Die Ökobilanz von Kurzumtriebsplantagen

Frank Burger und Janine Schweier

Schlüsselwörter: Hackschnitzel, Energiebilanz, Klimawirksamkeit, Holzerntesysteme

Zusammenfassung: Die Methode der Ökobilanz wurde angewandt, um den extensiven Charakter des Landnutzungssystems Kurzumtriebsplantage (KUP) zu veranschaulichen. Dazu wurde der Aufwand an fossiler Energie quantifiziert, der in die Bewirtschaftung von KUP für die Erzeugung von Energie-Hackschnitzeln gesteckt werden muss. Der Input an Energie liegt, je nachdem wie die Plantage geerntet wird, zwischen rund 330 und 800 Megajoule (MJ) und reicht bis zu 1.600 MJ, bei zusätzlicher Düngung und Bewässerung pro Tonne produzierter trockener KUP-Hackschnitzel. Das Verhältnis von Input zu Output (dem unteren Heizwert [Hu] der erzeugten Tonne Hackschnitzel) ergibt eine sehr weite Spanne. Landwirtschaftliche Energiekulturen erreichen keine derart günstigen Verhältnisse. Ernte, Rodung und Transport verursachen den höchsten Energieaufwand. Begründung und Pflege der Plantage fallen dagegen kaum ins Gewicht. Vollautomatische Mähhäcksler und Anbau-Mähhacker haben die geringsten Energie-Inputs. Gehölzmähhäcksler arbeiten ebenfalls sehr energieeffizient. Leistungsfähige Erntemaschinen können wegen ihrer enormen Produktivität also trotz hohen Kraftstoffverbrauchs günstige Umweltwirkungen je Einheit aufweisen. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Hackschnitzel möglichst nicht über eine Entfernung von 20 km transportiert werden sollten, um die gute Energieeffizienz des Anbaus von KUP optimal zu nutzen. Neben dem Energieaufwand wurden für die Kurzumtriebsplantagen auch potenzielle Umweltwirkungen in den Kategorien Klimaänderung und Eutrophierung ermittelt. Auch hier sind die Resultate wesentlich günstiger im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturen wie Winterraps, Zuckerrübe und Silomais.

Einleitung

Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine normierte Methode zur Analyse der Umweltwirkungen von Produkten. Um einen einheitlichen Standard zu gewährleisten, orientiert man sich bei der Ökobilanzierung an den internationalen Normenwerken ISO 14040 und 14044 (NAGUS 2006). Ökobilanzen liefern neben Aussagen zu potentiellen Umweltwirkungen wie Klimawirksamkeit oder Eutrophierung auch Daten zu Energie-Inputs und -Outputs, die bei der Herstellung und der Anwendung der untersuchten Produkte entstehen.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst auf den Energiebedarf der technischen Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen eingegangen. Das heißt, es wird in der sogenannten Sachbilanz ermittelt, wieviel fossile Energie aufgewendet werden muss, um eine KUP anzulegen, zu pflegen und nach einigen Jahren die Bäume zu fällen, zu rücken und zu hacken. Anschließend wird erfasst, wieviel Energie für den Transport der Hackschnitzel zum Heizwerk nötig ist und natürlich muss auch das Heizwerk gebaut und Jahre später wieder abgerissen werden. Das Verhältnis dieser Energie-Inputs zum Energieinhalt der erzeugten Hackschnitzel ergibt die Energiebilanz. Anschließend folgt in der sogenannten Wirkungsabschätzung die Darstellung der potentiellen Umweltwirkungen; bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen sind die wichtigsten Kategorien die Klimaänderung und die Eutrophierung.

Methodik

Die erforderlichen Daten zur Berechnung der Ökobilanz von Kurzumtriebsplantagen wurden in Arbeitszeitstudien bei der Bewirtschaftung von KUP im Flachland und im Mittelgebirge gewonnen (Burger 2010; Schweier 2013). Die meisten derzeit gängigen Erntelinien konnten auf diese Weise analysiert werden. Sie reichen von der motormanuellen Fällung über den Einsatz von hochmechanisierter Forsttechnik bis hin zum Einsatz landwirtschaftlicher Mähtechnik. Die Datenaufnahme

fand in kleinstrukturierten landwirtschaftlichen Gebieten Süddeutschlands statt. Wichtig dabei war ein praxisnaher Einsatz der Maschinen, um repräsentative Ergebnisse mit hoher Aussagekraft zu erhalten.

In dieser Arbeit werden alle während der Bewirtschaftung der KUP anfallenden In- und Output-Flüsse in Bezug zum Produkt Hackschnitzel gesetzt. Bei der Energiebilanz der Hackschnitzel wird wegen der unterschiedlichen Heizwerte nach den reell gemessenen Wassergehalten differenziert, die hier zwischen 24 % und 60 % lagen.

Mit dem Ziel einer möglichst umfassenden Darstellung der Umweltwirkungen und Energieverhältnisse wurden den Vorgaben der DIN EN ISO folgend die Vorketten, auch »graue Energie« genannt, in die Betrachtung mit einbezogen. Gemeint ist damit die Energie, die beispielsweise zur Produktion der Maschinen, sowie der Treib- und Schmierstoffe aufgewendet werden muss (Daten aus ecoinvent 2010).

Ergebnisse

Systeminputs

Betrachten wir zunächst die Inputseite der Bewirtschaftung. Der Aufwand für Anlage und Pflege der KUP wird als konstant gesehen. Differenziert wird nach den Erntelinien, nach der Transportentfernung der Hackschnitzel, nach Düngung und Bewässerung. Tabelle 1 zeigt den Kraftstoffeinsatz von fünf verschiedenen Erntelinien zur Produktion einer Tonne absolut trockener KUP-Hackschnitzel frei Feldrand. Im fünfjährigen Umtrieb sind drei Erntelinien dargestellt, von motormanueller Fällung mit mobilem kranbeschicktem Hacker (Linie 1) über Fäller-Bündler-Einsatz mit Rücken und Hacken (Linie 2) bis zum vollautomatischen Anbau-Mähhacker, der die Bäume in einem Arbeitsgang vom Stock trennt und hackt (Linie 3). Außerdem sind zwei Erntelinien im zehnjährigen Umtrieb dargestellt: die motormanuelle Fällung (Linie 4) und die mechanisierte Fällung mit Harvester (Linie 5), beides mit anschließendem Rücken und Hacken am zentralen Platz.

Linie Nr.	Dauer Umtrieb	Beschreibung Ernteverfahren	Verwendete Maschinen	Verwendete Materialien	Verbrauch [kg/t_{atro}]
1	5	Fällen motormanuell	Motorsäge (2,6 kW)	Zweitaktgemisch Sägekettenöl	0,32 0,19
		Hacken kranbeschickt	Hacker Eschlböck Biber 7 an Traktor (110 kW)	Diesel	4,91
			Traktor mit Hänger (66 kW)	Diesel	0,13
2	5	Fäller-Bündler	Fäller-Bündler TJ 720 an Timberjack TJ 870 (114 kW)	Diesel	2,34
		Rücken	Rückemaschine Ponsse S16 (158 kW)	Diesel	0,87
		Hacken am zentralen Platz	Hacker Heizomat an Traktor (147 kW)	Diesel	5,95
3	5	Anbau-Mähhacker (Wieneke/Döhrer)	Anbaumähhacker Wieneke/Döhrer an Traktor (96 kW)	Diesel	3,64
			Traktor mit Hänger (66 kW)	Diesel	0,38
4	10	Fällen motormanuell	Motorsäge (2,6 kW)	Zweitaktgemisch Sägekettenöl	0,09 0,06
		Rücken	Rückemaschine HSM 805 (85 kW)	Diesel	1,25
		Hacken am zentralen Platz	Hacker Heizomat mit eigenem Motor (137 kW)	Diesel	2,99
			Traktor zum Versetzen der Container (66 kW)	Diesel	0,03
5	10	Harvesterfällung	Harvester Timberjack 870 (114 kW)	Diesel	1,23
		Rücken	Rückemaschine HSM 805 (85 kW)	Diesel	1,25
		Hacken am zentralen Platz	Hacker Heizomat mit eigenem Motor (137 kW)	Diesel	2,99
			Traktor zum Versetzen der Container (66 kW)	Diesel	0,03

Tabelle 1: Beispielhafte Übersicht von fünf Erntelinien inklusive Kraftstoffverbrauch, bezogen auf eine produzierte Tonne absolut trockener (t_{atro}) Hackschnitzel (Quelle: Zeitstudien der Autoren)

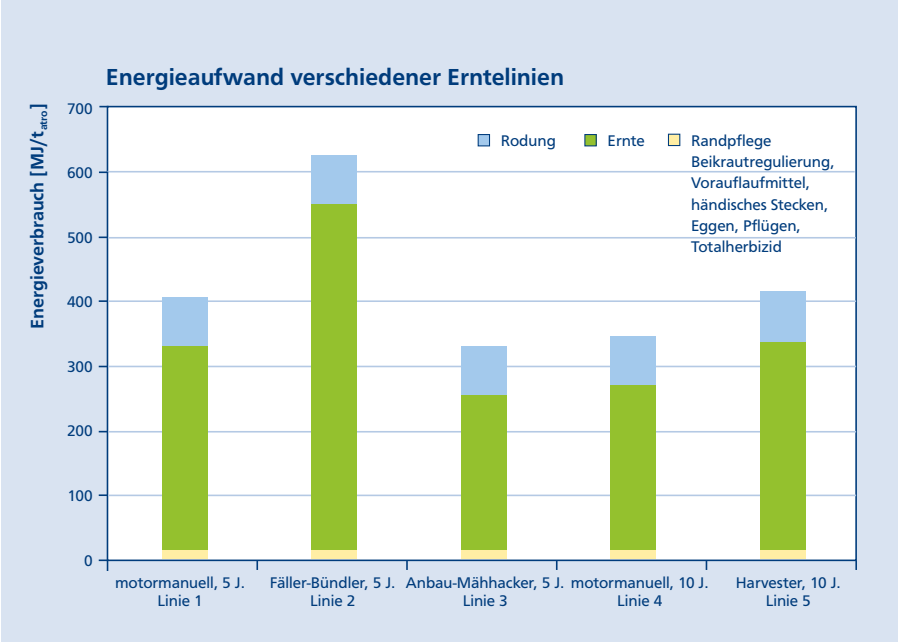

Abbildung1: Energie-Input bei Anbau und Ernte von Kurzumtriebsplantagen, differenziert nach fünf Erntelinien, bezogen auf eine Tonne absolut trockener Hackschnitzel frei Feldrand

Abbildung 2: New Holland Gehölzmähhäcksler Typ FR 9060 mit Vorsatz 130 FB Foto: F. Burger

Abbildung 3: Mähsammler Stemster MK III bei der Ernte Foto: J. Schweier

Es fällt auf, dass der Kraftstoffbedarf beim Einsatz des vollautomatischen Anbau-Mähhackers im fünfjährigen Umtrieb (Linie 3) am niedrigsten ist. Wenig Kraftstoff wird auch bei der motormanuellen Fällung im zehnjährigen Umtrieb verbraucht (Linie 4); der Grund dafür ist in der höheren Effektivität der eingesetzten Maschinen bei der Ernte der – im Vergleich zum fünfjährigen Umtrieb – wesentlich stärkeren zehn Jahre alten Bäume zu suchen.

Abbildung 1 zeigt den Energie-Input aller notwendigen Bewirtschaftungsprozesse, von der Flächenvorbereitung über die Pflanzung bis zum Hacken der Bäume und zur Rodung der Fläche (in Megajoule pro produzierte Tonne absolut trockener Hackschnitzel frei Feldrand). Differenziert wird wieder nach den fünf vorgestellten Erntelinien.

Den geringsten Energieaufwand mit 330 MJ/t_{atro} erfordert der Anbau von KUP im fünfjährigen Umtrieb mit vollautomatischer Ernte durch den Anbau-Mähhacker (Linie 3), gefolgt vom zehnjährigen Umtrieb mit motormanueller Ernte und anschließendem Rücken und Hacken (345 MJ/t_{atro}, Linie 4). Den höchsten Energie-Input mit über 600 MJ/t_{atro} benötigt der fünfjährige Umtrieb bei Ernte mit einem Fäller-Bündler Aggregat und Rücken und Hacken an einem zentralen Platz (Linie 2). Vergleicht man die beiden Umtriebszeiten miteinander, so ist der durchschnittliche Energiebedarf bei einer Bewirtschaftung in der zehnjährigen Rotation geringer als in der fünfjährigen. Auffallend hoch ist in jedem Fall der Anteil der für Ernte und Rodung aufgewendeten Energie im Verhältnis zu dem als konstant betrachteten

Energieeinsatz der anderen Bewirtschaftungsprozesse. Ernte und Rodung sind in allen Fällen zu über 95 % für den Energie-Input verantwortlich.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse einer weiteren Untersuchung zum Energieaufwand der Produktion von Hackschnitzeln aus KUP. Hier wurden zwei verschiedene Erntelinien analysiert, diesmal einschließlich der notwendigen Energie für den Transport zum Abnehmer in 50 km Entfernung. In der Linie 1 erfolgt die Ernte durch einen über 500 PS starken vollautomatischen Gehölzmähhäcksler, der die Bäume bis zu einem Durchmesser am Schnitthals von ca. 15–17 cm fällt und sofort hackt (Abbildung 2). Die Hackschnitzel werden mit kleinen, von landwirtschaftlichen Schleppern gezogenen Containern zu einem nahe gelegenen Zwischenlager gebracht und von dort per LKW zum Endabnehmer transportiert. In der Erntelinie 2 werden die Bäume bis zu einem Durchmesser am Schnitthals von ca. 20 cm mit einem Mähsammler gefällt, gesammelt und am Rand des Felds abgelegt (Abbildung 3). Dort trocknen sie vier bis sechs Monate und werden anschließend von einem mobilen Hacker gehackt und ebenfalls per LKW zum Endabnehmer transportiert.

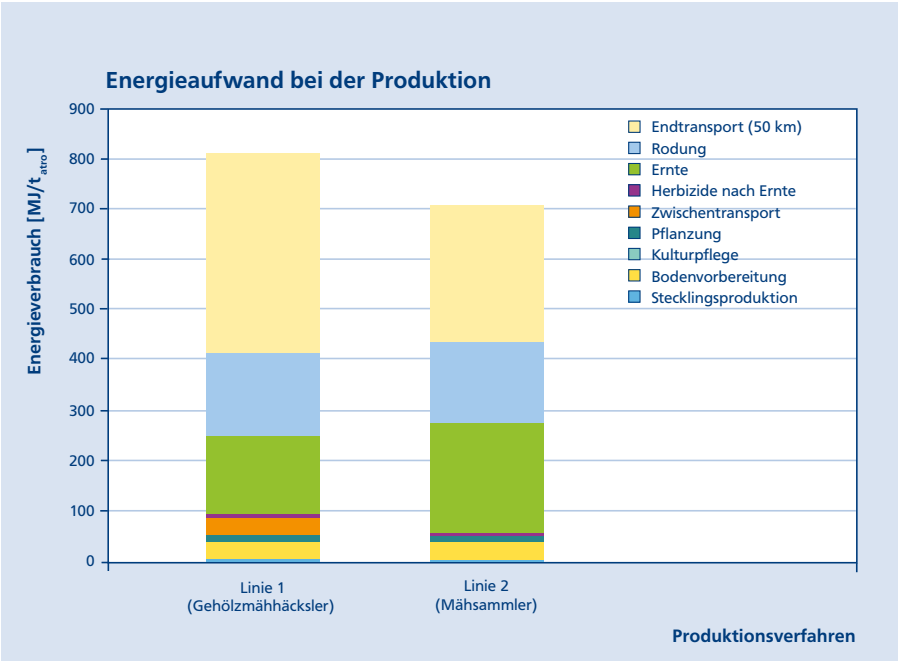

Abbildung 4:
Energie-Input für die Bereitstellung von Hackschnitzel aus KUP, einschl. Transport, für zwei Erntelinien bezogen auf eine Tonne absolut trockene Hackschnitzel

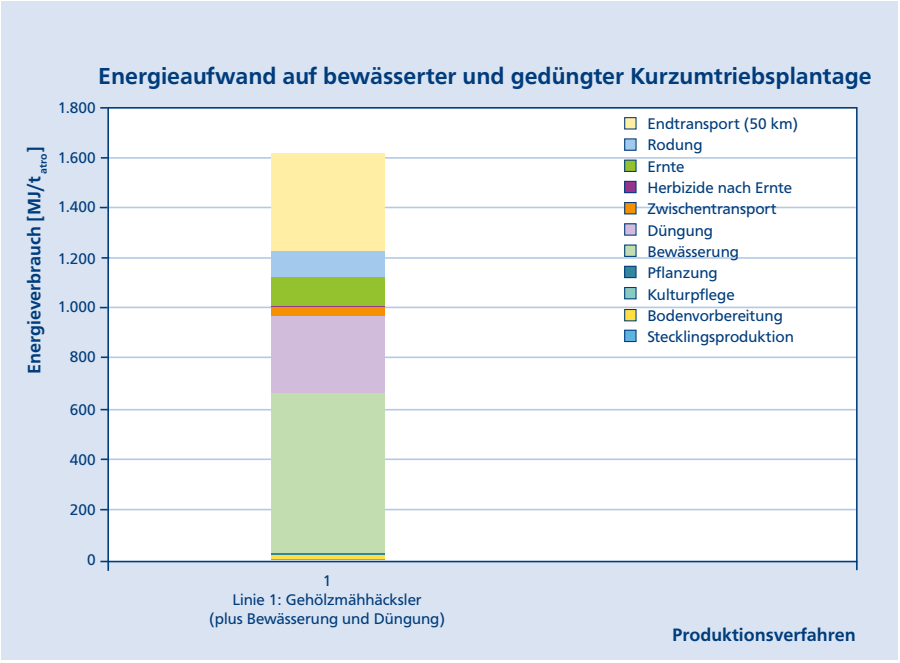

Abbildung 5:
Energie-Input für die Bereitstellung von Hackschnitzel aus KUP einschließlich Endtransport, Bewässerung über Tröpfchen-Bewässerungssystem und Düngung

Auch bei den beiden hier untersuchten Erntelinien dominieren die Energie-Inputs für die Prozesse Ernte und Rodung gegenüber den übrigen Arbeiten auf der KUP. Der Gehölzmähhäcksler hat zwar einen höheren Kraftstoffbedarf als der Mähsammler, erzielt aber auch eine höhere Ernteleistung. Das Erntegut ist zudem bereits gehackt – im Gegensatz zum Mähsammler ist kein zweiter Arbeitsschritt mehr notwendig. Allerdings erfordert der Gehölzmähhäcksler den permanenten Einsatz von Schlepper-Container-Gespannen für die Abfuhr der Hackschnitzel.

Bezieht man zusätzlich den im Durchschnitt 50 km langen Transport der Hackschnitzel zum Zielort mit in die Betrachtung ein, so wird deutlich, dass dann der Transport der energieintensivste Prozess ist (Abbildung 4). In der Erntelinie 1 ist der Anteil des Transports an der gesamten eingesetzten Energie höher als bei der zweiten Erntelinie, da hier frische Hackschnitzel mit 55 % Wassergehalt transportiert werden müssen. In der Erntelinie 2 ist der Wassergehalt der Hackschnitzel durch die Lufttrocknung auf 30 % reduziert, wodurch die Anzahl der Tonnenkilometer deutlich sinkt und die Produktionslinie mit dem Mähsammler beim Gesamtenergieverbrauch besser abschneidet als die Linie mit dem Gehölzmähhäcksler.

Die Transportdistanz hat also einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Berechnungen mit alternativen Distanzen zeigten, dass der Energieverbrauch in Erntelinie 1 bei einer Erhöhung der Transportdistanz von 50 km auf 100 km um 49 % (von 809 auf 1.201 MJ/t_{atro}) zunimmt. Bei einer kürzeren Transportdistanz verringert er sich entsprechend. So sinkt der Energieverbrauch in Erntelinie 2 von 704 MJ z. B. auf 541 MJ/t_{atro}, wenn die Distanz auf 20 km verringert wird.

Die Notwendigkeit von Bewässerung und Düngung von Kurzumtriebsplantagen mit dem Ziel einer höheren Biomasseproduktion wird immer wieder diskutiert. Abbildung 5 stellt die Effekte dieser Maßnahmen auf den Input an Energie anhand einer Kurzumtriebsplantage am Hang beispielhaft dar. Durch den unterstellten Mehrzuwachs von 12 anstatt vorher 7,6 Tonnen atro je Jahr und Hektar fällt der Energie-Input je Tonne atro für die Bewirtschaftungsprozesse von der Bodenvorbereitung bis zum Endtransport im Vergleich zu dem Ergebnis in Abbildung 4 etwas geringer aus.

Unter Berücksichtigung der Bewässerung einer KUP über ein Tröpfchen-Bewässerungssystem steigt der Energieverbrauch pro Tonne atro insgesamt deutlich an (Abbildung 5). Verantwortlich ist vor allem der Stromverbrauch für die Pumpen der Bewässerungsanlage. Dieser war im untersuchten Fall mit 1,5 kWh je Kubikmeter Wasser überdurchschnittlich hoch, da die Förderhöhe des Wassers im Mittel bei 30 m lag. Zudem war die ausgebrachte Wassermenge verhältnismäßig hoch (510 m^3/a*ha). Wie das Beispiel zeigt, ist eine intensive Bewässerung auf hanglagigen Flächen aus energetischer Sicht nur dann empfehlenswert, wenn sie unter Ausnutzung der Schwerkraft »von oben« erfolgt und die verfügbare Wassermenge dafür auch ausreicht. Eine ergänzende Berechnung mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch der Pumpen ergab immer noch einen Energie-Input von rund 400 MJ je Tonne atro alleine für die Bewässerung. Daraus würde sich bei Bewässerung der KUP ein Gesamtenergieverbrauch für die Produktion und den Transport der Hackschnitzel von rund 1.100 MJ/t_{atro} ergeben.

Die zusätzliche Ausbringung von Dünger führt zu einem Gesamtenergiebedarf der KUP, der mit rund 1.600 MJ/t_{atro} doppelt so hoch ist wie der Vergleichswert ohne Bewässerung und Düngung. Die Düngung hat natürlich auch Auswirkungen auf das Eutrophierungspotenzial: es steigt etwa um das sechsfache gegenüber der Variante ohne Düngung oder Bewässerung. Dies ist einerseits durch die »graue Energie«, die im Dünger steckt (Aufwand für Herstellung) und andererseits durch die zusätzliche Nitratauswaschung zu erklären.

Die Energiebilanz von Kurzumtriebsplantagen

Setzt man die Energie-Inputs der Bewirtschaftung der Kurzumtriebsplantage (Abbildung 1) in das Verhältnis zu der gewonnenen Energie (Output), so erhält man die Energiebilanz des Anbaus von KUP. Abbildung 6 zeigt den Output in Form des unteren Heizwerts (MJ) von einer Tonne absolut trockenem Holz. Der untere Heizwert ist natürlich nur eine modellhafte Annahme und wird in der Praxis wegen des im Holz vorhandenen Wassers nicht ganz erreicht. In Abbildung 7 wird der Wassergehalt der Hackschnitzel in die Betrachtung mit einbezogen.

Der Vergleich Input-Output macht den extensiven Charakter der Bodennutzungsart Kurzumtriebsplantage deutlich. Die Energieverhältnisse bewegen sich in einem Rahmen von 1 : 55 (Linie 3, Ernte mit dem Anbau-Mähhacker) und 1 : 29 (Linie 2, Ernte mit dem Fäller-Bündler und anschließendem Rücken und Hacken). Biedermann et al. (2010) ermittelten für den Anbau von Winterweizen zur energetischen Verwertung Energie-Input-Output-Verhältnisse, die ebenfalls die Vorketten von Maschinen und Kraftstoffen einbeziehen und daher gut mit den in Abbildung 6 gezeigten Werten vergleichbar sind. Die Input-Output-Verhältnisse von Winterweizen reichen von ca. 1 : 15 für den günstigsten Standort bis ca. 1 : 6,5 für den schlechtesten Standort

und sind damit wesentlich ineffizienter als bei Kurzumtriebsplantagen.

Tabelle 2 gibt die bei der KUP-Ernte aufgewendete Energie in absoluten Werten und als Prozentsatz der erzeugten Energie an. Die in den Vorketten verbrauchte Energie ist getrennt dargestellt. Dadurch wird ein direkter Vergleich mit Energiebilanzen der Produktion von Waldhackschnitzeln (Zimmer 2009) möglich. Bei diesen wurde der Primärenergieeinsatz bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln für verschiedene Mechanisierungsvarianten berechnet. Die bei den Kurzumtriebsplantagen direkt eingesetzte Energie schwankt in einem Bereich von 1,13 % bis 2,57 % der im absolut trockenen Holz enthaltenen Energie (Tabelle 2). Dies entspricht in etwa den Energieeinsätzen der Profi-Szenarien von Zimmer (2009), die sich in einem Bereich von 1,4 % bis 2,5 % des unteren Heizwerts bewegen. Wesentlich höher fällt bei demselben Autor der Energiebedarf der Kleinwald-Szenarien aus, der in einem Rahmen zwischen 4,3 % und 6,5 % liegt. Bezieht man beide Szenarien in den Vergleich mit ein, so ist der Energie-Input bei der Produktion von Waldhackschnitzeln im Durchschnitt höher als bei der Gewinnung von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen.

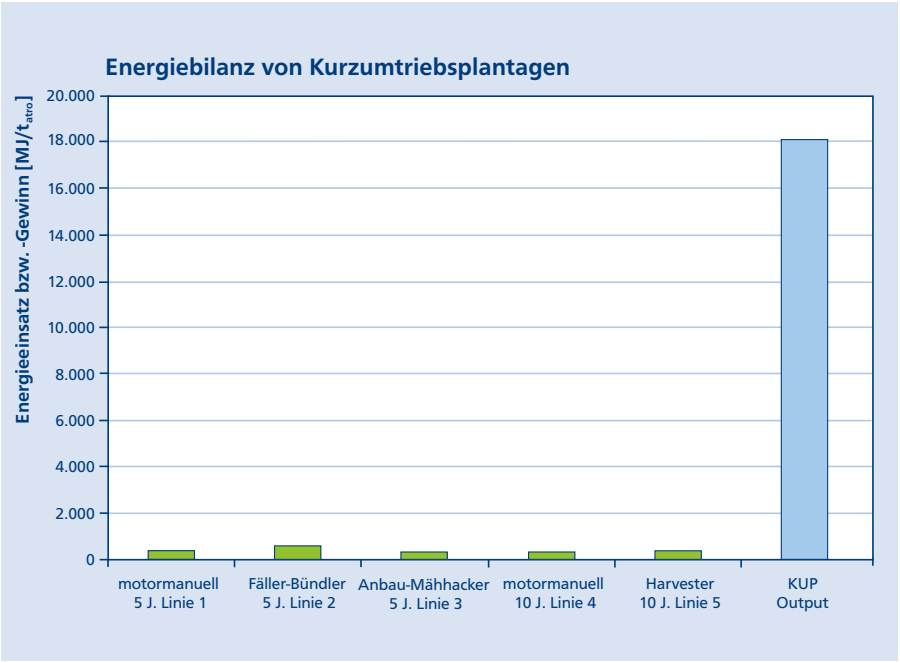

Abbildung 6:
Verhältnis Energie-Input zu -Output bei der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach fünf Erntelinien, bezogen auf eine Tonne absolut trockene Hackschnitzel frei Feld

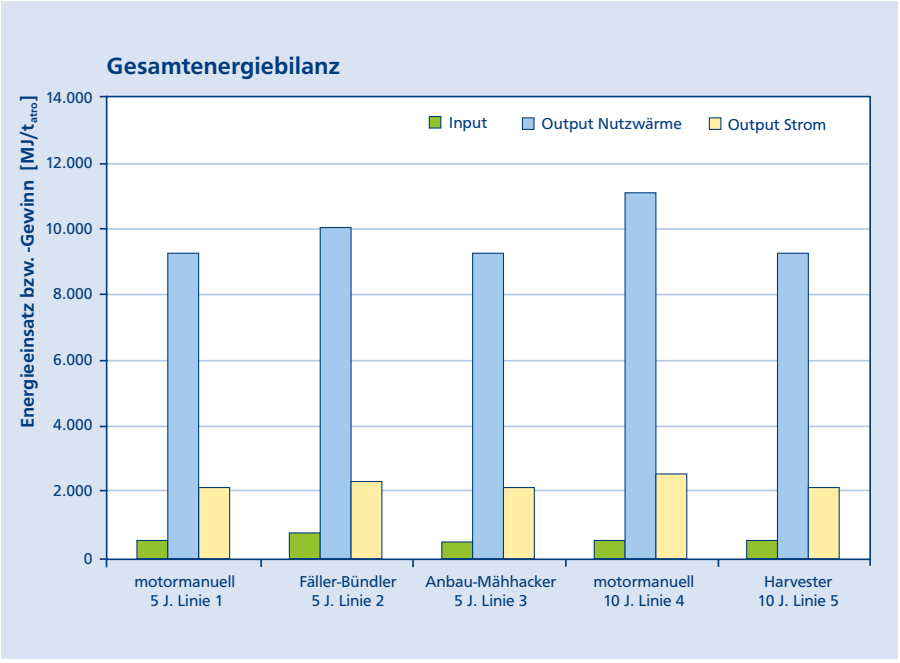

Abbildung 7:
Verhältnis von Gesamtenergie-Input/-Output bei zusätzlicher Einbeziehung der Verwertung von einer Tonne absolut trockener KUP-Hackschnitzel in einer 1,4-MW-KWK-Anlage differenziert nach fünf Erntelinien

Umtrieb	5-jährig			10-jährig	
Erntelinie	1	2	3	4	5
Beschreibung Ernteverfahren	· Fällen motor-manuell · Hacken kranbeschickt	· Fäller-Bündler · Rücken · Hacken am zentralen Platz	· Anbau-Mähhacker	· Fällen · Rücken · Hacken am zentralen Platz	· Harvesterfällung · Rücken · Hacken am zentralen Platz
Energie-Input zur Erzeugung von Hackschnitzel [MJ/t atro]					
Ernteverfahren gesamt	316	536	241	256	323
direkt eingesetzte Energie	276	465	204	226	280
Vorkette	41	71	36	30	43
Eingesetzte Energie in % vom Output (Unterer Heizwert – Hu)					
Ernteverfahren gesamt	1,75	2,96	1,33	1,41	1,79
direkt eingesetzte Energie	1,52	2,57	1,13	1,25	1,55
Vorkette	0,23	0,39	0,20	0,16	0,24

Tabelle 2: Energie-Input der Ernte von KUP differenziert nach direkt eingesetzter Energie und Vorketten, dargestellt am Beispiel von fünf Erntelinien, angegeben in MJ pro Tonne absolut trockener Biomasse und in % der erzeugten Energie (Hu)

Die kahlschlagartige Ernte der KUP sowie die exakte räumliche Ordnung erhöhen die Produktivität der eingesetzten Maschinen, was sich vorteilhaft auf die Energiebilanz auswirkt.

Geht man einen Schritt weiter und bezieht die Verbrennung in einem Heizkraftwerk mit ein, so erhält man die Gesamtenergiebilanz (Abbildung 7). Der Energie-Input, hier blau dargestellt, ist im Vergleich zu dem in Abbildung 6 gezeigten Input angestiegen. Das liegt am Energieaufwand, der für den Transport der Hackschnitzel, den Bau des Heizkraftwerks, die Entsorgung der Asche usw. aufgewendet werden muss (ecoinvent 2010). Dem gegenüber stehen die Outputs von Wärme (blau dargestellt) und Strom (gelb dargestellt). Die Verhältnisse von Energie-Input zu -Output reichen von 1:16 bei der Erntelinie mit dem Fäller-Bündler im fünfjährigen Umtrieb (Linie 2) und 1:26 bei motormanueller Fällung und anschließendem Rücken und Hacken am zentralen Platz in der zehnjährigen Rotation (Linie 4). Es fällt auf, dass nicht nur die Energie-Inputs variieren, sondern auch die Outputs. Dies liegt daran, dass bei der ersten, dritten und fünften Erntelinie frische Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 60 % verwertet wurden. Bei der zweiten und vierten Linie lagen die Wassergehalte der Hackschnitzel nach einer gewissen Trocknungszeit bei 55 % bzw. 24 %, wodurch höhere Energie-Outputs resultieren. Es lässt sich leicht erkennen, dass die Mehrausbeute an Energie bei einem Vielfachen des Inputs liegt. Aus Sicht der Energieeffizienz lohnt es sich also, die Bäume auf der Fläche oder im Polter abtrocknen zu lassen. Zu beachten sind hierbei jedoch auch Biomasseverluste, die während der Trocknung durch mikrobiologische Prozesse auftreten und je nach Trocknungsmethode stark variieren. Diese wurden in der hier dargestellten Bilanz nicht berücksichtigt.

Die Umweltwirkungen von Kurzumtriebsplantagen

Um die Umweltrelevanz von Kurzumtriebsplantagen abzuschätzen, bezieht man die bei der Bewirtschaftung entstehenden Energie- und Stoffströme auf bestimmte Umweltkategorien. Die allgemein bekannte Wirkungskategorie Klimaänderung ist definiert als der Einfluss menschlich bedingter Emissionen auf die Strahlungsabsorption der Atmosphäre. Dies führt zu einer verminderten langwelligen Abstrahlung in das Weltall und damit zu einer Aufheizung des Weltklimas. Den verschiedenen Treibhausgasen, wie Kohlendioxid, Lachgas oder Methan werden in Charakterisierungsmodellen unterschiedliche Klimawirksamkeiten zugeordnet; das addierte Ergebnis nennt man »Treibhauspotenzial«. Es hat die Einheit »Kilogramm CO_2-Äquivalente«, hier pro Jahr und Hektar dargestellt.

Abbildung 8 stellt die *Klimawirksamkeit* von Kurzumtriebsplantagen der des Anbaus der landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps, Zuckerrübe und Silomais gegenüber. Auch hier wird der extensive Charakter des KUP-Anbaus deutlich. Die CO_2-Äquivalent-Emissionen beim Anbau der Feldfrüchte übersteigen die von KUP um ein Vielfaches. Am schlechtesten schneidet der Anbau von Zuckerrüben mit einem Output von knapp 10.000 CO_2-Äquivalenten pro Jahr und Hektar ab.

In Tabelle 3 ist die CO_2-Äquivalent-Bilanz der Bewirtschaftung von KUP dargestellt. Referenzsystem ist die Verbrennung von Heizöl. In Holz ist eine große Menge an CO_2-Äquivalenten gespeichert (–18.504 kg CO_2-Äq./a*ha), die später bei der Verbrennung der Hackschnitzel wieder freigesetzt wird. In diesem Fall wurde Heizöl durch die thermische Verwertung der Hackschnitzel ersetzt, so dass eine Gutschrift für die entsprechend substituierte Menge Heizöl erfolgt (–13.500 kg CO_2-Äq./a*ha).

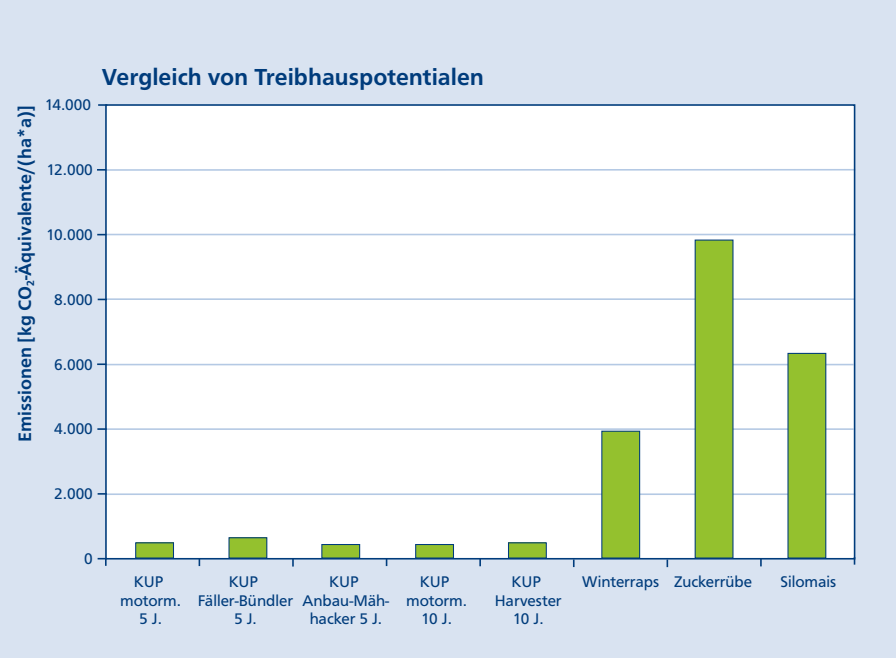

Abbildung 8: Treibhauspotenzial von KUP im Vergleich zu Winterraps, Zuckerrübe und Silomais: CO_2-Äquivalent-Emissionen beim Anbau (Daten für die landwirtschaftlichen Kulturen nach Bystricky 2009, vgl. Bystricky 2015)

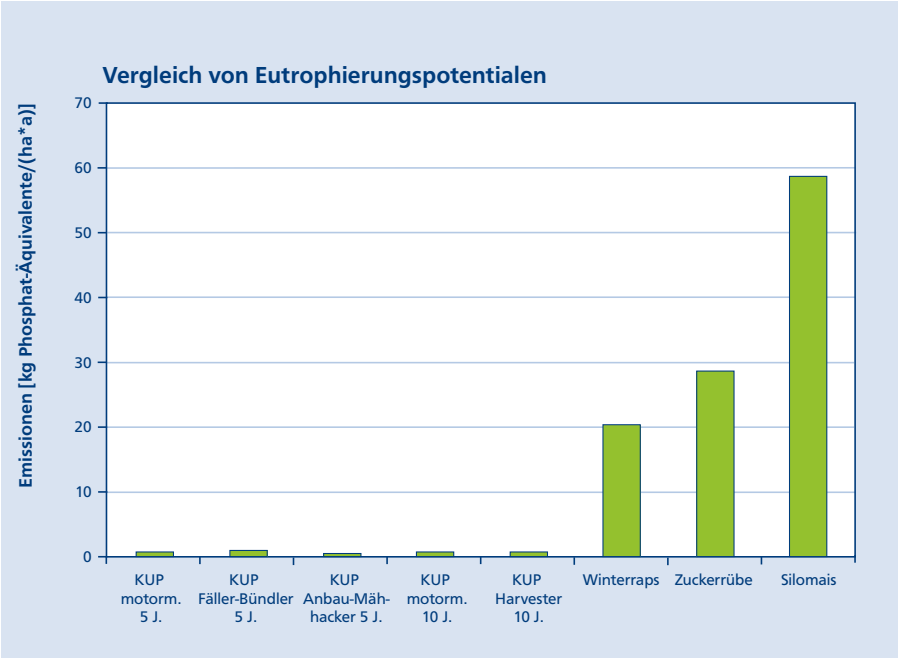

Abbildung 9: Eutrophierungspotenzial von KUP im Vergleich zu Winterraps, Zuckerrüben und Silomais (Daten für die landwirtschaftlichen Kulturen nach Bystricky 2009, vgl. Bystricky 2015)

Von der Gutschrift werden die CO_2-Äquivalent-Emissionen abgezogen, die durch die Bewirtschaftung (Anlage, Pflege, Ernte und Rodung) entstanden sind. Das resultierende Gesamtergebnis (»Saldo«) entspricht der Netto-CO_2-Ersparnis (–13.087 kg CO_2-Äq./a*ha) und zeigt, dass der Anbau von KUP und die Verwertung der Hackschnitzel zur Energieproduktion vorteilhaft gegenüber dem fossilen Energieträger Heizöl ist.

Die Wirkungskategorie *Eutrophierung* umfasst alle Auswirkungen von hohen Konzentrationen von Makronährelementen (vor allem Stickstoff und Phosphor). Eutrophierung kann zu unerwünschten Veränderungen in der Artenzusammensetzung von Ökosystemen führen. Außerdem sind hohe Nährstoffkonzentrationen der Grund für qualitative Beeinträchtigungen von Oberflächengewässern und des Grundwassers. Das Eutrophierungspotenzial beinhaltet alle Emissionen in Luft, Wasser und Erdboden. Gemessen wird es in Kilogramm Phosphat-Äquivalenten. In Abbildung 9 fällt auf, dass, wie bei der Klimawirksamkeit, auch das Eutrophierungspotenzial von Winterraps, Zuckerrübe und Silomais um ein Vielfaches höher ist als das der KUP. Dies liegt vor allem an den in der Landwirtschaft notwendigen Düngergaben. Während der Anbau von Kurzumtriebsplantagen in der ungünstigsten Erntevariante ein Eutrophierungspotenzial von knapp 0,8 kg Phosphat-Äquivalenten pro Jahr und Hektar verursacht (Linie 2), liegt die günstigste landwirtschaftliche Kultur bei ca. 20 kg Phosphat-Äquivalenten und der Silomais als Kultur mit dem höchsten Eutrophierungspotenzial bei fast 60 kg Phosphat-Äquivalenten pro Jahr und Hektar.

Position	Prozessschritt	[kg CO_2-Äq./ha/a]
Aufwand	Verbrennung Hackschnitzel	18.504
	Rodung	54
	Ernte	163
	Anbau KUP	188
	Pflege und Anlage	8
Einsparung	Speicherung	–18.504
	Substitution Heizöl	–13.500
Saldo		–13.087

Tabelle 3: CO_2-Äquivalent-Bilanz des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen am Beispiel der Erntelinie 3 mit dem Anbau-Mähhacker

Literatur

Biedermann, G.; Moitzi, G.; Boxberger, J. (2010): Klar positive Energiebilanz in der Getreideproduktion. Blick ins Land 45(2): 34–36

Burger, F. (2010): Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen. Dissertation, TU München 180 S.

Bystricky, M. (2009): Die Nutzenkorbmethode als Ansatz zum Vergleich der Strom-, Wärme-, und Kraftstoffproduktion aus Energiepflanzen. Vortrag auf der Ökobilanz-Werkstatt 2009, 05.–07. 10. Freising. www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/Recherchestand: 08.05.2010.

Bystricky, M. (2015): Weiterentwicklung der ökobilanziellen Bewertung des Energieplanzenanbaus auf Ebene von Modellbetrieben und Einzelkulturen anhand von Fallstudien für Bayern. Dissertation TU München 169 S.

Ecoinvent (2010): Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Centre, Empa, St. Gallen, Schweiz.

NAGUS (Normenausschuss für Grundlagen des Umweltschutzes im DIN) (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Schweier, J. (2013): Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland – Umweltbezogene und ökonomische Bewertung alternativer Bewirtschaftungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Holzernteverfahren. München. Dr. Hut Verlag. 289 S.

Zimmer, B. (2009): Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. In: Eberhardinger A., Warkotsch W., Zormaier F., Schardt M., Huber T., Zimmer B. (2009): Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut. Schlussbericht, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München, Freising, S. 104–141.

Keywords: Wood chips, energy balance, climate change impact, timber harvesting systems

Summary: The life cycle assessment method was applied to demonstrate the extensive character of short-rotation coppice (SRC) as a land-use system. Therefore the fossil energy expended in the management of short-rotation plantations in order to produce wood chips as a fuel was quantified. Depending on how the plantation is harvested, the energy input is between 330 and 800 megajoules (MJ) and up to 1.600 MJ when also irrigated and fertilised per ton of dry short-rotation wood chips produced. The ratio of input to output (to the lower heating value [net calorific value] of the ton of wood chips produced) has a very wide range. Agricultural energy crops do not achieve such favourable conditions. Of the operational processes, harvesting, clearing and transport consume the most energy. The establishment and tending of the plantation are practically negligible by comparison. The results of the comparison of different harvesting systems also show that optimum use of the good energy efficiency of the SRC can only be made if the wood chips are not transported further than 20 km. As well as the energy consumption, the potential environmental impacts of the SRC in terms of climate change and eutrophication were determined. Here too, the results are significantly more favourable than those attained for agricultural crops such as winter rapeseed, sugar beet and silage maize.