



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Embodied HANPP von Bioenergieträgern in Österreich“

verfasst von

Ludwig Sommer

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 827

Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Anthropologie

Betreut von: ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut Haberl

KURZFASSUNG

Der steigende Energieumsatz der Menschheit setzt Ökosysteme zunehmend unter Druck. In dieser Arbeit untersuche ich Energieträger aus Biomasse mit dem Landnutzungsindikator HANPP. Methodisch führe ich eine Ökobilanz durch. Die menschliche Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP) wird über den Lebenszyklus vom Feld bis zum Fabrikator für insgesamt sieben Bioenergieträger bestimmt. Die produktbezogene eHANPP, oder „Embodied HANPP“ beschreibt, wieviel der NPP vom Menschen angeeignet wird, um eine Energieeinheit (1 MJ) eines Bioenergieträgers zu erhalten. Die Ökobilanzierung wurde mit einer physischen Allokation nach den Energiemengen der Hauptprodukte der betrachteten Produktionssysteme durchgeführt.

Als Ergebnisse präsentiere ich unter anderem HANPP-Werte ($HANPP_{harv}$, $HANPP_{luc}$, NPP_{act} , NPP_{eco}) zu fünf Nutzpflanzen, Energieflüsse von sechs Bioenergieträgern, sowie jeweils die eHANPP für sieben Bioenergieträger. Die eHANPP von Rapsmethylester (RME) ist mit 3,44 J/J die größte, gefolgt von Bioethanol aus Weizen mit 2,80 J/J, Bioethanol aus Mais mit 1,47 J/J, Holzhackschnitzel aus Kurzumtrieb mit 1,28 J/J, Brennholz aus der Forstwirtschaft mit 1,12 J/J, Biogas aus Mais mit 0,72 J/J, und Biogas aus Gülle mit 0 J/J.

Die produktbezogene eHANPP liefert einen wichtigen Beitrag zur Untersuchung des gesellschaftlichen Stoffwechsels mit der Natur. So können Bioenergieproduktionssysteme im Hinblick darauf verglichen werden, wie sie die Produktionsökologie von Land-Ökosystemen verändern und in welchem Ausmaß Landfläche in Anspruch genommen wird.

EINLEITUNG

Energie aus Biomasse wird in der öffentlichen Debatte kontrovers diskutiert. Der steigende Energieumsatz der Menschheit setzt Ökosysteme zunehmend unter Druck. Die Gewinnung von Erdöl aus Teersanden beispielsweise bringt einen gewaltigen Flächenverbrauch mit sich. CO₂-Emissionen steigen durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffverbindungen weiter an und beeinflussen das Klima. Gleichzeitig gehen Kohlenstoffsenken durch den Verlust der Vegetation in dem großflächigen Teersandtagebau verloren. Aber auch die als Alternative zur Fossilenergie diskutierten regenerativen Energieträger, wie Biomasse, erhöhen den Druck auf Ökosysteme durch Landinanspruchnahme, auch hier gehen Kohlenstoffsenken verloren, Eingriffe in den Wasserhaushalt, oder Eingriffe in die Phosphor- und Stickstoffkreisläufe. In dieser Arbeit untersuche ich, wie sehr Bioenergieträger die Produktivität der natürlichen Vegetation beanspruchen. Dazu verwende ich das Konzept der menschlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion, kurz HANPP („Human Appropriation of Net-Primary Production“).

Pflanzen nutzen die Energie der Sonne um Biomasse aufzubauen (Photosynthese). Sie gehören daher zu den Primärproduzenten. Unter Nettoprimärproduktion (NPP) verstehen wir diejenige Energiemenge, die übrig bleibt, nachdem Pflanzen den Energiebedarf für ihren eigenen Stoffwechsel (Respiration) gedeckt haben. NPP bildet die Grundlage für das Überleben, das Wachstum und die Reproduktion aller heterotrophen Lebewesen; sie stellt das gesamte Nahrungsangebot der Erde dar (Vitousek et al., 1986). Biomasse, die nicht durch heterotrophe Lebewesen verbraucht wird, reichert sich im Ökosystem an, speichert damit Kohlenstoff und dient somit als Kohlenstoffsenke.

Ob Menschen Biomasse zur eigenen Ernährung, als Baumaterial, oder als Energieträger verwenden, sie entziehen dem Ökosystem damit NPP und eignen sich diese an. Dies wird als HANPP bezeichnet. Die HANPP, beziehungsweise die mit ihr verbundenen Aktivitäten, reduziert nicht nur die Menge an Energie, die für andere Lebewesen zur Verfügung steht, sondern beeinflusst auch die Biodiversität, Wasser-Kreisläufe, Kohlenstoff-Kreisläufe zwischen der Vegetation und der Atmosphäre, Energieflüsse innerhalb von Nahrungsketten, als auch die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (Haberl et al. 2007).

Das Konzept der HANPP berücksichtigt nicht nur die geerntete Biomasse, sondern auch die Veränderung der NPP, die durch Landnutzungswandel hervorgerufen wird. Wird beispielsweise Urwald gerodet, um die Fläche landwirtschaftlich zu nutzen, so verändert sich auch die NPP dieser Fläche, da die angebauten Kulturpflanzen eine andere (höhere oder niedrigere) biologische Produktivität als die natürliche Vegetation haben.

Die HANPP ist daher definiert als die Summe der geernteten NPP ($\text{HANPP}_{\text{harv}}$) und dem Betrag der NPP ($\text{HANPP}_{\text{luc}}$), der sich aus der Landnutzungsveränderung ergibt (Haberl, 1997).

Der Begriff „embodied HANPP“ (eHANPP) wurde erstmals von Haberl et al. (2009) eingeführt und beschreibt diejenige Menge an HANPP, die mit einem bestimmten Biomasseverbrauch, beziehungsweise mit einem bestimmten Produkt aus Biomasse verbunden ist (Haberl et al., 2009). Die eHANPP basiert auf dem Konzept der HANPP, welches in den 1980er und 90er Jahren (Vitousek et al., 1986; Haberl, 1997) als Indikator dafür eingeführt wurde, wie stark Ökosysteme durch den Menschen beherrscht, beziehungsweise kolonisiert, werden.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Indikatoren entwickelt, die bestimmte Umweltauswirkungen auf ein Produkt bezogen, beziehungsweise einer menschlichen Dienstleistung (z.B. Transport von Waren), beschreiben. Ein Beispiel ist der CO_2 -Fußabdruck (Davis & Caldeira, 2011), welcher die CO_2 -Emissionen angibt, die mit einem Produkt oder einer Dienstleistung verbunden sind. Ein ähnliches Konzept ist der Wasser-Fußabdruck, auch „Virtuelles Wasser“ genannt, also die Menge an Wasser, die für die Produktion einer bestimmten Ware benötigt wird (Allan, 1998). Jedoch fehlt es bisher an ähnlichen Ansätzen zur Berechnung der Inanspruchnahme von Biomassekreisläufen durch den Menschen (Haberl et al., 2012). Das Konzept der eHANPP kann ein wichtiger Beitrag dazu sein.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Bestimmung der menschlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP), welche bei der Produktion einer Energieeinheit eines Bioenergieträgers entsteht. Die HANPP wird also auf ein Produkt bezogen berechnet. Damit wird diejenige HANPP bestimmt, die in einem Bioenergieträger „enthalten“ (embodied) ist. Die eHANPP wird in dieser Arbeit für sieben in Österreich erzeugte Bioenergieträger berechnet.

Unter den flüssigen Bioenergieträgern, den Biokraftstoffen, untersuche ich den als „Biodiesel“ bezeichneten Rapsmethylester (RME), Bioethanol aus Weizen und aus Mais. Für Biogas, als Vertreter der gasförmigen Bioenergieträger, bestimme ich die eHANPP, wenn als Rohstoff Mais verwendet wird und diskutiere, ob mit dem Einsatz von Gülle zur Herstellung von Biogas eine eHANPP verbunden ist. Als feste Bioenergieträger berechne ich die eHANPP für Holzhackschnitzel aus Pappel/Weiden-Kurzumtriebsplantagen, sowie für Brennholz aus der Forstwirtschaft.

METHODEN

Um die eHANPP für die sieben Bioenergieträger (siehe Einleitung) zu bestimmen, führe ich eine (kleine) Ökobilanz durch. Üblicherweise werden in Ökobilanzen mehrere Umweltbelastungen berücksichtigt, die im Laufe eines ganzen Lebenszyklus eines Produkts, also von der Wiege bis zur Bahre, entstehen können. Der Umweltindikator eHANPP fand jedoch bisher keine Anwendung in Ökobilanzen. In dieser Arbeit führe ich eine Ökobilanz durch, die verschiedene Bioenergieträger im Hinblick auf einen Umweltindikator, nämlich der menschlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP) untersucht. Meine Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) untersucht nicht den gesamten Lebenszyklus der Bioenergieträger, sondern beschränkt sich auf die Prozesskette vom Anbau der Pflanzen auf dem Feld bis zum Bioenergieträger in der Fabrik, also vom Feld bis zum Fabrikator. Ich habe mich für diese Systemgrenze entschieden, da es in dieser Arbeit darum gehen soll, welche HANPP mit einem Bioenergieträger verbunden ist, und nicht, welche HANPP mit einem Verbrennungsmotor, einer Verbrennungsanlage, oder einer bestimmten Energiedienstleistung verbunden ist.

Außerdem wird die eHANPP mit einem „bottom-up“ Ansatz berechnet, wie er bei Haberl et al. (2009) diskutiert wurde. Das heißt, dass zur Berechnung der eHANPP sozusagen „von unten nach oben“ vorgegangen wird und ein möglichst niedriger Grad der Aggregation der Daten vorliegen sollte.

Um die für die Berechnung benötigten Daten abzuschätzen, habe ich eine eingehende Literaturrecherche durchgeführt. Relevant sind vor allem Daten über Erträge der Nutzpflanzen, sowie Biomasseverluste und Nebenprodukte im Produktionsprozess.

Die Berechnung der eHANPP kann in drei wesentliche Schritte unterteilt werden. Erstens wird diejenige HANPP berechnet, die pro Flächeneinheit und Jahr aus dem Anbau und der Ernte einer Nutzpflanze (z.B. Raps) resultiert. Zweitens wird diese HANPP durch den jährlichen Flächenertrag eines Bioenergieträgers (z.B. RME) geteilt, um damit die HANPP pro Energieeinheit (hier 1 MJ) des Bioenergieträgers zu bestimmen. Durch diesen zweiten Schritt erhalten wir die eHANPP für das gesamte System der Bioenergieträgerproduktion, also inklusive der Nebenprodukte (Stroh, Rapskuchen, Glycerin). Im dritten Schritt wird die eHANPP des Gesamtsystems auf das Hauptprodukt und seine Nebenprodukte mit einem geeigneten Allokationsverfahren (Zuordnungsverfahren) sinnvoll aufgeteilt.

Die funktionelle Einheit für die eHANPP-Ökobilanz ist 1 MJ des jeweiligen Bioenergieträgers.

HANPP. Die HANPP ist definiert als die Summe aus $HANPP_{harv}$ und $HANPP_{luc}$ (Terminologie nach Krausmann et al., 2013). In dieser Arbeit berechne ich die HANPP (und damit auch die eHANPP) für die gesamte, also ober- und unterirdische, NPP.

Berechnung $HANPP_{harv}$. Als Grundlage zur Berechnung der $HANPP_{harv}$ dienen Flächenerträge der jeweiligen Nutzpflanzen. Die recherchierten Literaturwerte rechne ich in die Einheit Kilogramm Trockenmasse pro Quadratmeter und Jahr, kurz $kg / (m^2 \cdot a)$, um. Wenn die Erträge in Frischmasse angegeben sind, werden diese in Trockenmasse umgerechnet. Dazu verwende ich Daten über den Wassergehalt der jeweiligen Nutzpflanze (Haberl et al., 2007). Da Ernteerträge einer natürlichen Schwankung unterliegen, habe ich aus den Literaturwerten ein 5-Jahres-Mittelwert über die Jahre 1998 bis 2002 berechnet.

Weil die Literaturwerte für die Erträge sich meist nur auf den kommerziell nutzbaren Teil der Pflanze (z.B. Korn) beziehen, muss ich über einen Faktor, den sogenannten „Harvest Index“, auf die Masse der ganzen Pflanze (oberirdisch) schließen. In dieser Arbeit wird, wie bei Haberl et al. (2007), angenommen, dass während der Ernte die unterirdische NPP vollständig zerstört wird. Daher multipliziere ich den Wert der (oberirdischen) Ganzpflanze mit dem Wurzelfaktor 1,15 (generischer Wert, eigene Berechnung nach Haberl et al., 2012). Anschließend berechne ich mit Brennwerten (GCV; gross calorific value) den Energiegehalt der geernteten Biomasse. Die Brennwerte von Raps, Weizen und Mais unterscheiden sich kaum (siehe Tabelle 1), die verschiedenen Literaturwerte bezüglich einer Pflanze jedoch mindestens im selben Ausmaß. Daher verwende ich keinen dieser Literaturwerte, sondern generische Werte. Für die Pflanzen Raps, Weizen und Mais wird ein GCV von 18,5 MJ/kg, für holzartige Biomasse ein GCV von 19,5 MJ/kg verwendet (nach Haberl et al., 2007). Die nun berechnete Energiemenge ist die $HANPP_{harv}$.

Pflanze	Ertrag kg FM	Quelle
Raps	0,26	FAOSTAT, 2014
Weizen	0,50	FAOSTAT, 2014
Mais	0,96	FAOSTAT, 2014
Weide/Pappel	0,80 TM	Stürmer & Schmid, 2007

Tabelle 1. Kommerzielle Erträge (siehe Text) als 5-Jahres-Mittelwert über die Jahre 1998 bis 2002 in kg Frischmasse (FM) pro Quadratmeter und Jahr. Ausnahme: Weide/Pappel Ertrag (jährlicher Zuwachs pro m^2) in kg Trockenmasse (TM).

Pflanze	Wassergehalt	Quelle
Raps	12 %	Haberl et al., 2007
Weizen	14 %	Haberl et al., 2007
Mais	14 %	Haberl et al., 2007

Tabelle 2. Wassergehalt in Prozent der kommerziellen Ernte (Korn).

Pflanze	HI in kg/kg	Quelle
Raps	0,35	Wirsenius, 2000
Weizen	0,50	Wirsenius, 2000
Mais	0,45	Wirsenius, 2000
Kurzumtrieb*	0,84	Calfapietra et al., 2003

*Tabelle 3. Harvest Indices (HI) sind definiert als das Verhältnis von der kommerziellen Ernte (z.B. Korn) zur Ganzpflanze (oberirdisch). *Kurzumtrieb von Pappeln mit einer Umtriebszeit von 2 bis 3 Jahren.*

Ganzpflanze	GCV in MJ/kg	Quelle
Raps	19,09	Maier et al., 1998
	19,38	TU Biobib, 2014
Weizen	18,61	Maier et al., 1998
	16,87	TU Biobib, 2014
	18,70	Kaltschmitt et al., 2009
Mais	19,00	Maier et al., 1998
	17,69	TU Biobib, 2014

Tabelle 4. Brennwerte (GCV) für Raps, Weizen und Mais beziehen sich auf die Ganzpflanze, jedoch ohne Wurzeln. In dieser Arbeit wird für diese Pflanzen ein generischer Wert von 18,5 MJ/kg verwendet, für holzartige Biomasse 19,5 MJ/kg (siehe Text).

Berechnung NPP_{act} . Doch nicht nur während der Ernte, sondern auch vor der Ernte, geht Biomasse verloren. Diese Verluste, beispielsweise durch Schädlingsbefall, können mit dem „Preharvest Loss“ Faktor geschätzt werden. Sie betragen etwa 14 Prozent der $HANPP_{harv}$ (Haberl et al., 2007). Die NPP_{act} ist demnach das Produkt aus der $HANPP_{harv}$ und dem Preharvest Loss Faktor 1,14.

Berechnung NPP_{pot} . Die natürliche oder potentielle Nettoprimärproduktion, NPP_{pot} wurde bereits von Haberl und Kollegen für unterschiedliche Landnutzungstypen in Österreich berechnet (Haberl et al., 2012). Für Raps, Weizen, Mais und Pappel/Weiden-Kurzumtrieb verwende ich die NPP_{pot} des Landnutzungstyps „Ackerland“, für Brennholz den Landnutzungstyp „Wald“. Für die Umrechnung der Kohlenstoff-Einheit C in die Biomasse-Einheit kg Trockenmasse (kg TM) multipliziere ich den Literaturwert mit dem Faktor 2 (Haberl et al., 2007). Anschließend rechne ich kg TM in MJ um, indem ich unabhängig vom Landnutzungstyp mit dem Wert 19,5 MJ/kg (für holzartige Biomasse, Haberl et al., 2007) multipliziere, da die potentielle Vegetation in Österreich Mischwald ist.

Berechnung $HANPP_{luc}$. Die menschliche Aneignung von Nettoprimärproduktion, welche mit der Landnutzungsveränderung einhergeht, also die $HANPP_{luc}$, ergibt sich aus der Differenz von NPP_{pot} und NPP_{act} .

Berechnung HANPP. Die Summe aus $HANPP_{luc}$ und $HANPP_{harv}$ ergibt schließlich die HANPP.

Berechnung eHANPP. Ziel der Arbeit ist diejenige HANPP zu bestimmen, die mit 1 MJ eines Bioenergieträgers (funktionelle Einheit) einhergeht. Dazu dividiere ich die berechnete HANPP durch den jährlichen Flächenertrag des Bioenergieträgers. Beide Größen beziehen sich auf 1 Quadratmeter (m^2) und 1 Jahr (a), sodass sich diese Einheiten kürzen. Die eHANPP hat folglich die Einheit $MJ_{(HANPP)}$ pro $MJ_{(Bioenergieträger)}$. Der Einfachheit halber wird die eHANPP ab sofort in J/J angegeben. Die jährlichen Flächenerträge für die Bioenergieträger berechne ich basierend auf FAO-Erträgen und Informationen über die Energieflüsse aus der Literatur (Kaltschmitt & Streicher, 2009; Menrad & König, 1982; Neubarth & Kaltschmitt, 2000). Anschließend vergleiche ich meine berechneten Werte mit jährlichen Flächenerträgen aus der Literatur (siehe Diskussion).

Die eHANPP ist zu diesem Zeitpunkt für den gesamten Prozess berechnet. Sie bezieht sich auf das Hauptprodukt und alle Nebenprodukte.

Besonderheiten Kurzumtrieb. Die Berechnung der eHANPP für Holzhackschnitzel aus Weiden/Pappel-Kurzumtrieb weist zwei Besonderheiten auf. Der Wurzelfaktor ist höher als bei den Ackerbaupflanzen und beträgt 1,19 (nach Calfapietra et al., 2003). In meiner Literaturrecherche konnte ich keine Informationen über die Biomasseverluste vor der Ernte (Preharvest Loss) finden. Cannell (1982) beschreibt die Nettoproduktion von einem 59 jährigen Rotbuchenwald in Deutschland. Die Nettoproduktion beträgt 1,39 kg pro Quadratmeter und Jahr. Davon sind 0,40 kg Streu (Bestandsabfall aus Laub, Früchten, Rinden, Äste). Daraus berechne ich einen Verlustfaktor von 1,40. Um den Preharvest Loss für Kurzumtrieb abzuschätzen verwende ich 4 Szenarien. In Szenario 1 ist der Faktor nur geringfügig größer als 1,14. In Szenario 4 ist der Faktor nur geringfügig kleiner als 1,40. Dazwischen liegen die Schätzwerte von 1,23 und 1,31 (vergleiche Tabelle 5).

Schätzung	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Faktor	1,15	1,23 *	1,31	1,39

*Tabelle 5. Schätzung des Preharvest Loss Faktor für Pappel/Weiden-Kurzumtrieb. * Szenario 2 wird als bester Schätzwert mit 1,23 für die Berechnung der eHANPP verwendet.*

Weiden, bzw. Pappeln, wachsen auf Kurzumtriebsplantagen bis zur Ernte 2 bis 10 Jahre. Besonders geeignet erscheinen Umtriebszeiten von 4 oder 5 Jahren (Stürmer & Schmid, 2007). Der Preharvest Loss Faktor im Kurzumtrieb muss sich stärker von demjenigen eines 59 jährigen Rotbuchenwald unterscheiden als von demjenigen einjähriger Nutzpflanzen. Daher verwende ich den Faktor 1,23 als besten Schätzwert für die Berechnung der eHANPP.

Besonderheiten Brennholz. Für die Berechnung der eHANPP von Brennholz verwende ich HANPP-Werte zum Landnutzungstyp „Wald“ aus der Literatur. $HANPP_{luc}$ beträgt $0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $HANPP_{harv}$ und damit auch HANPP betragen $5,53 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (eigene Berechnung nach Haberl et al., 2012). Davon sind 11% Ernteverluste (Haberl et al., 2007). Folglich betragen die Ernteverluste $0,61 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und die kommerziell genutzte Ernte $4,93 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Die Holzernte setzt sich aus rund 22% Brennholz und 78% Industrieholz zusammen (eigene Berechnung nach FAOSTAT 2014). Daraus ergibt sich ein Brennholzertrag von $1,07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Allokation. Für eine sinnvolle Zuordnung der eHANPP auf die Nebenprodukte und das Hauptprodukt, muss ein geeignetes Allokationsverfahren gewählt werden. Es gibt keine „wissenschaftlich korrekte“ Lösung für diese Herausforderung (Haberl et al., 2009). Dennoch muss für die jeweilige Forschungsfrage eine bestmögliche Allokation angestrebt werden.

Die Internationale Organisation für Normung, kurz ISO, präsentierte 1998 einen Standard für Ökobilanzen (ISO 14041, 1998). Demnach soll Allokation, wenn möglich, vermieden werden. Dazu kann entweder der Multifunktions-Prozess in einzelne Unter-Prozesse aufgeteilt werden, oder es werden die Systemgrenzen erweitert. Wenn dies nicht möglich ist, sollen Allokationen basierend auf physischen Beziehungen vorgenommen werden. Wenn auch dies nicht möglich ist, sollten andere Beziehungen wiedergegeben werden (z.B. Marktpreise).

In dieser Arbeit soll der ISO Standard 14041 als Grundlage dienen. Für die untersuchten Bioenergieproduktionssysteme ist eine Aufteilung in Unter-Prozesse nicht möglich, da für die Nebenprodukte (z.B. Rapskuchen) keine unabhängigen Produktionspfade existieren. Eine Erweiterung der Systemgrenzen erscheint schwierig und im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. Nebenprodukte der Bioenergieproduktion werden als Tierfutter eingesetzt. Allerdings wird Tierfutter in der Viehwirtschaft aus einer Reihe von Rohstoffen zusammengesetzt. Daher vermeidet eine Substitutionsmethode die Allokation nicht, sondern vergrößert die Allokationsproblematik. Demnach scheint eine Allokation basierend auf physischen Beziehungen (Energie) für diese Arbeit angemessen.

Biomasseflüsse der Bioenergieproduktionssysteme. Für eine sinnvolle Allokation müssen die Biomasseflüsse bekannt sein (siehe Abbildungen 1 bis 6). Aus den untersuchten Rohstoffen Raps, Weizen, Mais und Holz (Inputs) entstehen neben den Bioenergieträgern (Hauptprodukte) auch Nebenprodukte, Rück- und Nebenflüsse (Outputs). Als Nebenprodukte definiere ich alle Outputs, welche eine weitere wirtschaftliche Verwendung finden. Bei den Biokraftstoffen sind das proteinreiche Nebenprodukte (Rapskuchen, Schlempe), die als Tierfutter verwendet werden. Rückflüsse wie Stroh oder Wurzeln,

die während der Ernte zerstört werden, wird keine eHANPP zugewiesen. Die jeweils für ein Gesamtsystem (z.B. Raps-System) berechnete eHANPP wird auf das Hauptprodukt und das Nebenprodukt entsprechend ihrer Energiemengen aufgeteilt (physische Allokation nach Energie). Im Fall des Biogas-Systems (Mais) entsteht der Output „Gärrest“, welcher keine nennenswerte wirtschaftliche Verwendung findet, und daher als Abfallprodukt klassifiziert wird (mögliche Verwendungen des Gärrests werden in der Diskussion besprochen). Als einziges der untersuchten Produktionssysteme entsteht im Kurzumtrieb kein Nebenprodukt. Eine Allokation ist daher nicht notwendig. Das Forstsystem wird als System mit den Produkten Brennholz und Industrieholz, sowie dem Rückfluss aus Residuen, wie Rinden, Wurzeln, oder Blätter betrachtet. Die berechnete eHANPP für das Gesamtsystem wird auf die Produkte Brennholz und Industrieholz entsprechend der jeweiligen Energiemengen aufgeteilt. Biogas aus Gülle wird keine eHANPP zugewiesen, da Gülle als Abfallprodukt klassifiziert werden muss (siehe Diskussion).

Bioenergieträger	Nebenprodukt	Allokationsfaktor
RME	Rapskuchen	58 %
EtOH Weizen	Schlempe	46 %
EtOH Mais	Schlempe	64 %
Biogas Mais	-	100 %
Biogas Gülle	-	0 %
Brennholz	Industrieholz	22 %
Holz hackschnitzel	-	100 %

Tabelle 6. Allokationsfaktoren der Bioenergieträger (Hauptprodukte) sind definiert als das Verhältnis der Energiemenge des Energieträgers zu der Summe aus Hauptprodukt und Nebenprodukt. Industrieholz wird in dieser Arbeit definitionshalber als „Nebenprodukt“ bezeichnet. Mengenmäßig und ökonomisch ist es das Hauptprodukt in der Forstwirtschaft.

ERGEBNISSE

Zu den Ergebnissen dieser Arbeit gehören unter anderem Energieflüsse von sechs Bioenergieträgern (siehe Abbildungen 1 bis 6), HANPP-Werte zu fünf Nutzpflanzen (siehe Tab. 7), sowie jeweils die eHANPP für sieben Bioenergieträger (siehe Abbildung 7).

Energieflüsse. Die Energieflüsse der Bioenergieträger sind für die Allokation relevant (siehe Methoden).

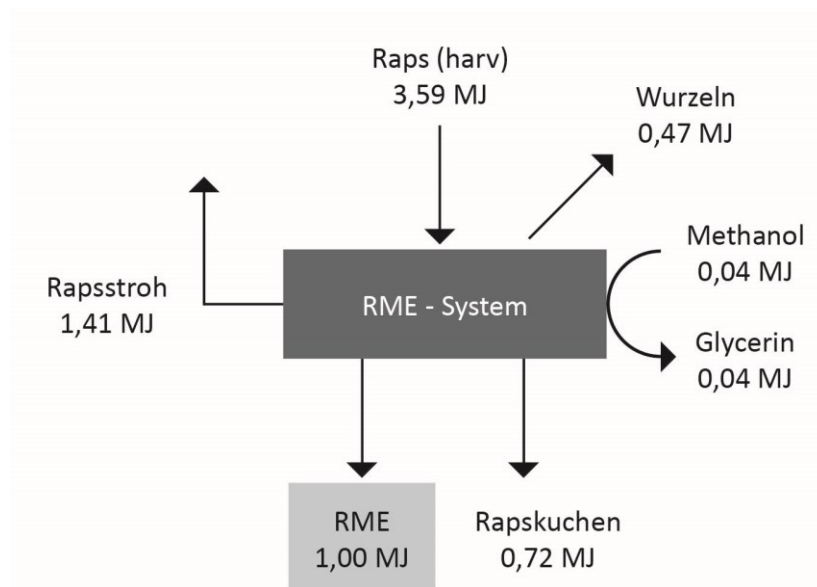


Abbildung 1. Energiefluss des RME-Systems auf Basis von FAO-Erträgen und Energieflussinformationen von Neubarth & Kaltschmitt (2000). Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ RME Output. Der Input ist die HANPP_{harv} von Raps. Wurzeln, die während der Ernte zerstört werden, und Rapsstroh sind Rückflüsse. Der Nebenfluss von Methanol zu Glycerin ist HANPP neutral. Methanol wird aus Synthesegas hergestellt (Menrad & König, 1982).

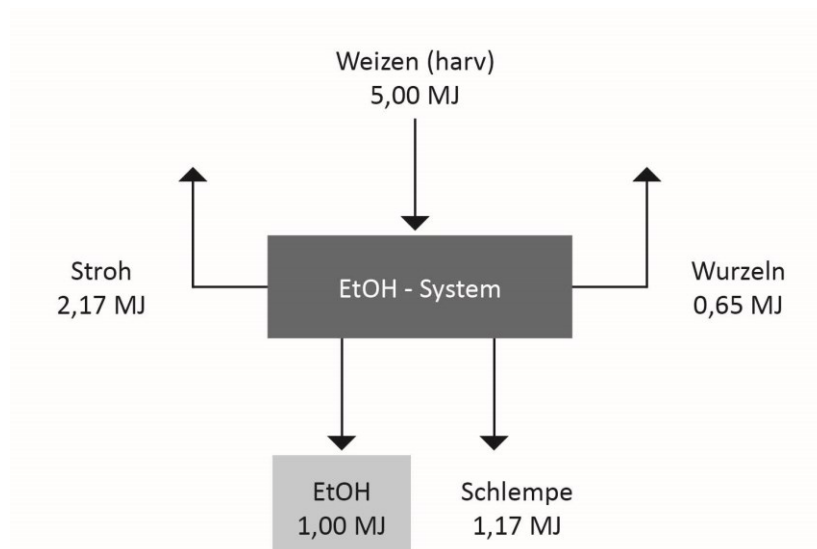


Abbildung 2. Energiefluss des Weizen-Bioethanol-Systems auf Basis von FAO-Erträgen und Energieflussinformationen von Kaltschmitt & Streicher (2009). Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ Ethanol Output. Der Input ist die HANPP_{harv} von Weizen. Stroh und Wurzeln sind Rückflüsse.

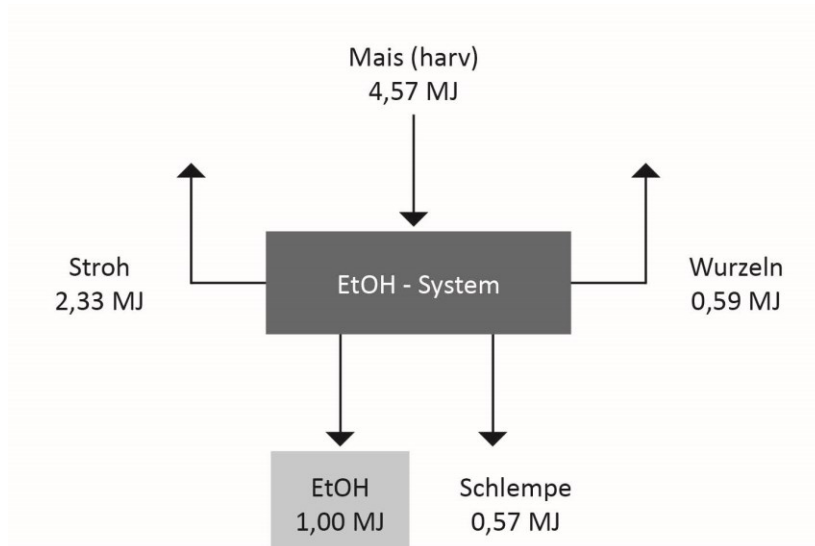


Abbildung 3. Energiefluss des Weizen-Bioethanol-Systems auf Basis von FAO-Erträgen und Energieflussinformationen von Menrad & König (1982). Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ Ethanol Output. Der Input ist die HANPP_{harv} von Mais. Stroh und Wurzeln sind Rückflüsse.

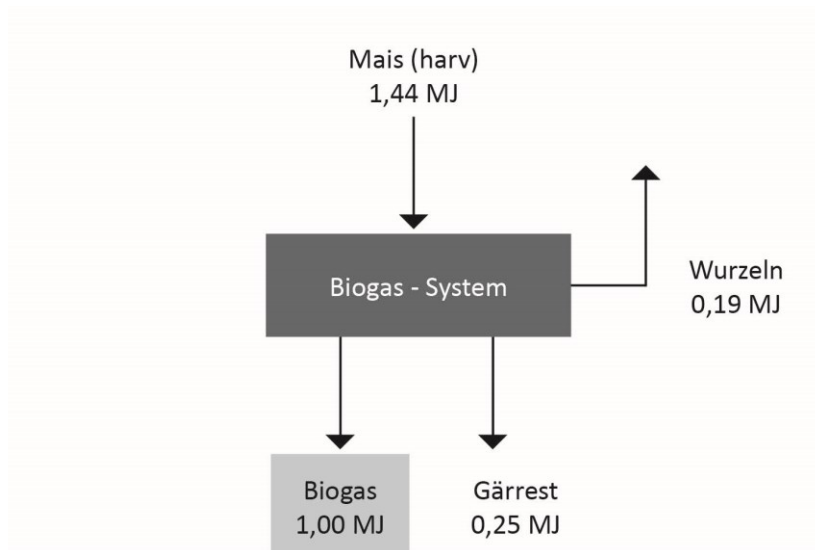


Abbildung 4. Energiefluss des Mais-Biogas-Systems auf Basis von FAO-Erträgen und Energieflussinformationen von Kaltschmitt & Streicher (2009). Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ Biogas Output. Der Input ist die HANPP_{harv} von Mais. Für das Biogas wird die Ganzpflanze (oberirdisch) als Maissilage vergoren. Daher ist Stroh kein Rückfluss. Wurzeln sind ein Rückfluss.

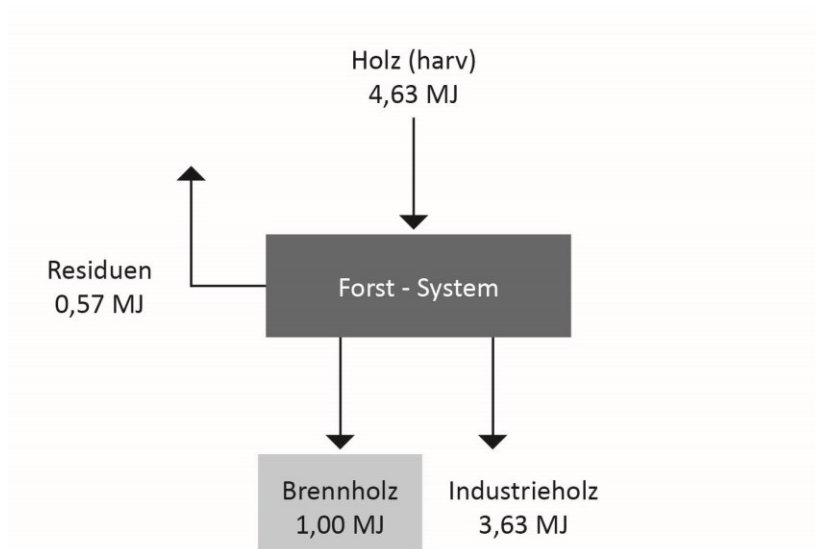


Abbildung 5. Energiefluss des Forst-Systems auf Basis von HANPP-Werten von Haberl et al. (2012). Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ Brennholz Output. Der Input ist die $HANPP_{harv}$ von Holz. Residuen, wie Rinden, Wurzeln, oder Blätter, sind Rückflüsse.

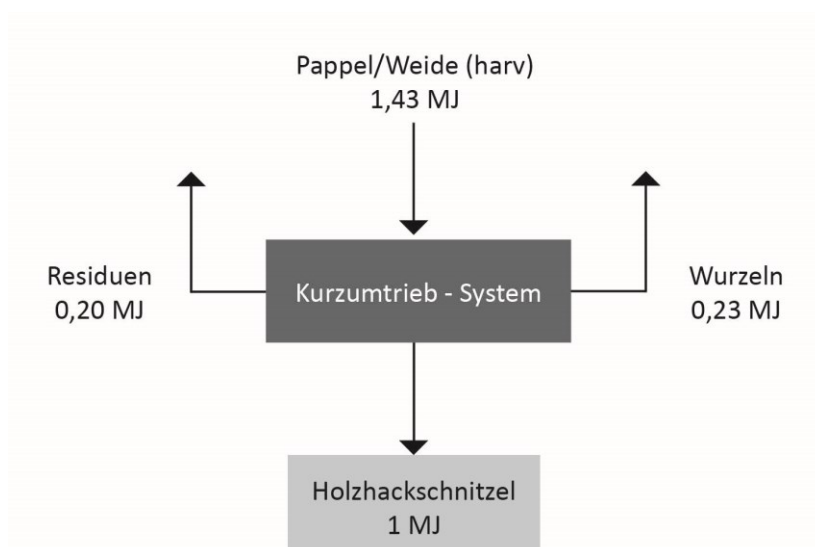


Abbildung 6. Energiefluss des Kurzumtrieb-Systems. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ Holzhackschnitzel Output. Der Input ist die $HANPP_{harv}$ von Pappel/Weide-Kurzumtrieb. Residuen (hier oberirdische Ernteverluste) und Wurzeln sind Rückflüsse.

HANPP. Die menschliche Aneignung der Produkte der Photosynthese (HANPP) ist bei den Ackerpflanzen (Raps, Weizen und Mais) am größten und reicht von 78% bis 92% der potentiellen Nettoprimärproduktion (NPP_{pot}). Die HANPP von Brennholz und Holzhackschnitzel macht 22% bzw. 68% aus. Die Energiepflanzen Mais und Kurzumtriebsgehölzer sind produktiver als die natürliche Vegetation. Durch die fast vollständige Entnahme der Biomasse durch die Ernte, sind die HANPP-Werte dennoch positiv (vergleiche Tabelle 7).

$MJ\ m^{-2}\ a^{-1}$	Raps	Weizen	Mais	Brennholz	Holzhack.
NPP_{pot}	25,07	25,07	25,07	25,46	25,07
NPP_{act}	15,99	21,01	44,34	25,46	27,35
NPP_{eco}	1,96	2,58	5,45	19,93	5,11
$HANPP_{luc}$	9,08	4,06	-19,27	0	-2,28
$HANPP_{harv}$	14,02	18,43	38,89	5,53	22,23
HANPP	23,11	22,49	19,62	5,53	19,96

Tabelle 7. HANPP-Werte in MJ pro Quadratmeter und Jahr für Raps, Weizen, Mais und Holzhackschnitzel aus Pappel/Weiden Kurzumtrieb.

Bioenergieerträge. Jährliche Erträge der Bioenergeträger habe ich auf Basis von FAO-Erträgen der Rohstoffe und Informationen über Energieflüssen aus der Literatur berechnet. Tabelle 8 fasst die Ergebnisse zusammen.

$MJ\ m^{-2}\ a^{-1}$	RME	$EtOH_w$	$EtOH_M$	$Biogas_M$	Brennholz	Holzhack.
E_y	3,90	3,69	8,51	27,07	1,07	15,60

Tabelle 8. Bioenergieerträge (E_y) in MJ pro Quadratmeter und Jahr für Rapsmethylester, Bioethanol aus Weizen und Mais, Brennholz, sowie Holzhackschnitzel aus Pappel/Weiden Kurzumtrieb.

eHANPP der Gesamtsysteme. Der Quotient aus HANPP und Bioenergieertrag (E_y) entspricht der eHANPP für den gesamten Prozess eines Bioenergeträgerpfades. Er bezieht sich auf das Hauptprodukt und alle Nebenprodukte. Das „Nebenprodukt“ von Brennholz ist Industrieholz. Rund 78 % der Ernte im Forst wird als Industrieholz verwendet. Auch bei den anderen Bioenergeträgern vermittelt der Quotient einen falschen Eindruck. RME schneidet besser ab als $EtOH_w$, während die eHANPP von RME mit einer Allokation der Nebenprodukte schlechter als $EtOH_w$ abschneidet (vergleiche Tabelle 9 und Abbildung 7). Der Quotient eignet sich daher nicht, um die Bioenergeträger zu vergleichen. Eine Allokation ist notwendig.

J / J	RME	EtOH _w	EtOH _M	Biogas _M	Brennholz	Holzhack.
HANPP/E _v	5,92	6,10	2,31	0,72	5,20	1,28

Tabelle 9. Quotient aus HANPP und Bioenergieertrag (E_v) entspricht der eHANPP für das jeweilige Gesamtsystem (RME-System, EtOH_w-System, usw.).

eHANPP. Nach durchgeführter Allokation ergeben sich die eHANPP-Werte wie in Abbildung 7 dargestellt. Die produktbezogene eHANPP von Rapsmethylester (RME) ist mit 3,44 J/J die größte, gefolgt von Bioethanol aus Weizen mit 2,80 J/J, Bioethanol aus Mais mit 1,47 J/J, Holzhackschnitzel aus Kurzumtrieb mit 1,28 J/J, Brennholz aus der Forstwirtschaft mit 1,12 J/J, Biogas aus Mais mit 0,72 J/J, sowie Biogas aus Gülle mit 0 J/J.

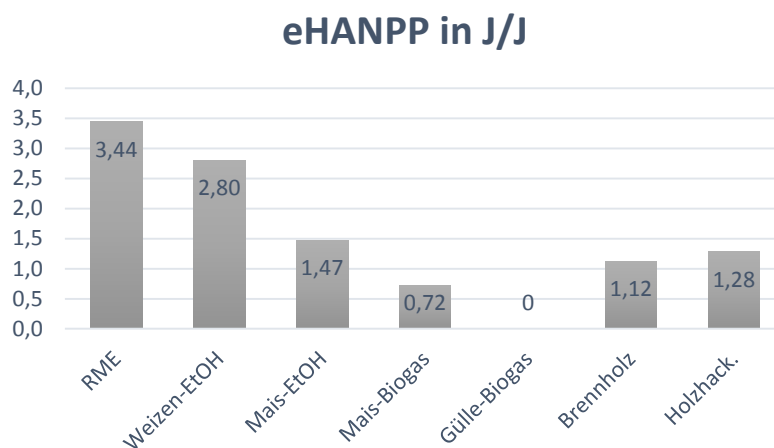


Abbildung 7. Embodied HANPP der Bioenergieträger Rapsmethylester, Weizen-Bioethanol, Mais-Bioethanol, Mais-Biogas, Gülle-Biogas, Brennholz und Holzhackschnitzel. Alle Angaben in J/J. Physische Allokation nach Energiemengen der Produkte (siehe Kapitel Methoden).

DISKUSSION

Berechnungen auf der Grundlage von vielen unterschiedlichen Quellen sind aller Wahrscheinlichkeit nach mit Fehlern behaftet. Meine Arbeit ist keine Ausnahme. Dennoch bin ich der Meinung, dass ich die notwendigen Maßnahmen getroffen habe und meine Ergebnisse in dem Maße robust und konsistent sind, wie es unter den Bedingungen einer Masterarbeit möglich ist.

Rohstoffträge. Die Daten über Erträge der Rohstoffe (Raps, Weizen, Mais, usw.) sind recht verlässlich und weichen eher selten stark voneinander ab (siehe Tabelle 3). Unterschiede in den Literaturwerten sind durch unterschiedliche Definitionen, die den Erträgen zu Grunde liegen, zu erklären. Auffällig sind die unterschiedlichen Erträge für Holz aus Kurzumtrieb. Dies liegt vermutlich daran, dass es Kurzumtrieb-Plantagen in Österreich bisher noch sehr wenige gibt. Unter den hohen Werten würde ich davon ausgehen, dass es sich um Forschungs-Plantagen handelt.

Rohstoff	Wert in FM kg m ⁻² a ⁻¹	Quelle
Raps	0,26*	FAOSTAT, 2014
	0,26	AMA, 2014
Weizen	0,50*	FAOSTAT, 2014
	0,50	AMA, 2014
	0,42	BMLFUW, 2013
	0,72	Kaltschmitt et al., 2009
Mais	0,96*	FAOSTAT, 2014
	0,91	Kastenhuber, 2007
	0,92	Kaltschmitt et al., 2009
Holz Forst	0,12*	eigene Berchnung nach FAOSTAT, 2014 und Haberl et al., 2012
Kurzumtrieb	0,80 bis 1,40 (TM)	Stürmer & Schmid, 2007
	1,00	Stockmann et al., 2010
	0,70 bis 1,50 (TM)	ENERGIEpflanzen, 2014
	1,20	FNR, 2013
	1,25	Kauter et al., 2001
	1,30	Rösch et al., 2007
	1,60	Österr. Biomasse-Verband, 2012

Tabelle 10. Erträge in Feuchtmasse (FM). Ausnahmen in Trockenmasse (TM) sind angegeben. Jeweils der erste Wert wurde für die eHANPP-Berechnung verwendet.

* Mittel über die Jahre 1998 bis 2002.

Erträge der Bioenergieträger. Neben den Rohstoff-Erträgen spielen Daten über die jährlichen Erträge der Energieträger eine wichtige Rolle für die Berechnung der eHANPP. Die Angaben aus der Literatur, wieviel MJ eines Bioenergieträgers auf einer Fläche in einer

bestimmten Zeit gewonnen werden kann, also der Ertrag, unterscheiden sich zum Teil sehr stark (siehe Tabelle 11).

Energieträger	Wert in MJ m ⁻² a ⁻¹	Quelle
RME	3,90	eigene Rechnung
	3,61	nach Wörgetter et al., 1999
	3,65	nach Senn & Luca, 2002
	3,72	Neubarth & Kaltschmitt, 2000
	4,90	Scharmer, 2001
	5,07	nach Quaschnig, 2009
	5,16	Braun et al., IEA task 37
	5,30	Kaltschmitt & Streicher, 2009
EtOH_{Weizen}	3,69	eigene Rechnung
	4,79	nach EnergieSchweiz 2006
	4,94	nach klimaaktiv.at, 2014
	5,12	nach Kaltschmitt & Hartmann 2001
	6,48	nach BDBe (online), 2014
	6,49	nach FNR, 2009
	6,49	nach FNR, 2011
	9,45	nach Rosenberger et al., 2000
EtOH_{Mais}	8,51	eigene Rechnung
	7,05	nach EnergieSchweiz 2006
	7,71	nach Kaltschmitt & Hartmann, 2001
	8,27	Kastenhuber, 2007
	8,27	nach Kaltschmitt et al., 2009
Biogas_{Mais}	27,07	eigene Rechnung
	7,62	nach Weiland, 2009
	7,69	nach Quaschnig, 2009
	19,60	Thyø & Wenzel, 2007
	27,87	nach Eder et al., 2012
	35,39	Braun et al., IEA task 37

Tabelle 11. Jährliche Erträge der Bioenergieträger. Die Quellenangaben mit "nach Autor, Jahreszahl" deuten an, dass Einheiten umgerechnet wurden. Jeweils in der ersten Zeile steht der Wert laut eigener Rechnung auf Basis von FAO-Erträgen und Energieflussinformationen aus der Literatur (siehe Methoden).

Hohe Literaturwerte für Erträge der Bioenergieträger sind mit Vorsicht zu behandeln, da es sich meist um Studien handelt, die unter kontrollierten und optimierten Bedingungen für das Wachstum der Energiepflanzen durchgeführt wurden. Daher habe ich die jährlichen Erträge der Bioenergieträger auf Basis von FAO-Erträgen und Informationen über den Energiefluss vom Feld bis zum fertigen Energieträger ermittelt. Dazu finden sich in der einschlägigen Literatur Angaben darüber, wieviel MJ der Ganzpflanze im Energieträger, in seinen Nebenprodukten und in den Verlusten verbleiben. Für die Energieträger auf Basis von Mais berechne ich Werte, die in der Größenordnung der Literaturwerte sind. Mais ist eine Energiepflanze mit sehr hohen Erträgen. Unter kontrollierten Versuchsbedingungen wird der Maisertrag nicht wesentlich höher ausfallen. Auffallend niedrig sind die Biogaserträge von Weiland

(2009) und Quaschnig (2009). Weiland beschreibt in seiner Arbeit relativ niedrige Maiserträge von 0,4 bis 0,6 kg/m². Andere Informationen, die diese niedrigen Biogaserträge erklären würden, liegen mir nicht vor.

eHANPP. Die Ergebnisse aus der Berechnung der eHANPP zeigen, dass Bioenergieträger bezüglich dem Landnutzungsindikator eHANPP unterschieden werden können. Während für 1 MJ des Biokraftstoffs RME zusätzlich 2,44 MJ wegen Verlusten und Landnutzungsveränderung angeeignet werden, sind es bei dem Bioethanol aus Weizen 1,80 MJ, und bei Brennholz, Holzhackschnitzel, und Bioethanol aus Mais zwischen 12% und 47%, die zusätzlich zum Energieträger angeeignet werden. Das heißt allerdings nicht, dass die Energieträger mit einem eHANPP-Wert von rund 1 MJ auf ihrem Produktionsweg keine oder kaum Verluste aufweisen. Bei dem Rohstoff Mais sind die Verluste etwa gleich groß wie bei Raps oder Weizen. Der niedrige eHANPP-Wert geht auf die stark negative HANPP_{luc} zurück. Maispflanzen haben eine höhere Biomasseproduktion als die natürliche Vegetation und können damit die Verluste entlang dem Produktionsweg zum Energieträger ausgleichen. Wird Mais als Ganzpflanze zu Biogas verarbeitet, ist die eHANPP mit 0,70 J/J sogar kleiner als 1 J/J. Das bedeutet, dass verglichen mit der natürlichen Vegetation ein Mehrprodukt von 0,30 MJ pro 1 MJ Biogas entsteht. Bei Brennholz hingegen ist die HANPP_{luc} gleich (oder nahe) Null, da der Wald der natürlichen Vegetation entspricht. Die eHANPP des Brennholzes wird somit allein durch die Verluste erhöht.

Holzhackschnitzel. In meiner Literaturrecherche konnte ich keine Informationen über die Biomasseverluste in Kurzumtriebsplantagen vor der Ernte (Preharvest Loss) finden. Daher habe ich Szenarien definiert, die den Bereich der möglichen Werte abstecken (siehe Methoden). Tabelle 12 zeigt die aus der jeweiligen Schätzung resultierende NPP_{act}, sowie eHANPP. Das minimal Szenario 1 und das maximal Szenario 4 für die Preharvest Loss Faktoren grenzen die möglichen eHANPP Werte zwischen 1,39 J/J und 1,05 J/J recht gut ein.

Schätzung	Preharvest Loss	NPP _{act} MJ m ⁻² a ⁻¹	eHANPP J/J
Szenario 1	1,15	25,57	1,39
Szenario 2	1,23 *	27,35	1,28
Szenario 3	1,31	29,12	1,17
Szenario 4	1,39	30,90	1,05

*Tabelle 12. Schätzung des Preharvest Loss Faktors für Pappel/Weiden Kurzumtrieb und daraus resultierende NPP_{act} und eHANPP. *Der Faktor 1,23 wurde als bester Schätzwert für die Berechnung der eHANPP verwendet.*

Biogas aus Mais. Der Reststoff aus der Biogasanlage, der sogenannte Gärrest, kann aufgrund seines hohen Mineralgehalts als Dünger eingesetzt werden. Würde der Gärrest eine nennenswerte wirtschaftliche Verwendung finden, müsste er in der Allokation

berücksichtigt werden. Teilweise kaufen Landwirte den Gärrest von Biogasanlagen, teilweise verlangen sie jedoch sogar Geld dafür, dass sie Gärrest abnehmen. Die vorherrschende Düngemethode ist der Einsatz von Mineraldünger aus der Petrochemie. Gärrest spielt als Dünger eine untergeordnete Rolle und muss daher als Abfallprodukt klassifiziert werden.

Biogas aus Gülle. Die eHANPP von Biogas aus Gülle wird in dieser Arbeit mit 0 J/J ausgewiesen. Begründet habe ich es damit, dass ich Gülle als Abfallprodukt einstufe. Es ist aber bekannt, dass in kleinen landwirtschaftlichen Betrieben und im biologischen Landbau Gülle als Düngemittel eingesetzt wird. Allerdings findet auf diesem Weg nur ein Bruchteil der in der Viehwirtschaft erzeugten Gülle eine Verwendung. Theoretisch könnte nun Gülle als Nebenprodukt angesehen werden, dem über ein Allokationsverfahren ein Anteil der in der Viehwirtschaft entstehenden HANPP zugewiesen wird, unter der Bedingung, dass nur der Bruchteil der Gülle, welcher kein Abfallprodukt darstellt, mengenmäßig in die Allokation einfließt. Aus dieser Überlegung heraus wird klar, dass dieser Teil der Gülle vernachlässigbar klein wird. Außerdem könnte man argumentieren, dass die tatsächlich als Dünger eingesetzte Gülle als Substitut (Ersatz) für petrochemisch erzeugten Dünger eingesetzt wird und damit einen Produktionsweg substituiert, mit dem keine HANPP verbunden ist. Für mich jedoch ausschlaggebend ist das Verhältnis der Größenordnungen. Während die Milch- und Fleischproduktion in der Landwirtschaft ökonomisch und ökologisch eine große Rolle spielt, werden Veränderungen durch einen etwas größeren oder kleineren Einsatz der Gülle als Dünger oder als Substrat für Biogasanlagen (wobei die Bioenergiewirtschaft deutlich kleiner als die fossile Energiewirtschaft ist) keine relevanten Auswirkungen haben. Ekvall und Finnveden sprechen von einem „Scale of Change“ (Ausmaß der Veränderung) als ein Prinzip in der Allokationsproblematik (Ekvall & Finnveden, 1998). Dieses Prinzip muss im Fall des Biogases aus Gülle angewendet werden, sodass Biogas aus Gülle als HANPP neutral bewertet wird.

Landnutzungsindikator. Die produktbezogene „embodied HANPP“ ist ein Landnutzungsindikator, der Informationen darüber liefert, welche Menge der Produkte der Photosynthese (NPP) durch den Menschen angeeignet werden müssen, um einen bestimmten Bioenergieträger an einem bestimmten Ort herzustellen. Die globalen Handelsströme von Biomasse nehmen enorm zu. Dadurch wird die räumliche Trennung zwischen den Orten immer größer, wo Biomasse produziert wird, wo gleichzeitig die Umweltbelastung durch die landwirtschaftliche Aktivität entsteht, und wo sie letztendlich konsumiert wird (Erb et al., 2009). Mit der produktbezogenen eHANPP kann nun eine Handelsware aus Biomasse mit dem Umweltindikator HANPP beschrieben werden. Sie

erhält sozusagen einen „HANPP-Rucksack“, der beispielsweise bei ihrem Import, die angeeignete NPP quantifiziert.

Mit dem Landnutzungsindikator eHANPP können Bioenergie-Produktionssysteme im Hinblick darauf verglichen werden, wie sie die Produktionsökologie von Land-Ökosystemen verändern und in welchem Ausmaß Landfläche in Anspruch genommen wird. Die produktbezogene eHANPP leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Untersuchung des gesellschaftlichen Stoffwechsels mit der Natur.

LITERATUR

- Allan JA (1998) "Virtual Water: A Strategic Resource. Global Solutions to Regional Deficits" *Ground Water* 36(4):545-546.
- AMA (2014) *AgraMarkt Austria, Marktinformationen, Getreide und Ölsaaten, Produktion*, <http://www.ama.at/>.
- BDBe (2014) *Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft*, <http://www.bdbe.de/>.
- BMLFUW (2013) *Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich*, <http://www.bmlfuw.gv.at/>.
- Braun R, Weiland P, Wellinger A "Biogas from Energy Crop Digestion" *IEA Bioenergy, Task 37*.
- Calafapietra C, Gielen B, Galema ANJ, Lukac M, Angelis PD, Moscatelli MC, Ceulemans R, Scarascia-Mugnozza G (2003) "Free-air CO₂ enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation" *Tree Physiology* 23:805-814.
- Cannell MGR (1982) "World Forest Biomass and Primary Production Data" *Academic Press*. ISBN 978-0121587802.
- Davis SJ, Caldeira K (2010) "Consumption-based accounting of CO₂ emissions" *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:5687-5692.
- Eder J, Eder B, Hofmann D, Darnhofer B, Lichti F (2012) „Silomais als Biogassubstrat“ *Biogas Forum Bayern, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.*, <http://www.biogas-forum-bayern.de/>.
- Ekvall T, Finnveden (2001) "Allocation in ISO 14041—a critical review" *Journal of Cleaner Production* 9:197-208.
- ENERGIEpflanzen (2014) *Reinhard Sperr, 4894 Oberhofen, Österreich*, <http://www.energiepflanzen.com/>.
- EnergieSchweiz (2006) „Bioethanol als Treibstoff“ *EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern*, <http://www.energie-schweiz.ch/>.
- Erb KH, Krausmann F, Lucht W, Haberl H (2009) "Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption" *Ecological Economics* 69:328-334.
- FAO (2014) *FAOSTAT 2014, FAO Statistical Databases: Agriculture, Fisheries, Forestry, Nutrition*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://faostat.fao.org/>.
- FNR (2009) „Basisdaten Biokraftstoffe Deutschland, Oktober 2009“ *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.*, <http://www.fnr.de/>.

FNR (2011) „Basisdaten Bioenergie Deutschland, September 2011“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., <http://www.fnr.de/>.

FNR (2013) „Basisdaten Bioenergie Deutschland, August 2013“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., <http://www.fnr.de/>.

Haberl H (1997) “Human Appropriation of Net Primary Production as an Environmental Indicator: Implications for Sustainable Development” *Ambio* 26(3):143-146.

Haberl H, Erb KH, Krausmann F, Gaube V, Bondeau A, Plutzer C, Gingrich S, Lucht W, Fischer-Kowalski M (2007) “Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth’s terrestrial ecosystems” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(31):12942-12947.

Haberl H, Erb KH, Krausmann F, Berecz S, Ludwiczek N, Martínez-Alier J, Musel A, Schaffartzik A (2009) “Using embodied HANPP to analyze teleconnections in the global land system: Conceptual considerations” *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 109(2):119-130.

Haberl H, Kastner T, Schaffartzik A, Ludwiczek N, Erb KH (2012) “Global effects of national biomass production and consumption: Austria’s embodied HANPP related to agricultural biomass in the year 2000” *Ecological Economics* 84:66-73.

ISO 14041 (1998) Geneva: International Organization for Standardization.

Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H (2001) „Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren“ Springer Verlag, 1. Auflage, ISBN 978-3-540-64853-6.

Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H (2009) „Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren“ Springer Verlag, 2. Auflage, ISBN 978-3-540-85095-3.

Kaltschmitt M, Streicher W (2009) „Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung“ Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-0839-4.

Kastenhuber M (2007) „Bioethanol - Kraftstoff der Zukunft?: Ganzheitliche Analyse und empirische Erhebung über die Zukunftschancen des Kraftstoffs Bioethanol“ Diplomica GmbH, Hamburg, ISBN 978-3-8366-5290-2.

Kauter D, Lewandowski I, Claupein W (2001) „Pappeln in Kurzumtriebswirtschaft: Eigenschaften und Qualitätsmanagement bei der Festbrennstoffbereitstellung – Ein Überblick“ Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, *Pflanzenbauwissenschaften* 5(2):64-74.

klimaaktiv (2014) klimaaktiv, Österreichische Energieagentur, <http://www.klimaaktiv.at/>.

Krausmann F, Erb KH, Gingrich S, Haberl H, Bondeau A, Gaube V, Lauk C, Plutzer C, Searchinger TD (2013) "Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century" Proceedings of the National Academy of Sciences 110(25):10324-10329.

Maier J, Vetter R, Siegle V, Spliethoff H (1998) „Anbau von Energiepflanzen - Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung“ Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Stuttgart, Forschungsvorhaben Ord.-Nr. 22-94.11.

Menrad H, König A (1982) „Alkoholkraftstoffe“ Springer Verlag, ISBN 978-3-7091-8664-0.

Neubarth J, Kaltschmitt M (2000) „Erneuerbare Energien in Österreich: Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte“ Springer Verlag, ISBN 978-3-211835791.

Österreichischer Biomasse-Verband (2012) „Energieholzproduktion im Kurzumtrieb, Hackschnitzel vom Acker“ Österreichischer Biomasse-Verband, Wien, <http://www.biomasseverband.at/>.

Quaschnig V (2009) „Regenerative Energiesysteme, Technologie – Berechnung – Simulation“ Hanser Verlag, 6. Auflage, ISBN 978-3-446-42151-6.

Rosenberger A, Kaul HP, Senn T, Aufhammer W (2000) „Optimierung der Produktion von Wintergetreide zur Bioethanolherstellung durch unterschiedlich intensive Anbauverfahren“ Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, J. Agronomy & Crop Science 185:55-65.

Rösch C, Raab V, Skarka J, Stelzer V (2007) „Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung?“ Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7333, ISSN 0947-8620.

Scharmer K (2001) „Biodiesel, Energy- and Environmental Evaluation, Rapeseed-Oil-Methyl-Ester“ Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V., <http://www.ufop.de/>.

Senn T, Luca F (2002) „Studie zur Bioethanolproduktion aus Getreide in Anlagen mit einer Jahres-Produktionskapazität von 2,5 und 9 Mio. Litern, Eine Energie- und Kostenbilanzierung“ Bundesverband landwirtschaftliche Rohstoffe verarbeitende Brennereien e.V. unter Beteiligung des Bundesverbandes Deutscher Kartoffelbrenner e.V.

Stockmann F, Hagemann H, Wenzelides M (2010) „Holzartige Biomasse in der Landwirtschaft – Praxisratgeber, Teil 1“ Acker+NawaRo, Wald-Zentrum, WWU Münster.

Stürmer B, Schmid E (2007) „Wirtschaftlichkeit von Weide und Pappel im Kurzumtrieb unter österreichischen Verhältnissen“
Ländlicher Raum - Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Thyø KA, Wenzel H (2007) “Life Cycle Assessment of Biogas from Maize silage and from Manure - for transport and for heat and power production under displacement of natural gas based heat works and marginal electricity in northern Germany” 2nd draft, Institute for Product Development.

TU Biobib (2014) “BIOBIB - A Database for biofuels” Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik,
<http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/>.

Vitousek PM, Ehrlich AH, Matson PA (1986) “Human Appropriation of the Products of Photosynthesis” *BioScience* 36(6):368-373.

Weiland P (2010) “Biogas production: current state and perspectives” Springer Verlag, *Appl Microbiol Biotechnol* 85:846-860.

Wirsenius S (2000) “Human Use of Land and Organic materials. Modeling the Turnover of Biomass in the Global Food System”
Chalmers University of Technology and Göteborg University, Sweden.

Wörgetter M, Lechner M, Rathbauer J (1999) „Ökobilanz Biodiesel“
Eine Studie der Bundesanstalt für Landtechnik im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, BLT Wieselburg.

KURZFASSUNG

Der steigende Energieumsatz der Menschheit setzt Ökosysteme zunehmend unter Druck. In dieser Arbeit untersuche ich Energieträger aus Biomasse mit dem Landnutzungsindikator HANPP. Methodisch führe ich eine Ökobilanz durch. Die menschliche Aneignung von Nettoprimärproduktion (HANPP) wird über den Lebenszyklus vom Feld bis zum Fabrikator für insgesamt sieben Bioenergieträger bestimmt. Die produktbezogene eHANPP, oder „Embodied HANPP“ beschreibt, wieviel der NPP vom Menschen angeeignet wird, um eine Energieeinheit (1 MJ) eines Bioenergieträgers zu erhalten. Die Ökobilanzierung wurde mit einer physischen Allokation nach den Energiemengen der Hauptprodukte der betrachteten Produktionssysteme durchgeführt.

Als Ergebnisse präsentiere ich unter anderem HANPP-Werte ($HANPP_{harv}$, $HANPP_{luc}$, NPP_{act} , NPP_{eco}) zu fünf Nutzpflanzen, Energieflüsse von sechs Bioenergieträgern, sowie jeweils die eHANPP für sieben Bioenergieträger. Die eHANPP von Rapsmethylester (RME) ist mit 3,44 J/J die größte, gefolgt von Bioethanol aus Weizen mit 2,80 J/J, Bioethanol aus Mais mit 1,47 J/J, Holzhackschnitzel aus Kurzumtrieb mit 1,28 J/J, Brennholz aus der Forstwirtschaft mit 1,12 J/J, Biogas aus Mais mit 0,72 J/J, und Biogas aus Gülle mit 0 J/J.

Die produktbezogene eHANPP liefert einen wichtigen Beitrag zur Untersuchung des gesellschaftlichen Stoffwechsels mit der Natur. So können Bioenergieproduktionssysteme im Hinblick darauf verglichen werden, wie sie die Produktionsökologie von Land-Ökosystemen verändern und in welchem Ausmaß Landfläche in Anspruch genommen wird.

Lebenslauf

Ludwig Sommer, geb. 4. Oktober 1984

- 2005 Abitur, Bodensee-Gymnasium Lindau, 88131 Lindau (B),
 Deutschland

- 2007 Verhaltensbiologisches Praktikum (1 Monat), Konrad
 Lorenz Forschungsstelle für Ethologie, Grünau im
 Almtal, Österreich

- 2008 Praktikum im Botanischen Garten Augsburg (1 Monat),
 Deutschland

- 2008 Bachelor of Science (BSc), Biological Sciences,
 Universität Konstanz, 78457 Konstanz, Deutschland
 Titel der Bachelorarbeit: "Arbeitsgedächtnis der
 Honigbiene"

- 2008 Hilfswissenschaftler in der Arbeitsgruppe Neurobiologie
 der Universität Konstanz (4 Monate)

- 2010 Meeresschildkrötenprojekt der Universität Wien,
 Projektpraktikum (5 Wochen), Türkei

- 2011 Publikation "Mind the Gap: Olfactory Trace Conditioning
 in Honeybees", Paul Szyszka, Christiane Demmler,
 Mariann Oemisch, Ludwig Sommer, Stephanie Biergans,
 Benjamin Birnbach, Ana F. Silbering and C. Giovanni
 Galizia, The Journal of Neuroscience, 18 May 2011,
 31(20): 7229-7239; doi: 10.1523/JNEUROSCI.6668-
 10.2011

- 2009 Masterstudium der Anthropologie, Universität Wien
– 2014