



Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutz- massnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz

Autoren

Martina Alig, Ulrich Prechsl, Katharina Schwitter,
Tuija Waldvogel, Veronika Wolff, Anne Wunderlich, Alexander
Zorn, Gérard Gaillard

Partner

IP-SUISSE (Auftraggeber)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Impressum

Herausgeber:	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte:	Martina Alig martina.alig@agroscope.admin.ch
Fotos:	Gaby Brändle, Agroscope
Titelbild	Gaby Brändle, Agroscope
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright:	© Agroscope 2015
ISSN:	2296-729X
ISBN:	978-3-906804-15-6

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Résumé	9
Summary	13
Danksagung	17
1 Einleitung	19
1.1 Ausgangslage	19
1.2 Ziel der Studie	19
1.3 Projektorganisation	20
2 Auswahl der Massnahmen	21
2.1 Vorgehen zur Auswahl der Massnahmen	21
2.2 Ausgewählte Massnahmen	22
2.3 Nicht berücksichtigte Massnahmen	24
3 Methodik zur Bewertung der Massnahmen	26
3.1 Ermittlung der Treibhausgas-Reduktion	26
3.1.1 Die Methode Ökobilanz	26
3.1.2 SALCA	27
3.1.3 Systemgrenzen	27
3.1.4 Bezugseinheit	28
3.1.5 Untersuchte Wirkungskategorien	28
3.1.6 Berechnung der direkten Treibhausgasemissionen auf dem Betrieb	31
3.1.7 Inputgruppen	32
3.1.8 Auswertungskonzept	32
3.1.9 Modellbetriebe	33
3.2 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit	35
4 Bewertung Einzelmassnahmen	38
4.1 Bezug von Ökostrom	38
4.2 Verminderung des Treibstoffbedarfs	41
4.3 Optimale Maschinenauslastung	44
4.4 Installation von Sonnenkollektoren	48
4.5 Installation einer Photovoltaikanlage	51
4.6 Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien	55
4.7 Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen	57
4.8 Erhöhung der Anzahl Laktationen von Milchkühen	60
4.9 Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja	65
4.10 Abdeckung des Güllesilos	71
4.11 Stallmanagement: saubere Laufflächen	75
4.12 Phasenfütterung in der Schweinemast	77
4.13 Parzellen-spezifische Düngebilanz	80
4.14 Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes	83
4.15 Reduzierter Einsatz mineralischer Stickstoffdünger	87
4.16 Gülleausbringung mit Schleppschlauch	92
4.17 Ausbringung von Gärresten	94
4.18 Leguminosen als Gründüngung	98
4.19 Etablierung eines Agroforstsystems	101
4.20 Ausbringung von Pflanzenkohle	105

5	Vergleich und Rangierung der Massnahmen	109
5.1	Ökologische Analysen	109
5.2	Ökonomische Analysen.....	112
5.3	Synthese der ökologischen und ökonomischen Ergebnisse.....	113
6	Diskussion der Massnahmenrangierung	115
6.1	Energie	115
6.1.1	Energiemanagement	115
6.1.2	Bauliche Massnahmen	116
6.2	Reduktion des mineralischen Stickstoffdüngers	116
6.3	Erhöhung der Stickstoffeffizienz	117
6.4	Treibhausgasspeicher	118
6.4.1	Erhalt von Treibhausgasspeicher	118
6.4.2	Aufbau von Treibhausgasspeicher	119
6.5	Emissionen aus der Rindviehhaltung	119
6.6	Ökonomische Gesamtbetrachtung	120
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	121
8	Abkürzungen	123
9	Literatur	124
10	Anhang	131
10.1	Mitglieder des begleitenden Beirates.....	131
10.2	Vorauswahl der Massnahmen mit Benotungsschema	132
10.3	Ergänzende Informationen zu den analysierten Massnahmen	136
10.3.1	Optimale Auslastung der eigenen Maschinen / überbetriebliche Kooperation.....	136
10.3.2	Photovoltaik.....	136
10.3.3	Wärmerückgewinnung	139
10.3.4	Erhöhung Anzahl Laktationen.....	140
10.3.5	Milchproduktion Soja zert./ ohne Einsatz von Soja.....	142
10.3.6	Abdeckung Güllesilo.....	143
10.3.7	Phasenfütterung in der Schweinemast	144
10.3.8	Umbruchlose Neuansaat	145
10.3.9	Reduktion N-Dünger.....	146
10.3.10	Schleppschlauch	148
10.3.11	Ausbringung von Gärresten.....	149
10.3.12	Agroforst.....	149
10.4	Erzielte Treibhausgasreduktion pro Massnahme absolut und bezogen auf MJ verdauliche Energie	152
10.5	Gehalt an verdaulicher Energie (vE) der berücksichtigten landwirtschaftlichen Produkte	155

Zusammenfassung

Kontext und Zielsetzung

Die Landwirtschaft trägt mit einem Anteil von rund 10 % bedeutend zu den Treibhausgasemissionen der Schweiz bei. IP-SUISSE hat zum Ziel, eine umweltschonende und tiergerechte Landwirtschaft zu fördern und möchte deshalb ihr Punktesystem „Biodiversität und Ressourcenschutz“ um Massnahmen zur Reduktion der Klimabelastung ergänzen. Zur wissenschaftlichen Abstützung dieser Ergänzung ist IP-SUISSE eine Zusammenarbeit mit Agroscope eingegangen.

Die vorliegende Studie liefert die wissenschaftlichen Grundlagen zur Entwicklung eines Punktesystems Klimaschutz für IP-SUISSE-Betriebe. Dazu wurden a) vielversprechende Klimaschutzmassnahmen mit hohem Potenzial bezüglich Treibhausgasreduktion und guter Umsetzbarkeit ausgewählt und detailliert definiert, b) das Treibhausgas-Reduktionspotenzial aller ausgewählten Massnahmen inklusive möglicher Synergien und Zielkonflikten zu anderen Umweltwirkungen mittels einer Ökobilanz ermittelt sowie c) für einzelne Massnahmen deren Wirtschaftlichkeit abgeschätzt. Zentrale Prämisse war der Erhalt der produzierenden Landwirtschaft. Die Klimaschutzmassnahmen sollten die landwirtschaftliche Produktion eines Betriebs nicht einschränken, sondern seine Treibhausgas-effizienz verbessern.

Vorgehen und Methodik

In einem 2011 abgeschlossenen Vorprojekt waren bereits zahlreiche Massnahmen durch Experten-Workshops bewertet worden. Diese Massnahmenliste wurde durch eine Literaturrecherche ergänzt und anschliessend wurde anhand der Kriterien a) ausreichende Datenverfügbarkeit, b) ausreichender Detaillierungsgrad der vorhandenen Studien, c) Umsetzbarkeit unter Schweizer Verhältnissen und d) Repräsentativität für verschiedene Betriebszweige eine Vorauswahl an zu berechnenden Massnahmen getroffen. In einem zweiten Schritt wurden daraus basierend auf den Kriterien i) vermutetes Treibhausgas-Reduktionspotenzial, ii) geringe Unsicherheit der Wirkung und iii) Umsetzbarkeit schlussendlich 20 Massnahmen (siehe Tabelle 1) definiert, welche mittels einer Ökobilanz gemäss SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) analysiert wurden.

Systemgrenze der Ökobilanz war der landwirtschaftliche Betrieb bis ans Hoftor während eines Jahres. Entsprechend dem Ziel der Studie wurde als Bezugseinheit für die Umweltwirkungen die gesamtbetrieblich produzierte Menge an verdaulicher Energie (vE) verwendet, um die Treibhausgas-effizienz, d.h. Umweltwirkung pro produzierte vE, abzubilden. Die Wirkung einer Massnahme wurde für die vier Modellbetriebe Ackerbau, Verkehrsmilch, Anderes Rindvieh und Schweine ermittelt. Für die Massnahme „Wärmerückgewinnung“ wurde zudem mit dem Modellbetrieb Geflügel gerechnet. Die Massnahmen wurden für jeden Betriebstyp einzeln analysiert. Es wurden Bilanzen für die Referenz ohne und das Szenario mit Massnahme berechnet, aus deren Differenz die Wirkung abgeleitet wurde.

Die Wirtschaftlichkeit der Massnahmenumsetzung wurde für neun Massnahmen ermittelt. Zielgrösse war der CO₂-Reduktionsgewinn bzw. die CO₂-Reduktionskosten pro kg CO₂-Äquivalente. Um ein vollständiges Bild zu liefern, wurden ausserdem Angaben zu den Indikatoren Rentabilität, Investitionen, Arbeitsaufwand und Risiko gegeben.

Resultate und Diskussion

17 der 20 untersuchten Massnahmen führten zu einer Steigerung der Treibhausgas-effizienz und zeigen so das vorhandene Potenzial zu einer Reduktion der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen auf. Im Mittel der vier Modellbetriebe änderte sich der Treibhausgasausstoss zwischen -38 und +2 g CO₂-Äquivalente pro MJ vE (Abbildung 1), was -6,3 bis +0,6 % des gesamtbetrieblichen Ausstosses entspricht. Die Massnahmen im Energiebereich wiesen eine mittlere, mit relativ geringen Unsicherheiten behaftete Reduktionsleistung auf. Dazu gab es in diesem Bereich vergleichsweise geringe Zielkonflikte und beträchtliche Synergien mit anderen Umweltwirkungen, insbesondere mit dem Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien. Bei den Massnahmen in der Tierhaltung und dem Pflanzenbau waren grössere Unterschiede in der erzielten Treibhausgasreduktion feststellbar. Während die „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ und die

„Phasenfütterung“ im Tierbereich sowie die „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ im Pflanzenbau eine deutliche Steigerung der Treibhausgas-effizienz zur Folge hatten, führten einige Massnahmen aus dem Bereich „Erhöhung der Stickstoffeffizienz“ („Güllesiloabdeckung“, „Saubere Laufflächen“) zu einer Erhöhung des Treibhauspotenzials. Diese Massnahmen reduzierten primär die terrestrische Eutrophierung und die Versauerung, führten jedoch durch erhöhte Stickstoffgehalte im Hofdünger indirekt zu erhöhten Lachgasemissionen. Hier wäre es wichtig, die veränderten Stickstoffgehalte im Hofdünger in der gesamten Düngungsplanung zu berücksichtigen, um diese indirekten Effekte zu vermeiden. Mit einem besonders hohen Reduktionspotenzial verbunden waren Massnahmen zum Erhalt und Aufbau von Kohlenstoff- bzw. Stickstoffspeichern im Boden und Biomasse, wie „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“, „Agroforstsystem“ und „Pflanzenkohle“. Bei letzterer bestehen aber noch erhebliche Unsicherheiten in der Wirkungsabschätzung; weitere Forschung ist nötig. Dies gilt auch für die Massnahme „Gärreste“, wo noch erhebliche Unsicherheiten in der Abschätzung der Ausbringungsemissionen bestehen.

Massnahmen zur Reduktion des mineralischen Stickstoffdüngers waren insbesondere im Ackerbau sehr effektiv („Parzellen-spezifische Düngebilanz“). Für ein hohes Reduktionspotenzial dieser Massnahmen muss aber darauf geachtet werden, dass sich das Ertragsniveau nicht wesentlich verringert. Werden die Mineraldünger durch andere Düngemittel ersetzt, können diese die Wirkung der Massnahme stark beeinflussen: So führte die Massnahme „Leguminosen als Gründüngung“ zu einer Erhöhung des Treibhauspotenzials. Hier war die bestehende Fruchtfolge entscheidend: durch die Umwandlung vorhandener Zwischenfutterflächen zu Gründüngerflächen wurde die Grundfutterproduktion reduziert, was durch Zukauf kompensiert werden musste. Diese Ergebnisse unterstreichen die Wichtigkeit einer gesamtbetrieblichen Betrachtung der Massnahmen mitsamt Synergien und Zielkonflikten auf andere Umweltwirkungen neben dem Treibhauspotenzial.

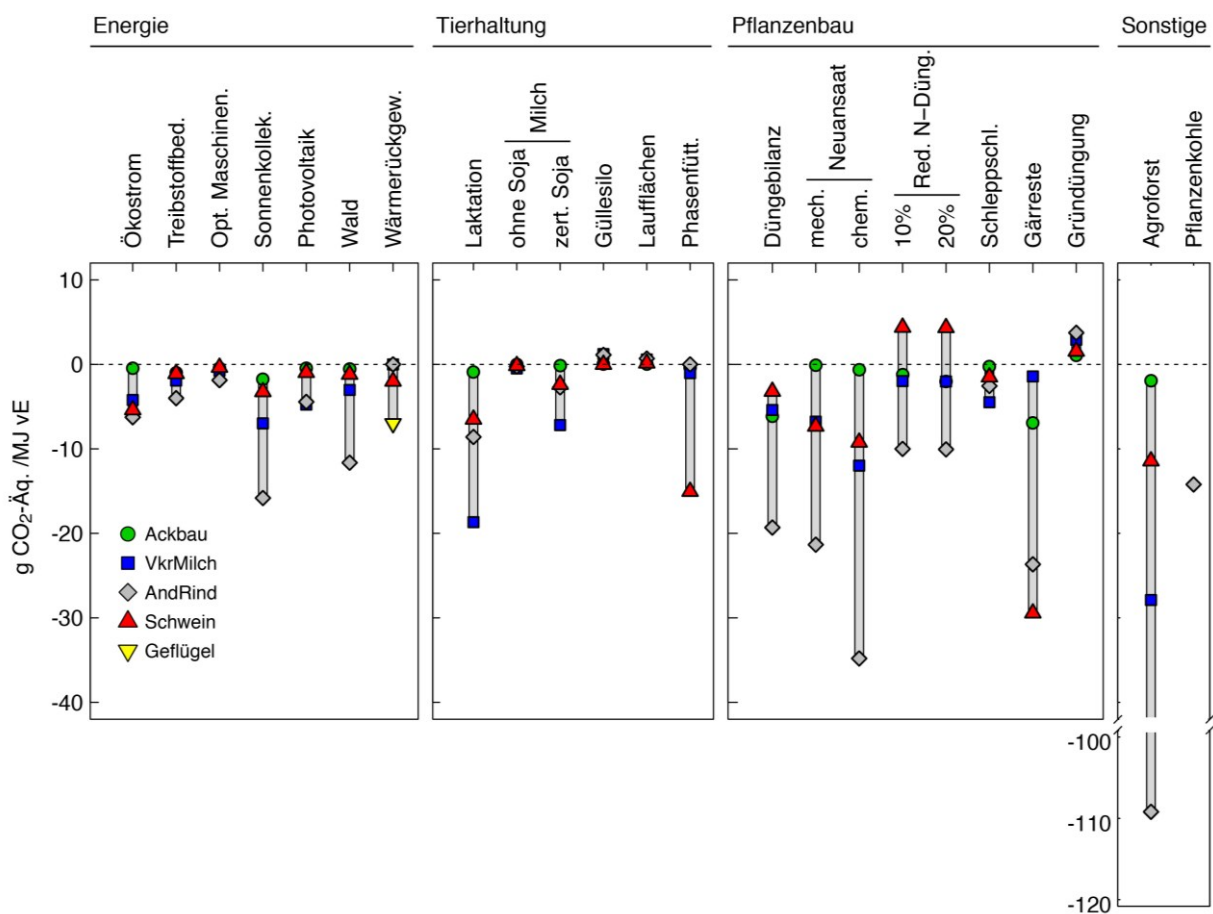


Abbildung 1: Übersicht über die erzielte Treibhausgasreduktion der 20 analysierten Massnahmen. Für die Massnahme „Wärmerückgewinnung“ wurde zusätzlich zu den vier ausgewählten Modellbetrieben der Modellbetrieb „Geflügel“ berücksichtigt.

Generell hing die Wirkung einer Massnahme stark von der Betriebsstruktur ab: Je nach Zusammensetzung der betriebsspezifischen Energieträger, der Anzahl Tiere oder der Fläche mit Ackerbau müssen unterschiedliche Massnahmen priorisiert werden.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse ergaben sich folgende Ergebnisse: Die „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ war nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich eine attraktive Massnahme in der Tierhaltung. Die „Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja“ kann nahezu kostenneutral umgesetzt werden. Im Pflanzenbau ging die „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“ mit möglichen Kostensenkungen einher. Ausserdem bietet eine bessere Maschinenauslastung Einsparpotenzial. Bei der Umsetzung der Massnahmen „Reduktion des mineralischen N-Düngers“, „Agroforstsystem“, „Wärmerückgewinnung“, „Photovoltaik“ sowie die „Güllesiloabdeckung“ wurden auf allen Modellbetrieben mittlere jährliche finanzielle Verluste erzielt.

Schlussfolgerungen

Aus ökologischer Sicht können 14 der 20 analysierten Massnahmen für ein Punktesystem Klimaschutz empfohlen werden (Tabelle 1). Von den Massnahmen, welche einer kombiniert ökologisch-ökonomischen Analyse unterzogen wurden, sind 4 von 9 untersuchten Massnahmen zu empfehlen.

Tabelle 1: Ergebnis der ökologischen und ökonomischen Bewertung für die 20 analysierten Massnahmen. Die Reduktionsleistung bezieht sich auf die Treibhausgasemissionen pro produzierte verdauliche Energie, d.h. die Treibhausgas-effizienz. Für die Massnahmen mit “-“ hat keine ökonomische Analyse stattgefunden.

	Massnahme	Resultat	Empfohlen für Punktesystem Klimaschutz	
			Ökologie	Ökonomie
Energie	Bezug von Ökostrom	Kleine bis mittlere Reduktionsleistung, geringe Unsicherheit. Keine Zielkonflikte.	Ja	-
	Verminderung des Treibstoffbedarfs			-
	Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien			-
	Optimale Maschinenauslastung	Kleine Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Keine Zielkonflikte.	Bedingt	Ja
	Installation von Sonnenkollektoren	Kleine bis mittlere Reduktionsleistung, geringe Unsicherheit. Schwache Zielkonflikte vorhanden.	Ja	-
	Installation einer Photovoltaikanlage			Nein
	Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen (Nachrüstung)			Nein
Tierhaltung	Erhöhung der Anzahl Laktationen von Milchkühen	Grosse Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Keine Zielkonflikte.	Ja	Ja
	Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja			Ja
	Abdeckung des Güllesilos	Keine Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Positive Wirkung auf terr. Eutrophierung und Versauerung.	Nein	Nein
	Stallmanagement: Saubere Laufflächen			-
	Phasenfütterung in der Schweinemast	Grosse Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Ev. Zielkonflikte vorhanden.	Ja	-

	Massnahme	Resultat	Empfohlen für Punktesystem Klimaschutz	
Pflanzenbau	Parzellen-spezifische Düngebilanz	Potenziell grosse Reduktionsleistung, wenn kein starker Ertragsrückgang. Mittlere Unsicherheit, Zielkonflikte bei starkem Ertragsrückgang.	Ja	-
	Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern			Nein
	Leguminosen als Gründüngung		Bedingt	-
	Ausbringung von Gärresten	Pot. grosse Reduktionsleistung, wenn Gärreste kostenlos übernommen werden können. Mittlere bis grosse Unsicherheit, Zielkonflikte zu Red. NH ₃ -Em. vorhanden.	Bedingt	-
	Gülleausbringung mit Schleppschlauch	Kleine Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Ev. Zielkonflikte zu aq. Eutrophierung.	Ja	-
	Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands	Grosse Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Geringe Zielkonflikte vorhanden.	Ja	Ja
Sonstige	Etablierung eines Agroforstsystems	Pot. grosse Reduktionsleistung, mittlere Unsicherheit. Zielkonflikte bei Ackerbau.	Ja	Nein
	Ausbringung von Pflanzenkohle	Pot. grosse Reduktionsleistung, grosse Unsicherheiten. Zielkonflikte unklar.	Nein	-

Résumé

Contexte et objectif

L'agriculture est responsable d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre en Suisse, ce qui est significatif. Le but d'IP-SUISSE étant de promouvoir une agriculture respectueuse des animaux et de l'environnement, elle souhaite compléter son système de points « Biodiversité et protection des ressources » par des mesures de réduction des impacts négatifs sur le climat. IP-SUISSE s'est donc engagée dans une collaboration avec Agroscope pour apporter une base scientifique à ce complément.

La présente étude fournit les bases scientifiques nécessaires au développement d'un système de points pour la protection du climat dans les exploitations IP-SUISSE. Pour ce faire : a) Des mesures prometteuses de protection du climat ont été sélectionnées et définies en détails. Elles offrent un gros potentiel en matière de réduction des gaz à effet de serre et sont aisées à mettre en pratique. b) Le potentiel de réduction des gaz à effet de serre de toutes les mesures sélectionnées, y compris les synergies potentielles et les conflits d'intérêts par rapport à d'autres impacts environnementaux, a été déterminé à l'aide d'une analyse du cycle de vie. c) Enfin, la rentabilité des différentes mesures a fait l'objet d'une estimation. La priorité absolue étant de préserver une agriculture productive, les mesures de protection du climat ne devraient pas restreindre la production agricole d'une exploitation, mais au contraire améliorer son efficacité rapportée aux gaz à effet de serre.

Procédure et méthode

Dans un projet préliminaire achevé en 2011, de nombreuses mesures avaient déjà été évaluées par des ateliers d'experts. Cette liste de mesures a été complétée par une recherche bibliographique. Ensuite, sur la base des critères suivants a) disponibilité suffisante des données, b) degré de détail suffisant des études disponibles, c) possibilité d'appliquer les mesures dans les conditions typiques de la Suisse et d) représentativité pour différentes branches de production, une présélection a été faite afin de ne conserver que les mesures à prendre en compte. Dans une deuxième phase, sur la base des critères ci-après i) potentiel supposé de réduction des gaz à effet de serre, ii) faible incertitude de l'impact et iii) possibilité de mise en œuvre, vingt mesures ont finalement été définies (cf. Tableau 1), et soumises à une analyse de cycle de vie selon SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment).

Dans l'analyse de cycle de vie, les limites du système incluent l'exploitation agricole jusqu'à ses portes pendant une année. Conformément à l'objectif de l'étude, la quantité d'énergie digestible (Ed) produite sur l'ensemble de l'exploitation a été choisie comme unité de référence pour les impacts environnementaux, afin de représenter l'efficacité rapportée aux gaz à effet de serre, c.-à-d. l'impact environnemental par énergie digestible produite. L'effet d'une mesure a été calculé pour les quatre exploitations pilotes grandes cultures, lait commercialisé, autre bétail bovin et porcs. Pour la mesure «récupération de chaleur», les calculs ont également été faits avec l'exploitation pilote volaille. Les mesures ont été analysées individuellement pour chaque type d'exploitation. Des analyses de cycle de vie ont été établies pour l'exploitation de référence sans mesures et pour le scénario avec mesures. La différence a permis de déduire l'effet obtenu.

La rentabilité de la mise en œuvre a été calculée pour neuf mesures. La grandeur cible était la réduction de CO₂ réalisée, soit les coûts de réduction du CO₂ par kg d'équivalents CO₂. Pour compléter, des informations ont également été fournies sur les indicateurs rentabilité, investissements, charge de travail et risque.

Résultats et discussion

Dix-sept des vingt mesures étudiées ont conduit à une augmentation de l'efficacité rapportée aux gaz à effet de serre et montrent donc qu'il existe un potentiel en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture. En moyenne des quatre exploitations pilotes, les émissions de gaz à effet de serre ont varié de -38 à +2 g d'équivalents CO₂ par MJ d'énergie digestible (Figure), ce qui correspond à un pourcentage compris entre -6,3 et +0,6 % des rejets de l'ensemble de l'exploitation. Les mesures dans le domaine énergétique indiquaient une réduction moyenne avec un taux d'incertitude relativement faible. Il faut ajouter que les conflits d'intérêts étaient relativement minimes et les synergies considérables avec d'autres

impacts environnementaux, notamment avec le besoin en énergies non-renouvelables. Les mesures prises dans la production animale et la production végétale ont donné des résultats plus différenciés en matière de réduction des gaz à effet de serre. Tandis que l'augmentation du nombre des lactations ainsi que l'affouragement en phases dans la branche animale et le réensemencement sans labour des prairies permanentes dans la branche végétale se sont traduits par une nette augmentation de l'efficacité rapportée aux gaz à effet de serre, certaines mesures prises pour «augmenter l'efficacité de l'azote» (couverture des containers à lisier, propreté des aires de circulation) ont conduit à une hausse du potentiel de réchauffement global. Dans un premier temps, ces mesures ont réduit l'eutrophisation terrestre et l'acidification, mais suite aux teneurs plus élevées des engrais de ferme en azote, elles ont causé indirectement une augmentation des émissions de protoxyde d'azote. A ce niveau, il serait important que le plan de fumure de l'ensemble de l'exploitation prenne en compte la variation de la teneur des engrais de ferme en azote afin d'éviter ces effets indirects. Les mesures prises pour préserver et mettre en place des réservoirs de carbone et d'azote dans le sol et la biomasse, comme le réensemencement sans labour des prairies permanentes, le système d'agroforesterie et le carbone végétal, affichaient un potentiel de réduction particulièrement élevé. Concernant la dernière mesure, l'estimation des effets fait encore l'objet d'incertitudes considérables; des recherches supplémentaires sont nécessaires. Cela est également vrai pour l'épandage des restes de fermentation', où il y a de grandes incertitudes sur l'estimation des pertes d'émission après l'application.

Les mesures prises pour réduire les engrais minéraux azotés ont été particulièrement efficaces dans les grandes cultures ('bilan de fumure spécifique aux parcelles'). Pour que ces mesures aient un potentiel de réduction élevé, il faut cependant veiller à ce que le niveau de rendement ne baisse pas démesurément. Lorsque les engrais minéraux sont remplacés par d'autres engrais, ces derniers peuvent influencer considérablement l'effet de la mesure: ainsi, la mesure «légumineuses utilisées comme engrais vert» a conduit à une augmentation du potentiel de réchauffement global. C'est l'assolement en place qui s'est avéré déterminant: la transformation de surfaces de cultures dérobées en surfaces d'engrais verts a entraîné une réduction de la production de fourrage de base, qui a dû être compensée par des achats de fourrage. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les mesures pour l'ensemble de l'exploitation avec les synergies et les conflits d'intérêts par rapport aux impacts environnementaux autres que le potentiel de réchauffement global.

En général, l'effet d'une mesure dépendait beaucoup de la structure de l'exploitation: suivant les sources d'énergie spécifiques de l'exploitation, le nombre d'animaux ou la surface de grandes cultures, la priorisation des mesures est différente.

L'analyse de rentabilité a donné les résultats suivants: dans la production animale, l'augmentation du nombre de lactations était une mesure attrayante non seulement sur le plan écologique, mais aussi sur le plan économique. La production laitière avec soja certifié/ sans soja pourrait être réalisée sans majoration de coût. Dans la production végétale, le réensemencement sans labour des prairies permanentes a ouvert des possibilités pour réduire les coûts. Par ailleurs, une utilisation optimale des machines permettrait d'économiser. La mise en œuvre des mesures de réduction des engrais minéraux azotés, d'un système d'agroforesterie, de récupération de chaleur, l'installation d'un dispositif photovoltaïque et de couverture des containers à lisier a entraîné des pertes financières moyennes annuelles dans toutes les exploitations pilotes.

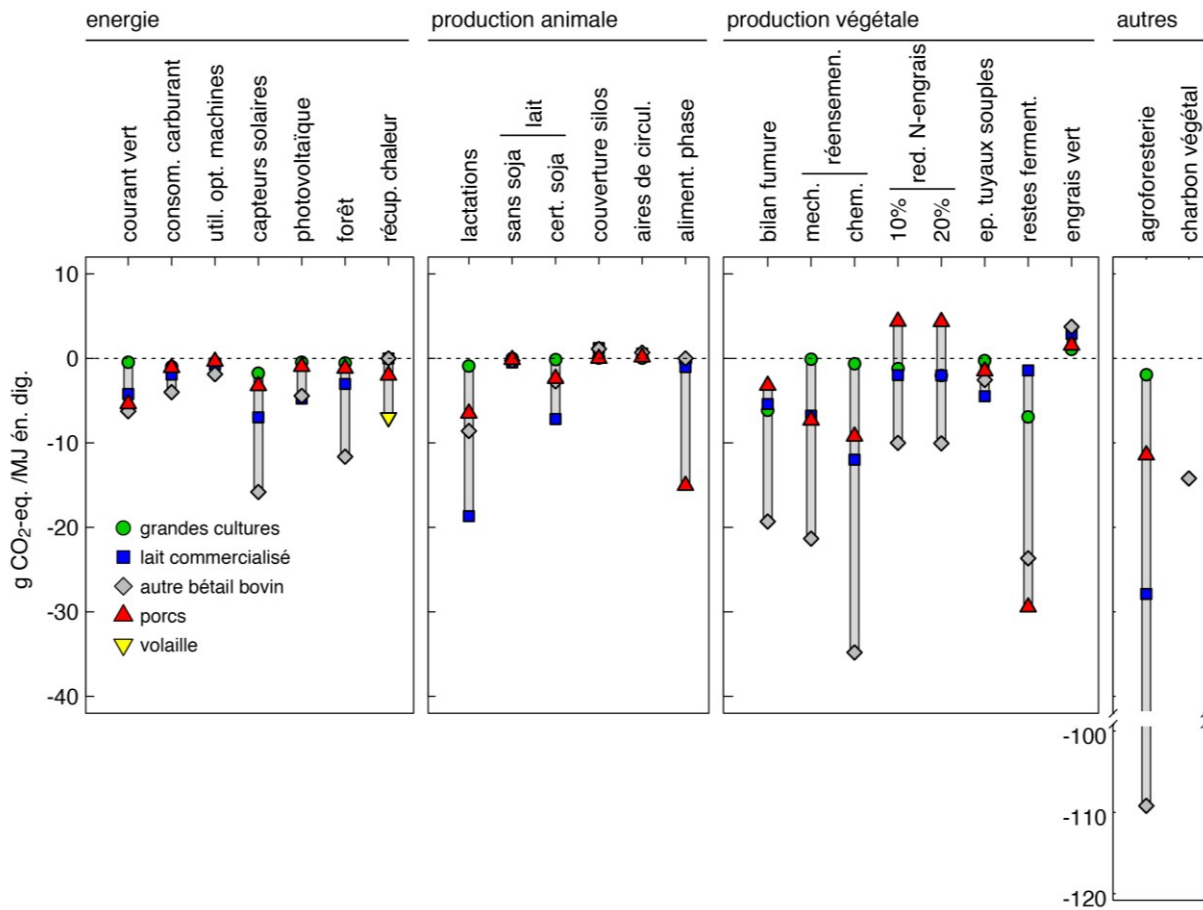


Figure 1: Vue d'ensemble de la réduction de gaz à effet de serre obtenue avec les vingt mesures analysées. Pour la mesure «récupération de chaleur», l'exploitation pilote «volaille» est venue compléter les quatre autres exploitations pilotes sélectionnées.

Conclusions

Du point de vue écologique, 14 des 20 mesures analysées peuvent être recommandées pour un système de points sur la protection du climat (Tablette 1). Parmi les mesures qui ont été soumises à une analyse à la fois écologique et économique, 4 des 9 mesures peuvent être conseillées.

Tableau 1: Résultats de l'évaluation écologique et économique des 20 mesures analysées. La réduction se réfère aux émissions de gaz à effet de serre par énergie digestible produite, c'est-à-dire à l'efficacité rapportée aux gaz à effet de serre. Pour les mesures signalées par «-», aucune analyse économique n'a eu lieu.

	Mesure	Résultat	Recommandé pour le système de points	
			Protection du climat	
			Ecologie	Economie
Energie	Utilisation de courant vert	Réduction faible à moyenne, incertitude minime. Aucun conflit d'intérêts.	Oui	-
	Réduction de la consommation de carburant			-
	Exploitation de la forêt pour la production d'énergie renouvelable			-
	Utilisation optimale des machines			Oui
	Installation de capteurs solaires			Oui

	Mesure	Résultat	Recommandé pour le système de points Protection du climat	
	Installation d'un dispositif photovoltaïque	d'intérêts.		Non
	Récupération de chaleur dans les étables chauffées			Non
Production animale	Augmentation du nombre de lactations des vaches laitières	Réduction importante, incertitude moyenne. Aucun conflit d'intérêts.	Oui	Oui
	Production laitière avec soja certifié/ sans soja			Oui
	Couverture des silos à lisier	Aucune réduction, incertitude moyenne. Effet positif sur l'eutrophisation terrestre et l'acidification.	Non	Non
	Gestion des étables: propreté des aires de circulation			-
	L'alimentation par phase pour l'engraissement de porcs	Réduction importante, incertitude moyenne. Conflits d'intérêts év.	Oui	-
Production végétale	Bilan de fumure spécifique aux parcelles	Réduction potentiellement importante en l'absence de fortes baisses des rendements. Incertitude moyenne, conflits d'intérêts en cas de fortes baisses des rendements.	Oui	-
	Réduction de l'emploi des engrais minéraux azotés			No
	Légumineuses comme engrais vert		Sous réserve	-
	Epandage des restes de fermentation	Réduction potentiellement importante, si les restes de fermentation peuvent être repris gratuitement. Incertitude moyenne à élevée, conflits d'intérêts liés à la réduction des émissions de NH ₃ .	Sous réserve	-
	Epandage du lisier avec des tuyaux souples	Faible réduction, incertitude moyenne. Conflits d'intérêts év. par rapport à l'eutrophisation aquatique.	Oui	-
	Réensemencement des prairies permanentes sans labour	Réduction importante, incertitude moyenne. Légers conflits d'intérêts.	Oui	Oui
Autres	Etablissement d'un système d'agroforesterie	Réduction potentiellement importante, incertitude moyenne. Conflits d'intérêts par rapport aux grandes cultures.	Oui	Non
	Epandage de charbon végétal	Réduction potentiellement importante, grande incertitude. Conflits d'intérêts incertains.	Non	-

Summary

Context and Objective

Accounting for around 10 %, agriculture contributes significantly to Switzerland's greenhouse-gas emissions. IP-SUISSE's aim is to promote an environmentally friendly and humane agricultural sector, and would therefore like to supplement its 'Biodiversity and Resource Protection' point system with measures for reducing climate impacts. For the scientific support of this extension, IP-SUISSE has entered into a cooperative venture with Agroscope.

The present study provides the scientific bases for developing a Climate Protection point system for IP-SUISSE farms. To this end, promising climate-protection measures with high greenhouse-gas-reduction potential and feasibility were selected and defined in detail. In addition, the greenhouse-gas-reduction potential of all selected measures, including potential synergies and trade-offs with other environmental impacts, were determined by means of a life-cycle assessment. The cost-effectiveness of the same individual measures was estimated. A key premise of the analysis in general was the preservation of the agricultural production sector. The aim of the climate-protection measures was not to limit the agricultural production of a farm, but to improve its greenhouse-gas efficiency.

Approach and Methodology

In a preliminary project concluded back 2011, numerous measures had already been evaluated in expert workshops. This list of measures was supplemented by a literature search, and a preliminary selection of measures to be analysed was then made on the basis of the following criteria: (a) sufficient data availability; (b) sufficient degree of detail of existing studies; (c) feasibility under Swiss conditions; and (d) representativeness for various branches of the farming sector. In a second step, twenty measures (see Table 1) based on (i) assumed greenhouse-gas-reduction potential, (ii) low uncertainty of the impact, and (iii) feasibility were ultimately defined and analysed via a life-cycle assessment (LCA) according to SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment).

The system boundary of the LCA was the farm to the farm gate, for one year. In accordance with the aim of the study, the quantity of digestible energy (dE) produced by the farm as a whole was used as a reference unit representing productivity, in order to illustrate greenhouse-gas efficiency, i.e. the environmental impact per produced dE. The impact of a measure was calculated for the four model farms 'field crops', 'commercial milk', 'other cattle' and 'pigs'. The measure 'heat recovery' was additionally calculated for the 'poultry' model farm. The measures were analysed individually for each farm type. LCA's were calculated for the reference and the scenario situations, i.e. without and with the measures, respectively.

The cost-effectiveness of implementation was calculated for nine measures. The target value was the CO₂ reduction costs per kg CO₂ equivalent reduced. In order to provide a complete picture, details on the indicators 'profitability', 'investments', 'work input' and 'risks' were also given.

Results and Discussion

Seventeen of the twenty methods investigated led to an increase in greenhouse-gas efficiency, thereby indicating the existing potential for reducing agricultural greenhouse-gas emissions. On average, the greenhouse-gas emissions for the four model farms changed between -38 und +2 g CO₂ equivalent per MJ dE (Figure), corresponding to between -6,3 % and +0,6 % of the overall emissions of the farms. The measures in the energy sector exhibited an average reduction performance with relatively low uncertainties. In addition, this sector had comparatively few trade-offs but considerable synergies with other environmental impacts, in particular with the demand for non-renewable energy sources. Greater differences in achieved greenhouse-gas reduction could be observed for measures in the animal husbandry and plant production sectors: Phase-feeding and an increase in the number of lactations (animal husbandry) and no-till reseeding of permanent grassland (plant production) resulted in a clear increase in greenhouse gas efficiency. In contrast, a number of measures from the 'increase in nitrogen efficiency' area (covering of slurry containers, clean flooring) led to an increase in global-warming potential. Whilst primarily reducing terrestrial eutrophication and

acidification, these measures nonetheless led indirectly to higher nitrous oxide emissions owing to the increased nitrogen content of farmyard manures. Here, in the overall planning of fertiliser application, it is important to bear in mind the changed nitrogen content of farmyard manures in order to avoid these indirect effects.

Measures to maintain and establish carbon or nitrogen stores in the soil and biomass, such as 'no-till reseeded permanent grassland', 'agroforestry system', and 'vegetable carbon', were associated with an especially high reduction potential. However, there are still considerable uncertainties in assessing the impact of the latter and further research is necessary. This is also true for the 'application of fermentation residues', where there are large uncertainties on the estimation of emission losses after application.

Measures for reducing mineral nitrogen fertiliser were highly effective, particularly in arable farming ('Plot-specific manure accounting'). In order for these measures to yield a high reduction potential, however, care must be taken not to reduce the yield level significantly. If mineral fertilisers are replaced by other fertilisers, the latter may strongly influence the measure's impact: thus, the measure 'legumes as a green manure crop' led to an increase in global-warming potential. Here, the existing crop rotation was crucial: the conversion of existing interim-fodder acreage to green-fertiliser acreage reduced staple-fodder production, which had to be offset by additional purchases. These results underscore the importance of viewing the measures for the farm as a whole, including synergies and trade-offs with other environmental impacts besides global-warming potential.

Generally speaking, the impact of a measure depended to a large extent on farm structure: depending on the composition of the farm-specific energy sources, the number of animals, or the area under field crops, different measures must be prioritised.

The profitability analysis yielded the following results: Increasing the number of lactations was a worthwhile animal-husbandry measure from an economic as well as an ecological perspective; feeding milk cows with certified soya/ without soya can be implemented virtually cost neutral. In plant production, no-till renewal of permanent grassland went hand-in-hand with possible reductions in costs. Also, the optimum machine utilisation offers savings potential. Implementing the measures 'reduction of mineral N fertiliser', 'agroforestry system', 'photovoltaic plant' and 'heat recovery' as well as the covering of slurry containers resulted in average annual financial losses on all model farms.

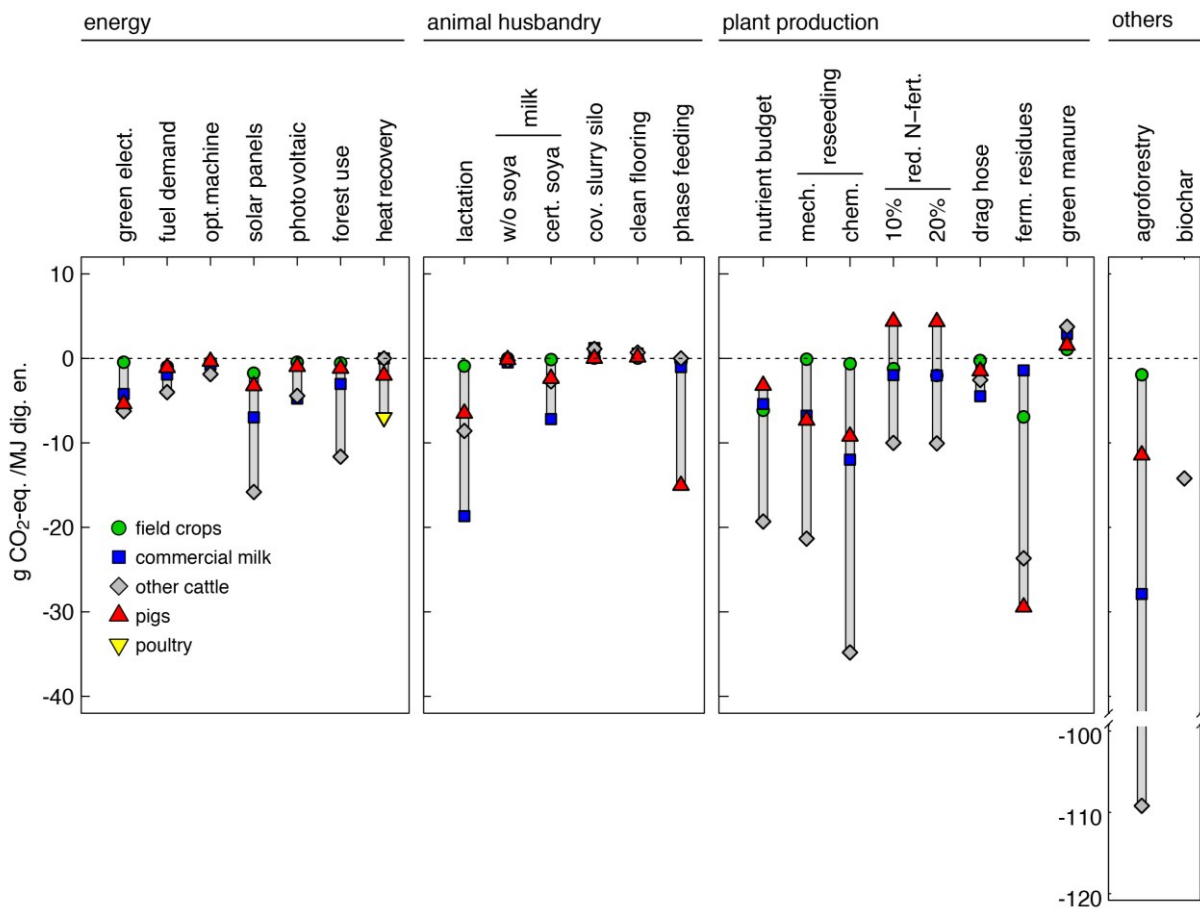


Figure 1: Overview of greenhouse-gas reduction achieved by the 20 analyzed measures. For the measure ‘heat recovery’, the ‘poultry’ model farm was taken into account in addition to the four selected model farms.

Conclusions

From an ecological perspective, fourteen of the twenty analysed measures can be recommended for a Climate Protection point system (Table 1). Of the measures subjected to a combined ecological/economic analysis, four of nine considered measures are to be recommended.

Table 1: Results of the ecological and economic evaluation for the 20 analyzed measures. The reduction performance refers to greenhouse-gas emissions per digestible energy produced, i.e. greenhouse-gas efficiency. No economic analysis took place for measures with ‘-’.

	Measure	Result	Recommended for ‘Climate Protection’ Point System	
			Ecology	Economic
Energy	Purchase of green electricity	Low-to-average reduction performance, low uncertainty, no trade-offs.	Yes	-
	Reduction in demand for fuel			-
	Forest management for generating renewable energy			-
	Optimum machine utilisation	Low reduction performance, average uncertainty. No trade-offs.	To an extent	Yes
	Installation of solar panels	Low-to-average reduction performance, low uncertainty. Weak trade-offs exist.	Yes	-
	Installation of a photovoltaic plant			No

	Measure	Result	Recommended for 'Climate Protection' Point System	
	Heat recovery in heated animal housing			No
Animal Husbandry	Increasing the number of lactations of dairy cows	High reduction performance, average uncertainty. No trade-offs.	Yes	Yes
	Milk production with certified soya/ without soya			Yes
	Covering of slurry silos	No reduction performance, average uncertainty. Positive impact on terrestrial eutrophication and acidification.	No	No
	Housing management: Clean flooring			-
	Phase feeding in pig fattening	High reduction performance, average uncertainty. Possible trade-offs exist.	Yes	-
Plant Production	Plot-specific manure accounting	Potentially high reduction performance if no significant decrease in yield. Average uncertainty; trade-offs where significant decreases in yield exist.	Yes	-
	Reduced use of mineral nitrogen fertilisers			No
	Legumes as a green manure crop		To an extent	-
	Application of fermentation residues	Potentially high reduction performance if fermentation residues can be applied free of charge. Average-to-high uncertainty; trade-offs exist with reduction of NH ₃ emissions.	To an extent	-
	Manure application with drag hose	Low reduction performance, average uncertainty. Possible trade-offs with aquatic eutrophication.	Yes	-
	No-till reseeded of permanent grassland	High reduction performance, average uncertainty. Slight trade-offs exist.	Yes	Yes
Other	Establishing an agroforestry system	Potentially high reduction performance, average uncertainty. Trade-offs with arable farming.	Yes	No
	Application of biochar	Potentially high reduction performance, high uncertainties. Trade-offs unclear.	No	-

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren möchten sich bei allen bedanken, die dieses Projekt mit ihrem Fachwissen, mit Daten und Modellabschätzungen unterstützt haben. Im Besonderen gilt unser Dank:

Peter Althaus von IP-SUISSE und den Mitgliedern der Projektoberleitung, Manfred Bötsch, Bernhard Kammer, Fritz Rothen und Michael Winzeler für die gewinnbringenden Diskussionen. Albert Zimmermann von der Forschungsgruppe Sozioökonomie (Agroscope) für die Aktualisierung der Daten der Modellbetriebe sowie die fachliche Unterstützung bei den diversen Anpassungen für die Modellierung. Allen anderen Kolleginnen und Kollegen von Agroscope, die uns bei der Modellierung der Massnahmen bereitwillig mit ihrem Expertenwissen unterstützt haben.

Den Mitgliedern der Begleitgruppe (die Namen sind im Anhang 10.1 aufgeführt) für die angeregten Diskussionen und die Inputs zu unserer Daten und Annahmen.

Allen weiteren Personen und Institutionen, die uns freundlicherweise Daten und ihr Expertenwissen zur Verfügung gestellt haben:

- Fredy Abächerli (Verora GmbH): Bereitstellung von Daten und Informationen zur Massnahme „Pflanzkohle“
- Micha Ackermann (H.U. Kohli AG): Informationen zu Gülletechnik und Behälterbau, Offerte zu Güllesiloabdeckung
- Thomas Anken (Agroscope): Angaben zum Maschinenpark auf Schweizer Betrieben
- Nicolas Berger (Swissherdbook): Zusammenstellung der Daten zur Milchleistung und Anzahl Laktationen bei Milchkühen
- Andreas Birrer (Krieger AG): Preisauskunft zu WRG-Anlagen
- Roman Bodner (Wiefferink): Angaben zu den Kosten einer Güllesiloabdeckung
- Chris Bosshard (Agroscope): Bereitstellung von Daten und fachlicher Input zur Massnahme „Düngeplan“.
- Jonas Bürgler (Elektrizitätswerk des Bezirks Schwyz AG)
- Matthias Burri (Basler&Hoffmann AG): Informationen zu Photovoltaikanlagen in der Landwirtschaft, Plausibilitätsprüfung der getroffenen Annahmen
- Dunja Dux (Agroscope): Angaben zu Güllesiloabdeckung und Photovoltaikanlagen
- René Flisch (Agroscope): Bereitstellung von Daten und fachlicher Input zur Massnahme „Düngeplan“
- Christian Gazzarin (Agroscope): Unterstützung bei Massnahmen bezüglich Milchkühen sowie Photovoltaik
- Andreas Gloor (Aviform): Informationen zu WRG-Anlagen und Stallgrössen im Geflügelbereich
- Felix Herzog (Agroscope): Hilfe bei der Ausgestaltung der Massnahme „Agroforstsystem“
- Olivier Huguenin (Agroscope): Fachlicher Input zur Berechnung der Ertragsreduktion im Grünland bei der Massnahme „Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern“
- Roman Hüppi (Agroscope): Fachlicher Input und kritisches Gegenlesen der Massnahme „Pflanzkohle“
- Urs Inauen (Inauen AG): Preisauskunft zu WRG-Anlagen
- Mareike Jäger (Agridea): Informationen zur Mulchung bei Grünflächen; Hilfe bei der Ausgestaltung der Massnahme „Agroforstsystem“
- Marco Landis (Agroscope): Fachlicher Input zum Thema Maschinenbestand in der Schweiz
- Jens Leifeld (Agroscope): Fachlicher Input und kritisches Gegenlesen der Massnahme „Pflanzkohle“
- Andreas Lüscher (Agroscope): Information zur Gründüngung und Stickstofffixierung von Leguminosen
- Stephan A. Mathez (Solar Campus GmbH): fachliche Inputs zur Massnahme „Sonnenkollektoren“
- Agnes Meyer Frund (Eidg. Dep. WBF): Preisüberwachung PUE, Auskunft zu Wasserpreisen
- Jochen Meyer (Agroscope): Fachlicher Input zur Gründüngung und Stickstoffverfügbarkeit
- Albrecht Neftel (Agroscope): Fachlicher Input zu Stickstoffkreislauf und -emissionen
- Josef Neiber (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft): Informationen zu Photovoltaikanlagen
- Thomas Nemecek (Agroscope): Fachliche Inputs und Kommentare zum Bericht

-
- Walter Richner (Agroscope): Bereitstellung der Ertragsfunktion von Ackerkulturen für die Massnahme „Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern“
 - Markus Sax (Agroscope): Angaben zu Photovoltaik im Landwirtschaftsbereich sowie Unterstützung bei der Massnahme „Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen“
 - Fredi Schori (Agroscope): Erstellung der soja-freien Ergänzungsfuttermischungen für die Massnahme „Milchproduktion mit zertifiziertem Soja / ohne Einsatz von Soja“
 - Sabine Schrade (Agroscope): fachliche Inputs zur Massnahme „Sauberhaltung der Laufflächen“
 - Markus Stalder (Fenaco): Preisauskunft zu zertifiziertem Soja
 - Patricia Steinmann (BLW): Informationen zu Agroforstsystemen und Direktzahlungen
 - Peter Stoll (Agroscope): Angepasste Rationen für die Phasenfütterung bei Schweinen
 - Ivo Strahm (BLW): Informationen zu den Ammoniakprojekten
 - Matthias Suter (Agroscope): Information zur Gründüngung und Stickstofffixierung von Leguminosen
 - Michael Zähler: fachliche Inputs zur Massnahme „Sonnenkollektoren“

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Landwirtschaft trägt mit einem Anteil von gut 10 % bedeutend zu den Treibhausgasemissionen (THGE) der Schweiz bei (BAFU 2015). Damit ist auch sie aufgerufen, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. In der Klimastrategie Landwirtschaft (BLW 2011) werden Ziele für den Klimaschutz in der Land- und Ernährungswirtschaft formuliert sowie mögliche Handlungsfelder aufgezeigt. Als Hauptziel formuliert die Klimastrategie Landwirtschaft: "Die Schweizer Landwirtschaft (...) nutzt die technischen, betrieblichen und organisatorischen Möglichkeiten zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen optimal und erreicht so eine Reduktion von mindestens einem Drittel bis 2050 im Vergleich zu 1990" (BLW 2011).

IP-SUISSE hat zum Ziel, eine umweltschonende und tiergerechte Landwirtschaft zu fördern (Statuten IP-SUISSE, Art. 2). 2008 hat IP-SUISSE das Punktesystem „Biodiversität und Ressourcenschutz“ eingeführt, wodurch die rund 10 000 IP-SUISSE Label-Produzenten ab 2011 verbindlich Massnahmen zur Förderung der Biodiversität sowie zum Schutz der natürlichen Ressourcen umsetzen mussten. Nun möchte IP-SUISSE zusätzlich Massnahmen zur Reduktion der Klimabelastung durch die landwirtschaftlichen Aktivitäten ihrer Mitglieder einführen. Durch das Punktesystem Klimaschutz sollen IP-SUISSE-Landwirte in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. Eine zentrale Prämisse dabei ist der Erhalt der produzierenden Landwirtschaft. Die Massnahmen zum Schutz des Klimas sollen die landwirtschaftliche Produktion eines Betriebs nicht einschränken. Für IP-SUISSE als privater Verein ist die Produktion von Nahrungsmitteln von zentraler Bedeutung. Ihr Spektrum an möglichen Massnahmen ist daher kleiner als das Spektrum der öffentlichen Hand, welche Massnahmen auch über die Instrumente der Agrarpolitik abgelten kann.

Für IP-SUISSE ist eine wissenschaftliche Abstützung der geplanten Aktivitäten im Klimabereich wichtig. Daher ist sie für dieses Thema eine wissenschaftliche Zusammenarbeit mit Agroscope eingegangen. Obwohl in der Literatur viele Klimamassnahmen im Einzelnen besprochen und teilweise auch bezüglich ihrer Klimawirkung analysiert worden sind, wurde bislang noch kein auf Schweizer Verhältnisse angepasstes Gesamtkonzept veröffentlicht, welches Massnahmen zur Reduktion der Klimawirkung landwirtschaftlicher Aktivitäten auf betrieblicher Ebene in einem kohärenten und konsistenten Kontext evaluiert und untereinander vergleicht. Ebenso müssen für ein umsetzbares System Machbarkeits- und Effizienzkriterien berücksichtigt werden. Agroscope hat hier einen eindeutigen Forschungsbedarf erkannt und unterstützt deshalb IP-SUISSE in ihren Anstrengungen, eine wissenschaftliche Basis für dieses Thema zu erarbeiten.

1.2 Ziel der Studie

Die vorliegende Studie soll die wissenschaftlichen Grundlagen zur Entwicklung eines Punktesystems Klimaschutz, angepasst auf Schweizer Landwirtschaftsbetriebe, erarbeiten. 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 Zielkonflikten zu anderen Umweltwirkungen mittels der Berechnung einer Ökobilanz ermittelt
- c. Für eine Unterauswahl von Massnahmen deren Wirtschaftlichkeit abgeschätzt.

Die Resultate aus oben genannten Analysen bilden die wissenschaftlichen Grundlagen, anhand derer IP-SUISSE in der Folge ein Punktesystem Klimaschutz entwickeln kann.

1.3 Projektorganisation

Das Projekt wurde gemeinsam von Agroscope und IP-SUISSE durchgeführt. Im Projektteam beteiligt waren die Forschungsgruppen Ökobilanz und Betriebswirtschaft des Instituts für Nachhaltigkeitswissenschaften von Agroscope sowie ein Vertreter des Auftraggebers IP-SUISSE. Die strategische Leitung hatte die Projektoberleitung (POL) mit je einem Vertreter von Agroscope, Migros-Genossenschaftsbund (MGB) und IP-SUISSE inne. Begleitet wurde das Projekt von einem Beirat, bestehend aus Vertretern der Behörden, Privatwirtschaft sowie von Nichtregierungsorganisationen (siehe Anhang 10.1).

2 Auswahl der Massnahmen

2.1 Vorgehen zur Auswahl der Massnahmen

In den letzten Jahren wurden zahlreiche landwirtschaftliche Klimaschutzmassnahmen in der Literatur beschrieben und diskutiert (AgriClimateChange 2012; AgroCO2ncept 2014; Bischofberger *et al.* 2011; Dalgaard *et al.* 2011; De Boer *et al.* 2011; FAO 2013; Goglio *et al.* 2014; IPCC 2006; Johnson *et al.* 2007; Osterburg *et al.* 2013; Smith *et al.* 2008; Wiedemar und Felder 2011). Der Detaillierungsgrad und die Dokumentation dieser Veröffentlichungen sind recht heterogen und es sind zahlreiche qualitative Bewertungen bzw. Einschätzungen vertreten.

In einem **Vorprojekt** für das „Punktesystem Klimaschutz“ wurden bereits Massnahmen zur Treibhausgasreduktion in der Landwirtschaft zusammengetragen, diskutiert und anhand von Expertenworkshops bewertet. Die Ergebnisse dieses Vorprojekts mit den Bewertungen der einzelnen Reduktionsmassnahmen sind in dem Bericht von Mieleitner *et al.* (2011; Qualitative Evaluation von Massnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen (THGE) von Landwirtschaftsbetrieben) festgehalten. Innerhalb dieser ersten *qualitativen* Bewertung wurden allerdings die einzelnen Themenbereiche (Energie, Tierhaltung, Pflanzenbau, Sonstige) nicht in Relation zueinander bewertet, was für eine *quantitative* Bewertung, einem Ziel der vorliegenden Studie, notwendig war.

Basierend auf der ersten *qualitativen* Bewertung (Mieleitner *et al.* 2011) wurden die ausgewählten Massnahmen durch aktuellste Forschungsergebnisse (u.a. Dalgaard *et al.* 2011; Osterburg *et al.* 2013)) aktualisiert, um die Art und Menge des THG-Reduktionspotenzials abzuschätzen.

Dabei existierte ein Ausschlusskriterium, aufgrund dessen gewisse Massnahmen nicht in die Wahl mit einbezogen wurden: Wie bereits erwähnt ist für IP-SUISSE als privater, landwirtschaftlicher Verband die Produktion von Nahrungsmitteln bzw. die Produktivität von zentraler Bedeutung. Massnahmen, die zu einer Extensivierung oder signifikanten Reduktion der Produktion führen, wie z.B. „Wiedervernässung von Mooren und staunassen Standorten“, deren THG-Reduktionspotenzial als sehr hoch einzustufen ist, standen somit in einem Zielkonflikt zu den Grundsätzen von IP-SUISSE und schieden aus (Osterburg *et al.* 2013). Am Beispiel dieses Zielkonfliktes werden auch der Unterschied und die Möglichkeiten zwischen privaten und staatlichen Klimaschutzinitiativen deutlich: Massnahmen, die eine Änderung der landwirtschaftlichen Struktur forcieren und einen grundlegenden Produktions- und Konsumwandel anstreben, müssen oder können nur von staatlicher Seite unterstützt und umgesetzt werden.

Anhand folgender Kriterien fand eine **Vorauswahl** statt:

1. eine ausreichende Datenverfügbarkeit (empirische Daten) sowie
2. ein gewisser Detaillierungsgrad der Studien musste gewährleistet sein (eine konkrete Massnahme).
3. Die Massnahmen sollten für möglichst viele Schweizer Betriebe umsetzbar sein und
4. die verschiedenen Betriebszweige / -typen abdecken (Ackerbau, Futterbau, Milchvieh, Schweine).

Zusätzlich wurde nach jüngsten, noch nicht berücksichtigten Massnahmen recherchiert und die Vorauswahl mit diesen ergänzt. Dies führte zu einer Liste von 42 Massnahmen. Aus dieser Liste fand die **definitive Auswahl** von 20 Massnahmen für die Analyse mittels Ökobilanz statt. Diese definitive Auswahl fand anhand dreier Bewertungsfaktoren statt, welche die wichtigsten Ziele und Prioritäten des Projektes widerspiegeln:

- a) erwartetes THG-Reduktionspotenzial,
- b) geringe Unsicherheit in der Wirksamkeit,
- c) Umsetzbarkeit für die Landwirte.

Da das Projekt eine möglichst hohe THG-Reduktion anstrebt, wurden selbstverständlich bei Faktor a) Massnahmen mit einem relativ hohen Reduktionspotenzial priorisiert. Allerdings sind Massnahmen mit einem theoretisch grossen Reduktionspotenzial oft mit grossen Unsicherheiten (aufgrund der Komplexität) in der Prognose verbunden (vor allem biologische Prozesse). Diese Unsicherheit wurde in Faktor b) berücksichtigt. Da für die erfolgreiche Umsetzung des Punktesystems die Praktikabilität und Umsetzbarkeit von zentraler Bedeutung sind, wurden diese unter Rücksprache mit Landwirten bewertet und im Bewertungsschema berücksichtigt (Faktor c).

Alle Faktoren wurden qualitativ (aufgrund der berücksichtigten Studien) mit Noten zwischen Minimum 0 und Maximum 5 Punkten benotet, anschliessend (ohne Gewichtung) multipliziert, um eine zusammenfassende Bewertungszahl zu erhalten, die einen direkten Vergleich zwischen den Massnahmen erlaubt. Die benoteten Massnahmen wurden in die folgenden Themenbereiche gruppiert: Energie, Tierhaltung, Pflanzen-/Futterbau, Sonstiges (siehe Anhang Abbildung 49). Da aus jedem Themenbereich Massnahmen untersucht werden sollten, wurden pro Themenbereich je die zwei Massnahmen mit der höchsten Bewertungszahl ausgewählt. Zusätzlich wurden alle weiteren Massnahmen mit einer überdurchschnittlichen Bewertungszahl ausgewählt. Dieses Bewertungs-, bzw. Auswahl-schema führte zu einer ausgeglichenen Vertretung der unterschiedlichen Betriebszweige (Ackerbau, Futterbau, Rinderhaltung, Schweinehaltung). Die durch das Bewertungsschema identifizierten 20 Massnahmen wurden abschliessend noch den beiden Gremien Projektoberleitung und Beirat zur kritischen Begutachtung vorgelegt (siehe Kapitel 1.3 und Anhang Abbildung 49).

Die Auswahl der Massnahmen, deren Wirtschaftlichkeit näher zu untersuchen war, orientierte sich ebenfalls daran, möglichst alle Themenbereiche sowie die verschiedenen Kategorien (Energie, Maschine, Holz, Stall, Tier, Düngung, Fruchtfolge, Boden), welchen die Massnahmen zugeordnet sind, abzudecken. Neben diesen Prämissen wurden noch die aus der Benotung resultierende Rangfolge der Massnahme berücksichtigt. Das Projektteam machte auf dieser Basis einen Vorschlag über die wirtschaftlich zu untersuchenden Massnahmen, der mit der Projektoberleitung zunächst diskutiert wurde. Auf dieser Basis wählte schliesslich die Projektoberleitung die neun Massnahmen aus, die ökonomisch untersucht wurden. Diese Auswahl wurde anschliessend im Projekt-Beirat vorgestellt, diskutiert und bestätigt.

2.2 Ausgewählte Massnahmen

Aus dem Auswahlverfahren resultieren 20 Massnahmen, welche in dieser Studie detailliert analysiert wurden (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Übersicht über die ausgewählten Massnahmen für die detailliertere Analyse

	Massnahme	Kurzname	Erwarteter Haupteffekt auf folgendes THG			
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NH ₃
Energie	Bezug von Ökostrom	Ökostrom	X			
	Verminderung des Treibstoffbedarfs	Treibstoffbedarf	X			
	Optimale Maschinenauslastung	Maschinenauslastung	X			
	Installation von Sonnenkollektoren	Sonnkollektoren	X			
	Installation einer Photovoltaikanlage	Photovoltaikanlage	X			
	Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien	Waldbewirtschaftung	X			
	Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen	Wärmerückgewinnung	X			
Tierhaltung	Erhöhung der Anzahl Laktationen von Milchkühen	Erhöhung der Anzahl Laktationen		X		
	Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja	Milch mit zert. / ohne Soja	X		X	
	Abdeckung des Güllesilos	Güllesiloabdeckung.			X	X
	Stallmanagement: Saubere Laufflächen	Saubere Laufflächen			X	X
	Phasenfütterung in der Schweinemast	Phasenfütterung			X	X
Pflanzenbau	Parzellen-spezifische Düngebilanz	Parzellen-spezifische Düngebilanz	X		X	
	Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands	Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands			X	
	Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern	Reduktion des mineralischen N-Düngers	X		X	
	Gülleausbringung mit Schleppschlauch	Schleppschlauch			X	X
	Ausbringung von Gärresten	Gärreste	X	X	X	
	Leguminosen als Gründüngung	Gründüngung	X		X	
Sonstige	Etablierung eines Agroforstsystems	Agroforstsystem	X			
	Ausbringung von Pflanzenkohle	Pflanzenkohle	X			

2.3 Nicht berücksichtigte Massnahmen

Massnahmen, welche nicht ausgewählt wurden, entsprechen weniger den Ansprüchen den Projektzielen, die in den Bewertungsfaktoren zur Geltung kamen (THG-Reduktionspotenzial, geringe Unsicherheit in der Wirksamkeit, Umsetzbarkeit). Neben dem Kriterium des Zielkonfliktes mit der Produktivität, das in Kapitel 2.1 bereits diskutiert wurde, war die Unsicherheit in der Wirksamkeit ein weiteres Kriterium, das häufig zu einem Ausscheiden von Massnahmen führte.

Als Beispiel sei hier die Massnahme „Direktsaat“ erwähnt, die in den vergangenen Jahren als Klimaschutzmassnahme vermehrt diskutiert und oft als sehr wirksame Massnahme propagiert wurde (IPCC 2006; Khaledian *et al.* 2012). Die Wirkungsweise dieser Massnahme zielt darauf ab, den Kohlenstoffgehalt der Ackerböden zu erhöhen und somit eine Kohlenstoffsенке zu erwirken. Allerdings zeigten einige Studien, dass eine zusätzliche Kohlenstofffestlegung durch Direktsaat in Ackerböden der gemässigten Breiten nicht vorhanden war (Baker *et al.* 2007; Dimassi *et al.* 2014; Hermle *et al.* 2008; Luo *et al.* 2010; Müller *et al.* 2007; Powelson und Jenkinson 1981). Diese entgegengesetzten Ergebnisse zur Wirkung von Direktsaat auf die Kohlenstofffestlegung im Boden bedeutete für die Benotung der Massnahme eine sehr geringe Punktezah für den Bewertungsfaktor „Unsicherheit in der Wirksamkeit“ und somit auch eine geringe Gesamtbenotung. Aus denselben Gründen wurde generell die Kohlenstofffestlegung (carbon sequestration) in den vorliegenden Analysen nicht berücksichtigt.

Mit einer ebenso hohen Unsicherheit sind Massnahmen zur Reduktion der enterischen Methanemissionen von Milchkühen verbunden. Hier wird besonders der Einfluss des Futters, wie z.B. der Einsatz von Futterzusatzstoffen, auf die Methanemissionen diskutiert. Die Wirkungsweisen dieser Massnahmen sind allerdings noch nicht eindeutig geklärt (Flachowsky und Brade 2007; Flachowsky und Lebzien 2009; Osterburg *et al.* 2013). Ein weiteres Beispiel für eine oft empfohlene Massnahme, die innerhalb dieses Projektes nicht berücksichtigt wurde, ist die energetische Nutzung von organischem Material durch Biogasanlagen auf dem Landwirtschaftsbetrieb selbst. Auch wenn diese Massnahme laut Abschätzung anderer Studien ein relativ hohes THG-Reduktionspotenzial und eine geringe Unsicherheit aufweist, so wurde die Umsetzbarkeit mangels finanzieller Anreize und Verfügbarkeit von Ko-Substraten für dieses Projekt als gering bewertet (KLIK).

Ein weiteres häufiges Argument für das Ausscheiden war die Umsetzbarkeit. Unter in diesem Bewertungsfaktor waren beispielsweise zu hohe Investitionskosten (z.B. die Kühlung von Gülle), eine geringe Praktikabilität (z.B. kurze Hofdüngerlagerung) bzw. noch keine vorhanden Praxiserfahrung (z.B. Futter-, und Gülleadditive) enthalten.

Aufgrund der oben erläuterten Gründe schieden folgende Massnahmen aus der Vorauswahl für eine detaillierte Analyse aus:

Tabelle 3: Massnahmen die in der Vorauswahl enthalten waren, aber nicht weiter analysiert wurden

	Massnahme	Hauptargument für ein niedrige Bewertung
Energie	Wärmepumpen	Umsetzbarkeit (Hohe Investitionskosten, Probleme mit Staub)
	Biogas	Umsetzbarkeit (Ko-Substrate notwendig)
Tierhaltung	Abschaffung von Festmist-Systemen (Stall)	Umsetzbarkeit (Hohe Investitionskosten)
	Geschlossene Mistlager	Umsetzbarkeit (Baulich schwer realisierbar)
	kurze Hofdüngerlagerung	Umsetzbarkeit
	Futteradditive (Fettzugabe)	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Begrenzung der verschmutzbaren Fläche	Umsetzbarkeit (Konflikt zum Tierwohl)
	Gülleadditive	Umsetzbarkeit (noch keine Praxiserfahrung bzw. marktfähige Produkte)
	Kühlung der Gülle	Umsetzbarkeit (Hohe Investitionskosten)
	Höherer Weideanteil	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Reduktion Kraftfutter	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Ersatz von belüfteten Heu durch Grassilage	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Eingrasen	Unsicherheit in der Wirksamkeit
Pflanzenbau	spezielle Fruchtfolge (z.B. Legumin. erhöhen; Mais red.)	Zielkonflikt mit Produktion
	Untersaat	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Direktsaat	Unsicherheit in der Wirksamkeit
Sonstige	Reduzierte Kalkung	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Reduzierte Bodenbearbeitung	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Extensivierung von Mooren und staunassen Standorten	Zielkonflikt mit Produktivität
	Kompostierung	Unsicherheit in der Wirksamkeit
	Verringerte Transporte: Betriebseigenes Futter, einheimisches Futter und organische Dünger	Umsetzbarkeit

3 Methodik zur Bewertung der Massnahmen

3.1 Ermittlung der Treibhausgas-Reduktion

Zur Ermittlung des THG-Reduktionspotenzials der einzelnen Massnahmen wurde eine gesamtbetriebliche Ökobilanz gemäss SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment, (Gaillard und Nemecek 2009) durchgeführt. Die Methode Ökobilanz wurde gewählt, um eine eventuelle Verschiebung der Treibhausgasemissionen (THGE), z.B. in die vor- oder nachgelagerte Prozesse, erfassen zu können. Zudem können so eventuelle Synergien und Trade-offs zu anderen Umweltwirkungen, etwa im Bereich Nährstoffanreicherung oder Schadwirkung auf Bodenorganismen, erkannt werden.

3.1.1 Die Methode Ökobilanz

Die Ökobilanzierung ist eine Methode der Umweltbewertung, welche für Entscheidungsträger entwickelt wurde (ISO 2006a, 2006d). Die Ökobilanz wird auch als Lebenszyklusanalyse oder Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet. Dies deshalb, weil ein Betrieb über seinen ganzen Lebensweg betrachtet wird, inklusive der Prozesse in den vorgelagerten Stufen. Dabei erfasst, quantifiziert und bewertet die Ökobilanz alle Ressourcen und Emissionen, die für die Umweltwirkungen des betrachteten Betriebs eine Rolle spielen, angefangen bei der Förderung der Rohstoffe über die Herstellung und Nutzung von Produktionsmitteln bis zur Entsorgung oder Wiederverwertung der Abfälle.

Die Ökobilanz beschreibt damit neben den direkten auch die indirekten Umweltwirkungen, die mit den betrachteten landwirtschaftlichen Aktivitäten verbunden sind. Neben der Produktion auf dem Betrieb werden auch die ausserbetrieblich entstehenden Umweltwirkungen durch den Import von Produktionsmitteln wie etwa Treibstoff oder Futtermittel berücksichtigt.

Gemäss ISO 14040 (ISO 2006a) umfasst die Ökobilanzmethode vier Phasen (Abbildung 2):

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens:
Durch die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden die Grundzüge der Studie bestimmt. Dazu gehören die Bezugsgrössen (funktionelle Einheiten), die Systemgrenzen, der Datenbedarf und die Auswahl der Wirkungskategorien.
2. Sachbilanz:
Diese Phase beinhaltet die Erhebung und Quantifizierung der Daten. In der Sachbilanz werden die Inputs und Outputs des Produktionssystems entlang des Lebenswegs quantifiziert. Dabei werden Produktionsdaten (z. B. Saatgut, Maschinen, Strom, Ernteprodukte, Milch, etc.) mit Emissionsmodellen sowie Ökoinventaren aus Datenbanken verknüpft. Daraus resultieren der Ressourcenbedarf und die Emissionen pro funktionelle Einheit.
3. Wirkungsabschätzung:
Die Ergebnisse der Sachbilanz werden zu Umweltwirkungen zusammengefasst, welche die wesentlichen ökologischen Probleme der heutigen Gesellschaft abdecken. Die Wirkungsabschätzung beurteilt die potenziellen Umweltwirkungen, welche sich aus den in der Sachbilanz ermittelten Energie- und Stoffflüsse (Ressourcen und Emissionen) ergeben. Flüsse mit ähnlichen Auswirkungen auf die Umwelt werden zu Gruppen, so genannten Wirkungskategorien, zusammengefasst (z. B. Treibhauspotenzial, Eutrophierung oder Ökotoxizität). Damit werden die Informationen verdichtet und eine Interpretation ermöglicht.
4. Auswertung:
In der letzten Phase der Ökobilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung interpretiert und daraus Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

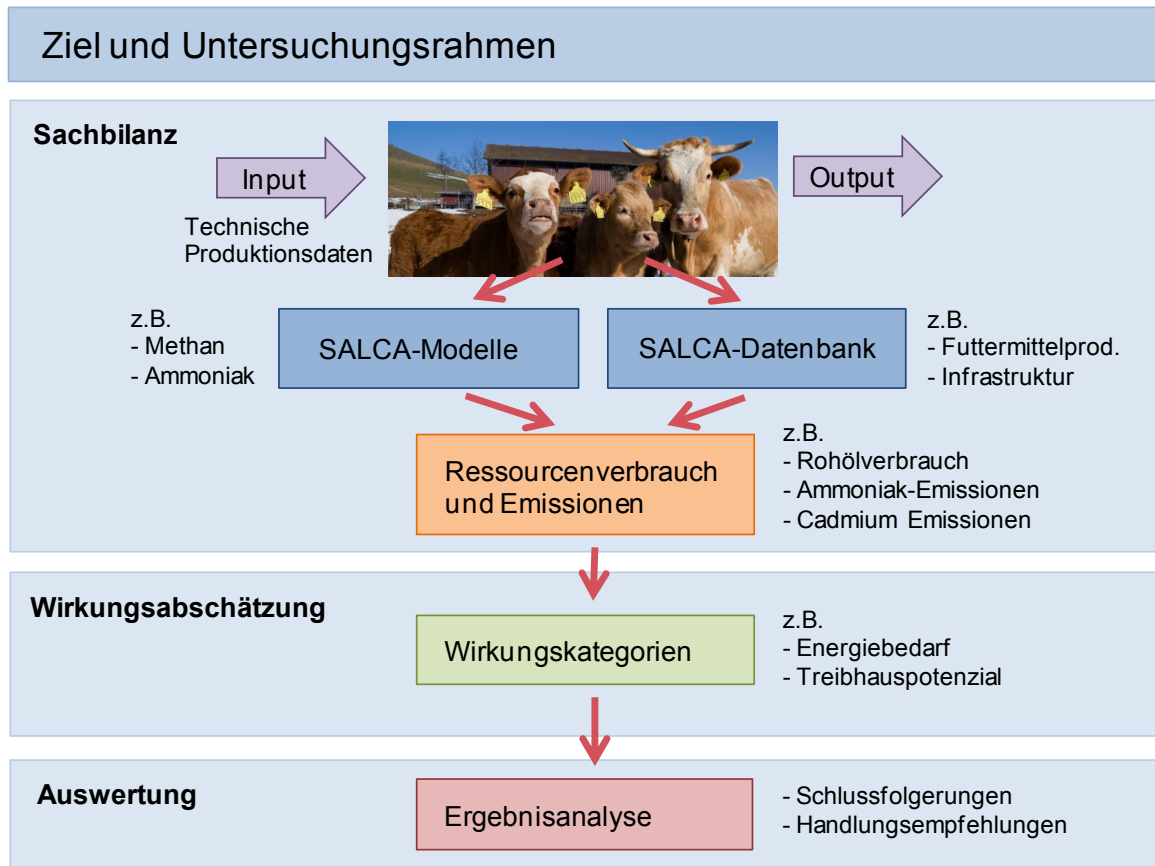


Abbildung 2: Die vier Phasen der Ökobilanzierung (Quelle: Hersener et al., 2011).

3.1.2 SALCA

In dieser Studie wurde die Ökobilanzmethode SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment (Gaillard und Nemecek 2009) verwendet. SALCA ist eine integrierte Ökobilanz-Methodik für die Land- und Ernährungswirtschaft bestehend aus:

- Einer Ökoinventar-Datenbank für die Landwirtschaft
- Modellen zur Berechnung der direkten Feld- und Hofemissionen
- Einer Auswahl von Methoden für die Wirkungsabschätzung
- Eigens entwickelten Methoden für die Wirkungsabschätzungen Biodiversität und Bodenqualität¹
- Berechnungswerkzeugen für landwirtschaftliche Systeme (Betrieb und Kultur)
- Einem Auswertungskonzept unter Berücksichtigung der Multifunktionalität der Landwirtschaft und
- Einem Kommunikationskonzept für die Ergebnisse.

3.1.3 Systemgrenzen

Für die Berechnung der Ökobilanz wurde der gesamte landwirtschaftliche Betrieb mit seiner Produktion bis ans Hoftor angeschaut. Dabei wurden auch alle Prozesse in den vorgelagerten Stufen berücksichtigt. Die dazu nötigen Inventare wurden der SALCA-Datenbank (Nemecek *et al.*, 2010) sowie der Datenbank ecoinvent V2.2 (ecoinvent Centre, 2010) entnommen. Zur landwirtschaftlichen Produktion gehört die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche einschliesslich der benötigten Maschinen und der Infrastruktur. Bilanziert wurden sämtliche auf dem Betrieb durchgeführten landwirtschaftlichen

¹ in dieser Studie nicht eingesetzt, da in den verwendeten Modellbetrieben die Grundlagendaten für diese Methoden nicht zur Verfügung standen

Tätigkeiten sowie die eingesetzten Produktionsmittel (z. B. Diesel, Mineraldünger, Pestizide). Der Zeitrahmen der Bilanz erstreckte sich über ein Kalenderjahr (1. Januar bis 31. Dezember). Pflanzliche Kulturen wurden jeweils vom Erntedatum der Vorkultur bis zum Erntedatum der analysierten Kultur betrachtet. Eine mögliche Änderung des Kohlenstoffvorrats im Boden wurde in den Analysen nicht berücksichtigt (siehe auch Kapitel 2.3).

3.1.4 Bezugseinheit

Die Funktion der Bezugseinheit liegt in der Ermöglichung des Vergleichs der Massnahmen auch auf unterschiedlich grossen Betrieben. In einer Ökobilanz beruht die Wahl der funktionellen Einheit auf den Zielen der vorgesehenen Studie. IP-SUISSE möchte mit dem Punktesystem Klimaschutz die Treibhausgas-effizienz (THG-Effizienz) seiner Betriebe verbessern, das heisst eine möglichst hohe Produktion bei gleichzeitig tiefen Treibhausgasemissionen (THGE) erreichen. Aus diesem Grund wurde als Bezugseinheit (funktionelle Einheit) eine produktive Funktion verwendet, und zwar die *gesamte durch den Betrieb produzierte Menge an verdaulicher Energie* (vE) in Megajoule (MJ). Die verdauliche Energie wird berechnet aus dem für den Menschen verdaulichen Energieinhalt eines Produktes (Nahrungsenegie). Nicht direkt für den Menschen verwertbare Energie (wie zum Beispiel diejenigen in Futtermitteln) wird über standardisierte Produktionsszenarien umgerechnet in Nahrungsenergie, die schlussendlich vom Menschen genutzt werden kann. Die verdauliche Energie ermöglicht es, die gesamte landwirtschaftliche Produktion (pflanzliche und tierische Produkte sowie produzierte Futtermittel) in einer Grösse auszudrücken. Das Verhältnis zwischen den eingesetzten Produktionsmitteln und der produzierten Menge an verdaulicher Energie spiegelt die Produktivität eines Betriebs wider. Mit dem Bezug der betrieblichen THGE auf die produzierten Megajoule an verdaulicher Energie kann die THG-Effizienz eines Betriebs berechnet werden. In den Resultaten der Analysen wird somit nicht nur die Veränderung der THGE durch die Massnahmenumsetzung, sondern auch eine allfällige Veränderung der Produktion eines Betriebs in den Massnahmenvergleich einbezogen und berücksichtigt. Eine Änderung der Produktion (Divisor) führt zu einer Änderung der THG-Effizienz (Quotient), auch wenn sich die THGE (Dividend) absolut nicht ändern. Solch eine Änderung wirkt sich dann anteilmässig auf alle Inputgruppen (siehe Kapitel 3.1.7) aus (siehe unter anderem Massnahme „Agroforstsystem“ Kap. 4.19).

3.1.5 Untersuchte Wirkungskategorien

Folgende Ressourcen und Umweltwirkungen wurden in den Analysen berücksichtigt (Definitionen und Unterteilungen siehe unten):

- Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen (gemäss (ecoinvent Centre 2010; Hischier *et al.* 2010)
- Treibhauspotenzial (IPCC 2007)
- Ozonbildungspotenzial (EDIP03)
- Eutrophierungspotenzial (EDIP03)
- Versauerungspotenzial (EDIP03)
- Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial (CML01)
- Aquatisches Ökotoxizitätspotenzial (CML01)
- Humantoxizitätspotenzial (CML01)

Daneben wurden weitere Umweltaspekte auf Stufe Sachbilanz betrachtet, da die in der Literatur beschriebenen Wirkungsabschätzungsmethoden als für die Landwirtschaft wenig geeignet beurteilt wurden (Nemecek *et al.* 2005). Die folgenden Sachbilanzergebnisse wurden aufgrund ihrer Relevanz für die landwirtschaftliche Produktion ausgewählt:

- Ressourcenbedarf P resp. K
- Flächenbedarf gesamt (CML01)
- Abholzung (Differenz aus Umwandlung von und zu Waldflächen und Buschland gemäss ecoinvent-Kategorien; Hischier *et al.* 2010)
- Wasserbedarf (blue water; gemäss ecoinvent-Kategorien; Hischier *et al.*, 2010)

Da sich die Analysen auf Schweizer Betriebe beziehen, wurden – wo vorhanden – jeweils die regionalen Schweizer Wirkungsabschätzungsfaktoren verwendet. Dies war der Fall für das Ozonbildungs-, das Eutrophierungs- sowie das Versauerungspotenzial.

Die analysierten Umweltwirkungen lassen sich in ressourcenbezogene, nährstoffbezogene und schadstoffbezogene Umweltwirkungen unterteilen (Nemecek und Gaillard 2007; Nemecek *et al.* 2005; Rossier und Gaillard 2004):

Ressourcenbezogene Umweltwirkungen

Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen (Energiebedarf; in MJ-Äquivalenten): Entspricht dem Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen (Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle, Uran), welcher gemäss der Methodik von ecoinvent (Hischier *et al.*, 2010) berechnet wurde. Er resultiert aus der Menge der verbrauchten Primärenergieträger jeweils multipliziert mit ihrem oberen Heizwert (Brennwert). Erneuerbare Energie (Solarenergie, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse, etc.) wird dabei nicht berücksichtigt.

Treibhauspotenzial (in kg CO₂-Äquivalenten): Das Treibhauspotenzial (THP) wurde gemäss der Methodik IPCC (2007) über einen Zeitraum von 100 Jahren gerechnet. Die Haupttreibhausgasemissionen sind Kohlendioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄). Der aus Flächenumwandlung freigesetzte Kohlenstoff wird mitgerechnet, da es sich um die Freisetzung langfristig gespeicherten Kohlenstoffs handelt. Hingegen wurde biogener Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Pflanzen und Erzeugnissen nicht berücksichtigt, da sich dieser in einem Zyklus von wenigen Jahren befindet.

Die **Ozonbildung** besteht aus zwei Unterkategorien:

Ozonbildungspotenzial (Vegetation) (in m²*ppm*h): Die Wirkung des Ozons auf die Vegetation wurde gemäss der Methode EDIP03 (Hauschild und Potting 2005) gerechnet. Sie berücksichtigt die photochemische Ozonbildung in der Troposphäre und spiegelt die Exposition der Vegetation wider.

Ozonbildungspotenzial (Human) (in person*ppm*h): Die Wirkung des Ozons auf die menschliche Gesundheit wurde gemäss der Methode EDIP03 (Hauschild und Potting 2005) gerechnet. Sie berücksichtigt die photochemische Ozonbildung in der Troposphäre und spiegelt die Exposition des Menschen wider.

Die Hauptemissionen für beide Unterkategorien sind flüchtige organische Verbindungen, Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Methan (CH₄).

Ressourcenbedarf P (in kg P): Der Ressourcenbedarf an Phosphor wurde auf Stufe Sachbilanz berücksichtigt und spiegelt den Bedarf an Rohstoffen für die Herstellung mineralischer Phosphordünger wider. Diese sind wie die nicht erneuerbaren Energieressourcen endlich und werden in absehbarer Zeit erschöpft sein.

Ressourcenbedarf K (in kg K): Ebenso wurde der Ressourcenbedarf an Kalium auf Stufe Sachbilanz berücksichtigt; er spiegelt den Bedarf an Rohstoffen für die Herstellung mineralischer Kalidünger wider. Diese sind wie die Rohstoffe für die Herstellung mineralischer Phosphordünger und die nicht erneuerbaren Energieressourcen endlich und werden in absehbarer Zeit erschöpft sein. Der Ressourcenbedarf an P und K ist nicht zu verwechseln mit dem Nährstoffbedarf der Kulturen.

Flächenbedarf (in m²a): Der Flächenbedarf wurde gemäss der Methode CML01 (Guinée *et al.* 2001) auf Stufe Sachbilanz berücksichtigt. Es wurde die ungewichtete Summe des Flächenbedarfs („land

occupation“ als Fläche x Zeit) ermittelt. Die wichtigsten Flächenkategorien sind Ackerland, Grünland, Wald und Siedlungsflächen. Alle Flächenkategorien wurden gleich bewertet, ihre unterschiedliche Bedeutung bezüglich Knappheit wurde nicht berücksichtigt. Die einzelnen Flächenkategorien wurden in dieser Studie nicht ausgewertet, da sie sich ihre Anteile durch die analysierten Massnahmen nicht veränderten.

Abholzung (in m²): Die Abholzung wurde auf Stufe Sachbilanz berücksichtigt. Betrachtet wurde nur die Abholzung von Wald- und Buschflächen, weil bei diesen die für diese Studie relevantesten Veränderungen zu beobachten sind (insbesondere Verlust von tropischen Wäldern). Dabei wurde die Bilanz der „Umwandlung zu“ Waldflächen abzüglich der „Umwandlung von“ Waldflächen gemäss ecoinvent-Methodik gerechnet.

Wasserbedarf (blue water; in m³): Der Wasserbedarf wurde auf Stufe Sachbilanz berücksichtigt. Ermittelt wurde der Bedarf an sogenanntem „Blue Water“, also Süsswasser, das aus dem Grundwasser oder aus Oberflächengewässern entnommen wird. Dabei handelt es sich zwar um eine erneuerbare Ressource, diese steht aber nur limitiert zur Verfügung.

Nährstoffbezogene Umweltwirkungen

Terrestrisches Eutrophierungspotenzial (in m²): Das Terrestrische Eutrophierungspotenzial wurde gemäss der EDIP-Methode 2003 (Hauschild und Potting 2005) berechnet. Es bezieht sich auf empfindliche Ökosysteme wie Magerwiesen, Hochmoore und Gewässer und nicht auf die Nährstoffanreicherung in landwirtschaftlichen Böden. Wichtigste Emissionen sind die Stickstoff(N)-Emissionen in die Luft. Das terrestrische Eutrophierungspotenzial spiegelt die Fläche des terrestrischen Ökosystems wider, auf welcher aufgrund von N-Emissionen eine Eutrophierung stattfindet (Fläche an ungeschütztem Ökosystem).

Aquatisches Eutrophierungspotenzial N (in kg N): Das aquatische Eutrophierungspotenzial N wurde gemäss der EDIP-Methode 2003 (Hauschild und Potting 2005) berechnet. Es berücksichtigt N-Emissionen in die Luft, den Boden und das Wasser und spiegelt die Belastung aquatischer Systeme wider.

Aquatisches Eutrophierungspotenzial P (in kg P): Das aquatische Eutrophierungspotenzial P wurde gemäss der EDIP-Methode 2003 (Hauschild und Potting 2005) berechnet. Es berücksichtigt Phosphoremissionen in die Luft, den Boden und das Wasser und spiegelt die Belastung aquatischer Systeme wider.

Versauerungspotenzial (in m²): Das Versauerungspotenzial wurde gemäss der Methode EDIP03 (Hauschild und Potting 2005) gerechnet. Es bezieht sich wie das Eutrophierungspotenzial auf empfindliche Ökosysteme und spiegelt die Fläche innerhalb des Ökosystems wider, welche infolge der Emission von versauernden Substanzen die kritische Schwelle zur Versauerung überschreitet (Fläche an ungeschütztem Ökosystem). Hauptemissionen für diese Wirkungskategorie sind Stickstoff- und Schwefelverbindungen.

Schadstoffbezogene Umweltwirkungen

Aquatische und Terrestrische Ökotoxizität (in kg 1.4-DB-Äquivalenten): Die terrestrische und aquatische Ökotoxizität wurden gemäss der Wirkungsabschätzungsmethode CML01 (Guinée *et al.*, 2001) berechnet und spiegeln die Wirkung toxischer Substanzen auf aquatische resp. terrestrische Ökosysteme wider. Hauptemissionen sind Pestizide und Schwermetalle. Die Charakterisierungsfaktoren der berücksichtigten Pestizide wurden durch Agroscope gegenüber der ursprünglichen Publikation von Guinée *et al.* (2001) wesentlich erweitert und unter Berücksichtigung einheitlicher Quellen für die Eigenschaften der Wirkstoffe neu berechnet (Hayer *et al.* 2010). Die Charakterisierungsfaktoren spiegeln das Verhalten der Wirkstoffe in der Umwelt (Abbau, Verlagerung, etc.) sowie die toxischen Wirkungen auf verschiedene Organismengruppen wider. Dabei handelt es sich um relativ einfache Wirkmodelle, welche ausschliesslich auf den Eigenschaften der Wirkstoffe (physikalische und chemische Eigenschaften sowie Toxizitäten) basieren. Andere Faktoren wie Zeitpunkt und Technik der

Ausbringung oder die Kultur werden vernachlässigt. Die Wirkungen auf die Toxizität werden getrennt für die Pestizide (Pest.) und die übrigen Schadstoffe (o. Pest; in der Studie „Nicht-Pestizide“ genannt). Bei den letzteren sind Schwermetalle und andere Substanzen mit toxischer Wirkung zu finden.

Humantoxizität (in kg 1.4-DB-Äquivalenten): Die Humantoxizität wurde gemäss der Methode CML 2001 (Guinée *et al.*, 2001) berechnet. Sie spiegelt die Wirkung toxischer Substanzen auf den Menschen wider. Hauptemissionen für diese Wirkungskategorie sind Schwermetalle, Chlorverbindungen und (polyzyklische) aromatische Kohlenwasserstoffe. Wie für die Ökotoxizität erfolgte eine Neuberechnung der Charakterisierungsfaktoren der berücksichtigten Pestizide, welche durch Agroscope gegenüber der ursprünglichen Publikation von Guinée *et al.* (2001) wesentlich erweitert und neu berechnet wurden (Hayer *et al.*, 2010).

Neben der Auswahl der Wirkungskategorien mit den zugehörigen Charakterisierungsfaktoren nennt die ISO-Norm 14040 (ISO 2006a) drei weitere optionale Schritte der Wirkungsabschätzung:

- Normalisierung
- Gruppierung
- Gewichtung

In der Normalisierung werden die Umweltwirkungen in Bezug auf die durchschnittlichen Umweltwirkungen pro Einwohner gesetzt. Dieser Schritt wird nicht durchgeführt, da für einige Wirkungsabschätzungsmethoden die Normalisierungsfaktoren fehlen.

Eine Gruppierung aufgrund von multivariater Statistik wurde in früheren Studien vorgenommen (Nemecek und Gaillard 2007; Nemecek *et al.* 2005; Rossier und Gaillard 2004) und hat zu der Gruppierung gemäss erwähnter Unterteilung in ressourcenbezogene, nährstoffbezogene und schadstoffbezogene Umweltwirkungen geführt.

In der Gewichtung werden die einzelnen Umweltwirkungen (Stufe Midpoint) zu einer einzigen Zahl (Indikator Stufe endpoint) aggregiert. Diese Gewichtung basiert auf Werthaltungen und Präferenzen und ist nicht naturwissenschaftlich fundiert. Die Gefahr besteht zudem, dass gewichtete Ergebnisse wichtige Unterschiede in einzelnen Wirkungskategorien maskieren. Zudem ist eine Kompensation zwischen verschiedenen Wirkungskategorien gemäss natürlichen Prozessen nicht möglich. Gemäss ISO-Norm 14044 (ISO 2006d) sollten in vergleichenden Studien, die veröffentlicht werden, keine Gewichtungen angewandt werden. Entsprechend wird in dieser Studie auf eine Gewichtung verzichtet und die Bewertung wird nach dem Midpoint-Ansatz vorgenommen.

3.1.6 Berechnung der direkten Treibhausgasemissionen auf dem Betrieb

Im Rahmen der Ökobilanzmethode SALCA wurden verschiedene Modelle zur Berechnung der direkt auf dem Landwirtschaftsbetrieb stattfindenden Emissionen entwickelt oder angepasst. Diese erlauben eine Abschätzung der Emissionen von Ammoniak, Nitrat, Lachgas, Phosphor, Methan und Schwermetallen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die für die Berechnung der THGE verwendeten Modelle gegeben. Eine ausführlichere Beschreibung aller Emissionsmodelle findet sich in Nemecek und Gaillard (2010) und in den jeweils angegebenen Quellen.

Methan (CH₄): Methanemissionen aus der Tierhaltung (Rindvieh ausser Milchkühe) und aus der Hofdüngerlagerung wurden gemäss den Emissionsfaktoren nach IPCC (2006) Tier 2 berechnet. Für die Milchkühe wurde die detailliertere Berechnungsformel gemäss Kirchgessner (2004) verwendet. In die Berechnung eingeschlossen wurden die Menge und Qualität des Futters sowie das Hofdüngermanagement.

Lachgas (N₂O): Die Emissionsfaktoren für die Berechnung der Lachgasemissionen stammen aus IPCC (2006). Dabei wurden sowohl die direkten N₂O-Emissionen wie auch die induzierten berücksichtigt. Direkte Emissionen kommen aus der Ausbringung von Stickstoffdüngern und der Einarbeitung von Ernterückständen; induzierte Emissionen entstehen aus Nitrifizierungs- und Denitrifizierungsprozessen im Boden.

Ammoniak (NH₃): Ammoniak selbst ist nicht treibhauswirksam, fungiert jedoch als Vorläufersubstanz für das treibhauswirksame Lachgas (N₂O). Ammoniakverluste aus tierischen Ausscheidungen im Stall und auf der Weide sowie während der Hofdüngerlagerung und der Ausbringung von Hof- und Mineraldüngern wurden gemäss Kupper und Menzi (2013) mit dem Modell Agrammon berechnet.

3.1.7 Inputgruppen

Unterschiedliche Produktionsmittel und -prozesse tragen zu den verschiedenen Umweltwirkungen bei. Zur besseren Übersicht und Interpretierbarkeit der analysierten Betriebe lassen sich diese in sogenannte Inputgruppen einteilen. Diese zeigen auf, woher die Hauptbeiträge zu einer bestimmten Umweltwirkung stammen. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die verwendeten Inputgruppen sowie einen kurzen Beschrieb der darin berücksichtigten Prozesse.

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Inputgruppen.

Inputgruppe	Betrachtete Prozesse
Gebäude und Einrichtungen	Bereitstellung der Gebäude und Einrichtungen (Infrastruktur)
Maschinen	Bereitstellung der Maschinen (Infrastruktur)
Energieträger auf Hof	Bereitstellung und Einsatz Energieträger als Treib- und Brennstoffe (Diesel, Elektrizität, Heizöl etc.) auf dem Betrieb
Dünger und Feldemissionen	Herstellung von Mineraldüngern sowie direkte Feldemissionen bei der Ausbringung von Mineral- und Hofdüngern auf der Betriebsfläche
Pestizide	Herstellung und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln auf der Betriebsfläche
Zukauf Saatgut	Produktion von zugekauftem Saatgut
Zukauf Kraftfutter	Produktion von zugekauftem Kraftfutter
Zukauf Grundfutter	Produktion von zugekauftem Grundfutter
Zukauf Tiere	Aufzucht von zugekauften Tieren
Tierhaltung auf Hof	Emissionen der Tiere auf dem Betrieb, welche bei der Verdauung, im Stall, auf der Weide und bei der Hofdüngerlagerung entstehen
Weitere Inputs	Herstellung von weiteren Produktionsmitteln wie Silofolie, Vogelschutznetze, Vliese, Schmierfette etc. sowie Bereitstellung von Leitungswasser

3.1.8 Auswertungskonzept

Um die Wirkung einer Massnahme zu berechnen, wurde die Umsetzung der Massnahme auf Modellbetrieben simuliert. Anschliessend wurde die Ökobilanz der Modellbetriebe berechnet und für jede analysierte Umweltwirkung mit der Referenz verglichen. Diese bestand aus den Ökobilanzen der Modellbetriebe ohne die Massnahme. Die Differenz der beiden Bilanzen ergab die Wirkung der Massnahme auf das THP sowie die weiteren analysierten Umweltwirkungen.

Um eine möglichst grosse Bandbreite an landwirtschaftlicher Produktion abzudecken, wurden die Analysen für vier verschiedene Betriebstypen, ausgedrückt in vier Modellbetrieben, durchgeführt. Für jeden Modellbetrieb wurden die Massnahmen separat modelliert und berechnet. So konnte die Wirkung einer Massnahme separat nach Betriebstyp erfasst und beurteilt werden und die Wirkungsbandbreite der Massnahme wurde ersichtlich. Diese Vorgehensweise erlaubte zudem die Identifikation von Massnahmen, welche auf verschiedenen Betriebstypen eine ähnliche Wirkung zeigen und Massnahmen, welche spezifisch auf einen bestimmten Betriebstyp gerichtet sind.

Die Veränderung der Umweltwirkung Treibhauspotenzial wurde für jeden Modellbetrieb detailliert analysiert und ist im Kapitel 4 dargestellt. Bei den übrigen Umweltwirkungen werden jeweils nur diejenigen gezeigt, welche sich durch die Massnahme um mehr als ein Prozent ändern.

3.1.9 Modellbetriebe

Die Modellbetriebe sind theoretische, modellierte Betriebe und stammen aus dem Projekt ZA-ÖB (Hersener *et al.*, 2011). Sie beruhen auf Daten der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten (ZA-BH) und bilden alle wichtigen Betriebstypen der Schweiz ab. Unterteilt nach Region und Landbauform, repräsentieren sie jeweils den durchschnittlichen Betrieb eines bestimmten Betriebstyps (Klassifizierung gemäss FAT99-Typologie S4; siehe (Meier 2000). Für das vorliegende Projekt wurden von Albert Zimmermann aus der Forschungsgruppe Sozioökonomie aktualisierte Modellbetriebe verwendet (pers. Mitteilung A. Zimmermann, 2015), welche auf den ZA-BH-Zahlen 2008 – 2010 beruhen. Zusätzlich wurden die wesentlichen Parameter für die Tier- und Pflanzenproduktion anhand Zahlen aus dem Deckungsbeitragskatalog 2013 (AGRIDEA 2013a) sowie aus der Dokumentation der technischen Parameter Agrammon (Kupper und Menzi 2013) aktualisiert.

Tabelle 5: Kennzahlen zu den vier verwendeten Modellbetrieben. Quelle: A. Zimmermann, Agroscope.

	Ackerbau	Verkehrs- milch	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]	0,26	1,64	0,71	3,12
Anzahl Milchkühe	1,9	26,5	3,9	12,9
Anzahl Mastschweine	3,7	4,3	0	121,4
Ausbringung von Stickstoff [kg / ha]	125	159	114	156
Zufuhr von Kraftfutter [kg FS / ha]	378	1374	489	7258
Output Verd. Energie [MJ / ha]	44 794	28 328	10 014	53 721
Output Verd. Energie total [MJ]	1 092 970	572 234	146 199	859 528

Insgesamt gibt es 37 Modellbetriebe. Für die Analysen wurden vier davon mit möglichst unterschiedlicher Ausrichtung ausgewählt: Ackerbau ÖLN (Ackbau), Verkehrsmilch Tal ÖLN (VrkMilch), Anderes Rindvieh Tal ÖLN (AndRind) und Schweine ÖLN (Schwein). Für die Massnahme „Wärmerückgewinnung“ wurde zudem der Modellbetrieb Geflügel berücksichtigt. Mit dieser Auswahl kann eine grosse Bandbreite der landwirtschaftlichen Produktion vom Ackerbaubetrieb über einen intensiven und einen extensiven Grünlandbetrieb bis zum Schweinebetrieb abgedeckt werden. Zur besseren

Vergleichbarkeit wurden ausschliesslich Modellbetriebe aus der Talregion verwendet. Bio-Betriebe wurden nicht berücksichtigt. Tabelle 5 zeigt einige Kennzahlen der verwendeten Modellbetriebe.

Die vier Modellbetriebe weisen ganz unterschiedliche Ausgangswerte bezüglich des absoluten THP pro Betrieb auf (Abbildung 3). Den auf Betriebsebene absolut höchsten THG-Ausstoss hat der Modellbetrieb Schweine. Dies liegt einerseits an seiner hohen Kraffutterzufuhr, andererseits besitzt dieser Modellbetrieb auch knapp 13 Milchkühe, welche sich mit ihrem Methanausstoss in der Inputgruppe „Tierhaltung auf Hof“ bemerkbar machen. Das zweithöchste THP weist der Modellbetrieb Verkehrsmilch auf, was vor allem an der Milchviehhaltung mit dem einhergehenden Methanausstoss liegt.

Die Modellbetriebe Ackerbau und Anderes Rindvieh haben absolut gesehen ein weit geringeres THP. Beim Ackerbaubetrieb liegt dies vor allem an den viel geringeren Tierbeständen, insbesondere beim Rindvieh. Dafür verursacht er den höchsten THG-Ausstoss durch die Produktion der zugeführten Mineraldünger, zu sehen in der Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“. Der Modellbetrieb Anderes Rindvieh ist der kleinste der analysierten Betriebe, dazu weist er eine ziemlich extensive Produktion mit einem tiefen Tierbesatz und basierend vor allem auf Grünland auf, was zu einem vergleichsweise sehr niedrigen THG-Ausstoss führt.

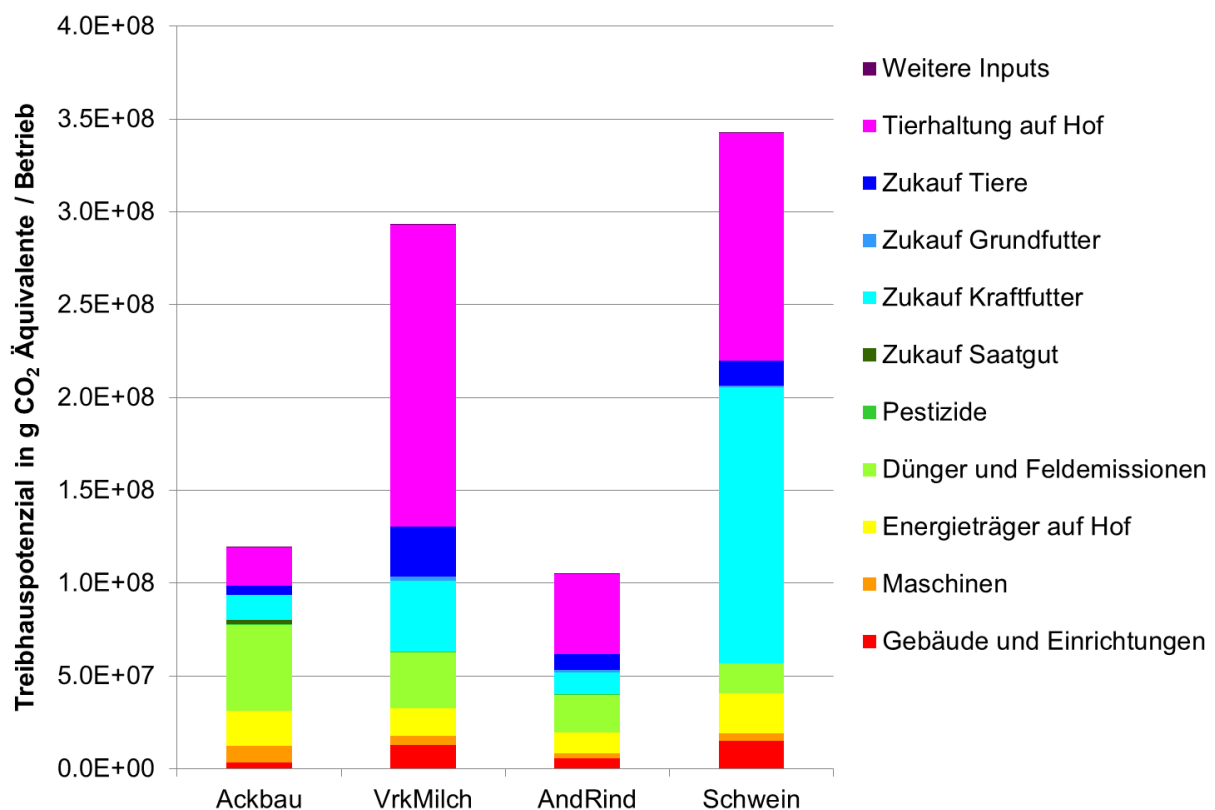


Abbildung 3: Treibhauspotenzial pro Betrieb der vier untersuchten Modellbetriebe, aufgeteilt nach Inputgruppen

Im Folgenden wird das THP der analysierten Betriebe jeweils auf ihre Produktion bezogen, ausgedrückt in MJ verdauliche Energie (vE). Abbildung 4 zeigt den THG-Ausstoss der vier analysierten Modellbetriebe in der Referenzsituation pro MJ produzierter verdaulicher Energie. Durch diesen Bezug ergibt sich ein völlig anderes Ausgangsbild: Das höchste THP weist nun der Betrieb Anderes Rindvieh auf. Dies liegt vor allem an seiner sehr niedrigen Produktion an verdaulicher Energie: Bei einem rund drei Mal geringeren THG-Ausstoss als der Betrieb Schweine produziert er knapp 7.5 Mal weniger verdauliche Energie. Relativ, d.h. pro MJ verdauliche Energie, weist er also einen höheren THG-Ausstoss auf als der Modellbetrieb Schweine. Am effizientesten bezüglich seines THG-Ausstoss pro MJ

vE ist der Modellbetrieb Ackerbau. Pflanzliche Produkte haben pro kg Trockenmass einen relativ hohen Gehalt an verdaulicher Energie, dazu finden keine trophischen Verluste statt.

Für das THP pro MJ vE ist also das Verhältnis zwischen Produktion und THG-Ausstoss entscheidend. Vermindert eine Massnahme die Produktion eines Betriebs, verringert dies die erzielte Treibhausgasreduktion pro MJ vE.

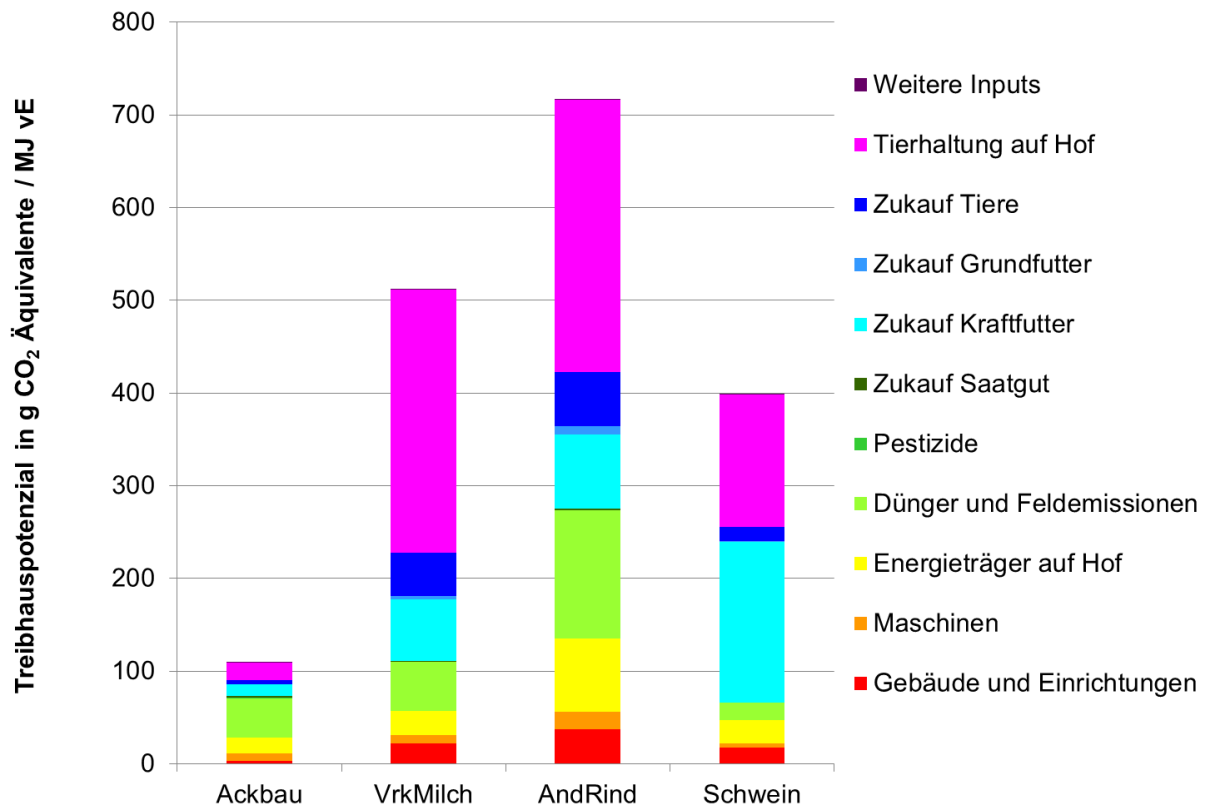


Abbildung 4: Treibhauspotenzial der analysierten Modellbetriebe, bezogen auf ihre Produktion an verdaulicher Energie (vE)

3.2 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit

Als Ausgangspunkt für die Analyse der Wirtschaftlichkeit wurden die von der Ökobilanz getroffenen Annahmen bzw. Festlegungen verwendet, um die Kongruenz beider Analysen sicherzustellen. Alle Berechnungen auf Stufe eines Betriebs bezogen sich auf die Modellbetriebe (vgl. Kapitel 3.1.9). Ziel der ökonomischen Untersuchung der Klimaschutzmassnahmen war es, die Kosten der Umsetzung von Klimaschutzmassnahmen zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der durch eine Massnahme eingesparten Treibhausgasemissionen konnten dann die CO₂-Reduktionskosten (negatives Vorzeichen) beziehungsweise -gewinne (positives Vorzeichen) je kg CO₂-Äquivalent der Massnahmen bestimmt und interpretiert werden.

Grundsätzlich wurde bei der Beurteilung der Massnahmen von zwei Methoden Gebrauch gemacht. Massnahmen, die lediglich eine Variation im Produktionsverfahren darstellten, also keine Investition vorsahen, wurden anhand von **Verfahrensvergleichen** bewertet, die alle relevanten pagatorischen und kalkulatorischen Kosten einbeziehen. Bei Massnahmen, die eine Investition erforderten, wurde eine **Vollkostenrechnung** durchgeführt. Da diese Massnahmen langfristig konzipiert wurden, wurden sowohl fixe als auch variable Kosten, die bei Durchführung der Massnahme entstehen, einbezogen.

Als Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit wurden die Rentabilität sowie die notwendigen Investitionen und – sofern relevant – das Risiko sowie der veränderte Arbeitsaufwand der Massnahmen untersucht (in Anlehnung an Mouron (2010)). Diese Indikatoren geben Auskunft über die Auswirkungen einer

Klimaschutzmassnahme auf das landwirtschaftliche Einkommen sowie die Arbeitsbelastung im Vergleich zur Referenzsituation. Eine Diskussion über das Risiko der Durchführung einer Massnahme dient zur Einschätzung potenzieller Kosten bzw. Gewinne, die durch Schwankungen beispielsweise der Preise entstehen können. Die jeweiligen Indikatoren setzten sich dabei (teilweise) aus unterschiedlichen Parametern zusammen. In Tabelle 6 werden die den erwähnten Indikatoren zugehörigen Parameter abgebildet:

Die **Rentabilität** gibt Aufschluss über den Erfolg eines Betriebs bzw. über die Effizienz des Einsatzes seiner knappen Produktionsfaktoren. Wenn keine Anfangsinvestition getätigt werden musste, so konnte nur der mittlere jährliche Gewinn/Verlust infolge der Umsetzung einer Massnahme als Kennzahl für die Rentabilität verwendet werden.

Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitsanalyse: Parameter und Indikatoren

Indikatoren	Parameter
Rentabilität	Mittlerer jährlicher Gewinn [Franken (Fr.)]
Investitionen	Investitionssumme [Fr.]
	Investitionssumme/mittlere jährliche Investitionssumme (2009-2013) [%]
Arbeitsaufwand	Arbeitsersparnis [Stunden (h)]
Risiko	Risikoabschätzung

Als **Investitionssumme** wurden die Anschaffungskosten (inklusive Mehrwertsteuer) herangezogen. Zur relativen Einordnung der Investitionssumme wurde diese zur mittleren jährlichen Investitionssumme der Modellbetriebe zwischen den Jahren 2009 und 2013 ins Verhältnis gesetzt (nach Mouron und Schmid (2011); Hoop und Schmid (2014)). Für alle selbst ausgeführten Tätigkeiten wurde der veränderte **Arbeitsaufwand** in Stunden angegeben bzw. eine qualitative Einschätzung wesentlicher den Arbeitsaufwand beeinflussender Punkte vorgenommen. Um das **wirtschaftliche Risiko** beurteilen zu können, fand eine Abwägung der zukünftigen Entwicklungen der wichtigsten Einflussfaktoren statt.

Schliesslich wird die Zielgrösse, der **CO₂-Reduktionsgewinn/-verlust pro kg CO₂-Äquivalent**, angegeben. Bei Massnahmen, die in einer Emissionszunahme resultieren, gibt es definitionsgemäss keine Reduktionsgewinne/-verluste. Da die neun wirtschaftlich zu untersuchenden Massnahmen sehr unterschiedlich sind und je nach Massnahme entweder ein Verfahrenvergleich oder eine Vollkostenrechnung vorgenommen wurde, können nicht bei allen Massnahmen jeweils alle Parameter bzw. Indikatoren berücksichtigt werden: Bei Verfahrensvergleichen mussten beispielsweise keine Investitionen getätigt werden, weshalb dieser Indikator hier entfiel.

Die Bezeichnung der ökonomischen Parameter erfolgte so, dass ein Wert kleiner Null eine Verschlechterung bedeutet (z.B. Kosten bzw. eine Zunahme der Arbeitszeit) und mit einem positiven Wert eine Verbesserung der betrieblichen Situation einhergeht.

Bei der Berechnung der Massnahmen wurden mehrere grundsätzliche Annahmen berücksichtigt, die nachfolgend beschrieben werden. Bezüglich der Arbeits- und Maschinenkosten mussten verschiedene Annahmen über das Arbeitsverfahren (zum Teil schon von der Ökobilanzierung vorgegeben), den Zeitaufwand pro Arbeitsverfahren, die variablen und fixen Maschinenkosten, die Erträge, Preise und Erlöse getroffen werden. Die Angaben hierzu nehmen grundsätzlich Bezug auf die Angaben im ART-

Arbeitsvoranschlag ,auf den Maschinenkostenbericht von Agroscope (Gazzarin 2014a), auf den Grundlagenbericht der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten (Hoop und Schmid 2014), und auf den Preis- und den Deckungsbeitragskatalog von AGRIDEA (AGRIDEA 2014a, 2014b). Soweit möglich wurde ausserdem immer mit dem fünfjährigen Mittel der Preise von 2009 bis 2013 gerechnet. Bei den Direktzahlungen hingegen wurde auf die aktuellen Werte zurückgegriffen (Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2015). Die Arbeitskosten (für interne Arbeitskräfte) wurden grundsätzlich Franken (Fr.) 28.– pro Stunde (Gazzarin 2014a) veranschlagt. Die Daten der Modellbetriebe (s. Kapitel 3.1.9) wurden genauso berücksichtigt wie spezifische Vorgaben der IP SUISSE Richtlinien (IP-Suisse 2014). Bezüglich der Maschinen auf den Betrieben, wird von einer mittleren Mechanisierung der Betriebe entsprechend dem ART-Arbeitsvoranschlag (Stark *et al.* 2014) ausgegangen, was sich mit den ermittelten Angaben für die Maschinenparks der Modellbetriebe deckt (Hersener *et al.*, 2011). Wurde ein Arbeitsverfahren im Rahmen einer Massnahme so umgestellt, dass der Einsatz neuer Maschinen notwendig wurde, so wurde mithilfe des Kaufschwellenansatzes abgewogen, ob die Maschine gekauft oder geliehen wird. Nach dem Kaufschwellenansatz lohnt sich der Kauf einer Maschine, wenn die Arbeitseinheiten, für die sie eingesetzt werden soll, mindestens dem Verhältnis der fixen jährlichen Kosten zur Differenz aus Mietpreis und variablen Kosten entsprechen (Gazzarin 2014a).

Weitere Annahmen wurden bezüglich Finanzierung und Unterhaltskosten getroffen. Die Laufzeit für die Kredite liegt zwischen 12 und 15 Jahren. Fremdkapital wird in den Berechnungen mit drei Prozent verzinst. Für die kalkulatorischen Kosten ist insbesondere die Verzinsung des Eigenkapitals relevant, welche die Opportunitätskosten des in der Massnahme gebundenen Kapitals darstellt. Als kalkulatorischer Zinssatz für das Eigenkapital wurde das zehnjährige Mittel des Zinssatzes von 10-Jahres-Bundesobligationen (1,86%) angenommen. Grundsätzlich wurde von einem Finanzierungsmodell ausgegangen, bei welchem 80 % der Investition aus Fremdkapital und 20 % aus Eigenkapital finanziert werden. Für die Reparatur- und Unterhaltskosten von Anlagen oder Einrichtungen wurden jährlich zwei Prozent der Investitionen angesetzt (Raaflaub *et al.* 2012) und ausserdem von einer zehnjährigen Nutzungsdauer ausgegangen (Raaflaub *et al.* 2012). Fanden sich in der Literatur andere Angaben zur Nutzungsdauer einer bestimmten Einrichtung oder Anlage, so wurden diese übernommen. Detaillierte Angaben zu den in der ökonomischen Untersuchungen getroffenen Annahmen sind im Anhang dokumentiert.

4 Bewertung Einzelmassnahmen

4.1 Bezug von Ökostrom

4.1.1 Beschreibung der Massnahme

Die Massnahme beinhaltet eine 100 %-ige Abdeckung des benötigten Stroms des jeweiligen Betriebes durch Ökostrom. Der Landwirt bezieht somit an Stelle der Schweizer Standard-Strommischung eine Strommischung aus 100 % erneuerbaren Energien. Es wurde nur der Strombedarf direkt auf dem Betrieb berücksichtigt und nicht derjenige, welcher beispielsweise die Futterzulieferer beziehen. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die benötigte Gesamtenergie der vier Modellbetriebe und den Anteil Strom pro Jahr.

Tabelle 7: Gesamtenergiebedarf der Modellbetriebe und der Anteil an Strom in MJ

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Gesamtenergie (ohne Treibstoffe) auf Hof [MJ]	88 336	86 454	78 931	203 611
Davon Strom [MJ]	13 097 (15 %)	64 845 (75 %)	24 608 (31 %)	124 365 (61 %)

Für die Quantifizierung des Reduktionspotenzials wurden die Umweltwirkungen der Modellbetriebe zum einen mit einer ‚konventionellen Strommischung‘ und zum anderen mit Strom aus erneuerbaren Energien berechnet. Die konventionelle Strommischung wurde mit dem Ecoinvent-Inventar „Electricity, low voltage, at grid/CH“ beschrieben, welches eine Schweizer Versorgungsmischung ohne Strom aus zertifizierten Quellen (41,2 % Atomstrom, 56,9 % Wasserkraft, 1,9 % fossile Brennstoffe) beschreibt. Der Strom aus erneuerbaren Energien wurde mit dem Ecoinvent-Inventar „Electricity, low voltage, certified electricity, at grid/CH“ beschrieben und entspricht einer Strommischung aus erneuerbaren Quellen, die innerhalb zertifizierter Produkte verkauft werden. Die hier verwendete Mischung (siehe Abbildung 5) besteht zu fast 98 % aus Wasserkraft mit kleineren Anteilen von Photovoltaik, in- und ausländischer Windkraft, sowie Holz und Biogas Wärme-Kraft-Werken.

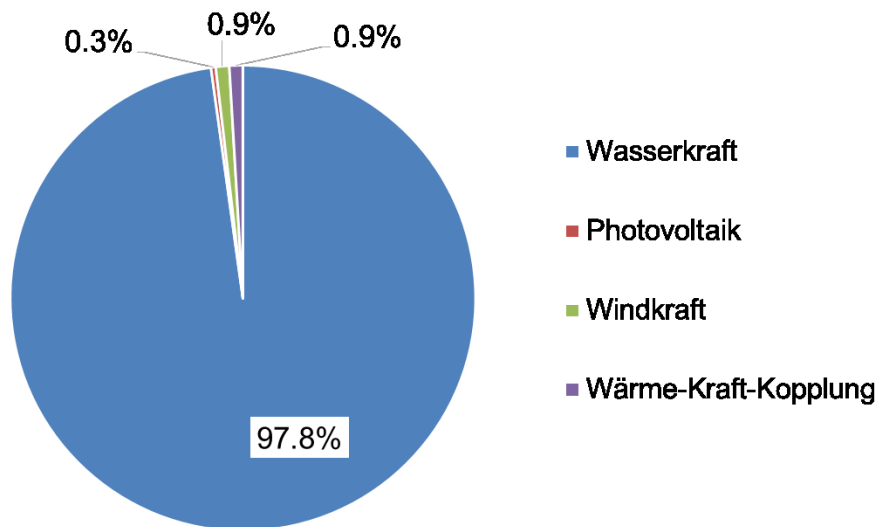


Abbildung 5: Zusammensetzung der verwendeten Strommischung "Electricity, low voltage, certified electricity, at grid/CH Erneuerbare Energie" (ecoinvent Centre 2010)

4.1.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Abbildung 6 zeigt die erzielte Treibhausgasreduktion pro produzierte verdauliche Energie der vier analysierten Modellbetriebe. Durch den Einsatz von Ökostrom liessen sich 0,4 bis 1,4 % des THG-Ausstosses verringern, was im Fall des Modellbetriebs Anderes Rindvieh 6,25 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE entsprach. Die stärksten Abnahmen war bei den Betrieben mit dem grössten Strombedarf (VrkMilch, AndRind und Schwein) zu beobachten, die geringsten Abnahmen beim Modellbetrieb Ackerbau mit dem kleinsten Strombedarf. Die Reduktion war vollständig der Inputgruppe „Energieträger auf Hof“ zuzuschreiben.

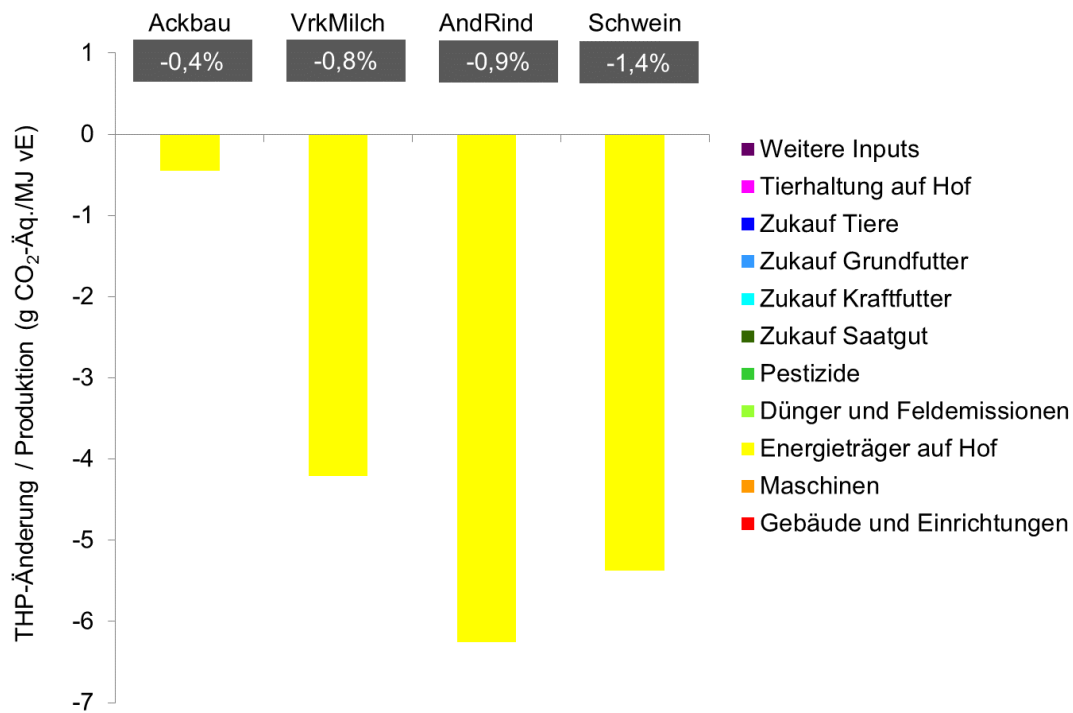


Abbildung 6: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Ökostrom“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetrieblichen Produktion wieder.

Einen grösseren Effekt als auf das THP hatte die Massnahme auf den Energiebedarf, wo eine Reduktion zwischen 3,5 % für den Betrieb Ackerbau und 16,2 % für den Betrieb Schwein beobachtet werden konnte. Auch der Wasserbedarf konnte um 1 bis 6,2 % reduziert werden. Ausserdem sank die aquatische Eutrophierung durch Phosphor, am stärksten beim Betrieb Schwein mit 6,0 % und am geringsten beim Ackerbau Betrieb mit 1,2 %. Bei der aquatischen Ökotoxizität verminderte sich die Wirkung durch Nicht-Pestizide (aq. Ökotox. o. Pest.), während bei den Pestiziden keine Reduktion ersichtlich war. Auch auf die übrigen analysierten Umweltwirkungen war kein Effekt feststellbar.

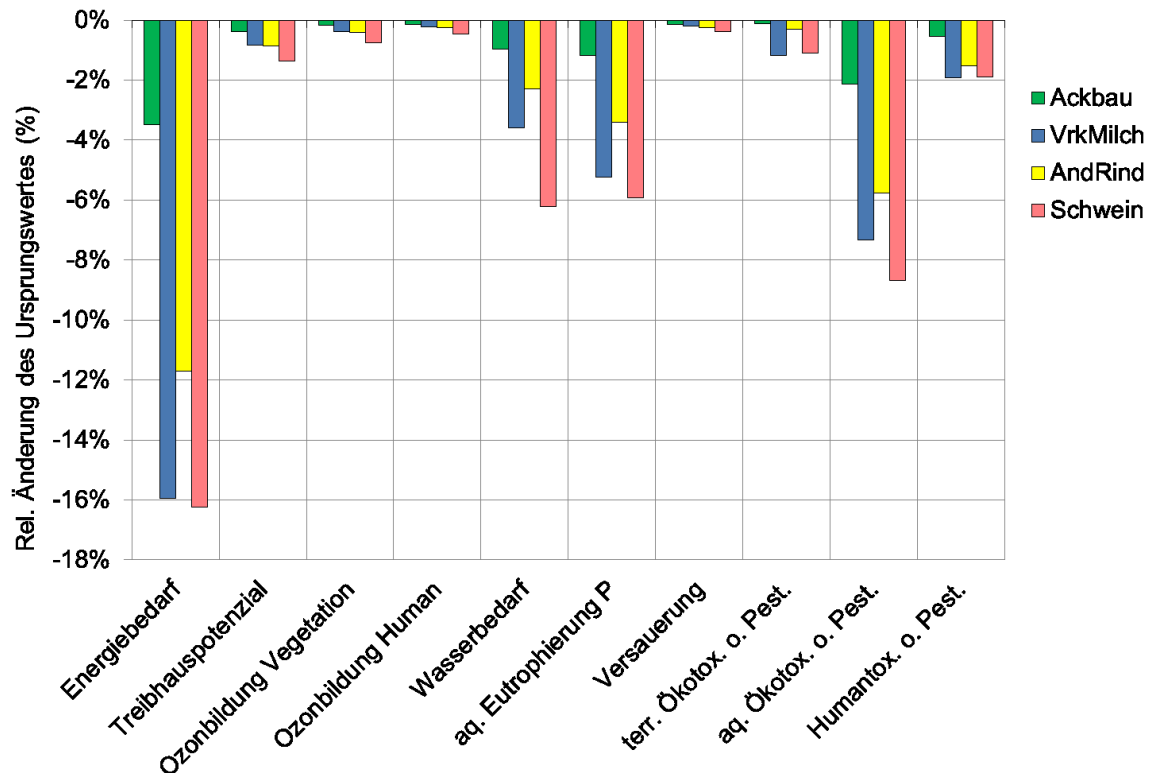


Abbildung 7: Wichtigste Effekte der Massnahme „Ökostrom“ auf weitere Umweltwirkungen

4.1.3 Diskussion

Der Bezug von 100 % zertifiziertem Strom führte zu positiven Effekten in vielen Umweltwirkungen mit keinerlei Trade-offs. Durch den ohnehin schon vergleichsweise klimagünstigen Strommix der Schweiz ist die THG-Emissionsreduktion allerdings geringer ausgefallen als es bei Strommischungen in anderen Ländern der Fall wäre. Bedingung für eine tatsächliche THG-Reduktion durch diese Massnahme ist jedoch, dass durch die gesteigerte Nachfrage nach Ökostrom effektiv auch durch eine Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen gedeckt wird.

4.2 Verminderung des Treibstoffbedarfs

4.2.1 Beschreibung der Massnahme

Der Offroadsektor² trägt mit einem Dieselverbrauch von 333 300 Tonnen pro Jahr zu fast einem Fünftel des Gesamtdieselverbrauchs der Schweiz bei (Schäffeler und Keller 2008). Angesichts der starken Verbesserung in der Treibstoffeffizienz von PKWs in den letzten 20 Jahren wird auch in der Landwirtschaft ein grosses Reduktionspotenzial vermutet. Der direkte Verbrauch an Treibstoffen, Brennstoffen, Elektrizität und erneuerbaren Energien macht 30 % des gesamten Energieverbrauchs in der Landwirtschaft aus und entspricht 15 GJ/ha (Latsch und Anken 2015). Der grösste Anteil daran hat dabei der Dieselverbrauch mit 5.5 GJ/ha (siehe Abbildung 8).

² mobile Maschinen und Geräte, die nicht zur Beförderung von Personen und Gütern auf der Strasse bestimmt sind, bspw. Baumaschinen, land- und forstwirtschaftliche Maschinen etc.



Abbildung 8: Anteile der verschiedenen Energieträger am direkten Energieverbrauch in der Schweizer Landwirtschaft 1990 und 2012 aus Latsch et al. (2015), Abbildung 4.

Beim Treibstoffverbrauch landwirtschaftlicher Maschinen wird typischerweise der Verbrauch auf die zu verrichtende Arbeit je Fläche angegeben, also beispielsweise pro ha Pflügen. Hierbei hängt der Verbrauch von mehreren Faktoren ab: Grösse und Gewicht der Maschine, Koppelung der Maschinen, Reifendruck, Bodenverhältnisse, Fahrweise, Motorauslastung usw. Neben dem Verbrauch an Dieseltreibstoffen sind auch die Partikelemissionen landwirtschaftlicher Maschinen erwähnenswert. Diese sind aufgrund des hohen durchschnittlichen Alters der Landmaschinen und der späteren Einführung von Abgasnormen im Vergleich zu Baumaschinen um 46 % grösser (Schäffeler und Keller 2008).

Ein Bericht aus dem Jahr 2004 hat für den Landwirtschaftssektor keine Senkung des Treibstoffbedarf festgestellt, da parallel zu treibstoffeffizienteren Maschinen eine Verschiebung hin zu grösseren, leistungsstärkeren Maschinen mit weiteren Funktionalitäten stattfand (Keller und Zbinden 2004). Wahrscheinlich reichen treibstoffeffizientere Maschinen nicht aus, um die Treibstoffeffizienz der Landwirtschaft zu senken, sondern es werden noch andere Massnahmen wie sie beispielsweise bei Eco Drive vorgeschlagen werden, eingesetzt werden müssen. Aus den Erfahrungen beim Strassenverkehr halten wir eine Senkung des Treibstoffbedarfs um 10% realistisch. Für die Ermittlung des Reduktionspotenzials wurde der Ist-Zustand (Modellbetriebe) einer 10 %-igen Verbesserung der Treibstoffeffizienz gegenüber gestellt. Der daraus resultierende Verbrauch an Benzin und Diesel für den Ist-Zustand und die Reduktion um 10 % (Massnahme) sind in Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Benzin- und Diesel-Verbrauch für die vier Modellbetriebe bezüglich der Referenz und der Reduktion um 10 %

	Referenz		Massnahme	
	Benzin [kg]	Diesel [kg]	Benzin [kg]	Diesel [kg]
Ackbau	302	2611	272	2350
VrkMilch	301	2611	271	2350
AndRind	203	1351	183	1216
Schwein	226	2290	204	2061

4.2.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Abbildung 9 zeigt die erzielte Treibhausgasreduktion pro produzierte verdauliche Energie der vier analysierten Modellbetriebe. Die Werte lagen zwischen 1,0 und 4,0 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE, was 0,3 bis 0,9 % des gesamten THP der analysierten Modellbetriebe entsprach. Absolut wies der Modellbetrieb Anderes Rindvieh die grösste Treibhausgasreduktion auf, wobei beim Betrieb Ackerbau die prozentuale Reduktion mit 0,9 % grösser war. Die Reduktion war vollständig der Inputgruppe „Energieträger auf Hof“ zuzuschreiben.

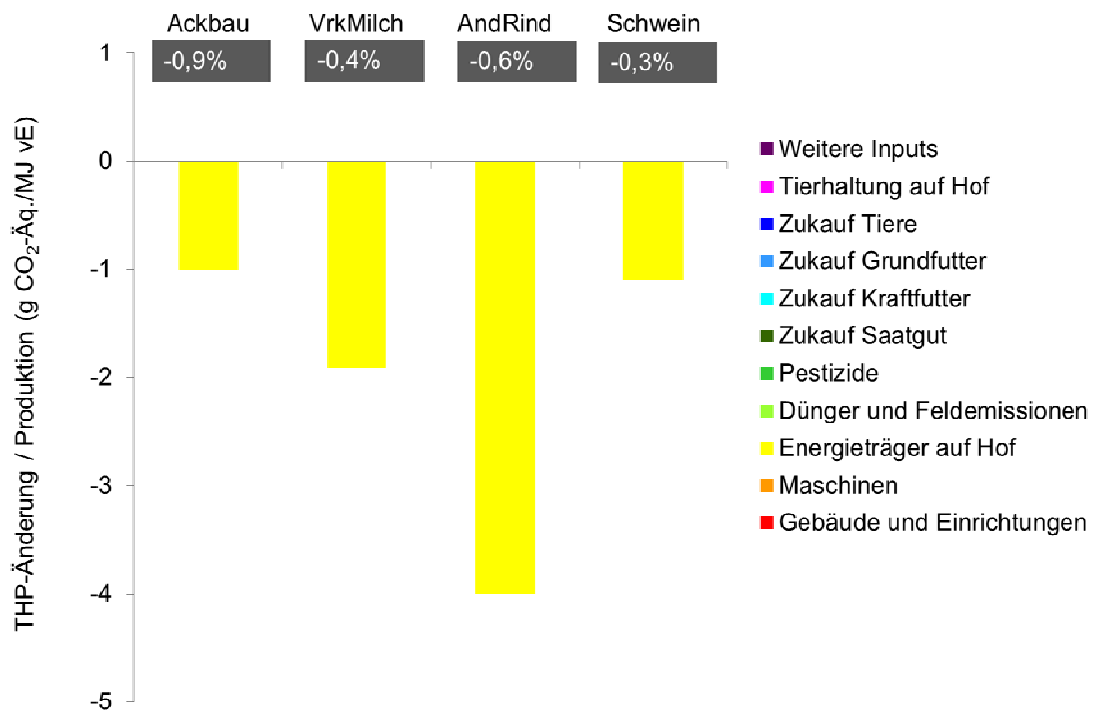


Abbildung 9: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Treibstoffbedarf“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wieder.

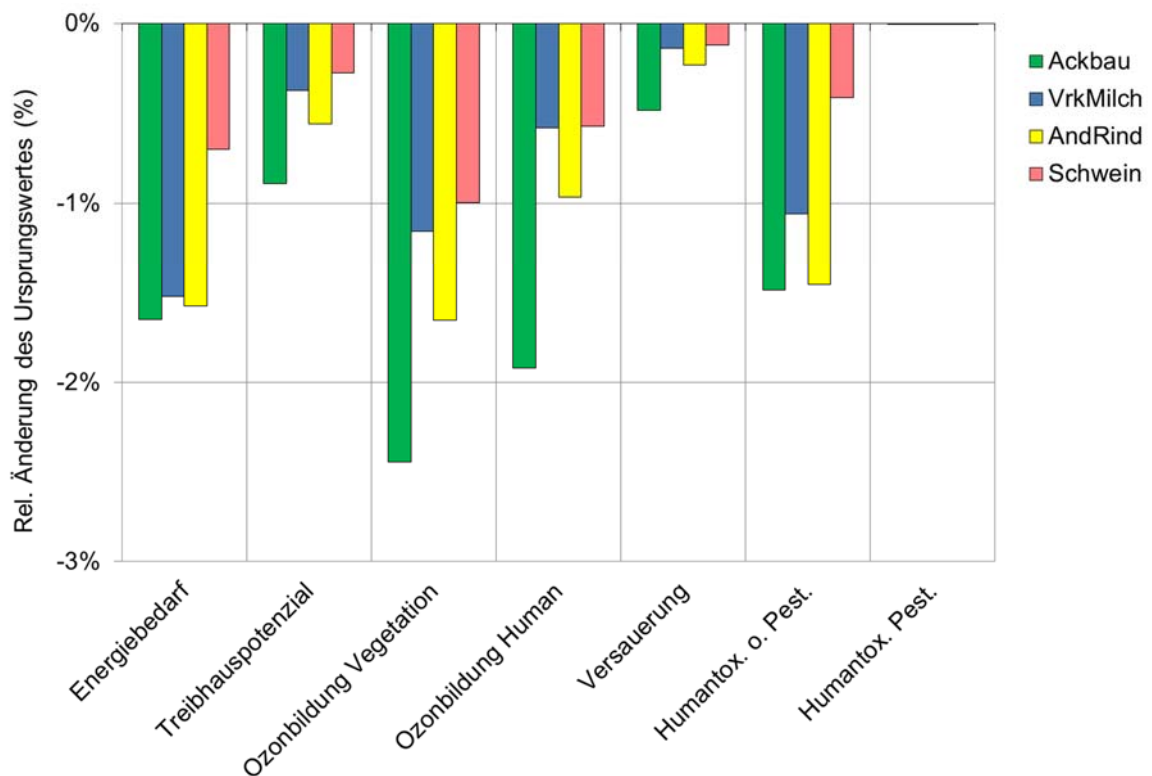


Abbildung 10: Wichtigste Effekte der Massnahme „Treibstoffbedarf“ auf weitere Umweltwirkungen.

Auf die anderen analysierten Umweltwirkungen wirkte sich die Massnahme durchwegs positiv aus, mit Reduktionen zwischen 0,4 und 2,4 % (Abbildung 10). Dabei ist die prozentuale Reduktion beim Ackerbaubetrieb immer am höchsten. Insbesondere die Reduktion bezüglich der Ozonbildung war beim Betrieb Ackerbau relativ hoch im Vergleich zu den restlichen Betrieben.

4.2.3 Diskussion

Ökologie und Ökonomie verfolgen in dieser Massnahme die gleichen Ziele und eine breite Front von Studien über Möglichkeiten der Treibstoffeinsparung wie angepasste Maschinenauswahl (zu verrichtende Arbeit bezüglich auf Traktorengrosse), Maschineneinstellungen (Reifendruck etc.) und Fahrweise existiert (Latsch und Anken 2015; Rinaldi *et al.* 2005, www.agri-ecodrive.ch, Webseiten der Landwirtschaftsämter). Die Massnahme sticht durch die Abwesenheit von Trade-offs und die positiven Synergien bei anderen Umweltwirkungen hervor. Im Bereich landwirtschaftlicher Maschinen wäre eine ähnlich positive Entwicklung wie beim Strassenverkehr wünschenswert.

4.3 Optimale Maschinenauslastung

4.3.1 Beschreibung der Massnahme

Diese Massnahme zielt darauf, die graue Energie aus Landmaschinen und somit den gesamtschweizerischen Maschinenpark zu minimieren, indem Landmaschinen optimal und überbetrieblich genutzt werden. Es ist anzunehmen, dass durch diese Massnahme die Zahl der Maschinen zwar abnimmt, der Treibstoffverbrauch pro Maschine aber insgesamt zunimmt, da die zwischenbetrieblichen Distanzen überwunden werden müssen.

Maschinenkosten machen einen massgeblichen Anteil an den gesamten Produktions- bzw. Selbstkosten der Schweizer Landwirtschaft aus (Vögeli *et al.* 2009). So ist die überbetriebliche Nutzung auch ein Beitrag zur Kostenreduktion und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit. Bei einer überbetrieblichen Nutzung verzichtet ein Landwirt darauf, alle benötigten Maschinen selbst zu besitzen, indem er Maschinen mit anderen Betrieben gemeinsam kauft oder Lohnunternehmer für bestimmte Arbeiten beauftragt. In jedem Fall wird ein höheres Mass an Organisation gefordert.

Tabelle 9: Maschinenbestand der Modellbetriebe bei 10 % weniger Auslastung (Referenz)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Landwirtschaftliches Gerät, allgemein (kg)	303	656	387	477
Landwirtschaftliches Gerät, Bodenbearbeitung (kg)	204	42	35	25
Selbstfahrende Erntemaschinen (kg)	3	27	15	19
Güllefass (kg)	8	61	15	77
Traktor (kg)	301	388	195	341
Pneuwagen (kg)	223	186	79	180
Personenwagen (kg)	39	37	20	32
Lieferwagen < 3.5 t (kg)	0	0	0	0
Total:	<u>1081</u>	<u>1397</u>	<u>746</u>	<u>1151</u>

Die Maschinenbestände und Auslastungen in den Modellbetrieben beruhen grundsätzlich auf dem Maschinenbedarf nach dem Deckungsbeitragskatalog und den Auslastungen gemäss Agroscope Maschinenkosten. Ziel des Agroscope Maschinenkostenberichts ist, Rahmenvorgaben für eine überbetriebliche Nutzung zu geben, d.h. die dortigen Auslastungen entsprechen bereits einer überbetrieblichen Nutzung. In der Realität sind die Auslastungen geringer. Gazzarin (2014, persönliche Mitteilung)

schätzt, dass die Auslastung realer Betriebe ca. 1/3 unter denen der Modellbetriebe liegt. Demzufolge entspricht die aktuelle Version der Modellbetriebe der Situation mit Umsetzung der Massnahme. Da der tatsächliche Maschinenbestand schwer zu ermitteln ist, legen wir das Referenzszenario bei einer um 10 % reduzierte Maschinenauslastung fest. Bei der Machbarkeitsstudie ist zu beachten, dass gewisse Maschinen besser bzw. schlechter für überbetriebliche Nutzung geeignet sind, beispielsweise wenn schmale Zeitfenster oder bestimmte meteorologische Situationen vorausgesetzt werden. In Tabelle 9 ist der Maschinenbestand des Referenzszenarios aufgeführt, was einer um 10 % geringeren Auslastung der Modellbetriebe entspricht.

Tabelle 10 zeigt den Maschinenbestand der Modellbetriebe im Ist-Zustand, was einer Implementation der Massnahme entspricht. Es ist ersichtlich, dass der gesamte Bestand bei den vier Modellbetrieben unterschiedlich stark abnimmt. Dies hängt damit zusammen, dass sich einige Maschinen schlecht für eine überbetriebliche Nutzung eignen (z.B. Ladewagen) und deren Bestand daher nicht reduziert werden kann.

Tabelle 10: Maschinenbestand der Modellbetriebe (Massnahme)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Landwirtschaftliches Gerät, allgemein (kg)	274	596	351	433
Landwirtschaftliches Gerät, Bodenbearbeitung (kg)	184	38	32	23
Selbstfahrende Erntemaschinen (kg)	3	24	13	17
Güllefass (kg)	8	61	15	77
Traktor (kg)	274	369	182	326
Pneuwagen (kg)	203	183	76	178
Personenwagen (kg)	36	35	18	31
Lieferwagen < 3.5 t (kg)	0	0	0	0
Total:	982	1306	687	1085

4.3.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Abbildung 11 zeigt eine Verringerung des THP durch die bessere Maschinenauslastung zwischen 0,1 und 0,4 %. Beim Modellbetrieb Anderes Rindvieh war die absolute Reduktion mit 1,87 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE am höchsten. Die anderen Betriebe bewegten sich im Bereich von 0,36 und 0,74 g CO₂-Äquivalente pro MJ vE. Bei allen Betrieben wurde die Reduktion weitgehend durch die Inputgruppe „Maschinen“ herbeigeführt. Es gab jedoch auch Reduktionen im Bereich „Gebäude und Einrichtungen“. Dies ist auf die Annahme zurück zu führen, dass bei einer Verringerung des Maschinenbestands weniger Garagenfläche benötigt wird und somit der Gebäudebedarf sinkt.

In Abbildung 12 ist ersichtlich, dass bei einer um 10 % verbesserten Maschinenauslastung vor allem die Umweltwirkungen Human- und Ökotoxizität von Nicht-Pestiziden, die aquatische Eutrophierung durch Phosphor, sowie der nicht-erneuerbare Energiebedarf gesenkt werden. Eine eventuelle Erhöhung des Treibstoffbedarfs durch die vermutlich zurück zu legenden zwischenbetrieblichen Distanzen wird hier allerdings nicht berücksichtigt.

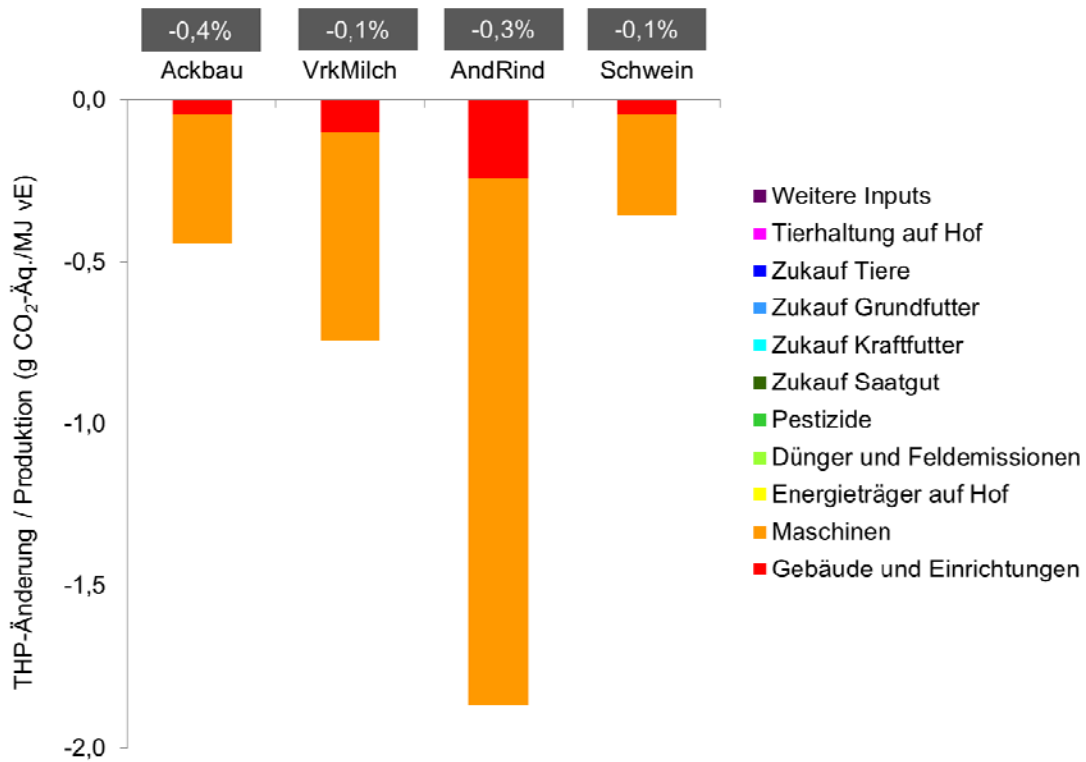


Abbildung 11: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Maschinenauslastung“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

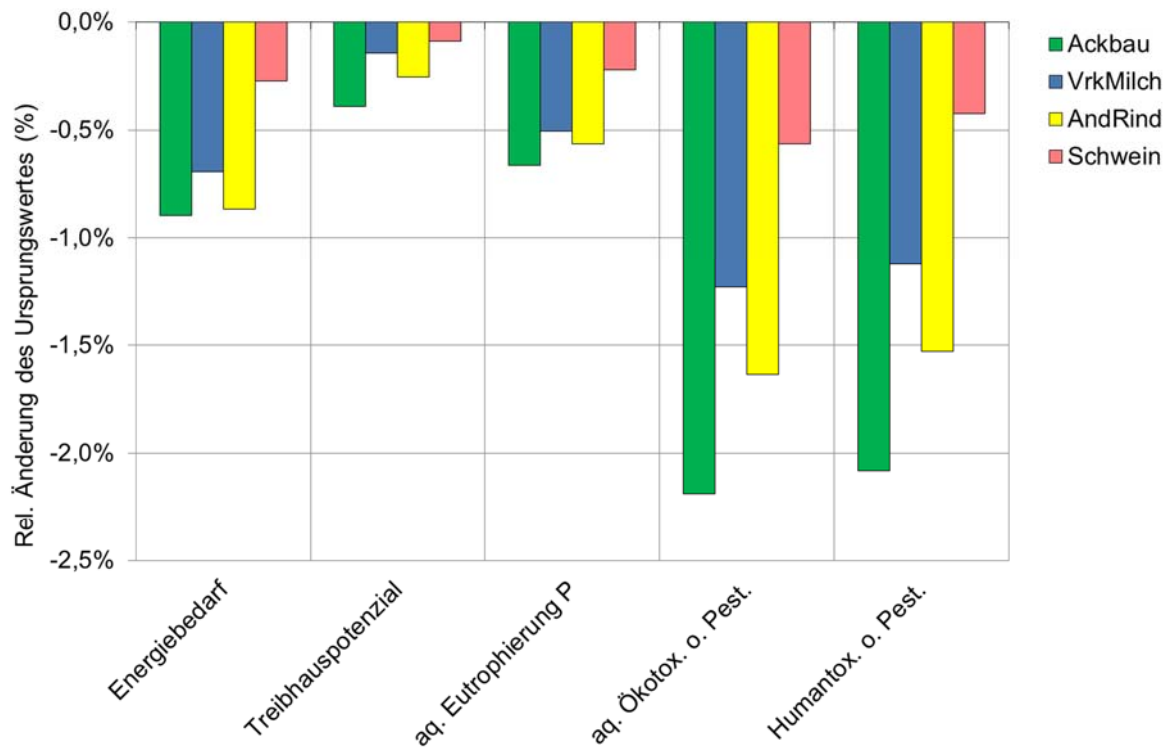


Abbildung 12: Wichtigste Effekte der Massnahme „Maschinenauslastung“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.3.3 Wirtschaftlichkeit

Mit durchschnittlich Fr. 44 421.- pro Referenzbetrieb (Hoop und Schmid (2014), die Angaben beziehen sich auf den Mittelwert der Jahre 2011-13) sind die Maschinenkosten die wichtigste Fremdkostenposition und machen knapp 22 % aller Fremdkosten aus.

Um abzuschätzen, inwiefern sich eine überbetriebliche Nutzung wirtschaftlich auswirkt, wurde die Maschinenauslastung ausgehend von den Werten der Modellbetriebe um 10 % reduziert, um zu den Werten der Referenz zu gelangen. Der effizientere Einsatz der Maschinen führte bei allen untersuchten Modellbetrieben zu Einsparungen bzw. einem mittleren jährlichen Gewinn (Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Massnahme „Optimale Maschinenauslastung“

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	483	424	273	307
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	1197	1974	670	1063
Risiko	Kosteneinsparungen vs. Verfügbarkeit			
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	2,48	4,66	2,46	3,46

Aufgrund der Vernachlässigung von Transaktionskosten (welche ggf. auch zusätzliche Arbeit einschliessen) stellen diese Werte jeweils die obere Grenze der möglichen Einsparungen dar. Insgesamt konnte der Modellbetrieb Ackerbau den zweithöchsten mittleren jährlichen Gewinn bei dieser Massnahme erwirtschaften. Dies liegt an der hohen Anzahl an verschiedenen Maschinen dieses Betriebstyps. Der Verkehrsmilchbetrieb sparte die grösste Summe ein. Dies liegt daran, dass dieser Modellbetrieb i) die höchste Anzahl an Maschinen und ii) die meisten Wiesen- und Weideflächen hat: Durch den überbetrieblichen Einsatz entstanden bei den Mähgeräten (Motormäher) sowie den Geräten zur Futterernte (Ladewagen, Rundballenpresse) hohe Einsparungen. Der Modellbetrieb Andere Rinder erzielte den geringsten mittleren jährlichen Gewinn bei dieser Massnahme. Dies liegt an der geringeren Anzahl an vorhandenen Maschinen sowie an den vergleichsweise kleinen Wiesen- und Weideflächen. Für den Schweine haltenden Betrieb ergab sich ein ähnliches Bild.

Bezüglich des Risikos entstehen bei der überbetrieblichen Nutzung von Maschinen unterschiedliche Vor- und Nachteile, deren Ausmass von der Organisation des Landwirts im Rahmen der überbetrieblichen Nutzung abhängig ist (Mietvertrag, Nachbarschaftshilfe etc., siehe dazu Anhang). Insgesamt stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Eine unmittelbare Verfügbarkeit und dementsprechend hohe Schlagkraft beim Eigenkauf einer Maschine muss gegen geringere Kosten bei der Maschinenmiete abgewogen werden. Entsprechend kann bei Umsetzung der Massnahme von einer Zunahme des Arbeitsaufwands ausgegangen werden (welcher in der Kalkulation unberücksichtigt blieb), da die Koordination der Maschineneinsätze auf unterschiedlichen Betrieben Zeit in Anspruch nimmt. Schliesslich spielen bei der gemeinschaftlichen Maschinennutzung auch psychologisch-soziale Hemmnisse eine Rolle (Aurbacher *et al.* 2011).

Da die CO₂-Einsparungen, die bei dieser Massnahme erreicht werden können, gering waren, fielen die Gewinne pro kg CO₂-Äquivalent recht hoch aus. Der Modellbetrieb Ackerbau verzeichnete zwar einen hohen jährlichen Gewinn, jedoch sparte dieser Betrieb bei Durchführung der Massnahme auch die höchsten Treibhausgasemissionen ein, weshalb sein CO₂-Reduktionsgewinn im Vergleich zu den anderen Betrieben gering ausfiel.

4.3.4 Diskussion

Die Massnahme zur optimalen Maschinenauslastung führte bei allen Betrieben zu einer Reduktion des Treibhausgasausstosses und zeigte des Weiteren positive Synergien mit dem Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien und Toxizität durch Nicht-Pestizide. Die Reduktion des Treibhauspotenzials ist dabei abhängig von der Art der benötigten Maschinen auf dem Betrieb und damit des Potenzials an überbetrieblicher Nutzung. So ist dieses Potenzial beim Betrieb AndRind am grössten und führt auch zu den grössten Einsparungen. Generell gilt die Schweizer Landwirtschaft als übermotorisiert und eine überbetriebliche Nutzung von Maschinen wäre sowohl aus wirtschaftlichen als auch ökologischen Gründen positiv (Gazzarin 2014h). Es existieren Tools für Landwirte, die bei der Abwägung zwischen Kauf, Miete und Lohnarbeit unterstützen (www.maschinenkosten.ch). Dabei sind, wie oben schon angedeutet, einige Maschinen für die überbetriebliche Nutzung geeigneter als andere. Des Weiteren ist die geographische Anordnung der Betriebe und auch der Maschinenringe wichtig. Bei zu grossen Distanzen würde der vermehrte Treibstoffbedarf den positiven Effekten durch die vermindert benötigte graue Energie allerdings entgegen stehen.

4.4 Installation von Sonnenkollektoren

4.4.1 Beschreibung der Massnahme

In der Schweizer Landwirtschaft wird der grösste Teil der Wärme mittels Holz erzeugt. Der zweitwichtigste Energieträger zur Wärmeerzeugung ist Heizöl (siehe Tabelle 12; (Henzen *et al.* 2012). Da der Ersatz von Holzheizungen durch Sonnenkollektoren aus Klimasicht keinen Sinn macht, wurde zur Ermittlung des Potenzials von Sonnenkollektoren mit einer Referenz von 100% Wärmeerzeugung mit Heizöl ausgegangen. Für die Massnahme werden auf der südexponierten Dachseite eines Stalls oder Lagergebäudes verglaste Röhrenkollektoren installiert. Das produzierte Warmwasser dient der Warmwasserversorgung (55°C) und der Heizung des Wohnhauses, was die Einrichtung eines neuen Kombispeichers bedingt. Zusätzlich wird Heisswasser (>75°C) für die Reinigung des Milchtanks produziert, wofür ein herkömmlicher Boiler benutzt, allenfalls sogar der alte Boiler übernommen werden kann. Als Referenzsituation gilt die Erwärmung des Warm- und Heisswassers durch Heizöl. Es wird also die Menge CO₂ reduziert, welche für die Herstellung der gleichen Warm- und Heisswassermenge mit der gleichen Temperatur durch Heizöl emittiert würde. Ausserdem wird ein Teil des Heizöls für die Heizung eingespart, sprich, es wird die Menge CO₂ reduziert, die für die Bereitstellung der gleichen Energie für die Heizung mit der gleichen Temperatur durch Heizöl emittiert würde.

Tabelle 12: Heizungsmix in der Schweizer Landwirtschaft, gemäss Henzen *et al.* (2012)

Energieträger	%
Holz	54
Heizöl	31
Elektrizität	6,5
Wärmepumpe	4,7
Gas	2,8
Fernwärme	0,5
Andere	0,2
Kohle	0,1
Sonnenkollektoren	0,1

Tabelle 13 zeigt die wichtigsten Kennzahlen für die Berechnung der Massnahme. Die Grösse der installierten Anlage wurde der benötigten Heisswassermenge angepasst. Diese wird durch die Anzahl Milchkühe definiert, wobei pro Kuh ein Wasserbedarf von 8 l pro Tag angenommen wurde (pers. Mitteilung M. Zähler, Agroscope 2015). Bei der Bestimmung des Heiz- und Warmwasserbedarfs des Wohnhauses wurde analog Henzen *et al.* (2012) von einem 4-Personen-Haushalt mit einem durchschnittlichen Warmwasserbedarf von 50 l pro Person und Tag ausgegangen (Bundesamt für Konjunkturfragen (BfK) 1995; Mathez 2012). Zur Modellierung des solaren Deckungsgrads der gesamten Warmwassermenge sowie der Abschätzung der Anzahl Tage mit einer Wassertemperatur von über 75°C diente die Solartoolbox (Solar Campus GmbH 2014) der Solar Campus GmbH. Es wurde angenommen, dass an Tagen mit einer Wassertemperatur von über 75°C der gesamte Heisswasserbedarf mit den Sonnenkollektoren gedeckt werden kann.

Der Heizbedarf für das Wohnhaus wurde aus Henzen *et al.* (2012) abgeleitet. Der gesamte Energieverbrauch (Warmwasserversorgung und Heizung) für ein landwirtschaftliches Wohnhaus beläuft sich dabei auf 34 MWh pro Jahr, davon wurden 30 kWh für die Heizung und 4 kWh für die Warmwassererzeugung veranschlagt. Anschliessend wurde der solare Deckungsgrad der Heizung mittels der Solartoolbox (Solar Campus GmbH 2014) abgeschätzt.

Tabelle 13: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme "Sonnenkollektoren"

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Fläche Sonnenkollektoren [m ²]	12	24	14	16
Ertrag der Anlage				
Heizung Wohnhaus [kWh/a]	3750	6270	4200	4650
(Deckung des Gesamtbedarfs)	(12,5 %)	(20,9 %)	(14,0 %)	(15,5 %)
Warmwasser Wohnhaus [l/a]	37 595	44 019	39 201	39 931
(Deckung des Gesamtbedarfs)	(51,5 %)	(60,3 %)	(53,7 %)	(54,7 %)
Heisswasser Melkkammer [l/a]	2400	35 360	5120	17 680
(Deckung des Gesamtbedarfs)	(41,1 %)	(46,6 %)	(43,8 %)	(46,6 %)
Einsparung Heizöl [l/a]				
Heizung & Warmwasser Wohnhaus	582	1124	693	800
Heisswasser Betrieb	5,6	82,2	11,9	41,1

4.4.2 Erzielte Treibhausgasreduktion

In Abbildung 12 ist die Treibhausgasreduktion pro produzierte verdauliche Energie der vier Modellbetriebe dargestellt. Die Reduktionen lagen zwischen 0,8 bis 2,2 % des gesamten THP der analysierten Betriebe. Sie waren bei allen Betrieben auf die Energieträger auf dem Hof, d.h. die Einsparung von Heizöl, zurück zu führen. Die grösste Reduktion wurde beim Betrieb Anderes Rindvieh erreicht mit 18 g CO₂-Äq/MJ vE und die geringste beim Ackerbaubetrieb mit 2 g CO₂-Äq/MJ vE.

In Abbildung 14 ist ersichtlich, dass diese Massnahme neben der Treibhausgasreduktion auch Reduktionen im Bereich des Energiebedarfs aufwies. Es gab jedoch auch Zunahmen gegenüber der Referenz, insbesondere im Bereich der aquatischen Eutrophierung sowie der Öko- und Humantoxizität durch Nicht-Pestizide. Dies lag an den Aufwendungen für die Produktion der Sonnenkollektoren. Die höchste

Zunahme war beim Betrieb Anderes Rindvieh in der Kategorie der aquatischen Ökotoxizität durch Nicht-Pestizide zu verzeichnen.

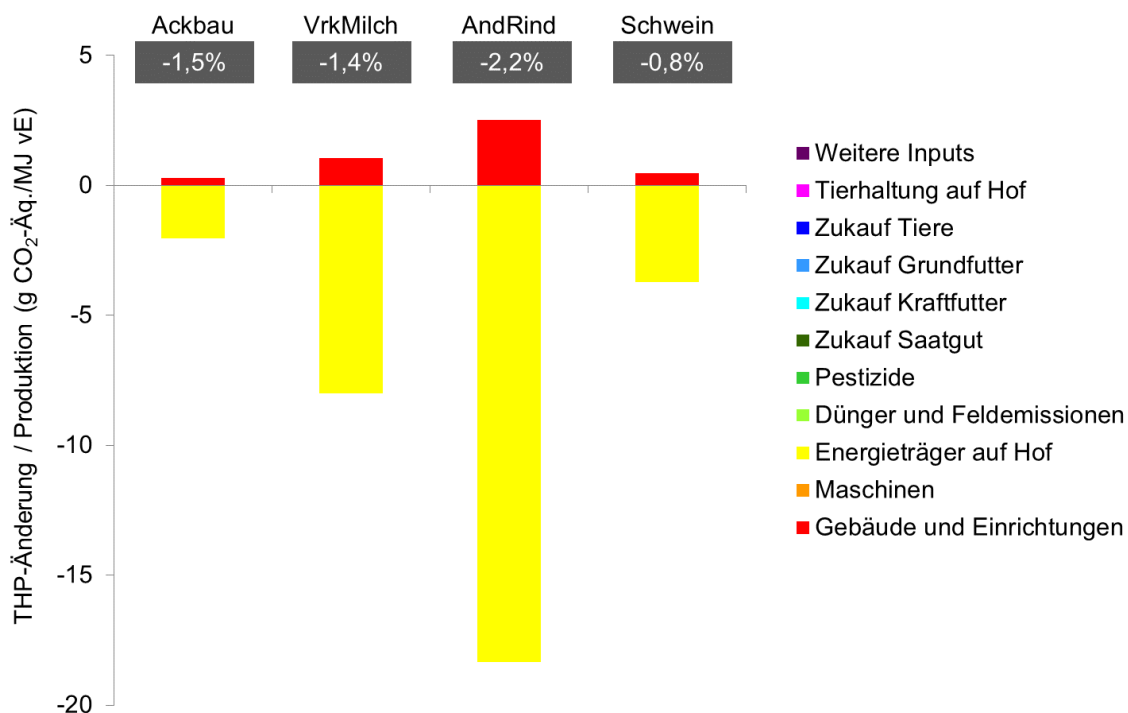


Abbildung 13: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Sonnenkollektoren“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

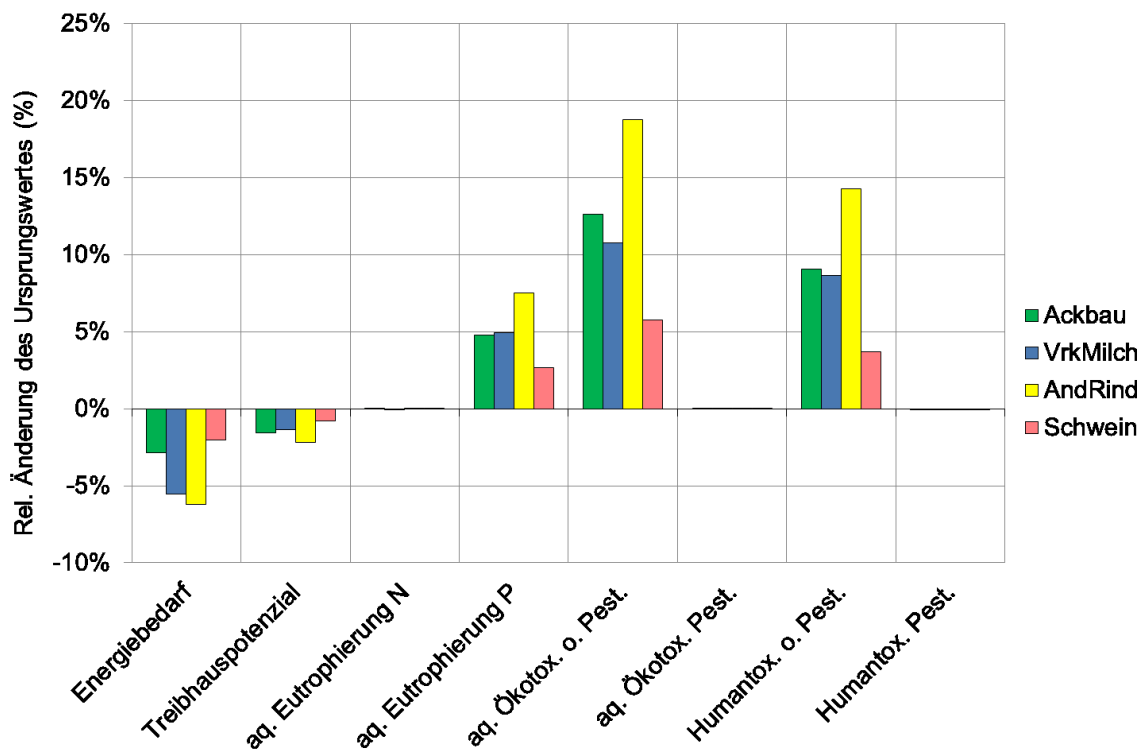


Abbildung 14: Wichtigste Effekte der Massnahme „Sonnenkollektoren“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.4.3 Diskussion

Der Einbau von Sonnenkollektoren führte zu relativ grossen Treibhausgaseinsparungen. Dies hat mit der Art des ersetzten Energieträgers zu tun: In der Modellierung der Massnahme wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Heisswassererzeugung auf dem Betrieb sowie die Warmwassererzeugung und Heizung im Wohnhaus mit Heizöl betrieben wird. Dieses weist ein relativ grosses Treibhauspotenzial (THP) auf, und dessen Ersatz führt zu deutlichen THG-Einsparungen. Wie in Kapitel 4.4.1 erwähnt, wird gemäss Henzen *et al.* (2012) über 50 % der Heizungsenergie in der Schweizer Landwirtschaft durch Holz erzeugt. Heizöl ist mit gut 30 % nur der zweitwichtigste Energieträger. Die Umsetzung der Massnahme macht aber nur Sinn, wenn damit fossile Energieträger wie eben Heizöl ersetzt werden können. Holz ist für sich treibhausgasneutral, dessen Ersatz durch eine Sonnenkollektoranlage ist demzufolge nicht anzustreben. Ein kleiner Teil der Heizenergie für die Schweizer Landwirtschaft wird auch mittels Strom erzeugt. Da der Schweizer Strommix ein sehr viel geringeres THP aufweist als Heizöl, würde ein Ersatz von Strom durch Sonnenkollektoren ein viel geringeres Reduktionspotenzial erzeugen. Dies wäre auch der Fall, wenn z.B. die Warm- oder Heisswassererzeugung durch Strom erfolgte.

Daneben gibt es bei dieser Massnahme noch einige Unsicherheiten in den vorgenommenen Berechnungen des Energieverbrauchs für das Warmwasser und die Heizung des Wohngebäudes. Diese wurden mit der Solar-Toolbox (www.solar-toolbox.ch) durchgeführt und dürften gemäss Experten-aussage der Praxis gut entsprechen (pers. Mitteilung S. Mathez, 2015). Bezüglich der Erträge für das Heisswasser (75°C) und der optimalen Regelung der Heisswasserproduktion für den Betrieb und der Wärmeproduktion für das Wohnhaus müssten aber noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die aufgeführten Zahlen verstehen sich als grobe Abschätzung und die realen Werte für einen spezifischen Landwirtschaftsbetrieb könnten unter Umständen stark von den angegebenen Werten abweichen (pers. Mitteilung S. Mathez, 2015).

Die negativen Wirkungen auf aq. Eutrophierung P sowie die aq. Ökotoxizität und die Humantoxizität durch Nicht-Pestizide stammen aus der Produktion der Sonnenkollektoren. Zur Verminderung dieser Trade-offs ist eine möglichst lange Lebensdauer der Kollektoren anzustreben.

4.5 Installation einer Photovoltaikanlage

4.5.1 Beschreibung der Massnahme

Die meist grossflächigen Dächer landwirtschaftlicher Nutzgebäude sind eine günstige Voraussetzung für die Installation von Photovoltaikanlagen, und bieten die Möglichkeit, den produzierten Strom zu einem garantierten Preis (AgroCleanTech 2011; BFE 2015) ins Stromnetz einzuspeisen. Die Treibhausgasreduktion dieser Massnahme beruht auf der Kompensation von Schweizer Standard Strom-Mix (Anteile verschiedener Kraftwerkstypen entsprechend Schweizer Stromproduktion), sprich, es wird die Menge CO₂ reduziert, die für die Herstellung der gleichen Strommenge durch Schweizer Standard Strom-Mix emittiert wird (ecoinvent Centre 2010). Zudem werden durch diese Kompensation Ressourcen, wie z.B. Uran oder Beton (Kraftwerkgebäude), eingespart, die für die Generierung des Stroms erforderlich sind.

Für die Analyse dieser Massnahme galten folgende Annahmen: Auf der südexponierten Seite (halbe Dachfläche) der grössten zu Verfügung stehenden Dachfläche eines Betriebstyps werden Auf-Dach-PV-Panels installiert. Anhand der Modellbetriebe und deren Baupläne lässt sich die Masse der grössten, verfügbaren Dachfläche ableiten (Tabelle 14: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme " Installation einer Photovoltaikanlage "). Der durch die PV-Anlage produzierte Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Die Analyse betrachtet einen Zeithorizont von 20 Jahren, welcher vor allem für Leistungsabnahme (Degradation) und die Abschreibung der Herstellungsemissionen der PV-Anlage Bedeutung hat (Gazzarin *et al.* 2008).

Tabelle 14: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme " Installation einer Photovoltaikanlage "

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Dachfläche (m ²)	142	415	158	165
Anzahl PV-Panels (Stück)	58	166	63	66
PV-Typ	monokristalline Si-Solarzellen			
Leistung (Watt peak=Wp)	340 Wp/Panel (ecoinvent Centre 2010)			

4.5.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Mit der „Installation von Photovoltaikanlagen“ erzielten die Modellbetriebe eine Treibhausgasreduktion zwischen 0,11 (Ackbau) und 0,73 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (VrkMilch; Abbildung 15). Bezogen auf die gesamte betriebliche Produktion (MJ vE) entsprach dies einem Reduktionspotenzial zwischen 0,24% und 0,93%.

Auf andere Umweltwirkungen hatte die Massnahme vorwiegend eine reduzierende Wirkung (Abbildung 16). Es wurden vor allem der Energiebedarf (8 bis 38%), der Wasserbedarf (3 bis 7%) die aquatische Eutrophierung P (1 bis 10%) und die aquatische Ökotoxizität Nicht-Pestizide (1 bis 14%) verringert. Bei der Humantoxizität Nicht-Pestizide kam es neben eine Reduktion bei VkrMilch (5%) zu leichten Erhöhungen bei den anderen Betrieben (max. 1% bei Ackbau).

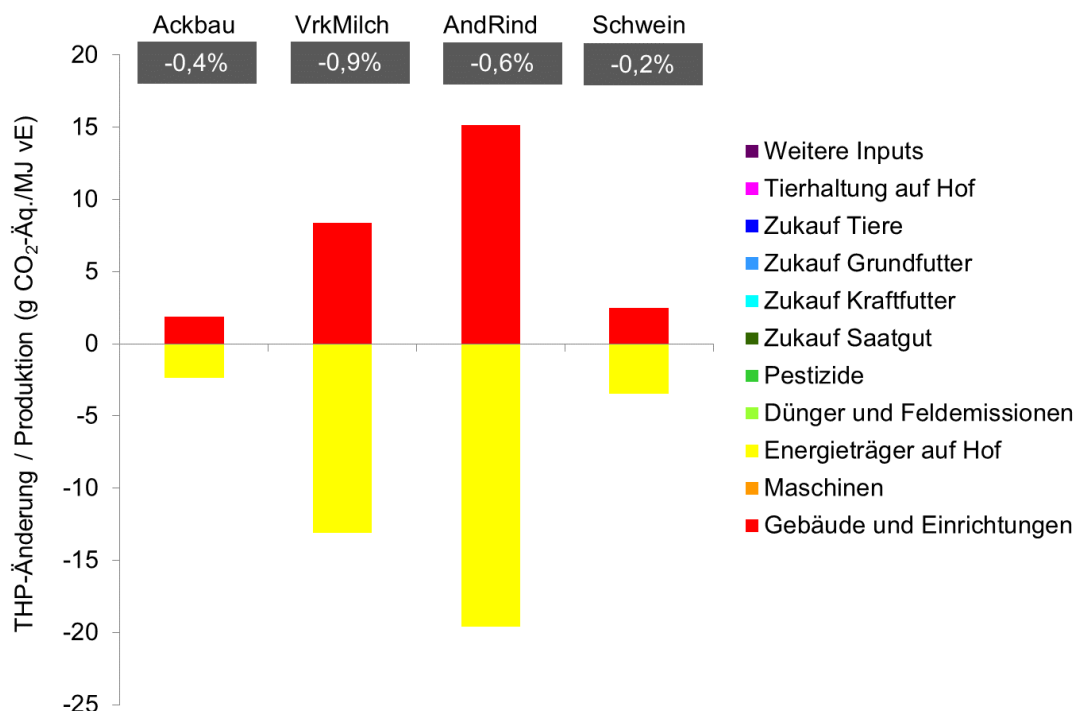


Abbildung 15: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Photovoltaik“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

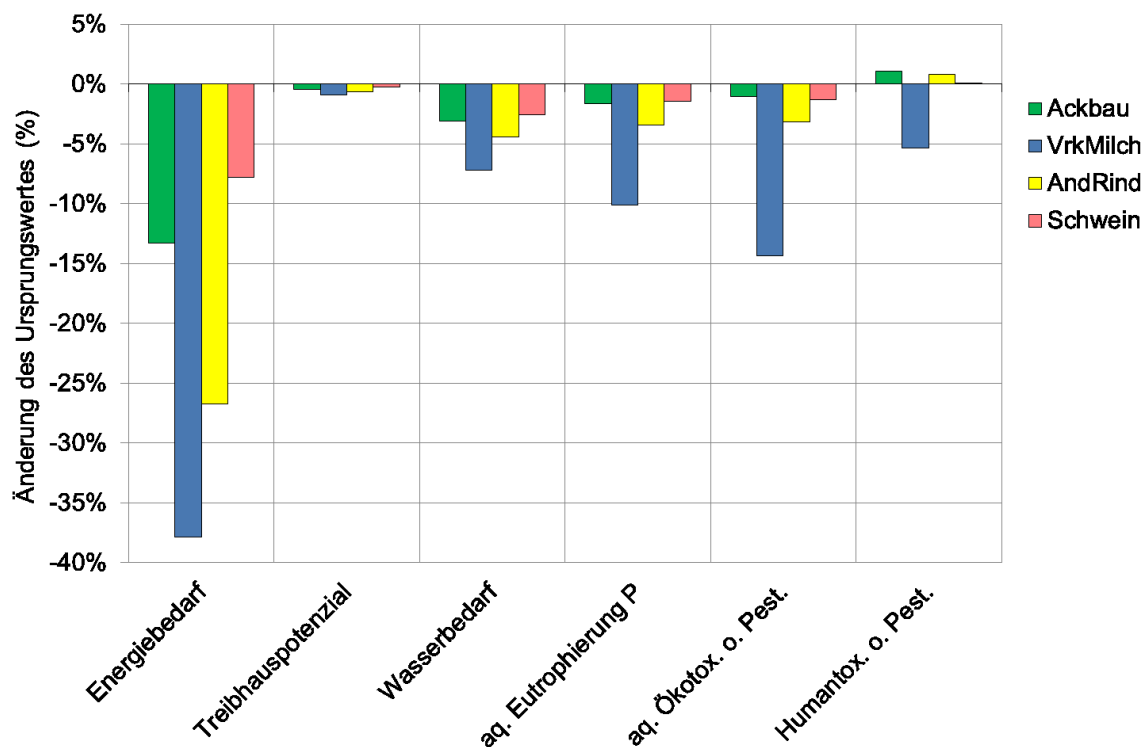


Abbildung 16: Wichtigste Effekte der Massnahme „Photovoltaik“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.5.3 Wirtschaftlichkeit

Die Berechnung zur Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung basierte auf der Annahme, dass der Landwirtschaftsbetrieb während der 20-jährigen Laufzeit der PV-Anlage eine kostendeckende Einspeisevergütung ab dem 5. Jahr nach der Inbetriebnahme erhält (Schmid 2015). Betreiber einer PV-Anlage haben die Möglichkeit, den erzeugten Strom selbst zu verbrauchen (Einsparung des Strombezugs mit Kosten zwischen Rp. 18,6 und 21,4/kWh je nach Modellbetrieb) oder gegen Entgelt ins Netz einzuspeisen (mit KEV: Rp. 17,7 bzw. 20,4/kWh; ohne KEV: Rp. 8,1/kWh). Die Grössen der Anlagen waren dabei von den Stalldachflächen der Modellbetriebe abhängig, wobei der Modellbetrieb Verkehrsmilch die grösste Dachfläche zur Verfügung hatte. Bei den Berechnungen wurde für den möglichen Eigenverbrauch lediglich der Strombedarf des Betriebes, nicht aber der des privaten Wohnhauses berücksichtigt. Die durchschnittlichen Netzanschlusskosten wurden in die Berechnungen einbezogen (Nowak und Biel 2012).

Die Installation einer PV-Anlage war unter den getroffenen Annahmen für keinen Modellbetrieb wirtschaftlich (Tabelle 15). Die jährlichen Verluste (absolut) nahmen mit der Anlagengrösse zu und waren beim Milchviehbetrieb am höchsten. Bezogen auf das vermiedene THG wies innerhalb der Modellbetriebe die grosse Anlage des Verkehrsmilchbetriebs allerdings die geringsten Kosten auf (Fr. 0.83 je vermiedenes kg CO₂-Äquivalent). Dies ist auf die bei einer grossen Anlage geringeren Kosten je m² Solarfläche zurückzuführen. Die höchsten Vermeidungskosten wies der Modellbetrieb Ackerbau auf, mit Fr. 1,64 je kg CO₂-Äquivalent. Dieser Betrieb hat die kleinste Anlage.

Ein entscheidender Punkt für die Rentabilität der Anlage ist deren Nutzungsdauer. Je länger eine Photovoltaikanlage genutzt werden kann, desto grösser ist der Kapitalwert (Gegenwartswert der jährlichen Gewinne). Die dieser Kalkulation zugrunde gelegte Nutzungsdauer von 20 Jahren ist eine konservative Annahme. Bei einer längeren Nutzung wird die Wirtschaftlichkeit stärker vom Eigenverbrauchsanteil des erzeugten Stroms beeinflusst (gemäss dem gegenwärtigen Preisverhältnis ist es vorteilhaft, den selbsterzeugten Strom selbst zu verbrauchen); dieser hing stark vom Betriebstyp ab und

ist beim Modellbetrieb Schweine am höchsten (siehe Anhang). Die alternative Option einer Einmalvergütung war unter den getroffenen Annahmen (Nutzungsdauer, Eigenverbrauchsanteil) für keinen Modellbetrieb attraktiver als der Bezug von KEV ab Jahr 5 (Ergebnisse hierzu siehe Anhang).

Tabelle 15: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Photovoltaik" für die untersuchten Modellbetriebe (gemäss Energieverordnung 2015, KEV ab Jahr 5).

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	516	2725	649	835
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-845	-2267	-933	-874
Investitionssumme [Fr.]	50 837	127 943	56 656	58 976
Investitionssumme/mittlere jährliche Investitionssumme (2009-2013) [%]	93 %	202 %	137 %	86 %
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-1,64	-0,83	-1,44	-1,05

Bei den Kalkulationen wurde vereinfachend von einem konstanten Strompreis ausgegangen. Die zukünftige Entwicklung der Strompreise wie auch der Förderung im Rahmen der Energieverordnung ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Die Rentabilität der Anlage steigt grundsätzlich mit dem Energiepreis. Die Unsicherheiten ergeben sich aufgrund gegenläufiger Tendenzen: Zwar kann einerseits, aufgrund der erhöhten Energieeffizienz, mit einer sinkenden Energienachfrage und damit von sinkenden Energiepreisen ausgegangen werden; andererseits haben erhöhte Investitionen im Energiesektor steigende Energiepreise zur Folge (International Energy Agency 2014). Die KEV-Sätze weisen eine deutlich sinkende Tendenz auf, die Wartezeit (zwischen Meldung und Erhalt der KEV) wird dagegen länger und damit steigt die Unsicherheit. Aufgrund der letzten Senkung der KEV-Sätze ergeben sich für die Wirtschaftlichkeitsanalyse ebenfalls keine positiven mittleren jährlichen Gewinne, selbst wenn die KEV direkt ab dem ersten Jahr ausbezahlt würde. Berücksichtigt man diese Tendenzen, so könnte zukünftig die Einmalvergütung kleiner Photovoltaikanlagen (Bundesamt für Energie (BFE) 2015) stärkere Bedeutung erlangen, gerade bei einem hohen Eigenverbrauchsanteil am produzierten Strom.

4.5.4 Diskussion

Die Höhe der absoluten Treibhausgasreduktion pro Betrieb hing unmittelbar von der produzierten Menge Strom und somit von der Panel-, bzw. zugewiesenen Dachfläche ab (Tabelle 14). Proportional zur Panelfläche steigen die Herstellungsemissionen (Inputgruppe „Gebäude und Einrichtung“) der Photovoltaikanlagen. Die relative Wirkung der Massnahme wurde durch den Bezug auf die gesamtbetriebliche Emission und Produktion (Referenzeinheit) leicht beeinflusst: Der Modellbetrieb Ackerbau wies trotz kleinerer PV-Anlage eine grössere THG auf, als der Modellbetrieb Schwein (Abbildung 15; siehe auch Kapitel 3.1.4 Referenzeinheit und Abbildung 4;). Der Modelbetreib Ackerbau wies, im Vergleich zu den anderen Modelbetrieben, die geringsten THG-Emissionen pro MJ vE auf. Hierdurch kam es durch die Installation einer Photovoltaikanlage zu der grössten Steigerung der THG-Effizienz. Verglichen mit existierenden Aufdach-PV-Anlagen waren die berechneten Dachflächen der Modellbetriebe Ackbau (142 m²), AndRind (158 m²) und Schwein (165 m²) eher klein. Entsprechend handelt es sich hier auch eher um eine konservative Abschätzung, so dass das Reduktionspotenzial für viele Landwirtschaftsbetriebe wohl deutlich höher einzustufen ist. Zudem ist eine Laufzeit von 20 Jahren für

die Abschreibung der PV-Anlage relativ knapp bemessen und somit ebenfalls als konservativer Wert einzustufen. Eine längere Laufzeit würde den jährlichen Anteil der Herstellungsemissionen („Gebäude und Infrastruktur“) reduzieren und somit die THG-Reduktion erhöhen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Installation einer Photovoltaikanlage unter ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll, aber unter aktuellen Bedingungen nicht wirtschaftlich ist.

4.6 Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien

4.6.1 Beschreibung der Massnahme

Der Schweizer Wald gilt zurzeit als unternutzt, d.h. die Holznutzung könnte weiter gesteigert werden, ohne die Nachhaltigkeit im Schweizer Wald zu gefährden (Hofer 2011; Thees *et al.* 2014). Diese Massnahme zielt auf die vermehrte Nutzung des Waldes ab: es wird berechnet, wieviel Energieholz bzw. Holzschnitzel durchschnittlich auf den bewaldeten Flächen der Landwirtschaftsbetriebe gewonnen werden könnte, um Heizöl zu ersetzen.

Zur Berechnung der Massnahme wurden die durchschnittlichen Waldflächen der Betriebstypen aus dem Grundlagenbericht (Hoop und Schmid 2014) den Modellbetrieben zugeordnet und eine bisherige Nutzung des Waldes von 3.3 Srm/ha/a (Schüttraummeter pro Hektar und Jahr) angenommen (Pelz 2007, www.energieholz-goepfingen.de). In der Massnahme wird die Nutzung auf 5 Srm/ha/a hochgesetzt, in der Annahme, dass diese Mehrnutzung innerhalb der Nachhaltigkeits-Grenzen bleibt. Die nicht auf dem Betrieb verfeuerten Anteile Energieholz werden weiterverkauft und als ersetztes Heizöl dem Betrieb gut geschrieben.

Auch bei dieser Massnahme wird mit einem Szenario verglichen, bei dem die gewonnene Wärmeenergie zu 100% jene aus Heizöl ersetzt. Wie im Kapitel zur Massnahme Sonnenkollektoren (vergleiche Kapitel 4.4) schon beschrieben, entspricht dies nicht der Schweizer Realität. Heizöl kommt nach Holz erst an zweiter Stelle der verwendeten Energieträger für Heizungen. (siehe Tabelle 12; Henzen *et al.* 2012). Wird mehr Holz verbrannt, kann davon ausgegangen werden, dass es vorwiegend Heizöl ersetzt.

4.6.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Treibhausgasreduktionen für die Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien liegen je nach Betrieb zwischen 0,5 (Ackbau) und 11,6 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (AndRind) (Abbildung 17). Die geringste prozentuale Reduktion wurde mit 0,3 % beim Modellbetrieb Schweine erreicht; die grösste beim Modellbetrieb Anderes Rindvieh mit 1,7 %. Diese Unterschiede beruhen auf den unterschiedlichen Waldflächen der Modellbetriebe im Verhältnis zu der benötigten Heizkraft auf dem Betrieb. Bei allen Betrieben war die Reduktion auf die Kategorie „Energieträger auf Hof“ zurückzuführen, da Heizöl ein Bestandteil dieser ist.

Neben der Treibhausgasreduktion bewirkte die Massnahme auch eine Reduktion beim Energiebedarf (siehe Abbildung 18). Trade-offs zeigte die Massnahme keine, sie führte zu kleinen Verbesserungen in den, durch Nicht-Pestizide verursachten Toxizität. Die grössten Effekte zeigte die Massnahme bei den Betrieben, wo mehr als das selbst benötigte Energieholz gewonnen werden kann und somit Heizöl gut geschrieben werden konnte.

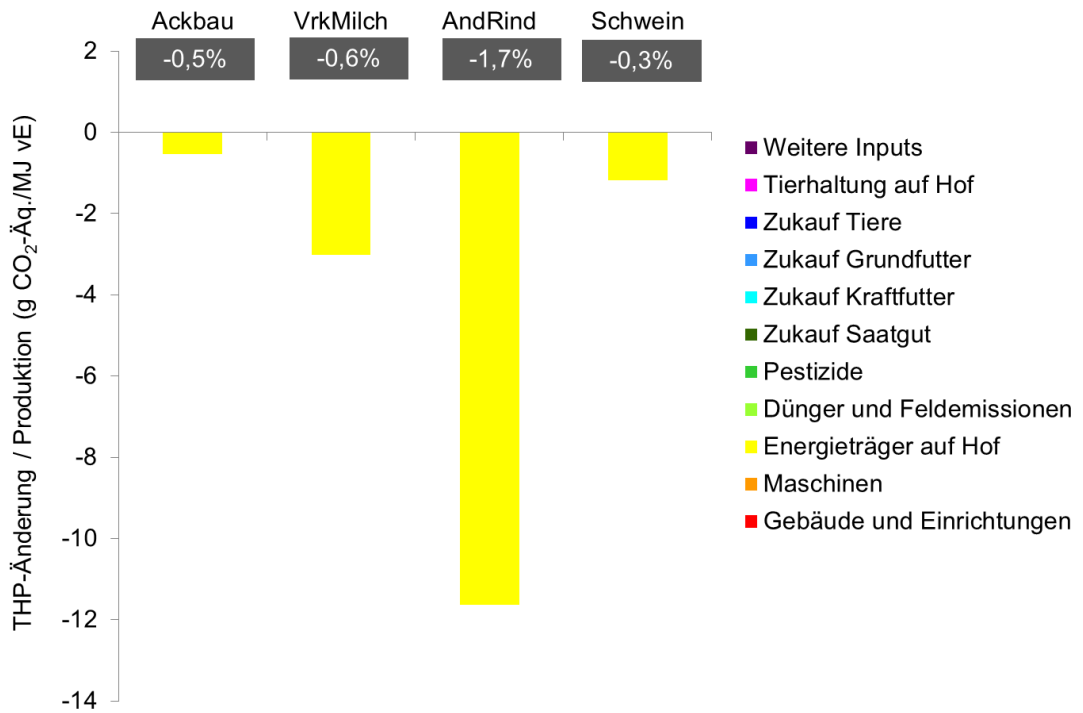


Abbildung 17: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Waldbewirtschaftung“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

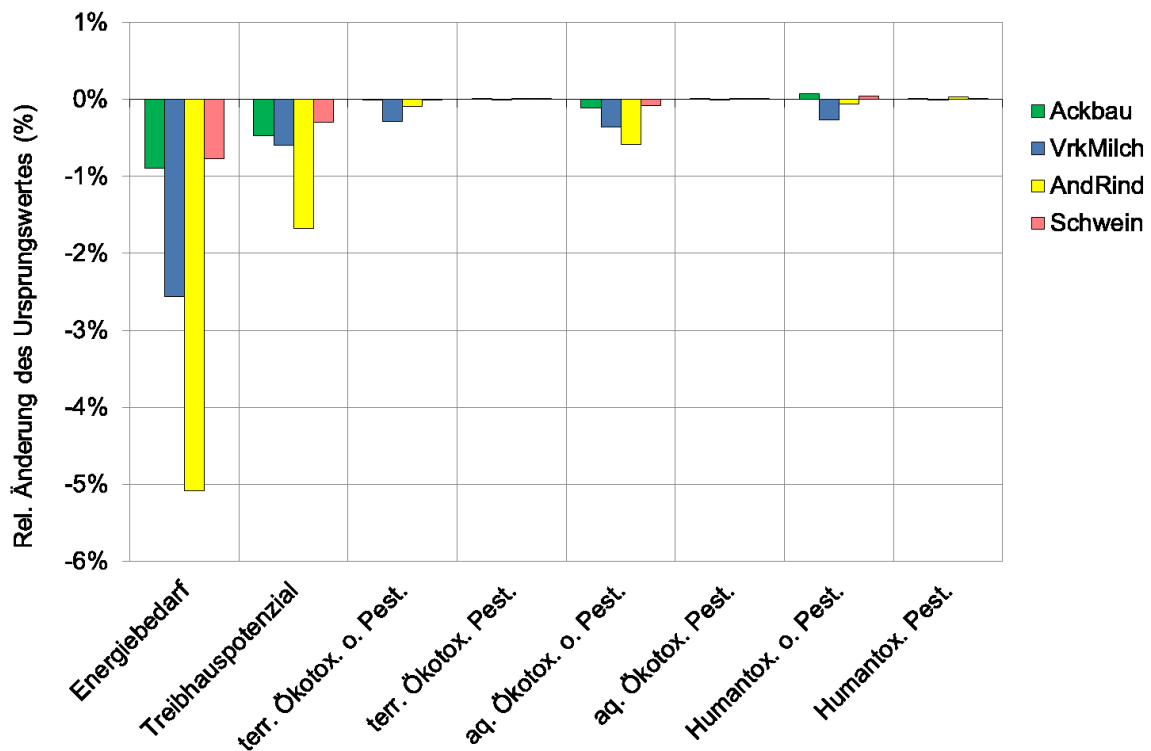


Abbildung 18: Wichtigste Effekte der Massnahme „Waldbewirtschaftung“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.6.3 Diskussion

Der Ersatz von Heizöl durch Energie aus Holz verringerte das THP der Modellbetriebe sowie den Bedarf an nichterneuerbaren Energien und zeigte keine negativen Effekte auf andere Umweltwirkungen. Wie schon in Kapitel 4.4 diskutiert ist Holz schon jetzt die bedeutendste Wärmequelle in der Schweizer Landwirtschaft (vergl. Tabelle 12, Henzen et al, Kapitel 4.4.). Eine Vergrösserung dieses Anteils durch weitere Holzheizungen bzw. Sonnenkollektoren um Heizöl zu ersetzen ist erstrebenswert. Dabei ist die Erweiterung des Holzanteils einfacher zu erlangen als eine komplette Neuetablierung von Holzheizungen. Eine vermehrte Nutzung des Schweizer Waldes kann zudem im Sinne der nachhaltigen Waldbewirtschaftung sein.

4.7 Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen

4.7.1 Beschreibung der Massnahme

Diese Massnahme wurde zusätzlich für den Modellbetrieb Geflügel berechnet, da dieser über eine grössere Fläche beheizter Ställe verfügt. Heizung und Lüftung eines Stalles stellen einen grossen Anteil am Gesamtenergiebedarf von beheizten Ställen in der Schweine- und Geflügelhaltung dar (Van Caenegem 2010). Die Lüftung ist dabei für den Hauptteil der Wärmeverluste verantwortlich. Van Caenegem (2010) zeigten, dass sich mit einer Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) der Heizbedarf bei Schweinemastbetrieben drastisch reduzieren lässt. Bei Geflügelställen ist eine Senkung des Heizenergiebedarfs von über 50 % leicht möglich (pers. Mitteilung D. Stauffer, 2015).

Tabelle 16: Auflistung des Bedarfs an Elektrizität, Heizmaterial und Wasser der Tierhaltung der vier Modellbetriebe Ackerbau, Verkehrsmilch, andere Rinder und Schweinemast mit und ohne Wärmerückgewinnungsanlage (WRG), sowie des Modellbetriebs Geflügel.

	Elektrizität, MJ	Heizmaterial*, MJ	Wasser, kg
Ackbau	15 731	8493	65 520
Ackbau + WRG	16 712	3397	68 323
VrkMilch	66 890	2384	476 880
VrkMilch + WRG	67 566	954	478 836
AndRind	24 608	0	113 760
AndRind + WRG	24 608	0	113 760
Schwein	182 013	43 532	503 360
Schwein + WRG	198 890	17 413	550 781
Geflügel	231 877	170 679	631 920
Geflügel + WRG	254 793	68 272	703 971

* In den Modellbetrieben ist leichtes Heizöl als Heizmaterial angegeben (vgl. Kap. 4.4. und 4.6., sowie Diskussion weiter unten).

Für die Berechnungen wurde angenommen, dass die Plätze der Schweine (Mastsauen und Zuchtsauen) und des Geflügels (Legehennen und Mastpoulets) in den Modellbetrieben beheizt werden. Der Energieanteil dieser Plätze (für diese Tierarten) wird nach Van Caenegem (2010) durch den Einbau einer WRG wie folgt geändert: 20 % mehr Lüftungsenergie (wobei die Lüftungsenergie 60 % des gesamten Elektrizitätsbedarfs darstellt, d.h. 12 % mehr elektrische Energie des gesamten Betriebs), 60 % weniger Heizenergie, 1,46 m³ mehr Wasserverbrauch pro Jahr und GVE für die Reinigung der Anlage. Der Einbau einer WRG wird in den SALCA-Berechnungen mangels eines treffenden Inventars

über eine 5 %-ige Vergrößerung der Stallanlagen der betreffenden Tierarten dargestellt. Die so veränderten Inventare werden im Vergleich zu den Modellbetrieben gerechnet. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Zudem wurden bei dieser Massnahme die Werte für den Bedarf je GVE an Elektrizität, Heizmaterial und Wasser in den Modellbetrieb so angepasst, das sie bei der gleichen Tierart in allen Modellbetrieben gleich sind. Dadurch kommt es zu kleineren Abweichungen zwischen Tabelle 7 und Tabelle 16.

4.7.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Da bei dieser Massnahme lediglich auf Schweine- und Geflügel-Betrieben grössere beheizte Stallungen vorhanden sind, in denen eine WRG installiert wird, waren die grössten Treibhausgasreduktionen bei den beiden Modellbetrieben Schweine und Geflügel zu finden (siehe Abbildung 19). Bei den Modellbetrieben Ackerbau und Verkehrsmilch waren die Reduktionen entsprechend kleiner, da diese viel weniger beheizte Schwein- und Geflügel-Ställe haben. Der Betrieb Anderes Rindvieh war nicht von dieser Massnahme betroffen, da er keine beheizten Stallungen hat. Alle Reduktionen betreffen durch den Ersatz von Heizöl die Inputgruppe Energieträger auf dem Hof. Eine Zunahme der THGE ist in der Kategorie „Gebäude und Einrichtungen“ zu verzeichnen, wobei die Zunahmen bei den Schweine- und Geflügel-Mast-Betrieb am höchsten sind mit 0,3 mg und 0,4 mg CO₂-Äq. / MJ vE.

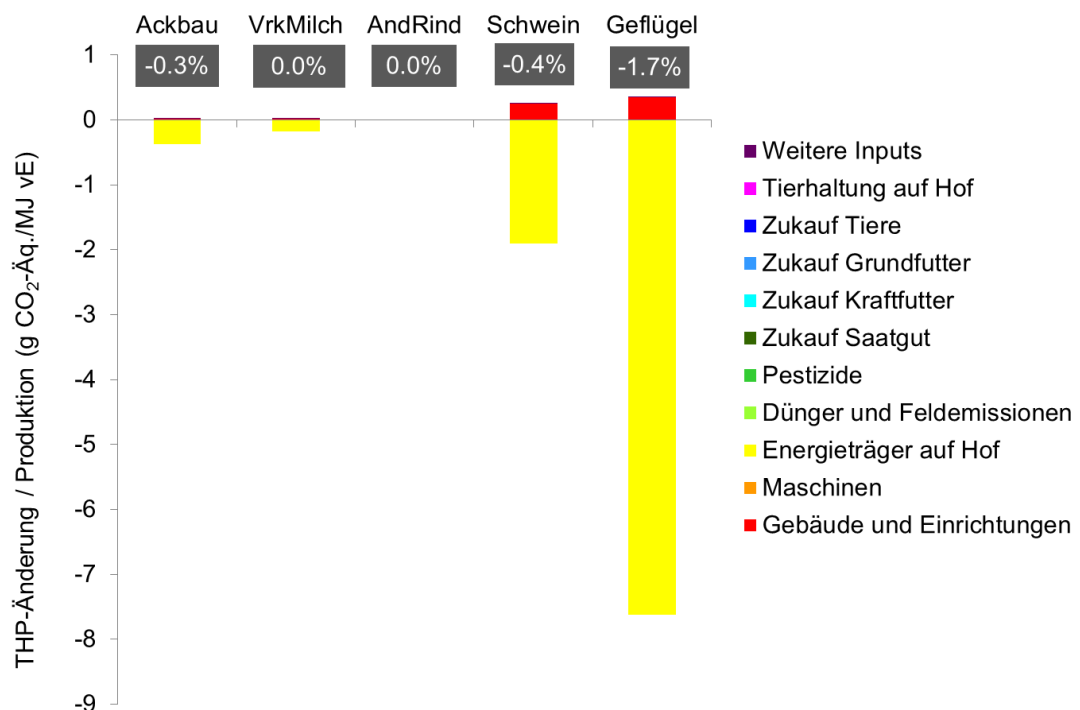


Abbildung 19: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Wärmerückgewinnung“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

Die relativen Auswirkungen auf andere Umweltwirkungen sind in Abbildung 20 dargestellt. Bezüglich des Bedarfs an nicht erneuerbaren Energien gibt es Betriebe, bei denen Synergien erzielt wurden (Ackbau und Geflügel), aber auch solche, in denen ein geringes Trade-off stattfand (VrkMilch und Schwein). Diese Umweltwirkung wird stark durch den Bezug elektrischen Stroms bestimmt, so dass hier die relativ kleine Vergrößerung des Strombedarfs zu einer Vergrößerung der Umweltwirkung führte. Der zusätzliche Wasserbedarf ist durch den zusätzlichen Reinigungsbedarf zu erklären. Bei den

Umweltwirkungen aquatischer Eutrophierung P und der Toxizität der Nicht-Pestizide waren wiederum der Bezug von elektrischem Strom sowie auch der vergrösserte Infrastrukturbedarf ausschlaggebend.

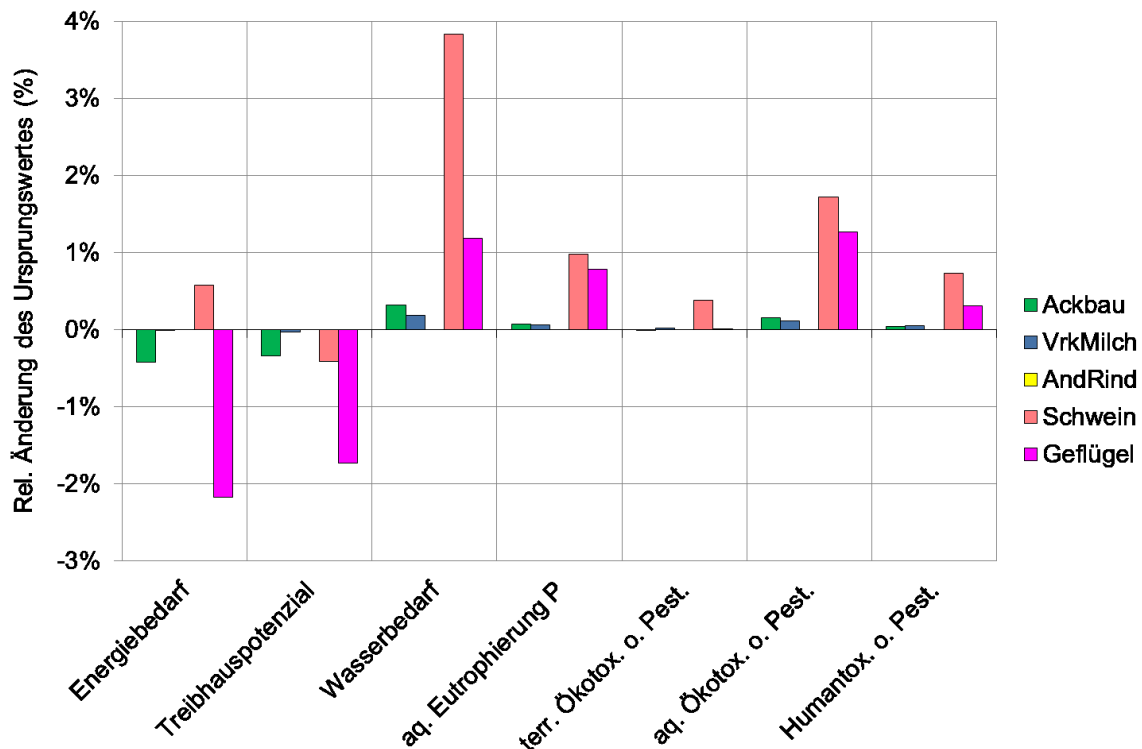


Abbildung 20: Wichtigste Effekte der Massnahme „Wärmerückgewinnung“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.7.3 Wirtschaftlichkeit

Bei dieser Massnahme wurde bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse von der Betrachtung aller Modellbetriebe abgesehen. Dies lag daran, dass die Modellbetriebe Ackerbau und Verkehrsmilch über nur sehr kleine, in der Regel unbeheizte, Stallflächen verfügen. Bei kleinen Stallflächen wird von Herstellerseite grundsätzlich vom nachträglichen Einbau einer WRG abgeraten. Bei der Massnahme wurden entsprechend nur der Modellbetrieb Schweinehaltung sowie ein weiterer Betriebstyp, nämlich der Geflügel haltende Modellbetrieb betrachtet.

Während der Schweine haltende Modellbetrieb über eine beheizte Stallflächen von 254 m² verfügte (32 GVE), verfügte der Geflügel haltende Betrieb über beheizte Stallflächen von 864 m² (49 GVE). Aufgrund der voneinander abweichenden Stallgrössen waren die Kosten, die bei der Nachrüstung mit einer WRG anfallen, unterschiedlich hoch. Während beim kleineren Stall eine Nachrüstung mit sogenannten Wärmemodulen möglich war, sind ab einer Stallgrösse von 400 m² mehrere solcher Wärmemodule notwendig. Alternativ bestand auch die Möglichkeit, einen Wärmetauscher einzubauen. Entsprechende Unterschiede liessen sich bei den Investitionshöhen ausmachen. Da eine Belüftungsanlage in den Ställen, die mit einer WRG nachgerüstet wurden, bereits vorhanden war, wurden die Kosten der Lüftung aus den Angeboten herausgenommen. Dies war notwendig, um die eingeholten Angebote für Wärmerückgewinnungsanlagen vergleichen zu können. Einsparungen wurden bei der Heizenergie (um 60 %) erzielt, wohingegen ein Anstieg von 20 % bei der notwendigen Energie für die Lüftung in Kauf genommen werden musste. Auch wurde von einem ansteigenden Wasserbedarf um 1,46 m³ pro beheizte GVE im Jahr ausgegangen.

Den jährlichen Kosten, die für den Bau und den Unterhalt der Wärmerückgewinnungsanlage anfielen, standen im Bereich Energie und Wasser lediglich beim Modellbetrieb Geflügel Einsparungen gegenüber (Tabelle 17). Insgesamt fallen diese Einsparungen jedoch zu niedrig aus, als dass bei Umsetzung der Massnahme ein mittlerer jährlicher Gewinn entstand.

Tabelle 17: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen" für die untersuchten Modellbetriebe

	Schwein	Geflügel
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	1408	7804
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-2223	-7030
Investitionssumme [Fr.]	14 625	61 500
Investitionssumme/mittlere jährliche Investitionssumme 2009-13 [%]	21 %	90 %
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-1,58	-0,9

Vor allem für den Geflügel haltenden Betrieb waren die mittleren jährlichen Kosten, die bei der nachträglichen Installation einer Wärmerückgewinnungsanlage anfielen, hoch. Dies liegt daran, dass die Investitionen infolge der grösseren Stallfläche wesentlich höher ausfielen als beim Schweine haltenden Betrieb. Im Vergleich zum Schweine haltenden Betrieb konnte der Geflügel haltende Betrieb aber jährliche Einsparungen beim Verbrauch von Wasser und Energie durch den Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage erzielen.

4.7.4 Diskussion

Der Einbau einer WRG Anlage zielt auf die Reduktion des Heizölbedarfs und damit auf eine Senkung des THP. Es zeigte sich, dass der Effekt auf die anderen Umweltwirkungen stark vom Anstieg des Strombedarfs wegen der Lüftungsanlage und somit von der Zusammensetzung der Strommischung abhängig war. Bei den Umweltwirkungen Toxizität Nicht-Pestizide, aquatische Eutrophierung P und Bedarf an nicht erneuerbaren Energien spielte der elektrische Strom eine entscheidende Rolle, so dass die Umweltwirkungen der leichten Erhöhung des Strombedarfs jene der Reduktion des Heizöls übertrafen. Die genannten Umweltwirkungen wurden ebenfalls durch die vergrösserte Infrastruktur negativ beeinflusst.

Auf spezialisierten Geflügelbetrieben werden heute grössere Ställe gebaut als er auf dem Modellbetrieb inventarisiert ist, so dass deren Sparpotenzial beim Heizverbrauch entsprechend grösser wird (pers. Mitteilung, Gloor, Aviforum, 2015). Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die wirtschaftliche Beurteilung der WRG im Falle eines Stallneubaus besser ausfallen sollte, da hier nicht nachgerüstet werden muss, sondern eine WRG beispielsweise anstatt einer Heizung samt Lüftung eingeplant wird. Schliesslich wurden sogenannte *weiche* Faktoren, wie zum Beispiel positive Effekte der Wärmerückgewinnungsanlage auf die Tiergesundheit, in den vorgestellten Ergebnissen nicht monetär berücksichtigt.

Wie auch bei den Massnahmen Sonnenkollektoren und Waldbewirtschaftung wurde in unserer Berechnung angenommen, dass der Heizbedarf der Betriebe durch Heizöl gedeckt wird. Würde man mit dem tatsächlichen Heizungsmix der Schweizer Landwirtschaftsbetriebe rechnen (Tabelle 12; Henzen et al. 2011), wäre das Einsparungspotenzial in jedem Fall geringer und negative Effekte auf andere Umweltwirkungen höher.

4.8 Erhöhung der Anzahl Laktationen von Milchkühen

4.8.1 Beschreibung der Massnahme

Aktuell liegt die durchschnittliche Anzahl Laktationen pro Milchkuh in der Schweiz bei 3.5 (AGRIDEA 2013a). Die Massnahme sieht eine Erhöhung auf 4.5 ohne Änderung der Milchleistung vor. Somit

müssen weniger Nachzuchttiere aufgezogen und weniger Aufzuchttiere gehalten werden, was insgesamt eine Reduktion des Methanausstosses zur Folge hat. Da die Milchkühe weiterhin ein Kalb pro Jahr produzieren, entstehen mit dieser Massnahme überzählige Kälber, welche nicht mehr für die Aufzucht benötigt werden. Es wurde angenommen, dass diese überzähligen Kälber als Mastkälber gemästet werden. Die dabei entstehenden Emissionen wie auch die zusätzliche Fleischproduktion wurden dem Betrieb angerechnet. Auf der anderen Seite verringert sich der Fleischoutput durch die abgehenden Kühe, da diese mit der Massnahme länger leben. Da abgehende Kühe mehr Fleisch liefern als ein Mastkalb, verringert sich mit der Massnahme die Fleischproduktion insgesamt.

Tabelle 18: Wichtigste Kennzahlen zur Massnahme „Erhöhung der Anzahl Laktationen“

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Bestand Milchkühe	1,9	26,5	3,9	12,9
Durchschn. Milchleistung [kg / Kuh und Jahr]	7113	6714	6960	6676
Nachzuchttiere nötig bei 3,5 Laktationen	0,6	7,7	1,1	3,7
Nachzuchttiere nötig bei 4,5 Laktationen	0,4	5,8	0,9	2,8
Überzählige Nachzuchttiere = zusätzliche Mastkälber [Stk / Jahr]	0,1	1,9	0,3	0,9
Veränderung der Fleischproduktion [kg LG/Jahr]	-62	-852	-122	-415

4.8.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Abbildung 21 zeigt die erzielte Treibhausgasreduktion pro produzierte verdauliche Energie der vier analysierten Modellbetriebe. Diese bewegte sich zwischen 0,9 und 19 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE, was 0,8 bis 3,6 % des gesamten Treibhauspotenzials der analysierten Modellbetriebe entspricht. Die Höhe der erzielten Reduktion war direkt abhängig von der Anzahl Milchkühe: Die höchste Reduktion erzielte der Verkehrsmilchbetrieb mit 26,5 Milchkühen, die niedrigste der Ackerbaubetrieb mit 1,9 Milchkühen.

Die Reduktion war vollständig der verminderten Anzahl Aufzuchttiere in der Inputgruppe „Remontierung“ zuzuschreiben. Die Aufwendungen für die Tierhaltung auf Hof erhöhten sich wegen der zusätzlichen Kälber in der Kälbermast leicht. Auch die übrigen Inputgruppen wiesen aufgrund des geringeren Fleisch- und dadurch kleineren Gesamtoutputs an verdaulicher Energie, welcher die Aufwendungen pro MJ vE in allen Inputgruppen erhöhte, leicht höhere Werte auf.

Auf die anderen analysierten Umweltwirkungen wirkte sich die Massnahme grösstenteils positiv aus, mit Reduktionen zwischen 0,6 und 6,3 % beim Verkehrsmilchbetrieb. Einzig der Ressourcenbedarf P und K, die terr. Ökotoxizität durch Nicht-Pestizide erhöhten sich beim Modellbetrieb Anderes Rindvieh leicht, dies infolge der geringeren Produktion an verdaulicher Energie.

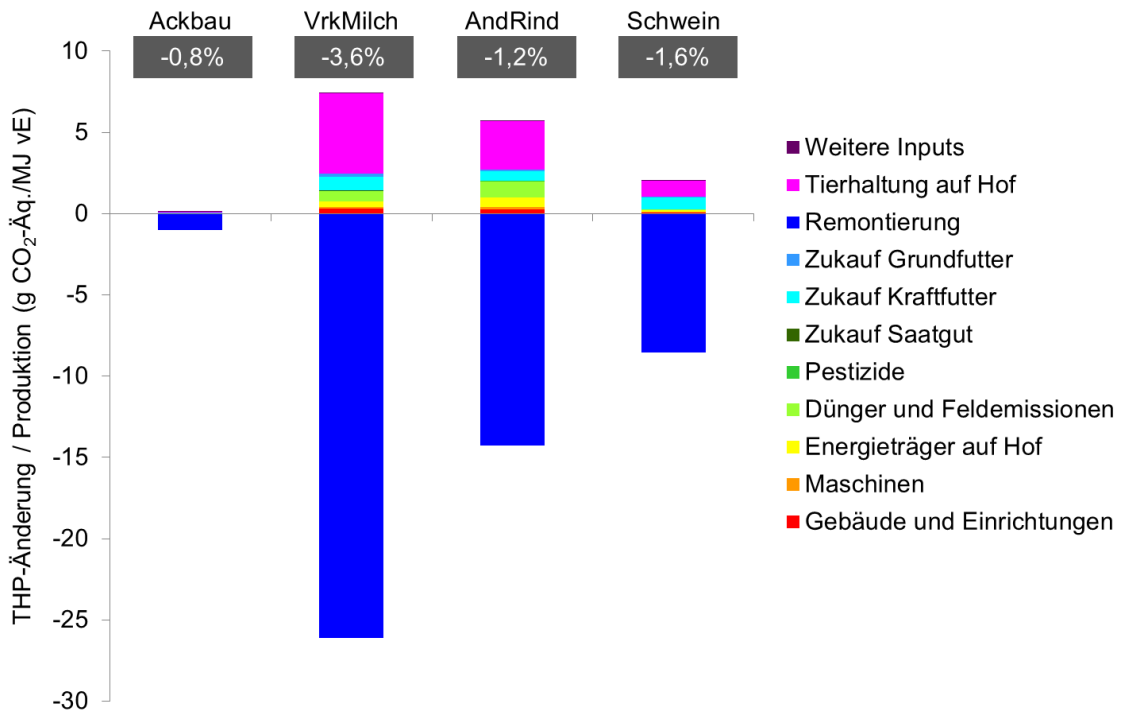


Abbildung 21: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

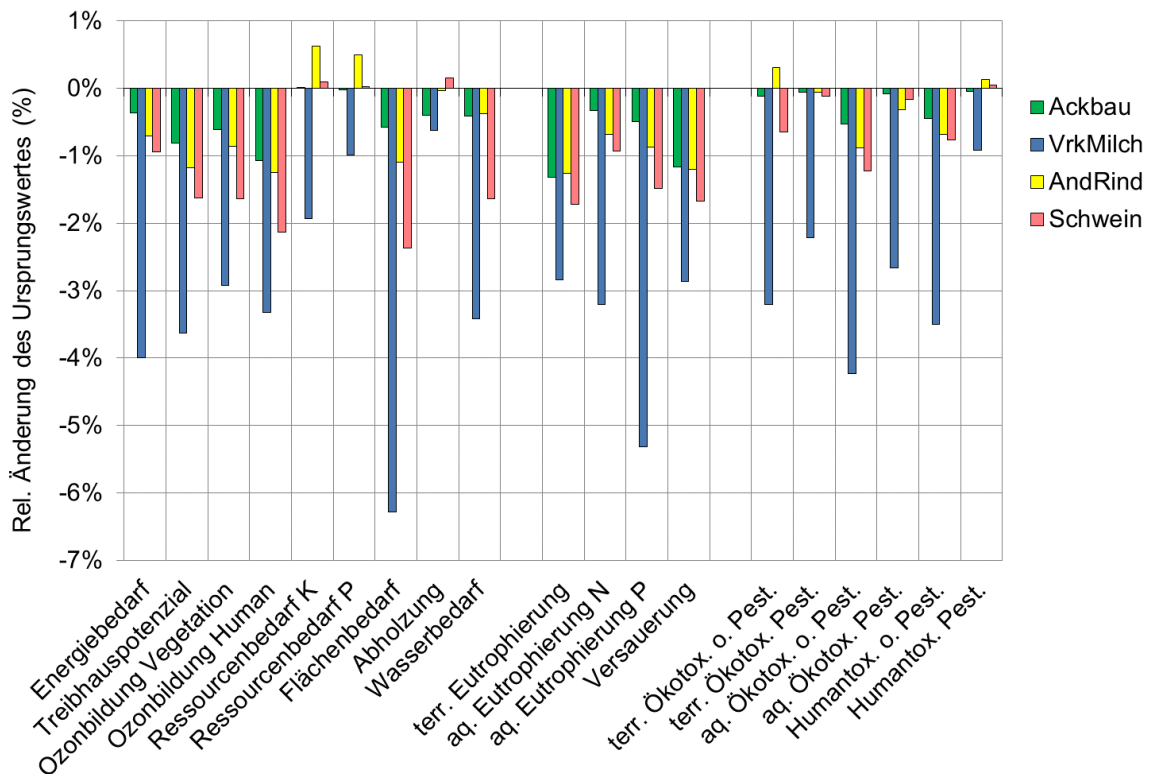


Abbildung 22: Wichtigste Effekte der Massnahme „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.8.3 Wirtschaftlichkeit

Bei einer verlängerten Nutzungsdauer einer Kuh konnten die Kosten der Aufzucht auf mehr Laktationsphasen verteilt werden. Unterschiede zwischen der Referenz und dem Massnahmenszenario ergaben sich hinsichtlich Kosten und Leistungen einerseits aus dem reduzierten Verkauf ausgemerzter Tiere (weniger abgehende Aufzuchtrinder und Kühe), andererseits aus dem reduzierten Ersatz abgehender Kühe. Die überzähligen weiblichen Kälber wurden mit ihrem Verkaufspreis in die Berechnung einbezogen. Bei der vorliegenden Analyse wurden Rinder aus eigener Nachzucht und zugekaufte Rinder mit dem Preis, der von aussen zugekaufter Rinder bewertet. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass sowohl die Milchleistung pro Kuh und Jahr gemäss Zahlen von Swissherdbook als auch die Tierarztkosten, trotz der verlängerten Lebenszeit der Kühe, konstant bleiben. Es fand demnach keine Differenzierung der Tierarztuntersuchungen nach dem Alter der Kühe statt (analog Römer (2011)). Die Durchführung der Massnahme entspricht dem Vergleich zweier Produktionsverfahren mit unterschiedlicher Nutzungsdauer.

Die vier betrachteten Modellbetriebe erwirtschafteten bei der Umsetzung dieser Massnahme alle einen mittleren jährlichen Gewinn, der in Abhängigkeit vom Milchkuhbestand der Betriebe variierte (siehe Kapitel 4.8.1). Die Betriebe, die über die höchste Anzahl an Milchkühen verfügten, nämlich der Betrieb Verkehrsmilch sowie der Betrieb Schweine, profitierten am stärksten von dieser Massnahme.

Tabelle 19: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ für die untersuchten Modellbetriebe

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	1059	14 355	2026	7011
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	161	2099	314	1021
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	0,15	0,15	0,16	0,15

Bezüglich des Arbeitsaufwands ist einerseits davon auszugehen, dass dieser leicht sinkt, da für die Einführung neuer trächtiger Rinder weniger Zeit benötigt wird (sinkender Aufwand für das Herdenmanagement). Andererseits steht dem ein vermehrter Mehraufwand für die Beobachtung der Tiergesundheit gegenüber: Während geplante sogenannte Managementabgänge (Hever 2015), die aus Selektionsgründen durchgeführt werden, leichter zu reduzieren sind, ist die Massnahme in Bezug auf die ungeplanten, erzwungenen Abgänge aufgrund gesundheitlicher Probleme als schwieriger in der Durchführung zu betrachten. Vor allem Fruchtbarkeitsprobleme führen oftmals zu dem sogenannten „forced culling“. Eine Herausforderung bei der Umsetzung der Massnahme wird es folglich sein, diese und andere Probleme, wie Euterentzündungen oder Klauenprobleme, durch ein besseres Stallklima, gesteigerte Melkhygiene, etc. zu vermeiden (Hever 2015).

Da die verlängerte Nutzungsdauer der Milchkühe keine Auswirkungen auf die Laktationshöhe je Kuh hatte und sich auch die Futterzusammensetzung nicht änderte, ist nicht davon auszugehen, dass sich das Risiko der Massnahme im Vergleich zur Referenz ändert. Einzig ist der Betrieb weniger abhängig vom Zukauf trächtiger Rinder, wobei dieser Preis in den letzten fünf Jahren stark gesunken ist (von Fr. 3000.– im Jahr 2009 auf Fr. 2380.– in 2013) (AGRIDEA 2009-2013a).

Der CO₂-Reduktionsgewinn pro kg CO₂-Äquivalent fiel bei dieser Massnahme gering aus, was an den hohen Emissionseinsparungen liegt. Da die Höhe der eingesparten CO₂-Äquivalente sowie die mittleren jährlichen Gewinne abhängig von der Menge der vorhandenen Kühe ist, liegt der CO₂-Reduktionsgewinn bei allen Betriebstypen in etwa der gleichen Höhe.

4.8.4 Diskussion

Die Erhöhung der Anzahl Laktationen pro Kuh scheint für Milchviehbetriebe eine vielversprechende Massnahme zu sein, um ihren Treibausgasausstoss zu verringern. In der vorliegenden Analyse wurde diese Massnahme für spezifische Betriebe mit vorhandener Herde berechnet. Die Milchleistung der Kühe bewegte sich je nach Modellbetrieb zwischen 6700 und 7100 kg Milch pro Kuh und Jahr. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Erhöhung der durchschnittlichen Anzahl Laktationen auf Herdenniveau um eine Laktation ohne Änderung der durchschnittlichen Milchleistung erzielt werden kann. Abgestützt wurde diese Annahme mit Zahlen von Swissherdbook über die Anzahl Laktationen und durchschnittliche Milchleistung aller abgegangenen Kühe im Jahr 2014 (pers. Mitteilung N. Berger, 2015). In diesem Datensatz belief sich die maximale Anzahl Laktationen pro Kuh auf 17. Über 1000 Kühe wiesen 10 und mehr Laktationen auf. Die durchschnittliche Milchleistung pro Jahr nahm dabei bis zu den Kühen mit insgesamt 5 Laktationen zu, danach langsam wieder ab (Abbildung 23). Die Lebensstagesleistung stieg bis zu den Kühen mit 10 Laktationen klar an und näherte sich dann asymptotisch einem Maximum (Abbildung 24). Demzufolge wurde davon ausgegangen, dass – ausgehend von 3.5 Laktationen pro Kuh und mit einer mittleren Milchleistung um die 7000 kg pro Kuh – die Anzahl Laktationen mittels gezielter Zucht und Auslese auf 4.5 Laktationen erhöht werden kann, ohne Einbussen bei der Milchleistung in Kauf nehmen zu müssen. Die aus Umweltsicht optimale Anzahl Laktationen dürfte gemäss Abbildung 24 noch höher liegen.

Bezüglich der überzähligen Kälber wurde die Annahme getroffen, dass diese gemästet und als Mastkälber geschlachtet werden. Dies weil eigentlich für die Nachzucht vorgesehene, überzählige Tiere per Definition weiblich sind, und weibliche Tiere heutzutage vor allem in die Kälbermast gehen. Ginge ein Teil der überzähligen Tiere in die Grossviehmast, verringerte dies die erzielte Treibhausgasreduktion, da die Tiere dann länger lebten und somit im Vergleich zu Mastkälbern auch mehr Methan emittierten. Im Gegenzug dazu würde sich der erzielte Fleischoutput erhöhen.

Die Veränderung des Fleischertrags wurde in der Analyse berücksichtigt, nicht jedoch dessen Qualität. Diesbezüglich wird mit der Massnahme aber auch eine Veränderung stattfinden, da weniger Fleisch von Altkühen, dafür mehr Kalbfleisch anfällt.

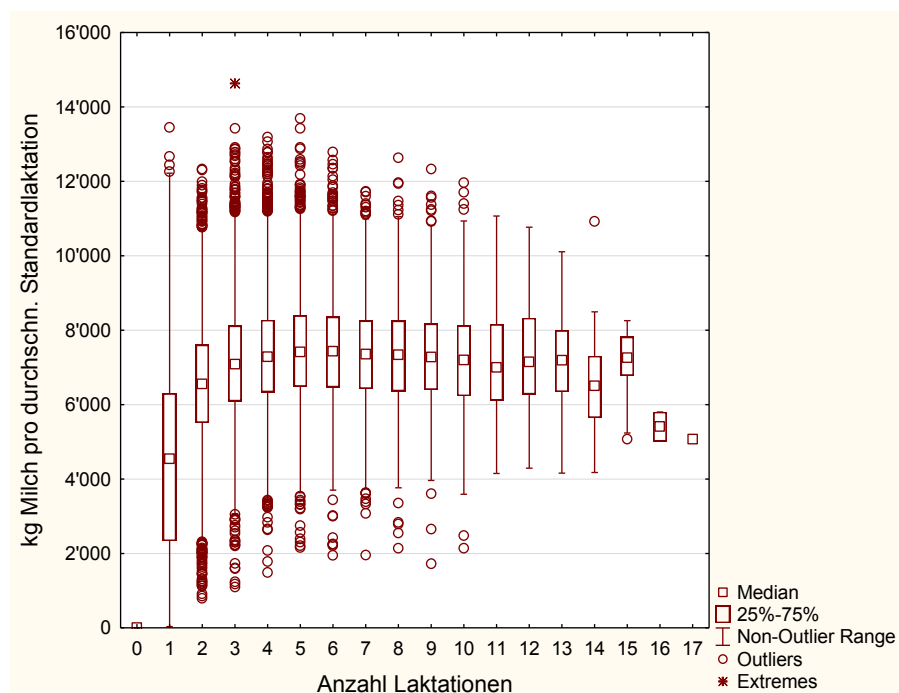


Abbildung 23: Durchschnittliche Milchleistung, gruppiert nach der Anzahl Laktationen pro Kuh. Quelle: Swissherdbook.

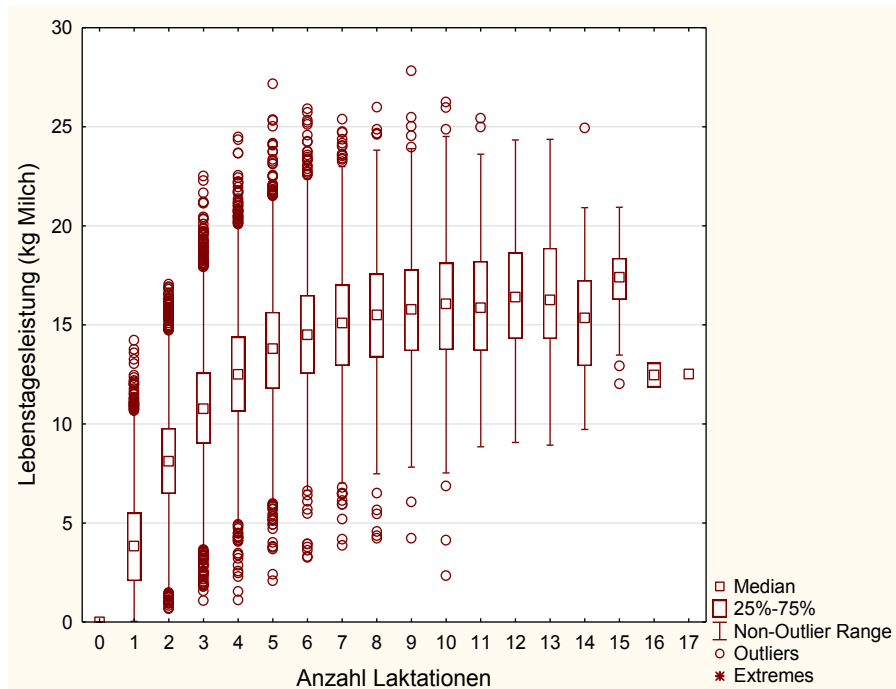


Abbildung 24: Durchschnittliche Lebenstagesleistung, gruppiert nach der Anzahl Laktationen pro Kuh. Quelle: Swissherdbook.

Die Massnahme wurde auf Milchkühe bezogen berechnet, die gleichen Überlegungen gelten aber auch für Mutterkühe. Auch hier darf mit der Erhöhung der Anzahl Laktationen eine Verminderung des THG-Ausstosses pro Kuh erwartet werden.

4.9 Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja

4.9.1 Beschreibung der Massnahme

Sojaextraktionsschrot (SES) ist auf Grund seines hohen Proteinanteils (~50 % Rohprotein) und des günstigen Aminosäuremusters ein wichtiger Bestandteil von Ergänzungsfutter in der Milchviehfütterung (Agroscope 2015). Global betrachtet, sind Nord- und Südamerika die bedeutendsten Produzenten und Exporteure für Soja (FAO 2015). In Südamerika ist der Anbau von Soja stark mit einer Landnutzungsänderung von Primärwäldern zu Ackerfläche verbunden. Durch diese Landnutzungsänderung (Rodung) wird sehr viel Kohlenstoff aus dem Boden und den abgeholzten Pflanzen in die Atmosphäre freigesetzt (IPCC 2006; Nemecek *et al.* 2014). Nicht-zertifiziertes Soja ist pro kg mit durchschnittlich 4.31 kg CO₂-Äquivalente verbunden (als Vergleich 1kg zertifiziertes Soja: 0.33 kg CO₂-Äquivalente; 1kg Weizen (IP): 0.54 kg CO₂-Äquivalente) (ecoinvent Centre 2010).

Eine reduzierter Einsatz oder eine komplette Substitution von Soja verspricht deshalb ein grosses Reduktionspotenzial bezüglich Treibhausgasemissionen. Eine weitere und schon etablierte Möglichkeit ist der Einsatz von zertifiziertem SES, dessen Importanteil im Jahr 2014 bereits 82% betrug (soja netzwerk schweiz 2015). Die Basler Kriterien (ProForest 2004) definieren eine umwelt- und sozialverträgliche sowie wirtschaftlich verantwortliche Soja-Produktion und haben entsprechende Richtlinien dafür erstellt. Ein Kriterium beinhaltet, dass nur auf Flächen die vor 1994 zu Ackerflächen aus Ökosystemen (mit hohem Schutzwert) umgewandelt wurden, eine Produktion von zertifiziertem Soja stattfinden darf (Richtlinien von zertifiziertem Soja siehe:

<http://www.sojanetz.ch/Zertifizierung.19.0.html>.)

Für die Analyse dieser Massnahme wurden beide erwähnten Varianten untersucht:

- Komplette Substitution von SES,
- Einsatz von 100% zertifiziertem SES.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Verbreitung von zertifiziertem Soja in der Schweiz wurden 82% zertifiziertes SES als Referenz verwendet.

Die betroffenen substituierten Ergänzungsfuttermittel sind Milchleistungsfutter und Proteinausgleichsfutter. Für Variante A wurde die Zusammensetzung der beiden Ergänzungsfuttermitteln geändert und SES vollständig durch andere Komponenten substituiert, mit der Annahme einer konstanten Milchleistung (~7000 kg Milch/Jahr). SES wurde dabei hauptsächlich durch eine Erhöhung des Anteils an Maiskleber und Rapsextraktionsschrot sowie durch eine Erhöhung der Gerste- und Weizenanteile substituiert (Tabelle 20, Tabelle 21). Für Variante B wurde die Annahmen getroffen, dass 100% des in den Ergänzungsfuttermitteln enthaltenen SES aus nachhaltiger, zertifizierter Produktion stammt. Die Zusammensetzung ist aber gleich wie bei der Referenz (Tabelle 20, Tabelle 21).

Die Menge an verfüttertem Ergänzungsfutter pro Kuh ist abhängig vom Modellbetrieb und wurde anhand des Deckungsbeitragskatalogs 2013 (AGRIDEA 2013a) sowie den Kraffutterkosten gemäss ZA-BH (Hoop und Schmid 2013) bestimmt (Tabelle 22).

Um das Ausmass des konventionellen Sojaanbaus (ohne Zertifizierung), bzw. die Wirkung des Schweizer Sojanetzwerkes abschätzen zu können, wurde zusätzlich mit der Referenz „0% zertifiziertes Soja“ gerechnet (schraffierter Teil der Balken).

Tabelle 20: Zusammensetzung des Milchleistungsfutters, Vergleich Referenz und Variante A) ohne Soja

Bestandteile	Anteil (%)	
	Referenz	Var. A) ohne Soja
Gerste vollkörnig	30	39
Mais	26	3
Weizen	20	40
Sojaextraktionsschrot	10	
Rapsextraktionsschrot	5	5
Melasse	3	3
Maiskleber	3	6
Kalk	2	2
Pflanzl. Fett	1	1
Mineralstoffe	1	1
Futtersalz	1	1

Tabelle 21: Zusammensetzung des Proteinausgleichsfutters, Vergleich Referenz und Variante A) ohne Soja

Bestandteile	Anteil (%)	
	Referenz	Var. A) ohne Soja
Sojaextraktionsschrot	50	0
Rapsextraktionsschrot	21	54
Maiskleber	20	40
Melasse	5	1
Kalk	2	2
pflanzl. Fett o Öl	1	2
Mineralstoffe	<1	<1
Futtersalz	<1	<1

Tabelle 22: Wichtigste Kennzahlen zur Massnahme "Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja"

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Bestand Milchkühe	1,9	26,5	3,9	12,9
Durchschn. Milchleistung [kg / Kuh und Jahr]	7113	6714	6960	6676
Verwendetes Ergänzungsfutter				
Milchleistungsfutter (kg / Jahr)	501	9432	1180	4565
Proteinausgleichsfutter (kg / Jahr)	371	9591	875	4791

4.9.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Durch die Substitution von Soja erzielten die Modellbetriebe eine potenzielle Treibhausgasreduktion zwischen 0,01 g (Ackbau) und 0,48 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (VrkMilch; Abbildung 25). Bezogen auf die Gesamtemissionen der Betriebe entsprach dies einem Reduktionspotenzial zwischen 0,01% und 0,1%. Mit dem Einsatz von zertifiziertem Soja war die Treibhausgasreduktion innerhalb eines Betriebstyps ca. 20% höher: die Reduktionen liegen zwischen 0,15 g (Ackbau) und 7,2 g pro MJ vE (VrkMilch), beziehungsweise zwischen 0,14% und 1,43% der gesamtbetrieblichen CO₂-Emissionen. Neben der Reduktion von THG, wirkte sich die Massnahme auch noch besonders positiv auf die Umweltwirkung „Abholzung“ aus (Abbildung 26). Diese wurde durch die Massnahme um mindestens 4% (Ackbau) bis maximal 55% (VrkMilch) reduziert, wobei beide Varianten innerhalb eines Betriebstyps keinen Unterschied zeigten. Bei der Substitution von Soja sank der Ressourcenbedarf an Phosphor und Kalium mit einem Maximum bei dem VrkMilch von 5% beziehungsweise 20%. Zusätzlich sank noch die Humantoxizität (Nicht-Pestizide) mit leicht höheren Werten (~1-2%) beim Einsatz von zertifiziertem Soja von 0% (Ackbau) und 6% (VrkMilch).

Eine Erhöhung der Umweltwirkungen war dagegen bei der terrestrischen, aquatischen Ökotoxizität und der Humantoxizität jeweils mit Pestiziden bei der Variante „ohne Soja“ zu verzeichnen. Dies beruht auf

dem Erhöhten Bedarf und Anbau von Mais und Raps, der zu einer relativen Zunahme des Pestizideinsatzes führt. Analog zu den anderen Umweltwirkungen zeigte der Betriebstyp VrkMilch hier jeweils die grösste Zunahme mit der geringsten Erhöhung für aquatische Ökotoxizität durch Nicht-Pestizide mit 3% und der grössten Zunahme bei aquatischer Ökotoxizität durch Pestizide mit 7%.

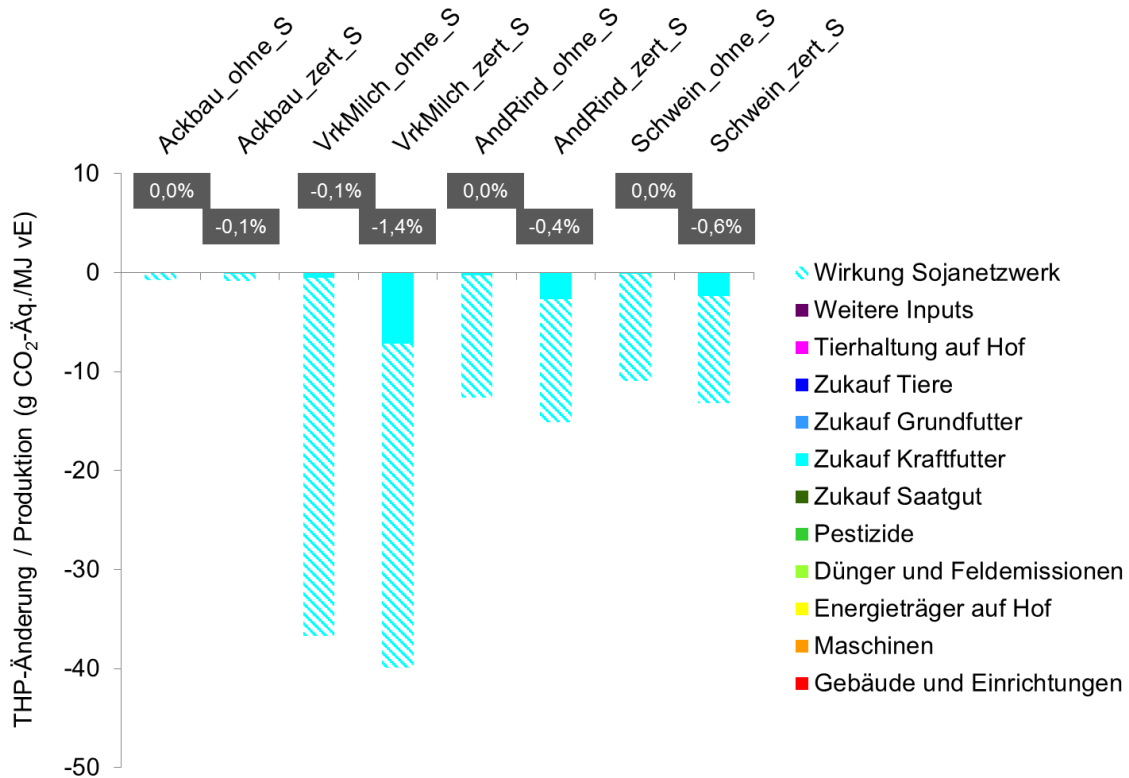


Abbildung 25: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider. Die Endung „ohne_S“ steht für die Variante (A) Substitution von Soja und „zert_S“ steht für die Variante (B) 100% zertifiziertes Soja. Der einfarbige Teil des Balkens repräsentiert die Wirkung mit der Referenz „82% zertifiziertes Soja“, der schraffierte Teil die Wirkung mit der Referenz „0% zertifiziertes Soja“.

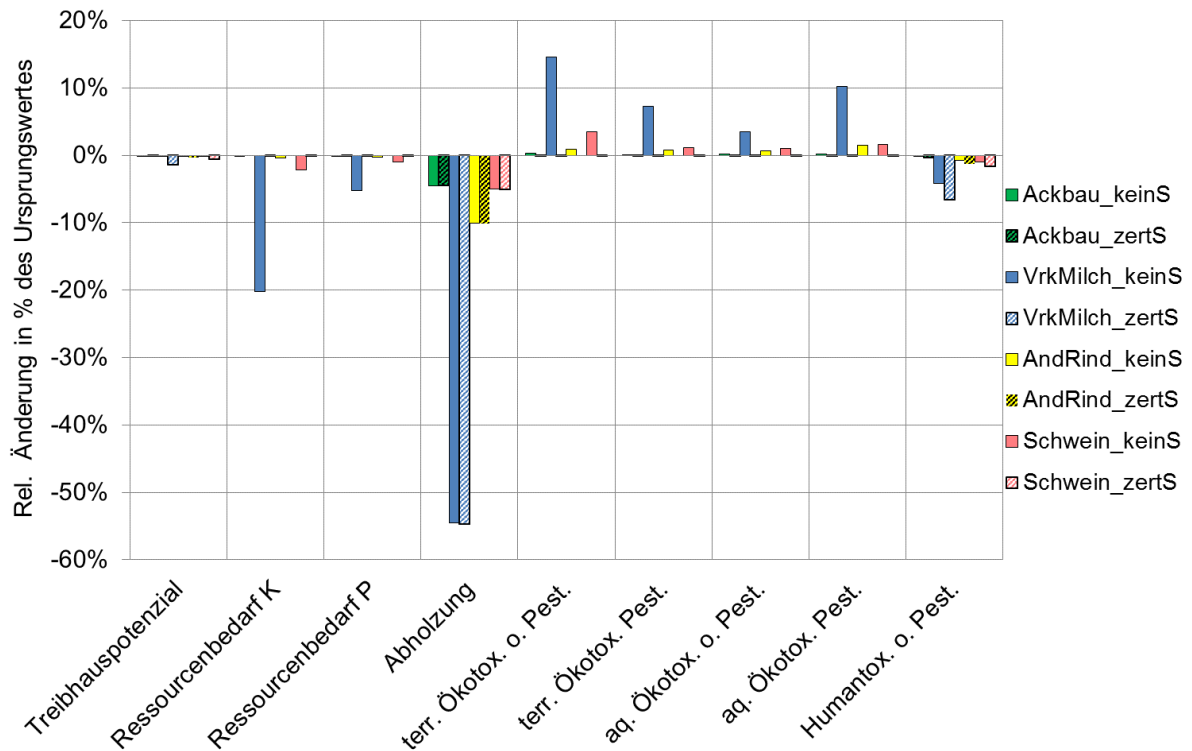


Abbildung 26: Wichtigste Effekte der Massnahme "Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja" auf weitere Umweltwirkungen.

4.9.3 Wirtschaftlichkeit

In Variante A wurde das SES im Futtermittel durch andere Bestandteile komplett ersetzt. Die neue Zusammensetzung führte zu leicht reduzierten Kosten für die betrachteten Ergänzungsfuttermittel. Die Prämie, die für die Zertifizierung des Pro Terra-Standards in Szenario B gezahlt werden muss, betrug in etwa 11 % des Preises von nicht zertifizierten Soja (pers. Mitteilung Markus Stalder, Fenaco, Geschäftsbereich Proteine, 2015). Entsprechend fielen die Ausgabenzuwächse für Futter Variante B aus. Da im Referenzszenario davon ausgegangen wurde, dass bereits 82 % des genutzten Sojas zertifizierten Standards entspricht, waren die zusätzlichen Kosten gering – am höchsten war der Kostenanstieg beim Modellbetrieb Verkehrsmilch mit jährlich 81 Franken.

Tabelle 23: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme Variante A ohne Soja für die untersuchten Modellbetriebe (Referenz 82 % zertifiziertes Soja)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	16	275	38	132
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	15	358	37	177
Risiko	Abhängigkeit von Rapspreisen: ähnliches Risiko im Vgl. zur Referenz			
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr.]	0,97	1,30	0,97	1,34

Tabelle 24: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme Variante B mit 100 % zertifiziertem Soja für die untersuchten Modellbetriebe (Referenz 82 % zertifiziertes Soja)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	169	4111	398	2043
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-3	-81	-8	-40
Risiko	Abhängigkeit von Rapspreisen: ähnliches Risiko im Vgl. zur Referenz			
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02

Beim Ersatz von Soja im Futter (Variante A) konnte auf den Modellbetrieben ein geringer jährlicher Gewinn zwischen 15 und 358 Franken erzielt werden. Dieser lässt sich auf die Einsparung infolge des Ersatzes der teureren zertifizierten Soja zurückführen. Dem erhöhten Einsatz an Raps stehen aber ein recht hoher Phosphorgehalt, der Gehalt an Fett mit hohem Polyensäuregehalt, die eher hohe Löslichkeit des Proteins im Pansen des Wiederkäuers und Restgehalte von Glucosinolaten gegenüber (Raaflaub *et al.* 2015). Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Auswirkungen eines Futtermitteltausches spielen entsprechend eine Rolle. So weisen Studien teils daraufhin, dass Auswirkungen auf die Milchqualität noch unzureichend erforscht sind. Auch der Gehalt an Rohproteinen ändert sich beim Ersatz der Soja, d.h. der Preis je Einheit Rohprotein steigt bei Umsetzung der Massnahme (Baur 2011; Eittle *et al.* 2013; Kluth *et al.* 2005).

Das Risiko der Durchführung beider Varianten änderte sich im Vergleich zur Referenz kaum: Die zukünftigen Futterpreise und deren Verhältnis bleiben schlecht planbar. Bei Variante A hängt das Risiko stark von der Entwicklung des Preises von Maiskleber ab, der in Variante A vermehrt zum Einsatz kommt. Insbesondere dessen Preisentwicklung ist schwer kalkulierbar, was auch damit zusammenhängt, dass auf Importe aus den USA zukünftig verzichtet werden muss (GVO-Mais Problematik) und ein sinkende Angebot erwartet wird (Halter 2014). Bei Variante B hängt das Risiko stark von der Entwicklung der Preise von Soja ab, die in den letzten Jahren sehr volatil waren. Bezüglich des Arbeitsaufwands ergaben sich keine Unterschiede zwischen Referenz- und Massnahmensituation. Die CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent in Variante erscheinen zwar hoch, basieren aber dem Verhältnis jeweils kleiner Einsparungen bzw. Gewinne. Die jährlichen Kosten der Variante B lagen jeweils unter Fr. 100.– und waren damit sehr gering. Aufgrund der angesprochenen Unsicherheit, kann man die Umsetzung dieser Varianten unter den gegebenen Bedingungen als nahezu kostenneutral erachten.

4.9.4 Diskussion

Die Höhe des Reduktionspotenzials korrelierte mit dem Bedarf an sojahaltigem Ergänzungsfutter bzw. mit dem Bestand an Milchkühen (Tabelle 20, Tabelle 21, Tabelle 22). Dadurch war die grösste Reduktionswirkung dieser Massnahme bei dem Betriebstyp mit dem höchsten Milchkuhbestand, dem Betrieb VkrMilch, zu verzeichnen. Für die Praxis lässt sich daraus analog ableiten, dass diese Massnahme besonders effektiv für Betriebe mit einem relativ hohen (sojahaltigem) Ergänzungsfutterbedarf ist. In dieser Analyse wurden nur Ergänzungsfuttertypen für Kühe betrachtet. Da SES auch bei anderen Nutztieren (Geflügel, Schwein) zum Einsatz kommt, ist hier analog in Abhängigkeit von der Futtermenge mit grossen Reduktionspotenzialen zu rechnen. Neben dem grossen Reduktionspotential, ist für die Praxis auch die Wirtschaftlichkeit besonders interessant, da keine zusätzlichen Kosten entstehen (bei beiden Varianten).

Auffallend ist, dass die „Substitution von Soja“ zu einer geringeren THG-Reduktion (20 %) führte, als der Einsatz von „zertifiziertem Soja“. Dies hängt vor allem mit der Erhöhung der Futtermittelkomponente „Maiskleber“ zusammen, die u.a. das Soja substituiert. In dieser Analyse wurde von einer Maiskleberproduktion in Deutschland ausgegangen, bei der mit 1,2 kg CO₂-Äq pro Kilogramm Maiskleber gerechnet werden. Aktuell wird ein Grossteil des Maisklebers aber aus China in die Schweiz importiert, was sich wegen längeren Transportdistanzen negativ auf das THG-Potenzial auswirkt.

Die Auswertung mit der Referenz „0% zertifiziertes Soja“ zeigt das gesamte Reduktionspotenzial dieser Massnahme auf, welches durch den Schweizer Standard von 82% zertifiziertem Soja schon zu einem grossen Anteil realisiert wird. Andersherum wird dadurch auch deutlich, wie klimaschädlich die Verwendung von konventionellem Soja aus Landnutzungswandel ist.

Längerfristig ist zu überlegen, ob nicht eine Substitution von Soja und Ergänzungsfutter durch eine Erhöhung des Grundfutteranteils für die THG-Reduktion sinnvoll wäre. Die Umsetzung dieses Ansatzes würde eine langfristige Änderung in der Betriebsstruktur erfordern, wie z.B. Vergrösserung der Grünlandflächen (oder Reduzierung der Besatzdichte), Anpassung des Grünlandmanagements und Futtermittelkonservierung. Der Ansatz einer Erhöhung des Grundfutteranteils würde zur schon existierenden Produktionsweise „Wiesenmilch“ von IP-SUISSE passen.

4.10 Abdeckung des Güllesilos

4.10.1 Beschreibung der Massnahme

Die NH₃-Emissionen aus der Lagerung der Gülle hängen wesentlich von den Eigenschaften der Gülle (Zusammensetzung, pH), der Temperatur und der Luftbewegung (Kontaktfläche zwischen Gülle und Atmosphäre) ab (IPCC 2006; Kupper *et al.* 2010). Durch eine Abdeckung des Güllebehälters mittels einer Folie (Folienzelt) wird die Luftbewegung oberhalb der Gülle vermindert (konvektiver Transport) und somit die NH₃-Emission reduziert.

Zur Abdeckung von Güllesilos gibt es schwimmende (Schwimmfolie) und nicht-schwimmende Varianten (Folienzelt). Eine detaillierte Beschreibung der Vor- und Nachteile der beiden Varianten ist dem FAT-Bericht Nr.631 (Van Caenegem *et al.* 2005) zu entnehmen. Die vorliegende Analyse untersuchte die Variante Folienzelt. Dabei wurde ein nicht selbsttragendes System mit Spanngurten und Pendelstütze angenommen. Für die baulichen Emissionen ist die Grösse des Güllebehälters entscheidend. Diese ist in den Modellbetrieben festgelegt und von der anfallenden Güllemenge der Modellbetriebe abhängig (Tabelle 25).

Die NH₃-Emissionen wurden in Anlehnung an das Agrammon Modell berechnet, wobei für die Emissionen der Gesamt-Ammoniumgehalt (TAN; absolut) der Gülle, unabhängig von der Oberflächen-grösse des Güllebehälters (Kontaktfläche Gülle-Atmosphäre; Tabelle 25; (Kupper *et al.* 2010) berücksichtigt wurden. Entsprechend dem Agrammon Modell reduziert ein Folienzelt die NH₃-Emissionen gegenüber einem nicht-abgedeckten Güllebehälter um 60 %. Als Referenz diente ein Güllebehälter ohne Abdeckung und ohne natürliche Schwimmschicht. Das Minderungspotenzial einer natürlichen Schwimmschicht ist generell sehr schwer abzuschätzen, da sich diese durch Niederschläge und Witterung im Allgemeinen verändert und durch Rühren zerstört wird.

Die Stickstoffgehalte in der Gülle wurden anhand der Referenzwerte gemäss Suisse-Bilanz (AGRIDEA und BLW 2014) berechnet. Unberücksichtigt bleibt dabei die Erhöhung des N-Gehaltes in der Gülle durch die Abdeckung der Güllebehälter. Demzufolge wurden bei der Berechnung der Massnahme keine Anpassungen an der Düngung im Pflanzenbau vorgenommen.

Tabelle 25: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme „Gülesiloabdeckung“. Für die Lagerungs- und Feldemissionen ist der Gesamt-Ammoniumgehalt (TAN) der Gülle entscheidend.

Betriebstyp	Abdeckung	TAN-Gehalt der Gülle (kg NH ₄ -N/m ³)	Gülemenge Betrieb (m ³)	Zuweisung Güllebehälter (m ³)
Ackerbau	Nein	0,8	122	39
	Ja	0,9		
Verkehrsmilch	Nein	1,1	915	289
	Ja	1,3		
Anderes Rindvieh	Nein	1,2	239	73
	Ja	1,4		
Schweine	Nein	0,7	1251	380
	Ja	0,8		

4.10.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

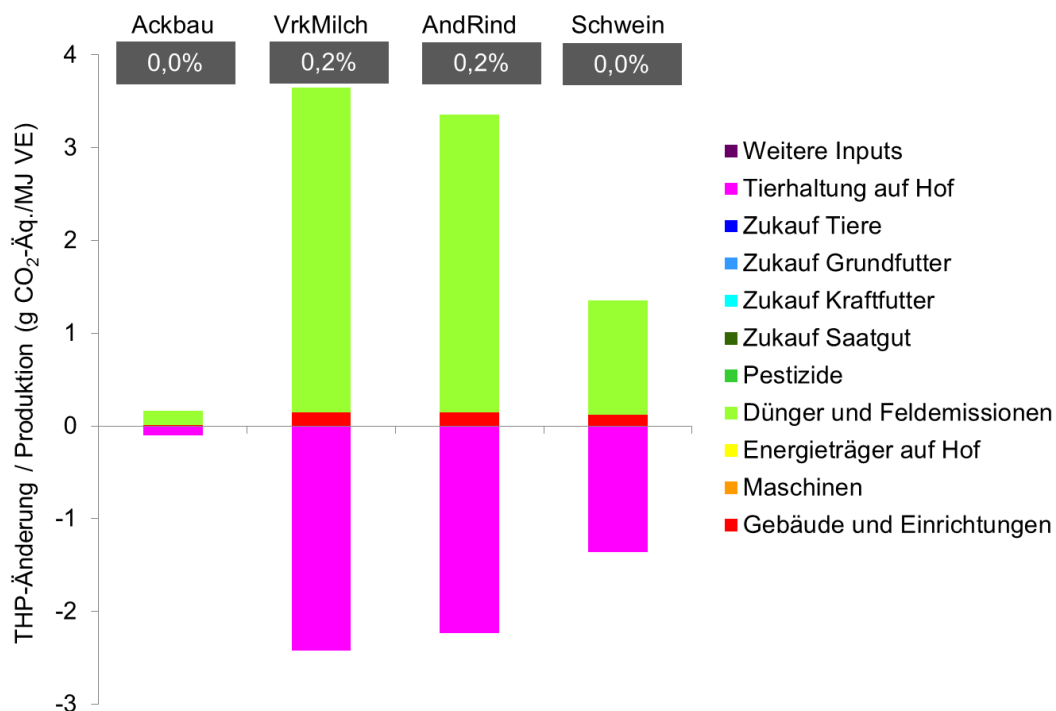


Abbildung 27: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Abdeckung des Gülesilos“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

Die Abdeckung der Gülesilos führte zu einer Reduktion der induzierten N₂O-Emissionen aus NH₃ (Inputgruppe „Tierhaltung Hof“). Bei der anschliessenden Gülleausbringung gab es hingegen eine Zunahme der Feldemissionen (vor allem N₂O; Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“), die höher

als die Reduktion durch die Gülleabdeckung war. Dadurch nahmen die THG zwischen 0,1 g (Ackbau) und 0,9 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (AndRind; Abbildung 27) zu. Bezogen auf die Gesamtemissionen der Betriebe entsprach dies keiner Änderung der THG-Emissionen (Schwein) bzw. einer leichten Zunahme (0,2%, VrkMilch).

Hinsichtlich weiterer Umweltwirkungen hatte die Massnahme einen besonders grossen positiven Effekt auf die terrestrische Eutrophierung (3-9%) und die Versauerung (2-8%), die beide sehr stark korrelierten (Abbildung 28). Es gab minimale Zunahmen bei der „Ozonbildung“, der „terrestrischen Ökotoxizität“ und der „Humantoxizität Nicht-Pestizide“, die jeweils unter einem Prozentpunkt liegen. Diese Zunahmen beruhten auf den zusätzlichen Materialien bzw. deren Herstellungsemissionen, die für die Abdeckung benötigt werden.

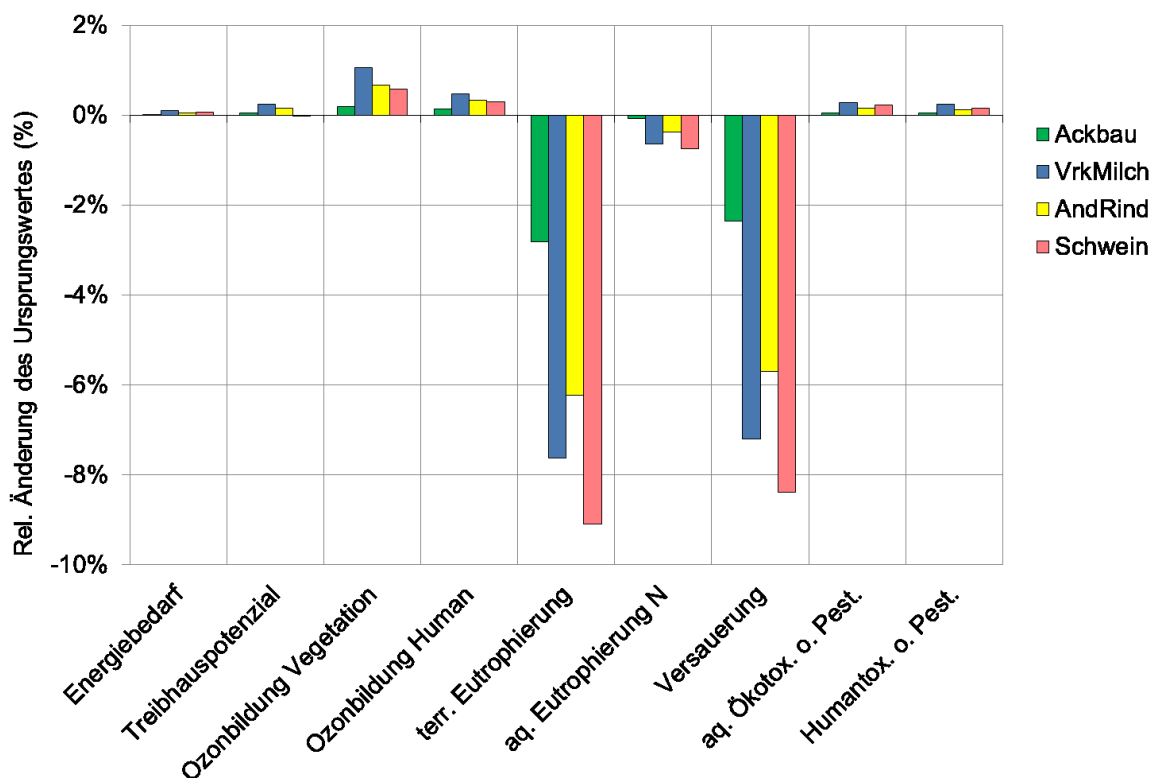


Abbildung 28: Wichtigste Effekte der Massnahme „Abdeckung des Güllesilos“ auf weitere Umweltwirkungen

4.10.3 Wirtschaftlichkeit

Durch den Bau einer Güllesiloabdeckung (10 Meter Durchmesser für alle Betriebe) werden Investitionen getätigt. Da die Investitionen der Abdeckung für alle Betriebe weniger als 50 % der mittleren jährlichen Investitionssumme betragen, wurde bei dieser Massnahme von der üblichen Misch-Finanzierung aus Eigen- und Fremdkapital abgewichen und davon ausgegangen, dass die Abdeckung bei allen Betrieben komplett aus Eigenkapital finanziert wird (siehe Tabelle 26). Eine Förderung beim Bau einer Güllesiloabdeckung wurde nicht berücksichtigt. Des Weiteren entstanden bei der Umsetzung dieser Massnahme Kosten für den Unterhalt (Reparaturen etc.). Die Modellbetriebe erfuhren allerdings auch Kosteneinsparungen bei den Ausgaben für Düngemittel (geringerer Düngezu Kauf), die der höhere Stickstoffgehalt in der Gülle infolge der Abdeckung möglich macht. Insgesamt waren diese Einsparungen gering, nahmen mit der anfallenden Güllemenge auf einem Betrieb aber zu.

Die mittleren jährlichen Kosten dieser Massnahme lagen bei allen Modellbetrieben bei rund Fr. 1700. Der Schweine haltende Modellbetrieb, der über die meiste hofeigene Gülle verfügte, verzeichnete die höchsten Einsparungen beim Kauf von Dünger; dementsprechend waren bei diesem Betrieb die

jährlichen Kosten am geringsten. Allerdings waren die Abweichungen zwischen den untersuchten Modellbetrieben nicht gross, da die getätigte Investition für alle Betriebe gleich teuer war. Der Arbeitsaufwand dieser Massnahme konnte als minimal eingestuft werden, während das Risiko der Massnahme gering war.

Tabelle 26: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Abdeckung von Güllebehältern" für die untersuchten Modellbetriebe

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	-60	-699	-165	8
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-1753	-1711	-1724	-1665
Investitionssumme [Fr.]	18 704	18 704	18 704	18 704
Investitionssumme/ mittlere jährliche Investitionssumme (2009-2013) [%]	34 %	29 %	45 %	27 %
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	Emissionszunahme			-212

Da auf allen Betrieben – ausser dem Schweine haltenden Betrieb – bei der Umsetzung dieser Massnahme keine Emissionen eingespart werden, können CO₂-Reduktionskosten nur für einen Betrieb kalkuliert werden: Beim Schweine haltenden Modellbetrieb, der eine minimale Menge an Treibhausgasäquivalenten einspart, sind die Kosten mit Fr. 212.– pro eingespartes kg CO₂-Äquivalent enorm hoch.

4.10.4 Diskussion

Auf den ersten Blick scheint es überraschend, dass eine Abdeckung der Güllebehälter zu einer Zunahme der klimarelevanten Gesamtemissionen führte (Abbildung 27). Dies ist durch eine Emissionsverlagerung und einer Veränderung der Emissionsart zu erklären. Durch die Abdeckung nehmen die NH₃-Emissionen aus dem Güllebehälter um 60 % ab. Dies führt zu einer Erhöhung der N-Konzentration in der Gülle, welche während und nach der Ausbringung auf dem Feld für höhere N₂O-Emissionen verantwortlich ist. In anderen Worten: Die gleiche Menge Gülle (bzw. -stickstoff) hat auf landwirtschaftlichen Nutzflächen potenziell ein höheres THP, da es dort zunehmend als Lachgas emittiert wird, als im Güllebehälter, wo es hauptsächlich als Ammoniak emittiert wird.

Die Schlussfolgerung, die Abdeckung der Güllebehälter sei keine sinnvolle oder sogar klimaschädliche Massnahme, wäre jedoch voreilig. Die Massnahme „Güllesiloabdeckung“ kann zur Steigerung der N-Effizienz beitragen, sie sollte aber stets in Kombination mit einer verlustarmen Düngapplikation umgesetzt werden, um den zunehmenden N₂O-Emissionen auf dem Feld entgegenzuwirken. Zudem mindert die Massnahme die terrestrische Eutrophierung und die Versauerung und trägt somit zu einer Minderung der Umweltwirkungen im Nährstoffbereich bei. Einschränkend muss auch gesagt werden, dass die via NH₃ und NO₃ indirekt induzierten N₂O-Emissionen (Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse) räumlich und zeitlich hoch variabel und noch nicht abschliessend verstanden sind. Die Berechnungen nach IPCC sind demnach als grobe Annäherungen zu verstehen.

4.11 Stallmanagement: saubere Laufflächen

4.11.1 Beschreibung der Massnahme

Verschmutzte Laufflächen stellen eine erhebliche Emissionsquelle für NH_3 dar. Nach der Hofdünger- ausbringung ist der Stall/Laufhof mit 34 % der Emissionen der Tierproduktion der zweitwichtigste Emissionsprozess für NH_3 -Emissionen in der Schweiz (Kupper und Menzi 2013). Die NH_3 -Bildung erfolgt, wenn Harnstoff mit Flächen in Kontakt kommt, die mit Kot oder Kot-Harn-Gemisch verschmutzt sind oder waren und somit urease-aktive Mikroorganismen aufweisen. Saubere und trockene Laufflächen verringern das Bildungs- und Freisetzungspotenzial von NH_3 (Schrade *et al.* 2011). Zur Minderung der NH_3 -Bildung und Freisetzung ist ein rascher Harnabfluss von planbefestigten Laufflächen durch Gefälle und Harnrinnen anzustreben. Damit der Harn in nützlicher Frist abfliessen kann, muss zudem in kurzen Zeitintervallen entmistet werden. In dieser Massnahme wurde evaluiert, welches THG-Reduktionspotenzial ein rascher Harnabfluss und häufiges Entmisten in Laufställen hat. Dabei beeinflusste die Massnahme die über die NH_3 -Emissionen gebildeten indirekten N_2O -Emissionen und war somit indirekt klimawirksam.

Ausgestaltet wurde die Massnahme im Stall gemäss den Empfehlungen der KOLAS und des BLW zur Finanzierung einzelbetrieblicher Massnahmen im Rahmen von NH_3 -Ressourcenprojekten (BLW und KOLAS 2013a): Planbefestigte Laufflächen in Ställen werden mit einem Quergefälle von 3 % und einer Längsrinne versehen. Ein Rinnenräumer reinigt diese Harnabflussrinne. Um einen ungehinderten Abfluss von Harn sicherzustellen, werden die Laufflächen während der Aktivitätszeit der Tiere in zweistündigem Rhythmus gereinigt. Dazu wird ein Mistschieber installiert.

Unklar ist die genaue Reduktionsleistung dieser Massnahme. Studien aus Holland (Braam *et al.* 1997a; Braam *et al.* 1997b; Swierstra *et al.* 1995) haben für Laufflächen in Milchviehställen mit Gefälle und Harnrinnen eine Reduktion der NH_3 -Emissionen von 20 % bis 50 % gezeigt. Für die Schweiz existieren gemäss S. Schrade (pers. Mitteilung, 2015) keine entsprechenden Zahlen. Die Reduktionsleistung dürfte aufgrund anderer Stallverhältnisse als in den holländischen Studien (bessere Durchlüftung) eher tiefer liegen. In den vorliegenden Analysen wurde mit dem unteren Wert von 20 % Reduktion der NH_3 -Emissionen gerechnet.

Wie bei der Massnahme „Abdeckung von Güllebehältern“ wurde gemäss der Methodik Suisse-Bilanz (Agridea und BLW 2014) eine allfällige Veränderung des N-Gehaltes in den Hofdüngern durch die Sauberhaltung der Laufflächen im Stall bei der Düngungsplanung nicht berücksichtigt.

4.11.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Sauberhaltung der Laufflächen im Stallbereich führte mit der Einrichtung von Gefälle und Harnrinne zu einer leichten Erhöhung der THGE um 0,03 bis 0,69 g pro MJ vE (Abbildung 29). Dies entspricht einer Zunahme von 30 bis 330 kg CO_2 -Äquivalenten respektive 0,02 bis 0,11 % pro Betrieb. Zwar verminderten sich die indirekt induzierten N_2O -Emissionen im Stallbereich wie beabsichtigt, die Feldemissionen bei der Ausbringung der Hofdünger erhöhten sich aber überproportional. Damit erhöhte sich sowohl das THP als auch das Ozonbildungspotenzial leicht (Abbildung 30).

Anders sah es bei den NH_3 -Emissionen aus. Die Massnahme führte klar zu einer Verringerung des NH_3 -Ausstosses und demzufolge zu einer Reduktion der terrestrischen und aquatischen Eutrophierung sowie der Versauerung. Bei den übrigen Umweltwirkungen waren keine Änderungen zu erkennen.

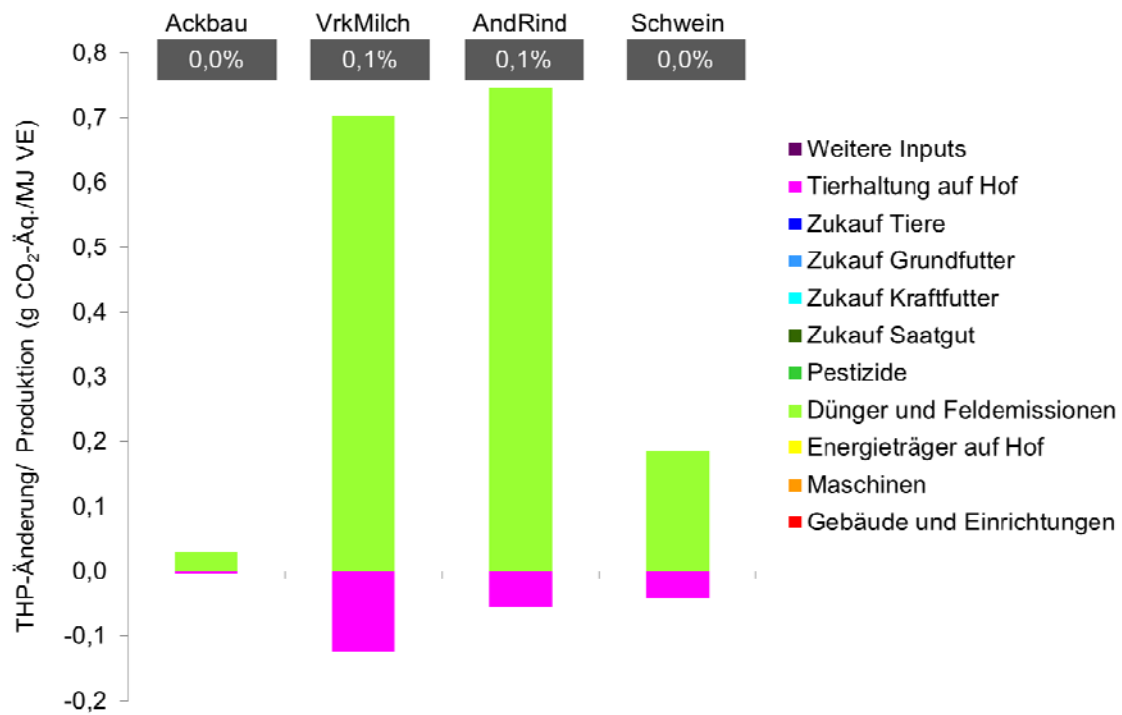


Abbildung 29: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Saubere Laufflächen“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

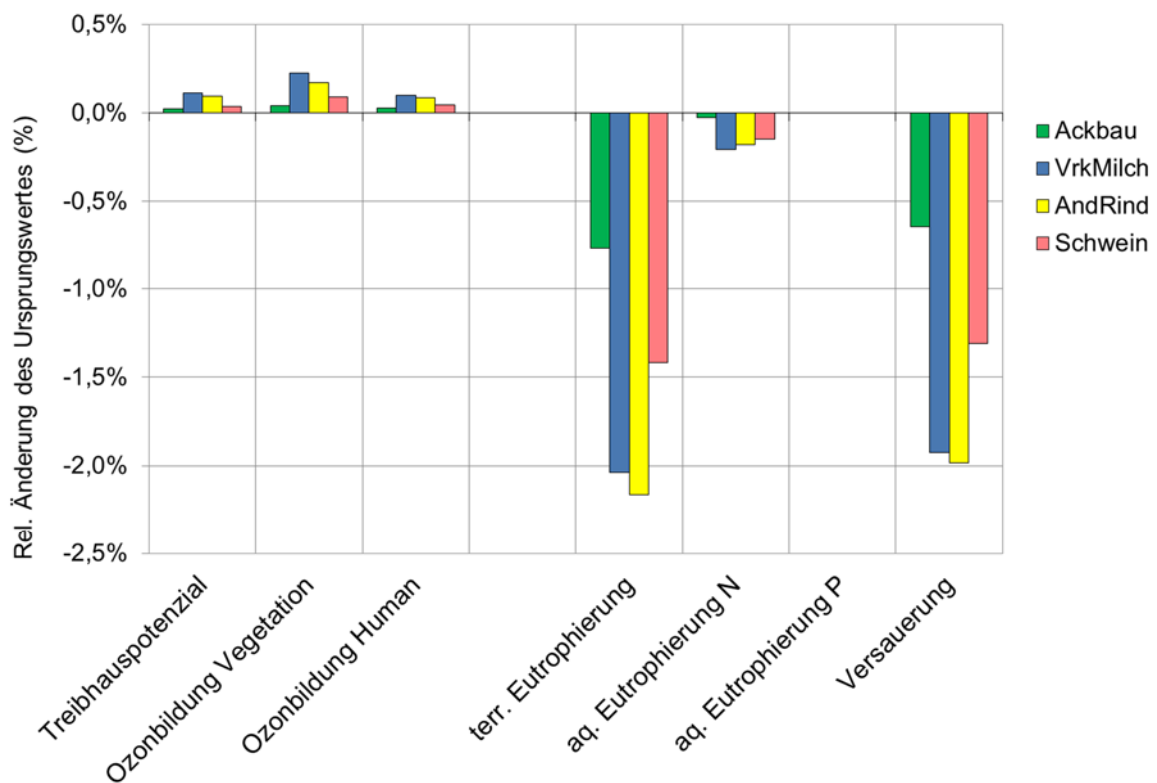


Abbildung 30: Wichtigste Effekte der Massnahme „Saubere Laufflächen“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.11.3 Diskussion

Die Massnahme „Sauberhaltung der Laufflächen“ wurde – wie die Massnahme „Abdeckung des Güllesilos“ (siehe Kapitel 4.10) – als Massnahme zur Verminderung von NH_3 -Emissionen entwickelt. Indirekt ergibt sich daraus auch eine Wirkung auf das Treibhausgas N_2O . Diese nur indirekte Wirkung auf das THP ist in der Ökobilanz der Massnahme gut erkennbar: Während sich die durch NH_3 -Emissionen bestimmten Umweltwirkungen terrestrische Eutrophierung und Versauerung um bis zu 2 % verringerten, erhöhte sich das THP insgesamt sogar. Zwar verringerten sich die THG-Emissionen im Stallbereich, dem Wirkungsbereich der Massnahme, zugleich erhöhten sich aber die Feldemissionen bei der Ausbringung der Hofdünger. Dies liegt an der schon bei der Massnahme „Abdeckung des Güllesilos“ aufgetretenen Verlagerung der N-Emissionen (siehe Kapitel 4.10.4): Durch die Sauberhaltung der Laufflächen erhöht sich der N-Gehalt in der Gülle. Die gleiche Menge Gülle (bzw. -stickstoff) hat auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (N-Emissionen zunehmend in Form von Lachgas) aber ein potenziell höheres THP als im Stallbereich (N-Emissionen hauptsächlich in Form von Ammoniak), was zur erwähnten THP-Erhöhung führt.

Um diese zu vermeiden, wäre es wichtig, die Hofdüngerausbringung den tatsächlichen N-Gehalten anzupassen. Auch eine angepasste Ausbringungstechnik, wie z.B. Schleppschlauch, könnte zumindest einen Teil der zusätzlichen Emissionen abfangen. Das Resultat zeigt die Wichtigkeit einer gesamtheitlichen Betrachtung der N-Flüsse auf dem Betrieb. Will man diese optimieren, sollte man nicht isoliert an einem Punkte des Hofdüngermanagements ansetzen, sondern die gesamte Kette betrachten.

Innerhalb der Tierhaltung sind zudem je nach betrachteter N-Verbindung andere Angriffspunkte wichtig: Während der Stallbereich bei den untersuchten Modellbetrieben bezüglich NH_3 -Emissionen nach der Hofdüngerlagerung die grösste Emissionsquelle ist, liegt er bezüglich N_2O nach Hofdüngerlagerung, Weide und Laufhof nur an vierter Stelle. Dies liegt daran, dass bei der Hofdüngerlagerung, auf dem Laufhof und auf der Weide auch direkte N_2O -Emissionen berücksichtigt werden, was die Wichtigkeit dieser Emissionsquellen erhöht. Während der Stallbereich für NH_3 -Minderungsmassnahmen ein zentraler Angriffspunkt darstellt, sind für Massnahmen bezüglich N_2O also andere Bereiche wichtiger.

In diesen Analysen wurden nur die Laufflächen von Rindviehställen berücksichtigt. Damit wird nur ein kleiner Teil der ganzen NH_3 -Emissionsquellen betrachtet. Wesentlich wäre die Massnahme auch für Laufhöfe, hier fehlen aber bislang quantitative Angaben zum Reduktionspotenzial. Dazu könnte die Massnahme auch für Schweineställe relevant sein, allerdings können die Resultate für die Rinderhaltung nicht ohne weiteres auf die Schweinehaltung übertragen werden, da Schweine Kot- und Liegebereiche trennen. Auch sind planbefestigte Flächen sowie stationäre Entmistung bei Schweinen derzeit nicht verbreitet, letztere kann dort nicht ohne Aufsicht betrieben werden. Somit wären spezifische Analysen bezüglich des zu erwartenden Reduktionspotenzials für Schweine notwendig.

4.12 Phasenfütterung in der Schweinemast

4.12.1 Beschreibung der Massnahme

Stickstoffreduziertes Futter (NPr-Futter) ist in der Schweinemast weit verbreitet. Gemäss Bracher und Spring (2010) beträgt der Anteil NPr-Futters in der Schweinemast nahezu 70 %. Die Mehrphasenfütterung hat sich hingegen (noch) nicht durchgesetzt. Sie erlaubt es, den Proteingehalt im Futter besser auf den Bedarf des Tieres anzupassen. Somit können Perioden mit Proteinmangel und -überschüssen minimiert werden und die N-Effizienz wird erhöht. Die weit verbreiteten Durchmastfutter sind auf den Bedarf der Vormast optimiert. In der Endmast ist generell von einem Proteinüberschuss auszugehen, auch unter NPr-Bedingungen, der mit Phasenfütterung minimiert werden kann (Bracher und Spring 2010).

Ein Proteinmangel wirkt sich negativ auf die Tierleistung aus, während überschüssiges Protein vor allem über den Harn wieder ausgeschieden wird, was emissionsrelevant ist. Die Emissionsminderung der

Mehrphasenfütterung kommt somit – analog dem NPr-Futter – vor allem über eine reduzierte N-Ausscheidung und verminderten Harnanteil zustande. Damit wird die Menge N, die in den landwirtschaftlichen Kreislauf gelangt, auf der Stufe Fütterung verringert und das Potenzial von NH₃-Verlusten wird kleiner (BLW und KOLAS 2013b).

Gemäss Empfehlungen der KOLAS und des BLW (BLW und KOLAS 2013b) hat bei einer Mehrphasenfütterung für Mastschweine die Fütterung in mindestens zwei getrennten Phasen zu erfolgen: Vormast (24 bis ca. 65 kg Lebendgewicht) und Ausmast (> ca. 65 kg Lebendgewicht). Der Rohproteingehalt des Vormastfutters darf 165 g / kg (basierend auf 13.5 MJ verdauliche Energie Schwein, VES), der Rohproteingehalt des Ausmastfutters 140 g / kg (basierend auf 13.5 MJ VES) nicht überschreiten. Zur Modellierung der Massnahme wurde die Fütterung der Mastschweine entsprechend angepasst (Tabelle 27). Bedingung war dabei eine gleich bleibende Leistung, d.h. gleiche Energieaufnahme der Masttiere.

Tabelle 27: Angaben zur Fütterung der Mastschweine im Referenzzustand und mit der Massnahme "Phasenfütterung"

Verfahren	Referenz	Massnahme	
	Alleinfutter	Vormastfutter	Ausmastfutter
Tageszunahme [g]	750	750	
Einsatz Kraftfutter [kg / Tier]	200	81,8	122,7
Energiegehalt [MJ VES / kg TS]	13,5	13,2	13,2
Bruttoenergie [MJ / kg TS]	19,8	19,4	19,4
% Rohprotein	17,0	15,8	12,6
N-Gehalt [g N / kg TS]	27	25,2	22,2
P-Gehalt [g P / kg TS]	5,0	5,2	4,2
K-Gehalt [g K / kg TS]	4,1	6,4	5,4

4.12.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Beim Modellbetrieb Schweine erzielte die Massnahme „Phasenfütterung“ eine THG-Reduktion von knapp 15 g pro MJ vE, was 3,9 % des gesamten THG-Ausstosses entsprach (Abbildung 31). Bei den anderen Modellbetrieben mit keiner oder nur sehr geringer Schweinehaltung wies die Massnahme naturgemäss eine niedrigere Reduktionsleistung auf. Interessant war der Beitrag der einzelnen Inputgruppen. Der grösste Teil der Reduktion erfolgte beim Kraftfutterzukauf, die Reduktionen in der Tierhaltung und bei den Feldemissionen durch die Ausbringung der Gülle waren vergleichsweise klein. Die geringeren Emissionen durch den Kraftfutterzukauf waren eine Folge des geringeren Sojaanteils in der Ration unter Phasenfütterung, was weniger Abholzung und dadurch weniger CO₂-Emissionen bedeutete. Dieser Effekt übertraf den Effekt der verminderten N-Ausscheidung durch die Phasenfütterung (siehe Inputgruppen Tierhaltung sowie Dünger und Feldemissionen). Beim verwendeten Soja wurde sowohl in der Referenz als auch bei der Massnahme mit einem Anteil von 80 % zertifiziertem Soja gerechnet (soja netzwerk schweiz 2013).

Durch die unterschiedliche Futterzusammensetzung im Vergleich zum Referenzszenario wirkte die Massnahme auf eine ganze Reihe weiterer Umweltwirkungen (Abbildung 32). Einen Zielkonflikt wurde bei der Ökotoxizität durch Pestizide ersichtlich. Dieser ergab sich einerseits aus der leicht erhöhten Futtermittelaufnahme, vor allem aber aus der veränderten Futtermittelzusammensetzung. Auf alle anderen Umweltwirkungen hatte die Massnahme keine oder positive Effekte. Der grösste positive Nebeneffekt

war bei der Abholzung zu erkennen, diese reduzierte sich infolge des geringeren Sojaanteils in der Ration mit Phasenfütterung um bis zu 18 %.

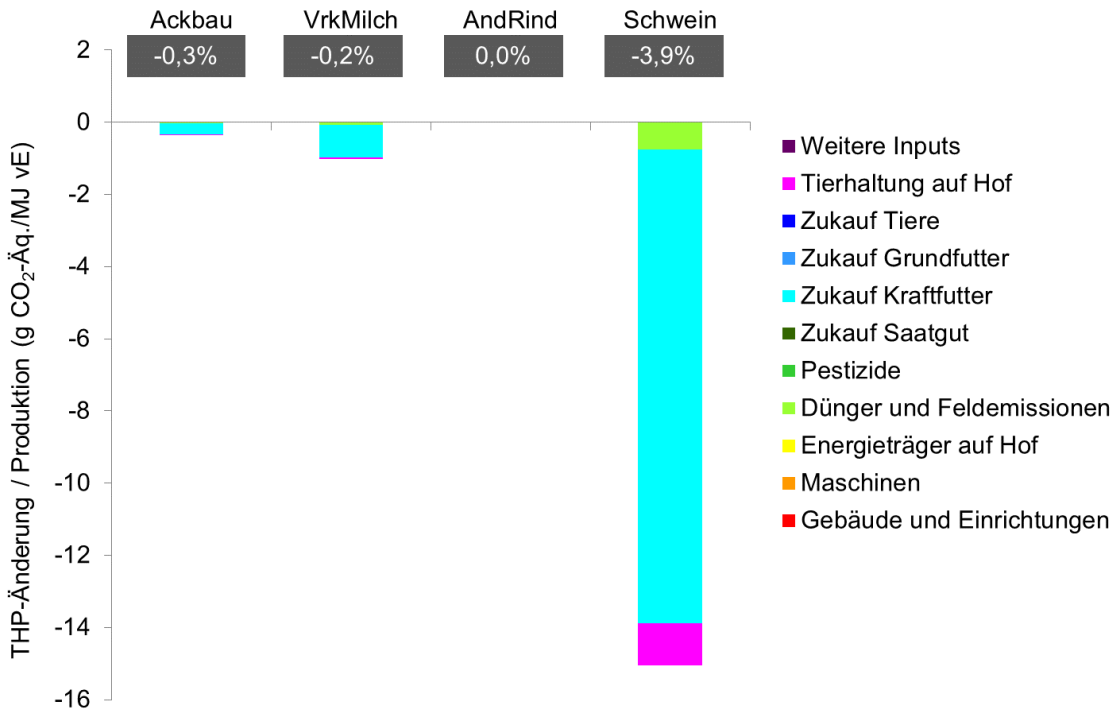


Abbildung 31: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Phasenfütterung“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

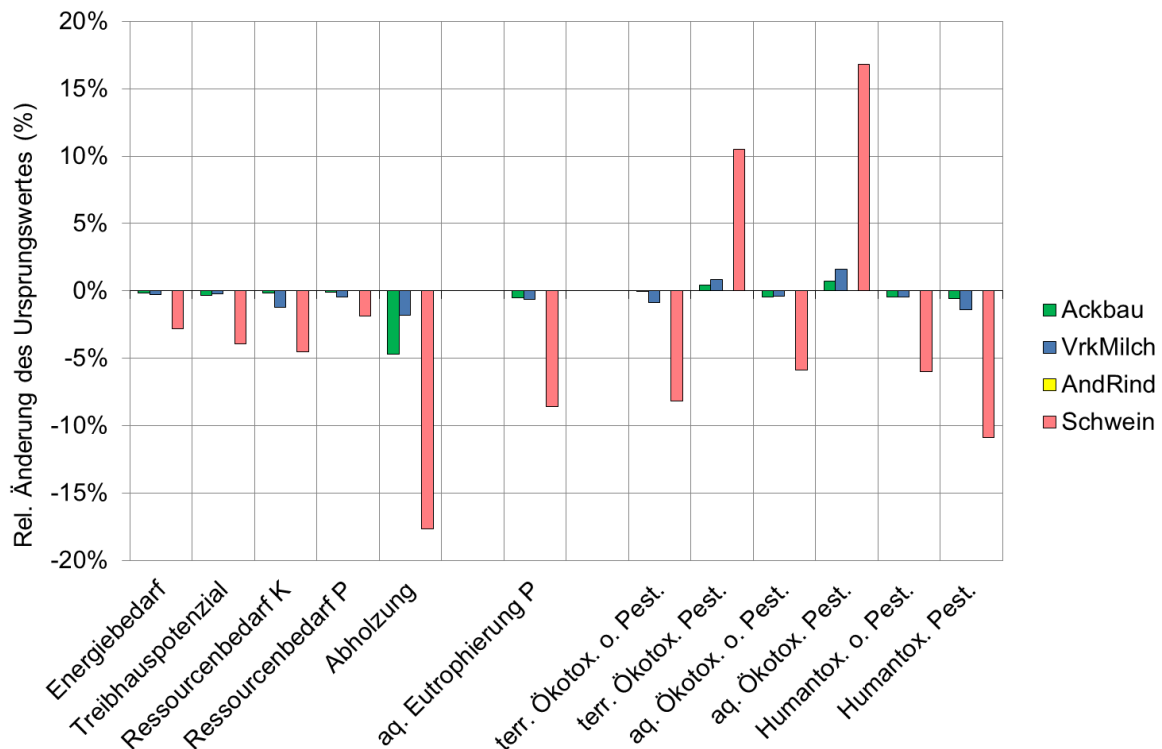


Abbildung 32: Wichtigste Effekte der Massnahme "Phasenfütterung" auf weitere Umweltwirkungen.

4.12.3 Diskussion

Die Massnahme „Phasenfütterung“ führte beim Modellbetrieb Schweine zu einer deutlichen Reduktion des THG-Ausstosses. Die Wirkung stammte jedoch zum grössten Teil aus der Reduktion des Sojaanteils in der Ration mit Phasenfütterung und nur zu einem kleineren Teil aus der Reduktion der N₂O-Emissionen auf dem Betrieb. Dies lag an den sehr hohen THGE, die mit Soja aus Brasilien einhergehen: Da ein Teil des Sojas auf frisch abgeholzten Flächen angebaut wird, werden pro Kilogramm Soja 4,31 kg CO₂-Äquivalente emittiert. Obwohl in den Analysen gemäss den Angaben des Sojanetzwerkes Schweiz (soja netzwerk schweiz 2013) von 80 % zertifiziertem Soja, d.h. Soja welches nicht mit Abholzung verbunden ist, ausgegangen wurde, übertrafen beim Modellbetrieb Schweine die THGE durch die Fütterung die direkten Emissionen aus der Tierhaltung immer noch. Der grösste Teil des auf dem Modellbetrieb Schweine eingesetzten Sojas wurde zudem für die Schweinemast verwendet. Eine Reduktion des Sojaanteils in der Schweineration hatte demzufolge einen grossen positiven Effekt auf die THGE des analysierten Modellbetriebs. Die direkten N-Emissionen aus der Hofdüngerlagerung und -ausbringung wurden durch die Phasenfütterung zwar auch reduziert, auf Betriebsebene konnten so aber maximal 10 % der Emissionen eingespart werden. Einen Grund für diese relativ geringe Einsparung ist die Tatsache, dass der Modellbetriebe Schweine auch knapp 13 Milchkühe sowie 1,2 Mutterkühe und die zugehörigen Aufzuchtrinder; dazu noch zwei Mastrinder hatte, welche zusammen für 65 % der in der Tierhaltung entstehenden N₂O-Emissionen verantwortlich waren. Auf diese zeigte die Massnahme keinen Effekt, was heisst, dass mit der Massnahme nur der kleinere Teil der auf dem Betrieb entstehenden N₂O-Emissionen angegangen werden konnte. Wird nur die Schweinemast angeschaut, reduzierten sich die verschiedenen N-Emissionen durch die Phasenfütterung um 30 %. Unbeachtet des Sojaanteils in der Ration zeigte die Massnahme Phasenfütterung in der Schweinemast also eine deutliche Reduktion der entstehenden Emissionen.

4.13 Parzellen-spezifische Düngebilanz

4.13.1 Beschreibung der Massnahme

Landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz weisen regelmässig N-Überschüsse auf (Bosshard und Richner 2013). Aus einer Studie geht hervor, dass Schweizer Betriebe aus der Tal-, bzw. Hügelzone einen durchschnittlichen N-Überschuss von 84 bzw. 90 kg N/ha aufweisen (BLW 2012).

Mit der Suisse-Bilanz sind Schweizer Landwirtschaftsbetriebe momentan dazu verpflichtet eine gesamtbetriebliche Nährstoffbilanz zu erstellen (Agridea und BLW 2014). Die Verteilung der Dünger und Nährstoffe auf den einzelnen Parzellen wird hier nicht berücksichtigt. Die Verwendung einer parzellen-spezifischen Düngebilanz soll das Risiko einer potenziellen Überdüngung verringern. Hierfür sollen möglichst genau der Nährstoffbedarf der Kultur und der Nährstoffinput aufeinander abgestimmt werden. Die Wirkung dieser Massnahme besteht in der Einsparung von mineralischen Düngern. Diese basiert auf der Grundlage des Haber-Bosch-Verfahrens, welches sehr energieintensiv (58 MJ/kg) ist. Damit verbunden sind hohe CO₂-Emissionen (8,5 kg CO₂-Äq./kg; ecoinvent Centre 2010). Zusätzlich wird während und nach der Ausbringung ein Teil des N-Düngers als N₂O emittiert. Durch einen reduzierten Einsatz mineralischer N-Dünger lassen sich beide erwähnten Emissionen entsprechend reduzieren.

Aufgrund der Datenverfügbarkeit werden folgende Kulturen für die N-Überschussanalyse berücksichtigt: Winterweizen, Körnermais, Silomais, Zuckerrüben, mittelintensive Naturwiesen/Mähweiden (siehe auch Tabelle 28 (Bosshard und Richner 2013)). Die N-Überschüsse (Mediane des Gesamtstickstoffs; N_{tot}) werden zu 100 % den mineralischen N-Düngern (verfügbaren Stickstoff; N_{verf}) angerechnet, da Hofdünger schwer zu reduzieren ist (nur bei Änderung der Besatzdichte oder Erhöhung der LN; siehe auch Diskussion unten). Als Referenz wurden die kulturspezifischen Düngenormen nach GRUDAF verwendet (= keine Stickstoffüberschuss; Flisch *et al.* 2009) zuzüglich einer 10 % Toleranz (analog zur Suisse-Bilanz; Referenz=Normdüngung+10% der Normdüngung). Es sei noch betont, dass bei dieser Massnahme nicht von einer Ertragsreduktion ausgegangen wird.

Tabelle 28: Wichtigste Kenngrössen der Massnahme „parzellen-spezifische Düngebilanz“. Die Berechnung der zu reduzierenden Düngermenge erfolgte über den verfügbaren Stickstoff (N_{verf}).

	Berechnete Menge an zu reduzierender N-Düngung	Fläche Ackbau	Fläche VrkMilch	Fläche AndRind	Fläche Schwein
	[kg N_{verf} /ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
Winterweizen	28,4	7,0	0,3	-	0,2
Zuckerrübe	38,5	2,4	0,1	-	-
Körnermais	95,3	1,4	0,1	-	0,04
Silomais	59,4	1,3	1,1	0,6	0,6
Naturwiese (mittelint.)	29,0	0,5	5,2	6,3	5,8

4.13.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Durch die Verringerung von N-Überschüssen liess sich die Emission von THG auf den Modellbetrieben zwischen 3,2 g (Schwein) und 19,3 g (AndRind) CO_2 -Äquivalenten pro MJ vE reduzieren. In Relation zur gesamtbetrieblichen Produktion hatte die Massnahme ein Reduktionspotenzial zwischen 0,8 % (Schwein) und 5,2 % (Ackbau).

Im Hinblick auf andere Umweltwirkungen führte die Massnahme ausschliesslich zu Reduktionen. Die grösste Auswirkung war bei der aquatischen Eutrophierung mit Reduktionen zwischen 6 % (Schwein) und 20 % (AndRind) zu verzeichnen, gefolgt von der terrestrischen Eutrophierung mit Reduktionen zwischen 1 % (Schwein) und 8 % (Ackbau).

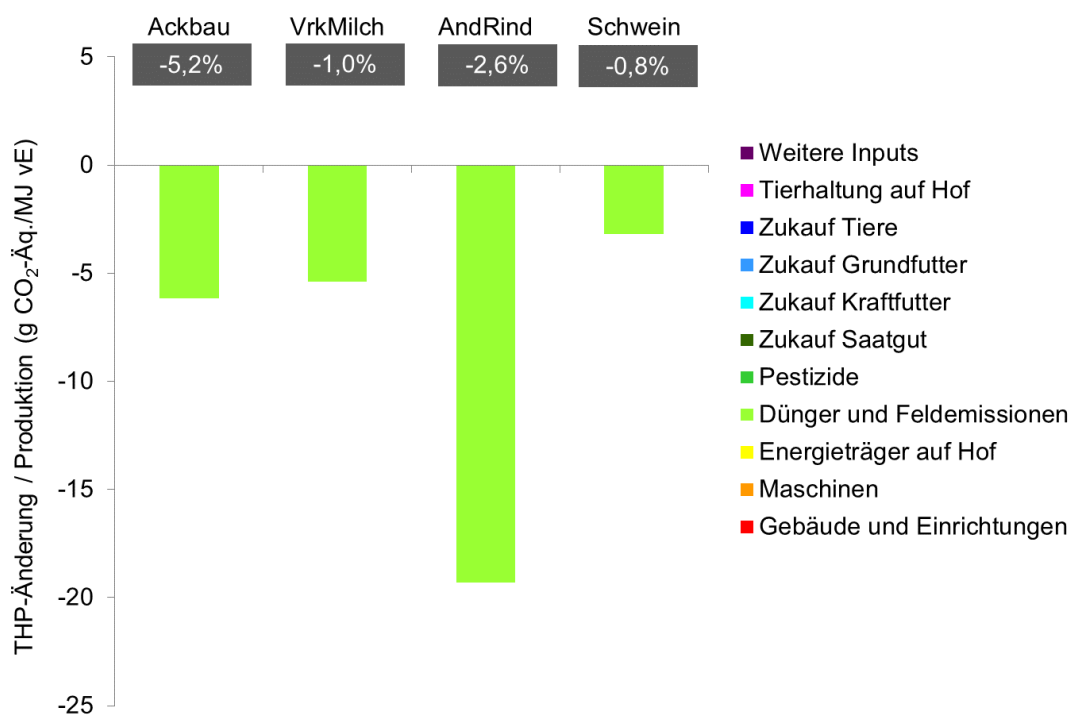


Abbildung 33: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Parzellen-spezifische Düngebilanz“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

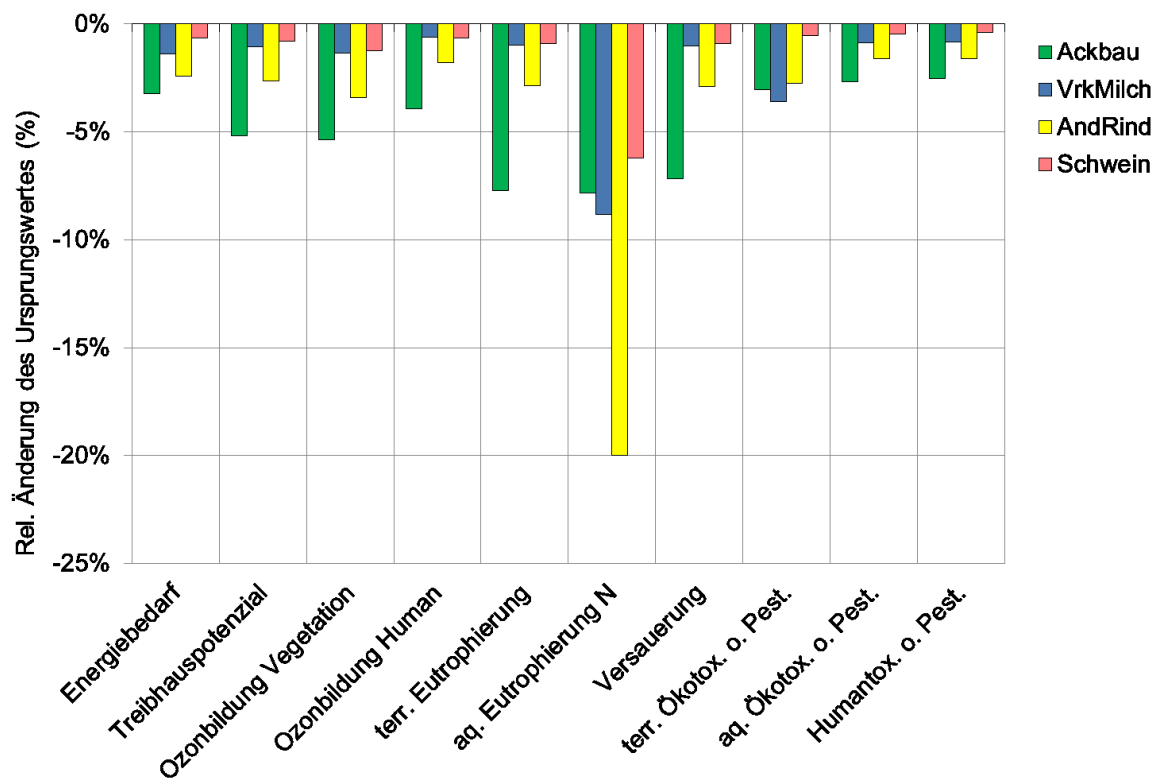


Abbildung 34: Wichtigste Effekte der Massnahme „Parzellen-spezifische Düngebilanz“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.13.3 Diskussion

Das Reduktionspotenzial der Massnahme „parzellenspezifische Düngebilanz“ wird hauptsächlich von drei Faktoren beeinflusst: 1) der Flächenanteile mit reduzierter Düngung, 2) der kulturspezifischen Höhe der reduzierten N-Düngung (siehe Tabelle 28) und 3) der Interaktion zwischen N-Reduktion und Kulturtyp. Die ersten beiden Faktoren erklären den relativ hohen Reduktionseffekt bei dem Betrieb Ackbau. Auf diesem Betrieb ist jede von der Düngereduktion betroffene Kultur vorhanden. Zudem weist dieser Betrieb den grössten Flächenanteil an Körnermais (1,4 ha) auf, der die höchsten N-Überschüsse (95,3 kg N_{tot}/ha) und somit das höchste Reduktionspotenzial aufweist. Der dritte Faktor folgt aus der Tatsache, dass eine Einheit N-Dünger bei unterschiedlichen Kulturen zu unterschiedlichen THGE führt. Diese Interaktion hängt vor allem mit der unterschiedlichen Nitratdynamik der Kulturen (u.a. Düngezeitpunkt, N-Aufnahme) zusammen, die sich auf die N₂O-Emissionen auswirken. Dieser „Kultureffekt“ bedeutet, dass eine Einheit N-Dünger bei Naturwiese (mittelintensiv) zu den relativ höchsten N₂O-Emissionen führt. Da AndRind einen relativ hohen Anteil an Wiesen besitzt (6,3 ha), waren hier durch Vermeidung von N-Überschüssen deutliche THGE-Reduktionen zu verzeichnen.

Die vollständige Zuschreibung der N-Überschüsse auf die mineralischen Dünger ($N_{tot} = N_{verf}$) ist eine starke Vereinfachung der Realität und entspricht so nicht den realen Prozessen. Durch diese Annahmen kommt es tendenziell zu einer Überschätzung der zu reduzierenden Menge an mineralischen N-Dünger, da der Gesamtstickstoffgehalt weitere, auch immobile N-Formen beinhaltet. Dazu haben Hofdünger, die in der Analyse nicht berücksichtigt wurden, ein hohes Potenzial zu N-Überschüssen zu führen, da sie nicht „vermieden“ werden können bzw. nur längerfristig über eine Verringerung der Besatzdichte. Zudem ist innerhalb der landwirtschaftlichen Produktion immer mit unvermeidbaren N-Verlusten zu rechnen, unabhängig vom Management.

Anzumerken ist auch, dass gemäss neuester Technologie das bei der Mineraldüngerproduktion entstehende N₂O abgefangen und gebunden wird, was das THP der gängigsten N-Dünger deutlich

verringert (Brenttrup und Pallière 2008). Diese neuste Technologie ist in den hier verwendeten Düngemittelinventaren jedoch noch nicht berücksichtigt und würde das Einsparungspotenzial der Massnahme verringern.

Für die Umsetzung dieser Massnahme wäre evtl. noch zu überlegen, ob eine zwischenbetriebliche Kooperation nicht sinnvoll wäre, um eventuelle Düngeüberschüsse eines Betriebes mit dem Düngebedarf eines anderen Betriebes auszugleichen.

4.14 Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes

4.14.1 Beschreibung der Massnahme

Eine Neuansaat von Dauergrünland kann notwendig sein, wenn durch unangepasste Bewirtschaftung, extreme Witterungen (Auswinterung, Trockenheit) oder Wühlmausschäden der Bestand sehr lückig wird und/oder die Artenzusammensetzung sich ungünstig verschiebt (wenig hochwertige Futtergräser wie z.B. *Lolium multiflorum* oder Unkräuter wie z.B. Ampfer)³. Um eine entsprechende Futterqualität und Ertrag des Grünlandes wieder herzustellen, ist im Extremfall eine Neuansaat notwendig, die konventionell mit einem Umbruch des Grünlandes verbunden ist (Buchgraber und Schaffer 1995; Huguenin-Elie *et al.* 2006; Stutz *et al.* 2010).

Eine intensive Bodenbearbeitung, wie z.B. ein Umbruch von Dauergrünland, kann durch eine erhöhte Mineralisation zu einem Abbau der Kohlenstoff- und Stickstoffpools der Böden und zu damit verbundenen THG-Emissionen führen (Horn *et al.* 2010; Lal 2010). Wichtige Gase sind hier das N₂O und das CO₂, die nach dem Umbruch von Dauergrünland erhöht aus dem Boden freigesetzt werden können (Merbold *et al.* 2014; Vellinga *et al.* 2004). Als Massnahme zur Reduktion dieser THGE wurde darum eine umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands betrachtet.

Als Referenz wurde eine Neuansaat mit Umbruch angenommen. Als umbruchlose Massnahmen wurden zwei Varianten analysiert: (A) minimale Bodenbearbeitung (mechanisch), (B) Direktsaatverfahren (chemisch). Die Arbeitsprozesse beider Varianten sind in Tabelle 29 beschrieben.

In den Berechnungen wurden nur die N₂O-Emissionen berücksichtigt, die durch den Umbruch entstehen. Änderungen des Bodenkohlenstoffs sowie bodenbürtige CO₂-Emissionen wurden aufgrund der Konsistenz (allgemein in dieser Studie nicht berücksichtigt) nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der zusätzlichen N₂O-Emissionen, die durch eine Bodenbearbeitung (wie beispielsweise der Umbruch) von Grünland entstehen, wurde das Modell von Vellinga *et al.* (2004) verwendet. In diesem werden die zusätzlichen N₂O-Emissionen aus den zusätzlichen durch den Umbruch entstehenden Nitratverlusten (Nitrat auswaschung) berechnet. Die Nitratverluste, die durch die Bodenbearbeitung bzw. Neuansaat entstehen (Referenz und beide Massnahmenvarianten), wurden mit SALCA berechnet.

Tabelle 29: Übersicht über die angenommenen Arbeitsprozesse der verschiedenen Varianten der Neuansaat des Dauergrünlandes

Neuansaat des Dauergrünlandes	Referenz (Pflug)	Massnahme	
		(A) mechanisch	(B) chemisch
Arbeitsprozesse/Maschinen	Pflügen 1mal Fräsen Drillsaat Walzen	2mal Grubbern 1mal Fräsen Drillsaat Walzen	Feldspritze (Glyphosat; 1980 g /ha) Direktsaat

³ Bei dieser Massnahme handelt es sich nicht um einen Landnutzungswandel

4.14.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Durch die Neuansaat ohne Pflug liessen sich die THGE auf den Modellbetrieben mit der mechanischen Variante zwischen 0,1 g (Ackbau) und 21,3 g (AndRind) CO₂-Äquivalenten pro MJ vE und der chemischen Variante zwischen 0,6 g (Ackbau) und 34,8 g (AndRind) CO₂-Äquivalenten pro MJ vE reduzieren. Diese Änderungen der THGE kamen hauptsächlich aus den Inputgruppen „Dünger und Feldemissionen“ und „Energieträger auf Hof“. In Relation zur gesamtbetrieblichen Produktion hatte die Massnahme das Potenzial einer Reduktion zwischen 0,1 % (Ackbau) und 2,9 % (AndRind) bei der mechanischen, bzw. 0,6 % (Ackbau) und 4,8 % (AndRind) bei der chemischen Variante.

Eine zusätzliche positive Wirkung hatte diese Massnahme vor allem auf die aquatische Eutrophierung N und P, mit Reduktion zwischen 7 % (Ackbau, mechanisch) und 59 % (Schwein, chemisch), bzw. zwischen 1 % (Ackbau, mechanisch und chemisch) und 6 % (VkrMilch, mechanisch). Die chemische Variante führte zudem zu einer leichten Reduktion bei der aquatischen Ökotoxizität Nicht-Pestizide (bis zu 2 %) und der Humantoxizität Nicht-Pestizide, bis zu 3 %. Auf die Öko- und Humantoxizität mit Pestiziden hatte die Massnahme keinen Effekt.

Eine Zunahme war bei der Umweltwirkungen „Ressourcenbedarf P“ zwischen 0 % und 12,5 % (VkrMilch, chemisch) zu verzeichnen, welche auf der Produktion von Glyphosat, einer phosphorhaltige Verbindung, beruhte. Zudem stieg der Energiebedarf bei der mechanischen Variante (bis 2 %, AndRind), da hier mehrere energieintensive Bodenbearbeitungsschritte notwendig waren.

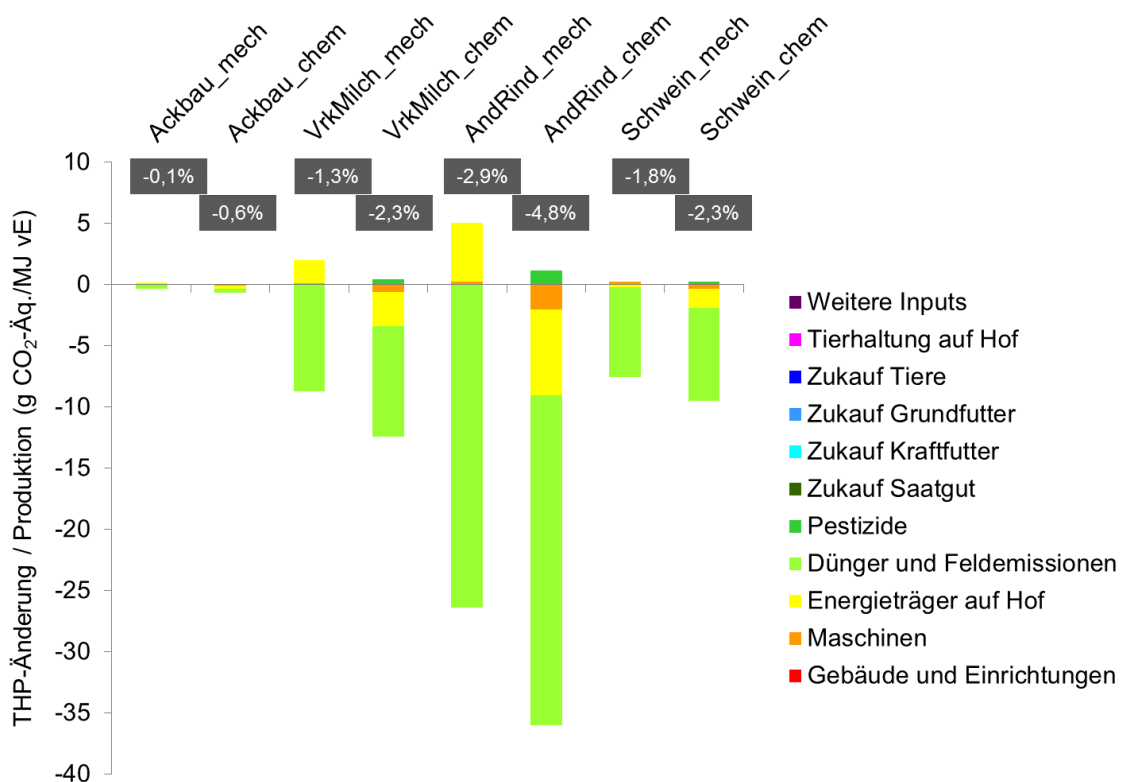


Abbildung 35: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider. Die Endung „mech“ steht für die Variante (A) mit minimaler Bodenbearbeitung und „chem“ für die Variante (B) mit Direktsaat.

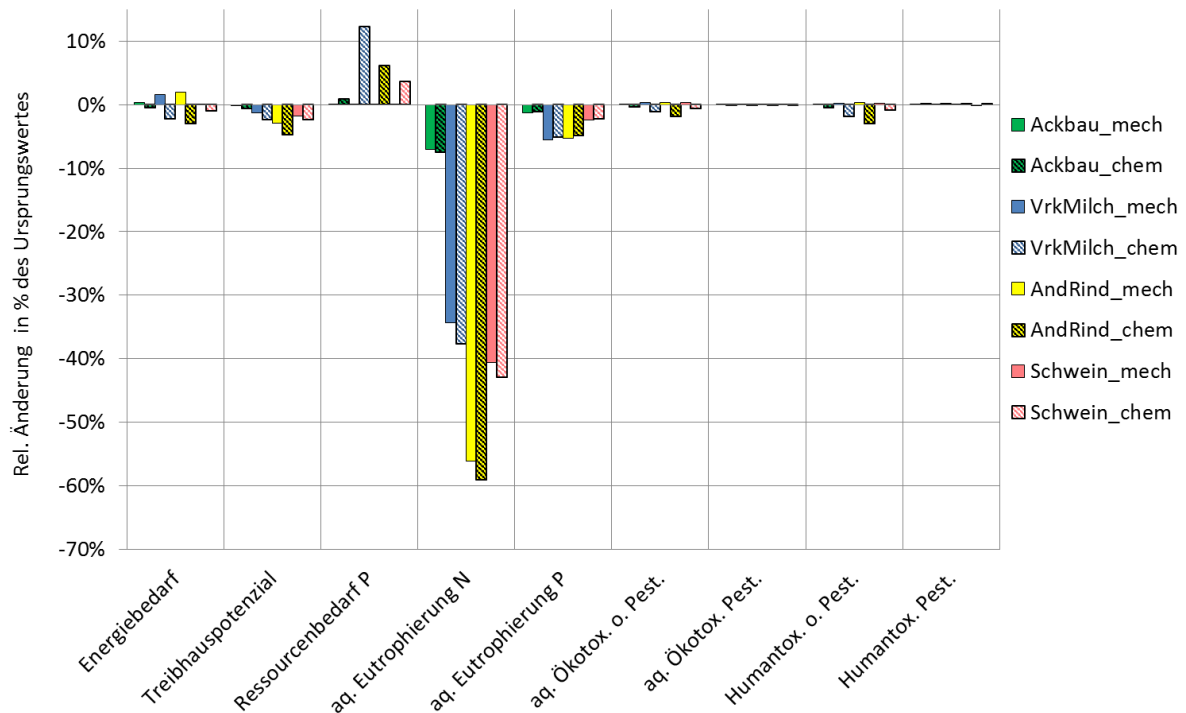


Abbildung 36: Wichtigste Effekte der Massnahme „Umbruchlose Erneuerung des Dauergrünlands“ auf weitere Umweltwirkungen. Die Endung „mech“ steht für die Variante (A) mit minimaler Bodenbearbeitung, und „chem“ für die Variante (B) mit Direktsaat.

4.14.3 Wirtschaftlichkeit

Bei der Kalkulation wurde ausgehend von der Gesamtfläche Grünland davon ausgegangen, dass alle zehn Jahre eine Neuansaat des Dauergrünlandes notwendig ist. D.h. jährlich wurden 10 % der Grünlandfläche der Modellbetriebe neu eingesät. Während die Grasnarbe in der Referenz mechanisch mithilfe eines Pflugs zerstört wurde, wurde für die Massnahme davon ausgegangen, dass einerseits ein mechanisches Verfahren (mittels Grubber), andererseits ein chemisches Verfahren (mithilfe des Herbizids Glyphosat) zur Anwendung kam (vgl. Tabelle 29 oben). Die für die mechanische Variante benötigten Maschinen waren auf den Modellbetrieben gemäss dem Maschineninventar der ZA-ÖB (Hersener *et al.* 2011) vorhanden. Bei der Ausbringung des Herbizids und der anschliessenden Direktsaat wurde hingegen davon ausgegangen, dass dies durch einen Lohnunternehmer durchgeführt wurde.

Bei beiden Varianten (Tabelle 30 und Tabelle 31) entstand auf allen Modellbetrieben ein Gewinn im Vergleich zur Referenz, der je nach Grösse des vorhandenen Dauergrünlands unterschiedlich hoch ausfiel. Ein Vergleich zwischen den Varianten zeigt auch, dass die mittleren jährlichen Gewinne im Falle der Anwendung der chemischen Variante höher ausfielen, als bei der Bearbeitung mit Grubber: Durch den Einsatz eines Grubbers anstelle des Pflugs sparten die Modellbetriebe zwischen 18 und 89 Franken jährlich. Durch die chemische Massnahme, also den Einsatz von Glyphosat sowie anschliessender Direktsaat, betrug die Ersparnis der Betriebe zwischen 90 und 434 Franken.

Gemäss Arbeitsvoranschlag ART-AV (Stark *et al.* 2014) wurde zudem bei beiden Varianten Arbeitszeit eingespart. Im Falle der mechanischen Bearbeitung reduzierte sich die Arbeitszeit der Betriebe um 0,1 bis zu 0,6 Arbeitsstunden. Bei der chemischen Variante entfiel der gesamte Arbeitsaufwand einer Neuansaat infolge der Beauftragung eines Lohnunternehmers.

Tabelle 30: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Massnahme „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ für die untersuchten Modellbetriebe, mechanische Variante

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	119	3880	3090	6299
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	18	89	57	74
Arbeitsersparnis [h]	0,1	0,6	0,4	0,5
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	0,15	0,02	0,02	0,01

Tabelle 31: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Massnahme „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ für die untersuchten Modellbetriebe, chemische Variante

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	695	6859	5089	7926
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	90	434	281	362
Arbeitsersparnis [h]	2	10	6	8
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	0,13	0,06	0,06	0,05

Die CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent fielen unter Anwendung beider Varianten in ähnlicher Höhe aus. Beim Ackerbaubetrieb waren die CO₂-Reduktionsgewinne bei der Durchführung der mechanischen Variante minimal höher als bei der Durchführung der chemischen Variante. Aufgrund der hohen CO₂-Einsparungen sind die Reduktionsgewinne je kg CO₂-Äquivalent jedoch gering. Dabei müssen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der derzeitigen politischen Diskussion um ein Verbot von Glyphosat gesehen werden (Guyton *et al.* 2015).

4.14.4 Diskussion

Die Berechnungen ergaben, dass der Verzicht auf einen Grünlandumbruch bei einer Neuansaat einer Dauergrünlandfläche zu einer Reduktion der N₂O-Emissionen von 340 - 2480 kg CO₂-Äq./ha*10a führt. Die Grössenordnung dieser Ergebnisse ist vergleichbar mit der Studie von Vellinga *et al.* (2004; 1800 – 5500 kg CO₂-Äq./ha*10a). Aktuell gibt es nur sehr wenige N₂O-Messungen bei Grünlandumbruch. Merbold *et al.* (2014) konnte mit kontinuierlichen Messungen zeigen, dass in dem Jahr, in dem ein Grünlandumbruch stattfand, rund 4300 kg CO₂-Äq./ha*10a als N₂O emittiert wurden. Dies entsprach knapp 15% des jährlichen N-Eintrags durch die Düngung. Im Vergleich zu den beiden diskutierten Studien sind unsere Ergebnisse tendenziell konservativ. Der Unterschied zwischen Vellinga *et al.* (2004) und unserer Studie liegt in der Berechnung der Nitratverluste, anhand derer die N₂O-Emissionen abgeleitet wurden. Allerdings sind N₂O-Emissionen – wie in Kap. 4.10.4 erwähnt – räumlich und zeitlich sehr variabel und von mehreren Faktoren, wie beispielsweise N-Eintrag und Bodenwassergehalt, abhängig (Hartmann und Niklaus 2012; Mori und Hojito 2012). Die vorliegenden Berechnungen gemäss IPCC (2006) sind demnach als grobe Abschätzung zu verstehen.

Über die Häufigkeit einer Grünlanderneuerung waren keine robusten Daten verfügbar. Diskussionen mit Fachleuten über die Häufigkeit einer Grünlanderneuerung ergaben recht unterschiedliche Annahmen bis zu 100 Jahren. Für die Berechnungen wurde schliesslich eine Häufigkeit von 10 Jahren

angenommen, was wahrscheinlich für die Praxis eher zu häufig ist, aber eine Vergleichbarkeit mit Merbold et al. (2014) erlaubt. Unabhängig von der Häufigkeit ist unser Ergebnis wahrscheinlich eine Unterschätzung des Reduktionspotenzials, da die CO₂-Emissionen aus dem Boden nicht berücksichtigt wurden die nach dem Grünlandumbruch erheblich sein können (Merbold et al. 2014).

Auffallend ist jedoch der Unterschied zwischen den beiden Varianten mechanischer und chemischer Neuansaat. Die chemische Variante führte, unabhängig vom Betriebstyp, immer zu einem höheren Reduktionspotenzial als die mechanische Variante. Dies hängt vor allem mit dem niedrigeren Energiebedarf der chemischen Variante zusammen, der zu weniger CO₂-Emissionen führte. Die mechanische Variante hat im Vergleich zur Referenz (Pflugeinsatz) sogar einen höheren Energiebedarf, da mehrere, energieintensive Arbeitsschritte notwendig sind (zweimal Grubbern, siehe Tabelle 29).

Der verringerte Energiebedarf und Maschineneinsatz bei der chemischen Variante spielt auch für die aquatische Ökotoxizität und die Humantoxizität (jeweils Nicht-Pestizide) eine Rolle. Der Erzabbau und die Produktion von Maschinen sind mit Schwermetallemissionen verbunden, die anteilmässig dem Maschineneinsatz zugeschrieben werden. Der erhöhte Einsatz von Glyphosat führt zu einem erhöhten Bedarf an Phosphor, hat aber keinen nennenswerten Effekt auf die Ökotoxizität und die Humantoxizität⁴. Dies ist auf die relativ niedrige Bewertung der Toxizität von Glyphosat (nach der CML-Methode) zurückzuführen. Wenn weitere, deutlich toxischere Pestizide, wie auf den Modellbetrieben der Fall ist, angewendet werden, überdecken diese die niedrige Toxizität von Glyphosat. Als Beispiel seine hier die Charakterisierungsfaktoren für die aquatische Ökotoxizität (m³/g Wirkstoff; CML-Methode) von Glyphosat mit 0,0000775 und Isoproturon mit 0,98 genannt. Allerdings muss das Ergebnis dieser Analyse bzw. das Ergebnis der chemischen Variante unter der Berücksichtigung der derzeitigen politischen Diskussion und ein mögliches Verbot von Glyphosat betrachtet werden (Guyton et al. 2015). Abschliessend ist noch zu erwähnen, dass eine Vermeidung einer Neuansaat, durch z.B. angepasstes Grünlandmanagement, zu einer grösstmöglichen Vermeidung von Emissionen führt. Dies sollte stets Ziel des Landwirtes sein und könnte als solche als Massnahme zugunsten des Klimaschutzes gelten. Da allerdings die Bestandesqualität nicht nur in den Händen des Landwirts liegt und sich auch durch äussere Umstände (wie z.B. nach einer langen Trockenperiode) verschlechtern kann, ist eine Neuansaat teilweise trotz guten Managements notwendig.

4.15 Reduzierter Einsatz mineralischer Stickstoffdünger

4.15.1 Beschreibung der Massnahme

Die Herstellung und Ausbringung mineralischer Stickstoffdünger ist mit hohen CO₂- und N₂O-Emissionen verbunden (siehe Kapitel 4.13 „Parzellen-spezifische Düngebilanz“). Durch einen reduzierten Einsatz mineralischer N-Dünger lassen sich beide erwähnten Emissionen entsprechend reduzieren. Als Referenz galten die Düngennormen nach GRUDAF (Flisch et al. 2009).

Bei der Analyse wurden Ertragsreduktionen abgeschätzt und berücksichtigt, welche vor allem für die Referenzeinheit pro MJ vE und die ökonomische Bewertung von Bedeutung sind. Generell hängt der Ertrag von mehreren Faktoren (wie Standort, Sortenwahl, Verteilung der Düngergaben) und deren Interaktionen ab. Diese komplexen Interaktionen konnten für diese Analyse nicht berücksichtigt werden und es wurde mit allgemeinen Abhängigkeiten zwischen jährlicher Düngermenge und Ertrag gearbeitet. Die Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ betrifft sowohl Ackerkulturen, als auch das Grünland. Um den nicht-linearen Zusammenhang zwischen Düngermenge und Ertrag besser abbilden zu können, wurden zwei Varianten analysiert: 10 % und 20 % Reduktion im Vergleich zur Standard-Ausbringung der Modellbetriebe (angelehnt an GRUDAF 2009).

⁴ In den Ökobilanzen ist die direkte toxische Wirkung auf den Landwirt, die durch einen unmittelbaren Kontakt bei einer Ausbringung entstehen können, nicht enthalten. Die von der WHO vermuteten gesundheitlichen Risiken durch den direkten Kontakt mit dem Wirkstoff sind somit nicht Bestandteil dieser Analyse (Fritschi et al. 2015).

Für die Ackerkulturen wurden kulturspezifische, kontinuierliche Ertragsfunktionen verwendet, anhand derer die Ertragsreduktionen bei beiden Varianten abgeleitet wurden (Richner *et al.* 2010). Für folgende Kulturen war solch eine Funktion verfügbar und wurde deshalb in der Analyse berücksichtigt: Weizen, Wintergerste, Winterraps, Silomais und Körnermais.

Für die Analyse des Grünlandes wurde das gesamte Grünland der Betriebe berücksichtigt (siehe Tabelle 53). Die Berechnung der Ertragsreduktionen erfolgte auf Grundlage der unterschiedlichen Intensitätsstufen (Anzahl Schnitte pro Jahr) der GRUDAF ((Flisch *et al.* 2009)) Düngernorm-Tabelle (Kapitel 3.3, Tabelle 3). In dieser ist die Düngermenge, als auch der erwartete Ertrag von der Höhenstufe und der Bewirtschaftungsintensität (z.B. „intensiv“, „mittelintensiv“) der Grünlandflächen abhängig. Sowie die Ertragsreduktion als auch die reduzierte Düngermenge wurden aus der Differenz zur nächst niedrigeren Bewirtschaftungsintensität (Anzahl Nutzungen pro Jahr; z.B. „Wiese intensiv, 5 Nutzungen“ zu „Wiese intensiv, 4 Nutzungen“) als die in den Modellbetrieben zugewiesen ist, abgeleitet. Da dieser Ansatz, im Gegensatz zu kontinuierliche Ertragsfunktion der Ackerkulturen, eine Stufenweise Reduktion ist, kommt es zu sehr grossen Reduktionsschritten für Dünger und Ertrag (abhängig vom Wiesentyp zwischen 0 und 33 %). Dies bedeutet auch, dass für das Grünland nur eine Variante berechnet wurde, die jeweils mit den beiden Varianten (10 und 20 %) der Ackerkulturen auf Betriebsstufe kombiniert wurde (Tabelle 32). Die Ertragsreduktion im Grünland wurde der Tierhaltung entsprechend mit einem „Zukauf an Grundfutter“ ausgeglichen. Bei dieser Massnahme gibt es keine Änderung der Bewirtschaftungsform, ausser einem Wegfallen des ersten Grünlandschnitts.

Tabelle 32: Reduzierte Mengen an Stickstoffdüngern (verfügbarer Stickstoff = N_{verf}) bei den Ackerkulturen und Grünland, in Abhängigkeit von der Variante (10%, 20% Reduktion) und Betriebstyp. Die Zahlen repräsentieren die Summe über alle berücksichtigten Ackerkulturen und Grünlandtypen.

Betriebstyp	Reduzierte Menge an Stickstoffdünger (kg N_{verf} /Betrieb)		
	Ackerkulturen (Summe)		Grünland (Summe)
	-10 %	-20 %	
Ackbau	178,9	357,7	57,9
VrkMilch	23,8	47,6	52,1
AndRind	12,9	25,7	60,4
Schwein	12,8	25,6	25,6

4.15.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Reduktion von 10 % mineralischen N-Dünger variierte in Abhängigkeit des Betriebstyps zwischen einer Zunahme von 4,4 g (Schwein) und einer Abnahme von 10,0 g $\text{CO}_2\text{-Äq.} / \text{MJ vE}$ (AndRind; Abbildung 37). In Relation zur gesamtbetrieblichen Produktion entsprach dies einer Zunahme von 1,1 % (Schwein) und einer Abnahme von den 1,4 % (AndRind). Die 20 % Variante führte im Verhältnis zur 10 % Variante zu keiner sichtlichen Änderung des Ergebnisses, mit Ausnahme des Betriebes Ackbau. Hier nahm das Reduktionspotenzial von 1,2 g auf 2,0 g $\text{CO}_2\text{-Äquivalenten pro MJ vE}$ zu, was einer gesamtbetrieblichen Reduktion von 1,1 % bzw. 1,8 % entsprach.

Zusätzlich führte die Massnahme zu einer Reduktion der aquatischen Eutrophierung (N:4 bis 28 %; P: 5 bis 30 %) und der terrestrischen Ökotoxizität (Nicht-Pestizide; 2 bis 6 %; Abbildung 38). Innerhalb einiger Umweltwirkungen waren, aufgrund des Zukaufs von Grundfutter, Zunahmen zu verzeichnen: Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien (0 bis +4 %); terrestrische Eutrophierung (-1 bis +10 %), aquatische Ökotoxizität Nicht-Pestizide (1 bis 7%) Humantoxizität Nicht-Pestizide (0 bis +2%) und dem Ressourcenbedarf P (2 bis 13%)

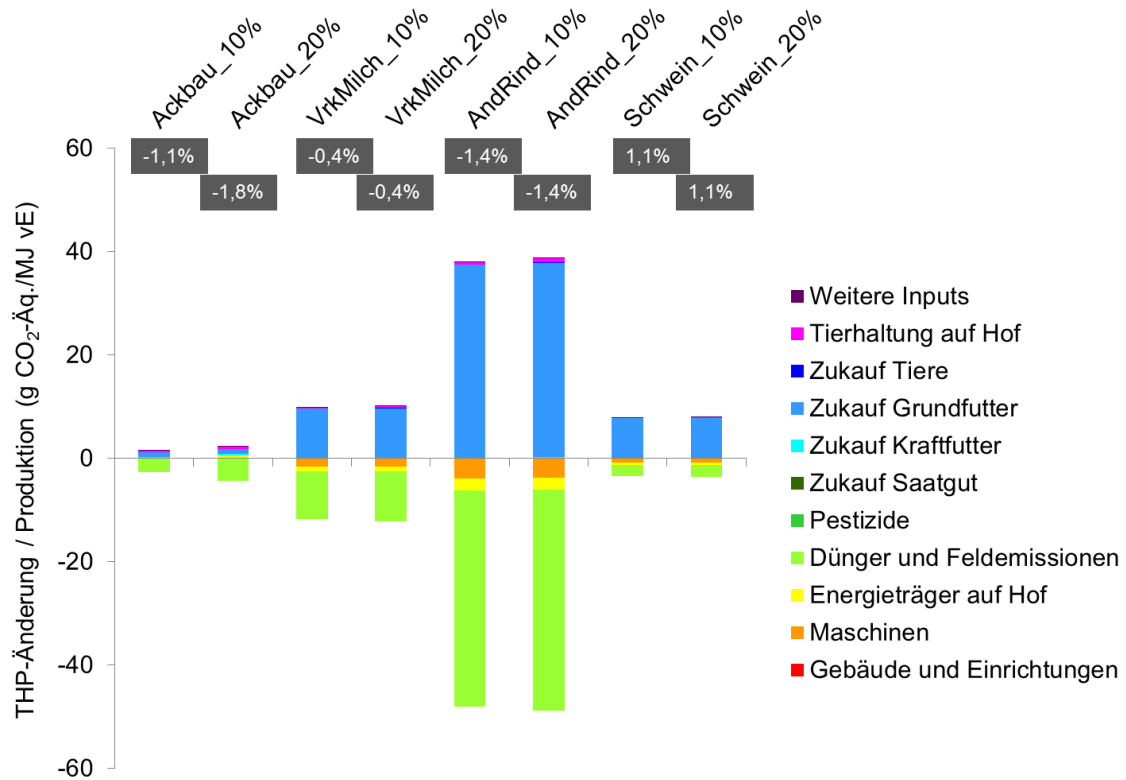


Abbildung 37: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider. Die Endung „10%“ bzw. „20%“ steht für die Variante mit der entsprechenden Düngereduktion bei den Ackerkulturen.

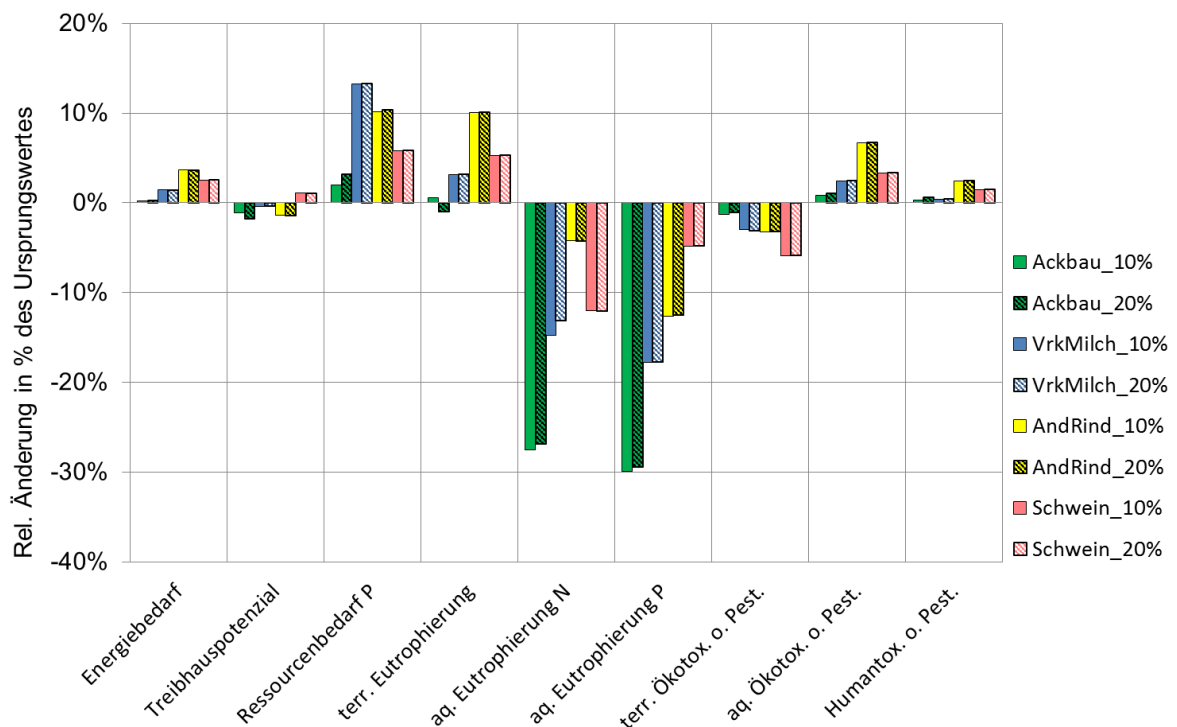


Abbildung 38: Wichtigste Effekte der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ auf weitere Umweltwirkungen

4.15.3 Wirtschaftlichkeit

Wird die Gabe von mineralischem N-Dünger auf Grünland und Ackerland reduziert, so ergeben sich bei Kosten und Leistungen Veränderungen. Einbussen konnten bei Umsetzung der Massnahme grundsätzlich zurückgeführt werden auf 1) Ertragsrückgänge, 2) eine veränderte Qualität der Ernteprodukte, für die geringere Verkaufspreise erzielt werden können und 3) den Wegfall von Feldfutter, welches ersetzt werden muss, um die auf dem Betrieb gehaltenen Tiere zu ernähren. Der reduzierte Einsatz mineralischen N-Düngers dagegen resultierte in geringeren Kosten. Bei den Ackerkulturen kam es zu keiner Reduktion des Arbeitsaufwands. Auf dem Grünland hingegen wurden – neben den geringeren Düngerkosten – gleichermassen auch Arbeits- und Maschinenkosten eingespart: Aufgrund der Ertrags-einbussen wurde hier von einem Schnitt weniger ausgegangen (vgl. oben, Kapitel 4.15.1).

Die Kosten, die infolge der Umsetzung dieser Massnahme entstehen, waren relativ hoch (Tabelle 33 und Tabelle 34). Hohe Kosten entstanden insbesondere bei Betriebstypen mit viel Grünland. Die Kosten resultierten aus der notwendigen Substitution des weniger geernteten Futters infolge der reduzierten N-Düngung. Beim Ackerbaubetrieb waren die Kosten im Falle der zehnpromtigen Reduktion im Verhältnis zu den anderen Betriebstypen relativ gering. Allerdings stiegen vor allem bei diesem Modellbetrieb mit der zunehmenden Höhe der Reduktion des mineralischen N-Düngers von 10 % auf 20 % die Kosten an (von 543 auf 886 Franken). Begründet ist dies in den höheren Ertragsausfällen der Ackerkulturen (v.a. beim Weizen und der Gerste).

Tabelle 33: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Reduktion des mineralischen N-Düngers" für die untersuchten Modellbetriebe (-10 % Düngung auf Ackerland, eine Nutzung weniger auf Grünland)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	2587	1351	1596	-3665
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-543	-2154	-2519	-2870
Risiko	u.U. Qualitätsänderungen bei Ackerfrüchten und Konsequenzen für Verkaufspreise			
Arbeitsersparnis [h]	4	31	46	30
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-0,21	-1,59	-1,58	<i>Emissionszunahme</i>

Tabelle 34: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Reduktion des mineralischen N-Düngers" für die untersuchten Modellbetriebe (-20 % Düngung auf Ackerland, eine Nutzung weniger auf Grünland)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	4905	1642	1760	-3503
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-886	-2184	-2541	-2886
Risiko	u.U. Qualitätsänderungen bei Ackerfrüchten und Konsequenzen für Verkaufspreise			
Arbeitsersparnis [h]	4	31	46	30
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-0,18	-1,33	-1,44	<i>Emissionszunahme</i>

Insgesamt ist die Massnahme wenig risikobehaftet in der Durchführung, da keine Investitionen getätigt werden musste und die Ertragsreduktion aufseiten der Ackerfrüchte sowie die notwendige Futtersubstitution durch Ertragsreduktionen auf dem Grünland mit in die Kalkulationen einbezogen wurden. Nicht in den wirtschaftlichen Betrachtungen berücksichtigt wurden Qualitätsaspekte; so bleibt z.B. ein infolge der reduzierten Düngung veränderter Eiweissgehalt beim Getreide unberücksichtigt, der geringere Verkaufspreise zur Folge hätte. Dies könnte die Kosten noch erhöhen, insbesondere beim Ackerbaubetrieb. Der Arbeitsaufwand sank in beiden Szenarien gleichermassen, da Arbeitszeit aufgrund der getätigten Annahmen lediglich auf Grünland eingespart werden konnte.

Die CO₂-Reduktionskosten pro kg CO₂-Äquivalent fielen entsprechend der unterschiedlichen Einsparmöglichkeiten sowie mittleren jährlichen Verluste in beiden Szenarien in verschiedener Höhe aus. Hervorzuheben sind die Emissionszunahmen beim Modellbetrieb Schweinehaltung. Da die Treibhausgasreduktionen beim Modellbetrieb Ackerbau in Relation zu den jährlichen Verlusten relativ gross ausfielen, weist dieser Betrieb in beiden Szenarien jeweils die geringsten Reduktionskosten auf.

4.15.4 Diskussion

Das Ergebnis der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ wird stark durch die allgemeine Ertragsreduktion und den damit verbundenen notwendigen Zukauf von Grundfutter zur Kompensation der Ertragsreduktion des Grünlandes beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass die THG-Reduktionspotenzial relativ gering ist bzw. sogar zu einer Zunahme der THGE führt (bis 1,1 %; Abbildung 37). Der Zukauf an Grundfutter und deren intensive Produktionsweise sind auch für die Zunahme bei anderer Umweltwirkungen, wie Energiebedarf, Phosphorbedarf und terrestrische Eutrophierung verantwortlich. Da die Ertragsreduktionen beim Grünland besonders hoch ausfallen, haben diese das Ergebnis massgeblich beeinflusst. Das ist bei den Betriebstypen mit einem hohen Grünlandanteil besonders deutlich (VrkMilch, AndRind): der Unterschied zwischen den beiden Reduktionsvarianten (10 %, 20 %) fällt marginal aus (0,01 %). Demgegenüber, war bei Betrieben mit einem hohen Ackerlandanteil (Ackbau) der Unterschied zwischen den beiden Varianten deutlicher ausgeprägt (0,7 %). Bei den Ackerkulturen ist die Ertragsreduktion für die Kultur „Winterraps“ mit 2,9 % bei der 10 % Variante und 6 % bei der 20 % Variante am deutlichsten. Im Verhältnis zu den Ertragsreduktionen beim Grünland, mit durchschnittlich 17 % und maximal 33%, ist diese weniger drastisch. Dies spiegelt sich auch in der Wirtschaftlichkeit wieder: die Reduktionskosten waren bei Betrieben mit einem relativ hohen Grünlandanteil am höchsten.

Die verwendete Methode mittels der GRUDAF-Intensitätsstufen, führt sicherlich zu einer Überschätzung der Ertragsreduktion für das Grünland und somit zu einer Unterschätzung der Massnahmenwirkung. Diese Einschätzung wird durch Studien zur Wechselwirkung zwischen Leguminosen und Düngung unterstützt. Bei der Reduktion der N-Düngung auf Grünland fördert man den Kleeanteil, welcher wiederum die reduzierte Menge an N-Dünger durch symbiotische Stickstofffixierung kompensieren kann. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer moderaten N-Düngung (50 bzw. 150 kg N/ ha a) die höchsten Erträge erzielt wurden (Nyfeler *et al.* 2011). Durch eine moderaten N-Düngung fördert man den Anteil an Leguminosen und somit die symbiotischen N-Fixierung, die die Düngereduktion überkompensiert. Allerdings ist dieser Zusammenhang sehr stark vom Standort (Höhe), der Artenzusammensetzung und der Bewirtschaftung abhängig und muss noch genauer erforscht werden, um verlässliche Aussagen zu machen.

Unter den getroffenen Annahmen dieser Analyse, ist die Massnahme besonders für Ackerbaubetriebe (geringe Änderung des Grenzertrags bei high-input Ackerkulturen) zu empfehlen. Die Verwendung eines differenzierteren Ertragsmodells für das Grünland, welches zum Zeitpunkt der Analyse nicht verfügbar war, würde sehr wahrscheinlich zu geringeren Ertragsreduktionen und somit zu einem höheren THG-Reduktionspotenzial bei Grünlandbetrieben führen.

In Anbetracht der N-Überschüsse (Bosshard und Richner 2013); siehe Massnahme „Düngeplan“) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und den erwähnten Wechselwirkungen zwischen Leguminosen und

Düngung im Grünland, wird allgemein die Reduktion von mineralischen N-Düngern, als sinnvolle Massnahme für den Klimaschutz (und Gewässerschutz) bewertet.

4.16 Gülleausbringung mit Schleppschlauch

4.16.1 Beschreibung der Massnahme

Die Hofdüngerausbringung ist mit 46 % der Emissionen der Tierproduktion die wichtigste Emissionsquelle für NH₃-Emissionen in der Schweiz (Kupper und Menzi 2013). Schleppschlauchverteiler für Gülle weisen im Vergleich zu Breitverteilern eine hohe Verteilgenauigkeit auf und vermindern NH₃-Emissionen durch die streifenförmige Ablage der Gülle effektiv (Sauter *et al.* 2010). In der vorliegenden Massnahme wurde die Gülleausbringung mittels Breitverteiler mit der Ausbringung mittels Schleppschlauch verglichen. Dabei wurde das jeweilige Verfahren auf die gesamte auf dem Hof auszubringende Güllemenge angewendet. Durch die Vermeidung von gasförmigen N-Verlusten kommt mehr N bei den Pflanzen an. Gemäss Suisse-Bilanz müssen bei Gülleausbringung mit dem Schleppschlauch pro Gabe und Hektare 3 kg N_{verf} angerechnet werden. Da sich die auszubringende Güllemenge mit der Massnahme nicht änderte, wurde auf den Modellbetrieben die entsprechende Menge Mineraldünger reduziert. Tabelle 35 zeigt einen Überblick über die Güllemengen sowie den Mineraldüngereinsatz der vier analysierten Modellbetriebe.

Ebenso berücksichtigt wurden das höhere Gesamtgewicht der Zugkombination mit Schleppschlauchverteiler sowie eine leichte Erhöhung des Treibstoffbedarfs durch die dadurch nötige höhere Zugleistung. Es wurde mit einer Erhöhung des Gesamtgewichts der Zugkombination um 10 % sowie einer mittleren zusätzliche nötigen Zugleistung von 3 kW gerechnet.

Tabelle 35: Auszubringende Güllemenge sowie Einsatz von Mineraldüngern der vier analysierten Modellbetriebe

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Gülleanfall [m ³]	122	915	239	1251
Güllewegfuhr [m ³]	-	-	-	440
Auszubringende Güllemenge [m ³]	122	915	239	811
Ausgebrachte Menge N-Mineraldünger [kg N]	2633	754	976	325
Reduktion N-Mineraldünger mit Massnahme [% des Gesamtbedarfs]	4 %	16 %	11 %	24 %

4.16.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Ausbringung der gesamten Gülle mittels Schleppschlauch verminderte die THGE der vier analysierten Modellbetriebe um 0,2 bis 0,9 % bzw. 0,25 bis 4,5 g CO₂-Äquivalente pro MJ vE (Abbildung 39). Durch die Reduktion der NH₃-Emissionen bei der Ausbringung der Gülle verminderten sich die induzierten N₂O-Emissionen in der Inputgruppe „Feldemissionen“. Der zusätzliche Treibstoffbedarf infolge des höheren Maschinengewichts erhöhte das THP um maximal 0,04 g CO₂-Äquivalente pro MJ vE.

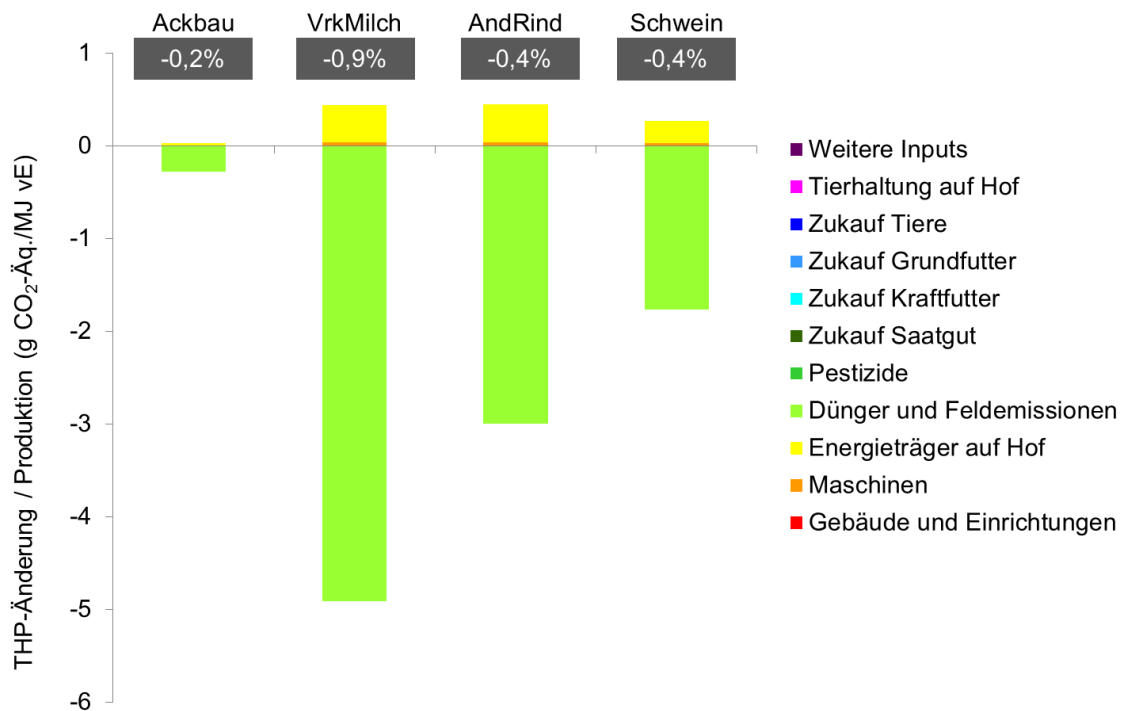


Abbildung 39: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Schleppschlauch“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

Die grösste Wirkung entfaltete die Massnahme Schleppschlauch auf die Umweltwirkungen terr. Eutrophierung und Versauerung (Abbildung 40). Hier führten die verminderten Ammoniakemissionen zu einer Reduktion von bis zu 10 % (terr. Eutrophierung beim Modellbetrieb VrkMilch). Auch zu einer Reduktion kam es beim Energiebedarf, was an der Reduktion des N-Mineraldüngereinsatzes lag. Dieser war auch der Grund für die leichte Reduktion der Ökotoxizität durch Nicht-Pestizide sowie der Human-toxizität. Die Umweltwirkung aquatische Eutrophierung N hingegen erhöhte sich infolge eines höheren Risikos für Nitrat auswaschung.

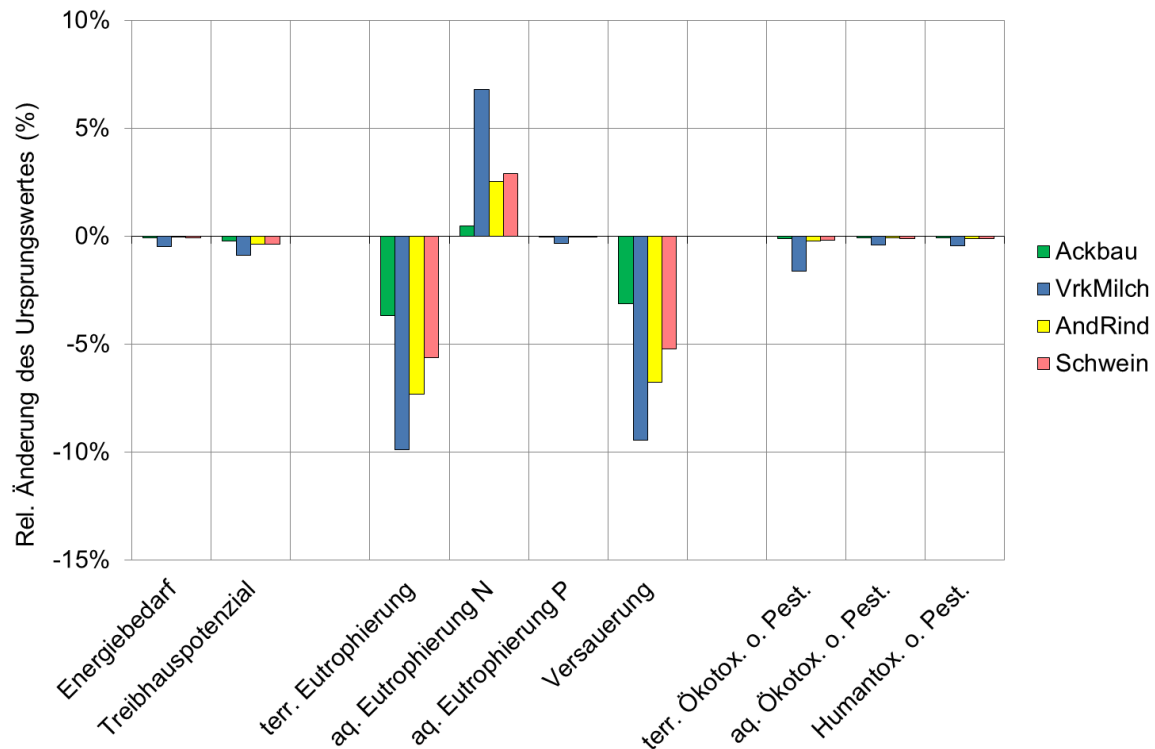


Abbildung 40: Wichtigste Effekte der Massnahme „Schleppschauch“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.16.3 Diskussion

Die Massnahme „Schleppschauch“ vermochte die THGE sichtbar zu senken. Dies lag daran, dass sie ganz am Ende der N-Kette ansetzte. Die hier eingesparten NH_3 -Emissionen konnten nicht mehr zu einem späteren Zeitpunkt in der nachfolgenden Kette verloren gehen, was zu einer effektiven Einsparung der N-Emissionen führte. Die vermiedenen NH_3 -Emissionen führten allerdings zu einem erhöhten N-Eintrag in den Boden. Dieser erhöhte das Risiko für Nitratauswaschung. Zwar wurde der erhöhte N-Eintrag in den Boden durch die Hofdünger in Form einer Mineraldüngerreduktion berücksichtigt; die Verminderung des Einsatzes von verfügbarem N um 3 kg pro ha und Güllegabe gemäss Suisse Bilanz reichte jedoch nicht aus, um das höhere Risiko für Nitratemissionen zu vermeiden.

4.17 Ausbringung von Gärresten

4.17.1 Beschreibung der Massnahme

Durch die Abnahme und Ausbringung von Gärresten aus Biogasanlagen können mineralische Dünger ersetzt werden, daneben wird durch die Erhöhung der Nachfrage nach Gärsubstrat indirekt die Produktion erneuerbarer Energie in Biogasanlagen gefördert. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit, eigene Hofdünger in Biogasanlagen zu vergären. Dadurch können CH_4 -Emissionen verringert werden, welche aus der Gülle entstehen und in der Biogasanlage abgefangen werden können. Die Abgabe von Gülle bei Biogasanlagen bedingt jedoch die Anwesenheit einer entsprechenden Anlage in Betriebsnähe. Zudem kann sie in einigen Kantonen kostenpflichtig sein und lohnt sich unter diesen Umständen nur für Betriebe mit einem Hofdüngerüberschuss.

In den vorliegenden Analysen wurden je nach Modellbetrieb unterschiedliche Varianten berechnet: Die Betriebe Ackerbau, Verkehrsmilch und Anderes Rindvieh können ihren Nährstoffbedarf über die eigenen Hofdünger nicht decken. Sie beziehen in der Massnahme Gärsubstrat aus Biogasanlagen, um damit mineralische Dünger zu ersetzen. Da bei der Herstellung von N-Mineraldüngern viel Energie verbraucht und N_2O freigesetzt wird, vermindert eine Einsparung von N-Mineraldüngern die Emission

von Treibhausgasen. Die Berechnung der zuführbaren Menge an Gärresten wurde sowohl bezüglich Stickstoff als auch Phosphor durchgeführt. Um einen Überschuss beim limitierenden Element zu vermeiden, wurden so viele Gärreste auf den Betrieb zugeführt, bis die maximale Menge beim tieferen Nährstoff erreicht war.

Der Betrieb Schweine verfügt über einen Nährstoffüberschuss. Er führt in der Massnahme seine Gülle in eine Biogasanlage, lässt sie dort vergären und nimmt die gemäss seinem Nährstoffbedarf maximal mögliche Menge an Gärgut zurück. Durch die Vergärung der Gülle kann ein Grossteil der Hofdüngerlagerungsemissionen vermieden werden. Gemäss Dauriat *et al.* (2011) wurden dem Betrieb noch 10 % der Hofdüngerlagerungsemissionen angerechnet. Der aus der abgelieferten Gülle produzierte Strom wurde dem Betrieb gutgeschrieben. Dabei wurde gemäss Zah *et al.* (2007) von einem Stromertrag von 0,05 kWh pro Kilogramm organische Substanz in der Gülle ausgegangen.

Zugeführt auf die Landwirtschaftsbetriebe werden lediglich die flüssigen Gärreste, welche nach der Separierung von der Festphase übrig bleiben. Die Ausbringung des Gärgutes erfolgt mittels Schlepplschlauch. Die Ausbringungsemissionen der Gärgülle wurden gemäss Agrammon (Kupper und Menzi 2013) berechnet. Die direkten Emissionen der Biogasanlage z.B. durch Lecks sowie die Emissionen während der Gärgutlagerung wurden nicht berücksichtigt. Da die Gärreste in der Regel gratis an die Landwirte abgegeben werden, wurde hier ein Cut-off eingeführt.

Tabelle 36 zeigt die wichtigsten Kennzahlen zur Ermittlung des Reduktionspotenzials der Massnahme. Der höhere Treibstoffbedarf durch den Schlepplschlaucheinsatz wurde berücksichtigt; grob abgeschätzt wurde basierend auf Rinaldi *et al.* (2005) ein drei Mal höherer Treibstoffbedarf pro gedüngte Hektare veranschlagt.

Tabelle 36: Wichtigste Kennzahlen der Massnahme "Ausbringung von Gärresten"

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Mineraldüngerbedarf Referenz				
N-Mineraldünger [kg N / a]	2629	754	976	325
P-Mineraldünger [kg P ₂ O ₅ / a]	1092	178	517	0
Zufuhr an Gärresten [t/a]	546	89	258	970
Eigene Gülle in Vergärungsanlage [m ³ /a]	-	-	-	1141
Ersatz Mineraldünger durch Gärreste				
N-Mineraldünger [% von Gesamtbedarf]	50 %	28 %	64 %	-
P-Mineraldünger [% von Gesamtbedarf]	100 %	100 %	100 %	-

Bezüglich Nährstoffgehalt des Gärsubstrats wurde von folgenden Werten ausgegangen (Flisch *et al.*, 2009): 4 kg N_{tot}/t; 2 kg P₂O₅/t und 4 kg K₂O/t. Diese beziehen sich zwar auf gewerblich-industrielle Biogasanlagen, ein Vergleich mit Werten aus Bosshard *et al.* (2008), Brücker *et al.* (2005) sowie Haber *et al.* (2008) zeigte jedoch für landwirtschaftliche Biogasanlagen keine wesentlich anderen Werte an. Einzig der Kalium-Gehalt war gemäss diesen Studien mit im Mittel 5,5 kg K₂O pro Tonne etwas höher. Die N-Verfügbarkeit wurde mit 60 % analog zu unvergorener Gülle angenommen.

4.17.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Durch den Einsatz der Gärreste konnten alle Modellbetriebe ihren THG-Ausstoss senken (Abbildung 41). Am grössten war die Reduktion mit 29 g CO₂-Äquivalenten beim Modellbetrieb Schweine, am kleinsten beim Modellbetrieb Verkehrsmilch. Deutlich zu sehen waren die zwei unterschiedlichen Modellierungsvarianten: Bei den Modellbetrieben Ackerbau, Verkehrsmilch und Anderes Rindvieh, welche mit den bezogenen Gärresten Mineraldünger ersetzten, erfolgten die Einsparungen in der

Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“. Dies lag an den grossen Einsparungen an CO₂ und N₂O durch die reduzierte Mineraldüngemittelproduktion, welche die erhöhten N₂O durch die Ausbringung der Gärreste kompensierte. Die Erhöhung des Treibstoffbedarfs infolge des Schleppschlaucheinsatzes fiel nicht gross ins Gewicht.

Beim Modellbetrieb Schweine hingegen erfolgten die Einsparungen zum grössten Teil in der Inputgruppe „Tierhaltung auf Hof“. Durch die Vergärung seiner Gülle sparte er eine erhebliche Menge an Lagerungsemissionen aus der Gülle ein. Eine kleine Einsparung fand zudem bei der Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“ statt. Dies lag daran, dass die gesamten Gärreste mit Schleppschlauch ausgebracht wurden, während bei der Referenz gemäss Kupper und Menzi (2013) lediglich rund 30 % der Gülleausbringung mittels Schleppschlauch stattfand.

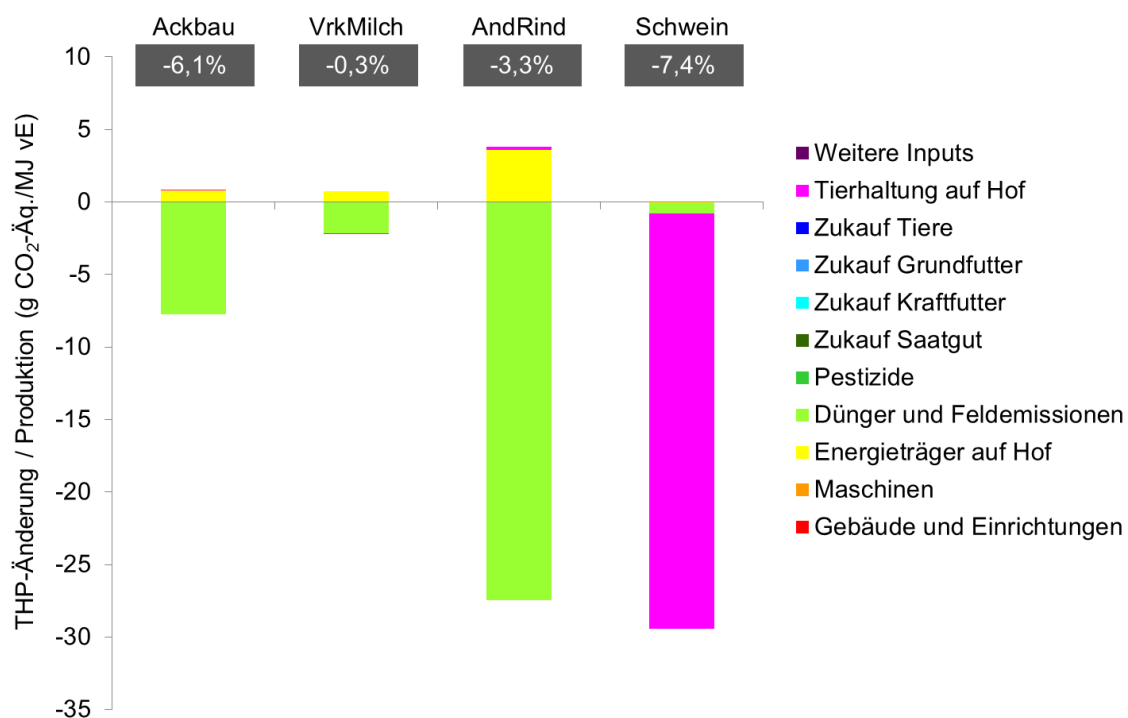


Abbildung 41: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Gärreste“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider.

Der Einsatz von Gärresten wirkte sich bei allen Betrieben neben dem THP positiv auf die Umweltwirkungen Energiebedarf, Ozonbildungspotenzial, Ressourcenbedarf P und K sowie Öko- und Humantoxizität durch Nicht-Pestizide aus. Auch die aquatische Eutrophierung nahm ab. Dies lag am reduzierten Einsatz von Mineraldüngern bei den Modellbetrieben Ackbau, VrkMilch und AndRind resp. der Stromgutschrift beim Betrieb Schweine. Durch die Ausbringung der Gärreste anstatt Mineraldünger erhöhten sich bei den Modellbetrieben Ackerbau, Verkehrsmilch und Anderes Rindvieh hingegen die NH₃-Emissionen, was sich negativ auf das terrestrische Eutrophierungspotenzial sowie die Versauerung auswirkte.

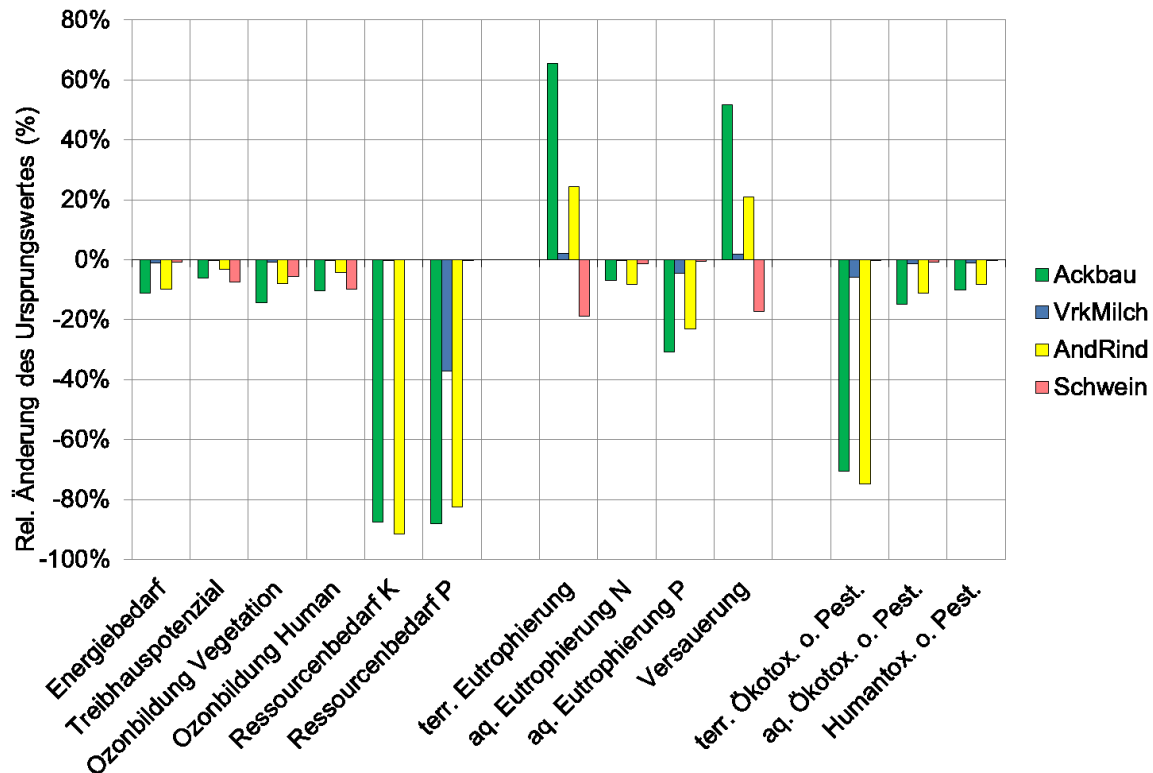


Abbildung 42: Wichtigste Effekte der Massnahme „Gärreste“ auf weitere Umweltwirkungen.

4.17.3 Diskussion

Der Ersatz der N-Mineraldünger durch Gärreste führte zu einer beachtlichen Einsparung an THGE. Dies lag am erheblichen Energieeinsatz und dem dadurch verbundenen CO₂-Ausstoss sowie den entstehenden N₂O-Emissionen bei der Produktion von mineralischem N-Dünger. Einzuschränken ist, dass wie im Kapitel 4.13 „Parzellen-spezifische Düngebilanz“ erklärt die neuste Technologie bezüglich Mineraldüngerherstellung in den hier verwendeten Düngemittelinventaren noch nicht berücksichtigt ist, diese würden die bei der Mineraldüngerproduktion entstehenden N₂O-Emissionen und somit das Einsparungspotenzial der Massnahme verringern.

Eine zweite Einschränkung betrifft die bei der Gärrestausrückführung berücksichtigten Emissionen. In den vorliegenden Berechnungen wurde angenommen, dass die N-Verfügbarkeit in Gärresten dieselbe ist wie in Gülle, nämlich 60 % (pers. Mitteilung, W. Richner, 2015). Publikationen aus Deutschland insbesondere aus Bayern deuten aber darauf hin, dass in vergorener Gülle die N-Verfügbarkeit höher ist (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2012; Lichti und Wendland 2013). Dies würde die NH₃- und damit die indirekten N₂O-Emissionen durch die Gärgülle erhöhen. Die hier berechneten Emissionen für die Ausbringung von Gärresten sind auch generell mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Der hier verwendete Prozentsatz zur Berechnung der NH₃-Emissionen (42 % TAN) liegt im Bereich des aktuellen Forschungsstandes (21-64 %; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2012). Es ist jedoch noch nicht abschliessend geklärt, wie genau die Wechselwirkungen zwischen emissionssteigernden und emissionsmindernden Eigenschaften von Gärresten zu bewerten sind. Erhöhte NH₃-Emissionen treten insbesondere aufgrund des erhöhten pH-Wertes von Gärresten auf. Emissionsmindernd wirkt jedoch die erhöhte Fließfähigkeit von vergorener Gülle und damit ein schnelleres Einsickern in den Boden (pers. Mitteilung W. Richner, 2015); Bayerisches Landesamt für Umwelt 2012). Es gibt jedoch auch Hinweise in der Literatur, dass die Emissionen bei der Ausbringung von Gärresten tendenziell höher sind als bei der Verwendung von unvergorener Gülle (Pachloski *et al.* 2007). Um genauere Aussagen über das Einsparungspotenzial durch den Einsatz von Gärgülle machen zu können, sind weitere Studien bezüglich Zusammensetzung sowie Lagerungs- und Ausbringungsemissionen von Gärgut nötig.

Nicht berücksichtigt wurden infolge des angewendeten Cut-offs die Emissionen der Gärrestlagerung. Diese kann aber eine wichtige Rolle spielen. Gärreste können nur in sehr begrenzten Zeitfenstern ausgetragen werden, fallen jedoch über das ganze Jahr hinweg an (pers. Mitteilung M. Keck, 2015; BAFU 2012). Während ihrer Lagerung können sie wichtige Emissionsquellen darstellen. Gemäss Sax *et al.* (2013) belaufen sich die Methanverluste im Gärrestlager bei Anlagen mit Nachvergärem auf rund 0,5 %, können aber bis zu 2 % betragen bei einstufigen Anlagen. Schon die Berücksichtigung eines Methanverlustes von 0,5 % würde das Reduktionspotenzial der Massnahme beim Modellbetrieb Schweine erheblich vermindern und für die drei anderen Betriebe sogar zunichtemachen.

Anzumerken ist zudem, dass in dieser Massnahme lediglich die flüssigen Gärresten und deren Emissionen betrachtet wurden. Bei einer Separierung der Gärreste fallen jedoch auch Feststoffe an, deren Verwertung und Emissionen müssten nach Expertenaussagen in einer zukünftigen detaillierteren Betrachtung auch berücksichtigt werden. Zusätzlich zur Lagerung der Gärreste ist auch der Separierungsprozess in einer zukünftigen Evaluierung miteinzubeziehen. Dabei könnten nach Expertenaussagen vor allem die zum teils langen Laufzeiten der Separatoren, sowie die frisch emittierenden Oberflächen ein Thema sein (pers. Mitteilung M. Keck, 2015).

4.18 Leguminosen als Gründüngung

4.18.1 Beschreibung der Massnahme

Der Anbau von Zwischenfrüchten ist bereits eine etablierte Ackerbaumassnahme in der Schweizer Landwirtschaft. Der Grund hierfür liegt bei den vielen erwarteten positiven Effekten, wie die Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit (organische Substanz), die Unterdrückung von Unkräutern, fruchtfolgebedingten Krankheiten und Schädlingen, Schutz vor Bodenerosion, die Vermeidung der N-Auswaschung oder die Fixierung von Luftstickstoff (N; wenn Leguminosen enthalten)⁵.

Durch den letztgenannten Effekt kann N in das Ackersystem eingetragen werden und als Pflanzennährstoff dienen. Dieser biologische N-Eintrag sollte bei der Düngung der Folgekulturen berücksichtigt werden und kann somit zu einer partiellen Substitution bzw. Reduktion von N-Düngern führen. Diese Reduktion ist klimarelevant und mit einer Reduktion der THGE verbunden (siehe auch Kapitel 4.15).

Die Klimaschutzmassnahme besteht nun darin, mineralische N-Dünger durch einen gezielten Anbau von Leguminosen als Gründünger zu substituieren. Diese Massnahme ist eng mit der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ verknüpft. Für einen hohen N-Eintrag ist auch die Auswahl der Kultur entscheidend. Studien haben gezeigt, dass die N-Fixierungsrate (pro Fläche) in einer Mischung aus Leguminosen und Gras oft höher ist, als bei Leguminosen in Reinkultur (Suter *et al.*, 2015; Nyfeler 2011; Høgh-Jensen 1997). Zusätzlich weisen Gras-Leguminosen-Mischungen eine höhere Ertragsstabilität, als Leguminosen in Reinkultur auf. Aufgrund dieser Tatsachen wurde für diese Massnahme von der Verwendung einer Klee-Gras-Mischung ausgegangen.

Da in der Praxis Zwischenfrüchte etabliert sind, wurde als Referenz der Anbau einer Nicht-Leguminose mit einer Düngung von 30 kg N/ha angenommen (siehe GRUDAF 2009). Die Wirkung der Massnahme setzt sich somit aus der Einsparung des N-Düngers und dem Düngeeffekt auf die Folgekultur zusammen.

Die Berechnung des Ertrags und der fixierten N-Menge erfolgten anhand der von der AGFF entwickelten Formeln (Suter und Weisskopf 2008; Suter *et al.* 2012). Zusätzlich wurden Untersuchungen zur N-Verfügbarkeit für die Folgekultur berücksichtigt, die Mittels Tracer (¹⁵N) zeigten, dass die Verfügbarkeit relativ gering ist (17-23 %) und ein Grossteil des N in den immobilen N-pool des Bodens fließt (Mayer *et al.* 2003). Demzufolge liegen die berechneten anrechenbaren N-Mengen (zwischen 12,7 und 22,0 kg N/ha) teils unter der schweizerischen Düngennorm (Flisch *et al.* 2009). Aufgrund der Konformität mit den landwirtschaftlichen Richtlinien wurde jedoch mit den anrechenbaren N-Mengen nach GRUDAF gerechnet (30 kg/ha).

⁵ Die hier genannten Effekte des Zwischenfruchtanbaus wurden in der Analyse nicht berücksichtigt.

Tabelle 37: Vorhandene Gründungs-, bzw. Zwischenfutterflächen der Modellbetriebe

	Gründung	Zwischenfutter
Ackbau	7,3	0
VrkMilch	0,3	1,2
AndRind	0,8	0
Schwein	0,8	0

4.18.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Durch den gezielten Anbau von Gründüngern statt Zwischenfutter kam es zu einer potenziellen Zunahme der THGE, zwischen 1,1 g (Ackbau) und 3,7 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (AndRind). Diese Änderungen kamen hauptsächlich aus den Inputgruppen „Dünger und Feldemissionen“ und „Zukauf Grundfutter“. In Bezug auf die gesamtbetriebliche Produktion führte die Massnahme zu einer Reduktion zwischen 0,4 % (Schwein) und 1,0 % (Ackbau; Abbildung 43).

Die Massnahme hatte zusätzlich noch einen grossen Effekt auf den Ressourcenbedarf (Abbildung 44). Kalium konnte zwischen 32 % (Ackbau) und 0 % (Schwein) und Phosphor zwischen 8 % (Ackbau) und 0 % (Schwein) reduziert werden. Bei der terrestrischen Ökotoxizität von Nicht-Pestiziden kam es ebenfalls zu einer Reduktion, zwischen 26 % (Ackbau) und 1 % (Schwein).

Zunahmen der Umweltwirkungen waren bei dem Flächenbedarf (0 bis 7%), der terrestrischen Eutrophierung (1 bis 11 %), der aquatischen Eutrophierung N (-1 bis 5 %) und der aquatischen Eutrophierung P (1 bis 4 %) zu verzeichnen. Diese Zunahmen beruhten vor allem auf dem Zukauf von Grundfutter.

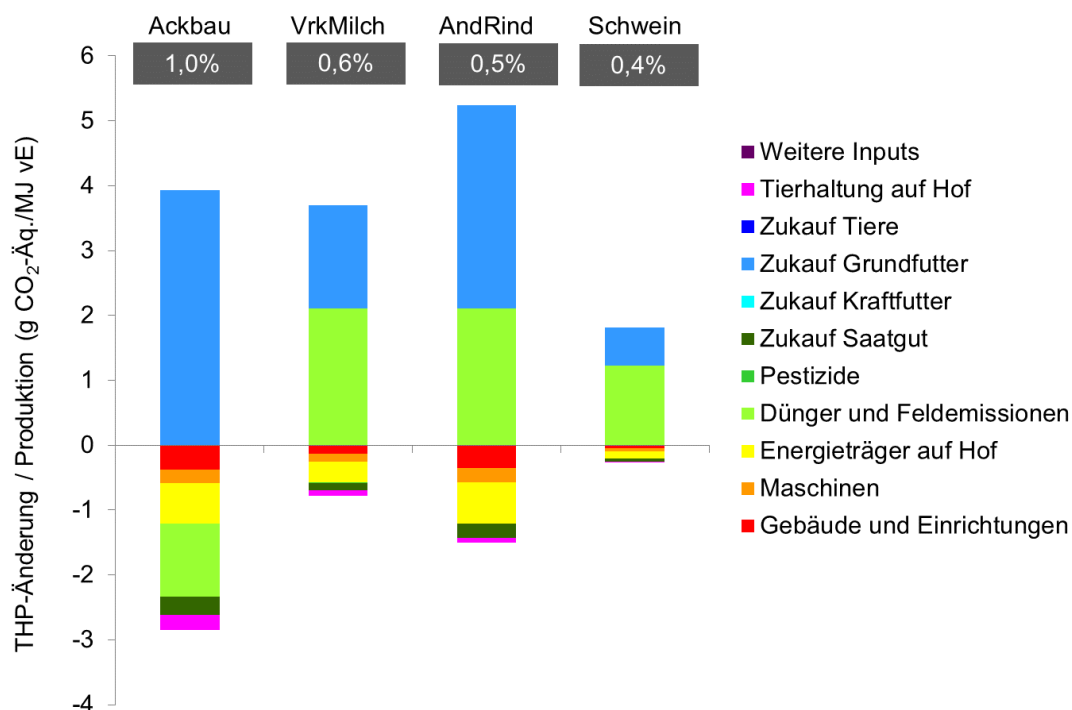


Abbildung 43: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Leguminosen als Gründüngung“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wieder.

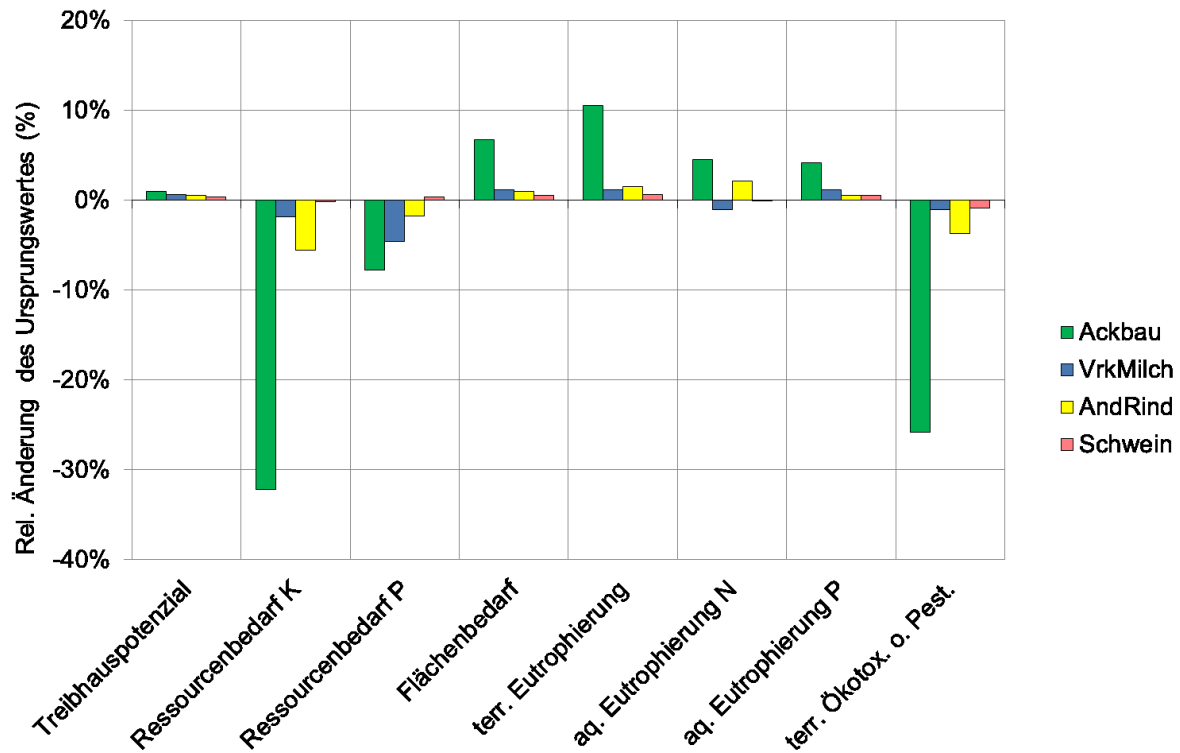


Abbildung 44: Effekte auf weitere Umweltwirkungen durch die Massnahme „Gründüngung“

4.18.3 Diskussion

Die Umstellung des Zwischenfruchtanbaus von Zwischenfutter auf Gründünger mit Leguminosen führte potenziell zu einer Zunahme der THGE (Abbildung 43). Dies lag vor allem an zwei Faktoren: 1) von den zusätzlichen N_2O -Emissionen aus dem (verrottenden) Pflanzenmaterial, die meistens (ausser bei dem Ackerbaubetrieb) die N_2O -Emissionen durch den N-Dünger überstiegen; 2) der reduzierten Verfügbarkeit an Grundfutter, die durch Zukauf von Belüftungsheu kompensiert werden musste (Inputgruppe „Zukauf Grundfutter“). Die Anpassung der Bewirtschaftung führte zu einer Reduktion der THGE, da im Gegensatz zum Anbau von Zwischenfutter für den Anbau von Gründüngern keine Überfahrten für die Düngung und Ernte notwendig sind. Dies führte neben einer Reduktion des Maschinenbedarfs zusätzlich zu einer Reduktion des Gebäude-, Energie-, und Saatgutbedarfs. Der geringere Ressourcenbedarf und die Reduktion in der terrestrischen Ökotoxizität hingen vor allem mit dem reduzierten Zukauf von Düngern zusammen. Der Zukauf von Grundfutter hingegen führte zu einer Erhöhung der Eutrophierung und des Flächenbedarfs.

Das Ergebnis hängt stark davon ab, ob vor der Einführung der Massnahme schon Zwischenfrüchte angebaut wurden oder nicht, und ob diese fest als Futter einkalkuliert wurden, wie es bei den Modellbetrieben der Fall ist.

Zudem hängt die Verfügbarkeit des symbiotisch fixierten N für die Folgekultur von folgenden Faktoren ab: Menge des fixierten N, dem C/N Verhältnis der Leguminose (Alter) und auch der Art der Folgekultur (Mayer *et al.* 2003). Des Weiteren ist der N-Transfer von Leguminosen zu Gräsern innerhalb eines Bestandes (Klee-Gras) höher und somit auch die Düngeleistung, als der N-Transfer für die Folgekultur (Nyfeler *et al.* 2011; Nyfeler *et al.* 2009; Suter *et al.* 2015). Somit trägt der Anbau von Leguminosen-Gras-Mischungen massgeblich zu einer Erhöhung der N-Effizienz und Einsparung an mineralischen N-Düngern bei, wurde aber in dieser Analyse aufgrund der Massnahmendefinition nicht berücksichtigt.

Abschliessend ist zu sagen, dass das vorliegende Ergebnis stark durch die Konkurrenz mit der Futterproduktion beeinflusst wurde. Wenn diese Konkurrenz (aufgrund der Fruchtfolge) nicht vorhanden ist,

hat der Anbau von Gründüngung sehr wahrscheinlich eine positivere Wirkung auf die THGE, was aber in einer zusätzlichen Analyse detailliert betrachtet werden müsste.

4.19 Etablierung eines Agroforstsystems

4.19.1 Beschreibung der Massnahme

Bei Agroforstsystemen handelt es sich um die absichtliche Kombination mehrjähriger Gehölze und landwirtschaftlicher Kulturen innerhalb eines Landnutzungssystems (Lundgren und Raintree 1982). Eine erwünschte Eigenschaft der Agroforstsysteme sind vorwiegend positive Wechselwirkungen zwischen Gehölzen und landwirtschaftlichen Kulturen wie z.B. Erosionsverminderung und erhöhte Ressourceneffizienz (Wasser, Nährstoffe), die idealerweise zu einer Steigerung der Flächenproduktivität führen sollen (Kaeser *et al.* 2010c). Zudem werden häufig die Biodiversität und das Landschaftsbild durch Agroforstsysteme positiv beeinflusst (Bender *et al.* 2009; Kaeser *et al.* 2011). Das THG-Reduktionspotenzial dieser Massnahme liegt in der Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse (Holz; Palma *et al.* 2007). Es wurde aus Konsistenzgründen nur die oberirdische Speicherung berücksichtigt (ohne Wurzeln), die 50 % der Speicherung ausmacht. Eine mögliche Zunahme des Bodenkohlenstoffs wurde aus Gründen der Konsistenz nicht berücksichtigt.

Für die Auswahl und Ausgestaltung des Agroforstsystems wurde neben einer Literaturrecherche zusätzlich Experten befragt. Für die Studie wurde ein Agroforstsystem (AFS) mit einer Neuetablierung von Apfelbäumen auf Ackerflächen definiert. Für die Verwendung von Apfelbäumen sprachen folgende Argumente: hohe Akzeptanz und vorhandenes Know-How bei den Landwirten (kulturelle, historische Verbundenheit), Direktzahlungen, hohe Wertigkeit für Ökologie und Landschaftsbild, Infrastruktur und Markt für Apfelverwertung vorhanden. Die Kombination mit Ackerkulturen wurde aufgrund des Neuerungspotenzials gewählt (Kombination mit Grünland sehr etabliert = Streuobstwiesen). Für die Analyse wurde ein AFS mit 50 Bäumen pro Hektare über einen Zeithorizont von 60 Jahren angenommen (siehe auch Tabelle 38; Kaeser *et al.* 2011). Ein Weiterbestehen wird angenommen, da eine befristete Kohlenstoffspeicherung durch einen Rodung als wirkungslos bewertet wird. Alte Bäume werden ersetzt und thermisch verwertet. Aufgrund der Komplexität des Agroforstsystems bezüglich Fruchtfolge, wurden für diese Analyse nur zwei der Unterkulturen innerhalb einer möglichen, fünfjährigen Fruchtfolge analysiert: Winterweizen und Kunstwiese. Diese beiden Kulturen repräsentieren die obere und untere Grenze der Flächenproduktivität (MJ vE / ha) und es wurde jeweils eine der beiden Kulturen pro Betrieb analysiert (entsprechend Vorhandensein auf dem Betrieb; Ackbau: Winterweizen; VrkMilch, AndRind, Schwein: Kunstwiese). Für diese Kulturen wurde aufgrund der zunehmenden Beschattung mit der Entwicklung der Bäume eine progressive Ertragsreduktion berücksichtigt. Die Ertragsreduktion der Kunstwiese wurde durch den Zukauf von Grundfutter kompensiert. Eine Umwandlung zu Grünland wegen der zunehmenden Beschattung ist wegen des relativ weiten Reihenabstandes (16 m) nicht notwendig. In der Analyse ist die Pflanzung der gesamten Anlage, die jährliche Pflege (z.B. Schnitt, Mulchen), die maschinelle Ernte und die Rodung enthalten.

Tabelle 38: Wichtigste Kennzahlen zur Massnahme „Agroforstsystem“

Variablen	Annahmen	
Fläche für AFS	20 % der gesamten Ackerbaufläche (MB)	
	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
	Fläche Unterkulturen	8000 m ² /ha
Obstertrag (Häseli <i>et al.</i> 2000)	12 500 kg Äpfel/ha a	
Ertragsreduktion d. Unterkultur	Jahr 0-20: 0 %	
	Jahr 20-60: jährlich 1 % vom ursprünglichen Ertrag	
Produkte	Verwertungsobst, Brennholz (nach 60 Jahren; Substitution fossiler Energieträger), Winterweizen (bei Ackbau), Grundfutter (bei VkrMilch, AndRind, Schwein)	
Zeithorizont	60 Jahre	
Kohlenstoffspeicherung (Bäume, oberirdisch)	0,96 t CO ₂ /ha (Palma <i>et al.</i> 2007)	
Holzvolumen	52 m ³ /ha 60a	

4.19.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Etablierung eines Agroforstsystems verringerte die Emission von THG auf den Modellbetrieben um 1,9 g (Ackbau) bis 109,2 g (AndRind) CO₂-Äquivalenten pro MJ vE. In Relation zur gesamtbetrieblichen Produktion führte die Massnahme zu einer Reduktion zwischen 1,7 % (Ackbau) und 15,2 % (AndRind; Abbildung 45). Alle Prozesse, die direkt mit dem AFS verbunden sind, wurden der Inputgruppe „Weitere Inputs“ zugeordnet. Der Effekt der Kohlenstoffspeicherung wurde der Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“ zugewiesen.

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.

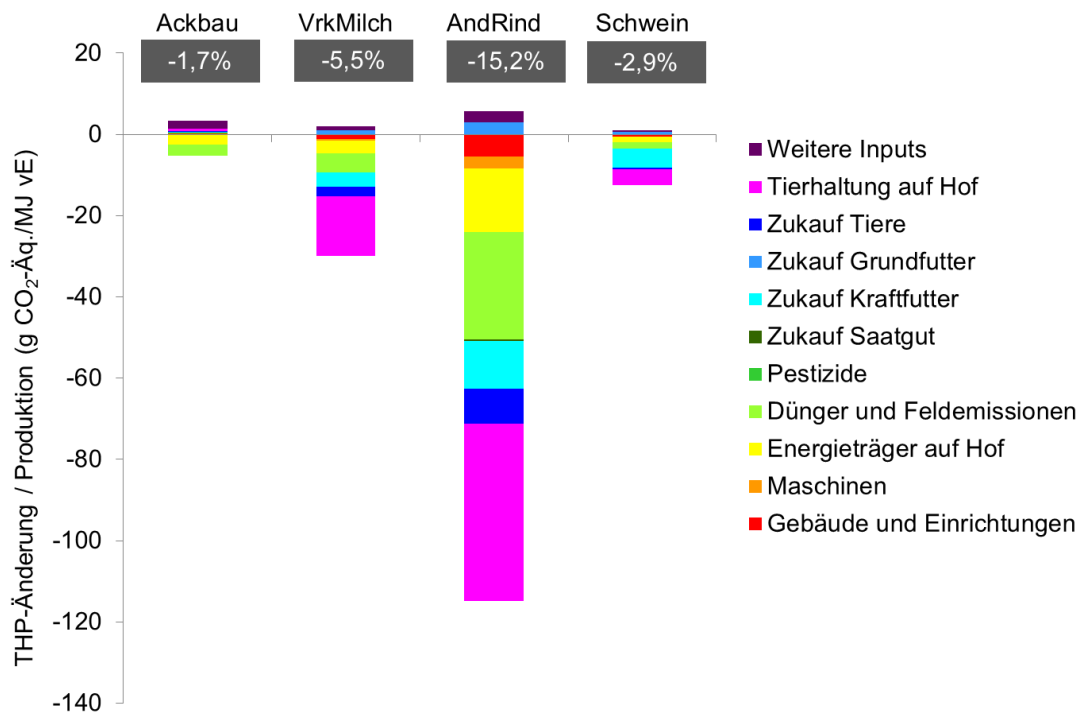


Abbildung 45: Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Agroforstsystem“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) der vier Modellbetriebe. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider. Die Inputgruppe „weitere Inputs“ beinhaltet die Emissionen die bei der Etablierung, Pflege, Ernte und Rodung entstehen.

4.19.3 Wirtschaftlichkeit

Zur ökonomischen Beurteilung dieser Massnahme wurde der Gewinn des Agroforstsystems mit dem Gewinn der Fruchtfolge der Referenz verglichen (die angenommene Fruchtfolge ist für alle Modellbetriebe gleich; es wurde mit einer fünfjährigen Fruchtfolge gerechnet). Die Einführung eines Agroforstsystems auf 20 % der Ackerfläche führt bei den Ackerkulturen – bei der Annahme eines gleichbleibenden Arbeits- und Maschinenaufwands zur Bearbeitung – zu Ertragseinbussen, welchen Einnahmen durch den Verkauf von Spezialmostobst sowie Holz (hier Scheitholz nach 60 Jahren) gegenüber stehen. Ausserdem verändert sich, bei Einführung eines Agroforstsystems, die Struktur der Direktzahlungen (Biodiversitätsbeitrag pro (Hochstamm-) Baum).

Investitionen wurden bei dieser Massnahme in erster Linie für den Kauf der Apfelbäume sowie deren Pflanzung (Pfosten, Mäusegitter etc.) angesetzt. Die Anschaffungskosten für einen Baumschüttler wurden in die Berechnungen ebenfalls einbezogen, da sich diese Investition (nach dem Entschädigungsansatz; (Gazzarin 2015) auf allen Modellbetrieben lohnt. Ansonsten wurde angenommen, dass alle übrigen, zur Mostobsternte notwendigen, Maschinen gemietet werden bzw. vorhanden sind.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Massnahme fiel bei allen Modellbetrieben negativ aus. Die jährlichen Kosten reichten von 1450 bis 6934 Franken beim Modellbetrieb Ackerbau. Dessen hohe jährliche Verluste durch die Einführung eines Agroforstsystems erklären sich durch die grössere Ackerfläche dieses Betriebstyps, die für das Agroforstsystem eingesetzt wird (4,28 ha im Vgl. zu ca. 1 ha Fläche für das AFS bei den anderen Betrieben, vgl. Tabelle 29). Beim Ackerbaubetrieb fallen auch entsprechend hohe Investitionen an.

Tabelle 39: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Massnahme "Agroforstsystem" für die untersuchten Modellbetriebe

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	5304	804	446	545
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-6934	-2075	-1680	-1450
Investitionssumme [Fr.]	37 370	14 897	11 809	10 644
Investitionssumme/mittlere jährliche Investitionssumme (2009-2013) [%]	69 %	23 %	29 %	16 %
Risiko	Diversifizierung / langer Planungshorizont			
Arbeitsersparnis [h]	-330	-99	-80	-69
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-1,31	-2,58	-3,76	-2,66

Durch den langen Planungshorizont (60 Jahre) war das Risiko der Massnahme schwer zu erfassen, da auf solch lange Zeithorizonte Preise, Zinsen etc. schwer zu prognostizieren sind. Insgesamt lässt sich aber festhalten, dass das Risiko der Betriebe infolge einer höheren Produktdiversifizierung sinken könnte: Holz gilt als langfristige Sparanlage (Kaeser *et al.* 2010a).

Mit der Umsetzung dieser Massnahme war ein deutlich erhöhter Arbeitszeitbedarf verbunden: Beim Modellbetrieb Ackerbau muss mit jährlich bis zu 330 Stunden zusätzlichem Aufwand gerechnet werden (inkl. der Arbeitsspitze „Baumfällarbeiten“ im letzten Jahr, gewichtetes Mittel). Insbesondere die kalkulatorische Berücksichtigung der Arbeitszeit erklärt die hohen Kosten dieser Massnahme. Die Verluste, die aufgrund der Ertragseinbussen in der Unterkultur erzielt werden, spielen ebenfalls eine wesentliche Rolle. Die Investitionssummen stellten, verglichen mit der mittleren jährlichen Investitionssumme (2009-2013), keine aussergewöhnliche Belastung für die Betriebe Verkehrsmilch, Andere Rinder und den Schweine haltenden Betrieb dar. Lediglich der Modellbetrieb Ackerbau verzeichnete aufgrund der grossen AFS-Fläche eine höhere Investitionsbelastung.

Da auf dem Modellbetrieb Ackerbau mit Abstand die höchsten Treibhausgas-Einsparungen realisiert werden konnten, waren, trotz der ebenfalls höchsten mittleren jährlichen Verluste, die CO₂-Reduktionsverluste pro kg CO₂-Äquivalente hier am geringsten. Der Modellbetrieb Andere Rinder hingegen verzeichnete die höchsten CO₂-Reduktionsverluste pro kg CO₂-Äquivalente.

4.19.4 Diskussion

Das Reduktionspotenzial der Massnahme hängt stark mit der Anzahl der Baumneupflanzungen zusammen und somit mit der Fläche, die das AFS einnimmt. Die grösste AFS-Fläche ist bei dem Ackerbaubetrieb zu verzeichnen und hatte somit auch absolut betrachtet das grösste THG-Reduktionspotenzial (Tabelle 39, Abbildung 45: 12 t CO₂-Äquivalenten pro ha und Jahr, entspricht 4,3 % der gesamtbetrieblichen Emissionen). Bei dem Ackerbaubetrieb gibt es eine Reduktion des gesamtbetrieblichen Outputs (-3 %), da im Gegensatz zu den anderen Betrieben, dieser die Unterkultur Winterweizen anbaut, deren Ertragsreduktion nicht wie bei der Kunstwiese durch Zukauf kompensiert wird. Bei den anderen Betrieben steigt der Output durch die Produktion von Äpfeln (VkrMilch: 5 %; AndRind: 17 %; Schwein: 3 %). Diese Änderung des Outputs kommt bei der produktivitätsorientierten Referenzeinheit (g CO₂-Äq./MJ vE) zur Geltung. Somit ist das geringsten Reduktionspotenzial pro gesamtbetrieblichen Output bei dem Betrieb Ackbau (-1,7 %) und höchsten Reduktionspotenzial bei dem Betrieb AndRind (-15,2 %) zu verzeichnen. Dieser Einfluss des betrieblichen Outputs wird

nochmals besonders bei den Anteilen der Inputgruppen innerhalb der AndRind-Betriebes deutlich: der Effekt der Produktivitätsänderung übersteigt jenen der Kohlenstoffspeicherung (Inputgruppe „Dünger und Feldemissionen“). Die THGE-Zunahme durch einen Zukauf an Grundfutter und die Prozesse für das AFS („Weitere Inputs“) fällt in Relation zur Einsparung gering aus, obwohl hier eine sehr intensive Bewirtschaftung angenommen wurde (Ökoinventare basieren auf französischem Hochstammsystem; (Koch und Salou 2013). Unterirdische Prozesse, wie die Speicherung von Kohlenstoff in den Wurzeln und dem Boden, wurden bei der Analyse nicht berücksichtigt (Montagnini und Nair 2004; Palma *et al.* 2014; siehe Punkt „Nicht berücksichtigte Massnahmen“). Dadurch ist innerhalb dieser Analyse die Wirkung der Massnahme sehr wahrscheinlich unterschätzt.

Es soll hier angemerkt werden, dass eine Analyse eines AFS mit schnellwachsenden Energiehölzern sehr interessant wäre. Aufgrund des schnellen Wuchses ist hier sehr wahrscheinlich mit einem hohen THG-Reduktionspotenzial zu rechnen. Ebenso wäre die Analyse von neuetablierten Streuobstwiesen interessant, da hier der Ertragsrückgang infolge eines angepassteren Grünlandbestandes wahrscheinlich weniger ins Gewicht fällt.

4.20 Ausbringung von Pflanzenkohle

4.20.1 Beschreibung der Massnahme

Pflanzenkohle (engl. Biochar) ist ein durch Pyrolyse (unter Ausschluss von Sauerstoff, bei 400-700°C) aus pflanzlichen Abfällen hergestelltes kohlenstoffreiches Produkt. Die Ausbringung von Pflanzenkohle auf landwirtschaftliche Nutzflächen kann einen positiven Effekt auf ertragsrelevante Bodeneigenschaften haben (Lehmann 2007; Woolf *et al.* 2010). Die Bodenverbesserung ist vorwiegend für marginale (tropische) Böden mit wenig organischer Substanz und tiefer Kationenaustauschkapazität relevant. Metastudien zeigen global einen erhöhten Ertrag von durchschnittlich 10 % mit dem Einsatz von Pflanzenkohle (Crane-Droesch *et al.* 2013). Da dieser Effekt aber für Böden mittlerer Breiten bzw. bei intensiven Produktionssystemen weniger klar und weniger gut dokumentiert ist, wird er in dieser Analyse vernachlässigt.

Eine wichtige Eigenschaft von Pflanzenkohle ist die hohe Stabilität gegenüber biologischem und chemischem Abbau im Boden (es existiert eine stabile und eine labile Kohlenstofffraktion; Lehmann und Joseph 2012; siehe Tabelle 40). Durch diese Eigenschaft ist es möglich, relativ grosse Mengen an organischem Kohlenstoff über das Pflanzenwachstum zu binden und durch die Ausbringung im Boden langfristig einzulagern (Woolf *et al.* 2010). Zudem hat Pflanzenkohle auch das Potenzial, die N₂O-Emissionen von kultivierten Böden zu reduzieren (abhängig vom Bodentyp und den Eigenschaften der Pflanzenkohle (Felber *et al.* 2014; Hüppi *et al.* 2015; siehe für Annahmen Tabelle 40). Dadurch birgt Pflanzenkohle das Potenzial einer sehr effektiven Klimaschutzmassnahme und wird u.a. deshalb in den letzten Jahren stark in den Fokus der Forschung gerückt (Lehmann und Joseph 2012)

Eine hohe Variabilität der Eigenschaften von Pflanzenkohle und deren Auswirkungen im Boden ist zu erwarten. Neben den Interaktionen mit den Bodeneigenschaften hängen die Eigenschaften von Pflanzenkohle vor allem vom Ausgangsmaterial und den Pyrolysebedingungen ab (Temperatur, Dauer; Lehmann und Joseph 2012). Zudem können bei der Herstellung während der Pyrolyse Schadstoffe (wie z.B. polyaromatische Kohlenwasserstoffe) entstehen, die im Endprodukt zurückbleiben. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die Bindung der Schadstoffe an die Pflanzenkohle sehr persistent ist und die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination gering ist (Bucheli *et al.* 2012). Zudem weiss man noch wenig darüber, wie sich die Pflanzenkohle in der Umwelt bewegt, z.B. wie stark die Auswaschung ist (Jaffé *et al.* 2013; Rumpel *et al.* 2015).

Aufgrund der erwähnten Unsicherheiten und oft widersprüchlichen Datengrundlage handelt es sich hier um eine erste nicht vollständige Abschätzung. Da für die Pyrolyseanlage noch keine Inventare existieren, enthält diese Analyse keine Emissionen für die Bereitstellung der Infrastruktur (Pyrolyseanlage). Als Substrat wurde ausgesiebt Kompostholz (welches nicht verrottet ist) angenommen.

Durch die eingeschränkten Verwendungsmöglichkeiten von Kompostholz wurden für die Referenz keine alternativen Nutzungen des Substrates, wie z.B. energetische Nutzung, berücksichtigt. Die Massnahme wurde beispielhaft anhand des Modellbetriebs AndRind untersucht. In der Abschätzung wird davon ausgegangen, dass alle 10 Jahre eine Menge von 9,9 t Pflanzenkohle auf eine Kunstwiese (0,99 ha) des AndRind-Betriebs ausgebracht wurde. Bei den übrigen Modellbetrieben wurde diese Massnahme nicht untersucht.

Tabelle 40: Wichtigste Kennzahlen für die Massnahme „Pflanzenkohle“

Variablen	Annahmen	
Ausgebrachte Menge an Pflanzenkohle pro ha (Woolf <i>et al.</i> 2010)	10 t / ha 10a (max. Menge: 50 t/ha)	
Zeithorizont	50 Jahre	
Reduktion der N ₂ O-Emissionen auf der LN (abgeleitet von Felber <i>et al.</i> , 2014)	20 % Reduktion	
Kohlenstoffgehalt Pflanzenkohle	60 %	
Anteil labile Kohlenstofffraktion	15 %	
Halbwertszeit	Labile Kohlenstofffraktion	20 Jahre
	Stabile Kohlenstofffraktion	300 Jahre
Energiebedarf Herstellung	Gas	75 kWh/m ³
	Strom	95 kWh/m ³
Fläche der Ausbringung	AndRind	Kunstwiese, 0,99 ha

4.20.2 Erzielte Treibhausgasreduktion und Trade-offs

Die Ausbringung von Pflanzenkohle auf einem knappen Hektar Kunstwiese führte zu einer Reduktion von 13,8 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE (AndRind). Im Verhältnis zur gesamtbetrieblichen Produktion entsprach dies einem Reduktionspotenzial von 1,9 % (Abbildung 46).

Wie bei der Massnahme „Agroforstsystem“ sind dieser Wirkungsabschätzung die der Pflanzenkohle zugeschriebenen positiven Wirkungen auf andere Umweltbereiche aufgrund fehlender Datengrundlage nicht enthalten, sondern nur die Emissionen, die bei deren Herstellung entstehen sowie die Speicherung von Kohlenstoff im Boden. Da die Wirkung von Pflanzenkohle in dieser Untersuchung nur unvollständig abgebildet werden konnte, werden die Effekte auf die übrigen Wirkungskategorien nicht gezeigt.

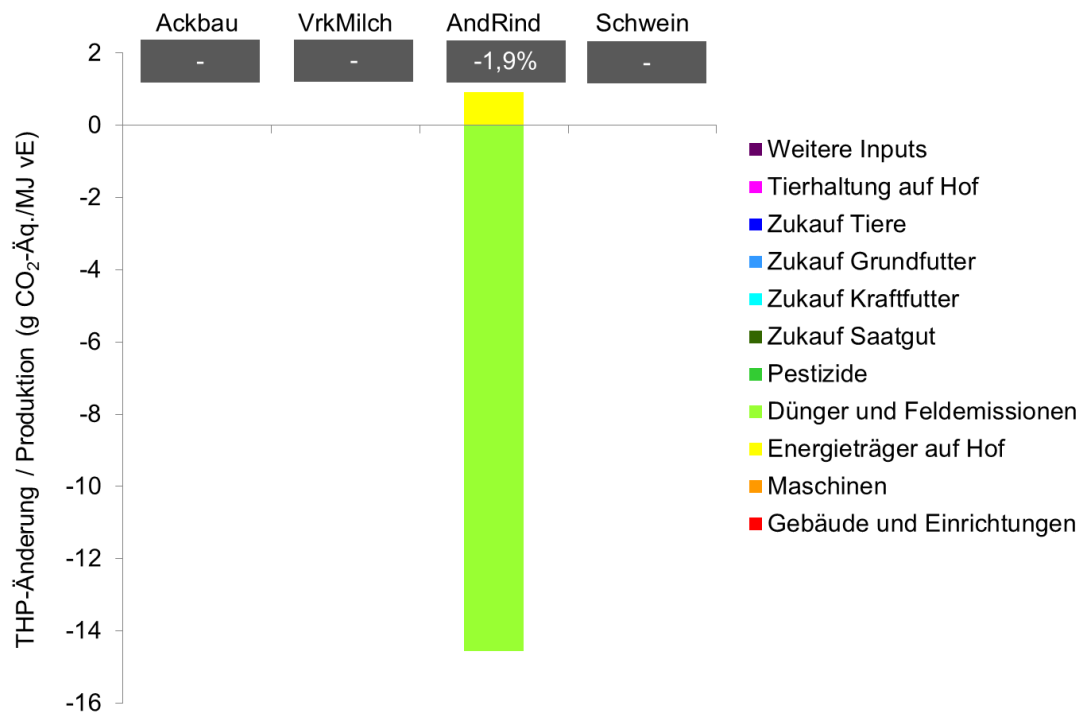


Abbildung 46 : Erzielte Treibhausgaspotenzialänderung (THP-Änderung) der Massnahme „Pflanzenkohle“ bezogen auf die betriebliche Produktion (pro Einheit verdauliche Energie in Megajoule, MJ vE) beim Modellbetrieb Anderes Rindvieh. Die Änderungen sind entsprechend der Inputgruppen aufgeschlüsselt (Farbcode) in denen sie stattfinden. Die Prozentzahlen in den dunklen Kästchen geben die relativen Änderungen der gesamtbetrieblichen Emissionen bezogen auf die gesamtbetriebliche Produktion wider. Die Inputgruppe „weitere Inputs“ beinhaltet die Emissionen die bei der Etablierung, Pflege, Ernte und Rodung entstehen.

4.20.3 Diskussion

Das Reduktionspotenzial von Pflanzenkohle, ist neben der oben beschriebenen Variabilität vor allem von der ausgebrachten Menge und der applizierten Fläche abhängig. Die Menge korreliert sehr stark mit dem gebundenen Kohlenstoff. Die Auswirkung auf die N_2O -Emissionen sind in dieser Analyse unabhängig von der Menge der ausgebrachten Pflanzenkohle: da eine 20% Reduktion angenommen wurde, sind die schon bestehenden, flächenspezifischen N_2O -Emissionen und die Fläche der Ausbringung entscheidend (hier nur 0,99 ha). Innerhalb der Modelbetriebe (aber auch generell) haben Wiesen eine relativ hohe N_2O -Emission, somit ist die Reduktion der Emissionen auch als relativ hoch zu bewerten. Das in der Studie angenommene Reduktionspotenzial der N_2O -Emissionen von 20 % basiert auf einem Freilandversuch mit THG-Messung in statischen Kammern (Felber *et al.* 2014). Allerdings ist nicht bekannt wie sich das Reduktionspotenzial von Pflanzenkohle auf N_2O -Emissionen langfristig und innerhalb einer Fruchtfolge verhält, da die empirischen Studien meist nur über einzelne Jahre oder sogar Monate verliefen.

Es herrscht noch grosse Unsicherheiten bezüglich der Halbwertszeit von Pflanzenkohle. Die Bandbreite reicht von einem Jahrzehnt bis zu mehreren Jahrtausenden (~5000 Jahre; Lehmann und Joseph 2012) und ist unter anderem abhängig vom Substrat und dem Pyrolyseverfahren. Die hier angenommene Halbwertszeit von 300 Jahren ist eine eher konservative Schätzung, was jedoch trotzdem gross genug ist, um klimarelevant zu sein.

Neben den physikalischen Eigenschaften von Pflanzenkohle ist auch die Praktikabilität von grosser Bedeutung. Die Ausbringung von 50 t/ha wie es von Woolf *et al.* (2010) vorgeschlagen wurde wäre mit einem grossen logistischen Aufwand verbunden. Für die Praxis ist es deshalb wahrscheinlicher, dass sich solch eine Menge über mehrere Jahre und nach mehreren Gaben akkumuliert. Entsprechend wird

in unserer Analyse, von 5 Ausbringungen innerhalb von 50 Jahren ausgegangen, die zusammen mit Mist oder Kompost ausgebracht werden (keine zusätzlichen Fahrten). Zudem ist Pflanzenkohle noch relativ teuer, da die Preise momentan bei rund 890 CHF/Tonne liegen (pers. Mitteilung F. Abächerli, 2015). Daneben gibt es die Möglichkeit der Nutzung der Pflanzenkohle als Einstreu-, und Futterzusatz, um eine sogenannte „Kaskadenwirkung“ zu erzielen. Die Pflanzenkohle sollte somit schon Emissionen aus dem Stall (Einstreu, Gülle, Verdauungssystem) während der Hofdüngerlagerung und -ausbringung und schliesslich auf dem Feld reduzieren. Allerdings bestehen zu diesen Wirkungsketten noch keine empirischen Studien.

Abschliessend kann gesagt werden, dass trotz der genannten Unsicherheiten und Variabilität Pflanzenkohle ein sehr hohes Reduktionspotenzial verspricht, gerade wenn man bedenkt, dass die in diesem Beispiel abgeschätzte Massnahme auf nur einem knappen Hektar stattfindet, was rund 6% der gesamten LN entspricht. Für den Einsatz in der Praxis ist weitere Forschung notwendig, um die Unsicherheiten zu minimieren und Wirkungsweisen besser zu verstehen bzw. diese gezielt kontrollieren zu können.

5 Vergleich und Rangierung der Massnahmen

5.1 Ökologische Analysen

Abbildung 47 zeigt eine Übersicht über die erzielte Treibhausgas-Reduktion (THG-Reduktion) der 20 analysierten Massnahmen inklusiv der analysierten Untervarianten bei „Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja“, „umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ und „Reduktion des mineralischen N-Düngers“. Die analysierten Massnahmen führten im Mittel der vier Modellbetriebe zu einer Änderung des THG-Ausstosses zwischen -38 und +2 g CO₂-Äquivalente pro MJ vE. Die Massnahmen im Energiebereich hatten eine kleine bis mittlere THG-Reduktion zwischen 0,5 und 7 g CO₂-Äquivalenten pro MJ verdauliche Energie zur Folge. In diesem Bereich erreichte die Massnahme „Sonnenkollektoren“ die grösste Einsparung, wobei hier der Ersatz von Heizöl für die Warmwassererzeugung für den Stall und das Wohnhaus, sowie die Heizung des Wohnhauses vorausgesetzt wurde und die Massnahme im Vergleich zu den übrigen Massnahmen im Energiebereich mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet ist. Die einzige Massnahme, welche nicht direkt auf die Reduktion oder den Ersatz von Energieträgern wie Heizöl oder Strom abzielt, ist die „optimale Maschinenauslastung“. Ihr Reduktionspotenzial war deutlich geringer als bei den übrigen Massnahmen im Energiebereich.

Die Massnahmen in der Tierhaltung zeigten sehr unterschiedliche Resultate, von einer Erhöhung um 1 g bis zu einer THG-Einsparung von 9 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE. Eine Erhöhung war bei den Massnahmen „Saubere Laufflächen“ und „Güllesiloabdeckung“ zu beobachten. Diese beiden Massnahmen verminderten die NH₃-Emissionen durch die Tierhaltung im Stallbereich bzw. bei der Güllelagerung; die dadurch erhöhten N-Gehalte in der Gülle führten zu erhöhten Lachgasemissionen bei deren Ausbringung. Vermieden werden könnte diese Verlagerung der Emissionen durch die Anpassung der Düngung an die veränderten Stickstoffgehalte in der Gülle. Besser schnitt die Massnahme „Phasenfütterung“ ab, welche direkt den N-Input in den Betrieb vermindert, aber definitionsgemäss nur die Schweinemast betrifft. Einen grossen Anteil am hohen Reduktionspotenzial dieser Massnahme hatte der verminderte Sojaanteil in der Schweineration. Die Wirksamkeit eines reduzierten Sojaeinsatzes zeigte sich auch in der Massnahme „Milch zert. / ohne Soja“, welche ein Reduktionspotenzial von bis zu 7 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE aufwies. Das grösste Reduktionspotenzial war jedoch bei der Massnahme „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ zu verzeichnen, welche zu einer Reduktion der Methanemissionen des Rindviehs führte. Hier konnten auf dem Verkehrsmilchbetrieb bis zu 19 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE eingespart werden.

Im Bereich Pflanzenbau war die Höhe der Reduktionspotenziale ebenfalls sehr unterschiedlich. Einige Massnahmen führten auch zu einer Erhöhung des THP. Dies betrifft die „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ sowie die „Gründüngung“, wo eine Zunahme des THG-Ausstosses von bis zu 4 g CO₂-Äquivalenten pro MJ vE festgestellt wurde. Bei beiden Massnahmen hing dies vor allem mit der Verminderung des Ertrags durch die Massnahmen zusammen. Da der Tierbestand konstant gehalten wurde, musste zum Teil Grundfutter zugekauft werden, um den fehlenden Ertrag zu kompensieren. Dies führte dann zur erwähnten Erhöhung des THP.

Die übrigen im Pflanzenbau analysierten Massnahmen führten alle zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen. Das geringste Reduktionspotenzial wies der Einsatz des „Schleppschlauchs“ bei der Gülleausbringung auf. Dieser wirkt vor allem auf die NH₃-Emissionen und vermindert das treibhauswirksame N₂O nur indirekt. Massnahmen, mit denen eine Reduktion des mineralischen Stickstoffbedarfs ohne Ertragsverlust erzielt werden konnte, wiesen deutlich höhere Emissionsvermindierungen auf (siehe Kapitel 6.2). Dazu gehören die Massnahmen „Gärrestausbringung“ sowie „Düngeplan“. Den höchsten Emissionsrückgang verzeichnete die Massnahme „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ (siehe Kapitel 4.14). Dies zeigt die potenziell sehr hohen N₂O-Verluste, welche bei einem Grünlandumbruch auftreten können.

Vergleich und Rangierung der Massnahmen

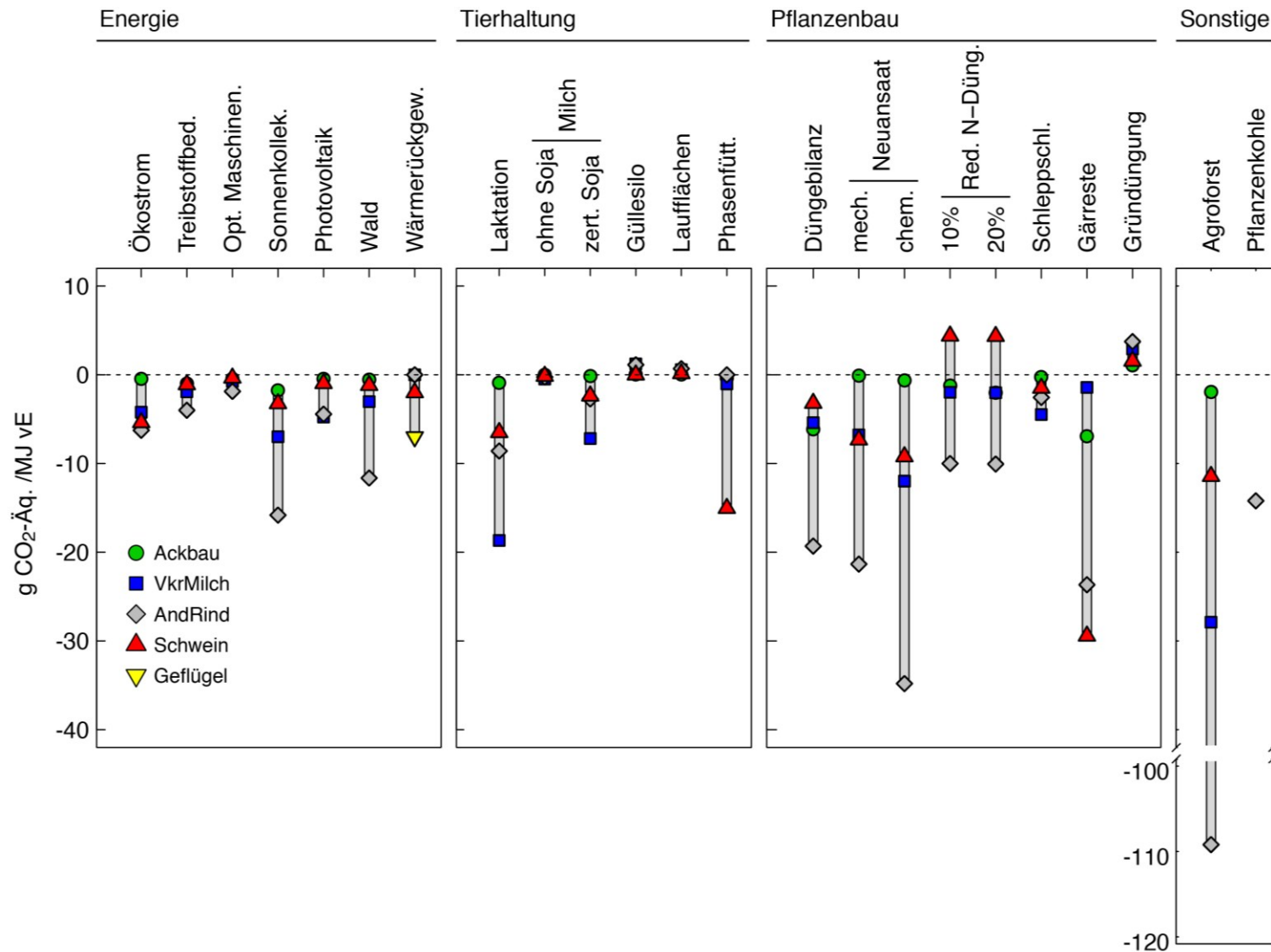


Abbildung 47: Übersicht über die erzielte Treibhausgasreduktion pro produzierte verdauliche Energie aller untersuchten Massnahmen für die untersuchten Modellbetriebe (Symbole). Der graue Balken spiegelt die Wirkungsbandbreite aufgrund der verschiedenen Modellbetriebe wider.

Bei vielen Massnahmen erzielte der Modellbetrieb Anderes Rindvieh die grössten Einsparungen pro MJ verdauliche Energie. Dies lag hauptsächlich an der sehr geringen Produktion an vE in der Referenz, welche einen relativ hohen THG-Ausstoss pro MJ produzierte verdauliche Energie zur Folge hatte. Dementsprechend war auch das Reduktionspotenzial pro MJ vE grösser. Prozentual gesehen wies der Betrieb aber keine grössere Reduktion auf als die anderen Modellbetriebe.

Die generelle Massnahmeneinordnung änderte sich je nach betrachtetem Betriebstyp. Abbildung 48 zeigt das Ranking der Massnahmen anhand ihres Reduktionspotenzials für jeden der vier analysierten Betriebstypen (ohne Betriebstyp „Geflügel“, für den nur eine Massnahme berechnet wurde). Hier werden die Interaktionen zwischen den Massnahmen und den Betriebsstrukturen deutlich, da je nach Ausrichtung des Modellbetriebs die Höhe des Reduktionspotenzials einer Massnahme variierte. Beim Betriebstypen Ackerbau hatten Massnahmen zur Reduktion des mineralischen Stickstoffdüngers ein besonders hohes Reduktionspotenzial. Ebenso zeigte der Aufbau von Kohlenstoffspeichern durch ein Agroforstsystem eine grosse Wirkung. Bei den Modellbetrieben mit viel Grünland (Verkehrsmilch und Anderes Rindvieh) zeigten Massnahmen zum Erhalt und Aufbau von Kohlenstoff- bzw. Stickstoffspeichern (Agroforstsystem, Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes) die grösste Wirkung. Daneben spielte beim Verkehrsmilchbetrieb die Erhöhung der Anzahl Laktationen eine grosse Rolle. Beim Modellbetrieb Schweine erzielte die Phasenfütterung das grösste Reduktionspotenzial, daneben hatte auch die Vergärung der Hofdünger in einer Biogasanlage eine grosse Wirkung. Da der Modellbetrieb Schweine auch einen beträchtlichen Anteil an Grünland hat, waren auch bei ihm Massnahmen zum Aufbau und Erhalt von Kohlenstoffspeichern wichtig.

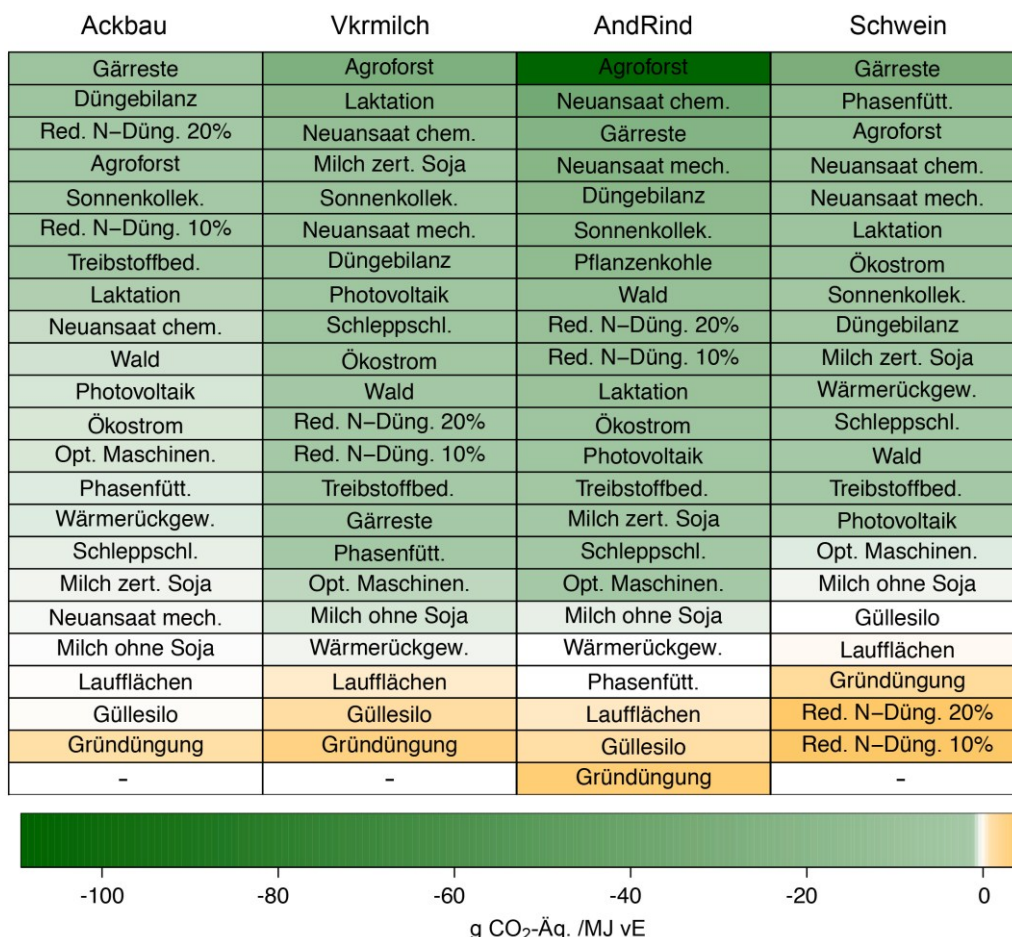


Abbildung 48: Ranking der Massnahmen anhand ihres Reduktionspotenzials (kg CO₂-Äq./MJ vE; siehe Abbildung 49) innerhalb der vier Modellbetriebstypen. Die Farbcodierung spiegelt die Höhe des Reduktionspotenzials wieder.

Massnahmen im Energiebereich waren bei allen Betriebstypen tendenziell im mittleren Drittel angesiedelt, Massnahmen zur Reduktion der NH₃-Emissionen - durch die oben genannten Wechselwirkungen im gesamten Hofdüngermanagement - eher in der unteren Hälfte.

5.2 Ökonomische Analysen

Die Bandbreite der Kosten der Umsetzung von Massnahmen zur Minderung des Treibhausgasausstosses ist gross. Im Mittel der untersuchten Modellbetriebe können die Massnahmen sowohl in vierstelligen jährlichen Verlusten (z.B. die „Reduktion des mineralischen N-Düngers“) als auch in vierstelligen jährlichen Gewinnen resultieren („optimale Maschinenauslastung“).

Insgesamt entstehen bei Durchführung von drei Massnahmen mittlere jährliche Gewinne: eine Massnahme kann dem Bereich Energie zugeordnet werden („optimale Maschinenauslastung“), eine der Tierhaltung („Erhöhung der Anzahl an Laktationen“) und ebenfalls eine dem Bereich Pflanzenbau („umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“).

Die insgesamt höchsten mittleren jährlichen Gewinne wurden im Energie-Bereich durch die überbetriebliche Nutzung der Maschinen ermittelt (siehe Tabelle 41). Bis auf den Modellbetrieb Verkehrsmilch profitieren alle Modellbetriebe am stärksten von der Massnahme der überbetrieblichen Maschinennutzung, wobei mögliche negative Effekte, die aufgrund eines höheren Organisationsgrades entstehen (Transaktionskosten), nicht in die Berechnung eingeflossen sind. Die Erhöhung der Anzahl Laktationen weist auch ein deutlich positives Ergebnis auf. Der Modellbetrieb Verkehrsmilch profitiert am stärksten von der Umsetzung dieser Massnahme. Geringe Gewinne sind bei der mechanischen Grünlanderneuerung zu erwarten, wobei die Variante mit Herbizideinsatz wirtschaftlich attraktiver ist.

Hohe jährliche Verluste werden bei vier Massnahmen verursacht: bei der Massnahme „Etablierung eines Agroforstsystems“ und der „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ im Bereich Pflanzenbau, der „Güllesiloabdeckung“ in der Tierhaltung sowie der „Photovoltaik“. Den Ackerbaubetrieb kommt die Massnahme „Agroforstsystem“ aufgrund seiner grossen Ackerflächen am teuersten zu stehen. Betriebe mit hohem Grünlandanteil (Verkehrsmilch, Schwein) schneiden bei der „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ relativ schlecht ab. Hier entstehen hohe Verluste aus der Notwendigkeit, Grundfutter zuzukaufen. Auch die Installation einer Photovoltaikanlage ist für die Modellbetriebe gegenwärtig nicht wirtschaftlich. Geringe Verluste entstehen bei der Massnahme „Milchproduktion mit zertifiziertem Soja“; die „Milchproduktion ohne Soja“ kann quasi kostenneutral umgesetzt werden.

Tabelle 41: Ranking der Massnahmen anhand der Höhe ihrer mittleren jährlichen Gewinne (absteigend) (Verluste und Nullgewinne in rot) für die vier Modellbetriebe

	Ackbau	Vrkmilch	AndRind	Schwein
1	Opt. Maschinen.	Laktation	Opt. Maschinen.	Opt. Maschinen.
2	Laktation	Opt. Maschinen.	Laktation	Laktation
3	Neuansaat chem.	Neuansaat chem.	Neuansaat chem.	Neuansaat chem.
4	Neuansaat mech.	Milch ohne Soja	Neuansaat mech.	Milch ohne Soja
5	Milch ohne Soja	Neuansaat mech.	Milch ohne Soja	Neuansaat mech.
6	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja
7	Red. N-Düng. 10%	Güllesilo	Photovoltaik	Photovoltaik
8	Photovoltaik	Agroforst	Agroforst	Agroforst
9	Red. N-Düng. 20%	Red. N-Düng. 10%	Güllesilo	Güllesilo
10	Güllesilo	Red. N-Düng. 20%	Red. N-Düng. 10%	Red. N-Düng. 10%
11	Agroforst	Photovoltaik	Red. N-Düng. 20%	Red. N-Düng. 20%

Die Massnahme „Wärmerückgewinnung in beheizten Ställen“ wird in Tabelle 41 nicht abgebildet, da die Effekte dieser Massnahme lediglich für die Modellbetriebe Schwein und Geflügel berechnet wurde – auf beiden Modellbetriebe ist diese Massnahme mit hohen jährlichen Kosten verbunden.

Ähnlich dem Ranking der mittleren jährlichen Gewinne/Verluste gestaltet sich das Ranking für die CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent der Massnahmen. Die alleinige Betrachtung dieses Quotienten ohne die absoluten Werte zu berücksichtigen birgt die Gefahr, dass wenig effektive Massnahmen positiv

beurteilt werden; so ergibt sich das positive Ergebnis der Massnahme „Milchproduktion ohne Soja“ aus dem Verhältnis zweier relativ kleiner Werte (geringer Gewinn/geringe CO₂-Einsparung).

Tabelle 42 vergleicht die entsprechenden CO₂-Reduktionsgewinne (in schwarz) bzw. -verluste (in rot) aller Massnahmen über alle Modellbetriebe hinweg. Werden bei einer Massnahme Emissionszunahmen verzeichnet, so sind diese Massnahmen durch Klammerung als solche gekennzeichnet. Es wird auch bei der Darstellung der CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent auf die Abbildung der Massnahme „Wärmrückgewinnung in beheizten Ställen“ verzichtet, wobei bei beiden betrachteten Modellbetriebe (Schwein und Geflügel) CO₂-Reduktionsverluste pro kg CO₂-Äquivalent entstehen. CO₂-Reduktionsgewinne lassen sich bei den Massnahmen „optimale Maschinenauslastung“, „Erhöhung der Anzahl Laktationen“, „Milchproduktion ohne Soja“ sowie der „umbruchlosen Neuansaat des Dauergrünlandes“ erzielen. Aufgrund der bereits erwähnten geringen THG-Einsparungsmöglichkeiten bei der Massnahme der überbetrieblichen Nutzung von Maschinen, schneidet diese Massnahme besonders gut innerhalb dieses Rankings ab und es lassen sich bei der optimalen Auslastung der Maschinen auf allen Modellbetrieben die höchsten CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent erzielen.

Tabelle 42: Ranking der Massnahmen anhand der Höhe ihrer CO₂-Reduktionsgewinne pro kg CO₂-Äquivalent (in schwarz, absteigend inkl. Nullwert; CO₂-Reduktionsverluste in rot; Massnahmen mit Emissionszunahme in Klammern) für die vier Modellbetriebe

	Ackbau	Vrkmilch	AndRind	Schwein
1	Opt. Maschinen.	Opt. Maschinen.	Opt. Maschinen.	Opt. Maschinen.
2	Milch ohne Soja	Milch ohne Soja	Milch ohne Soja	Milch ohne Soja
3	Laktation	Laktation	Laktation	Laktation
4	Neuansaat mech.	Neuansaat chem.	Neuansaat chem.	Neuansaat chem.
5	Neuansaat chem.	Neuansaat mech.	Neuansaat mech.	Neuansaat mech.
6	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja	Milch zert. Soja
7	Red. N-Düng. 20%	Photovoltaik	Photovoltaik	Photovoltaik
8	Red. N-Düng. 10%	Red. N-Düng. 20%	Red. N-Düng. 20%	Agroforstsystem
9	Agroforstsystem	Red. N-Düng. 10%	Red. N-Düng. 10%	Güllesilo
10	Photovoltaik	Agroforstsystem	Agroforstsystem	(Red. N-Düng. 10%)
11	(Güllesilo)	(Güllesilo)	(Güllesilo)	(Red. N-Düng. 20%)

Die geringsten CO₂-Reduktionsverluste je kg CO₂-Äquivalente werden über alle Modellbetriebe hinweg bei der Massnahme „Milchproduktion mit zertifiziertem Soja“ erzielt. Hohe CO₂-Reduktionsverluste werden beim Aufbau eines Agroforstsystems verzeichnet. Während die THG-Einsparungsmöglichkeiten in kg CO₂-Äquivalente bei dieser Massnahme nicht besonders hoch sind (ausser beim Modellbetrieb Ackerbau), fallen die CO₂-Reduktionsverluste je Einheit hier aufgrund der vergleichsweise hohen mittleren jährlichen Verluste besonders hoch aus. Die Massnahmen „Abdeckung des Güllesilos“ sowie die Massnahme „Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern“ weisen zudem für einige Betriebe eine Emissionszunahme auf.

5.3 Synthese der ökologischen und ökonomischen Ergebnisse

Zwei Massnahmen weisen sowohl aus ökologischer wie aus ökonomischer Sicht relativ gute Ergebnisse auf: die „Erhöhung der Anzahl Laktationen“ sowie die „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes (chemisch)“ sind besonders zu empfehlen. Mit deren Umsetzung sind, bezogen auf die verdauliche Energie, hohe prozentuale Treibhausgaseinsparungen verbunden. Ausserdem können bei beiden Massnahmen Gewinne verzeichnet werden.

Im Bereich Tierhaltung scheint auch die Massnahme „Milch ohne/mit zertifiziertem Soja“ eine Möglichkeit zu bieten, Treibhausgase zu geringen Kosten oder kostenneutral einzusparen. Die Umsetzung beider Varianten

der Massnahme ist aus ökologischer Sicht sinnvoll, jedoch kann die Massnahme bei der Umstellung auf zertifiziertes Soja mit wirtschaftlichen Nachteilen verbunden sein.

Für den Bereich des Pflanzenbaus lassen sich aus kombiniert ökologisch-ökonomischer Sicht zwei klare Aussagen treffen: Während die „umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“ bezüglich beider Aspekte klar vorteilhaft ist, kann die Durchführung der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ aus emissionsmindernder Sicht nur bedingt (d.h. bei gleichzeitiger Vermeidung eines Ertragrückgangs), aus ökonomischer Sicht hingegen nicht empfohlen werden.

Im Bereich Energie erweist sich sowohl die Installation einer Photovoltaik-Anlage als auch der nachträgliche Einbau einer Wärmerückgewinnung als sehr teure Massnahmen. Gleichzeitig ist der Beitrag dieser Massnahmen zur Treibhausgasminderung relativ gering. Dies gilt auch für die optimierte Auslastung der Maschinen; jedoch weist diese Massnahme ein ökonomisch positives Ergebnis auf.

Im Widerspruch zueinander stehen die Aussagen der beiden Analysen bei der Massnahme „Agroforstsystem“, welche aus ökologischer Sicht ein sehr hohes Einsparpotenzial vorzuweisen hat, aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes jedoch auch mit sehr hohen Kosten verbunden ist.

6 Diskussion der Massnahmenrangierung

Bislang wurden die Massnahmen gemäss ihrem Einsatzbereich, also Energie, Tierhaltung, Pflanzenbau oder Sonstige zusammengefasst. Obige Analysen haben gezeigt, dass zum Teil Massnahmen aus verschiedenen Bereichen den gleichen Wirkungsmechanismus aufweisen. So zielen z.B. sowohl die Massnahmen „Phasenfütterung“ und „Gülleabdeckung“ aus dem Tierbereich als auch die Massnahme „Schleppschlauch“ aus der Pflanzenproduktion auf die Erhöhung der betrieblichen Stickstoffeffizienz bzw. Einsparung von NH₃-Emissionen. Im Folgenden werden die analysierten Massnahmen gemäss ihrem Wirkungsmechanismus zusammengefasst und diskutiert.

6.1 Energie

Sieben der 20 analysierten Massnahmen betreffen den Energiebereich. Je nach Massnahme werden unterschiedliche Energieträger berücksichtigt: In den Massnahmen „Sonnenkollektoren“, „Waldbewirtschaftung“ und „Wärmerückgewinnung“ wird Heizöl durch erneuerbare Energieträger ersetzt bzw. dessen Einsatz vermindert. In den Massnahmen „Einsatz von Ökostrom“ und „Photovoltaik“ wird der auf dem Betrieb benötigte Strom durch erneuerbare Energieträger erzeugt. Treibstoffeffizienzsteigerung beziehungsweise Verminderung grauer Energie stehen in den Massnahmen „Verminderung des Treibstoffbedarfs“ und „optimale Maschinenauslastung“ im Zentrum.

Insgesamt zeichneten sich die Massnahmen im Energiebereich durch mittelgrosse, aber als relativ sicher zu betrachtende THG-Reduktionen aus, die beachtliche Synergien auf den nicht erneuerbaren Energiebedarf hatten. Zudem zeigen die Massnahmen im Energiebereich kaum negative Trade-offs. Der Ersatz von Heizöl durch erneuerbare Energieträger erzielt tendenziell eine höhere THG-Reduktion als der Ersatz von Strom, was an dem klimatechnisch günstigen Schweizer Strommix liegt. Dieser besteht zu fast 57 % aus Wasserkraft, was zu einem vergleichsweise niedrigen THP pro kWh Strom führt (ecoinvent Centre 2010). Ob dieses günstige THP des Schweizer Strommixes auch in Zukunft beibehalten werden kann, ist angesichts der bevorstehenden Energiewende unklar. Die restlichen gut 40 % des Schweizer Stroms werden zurzeit in AKWs erzeugt. Mit dem geplanten Atomausstieg steht diese Quelle in absehbarer Zeit nicht mehr zur Verfügung. Je nach gewähltem Ersatz könnte sich der Schweizer Strommix in der Folge ungünstiger auf das Klima auswirken.

Unabhängig von dieser Diskussion sind Massnahmen, die auf den Stromverbrauch abzielen, trotz ihres im Allgemeinen geringeren Reduktionspotenzials nicht zu vernachlässigen. Je nach Betriebstyp und Stromverbrauch können sie das Einsparpotenzial von Massnahmen zur Heizöleinsparung auch übertreffen. So kann der Modellbetrieb Schweine durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen seinen THG-Ausstoss stärker senken als durch den Einbau von Sonnenkollektoranlagen.

6.1.1 Energiemanagement

Unterschiede bei den Energiemassnahmen bestehen auch bezüglich ihrer Umsetzbarkeit. Die Massnahmen „Bezug von Ökostrom“, „Verminderung des Treibstoffbedarfs“, „optimale Maschinenauslastung“ und „Waldbewirtschaftung“ sind kurzfristig umsetzbare Massnahmen im Energiemanagement. Besonders deutlich ist dies beim Bezug von Ökostrom. Dieser ist eine einfache und unkomplizierte Art, die Ökobilanz des eigenen Betriebs zu verbessern. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass der Bezug von Ökostrom nicht dazu führt andere, komplizierter umzusetzende Energieeffizienzmassnahmen unterbleiben zu lassen (Pehnt *et al.* 2008).

Für die Verminderung des Treibstoffbedarfs bzw. die Erhöhung der Treibstoffeffizienz gibt es verschiedene Massnahmen, die ein Landwirt unmittelbar ergreifen kann, wie Fahrweise, Fahrzeugwahl aus dem bestehenden Fuhrpark und Fahrzeugeinstellungen, ecodrive usw. Zielgrösse hier sollte eine Verminderung des jährlichen Treibstoffverbrauchs auf dem Betrieb sein. Wie dies erreicht wird, liegt in der Entscheidungskompetenz des Betriebsleiters.

Die optimale Auslastung der Maschinen liegt prinzipiell auch im Entscheidungsbereich des Betriebsleiters, stellt sich in der Umsetzung aber deutlich schwieriger dar. Je nach geographischer Lage des Betriebs bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten bzgl. gemeinsamer Maschinennutzung bzw. Teilnahme an einem

Maschinenring. Auch die zeitliche Verfügbarkeit stellt für gewisse Arbeiten eine Einschränkung dar. Da diese Massnahme zudem nur auf die Verminderung von grauer Energie durch die Produktion der landwirtschaftlichen Maschinen abzielt, ist ihre Wirkung auf die THGE von geringem Umfang.

Die Erhöhung der Holzschnitzelproduktion im eigenen Wald durch verstärkte Bewirtschaftung kann auch eine unmittelbar umsetzbare Massnahme darstellen, welche eine gute THG-Reduktion aufweist. Voraussetzung dafür ist allerdings das Vorhandensein von betriebszugehörigen Waldflächen.

6.1.2 Bauliche Massnahmen

Die Massnahmen „Sonnenkollektoren“, „Photovoltaik“ und „Wärmerückgewinnung“ sind mit baulichen Massnahmen und damit Investitionen verbunden; sie stellen eher langfristige Massnahmen dar. Des Weiteren spielt auch die auf dem Betrieb vorhandene Energieversorgung eine Rolle: Sonnenkollektoren und auch Wärmerückgewinnungsanlagen lohnen sich nur, wenn dadurch Heizöl ersetzt werden kann. Wird auf einem Betrieb schon mit erneuerbaren Energien geheizt, sind diese Massnahmen kaum wirksam.

Alle baulichen Massnahmen sind mit kleineren Trade-offs auf verschiedene andere Umweltwirkungen verbunden. Betroffen sind insbesondere Umweltwirkungen, welche stärker von der Infrastruktur abhängen, wie etwa die Öko- und Humantoxizität durch Nicht-Pestizide. Diese Zielkonflikte können durch eine möglichst lange Nutzungsdauer der installierten Anlagen vermindert werden.

6.2 Reduktion des mineralischen Stickstoffdüngers

Die vier Massnahmen „Parzellen-spezifische Düngebilanz“, „Reduktion des mineralischen N-Düngers“, „Gründüngung“ und „Ausbringung von Gärresten“ haben eine Einsparung von mineralischem Stickstoffdünger zum Ziel, wobei bei den letzten beiden Massnahmen eine Kompensation durch organische Dünger (Leguminosen bzw. Gärreste aus Biogasanlagen) stattfindet.

Der Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger hat global mit 13 % einen erheblichen Anteil an den landwirtschaftlichen THGE (FAO 2015). Dies beruht auf der sehr energieintensiven Herstellung (Haber-Bosch-Verfahren) und somit hohen CO₂-Emission (aus nicht-erneuerbaren Energien) und den N₂O-Emissionen bei der Produktion sowie während und nach der Ausbringung auf dem Feld (Hauptkomponenten der Inputgruppe „Dünger & Feldemissionen“). Ein reduzierter Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger soll entsprechend den Energiebedarf sowie die CO₂- und N₂O-Emissionen verringern.

Ein Vergleich der Massnahmen zeigt, dass (1) die Ertragsreduktion und (2) die zusätzlichen Feldemissionen zentral für deren Wirkung sind. Die Massnahme „Düngeplan“, die keine Ertragsreduktion beinhaltet, hat die grösste Steigerung der THG-Effizienz (bis zu 5.2 % beim Betrieb Ackerbau).

Im Gegensatz zu den anderen Massnahmen wird für die „Reduktion des mineralischen N-Düngers“ eine Ertragsreduktion und eine Kompensation durch Zukauf von Grundfutter berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine sehr geringe Steigerung oder sogar eine Abnahme der THG-Effizienz (bis zu 1,4 % beim Betrieb Schweine). Betrachtet man hingegen die Ergebnisse ohne den Zukauf von Grundfutter, waren die Reduktionen durch „Dünger & Feldemissionen“ mit -40 g CO₂-Äq./MJ vE rund doppelt so hoch wie bei der Massnahme „Düngebilanz“. Anhand dieses Beispiels wird die potenzielle Wirksamkeit der Düngereduktion deutlich, wenn man die Ertragsreduktion ausser Acht lässt. Nochmals zu erwähnen ist, dass die angenommenen Ertragsreduktionen für das Grünland sehr hoch waren und somit die Wirkung der Massnahme stark reduziert wurde. In der Praxis kann eine Düngereduktion zu einer Zunahme des Klee-Anteils führen, die einen Grossteil der N-Reduktion kompensieren kann und somit dem Ertragsverlust entgegenwirkt.

Bei den Massnahmen „Gründüngung“ und teilweise auch „Gärreste“ sind deutliche Zunahmen der Feldemissionen zu verzeichnen. Dies sind zusätzliche Emissionen, vor allem N₂O, aus dem stickstoffreichen Pflanzenmaterial der Leguminosen und den ausgebrachten Gärresten. Für diese relativen Emissionszunahmen spielten in den Berechnungen vor allem der Zeitpunkt und die Menge des N-Eintrags eine wesentliche Rolle. Der Faktor Zeitpunkt umfasst vor allem den Ausbringungszeitpunkt im Jahr und somit die Witterung und den Stickstoffbedarf/-entzug durch die Kulturen. Der N-Entzug fehlt bei der „Gründüngung“, was zu hohen Nitrat- und N₂O-Emissionen führt. Dies bedeutet, dass die Kompensation von mineralischen Stickstoffdünger durch organische Materialien ein höheres Potenzial für N₂O-Emissionen aufweist. Für die Praxis heisst das, um die THGE bei organischen Materialien als Dünger möglichst gering zu halten, ist deren

Verwendung mit deutlich mehr Know-how, mehr Aufwand (Ausbringungstechnik) und weniger Flexibilität in der Ausbringung (Zeitpunkt) verbunden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Massnahmen, die an der Reduktion von mineralischen Stickstoffdüngern ansetzen, ein relativ hohes Reduktionspotenzial aufweisen, dessen Wirksamkeit aber sehr stark von einer potenziellen Ertragsreduktion und von zusätzlichen Feldemissionen aus den alternativen Düngern wie Gründünger und Gärreste abhängt. Für die Erhöhung der Wirksamkeit dieser Massnahmen sind deshalb, vor allem beim Grünland, möglichst geringe Ertragsreduktionen, emissionsmindernde Ausbringungstechniken und die Wahl des Ausbringungszeitpunkts entscheidend. Die Reduktion von mineralischem Stickstoffdünger kann zu dem wichtigen übergeordneten Ziel der Erhöhung der N-Effizienz (siehe Kapitel 6.3) beitragen und sollte deshalb stets als ein mögliches Stellrad im sehr stark verketteten betrieblichen Stickstofffluss betrachtet werden (siehe Massnahme Gülleabdeckung).

6.3 Erhöhung der Stickstoffeffizienz

Insgesamt vier der zwanzig analysierten Massnahmen zielen darauf ab, durch die Vermeidung von NH_3 -Emissionen die N-Effizienz zu erhöhen: „Phasenfütterung“, „Saubere Laufflächen“, „Güllesiloabdeckung“ und „Schleppschlauch“. Die Massnahmen setzen an unterschiedlichen Stellen der Stickstoffkette an: Während bei der „Phasenfütterung“ der N-Input in das System vermindert wird, wird bei den anderen drei Massnahmen versucht, den Stickstoff möglichst in der Gülle zu behalten bzw. in den Boden gelangen zu lassen. Die Massnahme „Saubere Laufflächen“ setzt dabei ganz am Anfang beim Anfall des Hofdüngers im Stall an, die Massnahme „Güllesiloabdeckung“ bei der Hofdüngerlagerung und die Massnahme „Schleppschlauch“ schliesslich bei der Gülleausbringung.

Je nach Ansatzpunkt wiesen die Massnahmen einen unterschiedlichen Effekt auf die N_2O -Emissionen auf: Die Massnahme „Phasenfütterung“ reduzierte die N-Emissionen in der Schweinemast inkl. der N_2O -Emissionen um bis zu 30 %. Durch den geringeren N-Gehalt in der Gülle verringerten sich auch die THG-Emissionen bei der Ausbringung der Gülle. Diese Einsparungen wurden noch übertroffen durch die Verminderung des THP infolge des verminderten Sojaanteils in der Ration (siehe Kapitel 4.9).

Auch durch die Sauberhaltung der Laufflächen in den Rindviehställen verminderten sich die N_2O -Emissionen aus der Tierhaltung. Dies wurde jedoch überkompensiert durch höhere N_2O -Emissionen bei der Gülleausbringung. Wie in Kap. 4.10.4 erklärt bringt die Ausbringung einer gewissen Menge Gülle höhere THG-Emissionen mit sich als dieselbe Menge Gülle im Stallbereich. Dazu kommt, dass der durch die Massnahme höhere N-Gehalt in der Düngung gemäss Suisse-Bilanz nicht berücksichtigt wurde und demzufolge insgesamt mehr Stickstoff auf das Feld gelangte. Dadurch stiegen die THGE bei dieser Massnahme insgesamt an. Denselben Effekt sieht man bei der Massnahme „Güllesiloabdeckung“. Um dem bei diesen Massnahmen erhöhten Risiko für Lachgasemissionen entgegenzuwirken, müsste der erhöhte N-Gehalt in der Gülle bei der Düngungsplanung berücksichtigt sowie emissionsmindernde Ausbringungstechniken eingesetzt werden.

Die „Gülleausbringung mit Schleppschlauch“ zeigte insgesamt eine Verminderung des THG-Ausstosses. Hier wurde der erhöhte N-Gehalt der Gülle berücksichtigt, indem gemäss Suisse-Bilanz pro Güllegabe mit Schleppschlauch und Hektare 3 kg N_{verf} angerechnet wurden. Die THG-Reduktion kam durch zwei Effekte zu Stande: Einerseits verminderte der Schleppschlauch die NH_3 - und damit die N_2O -Emissionen, andererseits verringerte sich durch den geringeren Einsatz von Mineraldüngern auch der CO_2 -Ausstoss der Modellbetriebe. Der verminderte Einsatz von Mineraldüngern (siehe Kapitel 6.2) überkompensierte die Erhöhung der CO_2 -Emissionen durch den erhöhten Dieselbedarf der Schleppschlauchausbringung.

Bei der Analyse der übrigen Umweltwirkungen war klar zu sehen, dass die oben erwähnten Massnahmen ihrer Bestimmung nach den grössten Effekt auf die NH_3 -Emissionen und damit die terrestrische Eutrophierung und die Versauerung hatten. Diese Umweltwirkungen konnten um 2 bis 10 % reduziert werden. Einzig bei der Massnahme „Phasenfütterung“ war die Reduktion kleiner, da hier die veränderte Futterzusammensetzung ihre Wirkung zeigte. Bei den anderen Massnahmen war die Wirkung auf das THP durchgängig kleiner als die Wirkung auf die terrestrische Eutrophierung und Versauerung.

Bei Massnahmen zur Erhöhung der N-Effizienz ist also grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Massnahmen, welche einen verminderten N-Input vorsehen, und Massnahmen zur Reduktion der N-Verluste entlang der Stickstoffkette. Die Massnahme „Phasenfütterung“ gehört zur ersten Gruppe, sie zeigte positive

Effekte auf die N-Verluste und das THP. Die veränderte Zusammensetzung der Futtermittel führte jedoch zu verschiedenen Effekten auf andere Umweltwirkungen. Die übrigen analysierten Massnahmen sind konzipiert zur Reduktion der NH₃-Emissionen und gehören somit zur zweiten Gruppe. Die NH₃-Emissionen vermochten sie effektiv zu senken. Damit sie aber nicht nachteilig auf das THP wirken, müssen begleitende Massnahmen getroffen werden. Wird dies nicht beachtet, können isoliert am Anfang der Stickstoffkette getroffene Massnahmen sogar zu einer Erhöhung der Lachgasemissionen führen. Soll nur eine einzelne Massnahme umgesetzt werden, ist es empfehlenswert am Schluss der Stickstoffkette, also bei der Hofdüngerausbringung, anzusetzen.

Erwähnt werden muss zudem, dass innerhalb der landwirtschaftlichen Produktion immer mit unvermeidbaren N-Verlusten zu rechnen ist, unabhängig vom Management. In anderen Worten: eine vollständig N-verlustfreie Landwirtschaft bzw. eine Düngeneffizienz von 100 % ist nicht realisierbar. Dennoch ist die Verringerung von N-Überschüssen ein aktuelles Problem, welches trotz vergangener und bestehender Bemühungen durch die Landwirte und gerade auf Grund der schwierigen Umsetzbarkeit (begrenzte Hofdüngerlagerung, Ausbringungszeitpunkt, klimatische Faktoren/Unsicherheiten) immer noch ein hohes Reduktionspotenzial aufweist

6.4 Treibhausgasspeicher

Durch die sehr grossen Vorräte und Speichermöglichkeiten von Kohlenstoff und Stickstoff in Böden, haben diese als mögliche THG-Quellen und potenzielle „Treibhausgasspeicher“ in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen.

Vier Massnahmen aus der vorliegenden Analyse zielen auf die Treibhausgasspeicherung in Böden ab: „Milch mit zert. / ohne Soja“, „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“, „Agroforstsystem“ und „Pflanzkohle“, wobei die ersten beiden auf den Erhalt der Treibhausgasspeicherung abzielen und die letzten beiden auf dessen Aufbau. Generell sind bei diesen Massnahmen sehr hohe Reduktionspotenziale zu verzeichnen.

6.4.1 Erhalt von Treibhausgasspeicher

Die beiden Massnahmen „Milch zert. / ohne Soja“ und „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“ zielen vor allem auf die Vermeidung bodenbürtiger CO₂- und N₂O-Emissionen ab. Bei der Massnahme „Milch zert. / ohne Soja“ sind die Emissionen des Sojaanbaus ausschlaggebend. Durch die Umwandlung von primären Wäldern zu Ackerflächen findet eine Landnutzungsänderung statt, durch die sehr viel Kohlenstoff aus dem Boden und den abgeholzten Pflanzen (Holz) in die Atmosphäre gelangt. Bei der „Umbruchlosen Neuansaat des Dauergrünlands“ werden vor allem die zusätzlichen N₂O-Emissionen berücksichtigt, die durch das Pflügen eines Grünlandes entstehen. Zusätzliche CO₂-Emissionen aus dem Boden werden auf Grund der Konsistenz nicht berücksichtigt (Bodenkohlenstoff relevante Prozesse wurden generell nicht berücksichtigt; siehe Kapitel 2.3., Nicht berücksichtigte Massnahmen). Von diesen methodischen Einschränkungen abgesehen verzeichnet die „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands“ mit das höchste Reduktionspotenzial (bis zu -39 g CO₂-Äq/MJ vE). Bei „Milch mit zert. / ohne Soja“ ist die Reduktionswirkung deutlich geringer. Dies ist auf die in der Schweiz aktuelle Verwendung von durchschnittlich 82 % zertifiziertem Soja zurückzuführen, die bei der Berechnung als Referenz galt. Ginge man von 100 % nicht-zertifiziertem Soja als Referenz aus, wäre das Reduktionspotenzial wesentlich höher und mit bis zu -40 g CO₂-Äq /MJ vE vergleichbar mit „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“.

Bezüglich der Umsetzbarkeit ist „Milch mit zert. / ohne Soja“ mit einem sehr geringen Aufwand verbunden. Hier müsste entweder 100 % statt 82 % zertifiziertes Soja bezogen oder die Futtermischung auf sojafrei umgestellt werden.

Für die Massnahme „Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes“ wäre die Umsetzbarkeit im Vergleich zur Referenz mit Pflug ebenfalls nur mit einem geringeren Mehraufwand verbunden. Allerdings ist zu erwähnen, dass eine Vermeidung einer Grünlanderneuerung der Massnahme vorzuziehen ist und einem optimalen Grünlandmanagement Rechnung getragen werden sollte. Zudem sind für die chemische Variante dieser Massnahme die aktuelle Diskussion zur Toxizität von Glyphosat und die möglichen Konsequenzen daraus zu berücksichtigen. Die Unterschiede zwischen den Betrieben zeigen auf, dass diese Massnahme eine besonders hohe Wirkung für extensive, relativ grünlandreiche Betriebe, wie AndRind, aufweist

6.4.2 Aufbau von Treibhausgasspeicher

Durch die beiden Massnahmen „Agroforstsystem“ und „Pflanzenkohle“ soll vor allem ein Aufbau der Kohlenstoffspeicher erwirkt werden. Für das „Agroforstsystem“ findet die Kohlenstoffspeicherung im Holz (Unterirdische Prozesse sind nicht berücksichtigt) der neu angepflanzten Apfelbäume statt und bei „Pflanzenkohle“ werden grosse Mengen an sehr persistentem Kohlenstoff in den Boden eingebracht.

Beim „Agroforstsystem“ ist die starke Streuung zwischen den Betrieben auffällig, die ein Reduktionspotenzial von -2 bis -109 g CO₂-Äq./MJ vE aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass „Agroforstsysteme“ vor allem bei extensiven, grünlandreichen Betrieben eine Erhöhung der THG-Effizienz erzielen. Diese hängt unter anderem auch mit der relativen Steigerung der Produktivität zusammen, die beim Modellbetrieb AndRind durch den zusätzlichen Apfelertrag um 17 % gesteigert werden kann. Für den Betrieb Ackbau hingegen führt die Etablierung eines „Agroforstsystems“ zu einer relativen Abnahme der gesamtbetrieblichen Produktion um 3 %. Absolut betrachtet bzw. ohne Berücksichtigung der Produktivität, hängt die Kohlenstoffspeicherung mit der Anzahl gepflanzter Bäume zusammen, was zum grössten, absoluten THG-Reduktionspotenzial beim Betrieb Ackbau führt. Für zukünftige Studien wäre eine Untersuchung eines AFS mit schnellwachsenden Energiehölzern oder auch von neuetablierten Streuobstwiesen sehr interessant, da bei letzteren aufgrund der fehlenden Fruchtfolge und eines angepassten, ertragsstabileren Grünlandbestandes die Produktivitätssteigerung möglicherweise noch höher liegt.

Im Hinblick auf die flächenbezogene Kohlenstoffspeicherung weist die Massnahme „Pflanzenkohle“ mit 1.9 t CO₂-Äq./ha*Jahr eine höhere Speicherkapazität auf als „Agroforstsystem“ mit rund 1 t CO₂-Äq./ha*Jahr. Allerdings sind bei beiden Massnahmen die Annahmen über die Anzahl Bäume bzw. ausgebrachte Menge an Pflanzenkohle, aber auch der betrachtete Zeithorizont entscheidend. So ist die Wirkung der Massnahme „Agroforstsystem“ sehr wahrscheinlich unterschätzt, da unterirdische Prozesse, wie die Speicherung von Kohlenstoff in den Wurzeln und dem Boden, bei der Analyse nicht berücksichtigt wurden. Generell ist der Aufbau eines Kohlenstoffspeichers nur klimarelevant, solange er existiert und nicht abgebaut wird. Diese Tatsache ist vor allem bei dem „Agroforstsystem“ von besonderer Bedeutung, da diese Massnahme durch eine mögliche Rodung reversibel ist. Hingegen ist die Ausbringung von Pflanzenkohle irreversibel und somit auch die Kohlenstoffspeicherung (der natürliche, kontinuierliche Abbau im Boden ausgenommen). Diese Irreversibilität kann einen Vorteil sein, bedeutet durch die zurzeit noch existierenden grossen Unsicherheiten aber auch ein gewisses Risiko. Die grossen Unsicherheiten hängen vor allem mit der sehr variablen Wirkungsweise der Pflanzenkohle zusammen, die auf der grossen Heterogenität der Pflanzenkohleigenschaften beruht. Hierdurch werden, um nur wenige zu nennen, ein möglicher Schadstoffeintrag, die möglichen positiven oder negativen Wirkungen auf Bodenlebewesen und auf das Gewässer durch eine mögliche Auswaschung beeinflusst. Der Einsatz von „Pflanzenkohle“ in der landwirtschaftlichen Praxis hat möglicherweise sehr grosses Potenzial für den Klimaschutz, benötigt aber noch weitere Forschung, insbesondere längerfristige Experimente, um die diskutierten Unsicherheiten einzugrenzen und die Wirkungsweisen besser zu verstehen.

6.5 Emissionen aus der Rindviehhaltung

Eine grosse Treibhausgasquelle in der Tierhaltung stellen die durch enterische Fermentation entstehenden Methanemissionen beim Rindvieh dar. In der vorliegenden Massnahmenauswahl zielt nur eine Massnahme, nämlich die Erhöhung der Anzahl Laktationen, direkt auf diese Emissionsquelle. Mit der Erhöhung um nur eine Laktation kann aber eine beträchtliche Reduktion von bis zu 3.6 % auf dem Verkehrsmilchbetrieb erreicht werden. Die direkte Beeinflussung der Methanemissionen aus der Wiederkäuerverdauung scheint also ein durchaus relevanter Ansatzpunkt zur Reduktion der THGE auf Landwirtschaftsbetrieben zu sein. Andere Massnahmen wie etwa der Gebrauch von Futteradditiven, welche direkt die Methanemissionen aus der enterischen Fermentation beeinflussen wollen, sind aber zurzeit noch nicht praxisreif (Flachowsky und Brade 2007; Flachowsky und Lebzien 2009; Osterburg *et al.* 2013). Die Forschung in diesem Gebiet sollte aber weiter verfolgt und periodisch neu beurteilt werden, um allenfalls zu einem späteren Zeitpunkt sich bestätigende Massnahmen integrieren zu können.

6.6 Ökonomische Gesamtbetrachtung

Betrachtet man die neun Massnahmen, deren Wirtschaftlichkeit untersucht wurde, so kann man grob vier Stossrichtungen differenzieren, die zur Umsetzung einer Massnahme vorgenommen werden: 1) eine grössere Investition (Photovoltaikanlage, Gülleabdeckung, Wärmerückgewinnung), 2) eine Verringerung des Inputs (Reduktion des mineralischen N-Düngers), 3) eine Änderung bestehender (Produktions-) Verfahren (Grünlandumbruch, Milchviehfütterung, Agroforstsystem, erhöhte Anzahl Laktationen) sowie 4) eine organisatorische Anpassung (Optimierung der Maschinenauslastung). Diese Differenzierung ist nicht trennscharf; so könnte man etwa das Agroforstsystem auch als Investition auffassen (Anschaffung des Baumschüttlers) und die erhöhte Anzahl Laktationen als eine organisatorische Anpassung des Herdenmanagements. Zur Analyse und zum Verständnis der Massnahmen ist die vorgeschlagene Differenzierung hilfreich.

Die Investition in eine Photovoltaikanlage – Stossrichtung 1 – stellt für einen landwirtschaftlichen Betrieb der Aufbau eines neuen oder den Ausbau eines bestehenden Betriebszweiges dar, und ist damit ein Sonderfall. Der Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage in einen bestehenden Stall, der beheizt wird, und auch die Abdeckung des Güllebehälters sind Investitionen in bestehende Gebäude mit einer in der Folge veränderten Kosten- und Leistungsstruktur der betroffenen Betriebszweige. Die untersuchten Massnahmen zeigen, dass der Aufbau eines neuen Betriebszweigs (Installation einer Photovoltaikanlage) unter den getroffenen Annahmen nicht wirtschaftlich ist. Auch die hohen Kosten der Anpassung bestehender Infrastruktur stehen nur in einem sehr schlechten Verhältnis zum erzielten Nutzen (Kosteneinsparung, CO₂-Reduktion).

Die Reduktion des eingesetzten mineralischen Düngers ist eine Massnahme, die auf der Input-Seite ansetzt (Stossrichtung 2). In der Folge des verringerten Düngereinsatzes ergeben sich kostenseitig Vorteile, welche die leistungsseitigen Nachteile jedoch nicht aufwiegen können. Dies schliesst die Möglichkeit einer Verbesserung der Stickstoff-Produktivität mit ökonomischen Vorteilen jedoch nicht grundsätzlich aus.

Stossrichtung 3, die Änderung bestehender Verfahren, kann man unterscheiden in eine (geringfügige) Anpassung (Grünlandumbruch, Milchviehfütterung, erhöhte Anzahl Laktationen) und eine signifikante Änderung (Agroforstsystem). Relativ vielversprechend erscheinen die Möglichkeiten, durch Anpassungen des Produktionsverfahrens zu geringen Kosten oder kostenneutral Treibhausgasreduktionen (THGR) zu erzielen. Derartige leichte Anpassungen bestehender Verfahren sind relativ kurzfristig und leicht umsetzbar. Die sogenannte organisatorische Anpassung, (Optimierung der Maschinenauslastung, Stossrichtung 4), ist gemäss der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen attraktiv. Die Tatsache, dass trotz der ermittelten Wirtschaftlichkeit und damit verbundener THGR diese Massnahme nicht bereits umgesetzt wird, könnte ein Hinweis auf nicht berücksichtigte Kosten sein. Bei der gemeinschaftlichen Maschinennutzung könnten dies hohe (erwartete) Transaktionskosten und auch psychologisch-soziale Hemmnisse sein.

Bei betrieblichen Entscheidungen ist es wichtig, die spezifische Situation (z.B. den Strombedarf des Betriebs, den vorhandenen Maschinenpark, die Produktionsintensität) zu berücksichtigen, wenn Massnahmen zur Treibhausgasvermeidung beurteilt werden. Die jeweilige betriebliche Situation kann die Kosten der Massnahmen stark beeinflussen.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Massnahmen im **Energiebereich** zeigen eine kleine bis mittlere Reduktionsleistung mit vergleichsweise geringen Zielkonflikten. Zudem sind sie mit den geringsten Unsicherheiten behaftet. Sie eignen sich demzufolge generell gut für ein Punktesystem Klimaschutz. Einzig die Massnahme „optimale Maschinenauslastung“ hat eine eher geringe Reduktionsleistung. Hier besteht aber eine grössere Unsicherheit aufgrund der unklaren Datenlage über die aktuelle Auslastung des Schweizer Maschinenparks. Aus ökonomischer Sicht schneidet die Massnahme sehr gut ab, sie weist als einzige der ökonomisch untersuchten Massnahmen im Energiebereich CO₂-Reduktionsgewinne auf. Dies im Gegensatz zum Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage in bestehende Ställe sowie der Installation einer Photovoltaikanlage, welche in der gegenwärtigen Situation aus ökonomischer Sicht nicht zu empfehlen sind. Im Hinblick auf andere Umweltwirkungen gibt es bei allen Massnahmen zum Teil beträchtliche Synergien, insbesondere auf den nicht-erneuerbaren Energiebedarf. Tendenziell sind Massnahmen zur Reduktion des Heizölbedarfs Massnahmen zur Reduktion des Strombedarfs vorzuziehen, wobei bei hohem Strombedarf auch Stromreduktionsmassnahmen wichtig sein können. Bei Massnahmen, die mit baulichen Installationen verbunden sind, ist auf eine möglichst lange Lebensdauer der installierten Anlagen zu achten, um entstehende Trade-offs zu minimieren.

Massnahmen zur **Reduktion des mineralischen Stickstoffdüngers** sind besonders im Ackerbau wichtig. Sie können generell auf allen landwirtschaftlichen Nutzflächen eine hohe Reduktionsleistung erzielen, wichtig ist jedoch, dass keine wesentliche Verminderung des Ertrags stattfindet. Eine solche wirkt sich sowohl auf die THG-Effizienz als auch ökonomisch nachteilig aus. Als gut kontrollierbarer Indikator für ein Punktesystem würde sich die Menge an eingesetztem mineralischem Stickstoffdünger pro Fläche und Jahr eignen. Hierbei bliebe es dem Landwirten überlassen, die auf seinem Betrieb möglichen Einsparungspotenziale zu identifizieren und umzusetzen, unter der Annahme, dass jeder Betriebsleiter dabei auf die Beibehaltung des Ertragsniveaus achten würde. Beim Einsatz organischer Dünger als Ersatz für Mineraldünger muss auf die Verminderung der Ausbringungsemissionen durch geeignete Wahl von Ausbringungstechnik und -zeitpunkt geachtet werden.

Massnahmen zur **Erhöhung der Stickstoffeffizienz** wirken in erster Linie auf die NH₃-Emissionen. Sie vermindern die terrestrische Eutrophierung und Versauerung effektiv, haben jedoch eine geringe oder gar negative Wirkung auf das THP. Werden nur einzelne Massnahmen zu Beginn der Hofdüngerkette umgesetzt, ohne die Düngung auf die veränderten Stickstoffgehalte der Gülle anzupassen, erhöhen diese Massnahmen das THP. Massnahmen zur Reduktion der NH₃-Emissionen sind wichtig zur Reduktion der gesamten Umweltbelastung eines Landwirtschaftsbetriebs. Für ein Punktesystem Klimaschutz haben sie aber nicht die gleiche Bedeutung wie Massnahmen, welche direkt auf Treibhausgase wirken. Werden solche Massnahmen umgesetzt, ist es unabdingbar, die gesamte Hofdüngerkette anzuschauen und die Düngung den effektiven Stickstoffgehalten in der Gülle anzupassen. Die grösste Wirkung erzielt die Massnahme Phasenfütterung, welche den effektiven Stickstoffeintrag in das System verminderte. Je nach Zusammensetzung der angepassten Futtermischung können aber Zielkonflikte zu anderen Umweltwirkungen, wie z.B. Ökotoxizität, auftreten.

Die so genannten **Treibhausgasspeicher** können sehr grosse Mengen an Treibhausgasen aufnehmen (sehr langfristig) bzw. wieder freigeben (kurzfristig). Ihr Aufbau (Biomasse) bzw. Erhalt (Böden) kann deshalb das THP eines Betriebs deutlich reduzieren. Die Höhe der Reduktionsleistung ist aber aufgrund der sehr komplexen Prozesse im Boden mit relativ grossen Streuungen und somit Unsicherheit verbunden. Zudem ist der Wissenstand bzw. die Datengrundlage bei den einzelnen Massnahmen sehr unterschiedlich. Für die Umsetzung innerhalb des Punktesystems sind die „Umbruchlose Neuansaat des Grünlandes“ sowie „Milch mit zert. / ohne Soja“ sicherlich sinnvoll. Beide weisen auch aus ökonomischer Sicht Vorteile auf. Der ausschliessliche Einsatz von zertifiziertem Soja hingegen kann mit wirtschaftlichen Nachteilen verbunden sein. Ein „Agroforstsystem“ scheint sich wegen der geringeren Ertragsreduktionen vor allem auf Grünland zu lohnen. Aus ökonomischer Sicht ergeben sich infolge des mit dem Aufbau verbundenen Arbeitsaufwands

erhebliche Kosten. In diesem Zusammenhang soll auf die Neuetablierung von Streuobstwiesen verwiesen werden, die sehr wahrscheinlich auch einen relativ hohen Reduktionseffekt besitzen.

Auch für die Massnahme „Pflanzenkohle“ bestehen noch sehr grosse Unsicherheiten. Der Einsatz von Pflanzenkohle in der landwirtschaftlichen Praxis hat grosses Potenzial als Klimaschutzmassnahme, ist allerdings aufgrund des hohen Forschungsbedarfs und der hohen Kosten für eine kurzfristige Umsetzung nicht empfehlenswert.

Methanemissionen aus der Rinderhaltung sind eine bedeutende Emissionsquelle. Die Reduktion dieser Emissionen kann die Treibhauswirkung eines Betriebs deutlich senken. Die Erhöhung der Anzahl Laktationen ist diesbezüglich eine zielführende Massnahme, welche auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist. Die aus Klimasicht optimale Anzahl Laktationen dürfte dabei deutlich höher liegen als die in der vorliegenden Analyse berücksichtigte.

8 Abkürzungen

a	Jahr
Ackbau	Modellbetrieb Ackerbau ÖLN
AndRind	Modellbetrieb Anderes Rindvieh Tal ÖLN
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
DBK	Deckungsbeitragskatalog
FAT	Forschungsanstalt Tänikon
Geflügel	Modellbetrieb Geflügel ÖLN
GVE	Grossvieheinheit
K	Kalium
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
MGB	Migros-Genossenschafts-Bund
N	Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
NH ₃	Ammoniak
Nicht- Pestizide	Schwermetalle und andere Stoffe mit toxischer Wirkung (im Ggs. zu „Pestizide“)
NPr-Futter	Stickstoffreduziertes Futter
N _{tot}	Gesamtstickstoff
N _{verf}	Stickstoff (N) verfügbar
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
P	Phosphor
POL	Projektoberleitung
PV	Photovoltaik
Schwein	Modellbetrieb Schweine ÖLN
SES	Sojaextraktionsschrot
TAN	Gesamt-Ammoniumgehalt
THG	Treibhausgase
THGE	Treibhausgasemissionen
THP	Treibhauspotenzial
TS	Trockensubstanz
vE	Verdauliche Energie
VES	Verdauliche Energie Schwein
VrkMilch	Modellbetrieb Verkehrsmilch Tal ÖLN
WRG	Wärmerückgewinnung
ZA-BH	Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten

9 Literatur

- AgriClimateChange, 2012. Klimaschutz in der EU-Landwirtschaft. Zugang: www.agriclimatchange.eu.
- AgriClimateChange, 2012. Klimaschutz in der EU-Landwirtschaft. www.agriclimatchange.eu.
- AGRIDEA, 2009-2013a. Deckungsbeiträge. AGRIDEA, Lindau.
- AGRIDEA, 2009-2013b. Preiskatalog. AGRIDEA, Lindau.
- AGRIDEA, 2013a. Deckungsbeiträge Ausgabe 2013. AGRIDEA, FiBL, Lindau.
- AGRIDEA, 2013d. Handbuch Betrieb und Familie 2014. Wirz Verlag, Basel.
- AGRIDEA, 2014a. Deckungsbeiträge Ausgabe 2014. AGRIDEA, Lindau.
- AGRIDEA, 2014b. Preiskatalog Ausgabe 2014. AGRIDEA, Lindau.
- AGRIDEA & Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2014. Wegleitung Suisse-Bilanz.
- AgroCleanTech, 2011. AgroCleanTech. <http://www.agrocleantech.ch/index.php/de/>.
- AgroCO2ncept, 2014. Projekt AgroCO2ncept Flaachtal. <http://www.agroco2ncept.ch/>.
- Agroscope 2015: Schweizerische Futtermitteldatenbank. <http://www.feed-alp.admin.ch/>
- Albisser Vögeli G., Ammann H. & Brecht I., 2009. Wirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Waldnutzung – Vollkostenrechnungen für Sägereirundholz und Scheitholz sowie Holzschnitzel. ART-Bericht 713, Agroscope-Reckenholz Tänikon, Ettenhausen, 12.
- Alder T., 2007. Vollkostenkalkulation für die Mostobstproduktion - Vergleich der Produktionskosten von Mostobst zwischen der Ostschweiz und Baden-Württemberg. Agroscope Reckenholz-Tänikon, ART-Bericht 691, Ettenhausen, 8.
- Amt für Landschaft und Natur (ALM), 2014. Faktoren für die Umrechnung des Tierbestandes in Grossvieheinheiten (GVE).
- Aurbacher J., Lippert C. & Dabbert S., 2011. Imperfect markets for used machinery, asynchronous replacement times, and heterogeneity in cost as path-dependent barriers to cooperation between farmers. *Biosystems Engineering* **108** (2), 144-153.
- BAFU, 2015. Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2013. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 596.
- Baker J. M., Ochsner T. E., Venterea R. T. & Griffis T. J., 2007. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment* **118** (1), 1-5.
- Baumgartner H., 2014. Gülle auf die Felder statt in die Luft. *Umwelt* **2014** (2), 22–27.
- Baur P., 2011. Sojaimporte Schweiz: Möglichkeiten und Grenzen der Reduktion/Vermeidung von Sojaimporten in die Schweiz. Eine Untersuchung im Auftrag von Greenpeace. Agrofutura AG, Frick.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt 2012: Materielle Anforderungen an Einrichtungen und Betrieb - Wasserwirtschaft. Biogashandbuch Bayern - Materialband.
- Bender B., Chalmin A., Reeg T., Konold W., Maste I. K. & Spiecke R. H., 2009. Moderne Agroforstsysteme mit Werthölzern – Leitfaden für die Praxis. Freiburg, 51.
- Berger S., 2014. Gewinn und Rendite von Photovoltaikanlagen. *Schweizer Landtechnik* **76** (6/7), 26–29.
- Bischofberger N., Gattinger A. & Oehen B., 2011. Klimaschutz auf Biobetrieben-Merkblatt'. *Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)*, Frick, 22.
- Bosshard C., Flisch R., Mayer J., Richtner W. & Basler S., 2008. Abklärung zu den Eigenschaften von Düngerprodukten aus der Gülleaufbereitung, Teil 2: Gefäss- und Feldversuche zur Ermittlung der pflanzenbaulichen Effizienz sowie zur Abschätzung der ökologischen Umweltauswirkungen der Aufbereitungsprodukte. Agroscope Reckenholz-Tänikon, 74-122.
- Bosshard C. & Richner W., 2013. Bestimmungsfaktoren des Stickstoff-Überschusses auf Betriebsebene. Teil 1: Analyse auf gesamtbetrieblicher Ebene. Abschlussbericht zuhanden des Bundesamts für Landwirtschaft BLW. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, 83-105.
- Braam C. R., Ketelaars J. J. M. H. & Smits M. C. J., 1997a. Effects of floor design and floor cleaning on ammonia emission from cubicle houses for dairy cows. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **45**, 49-64.
- Braam C. R., Smits M. C. J., Gunnink H. & Swierstra D., 1997b. Ammonia Emission from a Double-Sloped Solid Floor in a Cubicle House for Dairy Cows. *Journal of Agricultural Engineering Research* **68**, 375-386.
- Bracher A. & Spring P., 2010. Möglichkeiten zur Reduktion der Ammoniakemissionen durch Fütterungsmassnahmen bei Schweinen. SHL Zollikofen, Agroscope Liebefeld-Posieux, 98.
- Brentrup F. & Pallière C., 2008. Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions in European Nitrogen Fertilizer Production and Use. Sustainable Agriculture in Europe, Brussels, 24.
- Brücker U., Limacher R., Engeli H. & Henggeler H., 2005. Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen – SwissFarmerPower, Bundesamt für Energie, Bern.
- Bucheli T., Hilber I. & Schmidt H.-P., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbonates and polychlorinated aromatic compounds in biochar. In: Biochar for environmental management: science and technology. (Eds. Lehmann J. & Joseph S.), Routledge, New York, 595-624.

- Buchgraber K. & Schaffer R., 1995. Umbruchlose Grünlanderneuerung für Wiesen und Weiden. *Fortschrittli. Landwirt* (8), SB1-SB6.
- Bundesamt für Energie BFE, 2015. KEV, gemäss der Energieverordnung, SR 730.01, Stand 01.06.2015.
- Bundesamt für Energie BFE, 2014. Einmalvergütungen für kleine Photovoltaik-Anlagen – Version 2.0 vom 7. März 2014.
- Bundesamt für Energie BFE, 2015. Energieverordnung (EnV), SR 730.01. Stand am 1. Juni 2015.
- Bundesamt für Konjunkturfragen BfK, 1995. Solare Wassererwärmung. Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2011. Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. 46.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2012. Agrarbericht 2012. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, 246.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW & Konferenz der Landwirtschaftsämtler der Schweiz KOLAS, 2013a. Rascher Harnabfluss von Laufflächen in der Rindviehhaltung. Empfehlungen der KOLAS und des BLW zur Finanzierung einzelbetrieblicher Massnahmen im Rahmen von Ammoniak-Ressourcenprojekten.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2013. Weisungen und Erläuterungen 2013 zur Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV, SR 910.13). Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2014a. SR 910.13 – Weisungen nach Artikel 59 und Anhang 4 der Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV) - Extensiv genutzte Wiesen, wenig intensiv genutzte Wiesen und Streueflächen der Qualitätsstufe II. Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2014b. Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft. Weisungen und Erläuterungen 2014. Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2015. Überblick: Direktzahlungen an Schweizer Ganzjahresbetriebe. Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW & Konferenz der Landwirtschaftsämtler der Schweiz KOLAS, 2013b. Mehrphasenfütterung in Kombination mit stickstoffreduziertem Futter bei Schweinen. Empfehlungen der KOLAS und des BLW zur Finanzierung einzelbetrieblicher Massnahmen im Rahmen von Ammoniak-Ressourcenprojekten.
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV, 2014: Tierschutz-Kontrollhandbuch - Technische Weisungen über den baulichen und qualitativen Tierschutz, Legehennen, Junghennen und Elterntiere.
- Bundesamt für Statistik BFS, 2014. Heizöl – Jahresdurchschnittspreise in Franken pro 100 l, <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/05/02/blank/key/durchschnittspreise.html>.
- Bundesamt für Veterinärwesen BVET, 2010. Tierschutz-Kontrollhandbuch - Mastgeflügel, Version 2.1. BVET, Bern.
- Crane-Droesch A., Abiven S., Jeffery S. & Torn M. S., 2013. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environmental Research Letters* **8** (4), 44049-44056.
- Dabbert S. & Braun J., 2006. Landwirtschaftliche Betriebslehre. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 288.
- Dalgaard T., Olesen J. E., Petersen S. O., Petersen B. M., Jørgensen U., Kristensen T., Hutchings N. J., Gyldenkerne S. & Hermansen J. E., 2011. Developments in greenhouse gas emissions and net energy use in Danish agriculture—How to achieve substantial CO₂ reductions? *Environmental pollution* **159** (11), 3193-3203.
- Dauriat A., Gaillard G., Alig M., Scharfy D., Membrez Y., Bachmann N., Steiner R., Charles R., Maltas A. & Sinaj S., 2011. Analyse de cycle de vie de la production centralisée et décentralisée de biogaz en exploitations agricoles. Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, Suisse.
- De Boer I., Cederberg C., Eady S., Gollnow S., Kristensen T., Macleod M., Meul M., Nemecek T., Phong L. & Thoma G., 2011. Greenhouse gas mitigation in animal production: towards an integrated life cycle sustainability assessment. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **3** (5), 423-431.
- Deutscher Wetterdienst, 2015. Solarenergie - die Stärken der Sonne nutzen. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_gutachten&T15805338371147076754824gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FAllgemeines__node.html%3F__nnn%3Dtrue.
- Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F. & Cohan J.-P., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **188**, 134-146.
- Dorfner G. & Sprengel D., 2008. Deckungsbeitrag für die Lebensleistung. *Fleckvieh* **1** (2008), 50-51.
- ecoinvent Centre, 2010. ecoinvent Data - The Life Cycle Inventory Data V2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Eidgenössische Elektrizitätskommission EICom, 2010-2014. Rohdaten Tariferhebung EICom (der Jahre 2011-2015).
- Eidgenössische Elektrizitätskommission EICom, 2015. Wie gross ist Ihr Stromverbrauch? Verbrauchskategorien. <http://www.strompreis.elcom.admin.ch/ShowCat.aspx?placeNumber=121&OpID=595&Period=2015>

- Ettle T., Obermaier A., Aichner V., Spiekers H. & Windisch W., 2013. Untersuchungen zum Austausch von Soja- durch Rapsextraktionsschrot beim Milchvieh. *Forum angewandte Forschung* **09./10.04.2012**.
- FAO 2013: Climate smart agriculture sourcebook, FAO, Rome.
- FAO, 2015. FAOSTAT. <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- Feiffer A., 2014. Effizienzstreben in der Landwirtschaft. Unwägbarkeiten der Witterung ausbalancieren. *Bauernblatt* (11. Oktober 2014), 29-31.
- Felber R., Leifeld J., Horák J. & Neftel A., 2014. Nitrous oxide emission reduction with greenwaste biochar: comparison of laboratory and field experiments. *European journal of soil science* **65** (1), 128-138.
- Flachowsky G. & Brade W., 2007. Potenziale zur Reduzierung der Methan-Emissionen bei Wiederkäuern. *Züchtungskunde* **79** (6), 417-465.
- Flachowsky G. & Lebzien P., 2009. Comments on in vitro studies with methane inhibitors. *Animal Feed Science and Technology* **151** (3), 337-339.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. GRUDAF 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* **16** (2), 1-100.
- Fritschi L., McLaughlin J., Sergi C., Calaf G., Le Curieux F., Forastiere F., Kromhout H. & Egeghy P., 2015. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. *Red* **114**, 2.
- 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.
- Gazzarin C., Zumbühl T. & Toggweiler P., 2008. Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben: lohnt sich eine Investition?, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. ART-Bericht 694, 12.
- Gazzarin C., 2014a. Maschinenkosten 2014. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Agroscope Transfer Nr. 37, Ettenhausen.
- Gazzarin C., 2015. Berechnungsprogramm TractoScope. www.maschinenkosten.ch.
- Goglio P., Grant B. B., Smith W. N., Desjardins R. L., Worth D. E., Zentner R. & Malhi S. S., 2014. Impact of management strategies on the global warming potential at the cropping system level. *Science of the Total Environment* **490**, 921-933.
- Guinée J. B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. & Weidema B. P., 2001. Life cycle assessment - An operational guide to the ISO standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Netherlands.
- Guyton K. Z., Loomis D., Grosse Y., El Ghissassi F., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Scocciati C., Mattock H., Straif K. & International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group I. L. F., 2015. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. *The Lancet. Oncology* **16** (5), 490-491.
- Haber N., Kluge R., Wagner W., Mokry M., Dederer M. & Messner J., 2008. Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg, Augustenberg.
- Halter H.-M., 2014. Die Sonderstellung von Soja. *UFA-Revue* 3, 64-65.
- Hartmann A. A. & Niklaus P. A., 2012. Effects of simulated drought and nitrogen fertilizer on plant productivity and nitrous oxide (N₂O) emissions of two pastures. *Plant and soil* **361** (1-2), 411-426.
- Häseli A., Weibel F., Brunner H. & Müller W. 2000: Biologischer Obstbau auf Hochstämmen. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Frick, 20.
- Schweizer Vogelschutz SVS – Birdlife Schweiz. www.birdlife.ch
- Hauschild M. Z. & Potting J., 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. The Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Environmental News No. 80, Copenhagen, 195.
- Hayer F., Bockstaller C., Gaillard G., Mamy L., Nemecek T. & Strassemer J., 2010. Multi-criteria comparison of eco-toxicity models focused on pesticides. In: 7th Int. Conf. on LCA in the Agri-Food Sector (Ed. Notarnicola B.), Bari, Italy, 305-310.
- Henzen C., Angele H.-C., Maerki A., Meyer A., Meayer R., Steiner R. & Hersener J.-L., 2012. Ressourcen- und Klimaeffizienz in der Landwirtschaft: Potenzialanalyse. AgroCleanTech, Brugg.
- Hermle S., Anken T., Leifeld J. & Weisskopf P., 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research* **98** (1), 94-105.
- Hersener J.-L., Baumgartner D. U., Dux D., Aeschbacher U., 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). Schlussbericht. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich und Ettenhausen, 148.
- Hever A., 2015. Mehr Milch dank langlebigen Kühen. *Die Grüne* **12**, 18-21.
- Hischier R., Weidema B., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. & Nemecek T., 2010. Implementation

- of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hofer P. A., Jürg; Schoop, Andreas; Hässig, Jörg; Rüegg, Regula; Kaufmann, Edgar; Frutig, Fritz; Ulmer, Ulrich; Rosset, Christian; Camin, Paolo, 2011. Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald. Auswertung von Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Umwelt-Wissen 1116, Bern, 80.
- Hoop D. & Schmid D., 2013. Grundlagenbericht 2012 – Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon, 270.
- Hoop D. & Schmid D., 2014. Grundlagenbericht 2013 – Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, Tänikon, 270.
- Huguenin-Elie O., Stutz C., Lüscher A. & Gago R., 2006. Wiesenverbesserung durch Übersaat. *Agrarforschung* **13** (10), 424-429.
- Hüppi R., Felber R., Neffel A., Six J. & Leifeld J., 2015. Biochar's effect on soil nitrous oxide emissions from a maize field with lime-adjusted pH treatment. *SOIL Discuss.* **2** (2), 793-823.
- International Energy Agency 2014: World Energy Outlook 2014 Factsheet. How will global energy markets evolve to 2040? IEA, Paris.
- IP-Suisse, 2014. Anmeldung IP-Suisse Getreideanbau für die Ernte 2015. <http://www.ipsuisse.ch/CMS/ModanFileHandler.axd?DateiGUID=9be1aa7b-2df1-4ab7-a053-734e396539b1>.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. IGES, Kanagawa, Japan.
- IPCC, 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and (eds.) H. L. M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- ISO, 2006a. ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- ISO, 2006b. ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- Jaffé R., Ding Y., Niggemann J., Vähätalo A. V., Stubbins A., Spencer R. G., Campbell J. & Dittmar T., 2013. Global charcoal mobilization from soils via dissolution and riverine transport to the oceans. *Science* **340** (6130), 345-347.
- Johnson J. M.-F., Franzluebbers A. J., Weyers S. L. & Reicosky D. C., 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental pollution* **150** (1), 107-124.
- Jordan D. C. & Kurtz S. R., 2013. Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **2013** (21), 12 - 29.
- Kaesler A., Palma J., Sereke F. & Herzog F., 2010a. Umweltleistungen von Agroforstwirtschaft. *Die Bedeutung von Bäumen in der Landwirtschaft für Gewässer- und Bodenschutz, Klima, Biodiversität und Landschaftsbild. ART-Bericht* **736**, 1-12.
- Kaesler A., Sereke F., Dux D. & Herzog F., 2010b. Moderne Agroforstwirtschaft in der Schweiz - Innovative Baumgärten: Produktivität und Wirtschaftlichkeit. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, ART-Bericht 725, Ettenhausen, 12.
- Kaesler A., Sereke F., Dux D. & Herzog F., 2011. Agroforstwirtschaft in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* **2** (3), 128-133.
- Keller M. & Zbinden R., 2004. Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980-2030. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, Bern.
- Khaledian M., Mailhol J. & Ruelle P., 2012. The impacts of direct seeding into mulch on the CO2 mitigation. *Agronomy research* **10** (1-2), 303-310.
- Kirchgessner M., 2004. Tierernährung. **11**, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.
- KLIK. Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation. www.klik.ch
- Kluth H., Engelhard T. & Rodehutsord M., 2005. Zum Ersatz von Sojaextraktionsschrot durch Rapsextraktionsschrot in der Fütterung der Hochleistungskuh. *Züchtungskunde* **77** (1), 58-70.
- Koch P. & Salou T., 2013. AGRIBALYSE: Rapport méthodologique - Version 1.0. ADEME, 401.
- Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz KOLAS & Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 2012. Abdeckung bestehender offener Güllelager – Empfehlungen der KOLAS und des BLW zur Finanzierung einzelbetrieblicher Massnahmen im Rahmen von Ammoniak-Ressourcenprojekten, 10.
- Kupper T., Bonjour C., Achermann B., Zaucker F., Rihm B., Nyfeler-Brunner A., Leuenberger C. & Menzi H., 2010. Ammoniakemissionen in der Schweiz: Neuberechnung 1990-2007 - Prognose bis 2020. Bonjour Engineering GmbH, METEOTEST, Oetiker+Partner AG, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL), 79.
- Kupper T. & Menzi H., 2013. Technische Parameter Modell Agrammon - Tierkategorien, Stickstoffausscheidungen der Tiere, Emissionsraten, Korrekturfaktoren. Berner Fachhochschule Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).

- Latsch A. & Anken T., 2015. Landwirtschaftlicher Energieverbrauch in der Schweiz.
- Lehmann J., 2007. A handful of carbon. *Nature* **447** (7141), 143-144.
- Lehmann J. & Joseph S., 2012. Biochar for environmental management: science and technology. Routledge.
- Lichti F. & Wendland M., 2013. Biogasgärreste: Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Lundgren B. O. & Raintree J. B., 1982. Sustained agroforestry. In: Agricultural Research for Development: Potentials and Challenges in Asia. (Ed. Nestel B.), ISNAR,, Hague, The Netherlands, 37-49.
- Luo Z., Wang E. & Sun O. J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, ecosystems & environment* **139** (1), 224-231.
- Mathez S. A., 2012: Modul Solartechnik: Thermische Solartechnik, Teil 2, ZHAW, Wädenswil.
- Mayer J., Buegger F., Jensen E. S., Schloter M. & Heß J., 2003. Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant and Soil* **255** (2), 541-554.
- Meier B., 2000. Neue Methodik für die Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten an der FAT. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon.
- Merbold L., Eugster W., Stieger J., Zahniser M., Nelson D. & Buchmann N., 2014. Greenhouse gas budget (CO₂, CH₄ and N₂O) of intensively managed grassland following restoration. *Global change biology* **20** (6), 1913-1928.
- Mieleitner J., Baumgartner D. U. & Gaillard G., 2011. Qualitative Evaluation von Massnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen von Landwirtschaftsbetrieben. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich, 43.
- Möhring A., Ammann H. & Boéchat S., 2006. Überbetrieblicher Maschineneinsatz in der Landwirtschaft – Welche Formen bieten sich an? Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, ART-Berichte 666, Ettenhausen.
- Montagnini F. & Nair P., 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry systems* **61** (1-3), 281-295.
- Mori A. & Hojito M., 2012. Effect of combined application of manure and fertilizer on N₂O fluxes from a grassland soil in Nasu, Japan. *Agriculture, ecosystems & environment* **160**, 40-50.
- Mouron P., 2010. Methodology for Evaluating Environmental and Economic Sustainability of Crop Protection Systems. ENDURE Network, ENDURE - Integrated Pest Management in Europe, 49-51.
- Mouron P. & Schmid D., 2011. Grundlagenbericht 2011. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, 26.
- Müller M., Schafflützel R., Chervet A., Sturny W. G., Zihlmann U. & Weisskopf P., 2007. Humusgehalte nach 11 Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **14** (9) 394-399.
- Neiber J. & Schmid W., 2012. Sonnenstrom optimal selbst nutzen. *dlz Agrarmagazin Oktober 2012*, 110-115.
- Neiber J., 2013. Melken und Kühlen mit Sonnenstrom. *dlz Agrarmagazin August 2013*, 114-117.
- Neiber J. 2014. Projekt: Verbesserung der Energieeffizienz der Landwirtschaft in Bayern. Möglichkeiten und Grenzen der Eigenstromnutzung (PV) in der Milchhaltung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising.
- Nemecek T., Huguenin-Elie O., Dubois D. & Gaillard G., 2005. Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau. Agroscope FAL Reckenholz, Schriftenreihe der FAL 58, Zürich, 155.
- 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. & Gaillard G., 2010. Challenges in assessing the environmental impacts of crop production and horticulture. *Environmental Assessment and Management in the Food Industry: Life Cycle Assessment and Related Approaches* (194), 98-116.
- Nemecek T., Schnetzer J. & Reinhard J., 2014. Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment* DOI **10.1007/s11367-014-0712-7**, 18.
- Neser S., Neiber J. & Bonkoss K., 2012. Stromverbrauch und Energieeffizienz im landwirtschaftlichen Betrieb. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, Energiewende und Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan, 23-35.
- Neser S. & Neiber J., 2013. Effizienter Energieeinsatz im Schweine haltenden Betrieb. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, Schweinehaltung vor neuen Herausforderungen, Freising-Weihenstephan, 17-27.
- Nowak S. & Biel T., 2012. Photovoltaik (PV) Anlagekosten 2012 in der Schweiz - Überprüfung der Tarife der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) für PV-Anlagen. *BFE Schlussbericht 19. April 2012*.

- Nyfelner D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E., Connolly J. & Lüscher A., 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology* **46** (3), 683-691.
- Nyfelner D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E. & Lüscher A., 2011. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **140** (1), 155-163.
- Ochsner S., Rühls M. & Schäfer A., 2011. Kosten ausgewählter Maßnahmen des Nährstoffrückhalts in der Landschaft – Anhang 3 zum DBU-Projekt AZ 26637-34: Entwicklung von Strategien zur Minderung des Nährstoffaustrags dräniertes landwirtschaftlich genutzter Flächen. Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumender Erde (DUENE) e. V., Greifswald, 43.
- Osterburg B., Rüter S., Freibauer A., de Witte T., Elsasser P., Kätsch S., Leischner B., Paulsen H. M., Rock J. & Röder N., 2013. Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. (11), Thünen Report 11. Braunschweig, Johan Heinrich von Thünen-Institut, 146.
- Pachloski A., Gericke D. & Kage H., 2007. NH₃-Verluste nach Ausbringung von Gärresten aus Biogasanlagen. *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* **110**, 381-382.
- Palma J. H. N., Graves A. R., Bunce R., Burgess P. J., De Filippi R., Keesman K., van Keulen H., Liagre F., Mayus M. & Moreno G., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, ecosystems & environment* **119** (3), 320-334.
- Palma J. H. N., Paulo J. A. & Tomé M., 2014. Carbon sequestration of modern *Quercus suber* L. silvoarable agroforestry systems in Portugal: a YieldSAFE-based estimation. *Agroforestry Systems* **88** (5), 791-801.
- Pehnt M., Seebach D., Irrek W. & Seifried D., 2008. Umweltnutzen von Ökostrom. Vorschlag zur Berücksichtigung in Klimaschutzkonzepten. Diskussionspapier, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Öko-Institut e.V., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Büro Ö-Quadrat, 13.
- Pelz S., Wagelaar R., Kay S., Bauer S. & Held M., 2007. Operationale Biomassepotenziale im Landkreis Göppingen. Rottenburg am Neckar, 80.
- Powlson D. & Jenkinson D., 1981. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *The Journal of Agricultural Science* **97** (03), 713-721.
- Preisüberwachung (PUE), 1998. Der Schweizerische Trinkwassermarkt: Kosten und Preise - Hauptergebnisse einer Umfrage der Preisüberwachung. 2. Version 18.11.2014.
- Preisüberwachung (PUE), 2006. Gebührenvergleich für Wasser, Abwasser und Abfall für die 30 grössten Städte der Schweiz. 18.11.2014.
- Preisüberwachung (PUE), 2011. Vergleich der Wasser-, Abwasser- und Abfallgebühren in den 50 grössten Städten der Schweiz. PUE, Bern.
- ProForest, 2004. Basler Kriterien für verantwortungsvolle Soja-Produktion. Vers. 2005-02-16, Basel.
- Raaflaub M., Menzi H. & Durgai B., 2012. Wirtschaftliche Tragbarkeit baulicher Massnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen. Schweizerischer Bauernverband (SBV), Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften (HAFL).
- Raaflaub M., Bänninger A. & Künzler R., 2015. Importierte Eiweissträger: Die Alternativen zum Sojaschrot und ihre Nachhaltigkeit. Potentielle ökologische und soziale Schwachstellen und Risiken bei Produktion und Handel von importierten pflanzlichen Proteinträgern. AGRIDEA, Lindau.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S. & Charles R., 2010. Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen. *Agrarforschung Schweiz* **1** (11-12), 410-415.
- Rinaldi M., Erzinger S. & Stark R., 2005. Treibstoffverbrauch und Emissionen von Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten. Ausführliche Darstellung der Methoden, Messungen und Ergebnisse. Agroscope, Tänikon.
- Römer A., 2011. Untersuchungen zur Nutzungsdauer bei Deutschen Holstein Kühen. *Züchtungskunde* **83** (1), 8-20.
- Rossier D. & Gaillard G., 2004. Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs - Methode und Anwendung in 50 Landwirtschaftsbetrieben. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), FAL-Schriftenreihe 53, Zürich, 142.
- Rumpel C., Leifeld J., Santin C. & Doerr S., 2015. Movement of biochar in the environment. In: Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. (Eds. Lehmann J. & Joseph S.), 283.
- Sauter J., Moriz C., Honegger S., Anken T. & Albisser G., 2010. Schleppschlauch- und Breitverteiler im Vergleich. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, ART-Bericht 739, Ettenhausen, 8.
- Sax M., Schick M., Bolli S., Soltermann-Pasca A. & Van Caenegem L., 2013. Methanverluste bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, 1-93.
- Schäffeler U. & Keller M., 2008. Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Bundesamt für Umwelt.
- Schmid B., 2015. Dachausrichtung: zweitrangig. *die grüne* **151** (15), 20–23.

- Schrade S., Keck M., Zeyer K. & Emmenegger L., 2011. Ammoniak-Emissionen von Milchviehlaufställen mit Laufhof: Im Winter weniger Verluste. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, ART-Bericht 745, Zürich, 12.
- Schweizer Bauernverband, 2013. Brennholz – Preisempfehlung für den Direktverkauf. Schweizer Bauernverband, <http://www.sbv-usp.ch/preise/direktverkauf/brennholz/>.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F. & Rice C., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363** (1492), 789-813.
- soja netzwerk Schweiz, 2011. Bald nur noch verantwortungsvoll produzierte Soja in der Schweiz. Medienmitteilung. soja netzwerk Schweiz, Basel.
- soja netzwerk Schweiz, 2013. Soja Netzwerk auf Kurs. Medienmitteilung. soja netzwerk schweiz, Basel.
- soja netzwerk Schweiz, 2015. Importanteil nachhaltige Soja steigt 2014 auf 82 Prozent. . Medienmitteilung. soja netzwerk Schweiz, Basel.
- Solar Campus GmbH, 2014. Solar-Toolbox: Solarertrag berechnen mit der Online Solarsimulation, www.solartoolbox.ch.
- Solarinitiative München, 2014. FAQ - Fragen und Antworten: Eigenverbrauch. <http://www.solarinitiative-muenchen.de/info/faq-fragen-antworten/eigenverbrauch/>.
- Stark R., Stehle T. & Schick M., 2014. ART-AV Arbeitsvoranschlag & Modellkalkulation. Software von Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. <http://www.lbl.ch/index.php?id=187&L=0>.
- Stutz C., Lüscher A. & Waser K., 2010. AGFF Merkblatt 5: Wiesenverbesserung im mittelintensiven und intensiven Futterbau. AGFF, Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaus, Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich.
- Suter D. & Weisskopf P., 2008. AGFF, Merkblatt 16: Kunstwiese in der Fruchtfolge. AGFF, Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaus, Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich.
- Suter D., Lehmann J. & Rosenberg E., 2012. AGFF Merkblatt 9: Die Methode "Immergrün". AGFF, Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaus, Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Zürich.
- Suter M., Connolly J., Finn J. A., Loges R., Kirwan L., Sebastià M. T. & Lüscher A., 2015. Nitrogen yield advantage from grass-legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. *Global change biology* **21** (6), 2424-2438.
- Swierstra D., Smits M. C. J. & Kroodsma W., 1995. Ammonia Emission from Cubicle Houses for Cattle with Slatted and Solid Floors. *Journal of Agricultural Engineering Research* **62**, 127-132.
- Swissolar, 2014. KEV-Vergütungsansätze gültig für neue Bescheide, http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar_neu/1._Unsere_Themen/1.02_KEV/KEV-Tarife_de.pdf.
- Thees O., Lemm R., Erni M. & Ballmer I., 2014: Potenziale, Chancen und Risiken der Energieholznutzung. Zur Rolle des Holzes im Schweizer Energiesystem. Forum für Wissen. WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 13.
- Van Caenegem L., Dux D. & Steiner B., 2005. Abdeckungen für Güllensilos: technische und finanzielle Hinweise. *FAT-Bericht 631*, FAT Tänikon, 16.
- Van Caenegem L., 2010. Energiebedarf bei Heizung und Lüftung mehr als halbieren: Energiesparen im Stall ist nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll. *ART-Bericht 735*, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8.
- Vellinga T. V., Van den Pol-van Dasselaar A. & Kuikman P., 2004. The impact of grassland ploughing on CO₂ and N₂O emissions in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **70** (1), 33-45.
- Vögeli G. A., Gazzarin C. & Gärtner D., 2009. Maschinenkosten in der Praxis: Auslastung, Nutzungsdauer und reparaturkosten ausgewählter Landmaschinen auf Schweizer Betrieben. *ART-Bericht 711*, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 12.
- Wiedemar M. & Felder D., 2011. Klimastrategie Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz* **2** (6), 280-283.
- Wiefferink, 2014. Silocover - Nachhaltige Siloabdeckung. Wiefferink B.V., Prospekt, Oldenzaal.
- Woolf D., Amonette J. E., Street-Perrott F. A., Lehmann J. & Joseph S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications* **1**, 56.
- World Wide Fund for Nature (WWF), 2012. Alternativen zu importierter Soja in der Milchviehfütterung. WWF Deutschland, Berlin.
- Zah R., Böni H., Gauch M., Hischer R., Lehmann M. & Wäger P., 2007. Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa, St.Gallen.

10 Anhang

10.1 Mitglieder des begleitenden Beirates

Daniel Felder, BLW

Daniela Hoffmann, WWF

Daniel Imhof, Nestlé

Lukas Jenni, Vogelwarte

Barbara Oppliger, Konsumentenforum Schweiz

Eva Reinhard, BLW

Rainer Rufer, Mc Donald's Schweiz

Christian Schürch, IP-SUISSE

10.2 Vorauswahl der Massnahmen mit Benotungsschema

Themen- gruppe	Massnahmen	Kategorie	Betriebszweig					Reduktions- potential 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Unsicherheit 0 = sehr hoch; 5 = sehr niedrig	technische Umsetzbarkeit 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Total (max. 125 Punkte)
			Ackerbau	Futterbau	Rinder-haltung	Schweine-haltung	unabhängig				
Energie										22	
1	Bezug von Ökostrom	Energie					X	1	5	5	25
2	Verminderung des Treibstoffbedarfs	Maschine					X	1	5	5	25
3	Optimale Maschinen-auslastung	Maschine					X	1	5	5	25
4	Installation von Sonnenkollektoren	Energie					X	1	5	4	20
5	Installation von Photovoltaik	Energie					X	1	5	4	20
6	Waldbewirtschaftung zur Erzeugung erneuerbarer Energien	Holz					X	1	5	4	20
7	Wärmerück-gewinnung in beheizten Ställen	Energie					X	1	5	4	20
8	Wärmepumpen	Energie					X	1	5	4	20
9	Bioenergie (Biogas)	Energie					X	(3)	(5)	(1)	(15)
Tierhaltung										23	
10	Erhöhung der Anzahl Laktationen von Milchkühen	Tier			X			4	3	5	60
11	Milchproduktion mit zertifiziertem / ohne Soja	Tier			X	X		4	5	3	60
12	Abdeckung des Güllesilos	Stall			X	X		2	3	5	30
13	Stallmanagement: Saubere Laufflächen	Stall			X			2	3	5	30

Themen- gruppe	Massnahmen	Kategorie	Betriebszweig					Reduktions- potential 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Unsicherheit 0 = sehr hoch; 5 = sehr niedrig	technische Umsetzbarkeit 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Total (max. 125 Punkte)
			Ackerbau	Futterbau	Rinder-haltung	Schweine-haltung	unabhängig				
14	Phasenfütterung in der Schweinemast* ^B (N-reduziertes Futter)	Tier				X		3	3	3	27
15	Reduzierung von Festmist -Systemen (Stall)*	Stall			X			3	3	3	27
16	Geschlossene Mistlagerung*	Stall			X	X		3	3	3	27
17	kurze Hofdüngerlagerung *	Stall			X	X		3	3	2	18
18	Futteradditive (Fettzugabe)	Stall			X			5	3	1	15
19	Begrenzung der verschmutzbaren Fläche*	Stall			X			2	3	2	12
20	Saubere, trockene Bewegungs- und Liegeflächen	Stall			X			2	3	2	12
21	Gülleadditive	Stall			X	X		4	3	1	12
22	Kühlung Gülle	Stall			X	X		4	3	1	12
23	Höherer Weideanteil	Tier			X			2	2	3	12
24	Reduktion Kraftfutter	Tier			X			3	1	3	9
25	mehr Grassilage (red. Heubelüftung)	Tier			X			1	3	3	9
26	Eingrasen	Tier			X			1	2	4	8
Pflanzenbau/Futterbau											32
27	Parzellenspezifische Düngebilanz	Düngung	X					4	3	5	60
28	Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlands	Boden		X				4	3	4	48

Themen- gruppe	Massnahmen	Kategorie	Betriebszweig					Reduktions- potential 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Unsicherheit 0 = sehr hoch; 5 = sehr niedrig	technische Umsetzbarkeit 0 = nicht vorhanden; 5 = hoch	Total (max. 125 Punkte)
			Ackerbau	Futterbau	Rinder-haltung	Schweine-haltung	unabhängig				
29	Reduzierter Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern	Düngung	X	X				4	4	3	48
30	Gülleausbringung mit Schleppschlauch* ^B	Düngung	X	X				3	3	5	45
31	Ausbringung von Gärresten*	Düngung	X	X				3	3	4	36
32	Leguminosen als Gründüngung* ^B	Fruchtfolge	X	X				3	2	4	24
33	spezielle Fruchtfolge(n)	Fruchtfolge	X	X				3	3	3	27
34	Untersaat	Fruchtfolge	X					3	2	4	24
35	Direktsaat ^B	Boden	X					5	1	3	15
36	Reduzierte Kalkung	Düngung	X	X				3	1	5	15
37	Redu. Bodenbearbeitung	Boden	X					3	1	3	9
Sonstige											29
38	Etablierung eines Agroforstsystems	Boden					X	3	3	4	36
39	Ausbringung von Pflanzenkohle	Boden	X					4	3	3	36
40	Extensivierung von Mooren / anmoorigen Gebieten	Boden	X	X				5	4	3	60
41	Kompostierung*	Düngung					X	2	2	4	16
42	Transporte: Betriebseigenes Futter, einheimisches Futter und einheimische organische Dünger	Transporte					X	1	5	2	10

Themen- gruppe	Massnahmen	Kate- gorie	Betriebszweig					Reduktions- potential	Unsicherheit	technische Umsetzbarkeit	Total (max. 125 Punkte)
			Ackerbau	Futterbau	Rinder-haltung	Schweine-haltung	unabhängig				
Mittelwert										25,9	

Abbildung 49: Liste der zweiten Vorauswahl der Massnahmen mit Benotungsschema. **Anmerkungen:**

¹ Der Massnahmenaufwand, also ob einmalig oder wiederkehrend, ist von zentraler Bedeutung in der Umsetzung des Punktesystems. Wie wird z.B. eine einmalige Massnahme auf mehrere Folgejahre abgeschrieben.

*Erhöhung der N-Effizienz: Wird als übergeordnetes Ziel betrachtet. Die Produktion von mineralischem N-Dünger soll dadurch indirekt reduziert werden, als auch N-Überschüsse, die zur Eutrophierung von Gewässern führen und auch mit den Lachgas-Emissionen aus dem Boden in Verbindung stehen. ^B Bereits im "Punktesysteme Biodiversität"

^B Bereits im "Punktesysteme Biodiversität" von IP-Suisse vorhanden.

10.3 Ergänzende Informationen zu den analysierten Massnahmen

10.3.1 Optimale Auslastung der eigenen Maschinen / überbetriebliche Kooperation

Zur Berechnung der Massnahme „Optimale Auslastung der eigenen Maschinen / Überbetriebliche Nutzung“ musste zunächst der auf den Betrieben vorhandene Maschinenbestand mithilfe der Daten der Modellbetriebe laut den Zusammenstellungen der ZA-ÖB (Hersener *et al.* 2011) ermittelt werden. Dies war notwendig, da die verschiedenen Maschinentypen der Modellbetriebe lediglich in kg-Einheiten über die Nutzungsdauer alloziert angegeben waren. Mithilfe der vorhandenen Stückzahl je zu bewältigende Arbeitseinheit und den verfügbaren notwendigen Arbeitseinheiten je Ackerkultur, über welche Daten verfügbar waren, konnte die Maschinenanzahl ermittelt werden.

Wichtig dabei anzumerken ist, dass die Maschinenauslastung der Modellbetriebe im Vergleich zur gegenwärtigen Praxis als zu hoch eingeschätzt wird (Expertengespräch, Christian Gazzarin, Agroscope) und das, obwohl die aus dem ART-Maschinenkostenbericht übernommene Auslastung in den Modellbetrieben bereits um 25 % reduziert wurde. Aufgrund der Einschätzung, wurde in diesem Fall die Situation auf den Modellbetrieben als Massnahmenszenario angenommen. Das Referenzszenario war dann eine um 10 % reduzierte Maschinenauslastung.

Insgesamt waren die Maschinenbestände auf den Modellbetrieben unterschiedlich. So verfügte der Modellbetrieb Verkehrsmilch über die höchste Anzahl an Maschinen und Geräten (rund 19), während der Betrieb Andere Rinder die geringste Anzahl aufwies (rund 11). Die unter der Kategorie „landwirtschaftliche Geräte“ zusammengefassten Maschinen und Geräte waren auf allen Modellbetrieben am stärksten vertreten. Die zweite grosse Position machten die Traktoren aus; beim Betrieb Ackerbau waren hingegen mehr Geräte zur Bodenbearbeitung vorhanden.

Um den mittleren jährlichen Einsparungen, die bei der Umsetzung der Massnahme erwirkt werden können zu berechnen, wurde die Differenz aus neuem und altem Maschinenbestand (Stück/ Arbeitseinheit) berechnet und mit den fixen Kosten je Arbeitseinheit sowie den jeweiligen Arbeitseinheiten multipliziert.

Bezüglich des Risikos entstehen bei der überbetrieblichen Nutzung von Maschinen unterschiedliche Vor- und Nachteile, die zudem noch davon abhängig sind, inwiefern sich der Landwirt im Rahmen der überbetrieblichen Nutzung organisiert. Grundsätzlich sind verschiedene Organisationsformen möglich: die Zahlung einer Entschädigung im Rahmen eines Mietvertrages, die Organisation über Nachbarschaftshilfe, die Beauftragung eines Lohnunternehmers, die Organisation über eine lokale Maschinenvermittlung, die Vermittlung über einen Maschinenring, der Zusammenschluss zu einer lokalen Gruppe oder die Bildung einer Maschinen-gemeinschaft bzw. einer Maschinengenossenschaft. Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten der überbetrieblichen Maschinennutzung wird kein Ansatz für Arbeitszeit vorgenommen.

Während beim Gebrauch mit eigenen Maschinen die Maschinen stets verfügbar sind, können termingerechte Erledigungen leicht und ohne vorherige Absprachen durchgeführt werden. Die Transaktionskosten sind in diesem Fall entsprechend geringer. Das Risiko unsachgemässer Handhabung besteht bei der Nutzung durch nur eine Person kaum und individuelle Ansprüche an Pflege und Wartung der Maschinen können erfüllt werden. Für den überbetrieblichen Einsatz der Maschinen hingegen sprechen die geringeren Anschaffungskosten, die der einzelne tragen muss sowie die sinkenden durchschnittlichen Maschinenkosten je Arbeitseinheit, die durch die zunehmende Auslastung erzielt werden können. Durch die höhere Auslastung kommt es zudem zum frühzeitigeren Ersatz durch den Kauf neuer Maschinen, was einer besseren Ausnutzung des technischen Fortschritts ermöglicht (Möhring *et al.* 2006).

Sicherlich sind nicht alle Maschinentypen zum gemeinsamen Gebrauch geeignet. So sollte bei Maschinentypen, die zur Ausübung einer wetterabhängigen Tätigkeit eingesetzt werden, wie zum Beispiel bei der Heuernte, nicht nur die Effizienz beim Kauf im Vordergrund stehen, sondern auch die Sicherheit und die geringen Wartekosten: Die entstehenden Maschinenkosten müssen hier genau gegenüber zu wenig Kapazität und daraus möglicherweise hoher Prozesskosten abgewogen werden (Feiffer 2014).

10.3.2 Photovoltaik

Bei dieser Massnahme wurde die Wirtschaftlichkeit der Erstellung einer PV-Anlage mit 20-jähriger Laufzeit und der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV, gemäss der Energieverordnung, SR 730.01, Stand 1.6.2015) ab dem fünften Jahr berechnet. Die Anschaffungskosten der Anlagen werden vom Bundesamt für

Energie (BFE) und Swissolar jeweils per Kilowattpeak (kWp) angegeben. Bei Anlagen zwischen 10 und 30 kWp wurde mit Fr. 2'550.– Anschaffungskosten pro kWp kalkuliert (Swissolar 2014). Grundsätzlich ist auch die Netzanbindung (Netzanschluss und Netzverstärkung auf Seiten des Produzenten) in den Anschaffungskosten enthalten, die aufgrund der teils abgelegenen Orte landwirtschaftlicher Betriebe relativ hoch ausfallen können (Netzverstärkung). Für die Berechnung der Kosten wurden entsprechend Angaben zum kWp der Anlagen benötigt, welche sich vom Ertrag der Anlage ableiten lassen (bei angenommenen 950 kWh/a pro kWp (Berger 2014; Nowak und Biel 2012:12)). Zudem wurden Unterhaltskosten in Höhe von 0,6 % der Investitionssumme pro Jahr angenommen. Dies ist ein vergleichsweise hoher Wert (Jordan und Kurtz 2013:18). Die Tilgung des Kredites zur Finanzierung der Anlage erfolgte über einen Zeitraum von 15 Jahren. Falls der individuelle Kaufpreis von Strom grösser ist als dessen Gestehungskosten, kann es für den Betrieb im Falle einer Wartezeit auf die KEV oder bei einer Nutzungsdauer über 20 Jahre vorteilhaft sein, den erzeugten Strom selbst zu verbrauchen. Um den möglichen Eigenverbrauch der Modellbetriebe berücksichtigen zu können, wurde die Stromerzeugung dem Stromverbrauch Zeitverlauf gegenübergestellt. Der PV-Ertrag liess sich anhand von Messdaten anteilig für jeden Monat berechnen. Dazu wurde die durchschnittliche Globalstrahlung pro Tag (kWh/m², Tag) (20-jährige Durchschnittswerte; Basisjahre: 1981 bis 2000) durch Multiplikation mit der Anzahl Tage auf Monatsmittelwerte umgerechnet (Deutscher Wetterdienst 2015). Im Sommer ist der Ertrag am höchsten, im Winter am kleinsten, wobei mit einem Halbjahresmittelwert gerechnet wird.

Zur Ermittlung der Lastgänge (zeitlicher Verlauf der bezogenen elektrischen Leistung) der betrachteten Modellbetriebe wurde der Verbrauch, der in absoluten Zahlen vorliegt, im Tagesverlauf prozentual pro Stunde berechnet, da die Verteilung über den Tag hinweg die entscheidende Grösse ist. Dazu wurde der Verbrauch der Modellbetriebe entsprechend der prozentualen Angaben aus den Daten von Neiber (2014) und Nesper und Neiber (2013) auf den Tagesverlauf verteilt (Bedarf in kWh je Zeiteinheit).

Der Jahresstromverbrauch auf dem Ackerbetrieb war relativ gering (3'638 kWh/a). Insgesamt konnte davon ausgegangen werden, dass der Stromverbrauch über das Jahr hinweg bei diesem Betriebstyp gleichbleibend ist und tendenziell eher tagsüber Strom verbraucht wird, weshalb der Eigenverbrauchsanteil des Ackerbaubetriebs mit Angaben zu gängigen Eigenverbrauchsanteilen in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung geschätzt wurde (Solarinitiative München 2014). Bei einem durchschnittlichen Stromertrag von 17'328 kWh/a und einem Verbrauch von rund 3'638 kWh/a, ergab sich ein Verhältnis vom PV-Ertrag zum Stromverbrauch von 476 %. Bei diesem Verhältnis kann man einen Eigenverbrauchsanteil von etwa 12 % erreichen (Solarinitiative München 2014). Der Betriebstyp Verkehrsmilch hat im Sommer und Winter annähernd den gleichen Stromverbrauch. Im Sommer bezieht er v.a. Strom für die Kühlung der Milch, im Winter für die Warmwasseraufbereitung (Neiber 2013, 2014). Das typische Lastprofil des Milchviehbetriebes wird durch zwei Spitzen gekennzeichnet: Dem Melken und Herunterkühlen der Milch; diese Spitzen liegen vor bzw. nach der Spitze der Sonneneinstrahlung bzw. der Stromerzeugung. Um den Eigenverbrauchsanteil zu ermitteln, wurde zuerst anhand des Tageslastganges eines Milchviehbetriebes mit 55 Milchkühen und Fischgerät-Melkstand der Tageslastgang des Modellbetriebs abgeschätzt. Auch die Ertragskurve der PV-Anlage für Sommer und Winter wurde auf den entsprechenden kWp umgelegt. Für den Modellbetrieb Verkehrsmilch wurde damit ein Eigenverbrauchsanteil in Höhe von etwa 15 % erreicht (Solarinitiative München 2014). Beim Modellbetrieb Andere Rinder war der Energieaufwand geringer. Dies liegt daran, dass der Energieaufwand für andere Rinder als bedeutend niedriger angenommen werden kann, da die Milchkühlung und das Melken wegfallen. Genaue Daten zum Tageslastgang sind allerdings nicht zugänglich, wobei die Arbeiten des Betriebs eher tagsüber anfallen. Bei einem Stromertrag von 19'311 kWh/a und einem Bedarf von 6'835 kWh/a wurde ein Verhältnis PV-Ertrag / Stromverbrauch von etwa 283 % erreicht- damit liess sich ein Eigenverbrauchsanteil von etwa 18 % ableiten (Solarinitiative München 2014). Beim Schweinemastbetrieb muss im Sommer viel elektrische Energie für die Stallklimatisierung (Lüftung) aufgewendet werden. Entsprechend ist im Sommer tagsüber der Stromverbrauch am höchsten. Dieser Betriebstyp hat den höchsten Eigenverbrauch (Neiber und Schmid 2012:111; Nesper *et al.* 2012:33). Um eine Abschätzung des Eigenverbrauchsanteils vorzunehmen, wurde auf vorliegende Daten eines Schweinemastbetriebs zum Tageslastgang zurückgegriffen (Nesper und Neiber 2013:23). Auf diese Weise wurde ein Eigenverbrauchsanteil von fast 75 % abgeschätzt. Dies ist ein sehr hoher Anteil, den es nach unten zu korrigieren galt. Nach Rücksprache und Abgleichen mit unveröffentlichten Daten von Josef Neiber (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, LfL) zu

vergleichbaren Betrieben (ähnliches Verhältnis PV-Ertrag/Strombedarf), wurde ein Eigenverbrauchsanteil von 60 % angenommen.

Die Kalkulation basierte auf der Energieverordnung des Jahres 2015 (BFE, 2015, Stand 1.6.2015). Jüngst wurde die KEV deutlich gesenkt (von Rp. 26,4 auf Rp. 20,4 für Anlagen kleiner 30 kWp bzw. von Rp. 22,0 auf Rp. 17,7 für Anlagen zwischen 30 und 100 kWp); auch die Einmalvergütung wurde angepasst.

Der Strompreis der Betriebe unterscheidet sich nach Verbraucherkategorien. Laut der Eidgenössischen Elektrizitätskommission (EiCom) gibt es für landwirtschaftliche Betriebe keine speziellen Kategorien. Die Betriebe werden entsprechend ihrem Verbrauch eingeordnet (pers. Mitteilung, Baumann, EiCom, 2014). Mit 3'638 kWh/a Verbrauch befindet sich der Betrieb Ackerbau in der Kategorie „H2“ (Eidgenössische Elektrizitätskommission (EiCom) 2015). Anhand der „Rohdaten Tarifierhebung EiCom 2015“ (Eidgenössische Elektrizitätskommission (EiCom) 2014) wurde der Schweizer Durchschnitt des Strompreises für die Kategorie „H2“ ausgerechnet. Dieser beträgt 21,42 Rp./kWh. Allerdings fallen für Betrieb und Wohnhaus keine separaten Stromrechnungen an, so dass die Betriebe unter Einbezug des Wohnhauses evtl. in eine höhere Kategorie fallen und dann etwas weniger für die kWh bezahlen. Der Betrieb Verkehrsmilch mit einem Verbrauch von 18'012 kWh/a ist als Betrieb in der Kategorie „C1“ einzuordnen und bezahlt im Schweizer Mittel 19,92 Rp./kWh (Eidgenössische Elektrizitätskommission (EiCom) 2015). Der Betrieb Andere Rinder mit einem Verbrauch von 6'835 kWh/a könnte vom Verbrauch her mehreren Kategorien zugeordnet werden: „H3“, „H4“ oder „H8“. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Wohnhauses lässt sich der Betrieb am ehesten der Kategorie „C1“ zuordnen, was dem Tarif „H4“ entspricht. Damit bezahlt der Betrieb 19,5 Rp./kWh (Schweizer Mittelwert). Der Betrieb Schweinemast hat einen Verbrauch von 34'546 kWh/a und fällt somit in die Kategorie „C2“ mit einem Preis von 18,62 Rp./kWh (Schweizer Mittelwert, Eidgenössische Elektrizitätskommission (EiCom) (2015)). Die Stromtarife sind für alle Modellbetriebe höher, als der Tarif, den die Stromabnehmer bezahlen würden (Rückvergütungstarif): In der Berechnung wird von einem Rückvergütungstarif in Höhe von 8,1 Rp/kWh (ohne ökologischen Mehrwert) ausgegangen (Berger 2014:28; Bundesamt für Energie (BFE) 2014:3). Bei dieser Annahme gilt für alle vertretenen Kategorien, dass der Stromtarif für den Bezug (Einkaufspreis) höher ist als der Rückvergütungstarif (Verkaufspreis).

Insgesamt gilt für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen ein höherer Gewinn, je länger diese genutzt werden kann. Bei einer 30-jährigen Laufzeit mit KEV ab dem ersten Jahr verbessert sich das wirtschaftliche Ergebnis, jedoch erzielt auch bei dieser Laufzeit kein Modellbetrieb einen Gewinn.

Verwiesen sei an dieser Stelle auch auf weitere unterschiedliche Finanzierungsmodelle der PV-Anlagen. So wird neben der kostendeckenden Einspeisevergütung auch eine Einmalvergütung für PV-Anlagen zwischen 2 und 30 kWp gewährt. Bei den Kalkulationen auf der Basis einer 20-jährigen als auch einer 30-jährigen Nutzungsdauer hat sich die Wahl einer KEV (ab Jahr 5) allerdings als die wirtschaftlichere Variante herausgestellt (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für die Massnahme "Photovoltaik" für die untersuchten Modellbetriebe mit Einmalvergütung (gemäss Energieverordnung 2015, Stand 1. Juni 2015).

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Eingesparte CO ₂ -Äquivalente [kg]	516	2'725	649	835
Mittlerer jährlicher Gewinn [Fr.]	-1151	-2817	-1345	-1009
Investitionssumme [Fr.] nach Abzug der Einmalvergütung	36 876	90 668	41 303	43 068
Investitionssumme/mittlere jährliche Investitionssumme (2009-2013) [%]	67 %	143 %	100 %	63 %
CO ₂ -Reduktionsgewinn pro kg CO ₂ -Äquivalent [Fr./kg]	-1.96	-1.03	-2.07	-1.21

Der Stromertrag der Anlage wird mit der Nennleistung der verwendeten Solarpanels (140 Wp/m²) gemäss ecoinvent V2.2 (Jungbluth et al., 2009) berechnet: Stromertrag = Fläche der Anlage (Dachfläche MB) x 140. Diese stellt gemäss Vergleichen mit aktueller Literatur (Gazzarin, C., 2008; Basler und Hoffmann, pers. comm. 2014, www.swissolar.ch) sowie eigenen Berechnungen eine realistische Abschätzung dar. In Tabelle 44 sind die Stromerträge der Photovoltaikanlagen und die Deckung des Eigenbedarfs angegeben.

Tabelle 44: Stromertrag der Photovoltaikanlagen und Deckung des Eigenbedarfs der Modellbetriebe

Modellbetrieb	Stromproduktion PV [kWh / a]	Deckung des Eigenbedarfs [%]
Ackerbau	17 328	476
Verkehrsmilch	50 548	280
AndRind	19 312	282
Schweinemast	20 102	58
Durchschnitt	26 820	

10.3.3 Wärmerückgewinnung

Bei dieser Massnahme wurde der Einsatz der Wärmerückgewinnungsanlagen mit den Modellbetrieben ohne Wärmerückgewinnungsanlage verglichen. Eine Lüftung wurde auch für die beheizten Ställe in der Referenzsituation angenommen. Die Lüftungsenergie macht etwa 60% der gesamten Energie aus, die auf den Betrieben verbraucht wird. Durch den Einbau der Wärmetauscher steigt der Bedarf an Lüftungsenergie um etwa 20%. Auch der Wasserbedarf nimmt leicht zu. Dafür werden etwa 60% der Heizenergie eingespart. Die jährlich eingesparte Heizenergie wurde mit deren Anschaffungskosten (Heizöl) bewertet und mit den Mehrkosten infolge des erhöhten Wasser- und Strombedarfs saldiert.

Für die Anfrage von Offerten wurde die Grundfläche des Stalls benötigt. Um die Grundfläche der Ställe zu berechnen, wurden die Daten aus den Modellbetriebsdateien von GVE in Einzeltiere umgerechnet (Amt für Landschaft und Natur (ALM) 2014). Anhand der Angaben vom Bundesamt für Veterinärwesen (BVET) (2010) und vom Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) (2014) zur maximalen Besatzdichte in Geflügel- und Schweineställen, wurde die Grösse der Ställe auf den Modellbetrieben errechnet. Die Kalkulation stützte sich auf die Offerten von drei Schweizer Anbietern. Ein Anbieter bot nur Module mit inkludierter Lüftung an. Eine Lüftung existiert in den Ställen der Modellbetriebe jedoch bereits. Daher wurden von der Investitionshöhe bei diesem Angebot die Kosten der Lüftung abgezogen, um die Vergleichbarkeit der Angebote zu gewährleisten.

Da die Stallgrössen für die Montage einer Wärmerückgewinnungsanlage beim Modellbetrieb Ackerbau und Modellbetrieb Verkehrsmilch sowie dem Modellbetrieb Andere Rinder von allen befragten Anbietern als unrealistisch und nicht rentabel angesehen werden, beschränken sich die Berechnungen auf die Modellbetriebe Schwein und Geflügel. Da auch die Stallfläche beim Modellbetrieb Schwein recht klein war, wurde hier nur auf die Offerten zweier Anbieter zurückgegriffen. Beim Modellbetrieb Geflügel war die Stallgrösse hingegen gross genug, um in den Berechnungen auch das Angebot des dritten Anbieters von WRG-Anlagen zu berücksichtigen. Ansonsten entsprach das Vorgehen dem des Modellbetriebs Schwein. Des Weiteren wurde mit den im Methodenteil vorgestellten üblichen Annahmen bezüglich Finanzierung, Zinskosten, Unterhaltskosten und einer 10-jährigen Nutzungsdauer gerechnet.

Für die Stromtarife wurde aus den Rohdaten der EICom (Eidgenössische Elektrizitätskommission (Eicom) 2010-2014) ein fünfjähriges Mittel berechnet. Die Höhe des gesamtbetrieblichen Stromverbrauches ist dabei ausschlaggebend für den Tarif (vgl. Kapitel 4.7). Der angesetzte Strompreis betrug Rp. 18,33 je kWh. Der Heizölbedarf ist in den Modellbetriebsdaten in MJ angegeben. Für die Umrechnung gilt eine Energiedichte von 36 MJ pro Liter leichtem Heizöl (AGRIDEA 2013a). Da mit der Wärmerückgewinnungsanlage Heizöl gespart wird, fallen manche Modellbetriebe mit der Massnahme in eine tiefere Verbraucherkategorie, wodurch der Preis pro Liter Heizöl steigt (Bundesamt für Statistik (BFS) o.A.). Die durchschnittlichen Schweizer Wassergebühren sind aufgrund darin verschiedener Kostenpositionen sehr inhomogen (Preisüberwachung (PUE) 1998, 2006, 2011) und schwanken in einem Bereich von etwa Fr. 0.50 je m³ bis fast

Fr. 4.– je m³. Die Preisüberwachung (PUE) (2006) findet für die günstigste Stadt der 30 grössten Städte der Schweiz (Sion) einen Preis von etwa Fr. 0.80 je m³. Teilt man die durchschnittlichen jährlichen Wasserkosten der betrachteten Betriebstypen (fünfjähriges Mittel 2009–2013 gemäss Buchhaltungsdaten) (Hoop und Schmid 2014; Mouron und Schmid 2011) und dem Wasserbedarf der Modellbetriebe (von der Gruppe Ökobilanzen übernommen), so ergeben sich Kosten in Höhe von Fr. 0.39 je m³ bis Fr. 0.74 je m³. Als Preis für Wasser wurden für beide Betriebstypen Fr. 0.60 je m³ Wasser angenommen. Da für den Betriebstyp Geflügel in der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten (Hoop und Schmid 2014) keine spezifische Auswertung vorliegen, wurde für die Kalkulation der mittleren jährlichen Investitionssumme der Jahre 2009 bis 2013 der Wert des Schweine haltenden Betriebs übernommen (Hoop und Schmid 2014a; Mouron und Schmid 2011).

10.3.4 Erhöhung Anzahl Laktationen

Tabelle 45: Zusätzliche Zahlenangaben zur Ausgangssituation auf den vier analysierten Modellbetrieben (Referenzzustand)

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schweine
Durchschn. Milchleistung [kg / Kuh a]	7113	6714	6960	6676
<i>Tierbestand (Stück)</i>				
Milchkühe	1.9	26.5	3.9	12.9
Rinder über 2-jährig [Stk]	0.2	2.2	1.1	1.1
Rinder 1 bis 2-jährig [Stk]	0.3	4.5	2.4	2.2
Jungvieh zur Zucht, 4 bis 12 Monate alt, w. [Stk]	0.3	3.7	1.9	1.8
Aufzuchtälber unter 4 Monate alt, w. [Stk]	0.3	3.6	1.0	1.8
Erstkalbealter (Jahre)	2.5	2.5	2.5	2.5
Remontierungsrate (3.5 Laktationen)	0.29	0.29	0.29	0.29
Nachzuchttiere nötig bei 3.5 Laktationen	0.56	7.68	1.12	3.74
Milchkühe aus eigener Nachzucht	0.30	4.39	2.27	2.17
Tierzukauf (Anzahl trächtige Rinder)	0.26	3.29	0.00	1.58
Verkauf Tiere (Anzahl trächtige Rinder)	0.00	0.00	1.15	0.00
Abgehende Milchkühe [kg LG / Jahr]	394	5375	786	2620
Verkauf Mastälber [kg LG]	177	767	0	1121
Output Rindviehmast [kg LG]	2064	1430	5242	2753
Bestand Kälbermast [Stk]	0.3	1.3	0.0	1.9

Tabelle 46: Anpassungen bzgl. Tierbestand mit der Massnahme

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schweine
Remontierungsrate bei 4,5 Laktationen	1 / 4,5 = 0,22			

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schweine
Nachzuchttiere nötig bei 4.5 Laktationen	0.43	5.88	0.86	2.87
Milchkühe aus eigener Nachzucht	0.30	4.39	2.27	2.17
Tierzukauf (Anzahl trächtige Rinder)	0.13	1.44	-0.26	0.67
Verkauf Tiere (Anzahl trächtige Rinder)	0	0	1.42	0
Abgehende Milchkühe [kg LG / Jahr]	304	4120	605	2007
zusätzliche Mastkälber [Stk / Jahr]	0.13	1.85	0.27	0.91
Verkauf Mastkälber [kg LG]	205	1170	59	1319
Output Rindviehmast [kg LG]	2092	1833	5301	2951
Bestand Kälbermast [Stk}	0.34	1.90	0.09	2.19

Tabelle 47: Anpassungen bzgl. Fütterung mit der Massnahme

Mastkälber	Mastdauer (d)	Einheit	TS-Gehalt (%)	pro Tier	Zusatzbedarf (kg pro Betrieb, gedeckt über Zukauf)			
					Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schweine
Fütterung (DBK 2013)	118							
Vollmilch	kg	13%	1000	130.0	1850.0	270.0	910.0	
Milchaufwerter	kg	97%	120	15.6	222.0	32.4	109.2	
Mineralfutter	kg	95%	2	0.3	3.7	0.5	1.8	
Viehsalz	kg	99%	2	0.3	3.7	0.5	1.8	
Dürrfutter belüftet	kg TS	100%	40	5.2	74.0	10.8	36.4	
Stroh	kg TS	100%	200	26.0	370.0	54.0	182.0	
zusätzl. TS-Aufnahme (kg)			491	64	909	133	447	

Der Milchkuhbestand bleibt aufgrund der begrenzten Stallplätze insgesamt gleich, das heisst es gibt auf den Betrieben in der Referenzsituation sowie in der Situation mit Massnahme gleich viele Milchkühe. Eine Milchkuh wiegt 700kg. Da die Remontierungsrate in der Referenzsituation 0,29 betrug, konnte mithilfe des Produkts aus Gewicht und Remontierungsrate das Lebendgewicht (LG) der abgehenden Kühe berechnet werden. Um die Einnahmen, die aus dem Verkauf einer Milchkuh entstehen zu berechnen, wurde angenommen dass das Schlachtgewicht (SG) 46% des LG entspricht. Preise für abgehende Milchkühe ergaben sich aus dem fünfjährigen Mittel (AGRIDEA, 2009-2013a). Pro Laktation/Nutzungsjahr der Milchkuh, muss diese ein Kalb gebären, das verkauft werden kann (entweder zur Aufzucht oder Mast) (AGRIDEA 2009-2013a). Die 0,29 (zum SG bewertet) verkauften Kühe wurden, zur Aufrechterhaltung des Bestandes, jährlich wieder ersetzt. Auch diese wurden zum Fünfjahresdurchschnittspreis (AGRIDEA, 2009-2013a) bewertet. Im Rahmen der Umsetzung der Massnahme wurde angenommen, dass neben der Milchleistung (kg pro Kuh und Jahr) alle weiteren Kosten, die für Grund- und Ergänzungsfutter, Tiergesundheit, Herdenbuch, Ohrenmarken, Besamung etc. anfallen, bei Umsetzung der Massnahme konstant bleiben. Die Annahmen zur Milchleistung beruhten bei den Berechnungen auf den Angaben von Swissherdbook (pers. Mitteilung, Berger, Swissherdbook, 2015). Bezüglich der Ausgaben für Tiergesundheit bei einer längeren Nutzungsdauer der

Kühe liessen sich verschiedene Angaben in der Literatur finden: Nach Römer (2011) findet beispielsweise keine Differenzierung der Tierarztuntersuchungen nach dem Alter der Kühe statt. Dorfner und Sprengel (2008) hingegen gehen davon aus, dass eine längere Lebensdauer der Kühe mit höheren Tierärztkosten einhergeht.

Aufgrund der getroffenen Annahmen entstanden entsprechend nur Änderungen durch die verringerte Remontierungsrate: Zum einen führte dabei der geringere Verkauf ausgemerzter Tiere zu Einbussen, zum anderen mussten weniger Milchkühe durch neue, trüchtige Rinder ersetzt werden (sinkende Remontierungskosten). Zudem konnten die zusätzlichen „überschüssige“ Kälber von den Betrieben verkauft werden (LG von 65 kg je Stück, Fr. 3,55 je kg LG Verkaufspreis). Während deren Umweltwirkung den Modellbetrieben direkt zugerechnet wird, wird für die Berechnung der Wirtschaftlichkeitsanalyse hingegen von einem direkten Verkauf dieser Kälber ausgegangen. Die Differenz der Veränderungen, die sich bei den aufgezählten Positionen ergab, ergab schliesslich den jährlichen Gewinn der Massnahme. Da die Einsparungen je Grossvieheinheit (GVE) für alle Modellbetriebe gleichhoch sind, profitierten Betriebe, die über eine hohe Anzahl an Milchkühen verfügen am stärksten von der Massnahme.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass – auch aus wirtschaftlicher Sicht – das langfristige Optimum der Massnahme nicht bei einer Anzahl von 4,5 Laktationen erreicht wird, sondern eine weitere Ausweitung der durchschnittlichen Anzahl an Laktationen aus ökonomischer Sicht von Vorteil ist (Hever, 2014), da mit einer Abnahme der Milchleistung/Laktation erst ab der neunten Laktation zu rechnen ist (pers. Mitteilung, Berger, Swissherdbook, 2015)

10.3.5 Milchproduktion Soja zert./ ohne Einsatz von Soja

In 2014 wurden in der Schweiz gemäss Zollstatistik 250 455 Tonnen Sojaschrot importiert, wovon 82 % gemäss einem der vom Soja Netzwerk Schweiz anerkannten Standards zertifiziert waren (soja netzwerk schweiz 2015). Zugelassene Standards bei IP-Suisse werden vom „Schweizer Netzwerk nachhaltige Soja“ definiert und sind: ProTerra, RTRS Gentechnikfrei, Donau Soja sowie BioSuisse Soja (Soja-Netzwerk Schweiz 2011); wobei hauptsächlich ProTerra- Soja importiert wird (Marktanteil von 74% (Soja-Netzwerk Schweiz 2015).

Die Massnahme bestand aus zwei Varianten. Variante A sah den kompletten Verzicht von Soja im Futter (Anteile im Proteinkonzentrat und im Milchviehfutter mit 16% Rohprotein, RP) vor. Bei Variante B wurde komplett auf zertifizierte Soja umgestellt. Aufgrund dessen Marktdominanz wurde mit Soja nach ProTerra-Standard kalkuliert. Im Referenzszenario wurde davon ausgegangen, dass bisher 82 % der genutzten Soja zertifizierten Standards entspricht.

Variante (A)

Bei Variante A der Massnahme wurden die Soja-Bestandteile im Ergänzungsfutter (Proteinkonzentrat und Milchviehfutter 16% RP) ersetzt. Die neue Zusammensetzung des Futters entsprach damit den Angaben in Kapitel 4.9.1. Die Preise für die Bestandteile, deren Anteil an der Futtermischung sich änderten, wurden den Preiskatalogen (AGRIDEA 2010-2014a) entnommen.

Während beim Proteinkonzentrat, neben dem Verzicht auf Soja, der Anteil der Melasse reduziert wurde, wurden die Bestandteile Maiskleber, pflanzliches Fett (Alikon) und Rapsschrot erhöht. Insgesamt war Raps zwar wesentlich günstiger zu erstehen als Sojaschrot (Fr. 24.–/dt günstiger), aber Maiskleber (Fr. 100.–/dt) und das pflanzliche Fett (Alikon, Fr. 235.–/dt) waren vergleichsweise teuer, was insgesamt zu einer Preiserhöhung des Proteinkonzentrats führte. Beim Milchviehfutter ergab sich folgendes Bild: Der Wegfall des Soja ging hier mit einer geringeren Menge an Mais einher – allerdings erhöhten sich die Anteile von Gerste, Weizen sowie Maiskleber. Insgesamt ergaben sich hier geringere Preise für den Kauf des veränderten Milchviehfutters (unter der Referenzsituation von 82% bereits zertifiziertem Soja). Während Rapsschrot bereits zunehmend in der Schweine- und Geflügelfütterung zum Einsatz kommt und langfristig ein Konkurrenzprodukt zur Verwendung von Soja darstellt, ist der Ersatz durch gentechnikfreien Maiskleber vor allem durch dessen geringe Verfügbarkeit (oftmals nicht in gentechnikfreier Variante verfügbar) beschränkt (World Wide Fund for Nature (WWF) 2012).

Variante (B)

Bei Variante B entstanden Mehrkosten, da die Kosten für zertifizierten Soja höher sind, als jene für nicht zertifizierte Soja.

Für die Berechnungen wurde das fünfjährige Preismittel für Sojaschrot verwendet. Preisprämien für die Verwendung der zertifizierten Soja wurden gemäss Fachauskunft von Fenaco-Ufa (pers. Mitteilung, Stalder, Fenaco, Geschäftsbereich Proteine, 2015) angenommen und bezogen sich ebenfalls auf das fünfjährige Mittel. Da nur Prämienaufschläge ab dem Jahr 2010 gegeben waren, wurden hier ausnahmsweise die Durchschnittspreise der Jahre 2010 bis 2014 betrachtet (die Preise für nicht zertifiziertes Sojaschrot bezogen sich entsprechend auch auf die Jahre 2010 bis 2014, AGRIDEA, 2010-2014a). Der Preisaufschlag für zertifizierte Soja betrug in diesem Zeitraum etwa 11% gegenüber dem Preis nicht-zertifizierter Soja. Aufgrund der Mehrkosten für zertifizierte Soja, stiegen die Ausgaben für Futtermittel durch die Einführung der Massnahme.

10.3.6 Abdeckung Güllesilo

Bei dieser Massnahme standen sich einerseits Investitionen, der Unterhalts- und Reparaturaufwand einer Abdeckung der Güllebehältern sowie andererseits die Einsparungen beim N-Düngereinkauf gegenüber.

Die Einschätzung der Anschaffungskosten orientierte sich an der Zeltabdeckung eines Schweizer Anbieters, der eine Zeltabdeckung vertreibt, die der in den Berechnungen zur Ökobilanz verwendeten ähnlich ist, und dessen Kosten etwa dem Mittel verschiedener Offerten entsprach. Da die Kosten der Abdeckung für alle Betriebe weniger als 50% der mittleren jährlichen Investitionssumme betragen, wurde davon ausgegangen, dass die Abdeckung komplett aus Eigenkapital finanziert wird. Die Nutzungsdauer der Gülleabdeckung beträgt laut den Empfehlungen der Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz (KOLAS) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) 15 Jahre (Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz (KOLAS) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2012; Wiefferink 2014). Alle weiteren im Methodenteil (Kapitel 4.3.3) getroffenen Grundsatzannahmen blieben bei den Berechnungen bestehen. Es wurde davon ausgegangen, dass der Aufbau der Güllesiloabdeckung durch ein externes Unternehmen erfolgt.

Die Installation einer Güllesiloabdeckung wird bzw. wurde durch bestimmte Kantone finanziell gefördert im Rahmen sogenannter „Ressourcenprojekte“. Die Vergütung aus dem Ressourcenprojekt ist kantonal geregelt und findet in unterschiedlichen Zeiträumen und unter Einhaltung verschiedener Voraussetzungen statt. Dabei werden 80 % der Anschaffungskosten durch den Bund getragen. Die übrigen 20 % können entweder durch den jeweiligen Kanton oder den Landwirt selber getragen werden (Baumgartner (2014); pers. Mitteilung, Strahm, BLW, (2014), Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz (KOLAS) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2012). Die vorliegende Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde ohne den Einbezug einer solchen Vergütung vorgenommen, da sich die Fördersituation zwischen Kantonen unterscheidet.

Die Güllesiloabdeckung erhöht den N-Gehalt in der Gülle. Ein Teil des infolge der Abdeckung zusätzlich in der Gülle enthaltenen Stickstoffs geht bei der Ausbringung jedoch verloren. Bei der Berechnung dieser N-Verluste wurden die Angaben aus den Technischen Parametern des Agrammonmodells hinzugezogen (Kupper und Menzi 2013). Bei Rindergülle betrug der Verlust durch das Ausbringen 50 % und bei Schweinegülle etwa 35 %. Ausser beim Betrieb Andere Rinder handelte es sich auf den Modellbetrieben um ein Gemisch aus Rinder- und Schweinegülle. Der mittlere Verlust wurde anteilig nach der Herkunft der Gülle (Tierart) für die Modellbetriebe berechnet. Als Preis für N-Dünger wurden die gemittelten fünfjährigen Preise (2009-2013) für die auf den Modellbetrieben verbrauchten N-Dünger verwendet (der Anteil der Dünger am Gesamt-N beträgt: 18 % Harnstoff, 39 % Ammoniumsalpeter, 7 % Ammonsulfat sowie 36 % Ammonsalpeter mit Kalk (AGRIDEA 2009-2013b)).

10.3.7 Phasenfütterung in der Schweinemast

Tabelle 48: Zusammensetzung des Kraftfutters in der Ausgangssituation (Referenz)

Input	Futtermischung Mastschweine
Diffusionsschnitzel (kg)	9.2%
Dikalziumphosphat (kg)	0.8%
FAG-S 365 Sauen (kg)	
FAG-S 367 Mast (kg)	0.4%
Futtergerste (kg)	20.0%
Futterhafer (kg)	4.0%
Futtermais (kg)	10.0%
Futterweizen (kg)	20.0%
Kartoffelprotein (kg)	3.0%
KSK (kg)	0.8%
Leinkuchen (kg)	
L-Lysin-HCl (kg)	
L-Threonin (kg)	
L-Tryptophan (kg)	
Mischfett 50/50 (kg)	0.1%
Natriumchlorid (kg)	0.3%
Pellan (kg)	0.3%
Rapskuchen (kg)	3.0%
Sojakuchen n entsch(kg)	20.0%
Sojaoel (kg)	
Weizenstaerke (kg)	8.2%

Tabelle 49: Zusammensetzung des Kraftfutters mit der Massnahme "Phasenfütterung"

%	Vormastfutter	Ausmastfutter
ALP-S 467 Mast	0%	0%
DCP	1%	0%
Diffusionsschn getr	0%	6%
DL-Methionin	0%	0%
Gerste mittel	25%	58%
Haferspelzen	4%	0%
Kalk, kohlensaurer	1%	1%
L-Lysin-HCl	0%	0%
L-Threonin	0%	0%
L-Tryptophan	0%	0%
Mais	31%	4%
Maiskleber 60% RP	3%	1%
Natriumchlorid (Vie	0%	0%
Natuphos 5000 G	0%	0%
Pellan	0%	0%
Soja-Extraktionssch	15%	4%
Triticale, Koerner	15%	0%
Weizen, Koerner	0%	24%
Weizenstaerke	4%	0%

Berechnung der aufgenommenen Kraftfuttermenge mit Phasenfütterung:

Energieaufnahme total = 13.5 MJ VES / kg Futter x 200 kg Futter / Tier = 2700 MJ VES pro Tier

Futteraufnahme Mehrphasenfütterung = 2700 MJ VES / 13.2 MJ VES / kg Futter = 204.5 kg / Tier

10.3.8 Umbruchlose Neuansaat

Tabelle 50: Grünlandflächen der Modellbetriebe

	Naturwiese / Mähweide intensiv	Naturwiese / Mähweide mittelintensiv	Naturwiese wenig intensiv	Naturwiese extensiv	Dauerweide intensiv	Dauerweide mittelintensiv	Summe
Ackbau	0,23	0,49	0,16	1,6	0,1	0,17	2,75
Vrkmilch	6,39	5,22	0,25	0,92	0,57	0,31	13,66
AndRind	1,65	6,34	0,18	0,74	0	0	8,91
Schwein	3,58	5,77	0,4	0,73	0,43	0,52	11,43

Tabelle 51: Maschineneinsatz, Arbeitsprozesse und Herbizideinsatz der Modellbetriebe für die Massnahme „Umbruchlose Neuansaat“

	Referenz	+Massnahme	
Maschinen / Arbeitsprozesse	-Pflügen -Fräsen -Drillsaat -Walzen	mechanisch	chemisch
		-2 mal Grubbern (Flachgrubber) -Fräsen -Drillsaat -Walzen	-Feldspritze: Round-up (4 L/ha) -Fräsen -Drillsaat -Walzen
Glyphosat (g Wirkstoff /Betrieb)			Ackbau 5280
			VkrMilch 26 227
			AndRind 17 107
			Schwein 21 946

Beim Referenzverfahren wurde angenommen, dass alle zum Umbruch und zur Neuansaat notwendigen Geräte auf dem landwirtschaftlichen Betrieb vorhanden sind. Diese Annahme galt auch für die mechanische Variante. Bei der chemischen Variante hingegen wurde davon ausgegangen, dass das Verfahren durch einen Lohnunternehmer ausgeführt wird (in Anlehnung an Ochsner *et al.* (2011)).

Das Verfahren wurde gemäss Maschinenkostenbericht (Gazzarin 2014) sowie dem Arbeitsvoranschlag ART-Arbeitsvoranschlag (Stark *et al.* 2014) definiert. Für das mechanische Verfahren ergeben sich Maschinen- und Arbeitskosten in Höhe von Fr. 617.– je Hektar. Die chemische Variante wurde mit Fr. 366– je Hektar inkl. Herbizid kalkuliert.

Eine eventuelle Ertragsreduktion – z.B. ein wegfallender Schnitt – wurde bei den Berechnungen der Kosten nicht beachtet, da davon ausgegangen wurde, dass die Reduktion unabhängig vom Verfahren (Referenz oder Massnahme) gleich gross ist.

10.3.9 Reduktion N-Dünger

Tabelle 52: reduzierte N-Düngemittelgabe und die dadurch induzierte Ertragsreduktion für einige Ackerfrüchte auf den Modellbetrieben.

Kultur	Modellbetriebe	Ertrag (kg TS / Betrieb)		red. Ertrag (kg TS / Betrieb)		N Dünger (kg / Betrieb)		Red. N Dünger (kg/Betrieb)	
		100 %	-10 %	-20 %	100 %	-10 %	-20 %		
Winterweizen									
	Ackerbau	38 407,7	37 865,0	37 199,6	974,4	877,0	779,5		
	Verkehrsmilch	1411,6	1391,6	1367,2	39,2	35,3	31,4		
	Anderes Rind	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
	Schweine	970,5	956,8	940,0	26,6	23,9	21,3		
Wintergerste									
	Ackerbau	9421,5	9248,8	9048,7	178,2	160,4	142,6		
	Verkehrsmilch	2677,6	2628,5	2571,6	59,4	53,5	47,5		
	Anderes Rind	3609,3	3543,1	3466,4	67,1	60,4	53,7		
	Schweine	1482,2	1455,0	1423,6	31,9	28,7	25,5		
Winterraps									
	Ackerbau	317,7	308,5	298,8	334,6	301,1	267,7		
	Verkehrsmilch	57,8	56,1	54,3	4,2	3,8	3,4		

Kultur	Modellbetriebe	Ertrag (kg TS / Betrieb)	red. Ertrag (kg TS / Betrieb)		N Dünger (kg / Betrieb)	Red. N Dünger (kg/Betrieb)	
	Anderes Rind	3205,5	3112,7	3014,7	0,0	0,0	0,0
	Schweine	693,1	673,0	651,8	0,0	0,0	0,0
Körnermais							
	Ackerbau	11 855,2	11 755,4	11 636,4	157,3	141,6	125,8
	Verkehrsmilch	724,4	718,3	711,0	9,9	8,9	7,9
	Anderes Rind	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Schweine	323,7	320,9	317,7	4,4	4,0	3,5
Silomais							
	Ackerbau	22 819,9	22 714,8	22 598,6	144,1	129,7	115,3
	Verkehrsmilch	19 858,5	19 767,1	19 665,9	125,4	112,9	100,3
	Anderes Rind	9755,1	9710,2	9660,5	61,6	55,4	49,3
	Schweine	10 277,6	10 230,4	10 178,0	64,9	58,4	51,9

Tabelle 53: Grünlandflächen, Nutzungsänderung und Ertragsreduktion der Modellbetriebe mit Massnahme "Red. N-Dünger"

Grünlandtyp	Fläche (ha)				Nutzungen/Umtriebe	Referenz Ertrag (kg TS / ha a)	reduzierte Nutzung	% Red.	Reduz. Ertrag (kg TS / ha a)
	Ackbau	VkrMilch	AndRind	Schweine					
Naturwiese / Mähweide intensiv	0,23	6,39	1,65	3,58	4	10 000	3	20	8000
Naturwiese / Mähweide mittelintensiv	0,49	5,22	6,34	5,77	3	7500	2	33,3	5000
Naturwiese wenig intensiv	0,16	0,25	0,18	0,4	2	5000	1	30	3500
Naturwiese extensiv	1,6	0,92	0,74	0,73	1	3000	1	0	3000
Dauerweide intensiv	0,1	0,57	0	0,43	5 - 7	10 000	4 - 6	15	8500
Dauerweide mittelintensiv	0,17	0,31	0	0,52	4 - 5	8500	3 - 4	23,5	65000
Dauerweide wenig intensiv	0	0	0	0	2 - 4	5000	2 - 4	0	5000
Kunstwiesen Saatjahr (04)	0,11	0,39	0,22	0,28	6	9600	5	14,8	8178
Kunstwiesen Zwischenjahr	0,50	1,77	0,99	1,27	6	12 000	5	14,8	10 222
Kunstwiesen Endjahr (09)	0,50	1,77	0,99	1,27	6	9600	5	14,8	8178
Kunstwiesen Endjahr (03)	0	0	0	0	6	0	5	14,8	0
Kunstwiesen Saatjahr (08)	0,39	1,38	0,77	0,99	6	2500	5	14,8	2130

Bei der Massnahme Reduktion des mineralischen N-Düngereinsatzes wurden zwei Szenarien mit der Referenzsituation verglichen: Der N-Düngereinsatz auf den Ackerkulturen wurde um 10 bzw. 20 % gesenkt, was zu entsprechenden Ernteeinbussen bei den verschiedenen Kulturen führte. Beim Grünland wurde davon ausgegangen, dass die Reduzierung des N-Düngers der Reduzierung um eine Intensitätsstufe bzw. einen Schnitt entspricht. Die Höhe der Ernteeinbussen auf den jeweiligen Ackerkulturen wurde von der Gruppe Ökobilanzen mithilfe von Ertragsfunktionen und für das Grünland nach GRUDAF 2009 (Flisch *et al.* 2009) bestimmt (Tabelle 52 und Tabelle 53).

Um die Kosten dieser Massnahme zu beurteilen, musste eine Bewertung der Ernteeinbussen stattfinden. Als Preis für N-Dünger wurden die gemittelten fünfjährigen Preise (AGRIDEA 2009-2013b) für die auf den Modellbetrieben verbrauchten N-Dünger verwendet (Harnstoff 18%, Ammoniumsalpeter 39%, Ammonsulfat 7% und Ammonsalpeter mit Kalk 36% Anteil am Gesamt-N) (AGRIDEA 2009-2013b). Die Qualitätsbeiträge, die für extensiv genutzte Wiesen, wenig intensiv genutzte Wiesen sowie extensiv genutzte Weiden bezahlt werden, änderten sich nicht (Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2015).

Ernteauffälle der Ackerkulturen (Weizen, Wintergerste, Winterraps, Körnermais) wurden zum entgangenen Wert der markfähigen Leistung bewertet (Dabbert und Braun 2006). Da die IP-Suisse-Richtlinien den Getreideproduzenten vorschreibt, das gesamte Brotgetreide (Weizen, Roggen, Urdinkel) extenso anzubauen (IP-Suisse 2014), wurde auf den Modellbetrieben vorhandenes nicht-extenso-Getreide zu Preisen von Futtergerste und Futterweizen bewertet.

Für die Bewertung der Einbussen auf dem Grünland sowie für die Einbussen beim Silomais wurde der Substitutionswert angesetzt. Um die Ertragseinbussen von Grünland und Silomais zu monetarisieren, wurde der Preis, den der Landwirt für den Ersatz des Futters zahlen muss, angenommen. Bezüglich des Preises für Heu wurde angenommen, dass der Landwirt Grossballen Heu (franko Hof) einkauft. Bei den Preisen für Mais- sowie Grassilage mussten die Transportkosten noch zu den *Ab-Hof-Preisen* hinzugerechnet werden. Dabei wurde angenommen, dass der Transport mithilfe eines Rundballen-Ladewagens stattfindet. Zum Aufladen und Einlagern wurden weiterhin ein Traktor sowie eine Klemmzange für Grossballen angesetzt. Auch die anfallende Arbeitszeit fand bei den Berechnungen Berücksichtigung. Das Arbeitsverfahren inkl. Anfahrtskosten wurde gemäss (Gazzarin 2014a) bzw. AGRIDEA (2009-2013a) und dem ART-Arbeitsvoranschlag-Programm (Stark *et al.* 2014) bestimmt und sowohl variable als auch fixe Transportkosten in die Bewertung einbezogen.

Während beim Grünland zwar zusätzliche Kosten durch die notwendige Substitution der Futtermittel entstanden, fielen dafür aber i) weniger Kosten zur Düngung an und ii) konnte auf den Naturwiesen, die gedüngt werden, und Kunstwiesen, die gedüngt werden, mit einem Schnitt weniger gerechnet werden. Durch die Reduktion der Anzahl an Schnitten werden Arbeitsgänge gespart (zur Berechnung der Arbeits- und Maschinenkosten siehe Gazzarin (2014a), AGRIDEA (2009-2013a) und das Programm ART-Arbeitsvoranschlag (Stark *et al.* 2014); Ausgangspunkt Kunstwiese: Kunstwiese Talregion 550 m über Meer, <18% Neigung; Naturwiese: Naturwiese Talregion 550 m über Meer mit einer mittleren Neigung von 18-35%). Ebenfalls wurden die Futterauffälle mit den jeweiligen Anteilen für Heu, Silage, Eingrasen und Weiden der Naturwiesen berechnet. Der Anteil der Wiesen, der als Weide bzw. für das Eingrasen genutzt wird, wurde dabei 50:50 zu den Preisen von Silage und Heu bewertet, da davon ausgegangen werden musste, dass auch dieser Futtermittelverlust durch einen entsprechenden Futterzukauf ersetzt werden muss. Analog erfolgte das Vorgehen bei der Bewertung der Ertragseinbussen auf den Weiden.

10.3.10 Schleppschlauch

Reduktion der NH₃-Emissionen bei Gülleausbringung um 30% (gemäss Korrekturfaktor Agrammon).

Die zusätzlich nötige Zugleistung ist abhängig von Untergrund (Wiese / Strasse) und der Fahrgeschwindigkeit und bewegt sich zwischen 1.3 und 5.0 kW (Sauter *et al.* 2010). Verwendet wurde eine mittlere zusätzlich nötige Zugleistung von 3 kW.

Tabelle 54: Anpassung des Dieselbedarfs

	Einheit	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
1 Liter Diesel entspricht	kWh	9,8	9,8	9,8	9,8
Auszubringende Güllemenge	m ³	122	915	239	811
Leistung Schleppschauch	m ³ /h	23	23	23	23
Arbeitsstunden Schleppschauch	h	5,3	39,8	10,4	35
zusätzliche Leistung total	kWh	16	119	31	106
zusätzlicher Diesel nötig*	l	8,1	60,9	15,9	54,0

*Annahme: 20% des Dieselbedarfs werden direkt in Zugkraft umgesetzt

Tabelle 55: Anpassung des Gewichts der Zugkombination

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schwein
Gewicht Güllefass Ref [kg]	8,0	60,5	15,5	77,3
Gewicht Zugkombination Massn. [kg]	8,8	66,6	17,0	85,0

10.3.11 Ausbringung von Gärresten

Tabelle 56: Angerechnete Emissionen bei der Gärrestlagerung und -ausbringung

	Ackbau	VrkMilch	AndRind	Schweine
Produziertes Biogas aus zugeführter Menge Gärreste [m ³]	144 127	23 432	68 238	255 955
Emissionen Gärrestlagerung [kg/a]:				
CH ₄	503	82	238	894
NH ₃	21	3	10	38,1
N ₂ O	0,28	0,05	0,13	0,49
Erhöhung Ausbringungsemissionen [kg / a]:				
NH ₃	524,1	85,2	248,1	-
N ₂ O	41,4	6,7	19,6	-
Erhöhung Dieselbedarf [kg]	202	80	108	62
Anrechnung Stromproduktion [kWh]	-	-	-	1967,6

10.3.12 Agroforst

Bezüglich der Arbeits- und Maschinenkosten für die Bewirtschaftung der Ackerfruchtfolge (vgl. Tabelle 57) im Referenzszenario (1 ha) und der Ackerfruchtfolge (0,8 ha) mit AFS im Massnahmenszenario, wurde angenommen, dass sich diese nicht ändern. Zwar könnte zunächst von einer Zeiteinsparung ausgegangen werden, da 20% der vorherigen Ackerfläche nun für das AFS genutzt werden, also nicht mehr für die Ackerkultur zur Verfügung stehen, jedoch steht dieser Flächenreduzierung ein häufigeres Rangieren der Maschinen mit AFS gegenüber (vgl. auch Kaeser *et al.* (2010a)).

Tabelle 57: Fruchtfolge, die zur Beurteilung eines AFS betrachtet wurde

Winterweizen (+Gründüngung)
Winter-Eiweisserbsen
(Winter-)Raps (+Gründüngung)
(Silo-)Mais
Kunstwiese

Der Ertrag der Ackerkulturen verringerte sich einerseits infolge der geringeren Ackerfläche, andererseits durch Ertragseinbussen, mit denen aufgrund der Konkurrenz um Nährstoffe und Licht zwischen den Ackerfrüchten und den Apfelbäumen zu rechnen war (ab Jahr 20 reduziert sich der Ertrag je um ein Prozent des Vorjahresertrags linear). Die Erträge der Ackerkultur im Referenzszenario und mit AFS wurden zu Marktpreisen (fünfjährige Mittel von 2009-2013, AGRIDEA (2009-2013b) bewertet (Dabbert und Braun 2006). Somit liess sich der Barwert, der – über den Lebenszeitraum der Bäume von 60 Jahren – aus dem Verkauf der Ackerkulturen erzielt werden kann, berechnen. Der Barwert fiel im Massnahmenszenario aufgrund der erwähnten Ertragseinbussen sowie reduzierter Extensio-Beiträge deutlich geringer aus. Ausserdem waren infolge der Ertragseinbussen auf der Kunstwiese (50 % Silage, 50 % Heu) Futterzukäufe erforderlich. Das Vorgehen bei der Berechnung der Futtersubstitution entsprach jenem der Massnahme „Reduktion des mineralischen N-Düngers“.

Neben den Änderungen, die sich bezüglich der Ackerkulturen ergaben, entstanden Kosten für den Kauf und die Pflanzung der Bäume, deren Pflege und Ernte sowie für die Bewirtschaftung (Mulchen) der Grünstreifen, auf denen die Bäume gepflanzt werden. Nach den Preiskatalogen von AGRIDEA (2009-2013b) ergaben sich für den Kauf von Jungbäumen Kosten in Höhe von Fr. 90.– (AGRIDEA 2009-2013b). Die Arbeitszeit für die Pflanzung von Hand orientierte sich an Alder (2007). Spezialmostobstäpfel können für etwa Fr. 30.– je 100 kg verkauft werden (fünfjähriges Mittel 2009-2013 minus Abzüge und Rückbehalt, AGRIDEA (2009-2013b)). Durch die geringe Breite der Grünstreifen mussten diese mit einem Schmalspurtraktor gemulcht werden, der aufgrund seiner i.d.R. geringeren Höhe ausserdem zur Durchfahrt unter den Bäumen geeignet ist. Der Kauf eines solchen Traktors lohnte sich nach dem Kaufschwellenansatz nicht und wurde deswegen, wie auch das notwendige Mulchgerät, gemietet.

Pro Baum wurde mit einem Biodiversitätsbeitrag QI in Höhe von Fr. 15.– gerechnet (ab 20 Bäumen pro Betrieb, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2013)). Um für die Obstbäume die QII-Beiträge zu erhalten, ist im Umkreis von 50 Metern eine Biodiversitätsförderfläche (BFF) erforderlich, die als Zurechnungsfläche bezeichnet wird (mindestens ein Baum darf nicht mehr als 50 Meter von der BFF entfernt stehen, es werden 0,5 Aren pro Baum benötigt). Soll ungedüngte und extensiv genutzte oder wenig intensiv genutzte Wiese als Zurechnungsfläche geltend gemacht werden, so muss diese BFF den QII Anforderungen genügen (Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) 2014a, 2014b). Infolge der Randeinflüsse des Ackerbaus (Dünger- und Herbizideinträge) können die Grünstreifen nicht als Zurechnungsfläche für die QII-Beiträge genutzt werden (vgl. dazu Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014b)). Um folglich dennoch die QII-Beiträge für die Feldobstbäume zu erhalten, müssten demnach zusätzliche Biodiversitätsförderflächen im Umkreis von 50 Metern unterhalten werden. Alternativ wären Strukturelemente, wie Ast- oder Steinhäufen, Tümpel oder Gräben etc. möglich. Diese bedeuten aber Opportunitätskosten des Ackerlandes und einen zusätzlichen Arbeitsaufwand, weshalb QII-Beiträge hier nicht berücksichtigt wurden.

Gedüngt wurden die gepflanzten Apfelbäume lediglich in den ersten sieben Jahren wobei in diesem Zeitraum drei Mal eine Blattdüngung (mit Fer Edt) erfolgt. Einmal jährlich werden Mittel zum Pflanzenschutz benutzt (Mittel Pirimor (Wirkstoff Pirimicarb) und Netzschwefel) (Preise lt. AGRIDEA 2009-2013b). Die zur Ausbringung notwendige Anbaugebläsespritze wird gemietet. Für die Bekämpfung von Mäusen sowie die Pflege der Bäume (Schnitt etc.) wurde zusätzlich Zeit veranschlagt (Orientierung an Alder (2007)).

Bezüglich der Mechanisierung der Mostobsternte wurde davon ausgegangen, dass lediglich ein Baumschüttler erworben wird (Gazzarin 2015). Alle anderen zur Ernte notwendigen Maschinen wurden geliehen und mit dem entsprechenden Entschädigungsansatz bewertet (Gazzarin 2014a). Ab Jahr 7 bis 15 musste bezüglich der Ernte mit Halbertrag gerechnet werden, weshalb in diesen Jahren etwas weniger Arbeitszeit

für die Ernte angesetzt wurde (75% der Gesamtzeit). Ab dem ersten Jahr des Vollertrags (Jahr 15) wurden die vollen Arbeits- und Maschinenkosten für die Ernte berechnet (Maschinenkosten nach Gazzarin (2014a). Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass die Bäume nach 60 Jahren gefällt werden und zu Scheitholz weiterverarbeitet werden. Dadurch entstehen zusätzliche Arbeits- und Maschinenkosten. Zur Weiterverarbeitung wurde ein wenig mechanisiertes Scheitholzverfahren angenommen (33 cm Scheitholz verarbeitet, von Hand aufgeschichtet und abgedeckt) (nach Albisser Vögeli *et al.* (2009)). Maschinenanschaffungen sind deshalb nicht notwendig. Die Verarbeitung zu Wertholz (Sägereirundholz) wird als nicht praktikabel angesehen, da dies als sehr arbeitsaufwendig gilt (Kaeser *et al.* (2011)). Pro Ster Scheitholz (für Laubholz) lassen sich (2013) Fr. 160.– (gespalten, 33cm lang) erzielen. Dies entspricht dem Richtpreis für ofenfertiges, aufgearbeitetes Brennholz (trocken, exkl. Lieferung) des Schweizer Bauernverbandes (Schweizer Bauernverband 2013).

10.4 Erzielte Treibhausgasreduktion pro Massnahme absolut und bezogen auf MJ verdauliche Energie

Tabelle 58: Übersicht über die berechneten Änderungen der Treibhausgasemissionen (absolut) bzw. der THG-Effizienz (pro MJ vE) für die 20 analysierten Massnahmen und vier Modelbetriebe.

	Massnahme	Betrieb	Variante	absolut		Pro MJ vE	
				kg CO ₂ -Äq./Betrieb	%	kg CO ₂ -eq./MJ vE	%
Energie	Ökostrom	Ackbau		-487	-0,40%	0,000	-0,40%
		VrkMilch		-2411	-0,82%	-0,004	-0,82%
		AndRind		-915	-0,87%	-0,006	-0,87%
		Schwein		-4623	-1,35%	-0,005	-1,35%
	Treibstoffbedarf	Ackbau		-1095	-0,89%	-0,001	-0,89%
		VrkMilch		-1095	-0,37%	-0,002	-0,37%
		AndRind		-585	-0,56%	-0,004	-0,56%
		Schwein		-946	-0,28%	-0,001	-0,28%
	Maschinen- auslastung	Ackbau		-483	-0,39%	0,000	-0,39%
		VrkMilch		-424	-0,14%	-0,001	-0,14%
		AndRind		-273	-0,25%	-0,002	-0,25%
		Schwein		-307	-0,09%	0,000	-0,09%
	Sonnenkollektoren	Ackbau		-1912	-1,54%	-0,002	-1,54%
		VrkMilch		-3995	-1,36%	-0,007	-1,36%
		AndRind		-2313	-2,17%	-0,016	-2,17%
		Schwein		-2785	-0,81%	-0,003	-0,81%
	Photovoltaikanlage	Ackbau		-516	-0,42%	0,000	-0,42%
		VrkMilch		-2725	-0,93%	-0,005	-0,93%
		AndRind		-649	-0,62%	-0,004	-0,61%
		Schwein		-835	-0,24%	-0,001	-0,24%
Waldbewirt- schaftung	Ackbau		-578	-0,47%	-0,001	-0,47%	
	VrkMilch		-1730	-0,60%	-0,003	-0,60%	
	AndRind		-1702	-1,67%	-0,012	-1,67%	
	Schwein		-1022	-0,30%	-0,001	-0,30%	
Wärmerück- gewinnung	Ackbau		-398	-0,33%	0,000	-0,33%	
	VrkMilch		-90	-0,03%	0,000	-0,03%	
	AndRind		0	0,00%	0,000	0,00%	
	Schwein		-1408	-0,41%	-0,002	-0,41%	
	Geflügel		-7804	-1,73%	-0,007	-1,73%	
Tierhaltung	Erhöhung der Anzahl Laktationen	Ackbau		-1059	-0,85%	-0,001	-0,81%
		VrkMilch		-14355	-4,88%	-0,019	-3,63%
		AndRind		-2026	-1,90%	-0,009	-1,18%

	Massnahme	Betrieb	Variante	absolut		Pro MJ vE	
Pflanzenproduktion		Schwein		-7011	-2,04%	-0,006	-1,63%
	Milch zert. / ohne Soja	Ackbau	ohne Soja	-15,95	-0,01%	0,000	-0,01%
		Ackbau	100% certif. Soja	-168,67	-0,14%	0,000	-0,14%
		VrkMilch	ohne Soja	-275,26	-0,10%	0,000	-0,10%
		VrkMilch	100% certif. Soja	-4110,67	-1,43%	-0,007	-1,43%
		AndRind	ohne Soja	-37,58	-0,04%	0,000	-0,04%
		AndRind	100% certif. Soja	-397,93	-0,38%	-0,003	-0,38%
		Schwein	ohne Soja	-131,74	-0,04%	0,000	-0,04%
		Schwein	100% certif. Soja	-2043,09	-0,60%	-0,002	-0,60%
	Güllesiloabdeckung	Ackbau		60	0,05%	0,000	0,05%
		VrkMilch		699	0,24%	0,001	0,24%
		AndRind		165	0,16%	0,001	0,16%
		Schwein		-8	0,00%	0,000	0,00%
	Saubere Laufflächen	Ackbau		30	0,02%	0,000	0,02%
		VrkMilch		328	0,11%	0,001	0,11%
		AndRind		101	0,09%	0,001	0,09%
		Schwein		122	0,04%	0,000	0,04%
	Phasenfütterung	Ackbau		-404	-0,33%	0,000	-0,33%
		VrkMilch		-592	-0,20%	-0,001	-0,20%
		AndRind		0	0,00%	0,000	0,00%
		Schwein		-12934	-3,94%	-0,015	-3,94%
	Parzellen-spezifische Düngebilanz	Ackbau		-6730	-5,18%	-0,006	-5,18%
		VrkMilch		-3090	-1,05%	-0,005	-1,05%
		AndRind		-2823	-2,62%	-0,019	-2,62%
		Schwein		-2753	-0,80%	-0,003	-0,80%
	Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes	Ackbau		-119	-0,10%	0,000	-0,10%
		Ackbau		-695	-0,56%	-0,001	-0,56%
		VrkMilch		-3880	-1,31%	-0,007	-1,31%
		VrkMilch		-6859	-2,32%	-0,012	-2,32%
		AndRind		-3090	-2,93%	-0,021	-2,93%
		AndRind		-5089	-4,78%	-0,035	-4,78%
		Schwein		-6299	-1,84%	-0,007	-1,84%
Schwein			-7926	-2,31%	-0,009	-2,31%	
	Ackbau	10% Red	-2587	-2,09%	-0,001	-1,08%	
	Ackbau	20% Red	-4905	-3,96%	-0,002	-1,78%	

	Massnahme	Betrieb	Variante	absolut		Pro MJ vE		
	Reduktion des mineralischen N-Düngers	VrkMilch	10% Red	-1351	-0,46%	-0,002	-0,38%	
		VrkMilch	20% Red	-1642	-0,56%	-0,002	-0,39%	
		AndRind	10% Red	-1596	-1,50%	-0,010	-1,37%	
		AndRind	20% Red	-1760	-1,65%	-0,010	-1,38%	
		Schwein	10% Red	3665	1,07%	0,004	1,10%	
		Schwein	20% Red	3503	1,02%	0,004	1,09%	
	Schleppschlauch	Ackbau			-277	-0,22%	0,000	-0,22%
		VrkMilch			-2561	-0,87%	-0,004	-0,87%
		AndRind			-373	-0,35%	-0,003	-0,35%
		Schwein			-1289	-0,38%	-0,002	-0,38%
	Gärresten	Ackbau			-7573	-6,11%	-0,007	-6,11%
		VrkMilch			-817	-0,28%	-0,001	-0,28%
		AndRind			-3460	-3,25%	-0,024	-3,25%
		Schwein			-25305	-7,38%	-0,029	-7,38%
	Gründüngung	Ackbau			1179	1,01%	0,001	1,01%
		VrkMilch			1669	0,59%	0,003	0,59%
		AndRind			547	0,54%	0,004	0,54%
		Schwein			1337	0,39%	0,002	0,39%
	Sonstige	Agroforstsystem	Ackbau					
			VrkMilch			-5304	-4,30%	-0,002
AndRind					-804	-0,28%	-0,028	-5,46%
Schwein					-446	-0,43%	-0,109	-15,21%
Pflanzkohle		Ackbau						
		VrkMilch						
		AndRind			-1993,12	-1,87%	-0,014	-1,87%
		Schwein						

10.5 Gehalt an verdaulicher Energie (vE) der berücksichtigten landwirtschaftlichen Produkte

Produkt	Gehalt vE (MJ / kg TS)
Winterweizen (kg)	10.67
Sommerweizen (kg)	10.67
Roggen (kg)	7.4
Korn/Dinkel (kg)	7.25
Wintergerste (kg)	2.53
Sommergerste (kg)	2.53
Winterhafer (kg)	4.01
Sommerhafer (kg)	4.01
Wintertriticale (kg)	2.17
Sommertriticale (kg)	2.17
weitere Getreide (kg)	4.93
Körnermais (kg)	2.27
Übriger Körner- und Kolbenmais (CCM, kg)	1.5
Silomais, Grünmais, anderer Ganzpflanzenmais (kg TS)	2.09
Kartoffeln (kg)	3.17
Zuckerrüben für Zucker (kg)	1.15
Futterrüben (kg TS)	2.4
Raps (kg)	15.86
Sojabohnen (kg)	7.94
Sonnenblumen (kg)	16
Übrige Ölsaaten (kg)	13.1
Hanf (kg)	0
Ackerbohnen (kg)	2.27
Eiweisserbsen (kg)	2.21
Übrige Körnerleguminosen (Verfütterung, kg)	2.24
Tabak (kg)	0
Andere einjährige und mehrjährige Nachwachsende Rohstoffe (kg)	0
Übrige einjährige Ackerkulturen (kg)	8.13
Freiland- und Freiland-Konservengemüse (kg)	1.09
Gemüse- u.a. Spezialkulturen in Gewächshäusern oder gesch. Anbau mit und ohne festes Fundament (kg)	0.66
Gärtnerische und übrige Kulturen in Gewächshäusern (kg)	0
Reben (kg)	2.86
Hochstammobst (kg)	2.14
Äpfel (aus Obstanlagen, kg)	2.28
Birnen (aus Obstanlagen, kg)	2.33
anderes Kernobst (aus Obstanlagen, kg)	1.62

Produkt	Gehalt vE (MJ / kg TS)
Steinobst (aus Obstanlagen, kg)	2.33
weiteres Obst (aus Obstanlagen, kg)	2.14
Gewürz- und Medizinalpflanzen (ein- und mehrjährig, kg)	1.09
Einjährige gärtnerische Freilandkulturen (Setzlinge, Blumen, kg)	0
Erdbeeren (kg)	1.36
weitere Beeren (kg)	1.51
Mehrjährige Spezialkulturen (kg)	2.14
Gärtnerische Freilandkulturen: Baumschulen, Zierpflanzen (kg)	0
Übrige Flächen mit Dauerkulturen (kg)	2.14
Kunstwiesen ohne ext. genutzte Wiesen auf stillg. Ackerl. (kg TS)	2.17
Extensiv genutzte Wiesen auf stillg. Ackerl. (kg TS)	2.17
Extensive Wiesen ohne Weiden (kg TS)	2.17
Wenig intensive Wiesen ohne Weiden (kg TS)	2.17
Andere Dauerwiesen (kg TS)	2.17
extensiv genutzte Weiden (kg TS)	2.17
Waldweiden (ohne bewaldete Fläche, kg TS)	2.17
Weiden (kg TS)	2.17
Weiden für Schweine (kg TS)	2.17
Heuwiesen im Sömmerungsgebiet (keine Ökofläche, kg TS)	2.17
Heuwiesen im Sömmerungsgebiet (extensive Wiese, kg TS)	2.17
Heuwiesen im Sömmerungsgebiet (wenig intensive Wiese, kg TS)	2.17
Übrige Grünfläche (kg TS)	2.17
Zwischenfutter, nicht überwinternd (kg TS)	2.17
Zwischenfutter, überwinternd (kg TS)	2.17
Getreidestroh (kg TS)	0
Dürrfutter (ohne Trockengras, kg TS)	1.92
Grassilage (kg)	0.62
Trockengras (Grastrocknungsanl., kg TS)	1.92
Grünfutter (kg)	0.43
Milch und übrige tierische Produkte	
Kuhmilch (kg)	2.79
Schafsmilch (kg)	4.03
Schafswolle (kg)	0
Ziegenmilch (kg)	2.81
Pferdemilch (kg)	
Eier (Stk)	6.46
Fleisch	
<i>Milchvieh und Aufzucht</i>	
Kühe	2.9

Produkt	Gehalt vE (MJ / kg TS)
Rinder über 2-jährig (kg LG)	3.14
Rinder 1 bis 2-jährig (kg LG)	3.14
Stiere über 2-jährig (kg LG)	3.2
Stiere 1 bis 2-jährig (kg LG)	3.2
Rinder, Stiere und Ochsen über 4 Monate (nur Mast, kg LG)	3.2
Jungvieh zur Zucht, 4 bis 12 Monate alt, w. (kg LG)	3.5
Jungvieh zur Zucht, 4 bis 12 Monate alt, m. (kg LG)	3.5
Aufzuchtälber unter 4 Monate alt, w. (kg LG)	3.5
Aufzuchtälber unter 4 Monate alt, m. (kg LG)	3.5
Kälber zur Grossviehmast unter 4 Monate (kg LG)	3.5
Mastälber (kg LG)	3.5
<i>Mutter- und Ammenkuhhaltung</i>	
Mutter- und Ammenkühe (ohne Kälber, kg LG)	2.66
Rinder über 2-jährig (kg LG)	6.04
Rinder 1 bis 2-jährig (kg LG)	6.04
Stiere über 2-jährig (kg LG)	6.04
Stiere 1 bis 2-jährig (kg LG)	6.04
Kälber von Mutter und Ammenkühen, unter 1-jährig (kg LG)	3.38
<i>Grossviehmast</i>	
Rinder, Stiere und Ochsen über 4 Monate (kg LG)	6.04
Kälber zur Grossviehmast unter 4 Monate (kg LG)	3.5
<i>Kälbermast</i>	
Kälbermast (kg LG)	3.5
<i>Pferdehaltung</i>	
Säugende Stuten (kg LG)	2.66
Fohlen bei Fuss (kg LG)	3.5
Andere Pferde über 3-jährig (kg LG)	3.14
Andere Fohlen unter 3-jährig (kg LG)	3.5
Maultiere und Maulesel jeden Alters (kg LG)	3.14
Ponys und Kleinpferde jeden Alters (kg LG)	3.14
Esel jeden Alters (kg LG)	3.14
<i>Schafhaltung</i>	
Schafe gemolken (kg LG)	3.74
Andere weibliche Schafe über 1-jährig (kg LG)	3.74
Widder über 1-jährig (kg LG)	3.74
Jungschafe unter 1-jährig (weiblich und männlich, kg LG)	3.74
<i>Ziegenhaltung</i>	
Ziegen gemolken (kg LG)	3.74
Andere weibliche Ziegen über 1-jährig (kg LG)	3.74

Produkt	Gehalt vE (MJ / kg TS)
Ziegenböcke über 1-jährig (kg LG)	3.74
Jungziegen unter 1-jährig (weiblich und männlich, kg LG)	3.74
Schweine	
Säugende Zuchtsauen (kg LG)	11.59
Nicht säugende Zuchtsauen über 6 Monate alt (kg LG)	11.59
Zuchteber (kg LG)	11.59
Abgesetzte Ferkel (kg LG)	11.59
Saugferkel (kg LG)	11.59
Remonten bis 6 Monate und Mastschweine (kg LG)	11.59
Abgesetzte Ferkel (kg LG)	11.59
Remonten bis 6 Monate und Mastschweine (kg LG)	11.59
Hühner	
Zuchthennen und -hähne (Lege oder Mastlinie, kg LG)	2.02
Legehennen (kg LG)	2.02
Junghennen, Junghähne und Küken (kg LG)	2.02
Mastpoulets jeden Alters (kg LG)	2.02
Truten jeden Alters (kg LG)	2.02
übriges Nutzgeflügel (kg LG)	2.02
<i>Andere Raufutterverzehrende Nutztiere</i>	
Bisons über 3-jährig (kg LG)	3.2
Bisons unter 3-jährig (kg LG)	3.2
Damhirsche jeden Alters (kg LG)	3.14
Rothirsche jeden Alters (kg LG)	3.14
Lamas über 2-jährig (kg LG)	3.14
Lamas unter 2-jährig (kg LG)	3.14
Alpakas über 2-jährig (kg LG)	3.14
Alpakas unter 2-jährig (kg LG)	3.14
Andere Raufutterverzehrende Nutztiere, übrige (kg LG)	3.14
<i>Übrige</i>	
Andere Tiere (kg LG)	3.7



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope