

Energieproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse am Oberrhein – Auswirkungen für Landwirtschaft und Umwelt

Endbericht zum Projekt

Überprüfung der Möglichkeiten einer landwirtschaftlichen Erzeugung von Bioenergie-
trägern als Alternative zu intensiven Ackerbaukulturen mit dem Ziel der Nitrat-
sanierung des Grundwassers *

T. Hölscher, S. Deimling, R. Freiermuth Knuchel, G. Gaillard, T. Kägi & K. Müller-Sämann

Juli 2007



**ANNA - Agentur für Nachhaltige Nutzung
von Agrarlandschaften**



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-
departement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART



PE INTERNATIONAL
EXPERTS IN SUSTAINABILITY

*Gefördert durch den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz
der badenova AG & Co. KG



Projekt

wurde durchgeführt von:

Projektleitung:



Agentur für Nachhaltige Nutzung von Agrarlandschaften
(ANNA), Müllheim

Thomas Hölscher und Dr. Karl Müller-Sämam

Klosterrunsstraße 17

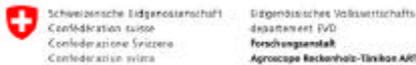
79379 Müllheim (Baden)

Telefon: 07631/174460

email: th@anna-consult.de

URL: www.anna-consult.de

Projektpartner:



Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Ruth Freiermuth Knuchel, Thomas Kägi, Dr. Gérard Gaillard

Reckenholzstrasse 191, CH – 8046 Zürich

Telefon: +41 443777223

email: ruth.freiermuth@art.admin.ch

URL: www.art.admin.ch



PE INTERNATIONAL GmbH

Dr. Sabine Deimling

Hauptstrasse 111-113, D – 70771 Leinfelden-Echterdingen

Telefon: 0711 / 34181731

email: s.deimling@pe-international.com

URL: www.pe-international.com

Inhaltsverzeichnis:**Zusammenfassung**

1	<i>Einleitung und Zielsetzung</i>	1
2	<i>Material und Methoden</i>	3
2.1	Naturraum und Situation der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet	3
2.2	Modellstandort	4
2.3	Situation der Landwirtschaft.....	5
2.4	Wahl der Bioenergiekulturen	6
2.4.1	Auswahlkriterien der Bioenergiekulturen	6
2.4.2	Untersuchte Kulturen und Anbausysteme	7
2.5	Beschreibung der Ökobilanz	10
2.5.1	Systemgrenzen.....	10
2.5.2	Sachbilanz des landwirtschaftlichen Anbaus.....	10
2.5.3	Sachbilanz der Energieerzeugung aus Biomasse über verschiedene Verwertungspfade.....	11
2.5.4	Wirkungsabschätzung.....	12
2.5.5	Auswertungskonzept des Teilsystems „Landwirtschaft“	12
2.5.6	Auswertungskonzept für das Teilsystem „Energiegewinnung aus Biomasse“	13
2.6	Wirtschaftliche Betrachtung.....	13
2.7	Standortpotenzial	15
3	<i>Umweltwirkungen der Bioenergiekulturen</i>	16
3.1	Umweltwirkung der Biomasseerzeugung	16
3.1.1	Ressourcenmanagement	17
3.1.2	Nährstoffmanagement	18
3.1.3	Schadstoffmanagement	20
3.2	Energiebilanz und Umweltwirkung der Gewinnung von Energie aus Biomasse.....	22
3.2.1	Energiebilanz je Kilogramm organischer Trockensubstanz	23
3.2.2	Energiebilanz je Hektar	26
3.2.3	Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus einem kg oTS	27
3.2.4	Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Biomasse von einem Hektar	33

4	<i>Wirtschaftliche Betrachtung</i>	36
4.1	Deckungsbeitragsrechnungen.....	36
4.2	Vollkostenrechnung	39
5	<i>Biomassebereitstellung am Oberrhein unter Berücksichtigung des Klimawandels</i>	41
5.1	Standortpotenzial im Untersuchungsgebiet.....	41
5.2	Biomassebereitstellung unter Berücksichtigung des Klimawandels.....	42
6	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	47
7	<i>Schlussfolgerungen</i>	50
8	<i>Literatur</i>	52

Anhang (gesondertes Dokument)

Verzeichnis der Abbildungen:

Abbildung 1: Karte des Untersuchungsgebietes.....	4
Abbildung 2 Verteilung der jährlichen Niederschlagsmengen am Modellstandort.....	4
Abbildung 3: Jahrestemperaturverlauf am Modellstandort1.....	5
Abbildung 4: Untersuchte Bioenergieszenarien* mit Referenzfruchtfolge unter Angabe der gewählten Verwertungswege.	7
Abbildung 5: Systemgrenze der Ökobilanzierung.....	10
Abbildung 6: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse am Energiebedarf auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre. .	17
Abbildung 7: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse am Energiebedarf auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und ein kg oTS. (oTS= organische Trockensubstanz)	18
Abbildung 8: Nitratauswaschung und Anteile der verschiedenen Emissionen am Eutrophierungspotenzial auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre.....	19
Abbildung 9: Nitratauswaschung und Anteile der verschiedenen Emissionen am Eutrophierungspotenzial auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und ein kg oTS.....	20
Abbildung 10: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse an der terrestrischen Ökotoxizität auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre.....	21
Abbildung 11: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse an der terrestrischen Ökotoxizität auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und auf ein kg oTS.	22
Abbildung 12: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	26
Abbildung 13: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein Hektar)	27
Abbildung 14: Treibhauspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	29
Abbildung 15: Versauerungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	29
Abbildung 16: Eutrophierungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	30
Abbildung 17: Ozonbildungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	31
Abbildung 18: Humantoxizitätspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	32
Abbildung 19: Terrestrische Ökotoxizität der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	32

Abbildung 20: Aquatische Ökotoxizität der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	33
Abbildung 21: Treibhauspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar)	34
Abbildung 22: Versauerungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar).....	34
Abbildung 23: Eutrophierungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar).....	35
Abbildung 24: Ozonbildungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar).....	35
Abbildung 25: Deckungsbeiträge in der Referenzfruchtfolge (in €/ha)	36
Abbildung 26: Deckungsbeiträge in der Energiefruchtfolge (in €/ha)	37
Abbildung 27: Jährliche Deckungsbeiträge beim Anbau von Kurzumtriebsweiden (in €/ha) .	37
Abbildung 28: Deckungsbeiträge beim Anbau von Miscanthus (in €/ha)	38
Abbildung 29: Deckungsbeiträge der Energiekulturen im Vergleich zum Referenzsystem (in €/ha).....	39
Abbildung 30: Vollkosten der Biomasseerzeugung in in €ct pro MJ in der Biomasse eingebundene Energie (Hu)	40
Abbildung 31: Huglin-Index für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekaden 1961-1970, 1991-2000 und 2021-2030	43
Abbildung 32: Anzahl der jährlichen Hageltage in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1986-2004 für verschiedene Schwellwerte nach Daten der SV Versicherung.	44

Verzeichnis der Tabellen:

Tabelle 1: Übersicht über die Wirkkategorien und die dazu verwendeten Methoden	12
Tabelle 2: Umweltlasten der Anbauvarianten pro ha bezogen auf die Referenzfruchtfolge. ..	16
Tabelle 3: Vergleich der Energiekulturen pro ha bezogen auf den Silomais	16
Tabelle 4: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS).....	25
Tabelle 5: Umweltlasten bzw. Umweltgutschriften der Anbauvarianten bezogen auf die energetische Verwertung von ein kg organischer Trockensubstanz.....	28
Tabelle 6: Datengrundlagen der Vollkostenrechnung	40
Tabelle 7: Flächenpotenzial zur Bioenergieerzeugung im Untersuchungsgebiet	41
Tabelle 8: Ertrags- und Energieertragspotenzial der untersuchten Kulturen im Untersuchungsgebiet	42

Zusammenfassung

Der Einsatz regenerativer Energien gilt als wesentlicher Beitrag zur Schonung endlicher Ressourcen und zur Entlastung der Atmosphäre von Immissionen klimarelevanter Gase. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlich erzeugter Biomasse. Sie erfordert bei flächenhafter Realisierung die Berücksichtigung wirtschaftlicher, ökologischer und gesellschaftlicher Gesichtspunkte.

Der Anbau von Energiepflanzen war lange Zeit für den Landwirt wirtschaftlich nicht interessant. Mit steigenden Rohölpreisen und/oder sobald sich aus positiven Umweltleistungen der Biomasseerzeugung zusätzliche Einkommensmöglichkeiten erschließen lassen, können die Energiekulturen in bestimmten Bereichen aber eine Alternative zu intensivem Marktfruchtanbau darstellen. Dies kann beispielsweise durch einen finanziell honorierten Beitrag zum Grundwasser- oder Bodenschutz geschehen.

Das Ziel des vorliegenden Projektes bestand darin, beispielhaft für den südbadischen Raum eine fundierte Entscheidungsbasis zur Auswahl ökologisch und ökonomisch vorteilhafter pflanzlicher Energieträger zu erstellen. Ihr Beitrag zur Entlastung der Umwelt - und hier vor allem des Grundwassers und der Atmosphäre - wurde mithilfe eines Ökobilanzansatzes quantifiziert.

Aus der Vielzahl möglicher Bioenergiekulturen wurde unter Berücksichtigung von Dauerkulturen eine Auswahl von aussichtsreichen Energiepflanzen getroffen:

- eine Energiefruchtfolge (mit Triticale und Silomais als wesentliche Fruchtfolgeglieder; nachfolgend FF Energie genannt)
- Dauerwiese
- Miscanthus (Chinaschilf)
- Salix spp. (Kurzumtriebweiden)

Dem Energiepflanzenanbau wurde eine Referenzfruchtfolge (Nahrungsmittelproduktion) gegenübergestellt. Die energetische Weiterverarbeitung der „feucht“ geernteten Biomassen, (Erntegut der Dauerwiese und der Energiefruchtfolge) erfolgt in einer Biogasanlage. Dieser Verwertungsweg beinhaltet einen Silierprozess zur Konservierung der Biomasse. Die nach der Ausgasung der Biomassen vorliegenden Gärrückstände werden als Düngemittel auf Ackerflächen zurückgeführt. Die energetische Umwandlung der Festbrennstoffe Miscanthus und Salix erfolgt in einer Feuerungsanlage. Ein Teil der in der Anlage produzierten Wärme wird im Fall von Salix wegen des zu hohen Wassergehalts zur Vortrocknung genutzt. Die Produktion von Strom und Wärme erfolgt mit Hilfe eines Blockheizkraftwerks. Es wird angenommen, dass der Strom ins Netz eingespeist wird und ein Abnehmer für die Wärme vorhanden ist.

Um die exakten Umweltwirkungen des Energiepflanzenanbaus und der Umwandlung zu Strom und Wärme abzuschätzen, wurden alle Prozessschritte einschließlich ihrer vorgelagerten Ketten und aller Transporte analysiert (z.B. Düngerherstellung, Herstellung von Diesel).

Die wirtschaftliche Bewertung der Energiekulturen und des Referenzsystems wurde anhand einer Deckungsbeitragsrechnung und einer Vollkostenrechnung durchgeführt. Die Deckungsbeitragsrechnung orientiert sich dabei an marktüblichen Erlösen im Jahr 2006, während die

Vollkostenrechnung die Wirtschaftlichkeit aus der Perspektive der Produktion betrachtet und die Produktionskosten je erzeugtem MJ Energie angibt.

Der **Anbau** der Dauerkulturen Miscanthus und Salix hat über alle betrachteten Wirkkategorien eine geringere Umweltlast als die Fruchtfolgen. Dies gilt sowohl für die Betrachtung bezogen auf 1kg organische Trockensubstanz als auch bezogen auf 1 Hektar Fläche. Auch die Dauerwiese besitzt bei allen Wirkkategorien bessere Werte als die Fruchtfolgen, mit Ausnahme des Versauerungspotenzials. Ursache hierfür ist die Verwendung von Gärsubstrat als Dünger, was zu erhöhten Lachgasemissionen führt. Bezüglich der Nitratauswaschung zeigt die Dauerwiese die geringste Umweltbelastung, gefolgt von den Festbrennstoffen Miscanthus und Salix sowie der Referenzfruchtfolge. Die Energiefruchtfolge weist trotz der angebauten Zwischenfrüchte, die als „catch-crops“ fungieren und nach Ernte der Hauptkultur überschüssiges Nitrat aufnehmen, das höchste Nitratauswaschungspotenzial auf. Auch in Bezug auf den Bedarf an nicht erneuerbaren Energieressourcen, beim Treibhaus- und beim Ozonbildungspotenzial belasten die Dauerkulturen die Umwelt weniger als die Fruchtfolgen, da die Dauerkulturen insgesamt einen geringeren Maschineneinsatz und weniger mineralische Dünger benötigen.

Bezogen auf die Fläche (funktionelle Einheit: 1 Hektar) weist die Energiefruchtfolge gegenüber der Referenzfruchtfolge ein höheres Ozonbildungspotenzial auf, da die Energiekulturen einen intensiveren Bewirtschaftungsaufwand erfordern (Bodenbearbeitung, Ernte) und weil mehr Biomasse zu transportieren ist. Zudem ist das Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial bei der Energiefruchtfolge durch den Einsatz von Gärsubstrat erhöht. Dafür ist der Aufwand an mineralischem N-Dünger geringer. Innerhalb der Dauerkulturen hat Salix aufgrund des geringen Düngereinsatzes und der nur alle drei Jahre durchgeführten Erntearbeiten die geringste Umweltlast.

Bei der Betrachtung auf Ebene der Kulturen zeigt sich, dass Silomais als düngungsintensivste Kultur den höchsten Energiebedarf hat, gefolgt von Triticale. Beim Vergleich pro kg organischer Trockensubstanz, der für die weitere Verarbeitung ausschlaggebend ist, verschiebt sich das Verhältnis jedoch wieder zu Gunsten des Silomais, da Triticale niedrigere Erträge bringt. Bei den Dauerkulturen weisen Miscanthus und Salix ähnlich günstige Umweltwirkungen beim Energiebedarf auf, während die Dauerwiese wegen geringerer Erträge einen höheren Energiebedarf pro kg organische Trockensubstanz als die Festbrennstoffe hat, aber energetisch immer noch günstiger ist als Silomais und Triticale.

Aufgrund des geringeren Düngereinsatzes und der permanenten Bodenbedeckung besitzen die Dauerkulturen Salix und Miscanthus das geringste Eutrophierungspotenzial, gefolgt von der Dauerwiese. Diese zeigt, bezogen auf die Fläche, gegenüber den annuellen Energiepflanzen die besseren Umweltwirkungen. Pro kg organische Trockensubstanz hat die Dauerwiese wegen des geringen Ertrages aber ein ähnlich hohes Eutrophierungspotenzial wie Silomais.

Da bei der Dauerwiese und in den Dauerkulturen während der 18 jährigen Wachstumsphase keine Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden, weisen diese eine deutlich geringere Toxizität auf als die Fruchtfolgen, bei denen die Referenzfruchtfolge schlechter abscheidet als die Energiefruchtfolge.

Bei Betrachtung des gesamten Lebensweges der **Energieerzeugung aus Biomasse** tragen grundsätzlich alle untersuchten Kulturen und Konversionsverfahren zur Einsparung von fossiler Energie bei (zwischen ca. 22 und 28,5 MJ / kg oTS). Miscanthus und Dauerwiese weisen das höchste Einsparpotenzial je kg organischer Trockensubstanz auf. Miscanthus mobilisiert auch auf die Fläche bezogen das größte Einsparpotenzial, während das Substitutionspotenzial der Dauerwiese aufgrund des relativ geringen Flächenertrags deutlich niedriger liegt. Das Einsparpotenzial von Salix bleibt gering, da im Vergleich zu Miscanthus weniger Energie gutgeschrieben wird. Ein Teil wird im System für die Vortrocknung von Salix benötigt.

Hinsichtlich des Treibhauspotenzials unterscheidet sich die energetische Verwertung der Biomassen nur geringfügig, wenn sie je kg oTS betrachtet werden. Dies ändert sich bei Betrachtung pro Fläche. Die Fruchtfolge Energie und Miscanthus tragen zwar, aufgrund ihres hohen Flächenertrages, wesentlich mehr zum Treibhauspotenzial bei, zeigen aber gleichzeitig pro Hektar eine wesentlich höhere Produktion an Strom und Wärme als die ertragschwächere Dauerwiese und Salix.

Der Verwertungsweg über Biogasanlagen schneidet je kg Biomasse im Treibhauspotenzial, im Versauerungspotenzial und im Eutrophierungspotenzial etwas günstiger ab als der Verwertungsweg über Feuerungsanlagen. Beim Ozonbildungspotenzial unterscheiden sich die vier Anbausysteme in den beiden Verwertungswegen kaum.

Bezieht man die Umweltlasten auf die Produktion von 1000 MJ Strom (vgl. Abbildungen im Anhang), so macht es hinsichtlich des Treibhauspotenzials kaum einen Unterschied, mit welchen Anbausystemen man diesen Strom produziert und über welchen der beiden Verwertungswege. Pro 1 MJ über die energetische Nutzung von Biomasse produzierten Stroms (und der dabei entstehenden Wärme) werden je nach Anbausystem zwischen 0,2 und 0,3 kg CO₂ eingespart. Beim Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial schneiden die beiden Feuerungsvarianten günstiger ab, da die Dauerkulturen Miscanthus und Salix deutlich weniger Emissionen in der Anbauphase aufweisen als die Fruchtfolge Energie und die Dauerwiese. Berücksichtigt man zusätzlich auch noch den Output an Wärme, so ergibt sich im Gesamtergebnis ein deutlicher Vorteil für Miscanthus. Hinsichtlich des Ozonbildungspotenzials ergeben sich für alle vier Anbausysteme Einsparpotenziale durch die Gutschriften für Strom, Wärme und Düngemittel.

Die Toxizitätspotenziale werden dominiert vom Anbau der Biomasse. Hinsichtlich des Verwertungsweges zeigen sich nur geringfügige Unterschiede beim Humantoxizitätspotenzial.

Die Umweltwirkungen der Transporte der Biomasse zur Anlage und der Transporte der Gärsubstrate und Aschen sind von untergeordneter Bedeutung. Hier könnte eventuell in einem zweiten Schritt geprüft werden, ab welcher Transportentfernung die Umweltwirkungen relevant werden.

Grundsätzlich führt eine Strombereitstellung aus Biomasse im Vergleich zur Bereitstellung aus fossilen Quellen zu einer Umweltentlastung hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs an nicht erneuerbaren Energieträgern und hinsichtlich des Treibhauspotenzials. Die Strombereitstellung aus Biomasse führt aber auch zu einer Mehrbelastung der Umwelt hinsichtlich der Wirkkategorien Eutrophierungspotenzial und Versauerungspotenzial.

Nach Analyse der **Wirtschaftlichkeit** kann davon ausgegangen werden, dass die steigende Nachfrage nach landwirtschaftlichen Bioenergieträgern über die Flächenkonkurrenz auch auf die Erzeuger Erlöse für pflanzliche Nahrungsmittel durchschlägt, so dass auch unter zukünfti-

gen, veränderten Marktbedingungen das Verhältnis ähnlich bleiben wird. Demzufolge wirkt sich eine Verbesserung der zugrunde gelegten, eher konservativen Annahmen für die Einnahmen aus der Biomasseproduktion ebenfalls auf die Erzeugerlöhne der Nahrungsmittelproduktion aus.

Die Deckungsbeitragsrechnung ergibt ohne Berücksichtigung von Flächenzahlungen in der Referenzfruchtfolge nur für Körnermais und in geringerem Umfang bei Braugerste ein positives Ergebnis für den Betrieb. Innerhalb der Energiefruchtfolge fällt auf, dass hier die aus Fruchtfolgegründen vorgesehenen Marktfrüchte (Nahrungsmittel) ein negatives Ergebnis erzielen, während die Energiekulturen Silomais und Triticale einen positiven Deckungsbeitrag aufweisen. Das über alle Jahre gesehen insgesamt positive Gesamtergebnis der Energiefruchtfolge wird allerdings von den durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträgen der Dauerkulturen Miscanthus und Salix deutlich übertroffen, die sich in diesem Punkt für die Landwirtschaft am attraktivsten darstellen. Die Dauerwiese bringt nur 20 % des Deckungsbeitrages der Referenzfruchtfolge und ist damit wirtschaftlich die schlechteste der untersuchten Alternativen.

Beim Vergleich der Vollkosten der pflanzlichen Energieerzeugung (frei Hof, ohne Kosten der Konversion) ergibt sich, dass Miscanthus, ausgedrückt in €/t/MJ Energie, die preiswerteste Biomasse darstellt. Salix und Silomais liegen mit leicht höheren Vollkosten frei Hof auf ähnlichem Niveau, wobei zur Trocknung der feucht geernteten und damit nicht lagerfähigen Salix ein Teil des Energieertrages aufgewendet werden muss. Demzufolge schneidet Salix beim Vergleich der lagerfähigen Biomassen (bei Feuchtbiomassen ist dabei die Silierung berücksichtigt) ungünstiger ab als Silomais und Triticale. Die Dauerwiese ist auch im Vollkostenvergleich die teuerste Art der pflanzlichen Energiebereitstellung.

Durch das Projekt wurden die Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl geeigneter Kulturen und bzw. der Anbausysteme unter verschiedenen Zielsetzungen verbessert. Trotz der vielfältigen Vorteile der Dauerkulturen Miscanthus und Salix sollte die Konsequenz dieser Untersuchung nicht sein, die zur Bioenergieproduktion zur Verfügung stehende Fläche komplett mit diesen Kulturen zu bedecken. Die Ökobilanz erweist sich als ein geeignetes Werkzeug zur Bestimmung der Umweltwirkungen von Produkten und Prozessen. Nicht untersuchte Wirkungskategorien wie z.B. der Einfluss auf die Artenvielfalt und das Landschaftsbild, sollten aber ebenso Berücksichtigung finden wie die Versorgungssicherheit der Anlagen mit Biomasse. Mit dem jetzigen Kenntnisstand wird daher ein Mix verschiedener Energiepflanzen empfohlen, in dem die in diesem Bericht günstig bewerteten Kulturen einen großen Anteil haben sollten.

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Zuge der Bemühungen um eine nachhaltige Wirtschaftsweise gilt der Einsatz von regenerativen Energien zur Schonung endlicher Ressourcen und zur Entlastung der Atmosphäre von Immissionen klimarelevanter Gase als wesentlicher Beitrag. Das große Potenzial der Bioenergieträger und die Notwendigkeit, diese zukünftig zu nutzen, werden von politischer Seite zunehmend erkannt. Auf internationaler Ebene ist die EU-Kommission bemüht, den Anteil erneuerbarer Energien, und darunter insbesondere den der Biomasse, am Gesamtenergieverbrauch zu erhöhen. Auf nationaler Ebene trägt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit von Biomasse zu verbessern.

Die Bundesregierung hat sich in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie das Ziel gesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2010 gegenüber 2000 mindestens auf 4,2 Prozent und am Stromverbrauch mindestens auf 12,5 Prozent zu erhöhen. Bis Mitte des Jahrhunderts sollen erneuerbare Energien rund die Hälfte des Energieverbrauchs decken. Diese Entwicklung muss bei weiter ansteigender Tendenz zukünftig einher gehen mit der Konzeption und Umsetzung umfassender Umwelt- und Nachhaltigkeitsstrategien, zu denen auch eine Überprüfung der ökonomischen Aspekte gehört. Kennzeichen einer nachhaltigen Entwicklung ist, dass sie "den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen" (Agenda 21).

Auch in Südbaden werden in landwirtschaftlichen Betrieben Kulturen für die Nutzung als Energieträger angebaut. Das mögliche Kulturartenspektrum ist sehr breit. Trotzdem konzentriert sich der Anbau, vorwiegend aus ökonomischen Gründen, auf nur wenige Kulturarten. Deshalb erscheint es geboten, für die regionalen Standortverhältnisse sowohl die bereits angebaute als auch „neue“ Kulturen, die zur energetischen Nutzung in Frage kommen, zu identifizieren und ihre Umweltwirkung zu bewerten.

Das Ziel des Projektes besteht darin, für den südbadischen Raum eine fundierte Entscheidungsbasis zur Auswahl ökologisch und ökonomisch vorteilhafter pflanzlicher Energieträger zu erstellen und ihren Beitrag zur Entlastung der Umwelt - insbesondere des Grundwassers und der Atmosphäre - zu quantifizieren. Frühere Untersuchungen (z.B. ARONSSON & BERGSTROM 2001, VOLK et al. 2004, MÜLLER-SÄMANN et al. 2003) haben gezeigt, dass vorwiegend Dauerkulturen wie z.B. Miscanthus oder Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Baumarten einen positiven Einfluss auf bodenökologische Eigenschaften haben. Angesichts der zunehmenden Nitratproblematik in den Wasserschutzgebieten im Oberrheintal soll im Speziellen der Beitrag, den der Anbau von Energiepflanzen zur Grundwassersanierung leisten kann, näher untersucht werden.

Durch die Bewertung des Anbaus und der Verwertung von Energiepflanzen in ökologischer und wirtschaftlicher Hinsicht kann abgeleitet werden, inwieweit landwirtschaftlich erzeugte Bioenergie einen Beitrag zur nachhaltigen Energiegewinnung und gleichzeitig zur Entlastung des Grundwassers von gesundheitsschädlichen Nitrat-Einträgen leisten kann. Für die Bewertung der Umweltwirkung wird die Methodik der Ökobilanz verwendet, welche den gesamten Lebenszyklus eines Produktes betrachtet.

Die Umweltverträglichkeit der Kulturen und Anbauverfahren wird mit SALCA (*Swiss Agricultural Life Cycle Assessment*, NEMECEK ET AL. 2005) untersucht, einer Ökobilanzmethode, welche in der Schweiz speziell für die Landwirtschaft entwickelt wurde. Anschließend wird die Umweltwirkung der Konversion pflanzlicher Energieträger in Strom und Wärme und der Beitrag zum Klimaschutz durch die energetische Verwertung der Biomasse für die Energiegewinnung mittels GaBi 4 (*Ganzheitliche Bilanzierung*, 2003) ermittelt, einem industriellen Ökobilanzansatz.

Parallel dazu erfolgt eine wirtschaftliche Analyse, die auf den erforderlichen Investitionen, der anfallenden Betriebs-, Wartungs- und Betriebsmittelkosten für die verschiedenen Kulturarten je Hektar und je bereitgestellter Energieeinheit basiert. Außerdem werden in einer Vollkostenrechnung die von Anlagenbetreibern für die landwirtschaftlichen Energieträger zu zahlenden Beträge für die einzelnen Biomassen ermittelt.

Durch die Bewertung des Anbaus und der Verwertung von Energiepflanzen in ökologischer und wirtschaftlicher Hinsicht wird abgeleitet, inwieweit landwirtschaftlich erzeugte Bioenergie einen Beitrag zur nachhaltigen Energiegewinnung und gleichzeitig zur Entlastung des Grundwassers von gesundheitsschädlichen Nitrat-Einträgen leistet.

Da dieser Bericht eine komplexe Materie behandelt, die ohne spezielle Fachbegriffe kaum darzustellen ist, ist an Ende dieses Dokumentes ein Glossar eingefügt, in dem diese Begriffe kurz erklärt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Naturraum und Situation der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über die Landkreise des Regierungsbezirks Freiburg, die in der Rheinebene liegen, also vom Ortenaukreis im Norden bis an die Schweizer Grenze im Süden, wobei die Rheinebene im Vordergrund der Untersuchung steht (vgl. Abbildung 1).

In der Rheinebene am nordwestlichen Rand des Untersuchungsgebietes finden sich flache bewaldete Auenlandschaften, ebene Niederterrassen und Hügellandschaften mit meist flachen, teils leicht welligen Geländeformen. Östlich der Rheinebene befindet sich die steile Bruchstufe des Schwarzwalds mit zahlreichen tief eingeschnittenen Tälern. Die hier liegenden landwirtschaftlichen Betriebe bewirtschaften teilweise Flächen in sehr unterschiedlichen Höhenlagen. Daran schließt sich der Kreis Emmendingen an, an dessen Südwestrand sich der Kaiserstuhl mit einem 250-300 m hohen flachwelligen Lößrücken, inselartig aus der Rheinebene erhebt, die sich nach Süden im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald fortsetzt.

In den Südschwarzwald (Kreis Lörrach) haben sich das Obere Kandertal, das Obere - und Kleine Wiesental mit bewaldeten Talflanken und offenen Höhen tief eingeschnitten.

Im Süden bildet der Hochrhein die naturräumliche und geographische Grenze des Untersuchungsgebietes. Auffällig sind die weiten, leicht gewellten Hochflächen, bedingt durch das hohe Gefälle vom Schwarzwald zum Hoch- und Oberrhein.

Bodenverhältnisse Nördliche Rheinebene: Braunerden aus anlehmigem Sand bis sandigem Lehm auf Schotter der Würmeiszeit, mit Lößauflagen und Aueböden aus sandig-schluffigem bis schluffigem Ton, oft kiesig auf Schwemmland.

Bodenverhältnisse Markgräfler Land: Braunerden und Para-Braunerden aus feinsandigem (schluffigem bis tonigem) Lehm bis lehmigem Sand, als Löß(lehm)decke über Jura und Schotter der Würmeiszeit, im Süden (Lörrach) auf Braunem und Weißem Jura.

Ertragsmesszahlen: Die durchschnittlichen Ertragsmesszahlen der Landkreise liegen zwischen 50 (Emmendingen) und 33 (Waldshut). Das Landwirtschaftsamt Lörrach gibt für seinen Kreis eine durchschnittliche Ertragsmesszahl von 46, die Landwirtschaftsämter Freiburg und Offenburg von 42 an. Die Einzelwerte schwanken im Untersuchungsgebiet zwischen 11 (Freiburg) und 77 (Emmendingen).

Klima: Die durchschnittliche Jahrestemperatur schwankt im Gesamtgebiet zwischen 3,7 und 11,5 °C, die durchschnittlichen Jahresniederschläge liegen zwischen 480 mm in der Rheinebene und bis zu 1,980 mm am Westabhang des Schwarzwaldes.

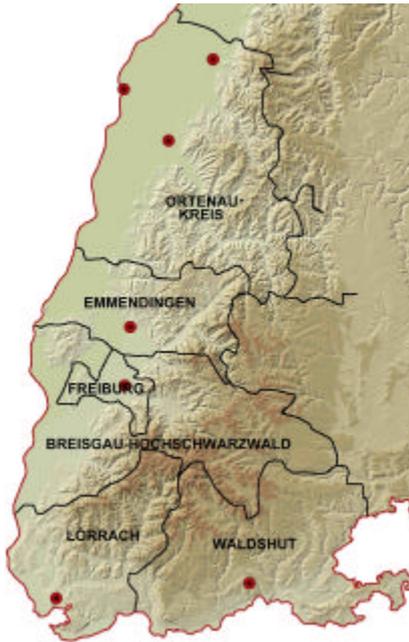
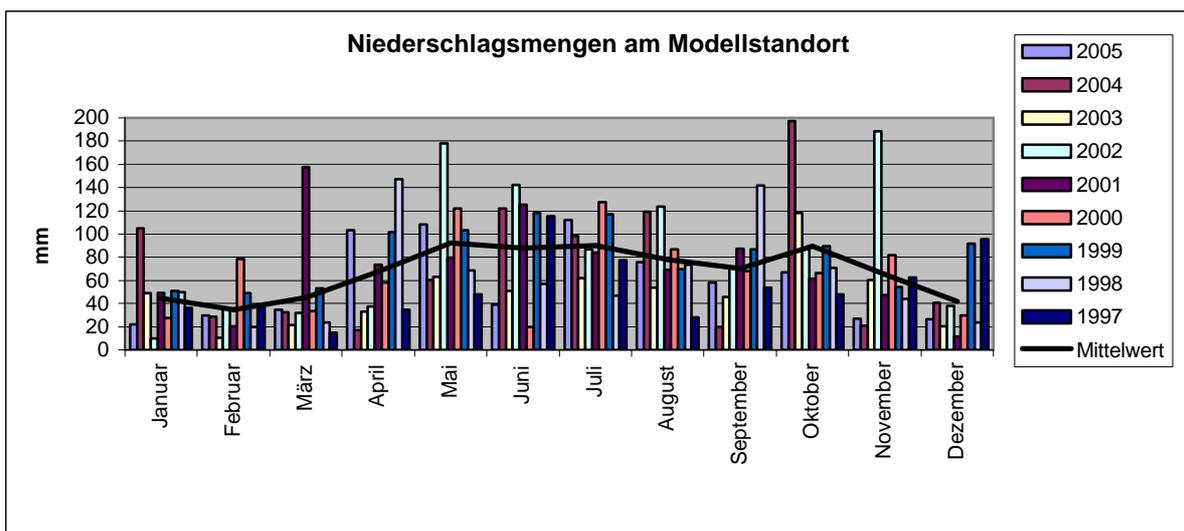


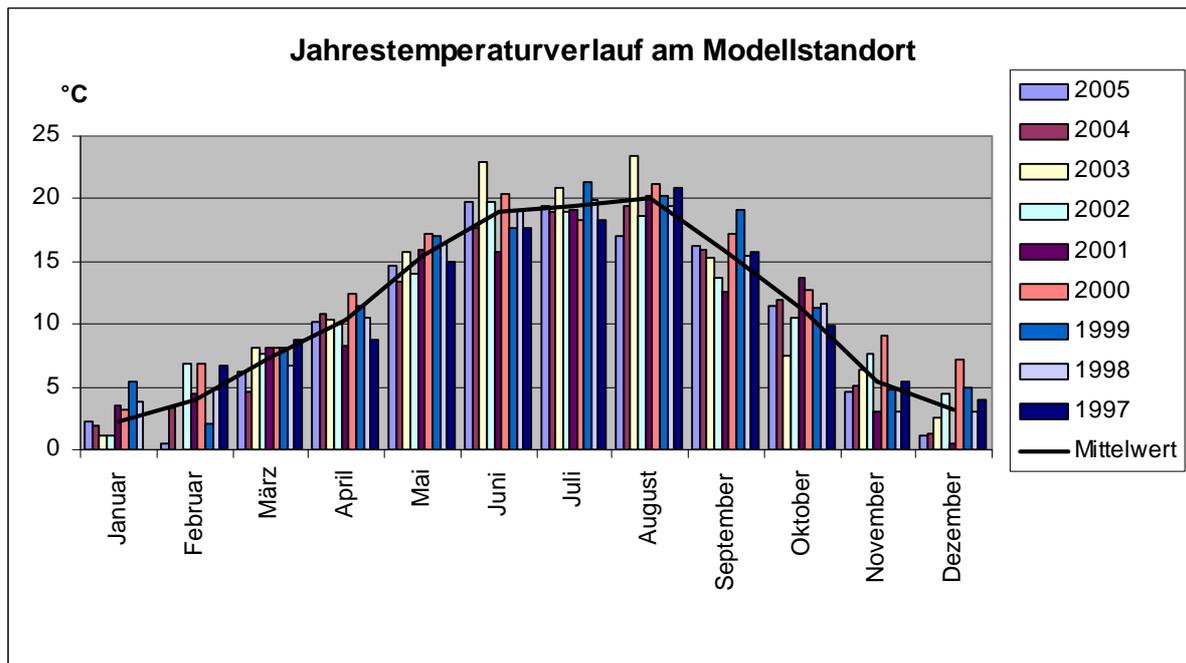
Abbildung 1: Karte des Untersuchungsgebietes

2.2 Modellstandort

Als repräsentativer Modellstandort für die untersuchten Bioenergieszenarien dient eine beispielhafte Fläche in der Rheinebene zwischen Hausen und Bad Krozingen. Der Boden ist ein sandiger Lehm mit einer nutzbaren Feldkapazität von 140 mm, einem mittleren Jahresniederschlag von 800 mm und einer Durchschnittstemperatur von 11°C (mehrjähriges Mittel der Wetteraufzeichnungen am Wasserwerk Hausen). Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Details zum Verlauf der Temperaturen und der Niederschläge.

Abbildung 2 Verteilung der jährlichen Niederschlagsmengen am Modellstandort¹

¹ Quelle: Aufzeichnungen der badenova AG im Wasserschutzgebiet Hausen

Abbildung 3: Jahrestemperaturverlauf am Modellstandort¹

2.3 Situation der Landwirtschaft

Im Untersuchungsgebiet bewirtschaften rund 14.000 Betriebe (davon etwa 4300 Vollerwerbsbetriebe) ca. 83.000 ha Ackerland und 97.000 ha Grünland. Baden-Württemberg und insbesondere die Region Südlicher Oberrhein werden häufig als Wirtschaftsstandorte, etwa entlang der Rheinschiene, wahrgenommen. Dennoch sind 70 % des Landes, und sogar mehr als Dreiviertel der Projektregion dem ländlichen Raum zuzuordnen (ARNDT 2005). Baden-Württemberg war 2003 im Bundesvergleich das Land mit der zweithöchsten Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben. Trotz oder gerade wegen dieser relativ hohen Zahl unterliegt der Südwesten einem starken agrarstrukturellen Wandel. Die Ergebnisse der Agrarstrukturerhebung 2003 belegen, dass immer mehr Betriebe ihre landwirtschaftliche Produktion aufgeben. Um dem Strukturwandel standzuhalten, versuchen viele Betriebe, ihre wirtschaftliche Situation durch Ausweitung ihrer Kapazitäten und/oder durch Diversifizierung ihres Angebots zu verbessern.

Im Jahr 2005 traten die Beschlüsse zur EU-Agrarreform in Kraft, die in weiten Teilen eine deutliche Neuausrichtung der Agrarpolitik und der begleitenden Fördermaßnahmen mit sich bringt. Viele Landwirte werden sich nach der Entkoppelung der Zahlungsansprüche von bestimmten Kulturen neu orientieren müssen, um die sich bietenden Marktchancen nutzen zu können.

Wie die vergangenen Jahre zeigten, beteiligen sich landwirtschaftliche Betriebe durch die Investition in Anlagen zur Biogas-Erzeugung oder durch den Anbau von Energiepflanzen am sich entwickelnden Markt für erneuerbare Energien. Dies wird umso schneller und umfangreicher geschehen, je verlässlicher und attraktiver sich die Einkommensperspektiven in diesem Sektor gegenüber den konventionellen Betriebszweigen entwickeln.

Die Landwirtschaft hat die Chance, sich als wichtiger und aktiver Partner bei der Erzeugung erneuerbarer Energien zu betätigen und sollte diese Chance ergreifen, um ihre Produktions-

und Einkommensstruktur zu diversifizieren. Auch die sich bietenden Chancen, das Kulturartenspektrum zu erweitern und die Nachhaltigkeit der Landnutzung, zum Beispiel im Hinblick auf den Grundwasserschutz zu optimieren, sollten genutzt werden.

2.4 Wahl der Bioenergiekulturen

Aus der Vielzahl möglicher Bioenergiekulturen wurde unter Berücksichtigung von Dauerkulturen eine Auswahl von fünf aussichtsreichen, Bioenergiepflanzen getroffen. In den nachfolgenden Kapiteln finden sich eine Beschreibung der Auswahlkriterien, der Kulturen und der untersuchten Anbausysteme (Dauerkulturen, Fruchtfolgen).

2.4.1 Auswahlkriterien der Bioenergiekulturen

Die Kulturartenwahl erfolgte unter Berücksichtigung der regional stark differenzierten Standortbedingungen, die sowohl hinsichtlich der naturräumlichen Ausstattung (Klima und Böden), als auch hinsichtlich der Bodennutzung im Projektgebiet vorliegen. Ausgehend von den regionalen Bedingungen und Möglichkeiten sowie mittels des nachfolgend aufgelisteten Kriterienkataloges wurden die Kulturen ausgewählt.

- Technische Eignung zur Energiegewinnung (Biomassepotenzial, Wassergehalt, Mechanisierbarkeit, Inhaltsstoffe, etc.) einschließlich notwendiger Zwischenschritte (wie Silierung, Entwässerung, Trocknung...)
- Regionale Anbaueignung (Wasser-, Temperatur-, Bodenansprüche)
- Erwartete Eignung der Pflanzen hinsichtlich der Nitratsanierung des Grundwassers
- Kurz- bis mittelfristigen Umsetzbarkeit (Anbauverhältnisse, Mechanisierungsstand, Nachfolgetechnik). Rein akademische Fragestellungen sollten nicht verfolgt werden. Infrastruktur und Know-how sollte bei den Landwirten (bzw. Maschinenringen) in der Region weitestgehend vorhanden sein
- Die Auswahl sollte maximal zwei nicht standortübliche Kulturen enthalten, zu denen noch wenige Daten verfügbar sind.
- Kompatibilität mit politischen Rahmenbedingungen (EU-Recht, Cross Compliance, etc.)
- Aus ökobilanzieller Sicht potenziell günstige Einschätzung hinsichtlich zu erwartender Ergebnisse je Biomasseeinheit bzw. je Energieeinheit nach Konversion
- Bandbreite an Pflanzengruppen: Es sollten maximal zwei Dauerkulturen behandelt werden. Grünland sollte aufgrund der Bedeutung für den Grundwasserschutz ebenso berücksichtigt werden wie eine Fruchtfolge mit annualen Kulturen.
- Lagerungsfähigkeit und -möglichkeiten der Biomasse und Logistik zur Gewährleistung eines ganzjährigen Betriebes der Konversionsanlagen
- Hohe Wahrscheinlichkeit von brauchbaren, belastbaren Ergebnissen

2.4.2 Untersuchte Kulturen und Anbausysteme

Unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien wurden die folgenden vier Bioenergie-Anbausysteme ausgewählt, die für einen Anbau in der Oberrheinebene und/oder der angrenzenden Vorbergzone geeignet sind:

- Energiefruchtfolge (mit Triticale und Silomais als wesentliche Fruchtfolgeglieder)
- Miscanthus (Chinaschilf)
- Salix spp. (Kurzumtriebweiden)
- Dauerwiese.

Für die Bioenergieszenarien wurden folgende Verwertungswege der verschiedenen Biomassen (siehe Abbildung 4) festgelegt: Dauerwiese, Triticale, Silomais und die Spontanbegrünung nach Winterraps werden für die Biogasgewinnung genutzt. Die in der Energiepflanzenfruchtfolge aus ackerbaulichen Gründen vorgesehenen Zwischenfrüchte werden teilweise ebenfalls zur Energieerzeugung genutzt. Da die Ernte der Untersaaten nach Mais aufgrund des geringen Biomasseaufwuchses nicht rentabel ist, fungieren diese über Winter als „catch-crops“, indem sie verlagerungsgefährdetes Nitrat aufnehmen und im Frühjahr als Gründüngung eingearbeitet werden. In der Feuerungsanlage und der Biogasanlage wird sowohl Strom als auch Wärme erzeugt.

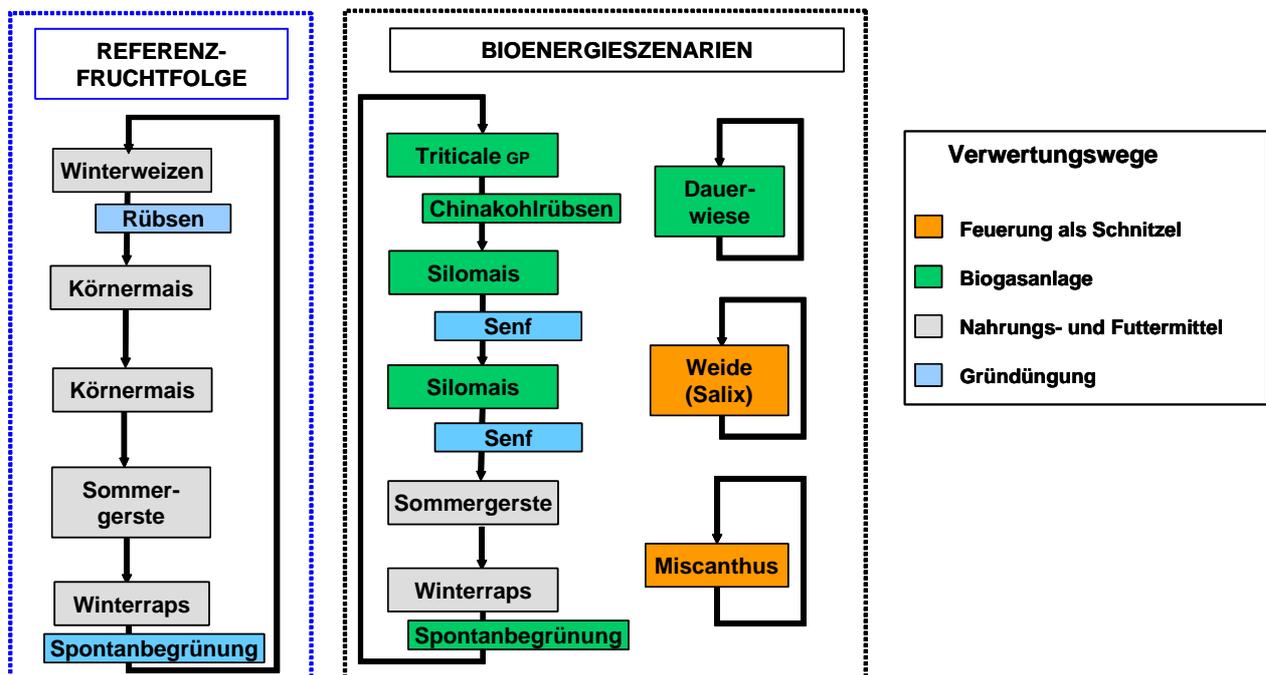


Abbildung 4: Untersuchte Bioenergieszenarien* mit Referenzfruchtfolge unter Angabe der gewählten Verwertungswege.

*Die Abkürzung GP bei Triticale bedeutet, dass hier die ganze Pflanze energetisch verwertet wird.

Um die exakten Auswirkungen eines Energiepflanzenanbaus auf die Umwelt abzuschätzen, sind alle Prozessschritte einschließlich ihrer vorgelagerten Ketten (z.B. Düngerherstellung, Herstellung von Diesel, etc.) zu analysieren. Unter Berücksichtigung der regionalen Standortverhältnisse und der Fruchtfolge werden die pflanzenbaulichen Anbausysteme für die ein-

zelenen Kulturen definiert und die Eingangsdaten für die Ökobilanzen recherchiert. Für die energetische Verwertung der Biomasse werden entsprechende Input- und Outputdaten ermittelt und die Ökobilanzmodelle für die Biogasanlage und die Feuerungsanlage aufgebaut (vgl. Kap. 2.5.3).

Für die Bioenergieszenarien und die Referenzfruchtfolge werden die Produktionsverfahren (Anbausysteme) unter Berücksichtigung der geltenden gesetzlichen Bestimmungen konkretisiert (vgl. Anhang II). Die erforderlichen Basisdaten für die Sachbilanz (Arbeitsgänge, eingesetzte Maschinen und deren Treibstoffbedarf, Dünger und Pflanzenschutz) wurden für eine 20-jährige Laufzeit (Standzeit der am längsten stehenden Dauerkulturen Miscanthus und Salix) recherchiert. Bei den unterstellten Produktionsszenarien werden regionale Struktur- und Ausstattungsmerkmale in der Landwirtschaft berücksichtigt und anhand betriebsplanerischer Daten bewertet (KTBL 2006a, 2006b, eigene Recherchen). Aus pflanzenbaulichen Gründen und, um den „Cross Compliance“ Anforderungen gerecht werden zu können, werden auch im Bioenergieszenario die Kulturen Gerste und Raps in die Fruchtfolge aufgenommen, deren Ertrag als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung findet.

Im Folgenden sind die Ansprüche der untersuchten Kulturen kurz beschrieben:

Triticale

Triticale ist ein weit verbreitetes Getreide, zu dem gesicherte Daten zur Anbautechnik und zu den mittleren Erträgen vorliegen. Triticale ist eine Kreuzung aus Weizen und Roggen und kann auf allen Böden angebaut werden, soweit es sich nicht um staunasse und sehr trockene Lagen handelt. Auf armen Sandböden erreicht er nicht die Ertragsicherheit des Roggens, so dass seine Anbaubedeutung auf den Weizen-Grenzstandorten liegt, wo er diesen ersetzen kann. In der Fruchtfolge zur Gewinnung von Ganzpflanzensilage angebaut, schafft Triticale eine gute Bodenbedeckung über Winter, beschattet und unterdrückt Problemunkräuter und räumt, teigreif geerntet, schon im Juni das Feld, so dass noch eine Zweitkultur möglich wird.

Mais

Für den Maisanbau geeignet sind tendenziell wärmere Anbaulagen. Die besten Erträge erzielt man auf tiefgründigen Böden mit guter Krümelstruktur und ausreichendem Wasser- und Nährstoffspeichervermögen. Dabei muss die Gefährdung durch Frosteinwirkung nach der Saat (Spätfrostgefahr im Mai) beachtet werden. Ungeeignet sind verdichtete, staunasse Böden, die eine rasche Erwärmung im Frühjahr verhindern und die notwendige intensive Durchwurzelung- und Nährstoffversorgung nicht gewährleisten. Zur Beschreibung der Standorteignung für den Maisanbau werden häufig die Durchschnittstemperaturen während der Vegetationszeit, die Temperatursummen oder die Anzahl der Sonnenscheinstunden benutzt. Silomais ist bei einer Durchschnittstemperatur (Mais bis September) von mehr als 13,5° gut möglich und wird auch in kühleren Lagen angebaut, die für Körnermais mit einem etwas höheren Wärmebedarf (15,5°) nicht mehr geeignet sind. Auch für Lagen bis über 500 m Höhe stehen geeignete Sorten unterschiedlicher Reifegruppen zur Verfügung. Höchste Biomasseerträge lassen sich bei ausreichender Wasserversorgung in typischen Maisanbau-

gebieten mit mittelspäten bis späten Hybriden erzielen. Im Vergleich zu Körnermais eigenen sich für die Biogaserzeugung Sorten, die in der Reifezahl etwa um 50 über ortsüblichen Reifezahlen für Körnermais liegen.

Miscanthus

Miscanthus (Chinaschilf, *Miscanthus x giganteus*,) ist ein horstbildendes, ausdauerndes Gras, welches Wasser- und Nährstoffe sehr effizient nutzt. Für hohe Biomasseerträge um 20 t TM /ha und darüber benötigt es ausreichend Wärme (C4-Pflanze) und Niederschläge über 650 – 900 mm/Jahr. Gut für den Anbau geeignet sind Körnermaisstandorte bis in Grenzlagen von 550 m über N.N. Die Pflanze bevorzugt tiefgründige, gut wasserführende Böden. Ungeeignet sind verdichtete, staunasse, spätfrostgefährdete und flachgründige Böden (AZ = 50). 20 Jahre Kulturdauer können aus heutiger Sicht als gesichert gelten.

Salix

Salix (Weiden) sind wärmeliebende, schnellwachsende Baumarten, die dennoch frosttolerant im Winter sowie tolerant gegen temporäre Überflutungen sind (Eignung für die Nutzung von Retentionsgebieten). Kiesige Lehmböden und Böden mit mittleren Tongehalten sind geeignet, auf schweren Tonböden, bei Staunässe und stark wechselfeuchten Böden (Pelosole, Gleye, Pseudogleye) ist der Salixanbau nicht zu empfehlen.

Als Flächen für den Anbau schnellwachsender Umtriebsgehölze bieten sich vor allem Grenzertragsflächen für den Ackerbau an, da hier auch mit hohem Aufwand häufig keine kostendeckenden Erträge zu erwirtschaften sind. Besonders geeignet sind dabei Standorte, wo perennierende Gehölze aufgrund des tieferen Wurzelwerkes Anschluss an das Grundwasser bekommen. Salix im Kurzumtrieb benötigen für eine gute Ertragsbildung mind. 400 mm Niederschlag während der Vegetationszeit (HOFMANN 1998; AGROBRÄNSLE 2005). Die Jahresniederschläge sollten für Ernten = 10 t TM/Jahr bei 600 mm oder darüber liegen (TEXTOR, 2006).

Dauerwiese

Dauergrünlandflächen nehmen aus der Sicht des Grundwasserschutzes und der Grundwasserneubildung eine Sonderstellung ein und gelten als ideale Form der Landnutzung in Wasserschutzgebieten (LUBW 2006)). Für die energetische Nutzung als Grassilage für die Biogaserzeugung kommen mittelintensive Grünlandflächen in der Rheinebene und in der niederschlagreicheren Vorbergzone in Betracht, während Dauerwiesen in den Hochlagen aufgrund der Milchproduktion oder wegen des hohen Ernteaufwandes in Hanglagen nur begrenzt in Frage kommen. Für die Bewertung im Rahmen dieses Projektes wurden deshalb drei bis vier-schnittige Wiesen mit mittleren Erträgen zugrunde gelegt (LAP Forchheim 2005).

Referenzfruchtfolge:

Um die Ergebnisse vergleichend interpretieren zu können, wurde ein Referenzszenario gebildet. Es besteht in einer ortsüblichen Fruchtfolge von Marktfrüchten. Bei der Auswahl der Kulturarten für das Referenzszenario wurden die regionalen Standortfaktoren und die Kulturartenverteilung im Untersuchungsgebiet berücksichtigt. Die Zusammensetzung der Referenzfruchtfolge zeigt Abbildung 4.

In der Ökobilanz wird die Referenzfruchtfolge der Fruchtfolge mit annualen Energiepflanzen und den anderen mehrjährigen Energiekulturen gegenüber gestellt. Der ökobilanzielle Vergleich dieser Kulturen konzentriert sich auf die Landnutzungsfunktion „Gewässerschutz“ und auf die Umweltemissionen der „Energieproduktion“

2.5 Beschreibung der Ökobilanz

2.5.1 Systemgrenzen

Durch die Verwendung des Lebenszyklusansatzes erstreckt sich die Analyse von der Extraktion der Ressourcen, welche für die Erstellung der Infrastruktur (z.B. Gebäude, Maschinen) und der Hilfsstoffe wie Saatgut, Dünger etc. benötigt wird, bis zur Entsorgung der Rückstände aus der energetischen Verwertung. Während das Gärsubstrat aus der Biogasanlage zum Teil wieder als Dünger eingesetzt wird, muss die Asche aus der Feuerung wegen des zu hohen Gehalts an Schwermetallen deponiert werden. In Abbildung 5 sind die angenommenen Systemgrenzen illustriert und schematisch dargestellt.

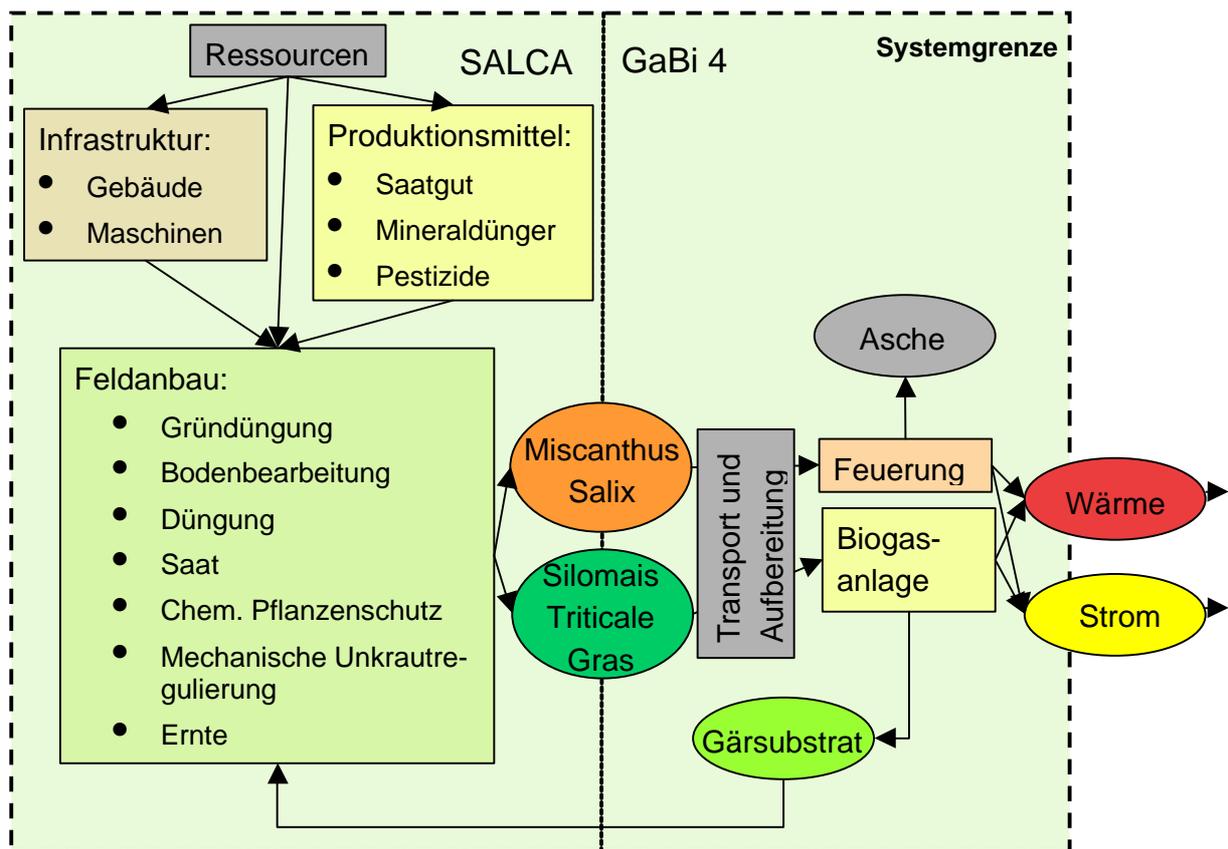


Abbildung 5: Systemgrenze der Ökobilanzierung

2.5.2 Sachbilanz des landwirtschaftlichen Anbaus

Die Berechnung der Sachbilanz des landwirtschaftlichen Anbaus erfolgt mit Hilfe von SALCA (NEMECEK ET AL. 2005). Die verwendeten Ökoinventare stammen aus ecoinvent (FRISCHKNECHT ET AL. 2004). Die Berechnung der direkten Feldemissionen erfolgt mittels landwirt-

schaftsspezifischer Modelle, welche in SALCA enthalten sind. Da in diesem Projekt ein spezieller Fokus auf die Nitratauswaschung gelegt wird, wird diese auf Stufe der Sachbilanz ausgewiesen. Für die Berechnung wurde das Modell SALCA-Nitrat (RICHNER et al. 2006) verwendet, welches eigens für dieses Projekt mit den Daten für die Kulturen Salix und Miscanthus ergänzt wurde.

Für die Bereitstellung der Biomassen wurde eine mittlere Feld-Hof Entfernung von 2 km und eine mittlere Schlaggröße von 2 ha angenommen, sowie mittlere Bodenverhältnisse (sL) und eine ebene Geländeform unterstellt. Die Mechanisierung richtete sich nach den regionalen Verhältnissen, die weitgehend den Annahmen für die Verfahrensgestaltung auf 2 ha-Schlägen der LEL (2005) und des KTBL (2006a) entsprechen.

Die Produktionsinventare der in dieser Studie betrachteten Fruchtfolgen und Dauerkulturen sind tabellarisch im Anhang II dargestellt. Gärsubstrat wird aus systemtechnischen Gründen nur bei den Anbausystemen eingesetzt, bei denen auch in der Biogasanlage Gärsubstrat entsteht.

2.5.3 Sachbilanz der Energieerzeugung aus Biomasse über verschiedene Verwertungspfade

Die Modellierung der energetischen Verwertung der Biomasse beginnt am Hof. Zwei unterschiedliche Verwertungswege werden je nach Wassergehalte der geernteten Biomassen betrachtet.

Zur Bilanzierung der energetischen Weiterverarbeitung der „**feucht**“ geernteten Biomassen, (Erntegut der Dauerwiese und Erntegut der Energiefruchtfolge) wird in der Software GaBi 4 (2003) ein parametrisiertes Modell einer Biogasanlage aufgebaut. Die Feuchtbiomassen Silomais, Triticale-Ganzpflanzen und die Zwischenfrucht Chinakohlrüben aus der Energiefruchtfolge werden in Bezug auf die energetische Verwertung als Biomassemix betrachtet. Das Modell beinhaltet einen Silierprozess zur Konservierung der feucht geernteten Biomasse. Im Anschluss an die Biogasanlage ist ein Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Produktion von Strom und Wärme aus Biogas modelliert. Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW ist einstellbar und wurde im Modell auf 35,7 % festgesetzt, was einem realistischen Wirkungsgrad für diese Art der Bioenergieerzeugung entspricht.

Zur Bilanzierung der energetischen Verwertung der „**trocken**“ geernteten Biomassen Miscanthus (14 % Wassergehalt) und Salix wurde das bereits in der GaBi Software bestehende Kraftwerksmodell auf die Verfeuerung von Biomasse als Ausgangsstoff angepasst. Um die Vergleichbarkeit zur Biogasanlage zu gewährleisten, ist hier die Stromerzeugung über eine Dampfturbine bzw. über einen Dampfmotor modelliert (elektrischer Wirkungsgrad = 33,2 %). Der Energieoutput ist somit auch hier Strom und thermische Energie in MJ pro kg organische Trockensubstanz. Ein Teil der bei der Verbrennung entstehenden Wärme bei Salix wird zur Vor-Trocknung des Erntegutes auf einen Wassergehalt von 20 % verwendet, da diese mit einem Wassergehalt von 48 % an der Anlage angeliefert wird und zunächst vorgetrocknet werden muss.

Beide Anlagen produzieren also Strom und Wärme, wobei sie theoretisch so gefahren werden, dass eine maximale Ausbeute an Strom erzielt wird, welcher ins Netz eingespeist wird. Es wird unterstellt, dass sowohl beim Verwertungsweg über Biogas, als auch über Feuerung, ein Abnehmer für die produzierte Wärme zur Verfügung steht. Die Modelle bilanzieren also

biogen produzierten Strom und die gleichzeitig dabei biogen produzierte Wärme über die Verwertungspfade „Biogas“ und „Feuerung“ aus einem Biomassemix (FF Energie), aus Biomasse von einer Dauerwiese sowie die Biomassen Miscanthus und Salix und stellt diese vergleichend gegenüber.

Die nach der Ausgasung der Biomassen vorliegenden Gärrückstände können als Düngemittel auf Ackerflächen zurückgeführt werden. Dies wurde im Modell als „Düngergutschrift“ berücksichtigt, d.h. es muss auf den Ackerflächen entsprechend weniger Mineraldünger eingesetzt werden. Für die Verbrennungaschen fehlen derzeit verlässliche Bewertungsgrundlagen, weshalb im Modell eine Entsorgung der Aschen auf Deponien unterstellt wurde.

Für die Transportentfernung der Biomasse vom Hof zu den Verwertungsanlagen gelten 10 km als Annahme. Der gleiche Transportweg ergibt sich für den Rücktransport des Gärsubstrates von der Anlage zum Hof. Für den Transport der Asche aus der Verbrennungsanlage zur Deponie wurde ebenfalls eine Entfernung von 10 km unterstellt.

Die Umweltlasten der Infrastruktur für die Konversionsanlagen (Gebäude, Anlagen, LKW etc.) sind separat ausgewiesen.

2.5.4 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung dienen die nachfolgend genannten Methoden (Tabelle 1). Auf eine Normalisierung oder Gewichtung wird verzichtet. Der Verbrauch an regenerierbaren energetischen Ressourcen (CML 2001, GUINÉE et al. 2001) dient ausschließlich der Analyse des Teilsystems „Energiegewinnung aus Biomasse“.

Tabelle 1: Übersicht über die Wirkkategorien und die dazu verwendeten Methoden

Wirkkategorie	Verwendete Abkürzungen	Methode	Quelle:
Bedarf an nicht-erneuerbaren Energieressourcen	EB	ecoinvent-Methodik	Frischknecht et al. 2004
Verbrauch an regenerierbaren Energieressourcen	EBR	CML 01	Guinée et al. 2001
Treibhauspotenzial	THP bzw. GWP	IPCC	IPCC 2001
Ozonbildungspotenzial	OBP bzw. POCP	EDIP 97	Wenzel und Hauschild 1998
Eutrophierungspotenzial	EP	EDIP 97	
Versauerungspotenzial	VP bzw. AP	EDIP 97	
Terrestrische Ökotoxizität	TeÖ	EDIP 97	
Aquatische Ökotoxizität	AqÖ	EDIP 97	
Humantoxizität	HT bzw. HTP	CML 01	Guinée et al. 2001

2.5.5 Auswertungskonzept des Teilsystems „Landwirtschaft“

Auf Ebene der Fruchtfolge werden die untersuchten Systeme bezüglich der potentiellen Nitrat Auswaschung und der oben beschriebenen Wirkkategorien miteinander verglichen und genauer analysiert. Die Auswirkungen werden pro ha Landwirtschaftsfläche über den Zeitraum einer Fruchtfolge (5 Jahre) betrachtet. Damit wird berücksichtigt, dass sich die Kulturen

innerhalb einer Fruchtfolge beeinflussen und ausgleichende Effekte bei den direkten Feldemissionen auftreten können. Auf Ebene der Kultur erfolgen dieselben Vergleiche für die einzelnen Energiekulturen (Triticale, Silomais, Dauerwiese, Miscanthus, Salix). Die Auswirkungen werden pro ha Landwirtschaftsfläche und pro kg organischer Trockensubstanz über den Zeitraum eines Jahres bilanziert.

Für die Analyse des Teilsystems Landwirtschaft können diejenigen Wirkkategorien (vgl. Tabelle 1), welche statistisch untereinander korrelieren, gruppiert werden, wodurch es möglich ist, sich bei der Diskussion auf diese Gruppen zu beziehen (ROSSIER & GAILLARD, 2004; NEMECEK et al. 2005, S. 42ff):

- **Ressourcen-Management:** Bedarf an nicht-erneuerbaren Energieressourcen (EB) gemäss ecoinvent-Methodik (FRISCHKNECHT et al. 2004), Treibhauspotenzial (THP) nach IPCC (2001), Ozonbildungspotenzial (OBP) gemäss EDIP 97 (HAUSCHILD & WENZEL 1998)
- **Nährstoff-Management:** Eutrophierungspotenzial (EP), d.h. Anreicherung von Stickstoff und Phosphor und Versauerungspotenzial (VP) für empfindliche Ökosysteme, beide gemäss EDIP 97 (HAUSCHILD & WENZEL 1998)
- **Schadstoff-Management (v.a. Pestizide und Schwermetalle):** Humantoxizität (HT) nach CML01 (GUINÉE et al. 2001), aquatische und terrestrische Ökotoxizität (AqÖ und TeÖ) gemäss EDIP 97 (HAUSCHILD & WENZEL 1998) und CML01 (GUINÉE et al. 2001)

Für die Auswertung fällt die Beurteilung (günstiger, ungünstiger etc.) für die verschiedenen Umweltwirkungen wegen unterschiedlicher Variabilität und Unsicherheit anders aus (Details siehe in Nemecek et al. 2005, S. 57ff). Die farbliche Einteilung, welche in Tabelle 2 und Tabelle 3 verwendet wird, dient dem besseren visuellen Verständnis der Zusammenstellung.

2.5.6 Auswertungskonzept für das Teilsystem „Energiegewinnung aus Biomasse“

Im Teilsystem „Konversion der Biomasse“ wird der Energieverbrauch bzw. die Einsparung an fossiler Energie und regenerativer Energie durch die Konversion von Biomasse. Die Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Biomasse werden für alle Wirkkategorien separat dargestellt, zum einen bezogen auf Masse (1 kg organische Trockensubstanz), dann auf die Fläche (1 ha * a) und zusätzlich auf einen Stromoutput (pro 1000 MJ) aus den Anlagen. Dabei sind die Energiebilanz und die Umweltlasten des Anbaus der Pflanzen, die in Kap. 3.1 differenziert abgebildet sind, mit in die Gesamtergebnisse integriert.

2.6 Wirtschaftliche Betrachtung

Zur finanziellen Bewertung der Energiekulturen und des Referenzsystems dienen eine Deckungsbeitragsrechnung und eine Vollkostenrechnung. Der Deckungsbeitrag ergibt sich aus der Differenz von Erlös und variablen Kosten der Produktion. Er zielt darauf ab, zu erfahren, welche Teile des Umsatzes aus dem Verkauf einer angebauten Kultur zur Deckung der fixen

Kosten eines Betriebes zur Verfügung stehen. Damit ist der Deckungsbeitrag ein wichtiges Entscheidungskriterium für kurzfristig notwendige Entscheidungsfindungen (z.B. Bestimmung der optimalen einjährigen Kultur oder eines günstigen Anbausystems). Für langfristige Entscheidungen, z.B. über die Anlage einer zwanzigjährigen Dauerkultur, bei der Investitionskosten anfallen und der Betrieb sich auf längere Sicht festlegt, sollte eine Vollkostenrechnung durchgeführt werden. Anschließend ist zu überprüfen, ob diese Kosten mit dem Verkauf der Biomasse zu decken sind.

Die Deckungsbeitragsrechnung orientiert sich dabei an marktspezifischen Erlösen, während die Vollkostenrechnung die Wirtschaftlichkeit aus der Perspektive der Produktion betrachtet (HILDEBRANDT 2006). Da der Markt für landwirtschaftliche Produkte derzeit stark in Bewegung ist, wurden für die Bioenergieträger die Produktionskosten je erzeugtem MJ berechnet. Der Preis des Energieträgers ist Teil der Energiegestehungskosten, die darüber hinaus auch die Kosten der Konversion (Anlagenbetrieb, Investitionen) beinhalten. Diese sind stark vom Einzelfall (Anlage) abhängig und sind hier nicht Gegenstand der Untersuchung.

Flächenprämien wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in Zukunft für Betriebe individuell berechnet werden. In Deutschland begann 2005 eine Entkopplung der Direktzahlungen an die Produktion. Für einen Übergangszeitraum (bis 2013) findet ein Kombimodell aus regional einheitlicher Flächenprämie und einer individuellen Betriebsprämie Anwendung, die aus dem (produktionsbezogenen) Prämienvolumen der vorangegangenen Jahre berechnet wird. Die individuellen Zahlungsansprüche werden auf die Fläche (ohne Stilllegung) umgelegt und als Zusatzprämie der einheitlichen Flächenprämie aufgeschlagen. Da dieser betriebsindividuelle Posten beim Vergleich einzelner Kulturen im Modellbetrieb neutral wirkt, bleibt er unberücksichtigt, während die Energiepflanzenprämie von 45 €/ha bei den Energiekulturen zu berücksichtigen ist, da sie einen politisch beabsichtigten komparativen Vorteil gegenüber den Marktfrüchten darstellt und erwartungsgemäß auch zukünftig wirksam bleibt. Die Randbedingungen der Kalkulation sind:

- Anbauverfahren und betriebliche Randbedingungen wurden analog zu den Annahmen der Ökobilanzierung festgelegt.
- Kosten und Erlöse gemäß LEL (Kalkulationsdaten Marktfrüchte 2005/2006) und KTBL (2006a, 2006b) sowie nach Berechnungen von DEDERER (2007).
- Bei den Energiekulturen sind 45 € Energiepflanzenprämie berücksichtigt, der Anbau erfolgt auf Basisflächen, keine Stilllegung.
- Deckungsbeiträge der Biomassen sind „frei Betrieb“ kalkuliert, d.h. Ernte und Transport zum Betrieb (2 km) sind berücksichtigt (entspricht der Systemgrenze der Ökobilanz des Anbaus).

Da wie oben erwähnt die Marktpreise derzeit stark in Bewegung sind, werden v.a. für Biomassen, aber auch für Marktfrüchte wie z.B. Körnermais inzwischen deutlich höhere Preise gezahlt als noch vor wenigen Jahren. Die Berechnungsgrundlage bilden die Kalkulationsdaten Marktfrüchte 2005/2006 der LEL sowie Daten von DEDERER (2007). Details zu den Berechnungen sind in Anhang V dargestellt.

2.7 Standortpotenzial

Die regionalen Standortbedingungen sind außerordentlich differenziert. Dies betrifft sowohl die klimatischen Kennwerte als auch die Bodenverhältnisse.

Die Grundlage der Potenzialabschätzung bilden die Acker- und Grünlandflächen im Untersuchungsgebiet (nach StaLa 2005) und die regionaltypischen Erträge. Die Festlegung der für den Biomasseanbau verfügbaren Flächenanteile erfolgte in Anlehnung an ÖKO-INSTITUT (2004). Diese Autoren führten ausführliche, bundesweite Potenzialberechnungen mit dem Modell Hektor 2 durch, in denen der Flächenverbrauch für verschiedene Ziele, der Anteil Ökolandbau sowie der Nahrungs- und Futtermittelbedarf (basierend auf Pro-Kopf-Verbrauch und dem Selbstversorgungsgrad bei pflanzlichen und tierischen Produkten) berücksichtigt wird.

Demzufolge werden von den Gesamtflächen in der Potenzialabschätzung folgende Anteile in Anrechnung gebracht:

- für den Biomasseanbau verfügbarer Flächenanteil Acker: 15,6 %
- für den Biomasseanbau verfügbarer Flächenanteil Grünland: 6,3 %

² Akronym für Hektar-Kalkulator

3 Umweltwirkungen der Bioenergiekulturen

3.1 Umweltwirkung der Biomasseerzeugung

Auf Ebene der Fruchtfolge (5 Jahre Betrachtungsdauer) weisen die beiden Dauerkulturen Miscanthus und Salix in allen Bereichen geringere Umweltlasten auf als die Referenz- oder Energiefruchtfolge (siehe Tabelle 2). Auch die Dauerwiese besitzt bei allen Wirkkategorien bessere Werte mit Ausnahme des Versauerungspotenzials. Im Vergleich zur Referenzfruchtfolge hat auch die Energiefruchtfolge deutlich schlechtere Resultate im Nährstoffmanagement.

Das höchste Nitratauswaschungspotenzial besitzt die Energiefruchtfolge gefolgt von der Referenzfruchtfolge. Deutlich geringere Werte weist die Miscanthus- und Salixproduktion auf. Bei der Dauerwiese ist keine Nitratauswaschung zu erwarten.

Tabelle 2: Umweltlasten der Anbauvarianten pro ha bezogen auf die Referenzfruchtfolge.

Die Wahl der Referenz hat keinen Einfluss auf das Resultat. Dunkelgrün = viel günstiger, hellgrün = günstiger, orange = ungünstiger, rot = viel ungünstiger (Lesebeispiel: der Energiebedarf von Miscanthus entspricht nur 49% des Energiebedarfs der Referenzfruchtfolge und ist somit deutlich günstiger)

Wirkkategorie	Einheit	FF Referenz	FF Energie	Miscanthus	Salix	Dauerwiese
Energiebedarf	MJ-eq/(ha*5a)	1.04E+05	107%	49%	27%	42%
Treibhauspotenzial	kg CO2-eq/(ha*5a)	1.81E+04	95%	36%	19%	32%
Ozonbildungspotenzial	kg Ethylene-eq/(ha*5a)	3.57E+00	125%	53%	36%	52%
Versauerungspotenzial	kg SO2-eq/(ha*5a)	9.28E+01	464%	48%	20%	504%
Eutrophierungspotenzial	kg N-eq/(ha*5a)	3.44E+02	158%	44%	29%	72%
Terrestrische Ökotoxizität	Tox. Punkte/(ha*5a)	1.81E+03	79%	49%	26%	8%
Aquatische Ökotoxizität	Tox. Punkte/(ha*5a)	1.38E+04	96%	9%	7%	13%
Humantoxizität	Tox. Punkte/(ha*5a)	2.88E+02	102%	48%	29%	46%
Dir. Nitratauswaschung	kg N/(ha*5a)	229	122%	41%	26%	0%

Auf Ebene der Kulturen (1 Jahr Betrachtungsdauer) zeigen sich bei Miscanthus und Salix ebenfalls deutlich geringere Umweltlasten als bei den in der Energiefruchtfolge enthaltenen Kulturen Silomais und Triticale (siehe Tabelle 3). Auch die Dauerwiese hat überall niedrigere Werte. Das Nitratauswaschungspotenzial ist bei Triticale am höchsten, gefolgt vom Silomais, während die Dauerkulturen deutlich geringere Werte haben.

Tabelle 3: Vergleich der Energiekulturen pro ha bezogen auf den Silomais

Erläuterung der Farben siehe Tabelle 2

Wirkkategorie	Einheit	Silomais	Triticale	Miscanthus	Salix	Dauerwiese
Energiebedarf	MJ-eq/ha	25842	92%	39%	21%	34%
Treibhauspotenzial	kg CO2-eq/ha	3770	108%	35%	18%	31%
Ozonbildungspotenzial	kg Ethylene-eq/ha	1	101%	38%	26%	37%
Versauerungspotenzial	kg SO2-eq/ha	85	153%	10%	4%	110%
Eutrophierungspotenzial	kg N-eq/ha	112	136%	27%	18%	44%
Terrestrische Ökotoxizität	Tox. Punkte/ha	247	41%	71%	38%	11%
Aquatische Ökotoxizität	Tox. Punkte/ha	1043	280%	25%	19%	33%
Humantoxizität	Tox. Punkte/ha	63	108%	45%	27%	42%
Dir. Nitratauswaschung	kg N/ha	58	129%	33%	20%	0%

Im Folgenden werden die Resultate anhand der drei Gruppen (Ressourcen, Nährstoff- und Schadstoffmanagement) eingehender diskutiert. Dabei wird jeweils eine Wirkkategorie stellvertretend für die Gruppe in einer Abbildung detailliert dargestellt. Im Anhang III können die Abbildungen zu sämtlichen Wirkkategorien eingesehen werden.

3.1.1 Ressourcenmanagement

Im Vergleich zu den Fruchtfolgevarianten hat der Anbau der Dauerkulturen einen deutlich geringeren Bedarf an nicht erneuerbarer Energien, sowie ein niedrigeres Treibhaus- und Ozonbildungspotenzial. Dies liegt unter anderem daran, dass die maschinelle Bewirtschaftung der Dauerkulturen über den ganzen Anbauzeitraum betrachtet weniger aufwändig ist (siehe Abbildung 6), obwohl z.B. die Auflösung von Salix sehr energieintensiv ist. Es werden somit deutlich weniger Ressourcen verbraucht und es fallen weniger Traktoremissionen an, die vor allem für das Ozonbildungspotenzial ausschlaggebend sind. Außerdem benötigen die Dauerkulturen weniger mineralische Dünger. Die Produktion von Mineraldüngern beansprucht beträchtliche Mengen an fossiler Energie (vgl. NEMECEK & ERZINGER 2005) und erzeugt klimawirksame bzw. luftbelastende Emissionen von Kohlendioxid, Ammoniak und Lachgas. Ferner führt der Einsatz von mineralischem Phosphor- und Kalium-Dünger zu einem Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen.

Die Energiefruchtfolge weist ähnliche Werte im Ressourcenmanagement auf wie die Referenzfruchtfolge, mit Ausnahme eines höheren Ozonbildungspotenzials. Dies ist auf den intensiveren Traktoreinsatz bei der Bodenbearbeitung und der Ernte zurückzuführen. Der Anteil von Ernte und Transport an der Umweltlast ist bei der Energiekultur höher, da mehr Biomasse geerntet wird, dafür ist der Anteil von mineralischem N-Dünger wegen der Substituierung durch Gärsubstrat geringer.

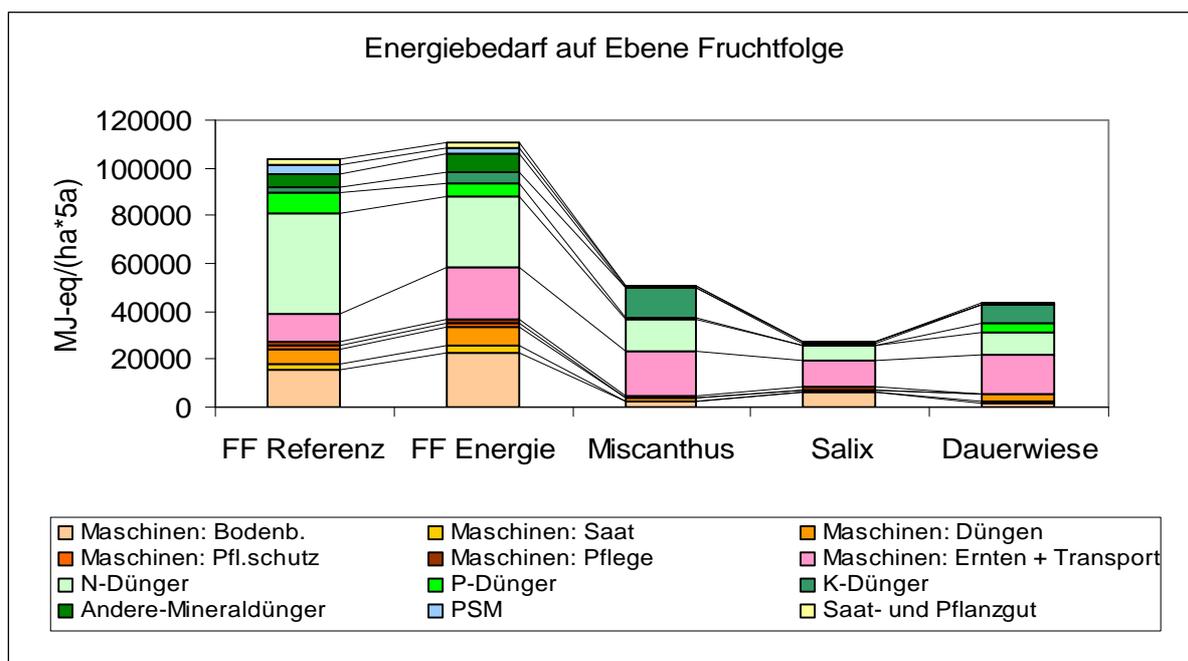


Abbildung 6: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse am Energiebedarf auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre.

Auf Ebene der Kultur zeigt sich dasselbe Bild (siehe Abbildung 7). Der geringere Maschinen- und Mineraleinsatz bei den Dauerkulturen führt zu deutlich besseren Werten im Ressourcenmanagement. Innerhalb der Dauerkulturen hat Salix aufgrund des geringen Düngereinsatzes und den nur alle drei Jahre durchgeführten Erntearbeiten die geringste Umweltlast. Die Dauerwiese profitiert davon, dass dank des Gärsubstrates aus der Biogasanlage in erheblichem Umfang auf Minerale Dünger verzichtet wird. Silomais hat als düngungsintensivste Kultur den höchsten Energiebedarf, gefolgt von Triticale. Beim Vergleich pro kg organischer Trockensubstanz, welcher ausschlaggebend für die weitere Verarbeitung ist, verschiebt sich das Verhältnis wieder zu Gunsten des Silomais, da Triticale weniger hohe Erträge bringt. Bei den Dauerkulturen weisen Miscanthus und Salix ähnlich günstige Umweltwirkungen auf. Dagegen hat die Dauerwiese wegen geringerer Erträge einen höheren Energiebedarf pro kg organischer Trockensubstanz als Miscanthus und Salix, aber einen geringeren Bedarf als Silomais und Triticale.

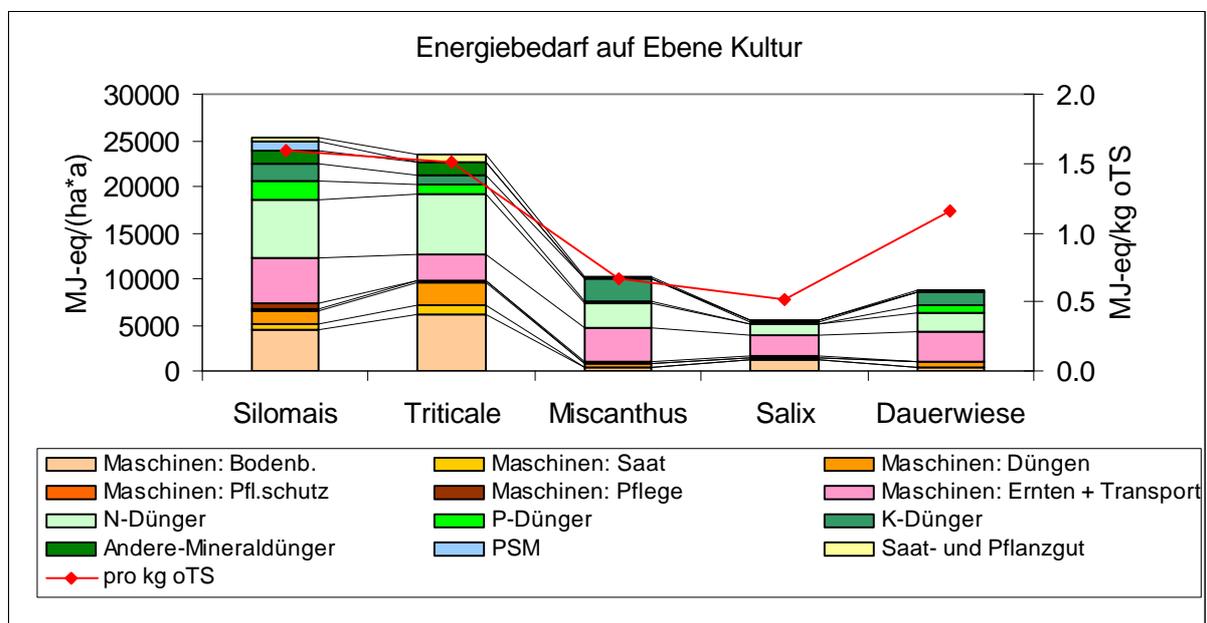


Abbildung 7: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse am Energiebedarf auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und ein kg oTS. (oTS= organische Trockensubstanz)

3.1.2 Nährstoffmanagement

Auf Ebene der Fruchtfolge haben Miscanthus und Salix ein sehr geringes Versauerungspotenzial. Die Dauerwiese weist den höchsten Wert auf, gefolgt von der Energie- und Referenzfruchtfolge. Vor allem der Gärsubstrateinsatz mit den damit verbundenen höheren Ammoniakverlusten wirkt sich negativ auf das Versauerungspotenzial aus, da für die Versauerung das freigesetzte Ammoniak die entscheidende Emission ist.

Auch beim Eutrophierungspotenzial besitzen die Dauerkulturen Salix und Miscanthus die geringste Umweltlast (siehe Abbildung 8). Dies ist auf die vergleichsweise geringe Düngung und eine fortwährende Bodenbedeckung respektive -durchwurzelung zurückzuführen. Die Nitrat auswaschung wird somit reduziert. Das Eutrophierungspotenzial der Dauerwiese liegt tiefer als jenes der Fruchtfolgen, aber höher als jenes der anderen Dauerkulturen. Der Grund

liegt in den aus dem Gärsubstrat indirekt entstehenden Lachgasemissionen (N_2O , WENZEL & HAUSCHILD 1998). Diese sind auch bei der Energiefruchtfolge dafür verantwortlich, dass das Eutrophierungspotenzial deutlich höher ist als bei der Referenzfruchtfolge.

Die weniger intensive Düngung sowie die extensive Bodenbearbeitung und eine ganzjährige Bodendeckung führen dazu, dass die potenzielle Nitratauswaschung der Dauerkulturen geringer ist als bei den Fruchtfolgen. Somit werden frühere Untersuchungen bestätigt, die bei Salix (ARONSSON & BERGSTROM 2001, VOLK et al. 2004) und Miscanthus (BULLARD & METCALFE 2001, STAUFFER & SPIESS 2001, CASOVA et al. 2003, MÜLLER-SÄMANN et al. 2003) geringere Nitratauswaschungen berichten als bei Ackerkulturen auf offenen Flächen.

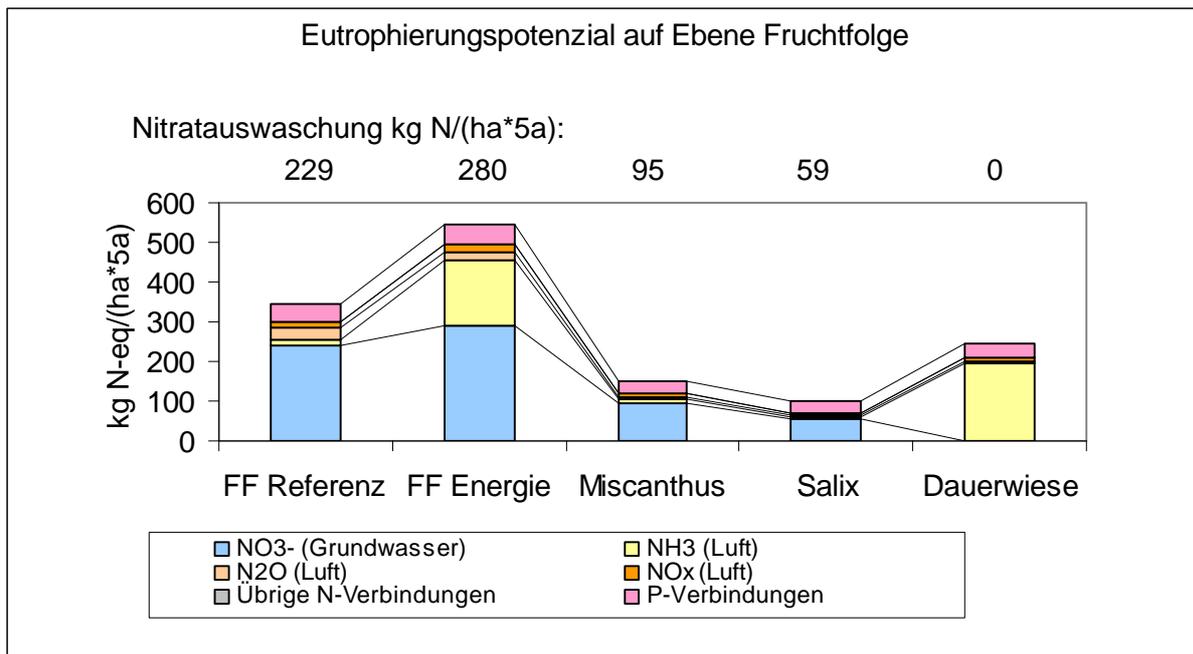


Abbildung 8: Nitratauswaschung und Anteile der verschiedenen Emissionen am Eutrophierungspotenzial auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre.

Auf Ebene der Kultur ist das Versauerungspotenzial von Silomais, Triticale und Dauerwiese aufgrund des Gärsubstrateinsatzes ähnlich groß, während Miscanthus und Salix sehr tiefe Werte aufweisen. Silomais und Triticale haben auch ein ähnliches Eutrophierungspotenzial (siehe Abbildung 9), welches zu großen Teilen durch die Nitratauswaschung infolge intensiver Düngung und langer Zeiträume ohne Bodenbedeckung zu erklären sind. Die Dauerwiese verursacht zwar keine Nitratauswaschung, die anfallenden Ammoniakemissionen ergeben jedoch ein Eutrophierungspotenzial zwischen dem der annuellen Kulturen und dem der Dauerkulturen. Pro kg organische Trockensubstanz weist die Dauerwiese sogar ein ähnlich hohes Eutrophierungspotenzial auf wie Silomais, während Triticale den höchsten Wert ausweist. Dies rührt daher, dass die beiden annuellen Kulturen in der Analyse gemeinsam mit den nachfolgenden Zwischenkulturen betrachtet werden. Im Falle von Triticale ist dies die Chinakohlrübsen, welche ebenfalls zur Biogaserzeugung geerntet wird und daher auch mit dem Gärsubstrat gedüngt wird. Bei Silomais dient der Senf als reine Gründüngung, die vor der nächsten Saat in den Boden eingearbeitet und daher auch nicht gedüngt wird.

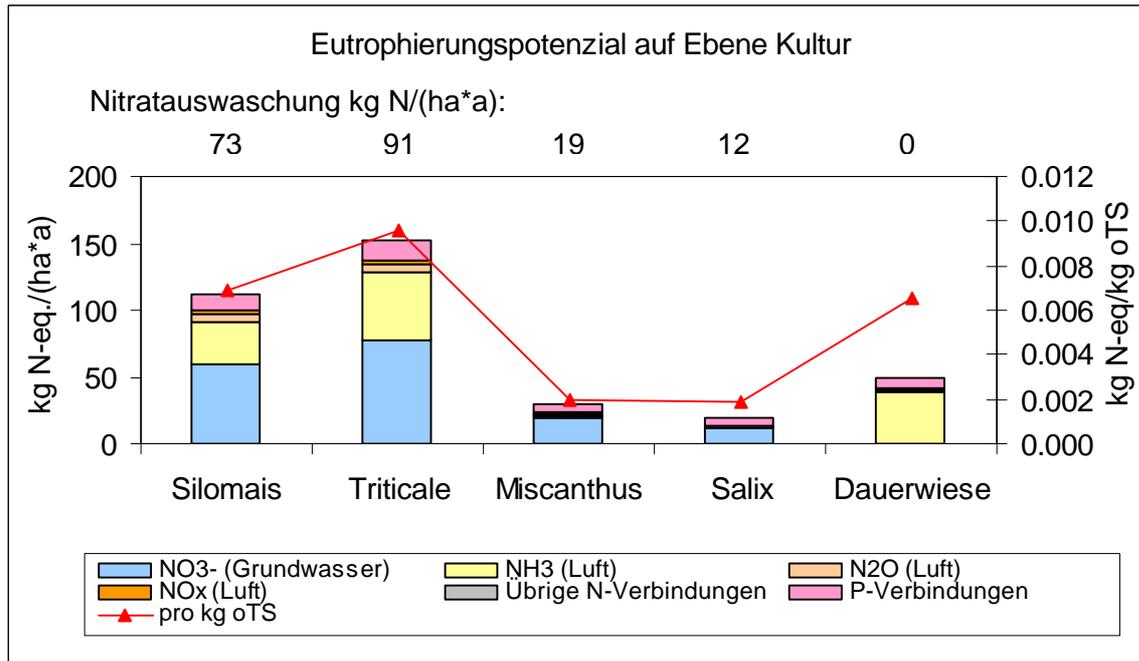


Abbildung 9: Nitratauswaschung und Anteile der verschiedenen Emissionen am Eutrophierungspotenzial auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und ein kg oTS.

3.1.3 Schadstoffmanagement

Bei der mehrjährigen Betrachtung ist zu erkennen, dass die Dauerkulturen eine deutlich geringere Toxizität aufweisen als die Fruchtfolgen, wobei die Referenzfruchtfolge tendenziell höhere Werte als die Energiefruchtfolge aufweist (siehe Abbildung 10). Bei der Dauerwiese werden keine Pflanzenschutzmittel eingesetzt, die Umweltlast der Wiese ist daher größtenteils auf die mechanischen Maßnahmen zurückzuführen. Bei Miscanthus und Salix werden zu Beginn und bei Miscanthus zusätzlich bei der Auflösung des Bestandes Herbizide gespritzt. Während der 18 jährigen Zwischenzeit sind aber keine Pflanzenschutzmittel notwendig. Dies ist der Hauptgrund, weshalb die Toxizitätswerte bei Miscanthus und Salix niedriger liegen als bei den Fruchtfolgen. Ein anderer Grund liegt darin, dass Schadstoffwerte stark von den jeweils eingesetzten Pestiziden abhängen.

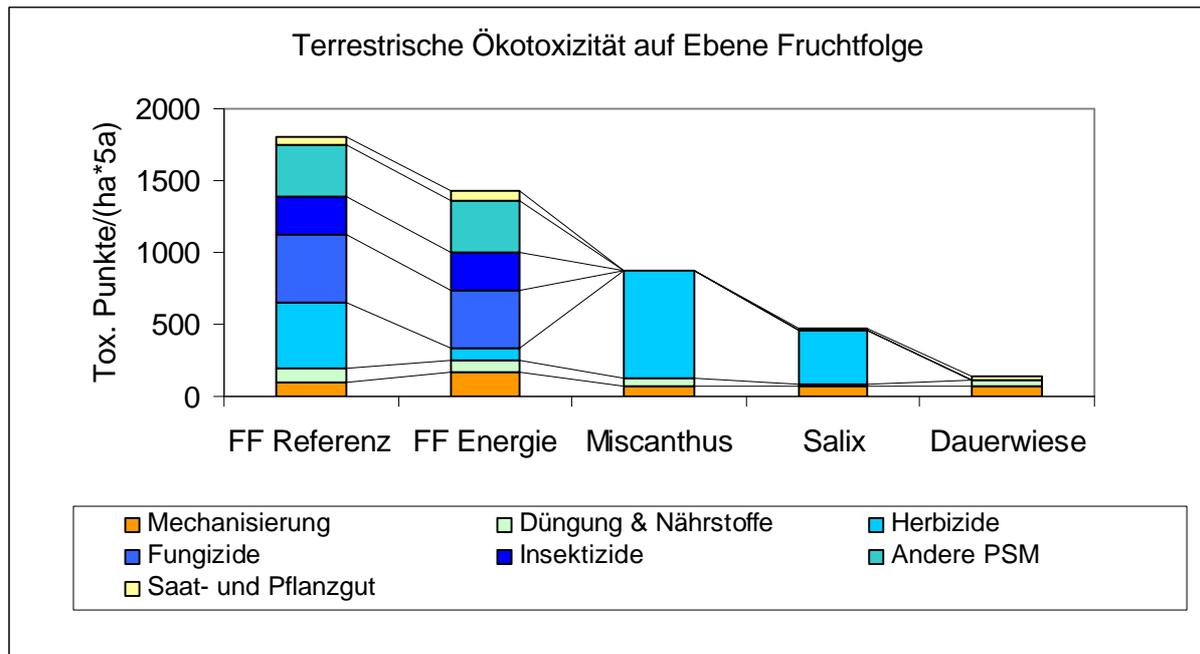


Abbildung 10: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse an der terrestrischen Ökotoxizität auf Ebene der Fruchtfolge bezogen auf einen Hektar und fünf Bewirtschaftungsjahre.

Auf Ebene der Kultur sind die Unterschiede weniger deutlich (siehe Abbildung 11). Dieser Umstand wird dadurch erklärt, dass die Kulturen der Energiefruchtfolge, die nicht zu Biogas verwertet werden und hier nicht weiter berücksichtigt werden, den großen Anteil am Gesamtschadstoffwert ausmachen. Innerhalb der hier betrachteten Kulturen weist Silomais die größte Zahl an Toxizitätspunkten auf, gefolgt von Miscanthus. Triticale und Salix weisen niedrigere Werte auf. Triticale hat jedoch sehr hohe Punktzahl in der aquatischen und Humantoxizität. Die Dauerwiese besitzt die niedrigste Toxizität (kein Pestizideinsatz). Aussagen im Schadstoffmanagement sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, weil die verwendete Wirkungsabschätzungsmethode nicht für alle eingesetzten Pflanzenschutzmittel die Toxizitätspunkte enthält und daher auch mit mittleren Punktzahlen gearbeitet werden musste.

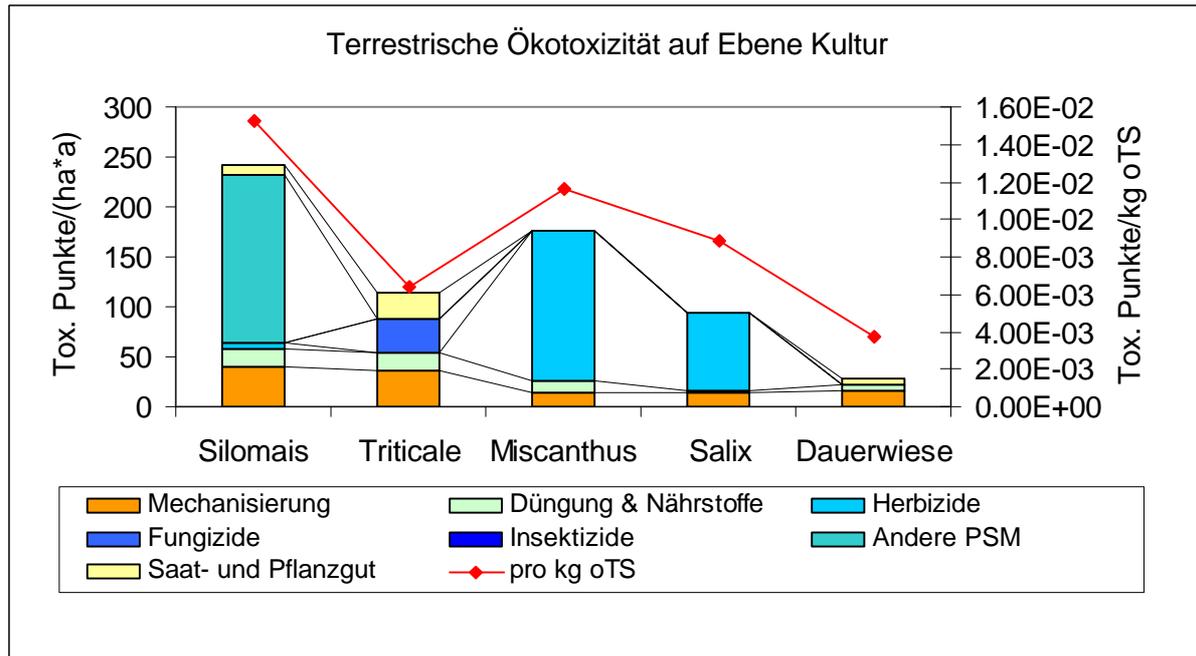


Abbildung 11: Anteile der verschiedenen Produktionsmittel und Prozesse an der terrestrischen Ökotoxizität auf Ebene der Kultur bezogen auf einen Hektar und auf ein kg oTS.

3.2 Energiebilanz und Umweltwirkung der Gewinnung von Energie aus Biomasse

Dieses Kapitel gibt die Ergebnisse des gesamten Lebensweges der Energieerzeugung aus Biomasse wieder. Der Anbau der Biomasse aus Kapitel 3.1 mit seinen Umweltlasten ist im hier dargestellten Gesamtergebnis berücksichtigt und wird bei Betrachtung der Energiebilanz und der Umweltwirkungen separat ausgewiesen (in den Grafiken zu den Umweltwirkungen ausgewiesen als „Anbau“), so dass der Anteil des Biomasseanbaus am Gesamtergebnis deutlich wird.

Bei der Energieerzeugung aus Biomasse wird die bis zum Ende der Wachstumsphase in der Biomasse gespeicherte Sonnenenergie über Konversionsanlagen in elektrische Energie und thermische Energie umgewandelt. Die Biomasse stellt also eine regenerative Energieressource dar. Regenerativ deshalb, da sie in relativ überschaubaren Zeiträumen erneut produziert werden kann im Gegensatz zu fossilen (nicht erneuerbaren) Energieressourcen.

Wird die regenerative Energieressource „Biomasse“ über eine Feuerungsanlage oder eine Biogasanlage mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung in Strom und Wärme umgewandelt, so ersetzt der auf diesem Weg produzierte Strom einen „deutschen Strom-Mix“. Dieser Strom-Mix setzt sich zum überwiegenden Teil zusammen aus Strom auf Basis nicht erneuerbaren Energieressourcen (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl, Uran etc.) und zu einem kleineren Teil aus Strom auf Basis erneuerbarer Energieressourcen (wie Windenergie, Solarenergie, Wasserkraft, Biomasse etc.). Die „Anteile“ der verschiedenen nicht erneuerbaren und erneuerbaren Energieressourcen am deutschen Strom-Mix verändern sich im Laufe der Zeit. Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurde ein deutscher Strom-Mix aus dem Bezugsjahr 2001 herangezogen.

Dieser Strom-Mix wird durch die erzeugte Bioenergie substituiert, also ersetzt. Dadurch werden auch Emissionen, die bei Erzeugung von Strom nach dem Strom-Mix freigesetzt werden, eingespart. Für die entfallenen Umweltlasten konventioneller Energiebereitstellung werden in den Berechnungen „Gutschriften“ erteilt, die in den Abbildungen dieses Kapitels als "negative Umweltbelastung" (= Umweltentlastung) unterhalb der X-Achse dargestellt sind. Genau so, wie Gutschriften für Strom ausgewiesen werden, werden auch Gutschriften für Wärme ausgewiesen. Zusätzlich wird bei den Systemen, die über Biogas verwertet werden, eine Gutschrift für Dünger erteilt, weil die ausgegaste Biomasse aufs Feld zurückgeführt wird und damit mineralischen Dünger einspart.

In den folgenden Kapiteln werden die Energiebilanz und die Umweltwirkungen vergleichend für die vier verschiedenen Biomassen (Fruchtfolge Energie, Dauerwiese, Miscanthus und Salix) dargestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse nur für die im Rahmen dieser Studie und in Kapitel 2.5.3 dargestellten getroffenen Annahmen gelten.

3.2.1 Energiebilanz je Kilogramm organischer Trockensubstanz

Die Energiebilanz je kg organischer Trockensubstanz für die beiden Konversionsverfahren der Biomasse aus den vier betrachteten Anbausystemen ist im Detail in Tabelle 4 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die wesentlichsten Ergebnisse zusätzlich grafisch dargestellt in Abbildung 12.

Bedarf an nicht-regenerierbaren Energieressourcen (Input):

In den beiden Prozessschritten „Aussaat bzw. Pflanzung der Energiepflanzen“ und „Strom-/Wärmeerzeugung“ wird ein geringer Teil nicht regenerative Energieressourcen, das sind Energieressourcen fossilen Ursprungs wie Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl, Uran etc. verbraucht (z.B. Diesel für Traktoren). Der Verbrauch an regenerativen Energieressourcen (Verbrauch im landwirtschaftlichen Anbau plus Verbrauch in der Konversion) variiert zwischen den vier Anbausystemen zwischen etwa 0,6 MJ / kg oTS für Salix und 2,2 MJ / kg oTS für die Fruchtfolge Energie.

Bedarf an regenerierbaren Energieressourcen (Input):

Bei der Energieerzeugung aus einem kg oTS werden zwischen 17,1 und 18,2 MJ regenerative Energieressourcen benötigt. Regenerative oder regenerierbare Energieressourcen umfassen alle in relativ überschaubaren Zeiträumen erneut produzierbare Energien wie Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie oder Biomasse – die also nicht fossilen Ursprungs sind. Die oben genannten Werte setzen sich zusammen aus dem Bedarf an in der Biomasse eingespeicherte Sonnenenergie (was dem unteren Heizwert der Biomasse entspricht) und dem Verbrauch eines geringen Teils an regenerativer Energie (aus dem Strom-Mix) für die Konversion der Biomasse.

Gutschriften an nicht-regenerierbaren Energieressourcen (Output):

Insgesamt gesehen wird durch die Produktion von Strom und Wärme aus Biomasse Energie aus fossilen Quellen (z.B. aus Erdöl oder Erdgas) substituiert. Nicht regenerierbare Ressourcen werden also durch die Bioenergieerzeugung eingespart. Durch die Rückführung des nährstoffreichen Gärsubstrates aufs Feld wird bei den Biogasvarianten neben Strom und Wärme zusätzlich auch Primärenergie aus fossilen Quellen, die zur Herstellung der hier substituierten Mineraldünger notwendig wären, eingespart. Insgesamt liegt die Einsparung an

nicht regenerierbaren energetischen Ressourcen für die vier Anbausysteme zwischen 22,58 und 29,19 MJ / kg oTS.

Gutschriften an regenerativen Energieressourcen (Output):

Durch die Substitution von Strom und Wärme aus fossilen Quellen sowie durch die Düngersubstitution wird auch ein geringer Anteil an regenerierbaren energetischen Ressourcen (Anteil am Strom-Mix) substituiert, der in die Bilanz mit einfließt. Diese Anteile sind jedoch vergleichsweise gering (etwa 0,69 bis 0,798 MJ / kg oTS für die vier Anbausysteme).

Verrechnung des Energiebedarfs mit den Gutschriften (Input minus Output)

Die jeweiligen Verbräuche an nicht regenerativer Energie werden mit den jeweiligen Einsparungen nicht regenerativer Energien verrechnet. Das Ergebnis der Netto eingesparten nicht-regenerativen Energie ist in der Grafik (Abbildung 12) in Form von blauen Balken als Gutschrift dargestellt. Dieser Balken gibt also die insgesamt eingesparte Menge an nicht erneuerbarer Energie wieder, wobei sämtliche Energieverbräuche aus dem Anbau, der Konversion und den Transporten etc. dort bereits berücksichtigt sind. Die Energiegewinnung aus Miscanthus spart mit minus 28,5 MJ netto am meisten fossile Energieressourcen je kg eingesetzter organischer Trockensubstanz ein. Salix weist mit minus 22 MJ das geringste Einsparpotenzial auf.

Genauso wurde bei der Auswertung der regenerativen energetischen Ressourcen verfahren (grüne Balken in Abbildung 12). Der Bedarf an regenerierbaren energetischen Ressourcen wurde mit den Gutschriften an regenerativen energetischen Ressourcen verrechnet. Netto müssen also zwischen 16,4 (Dauerwiese) und 17,5 (Salix) MJ regenerative Ressourcen für die Erzeugung und Umwandlung je kg eingesetzter oTS aufgewendet werden.

Der Nettoenergiebedarf aller fossilen und regenerativen Energieressourcen (= Delta; gelbe Balken in Abbildung 12) zeigt auf, wie viel MJ mehr an fossiler Energie eingespart, als an regenerativer Energie benötigt wird.

Die Ergebnisse am Beispiel Miscanthus:

Das bedeutet z.B. im Falle von Miscanthus werden etwa 17 MJ / kg oTS an regenerativer Energie benötigt (= die in der Biomasse eingebundenen regenerative Energie ca. 18 MJ minus aufgewendeter regenerativer Energie ca 1 MJ). Eingespart werden durch die Verbrennung von einem kg Miscanthus (oTS) netto etwa 28 MJ Energie fossiler Herkunft (dies entspricht ca. 15 MJ erzeugter Strom und Dampf unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade; Wert nicht in der Tabelle dargestellt). Miscanthus über den Verwertungsweg „Feuerung“ weist das größte Delta (= Nettoenergiebedarf aller fossilen und regenerativen Energieressourcen) auf. Durch die Verbrennung von einem kg Miscanthus (oTS) können etwas über 11 MJ Energie fossilen Ursprungs ersetzt werden.

Bezogen auf ein kg organische Trockensubstanz zeigen alle vier Varianten ein „Einsparpotenzial“ an fossilen Energieressourcen. Dieses ist bei Miscanthus am höchsten, gefolgt von Dauerwiese, FF Energie und Salix.

Tabelle 4: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

INPUT	Einheit / kg oTS	FF Energie Biogas	Dauerwiese Biogas	Miscanthus Feuerung	Salix Feuerung
Verbrauch an nicht regenerierbaren Ressourcen im Anbau (= Daten aus Salca)	MJ	1,38	1,16	0,67	0,52
Verbrauch an nicht regenerierbaren Ressourcen in der Konversion	MJ	0,858	0,784	0,045	0,065
Summe: Bedarf an nicht regenerierbaren energetischen Ressourcen	MJ	2,238	1,944	0,715	0,585
Bedarf an regenerierbaren energetischen Ressourcen (= in der Biomasse eingebundene Sonnenenergie = unterer Heizwert)	MJ	18,06	17,1	18,0	18,2
Verbrauch an regenerierbaren energetischen Ressourcen in der Konversion	MJ	0,0106	0,0101	0,0007	0,0008
Summe: Bedarf an regenerierbaren energetischen Ressourcen	MJ	18,0706	17,1000	18,0007	18,2008
OUTPUT	Einheit / kg oTS	FF Energie Biogas	Dauerwiese Biogas	Miscanthus Feuerung	Salix Feuerung
Durch Substitution von Strom, Wärme und Düngern eingesparte regenerierbare energetische Ressourcen	MJ	0,693	0,701	0,787	0,700
Durch Substitution von Strom, Wärme und Düngern eingesparte nicht regenerierbare energetische Ressourcen	MJ	25,62	27,10	29,19	22,58
Verrechnung INPUT minus OUTPUT	Einheit / kg oTS	FF Energie Biogas	Dauerwiese Biogas	Miscanthus Feuerung	Salix Feuerung
Netto nicht regenerierbare energetische Ressourcen	MJ	= 2,238 - 25,62 = - 23,38	= 1,944 - 27,10 = - 25,17	= 0,715 - 29,19 = - 28,475	= 0,585 - 22,58 = - 22,00
Netto regenerierbare energetische Ressourcen	MJ	= 18,0706 - 0,693 = 17,38	= 17,1000 - 0,701 = 16,40	= 18,0007 - 0,787 = 17,22	= 18,2008 - 0,700 = 17,50
Es werden also x MJ mehr an fossiler Energie eingespart, als an regenerativer Energie benötigt wird (Delta)		- 6,00	- 8,77	- 11,26	- 4,50

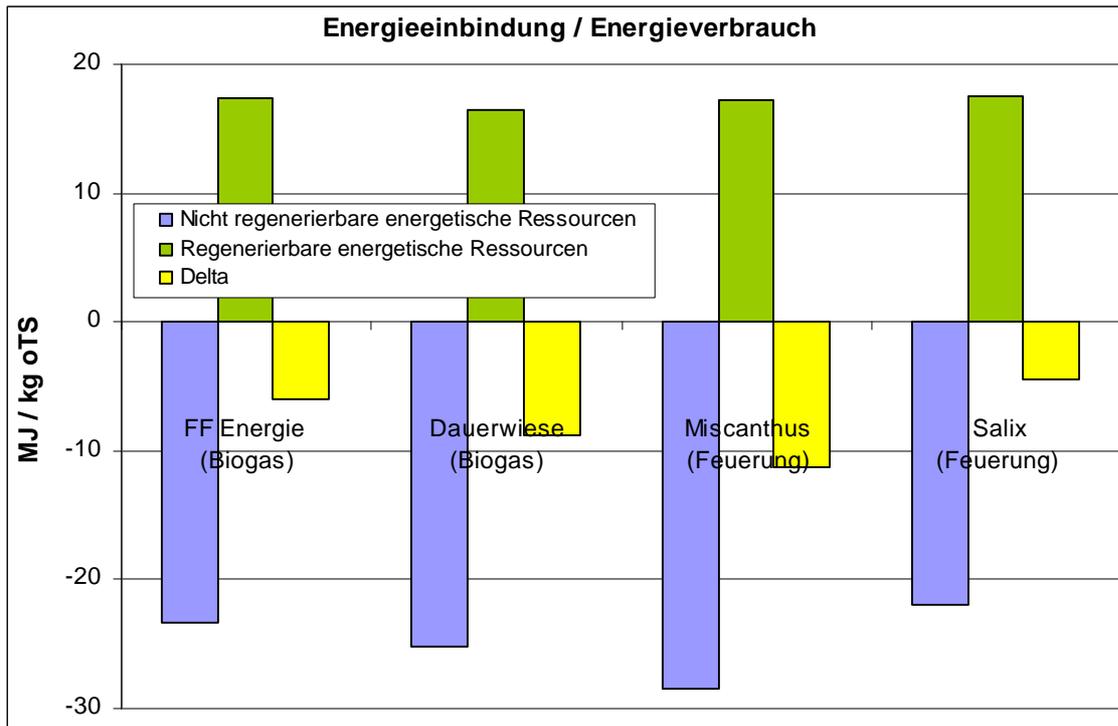


Abbildung 12: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

3.2.2 Energiebilanz je Hektar

Die Berechnung zur Energiebilanz bezogen auf die Anbaufläche (1 ha) wurde entsprechend der Energiebilanz je kg organischer Trockensubstanz durchgeführt. Deshalb wird an dieser Stelle auf die detaillierte Form der Ergebnisdarstellung anhand einer Tabelle verzichtet.

Bezieht man die Energiebilanz auf die Fläche, ändert sich das Bild durch die unterschiedlichen Hektarerträge der einzelnen Anbausysteme (Abbildung 13). Zwar zeigt Miscanthus wieder das größte „Delta“ (wäre aus energetischer Sicht also die zu bevorzugende Kultur zur Energiegewinnung aus Biomasse), wird hier aber gefolgt von der FF-Energie. Diese hat gegenüber der Dauerwiese ein wesentlich höheres Ertragspotenzial, wodurch sich hier das Ergebnis verschiebt.

Salix zeigt flächenbezogen das geringste Einsparpotenzial, da ein Teil der bei der Verbrennung gewonnenen Energie prozessintern genutzt werden muss, um das mit Erntegut mit 48 % Wassergehalt für die Lagerung und die anschließende Verbrennung auf einen Wassergehalt von 20 % vorzutrocknen.

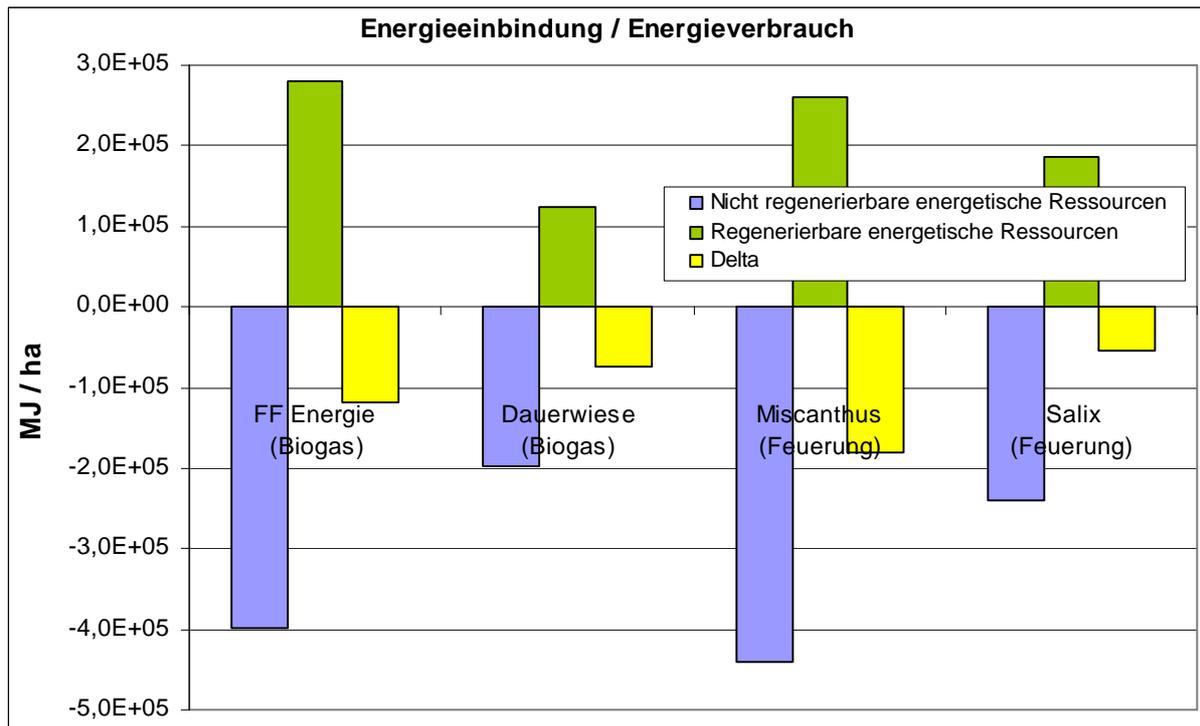


Abbildung 13: Verbrauch und Einsparung an energetischen Ressourcen bei der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein Hektar)

3.2.3 Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus einem kg oTS

Die nachfolgenden Grafiken weisen die Umweltwirkungen der Bioenergieerzeugung auf Basis von Energiepflanzen aus. Dargestellt sind die Umweltwirkungen für die Energieerzeugung je kg oTS in den verschiedenen Wirkkategorien, differenziert nach Verursacher.

Bei Strom, thermischer Energie und Dünger handelt es sich um Gutschriften (G). Dies bedeutet z.B. für Dünger, dass das aufs Feld rückgeführte Gärsubstrat mineralischen Dünger ersetzt und damit auch die mit der Mineraldüngerherstellung verbundenen Umweltlasten eingespart werden.

Unter „Transporte“ sind die Biomassetransporte vom Hof zur Konversionsanlage und die Transporte für Asche und Gärsubstrat subsummiert. Die Transporte im landwirtschaftlichen Anbau sind im Teilprozess „Anbau“ bereits berücksichtigt.

„Infrastruktur“ als Verursacher fasst die Umweltlasten zusammen, die im Zusammenhang mit der Erstellung von Gebäuden, Anlagen, Fahrzeugen etc. im Verbrennungs- bzw. Biogasprozess entstehen. Die Infrastruktur des Anbaus ist im betreffenden Teilprozess bereits berücksichtigt.

Der Verursacher „Anlage“ subsummiert alle die Umweltlasten, die aus dem laufenden Betrieb der Energieerzeugungsanlagen, also bei der Herstellung von Strom und Wärme (Feuerung oder Biogas mit anschließender KWK) stammen. Die Umweltlasten der Infrastruktur dieser Anlagen sind im „Verursacher Infrastruktur“ mit berücksichtigt.

„Silierung“ spezifiziert die Umweltlasten, die mit der Silierung der feucht geernteten Biomasse verbunden sind. Aus diesem Grund wird dieser Verursacher auch nur beim Verwertungsweg „Biogas“ ausgewiesen.

Tabelle 5 gibt einen Gesamtüberblick über die Umweltwirkungen der energetischen Nutzung von einem kg organische Trockensubstanz. Negative Umweltwirkungen sind in der Tabelle jeweils verrechnet mit den Gutschriften aus der Strom- und Wärmeerzeugung und den Düngergutschriften. Die Tabelle gibt die Ergebnisse aus den Abbildungen 14 bis 20 in absoluten Zahlen an. Detaillierte Ergebnisse sind in den Abbildungen dargestellt.

Tabelle 5: Umweltlasten bzw. Umweltgutschriften der Anbauvarianten bezogen auf die energetische Verwertung von ein kg organischer Trockensubstanz

Umweltwirkung	Einheit je kg oTS	FF Energie (Biogas)	Dauerwiese (Biogas)	Miscanthus (Feuerung)	Salix (Feuerung)
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äquiv.	-1,42	-1,48	-1,63	-1,27
Versauerungspotenzial	kg SO ₂ -Äquiv.	0,0046	0,0104	0,0011	-0,0006
Eutrophierungspotenzial	Kg N-Äquiv.	0,0080	0,0066	0,0023	0,0023
Ozonbildungspotenzial	kg Ethen-Äquiv.	-0,00005	-0,00008	-0,00008	-0,00002
Humantoxizität	Tox-Punkte	0,0007	0,0006	-0,0019	-0,0018
Terrestrische Ökotoxizität	Tox-Punkte	0,0927	0,0469	0,0173	0,0193
Aquatische Ökotoxizität	Tox-Punkte	0,0032	-0,0451	-0,0890	-0,0745

Treibhauspotenzial:

Dominiert wird das Treibhauspotenzial von den Emissionen aus den Anlagen und den Gutschriften für die Substitution von Strom und Wärme aus fossilen Quellen (Abbildung 14). Im Gegensatz zu den nachfolgend dargestellten Umweltwirkungen wird hier beim Treibhauspotenzial zusätzlich das in der Biomasse eingebundene CO₂ dargestellt (BM-CO₂). Auch hier handelt es sich um eine Gutschrift. Diese Gutschrift entspricht dem Treibhauspotenzial, welches in der Feuerungs- bzw. Biogasanlage wieder freigesetzt wird (grüne Balken). Hier wird der bereits im Energieteil dargestellte zweifache Effekt der Energieerzeugung aus Biomasse deutlich. Die Energieerzeugung aus Biomasse an sich ist weitgehend CO₂ neutral (die Biomassebereitstellung durch die Landwirtschaft hat einen relativ geringen Beitrag). Der wesentliche Effekt ergibt sich daraus, dass Strom und thermische Energie aus fossilen Quellen eingespart werden und somit auch die damit verbundenen Treibhausemissionen. Transporte, Silierung und Infrastruktur spielen eine untergeordnete (im Diagramm nicht sichtbare) Rolle. Das absolute Einsparpotenzial an CO₂-Äquivalenten (siehe auch Gesamtübersicht in Tabelle 5) variiert zwischen -1,27 kg für Salix und -1,63 kg für Miscanthus.

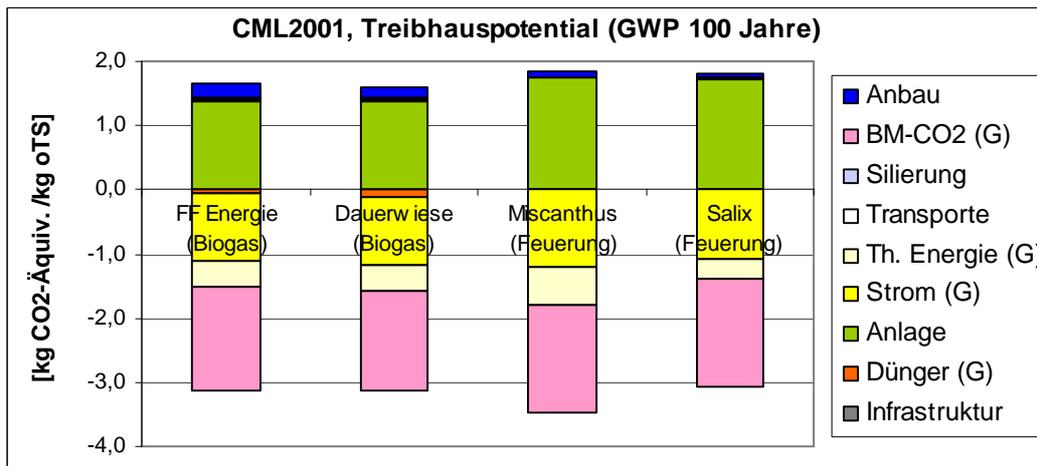


Abbildung 14: Treibhauspotential der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

Versauerungspotenzial:

Das Versauerungspotenzial (Abbildung 15) wird in der Fruchtfolge Energie und bei der Dauerwiese bestimmt durch den landwirtschaftlichen Anbau der Biomasse (vgl. Tabelle 2). Anlageseitig sind Miscanthus und Salix etwas ungünstiger hinsichtlich ihres Versauerungspotenzials einzustufen als die Biogasanlagen. Die Düngergutschriften zeigen einen relativ geringen Einfluss. Transporte, Silierung und Infrastruktur spielen auch hier eine untergeordnete (im Diagramm nicht sichtbare) Rolle. Bei den Gutschriften für Strom und Wärme unterscheiden sich die vier Anbausysteme nur geringfügig. Miscanthus zeigt im Vergleich zu Salix höhere Beiträge der Feuerungsanlage zum Versauerungspotenzial, da die halmgutartige Biomasse mehr Schwefel und Chlor enthält als das Holz, was zu höheren versauernden Emissionen führt. Absolut gesehen (die Emissionen und Gutschriften für eingesparte Emissionen sind gegeneinander verrechnet) liegt das Versauerungspotenzial pro kg energetisch verwertete Biomasse (siehe auch Gesamtübersicht in Tabelle 5) zwischen 0,0104 kg für die Dauerwiese und -0,0006 kg SO₂-Äquivalenten für Salix.

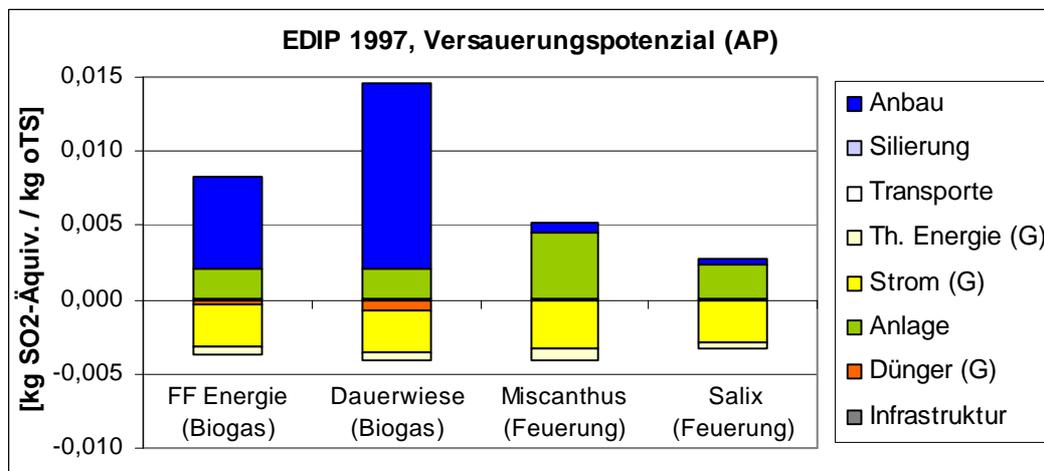


Abbildung 15: Versauerungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

Eutrophierungspotenzial:

Das Eutrophierungspotenzial (Abbildung 16) wird in der Fruchtfolge Energie und bei der Dauerwiese in noch höherem Maße als bei der Versauerung bestimmt durch den landwirtschaftlichen Anbau der Biomasse (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 8). In den anlagenbedingten Umweltwirkungen unterscheiden sich die vier Anbausysteme kaum. Gutschriften können beim Eutrophierungspotenzial die Umweltlasten nicht kompensieren. Mit 0,008 kg N-Äquivalenten je kg oTS hat die FF Energie das höchste Eutrophierungspotenzial, gefolgt von der Dauerwiese mit 0,0023 kg N-Äquivalenten je kg oTS (Emissionen und Gutschriften für die eingesparte Emissionen sind gegeneinander verrechnet; siehe auch Tabelle 5).

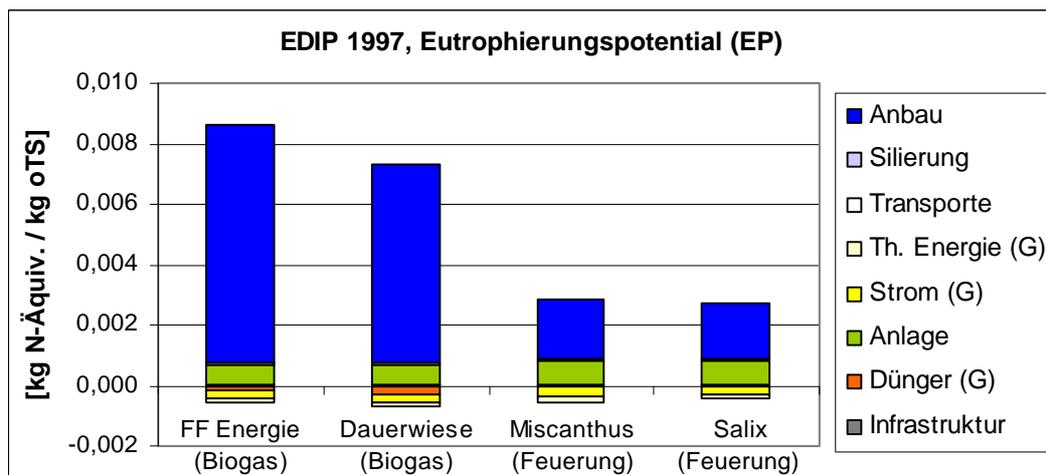


Abbildung 16: Eutrophierungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

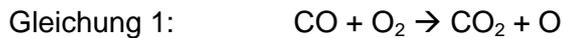
Ozonbildungspotenzial

Das Ozonbildungspotenzial (= Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)) ist emissionsseitig ähnlich hoch bei allen vier betrachteten Anbausystemen (Abbildung 17). Bei den Biogasvarianten tragen im Wesentlichen der Anbau und die Konversionsanlage zu den Emissionen bei. Darüber hinaus zeigen die Emissionen aus den Transporten einen gewissen Einfluss. Die POCP Emissionen aus den Transporten sind bei den Biogasvarianten ausgeprägter, da pro kg organische Trockensubstanz wesentlich mehr Frischmasse als bei den Feuerungsvarianten transportiert werden muss. Bei Miscanthus und Salix dominieren die Emissionen aus der Feuerungsanlage.

Emissionen aus der Silierung spielen eine eher untergeordnete Rolle. Ausgegangen wurde von einem gasförmigen Verlust an Kohlenstoff von 5 % (LVVG 2006). Es wurde hier angenommen, dass mehr als 99,8 % dieser Emissionen als CO₂, und unter 0,2 % als CO aus dem Silo entweichen (BUXTON et al. 2003). Aufgrund einer bestehenden Datenunsicherheit im Bereich der gasförmigen Verluste bei der Silierung müssen diese Werte allerdings derzeit mit Vorsicht interpretiert werden.

Anmerkung: Die photooxidierenden Potenziale des Kohlenmonoxids sind darüber hinaus noch gewissen naturwissenschaftlichen Unsicherheiten unterworfen. Je nach Schadstoffbelastung der Umgebungsluft ist davon auszugehen, dass durch Kohlenmonoxid reduzierende Wirkungen auf Ozon (zu O₂) genauso auftreten können wie reduzierende Wirkungen auf O₂.

Somit stehen folgende drei Reaktionsgleichungen (vereinfachend dargestellt) in einer Gleichgewichtsreaktion:



Die hier zur Anwendung kommende Methode zur Wirkungsabschätzung (EDIP 1997) geht offensichtlich von Gleichung 1 und 2 aus.

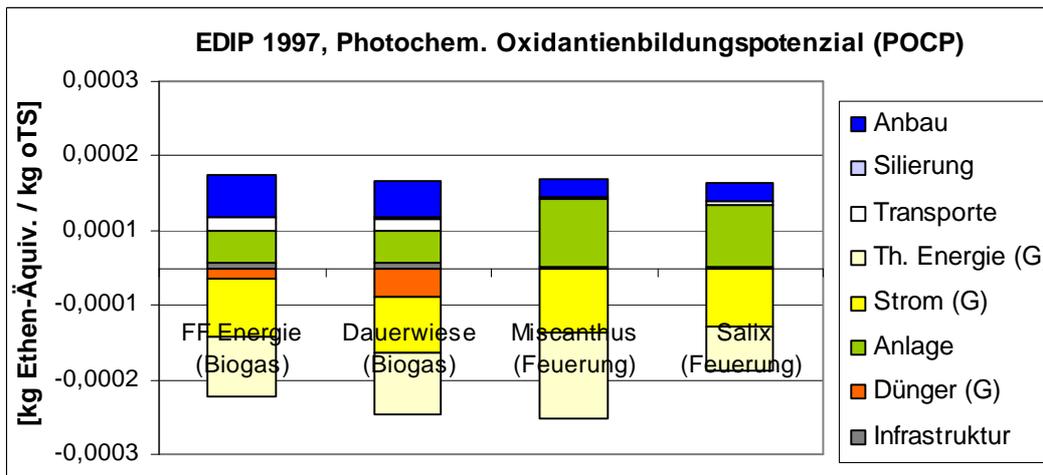


Abbildung 17: Ozonbildungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

Humantoxizitätspotenzial:

Die Humantoxizität (Abbildung 18) ist überwiegend durch den landwirtschaftlichen Anbau der Biomasse bestimmt, zu einem geringeren Anteil von der Konversionsanlage. Im Gegensatz zu den bisher dargestellten Umweltwirkungen kommt erstmalig der Infrastruktur eine geringe Bedeutung zu. Sie ist höher bei den Varianten, die über den Biogaspfad verwertet werden. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache, dass für diesen Weg der Energieerzeugung deutlich mehr Infrastruktur (Silo, Fermenter, Biogas-KWK) notwendig ist.

Das Humantoxizitätspotenzial bedingt durch Anbau, Anlage und beim Verwertungsweg „Biogas“ auch durch Infrastruktur wird bei allen vier Anbausystemen zu einem erheblichen Teil durch die Gutschrift für Strom kompensiert. Der regenerativ erzeugte Strom ersetzt einen Strom-Mix, der in Deutschland einen erheblichen Anteil an Kohle aufweist. Diese Schwermetallemissionen aus Kohle sind hier mitbestimmend für eine hohe Humantoxizität. Diese wird durch die Stromgewinnung aus Biomasse vermieden, weshalb alle vier Varianten eine relativ hohe Gutschrift aufweisen.

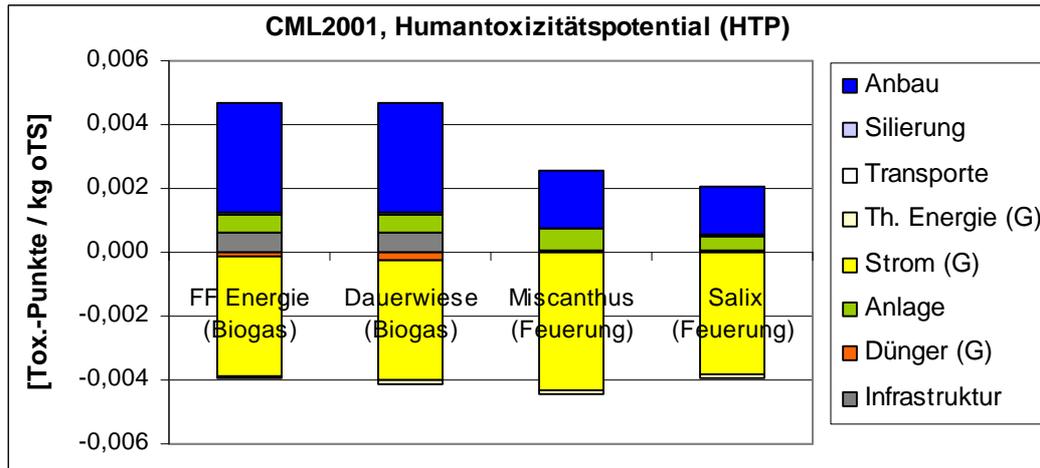


Abbildung 18: Humantoxizitätspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

Terrestrische Ökotoxizität:

Die terrestrische Ökotoxizität wird allein durch die landwirtschaftlichen Prozesse bestimmt. Die energetische Verwertung von Biomasse hat nur minimale Auswirkungen auf die Ökotoxizität des Bodens (in der Grafik nicht sichtbar). Je kg organische Trockensubstanz zeigen die Dauerkulturen Miscanthus und Salix deutlich geringere Umweltwirkungen in dieser Wirkkategorie als die Energiefruchtfolge und die Dauerwiese (Abbildung 19).

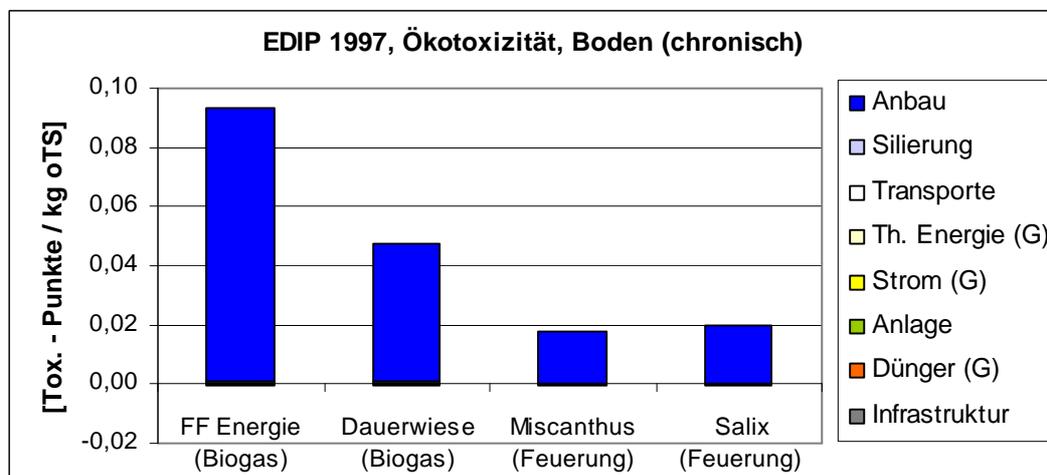


Abbildung 19: Terrestrische Ökotoxizität der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

Aquatische Ökotoxizität:

Die Wirkkategorie aquatische Ökotoxizität wird ebenfalls bestimmt durch die Auswirkungen des landwirtschaftlichen Anbaus. Zwischen den vier verschiedenen Biomassensystemen zeigen sich auch hier deutliche Unterschiede, die bereits in Kapitel 3.1.3 dargestellt wurden. Wie auch schon bei den anderen Toxizitätskategorien sind auch hier die Dauerkulturen Miscanthus und Salix als vorteilhaft zu beurteilen (Abbildung 20). Außer dem landwirtschaftlichen Anbau zeigt auch hier die Infrastruktur ein gewisses Toxizitätspotenzial. Kompensiert oder sogar überkompensiert wird das aquatische Toxizitätspotenzial durch die Gutschrift für Strom. Eisenemissionen aus Kohle in Wasser sind mitbestimmend für eine hohe aquatische Ökotoxizität des stark kohlehaltigen deutschen Strom-Mixes, der durch Bioenergie ersetzt wird. Diese wird durch die Stromgewinnung aus Biomasse vermieden.

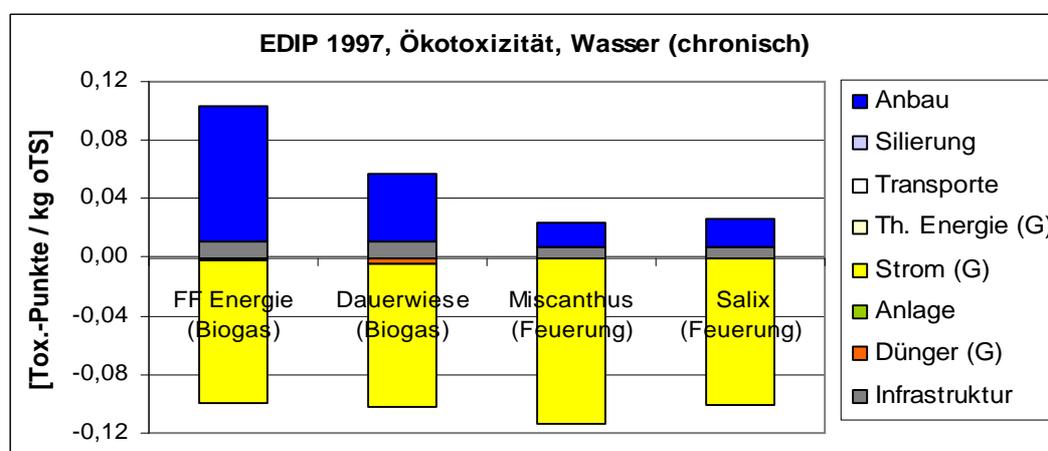


Abbildung 20: Aquatische Ökotoxizität der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf ein kg oTS)

3.2.4 Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Biomasse von einem Hektar

Für vier der Wirkkategorien werden in diesem Abschnitt die Umweltwirkungen der Energiebereitstellung aus Biomasse produziert auf einem ha Ackerfläche dargestellt. Es gehen also die jeweiligen durchschnittlichen Ernteerträge pro Jahr mit in die Auswertung ein. Folgende oTS Erträge je ha und Jahr liegen den Bilanzen zugrunde: FF Energie 16121 kg, Dauerwiese 7519 kg, Miscanthus 15132 kg und Salix 10660 kg.

Treibhauspotenzial:

Aufgrund der hohen Hektarerträge ergeben sich für Miscanthus und die FF-Energie die höchsten Beiträge zum Treibhauspotenzial. Sie werden gleichzeitig aber kompensiert durch die höchsten Gutschriften für Wärme und Strom. Aufgrund ihres höheren Einsparpotenzials sind beide Anbausysteme der Dauerwiese und der Salix vorzuziehen (Abbildung 21).

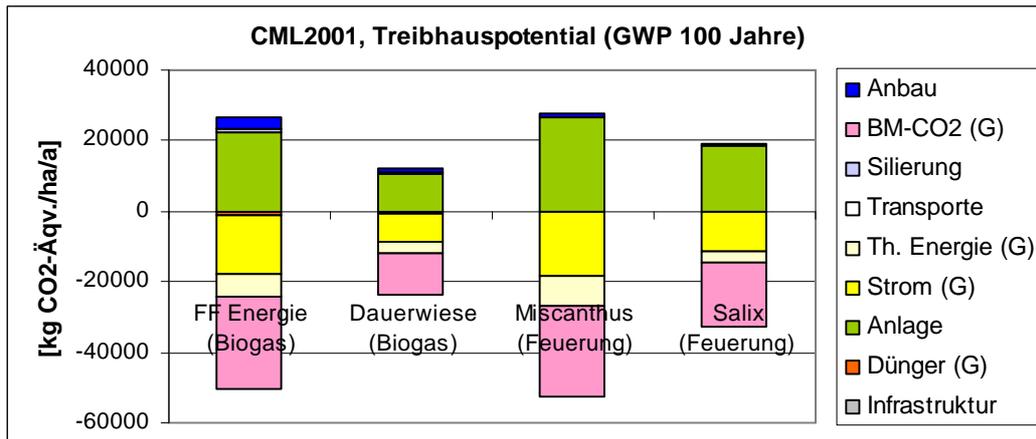


Abbildung 21: Treibhauspotential der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar)

Versauerungspotenzial:

Verrechnet man Emissionen und Gutschriften gegeneinander, liegt das Versauerungspotenzial für die FF Energie und die Dauerwiese bei rund 75 kg SO₂ Äquivalente pro Jahr und ha (Abbildung 22). Für Miscanthus liegt der Wert bei knapp 20 kg, für Salix ergibt sich eine leichte Gutschrift. Mit Blick auf ein geringes Versauerungspotenzial pro Fläche wären die Dauerkulturen Miscanthus und Salix der Energiefruchtfolge und der Dauerwiese also vorzuziehen. Wesentliche Ursache für das hohe Versauerungspotenzial für FF Energie und Dauerwiese sind die Maßnahmen im landwirtschaftlichen Anbau.

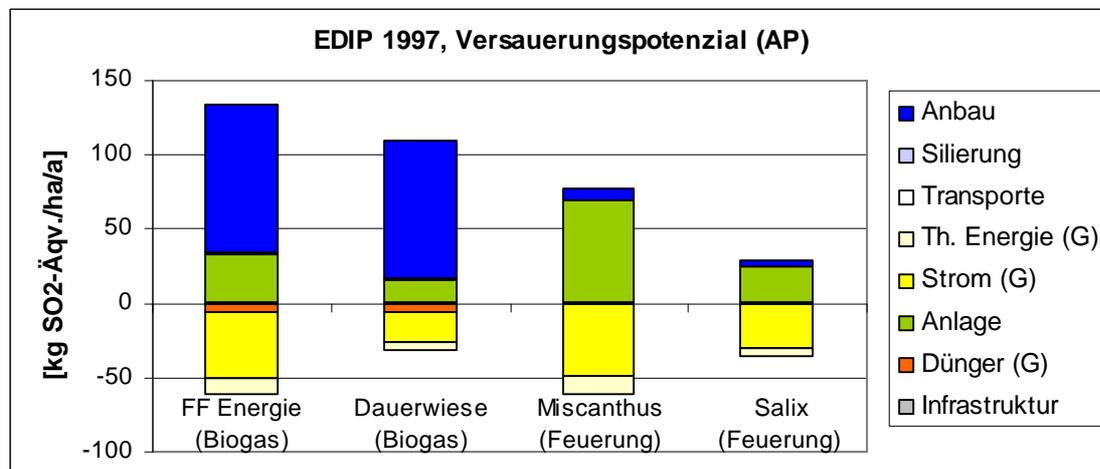


Abbildung 22: Versauerungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar)

Eutrophierungspotenzial:

Für das Eutrophierungspotenzial ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 23). Der Anbau ist fast allein bestimmend für das Ergebnis. Zur Minimierung des Eutrophierungspotenzials pro Hektar sind Salix, Miscanthus und Dauerwiese der Energiefruchtfolge vorzuziehen.

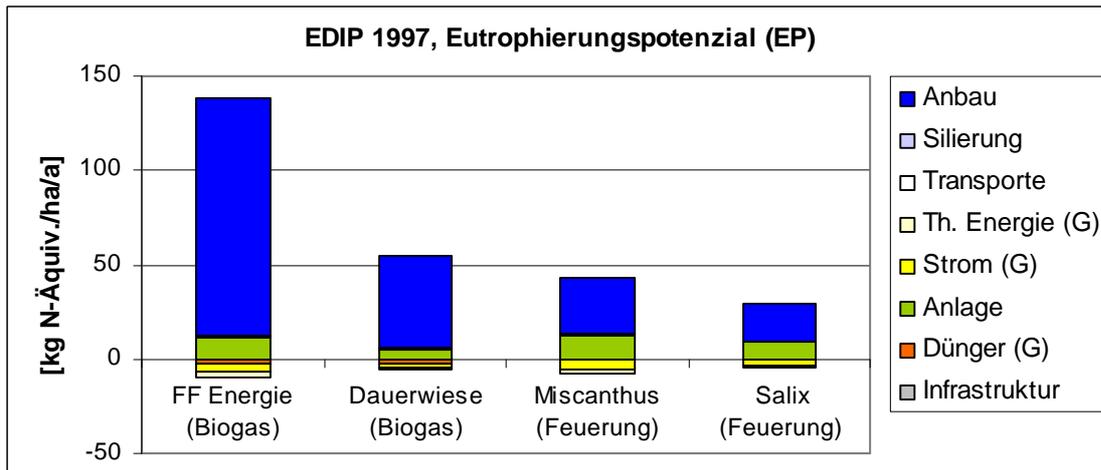


Abbildung 23: Eutrophierungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar)

Ozonbildungspotenzial:

Unter Einbeziehung des Hektarertrages sind die hochertragreichen Anbausysteme bestimmend für ein höheres Ozonbildungspotenzial. Der Verwertungsweg „Biogas“ zeigt anlagenseitig Vorteile gegenüber dem Verwertungsweg „Feuerung“ (Abbildung 24). Die Transportemissionen sind bei den Biogasvarianten höher, da hier auch die Rücktransporte der ausgegasteten Biomasse zurück auf die Anbauflächen massenmäßig nicht unerheblich sind. Die aus der Feuerungsanlage zur Deponie transportierten Aschen sind dagegen hoch aufkonzentriert und nahezu wasserfrei.

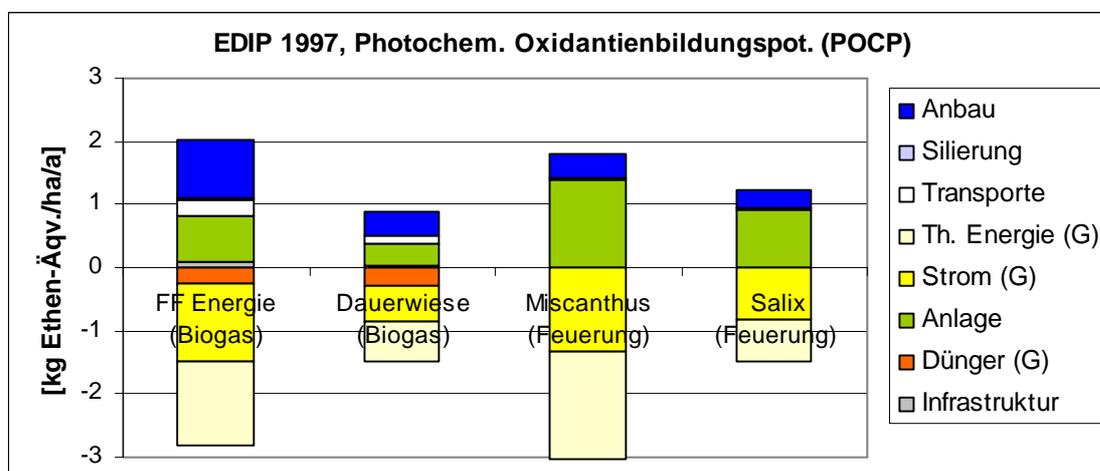


Abbildung 24: Ozonbildungspotenzial der energetischen Verwertung von Biomasse (bezogen auf einen Hektar)

Bezieht man die Umweltwirkungen anstelle auf die Fläche (1 ha) auf den Energieoutput von 1000 MJ elektrisch, ändern sich die Ergebnisse für die einzelnen Anbausysteme. Eine Darstellung der Umweltwirkungen bezogen auf die Herstellung von 1000 MJ elektrisch befindet sich im Anhang IV.

4 Wirtschaftliche Betrachtung

4.1 Deckungsbeitragsrechnungen

Analog zum ökobilanziellen Vergleich des Anbaus wird auch bei der Deckungsbeitragsrechnung den Energiekulturen als Vergleich die Referenzfruchtfolge gegenübergestellt. Abbildung 25 zeigt die Deckungsbeiträge (ohne Flächenprämien) der einzelnen Fruchtfolgeglieder der Referenzfruchtfolge. Körnermais ist erwartungsgemäß das stärkste Fruchtfolgeglied mit 187 €/ha bzw. 175 €/ha. Während die Braugerste einen leicht positiven Deckungsbeitrag von 6 €/ha ausweist, ist bei Winterraps und Winterweizen ohne Flächenzahlungen ein negativer Deckungsbeitrag auszuweisen.

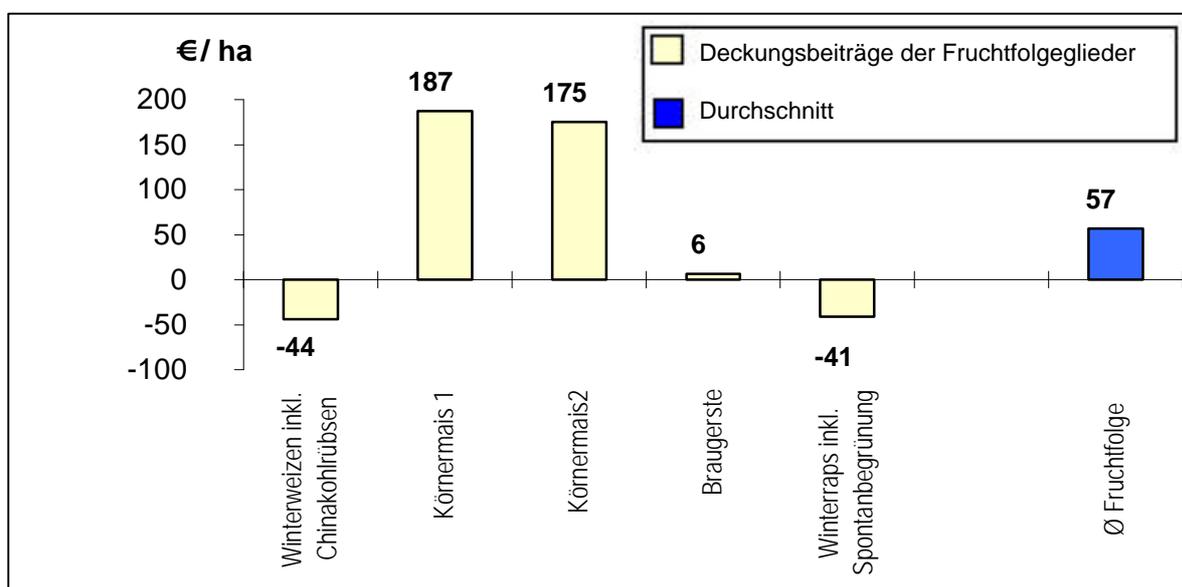


Abbildung 25: Deckungsbeiträge in der Referenzfruchtfolge (in €/ha)

Im Gegensatz zur Referenzfruchtfolge hat in der Energiefruchtfolge (Abbildung 26) die Braugerste nach Silomais einen negativen Deckungsbeitrag von -19 €/ha, der durch die leicht höhere mineralische Düngung nach Silomais im Vergleich zu Körnermais begründet ist. Die deutlich schlechte Marktleistung vom Raps in der Energiefruchtfolge ist auf die vorgesehene Spontanbegrünung nach Winterraps zurückzuführen. Hier wurde eine Bergung der 30 dt Biomasse dieser Zwischenfrucht mit einem selbstfahrendem Feldhäcksler zur energetischen Verwendung vorgesehen. Der finanzielle Wert des Aufwuchses deckt jedoch nicht die Kosten der vorgesehenen Ernte. Hier sollte deshalb ein günstigeres Ernteverfahren (z.B. Mähen, Schwaden, Ladewagen) zum Einsatz kommen.

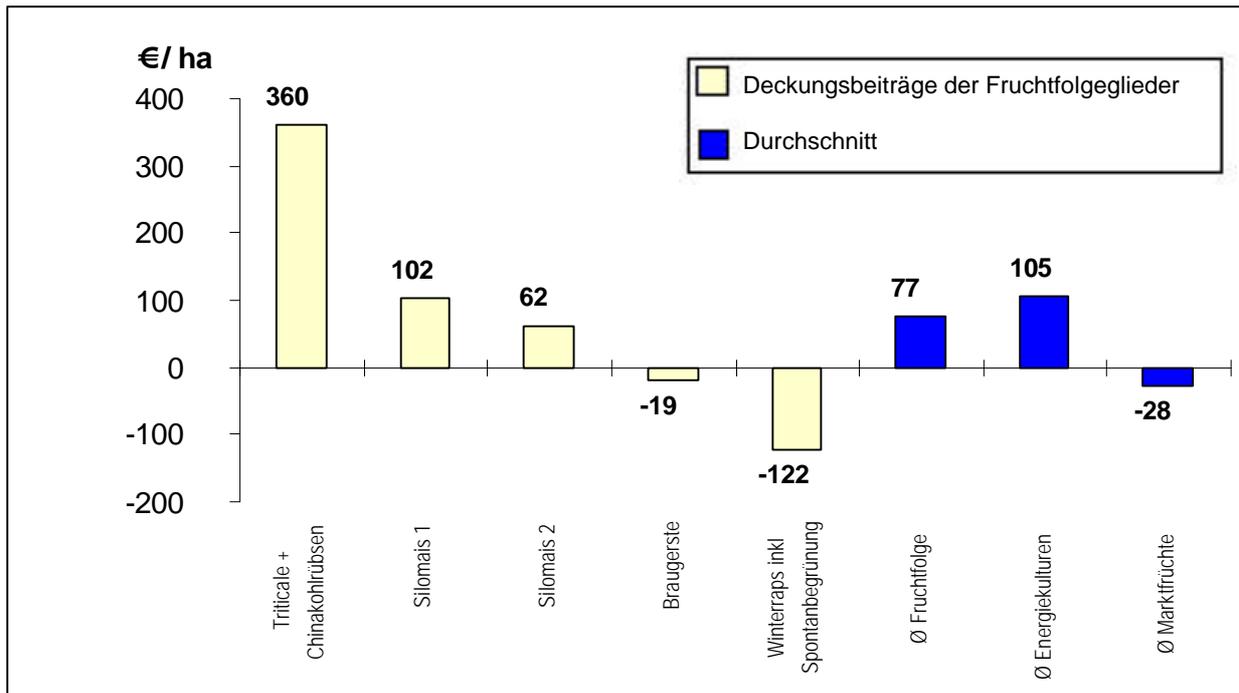


Abbildung 26: Deckungsbeiträge in der Energiefruchtfolge (in €/ha)

Bei den mehrjährigen Kulturen Weide (Salix, Abbildung 27) und Miscanthus (Abbildung 29) wird von einer 20-jährigen Nutzungsdauer ausgegangen. Im ersten Jahr fallen bei beiden Kulturen hohe Kosten zur Bestandsetablierung an, im letzten Jahr zusätzlich Kosten zur Auflösung der Anpflanzungen. Die Bestandesauflösung ist bei Weiden deutlich teurer als bei Miscanthus. Mit 2106 €/ha für Miscanthus gegenüber 1178 €/ha für Weiden fallen bei Miscanthus dagegen in ersten Jahr deutlich höhere Kosten zur Anlage des Bestandes an. Insgesamt schneidet Miscanthus im Deckungsbeitragsvergleich der Festbrennstoffe mit einem mittleren Saldo von 482 €/ha/a besser ab als Kurzumtriebsweiden mit durchschnittlich 314 €/ha/a.

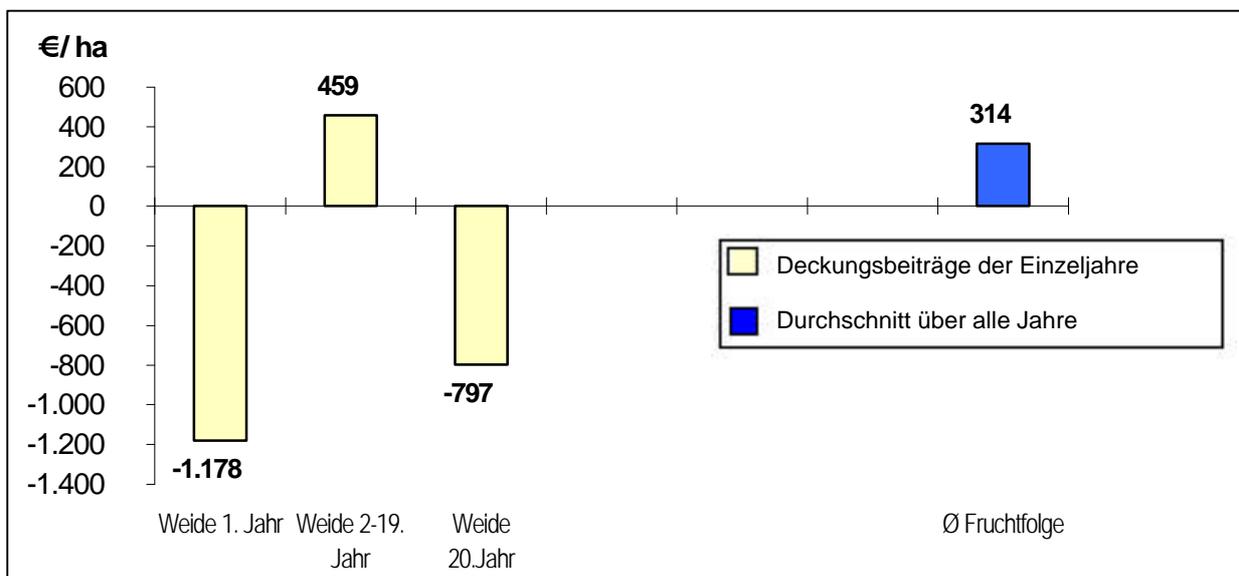


Abbildung 27: Jährliche Deckungsbeiträge beim Anbau von Kurzumtriebsweiden (in €/ha)

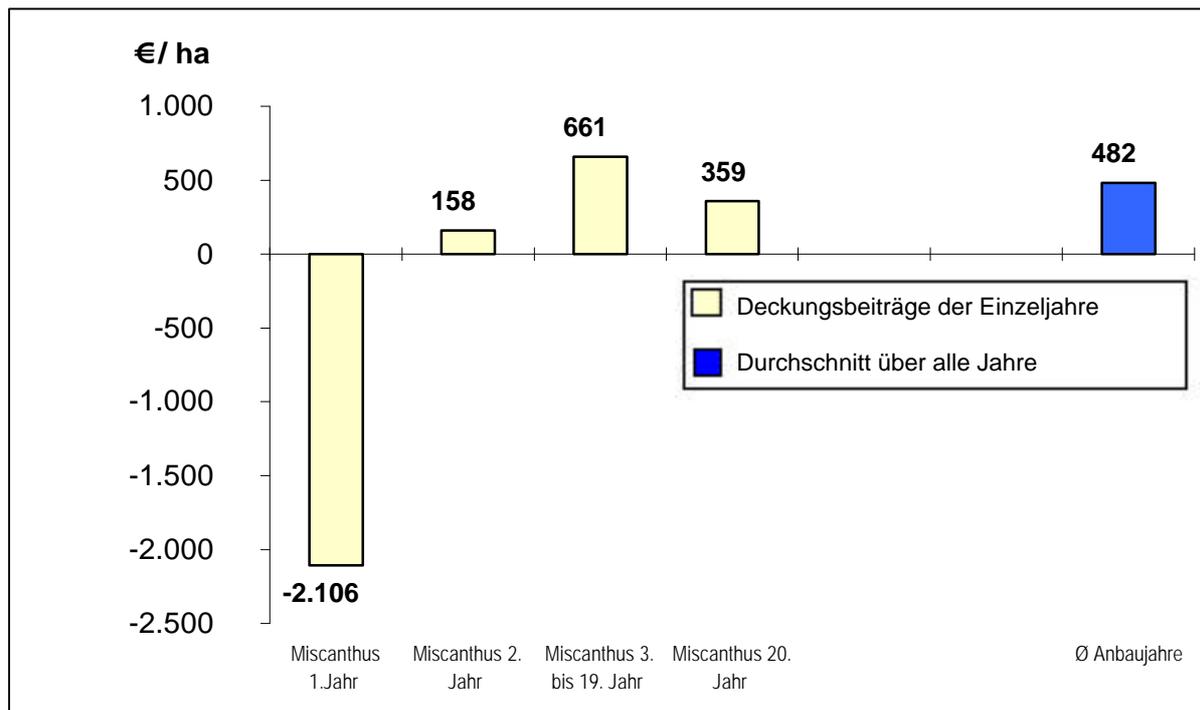


Abbildung 28: Deckungsbeiträge beim Anbau von Miscanthus (in €/ha)

Bei der energetischen Nutzung der Dauerwiese wird von einem viermaligen Schnitt auf bestehendem Dauergrünland ausgegangen. Eine Neuansaat ist nicht kalkuliert, da eine Umnutzung von Ackerflächen in Grünland für den Landwirt uninteressant und daher in der Praxis nicht zu erwarten ist. Allerdings wird, wie praxisüblich, alle 4 Jahre eine Nachsaat durchgeführt. Der jährliche Deckungsbeitrag der Dauerwiese zur energetischen Nutzung beträgt 27 €/ha (grafisch nicht dargestellt).

Der Nährstoffbedarf des Grünlandes könnte mit 23 m³ Gärrückstand je Hektar gedeckt werden. Da aber bei der Vergärung der Biomasse eines Hektars Grünland nur ca. 16 m³ Gärsubstrat anfallen und von geschlossenen Systemen ausgegangen wird, wurde in der Kalkulation analog zu den Eingangsdaten der Ökobilanz angenommen, dass der restliche Düngerbedarf mineralisch gedeckt wird. Durch den Zukauf von Mineraldünger anstatt der Nutzung von Gärrückstand sinkt der Deckungsbeitrag der Dauerwiese von 109 €/ha auf 27 €/ha (Abbildung 29). Werden in der Biogasanlage noch andere Substrate (z.B. Silomais) verwertet, wäre möglicherweise eine ausreichende Menge an Gärrückstand vorhanden, um den gesamten Nährstoffbedarf der Wiese über die Rückführung der organischen Gärreste zu decken, was die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern würde.

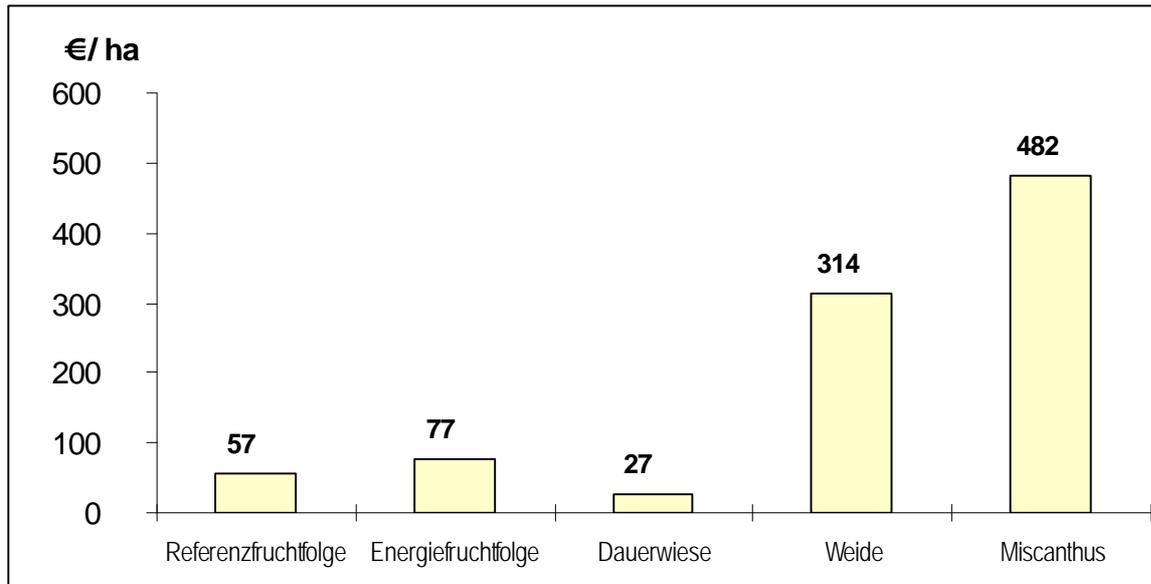


Abbildung 29: Deckungsbeiträge der Energiekulturen im Vergleich zum Referenzsystem (in €/ha)

Der Unterschied der Referenzfruchtfolge zur Energiefruchtfolge ist hauptsächlich durch die hohe Marktleistung von Triticale inkl. der Zwischenfrucht und auf die Einsparung von Mineraldünger zugunsten von rückgeführtem Gärsubstrat begründet. Zusätzlich kann die Marktleistung der Energiekulturen höher sein. Beispielsweise bringen 120 dt Triticale-Ganzpflanzen zusammen mit 45 dt Chinakohlrüben trotz niedrigerem Preis pro dt insgesamt einen höheren Erlös als 65 dt Weizenkorn (als Marktfrucht 9,81 €/dt).

4.2 Vollkostenrechnung

Im Gegensatz zum Deckungsbeitrag berücksichtigt die Vollkostenrechnung die Fixkosten des Betriebes und einen Unternehmerlohn von 12 € für betriebeigene Arbeitskräfte. Außerdem fallen bei den Dauerkulturen (Miscanthus und Salix) anfangs hohe Kosten zur Bestandesetablierung an, die über die Nutzungsdauer als verzinste Annuität abgeschrieben werden müssen (vgl. KTBL 2006b). In der Deckungsbeitragsrechnung wurden diese der Übersicht halber als Kosten im ersten Jahr ausgewiesen, während in der Vollkostenrechnung die Kapitalbeschaffungskosten zu berücksichtigen sind.

Durch diesen betriebswirtschaftlich korrekten Ansatz werden die Bestandsgründungskosten von 2106 €/ha für Miscanthus und 1178 €/ha für Salix unter Berücksichtigung der Verzinsung als Annuität mehr als verdoppelt. Im Gegensatz zur Anpflanzung sind die Kosten der Bestandsauflösung am Ende der Nutzungsdauer fällig, so dass hierfür Rücklagen aus Verkaufserlösen gebildet werden können. Abbildung 30 zeigt die Vollkosten der Biomasseerzeugung bezogen auf den Energieertrag (gelbe Säule) innerhalb der Systemgrenze der Ökobilanz für die Biomasseproduktion, d.h. es wird die Ernte und der Transport zum Betrieb berücksichtigt. Die Kosten für Silierung und Transport vom Betrieb zur Biogas- bzw. Heizkraftanlage sind dabei nicht berücksichtigt. Bei den beiden Festbrennstoffen besteht ein wesentlicher Unterschied darin, dass Miscanthus im April bei durchschnittlich 14% Wasserge-

halt geerntet wird, während das Weidenholz bei der Ernte noch 48 % Feuchtigkeit enthält, was sich negativ auf den Heizwert auswirkt und eine Lagerung nicht zulässt.

Die violette Säule in Abbildung 30 zeigt die Vollkosten des Weidenholzes pro Energieeinheit abzüglich des Energieaufwandes für die Trocknung auf 20 % Wassergehalt. Bei den Feuchtbiomassen ist in violett der Aufwand für das Silieren dargestellt (Kosten für Einsilieren und 5 % Siloverluste (nach DEDERER 2007)). Damit ergibt sich ein Vergleich der Kosten für die lagerfähigen Fest- und Feuchtbiomassen. Diese Zahl bezieht also aus Vergleichbarkeitsgründen die Kosten mit ein, die zur Lagerfähigkeit der Biomassen aufgewendet werden müssen, auch, wenn diese an der Konversionsanlage, also genau genommen außerhalb der Systemgrenze anfallen.

Eine detaillierte Aufstellung der Erträge und Energiegehalte, die als Grundlage der hier graphisch dargestellten Berechnungen dienen, ist in Tabelle 6 auf der folgenden Seite zu finden.

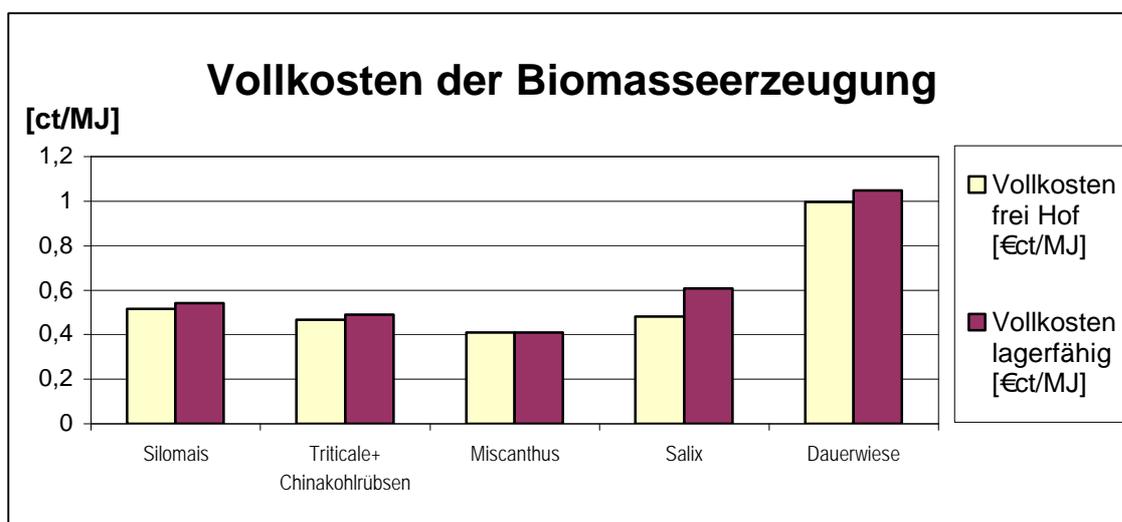


Abbildung 30: Vollkosten der Biomasseerzeugung in in €ct pro MJ in der Biomasse eingebundene Energie (H_U)

Tabelle 6: Datengrundlagen der Vollkostenrechnung

	Energiegehalt*	Durchschnittl. jährl. TS-Ertrag	Durchschnittl. jährl. Energieertrag	Vollkosten	Vollkosten frei Hof	Vollkosten lagerfähig
	[MJ/kg TS]	[kg/ha]	[MJ/ha *a]	[€/dt]	[€/MJ]	[€/MJ]
Silomais	18,5	17.000	314.500	9,52	0,51	*0,54
Triticale und Chinakohlrübsen	17,2	16.500	283.800	11,02	0,47	**0,49
Miscanthus	18,0	15.600	280.800	7,35	0,41	0,41
Salix	18,2	10.900	198.380	8,76	0,48	***0,61
Dauerwiese	17,1	8.085	138.254	15,29	1,00	**1,05

* Brennwert (H_U)

** Vollkosten Frei Hof zuzüglich Kosten für Festwalzen im Silo, abzüglich 5 % Verlusten

*** Vollkosten bezogen auf den Energieertrag abzüglich 41.366 MJ/ha für die Trocknung des Erntegutes auf 20% Wassergehalt (gemäß Berechnungen aus der Ökobilanz der Konversion)

5 Biomassebereitstellung am Oberrhein unter Berücksichtigung des Klimawandels

5.1 Standortpotenzial im Untersuchungsgebiet

In den fünf betrachteten Landkreisen werden insgesamt 83.736 ha Ackerland bewirtschaftet (Tabelle 7). Unter Berücksichtigung der Anteile, die zur Biomasseerzeugung zur Verfügung stehen (15 % Ackerland, 6 % Grünland, nach ÖKO-INSTITUT 2004), ergeben sich 12.560 ha Ackerland und 5.859 ha Grünland, auf denen Bioenergieträger angebaut werden könnten.

Tabelle 7: Flächenpotenzial zur Bioenergieerzeugung im Untersuchungsgebiet

LF im Landkreis	Gesamt [ha]		für Biomasseanbau verfügbar [ha]	
	Ackerland	Dauergrünland	Ackerland	Dauergrünland
Freiburg im Breisgau	1 657	1 102	249	66
Breisgau-Hochschwarzwald	19 677	24 493	2 952	1 470
Emmendingen	10 535	10 197	1 580	612
Ortenaukreis	28 490	23 182	4 274	1 391
Lörrach	7 490	15 153	1 124	909
Waldshut	15 887	23 530	2 383	1 412
SUMME	83 736	97 657	12 560	5 859

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die potenziellen Biomasse- und Energieerträge, die einer überschlägigen Kalkulation zufolge auf der oben berechneten Fläche erzeugt werden könnten. Dies ist als technisches Potenzial zu verstehen, also als Menge an landwirtschaftlicher Bioenergie, die ohne Beeinträchtigung der Versorgung mit Nahrungs- und Futtermitteln im Untersuchungsgebiet erzeugt werden könnte. Unberücksichtigt bleiben dabei wirtschaftliche Aspekte wie die Flächenkonkurrenz durch wirtschaftlich stärkere Kulturen wie Saatmais oder Sonderkulturen, deren Anbau für die Praxis unter momentanen Marktbedingungen finanziell interessanter ist. Die Fruchtfolgeglieder Silomais und Triticale mit Chinakohlrüben werden zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls mit 15 % der Ackerfläche berücksichtigt. Sie müssen nicht zwingend in der für die Ökobilanz angenommenen Fruchtfolge auf einem ausgewiesenen Teil der Gesamtfläche angebaut werden. Vielmehr können diese einjährigen Energiekulturen in einer beliebigen Fruchtfolge aus Marktfrüchten eingebaut werden.

Tabelle 8: Ertrags- und Energieertragspotenzial der untersuchten Kulturen im Untersuchungsgebiet

	Biomasseertrag [dt/a]	Energiegehalt ¹ [MJ/kg TS]	Energieertrag [TJ/a] ²	Stromertrag ³ [TJ/a] ²	Wärmeertrag ³ [TJ/a] ²
Silomais	2 135 268	18,5	39,50	14,10	18,68
Triticale und Chinakohlrübsen	2 072 466	17,2	35,65	12,73	16,86
Miscanthus	1 959 422	18,0	35,27	11,71	17,56
Salix	1 369 084	18,2	24,92	8,27	12,41
Dauerwiese	468 754	17,1	8,02	2,86	3,79

¹ H_U² 1 TJ = 10⁶ MJ = 10¹² J³ Wirkungsgrad der Anlagen gemäß Angaben für die Konversion (vgl. Kap. 2.5.3)

Das höchste Energieertragspotenzial im Untersuchungsgebiet liegt im Anbau von Silomais, mit dem auf 15 % der Ackerfläche im Untersuchungsgebiet jährlich mehr als 39 TJ (Terrajoule) als pflanzliche Bioenergie erzeugt werden können. Nach der Konversion (Biogas-KWK) würden dabei 14 TJ Strom und 18,6 TJ Wärme entstehen. Die Potenziale von Miscanthus und von Triticale mit der energetischen Nutzung der Zwischenfrucht Chinakohlrübsen liegen leicht darunter in einer ähnlichen Größenordnung von ca. 35 TJ in Pflanzen eingebundener Energie. Das geringste Energiepotenzial hat die Dauerwiese. Dies ist bedingt durch den geringen Trockenmasseertrag einerseits und die geringe, zur Verfügung stehenden Fläche von knapp 6000 ha.

5.2 Biomassebereitstellung unter Berücksichtigung des Klimawandels

Nach heutigem Wissensstand muss von einer relativ raschen globalen Klimaveränderung während der nächsten Jahrzehnte ausgegangen werden. Einige dieser Veränderungen sind bereits spürbar bzw. messbar. Obwohl die langfristige Entwicklung aufgrund der Komplexität der beteiligten Prozesse und Ursache-Wirkungs-Prinzipien nur schwer abschätzbar ist, ist nach heutigem Stand davon auszugehen, dass sich der in den 90er Jahren beobachtete Trend der Erwärmung weiterhin fortsetzt. Dadurch werden auch die Bedingungen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion und die Auswahl der angebauten Kulturen nachhaltig beeinflusst.

Klimaentwicklung 1951 bis 2000

Das Land Baden-Württemberg hat 2002 eine Studie über die Klimaentwicklung in Auftrag gegeben, die Arbeiten wurden Anfang 2005 abgeschlossen (PIK 2005). In Baden-Württemberg war der Studie zwischen 1951 und 2000 eine deutliche Klimaänderung zu verzeichnen.

Die Entwicklung in diesen 50 Jahren lässt sich wie folgt zusammenfassen (FRANKE 2007, PARLOW et al (2006)):

- Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um bis zu 1.5 °C
- Rückgang der Frosttage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) im Mittel um 30 Tage
- Zunahme der Sommertage ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) im Mittel um 20 Tage
- Niederschlagszunahme in der Jahressumme um bis zu 250 mm
- Zunahme der Starkniederschlagstage um bis zu 11 Tage

Es wird davon ausgegangen, dass sich die beobachteten Trends zukünftig mindestens fortsetzen, wenn nicht gar verstärken werden (vgl. Abbildung 31).

Laut der Prognose des PIK (2005) werden in den kommenden Jahren besonders im Westen und Norden von Baden-Württemberg die Jahresniederschläge deutlich zunehmen, wobei es zu einer saisonalen Verschiebung im Jahresverlauf kommt. Im Sommerhalbjahr ist mit weniger Niederschlägen zu rechnen, während die Winter nasser werden.

Auch der Temperaturanstieg ist dieser Studie zufolge in besonderem Maße im Norden und Westen Baden-Württembergs zu erwarten.

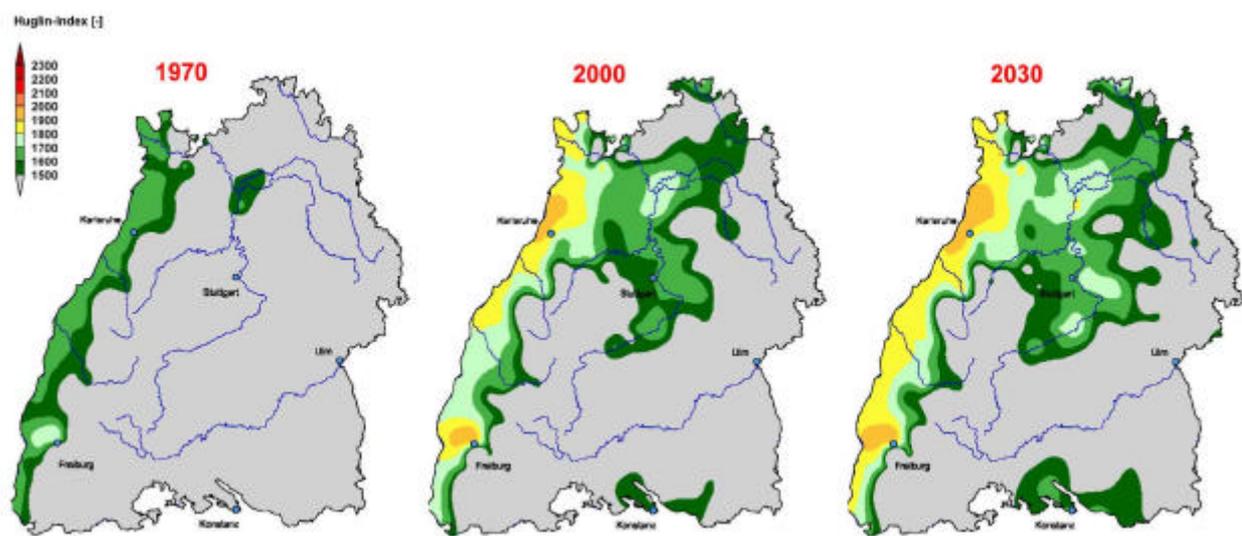


Abbildung 31: Huglin-Index³ für Baden-Württemberg - zehnjähriger gleitender Mittelwert für die Dekaden 1961-1970, 1991-2000 und 2021-2030 (Quelle: PIK 2005)

Schadensereignisse

Seit den 70er Jahren zeigt sich in Deutschland der Trend zunehmender Extremwetterereignisse sowohl in Bezug auf ihre Häufigkeit als auch auf die Schäden, die dadurch verursacht werden (LFU 2005). Einen Eindruck über die Zunahme starker Hagelereignisse, die besonders bei einjährigen Kulturen Schäden bis hin zum Totalausfall bewirken können (und in den

³ Huglin Index: $\text{Summe vom } 1.4 - 30.9 \left((T_{\max} - T_{\text{basis}}) + (T_{\text{mittel}} - T_{\text{basis}}) * K \right) / 2$

letzten Jahren auch kleinräumig verursacht haben), gibt Abbildung 32. Hier ist die Auswertung der Schadensdaten der Sparkassen-Versicherung Baden-Württemberg (LFU 2005) dargestellt. Bei der Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Schäden in den letzten 20 Jahre (korrigiert um die jährliche Veränderung der Vertragszahlen), zeigte sich eine zunehmende Anzahl der Schadensmeldungen als auch der Schadenssummen.

Obwohl vieles dafür spricht, dass auch in Zukunft eher mit einer Verstärkung als mit einer Abschwächung der bereits beobachteten Veränderungen zu rechnen ist, lässt sich die zukünftige Entwicklung von Temperaturen und Niederschlägen sowie die Häufigkeit anderer meteorologischer Ereignisse wie Stürme und Hagel allerdings nicht ohne weiteres aus den bisherigen Trends projizieren (LFU 2005).

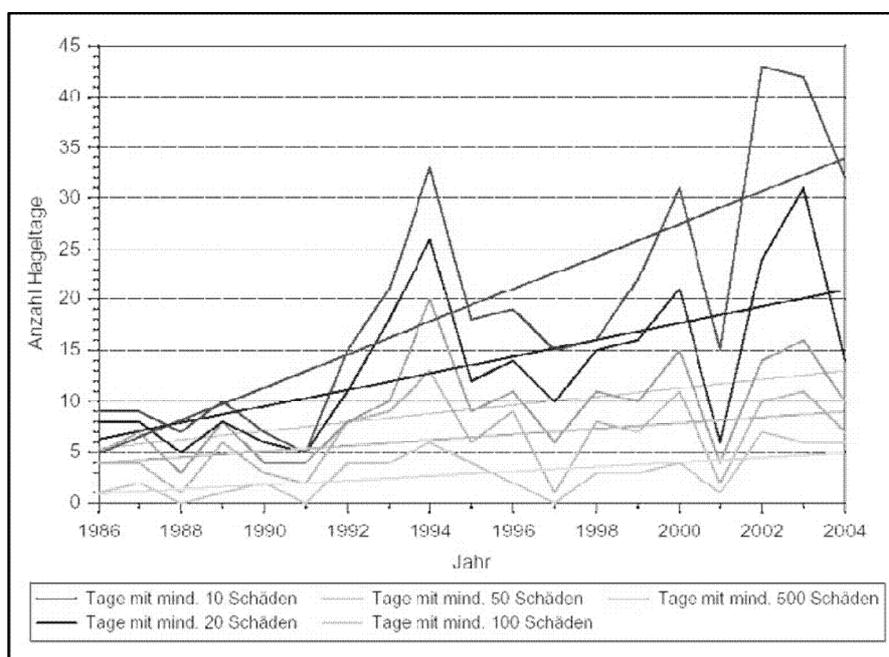


Abbildung 32: Anzahl der jährlichen Hageltage in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1986-2004 für verschiedene Schwellwerte nach Daten der SV Versicherung.

Gerade Linien = Ausgleichsgeraden

(Quelle: LFU 2005)

Voraussichtliche Klimaentwicklung bis 2050

Nach den aktuellen Klimamodellen ist allerdings innerhalb der nächsten 100 Jahre eine Beschleunigung der bereits eingesetzten globalen Erwärmung zu erwarten. Dabei wird von einer mittleren globalen Temperaturerhöhung zwischen 1,4 und 5,8 °C in den kommenden 100 Jahren ausgegangen (IPCC 2001).

Die in Süddeutschland zu erwartende Veränderung der regionalen Klimasituation wurde von den Forschungsprojekten KLIWA und KLARA („Klimawandel Auswirkungen, Risiken, Anpassung“) für die kommenden 50 Jahre untersucht.

Obwohl bei allen Modellen noch methodische Unsicherheiten bestehen, decken sich die regionalen Prognoseergebnisse der unterschiedlichen Modelle (PIK 2005, LFU 2005, ARBEITSKREIS KLIWA 2006). Sie prognostizieren eine Fortsetzung der bereits im Verlauf des 20. Jahrhunderts eingetretenen Veränderungen. Für Baden-Württemberg ist demnach im Vergleich

zum Ist-Zustand bis 2050 mit einem Temperaturanstieg um ca. 2 °C im Winterhalbjahr und ca. 1,4 °C im Sommerhalbjahr zu rechnen. Regional wird ein stärkerer Anstieg am südlichen Oberrhein als in anderen Gegenden Baden-Württembergs erwartet. Eine Untersuchung des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, hält für den süddeutschen Raum einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von mehr als 4 °C bis zum Jahr 2100 für möglich (UBA 2006).

Die Niederschlagsmodelle rechnen in Zukunft mit einer deutlichen Änderung vor allem in der Niederschlagsverteilung innerhalb des Jahres bei in etwa gleichbleibenden Jahresniederschlagssummen. Die erwartete Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Sommerhalbjahr zugunsten einer Zunahme der Winterniederschläge kann am südlichen Oberrhein zwischen 20 % und 50 % der Jahresniederschlagsmenge betragen (PARLOW et al. 2006). Insgesamt ist also künftig mit einer höheren Trockenheit in der Vegetationsperiode zu rechnen.

Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Für die Landwirtschaft ergeben sich durch den Klimawandel unterschiedliche Auswirkungen, wobei teils günstige, teils nachteilige Effekte zu erwarten sind. Generell hat zwar die Erwärmung zunächst einen positiven Einfluss für den Maisanbau, während der zu erwartende Trockenstress bei Mais, vor allem aber bei Weizen z.T. einen deutlichen Rückgang der Erträge bewirken kann.

CHRISTEN (2006) sieht Mais eher als Profiteur des Klimawandels. Dabei könnte aufgrund der zunehmenden Niederschläge im Herbst die Tendenz zur früheren Ernte des noch nicht vollständig ausgereiften Maises zur Nutzung als Silomais anstatt Körnermais gehen. Für Triticale, das im Sommer einen vergleichsweise höheren Wasserbedarf hat, verschlechtern sich dagegen die Anbaubedingungen. Für Getreide wird im Mittel mit einem Ertragsrückgang von 14 % gerechnet (PIK 2005).

Weitere wichtige Einflussgrößen für die Anbaufähigkeit und den Ertrag vieler Kulturen sind neben dem verfügbaren Wasser und der herrschenden Temperatur auch der Befallsdruck von spezifischen Schädlingen, der wiederum vom Klima beeinflusst werden.

Die Infektionsgefährdung durch Pilzkrankheiten hängt u.a. von der Durchlüftung der Bestände ab. Durch die Klimaerwärmung in Zusammenhang mit feuchteren Frühjahren kann es zu einem Anstieg der Gefahr von Primärinfektionen (April bis Mai) im Frühjahr sowie zu einer höheren Wahrscheinlichkeit für Sekundärinfektionen (Juni) kommen.

Mit Hilfe eines Waldwachstumsmodells wurde die für die Zukunft zu erwartende Produktivität der baden-württembergischen Wälder überprüft, was bedingt auch Hinweise für den landwirtschaftlichen Anbau von Salix geben könnte. Hier ist unter dem verwendeten Szenario mit leicht positiven Trends zu rechnen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Verlängerung der Vegetationsperiode für Buche und Eiche durch früheren Blattaustrieb mit einem Gewinn an Produktivität verbunden ist.

Durch das frühere Eintreten der Bäume in phänologische Phasen im Frühjahr wird eine höhere Produktivität infolge früheren Blattaustriebs erwartet. In wieweit dies auch für Holzplantagen gilt, ist nicht überprüft worden, ähnliche Effekte sind aber zu vermuten. Die Jahresproduktivität von Bäumen im Wald steigt pro Tag früheren Austriebs um 0.5 bis 1 % an.

Insgesamt ist im Bereich der Forstwirtschaft mit geringeren Effekten als in der Landwirtschaft zu rechnen, da bei den für die Produktivität in diesem Bereich verantwortlichen Jahresniederschlagssummen wenig Änderungen erwartet werden. Ein Anstieg der Schäden durch Wetterextreme und Schädlinge ist allerdings auch hier möglich, wobei die Ertragsgefährdung hier weniger hoch einzuschätzen ist als diejenige des landwirtschaftlichen Anbaus, insbesondere der einjährigen Kulturen.

Für die untersuchten Bioenergieszzenarien bedeutet dies negative Effekte für Mais und besonders für Triticale, bei denen zukünftig zusätzlich zum erhöhten Ausfallrisiko durch Schadensereignisse von einem trockenheitsbedingten Ertragsrückgang ausgegangen wird. Besonders durch die Kombination aus Ertragsrisiko, welches hohe Düngerhinterlassenschaften verursachen kann, und steigenden Herbst- und Winterniederschlägen, kann es zu erhöhter Nitratauswaschung kommen. Die Dauerwiese ist demgegenüber mit geringeren Risiken behaftet. Zu Miscanthus und Salix als Kurzumtriebsgehölz wurden aufgrund der derzeit noch geringen Bedeutung keine expliziten Untersuchungen durchgeführt. Wird unterstellt, dass die Aussagen aus dem Forstbereich innerhalb gewisser Grenzen übertragbar sind, ist für Salix eine Zunahme der Produktivität durch die verlängerte Vegetationsperiode möglich. Salix und auch Miscanthus haben im Bereich des Trockenstress Vorteile gegenüber den einjährigen Kulturen, da sie über ein mehrjährig ausgebildetes Wurzelwerk verfügen und dadurch in tieferen Bodenschichten vorhandenes Wasser besser erschließen können. Zudem durchlaufen die Dauerkulturen im Laufe der Vegetationszeit weniger sensible Phasen (z.B. Blüte, Ährenschieben etc. bei Mais und Getreide), in denen die einjährigen Kulturen empfindlich auf Trockenstress reagieren. Besonders der im Untersuchungsgebiet sehr verbreitete Mais wurde in den vergangenen Jahren stellenweise durch Hagel oder Trockenheit bis hin zum Totalausfall geschädigt (HAAKH et al. 2007).

6 Diskussion der Ergebnisse

Anbau

Der Anbau der Dauerkulturen Miscanthus und Salix hat über alle betrachteten Wirkkategorien eine geringere Umweltlast als die Fruchtfolgen. Auch die Dauerwiese besitzt bei allen Wirkkategorien bessere Werte mit Ausnahme des Versauerungspotenzials. Im Bereich der Nitratauswaschung zeigt die Dauerwiese die geringste Umweltwirkung, gefolgt von den Festbrennstoffen Miscanthus und Salix. Die Referenzfruchtfolge weist hier ein deutlich höheres Belastungspotenzial auf, jenes der Energiefruchtfolge liegt allerdings noch darüber. Trotz der angebauten Zwischenfrüchte, die als „catch-crops“ fungieren und nach Ernte der Hauptkultur überschüssiges Nitrat aufnehmen, ist das Nitratauswaschungspotenzial bei den Energiepflanzen der Fruchtfolge und unter diesen bei Triticale am höchsten.

Auch in Bezug auf den Bedarf an nicht erneuerbaren Energien, beim Treibhaus- und beim Ozonbildungspotenzial belasten die Dauerkulturen die Umwelt weniger als die Fruchtfolgen, da die Dauerkulturen insgesamt deutlich weniger maschinelle Bewirtschaftung und weniger mineralische Dünger benötigen.

Die Energiefruchtfolge weist gegenüber der Referenzfruchtfolge ein höheres Ozonbildungspotenzial auf, da bei den Energiekulturen ein intensiverer Bewirtschaftungsaufwand (Bodenbearbeitung, Ernte) notwendig und mehr Biomasse zu transportieren ist. Der Anteil an mineralischem N-Dünger ist wegen der Substituierung durch Gärsubstrat geringer. Innerhalb der Dauerkulturen hat Salix aufgrund des geringen Düngereinsatzes und der nur alle drei Jahre durchgeführten Erntearbeiten die geringste Umweltlast. Die Dauerwiese profitiert davon, dass durch die Rückführung des Gärsubstrates aus der Biogasanlage weitgehend auf Mineraldünger verzichtet wird. Dies wirkt sich allerdings nachteilig auf das Versauerungspotenzial aus. Die Rückführung des Gärsubstrates bedingt Lachgasemissionen (N_2O), die bei der Energiefruchtfolge dafür verantwortlich sind, dass auch das Eutrophierungspotenzial deutlich höher ist als bei der Referenzfruchtfolge.

Silomais hat als düngungsintensivste Kultur den höchsten Energiebedarf, gefolgt von Triticale. Beim Vergleich pro kg organischer Trockensubstanz, der für die weitere Verarbeitung ausschlaggebend ist, verschiebt sich das Verhältnis jedoch wieder zu Gunsten des Silomais, da Triticale niedrigere Erträge bringt. Bei den Dauerkulturen weisen Miscanthus und Salix ähnlich günstige Umweltwirkungen beim Energiebedarf auf, während die Dauerwiese wegen geringerer Erträge einen höheren Energiebedarf pro kg organische Trockensubstanz als die Festbrennstoffe hat, aber energetisch immer noch günstiger ist als Silomais und Triticale.

Durch die geringere Düngung und eine permanente Bodenbedeckung besitzen die Dauerkulturen Salix und Miscanthus das geringste Eutrophierungspotenzial, gefolgt von der Dauerwiese. Trotz einer besseren Umweltwirkung bezogen auf die Fläche weist die Dauerwiese durch den geringen Biomasseertrag pro kg organische Trockensubstanz ein ähnlich hohes Eutrophierungspotenzial auf wie Silomais.

Die Dauerwiese und die Dauerkulturen, bei denen während der 18 jährigen Wachstumsphase keine Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden, weisen ebenfalls eine deutlich geringere Toxizität auf als die Fruchtfolgen, wobei hier die Referenzfruchtfolge schlechter abscheidet als die Energiefruchtfolge.

Energieerzeugung aus Biomasse

Bei Betrachtung des gesamten Lebensweges der Biomasse einschließlich ihrer energetischen Nutzung tragen grundsätzlich alle vier Anbausysteme zur Einsparung (zwischen ca. 22 und 28,5 MJ / kg oTS) von fossilen Energieträgern bei. Dabei haben je kg organischer Trockensubstanz Miscanthus und Dauerwiese das höchste Einsparpotenzial. Miscanthus ist auch flächenbezogen überlegen, während das Einsparpotenzial der Dauerwiese bezogen auf die Fläche aufgrund des relativ geringen Flächenertrags deutlich tiefer liegt. Salix dagegen hat ein geringeres Einsparpotenzial, da im Vergleich zu Miscanthus weniger Energie gutgeschrieben wird, die im System für die Vortrocknung von Salix benötigt wird.

Hinsichtlich ihres Treibhauspotenzials unterscheidet sich die energetische Verwertung der Biomasse aus den vier Anbausystemen nur geringfügig, wenn sie je kg oTS betrachtet werden. Dies ändert sich bei Betrachtung pro Fläche. Die Fruchtfolge Energie und Miscanthus tragen zwar, aufgrund ihres hohen Flächenertrages, wesentlich mehr zum Treibhauspotenzial bei, zeigen aber gleichzeitig pro Hektar eine wesentlich höhere Produktion an Strom und Wärme als die ertragsschwächere Dauerwiese und Salix.

Der Verwertungsweg über Biogasanlagen schneidet je kg Biomasse im Treibhauspotenzial, im Versauerungspotenzial und im Eutrophierungspotenzial etwas günstiger ab als der Verwertungsweg über Feuerungsanlagen. Beim Ozonbildungspotenzial unterscheiden sich die vier Anbausysteme in den beiden Verwertungswegen kaum.

Bezieht man die Umweltlasten auf die Produktion von 1000 MJ Strom (vgl. Abbildungen im Anhang), so macht es hinsichtlich des Treibhauspotenzials kaum einen Unterschied, mit welchen Anbausystemen man diesen Strom produziert und über welchen der beiden Verwertungswege. Pro 1 MJ über die energetische Nutzung von Biomasse produzierten Stroms (und der dabei entstehenden Wärme) werden je nach Anbausystem zwischen 0,2 und 0,3 kg CO₂ eingespart. Beim Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial schneiden die beiden Feuerungsvarianten günstiger ab, da die Dauerkulturen Miscanthus und Salix deutlich weniger Emissionen in der Anbauphase aufweisen als die Fruchtfolge Energie und die Dauerwiese. Berücksichtigt man zusätzlich auch noch den Output an Wärme, so ergibt sich im Gesamtergebnis ein deutlicher Vorteil für Miscanthus. Hinsichtlich des Ozonbildungspotenzials ergeben sich für alle vier Anbausysteme Einsparpotenziale durch die Gutschriften für Strom, Wärme und Düngemittel.

Die Toxizitätspotenziale werden dominiert vom Anbau der Biomasse. Hinsichtlich des Verwertungsweges zeigen sich nur geringfügige Unterschiede beim Humantoxizitätspotenzial.

Die Umweltwirkungen der Transporte der Biomasse zur Anlage und der Transporte der Gärsubstrate und Aschen sind von untergeordneter Bedeutung. Hier könnte eventuell in einem zweiten Schritt geprüft werden, ab welcher Transportentfernung Umweltwirkungen relevant werden.

Grundsätzlich führt eine Strombereitstellung aus Biomasse im Vergleich zu aus fossilen Quellen bereitgestelltem Strom zu einer Umweltentlastung hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs an nicht erneuerbaren Energieträgern und hinsichtlich des Treibhauspotenzials. Die Strombereitstellung aus Biomasse führt aber auch zu einer Mehrbelastung der Umwelt hinsichtlich der Wirkkategorien Eutrophierungspotenzial und Versauerungspotenzial.

Wirtschaftlichkeit

Die Märkte für landwirtschaftliche Produkte und hier vor allem der Nutzpflanzen sind derzeit stark in Bewegung. Es kann davon ausgegangen werden, dass die steigende Nachfrage nach landwirtschaftlichen Bioenergieträgern über die Flächenkonkurrenz auch auf die Erzeugererlöse für pflanzliche Nahrungsmittel durchschlägt, so dass auch unter zukünftigen, veränderten Marktbedingungen das Verhältnis ähnlich bleiben wird.

Demzufolge wirkt sich eine Verbesserung der zugrunde gelegten, eher konservativen Annahmen für die Einnahmen aus der Biomasseproduktion ebenfalls auf die Erzeugererlöse der Nahrungsmittelproduktion aus.

Die Deckungsbeitragsrechnung ergibt ohne Berücksichtigung von Flächenzahlungen in der Referenzfruchtfolge nur für Körnermais und in geringerem Umfang bei Braugerste ein positives Ergebnis für den Betrieb. Innerhalb der Energiefruchtfolge fällt auf, dass hier die aus Fruchtfolgegründen vorgesehenen Marktfrüchte (Nahrungsmittel) ein negatives Ergebnis erzielen, während die Energiekulturen Silomais und Triticale einen positiven Deckungsbeitrag aufweisen. Das über alle Jahre gesehen insgesamt positive Gesamtergebnis der Energiefruchtfolge wird allerdings von den durchschnittlichen jährlichen Deckungsbeiträgen der Dauerkulturen Miscanthus und Salix deutlich übertroffen, die sich in diesem Punkt für die Landwirtschaft am attraktivsten darstellen. Die Dauerwiese bringt 20 % des Deckungsbeitrages der Referenzfruchtfolge, die als zweitschlechteste untersuchte Alternative abschnitt, mit Abstand den geringsten Deckungsbeitrag. Dabei ist zu beachten, dass die Dauerwiese in der Ökobilanz und in der wirtschaftlichen Analyse als in sich geschlossenes System betrachtet wird, bei dem nur das für diese Kultur anfallende Gärsubstrat als Dünger auf die Fläche zurückgeführt wird, während der restliche Nährstoffbedarf durch zugekauften Mineraldünger gedeckt wird. Unter der Voraussetzung, dass weitere Gärreste aus der Biogaserzeugung anderer Substrate zur Düngung der Wiese zur Verfügung stehen, wäre der Deckungsbeitrag nur noch geringfügig unterhalb der Referenzfruchtfolge.

Beim Vergleich der Vollkosten der pflanzlichen Energieerzeugung (frei Hof, ohne Kosten der Konversion) ergibt sich, dass Miscanthus ausgedrückt in €/t/MJ die preiswerteste Biomasse darstellt. Salix und Silomais liegen mit leicht höheren Vollkosten frei Hof auf ähnlichem Niveau, wobei zur Trocknung der sehr feucht geernteten und damit nicht lagerfähigen Salix ein Teil des Energieertrages aufgewendet werden muss. Demzufolge schneidet sie beim Vergleich der lagerfähigen Biomassen (bei Feuchtbiomassen ist dabei die Silierung berücksichtigt) ungünstiger ab als Silomais und Triticale. Die Dauerwiese ist auch im Vollkostenvergleich die teuerste Art der pflanzlichen Energiebereitstellung.

7 Schlussfolgerungen

Die Analyse der Kulturen zum einen hinsichtlich ihres Anbaus und ihrer energetischen Verwertung und zum anderen hinsichtlich ihres Energiebedarfs und ihrer Umweltwirkungen ergibt eine sehr differenzierte Bewertung. Eindeutige Empfehlungen sind schwierig, da Umweltlasten in verschiedenen Wirkkategorien entstehen. Zusätzlich muss bei der Gesamtbewertung zwischen zwei unterschiedlichen Zielsetzungen unterschieden werden:

- liegt das primäre Interesse in einer flächeneffizienten Erzeugung landwirtschaftlicher Bioenergie, bei der unter möglichst geringem Flächenverbrauch eine maximale Menge Energie erzeugt werden soll – oder -
- liegt der Schwerpunkt in einer möglichst umweltverträglichen Flächennutzung, bei der Bioenergieträger als Alternative zu Marktfrüchten erzeugt werden?

Im ersten Fall wären die Umweltlasten bezogen auf den Biomasseertrag (kg oTS) oder MJ zu vergleichen, während im zweiten Fall die Umweltbeeinträchtigung auf den Hektar Anbaufläche zu beziehen sind.

In beiden Fällen muss die wirtschaftliche Tragfähigkeit unter gegebenen und zu erwartenden politischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, da diese die Voraussetzung für die landwirtschaftliche Erzeugung der betrachteten Biomassen ist.

Im Überblick ergeben sich unter beiden Gesichtspunkten Vorteile für den Anbau und die Nutzung der Festbrennstoffe Miscanthus und Salix gegenüber den Feuchtbiomassen Triticale, Silomais und der Dauerwiese. Die ist einerseits auf den extensiveren Anbau und andererseits auf den in den meisten Fällen höheren Energieertrag je Hektar zurückzuführen. Die Dauerwiese trägt mit einer hohen Versauerung zu einer Beeinträchtigung der Umwelt bei. Durch den geringen Energieertrag je Hektar ist die Dauerwiese weniger geeignet zur flächeneffizienten Energieerzeugung.

Im Hinblick auf die Eignung von Bioenergiekulturen zur Nitratsanierung des Grundwassers bzw. von Standorten in Wasserschutzgebieten zeigt sich, dass die Dauerkulturen gegenüber den Fruchtfolgen eine deutliche Verbesserung darstellen, allen voran die Dauerwiese, bei der keine Nitratauswaschung zu erwarten ist. Insbesondere die hier untersuchte Energiefruchtfolge ist für eine Grundwassersanierung nicht geeignet. Sie müsste zu diesem Zweck optimiert werden.

Auch im wirtschaftlichen Vergleich liegen die Festbrennstoffe vorne. Sowohl aus Sicht der Landwirtschaft, die bei gegebenen Marktbedingungen hier die höchsten Deckungsbeiträge erzielen kann, als auch bei den Vollkosten der Erzeugung der Biomasse, die als Teil der Energiegestehungskosten als Gesamtprozess entstehen, liegt Miscanthus an erster Stelle, je nach Betrachtungsweise gefolgt von Salix oder den Biogaskulturen Silomais und Triticale.

Auch unter Berücksichtigung der zu erwartenden Klimaveränderungen sind Miscanthus und Salix sowie hier aus die Dauerwiese weniger kritisch zu bewerten als die Kulturen der Energiefruchtfolge.

Durch das Projekt wurden einige wichtige Fragen geklärt und damit die Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl der geeigneten Kultur bzw. des Anbausystems unter verschiedenen Zielsetzungen verbessert. Trotz der vielfältigen Vorteile der Dauerkulturen Miscanthus und Salix sollte die Konsequenz dieser Untersuchung nicht sein, die zur Bioenergieproduktion zur Verfügung stehende Fläche komplett mit diesen Kulturen zu bedecken. Die Ökobilanz ist zwar ein geeignetes Werkzeug zur Bestimmung der Umweltwirkungen von Prozessen und Produkten, aber dabei ist zu beachten, dass aus Aufwandgründen in dieser Arbeit die Effekte auf das Klima und die Grundwasserqualität im Vordergrund standen und auch einige andere Aspekte wie Human- und Ökotoxizität mit berücksichtigt wurden. Andere Gesichtspunkte, die in weiteren Wirkkategorien wie z.B. der Einfluss auf die Biodiversität (Artenvielfalt) und das Landschaftsbild konnten hier nicht im Detail analysiert werden, sollten aber ebenso Berücksichtigung finden wie die Versorgungssicherheit der Anlagen mit Biomasse, so dass eher ein Mix verschiedener Energiepflanzen empfohlen wird, in dem die in diesem Bericht günstig bewerteten Kulturen einen großen Anteil haben sollten.

8 Literatur

- Agrobränslé [Hrsg.] (2005): Manual *Salix viminalis*. Ackerbauliche Informationen zum Weidenanbau. Informationsblatt der Firma AgrobränsléÖrebro, Schweden, 5 S.
- Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte Heft. 9, Karlsruhe, 100 S.
- Arndt, J. (2005): Landwirtschaft in Baden-Württemberg – ein Mosaik aus regionaler Vielfalt. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg, 2/2005.
- Aronsson, P. G. & Bergstrom, L. F. (2001): Nitrate Leaching From Lysimeter-Grown Short-Rotation Willow Coppice in Relation to N-Application, Irrigation and Soil Type, *Biomass & Bioenergy*, 21/3 155-164.
- Bullard and Metcalfe, (2001): Estimating the energy requirements and CO₂ emissions from production of the perennial grasses *Miscanthus*, switchgrass and reed canary grass. ETSU B/U1/00654/REP.
- Buxton D. R., Muck R. E. & Harrison J. H. [Eds.] (2003): *Silage Science and Technology*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. Agronomy No 42. S. 70.
- Casova, K.; Gulholm-Hansen, T.; Javorska, H.; Theriault, F.; Tucker, M. (2003). The Potenzial for Perennial Grasses as Energy Crops in Organic Agriculture, Ecological Agriculture I, SOCRATES European Common Curriculum (05 85 00), Department of Agricultural Sciences, the Royal Veterinary and Agricultural University Denmark, retrieved 20.2.2006 from http://www.kursus.kvl.dk/shares/ea/03Projects/32gamle/_2003/perennial_grasses.pdf
- Christen, O. (2006): Vorteile für den Mais? *Mais* 4/2006, S. 160/161.
- Dederer, M. (2007): Anbau nachwachsender Rohstoffe für die energetische Biomassennutzung - Chance für die Landwirtschaft oder nur Pachtpreistreiberei? 59. Landwirtschaftliche Woche Nordhessen, 9. Januar 2007.
- Franke, W. (2007): Szenarien der Klimaentwicklung für Baden-Württemberg. Ergebnisse aktueller Forschungsvorhaben zum Klimawandel im regionalen Kontext. Abschlussveranstaltung Regionale Klimaanalyse Südlicher Oberrhein (REKLISO) 26.01.2007, Freiburg.
- Öko-Institut [Hrsg.] (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht zum Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger: FZ Jülich. Selbstverlag Darmstadt, 264 S.
- Frischknecht, R., Jungbluth N., Althaus, H.-J., Doka G., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitze, G. & Spielmann, M. (2004): Overview and Methodology - ecoinvent data v1.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (ecoinvent), Dübendorf; ecoinvent report 1, 75 p.
- GaBi 4 (2003): Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. LBP, Universität Stuttgart und PE International GmbH (vormals PE Europe), Leinfelden-Echterdingen, April 2003.

- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., Lindeijer, E., Roorda, A. A. H. & Weidema, B. P. (2001): Life cycle assessment - An operational guide to the ISO standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Netherlands.
- Haakh, F., Scheck, R., Selz, M., Kaatz, C. & Ball, T. (2007)(in Vorbereitung): Vergleichende Untersuchung von Hoftorbilanzen und Nmin-Werten zur Verbesserung der Nitrat-Emissionskontrollen. Endbericht zum Projekt 2003/08 des Innovationsfonds Klima und Wasserschutz der badenova AG.
- Hauschild M & Wenzel H., 1998. Environmental Assessment of Products: Scientific background. Chapman&Hall, London, 565 p.
- Hildebrandt, R. (2006): Die Deckungsbeitragsrechnung als Instrument der strategischen Unternehmensführung. Verlag Rüdiger Hildebrandt, München. 155 S.
- Hofmann M. (1998): Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen Kurzumtrieb. Merkblatt 11 des Forschungsinstituts für schnellwachsende Baumarten. Hann.Münden(Hrsg.), 22 S.
- IPCC, 2001. Climate Change (2001): The Scientific Basis. In: Houghton, J. T. et al. (eds.), Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge, UK.
- KTBL (2006a): Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/07. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 20. Aufl., Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, 672 S.
- KTBL (2006b):Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, 372 S.
- Landesanstalt für Pflanzenbau - Forchheim [Hrsg.] (2005):Düngung von Wiesen und Weiden. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 13 (3. Aufl.) Grünland, Wiesen, Weiden, Düngung. Rheinstetten, 8 S.
- LEL (2005): Kalkulationsdaten Marktfrüchte, Ernte 2004 / 2005. Deckungsbeiträge / Vollkosten. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume (LEL), Schwäbisch Gmünd, 110 S.
- LFU Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg [Hrsg.] (2005): Umweltforschung-Journal 2005, Umweltforschung in Baden-Württemberg – Beiträge für eine sichere Zukunft. Karlsruhe. 51 S.
- LUBW (2006): Nitratherkunft im Bodenwasser und Grundwasser. Abschlussbericht Interreg IIIa Projekt „MoNit“, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe,133 S.
- LVVG (2006): persönliche Mitteilung Dr. Hansjörg Nussbaum, Bildungs- und Wissenszentrum Aulendorf - Viehhaltung, Grünlandwirtschaft, Wild, Fischerei – (ehemalige Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft (LVVG)).

- Müller-Sämann, K.M., Reinhardt, G., Vetter, R. & Gärtner, S. (2003): Nachwachsende Rohstoffe in Baden-Württemberg: Identifizierung vorteilhafter Produktlinien zur stofflichen Nutzung unter besonderer Berücksichtigung umweltgerechter Anbauverfahren. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Karlsruhe, retrieved 20.2.2006 from <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWA20002SBer.pdf>
- Nemecek, T. & Erzinger, S. (2005): Modelling Representative Life Cycle Inventories for Swiss Arable Crops. *Int J LCA*, 10: 68-76.
- Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D. & Gaillard, G. (2005): Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich; Schriftenreihe der FAL 58, 155 p.
- Parlow, E., Scherer, D. & Fehrenbach, U. (2006): Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (REKLISO). Wissenschaftlicher Abschlussbericht, erstellt im Auftrag des Regionalverbandes Südlicher Oberrhein, Freiburg. 98 S.
- PE (2007): Glossar der PE International GmbH. Online verfügbar unter <http://www.pe-international.com/pe-international/company/glossary/>
- PIK (2005): Verbundvorhaben Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA). Analyse spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen. PIK Report 99, Abschlussbericht, Potsdam Institute for Climate Impact Research.
- Richner, W., Oberholzer, H.-R., Freiermuth Knuchel, R. & Walther, U. (2006): Modell zur Beurteilung des Nitratauswaschungspotenzials in Ökobilanzen - SALCA-NO₃. Unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, N-Düngung), der mikrobiellen Nitratbildung im Boden, der Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen und verschiedener Bodeneigenschaften. Agroscope FAL Reckenholz, Verfügbar im Internet: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/control/bilanz/publ9905.pdf>, 25 p.
- Rossier, D. & Gaillard, G. (2004): Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs - Methode und Anwendung in 50 Landwirtschaftsbetrieben. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich; FAL-Schriftenreihe 53, 142 p.
- STALA [Statistisches Landesamt Baden-Württemberg] (2006): Statistische Daten Landwirtschaft und Umwelt 5/2006.
- Stauffer, W. & Spiess, E. (2001): Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen auf die Nitratauswaschung. Agrarforschung.
- Textor, B. (2006): Die Ernte forstlicher Rohstoffe auf landwirtschaftlichen Flächen im Kurzumtrieb. In: LAP, Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim (2006): Pflanzliche Rohstoffe zur energetischen Nutzung. Workshop am 4.06.2006, Rheinstetten.
- UBA 2006: UBA aktuell2/2006. Informationen aus dem Umweltbundesamt, Dessau. 16 S.
- Volk, T.A., Verwijst, T., Tharakan, J.P., Abrahamson, L.P., & White, E.H. (2004): Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops, *Front Ecol Environ* 2004; 2(8): 411-418
- Wenzel, H. & Hauschild, M. (1998): Environmental Assessment of Products: Scientific background. Chapman & Hall, London, 565 p.

Glossar:

Die Grundlage für dieses Glossar ist ein Glossar der PE International (PE 2007), welches von der Projektgruppe ergänzt wurde.

Allokation

Verfahren bekannt aus der Betriebswirtschaft zur Zuordnung und quantitativen Aufteilung der Input- und Outputflüsse eines Prozesses mit mehreren Produkten auf die einzelnen Produkte. Erforderlich bei Mehrproduktsystemen, um auch zu einzelnen (freigeschnittenen) Produkten Ökobilanzen erstellen zu können. Die Allokation kann erfolgen nach z.B. Masse, Inhaltstoffen, technischen Zusammenhängen oder Preisen. Die Allokation ist eine wichtige Methode um sinnvolle Aussagen aus Prozesskettenanalysen für einzelne Produkte generieren zu können.

Annuelle Kultur

Einjährige Kultur (Gegenteil: mehrjährig = perennierend). Darunter sind Kulturen zu verstehen, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in einjährigen Anbauzyklen kultiviert werden.

Auswertung

Bestandteil einer Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz und/oder der Wirkungsabschätzung mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen zusammengeführt werden, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, Optimierungsansätze zu erkennen, Schwachstellen zu identifizieren und Empfehlungen geben zu können.

CO₂-Äquivalent

Bezeichnung für die Wirkung einer für den Treibhauseffekt relevanten (Gas-) Emission, zur äquivalenten Wirkung einer Menge CO₂. Andere Gase als CO₂ (z. B. CH₄, CO) werden so auf CO₂ umgerechnet (Äquivalenzfaktoren).

Direkte Feldemissionen

Emissionen von Stickstoff- und Phosphorverbindungen, welche direkt auf dem Feld entstehen und daher eine spezifische Modellierung erfordern.

Emissionen

von industriellen Anlagen, Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, Haushaltsheizungen oder bei sonstigen technischen Vorgängen in die Umwelt abgegebene feste, flüssige und gasförmige Stoffe oder Verbindungen sowie Geräusche, Strahlen, Wärme, Erschütterungen und ähnliche Erscheinungen.

Energiebedarf EB

auch Bedarf nicht erneuerbarer Energieressourcen. Energie aus erschöpflichen Quellen wie Erdöl, Erdgas oder Atomstrom. Der Energiebedarf wird meist in der Einheit Megajoule (MJ) angegeben.

Ertragsmesszahl

Die Ertragsmesszahl Kennzeichnet die naturale Ertragsfähigkeit des Bodens auf Grund der natürlichen Ertragsbedingungen, insbesondere der Bodenbeschaffenheit, der Geländegestal-

tung und der klimatischen Verhältnisse. Sie wird an Hand der Ergebnisse der amtlichen Bodenschätzung berechnet.

Eutrophierung

Als Eutrophierung bezeichnet man die Nahrungs- und Nährstoffanreicherung an einem Standort. Dieser Begriff wird für den Vorgang der Überdüngung durch natürliche und anthropogen bedingte Anreicherung von Stickstoff und Phosphor und die dadurch auftretende Störung des biologischen Gleichgewichtes verwendet. Man unterscheidet hierbei zwischen aquatischer und terrestrischer Eutrophierung in Abhängigkeit davon, ob der Nährstoffeintrag in Gewässer oder in Form luftgetragener Emissionen in Böden erfolgt. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird als Eutrophierung nur eine Überdüngung von Oberflächengewässern und Meeren verstanden. In der Natur läuft dieser Prozess zum Beispiel während des langsamen Alterns von Seen ab. Er kann aber durch abfließendes Wasser, welches von der Landwirtschaft belastet wurde (Einträge von Stickstoff (N) und Phosphor (P)) und durch Einleitung häuslicher und industrieller Abwässer beschleunigt werden.

Eutrophierungspotential (EP)

auch Überdüngungspotential. Die Bezugsgröße für das Eutrophierungspotenzial ist Phosphat (PO_4^{3-}) mit einem EP von 1,0 in kg PO_4 - äquivalent. Andere eutrophierende Emissionen werden auf die wirkungsäquivalente Phosphatmenge bezogen.

Funktionelle Einheit

Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems als Vergleichseinheit in einer Ökobilanz. Auf die Funktionelle Einheit werden alle Daten einer Ökobilanz bezogen.

Gewichtung

Die Gewichtung der einzelnen Umweltwirkungen untereinander ist ein Aspekt der ökologischen Bewertung im Rahmen von Life Cycle Engineering und Life Cycle Assessment, falls die unterschiedlichen Umweltwirkungen auf eine gemeinsame Kennzahl verdichtet werden sollen. Dieser Teil der Bewertung ist nicht naturwissenschaftlich begründbar. Es erfordert daher einen sorgsameren Umgang mit wertgetragenen Entscheidungen und Wertesystemen. Grundlage einer solchen Gewichtung können unterschiedliche Wertesysteme sein, die politisch oder gesellschaftlich gewonnen werden können, oder einer Unternehmenspolitik entsprechen. Durch eine Gewichtung erhält man keine neuen Erkenntnisse, sondern verdichtet lediglich Informationen. In der Praxis der industriellen Produktentwicklung und -optimierung wird daher oftmals auf eine explizite Gewichtung verzichtet.

Huglin-Index:

Temperatursumme vom 1.4 – 30.9 $((T_{\text{max}} - T_{\text{basis}}) + (T_{\text{mittel}} - T_{\text{basis}}) * K) / 2$

Input

Stoffe oder Energien, die einem Prozess oder einem System zugeführt werden. Ein Stoff kann sowohl Rohstoff als auch Produkt sein.

Kurzumtriebsplantage

Anlage zur Erzeugung von Feldholz auf Ackerland mit schnellwachsenden Baumarten (z.B. Salix), die im hier unterstellten Fall alle 3 Jahre komplett abgeerntet wird, woraufhin die Bäume wieder austreiben.

Nicht regenerierbare bzw. nicht regenerative Energieressourcen

Das sind Energieressourcen fossilen Ursprungs wie Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl, Uran etc.

Ökobilanz

(englisch: Life Cycle Assessment oder LCA); im deutschen Sprachraum Lebensweganalyse oder Lebenswegbewertung oder allgemein Ökobilanz. Erlaubt, die Lebenszyklen von Produkten und Dienstleistungen auf ihre ökologischen Auswirkungen hin zu untersuchen und transparent darzustellen. LCA ist die Zusammenstellung der Stoff- und Energieflüsse, die für ein Produkt entlang seines gesamten Lebensweges verursacht werden (Sachbilanz, Life Cycle Inventory (LCI)); Zusammenführung der Belastungen nach Wirkungen (Wirkungsanalyse, Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) und Bewertung mit unterschiedlicher Aggregation. Standardisierte Vorgehensweise nach ISO 14040 ff.

Ökoinventar

Ein Ökoinventar ist eine Sammlung von Daten zum Ressourcenverbrauch und zu den Emissionen von einzelnen Prozessen oder Gütern, wie z.B. der Herstellung von Pflanzenschutzmitteln oder dem Transport von 1kg eines Gutes mit einem Laster. In diesem Projekt werden die umfassenden Ökoinventare des schweizerischen ecoinvent-Zentrums (www.ecoinvent.ch) verwendet.

Ozonbildungspotential (OBP)

Photochemisches Oxidantienbildungspotential in kg C₂H₄- äquivalent, auch Sommersmog, bodennahe Ozonbildung (engl. Photochemical Ozone Creation Potential). Ozonbildungspotenzial ist das massebezogene Äquivalent der Bildung von bodennahem (troposphärischen) Ozon durch Vorläufersubstanzen, die für die bodennahe O₃- Bildung verantwortlich sind und so zum Sommersmog beitragen

Perennierende Kultur

Mehrjährige Kultur (Gegenteil: einjährig = annuell). Darunter sind Kulturen zu verstehen, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in mehrjährigen Anbauzyklen kultiviert werden.

Regenerative bzw. regenerierbare Energieressource

umfassen alle in relativ überschaubaren Zeiträumen erneut reproduzierbare Energien wie Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie oder Biomasse – die also nicht fossilen Ursprungs sind.

Reifezahl

Maßzahl für das Abreifeverhalten einer Maissorte. Seit 1998 ersetzt die Reifezahl die bisherige FAO-Zahl. Für Körnermais ist der Trockensubstanzgehalt im Korn entscheidend, für Silomais der TS-Gehalt der Gesamtpflanze. Unterscheiden sich zwei Sorten um zehn Einheiten in der Reifezahl, bedeutet dies eine Differenz von einem Prozent im Trockensubstanzgehalt des Kornes. Dies entspricht einer verzögerten oder beschleunigten Abreife von ein bis drei Tagen.

Ressource

In der Natur für die Nutzung verfügbarer Stoff oder Organismus wie z.B. Erze, fossile Energieträger aber auch Luft, Wasser und Biomasse.

SALCA

SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) ist eine Ökobilanzmethode und -datenbank, welche von Agroscope Reckenholz-Tänikon ART entwickelt wurde. Sie dient der Analyse und Optimierung der Umweltwirkungen der landwirtschaftlichen Produktion. Zurzeit wird die Methode in der agrarökologischen Forschung eingesetzt.

Sachbilanz

Ist der Teil einer Ökobilanz, in dem die Grundinformationen zum Lebensweg des zu analysierenden Produkts (oder der Dienstleistung) enthalten sind, d.h. die eingesetzten Energie- und Materialmengen, technischen Kenngrößen (z.B. Lebensdauern, Nutzungsgrade), die jeweils entstehenden Emissionen, Reststoffe usw. sowie die zugehörigen Systemgrenzen und Allokation.

SO₂-äquivalent

Ist der quantitative Ausdruck des Versauerungspotenzials, ausgedrückt in wirkungsäquivalenten Menge SO₂. In das Versauerungspotenzial gehen so z.B. neben SO₂ auch die Luftschadstoffe NO_x, HCl, HF, NH₃ und H₂S mit ihrer auf SO₂ bezogenen Wirkung ein.

Systemgrenze

Schnittstelle zwischen einem Produktsystem und seiner Umwelt oder anderen Produktsystemen. Die Systemgrenze legt die Tiefe einer Untersuchung fest; z.B. durch Angabe von einzubeziehenden Phasen und Modulen, Indikatoren einer Sachbilanz, die außer acht gelassen werden können, oder Umwelteinflüssen, die im Rahmen einer Wirkungsbilanz berücksichtigt werden sollen.

Toxizität

Die Toxizität ist eine aus dem griechischen abgeleitete Bezeichnung für die Giftigkeit von Stoffen. Die Toxizität eines Stoffes hängt von verschiedenen, oft sehr kleinräumigen Parametern ab. In der LCA wird die potentielle Toxizität von Stoffen aufgrund der chemischen Beschaffenheit, des ursprünglichen Emissionsortes und dessen Verhalten bzw. Verbleib nach Entlassung in die Umwelt charakterisiert. Das heißt es werden potentielle Beiträge zu tatsächlich eintretenden toxischen Belastungen ermittelt. Es wird unterschieden zwischen der Wirkung auf den Menschen (Humantoxizität), im Wasser lebende Organismen (aquatische Toxizität) und Bodenorganismen (terrestrische Ökotoxizität).

Toxizitätspunkte

Aquatische und terrestrische Ökotoxizität wird bei EDIP 97 in m³ Wasser/Boden, das es braucht, damit der Grenzwert der Belastung unterschritten wird, dargestellt. Die Humantoxizität wird bei CML01 in kg DCB-Äquivalenten angegeben. Da diese Einheiten nur schwer verständlich sind, wird die Toxizität in diesem Bericht einfach in Punkten dargestellt.

Treibhauspotenzial THP

Ist das massebezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von Treibhausgasen bezogen auf das CO₂ - daher wird es in CO₂-äquivalenten angegeben. Das Treibhauspotenzial ist aufgrund der Wirkungscharakteristik von Treibhausgasen und deren unterschiedlichen atmosphärischen Verweildauern ein zeitliches Integral über einen bestimmten Zeitraum. üblich sind Angaben für 100 Jahre. Wichtige Treibhausgase sind CO₂, CH₄ und N₂O sowie SF₆, PFC und HFC.

Umweltwirkung

Jede Veränderung der Umwelt, ob nachteilig oder günstig, ganz oder teilweise resultierend aus den Aktivitäten, Produkten oder Dienstleistungen einer Organisation.

Versauerungspotenzial VP

Beschreibt die Wirkung versauernder Emissionen, ausgedrückt in massebezogenen SO₂-äquivalenten. Referenzstoff für die Bildung des Versauerungspotenzials ist SO₂ (Schwefeldioxid) mit VP=1,0 auf das die Wirkung der anderen versauernd wirkenden Emissionen (wie z.B. NO_x, H₂S) bezogen wird.

Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse aus der Sachbilanz werden in ihrer Wirkung auf die Umwelt beurteilt. Siehe auch LCIA

Wirkungskategorie, Wirkkategorie

Gruppe von ökologisch relevanten Lebenszyklusauswirkungen, die die Sachbilanzdaten auf spezifische Indikatoren oder Endpunkte zusammenfassen und darstellen. Diese Auswirkungen haben Einfluss auf z.B. die globale Erwärmung, der Versauerung und der menschlichen Gesundheit und werden Wirkungskategorien genannt.