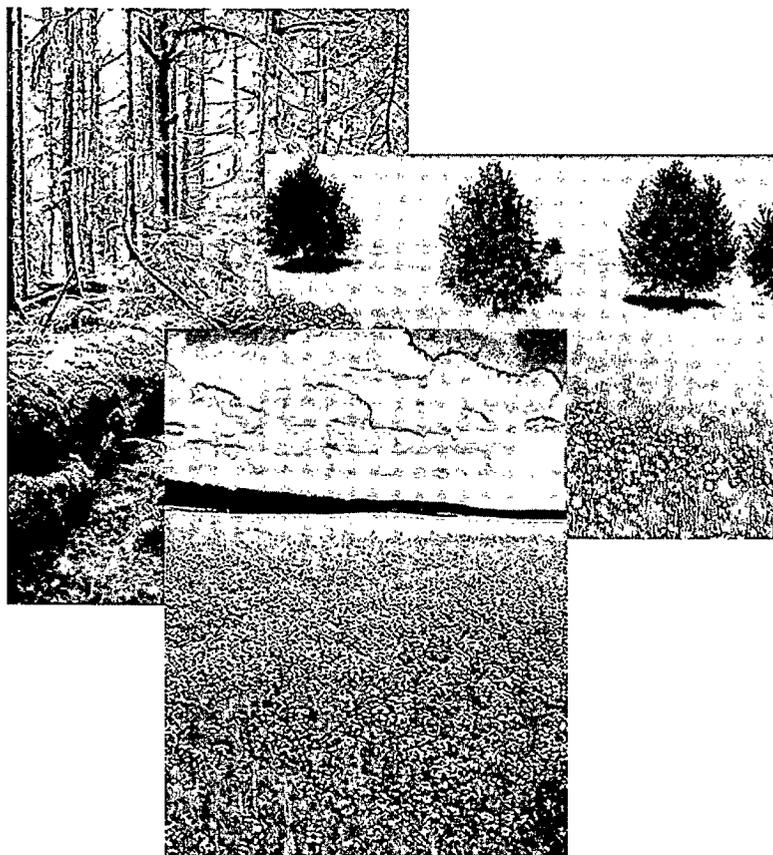




FAT

Ökologische und ökonomische Bewertung von Bioenergieträgern

52



**Lena Heinzer
Gérard Gaillard**

**Dunja Dux
Cornelia Stettler**

Lena Heinzer, FAT
Gérard Gaillard*
Dunja Dux, FAT
Cornelia Stettler, FAT

* Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL),
CH-8046 Zürich

Ökologische und ökonomische Bewertung von Bioenergieträgern

Vergleichende Untersuchungen von Stückholzheizung,
Rapsmethylester und Fernwärme aus Heu

2000

Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft
und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG

Direktor: Prof. Dr. Walter Meier

Verdankung

Diese Arbeit wurde durch die finanzielle Unterstützung des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft im Rahmen des EU-Projektes „Bioenergy for Europe: Which ones fit best? A comparative analysis for the Community“ FAIR V PL 98 3832 ermöglicht.

Vorwort

Die Energieproblematik in den entwickelten Ländern ist wohlbekannt: Der Energieverbrauch ist zu hoch und der allergrösste Teil der Energie stammt aus nichterneuerbaren fossilen Quellen, die früher oder später erschöpft sein werden. Dabei ist die Frage, ob dies in fünfzig, hundert oder dreihundert Jahren der Fall sein wird, von sekundärer Bedeutung.

Es ist deshalb oberstes Gebot unserer Zeit, mit Energie sparsam umzugehen, sie rationell und sinnvoll einzusetzen. Wenn dieser Anstrengung auch heute die höchste Priorität zukommt, können wir damit das Ende der fossilen Ressourcen lediglich hinausschieben. Für eine langfristige, nachhaltige Lösung müssen wir andere, erneuerbare Energiequellen suchen. Neben Wasser, Wind und Sonne bietet sich dafür vor allem die Biomasse an. Diese Situation wurde erkannt, und in der in- und ausländischen Politik sind Anstrengungen sichtbar, die energetische Nutzung von Biomasse zu fördern. Beispielhaft ist diesbezüglich Österreich zu erwähnen, einige Länder der Bundesrepublik Deutschland, aber auch die nordischen Staaten, allen voran Dänemark und Schweden. In der Schweiz gab es das Programm Energie 2000, das nun vom Nachfolgeprogramm EnergieSchweiz abgelöst wird. Und das Bundesamt für Energie unterstützt bis 2003 im Rahmen der Bewältigung der Schäden des Sturms Lothar neue Projekte zur nachhaltigen Nutzung von Energieholz.

Welche Art von Biomasse und welche Nutzungstechnik aber ist wohl die beste, die effizienteste, die sinnvollste? Welche soll gefördert werden, welche eher nicht? Die Antwort wird immer eine politische sein, es wird keine Ja-/Nein-Entscheidung geben. Umso wichtiger ist, dass sich die Entscheidungsträger auf seriöse, objektive, umfassende Grundlagen abstützen können. Es war das Ziel des EU-Projektes „Bioenergy for Europe: Which ones fit best?“, an dem sich auch die FAT beteiligte, solche Unterlagen für möglichst vielfältige Bioenergieträger Europas zu erarbeiten. In diesem Bericht sind in Anlehnung ans EU-Projekt Ergebnisse und Beurteilungsgrundlagen von drei Bioenergieträgern, die in der Schweiz relevant sind, speziell für unsere Bedingungen zusammengestellt, neu gerechnet und übersichtlich dargestellt. Die bekannte, aber im Heizöl-Zeitalter wenig angewendete Möglichkeit der Wärmegewinnung aus der Verbrennung von Holz ist wohl die naheliegendste Variante. Dann aber wurde im Grasland Schweiz auch die Verbrennung von Gras bzw. Heu untersucht, die ebenfalls technisch weitgehend abgeklärt ist. Und als Möglichkeit der Herstellung und Verwendung von Biotreibstoff bot sich der technisch in jeder Hinsicht bestens untersuchte und – hauptsächlich im Ausland – bereits eingeführte Rapsmethylester „Biodiesel“ an.

Eine Gesamtbeurteilung soll sich auf möglichst viele Aspekte aller Art abstützen können. Die Grundvoraussetzung, dass die untersuchten Bioenergie-Varianten tatsächlich technisch machbar und funktionstüchtig sind, muss durch die Auswahl sichergestellt werden. Nur so kann die Relevanz der verwendeten, im Praxiseinsatz erhobenen Daten gewährleistet sein. Einen bedeutenden Stellenwert haben selbstredend die Ökobilanzen und die Wirtschaftlichkeitsrechnungen der untersuchten Energieträger. Bekanntlich sind für diese Betrachtungen die Definition der Funktion und damit der funktionellen Einheit, die Wahl der Systemgrenzen und die detaillierte Beschreibung der Untersuchungssysteme von entscheidender Wichtigkeit. Auf diesbezügliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit wurde allergrössten Wert ge-

legt. Schliesslich gehört auch eine Darstellung der politischen und gesetzlichen Analyse zu den Grundlagen der Beurteilung. Vervollständigt würde die Betrachtung mit weiteren Aspekten wie beispielsweise der Wirkung auf das Landschaftsbild und die belebte Umwelt, der Sozialverträglichkeit oder auch dem Komfort der praktischen Anwendung. Solche und ähnliche Kriterien können aber immer nur sehr subjektiv behandelt werden; auch die viel diskutierte Monetarisierung aller Auswirkungen vollzieht bereits eine klare Gewichtung der Ergebnisse, die jedoch in dieser Studie bewusst der Leserschaft überlassen werden soll.

Ulrich Wolfensberger

Fachbereichsleiter Pflanze + Energie, FAT

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	3
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
1. ZUSAMMENFASSUNG	11
RÉSUMÉ	13
SUMMARY	14
2. EINFÜHRUNG	16
2.1 Hintergrund der Studie	16
2.2 Ziel und Zielgruppe	16
2.3 Aufbau der Studie	17
2.4 Auswahl der zu untersuchenden Bioenergieträger	17
3. ÖKOBILANZ	19
3.1 Methode Ökobilanz	19
3.1.1 Funktionen	19
3.1.2 Funktionelle Einheit	20
3.1.3 Vergleichssysteme	20
3.1.4 Systemgrenzen	21
3.1.5 Beschreibung der Untersuchungssysteme	22
3.1.6 Datengrundlage	28
3.1.7 Allokationsverfahren	30
3.1.8 Direkte Emissionen	33
3.1.9 Wirkungskategorien und Wirkungsfaktoren	43
3.1.10 Auswertungskonzept	44
4. RESULTATE UND DISKUSSION	45
4.1 Bewertung nach Wirkungskategorien	45
4.2 Sensitivitätsanalysen	55
4.3 Zusammenfassung und Interpretation	61
4.4 Vergleich mit anderen Studien	63
5. WIRTSCHAFTLICHE ANALYSE	66
5.1 Methode	66
5.1.1 Einleitung	66
5.1.2 Annahmen	66
5.2 Resultate und Diskussion	68
5.2.1 Wirtschaftlichkeit Stückholz	68
5.2.2 Wirtschaftlichkeit Rapsmethylester	69
5.2.3 Wirtschaftlichkeit Fernwärme aus Heu	71
5.3 Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit	74
6. POLITISCHE UND GESETZLICHE ANALYSE	75
6.1 Methode	75
6.2 Resultate	75
6.3 Diskussion	78
7. ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG	79
8. LITERATUR UND ABKÜRZUNGEN	81
8.1 Literatur	81
8.2 Abkürzungen	87
9. ANHANG	90

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Bioenergieträger und ihre Bedeutung in der Schweiz – Hintergründe zur Wahl der untersuchten Biomassen	18
Tabelle 2:	Untersuchte Bioenergieträger und ihre Vergleichssysteme. Die Herleitung der Energiemengen findet sich in Kap. 3.1.5.	20
Tabelle 3:	Berechnung der Allokation für Rapsöl und Rapskuchen	32
Tabelle 4:	Berechnung der Allokation zwischen Weizenkörnern und Weizenstroh	32
Tabelle 5:	NH ₃ -Emissionsfaktoren für die Ausbringung je Düngerart bzw. pro Hektare und Jahr	34
Tabelle 6:	Potentielle mikrobielle Nitratbildung (P _M) in kg NO ₃ ⁻ -N pro ha und Monat je Kultur in einem Boden mit maximal 2 % Humusgehalt und höchstens 25 % Tongehalt	35
Tabelle 7:	Potentielle Stickstoffaufnahme (P _K) in kg NO ₃ ⁻ -N pro ha je Monat und Kultur	36
Tabelle 8:	Potentielle N-Auswaschungsgefahr der Düngergaben (P _D) je Kultur und Monat in Prozent pro kg N _{löslich} im Dünger	36
Tabelle 9:	PO ₄ ³⁻ -Eintrag in die Oberflächengewässer durch Erosion	38
Tabelle 10:	Medianwerte für Schwermetalleinträge aus Hofdüngern in den Boden	38
Tabelle 11:	Medianwerte für Schwermetalleinträge aus Ammonsalpeter in den Boden....	39
Tabelle 12:	Medianwerte für Schwermetalleinträge durch Aschegemisch von der Heuverbrennung	39
Tabelle 13:	Medianwerte der jährlichen atmosphärischen Ablagerung von Schwermetallen im ländlichen Raum und in der Agglomeration	39
Tabelle 14:	Austrag von Schwermetallen in mg/kg TS Erntegut je Kultur	39
Tabelle 15:	Schwermetallausträge durch Erosion je Kultur pro ha und Jahr	40
Tabelle 16:	Emissionen pro kg Holz waldfrisch	41
Tabelle 17:	Verbrennungsemissionen von Diesel und Rapsmethylester in Traktoren	42
Tabelle 18:	Verbrennungsemissionen von Motormäher, Motorsäge, Mähdrescher, Brennholzautomat und Forwarder	42
Tabelle 19:	Emissionen stationärer Verbrennungsanlagen je Einheit eingesetzten Brennstoffes	43
Tabelle 20:	Die in der Ökobilanz berücksichtigten Umweltwirkungen und die Quellen der entsprechenden Charakterisierungsfaktoren	44

Tabellè 21:	Beiträge der einzelnen Prozesse in der Energieträgerherstellung und -verbrennung an die gesamte Umweltbelastung jeder Wirkungskategorie.....	54
Tabelle 22:	Werte der einzelnen Szenarien für die Wirkungskategorien der Eutrophierung. Einheit: g PO ₄ -Äqu./MJ Nutzenergie.....	60
Tabelle 23:	Beurteilungsschema eines Bioenergieträgers-Szenarios im Verhältnis zum jeweiligen Referenzszenario für die untersuchten Wirkungskategorien (nach Wolfensberger und Dinkel 1997)	61
Tabelle 24:	Überblick über die Bewertung der Bioenergieträger verglichen mit deren fossilen Referenzenergien. Einstufung nach Tabelle 23. Bewertungen in Klammern können nicht berechnet werden, da eine Zahl negativ ist.	62
Tabelle 25:	Vergleich der Resultate der Wirkungskategorien verschiedener Ökobilanzen von RME. (Bedeutung der Zeichen: + Vorteil für RME; - Nachteil für RME; ± RME und Diesel ungefähr gleich; * kein Resultat für diese Wirkungskategorie).....	64
Tabelle 26:	Vergleich der Resultate verschiedener Ökobilanzen von Fernwärme aus Heu. (Bedeutung der Zeichen: + Vorteil für Bioenergieszenario; - Nachteil für Bioenergieszenario ; ± beide Energieträger ungefähr gleich; * kein Resultat für diese Wirkungskategorie).....	65
Tabelle 27:	Übersicht über die Grundannahmen für die wirtschaftliche Analyse	67
Tabelle 28:	Wirtschaftliche Vergleichszahlen in CHF zwischen den drei Heizsystemen Holz, Öl und Gas für eine Wärmemenge von 35 700 kWh pro Jahr (Detailberechnungen siehe Anhang, 1) Rinaldi und Herger 1998	68
Tabelle 29:	Deckungsbeiträge in CHF pro ha und Jahr für den Anbau von Raps und SM 210 versus Rotationsbrache (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 45, Tabelle 46 und Tabelle 47)	69
Tabelle 30:	Wirtschaftliche Kennzahlen der RME-Herstellung in CHF bei einem Ankaufspreis von CHF 35.-/dt Raps. Eine Hektare ergibt 30 dt Raps, 1113 Liter RME bzw. 36 840 MJ Heizwert (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 48).	70
Tabelle 31:	Staatsausgaben je Vergleichssystem in CHF pro ha	71
Tabelle 32:	Deckungsbeiträge für den Anbau von wenig intensiver Naturwiese und Extensivwiese pro Jahr und Hektare (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 52 und Tabelle 53)	72
Tabelle 33:	Wirtschaftliche Kennzahlen in CHF für die Fernwärme aus Heu verglichen mit Ölheizung pro Jahr. Einheit: 81 700 MJ Wärme bzw. 1 ha Heu pro Jahr (Berechnungen siehe Anhang, Tabelle 54, Tabelle 55).	72
Tabelle 34:	Staatsaufwendungen je Vergleichssystem. Einheit: 81 700 MJ Wärme bzw. 1 ha Heu pro Jahr.....	73

Tabelle 35:	Zusammenfassung der wichtigsten gesetzlichen Regelungen und Normen in der Schweiz bezüglich Bioenergieträger	75
Tabelle 36:	Gewichtungsfaktoren je Emission und Wirkungskategorie (Erläuterungen siehe 3.1.9)	90
Tabelle 37:	Produktionsinventar für die RME-Gewinnung aus Raps	94
Tabelle 38:	Produktionsinventar für Rotationsbrache mit Energiebereitstellung durch Diesel	98
Tabelle 39:	Produktionsinventar für Heizwärme aus Holz	100
Tabelle 40:	Produktionsinventar für Heizwärme aus Gas mit Holzverrottung im Wald....	101
Tabelle 41:	Produktionsinventar für Heizwärme aus Heizöl mit Holzverrottung im Wald	101
Tabelle 42:	Produktionsinventar für Fernwärme aus der Verbrennung von Heu einer wenig intensiven Naturwiese	102
Tabelle 43:	Produktionsinventar für Heizwärme aus Heizöl und Heu von einer Extensivwiese	104
Tabelle 44:	Produktionsinventar für Belüftungsheu und Weizenstroh	105
Tabelle 45:	Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages für den Rapsanbau	108
Tabelle 46:	Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages für den Anbau von SM 210	109
Tabelle 47:	Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages der Rotationsbrache	109
Tabelle 48:	Detaillierte Kostenberechnungen für die RME-Produktion	110
Tabelle 49:	Detaillierte Kostenberechnungen für das System Holzheizung	111
Tabelle 50:	Detaillierte Kostenberechnungen für das System Ölheizung	112
Tabelle 51:	Detaillierte Kostenberechnungen für das System Gasheizung	113
Tabelle 52:	Detaillierte Kostenberechnung des Deckungsbeitrags der wenig intensiven Naturwiese	114
Tabelle 53:	Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrags der Extensivwiese	115
Tabelle 54:	Detaillierte Kostenberechnung für die Produktion von Fernwärme aus Gras	116
Tabelle 55:	Detaillierte Kostenberechnung des Systems Extensioheu/Ölheizung	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 ff.....	19
Abbildung 2: Schema der Systemgrenzen	21
Abbildung 3: Untersuchungssystem Rapsmethylester (linke Seite) verglichen mit Rotationsbrache und Diesel (rechte Seite)	25
Abbildung 4: Untersuchungssystem Stückholz (linke Seite) verglichen mit Holzverrottung und Heizöl resp. Gas (rechte Seite).....	26
Abbildung 5: Untersuchungssystem Fernwärme aus Heu (linke Seite) verglichen mit Extensivwiese und Heizöl (rechte Seite)	27
Abbildung 6: Wirkungskategorie "Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung mit unterem Heizwert nach Frischknecht et al. 1996).....	46
Abbildung 7: Wirkungskategorie "Treibhauspotential" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Albritton et al. 1995 und Prather et al. 1995).....	47
Abbildung 8: Wirkungskategorie "Ozonbildung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Hauschild und Wenzel 1998).....	48
Abbildung 9: Wirkungskategorie "Versauerung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Hauschild und Wenzel 1998).....	49
Abbildung 10: Wirkungskategorie "Gesamteutrophierung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Lindfors et al. 1995).....	50
Abbildung 11: Wirkungskategorie "Humantoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997):	51
Abbildung 12: Wirkungskategorie "Aquatische Ökotoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997).....	52

Abbildung 13: Wirkungskategorie "Terrestrische Ökotoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997).	53
Abbildung 14: Berechnung der Wirkungsbilanz unter der Berücksichtigung von zwei Varianten der Holzverrottung (A: Emissionen aus der Holzverrottung. B: nur biogenes CO ₂). Dargestellt sind nur die Wirkungskategorien (Treibhauspotential, Ozonbildung, Versauerung, Gesamteutrophierung), die durch die unterschiedliche Verrechnung der Gasemissionen eine deutliche Veränderung erfahren.	56
Abbildung 15: Berechnung der Wirkungsbilanz unter Berücksichtigung von zwei Varianten der Holzverrottung (A: Emissionen aus der Holzverrottung. B: nur biogenes CO ₂). Dargestellt sind die Toxizitäten (Jolliet und Crettaz 1997), die das Resultat aufgrund der Schwermetalle verändern.....	57

1. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie analysiert den Einsatz dreier für die Schweiz relevanter Bioenergieträger bezüglich ihrer Verträglichkeit mit der Umwelt, ihrer Wirtschaftlichkeit und ihrer politischen und gesetzlichen Stellung:

- Bereitstellung von Wärme mittels einer Stückholzheizung
- Fernwärme aus der Verbrennung von Heu
- Rapsmethylester als Treibstoff für Dieselmotoren.

Mit Hilfe von Ökobilanzen gemäss ISO 14040 ff. wird abgeklärt, ob die Herstellung und Verwendung der ausgewählten Bioenergieträger umweltfreundlicher ist als die Herstellung und Verwendung vergleichbarer fossiler Energieträger (konventionelle Ölheizung und Gasheizung bzw. Dieseltriebstoff). Bei den fossilen Energien wird die alternative, nichtenergetische Verwendung der Biomasse mitberücksichtigt. Die betrachteten Umweltkategorien sind: Ausschöpfung nichterneuerbarer Energieressourcen, Treibhauspotential, Ozonbildung, Versauerung, Gesamteutrophierung, Humantoxizität, aquatische und terrestrische Toxizität. Dabei sind die wohl wichtigsten politischen Argumente für die Förderung der Bioenergieträger die Reduktion des Treibhauseffektes und die Schonung der endlichen Energieressourcen. Bei diesen beiden Umweltwirkungen sind die drei untersuchten Bioenergieträger als günstig bis sehr günstig einzustufen und den fossilen Energieträgern eindeutig vorzuziehen. Auch für die Verringerung der Ozonbildung sind alle drei Bioenergieträger vorteilhafter. In den restlichen Umweltkategorien fallen die Resultate je nach Bioenergieträger positiv oder negativ aus.

Die untersuchten Bioenergieträger schneiden unter den für die Jahre 1998-1999 gültigen Annahmen wirtschaftlich schlecht ab. Bei der Stückholzheizung sind sowohl die Brennstoff- als auch die Betriebskosten deutlich höher als bei den fossilen Alternativen Öl und Gas. Ab einem Heizölpreis von CHF 0.64/l und einem Erdgaspreis von CHF 0.1/kWh ist die Holzheizung mit den Alternativen konkurrenzfähig. Wie die Praxis zeigt, lohnt sich hingegen die RME-Produktion für den Hersteller. Das Problem bildet dabei der Rapsanbau, der beim angenommenen tiefen Non-Food Rapspreis zwar die direkten Kosten deckt, aber weniger lukrativ als andere Kulturen ist. Die Nettokosten der Fernwärme aus Heu sind dank der Verarbeitungsbeiträge nur um CHF 0.02/kWh höher als die der Ölheizung und damit für den Verbraucher ähnlich teuer. Durch den Anstieg des Heizölpreises im Jahre 2000 ist nicht nur die Fernwärme vorteilhafter geworden (die Kostengleichheit liegt bei CHF 0.47/l Heizöl), sondern auch die Stückholzheizung kann als konkurrenzfähig eingestuft werden (Heizölpreis, Stand Oktober 2000: CHF 0.63/l).

Die Abklärung der politischen und gesetzlichen Verhältnisse hat gezeigt, dass für einen weiteren Anstieg der erneuerbaren Energien der Transparenz und Konsistenz in der Politik sowie den finanziellen Aspekten unbedingt mehr Beachtung geschönkt werden muss. Die Erleichterungen und Unterstützungen dürfen nicht nur Pilot- und Demonstrationsanlagen vorbehalten bleiben.

Da Stückholzheizung, Rapsmethylester und Fernwärme verschiedene Energiezwecke erfüllen, sind alle drei untersuchten Bioenergieträger förderungswürdig, zumal sie in den am meisten diskutierten Kriterien (Verminderung des Treibhauseffektes und Ressourcenschonung)

sehr viel vorteilhafter als ihre Referenzenergien sind. Ausserdem lässt sich mit Bioenergieträgern die Abhängigkeit von Ölimporten verringern und die Wertschöpfung im eigenen Land halten. Der Anstieg der Heiz- und Dieselölpreise innert weniger Monate im Jahre 2000 hat gezeigt, dass sich die Konkurrenzfähigkeit der Bioenergieträger sehr schnell verbessern kann.

Résumé

Evaluation économique et écologique des sources d'énergie biologiques

La présente étude analyse l'emploi de trois sources d'énergie biologiques importantes en Suisse, en ce qui concerne leur comptabilité environnementale, leur rentabilité et leur profil politique et légal:

- production de chaleur par chauffage au bois déchiqueté,
- chauffage à distance par combustion de foin,
- ester méthylique de colza utilisé comme carburant pour les moteurs Diesel.

Il s'agit de déterminer à l'aide des écobilans selon les normes ISO 14040 et suivantes si la production et l'utilisation des sources d'énergie biologiques mentionnées est plus écologique que la production et l'utilisation des sources d'énergie fossiles comparables (chauffage conventionnel au mazout et au gaz; gazole). En ce qui concerne les énergies fossiles, l'étude tient compte de l'emploi alternatif, non énergétique de la biomasse. Les catégories environnementales considérées sont les suivantes: épuisement des sources d'énergie non renouvelables, effet de serre potentiel, formation d'ozone, acidification, eutrophisation générale, toxicité pour l'homme, toxicité aquatique et terrestre, sachant que les principaux arguments politiques pour la promotion des sources d'énergie biologiques portent sur la réduction de l'effet de serre et la préservation des sources d'énergie non renouvelables. Concernant ces deux impacts environnementaux, les trois sources d'énergie biologiques étudiées peuvent être considérées comme favorables à très favorables et doivent sans aucun doute être préférées aux sources d'énergie fossiles. Sur le plan de la réduction de la formation d'ozone, les trois sources d'énergie étudiées s'avèrent également avantageuses. Enfin, dans les autres catégories environnementales, les résultats sont tantôt positifs, tantôt négatifs en fonction de la source d'énergie considérée.

D'un point de vue économique et sur la base des données disponibles pour les années 1998-1999, on constate que les sources d'énergie biologiques étudiées ne donnent pas de bons résultats. En ce qui concerne le chauffage au bois déchiqueté, le coût de la matière première, mais aussi les coûts d'opération sont nettement supérieurs à ceux des alternatives fossiles, que sont le mazout et le gaz. Le chauffage au bois ne devient concurrentiel que lorsque les prix du mazout atteignent et dépassent les CHF 0.64/l et ceux du gaz naturel les CHF 0.17/kWh. En revanche, comme le montre la pratique, la production d'ester méthylique de colza s'avère rentable. A ce niveau, seule la culture de colza pose problème. Etant donné le prix assez bas du colza non destiné à la consommation, les coûts de production sont certes couverts, mais la culture du colza demeure moins lucrative que les autres cultures. Les coûts nets du chauffage à distance par combustion de foin ne représentent que CHF 0.02/kWh de plus que pour le chauffage au mazout, et ce, grâce aux contributions de transformation. Pour le consommateur, ces deux énergies ont donc un coût équivalent. Suite à la hausse du prix du mazout en l'an 2000, non seulement le chauffage à distance est devenu plus avantageux (les coûts sont équivalents lorsque le prix du mazout est de CHF 0.47/l), mais le chauffage au bois est lui aussi devenu concurrentiel (prix du mazout, situation en octobre 2000: CHF 0.63/l).

La définition plus précise du cadre politique et légal a montré que pour promouvoir les énergies renouvelables, il était impératif d'accorder plus d'importance à la transparence et à la consistance au niveau politique, ainsi qu'aux aspects financiers. Les allègements fiscaux et les aides ne doivent pas être réservés uniquement aux installations pilotes et aux installations de démonstration.

Etant donné que le chauffage au bois, l'ester méthylique de colza et le chauffage à distance remplissent des objectifs énergétiques différents, ils sont tous les trois dignes d'être promus d'autant qu'ils s'avèrent nettement plus avantageux que les énergies concurrentes en ce qui concerne les critères les plus discutés (réduction de l'effet de serre et préservation des ressources). Par ailleurs, les sources d'énergie biologiques permettent de limiter la dépendance par rapport aux importations de pétrole et de conserver la valeur ajoutée dans le pays. La hausse des prix du gazole et du mazout en l'espace de quelques mois en l'an 2000 a montré que les sources d'énergie biologiques pouvaient très rapidement devenir concurrentielles.

Summary

Ecological and economic evaluation of biofuels

The present study analyses the use of three biofuels that are of relevance in Switzerland with regard to their environmental compatibility and economic efficiency as well as their political and legal profile. The following three types of biofuels were investigated:

- Heat produced by means of wood log heating systems
- District heating by means of hay burning
- Rape methyl ester as a fuel for diesel engines

By means of environmental life cycle assessments as described in ISO 14040 and the following standards, it has been investigated whether the production and use of the chosen biofuels are more environmentally sound than the production and use of comparable fossil energy resources (conventional fuel oil heating, gas heating and diesel fuel). In the case of fossil energy resources, the alternative, non-energetic use of the biomass has also been taken into consideration. The environmental categories examined comprise the extensive use of non-renewable energy resources, the greenhouse potential, the photochemical oxidant formation, acidification, overall eutrophication and human toxicity as well as aquatic and terrestrial toxicity. The probably most significant political arguments in favour of promoting biofuels are the reduction of the greenhouse effect and the protection of non-renewable energy resources. As far as these environmental impacts are concerned, the three biofuels investigated are to be categorised as being favourable to very favourable. Therefore, in comparison to fossil energy resources, they must be treated preferentially. All three biofuels proved to be more advantageous with regard to reducing the formation of ozone. The results for the remaining environmental categories were either positive or negative - depending on the biofuel.

The biofuels investigated in compliance with the presumptions made for the period between 1998 and 1999 do not provide very satisfying results with regard to economic efficiency. Wood log heating involved significantly higher fuel as well as higher operating costs than the fossil alternatives oil and gas. If the fuel oil price reaches and exceeds CHF 0.64/l and the natural gas price CHF 0.1/kWh, wood heating can compete with the alternatives. Practice has shown that RME production is profitable for the producer. The problem lies in the rape cultivation: if a low non-food rape price is assumed, the direct costs can be covered; nevertheless, it is still less profitable than other crops. Thanks to processing contributions, the net costs of district heat by means of hay burning are only CHF 0.02/kWh higher than those of oil heating costs. Therefore, such a solution proves to be similarly expensive for the consumer. Because of the increase in oil prices in the year 2000, district heat has not only become more advantageous (the costs are the same in case of a fuel oil price of CHF 0.47/l), but wood log heating can also be considered to be a competitive alternative (heating oil price, state as per October 2000: CHF 0.63/l).

An analysis of the political and legal prerequisites showed that in order to encourage the increased use of renewable energy resources, policies must be more transparent and consistent. Moreover, greater attention must be given to the financial aspects. Facilitation and support must not be reserved for pilot and demonstration plants only.

Because wood log heating, rape methyl ester as a fuel, and district heat fulfill various requirements made towards energy sources, the three biofuels investigated are worth supporting. Above all, because they have proven to be much more advantageous with regard to the most frequently discussed criteria (reducing the greenhouse effect and protecting resources) than reference energy resources. Furthermore, the implementation of biofuels reduces our dependency towards oil imports and helps us to maintain our national net product. The increase of fuel and diesel oil prices in the year 2000 within a few months has shown that the competitiveness of biofuels can rapidly improve.

2. Einführung

2.1 Hintergrund der Studie

Die Abnahme der fossilen Ressourcen sowie die aus ihrem Verbrauch resultierende Umweltverschmutzung sind für die Zukunft problematisch. Zudem bezieht Europa einen grossen Teil seiner Energien aus politisch instabilen Regionen. Es wird erwartet, dass in den nächsten 20 Jahren in der EU (Europäische Union) die Abhängigkeit von aussereuropäischer Energie von heute 50 % auf 70 % ansteigen wird (Agrarische Rundschau, 1998). Im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung müssen deshalb Alternativen in Form von erneuerbaren Energien gesucht werden. Der Anteil einheimischer, erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch beträgt in der Schweiz bereits 16,8 %. Davon stammen gut zwei Drittel aus Wasserkraft (Hersener und Meier 1999). Energieträger aus Biomasse steuern mit 30 % den zweithöchsten Anteil bei. Ihr Potential ist noch lange nicht ausgeschöpft. Da eine Forcierung der Wasserkraft aus Gründen des Gewässerschutzes kaum in Frage kommt und andere erneuerbare Energieträger wie Wind oder Sonne weder nennenswert verbreitet noch rasch einsetzbar sind, müssen in nächster Zeit Bioenergieträger vermehrt zum Zuge kommen. Unter Bioenergieträger fallen alle Arten von organischen Abfällen, Waldholz, Ernterückständen, Hofdüngern sowie eigens für die Energiegewinnung angebaute Pflanzen.

Diese Studie wurde im Rahmen des EU-Projektes "Bioenergy for Europe: which ones fit best?" durchgeführt und vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft finanziert. Im EU-Projekt wurden ausgewählte Bioenergieträger miteinander und zwischen den verschiedenen Ländern bezüglich Ökologie, Wirtschaftlichkeit und Politik verglichen. Für die Schweiz wurden dort Rapsmethylester, Stückholz und Biogas aus Schweinegülle untersucht. Aufgrund verschiedener Kompromisse in der Wahl der Bioenergieträger, den Annahmen (zum Beispiel kein Hofdüngereinsatz in den Kulturen) und Methoden bilden die Resultate aus dem EU-Projekt nicht in jedem Falle die schweizerische Praxis ab. So ist zum Beispiel die Vergärung von reiner Gülle aus wirtschaftlichen Gründen in der Schweiz derzeit nicht relevant, weshalb hier im Gegensatz zum EU-Projekt auf deren Untersuchung verzichtet wurde. Neu ins Programm kam dafür die Verbrennung der reichlich vorhandenen Biomasse Heu.

Zwar existieren bereits Ökobilanzstudien zu einigen Bioenergieträgern wie Holz und Rapsmethylester (zum Beispiel BUWAL 1990, Wolfensberger und Dinkel 1997, Kräus et al. 1999, BUWAL 2000), auf die in der Auswertung Bezug genommen werden soll, doch fehlt in der Schweiz bislang ein zusammenhängender Vergleich von mehreren Bioenergieträgern. Diese Studie soll diese Lücke schliessen, indem gleichzeitig ökologische, wirtschaftliche und politische Standpunkte in Betracht gezogen werden.

2.2 Ziel und Zielgruppe

Zielpublikum dieser Studie sind Entscheidungsträger und Interessenten in den Sektoren Energie, Umwelt, Land- und Forstwirtschaft. Für sie sollen die umweltrelevanten Vor- und Nachteile ausgewählter Bioenergieträger gegenüber konventionellen Energieträgern aufgezeigt werden. Sie sollen Auskunft erhalten über die wirtschaftlichen Kenndaten und mögliche Ansatzpunkte zur Förderung.

Anvisiert wird die Beantwortung folgender Fragen:

- Ist die Bereitstellung von Nutzenergie durch den ausgewählten Bioenergieträger ökologisch sinnvoller als durch den korrespondierenden fossilen Energieträger?
- Ist der ausgewählte Bioenergieträger für den Hersteller, Konsumenten und Staat wirtschaftlich lohnender als seine fossile Alternative? Wenn nicht, wie und mit wieviel Geld könnte der Bioenergieträger konkurrenzfähiger gemacht werden?
- Bestehen politische oder gesetzliche Hemmnisse für Bioenergieträger? Wenn ja, welche?

2.3 Aufbau der Studie

Einerseits wird für jeden einzelnen der ausgewählten Bioenergieträger mit Hilfe von Ökobilanzen abgeklärt, ob seine Herstellung und Verwendung umweltfreundlicher ist als die Herstellung und Verwendung von einem vergleichbaren fossilen Energieträger einschliesslich der alternativen Nutzung des Landwirtschaftslandes respektive der Biomasse. Die Ökobilanzen folgen soweit möglich den Anforderungen der Norm EN ISO 14 040 ff., es wird jedoch keine kritische Prüfung durchgeführt. Zusätzlich wird jedes Energieszenario bezüglich seiner Wirtschaftlichkeit untersucht und die massgebenden politischen und gesetzlichen Verhältnisse abgeklärt. Die landschaftlichen, sozialen oder weiteren Aspekte wie Lärm und Geruch sind in dieser Studie nicht berücksichtigt.

2.4 Auswahl der zu untersuchenden Bioenergieträger

Hauptkriterien für die Wahl der Bioenergieträger waren das Vorhandensein der Biomasse, deren Bedeutung jetzt und in Zukunft, die Ausgereiftheit der Technologien und deren Entwicklungspotential. Untersucht werden Rapsmethylester (RME) als Dieselölersatz, Verbrennung von Heu für Fernwärme sowie Verbrennung von Stückholz für Heizwärme und Warmwasser. Hintergründe zur Selektion der Energieträger sind aus

Tabelle 1 im Anhang ersichtlich.

Tabelle 1: Bioenergieträger und ihre Bedeutung in der Schweiz – Hintergründe zur Wahl der untersuchten Biomassen

Bioenergieträger	Hintergründe	Wahlentscheid
Waldholz (Stückholz)	Bereits etabliert, Steigerungspotential vorhanden, Technik weit fortgeschritten, Bioenergieträger Nr. 1 in der Schweiz, Etwas mehr als die Hälfte des gesamtschweizerisch genutzten Brennholzes wird immer noch traditionell zu Scheiter aufbereitet, (Vhe 1997), weshalb Stückholz als Bioenergieträger hier vertreten ist.	Ja
Abbruchholz	Begrenzte Rohstoffmenge, eine Verbrennung ist nur in speziellen Grossanlagen möglich.	Nein
Chinaschilf	Biomassepotential theoretisch vorhanden, aber wirtschaftlich uninteressant für den Landwirt.	Nein
Rapsöl für RME	Praxisreif, Biomassepotential vorhanden, hochwertiges Energieprodukt.	Ja
Rapsöl für Elsbettmotor	Biomassepotential vorhanden, beschränkte Absatzmöglichkeiten.	Nein
Gras für Ethanol	Genügend Biomasse vorhanden (Grasland Schweiz), zur Zeit wird Ethanol via Destillation zu Industriealkohol aufkonzentriert, die weniger energieintensive Membranfiltration befindet sich noch im Entwicklungsstadium, so dass Daten für die Herstellung von reinem Ethanol als Benzinersatz fehlen.	Nein
Heu für Verbrennung	Genügend Biomasse vorhanden (Grasland Schweiz), Technologie wird im Ausland bereits eingesetzt.	Ja
Biogas aus Co-Vergärung	Genügend Biomasse vorhanden, Energieumwandlung kein Problem, hochwertiges Energieprodukt, in Kürze eine sehr detaillierte Ökobilanz zu erwarten.	Nein

3. Ökobilanz

3.1 Methode Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt oder einer Dienstleistung verbundenen Umweltwirkungen und umfasst den ganzen Lebenszyklus. Für eine Ökobilanz müssen zuerst die Problemstellung definiert, das Untersuchungssystem skizziert und die Rahmenbedingungen (zum Beispiel die Systemgrenzen etc.) sowie die Vergleichssysteme festgelegt werden. Sodann folgen mit Hilfe der detaillierten Produktionsinventare, der Emissionen und des Ressourcenbedarfes die Berechnung der Sachbilanz und der quantifizierbaren Wirkungskategorien (Treibhauspotential u.s.w.). Schliesslich erfolgt die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der Ziele der Studie.

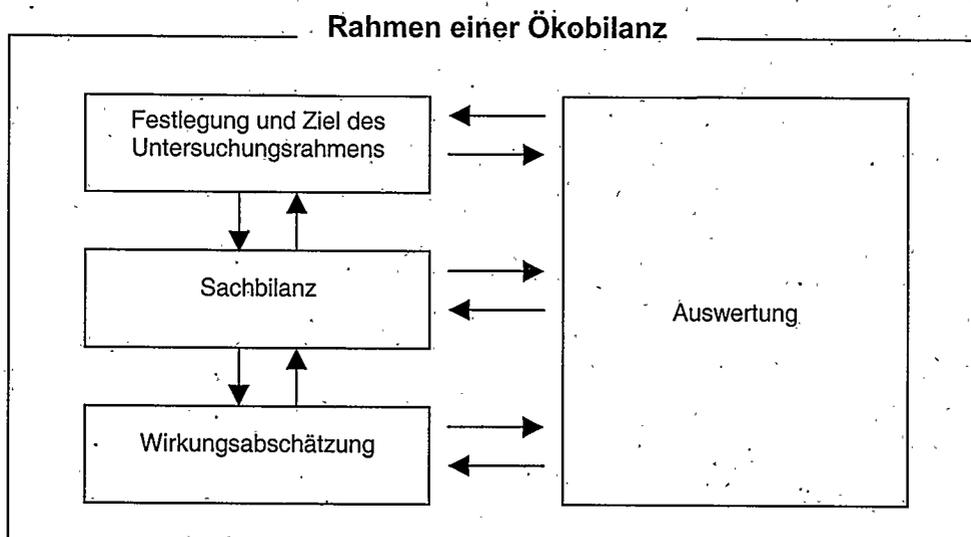


Abbildung 1: Ablauf einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 ff.

3.1.1 Funktionen

EN ISO 14 040 (1997) definiert die Funktion(en) als Leistung eines Untersuchungssystems in der Ökobilanz. Die Funktionen hängen stark mit den Zielen der Untersuchung zusammen. Zweck aller untersuchter Bioenergieträger ist in erster Linie die Bereitstellung von Nutzenergie, weshalb dies die Hauptfunktion darstellt.

Weitere zentrale Funktionen sind für RME der Erhalt von landwirtschaftlichem Kulturboden als Ernährungsgrundlage, der Erhalt von bäuerlichem Einkommen und die Entlastung des Marktes für Ackerfrüchte.

Der Bioenergieträger Stückholz erfüllt die Zusatzfunktion der Verwertung von Holz niedriger Qualität.

Heu für Fernwärme erfüllt die Zusatzfunktionen des Erhaltes von landwirtschaftlichem Kulturboden als Ernährungsgrundlage, des Erhaltes von bäuerlichem Einkommen und der Extensivierung von Grasland.

In dieser Studie wurden die hier nicht genannten Nebenfunktionen einzelner Systeme (zum Beispiel Futtermittelbereitstellung durch Rapskuchen, ein Nebenprodukt der Rapsöl-Herstellung) mittels Allokation (siehe Kapitel 3.1.6) berücksichtigt.

3.1.2 Funktionelle Einheit

EN ISO 14 040 (1997) definiert die funktionelle Einheit als quantifizierten Nutzen eines Untersuchungssystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanzstudie. Alle Aufwendungen und Erträge werden auf sie bezogen. In diesem Sinne fiel die Wahl der funktionellen Einheit auf ein Megajoule (MJ) Nutzenergie. Nutzenergie wird definiert als jene Energie, die beim Verbraucher nach der letzten Umwandlung für den jeweiligen Zweck zur Verfügung steht, also zum Beispiel Wärme oder mechanische Energie (VDI, 1997).

3.1.3 Vergleichssysteme

Die Absolutwerte einer Ökobilanz sagen für sich alleine relativ wenig aus, weshalb Vergleiche sinnvoll sind. Gemäss EN ISO 14 041 (1999) müssen Vergleiche zwischen Systemen auf der Basis derselben Funktion(en) und derselben funktionellen Einheit basieren. Deshalb mussten die Referenzsysteme der Bioenergieträger so gewählt werden, dass sie einerseits die Hauptfunktion der Bereitstellung von Nutzenergie und andererseits die im Abschnitt 3.1.1 genannten wichtigen Zusatzfunktionen erfüllen. Die Suche nach den Referenzsystemen erfolgte schrittweise. Als erstes stellte sich die Frage, welcher fossile Energieträger jeweils die gewünschte Art der Nutzenergie bereitstellt und am ehesten vom jeweiligen Bioenergieträger ersetzt würde. Als zweites folgte die Abklärung, welche Ländnutzungsform bzw. Verwertungsart von Holz die Zusatzfunktionen erfüllt und am wahrscheinlichsten wäre, wenn nicht der jeweilige Bioenergieträger produziert würde.

Tabelle 2: Untersuchte Bioenergieträger und ihre Vergleichssysteme. Die Herleitung der Energiemengen findet sich in Kap. 3.1.5.

Untersuchte Bioenergieträger	Vergleichssysteme
Stückholz (19 600 kg waldfriech bzw. 135 000 MJ Wärme)	Öl- bzw. Gasheizung (135 000 MJ Wärme), sowie Verrottung von Holz im Wald (19 600 kg waldfriech)
Heu für Fernwärme (81 700 MJ Wärme bzw. 1 ha)	Ölheizung im Hause (81 700 MJ Wärme), sowie Extensivwiese (1 ha)
RME (11 052 MJ mechanische Energie) und Ansaatwiese mit Standardmischung SM 210 (1 ha) ¹	Diesel (11 052 MJ mechanische Energie), sowie einjährige Rotationsbrache (1 ha) ¹

¹ Da die sogenannt einjährige Rotationsbrache mindestens 17 Monate dauern muss, wird die Kulturdauer von Raps durch den Zwischenfutteranbau mit der Standardmischung 210 auf 17 Monate verlängert.

Die Vergleiche basieren jeweils auf der gleichen Menge Nutzenergie (ausgehend von der Produktion des Bioenergieträgers) sowie der zeitlich gleich langen Nutzung einer Hektare Land bzw. gleich vielen Kubikmetern Holz (Tabelle 2).

3.1.4 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen legen fest, welche Module bzw. Prozesse in der Ökobilanz enthalten sein sollen. Für jeden Prozess müssen die Daten separat erfassbar sein (EN ISO 14 040, 1997). Die Systemgrenzen gelten ebenfalls für die Referenzsysteme. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, sind Sonne, Wasser und menschliche Arbeit nicht eingeschlossen, ebenso wenig wie die Auswirkungen einzelner Kulturen auf die Fruchtfolge oder die Biodiversität. Die einzelnen Prozesse und Produktionsmittel werden von der "Wiege bis zur Bahre" analysiert, also von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung (Abbildung 2). Einzig Elementarflüsse, die vom Menschen noch nicht oder nicht mehr veränderten Stoffe oder Energien, passieren die Systemgrenzen. Gemäss EN ISO 14 041 (1999) können Prozesse aus der Ökobilanz weggelassen werden, wenn dies das Resultat nicht verändert, d.h. wenn sie in exakt derselben Art und Menge in den zu vergleichenden Systemen vorkommen. Von dieser Möglichkeit wird in der vorliegenden Studie Gebrauch gemacht. Die entsprechenden Fälle sind in 3.1.5 dokumentiert. Die Datengrundlagen und Aussagen (spez. für die Landwirtschaftspolitik) gelten für die schweizerische Situation im Jahr 2000.

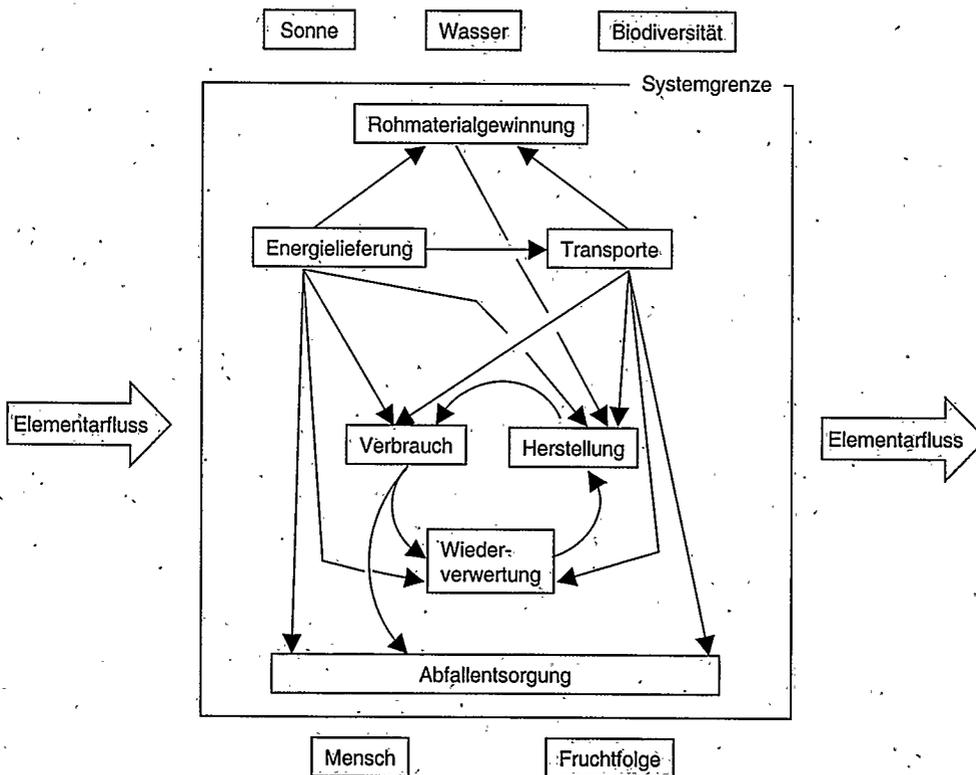


Abbildung 2: Schema der Systemgrenzen

3.1.5 Beschreibung der Untersuchungssysteme

Rapsmethylester

Abbildung 3 zeigt die Produktion von RME. Der Raps wird in den vorbereiteten Boden gesät, gedüngt, vor Unkräutern und Insekten geschützt und mit dem Mährescher geerntet. Der Landwirt transportiert die Körner zur Sammelstelle, wo sie von Beimengungen gereinigt, getrocknet und gelagert werden. Anschliessend werden die Rapskörner in die Umesterungsanlage gefahren, wo sie kurze Zeit gelagert werden. Die Pressung erfolgt ohne chemische Hilfsmittel. Das gepresste Rapsöl wird mittels Kaliumhydroxid und Methanol zu RME umgeestert. Der RME wird an Tankstellen verteilt, verkauft und in Dieselmotoren verbraucht. Das Nebenprodukt aus der Pressung, der Rapskuchen, wird an Tiere verfüttert, das Nebenprodukt aus der Umesterung, die Glycerinphase 1, wird in der Industrie zu reinem Glycerin aufbereitet. Die technischen Grundlagen zur RME-Herstellung sind in Rinaldi und Herger (1998) eingehend erläutert.

Der Rapsanbau erfolgt gemäss den gültigen Vorschriften für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN). Die Kultur wird mit je einer Insektizidanwendung gegen den Stengelrüssler und den Rapsglanzkäfer geschützt, der Ertrag im Lohndrusch beträgt 3000 kg/ha. Von einer Hektare Raps werden 1113 Liter RME gewonnen. Nach der Ölpresung und dem Umestern wird das Nebenprodukt Glycerinphase 1 (165 kg/ha, mit 60 % Reinglycerinanteil) verkauft (Herger 2000) und als Gutschrift verrechnet. Für den ebenfalls verkauften Rapskuchen (1863 kg/ha) werden die Anteile an den Umweltwirkungen ermittelt und abgezogen (siehe Allokationsverfahren 3.1.6). Das Abfallprodukt Glycerinphase 2 wird von Landwirten abgeholt und via Gülleausbringen auf Felder entsorgt. Dies wird vernachlässigt, da sich das Glycerin vollständig zu CO₂ und Wasser zersetzt (Candidas 1996). Zudem fällt die geringe Menge beim Gülleführen nicht ins Gewicht, weshalb auch keine direkten Aufwendungen daraus angelaistet werden.

Da gemäss der Direktzahlungsverordnung (1998) die gewählte Vergleichskultur der einjährigen Rotationsbrache für Beiträge mindestens 17 Monate dauern muss, der Raps hingegen nur elf Monate auf dem Feld steht, muss für das RME-System die Kulturdauer mittels eines überwinterten Zwischenfutters verlängert werden. Deshalb erfolgt nach der Rapsernte im August der Anbau einer Ansaatwiese mit der Standardmischung SM 210. Diese liefert im Herbst und im Frühling einen Schnitt mit je 25 dt TS (Dezitonne Trockensubstanz) Grünfutter, was mit einer Gutschrift berücksichtigt wird (siehe Allokationsverfahren 3.1.6). Der Umbruch der SM 210 ist nicht mehr enthalten, da auch die Rotationsbrache umgebrochen wird. Die berücksichtigten Inputs und Outputs für das RME-System sind aus Abbildung 3 und im Anhang aus Tabelle 37 ersichtlich.

Für die Vergleichskultur Rotationsbrache (siehe Abbildung 3 und Anhang Tabelle 38) wird Ende August eine Spezialmischung gesät. Da diese Spezialmischung aus sehr vielen Einzelarten besteht, aber mengenmässig Buchweizen vorherrscht, lässt sich die Produktion dieses Saatgutes mit der Produktion von Buchweizen annähernd beschreiben. Abgesehen vom Mulchen der Biomasse im zweiten Frühjahr werden keine Eingriffe vorgenommen. Das darauf folgende Pflügen ist ausgeklammert, da es auch nach der Standardmischung 210

vorkommt. Pflanzenschutzmittel und Düngung sind nicht erlaubt (Direktzahlungsverordnung 1998).

Stückholz

Als Bioenergieträger wird Hartholz in einer Stückholzheizanlage im Haus verbrannt und für die Wärme- und Warmwasserproduktion verwendet. Als Vergleichssysteme dienen eine Gas- bzw. eine Ölheizung im Haus sowie die Verrottung von Holzstücken im Wald.

Für das Hartholz wurde angenommen, dass es aus einem Durchforstungsbestand im Mittelland stammt und einen Brusthöhendurchmesser (BHD) von 20 cm aufweist. Das allfällige Setzen der Bäume, die Pflege, das Fällen und das Entasten werden nicht bilanziert, da diese Prozesse auch in den Vergleichssystemen ablaufen. Die entasteten Stämme werden mit einem Forwarder an die Waldstrasse gerückt, von einem Brennholzautomaten zu 50 cm Scheiter zerkleinert und in Kunststoffnetze zu 1 Ster abgepackt. Diese lagern während eines Jahres im Wald, was mangels nennenswerter Umweltwirkungen vernachlässigt wird, genauso wie die halbjährige Lagerung im oder am Wohnhaus. Das Holz wird in einem modernen 24 kW-Stückholzheizkessel mit angenommenem Gesamtwirkungsgrad von 75 % verbrannt (Abbildung 4). Die Asche wird laufend via Haushaltkehrrichtsäcke in eine Kehrrichtverbrennungsanlage (KVA) entsorgt.

Als Basis für die Vergleiche dient ein Haus mit einem angenommenen Bedarf von 135.000 MJ Wärme für Heizzwecke und Warmwasser im Winter. Mit Hilfe eines angenommenen Gesamtwirkungsgrades (Neher 1999), des Energiegehaltes von Holz (2000 kWh pro Ster bzw. 16,8 MJ pro kg Holz atro^2 (Vhe 1998)), von Öl (9,91 kWh pro Liter) und von Gas (9,72 kWh pro Kubikmeter (Frischknecht et al. 1996)) sowie der Berechnungsformel für die Kesselleistung³ (BfE 1998) wird der jeweils passende Heizkessel gewählt. Die Hilfsenergie für die Betreibung der Heizsysteme (zum Beispiel Elektrizität für Regelung der Lambda-Sonde zur Kontrolle der Luftzufuhr) wurde vernachlässigt.

In beiden Vergleichssystemen (Abbildung 4) wird das Holz mit der Motorsäge nach dem Fällen und Entasten zur schnelleren Verrottung zerkleinert und dann im Wald liegengelassen. Die Energie für Wärme und Warmwasser wird im ersten Vergleichssystem mit einem 15 kW-Ölheizkessel mit einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad von 85 % aus Heizöl extra leicht bereitgestellt. Im zweiten Vergleichssystem (Abbildung 4) stammt die Wärmeenergie von einer 15 kW-Gasheizung mit einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad von 95 %.

Die berücksichtigten In- und Outputs der drei Systeme sind im Anhang aus Tabelle 39 bis Tabelle 41 ersichtlich.

Fernwärme aus Heu

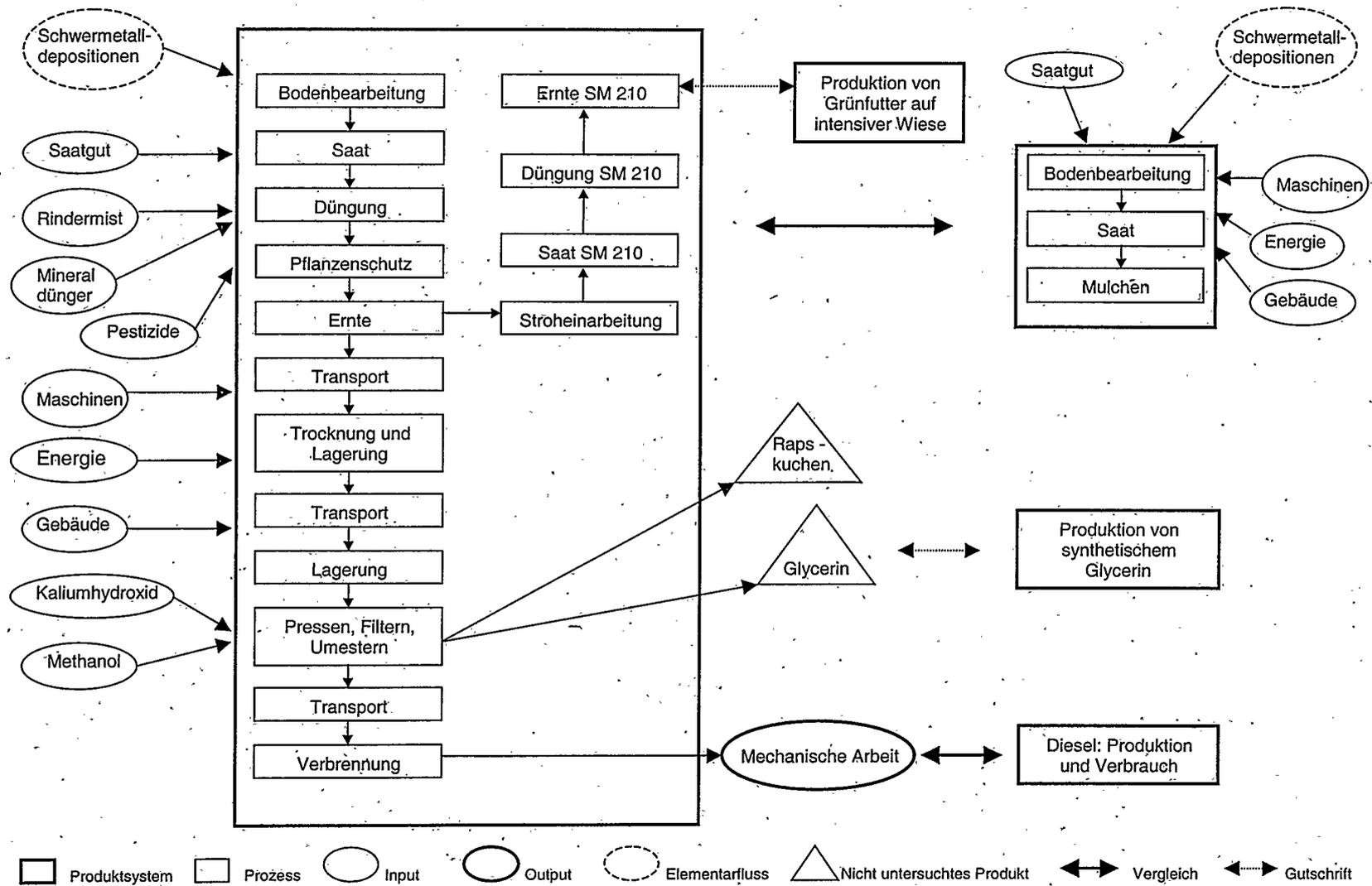
Die Düngung der wenig intensiven Wiese (Abbildung 5 und Anhang, Tabelle 42) erfolgt alle zwei Jahre mit Rindermist und einmal pro Jahr mit der anfallenden Rost- und Zyklonasche. Die Ascherückführung wäre bei einer extensiven Wiese nicht möglich, weshalb eine wenig intensive Wiese gewählt wurde. Aus den zwei Schnitten pro Jahr werden die total 6500 kg

² 100 % Trockensubstanz ($\text{atro} = \text{absolut trocken}$)

³ Kesselleistung = Ölverbrauch in Liter/300

TS Heu in Quaderballen in das Lager des Biomasse-Heizkraftwerkes abgeführt. Das Biomasse-Heizkraftwerk ist mit einem Zigarrenbrenner von 3,15 MW Leistung ausgestattet, dessen Auslastung beträgt angenommene 70 % und der Wirkungsgrad beläuft sich auf 89 % (Schkölen GmbH 1999). Das Heizwerk verfügt noch über einen Spitzenlastkessel von 4 MW Leistung, welcher mit Heizöl 380 Stunden pro Jahr mit einem Wirkungsgrad von 91 % läuft (Schkölen GmbH, 1999). Die erzeugte Wärme wird via Fernwärmenetz an die Haushalte verteilt. Es werden 23 % Netzverluste angenommen.

Im Vergleichssystem wird die Heizwärme mittels einer Ölheizung mit 15 kW-Leistung und einem Jahresnutzungsgrad von 85 % (Neher 1999) im Haus erzeugt. Auf dem Land stehe eine Extensivwiese, die im einzigen Schnitt pro Jahr 30 dt TS Heu liefert, das in die Tierfütterung fließt. Für dieses Heu wird eine Gutschrift errechnet, wie in den Allokationsverfahren unter Kapitel 3.1.6 und aus Tabelle 44 im Anhang ersichtlich ist. Die berücksichtigten In- und Outputs sind im Anhang in Tabelle 43 aufgelistet.



25 **Abbildung 3: Untersuchungssystem Rapsmethylester (linke Seite) verglichen mit Rotationsbrache und Diesel (rechte Seite)**

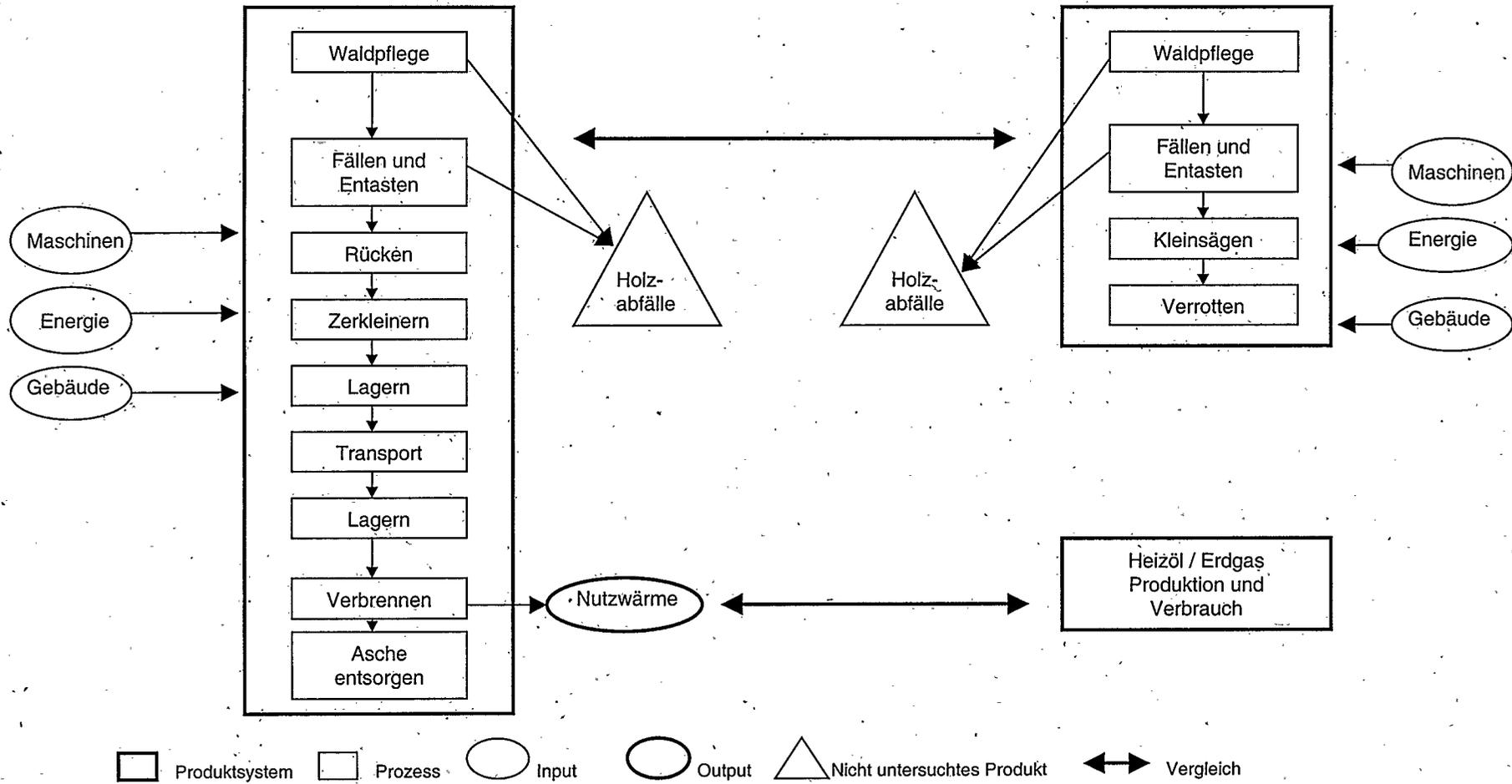


Abbildung 4: Untersuchungssystem Stückholz (linke Seite) verglichen mit Holzverrottung und Heizöl resp. Gas (rechte Seite)

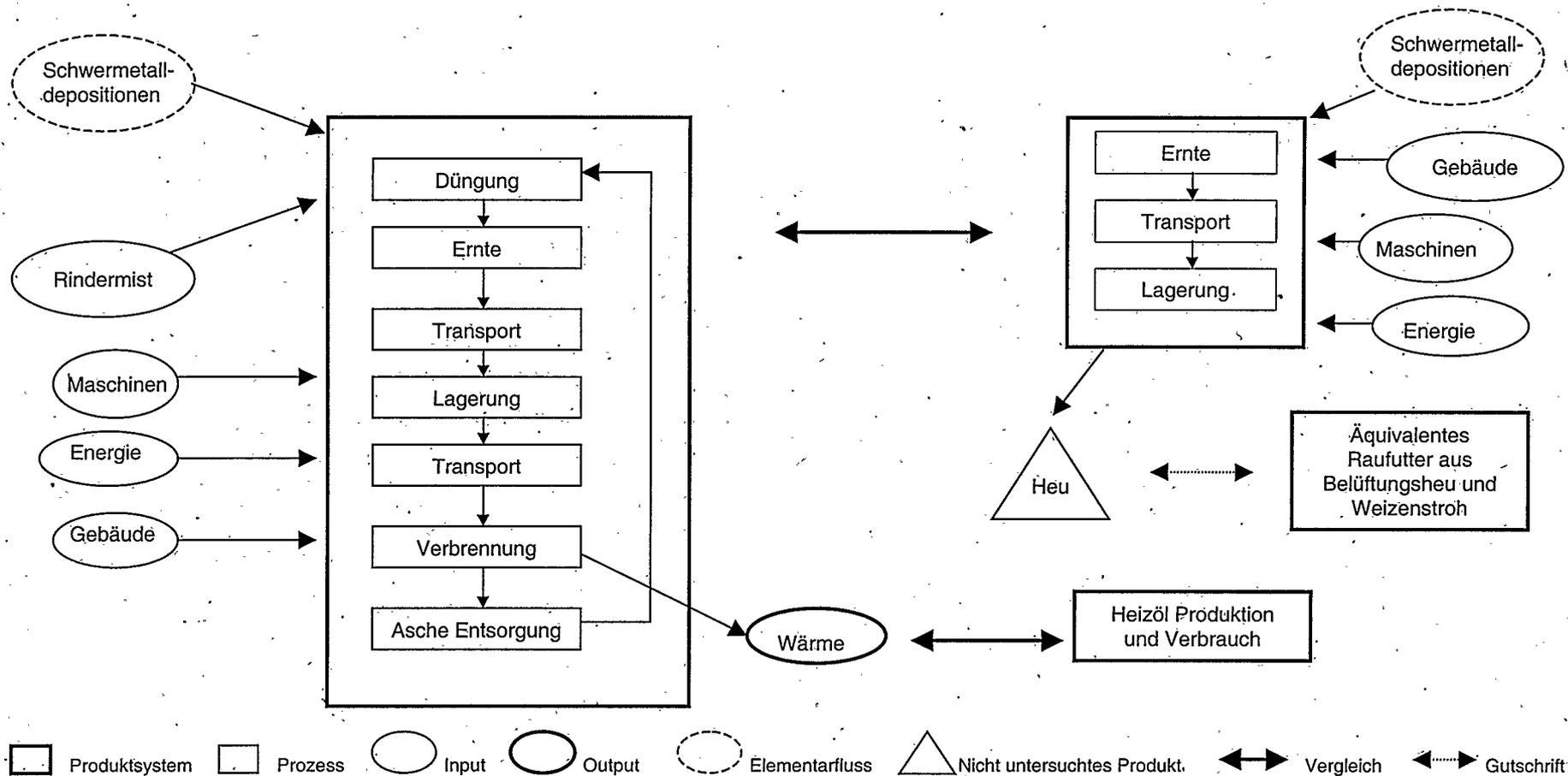


Abbildung 5: Untersuchungssystem Fernwärme aus Heu (linke Seite) verglichen mit Extensivwiese und Heizöl (rechte Seite)

3.1.6 Datengrundlage

Die verwendeten Daten wurden nicht neu erhoben, sondern stammen alle aus der Literatur. Die Prozessabläufe in der Landwirtschaft basieren auf Expertenaussagen, jene aus der Verarbeitungsindustrie aus Untersuchungsberichten von einzelnen Anlagen.

Datenquellen für Inputs

Nicht erneuerbare Energieträger:

Benzin:	Benzin bleifrei ab Regionallager, Frischknecht et al. (1996)
Diesel:	Diesel ab Regionallager Schweiz, Frischknecht et al. (1996)
Heizöl:	Heizöl EL ab Regionallager, Frischknecht et al. (1996)
Erdgas:	Erdgas ND ab Ortsgasversorgung, Frischknecht et al. (1996)
Elektrizität:	Schweizer Strommix Mittelspannung bzw. Niederspannung, Frischknecht et al. (1996)

Landwirtschaft:

Maschinen:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Cowell et al. (1995) Guelorget et al. (1993), Weidema u. Mortensen (1995)
Gebäude:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Audsley et al. (1997), Kohler (1994)
Pestizide:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Audsley et al. (1997) Green (1987), Hartley und Kidd (1987), Weidema et al. (1995)
Mineraldünger:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Audsley et al (1997) und Patyk (1996)
Saatgut:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Bonny (1993)
Polypropylen:	Polypropylene (PP, Film), Boustead (1997b)

Verschiedenes:

Transport:	LKW 28 t, Frischknecht et al. (1996)
Industriegebäude:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Audsley et al. (1997), Kohler (1994)
Methanol:	Gaillard (1997)
Natronlauge:	Gaillard (1997)
Chlor:	Chlorine Production, Boustead (1994)
Propylen:	Propylene Production, Boustead (1997c)
Polyethylen:	Gaillard et al. (1997), basierend auf Frischknecht et al. (1996), Waldeck (1996)

- Asche KVA: Holzasche gemischt in KVA, Frischknecht et al. (1996)
- Asche in Reaktordeponie:
Hölz in Reaktordeponie, Frischknecht et al. (1996)
- Fernwärmenetz: Transport Fernwärme kleinräumig neu, Frischknecht et al. (1996)
- Heizkessel, Speicher, Boiler:
Stahl unlegiert, Frischknecht et al. (1996)
Stahl niedriglegiert, Frischknecht et al. (1996)
Stahl hochlegiert, Frischknecht et al. (1996)
Keramik, Frischknecht et al. (1996)
Gusseisen, Frischknecht et al. (1996)
Glaswolle, Weibel und Stritz, (1995)
Mineralwolle, Frischknecht et al. (1996)
Aluminium (Sheet), Nordheim et al. (1995)
Kupfer, Frischknecht et al. (1996)
Polyurethane (Pure Rigid Foam), Boustead (1997a)

Datenquellen für Outputs

Die Datengrundlagen für die verwendeten direkten Emissionen finden sich in Kapitel 3.1.8. Die indirekten Emissionen sind in den jeweiligen Datensätzen für die Inputs eingeschlossen.

Datenquellen für Prozessabläufe

- Landwirtschaft: LBL (1999a), LBL (1999b), LBL (1999c) sowie Expertenbefragungen
- Treibstoffverbrauch: Ammann, Rinaldi, Stadler, (1999)
- Forstwirtschaft: Professur für Forstliches Ingenieurwesen, ETH Zentrum, Zürich
- RME-Produktion: Rinaldi und Herger (1998)
- Heizsysteme: Neher (1999), Hersener (1999)
- Heuverbrennung: Strohheizkraftwerk Schkölen GmbH (1999), Flaig et al. (1998), Hersener (1999)

3.1.7 Allokationsverfahren

Bei der Produktion und Aufarbeitung von Bioenergieträgern fallen neben den gewünschten Hauptprodukten oft Nebenprodukte an. Meist interessiert für die Energiegewinnung nur das Hauptprodukt. Sind die Nebenprodukte Reststoffe, die nicht verwertet werden können, müssen die benötigten Ressourcen und Umweltwirkungen vollständig auf das Hauptprodukt abgewälzt werden. Können die Nebenprodukte aber verwertet werden, ist eine Aufteilung/Allokation des Rohmaterialienverbrauchs und der Umweltwirkungen auf alle Produkte nötig. Gemäss EN ISO 14 041 bieten sich zwei Möglichkeiten zur Aufteilung an:

- Vermeiden einer Allokation durch Substitution: Ersetzt das Nebenprodukt ein in einem anderen Prozess hergestelltes gleichwertiges Produkt, werden die Umweltwirkungen der Herstellung dieses Äquivalenzproduktes berechnet. Sie werden als Gutschrift von den Umweltwirkungen des Hauptprodukt-Prozesses abgezogen. (Beispiel: Glycerinphase 1, siehe unten).
- Aufteilung nach ökonomischem oder energetischem Wert: Wenn keine Äquivalenzprodukte vorhanden sind, ist keine Substitution möglich. Die Allokation erfolgt dann nach einer Beziehung der Haupt- und Nebenprodukte zueinander, zum Beispiel nach dem ökonomischen oder energetischen Wert. (Beispiel: Rapskuchen, siehe unten)

Werden Inputs, wie zum Beispiel Maschinen, nicht nur im untersuchten Prozess verwendet, sondern auch noch in anderen, müssen die benötigten Ressourcen und Umweltwirkungen bei der Herstellung, dem Unterhalt und der Entsorgung mit Hilfe einer Allokation aufgeteilt werden.

Folgende, in dieser Studie verwendeten Inputs und Outputs müssen einem Allokationsverfahren unterzogen werden:

- | | | |
|--|---|---------|
| - Landwirtschaftliche und industrielle Maschinen und Anlagen | } | Inputs |
| - Landwirtschaftliche und industrielle Gebäude | | |
| - Hofdünger | | |
| - Glycerinphase 1 | } | Outputs |
| - Rapskuchen | | |
| - Gras der Standardmischung 210 | | |
| - Heu der Extensivwiese | | |

Wird von einem Ökosystem nicht ein ganzes Jahr betrachtet, sondern nur Teile davon (zum Beispiel nur zwei Wiesenschnitte anstelle von gesamthaft fünf), müssen die direkten Emissionen auch aufgeteilt werden. Dabei werden die Jahresemissionen linear auf die tatsächlich betrachteten Zeitperioden umgerechnet (Beispiel: Nitratauswaschungen, siehe Kapitel 3.1.8).

Landwirtschaftliche und industrielle Maschinen und Anlagen

Die Zuteilung der landwirtschaftlichen Maschinen basiert auf dem Verhältnis der benötigten Arbeitseinheiten zu den durchschnittlich geleisteten Arbeitseinheiten während der ganzen

Lebensdauer (Audsley et al. 1997, Wolfensberger und Dinkel 1997, Gaillard et al. 1997), wobei die durchschnittlichen Arbeitseinheiten Ammann (1999) entnommen sind. Der Zuteilungsfaktor für die industriellen Anlagen errechnet sich aus dem Verhältnis der für den Bioenergieträger verarbeiteten Biomasse zur gesamten während der Lebensdauer verarbeiteten Biomasse.

Landwirtschaftliche und industrielle Gebäude

Die Umweltwirkungen der landwirtschaftlichen Gebäude für Maschinen errechnen sich folgendermassen (Wolfensberger und Dinkel 1997, Gaillard et al. 1997):

$$\frac{\text{Benötigter Raum für die Maschine} \times \text{Benötigte Arbeitseinheiten}}{\text{Arbeitsauslastung pro Jahr} \times \text{Gebäudegrösse} \times \text{Lebensdauer des Gebäudes}}$$

Der Allokationsfaktor der landwirtschaftlichen Gebäude für zum Beispiel Lagerzwecke besteht aus dem Verhältnis des benutzten Raumes zur gesamten Gebäudegrösse geteilt durch die Anzahl Lebensjahre des Gebäudes (Wolfensberger und Dinkel 1997, Gaillard et al. 1997). Der Zuteilungsfaktor für die industriellen Gebäude besteht aus dem Verhältnis der für den Bioenergieträger verarbeiteten Biomasse zur gesamten während der Lebensdauer verarbeiteten Biomasse.

Hofdünger

Unter der Annahme, dass Hofdünger ein Abfallprodukt der Tierhaltung sind, lässt sich ihre Sammlung und Lagerung jenem System zuordnen. Darum werden nur die in den Produktionsinventaren aufgelisteten Aufwendungen und Emissionen für das Ausbringen einbezogen.

Glycerinphase 1

Die bisher einzige Betreiberin einer Umesterungsanlage in der Schweiz verkauft ihre Glycerinphase 1 mit 60 % Anteil Reinglycerin an eine Aufbereitungsfirma, wo sie zu 100 % Reinglycerin aufgearbeitet und in die Nahrungsmittelbranche weiterverkauft wird. Dort ersetzt es synthetisch hergestelltes Glycerin. Darum wird eine kleine Aufwendung in Form von Dampf für die Aufarbeitung der Glycerinphase zu Reinglycerin angelastet (Borken et al., 1999). Die Gutschrift für die substituierte Produktion von synthetischem Reinglycerin basiert auf den Daten aus Borken et al., (1999) bzw. Kraus et al. (1999).

Rapskuchen

Für die Aufteilung der Prozesse von Bodenbearbeitung bis Pressen und Filtern wird zwischen Rapsöl und Rapskuchen eine Allokation gemäss ihrem ökonomischen Wert bzw. dem Kostendeckungsgrad des Rapskuchens in Tabelle 3 vorgenommen, da für den Wert des Rapsöls nicht der Preis von Speiserapsöl herangezogen werden darf.

Tabelle 3: Berechnung der Allokation für Rapsöl und Rapskuchen

	Einheit	Rapskörner	Rapskuchen	Rapsöl
Ertrag ⁴	kg/ha	3000	-	-
Ausbeute ⁵	kg/ha	-	1863	1137
Wert ⁶	CHF/kg	-	0,43	-
Wert total	CHF/ha	-	801.-	-
Kosten (ohne Pressen etc.) ⁷	CHF/ha	2054	-	-
Kostendeckung Rapskuchen	%	-	39	-
Allokation	%	-	39	61

Gras der Standardmischung 210

Das System RME liefert mit der SM 210 zwei Schnitte Grünfutter von je 25 dt TS, das im Vergleichssystem Rotationsbrache fehlt. Die Gutschrift für das System RME berechnet sich aus der Produktion von zwei Schnitten Grünfutter von einer intensiven Naturwiese in der selben Ertragshöhe.

Heu der Extensivwiese

Die gelagerten Heuballen der Extensivwiese (Vergleichssystem für Fernwärme aus Heu) fliessen in die Tierfütterung. Die Gutschrift dafür besteht aus der Produktion eines Futtermittels ähnlicher Qualität. Auf der Basis von APD (absorbierbares Protein im Darm) und NEL (Nettoenergie Laktation) wird 1 kg Extensioheu mit 0,5 kg Belüftungsheu einer Intensivwiese und 0,47 kg Weizenstroh gleichgesetzt (Wölfensberger und Dinkel 1997). Die dem Weizenstroh anlastbaren Aufwendungen des Weizenanbaues berechnen sich gemäss seinem Erlösanteil (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Berechnung der Allokation zwischen Weizenkörnern und Weizenstroh

	Einheit	Weizenproduktion	Weizenkörner	Weizenstroh
Ertrag ⁸	dt/ha	-	60	55
Wert ⁹	CHF/dt	-	75.-	12.-
Wert total	CHF/ha	5160.- ¹⁰	4500.-	660.-
Allokation	%	-	87	13

⁴ Gemäss Produktionsinventar Oekobilanz

⁵ Rinaldi und Herger (1998)

⁶ LBL (1999a)

⁷ Eigene Berechnungen

⁸ Gemäss Produktionsinventar Oekobilanz

⁹ LBL (1999b) (Weizenpreis für das Jahr 2000)

¹⁰ LBL (1999a)

3.1.8 Direkte Emissionen

Direkte Emissionen sind all jene Emissionen, die bei den betrachteten Verfahren (Produktion und Verbrauch der Bioenergieträger, Verbrauch der fossilen Energieträger) direkt entstehen, zum Beispiel Abgase beim Heizen. Folgende Emissionen sind gemäss heutigem Kenntnisstand in der Studie berücksichtigt:

Oberflächengewässer:	Phosphat PO_4^{3-} Schwermetalle je Element
Grundwasser:	Phosphat PO_4^{3-} Nitrat NO_3^- Schwermetalle je Element
Luft:	Ammoniak NH_3 Benzol Kohlendioxid fossil CO_2 Kohlenmonoxid CO Flüchtige Kohlenwasserstoffe VOC Lachgas N_2O Methan CH_4 Partikel Schwefeldioxid SO_2 Stickoxide NO_x Schwermetalle je Element
Böden:	Schwermetalle je Element

Für jede untersuchte Emission wird pro Aktivität ein Emissionsfaktor bestimmt. Zuerst folgen die landwirtschaftlichen Aktivitäten auf dem Feld, die teilweise stark von Standort, Klima und Bewirtschaftung abhängen, danach die Aktivitäten verbunden mit Energieverbrauch.

Die Wirkungsabschätzung der Pestizide basiert auf der Methode der critical surface time (Joliet und Crettaz 1997) mit den von Margni et al. (2000) ausgearbeiteten Faktoren. Die Wirkstoffflüsse in Luft, Wasser und Boden sind in den Charakterisierungsfaktoren enthalten (siehe Anhang, Tabelle 36), weshalb nur die gesamthaft ausgebrachte Wirkstoffmenge von Belang ist.

CH₄ – Methan

Methanbildung tritt bei der Tierhaltung sowie der Hofdüngeraufbereitung und -lagerung auf. Gemäss den Allokationsregeln (siehe 3.1.6) werden den Hofdüngern keine Umweltwirkun-

gen daraus angelastet. Somit gibt es in den betrachteten Verfahren keine direkten Methanemissionen.

N₂O – Lachgas

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Boden Lachgas emittiert, steigt mit zunehmendem verfügbarem Stickstoff. Die emittierte Menge hängt von Wechselwirkungen zwischen Bodeneigenschaften, Klima und Bewirtschaftung ab. Deshalb ist die Ungenauigkeit relativ gross. Es finden die Emissionsfaktoren gemäss IPCC (1996) Verwendung.

Mineraldünger	19,6 g N ₂ O/kg N _{verf}
Organische Dünger	19,6 g N ₂ O/kg N _{verf}
Ernterückstände	19,6 g N ₂ O/kg N _{verf}
NH ₃	13,0 g N ₂ O/kg NH ₃
NO _x	4,80 g N ₂ O/kg NO _x
NO ₃ ⁻	8,90 g N ₂ O/kg NO ₃ ⁻

NO_x – Stickoxide

Die NO_x-Emissionen durch Denitrifikationsprozesse im Boden sind schwierig zu quantifizieren. Als grobe Annäherung für NO_x-N wird ein einheitlicher Emissionsfaktor von 10 % des emittierten N₂O -N angenommen (Wolfensberger und Dinkel 1997). Der Konversionsfaktor von NO_x-N zu NO_x berechnet sich aus dem Molgewicht der Elemente und beträgt 3,29, für N₂O -N zu N₂O ist er 1,57. Damit betragen die NO_x-Emissionen 0,21 mal die direkten N₂O-Emissionen.

NH₃ – Ammoniak

Die Ammoniakemissionen aus Tierhaltung, Hofdüngeraufbereitung und -lagerung werden gemäss Allokationsregeln (siehe 3.1.6) den Hofdüngern nicht angelastet. Für die aus ihrer Ausbringung resultierenden Emissionen kommen die Faktoren in Tabelle 5 zur Anwendung.

Tabelle 5: NH₃-Emissionsfaktoren für die Ausbringung je Düngerart bzw. pro Hektare und Jahr

	N _{tot} -Gehalt ¹¹	Anteil N _{löslich} an N _{tot} ¹²	Von N _{löslich} emittiert ¹²	NH ₃ Emissionen ¹³
Laufstallmist Milchkühe	5 kg/t	40 %	60 %	1,45 kg NH ₃ /t
Vollgülle Milchkühe	4,5 kg/m ³	60 %	50 %	1,63 kg NH ₃ /m ³
Ammonsalpeter	27.5 %	100 %	2 % ¹⁴	24 g NH ₃ /kg N _{lös-} lich

¹¹ Walther et al. (1994) p. 27

¹² Menzi et al. (1997) Anhang C3.

¹³ Umwandlungsfaktor von NH₃-N zu NH₃ 1.21

¹⁴ Emissionsfaktoren von Asman W.A.H. (1992)

NO_3^- – Nitrat

In der Nitratauswaschung sind die Verluste infolge natürlicher mikrobieller Nitratbildung im Boden und Verluste infolge einer nicht dem Pflanzenbedarf angepassten Düngung berücksichtigt. Zuerst wurde die potentielle monatliche mikrobielle Nitratbildung in Tabelle 6 geschätzt. Dann folgten Annahmen für die potentielle monatliche Stickstoffaufnahme der Kulturen in Tabelle 7. Durch Subtraktion dieser beiden Werte berechnet sich das monatliche Nitratverlustpotential infolge mikrobieller Mineralisierung. Ein negativer Wert lässt darauf schliessen, dass kein Verlust auftritt, dies gibt aber keine Gutschrift. Für die Nitratverluste infolge einer dem Pflanzenbedarf nicht angepassten Düngung kamen die Faktoren in Tabelle 8 zur Anwendung. Alle Basiswerte zur Nitratauswaschung sind in Wolfensberger und Dinkel (1997) zu finden. Für die Kultur Rotationsbrache wurden die Werte von Grünbrache Herbstansaat in genannter Quelle bezüglich Auswirkungen der Saat angepasst, für Buchweizen jene von im Mai gesäeter Extensivwiese direkt übernommen. Der Konversionsfaktor von NO_3^- -N zu NO_3^- beträgt 4,43.

Tabelle 6: Potentielle mikrobielle Nitratbildung (P_M) in kg NO_3^- -N pro ha und Monat je Kultur in einem Boden mit maximal 2 % Humusgehalt und höchstens 25 % Tongehalt

Monat	Winterweizen	Raps	Rotationsbrache	Buchweizen	SM 210 (Ansaatwiese)	Intensive Wiese	Wenig intensive Wiese	Extensive Wiese
Januar	0	0	0	0	0	0	0	0
Februar	0	0	0	0	0	0	0	0
März	10	10	8	8	13	13	8	8
April	15	15	12	12	19,5	19,5	12	12
Mai	20	20	16	24	26	26	16	16
Juni	25	25	20	20	32,5	32,5	20	20
Juli	30	30	24	24	39	39	24	24
August	35	60	48	28	78	45,5	28	28
September	40	40	32	32	52	52	32	32
Oktober	40	20	16	16	26	26	16	16
November	10	10	8	8	13	13	8	8
Dezember	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 7: Potentielle Stickstoffaufnahme (P_K) in kg NO_3^- -N pro ha je Monat und Kultur

Monat	Winterweizen	Raps	Rotationsbrache	Buchweizen	SM 210 (Ansaatwiese)	Intensive Wiese	Wenig intensive Wiese	Extensive Wiese
Januar	0	5	0	0	0	0	0	0
Februar	15	10	5	0	15	15	5	5
März	30	30	10	0	30	30	10	10
April	40	40	15	0	40	40	20	20
Mai	60	50	20	0	40	40	25	25
Juni	50	40	25	10	40	40	30	30
Juli	30	20	30	20	40	40	30	30
August	0	0	0 ¹⁵	30	0	40	35	35
September	0	30	40	30	40	40	40	40
Oktober	10	60	20	20	30	30	20	20
November	10	20	10	10	10	10	10	10
Dezember	5	10	0	0	0	0	0	0

Tabelle 8: Potentielle N-Auswaschungsgefahr der Düngergaben (P_D) je Kultur und Monat in Prozent pro kg $\text{N}_{\text{löslich}}$ im Dünger

Monat	Winterweizen	Raps	SM 210 (Ansaatwiese)	Intensive Wiese	Wenig intensive Wiese
Januar	50 %	20 %	20 %	20 %	20 %
Februar	30 %	10 %	10 %	10 %	10 %
März	10 %	0 %	10 %	10 %	10 %
April	10 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Mai	10 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Juni	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Juli	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
August	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
September	0 %	10 %	0 %	0 %	0 %
Oktober	90 %	10 %	10 %	10 %	10 %
November	90 %	10 %	20 %	20 %	20 %
Dezember	90 %	10 %	20 %	20 %	20 %

Das Nitratauswaschungspotential pro Jahr beträgt:

¹⁵ Im Startjahr 0, im Folgejahr 35

Nitratauswaschungspotential pro Jahr = $\sum_{i=Jan}^{Dez} ((P_{Mi} - P_{Ki}) + P_{Di})$, wobei $P_{Mi} - P_{Ki} \geq 0$

P_M ist das mikrobielle Mineralisierungspotential des Bodens, P_K das Nitrataufnahmepotential der Kulturen und P_D steht für das Nitratauswaschungspotential der ausgebrachten Dünger. Die Monatssummen werden addiert, wobei ein negativer Wert darauf schliessen lässt, dass kein Verlust auftritt, dies gibt aber keine Gutschrift. Bei Raps sind die Monate August bis November zusammenzufassen, bei SM 210 und Rotationsbrache die Monate August bis Dezember.

PO_4^{3-} - Phosphat

Die PO_4^{3-} - Auswaschung ins Grundwasser ist praktisch unabhängig von der Düngung und der Kultur (Braun et al. 1994). Es kann für sämtliche Gebiete ausser Alpweiden und Sömmerungsweiden mit einem Emissionsfaktor ins Grundwasser von 459 g PO_4^{3-} /ha gerechnet werden (Braun et al. 1994).

Oberflächenabfluss hängt von Bodenfeuchtigkeit, Bodenstruktur und Niederschlägen ab (Von Albertini et al. 1993). Die durch Abschwemmung (Transport von gelösten Nährstoffen mit auf der Bodenoberfläche abfliessendem Wasser) verursachten PO_4^{3-} - Einträge in die Oberflächengewässer sind vor allem bei Grasland von Bedeutung. Auf Ackerland kann sich das gelöste PO_4^{3-} nämlich während des Transports an erodierte Bodenpartikel oder an die Bodenoberfläche binden (Braun et al., 1994; Sharpley et al. 1981). Für Wiesen wurde darum mit einem Faktor von 1270 g PO_4^{3-} /ha/Jahr und für die übrigen Kulturen mit 306 g PO_4^{3-} /ha/Jahr gerechnet (Braun et al. 1994).

Im Prinzip bestimmen die erodierte Bodenmenge und der Phosphorgehalt des Bodens die Verluste durch Bodenerosion. Da aber bei der Erosion vor allem kleine Korngrössen verfrachtet werden und PO_4^{3-} genau an diese kleinen Bodenteilchen gebunden ist, kommt es zu einer PO_4^{3-} - Anreicherung im Erosionsmaterial. Vom erodierten Bodenmaterial gelangen jedoch nur rund 20 % in die Gewässer (Prasuhn und Braun 1994), der Rest lagert sich auf der Fläche selbst oder dem Nachbarfeld ab. Eine Zusammenstellung über den PO_4^{3-} - Verluste durch Bodenerosion ist in (Tabelle 9) ersichtlich. Für die Rotationsbrache und Buchweizen werden die Werte der Zeile „anderen Kulturen“ angenommen, für intensive, wenig intensive und extensive Wiese diejenigen von SM 210.

Tabelle 9: PO₄³⁻-Eintrag in die Oberflächengewässer durch Erosion

Kultur	Mittlere Erosion t/ha/a ¹⁶	Erodierbarer Flächenanteil ¹⁷	Erosion in Gewässer (20 %) t/ha/a ¹⁸	P-Gehalt in mg/ kg Boden ¹⁹	Anreicherungsfaktor ²⁰	g PO ₄ ³⁻ /ha/a in Gewässer ²¹
Getreide	3	37 %	0,222	780	1,86	322
Raps	0,5	4 %	0,004	780	1,86	6
Andere Kulturen	1	20 %	0,04	780	1,86	58
SM 210 (Ansaatwiese)	0,3	20 %	0,012	780	1,86	17

Schwermetalle

Für die Schätzung der Schwermetalleinträge der einzelnen Systeme in den Böden wurde versucht, eine Bilanz der Einträge und Austräge aufzustellen (Tabelle 10 bis Tabelle 15). Für die Ermittlung der anlastbaren, kulturbedingten Emissionen wurden die Emissionen der einzelnen Kompartimente mit einem Allokationsfaktor multipliziert. Dieser ergibt sich aus der Division der kulturbedingten Einträge durch die Gesamteinträge.

Einträge:

Tabelle 10: Medianwerte für Schwermetalleinträge aus Hofdüngern in den Boden

	TS	Cd mg/kg TS	Co mg/kg TS	Cr mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Hg mg/kg TS	Mo mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Pb mg/kg TS	Zn mg/kg TS
Rindermist	20 %	0,3	<u>0,4</u>	<u>3,9</u>	39	<u>0,4</u>	<u>2,8</u>	<u>4,3</u>	8	170
Rindervollgülle	9 %	0,3	0,4	3,9	33	0,4	2,8	4,3	6,4	146

Quellen: Normalschrift: Menzi et al. (1993)

Kursiv: Gsporner (1990)

Unterstrichen: Annahme, dass die Gehalte gleich sind wie bei Rindervollgülle.

¹⁶ Prashun und Braun (1994) In: Braun M., Hurni P., Spiess E. (1994) p. 24

¹⁷ Mosimann et al. (1990) und Braun et al. (1991 in Prashun und Braun (1994) p. 47

¹⁸ Prashun und Braun (1994) p.29

¹⁹ Braun et al. (1994) p. 23

²⁰ 1.86 Wilke und Schaub (1996)

²¹ Umrechnungsfaktor P zu PO₄³⁻ = 3.06

Tabelle 11: Medianwerte für Schwermetalleinträge aus Ammonsalpeter in den Böden

	As mg/kg TS	Cd mg/kg TS	Co mg/kg TS	Cr mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Hg mg/kg TS	Mo mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Pb mg/kg TS	Se mg/kg TS	Zn mg/kg TS
Ammonsalpeter	0,43	0,05	5	4	7	0,023	0,25	13	1,9	0,25	50

Quelle: BUWAL (1991)

Tabelle 12: Medianwerte für Schwermetalleinträge durch Aschegemisch von der Heuverbrennung

	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Mo mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
Rostasche (90 %) und Zyklonasche (10 %)	0,14	63	8	1	58

Quelle: Hasler und Nussbaumer (1996)

Tabelle 13: Medianwerte der jährlichen atmosphärischen Ablagerung von Schwermetallen im ländlichen Raum und in der Agglomeration

Cd g/ha/a	Cr g/ha/a	Cu g/ha/a	Hg g/ha/a	Ni g/ha/a	Pb g/ha/a	Zn g/ha/a
1,1	5,3	40,4	1,5	25	37	159

Quelle: Bréchtel (1989), BUWAL (1995), Hertz (1989), Gälli-Gurhart (1991), KIGA (1991) alle in Wolfensberger und Dinkel (1997)

Austräge:

Für den Schwermetallaustrag via Erntegut (Tabelle 14) wurde angenommen, dass der Gehalt in Buchweizenkörnern gleich wie jene in Weizenkörnern sei. Da bei der Rotationsbrache keine Ernte erfolgt, gibt es auch keinen Austrag. Für die wenig intensive und die extensive Naturwiese wurden die Werte der intensiven Naturwiese übernommen.

Tabelle 14: Austrag von Schwermetallen in mg/kg TS Erntegut je Kultur

Kultur	Quellen	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Weizenkorn	Wolfensberger und Dinkel (1997)	0,15	0,3	5	0,014	0,3	0,16	45
Weizenstroh	Wolfensberger und Dinkel (1997)	0,42	0,35	2,5	0,061	0,35	1,05	10,7
Rapskorn	Von Steiger und Baccini (1990) Stadelmann und Frossard (1992)	1,6	0,5	3,3	0,1	2,6	5,25	48
SM.210 (Ansaatwiese)	Von Steiger und Baccini (1990) Wolfensberger und Dinkel (1997)	0,13	1,1	8,6	0,15	1,7	3,4	39
Intensive Wiese	Von Steiger und Baccini (1990)	0,13	1,1	13	0,15	1,7	6	49

Für die Schwermetallausträge via Sickerwasser ins Grundwasser werden gemäss Peters (1990) für Cd 50 mg/ha und Jahr, für Cu 3600 mg/ha und Jahr, für Pb 600 mg/ha und Jahr und für Zn 33 000 mg/ha und Jahr angenommen.

Der Schwermetallaustrag durch Erosion hängt von der erodierten Bodenmenge und dem Schwermetallgehalt ab. Da das Adsorptionsverhalten der Schwermetalle ähnlich ist wie dasjenige von PO_4^{3-} , kommt derselbe Anreicherungsfaktor zur Anwendung. Für Rotationsbrache und Buchweizen werden die Werte von anderen Kulturen übernommen, für intensive, wenig intensive und extensive Wiese diejenigen von SM 210.

Tabelle 15: Schwermetallausträge durch Erosion je Kultur pro ha und Jahr

Kultur	Erosion t/ha/a ²²	Anreicherungsfaktor ²³	Cd g/ha/a	Cr g/ha/a	Cu g/ha	Hg g/ha/a	Ni g/ha/a	Pb g/ha/a	Zn g/ha/a
Schwermetallgehalt in g/t Boden ²⁴			0,23	25,1	20,1	0,09	23,4	22,7	47,1
Getreide	0,222	1,86	0,095	10,4	8,3	0,04	9,7	9,4	19,4
Raps	0,004	1,86	0,002	0,19	0,15	0,001	0,17	0,17	0,35
Andere Kulturen	0,040	1,86	0,017	1,87	1,5	0,006	1,74	1,69	3,5
SM 210 (Ansaatwiese)	0,012	1,86	0,005	0,56	0,45	0,002	0,52	0,51	1,05

Emissionen durch Verrottung von Holz im Wald

Zur Holzverrottung liegen keine den Autorinnen und Autoren bekannte Emissionsdaten vor. Deshalb wurden für die Luftemissionen Messergebnisse aus Kompostversuchen (Tabelle 16, Hellebrand 1998, Grönauer et al. 1997) herangezogen. Aus den Zahlen ist ersichtlich, dass in der an und für sich aeroben Kompostierung auch Methan freigesetzt wird. Da das Lignin im Holz jedoch nur aerob abgebaut wird, sind Methanemissionen für den Holzabbau fraglich, obwohl anaerobe Bakterien aus den Zwischenprodukten des Abbaus Methan bilden können. Bezüglich des Schwermetallgehaltes im Holz wird davon ausgegangen, dass die gesamte Menge in den Boden emittiert wird. Da diese Schwermetalle aber je zur Hälfte (Annahme) aus der Luft und aus dem Boden stammen, wo sie keine Schäden mehr verursachen können, müssen sie in diesen Kompartimenten von den Umweltbelastungen in Form einer Gutschrift abgezogen werden. Mit der Holzverrottung wird der Kreislauf wieder geschlossen.

Um die Bedeutung des Verrottungsprozesses und speziell des Methans innerhalb des Untersuchungssystems zu zeigen, wird eine Variante mit den Emissionswerten aus Tabelle 16 gerechnet und eine Variante mit der Annahme, dass keine Emissionen ausser biogenem CO_2 auftreten.

²² Siehe Tabelle 9

²³ Wilke und Schäub (1996)

²⁴ BUWAL (1993)

Tabelle 16: Emissionen pro kg Holz waldfrisch

Emission	Gemessen in Hellebrand (1998)	Gemessen in Gronauer et al. (1997)	Elementgehalt in Buchenholz ²⁵	Variationsbreite Emissionen pro kg Buchenholz mit 20 % TS ²⁶	Verwendete Emissionen pro kg Buchenholz 20 % TS
CO ₂	CO ₂ -C: 81 % C	CO ₂ -C: 67 % C	490 g C/ kg TS	1 313g- 1 588g	0 CO ₂ - fossil
CO	CO-C: 0,04 % C	-	490 g C/ kg TS	0,09 g	0,09 g
CH ₄	CH ₄ -C: 1,7 % C	CH ₄ -C: 2 % C	490 g C/ kg TS	2,23g – 13,1g	7,7 g
NH ₃	NH ₃ -N: 1,2 % N	NH ₃ -N: 11,4 % N	2,3 g N/ kg TS	0,007g – 0,3g	0,15 g
N ₂ O	N ₂ O-N: 0,5 % N	N ₂ O-N: 1,8 % N	2,3 g N/ kg TS	0,004g.– 0,06g	0,03 g
Cd	-	-	0.12 mg/kg TS	-	0.02 mg
Pb	-	-	0.58 mg/kg TS	-	0.12 mg
Zn	-	-	29.6 mg/kg TS	-	5.92 mg

Emissionen durch Energieverbrauch

In Tabelle 17 sind die Verbrennungsemissionen von Diesel und RME in Traktoren ersichtlich. Sowohl für Diesel als auch für RME wurde jeweils derselbe Motor im 5 Punkte-Test gemessen. In Tabelle 18 sind die Verbrennungsemissionen von Motormähern, Motorsägen sowie von Mähreschern bzw. Brennholzautomaten und Forwardern aufgelistet. Die benötigten Treibstoffmengen (hier nicht dargestellt) stammen aus verschiedenen FAT-Untersuchungen. Die Emissionen der verschiedenen stationären Verbrennungsanlagen (

Tabelle 19) wurden von Messwerten und Literaturdaten aus der Einheit mg Schadstoff pro Normkubikmeter (Nm³) Abgas mittels der Formel von Frei (1988) für Holz, Heizöl und Erdgas sowie für Heu mittel des Umrechnungsfaktors 7,56 (Biollaz, 1999) in mg Schadstoff pro kg oder m³ Energieträger umgerechnet.

Da die Schwermetalle, die im Holz eingelagert sind, vorher der Luft und dem Boden entzogen wurden, wo sie keine Schäden mehr verursachen können, muss dies von der Luftbelastung in Form einer Gutschrift abgezogen werden. Mit der Holzverbrennung wird der Kreislauf wieder geschlossen und die Schwermetalle an die Luft abgegeben.

²⁵ Aus Frischknecht et al. (1996): Holz, Holzqualitäten und Zusammensetzung

²⁶ Umwandlungsfaktoren CO₂-C zu CO₂: 4, CO-C zu CO: 2.33, CH₄-C zu CH₄: 1.34, NH₃-N zu NH₃: 1.21, N₂O-N zu N₂O: 1.57

Tabelle 17: Verbrennungsemissionen von Diesel und Rapsmethylester in Traktoren

Emission		Traktor g/kg Diesel	Traktor g/kg RME
CO ₂ fossil	Prüfresultate FAT, interne Mitteilung, (1996)	3 100	0
CO		9,6	8,4
HC		4,5	2,2
NO _x		51	53
Partikel		1,8	1,3
N ₂ O		nicht nachweisbar = 0	nicht nachweisbar = 0
SO ₂		1,1 ²⁷	0,02 ²⁸
CH ₄	Wörgetter et al. (1991) "Pilotprojekt Biodiesel" Teil 2, S. 53	0,038	0,029
Benzol		0,0073	0,0083

Tabelle 18: Verbrennungsemissionen von Motormäher, Motorsäge, Mähdrescher, Brennholzautomat und Forwarder

Emission	Motormäher: g/kg Benzin ²⁹	Motorsäge: g/kg Benzin ³⁰	Mähdrescher bzw. Brennholzautomat und Forwarder: g/kg Diesel ³¹
CO ₂ fossil	3 157	1 171,8	3 180
CO	450,63	802,9	13,8
HC	17,03	231,5	6,05
NO _x	12,71	1,5	46,7
Partikel	0,37 ³²	0,37 ³³	4,99
SO ₂	0,09 ³⁴	0,09 ³⁴	1,1 ³⁵
CH ₄	0 ³⁶	0 ³⁶	0,2
Benzol	9,48	9,48 ³³	0,001
N ₂ O	0 ³⁶	0 ³⁶	0,08

²⁷ Berechnet aufgrund des Schwefelgehaltes

²⁸ Berechnet aufgrund des Schwefelgehaltes

²⁹ Teillast 75 %, Benzin bleifrei 95 ohne Katalysator, Stadler et al. (1999)

³⁰ EMPA, unveröffentlichte Messung gemäss ISO 8178 G3

³¹ Gäßlard et al. (1997)

³² Czewinski und Mayer (1999)

³³ Annahme

³⁴ Berechnet aufgrund des Schwefelgehaltes, Benzin bleifrei 98

³⁵ Berechnet aufgrund des Schwefelgehaltes von 1998

³⁶ Annahme basierend auf Bach et al. (1998), S. 29

Tabelle 19: Emissionen stationärer Verbrennungsanlagen je Einheit eingesetzten Brennstoffes

Emission	Hausheizung mg/kg Holz lufttrocken 80 %TS	Hausheizung mg/Nm ³ Erd- gas	Hausheizung mg/kg Heizöl EL	Industrie- feuerung mg/kg Heizöl EL	Heizkraftwerk mg/kg TS Heu
CO ₂ fossil	0	2 107 560 ³⁷	3 667 930 ³⁸	3 667 930 ³⁹	0
CO	3 320 ⁴⁰	28 ⁴⁰	72 ⁴⁰	551 ³⁹	1 788 ⁴¹
NO _x	1 760 ⁴⁰	245 ⁴⁰	1 240 ⁴⁰	1 708 ³⁹	3 202 ⁴¹
N ₂ O	28 ⁴²	4 ³⁷	30 ³⁸	30 ³⁹	232 ⁴³
CH ₄	1 792 ⁴²	229 ³⁷	26 ³⁸	52 ³⁹	20 ³⁹
SO ₂	359 ⁴²	19 ³⁷	2 298 ⁴⁴	2 298 ⁴⁴	542 ⁴¹
VOC	91 ⁴⁰	305 ³⁷	119 ⁴⁰	154 ³⁹	60 ³⁹
Partikel	365 ⁴⁰	4 ³⁷	9 ³⁸	9 ³⁹	18 ⁴³
NH ₃	161 ⁴²	0 ³⁷	0 ³⁸	0 ³⁹	0 ³⁹
HCl	14 ⁴²	0 ³⁷	5 ³⁸	5 ³⁹	2 ³⁹
HF	0,5 ⁴²	0 ³⁷	0,5 ³⁸	0,5 ³⁹	0,2 ³⁹
Pb	0,2 ⁴²	0 ³⁷	0,3 ³⁸	0,3 ³⁹	0,1 ³⁹
Zn	1,8 ⁴²	0 ³⁷	0,1 ³⁸	0,1 ³⁹	0,04 ³⁹
Cd	0,07 ⁴²	0 ³⁷	0,05 ³⁸	0,05 ³⁹	0,02 ³⁹

3.1.9 Wirkungskategorien und Wirkungsfaktoren

In der Wirkungsbilanz erfolgt die Bestimmung der potentiellen Auswirkungen der Stoff- und Energieströme auf die Umwelt. Die Stoffmengen werden mit einem entsprechenden Charakterisierungsfaktor/Gewichtungsfaktor (siehe Anhang Tabelle 36) multipliziert, welcher der relativen Wirkung des Stoffes entspricht. Der Charakterisierungsfaktor beruht auf den heute geltenden naturwissenschaftlichen Theorien. Die gewichteten Stoffströme werden dann zu Umweltwirkungen zusammengefasst (Tabelle 21). Dies geschieht durch die Addition der gewichteten Flüsse mit derselben Art der Auswirkung auf die Umwelt. Die Faktoren für die Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieressourcen, das Treibhauspotential, die Ozonbildung und die Versauerung sind allgemein akzeptiert, für die Eutrophierung und die Toxizität gibt es in der Literatur noch weitere Methoden, auf welche zum Teil in der Sensitivitätsanalyse eingegangen wird.

³⁷ Berechnet aus low-NO_x – Anlagen (BUWAL 1995b, p. 46), wobei VOC = CH₄ + NMVOC

³⁸ Berechnet aus lox-NO_x – Anlagen ohne Oekoöl (BUWAL 1995b, p. 42)

³⁹ Berechnet aus low-NO_x – Anlagen entspr. LRV. 92 (BUWAL 1995b, p. 14), wobei VOC = CH₄ + NMVOC

⁴⁰ Berechnet aus den jeweiligen EMPA-Typenprüfberichten

⁴¹ Berechnet aus Messwerten (Schkölen 1999)

⁴² Berechnet aus Stückholzfeuerungen Haushalt (BUWAL 1995b, p. 53)

⁴³ Berechnet aus Weber et al. (1995)

⁴⁴ Berechnet aufgrund des Schwefelgehaltes von Heizöl EL 1998

Tabelle 21: Die in der Ökobilanz berücksichtigten Umweltwirkungen und die Quellen der entsprechenden Charakterisierungsfaktoren

Umweltwirkung	Kurze Charakterisierung der Umweltwirkung	Gewichtungsfaktoren (GWF)
Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieressourcen	Verbrauch an nicht-erneuerbaren energetischen Ressourcen wie zum Beispiel Erdöl	Unterer Heizwert aus Frischknecht et al. (1996)
Treibhauspotential	Erhöhung der Temperatur der Atmosphäre aufgrund von Gasen (zum Beispiel CO ₂ , CH ₄), die Infrarotstrahlen wieder auf die Erde reflektieren. Zeithorizont 500 Jahre	Albritton et al. (1995) Prather et al. (1995)
Ozonbildung	Bildung von Ozon (Sommersmog) infolge Emissionen von zum Beispiel Stickoxiden	Hauschild und Wenzel (1998)
Versauerung	Versauerung der Böden und die damit verbundene Schädigung von Pflanzen durch Luftimmissionen von zum Beispiel SO ₂	Hauschild und Wenzel (1998)
Gesamteutrophierung	Erhöhung des Nährstoffgehaltes der Böden und Gewässer durch düngungswirksame Stoffe in Luft und Wasser	Lindfors et al. (1995)
Humantoxizität	Belastung der Gesundheit vom Menschen durch giftige Stoffe in der Atemluft und im Wasser	Jolliet und Crettaz (1997), Margni et al. (2000)
Aquatische Ökotoxizität	Schädigung von Lebewesen durch giftige Stoffe im Wasser	Jolliet und Crettaz (1997), Margni et al. (2000)
Terrestrische Ökotoxizität	Schädigung der Lebewesen durch giftige Stoffe im Boden, zum Beispiel Pestizide, Schwermetalle	Jolliet und Crettaz (1997), Margni et al. (2000)

3.1.10 Auswertungskonzept

Die Auswertung der Ökobilanzresultate pro Einheit Nutzenergie erfolgt für jede Umweltkategorie separat, also ohne Normalisierung und Aggregation. Durch die Stufe Nutzenergie sind die unterschiedlichen Nutzungsgrade der Energiesystemsysteme bereits inbegriffen. Das Verhältnis des Bioenergieträgers zu seinem Alternativszenario dient zur Einteilung der Bioenergieträger in „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ nach dem Schema von Wolfensberger und Dinkel (1997) (vgl. Tabelle 24). Die Gesamtbeurteilung berücksichtigt die Hauptziele der Schweizerischen Bundespolitik bezüglich Energien, das heisst die Verringerung des Treibhauseffektes und die sichere Energieversorgung. In einer Sensitivitätsanalyse wird die Bedeutung der Holzverrottung, der Wahl der Methode für die Toxizitäten und der Eutrophierung

hinsichtlich der Resultate beleuchtet. Zusätzlich werden die Resultate mit anderen Studien verglichen und allfällige Diskrepanzen eruiert.

4. Resultate und Diskussion

4.1 Bewertung nach Wirkungskategorien

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Umweltbelastungen der untersuchten Energieträger. Alle Wirkungskategorien werden unabhängig voneinander analysiert, und die erneuerbaren Energien mit den Szenarien der fossilen Energieträger als Referenzszenarien verglichen. Fällt das Resultat für den Bioenergieträger bezogen auf die entsprechende Wirkungskategorie kleiner als für das Referenzsystem aus, ist er ökologisch sinnvoller als der fossile Energieträger und umgekehrt.

Die Berechnungen beruhen auf den Ergebnissen der Sachbilanz. Die Wirkungskategorien und -faktoren sind in Tabelle 21 und im Anhang (Tabelle 36) erklärt. Negative Zahlen sind durch Gutschriften erklärbar (siehe Kap. 3.1.6).

Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energiressourcen

Der Verbrauch nicht erneuerbarer Energiressourcen (Abbildung 6) stellt hinsichtlich der sich verknappenden fossilen Energiequellen eine wichtige Umweltwirkung dar. Alle erneuerbaren Energieträger schneiden erwartungsgemäss deutlich besser ab als die entsprechenden Referenzszenarien. Ihr Bedarf an nicht erneuerbaren Energien liegt zwischen knapp 28 mal (Holz- vs. Ölheizung) und knapp drei mal tiefer (Fernwärme aus Heu vs. Extensoheu/Öl) als für die entsprechenden Referenzszenarien. Die Holzheizung benötigt pro MJ Nutzenergie weniger nicht erneuerbare Energieträger als die Produktion von Fernwärme durch Heuverbrennung oder der Betrieb eines Motors mit RME, weil der nur teilweise betrachtete forstwirtschaftliche Teil viel weniger energieaufwändig als die landwirtschaftlichen Prozesse ist.

Bei den Referenzszenarien wird die grösste Belastung durch den direkten Verbrauch der jeweiligen Energieträger verursacht, weil dort auch die Produktion und die Bereitstellung von Öl und Gas enthalten sind. Die Werte der Ölheizung fallen wegen ihres geringeren Wirkungsgrads (0.85 Gesamtwirkungsgrad) schlechter als die der Gasheizung aus (0.95 Gesamtwirkungsgrad). Beim Szenario Holzheizung werden etwa zwei Drittel der benötigten Energiressourcen für die Holzaufbereitung verwendet, bei RME der grösste Teil im Rapsanbau (siehe Tabelle 21), der wegen der verwendeten Maschinen und Dünger sehr energieaufwändig ist. Der Prozess "Ölmühle" erreicht dank der hohen Gutschrift aus der Allokation für die Glycerinproduktion gar eine negative Belastung, da beim ersetzten synthetischen Glycerin viele Chemikalien und viel Energie aufgewendet werden müssten. Beim System Fernwärme aus Heu fallen 70 % des Verbrauchs von Energiressourcen der Verbrennung zu, weil im Heizkraftwerk bei Ausfällen und Bedarfsspitzen auf Ölbetrieb umgeschaltet wird und somit diese Ölverbrennung anteilmässig einberechnet wurde.

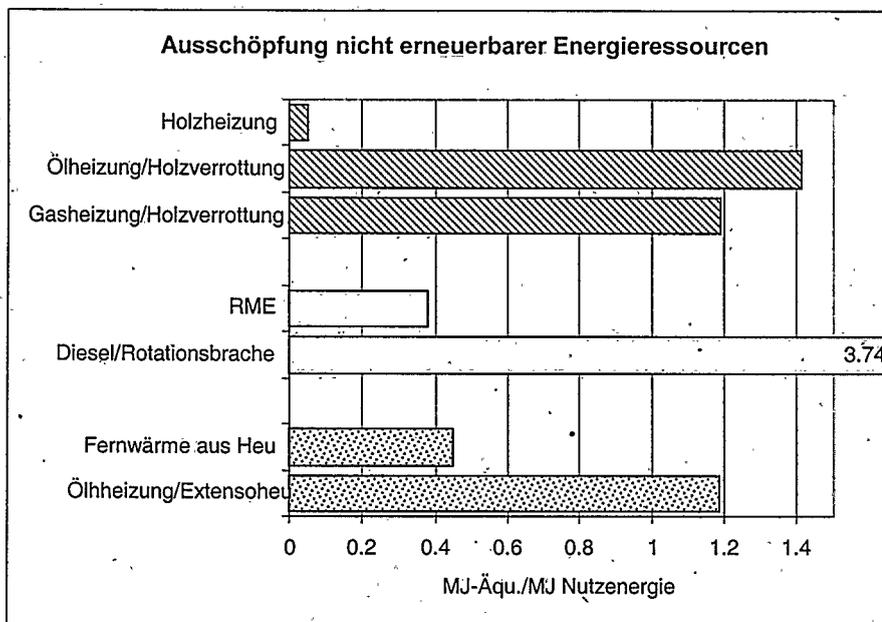


Abbildung 6: Wirkungskategorie "Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung mit unterem Heizwert nach Frischknecht et al. 1996).

Treibhauspotential

Das Treibhauspotential eines Energieträgers ist von grosser ökologischer Bedeutung. Weltweit produzieren die Verbrennung fossiler Energieträger sowie die Landwirtschaft einen grossen Anteil der Treibhausgase (BUWAL 1997). Abbildung 7 zeigt, dass die Bioenergieträger ein deutlich tieferes Treibhauspotential als deren Referenzszenarien aufweisen. Die Werte der Bioenergieträger liegen zwischen gut drei Mal (RME vs. Rotationsbrache/Diesel) und 37 Mal tiefer (Holz- vs. Ölheizung) als jene der fossilen Energieträger. Beim Szenario Holzheizung werden im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energien am wenigsten Treibhausgase produziert.

Der Grund für das ausserordentlich positive Ergebnis der erneuerbaren Energieträger liegt darin, dass das biogene Kohlendioxid nicht als Belastung für den Treibhauseffekt angerechnet wird. Denn beim Wachstum der Pflanzen wird dieselbe Menge CO_2 über die Photosynthese aus der Luft gebunden wie später bei der Verbrennung freigesetzt wird. Der Kreislauf wird somit innert nützlicher Frist geschlossen. Würden diese Pflanzen(produkte) nicht verbrannt, sondern der Natur und der Verrottung überlassen, entstünde dieselbe Menge Kohlendioxid wie bei der Verbrennung.

Die Anteile der Prozesse an der gesamten Umweltwirkung eines Szenarios liegen im Grossen und Ganzen gleich wie bei der Kategorie "Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger" (siehe Tabelle 21). Das heisst, die Verbrennung produziert bei den fossilen Energieträgern die höchsten Anteile. Dasselbe gilt für das System Fernwärme aus Heu, weil dort für den Spitzenbedarf der Ölheizkessel zugeschaltet wird. Beim System RME ist die Produktion von Treibhausgasen fast vollständig auf die landwirtschaftlichen Teile zurückzuführen, da durch die Düngung Lachgas emittiert wird. Beim Szenario Holzheizung fällt der Holzverbrennung eine verhältnismässig grosse Belastung zu, weil bei der Verbrennung aus dem im Holz

enthaltenen Stickstoff das Treibhausgas N_2O produziert wird. Die Gasheizung schneidet mit drei Viertel der Umweltbelastung einer Ölheizung besser ab. Zum höheren Wirkungsgrad der Gasheizung kommt bei dieser Wirkungskategorie noch hinzu, dass das Erdgas aufgrund seiner chemische Zusammensetzung⁴⁵ pro Energieeinheit weniger Kohlenstoff enthält als das Heizöl und somit weniger CO_2 produziert.

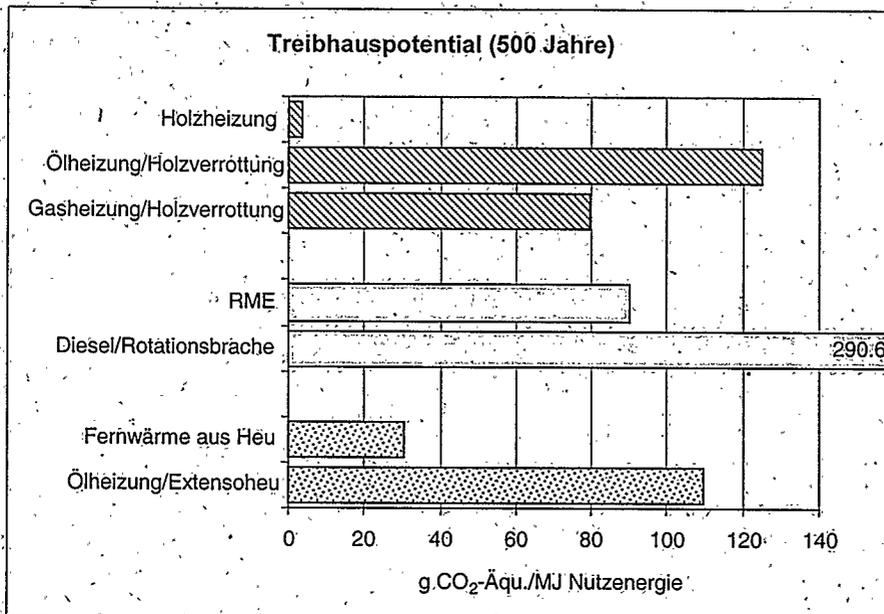


Abbildung 7: Wirkungskategorie "Treibhauspotential" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Albritton et al. 1995 und Prather et al. 1995).

Ozonbildung

Aus den emittierten flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wird mit Stickoxiden (NO_x) unter intensiver Sonneneinstrahlung Ozon (O_3) gebildet, das der dominierende Bestandteil des Sommersmogs ist. In zu hohen Konzentrationen wirkt dieses bodennahe Ozon durch seine Aggressivität und Giftigkeit schädigend auf Mensch und Umwelt. Das Ozonbildungspotential ist verschieden in Regionen mit niedrigen und hohen Konzentrationen von NO_x (siehe Hauschild und Wenzel 1998). Für Westeuropa wird von einer hohen NO_x -Konzentration ausgegangen (siehe Anhang, Tab. 30)

Alle erneuerbaren Energieträger tragen mit knapp zwei Mal (Holz- vs. Gasheizung) bis 12 Mal (RME vs. Rotationsbrüche/Diesel) tieferen Werten im Vergleich zu den Referenzenergien weniger stark zur bodennahen Ozonbildung bei (siehe Abbildung 8). Vor allem die Erdöl- und Dieselverbrennung verursacht ein hohes Ozonbildungspotential. Auch bei der Bereitstellung von Heizöl und Diesel wird als Brennstoff vor allem Rohöl verwendet, das bei der Verbrennung verhältnismässig viel Methan und andere VOC produziert (BUWAL, 2000).

Bei allen Energieträgern steuert die Verbrennung den grössten Anteil zur Ozonbildung bei (siehe Tabelle 21), da bei der Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen NMVOC entstehen.

⁴⁵ Erdgas besteht vorwiegend aus Methan. Das C:H-Verhältnis ist somit 1:4. Heizöl besteht aus langkettigen Kohlenwasserstoffen. Als Näherung gilt ein C:H-Verhältnis von 1:2. (Erdgas 2000)

Kohlenmonoxid (bei Holzheizung und Fernwärme aus Heu) und Methan (bei Gasheizung) sind weitere Gase, die massgebend zur Ozonbildung beitragen. Anders sieht die Verteilung beim System RME aus, wo der Rapsanbau den grössten Anteil an der Ozonbildung aufweist. Durch die aufwändige Bewirtschaftung wird viel Energie für die Arbeit und die Düngerherstellung verbraucht, was zu der verhältnismässig hohen VOC-Produktion führt.

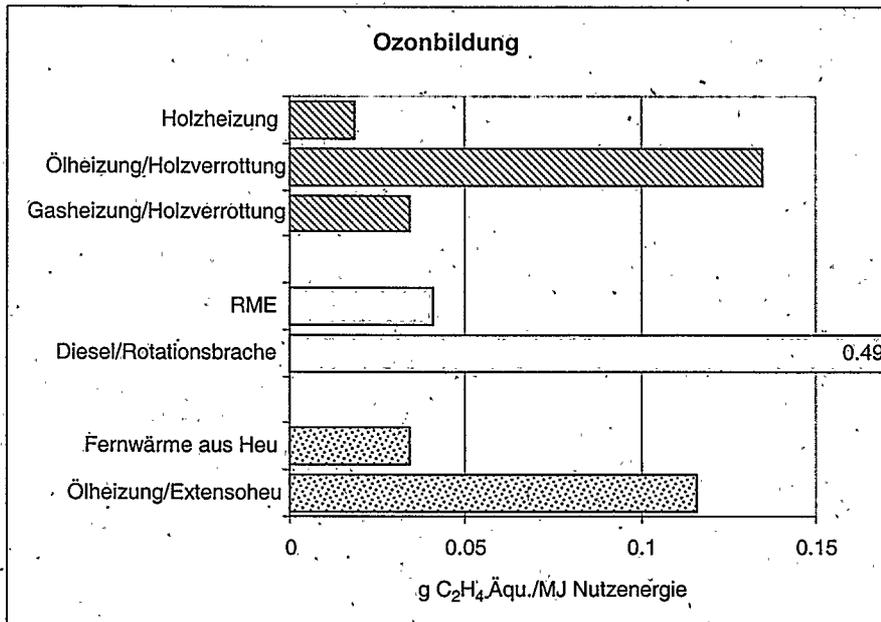


Abbildung 8: Wirkungskategorie "Ozonbildung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Hauschild und Wenzel 1998).

Versauerung

Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x) sind die wichtigsten Vorläufersubstanzen von sauren Niederschlägen. Diese führen zu einer Versauerung des Bodens und somit zur Störung des Gleichgewichtes in den Ökosystemen. Speziell die Pflanzen werden dabei geschädigt. Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass fast alle Bioenergieträger ein höheres Versauerungspotential als deren entsprechenden fossilen Energieträger aufweisen. Die Ausnahme bildet der Vergleich Holz- vs. Ölheizung, wo beide Energieträger eine vergleichbare Wirkung auf die Versauerung des Bodens haben. Das Szenario Extensioheu/Ölheizung erreicht durch die hohen Gutschriften für das Extensioheu einen negativen Wert, da die ersetzte Intensivwiese und das Weizenfeld (siehe Kapitel 3.1.6) gedüngt und dadurch NO_x gebildet wird (Nitrifikation). Abgesehen vom negativen Wert für das Szenario Extensioheu/Ölheizung erreicht die Gasheizung die niedrigste Belastung. Da der Stickstoff- und Schwefelgehalt von Erdgas sehr tief liegt, ist die Belastung nur halb so hoch wie die der Holzheizung. Die Werte für RME und Diesel liegen im Vergleich zu den anderen Energieträgern sehr hoch. Grund dafür sind bedeutend höhere NO_x-Emissionen, die aufgrund des geringeren Wirkungsgrades des Motors (0,3) im Vergleich zu den Heizkesseln (Wirkungsgrad 0,75 bis 0,95) und durch die höheren Verbrennungstemperaturen in die Luft abgegeben werden.

Die Holzheizung schneidet schlechter ab als die Gasheizung, weil bei der Holzverbrennung bedeutend mehr NO_x gebildet wird (siehe Tab. 19). Die NO_x-Produktion der Holzverbren-

nung ist auch im Vergleich zur Ölverbrennung höher, allerdings produziert die Ölheizung noch SO_2 , was bei Holz nur in sehr kleinen Mengen emittiert wird. Die Prozesse Rapsanbau und RME-Verbrauch des Systems RME bilden durch die Düngung (Ammoniak und NO_x) und Verbrennung (NO_x) die Hauptanteile bei der Umweltbelastung Versauerung.

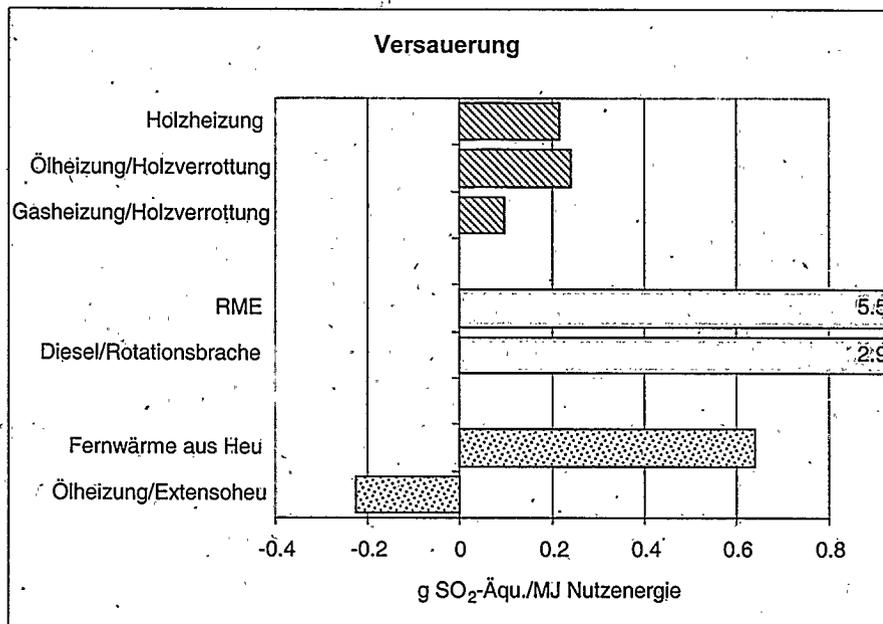


Abbildung 9: Wirkungskategorie "Versauerung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Hauschild und Wenzel 1998).

Gesamteutrophierung

Einträge von düngungswirksamen Stickstoff- und Phosphorverbindungen über Luft und Wasser erhöhen den Nährstoffgehalt in Böden und Gewässern. Diese Eutrophierung hat bei empfindlichen Ökosystemen zum Beispiel Veränderungen in der Artenzusammensetzung zur Folge. Abbildung 10 zeigt, dass keiner der erneuerbaren Energieträger bezüglich der Gesamteutrophierung ökologisch sinnvoller als die Referenzsysteme ist. Holzheizung und RME erreichen immerhin vergleichbare Potentiale wie ihrer Referenzszenarien. Nur bei Fernwärme aus Heu fällt der Vergleich eindeutig zugunsten des fossilen Energieträgers aus. Auffallend sind wiederum die hohen Werte für die Szenarien RME und Rotationsbrache/Diesel sowie der verhältnismässig stark negative Wert für Extensoheu/Ölheizung. Dieser wird durch eine hohe Gutschrift für das Extensoheu (Düngung der Intensivwiese) erreicht. Bei den Szenarien RME und Rotationsbrache/Diesel trägt der Feldbau stärker zur Gesamteutrophierung als die Verbrennung der Energieträger bei (siehe Tabelle 21). Dies auch ohne Düngung, da die Auswaschung und der Abfluss des für die Gesamteutrophierung massgebenden Phosphors praktisch unabhängig von der Düngung vor sich geht (siehe Kapitel 3.1.8) Für die Szenarien Holz-, Öl- und Gasheizungen würden keine Phosphorausträge und Nitatauswaschung eingerechnet, da für Waldböden keine Daten zur Verfügung standen. Somit dürfen diese drei Heiz-Szenarien in dieser Wirkungskategorie nicht mit den anderen Energieträgern verglichen werden. Die Holzverbrennung produziert mehr Stickstoff in Form von NO_x und Ammoniak als die Ölverbrennung, aber beim Szenario Ölheizung kommt die Holzverrottung im Wald mit Ammoniakemissionen dazu, so dass die beiden Systeme insgesamt ungefähr

gleich viel zur Gesamteutrophierung beitragen. Die Gasheizung erreicht durch den höheren Wirkungsgrad und den niedrigen Stickstoffgehalt von Erdgas ein besseres Resultat als die anderen zwei Brennstoffe.

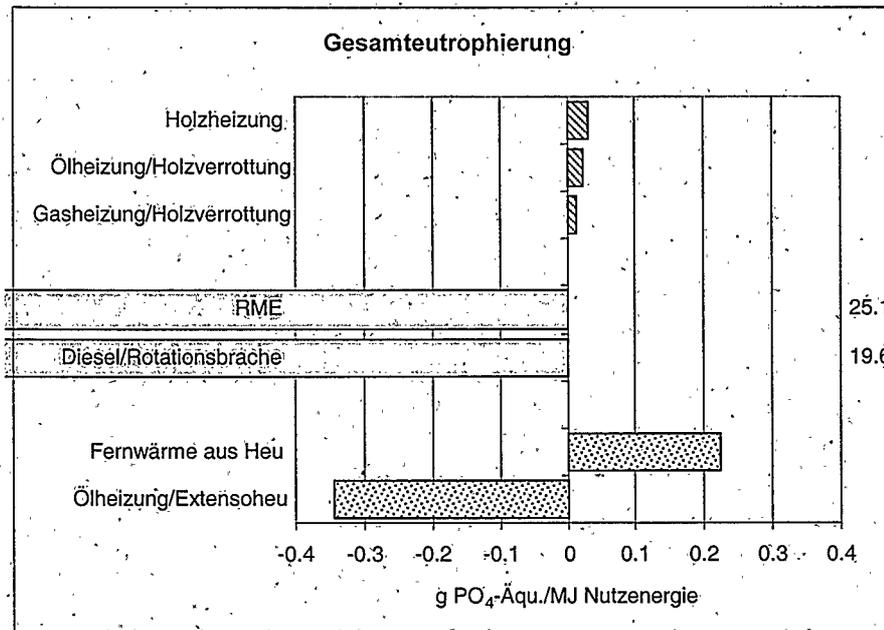


Abbildung 10: Wirkungskategorie "Gesamteutrophierung" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Lindfors et al. 1995).

Humantoxizität

Einwirkung von toxischen Substanzen über Luft, Wasser und Boden und speziell über die Nahrungskette können beim Menschen zu Gesundheitsproblemen führen. Bei der Berechnung der Humantoxizität nach Jolliet und Crettaz (1997) sind die Schwermetalle in Luft, Wasser und Boden aufgrund ihrer Nicht-Abbaubarkeit mit hohen Wirkungsfaktoren versehen. Wie in Abbildung 11 ersichtlich, verhalten sich die Bioenergieträger gegenüber ihren Referenzsystemen ungleich. Die Humantoxizität des Systemes RME ist nur halb so gross wie von Diesel/Rotationsbrache. Bei beiden Heizszenarien weisen die erneuerbaren Energien höhere Humantoxizitätspotenziale als die fossilen Energien auf. Die Gründe sind:

Die Holzheizung emittiert pro MJ Nutzenergie aufgrund des schlechten Wirkungsgrades und der geringen Energiedichte des Holzes mehr Schwermetalle als die Öl- und die emissionsarme Gasheizung. Zudem werden die bei der Holzverrottung in den Boden abgegebenen Schwermetalle für die Humantoxizität nicht so stark gewichtet wie die bei der Holzverbrennung in die Luft abgegebenen. Beim Gasheizungssystem resultiert sogar eine negative Belastung, da via Verrottung schädliche Schwermetalle aus der Luft in den Boden umgelenkt werden und die Verbrennung von Erdgas kaum Schwermetalle emittiert.

Die RME-Verbrennung ist deutlich weniger schädigend für den Menschen als die Dieserverbrennung, weil bei Diesel viel mehr Schwermetalle emittiert werden. Der leicht höhere Anteil des Rapsanbaus verglichen mit der Rotationsbrache ist nicht ausschlaggebend für das Endresultat. Die Heuverbrennung und die Ölverbrennung erreichen zwar etwa die gleichen Werte, das Szenario Extensioheu/Ölheizung schneidet aber verglichen mit der Fernwärme

aus Heu im Gesamten besser ab, weil die Gutschrift für das Extensoheu etwa ein Drittel des Gesamtwertes der Humantoxizität ausmacht (siehe Tabelle 21).

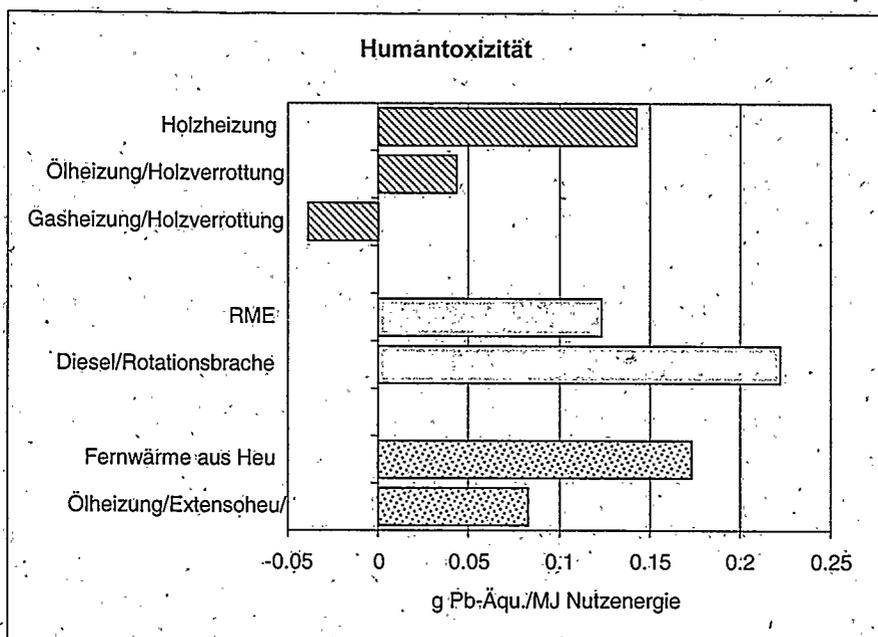


Abbildung 11: Wirkungskategorie "Humantoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt. (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997).

Aquatische Ökotoxizität

Die Wirkungskategorie "Aquatische Ökotoxizität" ist ein Mass für die Schädigung von Lebewesen durch giftige Stoffe im Wasser. Schwermetalle und Pestizide belasten die Gewässer besonders. Abbildung 12 stellt die Resultate für die Aquatische Ökotoxizität dar. Allgemeine Aussagen über die Bioenergieträger sind nicht möglich. Die Holzheizung hat ein um den Faktor 4,5 kleineres Potenzial als die Ölheizung. Fernwärme aus Heu ist vergleichbar mit dem Szenario Extensoheu/Ölheizung. Die Vergleiche Holz- vs. Gasheizung und RME vs. Rotationsbrache/Diesel fallen für die erneuerbaren Energieträger vier bis fünf Mal schlechter aus. RME erreicht eindeutig den höchsten Wert und belastet somit unter allen untersuchten Energieträgern das Wasser am stärksten. Grund dafür ist die Bewirtschaftung mit Düngung und Pestizideinsatz auf dem Acker. Die ganze Belastung beruht auf den Emissionen des Rapsanbaus. Wird nur die Verbrennung der beiden Treibstoffe verglichen, ist RME vorteilhafter als Diesel.

Die Ölheizung erreicht im Vergleich zu Holz und Erdgas die höchste Umweltbelastung, weil im Prozess der Ölverbrennung auch der Transport und die Raffinierung des Öls beinhaltet sind. Der grösste Anteil an der Aquatischen Ökotoxizität spielen dabei Öle, die ins Wasser gelangen. Die Schwermetallbelastung alleine ist mit jener von Holz vergleichbar. Erdgas belastet das Wasser kaum mit toxischen Stoffen, da es gasförmig ist und zudem sehr wenig Schwermetalle enthält. Die Heuverbrennung trägt mit einem viel kleineren Anteil an die Aquatische Ökotoxizität als die Ölverbrennung bei (siehe Tabelle 21), wobei die Emissionen der Verbrennung erst noch grösstenteils von dem ins Gasheizwerk integrierten Ölheizkessels stammen. Der Vorsprung der Heuverbrennung wird allerdings durch die höheren Um-

weltbelastungen beim Grasanbau wieder relativiert. Da die Rost- und Zyklonasche der Heuverbrennung als Düngung aufs Feld ausgebracht wird, wird auch ein Teil der bei der Verbrennung zurückgebliebenen Schwermetalle wieder ausgebracht. Beim Extensioheu erfolgt definitionsgemäss keine Düngung (extensive Bewirtschaftung). Dieses System profitiert zudem noch von der Gutschrift (siehe Kapitel 3.1.6.).

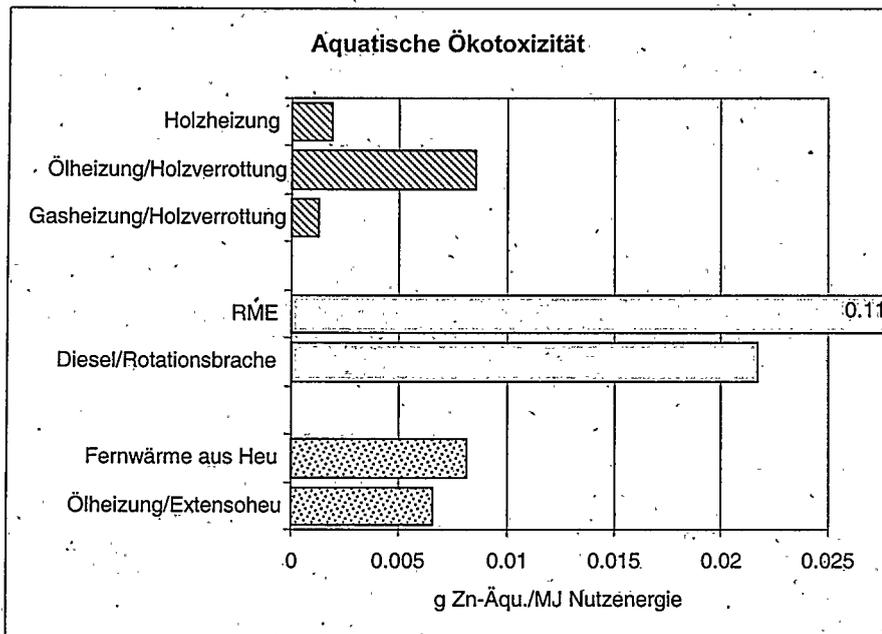


Abbildung 12: Wirkungskategorie "Aquatische Ökotoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997).

Terrestrische Ökotoxizität

Pflanzen und Tiere werden durch giftige Stoffe im Boden (zum Beispiel Pestizide, Schwermetalle) geschädigt. Die Wirkungskategorie "Terrestrische Ökotoxizität" beurteilt diese Umweltbelastung. Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass RME den höchsten Wert und somit die stärkste Bodenbelastung erreicht, gefolgt von Fernwärme aus Heu. Das Resultat wird vom Düngemittel- und Pestizideinsatz verursacht, die Verbrennung der Energieträger belastet den Boden mengenmässig viel weniger stark. Der Rapsanbau ist die intensivste Bewirtschaftung der drei Landwirtschaftssysteme. Da bei der Fernwärme aus Heu die wenig intensive Wiese mit einem Teil der beim Verbrennen anfallenden Asche gedüngt wird, verursacht dieser Bioenergieträger ein höheres Toxizitätspotential als die Holzheizung, wo im Wald gar keine Pestizide und Düngemittel zum Einsatz gelangen.

Für die Terrestrische Ökotoxizität fallen die Schwermetallemissionen in den Boden definitionsgemäss stark ins Gewicht, womit sich die Belastungen für die Öl- und Gasheizung durch die Holzverrottung erklären lassen. Da die im Holz eingelagerten Schwermetalle bei der Verbrennung in die Luft statt in den Boden emittiert werden, erfolgt beim Szenario Holzheizung eine Gutschrift, die gar in einer negativen Belastung resultiert.

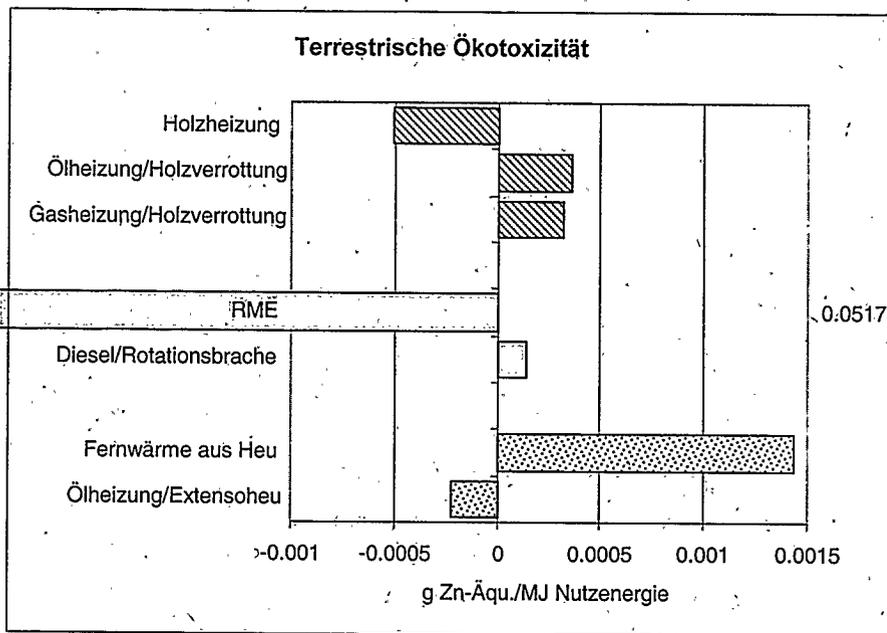


Abbildung 13: Wirkungskategorie "Terrestrische Ökotoxizität" für alle untersuchten Szenarien. In jedem Vergleichssystem sind zuerst die Bioenergieträger, dann die fossilen Energieträger dargestellt (Berechnung nach Jolliet und Crettaz 1997).

Prozessanteile

Aus Abbildung 6 bis Abbildung 13 (oben) ist jeweils die gesamte Umweltbelastung der einzelnen Energieträgern ersichtlich. Tabelle 21 zeigt die prozentualen Anteile der Prozessschritte an die gesamte Umweltbelastung. Diese Werte werden für die Interpretation der Ergebnisse verwendet (siehe Verweise im Text).

Tabelle 21: Beiträge der einzelnen Prozesse in der Energieträgerherstellung und -verbrennung an die gesamte Umweltbelastung jeder Wirkungskategorie.

Wirkungsbilanz	Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger	Treibhauspotential (500 Jahre)	Ozonbildung	Versauerung	Gesamteutrophierung	Human-toxizität	Aquatische Ökotoxizität	Terrestrische Ökotoxizität
Holzheizung	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	-100.0%
Holzaufbereitung	66.0%	56.7%	17.1%	9.0%	6.5%	6.1%	12.9%	0.5%
Holzverbrennung	34.0%	43.3%	82.9%	91.0%	93.5%	93.9%	87.1%	-100.5%
Ölheizung	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Holzverrottung	0.1%	7.4%	7.9%	16.9%	33.7%	-149.4%	4.4%	84.2%
Ölverbrennung	99.9%	92.6%	92.1%	83.1%	66.3%	249.4%	95.6%	15.8%
Gasheizung	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	-100.0%	100.0%	100.0%
Holzverrottung	0.1%	11.6%	31.4%	42.5%	62.0%	-164.9%	30.2%	95.1%
Gasverbrennung	99.9%	88.4%	68.6%	57.5%	38.0%	64.9%	69.8%	4.9%
RME	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Rapsanbau	169.8%	79.3%	127.9%	65.8%	32.0%	84.4%	114.0%	107.1%
Ölmühle	-154.3%	-31.2%	-156.9%	-2.6%	-0.1%	-43.0%	-4.6%	0.0%
RME-Verbrauch	0.0%	0.0%	78.0%	63.4%	2.4%	9.5%	0.0%	0.0%
SM 210	38.9%	36.8%	11.3%	-27.3%	65.6%	27.3%	-10.5%	-7.1%
Transporte	8.0%	2.0%	8.9%	0.3%	0.0%	10.3%	0.5%	0.0%
Trocknung	37.7%	13.1%	30.7%	0.4%	0.0%	11.5%	0.8%	0.0%
Rotationsbrüche/ Diesel	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Feldbau	8.4%	16.9%	5.4%	6.9%	97.6%	35.6%	12.0%	15.9%
Referenzenergie	91.6%	83.1%	94.6%	93.1%	2.4%	64.4%	88.0%	84.1%
Fernwärme aus Heu	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Grasanbau	29.7%	28.9%	27.2%	54.9%	83.3%	21.7%	78.5%	98.0%
Grasverbrennung inkl. Ölbrenner	70.3%	71.1%	72.8%	45.1%	16.7%	78.3%	21.5%	2.0%
Extensioheu/ Ölheizung	100.0%	100.0%	100.0%	-100.0%	-100.0%	100.0%	100.0%	-100.0%
Gras	5.1%	3.1%	3.6%	16.9%	7.1%	21.8%	7.9%	2.7%
Ölheizung	119.9%	108.1%	108.1%	91.5%	4.4%	174.6%	127.2%	27.8%
Gutschrift Extensioheu	-25.0%	-11.1%	-11.7%	-208.4%	-111.5%	-96.4%	-35.1%	-130.6%

4.2 Sensitivitätsanalysen

Wie schon in Kapitel „Direkte Emissionen“ beschrieben wurde, gibt es verschiedene Lösungsansätze zur Berechnung der Emissionen beim Abbau des Holzes im Wald. In diesem Kapitel werden zwei Varianten und deren Auswirkungen auf die Ökobilanzergebnisse diskutiert.

Eine weitere Ergebnisinterpretation erfolgt über den Vergleich der verwendeten Wirkungskategorien mit ähnlichen Kategorien. Dazu wird die Gesamteutrophierung mit der Terrestrischen Eutrophierung und der Eutrophierung des Wassers (alle nach Lindfors et al. 1995) verglichen. Die Ergebnisse der Toxizitäten nach Jolliet und Crettaz 1997 werden den Toxizitäten nach Wolfensberger und Dinkel 1997 gegenübergestellt. Die Berechnungen dieser Wirkungskategorien beruhen auf unterschiedlichen Ansätzen, auf die später eingegangen wird.

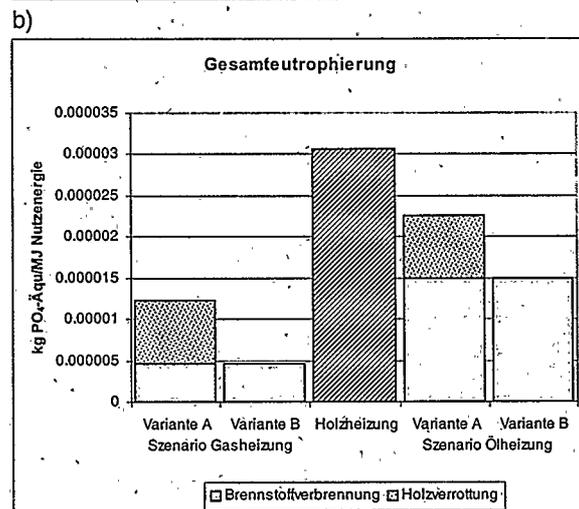
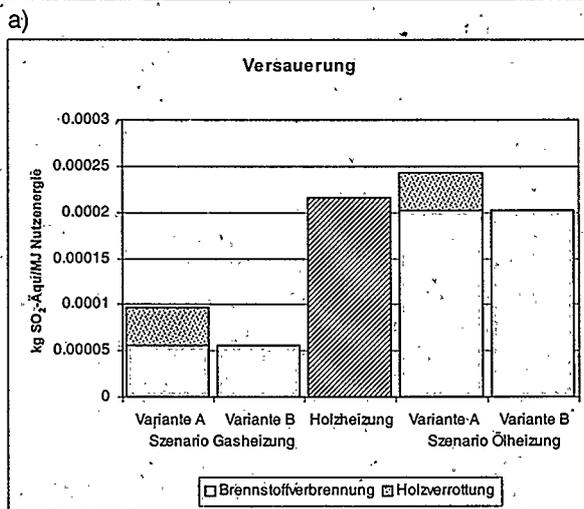
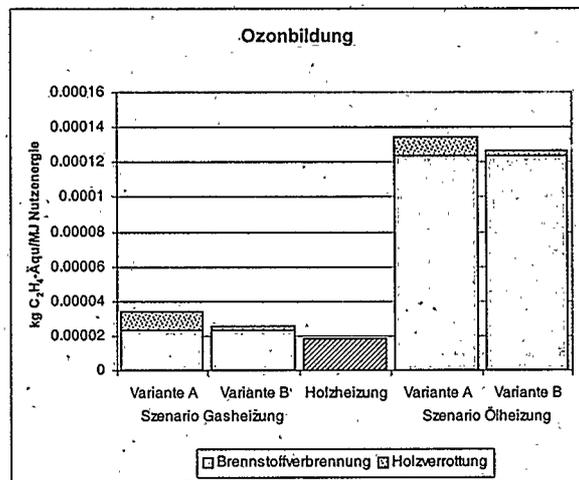
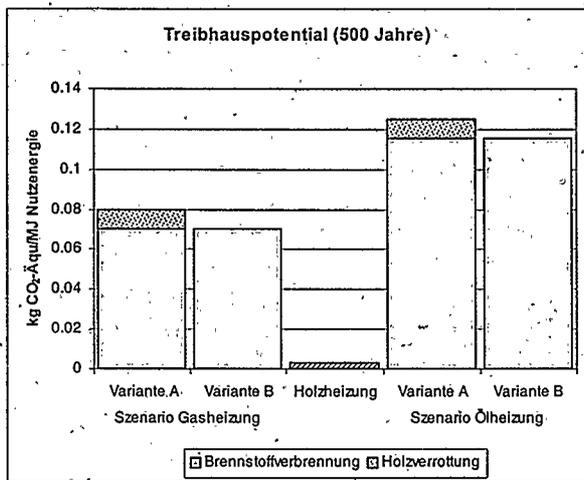
Holzverrottung

Da keine Emissionsdaten für die Holzverrottung vorliegen, wurde an Hand von zwei Variantenberechnungen versucht, ihre Bedeutung abzuschätzen.

Aus der Literatur sind die Emissionen der Kompostierung von gemischtem Grünmaterial bekannt (siehe Tabelle 16). Es sind dies neben CO_2 auch Kohlenmonoxid, Methan, Ammoniak und Lachgas. Die Schwermetalle wurden aus dem Holzgehalt abgeleitet. In Variante A wurden die Berechnungen der Wirkungsbilanz aufgrund dieser Emissionen vorgenommen (siehe Kpt. 4.1). Die Produktion von Methan deutet darauf hin, dass auch anaerobe Vorgänge ablaufen. Lignin und Lignozellulose werden vorwiegend von Schimmelpilzen und somit unter sauerstoffreichen Bedingungen abgebaut (Fritsche 1998), dessen Abbauzwischenprodukte können aber sehr wohl von anaeroben Mikroorganismen zersetzt werden.

Da der Abbau von Lignin im Prinzip nur aerob erfolgt, wurde für Variante B angenommen, dass bei der Holzverrottung nur Kohlendioxid (CO_2) als Gas produziert wird, und dass während der Verrottung keine anderen Gase gebildet werden. Die Emissionen von Schwermetallen und Stickstoffverbindungen werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Aus allen vier Grafiken in Abbildung 14 ist ersichtlich, dass mit Variante A eine stärkere Umweltbelastung errechnet wird. Da bei Variante B angenommen wird, es werde nur biogenes CO_2 emittiert, werden keine Emissionen aus der Verrottung des Holzes angerechnet. Dass bei der Wirkungskategorie „Ozonbildung“ für die Variante B trotzdem geringe Emissionen bei der Holzverrottung erkennbar sind, ist auf die Abgase der Motorsäge bei der Zerkleinerung des Holzes zurückzuführen.



a)

b)

Abbildung 14: Berechnung der Wirkungsbilanz unter der Berücksichtigung von zwei Varianten der Holzverrottung (A: Emissionen aus der Holzverrottung, B: nur biogenes CO₂). Dargestellt sind nur die Wirkungskategorien (Treibhauspotential, Ozonbildung, Versauerung, Gesamteutrophierung), die durch die unterschiedliche Verrechnung der Gasemissionen eine deutliche Veränderung erfahren.

In der Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ macht die Holzverrottung im Verhältnis zur Brennstoffverbrennung nur einen kleinen Teil aus, weshalb die Varianten A und B keinen Einfluss auf das Total ausüben. Die Holzheizung verhält sich bei beiden Varianten deutlich besser als die fossilen Energieträger.

Das Ergebnis bei der Ozonbildung ändert sich nicht wesentlich für den Vergleich Holz- vs. Ölheizung. Für den Vergleich Gas- vs. Holzheizung macht die relativ kleine Veränderung der Umweltbelastung gerade den Unterschied aus, ob die Holzheizung besser abschneidet als die Gasheizung (Variante A) oder ob beide etwa die gleiche Umweltbelastung verursachen (Variante B).

In der Wirkungskategorie „Versauerung“ macht die Differenz der zwei Varianten einen beachtlichen Anteil aus. Allerdings schneidet die Gasheizung in beiden Fällen besser als die Holzheizung ab. Beim Vergleich zwischen Öl- und Holzheizung ist zwar ein Unterschied zwischen den zwei Varianten zu erkennen. Die Differenz zwischen den zwei Systemen ist aber in beiden Varianten zu klein, als dass sie als signifikant anzusehen wäre.

Bei der Gesamteutrophierung macht die Holzverrottung in Variante A (durch NH_3 -Emission) einen grossen Anteil aus. Bei der Gasheizung beläuft sie sich auf mehr als die Hälfte, bei der Ölheizung auf ein Drittel des Gesamtergebnisses. Bei Variante B schneidet die Holzheizung im Vergleich mit der Ölheizung deutlich schlechter ab. Im Vergleich mit Variante A liegt die Differenz allerdings im Unsicherheitsbereich der Berechnungen, und es muss von einer vergleichbaren Umweltbelastung ausgegangen werden.

In Variante A wird angenommen, bei der Verrottung gelange das im Holz enthaltene Schwermetall in den Boden. Die Aquatische und Terrestrische Ökotoxizität erfahren somit für diese Variante auch eine höhere Belastung (siehe Abbildung 15), da dort die Schwermetalle im Boden stark gewichtet werden. Für die Humantoxizität wird eine geringere Belastung in Variante A berechnet, weil die Schwermetalle in der Luft und im Wasser mit einem höheren Gewichtungsfaktor belegt sind. Es resultiert somit eine Gutschrift, da sie zum Teil aus der Luft gebunden und in den Boden verfrachtet werden. In Abbildung 15 c) wird wegen dieser Gutschrift für Variante A nur die Gesamtbelastung aufgezeigt.

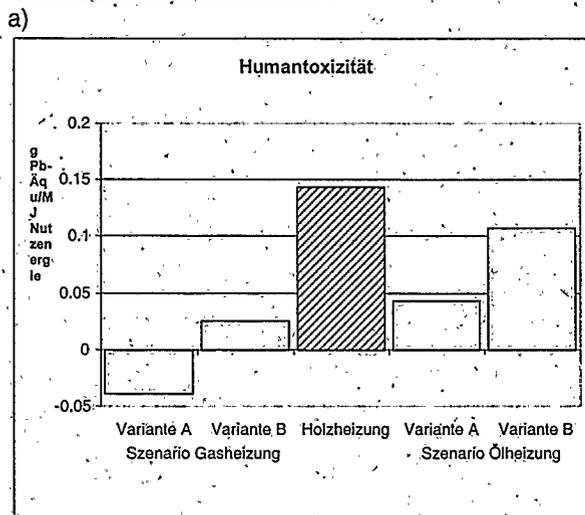
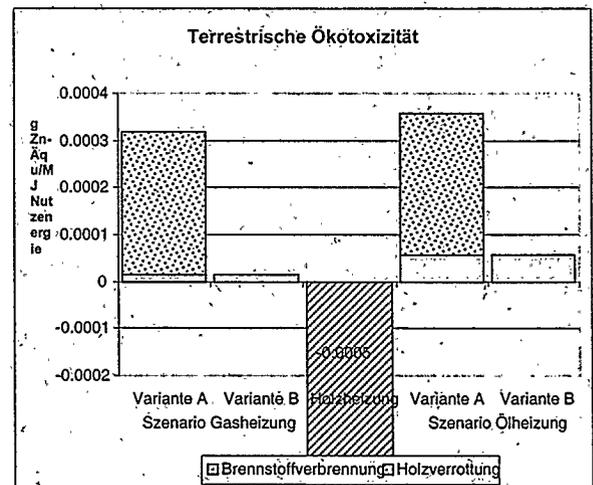
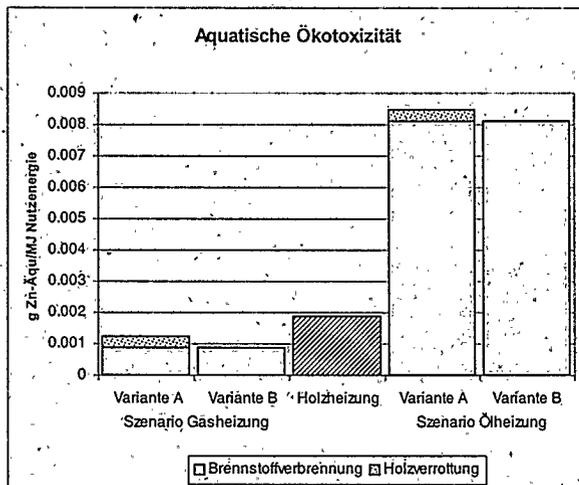


Abbildung 15: Berechnung der Wirkungsbilanz unter Berücksichtigung von zwei Varianten der Holzverrottung (A: Emissionen aus der Holzverrottung. B: nur biogenes CO_2). Dargestellt sind die Toxizitäten (Jolliet und Crettaz 1997), die das Resultat aufgrund der Schwermetalle verändern.

In der Kategorie Aquatische Ökotoxizität schneidet die Holzheizung im Vergleich zur Ölheizung unabhängig von der Verrottungsvariante besser ab. Anders ist es beim Vergleich Holz-

heizung vs. Gasheizung. In Variante B belastet die Holzheizung das Wasser stärker, bei Variante A hingegen liegen die Werte im Unsicherheitsbereich. In Hinsicht auf die Humantoxizität ist die Gasheizung für Variante A und B weniger belastend als die Holzheizung. Wird Holz mit Erdöl verglichen, liegt das Resultat in Variante A deutlich höher, in Variante B ist der Unterschied statistisch nicht signifikant. Bezüglich Terrestrischer Ökotoxizität schneidet die Holzheizung dank der Gutschrift unabhängig von den Verrottungsvarianten besser ab als die Referenzsysteme.

In der nicht dargestellten Wirkungskategorie (Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger) und in den Kategorien Treibhauspotential, Versauerung und Terrestrische Ökotoxizität sind die Unterschiede in den Resultaten der beiden Varianten nicht relevant. In der Ozonbildung und der Aquatischen Toxizität erreichen die Vergleiche zwischen Gas- und Holzheizung unterschiedliche Verhältnisse je nach Variante. Der Vergleich zwischen Öl- und Holzheizung fällt je nach Variante in den Kategorien Gesamteutrophierung und Humantoxizität anders aus.

Die Variante A kommt mit den Werten der Kompostemissionen näher an die Wirklichkeit heran. Wenn die zerkleinerten Holzstücke an einem Haufen gelagert werden, ist damit zu rechnen, dass bei der Verrottung auch anaerobe Zonen entstehen. Verrottungen von organischem Material laufen in der Natur nie nur aerob ab. Die Zersetzung ist immer ein Zusammenspiel von aerobem und anaerobem Abbau (Krogmann 1994). Die Schwermetall- und Stickstoffemissionen rufen bei einigen Wirkungskategorien erhebliche Unterschiede hervor. Es muss davon ausgegangen werden, dass solche Emissionen auch tatsächlich entstehen. Da die Variante A somit plausibler erscheint, wurde in den Analysen der Wirkungsbilanz (Kpt. 4.1) die Holzverrottung mit dieser Variante berechnet.

Toxizitäten

Für die Wirkungsfaktoren der verschiedenen Toxizitäten gibt es viele Berechnungsmöglichkeiten. Audsley et al. (1997) empfehlen die Verwendung von Methoden, bei denen das Verhalten jedes einzelnen Schadstoffes berücksichtigt wird. Neben den in Kapitel 4.1 betrachteten Toxizitäten erfüllen auch die Wirkungskategorien für Toxizitäten des Grundwasser, des Oberflächenwasser, des Bodens und der Luft nach Wolfensberger und Dinkel (1997) diese Anforderungen, weil die Abbau- und Verweilzeit im Kompartiment berücksichtigt wird.

Bei den Toxizitätspotenzialen nach Jolliet und Crettaz (1997) ist die Belastung des Bodens durch Pestizide berücksichtigt. Weiter werden zur Abschätzung der Umweltbelastungen des untersuchten Kompartimentes auch Schadstoffe einberechnet, die in die anderen Kompartimente emittiert und von dort verfrachtet werden. Als Beispiel dient die Aquatische Ökotoxizität, in der die Auswaschung der Pestizide und Schwermetalle aus dem Boden inbegriffen ist. Auch die Schwermetalle, die aus der Luft ins Wasser gelangen, bleiben nicht unberücksichtigt. Aufgrund dieser Vorteile gegenüber den Wirkungskategorien nach Wolfensberger und Dinkel (1997) wurden im vorliegenden Bericht die Toxizitäten nach Jolliet und Crettaz (1997) berechnet.

Da die Toxizitäten nach Jolliet und Crettaz (1997) und jene nach Wolfensberger und Dinkel (1997) nicht in den selben Einheiten gerechnet werden, sind nur die Verhältnisse der Szenarien untereinander vergleichbar. Weiter sind bei den beiden Ansätzen die Wirkungskategori-

en nicht deckungsgleich. Jolliet und Crettaz erstellen für das Kompartiment Wasser nur eine, die Aquatische Ökotoxizität, während Wolfensberger und Dinkel in Grund- und Oberflächenwasser differenzieren. Für die Humantoxizität (Jolliet und Crettaz 1997) und die Lufttoxizität (Wolfensberger und Dinkel 1997) gibt es keine Pendanten.

Die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Wirkungskategorien geben immer wieder zu Diskussionen Anlass. Für die Toxizitäten nach Jolliet und Crettaz werden für die Schwermetalle teilweise sehr hohe Gewichtungsfaktoren verwendet (siehe Tab. 30, Anhang). Als Beispiel sei hier nur die Humantoxizität mit einem Faktor von 19 000 Zink Äquivalenten für Cadmium in der Luft erwähnt (als Vergleich NO_x mit einem Faktor von 0,002). Durch solche Faktoren können kleine Unterschiede in der Schwermetallemission eine grosse Wirkung in den Resultaten einzelner Kategorien verursachen.

Werden die Bioenergieträger mit den entsprechenden Referenzszenarien verglichen, fallen in der Toxizität des Bodens (Wolfensberger und Dinkel) und in der Terrestrischen Ökotoxizität (Jolliet und Crettaz) die Verhältnisse gleich aus. Bei den Toxizitätspotentialen des Wassers lässt sich Folgendes feststellen: die Verhältnisse der Aquatischen Ökotoxizität (Jolliet und Crettaz) stimmen mit den Tendenzen der Toxizität des Grundwasser (Wolfensberger und Dinkel) überein, laufen den Verhältnissen in der Toxizität des Oberflächenwassers aber entgegen.

Eutrophierung

Der Nährstoffeintrag ins Wasser (Grund- und Oberflächenwasser) erfolgt zu etwa 40 % durch die Landwirtschaft (BUWAL 1997). Dabei steht die Düngung der Pflanzen mit Phosphor und Stickstoff (in Form von Nitrat und Ammonium) im Vordergrund. Bei den Prozessen der Verbrennung entstehen grösstenteils gasförmige Emissionen. Sie werden für die Eutrophierung des Wassers nicht berücksichtigt. Unter Terrestrischer Eutrophierung wird die Erhöhung des Nährstoffgehaltes der Böden durch Stickstoffverbindungen aus der Luft verstanden. Stickoxide aus der Verbrennung und Ammoniak, der durch Bakterien aus Stickstoffverbindungen im Boden gebildet und in die Luft freigesetzt wird, gelangen durch Auswaschung aus der Luft in den Boden. Ist die landwirtschaftliche Produktion intensiv, trägt sie durch die Düngung zur Terrestrischen Eutrophierung bei. Ist die Bewirtschaftung extensiv, leistet die Verbrennung der Energieträger den grössten Anteil.

Unter Gesamteutrophierung versteht man die Überdüngung der Böden und Gewässer durch den Eintrag von Stickstoff und Phosphor (siehe Tabelle 36) über Luft und Wasser. In Tabelle 22 sind die Werte aller drei Eutrophierungen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Gesamteutrophierung aus der Summe der Terrestrischen und der Wassereutrophierung berechnet werden kann. Bei der Berechnung der Gesamteutrophierung kommt einzig noch die Emission von Phosphor in die Luft dazu. Da diese Werte aber um zwei bis drei Zehnerpotenzen kleiner sind als die Gesamtwerte, fallen sie nicht ins Gewicht. Aus diesem Grund wurde in der Besprechung der Resultate auch darauf verzichtet, die Eutrophierungen nach den Kompartimenten Wasser und Boden zu unterscheiden.

Tabelle 22: Werte der einzelnen Szenarien für die Wirkungskategorien der Eutrophierung.
Einheit: g.PO₄-Äqu./MJ-Nutzenergie

	Holz- heizung	Ölheizung/ Holzverrottung	Gasheizung/ Holzverrottung	RME	Rotations- brache/Diesel	Fernwärme aus Heu	Extensioheu/ Ölheizung
Eutrophierung des Wassers ⁴⁶	0,0001	0,0011	0,0001	24,13	19,14	0,13	-0,29
Terrestrische Eutrophie- rung ⁴⁷	0,0306	0,0215	0,0122	0,97	0,49	0,09	-0,05
Gesamt- eutrophierung	0,0307	0,0226	0,0123	25,10	19,63	0,22	-0,34

Bei den Szenarien mit landwirtschaftlich genutzten Flächen (Fernwärme aus Heu, RME), wird das Wasser durch die Eutrophierung stärker als der Boden belastet. Obwohl die Rotationsbrache in der betrachteten Periode nicht gedüngt wird, ist die Auswaschung von düngungswirksamen Stoffen relativ hoch. Phosphorverbindungen und durch Nitrifikation der Bakterien entstandenes NO_x wird in Abhängigkeit der Kultur und weniger der Düngung ausgewaschen. Bei den Szenarien ohne Düngemittelleinsatz (Holz-, Öl-, Gasheizung und Extensioheu/Ölheizung) werden vor allem durch die Verbrennung der Energieträger düngungswirksame Stoffe emittiert. Somit trägt die terrestrische Eutrophierung bei diesen Szenarien stärker zur Gesamteutrophierung bei. Die absoluten Werte liegen allerdings deutlich tiefer als bei den landwirtschaftlich bewirtschafteten Systemen. Bei der Gasheizung wird der Wert für die terrestrische Eutrophierung vorwiegend durch die Holzverrottung verursacht. Da Erdgas nur sehr wenig Stickstoff enthält, trägt dessen Verbrennung kaum zur Eutrophierung bei.

Werden für die drei Eutrophierungen die Werte aller Szenarien rangiert, bleibt die Reihenfolge bis auf eine Ausnahme gleich. Beim Szenario Ölheizung liegt der Wert für die Eutrophierung des Wassers höher als jener der Holzheizung. Bei den andern beiden Eutrophierungen verhalten sie sich genau umgekehrt. Der Grund dafür liegt im Transport und der Raffinierung des Öls, dort wird das Wasser stärker als bei der Holzverarbeitung belastet.

⁴⁶ Berücksichtigte Emissionen: BOD, COD, PO₄³⁻, NO₃

⁴⁷ Berücksichtigte Emissionen: NH₃, NO_x

4.3 Zusammenfassung und Interpretation

Für die Beurteilung werden die Ergebnisse in fünf Gruppen von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ (nach Wolfensberger und Dinkel 1997) eingeteilt. Die betrachteten Wirkungskategorien haben unterschiedliche Unsicherheiten betreff Daten und Faktoren. Nach dem heutigen Kenntnisstand werden die Wirkungskategorien darum in zwei Klassen eingeteilt:

Klasse 1:

Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger (verhältnismässig geringe Unsicherheiten).

Klasse 2:

Treibhauspotential, Ozonbildung, Versauerung, Gesamteutrophierung, Humantoxizität, Aquatische Ökotoxizität, Terrestrische Ökotoxizität (deutlich grössere Unsicherheiten).

Die Beurteilung der Resultate beruht auf den in Tabelle 24 aufgeführten Kriterien. Hierzu wird das Verhältnis der Umweltwirkung des Bioenergieträgers zu den Umweltwirkungen des Referenzszenarios in Prozent bestimmt.

Tabelle 24: Beurteilungsschema eines Bioenergieträgers-Szenarios im Verhältnis zum jeweiligen Referenzszenario für die untersuchten Wirkungskategorien (nach Wolfensberger und Dinkel 1997)

Beurteilung	Wirkungskategorien	
	Klasse 1	Klasse 2
Sehr günstig	Unter 50 %	Unter 20 %
Günstig	Zwischen 50 und 80 %	Zwischen 20 und 60 %
Vergleichbar	Zwischen 80 und 125 %	Zwischen 60 und 167 %
Ungünstig	Zwischen 125 und 200 %	Zwischen 167 und 500 %
Sehr ungünstig	Über 200 %	Über 500 %

Eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der Bioenergieträger gegenüber ihrer fossilen Referenzsysteme ist in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Überblick über die Bewertung der Bioenergieträger verglichen mit deren fossilen Referenzenergien. Einstufung nach Tabelle 24. Bewertungen in Klammern können nicht berechnet werden, da eine Zahl negativ ist.

	Holzheizung vs		RME vs.	Fernwärme Heu vs.
	Ölheizung	Gasheizung	Rotationsbrache/ Diesel	Extensioheu/ Ölheizung
Ausschöpfung nicht-erneuerbarer Energieträger	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Treibhauspotential (500 Jahre)	sehr günstig	sehr günstig	günstig	günstig
Ozonbildung	sehr günstig	günstig	sehr günstig	günstig
Versauerung	vergleichbar	ungünstig	ungünstig	(ungünstig)
Gesamteutrophierung	vergleichbar	ungünstig	vergleichbar	(ungünstig)
Humantoxizität	ungünstig	(ungünstig)	günstig	ungünstig
Aquatische Ökotoxizität	günstig	vergleichbar	sehr ungünstig	vergleichbar
Terrestrische Ökotoxizität	(günstig)	(günstig)	sehr ungünstig	(ungünstig)

Wichtige Argumente bei der Förderung der Bioenergieträger sind die Reduktion des Treibhauseffektes und die Schonung der erschöpflichen Energieressourcen sowie die Verringerung der Sommersmog-Bildung. In allen vier Vergleichen dieser drei Wirkungskategorien sind die Bioenergieträger günstig bis sehr günstig. Bezüglich der erwähnten Umweltbelastungen sind sie also eindeutig den fossilen Energieträgern vorzuziehen. In den restlichen Wirkungskategorien fallen die Vergleiche für die Bioenergieträger sehr unterschiedlich aus.

Aus den Resultaten ist weiter ersichtlich, dass unter allen Vergleichen Holz gegenüber der Ölheizung als Bioenergieträger am meisten Vorteile aufweist. Nur die Wirkungskategorie Humantoxizität fällt für Holz ungünstig aus. Die Holzheizung belastet die Umwelt also tendenziell weniger stark als die Ölheizung. Im Vergleich zu Erdgas schneidet Holz nicht so gut ab, weil die Bereitstellung und Verbrennung des Gases wenig Schadstoffe verursacht. Das Szenario Extensioheu/Ölheizung zeigt tendenziell die besseren Resultate als die Fernwärme aus Heu, weil eine hohe Gutschrift für das Extensioheu berechnet wurde. Die Wahl der Allokation zeigt in diesem Fall grössere Umweltauswirkungen als der Energieträger selbst.

Auf die allgemeine Frage, welcher Energieträger der förderungswürdigste sei, ist mit dieser Ökobilanz keine abschliessende Antwort möglich. Je nach Gewichtung der Wirkungskategorien ergeben sich unterschiedliche Antworten. Eine ökologische Gesamtbewertung wird in dieser Schriftenreihe nicht durchgeführt, da sie stets subjektiv ist. Sie ist stark von individuellen Vorstellungen und Wertmassstäben geprägt. Die Entscheidungsträger können die Gewichtung je nach Zielsetzung selbst festlegen und so die Umweltbelastungen gegeneinander abwägen.

4.4 Vergleich mit anderen Studien

Resultate aus verschiedenen Ökobilanzen sind meist schwer miteinander vergleichbar, da die Berechnungsgrundlagen und Auswertungsmethoden sehr unterschiedlich sind. In diesem Kapitel soll versucht werden, bereits erschienene Ökobilanzen über Bioenergieträger mit den in dieser Studie berechneten Resultaten zu vergleichen. Das Gegenüberstellen von Werten einzelner Szenarien ist in den meisten Fällen nicht möglich, da die Systemgrenzen jeder Studie unterschiedlich angelegt sind. Im weiteren gibt es viele Bewertungsmöglichkeiten, die untereinander nur schlecht vergleichbar sind.

Holz- versus Öl- und Gasheizung

In der Schriftenreihe (BUWAL 2000) wird Heizenergie aus Heizöl, Erdgas und Holz verglichen. Allerdings handelt es sich bei den Heizungen um grössere Anlagen für Mehrfamilienhäuser mit zirka zehn Wohneinheiten. Weiter werden vollkommen andere Bewertungsmethoden für die Wirkungsabschätzung verwendet (Methode der ökologischen Knappheit, Ecoindicator 95^{ff}, Bedarf nicht erneuerbarer Energie) und in den Szenarien der nicht erneuerbaren Energieträger werden die Zusatzfunktionen des Holzes, das heisst eine anderweitige Verwertung, nicht berücksichtigt. Ein Vergleich ist somit nur bedingt möglich. In BUWAL 2000 schneidet das Holz schlechter ab als das Erdgas, aber besser als das Heizöl. Die Nachteile für Erdgas liegen beim Treibhauseffekt und beim Verbrauch an Primärenergie. Für Heizöl liegen die Resultate der genannten Kategorien deutlich höher als für Erdgas. Dazu kommen die hohe SO_x-Emissionen, die das Versauerungspotential erhöhen. Das Stückholzsystem verursacht vor allem hohe PM₁₀- und NO_x-Emissionen.

Reinhardt und Zemanek (2000) haben in ihrer Studie „Ökobilanz Bioenergieträger“ unter anderem eine Ökobilanz für Hackschnitzel aus Fichte und Buche erstellt und mit jener von Heizöl verglichen. Dabei schneidet die Ölheizung in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung besser und in den Kategorien energetischer Ressourcenverbrauch und Treibhauseffekt leicht schlechter als die Waldrestholzverbrennung ab.

Der Vergleich Holzheizung versus fossile Energieträger fällt in der vorliegenden Untersuchung für das Holz etwas besser als in den zwei genannten Studien aus. Da die Systemgrenzen und Bewertungsmethoden sehr unterschiedlich gewählt wurden, ist eine Abweichung der Resultate in diesem Rahmen sehr gut möglich.

RME versus Rotationsbrache/Diesel

Für den Vergleich der Szenarien RME und Rotationsbrache/Diesel mit Literaturdaten wurden drei Untersuchungen über RME ausgewählt. In Tabelle 25 sind die Resultate zum Vergleich einander gegenübergestellt. Die Systemgrenzen sind in allen vier Studien vergleichbar. Die Berechnung und Wertung der Wirkungskategorien basiert allerdings auf unterschiedlichen Wirkungsfaktoren und Substanzen.

Tabelle 25: Vergleich der Resultate der Wirkungskategorien verschiedener Ökobilanzen von RME. (Bedeutung der Zeichen: + Vorteil für RME; - Nachteil für RME; ± RME und Diesel ungefähr gleich; * kein Resultat für diese Wirkungskategorie).

Wirkungskategorie	Kraus et al. 1999	Reinhardt und Zemanek 2000	Wolfensberger und Dinkel 1997	Vorliegende Studie
Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger	+	+	+	+
Treibhauspotential 500 Jahre	+	+	±	+
Ozonbildung	±	*	±	+
Versauerung	-	±	-	-
Gesamteutrophierung	-	-	-	±

Die Unterschiede der Resultate bei Kraus et al. (1999) und Reinhardt und Zemanek (2000) im Vergleich zu dieser Studie sind auf die unterschiedlichen Berechnungsweisen der Wirkungskategorien zurückzuführen. Bei der Gesamteutrophierung wurde für diese beiden Literaturwerte nur die luftgetragenen Gesamtstickstoff-Emissionen berücksichtigt, in der vorliegenden Studie auch die Phosphor-Verbindungen und die wassergebundenen relevanten Schadstoffe. In Kraus et al. (1999) wird die Ozonbildung nur durch die NMVOC-Emissionen bestimmt.

Für die Berechnung der Kategorien Treibhauspotential und Ozonbildung wurden in Wolfensberger und Dinkel (1997) andere Gewichtungsfaktoren verwendet. Ein Vergleich in diesen Kategorien ist somit nur mit Vorbehalten möglich. Vergleiche der Toxizitäten machen wenig Sinn, weil sich die Berechnungsmethoden in den vier Studien stark unterscheiden. Insgesamt liefert RME aber jeweils eher die schlechteren Resultate diesbezüglich als Diesel.

Fernwärme aus Heu versus Extensioheu/Ölheizung

Für den Literaturvergleich der Szenarien Fernwärme aus Heu und Extensioheu/Ölheizung wurden wiederum drei Studien aus der Literatur ausgewählt. In Tabelle 26 sind die Bewertungen der einzelnen Wirkungskategorien aufgelistet. Ein Vergleich ist allerdings nur in beschränktem Masse möglich, weil die Produktionsinventare nicht überall die gleichen sind. Eine grosse Differenz kann durch die unterschiedliche Bewertung des Grases im Referenzszenario entstehen. Bei Wolfensberger und Dinkel (1997) wurde wie in der vorliegenden Studie eine Gutschrift dafür erstellt. Bei Hersener et al. (1997) wurde das Gras als Futter nicht berücksichtigt und bei Reinhardt und Zemanek (2000) ist die Bewertung nicht ersichtlich.

Tabelle 26: Vergleich der Resultate verschiedener Ökobilanzen von Fernwärme aus Heu. (Bedeutung der Zeichen: + Vorteil für Bioenergieszenario; – Nachteil für Bioenergieszenario; ± beide Energieträger ungefähr gleich; * kein Resultat für diese Wirkungskategorie).

	Reinhardt und Zemanek 2000	Hersener et al. 1997	Wolfensberger und Dinkel 1997	Vorliegende Studie
Feldbau (Bioenergie vs. Referenzenergie)	wenig intensiv vs. extensiv	wenig intensiv vs. wenig intensiv	wenig intensiv vs. extensiv	wenig intensiv vs. extensiv
Ausschöpfung nicht-erneuerbarer Energieträger	+	+	+	+
Treibhauseffekt	+	+	+	+
Ozonbildung	*	±	±	+
Versauerung	–	±	±	–
Gesamteutrophierung	–	–	–	–

Unterschiede sind vor allem in den Wirkungskategorien Ozonbildung und Versauerung zu beobachten. Für die Versauerung sind sicher der Einsatz und die Bewertung der Düngung hauptverantwortlich für abweichende Resultate. Grund für die verschiedenen Resultate in der Wirkungskategorie Ozonbildung sind möglicherweise unterschiedliche Emissionswerte der Verbrennungsanlagen. Für die Toxizitäten kann kein Vergleich durchgeführt werden, da jeder Studie andere Gewichtungsfaktoren zu Grunde liegen.

Trotz der unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen stimmen die Resultate der vier Untersuchungen tendenziell gut überein.

5. Wirtschaftliche Analyse

5.1 Methode

5.1.1 Einleitung

Die ökonomischen Berechnungen wurden wo möglich für die drei Stufen Landwirtschaftsbetrieb, Verarbeiter/Konsument und Staat durchgeführt. Ziel waren Aussagen, ob unter den gegebenen Umständen der Bioenergieträger oder die Alternative für die jeweilige Stufe wirtschaftlicher ist. Da die Resultate stark von den getroffenen Annahmen abhängen, wurden Zusatzvarianten berechnet. Die technischen und von der Natur bestimmten Parameter lassen sich jedoch kaum verändern, weshalb sich die Varianten nur bei den Produktpreisen und Staatsbeiträgen unterscheiden. Die Berechnungen basieren stets auf den Produktionsinventaren der Ökobilanz (siehe Anhang Tabelle 37 bis Tabelle 44).

Auf der Stufe Landwirtschaftsbetrieb wurde eine Teilkostenrechnung (Deckungsbeitrag) durchgeführt. Unter vergleichbarem Deckungsbeitrag versteht man den monetären Ertrag einer Kultur abzüglich deren Direktkosten wie Saatgut, Pflanzenschutz- und Düngemittel, Versicherung, Reinigung, etc. Der Deckungsbeitrag (DB, mit und ohne Direktzahlungen) ist ein Mass für die Flächenproduktivität und eignet sich deshalb gut für den Landwirt als Entscheidungsbasis für die Wahl der Kultur. Der DB bildet sich aus der Differenz zwischen Erlös und variablen Kosten. Die üblicherweise eingeschlossenen, produktgebundenen Beiträge wurden aus Transparenzgründen zusammen mit den flächengebundenen Direktzahlungen separat ausgewiesen. Ebenfalls wichtig für den Anbauentscheid sind die benötigten Arbeitskraftstunden (Akh) und damit der DB pro Akh. Die für die Berechnung benutzten variablen Maschinenkosten stützen sich auf den Maschinenkostenbericht (Ammann 1999), die Lohnarbeitskosten auf die Richtansätze vom Schweizerischen Verband für Landtechnik (SVLT 1999) und der Arbeitszeitbedarf auf den Arbeitsvoranschlag von Näf et al. (1996).

Für die Stufe Verarbeitung/Konsument wurde eine Vollkostenrechnung durchgeführt. Der Produkterlös für den Biomasseproduzenten aus der Stufe Landwirtschaft/Forstwirtschaft wird dabei zum Einkaufspreis für die Verarbeitung/den Konsumenten. Die benötigten Grunddaten basieren weitgehend auf Angaben von Herstellern und Anlagenbetreibern.

Auf Stufe Staat wurden die Ausgaben für Direktzahlungen etc. mit den Einnahmen (zum Beispiel Steuerabgaben) verglichen.

5.1.2 Annahmen

Tabelle 27 enthält die wichtigsten Grundannahmen für die einzelnen Prozesse. Für die Hofdünger gilt die Annahme, dass sie unentgeltlich vom Betrieb übernommen werden können und darum nur die Kosten für ihre Ausbringung relevant sind. Der Prozentsatz für die nötigen Versicherungen bei Einrichtungen wurde bei 0,15 % des Neuwertes festgesetzt, jener für die Hagelversicherung von Raps bei 5,3 % des Erntewertes. Die Abschreibung richtet sich nach der Lebensdauer der einzelnen Kapitalgüter, ebenso die Zinsbelastung auf diesen Anlage-

vermögen. Für die Zinsbelastung des Umlaufvermögens wurden 4 % auf ein halbes Jahr angenommen.

Tabelle 27: Übersicht über die Grundannahmen für die wirtschaftliche Analyse

Prozess	Ertrag	Verkaufs- bzw. Ankaufspreis in CHF	Beiträge in CHF
Rapsanbau SM 210	30 dt Raps/ha 50 dt TS /ha (2 Schnitte)	35.-/dt ⁴⁸ 480.-/ha	1 200.-/ha ⁴⁹ + 1 500.-/ha ⁵⁰
RME-Anlage	1 113 l RME/ha 1 863 kg Rapskuchen/ha 165 kg Glycerinphase 1/ha	35.-/dt Raps 0,43/kg Rapskuchen ⁵¹ 0,075/kg Glycerinphase ⁵²	20.-/dt Raps ⁵³
Rotationsbrache	-	-	1 200.-/ha ⁴⁹ + 2 500.-/ha ⁵⁴
Diesel	-	1,24/l ⁵⁵	-
Holzheizung	37 500 kWh/Jahr	-	-
Ölheizung	37 500 kWh/Jahr ⁵⁶	0,3073/ l Heizöl EL ⁵⁵	-
Gasheizung	37 500 kWh/Jahr	0,05/kWh Erdgas ⁵⁵	-
Wenig intensive Naturwiese (für Fernwärme)	65 dt TS/ha	24,4/dt TS ⁵⁷	1 200.-/ha ⁴⁹ + 650.-/ha ⁵⁴
Heuverbrennungsanlage	81 700 MJ/ha	24,4/dt TS ⁵⁷	0,04/kWh ⁵³
Extensivwiese	30 dt TS/ha	24,4/dt TS ⁵⁷	1 200.-/ha ⁴⁹ + 1 500.-/ha ⁵⁴

⁴⁸ LBL (1999c)

⁴⁹ Allgemeiner Flächenbeitrag gemäss Direktzahlungsverordnung 1998

⁵⁰ Ölsaatenbeitrag gemäss Ackerbaubeitragsverordnung 1998

⁵¹ LBL (1999a)

⁵² Rinaldi und Herger (1998)

⁵³ Verarbeitungsbeitrag für Pilot- und Demonstrationsanlagen (Ackerbaubeitragsverordnung 1998)

⁵⁴ Anbaubeitrag für ökologische Ausgleichsflächen (Direktzahlungsverordnung 1998)

⁵⁵ Landesindex für Konsumentenpreise 1999

⁵⁶ Entspricht 4480 Liter/Jahr

⁵⁷ Eigene Berechnungen für kostendeckenden Preis, basierend auf LBL (1999c)

5.2 Resultate und Diskussion

5.2.1 Wirtschaftlichkeit Stückholz

Stufe Energiekonsument

Tabelle 28 stellt die Kosten für die verschiedenen Systeme der Heizwärme- und Warmwasserproduktion dar. Die Jahreskosten der Stückholzheizung sind um rund 27 % bzw. 35 %, nämlich um etwa CHF 1400.-/Jahr bzw. CHF 1800.-/Jahr höher als jene der Ölheizung und der Gasheizung. Dies, obwohl bei den Brennstoffkosten nur die Holzbereitstellung, nicht aber der eigentliche Wert des Holzes berücksichtigt wurde. Um die Brennstoffkosten der Holzheizung den Alternativen anzugleichen, müsste der Heizölpreis um CHF 0,18/l auf CHF 0,48/l und der Erdgaspreis von CHF 0,05/kWh auf CHF 0,59/kWh steigen. Oder der Ster Holz müsste um CHF 33.- verbilligt werden.

Damit die Totalkosten der Holzheizung pro Jahr nicht höher als die der beiden günstigeren Alternativen sind, müsste der Heizölpreis ein Niveau von CHF 0.64/l und der Erdgaspreis von CHF 0,10/kWh erreichen. Als weitere Möglichkeiten kämen eine Verbilligung um CHF 73.-/Ster oder ein einmaliger Beitrag an die Holzheizung von CHF 17 500.- in Frage. Müsste im Übrigen das Holz zu Marktpreisen für rund CHF 285.- pro Ster (zugesägt franko Haus, LBL, 1999a) gekauft werden, stiegen die Jahreskosten für das Stückholzsystem auf CHF 7700.- und die Differenz zu den beiden günstigeren Systemen auf etwa CHF 4000.- an.

Tabelle 28: Wirtschaftliche Vergleichszahlen in CHF zwischen den drei Heizsystemen Holz, Öl und Gas für eine Wärmemenge von 35 700 kWh pro Jahr (Detailberechnungen siehe Anhang, 1) Rinaldi und Herger 1998
Tabelle 49 bis Tabelle 51)

	Stückholzheizung	Heizöl	Erdgas
Investitionskosten Heizsystem	27 288.-	21 583.-	11 942.-
Brennstoffkosten/Jahr	2 204.-	1 377.-	1 860.-
Übrige variable Kosten/Jahr	411.-	296.-	199.-
Fixkosten/Jahr	2 672.-	2 196.-	1 452.-
Totalkosten/Jahr	5 287.-	3 870.-	3 471.-
Totalkosten pro kWh Wärme	0.141	0.107	0.095

Stufe Staat

Die Abgaben auf Heizöl und Erdgas sind so gering (zirka CHF 3.- auf 1000 l Heizöl und CHF 2.- auf 1000 kg Gas), dass durch die Umstellung auf Holzheizungen bei der bestehenden Situation keine Einbussen entstünden.

Damit die Holzheizung für den Verbraucher den Alternativen finanziell gleichwertig würde, müsste der Staat die Holzheizung oder das Holz mit Beiträgen unterstützen. Es bestehen folgende Möglichkeiten:

- Den Ster Holz mit CHF 73.- unterstützen, damit die Jahreskosten gleich hoch wie die der Vergleichsheizungen sind.
- Einen einmaligen Beitrag von CHF 17 500.- bei der Erstellung der Holzheizung bezahlen.
- Höhere Abgaben auf Öl und Gas verlangen.

5.2.2 Wirtschaftlichkeit Rapsmethylester

Stufe Landwirt

Der DB ohne Beiträge ist beim Rapssystem (inklusive SM 210) und der Rotationsbrache praktisch gleich negativ (Tabelle 29), d.h. ohne Anbaubeiträge wäre bei den vorgegebenen Annahmen weder der Rapsanbau noch die Rotationsbrache rentabel. Der DB mit Beiträgen ist für Rotationsbrache um rund CHF 1100.- höher als für das Rapssystem. Dies entspricht genau dem um CHF 1100.- höheren Anbaubeitrag für Rotationsbrache. Die Arbeitsproduktivität ist bei der arbeitsextensiven Rotationsbrache mit einem DB (Beiträge eingerechnet) von CHF 139.- pro Akh etwa vier Mal höher als bei Raps inkl. SM 210.

In der bestehenden Situation ist der Anbau von Raps klar unrentabler als der Anbau von Rotationsbrache. Um den Raps genauso wirtschaftlich zu machen wie die Rotationsbrache, müsste entweder der Anbaubeitrag für Ölsaaten um CHF 1100.- auf CHF 2600.- erhöht oder der Verkaufspreis auf CHF 72.- pro dt angehoben werden. Im übrigen muss man sich bewusst sein, dass auch der DB mit Beiträgen für Rotationsbrache um knapp CHF 400.- unter demjenigen von Winterweizen liegt (75.-/dt, ohne Stroh, LBL 1999b) und der Non-Food-Raps somit ökonomisch in der Fruchtfolge einen schweren Stand hat.

Tabelle 29: Deckungsbeiträge in CHF pro ha und Jahr für den Anbau von Raps und SM 210 versus Rotationsbrache (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 45, Tabelle 46 und Tabelle 47)

	Raps	SM 210	Total	Rotationsbrache	Differenz
Vergleichbarer Deckungsbeitrag/ha	2	187	189	-702	891
DB/ha	-1004	39	-965	-917	-48
Beiträge	2700	-	2700	3700	-1000
DB mit Beiträgen/ha	1696	39	1735	2783	-1048
DB mit Beiträgen/Akh	35	.6	32	139	-107

Stufe Verarbeitung

Die Kosten für das Pressen und die Umesterung beruhen auf Erhebungen von Rinaldi und Herger (1998) in der bisher einzigen Pilotanlage für RME in der Schweiz, in Etoy. Die Zahlen der Erhebungsdauer wurden via verarbeitete Rapsmenge linear auf 1 ha umgerechnet. Die Distributions- und Marketingkosten konnten mangels genauer Daten nicht berücksichtigt werden. Sie dürften, wie beim Diesel, vermutlich etwa zwischen 15 und 20 Rappen pro Liter liegen (Thurgauer Zeitung, 2000). Der Tankstellenpreis von RME wäre also um diese höher, als die berechneten CHF 0,25 pro Liter (Tabelle 30), dazu käme noch eine Gewinnmarge.

Der durchschnittliche Dieselpreis für das Jahr 1999 (Landesindex für Konsumentenpreise) betrug CHF 1.24 pro Liter.

Bei einem Ankaufspreis von CHF 72.- pro dt Raps wären die Nettokosten (ohne Distribution und Marketing) pro Liter RME mit CHF 1.25 etwa gleich hoch wie der Dieselpreis. De facto wäre der Tankstellenpreis dann aber nicht mehr konkurrenzfähig.

Müssten die Rapsverarbeiter nicht nur *ohne Verarbeitungsbeiträge* auskommen sondern auch noch die Mineralölsteuer berappen, so kämen die Nettokosten bei einem Ankaufspreis von CHF 35.- pro dt Raps auf CHF 1.51 pro Liter RME zu stehen. Bei einem Ankaufspreis von CHF 72.-/dt würden die Nettokosten CHF 2.51/l RME betragen. Dies alles ohne Marketing- und Distributionskosten und unter der Annahme, dass ein MJ RME gleich hoch besteuert würde wie ein MJ Dieseltreibstoff.

Ohne den Verarbeitungsbeitrag käme der Literpreis von RME bei 35.-/dt Raps auf CHF 0.79 zu stehen und wäre somit immer noch konkurrenzfähig, bei 72.-/dt Raps mit Nettokosten von 1.79 jedoch nicht mehr. Ohne den Erlös aus dem Verkauf der Nebenprodukte (v.a. Rapskuchen) wäre die RME-Herstellung nur bei der Variante 35.-/dt Raps und Verwertungsbeitrag konkurrenzfähig.

Da RME den niedrigeren Heizwert hat als Diesel, sieht das Preisverhältnis eines Megajoules Heizenergie leicht schlechter aus für den RME. Der Tankstellenpreis für Diesel beträgt CHF 0.035 und der Nettopreis für RME CHF 0.008 pro MJ. RME ist somit auch bezüglich Heizwert konkurrenzfähig, obwohl die Gewinnmarge und die Marketingkosten noch dazu gerechnet werden müssen.

Tabelle 30: Wirtschaftliche Kennzahlen der RME-Herstellung in CHF bei einem Ankaufspreis von CHF 35.-/dt Raps. Eine Hektare ergibt 30 dt Raps, 1113 Liter RME bzw. 36 840 MJ Heizwert (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 48).

Variable Kosten/ha	CHF	1 323.00
Fixe Kosten/ha	CHF	374.00
Total Kosten/ha	CHF	1 697.00
Erlös aus Glycerinphase 1/ha	CHF	-12.30
Erlös aus Rapskuchen/ha	CHF	-801.00
Beitrag Rapsverarbeitung/ha	CHF	-600.00
Nettokosten RME	CHF	283.00
<hr/>		
Totalkosten pro Liter RME	CHF	1.52
Nettokosten pro Liter RME	CHF	0.25
Tankstellenpreis pro Liter Diesel	CHF	1.24
<hr/>		
Totalkosten RME/MJ Heizwert	CHF	0.046
Nettokosten RME/MJ Heizwert	CHF	0.008
Tankstellenpreis Diesel/MJ Heizwert	CHF	0.035

Stufe Staat

Auch für den Staat hat die Wahl der Kulturen finanzielle Auswirkungen. Das RME-System kommt dem Staat pro ha CHF 400.- teurer zu stehen als das System mit Rotationsbrache und Energielieferung durch Diesel (Tabelle 31). Da jedoch der Landwirt Raps nur anbaut, wenn die Kultur mit Rotationsbrache konkurrenzfähig ist, gibt es drei Varianten zur Förderung des Non-Food Rapsanbaus.

- A) Anhebung des Rapsverkaufspreises auf CHF 72.-/dt. Da bei diesen Rohstoffpreisen ein MJ RME aber teurer als ein MJ Diesel ist (siehe S. 69), müsste der Verarbeitungsbeitrag von CHF 20.-/dt Raps auf etwa 40.-/dt Raps erhöht werden. Damit käme das RME-System dem Staat CHF 1000.-/ha teurer als die Rotationsbrache zu stehen.
- B) Anhebung des Ölsaatenbeitrages um CHF 1100.- auf CHF 2600.-/ha. Dies würde dem Staat insgesamt CHF 1500.-/ha mehr als die Rotationsbrache kosten.
- C) Senkung des Beitrages der Rotationsbrache um CHF 1100.- auf CHF 1400.-/ha. Somit würde die Förderung des Rapsanbaus dem Staat nichts kosten. Allerdings würde damit die Konkurrenzfähigkeit des Non-Food Rapses gegenüber anderen Kulturen nicht verbessert.

Tabelle 31: Staatsausgaben je Vergleichssystem in CHF pro ha

	RME	Rotationsbrache und Diesel
Flächenbeiträge	1200.-	1200.-
Ölsaatenbeiträge	1500.-	0.-
Ökobeiträge	0.-	2500.-
Verarbeitungsbeiträge	600.-	0.-
Mineralölsteuern und Abgaben (=Einnahmen)	0.-	-800.-
Total	3300.-	2900.-

5.2.3 Wirtschaftlichkeit Fernwärme aus Heu

Stufe Landwirt

Der DB mit Beiträgen unterscheidet sich zwischen den beiden Wiesenarten um rund CHF 400.-. Dies ist auf die höheren Beiträge für die Extensivwiese zurückzuführen.

Tabelle 32: Deckungsbeiträge für den Anbau von wenig intensiver Naturwiese und Extensivwiese pro Jahr und Hektare (Detailberechnungen siehe Anhang, Tabelle 52 und Tabelle 53)

	Wenig intensive Naturwiese	Extensivwiese	Differenz
Vergleichbarer Deckungsbeitrag/ha	1545.-	733.-	812.-
DB/ha	950.-	488.-	462.-
Beiträge/ha	1850.-	2700.-	-850.-
DB mit Beiträgen/ha	2800.-	3188.-	-388.-
DB mit Beiträgen /Akh	74.-	104.-	-30.-

Stufe Verarbeitung

Die Nettokosten pro kWh Fernwärme aus Heu übersteigen mit CHF 0.122 die Kosten einer häuslichen Ölheizung um rund 15 %. Für gleich hohe Kosten müsste der Heizölpreis auf CHF 0.47/l oder der Verwertungsbeitrag auf CHF 0.06/kWh steigen

Tabelle 33: Wirtschaftliche Kennzahlen in CHF für die Fernwärme aus Heu verglichen mit Ölheizung pro Jahr. Einheit: 81 700 MJ Wärme bzw. 1 ha Heu pro Jahr (Berechnungen siehe Anhang, Tabelle 54, Tabelle 55).

	Heuverbrennung	Heizölsystem
Brennstoffkosten / Jahr	1545.-	834.-
Übrige variable Kosten	615.- ⁵⁸	184.-
Fixe Kosten	1524.- ⁵⁸	1316.-
Totalkosten	3685.-	2334.-
Abzüglich Verarbeitungsbeiträge	-908.-	0.-
Nettokosten	2777.-	2334.-
Kosten pro kWh Wärme	0.122	0.103

Stufe Staat

In der geltenden Agrarpolitik käme das System Fernwärme aus Heu den Staat nur um CHF 64.-/ha teurer zu stehen als das System Extensivwiese mit Ölheizung (Tabelle 34). Es ist aber zu bedenken, dass der Landwirt sich unter den gegebenen Umständen nicht für die wenig intensive Wiese entscheidet, es sei denn, der Anbaubetrag würde um CHF 400.-/ha erhöht. Zudem müsste für die volle Konkurrenzfähigkeit der Fernwärme der Verarbeitungsbeitrag um CHF 454.- erhöht werden, sodass der Staatsbeitrag für das Grassystem schliesslich um CHF 918.-/ha höher als beim Alternativsystem läge. Wenn hingegen statt eines höheren Verwertungsbeitrages der Heizölpreis auf CHF 0.47/l (zum Beispiel höhere Steuerabgabe) angehoben würde, müsste der Staat trotz höherem Anbaubetrag nur CHF 78.-/ha mehr als beim Alternativsystem zahlen.

⁵⁸ Quelle: Flaig et al. (1998)

Tabelle 34: Staatsaufwendungen je Vergleichssystem. Einheit: 81 700 MJ Wärme bzw. 1 ha Heu pro Jahr.

	Wenig intensive Wiese und Heuverbrennung	Extensivwiese und Ölheizung
Flächenbeiträge / Jahr	1200.-	1200.-
Ökobeiträge	650.-	1500.-
Verarbeitungsbeiträge	908.-	-
Mineralölsteuern und Abgaben (= Einnahmen)	-1.-	-8.-
Total	2757.-	2693.-

5.3 Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit

Die in Kap. 5.2 aufgeführten Resultate zeigen, dass mit Ausnahme einiger Prozesse Bioenergie gegenüber den jeweiligen Alternativen unter den angenommenen Bedingungen nicht konkurrenzfähig ist. Berücksichtigt man hingegen die Situation auf den Ölmärkten im Jahre 2000 (mit Heizölpreisen von zum Beispiel CHF 0,63/l und Dieselpreisen von CHF 1.50 Ende September), ändert sich das Bild sehr zum Vorteil der Bioenergieträger.

Die RME-Produktion lohnt sich wirtschaftlich, wie auch die Praxis zeigt. Das Problem bildet der Rapsanbau, der beim angenommenen tiefen Non-Food-Rapspreis zwar die direkten Kosten deckt, aber weniger lukrativ als die Rotationsbrache oder andere Kulturen ist. Deshalb besteht kein Anreiz zum Anbau von Non-Food-Raps.

Bei der Stückholzheizung sind mit den letztjährigen Durchschnittspreisen für fossile Brennstoffe sowohl die Brennstoff- als auch die Betriebskosten deutlich höher als bei den fossilen Alternativen Öl und Gas. Die Kostenegalität wird bei CHF 0.64/l Heizöl und bei CHF 0.10/kWh erreicht.

Die Nettokosten der Fernwärme aus Heu und der Ölheizung sind für den Verbraucher vergleichbar, auch wenn die Brennstoffkosten für die Fernwärme fast doppelt so teuer sind. Ab einem Heizölpreis von CHF 0,47/l ist die Fernwärme günstiger. Der Anbau wenig intensiver Wiesen ist für den Landwirt jedoch von geringerer Attraktivität als die extensive Wiese.

6. Politische und gesetzliche Analyse

6.1 Methode

Verschiedene politische Strategiepapiere dienen als Grundlagen für die politische Analyse. Die gesetzliche Analyse stützt sich auf die geltenden Gesetze im Energiebereich.

6.2 Resultate

Tabelle 35: Zusammenfassung der wichtigsten gesetzlichen Regelungen und Normen in der Schweiz bezüglich Bioenergieträger

Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft
vom 1.1.2000

Energiegesetz (EnG)
vom 26. Juni 1998

Energieverordnung (EnV)
vom 7. Dezember 1998 (Stand am 19. Januar 1999)

Mineralölsteuergesetz (MinöStG)
vom 21. Juni 1996 (Stand am 1. Januar 1997)

**Verordnung über Flächen- und Verarbeitungsbeiträge im Ackerbau
(Ackerbaubeitragsverordnung, ABBV)**
vom 7. Dezember 1998

Luftreinhalte-Verordnung (LRV)
vom 16. Dezember 1985 (Stand am 12. Oktober 1999)

Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Gesetz)
Vom 1. Mai 2000

Normen (DIN, CEN, ÖNORM)

- RME ÖNORM C 1190 und ein Vorschlag von Deutschland DIN V 51 606
- DIN 5 1731 für feste Brennstoffe

Bundesverfassung

Grundlagen für die schweizerische Energiepolitik bildet Artikel 89 in der Bundesverfassung, laut dem sich Bund und Kantone im Rahmen ihrer Zuständigkeiten für eine ausreichende, breitgefächerte, sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung sowie für einen sparsamen und rationellen Verbrauch einsetzen. Desweiteren fördert der Bund die Entwicklung von Energietechniken, insbesondere in den Bereichen des Energiesparens und der erneuerbaren Energien.

Energiegesetz und Energieverordnung

Das auf der Bundesverfassung aufbauende Energiegesetz bezweckt unter anderem die verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien. Dies durch die Unterstützung von Forschung, Entwicklung und Demonstrationsprojekten sowie finanzielle Beiträge. Die Finanzhilfen für Massnahmen zur sparsamen Energienutzung und zur Nutzung erneuerbarer Energien sowie Abwärme dürfen jedoch 40 Prozent der anrechenbaren Kosten nicht übersteigen (als anrechenbare Kosten gelten die nicht amortisierbaren Mehrkosten gegenüber den Kosten für konventionelle Techniken). Der Gesamtbetrag für die finanzielle Förderung wird jährlich von der Bundesversammlung limitiert. Pilot- und Demonstrationsanlagen werden unterstützt, wenn

- sie der sparsamen und rationellen Energieverwendung oder der Nutzung erneuerbarer Energien dienen,
- ihr Anwendungspotential und die Erfolgswahrscheinlichkeit des Projektes genügend gross ist,
- das Projekt der Energiepolitik des Bundes entspricht,
- die gewonnenen Resultate der Öffentlichkeit zugänglich sind und interessierten Kreisen bekannt gemacht werden.

Massnahmen zur sparsamen und rationellen Energienutzung sowie zur Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien werden unterstützt, sofern sie

- im Rahmen eines Förderprogramms des Bundes durchgeführt werden,
- energiewirtschaftlich von exemplarischer oder allgemeiner Bedeutung oder für die Einführung einer Technologie wichtig sind,
- die Massnahme der Energiepolitik des Bundes und dem Stand der Technik entspricht,
- die energiebedingte Umweltbelastung mindert oder die sparsame und rationelle Energieverwendung fördert,
- ohne Unterstützung nicht wirtschaftlich ist.

Bei der Nutzung von Energieholz werden die Aufbereitung, Lagerung und energietechnische Verwertung von Wald-, Rest-, Alt- und Flurholz unterstützt.

Mineralölsteuergesetz

Finanziell von grosser Bedeutung ist das Mineralölsteuergesetz, gemäss dem der Bund auf Erdöl, andere Mineralöle, Erdgas und verarbeitete Produkte eine Mineralölsteuer erhebt sowie auf Treibstoffe einen Mineralölsteuerzuschlag. Wichtig für RME ist, dass Treibstoffe, die in Pilot- und Demonstrationsanlagen aus erneuerbaren Rohstoffen gewonnen werden, steuerfrei sind. Als Pilotanlagen gelten Anlagen, deren Betrieb der Energie- und Umweltpolitik der Bundes entspricht, in denen jährlich höchstens 2,5 Millionen Liter Dieselöläquivalent gewonnen werden und die der Markterprobung oder der technischen Erprobung dienen. Haben mehrere Anlagen den gleichen Zweck und übersteigt die gesamte Produktionsmenge 5 Millionen Liter Dieselöläquivalente, so werden die einzelnen Gesuchsteller anteilmässig von

der Steuer befreit. Artikel 58 besagt, dass der Landwirtschaft einen Teil der Treibstoffsteuer rückerstattet wird.

Ackerbaubeitragsverordnung

In der Landwirtschaftsgesetzgebung gibt es in der Verordnung über Flächen- und Verarbeitungsbeiträge im Ackerbau einen speziellen Artikel, nach dem für die Verarbeitung der nachwachsenden Rohstoffe, die sowohl zur Ernährung als auch zu industriellen Zwecken eingesetzt werden können, Rohstoffverbilligungsbeiträge an Pilot- und Demonstrationsanlagen gewährt werden. Als Pilot- und Demonstrationsanlagen gelten Anlagen, die der technischen Erprobung von Systemen dienen und die Erfassung neuer wissenschaftlicher oder technischer Daten und vor allem die wirtschaftliche Beurteilung einer allfälligen Markteinführung ermöglichen. Die Beiträge betragen:

- für Ölsaaten (Raps, Soja, Sonnenblumen) CHF 20.- pro dt Biomasse.
- für die auf landwirtschaftlicher Nutzfläche produzierte Biomasse (ohne Ölsaaten) maximal CHF 200.- pro Hektoliter (hl) daraus produziertem reinem Ethanol oder CHF 0.04. pro kWh daraus produzierter Energie.

Nachwachsende Rohstoffe dürfen nicht der Ernährung von Menschen oder Tieren dienen. Nebenprodukte, die bei der Verarbeitung entstehen, können als Futtermittel verwendet werden.

CO₂-Gesetz

Das CO₂-Gesetz hat zum Ziel, die CO₂-Emissionen aus der Nutzung der fossilen Energieträger bis zum Jahr 2010 gegenüber 1990 gesamthaft um 10 % zu vermindern. Falls dieses Ansinnen nicht durch energie-, verkehrs-, umwelt- und finanzpolitische sowie freiwillige Massnahmen erreicht werden kann, ist die Einführung einer Abgabe vorgesehen. Diese würde frühestens im Jahre 2004 eingeführt und könnte maximal CHF 210.- pro Tonne CO₂ betragen. Das letzte Wort dazu hat aber das Parlament. Falls die Abgabe eingeführt wird, würde sie dem Volk und der Wirtschaft vollumfänglich rückerstattet. Die Energieagentur der Wirtschaft versucht in Zusammenarbeit mit den Bundesbehörden Lösungen zu finden, damit die verschiedenen Branchen weniger Energie verbrauchen und weniger CO₂ ausstossen. Ziel ist es, sogenannte freiwillige Leistungsvereinbarungen abzuschliessen, mit denen die Branchen sich verpflichten, die ausgehandelten CO₂-Zielvorgaben zu erfüllen. Damit würden sie von der CO₂ Abgabe befreit. Noch sind keine solchen Vereinbarungen abgeschlossen worden.

Ausblick

Da Volk und Stände in der Abstimmung vom September 2000 alle drei Energievorlagen (Solarinitiative, Förderabgabe für erneuerbare Energien und Energielenkungsabgabe) deutlich abgelehnt haben, muss weiterhin auf einen Richtungswechsel zugunsten der erneuerbaren Energien in der eidgenössischen Energiepolitik gewartet werden.

Das Thema der ökologischen Steuerreform ist aber nicht vom Tisch, da das Parlament noch die 1996 eingereichte Volksinitiative „Für eine gesicherte AHV – Energie statt Arbeit besteuern“ beraten muss. Die Initiative verlangt eine Steuer auf nicht erneuerbare Energien und auf

Strom aus grossen Wasserkraftwerken. Der Ertrag würde nicht nur an Erwerbstätige und an die Wirtschaft zurückerstattet, sondern auch an Rentner.

Zusätzlich zu den gesamtschweizerischen Förderprogrammen (das Nachfolgeprojekte von Energie 2000 wird ausgearbeitet), unterstützen die Kantone ebenfalls Massnahmen im Bereich erneuerbare Energien. Die kantonalen Unterstützungen können finanziell bedeutender als die des Bundes sein. Seit Beginn dieses Jahres arbeiten 16 von 26 Kantonen mit einem Globalbudget des Bundes, bei dem sie selbst bestimmen können, welche Energieträger sie in welchem Umfang fördern wollen. In diesen 16 Kantonen hat sich der Bund völlig von der Förderung zurückgezogen.

Normen

Es gibt keine Schweizer Normen zu RME, Stückholz oder Gras. Zurzeit sind bei DIN, CEN und ÖNORM Normgebungsprozesse für RME im Gange. In Österreich besteht für RME die ÖNORM C 1190 und in Deutschland ein Vorschlag DIN V 51 606. Holz unterliegt den gesetzlichen Regelungen für feste Brennstoffe, die sich an die Deutsche Norm DIN 51 731 angliedert. Die Klassifizierung und Vereinbarungen hat in der Schweiz der Verein für Holzenergie (Vhe) aufgestellt.

6.3 Diskussion

Die gesamte Gesetzgebung zielt auf eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien ab. Mittel dazu sind Forschung, Ausbildung und (limitierte) finanzielle Unterstützung von Produktionsanlagen. Aus politischer Sicht sind die meisten Hinderungsgründe für Bioenergieträger jedoch finanzieller Natur. Das grösste Hindernis ist die Tatsache, dass nur Bioenergieträger von Pilot- und Demonstrationsanlagen im Umfang von total 5 Millionen Dieselöläquivalenten von der Mineralölsteuer befreit sind. Auch die Verarbeitungsgebühr für Ölsaaten erhalten nur Pilot- und Demonstrationsanlagen. Artikel 14 des Energiegesetzes und der entsprechende Artikel 15 in der Energieverordnung erlauben Unterstützungszahlungen von bis zu 40 % der nicht-amortisierbaren Mehrkosten. Diese Regelung ist interpretationsbedürftig und löst im allgemeinen, wenn überhaupt, keine signifikanten Zahlungen aus. Aus der Sicht privater Investoren ist es sehr ärgerlich, wenn die Regelungen und die daraus folgenden Unterstützungszahlungen von Kanton zu Kanton oder sogar von Gemeinde zu Gemeinde variieren. Das bedeutet, dass für einen weiteren Anstieg der erneuerbaren Energien der Transparenz und Konsistenz sowie den finanziellen Aspekten unbedingt mehr Beachtung geschenkt werden muss. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Gesetzestexte nur Absichtserklärungen bleiben.

7. Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerung

Die wohl wichtigsten politischen Argumente bei der Förderung der Bioenergieträger sind die Reduktion des Treibhauseffektes und die Schonung der erschöpflichen Energieressourcen. Bei beiden Umweltwirkungen sind die drei untersuchten Bioenergieträger als günstig bis sehr günstig einzustufen. Bezüglich der erwähnten Umweltbelastungen sind sie also eindeutig den fossilen Energieträgern vorzuziehen. Auch für die Verringerung des Sommersmoges sind alle drei Bioenergieträger vorteilhafter. Es folgt nun eine fallweise Diskussion der Ökobilanz und der übrigen Aspekte.

Die Ökobilanz zeigt, dass unter allen Vergleichen Holz gegenüber der Ölheizung am meisten Vorteile aufweist. Nur die Wirkungskategorie Humantoxizität fällt für Holz ungünstig aus. Falls die dafür verantwortlichen Nox- und Partikelemissionen durch weitere technische Entwicklungen verringert werden können, dürfte sich das Belastungspotential für die Humantoxizität dem der Ölheizung angleichen. Unter den getroffenen Annahmen ist die Stückholzheizung deutlich teurer als die Ölheizung, selbst wenn für das Holz an und für sich kein Wert berechnet wurde. Berücksichtigt man aber den durch den Wintersturm Lothar gesunkenen Holzpreis und den in diesem Jahr stark gestiegenen Heizölpreis (zum Beispiel auf rund CHF 0.63 pro Liter Ende Oktober, Bauernzeitung vom 3. November 2000), so dürfte die Egalität bei den jährlichen Betriebskosten erreicht sein. Diese Egalität wurde in Kap. 5.2.1 mit CHF 0.63 berechnet. Weitere Holzfördernde Umstände sind, dass Holz in der Bevölkerung breit verankert ist, ein gutes Image geniesst und die benötigte Technik verfügbar ist. Zudem könnte die Holzenergienutzung von heute 2 Millionen m³ auf 4 Millionen m³ verdoppelt werden, ohne andere Holzsortimente zu konkurrenzieren (VHe, 1997). Einziger unerfreulicher Aspekt ist zurzeit die ungleiche Förderung der Holzheizungen in den einzelnen Kantonen.

Im ökologischen Vergleich zu Erdgas steht Holz in den Umweltwirkungen Versauerung, Gesamteutrophierung und Humantoxizität weniger gut da als gegenüber Heizöl, da die Bereitstellung und Verbrennung von Erdgas wenig Schadstoffe verursachen. Auch finanziell ist der Unterschied grösser, der Erdgaspreis müsste sich auf CHF 0.10/kWh verdoppeln, damit die jährlichen Betriebskosten gleich wären.

RME hat gegenüber dem Dieselszenario den Vorteil, weniger humantoxisch zu wirken. Dafür sind die Potentiale bei der Versauerung, der aquatischen und der terrestrischen Ökotoxizität höher, dies vor allem wegen des Feldbaues. Das ist ein Hauptkritikpunkt, doch ist ohne Düngung nirgends in der Landwirtschaft ein qualitativ und quantitativ befriedigender Ertrag zu erzielen. Die RME-Produktion lohnt sich wirtschaftlich, wie auch die Praxis zeigt. Das Hauptproblem bildet der Rapsanbau, der beim angenommenen tiefen Non-Food Rapspreis von CHF 35.- pro Dezitonne zwar die direkten Kosten deckt, aber weniger lukrativ als die Rotationsbrache oder andere Kulturen ist. Würde der Rapspreis auf ein mit der Rotationsbrache konkurrenzfähiges Niveau (CHF 72.-/dt, ähnlich Speiseraps) ansteigen, so kämen die Gestehungskosten pro Liter RME auf CHF 1.25 zu stehen. Der Dieselpreis stieg in diesem Jahr zum Teil auf über CHF 1.50. Das grösste Hindernis für eine kommerzielle RME-Herstellung ist die Tatsache, dass nur RME von Pilot- und Demonstrationsanlagen im Umfang von total 5 Millionen Dieselöläquivalenten von der Mineralölsteuer befreit ist. Auch die Verarbeitungsgebühr für Ölsaaten erhalten nur Pilot- und Demonstrationsanlagen. Ohne diese beiden Er-

leichterungen kann bei einem landwirtschaftlich akzeptablen Rapspreis kein zum Diesel konkurrenzfähiger RME produziert werden.

Die Fernwärme aus Heu hat bezüglich Versauerung, Gesamteutrophierung, Humantoxizität und terrestrischer Ökotoxizität grössere Umweltwirkungen als das Szenario mit Ölheizung und Extensivheuproduktion. Hauptgrund sind aber ganz klar nicht die Energieträger an sich, sondern die Wahl der Allokation für das Extensivheu mit Heu einer Intensivwiese und Weizenstroh, was eine hohe Gutschrift im Referenzsystem ergab. Die Wahl der Allokation zeigt in diesem Fall grössere Umweltauswirkungen als der fossile Energieträger selbst. Die Nettokosten der Fernwärme aus Heu und der Ölheizung sind für den Verbraucher vergleichbar, auch wenn die Brennstoffkosten für die Fernwärme fast doppelt so teuer sind. Mit dem derzeitigen, sich gegenüber dem Durchschnitt von 1999 verdoppelten Heizölpreis (zum Beispiel rund CHF 0.63 pro Liter Ende September, Bauernzeitung vom 6. Oktober 2000) dürfte sich die Fernwärme sogar lohnen. Jedenfalls liesse sich damit problemlos dem Landwirt CHF 400.- mehr pro Hektare für seine Heuballen zahlen, damit er statt einer Extensivwiese eine wenig intensive Wiese unterhält. Als entscheidender Hemmschuh entpuppt sich aber einmal mehr, dass die Verarbeitungsbeiträge von CHF 0.04 pro kWh nur an Pilot- und Demonstrationsanlagen ausgerichtet werden. Ohne diese Beiträge ist die Fernwärme nur bei einem recht hohen Heizölpreis wie im Jahre 2000 konkurrenzfähig.

Für einen weiteren Anstieg der erneuerbaren Energien muss der Transparenz und Konsistenz in der Politik sowie den finanziellen Aspekten unbedingt mehr Beachtung geschenkt werden. Da verschiedene Formen von Energie benötigt werden, also nicht nur Wärme oder Treibstoffe, sind alle drei untersuchten Bioenergieträger förderungswürdig, zumal sie in den am meisten diskutierten Kriterien der Verminderung des Treibhauseffektes und der Ressourcenschonung sehr viel vorteilhafter als ihre Referenzenergien sind. Ausserdem lässt sich mit Bioenergieträgern die Abhängigkeit von den Ölkonzernen verringern und die Wertschöpfung im eigenen Land halten. Je nach Ölpreis sind die Bioenergieträger bereits zum jetzigen Zeitpunkt konkurrenzfähig.

8. Literatur und Abkürzungen

8.1 Literatur

- Ackerbaubeitragsverordnung ABBV, 1998. Verordnung über Flächen- und Verarbeitungsbeiträge im Ackerbau (SR 910.17).
- Agrarische Rundschau 1998. EU-Weissbuch für erneuerbare Energien, Energie für die Zukunft: erneuerbare Energieträger. Ausgabe 3, Klosterneuburg, A.
- Albritton D.J., Derwent R.G., Isaksen I.S.A., Lal M., Wuebbels D.J., 1995. Trace gas radiative forcing. In: Climate Change 1994. Radiative forcing of climate change and evaluation of the IPCC IS 92 emission scenarios (Ed. Houghton et al.). Cambridge University Press.
- Ammann H., 1999. Maschinenkosten 2000. FAT-Bericht 539, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- Ammann H., Rinaldi M., Stadler E., 1999. Persönliche Mitteilungen.
- Audsley E., Alber S., Clift R., Cowell S., Crettaz P., Gaillard G., Hausheer J., Jolliet O., Kleijn R., Mortensen B., Pearce D., Roger E., Teulon H., Weidema B., van Zeijts H., 1997. Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final report for the DG VI Agriculture in the European Commission, England.
- Bach Ch., Heeb N., Mattrel P., Mohr M., 1998. Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen. Bericht Nr. 160 928/2, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf.
- Bauernzeitung (2000), 89. Jahrgang, Nr. 44, Schweizer Agrarmedien GmbH, Bern
- BfE (Bundesamt für Energie), 1998. Dimensionierung von Öl- und Gasheizkesseln, Merkblatt. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- Biollaz S., 1999. Persönliche Mitteilung.
- Bonny S., 1993. Is agriculture using more and more energy? A french case study, *Agric. Systems* **43**, 51-56.
- Borken J., Patyk A., Reinhardt G.A., 1999. Basisdaten für ökologische Bilanzierungen, Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Boustead I., 1994. Eco-profiles of the European plastics industry (APME). Report 6: Polyvinyl Chloride, Brussels.
- Boustead I., 1997a. Eco-profiles of European plastics industry. Report 9: Polyurethane precursors (MDI, TDI, Polyols) (Second Edition), Brussels.
- Boustead I., 1997b. Eco-profiles of the European plastics industry. Report 10: Polymer Conversion, Brussels.

- Boustead I., 1997c. Propylene Production. Eco-profiles of European plastics industry Report 14 : Polymethyl Methacrylate, Brussels.
- Braun M., Leuenberger J., 1991. Abschwemmung von gelöstem Phosphor auf Ackerland und Grasland während der Wintermonate. *Landwirtschaft Schweiz* 4/10, 555-560.
- Braun M., Hurni P., Spiess E., 1994. Phosphor und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. Schriftenreihe Nr. 18 der FAC, Liebefeld.
- Brechtel H.M., 1989. Stoffeinträge in Waldökosysteme: Niederschlagsdepositionen im Freiland und in Waldbeständen. DVKV-Mitteilungen 17, 27-52.
- BUWAL, 1990. Energie aus Heizöl oder Holz? Eine vergleichende Umweltbilanz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 131. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 118 S.
- BUWAL, 1991. Schwermetalle und Fluor in Mineraldüngern. Schriftenreihe Umwelt Nr. 162, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL, 1993. NABO: Nationales Bodenbeobachtungsnetz, Messresultate 1985-1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL, 1995a. NABEL: Luftbelastung 1994. Schriftenreihe Umwelt Nr. 244, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL, 1995b. Handbuch Emissionsfaktoren für stationäre Quellen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL, 1997. Umwelt in der Schweiz. Daten, Fakten, Perspektiven. Bericht des Bundesamts für Statistik und des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 65-94.
- BUWAL, 2000. Heizenergie aus Heizöl, Erdgas, oder Holz. Schriftenreihe Umwelt Nr. SRU-315-D, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Candinas A., 1996. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz, briefliche Mitteilung.
- Czerwinski J., Mayer A., 1999. Best Available Technology for Emission Reduction of Small 4S-SI-Engines. Hochschule für Technik und Architektur, Biel.
- Cowell S., Audsley E., Cliff R., 1995. Report for EU Concerted Action: Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture, Centre of Environmental Strategy, University of Surrey and Silsoe Research Institute, GB.
- Direktzahlungsverordnung (DZV), 1998. Verordnung über Direktzahlungen an die Landwirtschaft. (SR 910.13).
- EMPA (Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt), 1999. Persönliche Mitteilung. Dübendorf.
- EN ISO 14 040, 1997. Umweltmanagement Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Europäisches Komitee für Normierung, Brüssel.
- EN ISO 14 041, 1999. Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. Europäisches Komitee für Normierung, Brüssel.

- Erdgas, 2000. www.erdgas.ch. Homepage des Verbandes der Schweizerischen Gasindustrie, Zürich.
- Flaig H., Leuchtweis C., Von Lüneburg E., Ortmaier E., Seeger C., 1998. Biomasse – nachwachsende Energie, Potentiale – Technik – Kosten. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim.
- Frei U., 1988. Berechnungen von Schadstoffemissionen. *Heizung Klima* 12/1988, 71-76.
- Frischknecht R., Bollens U., Bosshart S., Ciot M., Ciseri L., Doka G., Dones R., Gantner U., Hirschier R., Martin A., 1996. Ökoinventare von Energiesystemen, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt, Institut für Energietechnik, ETH-Zürich, PSI Villigen.
- Fritsche W., 1998. Umwelt-Mikrobiologie – Grundlagen und Anwendungen. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Gälli-Gurhart B.C., 1991. Schwermetall auf grössenfraktioniertem Aerosol und in der Deposition: Untersuchungen an einem Höhenprofil im Kanton Bern. Dissertation Universität Bern.
- Gaillard G. (1997). Informationstagung Landtechnik 14.-16.10.1997, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- Gaillard G., Crettaz P., Hausheer J., 1997. Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau. FAT-Schriftenreihe Nr. 46; Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- Green M.B., 1987. Energy in pesticide manufacture, distribution and use. In: Energy in Plant Nutrition and Pest Control (Ed. Z.R: Hesel). *Energy in World Agriculture*, Vol. 2, 165-177.
- Gronauer A., Claassen N., Ebertseder T., Fischer P., Gutser R., Helm M., Popp L., Schön H., 1997. Bioabfallkompostierung. Schriftenreihe Heft 139, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München.
- Gsporner R., 1990. Schwermetalle in Düngemitteln – Ein Diskussionsbeitrag (Rohdaten) AGW ZH.
- Guelorget Y., Jullien V., Weaver P.M., 1993. A life cycle analysis of automobile tyres in France. Centre for the Management of Environmental Resources (CMER), INSEAD, Fontainebleau.
- Hauschild M., Wenzel H., 1998. Environmental Assessment of Products, Volume 2: Scientific Background. Chapman&Hall, London.
- Hartley D., Kidd H., 1987. The Agrochemical Handbook, 2nd edition, Royal Society of Chemistry, Information Services, Nottingham (GB).
- Hasler P., Nussbaumer T., 1996. Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern.

- Hellebrand H.J., 1998. Emission of Nitrous Oxide and other Trace Gases during Composting of Grass and Green Waste. *J. agric. Engng. Res.* **69**, 365 – 375.
- Herger E., 2000. Persönliche Mitteilung. Eco Energie, Etoy.
- Hersener J.-L., Meister E., Mediavilla V., Lips A., Rüegg J., Nussbaumer T., Baserga U., Müller D., Dinkel F., Waldeck B., Trauboth Müller T., Hirs B., 1997. Schlussbericht Projekt Energiegras/Feldholz zuhanden des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Tänikon.
- Hersener J.-L. und Meier U., 1999. Energetisch nutzbares Biomassepotential in der Schweiz sowie Stand der Nutzung in ausgewählten EU-Staaten und den USA. Bundesamt für Energie, Bern.
- Hersener J.-L., 1999. Persönliche Mitteilung. Tänikon.
- Hertz J., 1989. Immisionsökologische Untersuchungen an Dauerbeobachtungsflächen im Wald des Kanton Zürichs, Teilprojekt Deposition. Anorganisch-Chemisches Institut der Universität Zürich (unveröffentlicht).
- IPCC (1996) Climate Change 1995 – The Science of Climate change (Ed. J.T. Houghton); Cambridge University Press.
- Jolliet O., Crettaz P., 1997. Critical surface-Time 95. A life cycle impact assessment methodology including fate and exposure. Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Soil and Water Management, Lausanne.
- KIGA, 1991. Lufthygienische Untersuchungen im Kanton Bern. Bericht über das Messjahr 1990. Berner Kantonales Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit, Abteilung Umweltschutz, Bern.
- Kohler N., 1994. Energie- und Stoffflussbilanzen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer, Schlussbericht zuhanden des Bundesamtes für Energiewirtschaft, EPFL-LESO und Universität Karlsruhe.
- Kraus K., Niklas G., Tappe M., 1999. Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Texte 79/99 Umweltbundesamt Berlin.
- Krogmann U., 1994. Neueste Erkenntnisse über die Grundlagen der Kompostierung. *Abfallwirtschaft* **4/94**, Seiten 13-21.
- LBL (Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau) 1999a. Preiskatalog. Ausgabe 1999.
- LBL (Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau) 1999b. Deckungsbeiträge. Ausgabe 1999, mit SRVA und FiBL.
- LBL (Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau) 1999c. Handbuch zum Wirzkalender 1999, Wirz Verlag Basel.
- Lindfors L.-G., Christiansen K., Hoffmann L., Virtanen Y., Juntilla V., Hanssen O.J., Ronning A., Ekvall T., Finnweden G., 1995. Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nord 1995, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Margni M., Jolliet O., Rossier D., Crettaz P., (2000, in Vorbereitung). Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems.

- Menzi H., Haldemann C., Kessler K., 1993. Schwermetalle in den Hofdüngern – ein Thema mit Wissenslücken. *Schweiz. Landw. Fo.*, Vol 32 (1/2), 159-167
- Menzi H., Frick R., Kaufmann R., 1997. Ammoniakemissionen in der Schweiz, Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials. Schriftenreihe der FAL, Nr. 26.
- Mosimann T., Crole-Rees A., Maillard A., Neyroud J.A., Thöni M., Musy A., Rohr W., 1990. Bodenerosion im schweizerischen Mittelland – Erosion du sol sur le Plateau suisse. Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes 'Nutzung des Bodens in der Schweiz', Bern-Liebefeld.
- Näf E., Schick M., Luder W., 1996. Arbeitsvoranschlag, Version 4. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- Neher L., 1999. Persönliche Mitteilung. Nova Energie, Ettenhausen.
- Nordheim E., Lallemand Y., Ruff W., 1995. Aluminium and Ecology. Report from WG1, Ecobalance European Average Situation, EAA (European Aluminium Association).
- Patyk A., 1996. Balance of energy consumption and emissions of fertiliser production and supply. In: Int Conf. on Application of Life Cycle Assessment in Agriculture, Food and Non-Food Agro-Industry and Forestry: Achievements and Prospects (Ed. D. Ceuterik), Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, (B), 47-67.
- Peters M., 1990. Nutzungseinfluss auf die Stoffdynamik schleswig-holsteinischer Böden, Wasser-, Luft-, Nähr- und Schadstoffdynamik, Dissertation Nr. 268, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Prashun V. und Braun M., 1994. Abschätzung der Phosphor und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der FAC Nr. 17, Bern-Liebefeld.
- Prather M., Derwent R., Ehhalt D., Frazer P., Sanhueza E., Zhou X., 1995. Other trace gases and atmospheric chemistry. In: Climate Change 1994. Radiative forcing of climate change and evaluation of the IPCC IS 92 emission scenarios. Cambridge University Press (GB).
- Reinhardt G.A. und Zemanek G., 2000: Ökobilanz Bioenergieträger – Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin.
- Rinaldi M., Herger E., 1998. Schweizer Pflanzenölester als Dieseltreibstoff. FAT-Bericht 514, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.
- Sharpley A.N., Menzel R.G., Smith S.J., Rhoades E.D., Olness A.E., 1981. The sorption of soluble phosphorus by soil material during transport in runoff from cropped and grassed watersheds. *J. Environ. Qual.* 10 (2), 211-215.
- Stadelmann F.X., und Frossard R., 1992. Schwermetalle in der Landwirtschaft. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), Bern-Liebefeld.
- Stadler E., Wolfensberger U., Schiess I., 1999. Emissionsminderung bei kleinen Viertakt-Benzinmotoren. FAT-Bericht Nr. 541, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.

- Strohheizkraftwerk Schkölen GmbH, 1999. Persönliche Mitteilung. Schkölen D.
- SVLT (Schweizerischer Verband für Landtechnik), 1999. Richtansätze 1999. *Schweizer Landtechnik* 4/99, Seite 8.
- Thurgauer Zeitung, 2000. Rasche Erholung ist nicht in Sicht. Thurgauer Zeitung, Frauenfeld 12. 9. 2000, Seite 2.
- VDI-Richtlinien, 1997. VDI 4600, Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag, Berlin. 19 S.
- VHe (Schweizer Vereinigung für Holzenergie), 1997. Vademecum Holzenergie. In: Wald und Holz, Jahrbuch 1997, (Ed. BUWAL), Bern.
- VHe (Schweizer Vereinigung für Holzenergie), 1998. Umrechnungsfaktoren für Energieholz. In: *Wald und Holz* 16/98. Seite 19.
- Von Albertini N., Braun M., Hurni P., 1993. Oberflächenabfluss und Phosphorabschwemmung von Grasland. *Landwirtschaft Schweiz* 6 (10), 575-580.
- Von Steiger B., Baccini P., 1990. Regionale Stoffbilanzierung von landwirtschaftlichen Böden mit messbarem Ein- und Austrag. Nationales Forschungsprogramm 22, Böden, Bern-Liebefeld.
- Waldeck B., 1996. Persönliche Mitteilung. Carbotech AG, Basel.
- Walther U., Menzi H., Ryser J.-P., Flisch R., Jeangros B., Kessler W., Maillard A., Siegenthaler A. F., Vuilloud P. A., 1994. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, Beilage zu: *Agrarforschung* 1 (7).
- Weber R., Moxter W., Pilz M., Pospischil H., Roleder G., 1995. Umweltverträglichkeit des Strohheizkraftwerkes Schkölen – Teil Emissionen. Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena.
- Weibel T., Stritz A., 1995. Ökoinventare und Wirkungsbilanzen für Baumaterialien. ESU Reihe 1/95, Institut für Energietechnik, ETH-Zürich.
- Weidema B.P., Mortensen B., 1995. Preliminary life cycle inventory for wheat production, Interner Bericht. Institute for Product Development, Technical University of Denmark, Lyngby, DK.
- Weidema B.P., Pedersen R.L., Drivsholm T.S., 1995. Life Cycle Screening of Food Products. Two examples and some methodological proposals. Danish Academy of Technical Sciences, ATV, Lyngby.
- Wilke B., Schaub D., 1996. Phosphatanreicherung bei Bodenerosion. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 79, 435-438
- Wörgetter M., 1991. Pilotprojekt Biodiesel, Teil 2. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Landtechnik, Heft Nr. 26, Wieselburg.
- Wolfensberger U. und Dinkel F., 1997. Beurteilung nachwachsender Rohstoffe in der Schweiz 1993 –1996. FAT und Carbotech im Auftrag des BLW, Bern.

8.2 Abkürzungen

Emissionen:

As	Arsen
BOD	Biologischer Sauerstoffbedarf
C ₂ H ₄	Ethen, Äthylen
Cd	Cadmium
CH ₄	Methan
Co	Kobalt
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COD	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
F ⁻	Fluorid
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HC	Kohlenwasserstoffe
HCl	Chlorwasserstoff, Salzsäure
HF	Fluorwasserstoff, Flusssäure
Hg	Quecksilber
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
N _{löslich}	Löslicher Stickstoff
N _{tot}	Stickstoff total
N _{verf.}	Pflanzenverfügbare Stickstoff (entspricht mineralischem Stickstoff)
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium
Ni	Nickel
NMVOG	Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen ausser Methan
NO ₃ ⁻	Nitrat
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide

N ₂ O	Lachgas, Distickoxid
PO ₄ ³⁻	Phosphat
Pb	Blei
S ⁻	Sulfid
Se	Selen
Sn	Zinn
SO ₂	Schwefeldioxid
VOC	Flüchtige Kohlenwasserstoffe
Zn	Zink

Übrige Abkürzungen:

Akh	Arbeitskraftstunden
APD	Absorbierbares Protein im Darm
Äqu.	Äquivalenten
atro	Absolut trocken (100 % Trockensubstanz)
BHD	Brusthöhendurchmesser
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CHF	Schweizer Franken
DB	Deckungsbeitrag
DIN	Deutsche Industrie Norm
dt	Dezitonne (= 100 kg)
EU	Europäische Union
ha	Hektare (= 10 000 m ²)
hl	Hektoliter (= 100 l)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde (= 3,6 MJ)
KVA	Kehrrichtverbrennungsanlage
MJ	Megajoule
NEL	Nettoenergie Laktation
Nm ³	Normkubikmeter
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
ÖNORM	Österreichische Norm

PMH	Produktive Maschinenstunde
RME	Rapsmethylester
Rp.	Rappen
SM 210	Überwinternde Standardmischung 210 für den Futterbau
TS	Trockensubstanz
VHe	Verein für Holzenergie

9. Anhang

Tabelle 36: Gewichtungsfaktoren je Emission und Wirkungskategorie (Erläuterungen siehe 3.1.9)

	Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger	Treibhauspoten- tial 500 Jahre	Ozonbildung High NO _x	Versauerung	Gesamt-Eutrophie- rung	Humantoxizität	Aquatische Öko- toxizität	Terrestrische Öko- toxizität
Benötigte nicht erneuerbare Energieträger	MJ- Äqu./kg	g CO ₂ - Äqu./g Subst.	g C ₂ H ₄ - Äqu./g Subst.	g SO ₂ - Äqu./g Subst.	g PO ₄ ³⁻ - Äqu./g Subst.	g Pb-Aqu./g Subst.	g Zn-Aqu./ g Subst.	g Zn-Aqu./g Subst.
Kohle	18							
Lignit	8							
Erdgas	35,9							
Erdöl	42,6							
Erdölgas	40,9 (pro m ³)							
Grubengas	35 (pro kg)							
Uranium	756.000							
Emission je Umweltkom- partiment:								
Luft								
Akrolein			0,8					
Halon 1 301		2 200						
NM VOC			0,5 ⁵⁹					
VOC			0,5 ⁵⁹					
CO			0,03			0,00014		
CO ₂		1						
CH ₄		7,5	0,007					
N ₂ O		180		0,7	0,13			
Perfluor-methan		9 800						
Perfluorethan		19 100						
Aldehyde			0,5			0,0087		

⁵⁹ Eigene Schätzung der Durchschnitte

Fortsetzung von Seite 90

	Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger	Treibhauspoten- tial 500 Jahre	Ozonbildung High NO _x	Versauerung	Gesamt-Eutrophie- rung	Humantoxizität	Aquatische Öko- toxizität	Terrestrische Öko- toxizität
Emission je Umweltkom- partiment	MJ- Äqu./kg	g CO ₂ - Äqu./g Subst.	g C ₂ H ₄ - Äqu./g Subst.	g SO ₂ - Äqu./g Subst.	g PO ₄ ³⁻ - Äqu./g Subst.	g Pb-Äqu./g Subst.	g Zn-Äqu./ g Subst.	g Zn-Äqu./g Subst.
Alkane			0,4					
Ethan			0,1					
Propan			0,4					
n-Butan			0,4					
n-Pentan			0,4					
n-Hexan			0,4					
n-Heptan			0,5					
Benzol			0,2			0,012		
Ethylen			1					
Propylen			1					
Toluol			0,6					
p-Xylol			0,9					
Aromatische Kohlenwasser- stoffe			0,8					
Halogenierte Kohlenwasser- stoffe			0,3					
NH ₃				1,88	0,35			
HF				1,6				
H ₂ S				1,88				
NO _x				0,7	0,13	0,002		
SO ₂				1		0,0075		
HCl				0,88				
H ₂ SO ₄				0,65				
Phosphor					3,06			
Partikel						0,0075		

Fortsetzung von Seite 90

	Ausschöpfung nicht-erneuerbarer Energieträger	Treibhauspoten- tial 500 Jahre	Ozonbildung High NO _x	Versauerung	Gesamt-Eutrophie- rung	Humantoxizität	Aquatische Öko- toxizität	Terrestrische Öko- toxizität
Emission je Umweltkom- partment	MJ- Äqu./kg	g CO ₂ - Äqu./g Subst.	g C ₂ H ₄ - Äqu./g Subst.	g SO ₂ - Äqu./g Subst.	g PO ₄ ³⁻ - Äqu./g Subst.	g Pb-Äqu./g Subst.	g Zn-Äqu./ g Subst.	g Zn-Äqu./g Subst.
As						9 000	0,078	0,75
Cd						19 000	79	3,14
Cu						145	0,66	0,14
Pb						2 300	1,28	0,13
Hg						46 000	196	5,94
Ni						370	0,12	0,35
Zn						27	0,076	0,33
Wasser								
BOD					0,022 ⁶⁰	0,022	0,00013	
COD					0,022			
PO ₄ ³⁻					1	0,0000032	0,01	
NH ₄ ⁺					0,33			
NO ₃					0,1	0,00085		
Ole							0,13	
F						0,045		
S						2,1		
Phenol						0,052	15,4	
As						1,5	0,52	
Cd						8,2	520	
Cr						0,62	2,6	
Co						2,2		
Cu						0,022	5,2	
Pb						0,86	5,2	
Hg						7,8	1 300	
Ni						0,062	0,79	
Se						10,9		
Zn						0,0032	1	

Fortsetzung von Seite 90

⁶⁰ Annahme

	Ausschöpfung nicht erneuerbarer Energieträger	Treibhauspoten- tial 500-Jahre	Ozonbildung High. NO _x	Versauerung	Gesamt-Eutrophie- rung	Humantoxizität	Aquatische Öko- toxizität	Terrestrische Öko- toxizität
Emission je Umweltkom- partiment	MJ- Äqu./kg	g CO ₂ - Äqu./g Subst.	g C ₂ H ₄ - Äqu./g Subst.	g SO ₂ - Äqu./g Subst.	g PO ₄ ³⁻ - Äqu./g Subst.	g Pb-Äqu./g Subst.	g Zn-Äqu./ g Subst.	g Zn-Äqu./g Subst.
Boden						⁶¹		
Asulam						0,0000155	0,0000154	0,0000101
Carbetamide						0,00000342	0,000606	0,000985
Diflufenican						0,000615	0,000601	0,000406
Dimeturon						0,000772	1,03	0,334
Epoxi-conazole						0,00116	0	0
Fenpiclohil						0,00000933	0,0349	0,122
Ioxynil						0,00867	0,0000487	0,000116
Isoproturon						0,000824	0,124	0,0000147
Lambda- cyhalothrin						0,00109	0,0787	0,000173
Mecoprop (MCP)						0,000166	0,0000238	0,0000477
As						0,7	0,24	2,3
Cd						1,46	240	9,6
Cr						0,29	1,2	0,26
Co						1		0,26
Cu						0,009	2	0,42
Pb						0,6	3,9	0,41
Hg						3,6	600	18,3
Ni						0,029	0,36	1,1
Se						5		
Zn						0,0007	0,23	1

Fortsetzung von Seite 90

⁶¹ Bei den Pestiziden für die Humantoxizität wurde nur die indirekte Wirkung berücksichtigt

Tabelle 37: Produktionsinventar für die RME-Gewinnung aus Raps

Input pro ha Raps	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Bodenbearbeitung					
Pflug (3-schar)	ha	1	Ende Aug.	867	450 ha
Kreiselegge 3 m	ha	1		748	500 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	4,3		3 771	10 000 h
Diesel	kg	30,7			
Gebäude Maschinen (Pflug/Kreiselegge/Traktor)	m3	39/25/61			50 Jahre
Saat					
Sämaschine 3 m	ha	1	Ende Aug.	507	700 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	ha	1,5		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Sämaschine/Traktor)	m3	25/56			50 Jahre
Diesel	kg	4			
Saatgut 'Express'	kg	5			
<i>Oftanol'</i>	<i>Nicht bilanziert, Menge unbekannt</i>				
<i>Thiram TMTD (Thiram 80)</i>	<i>Nicht bilanziert, Menge unbekannt</i>				
Pflanzenschutz					
Anbaufeldspritze 12 m	ha	3		300	800 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3,6		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Anbaufeldspritze/Traktor)	m3	18/56			50 Jahre
Diesel	kg	11,5			
Carbetamid (Herbizid 'Pradone TS')	kg	2	Ende Sept.		
Dimefuron (Herbizid 'Pradone TS')	kg	1	Ende Sept.		
Lambda-Cyhalothrin (Insektizid 'Karate')	kg	0,01	Mitte März		
Lambda-Cyhalothrin (Insektizid 'Karate')	kg	0,008	Mitte April		
Düngung					
Frontlader (mittel)	h	2,1		820	5 000h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	2,1		3 343	10 000h
Miststreuer (3-4 t)	Fu	7		1 294	4 000 Fu
Traktor (4WD, 85 PS)	h	2,1		3 771	10 000 h
Rindermist aus Zweiraumlaufstall	t	20	Ende Aug.		
Schleuderstreuer	ha	2		105	1 000 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	2,8		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Frontlader/Traktor/ Mist- streuer/Traktor/Schleuderstreuer/Traktor)	m3	32/56/57/61/12/56			50 Jahre
Diesel	kg	21,7			
Ammonsalpeter 27,5 %	kg	164	Anfang März		
Ammonsalpeter 27,5 %	kg	91	Anfang April		

Fortsetzung von Seite 94

Input pro ha Raps	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Ernte (Lohndrusch)					
Mähdrrescher (150 kW) mit Strohhäcksler	ha	1	Mitte Juli	10 280	2 700 ha
Gebäude Maschinen	m3	234			
Diesel	kg	26,4			
Stroheinarbeitung					
			Ende Juli/ Mitte August		
Grubber mit Nachläufer	ha	1		709	800 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	1,5			
Gebäude Maschinen (Grubber/Traktor)	m3	31/61			
Diesel	kg	11,3			
Saatbettbereitung SM 210					
			Mitte Aug.		
Kreiselegge 3 m	ha	1		748	500 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	1,4			
Gebäude Maschinen (Kreiselegge/Traktor)	m3	25/61			
Diesel	kg	7,3			
Saat SM 210					
			Mitte Aug.		
Grassämaschine pneumatisch mit Walze 3m	ha	1		787	900 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	1,5			
Gebäude Maschinen (Sämaschine/Traktor)	m3	25/56			
Diesel	kg	4			
Saatgut SM 210	kg	30			
Düngung SM 210					
Schleuderstreuer	ha	1	Mitte Aug.	105	1 000 ha
Ammonsalpeter 27,5 %	kg	115			
Vakuumfass 5 000 l	Fa	6			
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3,3			
Gebäude Maschinen (Schleuderstreuer/Vakuumfass/Traktor)	m3	12/64/56			
Diesel	kg	13,5			
Rindervollgülle aus Boxenlaufstall 1:2 verdünnt	m3	30			
Ernte SM 210					
			Ende Sept./ Mitte April		
2 Schnitte mit Eingrasen jeden Tag				350	1 000 ha
Motormäher mit Bandeingrasvorrichtung	ha	2			
Benzin	kg	4,6			
Ladewagen (13-20 m3)	Fu	20			
Traktor (4WD, 70 PS)	h	6			
Gebäude Maschinen (Motormäher/Ladewagen/Traktor)	m3	20/101/56			
Diesel	kg	23,4			

Fortsetzung von Seite 94

Input pro ha Raps	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Transport Rapskörner zur Annahmestelle, 8 km					
Pneuwagen 5 t hydr.	h	0,8		1 457	6 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	0,8		3 343	10 000 h
Gebäude-Maschinen (Pneuwagen/Traktor)	m ³	59/56			50 Jahre
Diesel	kg	2,3			
Trocknung					
Heizöl	kg	51			
Gebäude und Maschinen	<i>Nicht bilanziert, da Anteil an der gesamthaft getrockneten Menge Getreide sehr minim</i>				
Transport zur Oelmühle 20 km mit 28 t Lkw					
Transport	tkm	60			
Ölmühle					
Maschinen	Jahr	0,0005		123 000	20 Jahre
Methanol	kg	153,3			
Natronlauge 50 %ig (statt Kalilauge)	kg	15,6			
Elektrizität	kWh	89,9			
Heizöl für Aufbereitung Glycerinphase 1	kg	6			
Gebäudebedarf	Jahr	0,0005		4 772 m ³	50 Jahre
Transport mit Lkw 28 t 30 km					
Transport	tkm	30			
Verbrennen					
RME Verbrennung	kg	982			
Entsorgung Glycerinphase 2 auf Feld					
Glycerinphase 2	<i>Nicht bilanziert, da rascher, vollständiger Abbau</i>				
Output					
Nutzenergie	MJ	36 840			
Rapsschrot	kg	1 863			
Reinglycerin	kg	99			
Kaliumüberschuss (K ₂ O)	kg	200			
Futtergras	dt	50			
Gutschrift Kaliumüberschuss					
Kalisalz 60 % (Bereitstellung)	kg	333			

Fortsetzung von Seite 94

Input pro ha Raps	Einheit	Anzahl	Datum	Gewicht	Lebensdauer
		Einheiten		in kg	
Gutschrift Reinglycerin: Glycerinproduktion					
Chlor	kg	198			
Natronlauge	kg	139			
Propylen	kg	79			
Elektrizität	kWh	89			
Heizöl	kg	186			
Gutschrift Rapskuchen					
Aufteilung zwischen Rapsöl und Rapskuchen mittels ökonomischem Wert					
Gutschrift Grünfutter					
2 Schnitte Grünfutter von intensiver Naturwiese (NW), 2 x 25 dt TS					
Düngung NW: 2 x Gülle					
Vakuumfass 5 000 l	Fa	12		1 690	12 000 Fa
Traktor (4WD, 70 PS)	h	4,8		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Vakuumfass/Traktor)	m3	64/56			50 Jahre
Diesel	kg	22,1			
Rindervollgülle aus Boxenlaufstall 1:2 verdünnt	m3	60	Mitte Aug./ Anfang März		
Ernte SM 210: 2 Schnitte mit Eingrasen jeden Tag			Ende Sept./Mitte April		
Motormäher mit Bandedingrasvorrichtung	ha	2		350	1 000 ha
Benzin	kg	4,6			
Ladewagen (13-20 m3)	Fu	20		2 108	5 000 Fu
Traktor (4WD, 70 PS)	h	6		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Motormäher/Ladewagen/Traktor)	m3	20/101/56			50 Jahre
Diesel	kg	23,4			

Tabelle 38: Produktionsinventar für Rotationsbrache mit Energiebereitstellung durch Diesel

Input pro ha	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Bodenbearbeitung					
Pflug 3-schar	ha	1	Anfang Sept.	867	450 ha
Kreiselegge 3m	ha	1		748	500 ha
Traktor (4 WD, 85 PS)	h	4,3		3 771	10 000 h
Gebäude Maschinen (Pflug/Kreiselegge/Traktor)	m3	39/25/61			50 Jahre
Diesel	kg	30,7			
Saat					
Grassämaschine pneumatisch mit Walze 3 m	ha	1		787	900 ha
Traktor (4 WD, 70 PS)	h	1,5		3 343	10 000 h
Diesel	kg	4			
Gebäude Maschinen (Sämaschine/Traktor)	m3	25/56			50 Jahre
Saatgut "Grundversion"	kg	18			
Düngung					
Nicht erlaubt					
Pflanzenschutz					
nicht erlaubt					
Mulchen					
Schlegelmulchgerät ohne Schwenkarm	ha	1		595	600 ha
Traktor (4 WD, 70 PS)	h	1,2		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Mulchgerät/Traktor)	m3	26/56			50 Jahre
Diesel	kg	4,1			
Diesel					
Diesel	kg	861			
Output					
Nutzenergie	MJ	36 840			

Szenario für Saatgut 'Grundversion':

Input pro ha	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Saatbettbereitung					
Kreiselegge 3m	ha	2		748	600 ha
Traktor (4 WD, 85 PS)	h	2,8		3 771	10 000 h
Gebäude Maschinen (Kreiselegge/Traktor)	m3	25/61			50 Jahre
Diesel	kg	14,6			
Saat					
Grassämaschine pneumatisch mit Walze 3 m	ha	1		787	900 ha
Traktor (4 WD, 70 PS)	h	1,5		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Sämaschine/ Traktor)	m3	25/56			50 Jahre
Diesel	kg	4			
Saatgut Buchweizen *	kg	40			
Düngung					
Keine (profitiert von früheren Mistgaben, N-empfindlich)					
Pflanzenschutz					
Keiner (gibt keine selektiven Herbizide, falsches Saatbeet zu Beginn)					
Ernte					
Mähdrescher (150 kW)	ha	1		10 280	2 700 ha
Gebäude Maschinen	m3	234			50 Jahre
Diesel	kg	22,4			
Output					
Buchweizen	dt TS	16			

Tabelle 39: Produktionsinventar für Heizwärme aus Holz

Input pro 135 000 MJ Nutzenergie (entspricht einer Heizperiode)	Einheit	Anzahl Einheiten	Gewicht in kg	Lebensdauer
Fällen	<i>Nicht bilanziert</i>			
Entasten	<i>Nicht bilanziert</i>			
Rücken 200 m				
Forwarder 'Timberjack 810B'	PMH	1,4	11 500	8 000 PMH
Gebäude Maschinen	m3	70		50 Jahre
Diesel	kg	8,23		
Scheiterproduktion (50 cm)				
Brennholzautomat	PMH	3	28 000	22 500 PMH
Gebäude Maschinen	m3	234	0,01	50 Jahre
Diesel	kg	22,5		
Kunststoffnetz Polyethylen	kg	0,2	5	
Lagerung 1,5 Jahre im Wald				
Wellblechabdeckung	<i>Nicht bilanziert</i>			
10 km Transport mit Lkw und Kran				
Transport	tkm	134		
Lagerung 0,5 Jahre am Haus				
Wellblechabdeckung	<i>Nicht bilanziert</i>			
Verbrennung				
Heizkessel 24,8 kW	Jahr	1	660	18 Jahre
Speicher 920 l mit Boiler	Jahr	1	280	18 Jahre
Verbrennung Hartholz lufttrocken	kg	13 400		
Ascheentsorgung via KVA				
Asche 1 %	kg	105		
Output				
Nutzenergie	MJ	135 000		

Tabelle 40: Produktionsinventar für Heizwärme aus Gas mit Holzverrottung im Wald

Input pro 135 000 MJ Nutzenergie (entspricht einer Heizperiode)	Einheit	Anzahl Einheiten	Gewicht in kg	Lebensdauer
Fällen	<i>Nicht bilanziert</i>			
Entasten	<i>Nicht bilanziert</i>			
Zersägen				
Motorsäge	PMH	1,8	6	1 200 PMH
Benzin	kg	2,3		
Verrotten lassen				
Hartholz waldfrisch	kg	19 600		
Gasleitung				
Eingeschlossen im Modul Erdgas				
Gas Verbrennung				
Gasheizung 15 kW	Jahre	1		15 Jahre
Boiler 300 l	Jahre	1		15 Jahre
Erdgas	m ³	3 904		
Output				
Nutzenergie	MJ	135 000		

Tabelle 41: Produktionsinventar für Heizwärme aus Heizöl mit Holzverrottung im Wald

Input pro 135 000 MJ Nutzenergie (entspricht einer Heizperiode)	Einheit	Anzahl Einheiten	Gewicht in kg	Lebensdauer
Fällen	<i>Nicht bilanziert</i>			
Entasten	<i>Nicht bilanziert</i>			
Zersägen				
Motorsäge	PMH	1,8	6	1 200 PMH
Benzin	kg	2,3		
Verrotten lassen				
Hartholz waldfrisch	kg	19 600		
Heizöltransport				
Eingeschlossen im Modul Heizöl EL				
Lagerung Heizöl 1 Jahr				
Lagertank 2 000 l Polyethylen	Jahr	3*1	95	20 Jahre
Schutzwanne Stahl unlegiert	Jahr	3*1	95	20 Jahre
Verbrennung Heizöl				
Heizkessel 15 kW	Jahr	1	160	20 Jahre
Boiler 300 l	Jahr	1	80	18 Jahre
Heizöl EL	kg	3 719		
Output				
Nutzenergie	MJ	135 000		

Tabelle 42: Produktionsinventar für Fernwärme aus der Verbrennung von Heu einer wenig intensiven Naturwiese

Input pro ha Wiese	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Düngung					
Frontlader	h	0,5*1,2		820	5 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	0,5*1,3		3 343	10 000 h
Miststreuer (3-4 t)	Fu	0,5*2		1 294	4 000 Fu
Traktor (4WD, 85 PS)	h	0,5*1,2		3 771	10 000 h
Rindermist aus Zweiraumlaufstall	t	0,5*16	Anf. März		
Kastenstreuer (2,5 m)	ha	1		290	900 ha
Traktor (4WD, 70 PS) inkl. Aschetransport	h	1,7		3 343	10 000 h
Diesel	kg	9,4			
Rost- und Zyklonasche	kg	308	Mitte Juni		
Gebäude-Maschinen (Frontlader/Traktor/ Miststreuer/Traktor/Kastenstreuer/Traktor)	m3	32/56/57/61/18/56			50 Jahre
Ernte, 2 Schnitte					
			Mitte Juni/ Ende Aug.		
Kreiselmäher (2,5 m)	ha	2		528	700 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	2		3 771	10 000 h
Kreiselheuer (6m)	ha	4		552	1 600 ha
Kreiselschwader (4,5m)	ha	2		500	1 000 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	4,8		3 343	10 000 h
Quadrantballenpresse (Lohn)	Qb	21		6 167	30 000 Qb
Traktor (4WD, 120 PS, Lohn)	h	2,1		5 241	10 000 h
Gebäude-Maschinen (Kreiselmäher/Traktor/ Kreiselheuer/Kreiselschwader/Traktor/ Ballenpresse/Traktor)	m3	30/61/48/39/56/81/77			50 Jahre
Diesel	kg	45,3			
Bindegarn Polypropylen	kg	4			
Aufladen, Transport zur Verbrennungs- anlage, Abladen, 10 km je Weg					
Frontlader	h	2		820	5 000 h
Pneuwagen (5 t)	h	1		1 457	6 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3		3 343	10 000 h
Gebäude-Maschinen (Frontla- der/Pneuwagen/Traktor)	m3	32/59/56			50 Jahre
Diesel	kg	8,7			

Fortsetzung von Seite 102

Input pro ha Wiese	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Lagerung, Verbrennung					
Gebäude	Jahr	0,002		2 967 m2	50 Jahre
Maschinen	Jahr	0,002		123 000	20 Jahre
Heizöl EL	kg	253			
Elektrizität	kWh	456			
Heu	kg TS	6 500			
Fernwärmenetz					
Fernwärmenetz	TJ	0,081			
Filterasche entsorgen					
Filterasche in Reaktordeponie	kg	48			
Output					
Nutzenergie	MJ	81 700			

Tabelle 43: Produktionsinventar für Heizwärme aus Heizöl und Heu von einer Extensivwiese

Input pro ha	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Ernte: 1 Schnitt					
Kreiselmäher (2,5 m)	ha	1	Anf. Juli	528	700 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	1		3 771	10 000 h
Kreiselheuer (6m)	ha	2		552	1 600 ha
Kreiselschwader (4,5m)	ha	1		500	1 000 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3,4		3 343	10 000 h
Quadrantballenpresse (Lohn)	Qb	10		6 176	30 000 Qb
Bindegarn.Polypropylen	kg	2			
Traktor (4WD, 125 PS, Lohn)	h	1		5 241	10 000 h
Gebäude Maschinen (Kreiselmäher/ Traktor/ Kreiselheuer/Kreiselschwader/Traktor/ Ballen- presse/Traktor)	m3	30/61/48/39/56/81/77			50 Jahre
Diäsel	kg	22,2			
Aufladen, 1 km Transport zum Hof, Abladen					
Frontlader (mittel)	h	1		820	5 000 h
Pneuwagen (5 t)	h	1,3		1 457	6 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	1,3		3.343	10.000 h
Gebäude Maschinen	m3	3,3E+07			50 Jahre
Diäsel	kg/h	3,8			
Hoflagerung 6 Mt					
Gebäude	Jahr	0,5		20 m3	50 Jahre
Lagerung Heizöl 1 Jahr					
Lagertank Polyethylen 2 000-l	Jahr	2*1		95	20 Jahre
Auffangwanne Stahl unlegiert	Jahr	2*1		95	20 Jahre
Verbrennung Heizöl					
Ölheizkessel 15 kW	Jahr	1		160	20 Jahre
Heizöl EL	kg	2 252			
Output					
Nutzenergie	MJ	81.700			
Heu	dt TS	30			
Gutschrift für Heu von Extensivwiese:					
Mittels Systemerweiterung auf Basis Gehalt an APD und NEL durch 0,5 kg Belüftungsheu einer Intensivwiese und 0,47 kg Weizenstroh pro kg Extensivheu (siehe Tabelle 44).					

Tabelle 44: Produktionsinventar für Belüftungsheu und Weizenstroh.

Belüftungsheu von einem Schnitt einer ha Intensivwiese

Input pro ha und Schnitt	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Düngung für 1 Heuschnitt			Ende April		
Vakuumpfass 4 000 l	Fa	6		1 690	12 000 Fa
Traktor (4WD, 70 PS)	h	2,4		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Vakuumpfass/Traktor)	m3	64/56			50 Jahre
Diesel	kg	11			
Rindervollgülle aus Boxenlaufstall 1: 2 verdünnt	m3	30			
Pflanzenschutz Intensivwiese alle zwei Jahre			Mitte Mai		
Rückensprüngerät	<i>Nicht bilanziert</i>				
Asulam	kg	0,04			
Ernte Intensivwiese: 1 Heuschnitt			Anfang Juni		
Kreiselmäher (2,5 m)	ha	1		528	700 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	1		3 771	10 000 h
Kreiselheuer (6m)	ha	2		552	1 600 ha
Kreiselschwader (4,5 m)	ha	1		500	1 000 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	0,8		3 343	10 000 h
Ladewagen (13-20 m3)	Fu	4		2 108	
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3,6		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Kreiselmäher/Traktor/ Kreiselheuer/Kreiselschwader/Traktor/Ladewagen/Traktor)	m3	30/61/48/39/56/56/101			50 Jahre
Diesel	kg	19			
Dosiergerät	h	1,2		2 000	2 000 h
Gebläse 15 PS	h	1,2		400	700 h
Automatischer Verteiler	h	1,2		800	2 000 h
Elektrizität	kWh	6			
Lagerung 9 Monate					
Ventilator	h	54		450	12 000 h
Elektrizität	kWh	408			
Gebäude	Jahr	0,75		30 m3	50 Jahre
Output					
Belüftungsheu	dt TS	30			

Weizenstroh

Input pro ha Weizenanbau	Einheit	Anzahl	Datum	Gewicht	Lebensdauer
		Einheiten		in kg	
Grunddüngung			Anf. Oktober		
Frontlader	h	2,1		820	5 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	2,1		3 343	10 000 h
Miststreuer (3-4 t)	Fu	7		1 294	4 000 Fu
Traktor (4WD, 85 PS)	h	2,1		3 771	10 000 h
Gebäude Maschinen (Frontlader/Traktor/Miststreuer/Traktor)	m3	32/56/57/61			50 Jahre
Diesel	kg	16,8			
Rindermist aus Zweiraumlaufstall	t	20			
Bodenbearbeitung			Anf. Oktober		
Pflug (3-schar)	ha	1		867	450 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	2,9		3 771	10 000 h
Gebäude Maschinen (Pflug/Traktor)	m3	39/61			50 Jahre
Diesel	kg	22,9			
Saatbettbereitung			Mitte Oktober		
Kreiselegge 3 m	ha	1		748	500 ha
Traktor (4WD, 85 PS)	h	1,4		3 771	10 000 h
Gebäude Maschinen (Kreiselegge/Traktor)	m3	25/61			50 Jahre
Diesel	kg	7,3			
Saat			Mitte Oktober		
Sämaschine 3 m	ha	1		507	700 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	1,5		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Sämaschine/Traktor)	m3	25/56			50 Jahre
Diesel	kg	4			
Saatgut 'Terza'	kg	160			
Fenpiclonil (Beret 050 FS)	kg	0,032			
Pflanzenschutz					
Anbaufeldspritze 12 m	ha	2		300	800 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	2,4		3 343	10 000 ha
Gebäude Maschinen (Anbaufeldspritze/Traktor)	m3	18/56			50 Jahre
Diesel	kg	7,7			
Isoproturon (Herbizid 'Ioniz-P')	kg	1,14	Anf. April		
Diflufenican (Herbizid 'Ioniz-P')	kg	0,056	Anf. April		
Ioxynil (Herbizid 'Ioniz-P')	kg	0,284	Anf. April		
MCPP-P (Herbizid 'Ioniz-P')	kg	0,456	Anf. April		
Epoxiconazole (Fungizid 'Opus')	kg	0,125	Anf. Juni		

Fortsetzung von Seite 105

Input pro ha Weizenanbau	Einheit	Anzahl Einheiten	Datum	Gewicht in kg	Lebensdauer
Düngung					
Schleuderstreuer	ha	2		105	1 000 ha
Traktor (4WD, 70 PS)	h	1,8		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Schleuderstreuer/Traktor)	m3	12/56			50 Jahre
Diesel	kg	4,9			
Ammonsalpeter 27,5 %	kg	220	Mitte März		
Ammonsalpeter 27,5 %	kg	110	Mitte April		
Ernte					
Mähdrescher (150kW)	ha	1	Ende Juli	10 280	2 700 ha
Gebäude Maschinen	m3	234			50 Jahre
Diesel	kg	22,4			
Strohernte					
Quadrantballenpresse (Lohn)	Qb	25		6 176	30 000 Qb
Traktor (4WD, 125 PS, Lohn)	h	2,5		5 241	10 000 h
Gebäude Maschinen (Ballenpresse/Traktor)	m3	81/77			50 Jahre
Diesel	kg	23,5			
Bindegarn Polypropylen	kg	5			
Output					
Weizen am Feldrand	dt TS	60			
Stroh gepresst auf dem Feld	dt TS	55			
Strohlagerung					
Aufladen, 1 km Transport zum Hof, abladen					
Frontlader	h	2,4		820	5 000 h
Pneuwagen (5 t hydr.)	h	3		1 457	6 000 h
Traktor (4WD, 70 PS)	h	3		3 343	10 000 h
Gebäude Maschinen (Frontlader/Pneuwagen/Traktor)	m3	32/59/56			50 Jahre
Diesel	kg	8,7			
Hoflagerung, 7 Mt					
Gebäude	Jahr	0,5		50 m3	50 Jahre
Output					
Strohballen	dt TS	55			

Tabelle 45: Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages für den Rapsanbau

Angaben pro ha	Einheit	Anzahl	Preis/Einheit in CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Verkauf Industrierraps (94% TS)	dt	30	35	1050	
Leistung				1050	
Saat Saatgut 'Express'	kg	5	20		100
Pflanzenschutz Herbizid Pradone TS	kg	4	63.5		254
Insektizid Karate	l	0.35	313.3		110
Düngung Grunddüngung Mist	t	20	0		0
Ammonsalpeter 27.5 %	dt	2.55	43.1		110
Versicherung Hagelversicherung 5.3 % des Erntewertes	Fr	1050	0.05		56
Annahme Trocknung 1.6 Fr	dt	32	7.6		243
Reinigung	dt	32	4.4		140
SBV- und Propagandabeiträge 1.2 CHF/dt	dt	30	1.2		36
Total Direktkosten					1048
Vergleichbarer Deckungsbeitrag				2	
Variable Maschinenkosten					486
Lohnarbeit					480
Zinsanspruch 6 Monate 4 %					40
Total Kosten					2054
Deckungsbeitrag				-1004	
Beiträge Flächenbeitrag				1200	
Ölsaaten				1500	
Deckungsbeitrag mit Beiträgen				1696	
Arbeitskraftstunden	Akh	49			
Deckungsbeitrag inkl. Beiträge / Akh				35	

Tabelle 46: Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages für den Anbau von SM 210

Angaben pro ha	Einheit	Anzahl	Preis/Einheit in CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Verkauf Zwischenfutter, 2 Schnitte a 25 dt	dt	50.0		480	
Leistung				480	
Saat SM.210	kg	30	8.1		243
Düngung Rindervollgülle 1:2 verdünnt	m3	60	0		0
Ammonsalpeter 27.5 %	dt	1.15	43.1		49.6
Total Direktkosten					293
Vergleichbarer Deckungsbeitrag				187	
Variable Maschinenkosten					139.4
Zinsanspruch 6 Monate 4 %					8.6
Total Kosten					441
Deckungsbeitrag				39	
Beiträge				0	
Deckungsbeitrag mit Beiträgen				39	
Arbeitskraftstunden	Akh	6.2			
Deckungsbeitrag inkl. Beiträge pro Akh				6	

Tabelle 47: Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrages der Rotationsbrache

Angaben pro ha	Einheit	Anzahl	Preis/Einheit in CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Verkauf				0	
Leistung				0	
Saat Saatgut Grundversion	kg	18	39		702
Total Direktkosten					702
Vergleichbarer Deckungsbeitrag				-702	
Variable Maschinenkosten					196.7
Zinsanspruch 6 Monate 4 %					18.0
Total Kosten					917
Deckungsbeitrag				-916	
Beiträge Flächenbeitrag (1999)				1200	
Beitrag für Rotationsbrache				2500	
Deckungsbeitrag mit Beiträgen				2783	
Arbeitskraftstunden	Akh	20			
Deckungsbeitrag inkl. Beiträge / Akh				139	

Tabelle 48: Detaillierte Kostenberechnungen für die RME-Produktion

		RME-Produktion ¹⁾ (10 Monate Betrieb der Anlage)			Verarbeitung Raps (Angabe für eine ha-Raps)			
	Einheiten	Menge	Erlös	Kosten	Menge	Preis	Erlös	Kosten
	E	# E	CHF	CHF	# E	CHF/ E	CHF	CHF
Erlös	RME	l	1801000		1113	0.9	947	
	Rapsküchen	kg	3013000		1863	0.4	801	
	Glycerinphase 1	kg	265000	19720	165	0.1	12	
	Transporte			226095				
Ertrag				245815			1760	
Raps	Industrieraps	dt	48530		30	35		1050
Lagermiete	0.5 Jahre			82722				51
Transport (Lkw 28 t)	Raps			63542				39
	RME			72040				45
				135582				84
Chemikalien	Methanol	kg	248000	99200	153.3	0.4		61
	Kalilauge	kg	25400	28700	15.6	1.13		18
	Analysen			4000				2
				131900				82
Ressourcen	Elektrizität	kWh	436280	81148				50
	Wasser	m3	4052	2836				2
	Abwasser			1260				1
				85244				53
Unterhalt und Reparatur Maschinen				5500				3
Variable Kosten				440948				1323
Erlös ohne variable Kosten				195133			438	
Versicherung				4750				3
Verwaltungskosten				40000				25
				44750				28
Abschreibung	Maschinen			278000				172
	Liegenschaften			50400				31
	Gründungskosten			5000				3
				333400				206
Lohnarbeit (inkl. Sozialleistung)		h	3356	130000				80
Zinsen auf	Umlaufvermögen			55000				34
	Anlagevermögen			42550				26
				97550				60
Fixe Kosten				605700				374
Erlös				800833			63.5	
Rohstoff-Verbilligungsbeiträge		dt			30	20	600	
Erlös mit Beiträgen				800833			663.5	

¹⁾ Rinaldi und Herger 1998

Tabelle 49: Detaillierte Kostenberechnungen für das System Holzheizung

Angaben pro Heizperiode	Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten in CHF
Brennholzproduktion. Scheiter 50 cm	Ster	25	88	2204
Kosten Brennholz				2204
Lagerung im Haus / Wald Wellblechabdeckung	kg	160		0
Entsorgungsgebühren Asche Entsorgung	kg	105	0.2	21
Reparatur-Heizungssystem				390
Variable Kosten				2615
Versicherung				32
Wartung Jahresabo				306
Abschreibung Heizungssystem				1246
Zinsen				44
auf Umlaufvermögen				1042
auf Anlagevermögen				1087
Fixe Kosten				2672
Totalkosten				5287
Nutzenergie	MJ	135000		
Totalkosten/MJ				0.039

Tabelle 50: Detaillierte Kostenberechnungen für das System Ölheizung

Betrieb einer Ölheizung (Angaben pro Heizperiode)	Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten in CHF
Brennstoff Oel	l	4480	0.31	1377
Transport				0
Reparatur Heizkessel/Warmwasserwärmer				296
Variable Kosten Heizsystem				1673
Versicherung				24
Wartungskosten				306
Abschreibung				1020
Zinsen auf Umlaufvermögen				28
Zinsen auf Anlagevermögen				818
				845
Fixkosten Heizsystem				2196
Totalkosten Heizsystem				3870
Wärmeenergie	MJ	135000		
Heizkosten/MJ				0.029
Holz verrotten lassen (Angaben pro Heizperiode)				
	Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten In CHF
Holz zersägen	kg	19600		139
Totalkosten Holzbearbeitung				139

Tabelle 51: Detaillierte Kostenberechnungen für das System Gasheizung

Betrieb der Gasheizung (Angaben pro Heizperiode)		Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten in CHF
Brennstoff	GAS	kWh	37200	0.05	1860
	Pauschale	Anzahl	1.0	60.0	60
					1920
Lagerung					0
Transport					0
Reparatur Heizkessel / Speicher					199
Variable Kosten Heizsystem					2119
Versicherung					12
Wartung					200
Abschreibung					752
Zinsen	auf Umlaufvermögen				38
	auf Anlagevermögen				449
					487
Fixe Kosten Heizsystem					1452
Totalkosten Heizsystem					3570
Nutzbare Wärmeenergie		MJ	135000		
Heizkosten/MJ					0.026
Holz verrotten lassen (Angaben pro Heizperiode)		Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten in CHF
Holz zersägen zum verrotten lassen		kg	19600		139
Totalkosten Holzbearbeitung					139

Tabelle 52: Detaillierte Kostenberechnung des Deckungsbeitrags der wenig intensiven Naturwiese

Angaben pro ha	Einheit	Anzahl	Preis/Einheit CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Verkauf Heu aus 2 Schnitten	dt	81.3		1545	
Total Ertrag				1545	
Saat	kg	0			0
Düngung Rindermist alle 2 Jahre 16 t	t	8	1.5		12
Rost- und Zyklonasche	kg	308			0
					12
Versicherung					0
Total Direktkosten					12
Vergleichbarer Deckungsbeitrag				1533	
Variable Maschinenkosten					236
Lohnarbeit					336
					572
Zinsanspruch 6 Monate 4 %					11.7
Total Kosten					595
Deckungsbeitrag				950	
Beiträge Flächenbeitrag				1200	
Wenig intensiv genutzte Wiesen				650	
Deckungsbeitrag mit Beiträgen				2800	
Arbeitskraftstunden	Akh	38			
Deckungsbeitrag inkl. Beiträge / Akh				73.5	

Tabelle 53: Detaillierte Kostenberechnungen des Deckungsbeitrags der Extensivwiese

Angaben pro ha	Einheit	Anzahl	Preis/Einheit CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Verkauf	1 Schnitt Heu	dt	30.0	733	
Total Ertrag			0.3073	733	
Saat		kg	0		0
Material	Bindegarn Polypropylen	kg	1.5	3.5	0
Lagerung	0,5 Jahr auf dem Hof	m ³	20		0
Versicherung					0
Total Direktkosten					0
Vergleichbarer Deckungsbeitrag				733	
Variable Maschinenkosten					80
Lohnarbeit					160
					240
Zinsanspruch	6 Monate 4 %				4.8
Total Kosten					245
Deckungsbeitrag				488	
Beiträge	Flächenbeitrag			1200	
	Extensivwiese			1500	
Deckungsbeitrag mit Beiträgen				3188	
Arbeitskraftstunden		Akh.		30.7	
Deckungsbeitrag inkl. Beiträge / Akh				103.8	

Tabelle 54: Detaillierte Kostenberechnung für die Produktion von Fernwärme aus Gras

Angaben pro ha Grasanbau und Jahr		Einheiten	Menge	Preis CHF	Erlös in CHF	Kosten in CHF
Brennstoff	Heu aus 2 Schnitten	dt	81,25			1545
Lägermiete						0,0
Transport						0,0
Ressourcen	Filterasche in Reaktordeponie	kg	48,0	1,50		72,0
	Elektrizität	kWh	684	0,196		134
	Heizöl EL	J	456	0,307		140
						346
Unterhalt und Reparatur Grasverbrennungsanlage						269
Variable Kosten						2160,8
Versicherung						22,3
Abschreibung	Maschinen					497
Lohnarbeit (inkl. Sozialleistung)		Personen	2			250
Zinsen	auf Umlaufvermögen					43
	auf Anlagevermögen					711
						755
Fixe Kosten						1524,3
Totalkosten						3685,1
Beiträge	Rohstoff-Verbilligungsbeiträge	kWh	22705	0,04	908	
Nettokosten						2777

Tabella 55: Detaillierte Kostenberechnung des Systems Extensivweide/Ölheizung

Betrieb der Ölheizung (Angaben für Produktion 81737 MJ Wärme)	Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten in CHF
Brennstoff Öl		2713	0.3073	834
Transport				0
Reparatur Heizkessel/Warmwasserwärmer				184
Variable Kosten Heizsystem				1017
Versicherung				15
Wartungskosten				190
Abschreibung				633
Zinsen auf Umlaufvermögen				17
Zinsen auf Anlagevermögen				462
				479
Fixkosten Heizsystem				1316
Totalkosten Heizsystem				2334
Wärmeenergie	MJ	81737		
Heizkosten/MJ				0.029

Heu von einer Extensivweide (Angaben für ein Jahr)	Einheiten	Menge	Preis CHF	Kosten/Erträge in CHF
Kosten Pflege und Ernte Extensivweide	ha	1		245
Arbeit Bauer	ha	30.7	23	706
Kosten Extensivweide				951
Beitrag vom Staat Flächen- und Ökobeitrag	ha	1		2700
Erlös Verkauf Heu	dt	30		733
				3433
Erlös aus der Bewirtschaftung der Extensivweide				2481

Frühere Nummern der FAT-Schriftenreihe

Jahr	Nr.	Verfasser	Titel
1988	31	Jakob P. et al.	Die Benützung des Liegebereiches im Boxenlaufstall durch Milchkühe.
1988	32	Gloor P.	Die Beurteilung der Brustgurtanbindehaltung für leere und tragende Sauen auf ihre Tiergerechtigkeit unter Verwendung der "Methode Ekesbo" sowie ethologischer Parameter.
1990	33	Mühlebach J. und Näf E.	Die Wettbewerbsfähigkeit des biologischen Landbaus.
1991	34	Götz M. et al.	Mastschweine auf Teilspaltenboden.
1992	35	Minonzio, G. et al.	Der Tretmiststall.
1992	36	Rossier R.	Schweizer Bäuerinnen - Ihre Arbeit im Betrieb.
1992	37	Oswald Th.	Der Kuhtrainer.
1994	38	Ott A. (Redaktion)	Landwirtschaftliche Forschung zwischen Technik, Ökonomie und Ökologie.
1995	39	Schick M.	Arbeitswirtschaftliche Einordnung zeitgemässer Haltungssysteme für Mastkälber.
1995	40	Götz M.	Sauen in Gruppen während der Geburt und Säugezeit.
1996	41	Meier B.	Vergleich landwirtschaftlicher Buchhaltungsdaten der Schweiz und der EU - Methodische Grundlagen.
1996	42	Rossier R.	Arbeitszeitaufwand im bäuerlichen Haushalt.
1996	43	Malitius O.	Die Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebe im Talgebiet der Schweiz.
1997	44	Zimmermann A. et al.	Ammoniak: Kosten der Emissionsminderung.
1997	45	Weber R. (Redaktion)	Tiergerechte Haltungssysteme für landwirtschaftliche Nutztiere.
1997	46	Gaillard G. et al.	Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau.
1998	47	Kaufmann R. (Red.)	Elektronik in der Landtechnik.
1998	48	Van Caenegem L. et al.	Erdwärmetauscher für Mastschweine.
1998	49	Deiningner E.	Beeinflussung der aggressiven Auseinandersetzungen beim Gruppieren von abgesetzten Sauen.
1999	50	Mayer C.	Stallklimatische, ethologische und klinische Untersuchungen zur Tiergerechtigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme in der Schweinemast.
2000	51	Van Caenegem L. und Wechsler B.	Stallklimawerte und ihre Berechnung.



**Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt
für Agrarwirtschaft und Landtechnik**

**Comptes-rendus de la Station fédérale de recherches
en économie et technologie agricoles**

CH-8356 Tänikon TG

Die Schweiz hat sich an den Klimakonferenzen zu erheblichen Reduktionen der treibhausrelevanten Schadgase verpflichtet. Die Sicherung einer genügenden Energieversorgung in Zukunft wird national ebenfalls als vorrangig betrachtet. Deshalb wurden drei der viel versprechendsten Energiealternativen aus der schweizerischen Land- und Forstwirtschaft hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen untersucht. Ihre Wirtschaftlichkeit sowie die politischen und gesetzlichen Voraussetzungen waren ebenfalls Gegenstand der Abklärungen. Die Studie zeigt, dass die untersuchten Bioenergieträger hinsichtlich des Treibhauspotenzials und der Schonung der fossilen Energieressourcen den konventionellen Energieträgern eindeutig vorzuziehen sind. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt in starkem Masse vom Verbraucherpreis für Erdöl und Erdgas ab. Mit den im Jahre 2000 stark angestiegenen Erdölpreisen wurde die Konkurrenzfähigkeit teilweise bereits erreicht. Damit aber Private und Industrie in die umweltfreundlichen Technologien investieren, muss der Transparenz und Konsistenz in der nationalen und kantonalen Politik unbedingt mehr Beachtung geschenkt werden. Die Erleichterungen und Unterstützungen dürfen nicht nur Pilot- und Demonstrationsanlagen vorbehalten bleiben.