

Karl-Heinz Kettl

**Ökologische Bewertung von integrierten
Technologiesystemen (insbesondere
Industrieparks) durch den Sustainable
Process Index**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Karl-Franzens-Universität Graz

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Narodoslawsky
Institut für Prozess- und Partikeltechnik, TU Graz

2009

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, 19. Mai 2009

Ort, Datum

(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 19. Mai 2009

date

(signature)

Abstract

Renewable energy technologies are important for securing our future energy demand. Beside our rapidly increasing energy demand, environmental aspects became more important in the past years. This work describes methods for the generation of electricity and heat. The production of bioethanol for fuel is also considered. The main focus is the ecological point of view. A Life Cycle Assessments of each technology was created to get the environmental impacts. On the basis of the Sustainable Process Index (SPI) ecological footprints were generated. These ecological footprints make it easier to compare the technologies on their environmental impacts.

Kurzzusammenfassung

Energietechnologien sind wichtig um unsere zukünftige Energieversorgung zu gewährleisten. Abseits unseres ständig wachsenden Energiebedarfs rückten in den vergangenen Jahren ökologische Aspekte immer mehr in den Vordergrund. Diese Arbeit beschreibt verschiedene Methoden zur Bereitstellung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energiequellen. Weiters wird die Produktion von Bioethanol zur Verwendung als Kraftstoff betrachtet. Ziel ist eine ökologische Betrachtung der verschiedenen Technologien. Dazu wurden Ökobilanzen erstellt um die Einflüsse auf die Umwelt zu erfassen. Um die Technologien vergleichen zu können, wurden ökologische Fußabdrücke mithilfe der Methode des Sustainable Process Index (SPI) erstellt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Sustainable Process Index - SPI	2
2.1. Methodik der Bewertung	3
2.2. Anmerkungen zur Fußabdrucksberechnung	5
2.3. CO ₂ - Emission	5
2.4. Fußabdrucksallokation bei Prozessen mit Sekundärprodukten	6
3. Auswahl der Technologien	7
4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung	8
4.1. Holz - Ein Vertreter der Biomasse	8
4.2. ORC	9
4.2.1. Technologie	10
4.2.2. SPI-Kalkulation	12
4.3. Holzpellets	17
4.3.1. Holzpellets - Rohstoff	17
4.3.2. Holzpellets - KWK	19
5. Bioethanol	23
5.1. Technologie	23
5.2. Bioethanol aus Mais	24
5.3. E85	25
6. Biogas	26
6.1. Technologie	26
6.2. Fallbeispiel - Brauerei Freistadt	29
6.3. Biogas - Reinigung	33
6.4. Biogas - Brennstoffzellen	33
6.4.1. Technologie	34
6.4.2. SPI-Kalkulation	35
6.5. Biogassubstrate	36

7. Windkraft	38
7.1. Technologie	38
7.2. SPI - Kalkulation	39
8. Thermische Solaranlage	43
8.1. Technologie	43
8.2. Flachkollektor	43
8.3. Anlage	44
9. Photovoltaik	46
9.1. Technologie	46
9.2. PV - Module	48
9.3. PV-Anlagen	50
10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich	53
10.1. Strombereitstellung	53
10.1.1. Allokationsvariante - Preis	55
10.2. Wärmebereitstellung	57
10.2.1. Allokationsvariante - Preis	57
10.3. Bioethanol	60
Literatur	63
A. Anhang	68
A.1. Vergleichensenergiesysteme - Strom	68
A.1.1. Ölkraftwerk	68
A.1.2. Erdgaskraftwerk	68
A.2. Vergleichensenergiesysteme - Wärme	70
A.2.1. Ölheizung	70
A.2.2. Gasheizung	70
A.3. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung	71
A.3.1. ORC	71
A.3.2. Holzpellets	74
A.4. Bioethanol	76

A.5. Biogas	78
A.5.1. Rohbiogas	78
A.5.2. Biogas - Reinigung	79
A.6. Wind	81
A.7. Thermische Solaranlage	82
A.7.1. Flachkollektor	82
A.7.2. Anlage	83
A.8. Photovoltaik	84
A.8.1. Module	84
A.8.2. Anlagen	92

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
DDGS	Dried Distillers Grains with Solubles)
EG-Si	electronic grade silicium
EtOH	Ethanol
H ₂	Wasserstoff
He	Helium
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
MeOH	Methanol, CH ₃ OH
MG-Si	metallurgisches Silizium
MJ	Megajoule
Nm ³	Normkubikmeter
PV	Photovoltaik
RME	Rapsmethylester
SPI	Sustainable Process Index
TS	Trockensubstanz

1. Einleitung

Das Thema Energiebereitstellung ist in den letzten Jahren sehr stark in den Vordergrund gerückt. Die EU hat im März 2007 seine Klimaschutzziele definiert (20% weniger Energieverbrauch, 20% weniger CO₂-Emissionen und 20% mehr erneuerbare Energien). Das erfordert den Einsatz neuer Technologien oder die Optimierung bereits bestehender Energiebereitstellungsanlagen. Ein weiterer Grund sich von traditionellen Energieträgern wie Kohle, Erdöl oder Erdgas schrittweise zu entfernen, sind sich ständig ändernde geopolitische Bedingungen.

Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung einer ökologischen Bewertung von Energietechnologien. Anhand der Anwendungen zur Generierung von Strom oder/und Wärme wurden ökologische Fußabdrücke erstellt. Zusätzlich zur Bereitstellung von Strom und Wärme wurde die ökologische Bewertung von Bioethanol-Kraftstoff durchgeführt. Die Inputs bestehen aus den eingesetzten Energieträgern, Prozessenergie, Transport der Energieträger und die Infrastruktur (z.B.: Photovoltaikanlage, Windrad, Kraftwerksgebäude,...), welche für die Umwandlung nötig ist. Wobei die Infrastruktur jeweils nur anteilmäßig, entsprechend der Lebensdauer einer Anlage, eingerechnet wurde. Diese Daten stammen aus verschiedensten Quellen, jedoch wurde als primäre Datenquelle die *ecolnvent 2.01* des Schweizer Zentrums für Ökoinventare verwendet. (Ecolnvent, 2001)

Zum Vergleich der Energietechnologien wurden für jede Technologie mithilfe des Programms **SPionExcel 2.07** ökologische Fußabdrücke erstellt und gegenübergestellt. Daraus erkennt man, in welchen Teilbereich der größte ökologische Druck entsteht und somit lassen sich Optimierungspotentiale identifizieren. (Krotschek, 1995)

2. Sustainable Process Index - SPI

Mithilfe einer ökologischen Bewertung ist es möglich, Prozesse (Stoff- oder Energiefluss) zu analysieren. Die Idee ist eine Fläche zu ermitteln um einen Prozess nachhaltig in die Ökosphäre einzubetten. Im Idealfall findet nicht nur eine ökonomische Betrachtung statt. Um ökologische Aspekte eines Prozesses zu bewerten benötigt man eine Methode um verschiedenste Art von Subprozessen eines Gesamtprozesses vergleichbar zu machen. Man definiert die Erdoberfläche als Basisdimension und die solare Exergie als primäres Einkommen, da praktisch jeder lebende Prozess daran gekoppelt ist. Die bei der Durchführung einer LCA ermittelten Stoff- und Energieflüsse werden einer äquivalenten Fläche zugewiesen.

Der SPI ist eine Verhältniszahl welche die zuvor ermittelte spezifische Fläche für einen Prozess in Relation zu einer statistisch ermittelten Fläche stellt. Diese statistisch ermittelte Fläche entspricht jener Fläche welche jedem Menschen auf der Erde zur Verfügung steht. In Abbildung 1 ist der SPI für den Prozess der Herstellung von RME dargestellt. In einer nachhaltigen

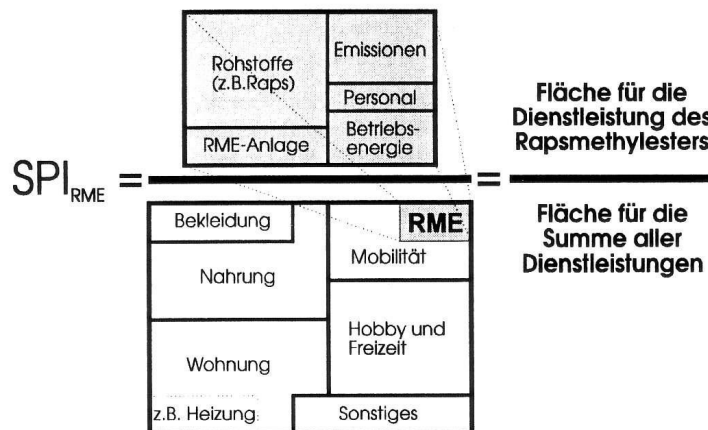


Abbildung 1 – SPI - Beispiel, Quelle: (Krotschek, 1995)

Gesellschaft ist der Wert des SPI = 1. Die Fläche eines Prozesses wird nach folgender Formel ermittelt:

$$A_{tot} = A_R + A_E + A_I + A_S + A_P \text{ [m}^2\text{]}$$

A_R Produktion von Rohmaterialien; setzt sich aus A_{RN} (renewable raw material area) und A_{RN} (non-renewable raw material area) zusammen

A_E Bereitstellung von Prozessenergie

A_I Bereitstellung der Installation; setzt sich aus A_{ID} (direct use of land area) und A_{II} (indirect use of land area)

A_S Personal

A_P Produktdissipation

Aus diesen Einzelflächen setzt sich A_{tot} zusammen. Der Prozess liefert einen Output welcher S_{tot} entspricht und ist auf ein Jahr bezogen.

$$a_{tot} = \frac{A_{tot}}{S_{tot}}$$

a_{tot} stellt somit die Fläche einer Outputeinheit oder Dienstleistungseinheit dar bezogen auf ein Jahr.

$$SPI = \frac{a_{tot}}{a_{in}}$$

a_{in} stellt die für jeden Menschen statistisch verfügbare Fläche dar. (Krotschek, 1995)

2.1. Methodik der Bewertung

Die Bewertung mit dem Tool SPIONExcel basiert auf Grunddatenbanken, in welchen bereits Fußabdrücke für verschiedene Produkte und Dienstleistungen gespeichert sind. Dabei stehen Datenbanken aus verschiedensten Bereichen zur Verfügung (Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Chemikalien, Energiebereitstellung, Transportarten, ...)

In dieser Arbeit wurden für die verschiedenen Energietechnologien zur Berechnung eine Vielzahl von Prozessen generiert. Diese Prozesse beinhalten bereits bestehende Sub-Prozesse aus den zuvor erwähnten Datenbanken. Somit werden die Datenbanken im Zuge dieser Arbeit durch neue Energietechnologien erweitert. Zur Generierung der neuen Prozesse benötigt man Rohdaten der Energietechnologie, wie z.B.: Menge und Art der Brennstoffe, Transportdistanzen (von Brennstoffen, Beiprodukten oder Materialien für die Infrastruktur) und Materialaufwand für die Infrastruktur. Die Inputs an Materialien wurden stets bezogen auf eine Outputeinheit. Im Falle der Bereitstellung von Rohstoffen wie Pellets auf [kg], von Elektrizität auf [kWh] oder Wärme auf [MJ]. Die Fußabdrücke der Sub-Prozesse kumulieren sich zu einem Gesamtfußabdruck pro Outputeinheit (z.B.: $m^2/kg, m^2/kWh$ oder m^2/MJ). Dadurch lassen sich unterschiedliche Technologien ökologisch vergleichen.

Zur Veranschaulichung der Berechnung finden sich zu den einzelnen Technologien Screenshots aus SPonExcel, in welchen die Inputs und der errechnete Gesamtfußabdruck dargestellt sind. In Abbildung 2 ist ein Beispiel-Screenshot dargestellt. Der braune Rahmen gibt die Be-

The screenshot shows the SPonExcel interface with the following data:

output		Process Name:	Unit	$a_{tot} = \sum a_i$ [m ² ·a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² ·a/unit]	Value [\$/unit]
1	N 42	Test Prozess	kWh	3000,000	1,00	3,000E+03	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² ·a/q]	a_{part} [m ² ·a/unit]	
N 33		Sub-Prozess 1	m2	200,000	10,000	2000,000	66,60%
N 55		Sub-Prozess 2	m2	10,000	100,000	1000,000	33,30%

Abbildung 2 – SPI Screenshot

zugseinheit des Produkts an. Der grüne Rahmen zeigt die Inputs (welche bereits in der SPI Datenbank bestehende Prozesse oder neu generierte sein können) für diese Technologie an. Die Spalte a_{part} ist das Produkt aus den Spalten Inventory und y_{spec} . y_{spec} ist der Fußabdruck einer Einheit des Sub-Prozesses. Multipliziert mit der Menge die man als Input benötigt (Inventory), ergibt sich ein Teilfußabdruck a_{part} . Die Teilfußabdrücke aller Sub-Prozesse werden addiert und man erhält den Gesamtfußabdruck a_{tot} (roter Rahmen).

Dieser Gesamtfußabdruck teilt sich auf einzelne Bereiche auf:

- area
- non renewable
- fossil C
- renewable
- air
- water
- soil
- NACE

Tabelle 1 veranschaulicht eine Art in Programm SPonExcel einen Report zum Gesamtfußabdruck zu erstellen. A_{part} zeigt den Gesamtfußabdruck verteilt auf die einzelnen Bereiche. Die Zeile „NACE“ muss den Wert 0 haben, was bedeutet dass alle Teilfußabdrücke den Einzelbereichen zugeteilt wurden. Somit lässt sich schnell erkennen, in welchem Bereich der

			Test Produkt	Verteilung
	area	m2.a	100.000	15%
	non renewable	m2.a	200.000	31%
	fossil C	m2.a	300.000	46%
	renewable	m2.a	30.000	5%
	air	m2.a	10.000	2%
	water	m2.a	2.000	0%
	soil	m2.a	4.000	1%
	NACE	m2.a	0.000	0%
	A part	m2.a/unit end product	646.000	

Tabelle 1 – SPI Chain Report

ökologische Druck am größten ist, der durch die Technologie verursacht wird. Speziell der Bereich „fossil C“ ist wesentlich, da man daraus die Emission an CO₂ ermitteln kann.

2.2. Anmerkungen zur Fußabdrucksberechnung

In der Arbeit werden Begriffe wie „ökologischer Druck“ und „Fußabdruck“ verwendet, welche gleichbedeutend sind.

In allen Berechnungen wird im Falle des Einsatzes von Netzstrom, mit dem EU25-Strommix gerechnet. Somit werden die Berechnungen nicht nur für Österreich anwendbar, sondern regional unabhängig.

Im Anhang sind zu den einzelnen Technologien Details zu den verwendeten SPI Datensätzen dokumentiert. Da eine Großzahl der Rohdaten aus der Datenbank ecoInvent (Ecolnvent, 2001) stammt, befinden sich im Anhang jeweils ein Prozessbild zu den verwendeten ecoInvent-Datensätzen. Weiters finden man dazu Tabellen, in denen aufgeführt ist, welche SPI Datensätze für den jeweiligen ecoInvent-Datensatz verwendet wurde. Besonders geringe Inputs aus der ecoInvent-Datenbank wurden vernachlässigt, da diese einen unwesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

2.3. CO₂ - Emission

Aus dem zuvor erwähnten SPI Reporten kann durch die Fläche vom Bereich „fossil C“ die Menge an emittierten CO₂ rückgerechnet werden. Kohlenstoff hat einen Fußabdruck von 0,65 m²/g. Dividiert man die Fläche an „fossil C“ des Gesamtfußabdrucks durch die Fläche des Kohlenstoffs erhält man die Menge an emittierten molekularen Kohlenstoff-Äquivalent (Molmasse = 12 g/mol). Aufoxidiert zum CO₂ (Molmasse = 44 g/mol) ist die Molmasse um den Faktor f = 3,66 größer als von reinem Kohlenstoff. Das in Abbildung 3 veranschaulichte Beispiel, zeigt die Berechnung der CO₂-Emissionen bei einer „fossil C“ - Teilbereichsfläche von 300 m².

Berechnungsbeispiel CO₂ - Emission

	fossil C	m2.a	300,000
300	fossil C [m ²]		1g C = 0,65m ²
461,5	C [g]		
1689,2	CO₂ [g]		

Abbildung 3 – CO₂ - Berechnungsbeispiel

2.4. Fußabdrucksallokation bei Prozessen mit Sekundärprodukten

In einigen Fällen der berechneten Fußabdrücke hat eine Technologie nicht nur ein Produkt sondern auch ein Nebenprodukt. Zum Beispiel liefert die Windkraft das Produkt Elektrizität, welchem der Fußabdruck zugewiesen wird. Im Falle der ORC-Technologie (Kapitel 4.2) erhält man die Produkte Elektrizität und Wärme. In dieser Arbeit werden dazu 2 verschiedene Methoden verwendet um den Fußabdruck den Produkten zuzuweisen (= Allokation).

Die erste Methode ist die **Allokation nach Output**. Dabei teilt sich der Gesamtfußabdruck anteilmäßig auf beide Produkte auf. Liefert zum Beispiel eine Technologie 1MJ Elektrizität und 3MJ Wärme, dann erhält die Elektrizität 25% und Wärme 75% des Gesamtfußabdrucks. Die zweite Methode ist die **Allokation nach Preis**. Da die Elektrizität einen höheren ökonomischen Wert als Wärme hat, wird der Fußabdruck in dieser Allokationsmethode verteilt nach dem Preis pro Einheit. Wird zum Beispiel 1MJ Elektrizität mit 15 €-Cent und 1MJ Wärme mit 3 €-Cent bewertet, teilt sich der Gesamtfußabdruck nach dem obigen Beispiel anders auf. Demnach erhalten 1MJ Elektrizität 63% und 3MJ Wärme 37% des Gesamtfußabdrucks. In diesem Beispiel muss man beachten dass in beiden Fällen der Teilfußabdruck für Wärme durch 3 dividiert werden muss, um den Fußabdruck pro MJ Wärme zu erhalten.

In dieser Arbeit wird die Elektrizität in kWh angeben und Wärme in MJ, wobei 1 kWh genau 3,6 MJ entsprechen.

3. Auswahl der Technologien

Für diese Arbeit wurden verschiedenste Technologien gewählt, um sie untereinander ökologisch vergleichen zu können. Dabei fiel die Wahl zu einem auf Energiebereitstellungsanlagen welche die Sonnenenergie direkt nutzen können. Weiters werden Technologien bewertet die auf erneuerbare Energieträger setzen. Durch das in den letzten Jahren gestiegenen Bewusstsein zur nachhaltigen Energiebereitstellung kommen für Entscheidungsträger mehrere Energieerzeugungsarten in Frage. Diese Auswahl an Technologien soll einer Ökobilanz unterzogen werden die auf der Methode des SPI fußt. Eine Bewertung wie ökologisch eine Technologie im Vergleich zu einer anderen ist soll somit erleichtert werden. Weiters können Optimierungspotentiale abgeschätzt werden. Zum Beispiel scheint eine Photovoltaikanlage auf den ersten Blick eine sehr ökologische Lösung zu sein, da der Betrieb keinen Materialeinsatz verlangt und somit keine CO₂-Emissionen entstehen. Jedoch muss man die Herstellung der Komponenten beachten und den bei der Produktion entstehenden Fußabdruck auf die Lebenszeit verteilen.

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

Der Begriff Biomasse umfasst sämtliches organisches Material, welches in unserem Ökosystem vorkommt. Die Synthese der Biomasse erfolgt über Photosynthese durch Pflanzen oder Organismen. Man unterscheidet primäre und sekundäre Biomasse. Wobei primäre Biomasse durch direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonneneinstrahlung entsteht (z.B.: land- und forstwirtschaftliche Produkte). Bei sekundärer Biomasse handelt es sich um organische Substanzen welche durch höhere Organismen (z.B.: Tiere) um- oder abgebaut wurde (z.B.: Mist, Gülle, Klärschlamm). (Eder, 2007)

4.1. Holz - Ein Vertreter der Biomasse

Die in diesem Kapitel beschriebenen Technologien verwenden Holz als Biomasseinput. Wobei Holz nur ein Vertreter der Biomasse ist. Setzt man eine andere Art von Biomasse (z.B.: halmgutartige Biomasse) ein, verändert sich der Gesamtfußabdruck der Technologie. Fußabdruckdetails zur verwendeten Biomasse für die Energietechnologien sind im Anhang unter A.3 dargestellt. Holz besteht aus 3 Hauptbestandteilen:

- Cellulose
- Hemicellulose
- Lignin

Weiters sind noch Proteine, Terpentinöl, Fettsäuren und anorganische Materialien in sehr geringen Bestandteilen enthalten.

Cellulose:

Cellulose besteht aus den Monomeren der Glucose und ist durch β -1,4-glycosidische Bindungen verknüpft. Das Biopolymer Cellulose dient gemeinsam mit Hemicellulose als Struktursubstanz im Holz. Ungefähr 40% der Trockensubstanz an Holz besteht aus Cellulose.

Hemicellulose:

Hemicellulose (auch Holzpolyosen genannt) ist wie Cellulose ein Polysaccharid, welches aus

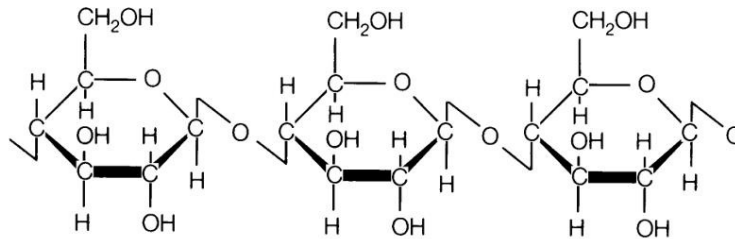


Abbildung 4 – Cellulose, Quelle:

<http://www.greenspirit.org.uk/resources/LifeChemistry.shtml>

mehreren verschiedenen Monomeren wie Glucose, Galactose, Mannose, Xylose, usw. aufgebaut ist. Die Struktur der Hemicellulose ist jedoch viel stärker verzweigt als die der Cellulose. Dabei erfüllen Hemicellulose als Bindemittel und Cellulose als Faser gemeinsam die Aufgabe als Struktur- und Stützsubstanzen im Holz. Der Anteil im Holz beträgt ca. 25%.

Lignin:

Lignin dient als Art „Klebstoff“ im Holz. Lignin ist wie Hemicellulose keine homogene Substanz sondern aus verschiedensten Molekülen aufgebaut. Hauptsächlich besteht es aus stark verzweigten Ketten aus Propyl-Phenolen mit verschiedensten funktionellen Gruppen und hat einen Gesamtanteil von 20% im Holz. (Lange, 2007)

Der Heizwert von wasserfreiem Holz liegt bei 18-19 MJ/kg. Bei Pellets mit 10% Wassergehalt (lt. ÖNORM M7135) reduziert sich der Heizwert auf 16-17 MJ/kg. (Eder, 2007)

4.2. ORC

Diese Energietechnologie verwendet als Input Biomasse um daraus Wärme zu generieren und in weiter Folge aus der Wärme über einen Generator Strom. Die Abkürzung ORC steht für **O**rganic **R**ankine **C**ycle. Dabei wird als Arbeitsmittel für die Turbine nicht Wasserdampf eingesetzt, sondern ein organisches Arbeitsmedium mit niedrigerer Verdampfungstemperatur als Wasser.

4.2.1. Technologie

ORC-Anlagen erzeugen aus der Biomasse über Kraft-Wärme-Kopplung elektrische Energie und die Abwärme wird ebenfalls genutzt um den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen. Die ORC-Technologie ist bei einer elektrischen Nennleistung von 200-1500kW am effizientesten. (Oberberger, 2005)

Wasser-Dampf-Prozess:

Die Grundlage für die Erzeugung von elektrischer Energie aus Wärme ist der Clausius-Rankine-Prozess. Wird Arbeit aus Wärme generiert, ist das ein sog. Rechts-Prozess. Das T,s-Diagramm

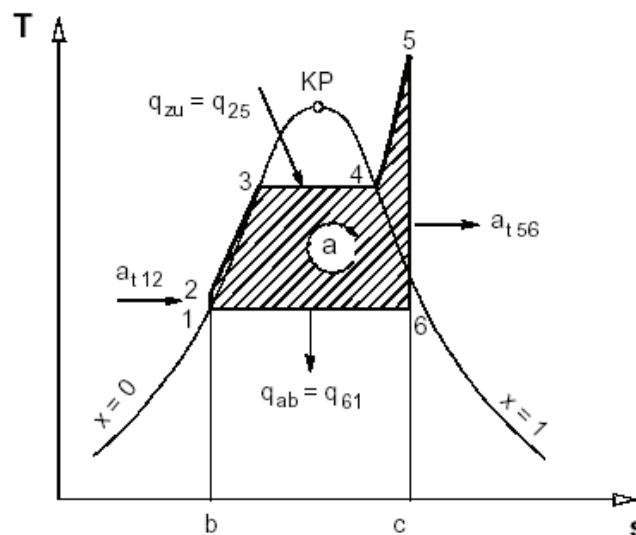


Abbildung 5 – T,s-Diagramm (Clausius Rankine), Quelle: (Gutsch, 2007)

aus Abbildung 5 illustriert den Kreislaufprozess. Je größer die eingeschlossene Fläche des Kreislaufes, desto mehr mechanische Arbeit kann daraus gewonnen werden. Somit in weiterer Folge auch elektrische Arbeit, da die mechanische Energie mithilfe eines Generators zu elektrischer Energie gewandelt wird. In diesem Kreisprozess wird das Arbeitsmedium Wasser aus dem Kondensator mittels einer Speisewasserpumpe auf Hochdruckniveau gebracht (200-250 bar). Anschließend wird das Wasser im Vorerhitzer auf Siedetemperatur gebracht. Im Verdampfer wird das Wasser verdampft und Sattdampf erzeugt. Der Sattdampf wird im Überhitzer weiter auf ca. 550°C erhitzt und überhitzter Dampf erzeugt. An der Turbine wird der überhitzte Dampf entspannt. Die freiwerdende Energie treibt eine Turbine an. Diese treibt wiederum einen Generator an, welcher die elektrische Energie erzeugt. Dabei verbraucht die

Speisewasserpumpe elektrische Energie und zur Erzeugung des überhitzten Dampfes wird Wärme benötigt.

Der exergetische Wirkungsgrad ist am höchsten wenn der Kreisprozess am ehesten dem idealen Carnot-Prozess ($\eta_c = \frac{T_O}{T_O - T_U}$; wobei T_O = oberes Temperaturniveau und T_U = unteres Temperaturniveau) entspricht. Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ist ein idealisierter und somit liegt jeder reale Kreisprozess gemessen am Wirkungsgrad unter dem Carnot-Prozess. Man kann versuchen die Verluste geringe zu halten und sich dem Carnot-Prozess zu nähern. Dabei sollte das Temperaturniveau des Dampfes möglichst hoch sein und das Austrittstemperaturniveau möglichst niedrig. Der Clausius-Rankine-Kreisprozess ist ein Vergleichsprozess für Dampfkraftwerke. (Gutschi, 2007)

ORC-Prozess:

Vergleichbar zum Wasser-Dampf-Prozess werden beim ORC-Prozess organische Arbeitsme-

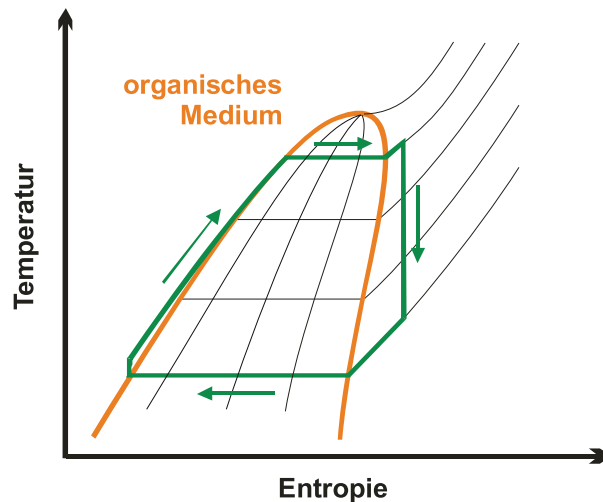


Abbildung 6 – T,s-Diagramm - ORC, Quelle: (Gutschi, 2007)

dien eingesetzt. Dabei kommen Kohlenwasserstoffe wie iso-Oktan, iso-Pentan, Toluol oder Silikonöl zum Einsatz. Bei niedrigeren Temperaturen und Drücken besitzen diese Medien günstigere Verdampfungseigenschaften. In der Turbine tritt kein Kondensieren des Dampfes auf und somit muss man das Medium auch nicht überhitzen. Damit lässt sich mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen auch ein Kreisprozess mit gutem Wirkungsgrad erzielen. Wirkungsgrade von 17,7% (elektrisch) bzw. 80% (thermisch), lassen sich mit einer solchen Anlage realisieren. (Gutschi, 2007)

Abbildung 7 zeigt einen schematischen Aufbau einer ORC-Anlage. Ein Thermoölkreislauf wird

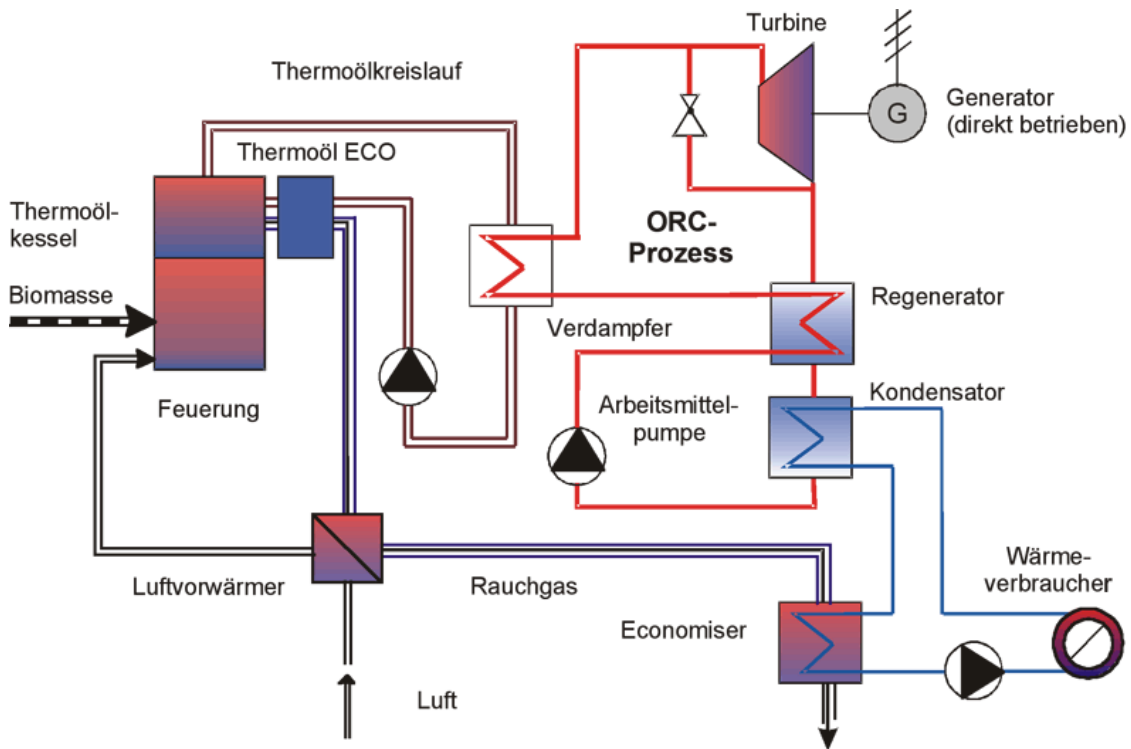


Abbildung 7 – ORC - Prozess, Quelle: (Oberberger, 2005)

mittels Biomasse erhitzt und die Wärme auf den geschlossenen ORC-Kreislauf mit dem Arbeitsmedium übertragen. Ein großer Vorteil der ORC-Technologie ist ein praktisch druckloser Kesselbetrieb, somit entfällt die Notwendigkeit eines Dampfkesselwärters. Weiters bietet diese Technologie ein gutes Teillastverhalten und ist leicht in bestehende Biomasse-Heizkraftwerke implementierbar. (Oberberger, 2005)

4.2.2. SPI-Kalkulation

Als Grundlage für die SPI Kalkulation diente die ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent, 2001) und ein Bericht des Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Bauer, 2007).

In dieser Betrachtung wird eine 1400KW_{th} Biomasse-ORC-KWK-Anlage betrachtet. Mit einem Multi-Zyklon-Filter zur Abgasreinigung. Eine solche Anlage steht in der Schweiz und hat die in Tabelle 2 abgebildeten Kenndaten. Die ORC-Anlage liefert 2 Outputs (Strom und Wärme). Details zu den verwendeten SPI Datensätzen findet man unter A.3.1. Der Fußabdruck der ORC-Anlage besteht aus der Menge an verfeuerter Biomasse, Infrastruktur, Transport und Chemikalien für den laufenden Betrieb. Der Fußabdruck für die Infrastruktur verteilt sich auf

	ORC, Turbine, Multi-Zyklon
Holzverbrauch [Sm ³ /a]	10.000-14.000
elektr. Leistung [kW _e]	335
thermische Leistung [kW _{th}]	1440
Stromproduktion [MWh/a]	371,7
Wärmeproduktion [MWh/a]	9000
Gesamtwirkungsgrad [%]	80

Tabelle 2 – ORC-Anlage

eine angenommene Lebensdauer von 20 Jahren. Der größte Anteil des Fußabdrucks kommt durch den kontinuierlichen Einsatz der Biomasse zustande. In der Berechnung werden Holzchips (Mix) aus dem Sägewerk eingesetzt. Auf den Fußabdruck der Holzchips wird im Anhang näher eingegangen.

Allokation - Output

Die Inputs beziehen sich auf die Bereitstellung von einer kWh Elektrizität. Dabei erhält man als Nebenprodukt 86,3 MJ an Wärme. Der Fußabdruck wurde in diesem Beispiel anteilmäßig auf Strom und Wärme, entsprechend der produzierten Menge, aufgeteilt. Der ökologische

output	Process Name	Unit	$a_{tot} = \Sigma a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20138	1 N 42	kWh	9,815	0,04	9,81	
20139	86,3 N 42	MJ	2,726	0,96	235,28	

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]
10136	N 24	Lubricant oil SP	kg	0,00042569	264,671	0,113
10099	N 24	Organic chemicals SP	kg	0,00074580	1493,861	1,114
10076	N 24	Ammonia SP	kg	0,00000107	196,991	0,000
10087	N 24	Chlorine (by-product) SP	kg	0,00004257	94,013	0,004
10085	N 24	Sodium chloride SP	kg	0,00053240	44,717	0,024
20017	N 20	Wood chips Sawmill ex store DP	kg	6,24024000	29,782	185,844
10048	N 60	Transport 28t Truck SP	tkm	0,55353240	84,945	47,020
20161	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, common components for heat+electricity	#	0,00000017	29576193,062	4,950
20162	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, building	#	0,00000004	75884836,930	3,154
20165	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, components for electricity only	#	0,00000017	17261708,995	2,869

Abbildung 8 – Screenshot, ORC (Output)

Fußabdruck einer Biomasse ORC beträgt somit 9,8 m²/kWh für Strom und 2,73 m²/MJ für Wärme. Die in Tabelle 3 gezeigten Aufteilungen beziehen sich auf 1kWh produzierte Menge an Strom und 1MJ Wärme. Die Emission an CO₂ betragen 20,3 g/kWh bzw. 5,6 g/MJ.

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

(a) SPI-Report, ORC, Strom

			wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy	Verteilung
	area	m2.a	0,001	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	3,601	37%
	renewable	m2.a	0,251	3%
	air	m2.a	0,873	9%
	water	m2.a	5,098	52%
	soil	m2.a	0,004	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	9,828	

(b) SPI-Report, ORC, Wärme

			wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy	Verteilung
	area	m2.a	0,000	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	1,000	37%
	renewable	m2.a	0,070	3%
	air	m2.a	0,243	9%
	water	m2.a	1,416	52%
	soil	m2.a	0,001	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	2,730	

Tabelle 3 – SPI-Report, ORC (Output)

Allokation - Preis

In der Allokation nach Output wird nicht berücksichtigt, dass Strom einen höheren ökonomischen Wert hat als Wärme. Um Strom zu generieren, muss mehr Aufwand betrieben und entsprechende Verluste in Kauf genommen werden. Nach der Einspeisetarifverordnung 2006 (Lebensministerium, 2006) wird 1 kWh aus fester Biomasse (Anlage unter 2 MW) mit 15,7 €-Cent bzw. 4,4 €-Cent/MJ vergolten. Der Einspeisetarif für die Wärme wurde von einem Förderantrag der Kommunalkredit für Biomasse-Nahwärme entnommen. Für 1 kWh Wärme werden 6,6 €-Cent bzw. 1,85 €-Cent/MJ vergolten. Nun erhält Strom einen Fußabdruck von 21,9 m²/kWh und Wärme 2,6 m²/MJ. Der Fußabdruck hat sich in dieser Betrachtungsweise für Strom mehr als verdoppelt.

Die Emissionen an CO₂ betragen 45,3 g/kWh und 5,3 g/MJ.

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

Workbook 2.00 [2]		Updated: LEPPE_v1		Current: LEPPE_v1		more >>		
01		wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy		Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20138	1 N 42		electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation energy	kWh	21,944	0,09	21,94	15,70
20139	86,3 N 42		heat, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation energy	MJ	2,586	0,91	223,15	1,85

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
10136	N 24	Lubricant oil SP	kg	0,00042569	264,671	0,113	0,05%
10099	N 24	Organic chemicals SP	kg	0,00074580	1493,861	1,114	0,45%
10076	N 24	Ammonia SP	kg	0,00000107	196,991	0,000	0,00%
10087	N 24	Chlorine (by-product) SP	kg	0,00004257	94,013	0,004	0,00%
10085	N 24	Sodium chloride SP	kg	0,00053240	44,717	0,024	0,01%
20017	N 20	Wood chips Sawmill ex store DP	kg	6,24024000	29,782	185,844	75,83%
10048	N 60	Transport 28t Truck SP	tkm	0,55353240	84,945	47,020	19,18%
20161	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, common components for heat+electricity	#	0,00000017	29576193,062	4,950	2,02%
20162	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, building	#	0,00000004	75884836,930	3,154	1,29%
20165	N 93	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, components for electricity only	#	0,00000017	17261708,995	2,869	1,17%

Abbildung 9 – Screenshot - ORC (Preis)

(a) SPI-Report, ORC, Strom

			wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy	Verteilung
	area	m2.a	0,003	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	8,052	37%
	renewable	m2.a	0,560	3%
	air	m2.a	1,952	9%
	water	m2.a	11,397	52%
	soil	m2.a	0,010	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	21,974	

(b) SPI-Report, ORC, Wärme

			wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy	Verteilung
	area	m2.a	0,000	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	0,949	37%
	renewable	m2.a	0,066	3%
	air	m2.a	0,230	9%
	water	m2.a	1,343	52%
	soil	m2.a	0,001	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	2,589	

Tabelle 4 – SPI-Report, ORC (Preis)

Auswertung der SPI-Kalkulation

Aus den in Tabelle 3 und 4 dargestellten Fußabdrucksteilbereichen, ist der ökologische Druck in den Bereichen *Wasser* und *fossil C* am größten. Im Anhang sind die Holzchips nach Herkunft des Fußabdrucks abgebildet (Abbildung 50). 93,6% des Fußabdrucks der Holzchips entsteht durch den Einsatz elektrischer Energie. Diese wiederum hat einen hohen ökologischen Druck im Bereich *Wasser* und *fossil C* erzeugt (im Falle vom EU25 Strommix nach EUROSTAT 2002).

Ersetzt man den Strommix in der Verarbeitung der Holzchips durch den Österreich Strommix sinkt der Fußabdruck der Elektrizitätsbereitstellung auf 85% (Abbildung 51). Was natürlich auch bedeutet dass der Betreiber einer ORC-Anlage nur Holzchips aus einer österreichischen Sägemühle verwenden darf.

Da der Anteil der Elektrizität im Rohstoff Holzchips derart groß ist, würde eine mit Ökostrom (z.B.: Windkraft) betriebene Säge ein großes Optimierungspotential bezüglich der Ökobilanz aufweisen.

4.3. Holzpellets

Pellets aus Holz stellen eine beliebte Alternative zu fossilen Energieträgern dar. Durch die Herstellung der Pellets wurde ein Markt geschaffen, um das Nebenprodukt Sägespäne noch gewinnbringend verkaufen zu können. Es kommen jedoch auch andere Rohstoffe wie Waldhackgut zum Einsatz. Durch das Verpressen erhält man eine hohe Materialdichte und die Presslinge sind besser handzuhaben. Der Vorteil der Pellets liegt an dem sehr geringen Wasseranteil von maximal 10%. Dadurch ist der untere Heizwert (H_u) im Vergleich zu Stückholz höher. Jedoch muss in der Produktion Energie aufgewendet werden für Trocknung und Verpressen. Die folgende SPI-Kalkulation evaluiert die Produktion der Pellets und Transport zum regionalen Lager.

4.3.1. Holzpellets - Rohstoff

Die Abmessungen der Pellets betragen ca. 6mm Dicke und 5-30 mm Länge. Eine vorgeschriebene Mindestrohndichte von $1,12 \text{ g/cm}^3$ garantiert die mechanische Stabilität der Presslinge. Weiters ist ein Zusatz von maximal 2% Presshilfsmittel aus Produkten der primären Land- und Forstwirtschaft gestattet. Als Presshilfsmittel wird meist Mais - oder Kartoffelstärke eingesetzt. Es funktioniert auch ohne Presshilfsmittel indem man höhere Pressdrücke anwendet. Jedoch funktioniert die Herstellung mechanisch belastbarer Pellets besser mit den Presshilfsmitteln. Für Holzpellets sind folgende Grenzwerte vorgeschrieben:

- Wassergehalt (10%)
- Aschegehalt (0,5%)
- Schwefelgehalt (0,04%)
- Stickstoffgehalt (0,3%)
- Chlorgehalt (0,02%)

Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert. Der Heizwert muss mindestens 18 MJ/kg bzw. 5 kWh/kg betragen (bezogen auf die wasserfreie Masse). Bei einem Wassergehalt von 8% beträgt der Heizwert $17,3 \text{ MJ/kg}$ bzw. $4,8 \text{ kWh/kg}$. Im Vergleich dazu hat Heizöl einen Heizwert von $10,08 \text{ kWh/l}$. Um den Heizwert von einem Liter Heizöl bereitzustellen benötigt man ca. $2,2 \text{ kg}$ Pellets. (Eder, 2007)

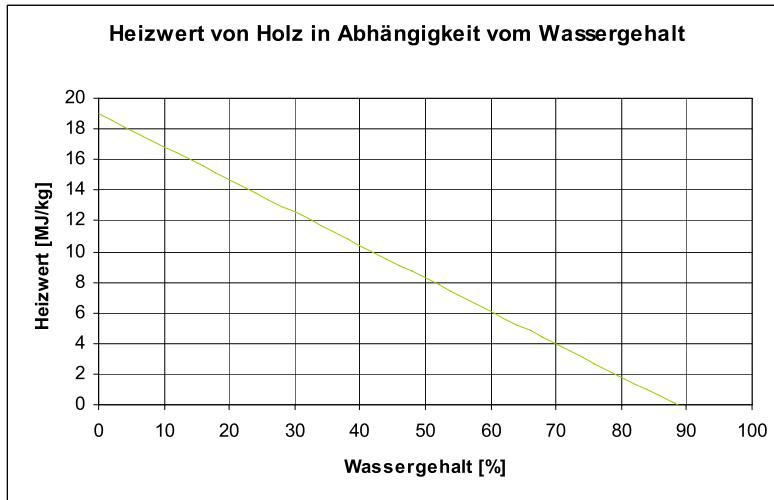


Abbildung 10 – Heizwertzusammenhang - Pellets, Quelle: (Eder, 2007)

SPI-Kalkulation

In dieser Kalkulation wird die Produktion der Holzpellets betrachtet, im Kapitel 4.3.2 die Verbrennung der Pellets um daraus Wärmeenergie zu gewinnen. Für die Kalkulation wurden Rohdaten von der Datenbank des deutschen Umweltbundesamtes (PROBAS) und von der ecoinvent verwendet (siehe A.3.2 im Anhang).

output		Process Name:	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20172	1 N 20	Holzpellets, at regional store	kg	53,972	1,00	5,397E+01	
							0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
20170	N 90	Wood Rejects (with ecological pressure)	kg	1,010	1,601	1,617	3,00%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	MJ	0,265	153,798	40,757	75,51%
10046	N 60	Transport Railway SP	tkm	0,110	39,850	4,384	8,12%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	0,055	125,226	6,897	12,78%
20171	N 93	wood pellet manufacturing, infrastructure	#	0,000	2281460,113	0,023	0,04%
20072	N 01	Corn	kg	0,020	14,620	0,295	0,55%

Abbildung 11 – Screenshot - Holzpellets

Die Holzabfälle aus der Holzindustrie haben entsprechend der anfallenden Menge im Vergleich zum Nutzholz (siehe A.3.2 im Anhang) einen geringeren Fußabdruck. Daraus ergibt sich ein ökologischer Druck von 53,9 m²/kg, was einem Wert von 3,1 m²/MJ entspricht (bei einem Heizwert von 17,3 MJ/kg). Die Emission an CO₂ beträgt 110,1 g/MJ.

			Holzpellets, at regional store	Verteilung
	area	m2.a	0,016	0%
	non renewable	m2.a	0,001	0%
	fossil C	m2.a	19,564	36%
	renewable	m2.a	0,246	0%
	air	m2.a	4,565	8%
	water	m2.a	29,534	55%
	soil	m2.a	0,046	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	53,972	

Tabelle 5 – SPI-Report, Holzpellets

4.3.2. Holzpellets - KWK

Die zuvor in Kapitel 4.3.1 evaluierten Holzpellets werden in einer KWK-Anlage eingesetzt um daraus Strom und Wärme zu produzieren. Dabei kommt ein Stirlingmotor zur Stromproduktion zum Einsatz. Die Rohdaten zur Berechnung stammen aus der ecolnvent-Datenbank. (Ecolnvent, 2001)

Stirlingmotor

Beim Stirlingmotor handelt es sich um eine Wärmekraftmaschine. In einem abgeschlossenen Raum befindet sich ein Arbeitsgas (meist H₂ oder He). Über Wärmezufuhr von außen wird das Arbeitsgas komprimiert oder expandiert. Dadurch wird thermische Energie zu mechanischer Energie gewandelt, indem der sich bewegende Kolben ein Schwungrad bewegt. Abbildung 12 veranschaulicht die 4 Takte eines Stirlingmotors und das dazugehörige T,s-Diagramm. Die Vorteile des Einsatzes eines Stirlingmotors sind z.B.:

- Verschiedene Arten der Wärmezufuhr möglich (auch Solarenergie)
- Es erfolgt keine Verbrennung von Brennstoffen im Inneren. Durch die Wärmezufuhr von außen kann für eine emissionsarme Wärmebereitstellung gesorgt werden
- Ungiftige Arbeitsmedien
- Hohe Wirkungsgrade möglich

Nachteilig sind die Materialanforderungen, da im Inneren hohe Drücke herrschen (ca. 150 bar) und Temperaturen bis zu 800 °C angewandt werden.

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

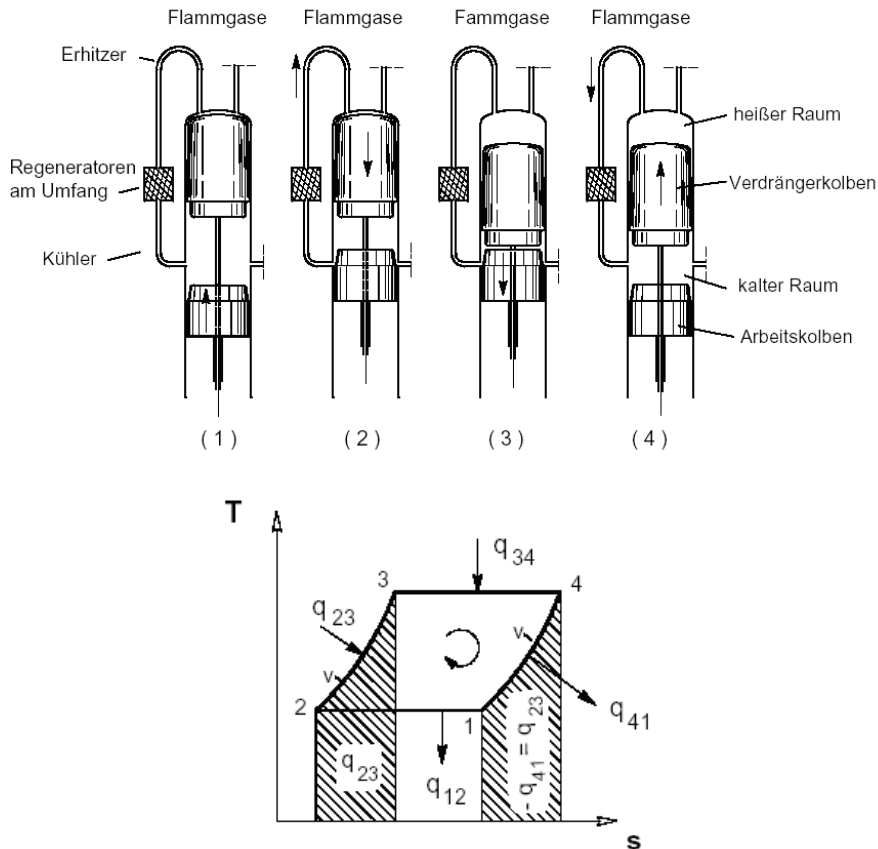


Abbildung 12 –
Die 4 Takte des Stirlingmotors und T,s-Diagramm, Quelle: (Gutschi, 2007)

Allokation - Output

Der Output an Strom beträgt 1 kWh und dabei fallen als Sekundärprodukt 10,4 MJ Wärme an. Die Bereitstellung von Strom aus Holzpellets mit einem Stirlingmotor hat einen Fußabdruck

output		Process Name:	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20180	1 N 40	electricity, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	kWh	21,319	0,26	2,132E+01	
20181	10,4 N 40	heat, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	MJ	5,922	0,74	6,182E+01	

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
20176	N 93	stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, future	#	0,000	1743718,071	10,841	13,04%
20177	N 93	maintenance stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, :	#	0,000	30580,061	2,663	3,20%
20172	N 20	Holzpellets, at regional store	kg	0,867	53,972	46,770	56,25%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	0,021	553,674	11,358	13,66%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	0,092	125,226	11,511	13,85%

Abbildung 13 – Screenshot - Holzpellets KWK (Output)

von 21,3 m²/kWh. Die Bereitstellung der Wärme hat einen Fußabdruck von 5,9 m²/MJ.

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

(a) SPI-Report, Holzpellets KWK, Strom

			electricity, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	Verteilung
	area	m2.a	0,003	0%
	non renewable	m2.a	0,001	0%
	fossil C	m2.a	8,576	40%
	renewable	m2.a	0,055	0%
	air	m2.a	2,239	11%
	water	m2.a	10,363	49%
	soil	m2.a	0,015	0%
	NACE	m2.a	0,066	0%
	A part	m2.a/unit end product	21,319	

(b) SPI-Report, Holzpellets KWK, Wärme

			electricity, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	Verteilung
	area	m2.a	0,001	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	2,382	40%
	renewable	m2.a	0,015	0%
	air	m2.a	0,622	11%
	water	m2.a	2,879	49%
	soil	m2.a	0,004	0%
	NACE	m2.a	0,018	0%
	A part	m2.a/unit end product	5,922	

Tabelle 6 – SPI-Report, Holzpellets KWK (Output)

Die Emission an CO₂ für Strom beträgt 48,3 g/kWh und 13,4 g/MJ für Wärme.

Allokation - Preis

Nach dem gleichen Schema wie in der Preisallokation bei der ORC-Anlage (siehe Kapitel 4.3.2) wird der Gesamfußabdruck anders aufgeteilt.

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y _{spec} [m ² .a/q]	a _{part} [m ² .a/unit]	Value
20176	N 93	stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, future	#	0,000	1743718,071	10,841	13,08%
20177	N 93	maintenance stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, future	#	0,000	30580,061	2,663	3,21%
20172	N 20	Holzpellets, at regional store	kg	0,867	53,677	46,514	36,12%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	0,021	553,674	11,358	13,70%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	0,092	125,226	11,511	13,89%

Abbildung 14 – Screenshot, Holzpellets KWK (Preis)

4. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

Dadurch erhält Strom einen wesentlich höheren Anteil des Fußabdrucks von 37,2 m²/kWh bzw. 10,3 m²/MJ. Die Bereitstellung von 1kWh Strom liefert gleichzeitig 10,4MJ Wärme, wobei diese einen Fußabdruck von 4,4 m²/MJ hat. Die Emission an CO₂ beträgt 84,4 g/kWh für

(a) SPI-Report, Holzpellets KWK, Strom

			electricity, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	Verteilung
	area	m2.a	0,005	0%
	non renewable	m2.a	0,002	0%
	fossil C	m2.a	14,995	40%
	renewable	m2.a	0,097	0%
	air	m2.a	3,915	11%
	water	m2.a	18,120	49%
	soil	m2.a	0,027	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	37,161	

(b) SPI-Report, Holzpellets KWK, Wärme

			heat, pellets, allocation exergy, at stirling cogen unit 3kWe, future	Verteilung
	area	m2.a	0,001	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	1,767	40%
	renewable	m2.a	0,011	0%
	air	m2.a	0,461	11%
	water	m2.a	2,136	49%
	soil	m2.a	0,003	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	4,380	

Tabelle 7 – SPI-Report, Holzpellets KWK (Preis)

Strom und 9,9 g/MJ für Wärme.

Auswertung der SPI-Kalkulation

Der Fußabdruck der Holzpellets besteht zu 75% aus dem eingesetzten Netzstrom. Der Einsatz des Rohstoffes Holz oder des Presshilfsmittels Maisstärke steuert nur einen geringen Anteil zum Fußabdruck bei. Im original SPI Datensatz erhalten die Sägeabfälle (Wood Rejects DP) keinen Fußabdruck und machen 20% des Outputs im Vergleich zum Nutzholz aus da diese als Nebenprodukt bei der Herstellung von Nutzholz anfallen. Im neu angelegten Datensatz (Wood Rejects (with ecological pressure)) wird der Fußabdruck von den Holzabfällen proportional zum Output angesetzt. Somit erhalten die Holzabfälle 20% des Gesamtfußabdrucks, welcher für die Herstellung von Nutzholz anfällt. Abbildung 53 im Anhang zeigt die Details zum SPI Datensatz Wood Rejects (with ecological pressure).

5. Bioethanol

Der Energieaufwand um den Bereich Mobilität zu decken steigt stetig. Um auch auf diesem Sektor die Abhängigkeit vom Erdöl zu reduzieren wurden Autos entwickelt, welche mit Ethanol betrieben werden. Solche FlexiFuel™-Cars werden mit E85-Treibstoff (=85% Ethanolanteil und 15% Benzin) betrieben und sind bereits in Brasilien oder Schweden im großflächigen Einsatz. Brasilien besitzt große Zuckerrohrplantagen, welche zu Bioethanol weiterverarbeitet werden.

5.1. Technologie

In diesem Kapitel werden kurz 2 Arten der Bioethanolgewinnung erläutert. Als Rohstoff kann man Agrarprodukte verwenden, wie Weizen, Triticale, Roggen, Mais und weitere stärkehaltige Produkte (1.Generation). Dies hatte in der Vergangenheit Diskussionen zur Folge, ob es gerechtfertigt ist, Lebensmittel einzusetzen und dem Sektor der Mobilität zuzuführen. Eine andere Variante ist die Herstellung von Bioethanol aus lignocellulosem Material wie Holz, Gräsern, ... (2.Generation)

Bioethanol aus Agrarprodukten

In Abbildung 15 ist die Bioethanolherstellung mittels Trockenmahlprozess dargestellt. Die Kör-

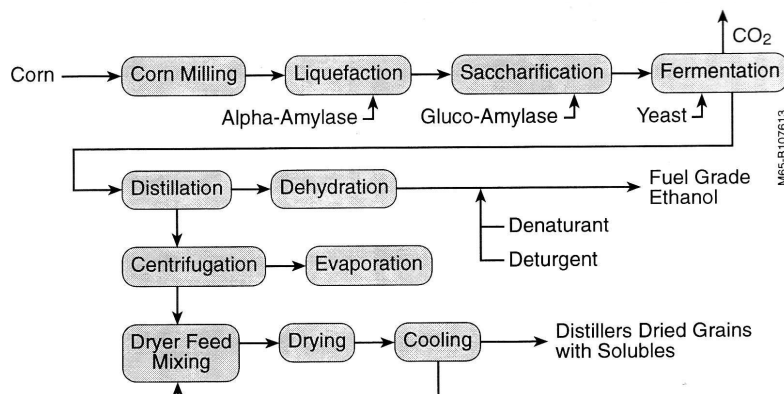


Abbildung 15

– Bioethanolproduktion, Trockenmahlprozess, Quelle: (Wyman, 1996)

ner werden gemahlen und anschließend in Wasser gelöst und erhitzt. Dadurch können die in Stärke enthaltenen α -1,4-glycosidische Bindungen von Amylose und Amylopektin gebrochen werden. Man erhält Dextrine (Oligo- und Polysaccharidgemisch), welche im Vergleich zu Stär-

ke weniger stark verzweigt sind und kürzere Ketten haben. Dadurch sinkt die Viskosität der Lösung. Das Aufbrechen der glycosidischen Verbindungen kann durch Bakterien erreicht werden (α -Amylase). Durch ein weiteres Enzym (Glucosyl-Amylase) werden aus den Dextrinen Mono- und Disaccharide abgetrennt. Mittels Hefen wird eine alkoholische Gärung durchgeführt, welche Ethanol und CO₂ als Produkte liefert. Das Nebenprodukt Schlempe wird zentrifugiert und getrocknet. Dabei erhält man DDGS, welches einen hohen Proteingehalt aufweist und als Futtermittel verwendet werden kann. (Wyman, 1996)

5.2. Bioethanol aus Mais

Zur Evaluierung von Bioethanol aus Mais stehen mehrere Datenquellen zur Verfügung. In diesem Fall stammen die Daten aus der ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent, 2001). Das Produkt Bioethanol beinhaltet die Bereitstellung des Mais, Infrastruktur, Transport, Energieaufwand und die Trocknung auf einen Gehalt von 99,7%. Als Nebenprodukt entsteht dabei DDGS näherungsweise im Verhältnis 1:1 (kg/kg) zur produzierten Menge an Bioethanol. Ein Kilogramm

output		Process Name:	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20196	1 N 24	ethanol, 99.7% in H ₂ O, from biomass, at distillation	kg	188,633	0,77	1,886E+02	100,00
20197	1 N 24	DDGS	kg	56,590	0,23	5,659E+01	30,00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
20195	N 24	ethanol, 95% in H ₂ O, from corn, at distillery	kg	1,000	220,491	220,491	99,91%
10040	N 40	Process energy, natural gas, industrial heater >100 k	MJ	1,005	19,584	19,674	8,02%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	0,009	553,674	4,894	2,00%
20194	N 93	ethanol fermentation plant	#	0,000	3104730433,933	0,165	0,07%

Abbildung 16 – Screenshot, BioEtOH Mais ecoinvent

			ethanol, 99.7% in H ₂ O, from biomass, at distillation	Verteilung
	area	m ² .a	0,956	1%
	non renewable	m ² .a	0,007	0%
	fossil C	m ² .a	105,902	56%
	renewable	m ² .a	0,007	0%
	air	m ² .a	23,175	12%
	water	m ² .a	57,688	31%
	soil	m ² .a	0,899	0%
	NACE	m ² .a	0,000	0%
	A part	m ² .a/unit end product	188,633	

Tabelle 8 – SPI-Report, BioEtOH Mais ecoinvent

Bioethanol hat einen ökologischen Fußabdruck von 188,6 m²/kg. Die Prozesswärme wird in diesem Beispiel aus Erdgas erzeugt und der Strom kommt vom Netz. Die Emission an CO₂ beträgt 596,1 g/kg.

Weiters sind zwei bereits am Institut durchgeführte Studien zu erwähnen. In den Studien erfolgt die Energiebereitstellung mit erneuerbaren Ressourcen. Die 1. Studie zu dezentralen Klein-Bioethanolanlagen mit 1.000, 5.000 und 10.000 Jahrestonnen analysiert die Bioethanolproduktion aus Mais mit mehreren Möglichkeiten zur alternativen Energiebereitstellung (BM-VIT, 2007). In der 2. Studie wird Bioethanol aus Mais (bei 10.000 Jahrestonnen) mit einem Fußabdruck von 130,5 m²/kg und 356,3 g CO₂-Emissionen bereitgestellt. Der geringere Fußabdruck ergibt sich daraus, dass die benötigte Wärme mit einer Strohverbrennungsanlage zur Verfügung gestellt wird. Der Strom wird aus dem Netz bezogen.

In einer weiteren Studie zum Thema Bioethanol wurde die Produktion aus Mais mit 51,0 m²/kg errechnet. Was jedoch daran liegt dass Strom und Wärme von einer Biomasse-KWK bereitgestellt wird. (Narodoslawsky, 2008)

5.3. E85

Das zuvor produzierte Bioethanol wird im Verhältnis 85:15 (EtOH:Benzin) mit herkömmlichem Benzin gemischt. Daraus lässt sich ein entsprechender Fußabdruck für E85-Treibstoff (je nachdem, woraus das Bioethanol hergestellt wird) erstellen. Dieser wird in folgender Tabelle gegenübergestellt. In diesem Vergleich wurde nur ein rein massenmäßiger Vergleich

		[m ² /kg]	[%-Unterschied bezogen auf Benzin (fossil)]
Benzin (fossil)		1164,5	
E85 (EtOH aus Mais)			
	Variante 1 - ecolInvent	335,0	-71%
	Variante 2 - Studie 1	285,6	-75%
	Variante 3 - Studie 2	218,0	-81%

Tabelle 9 – Vergleich E85/Benzin

durchgeführt. Dabei ist nicht berücksichtigt, was an sonstigen Aufwendungen einfließt bei einer großtechnischen Anwendung, wie Energieaufwand, Infrastruktur und Transport. Im Anhang A.4 findet sich noch der Detailfußabdruck zu fossilem Benzin.

Auswertung der SPI-Kalkulation

In diesem Kapitel stehen 3 ökologische Fußabdrücke für Bioethanol zur Verfügung. Die erste Variante aus ecolInvent setzt ausschließlich auf Netzstrom und fossile Energieträger. Dementsprechend hoch ist auch der Fußabdruck. In der zweiten Variante wird zwar noch immer Netzstrom bezogen jedoch stammt die Wärme aus einer erneuerbaren Energiequelle.

6. Biogas

Es gibt viele Wege um Biogas zu erzeugen. Als Substrat kommen biogene Abfälle, Gülle, Pflanzenreste oder Agrarprodukte in Frage. Der Einsatz von Agrarprodukten wie Mais ist möglich, jedoch kann bei Einsatz im großen Maßstab der Preis von Mais in die Höhe getrieben werden. Diese Konkurrenz mit dem Lebensmittelsektor wird vermieden indem man auf Abfälle als Substrat setzt. Rückstände aus der Landwirtschaft, Biomüll, Klärschlamm, usw. fallen in großen Mengen an und bekommen erst in letzter Zeit einen Wert zugeschrieben. Anlagen welche landwirtschaftliche Abfälle verwerten werden als Anlagen zweiter Generation bezeichnet.

6.1. Technologie

Das Prinzip der Biogasherstellung besteht in der Fermentation von organischem Material mittels methanbildender Bakterien. Dieser Vorgang findet in der Natur ständig unter anaeroben Bedingungen (=Sauerstoffausschluss) statt.

Stoff	Chemische Bezeichnung	Anteil [%]	Wirkung
Methan	CH ₄	40-75	Brennbare Biogaskomponente
Kohlendioxid	CO ₂	25-55	Vermindert den Brennwert Fördert Korrosion (schwache Kohlensäure)
Wasserdampf	H ₂ O	0-10	Korrosion
Stickstoff	N ₂	<5	Vermindert Brennwert
Sauerstoff	O ₂	<2	
Wasserstoff	H ₂	<1	
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	<2	Korrosion SO ₂ -Emissionen Giftig
Ammoniak	NH ₃	<1	NO _x -Emissionen Giftig

Tabelle 10 – Biogaszusammensetzung, Quelle: (Salchenegger, 2005)

Abbildung 10 zeigt eine beispielhafte Zusammensetzung von Biogas. Die anteilmäßig größten Bestandteile sind CH₄ und CO₂. Je größer die Menge an CH₄, desto höher die Qualität des Biogases. In Abbildung 17 sind mögliche Gasausbeuten aus verschiedenen Substraten dargestellt. Die Ausbeuten variieren sehr stark je nach Substrat und in welchem Verhältnis die

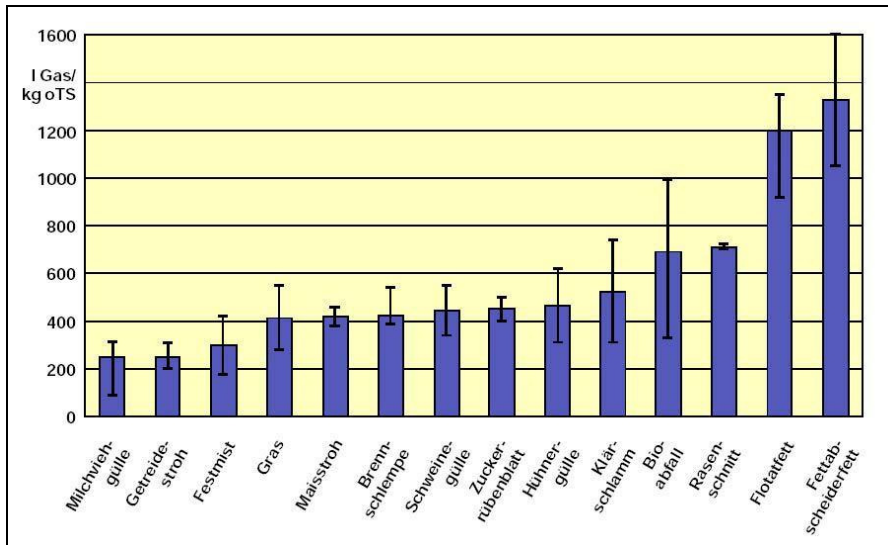


Abbildung 17 – Biogasausbeuten, Quelle: (Salchenegger, 2005)

Substrate gemischt sind. Um die Ausbeuten von Gülle oder Mist zu erhöhen werden andere organische Substrate wie z.B.: Schlachtabfälle, Biomüll, usw. beigemischt. Dieses Verfahren wird Kofermentation genannt.

Ein prinzipielles Schema einer Biogasanlage ist in Abbildung 18 dargestellt. Es gibt prinzipiell

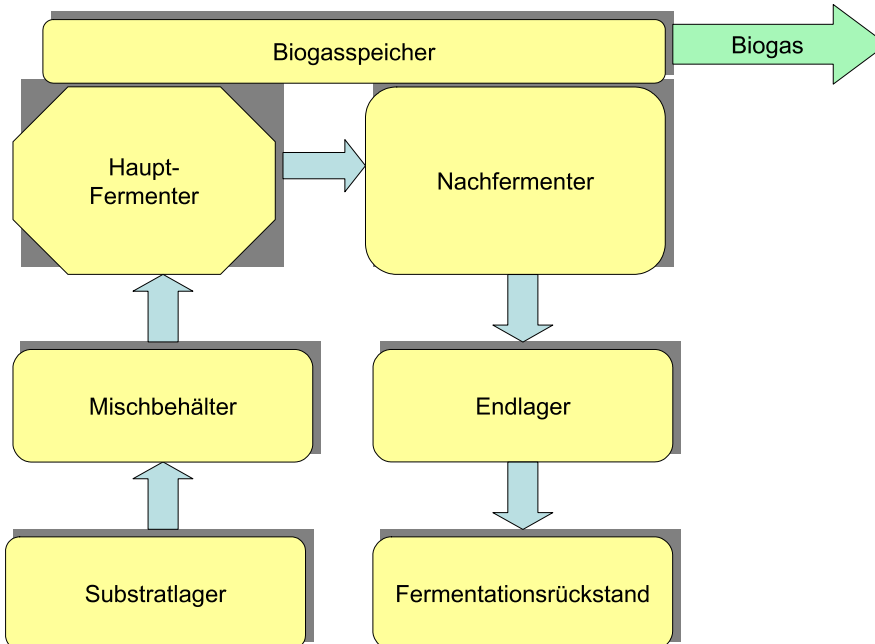


Abbildung 18 – Biogaszusammensetzung, Quelle: (Salchenegger, 2005)

2 Möglichkeiten der Fermentation.(Salchenegger, 2005)

- Nassfermentation (TS-Gehalt <15%)

- Trockenfermentation (TS-Gehalt 25-60%)

Das erzeugte Biogas kann auf mehrere Arten eingesetzt werden. Man kann es über ein BHKW verstromen und die Abwärme nutzen, reinigen und ins Gasnetz speisen oder als Kraftstoff für Erdgasautos einsetzen. Um die Qualität des Biogases zu erhöhen, müssen Nebenprodukte wie CO_2 und H_2S entfernt werden.

CO_2 -Abtrennung

Die Abtrennung kann man durch chemische Absorption von CO_2 in Wasser bei Überdruck erreichen. CH_4 ist unter diesen Bedingungen schlechter löslich. Eine weitere Methode ist die

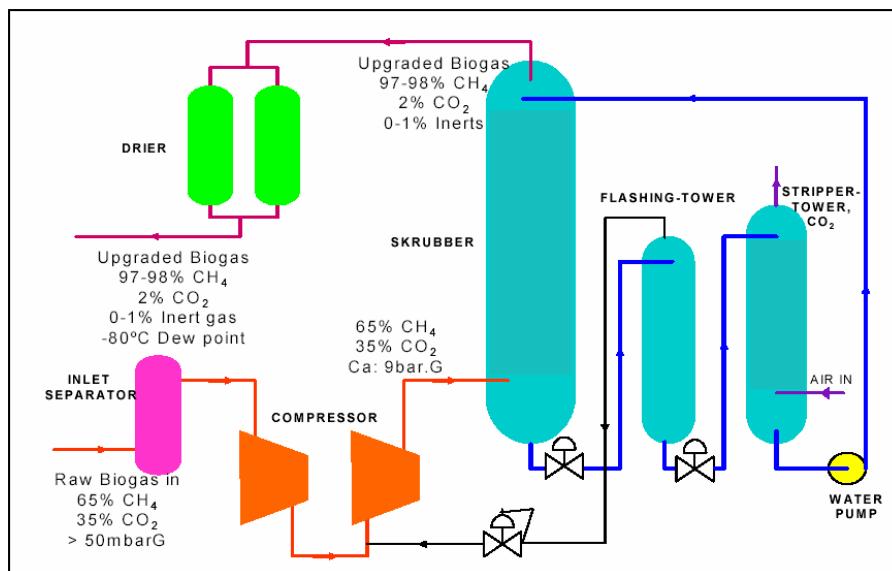


Abbildung 19

– CO_2 -Abtrennung, Biogas(Absorption), Quelle: (Salchenegger, 2005)

Abtrennung von CO_2 durch Druckwechsel-Adsorption. Dabei wird das Biogas komprimiert und in Adsorptionsbehälter geleitet. CO_2 wird an Aktivkohle oder Molekularsieben adsorbiert. Mit dieser Methode sind CH_4 -Konzentrationen von >96% möglich. (Salchenegger, 2005)

H_2S -Abtrennung

H_2S entsteht als Nebenprodukt bei der Fermentation. Es ist giftig, stark korrosiv und bei der Verbrennung kann SO_2 entstehen. Zum Entfernen kann man bereits in der Fermentation durch Einblasen geringer Mengen an Sauerstoff H_2S mikrobiell zu elementarem Schwefel

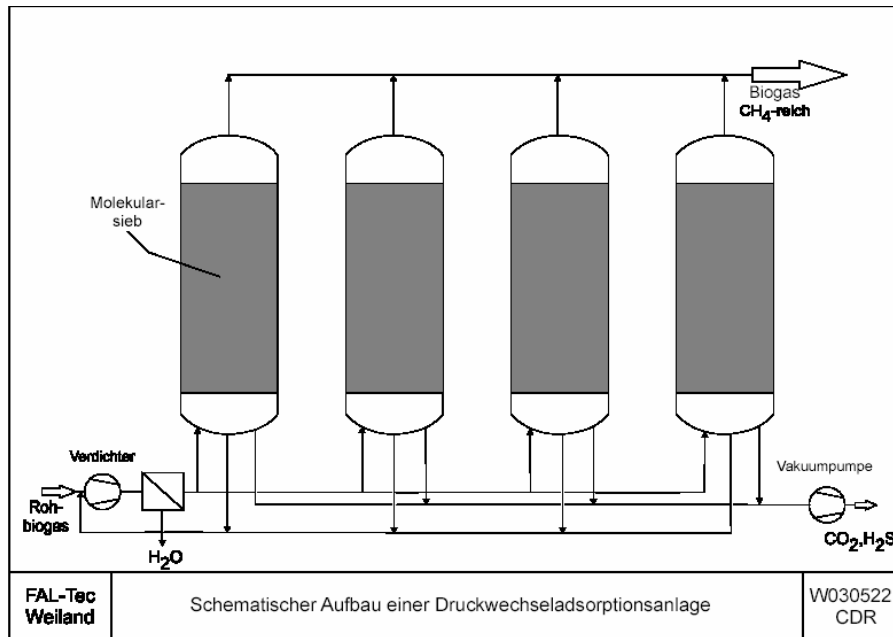


Abbildung 20

– CO₂-Abtrennung, Biogas(Adsorption), Quelle: (Salchenegger, 2005)

gewandelt werden. Dieser lagert sich dann an der Fermenterwand ab, welcher mit den Fermentationsresten entfernt wird. Weiters wird Biogas noch von Wasser befreit um eine Kondensation zu verhindern und somit Korrosion vorzubeugen. (Salchenegger, 2005)

6.2. Fallbeispiel - Brauerei Freistadt

Anhand einer konkreten Biogasanlage in Freistadt in Oberösterreich wurde eine Evaluierung durchgeführt. Die Daten wurden in Kooperation mit der Brauerei zur Verfügung gestellt und als Grundlage für die Evaluierung verwendet. Die Anlage wird dazu genutzt Strom zu erzeugen und den Wärmebedarf für die Fermentation und Trocknung der Substrate verwendet. Abbildung 11 zeigt die Kenndaten der Biogasanlage. Die Substrate werden aus der Region bezo-

Daten - Biogasanlage (Freistadt)		
Substrate		
	Grassilage	21 t/ha
	Maissilage	17 t/ha
Gasausbeute		1100000 Nm ³ /a
Energieproduktion		
	Strom	2200 MW/a
	Wärme	2600 MW/a

Tabelle 11 – Biogasanlage Freistadt, Daten

gen. Maissilage aus 55 ha Anbaufläche und Grünlandsilage aus 80 ha Anbaufläche. Wobei die Jahrestonnenenerträge für Maissilage bei 17 t/ha und bei Grünlandsilage bei 21 t/ha liegen. Die Grassilage teilt sich auf in 12 t/ha Kleegrassilage und 9 t/ha Grassilage. Aus dem Biogas wird mittels Gasmotor Strom erzeugt und die Abwärme genutzt. Der Gasmotor hat einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 37% und einen thermischen von ca. 45%. Von den 2200 MWh Strom (basierend auf Gesamterzeugung 2008) sind 8% Eigenverbrauch für Rührwerke und Pumpen. Der restliche Strom von 2024 MWh wird ins Netz eingespeist. Von den 2600MWh benötigt die Fermenterheizung 800 MWh und 700 MWh benötigt die Trocknung. Somit stehen noch 1100 MWh Wärme für eine Einspeisung in ein Fernwärmenetz zur Verfügung. Die Bewertung beinhaltet die Substrateinsätze, 8 km Transport und näherungsweise die Infrastrukturdaten einer Biogasanlage aus der ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent, 2001). In der Maissilage wurde kein konventioneller Dünger eingesetzt, da die Biogasgülle wieder als Dünger auf dem Feld ausgebracht wird. Das produzierte Biogas hat einen CH₄-Gehalt von ca.

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y _{spec} [m ² .a/g]	a _{part} [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20244	N 01	Corn Silage Production (30% Dry Matter) DP_NEU_c	kg	0,855	6,182	5,285	13,59%
20250	N 01	Grassland DP	kg	0,323	9,051	2,921	7,51%
20208	N 93	anaerobic digestion plant, biowaste	#	0,000	612129465,478	4,465	11,48%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	0,008	125,226	1,002	2,58%
20252	N 01	Clover-Grass Silage DP_NEU	kg	0,436	57,876	25,211	64,84%

Abbildung 21 – Screenshot, Biogasanlage Freistadt

			Biogas Freistadt NEU_ohne Dünger	Verteilung
	area	m2.a	1,476	4%
	non renewable	m2.a	0,012	0%
	fossil C	m2.a	21,216	55%
	renewable	m2.a	0,001	0%
	air	m2.a	10,005	26%
	water	m2.a	5,937	15%
	soil	m2.a	0,237	1%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	38,884	

Tabelle 12 – SPI-Report, Biogasanlage Freistadt

53%. Eine Einspeisung in das Erdgasnetz oder die Verwendung als Kraftstoff ist mit dieser Qualität nicht möglich. Eine weitere Reinigung müsste erfolgen, was wiederum in einem höheren Fußabdruck endet (siehe Kapitel 6.3). Der ökologische Fußabdruck beträgt 38,9 m²/Nm³.

Die Emission an CO₂ beträgt dabei 119,4 g/Nm³.

Allokation - Output

Das gesamte Biogas wird für den Gasmotor verwendet. Bei einem Einsatz von 1,1 Million Nm³ Biogas erhält man 3124 MW (2024 MW(elekttrisch) + 1100 MW(thermisch)). Ein Kubikmeter Biogas erzeugt 1,84 KW Strom und 1 KW Wärme. Die SPI-Kalkulation bezieht sich auf die Produktion einer kWh Strom und als Sekundärprodukt 0,56 kWh bzw. 2,02 MJ Wärme. Dafür muss man 0,55 Nm³ Biogas einsetzen. Aus der Berechnung ergeben sich 13,7 m²/kWh für

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y _{spec} [m ² .a/q]	a _{part} [m ² .a/unit]
20249	N 40	Biogas_Freistadt_NEU_ohne Dünger	Nm3	0,549	38,884	21,347 100.00%

Abbildung 22 – Screenshot, Biogasanlage - Freistadt (Output)

(a) SPI-Report, Biogas Freistadt, Strom

			Biogas Freistadt	Verteilung
	area	m2.a	0,519	4%
	non renewable	m2.a	0,004	0%
	fossil C	m2.a	7,461	55%
	renewable	m2.a	0,000	0%
	air	m2.a	3,518	26%
	water	m2.a	2,088	15%
	soil	m2.a	0,083	1%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	13,674	

(b) SPI-Report, Biogas Freistadt, Wärme

			Biogas Freistadt	Verteilung
	area	m2.a	0,144	4%
	non renewable	m2.a	0,001	0%
	fossil C	m2.a	2,072	55%
	renewable	m2.a	0,000	0%
	air	m2.a	0,977	26%
	water	m2.a	0,580	15%
	soil	m2.a	0,023	1%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	3,798	

Tabelle 13 – SPI-Report, Biogasanlage - Freistadt (Output)

Strom und 3,8 m²/MJ für Wärme. Der Fußabdruck wurde entsprechend dem Output aufge-

teilt. Die CO₂-Emissionen betragen für Strom 41,9 g/kWh und für Wärme 11,7 g/MJ.

Allokation - Preis

Nun wird der aus Biogas bereitgestellten Energie wieder ein ökonomischer Wert zugewiesen und der Fußabdruck entsprechend anders aufgeteilt. Für die Allokation wurde für Strom ein Tarif von 15,20 €-Cent gewählt. (Lebensministerium, 2006) Die Wärme wurde mit 1,72 €-Cent/MJ laut der lokalen Situation in Freistadt gewählt. Daraus ergibt sich ein ökologischer

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y_{spec} [m ² .a/g]	A_{part} [m ² .a/unit]
20229	1 N 42	Biogas_Freistadt_Elektrizität	kWh		17,376	1,738E+01
20230	2,02 N 40	Biogas_Freistadt_Wärme	MJ		1,966	3,972E+00

Abbildung 23 – Screenshot, Biogasanlage - Freistadt (Preis)

Fußabdruck von 17,4 m²/kWh Strom und 1,9 m²/MJ Wärme. Die Emission an CO₂ für die

(a) SPI-Report, Biogas Freistadt, Strom

			Biogas_Freistadt	Verteilung
area	m2.a		0,660	4%
non renewable	m2.a		0,005	0%
fossil C	m2.a		9,480	55%
renewable	m2.a		0,000	0%
air	m2.a		4,471	26%
water	m2.a		2,653	15%
soil	m2.a		0,106	1%
NACE	m2.a		0,000	0%
A part	m2.a/unit end product		17,376	

(b) SPI-Report, Biogas Freistadt, Wärme

			Biogas_Freistadt	Verteilung
area	m2.a		0,075	4%
non renewable	m2.a		0,001	0%
fossil C	m2.a		1,073	55%
renewable	m2.a		0,000	0%
air	m2.a		0,506	26%
water	m2.a		0,300	15%
soil	m2.a		0,012	1%
NACE	m2.a		0,000	0%
A part	m2.a/unit end product		1,966	

Tabelle 14 – SPI-Report, Biogasanlage - Freistadt (Preis)

Bereitstellung von Strom beträgt 53,4 g/kWh. Die Bereitstellung der Wärme hat eine CO₂-Emission von 6,0 g/MJ.

6.3. Biogas - Reinigung

Das zuvor berechnete Rohbiogas wird nun dazu verwendet um es zu reinigen um eine Einspeisung in das Erdgasnetz zu ermöglichen. Die Evaluierung des gereinigten Biogases beinhaltet den Energieeinsatz für die Reinigung, Aufkonzentrierung, Rohbiogaseinsatz und Infrastruktur um 96%-igen CH₄ (Vol-%) bereitzustellen. Eingesetzt wurde das zuvor evaluierte Rohbiogas. Die restlichen Daten für Infrastruktur und Energieeinsatz stammen wiederum aus der ecoinvent-Datenbank. Die zuvor in Kapitel 6.2 berechneten Biogase wurden hier zu glei-

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y _{spec} [m ² .a/g]	a _{part} [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20249	N 40	Biogas_Freistadt_NEU_ohne Dünger	Nm3	1,500	38,884	58,326	17,40%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	0,500	553,674	276,837	82,60%
20211	N 93	facilities, chemical production	#	0,000	5688,638	0,000	0,00%

Abbildung 24 – Screenshot, Biogas (gereinigt)

chen Anteilen eingesetzt. Daraus ergibt sich ein Fußabdruck von 335,2 m²/Nm³. Bei einer Dichte von 0,74 kg/Nm³ (Jungbluth, 2007a) und 96 Vol-% reinem CH₄ ergeben sich 0,71 kg CH₄. Was einen Fußabdruck von 452,9 m²/kg CH₄ zur Folge hat. Die Emission an CO₂

			Biogas Reinigung (96%-Methan)	Verteilung
	area	m2.a	2,234	1%
	non renewable	m2.a	0,019	0%
	fossil C	m2.a	122,162	36%
	renewable	m2.a	0,022	0%
	air	m2.a	27,932	8%
	water	m2.a	182,339	54%
	soil	m2.a	0,454	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	335,163	

Tabelle 15 – SPI-Report, Biogas (gereinigt)

beträgt dabei 687,6 g.

6.4. Biogas - Brennstoffzellen

Das gereinigte Biogas kann auch in Brennstoffzellen eingesetzt werden, um Strom zu erzeugen. Ohne den Umweg, die Energie in Wärme, Arbeit und anschließend daraus elektrische Energie zu erzeugen, nimmt man den direkten Weg wie in Abbildung 25 dargestellt. Dieser

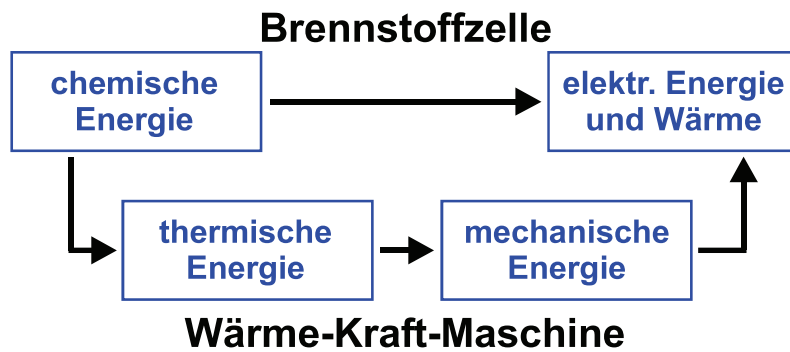


Abbildung 25 – Prinzip der Brennstoffzelle; Quelle: (Gutschi, 2007)

direkte Umwandlungsweg macht theoretisch hohe Wirkungsgrade möglich, jedoch befindet sich diese Technologie noch im Entwicklungsstadium.

6.4.1. Technologie

Das Funktionsprinzip ist das einer umgekehrten Elektrolyse. Im einfachsten Aufbau werden H_2 und O_2 , getrennt durch eine protonendurchlässige Membran, in eine Zelle gepackt. Die Protonen wandern durch die Membran und die Elektronen über einen Verbraucher extern zum O_2 -Teil. Dabei entsteht H_2O , Strom und Wärme. Die Membran ist wichtig da sonst unkontrolliert eine Knallgasreaktion einsetzen würde. Die Brennstoffe sind nicht auf H_2 und O_2

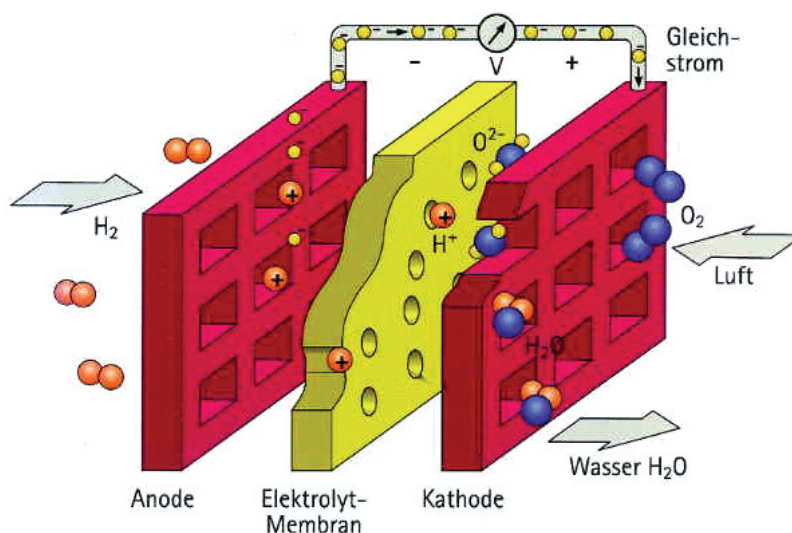


Abbildung 26 – Funktion der Brennstoffzelle; Quelle: (Gutschi, 2007)

beschränkt. Es kann auch MeOH und Biogas verwendet werden. Es gibt mehrere verschiedenen Typen von Zellen, wobei sich diese wesentlich durch die verwendeten Elektrolyten unterschei-

den:

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC)
- Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)
- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)
- Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Ebenfalls unterschiedlich sind die Betriebstemperaturen bei welchen die Zellen arbeiten. (Gutsch, 2007)

6.4.2. SPI-Kalkulation

Zur Evaluierung werden die Daten aus ecoinvent (Ecoinvent, 2001) verwendet. Es wurde eine oxidkeramische Brennstoffzelle berechnet, da diese primär für den stationären Betrieb und als Ersatz für BHKW in Frage kommen. Das eingesetzte Biogas (96%-CH₄-Gehalt), stammt aus dem Fallbeispiel Brauerei Freistadt. Es ergibt sich ein Fußabdruck von 70,2 m²/kWh und die

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	v_{spec} [m ² .a/g]	a_{part} [m ² .a/unit]	
20237	N 40	Biogas (96%-Methan)	Nm3	0,199	335,163	66,647	94,94%
20216	N 93	SOFC fuel cell 125kWe, future	#	0,000	29724301,270	3,277	4,67%
20218	N 93	maintenance SOFC fuel cell 125kWe, future	#	0,000	278453,491	0,276	0,39%

Abbildung 27 – Screenshot, Brennstoffzelle

			electricity, biogas, allocation exergy, at SOFC fuel cell 125kWe, future	Verteilung
	area	m2.a	0,444	1%
	non renewable	m2.a	0,004	0%
	fossil C	m2.a	25,945	37%
	renewable	m2.a	0,005	0%
	air	m2.a	5,896	8%
	water	m2.a	37,811	54%
	soil	m2.a	0,095	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	70,201	

Tabelle 16 – SPI-Report, Brennstoffzelle

Emission an CO₂ beträgt dabei 146,0 g.

6.5. Biogassubstrate

Zur Herstellung von Biogas können verschiedene Substrate mit unterschiedlichen Gasausbeuten verwendet werden (siehe Abbildung 17). Es gibt 2 Arten der Fermentation (Nass- und Trockenfermentation). Es kommt jedoch fast ausschließlich die Nassfermentation zum Einsatz (Weiland, 2006). Milchviehgülle wird im Biogasfermenter mit einer Trockensubstanz von ca. 5,5-7,5% eingesetzt (LK-NRW, 2008). Mais- und Grünlandsilage kommt mit einer Trockensubstanz von 8-10% (Weiland, 2006) im Fermenter zum Einsatz. Somit muss dementsprechend mehr Milchviehgülle eingesetzt werden um die selbe Menge an Biogas zu erzeugen. Milchviehgülle besitzt ungefähr 60% der Trockensubstanz im Fermenter im Vergleich zu Mais- oder Grünlandsilage. Milchviehgülle ist fußabdrucksfrei da es ein Abfallprodukt ist, jedoch erhöht sich der Anteil des Transports und der Infrastruktur der Biogasanlage, da die Gasausbeuten geringer sind und der Fermenter öfter befüllt werden muss. Um 1 Nm³ Biogas zu erhalten benötigt man entweder 1,9 kg Maissilage, 2,0 kg Grassilage oder 4,5 kg Milchviehgülle (Schwab, 2009). Der ökologische Fußabdruck für 1 Nm³ Biogas aus Maissilage beträgt 10,8 m², aus Grassilage 24,1 m² und aus Milchviehgülle 12,6 m². Biogas aus Maissilage stellt die Basislinie

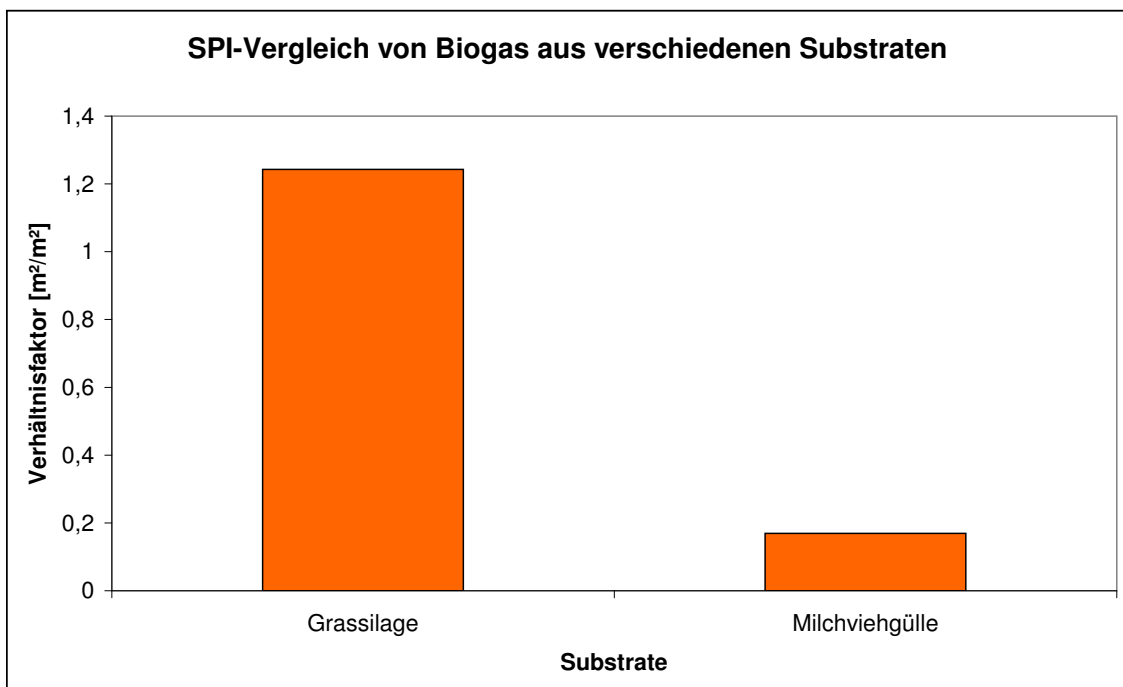


Abbildung 28 – SPI, Biogas aus verschiedenen Substraten

in Abbildung 28 dar. Der Fußabdruck von Biogas aus Grassilage ist mehr als doppelt so hoch

wie in Biogas aus Maissilage. Der Grund dafür sind mehr Traktorstunden und eine etwas geringere Gasausbeute. Im Falle der Milchviehgülle liegt der Fußabdruck um 17% höher als der von Biogas aus Maissilage. Milchviehgülle hat zwar keinen Fußabdruck, die höher bewertete Infrastruktur und der Transport erhöhen den Fußabdruck wesentlich.

Auswertung der SPI-Kalkulation

Die Produktion von Biogas hat den Großteil des Fußabdrucks in den Substraten. Strom und Wärme für die Produktion finden sich nicht in der Kalkulation, da kein Strom vom Netz bezogen wird. Die benötigte Wärme stammt von der Abwärme des Gasmotors. Trotzdem ist der ökologische Druck verglichen zu den anderen Technologien sehr hoch. Die Herstellung der Mais- oder Grassilage hat bereits einen relativ hohen ökologischen Druck, bedingt durch den Einsatz von Traktoren, Düngemittel und Pflanzenschutzmitteln. Die Reinigung erhöht den Fußabdruck nochmal auf ca. das Doppelte. Einerseits durch die notwendige elektrische Energie (ca. 35%), andererseits wegen des höheren Einsatzes von ungereinigtem Biogas. Um einen Kubikmeter gereinigtes Biogas zu erhalten, müssen 1,5 Nm³ ungereinigtes Biogas eingesetzt werden. Der Fußabdruck des erzeugten Stroms aus Biogas liegt von allen betrachteten Technologien am höchsten. Noch deutlicher fällt dieser Umstand bei der Allokation nach Preis auf. Dort ist der Fußabdruck sogar geringfügig höher als jener von Strom aus einem Erdgaskraftwerk. Der Einsatz von Biogas in einer Brennstoffzelle fällt jedoch wesentlich günstiger aus. Im Falle der Wärme fällt der Fußabdruck wesentlich höher als alle anderen Vergleichstechnologien aus. Selbst die fossilen Vertreter sind im Bezug auf den Fußabdruck günstiger.

7. Windkraft

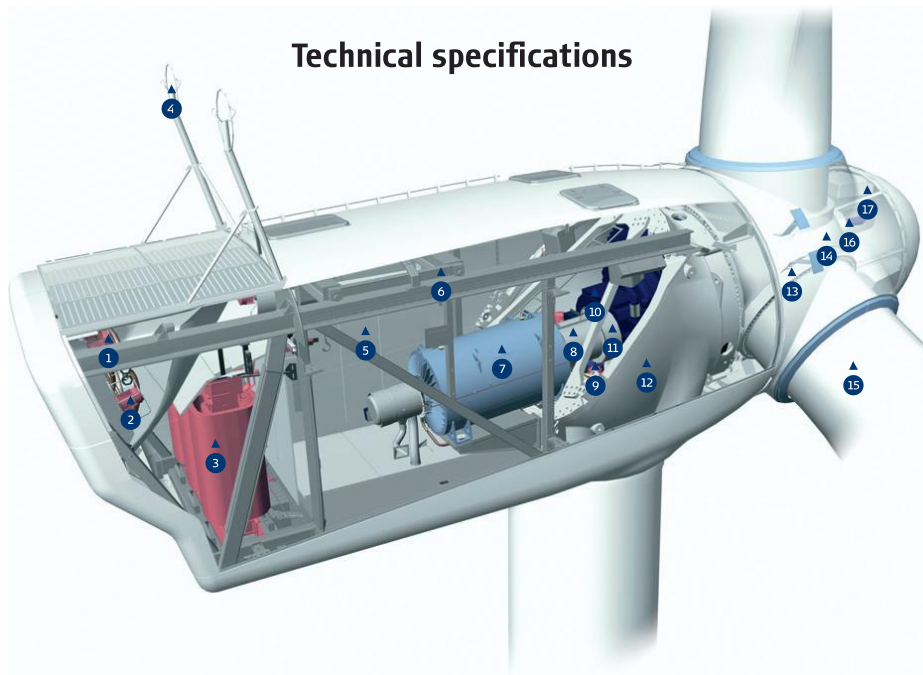
Im Falle der Windenergie ergeben sich andere Faktoren, welche ausschlaggebend für die Kalkulation des SPI sind. Der Rohstoff welcher den Strom erzeugt muss nicht permanent zugeführt werden, sondern steht fußabdrucksfrei und gratis zur Verfügung. Ein gravierender Nachteil des Windes ist die unstetige Verfügbarkeit. Somit lässt sich nicht steuern, zu welchem Zeitpunkt wieviel Energie erzeugt werden kann. Daraus ergeben sich Konsequenzen bezüglich der Einsetzbarkeit der Windenergie. Der große limitierende Faktor der Windenergie ist die Speicherbarkeit der Elektrizität. Es gibt noch nicht zufriedenstellende technologische Möglichkeiten, im großen Stil Strom zu speichern und bei Bedarf zu beziehen. In Zeiten hoher Spitzenlasten kann man nicht garantieren dass genug Wind zur Produktion zur Verfügung steht. Im Gegensatz dazu kann man in Kraftwerken mit Brennstoffen die Produktion nach Bedarf durch die Menge der Brennstoffe regeln. Weiters benötigen Winräder mehr Platz, um die selbe Menge Strom zu produzieren wie herkömmliche Kraftwerke. Zuviele Winräder auf zu engen Raum machen keinen Sinn. Pro Megawatt Turbinenkapazität müssen ca. 25 ha Fläche frei von anderen Winrädern sein. Wobei bei 2 x 1 MW Windturbinen eine Fläche von 50 ha geschützt werden müsste und für eine 2MW Turbine ebenfalls 50 ha. (Pimentel, 2008)

7.1. Technologie

Eine Windkraftanlage besteht aus 3 wesentlichen Teilen:

- Turm
- Nacelle
- Rotorblätter

Der Turm ist eine Stahlkonstruktion, welche auf einem Fundament aus Beton steht. Die Leistung der Anlage bestimmt die Höhe des Turms, da die Rotorblätter umso länger sein müssen. In der Nacelle befindet sich ein Getriebe. Die Umdrehungen der Rotorblätter pro Minute wären zu gering für den Generator, um daraus Strom zu erzeugen. Das Getriebe setzt die Umdrehungen pro Minute je nach Anlagengröße auf die für den Generator erforderliche Drehzahl um. Die Rotorblätter bestehen hauptsächlich aus glasfaserverstärktem Kunststoff.



- | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1 Oil cooler | 6 Service crane | 11 Mechanical disc brake | 16 Pitch cylinder |
| 2 Water cooler for generator | 7 OptiSpeed® generator | 12 Machine foundation | 17 Hub controller |
| 3 High voltage transformer | 8 Composite disc coupling | 13 Blade bearing | |
| 4 Ultrasonic wind sensors | 9 Yaw gears | 14 Blade hub | |
| 5 VMP-Top controller with converter | 10 Gearbox | 15 Blade | |

Abbildung 29

– Windturbine, Quelle: Vestas V90-3.0 MW Technical Specifications

7.2. SPI - Kalkulation

Im Gegensatz zu anderen Technologien (z.B.: Biomasse-ORC, Pellets, . . .) bei welchen der Fußabdruck vom Einsatz des Rohstoffes und dessen Transport wesentlich abhängig ist, kommt bei der Windenergie (wie auch bei der Photovoltaik) die Erzeugung der Anlage zum Tragen. Der Fußabdruck durch die Erzeugung des Windrades muss also auf die Lebenszeit aufgeteilt werden. Einzig die Wartung könnte als laufender ökologischer Druck berücksichtigt werden, diese wird jedoch aufgrund des niedrigen Beitrages vernachlässigt. Als Datengrundlage wurde der LCA Bericht einer 3MW Wind Turbine Onshore der Firma Vestas verwendet (Vestas, 2004a). Der Bericht erfasst ca. 95% der eingesetzten Materialien, bezogen auf das Gewicht des Windrades. Somit dürfte der ökologische Druck, welcher fast ausschließlich bei der Produktion entsteht, sehr gut abgebildet werden. Ein Windrad besteht grundsätzlich aus 3 Ein-

heiten. Der Turm, Rotor und dem Maschinenhaus. Die Lebensdauer der Anlage wird auf 20 Jahre festgelegt. Laut dem Vestas Environmental Statement 2004 (Vestas, 2004b) wird für die Produktion einer Turbine 7795 MWh an Energie aufgewendet. Diese Menge beinhaltet auch die Energie zur Herstellung der Rohmaterialien wie Stahl und Kupfer. Da die Prozesse für die Rohmaterialien in der SPI Datenbank bereits die eingesetzte elektrische Energie enthalten wird diese von den 7795 MWh abgezogen. Somit wird der Stromeinsatz zur Erzeugung der Rohmaterialien nicht doppelt gerechnet. Es bleiben damit 7312,4 MWh Einsatz an Strom übrig.

Der Einsatz an Materialien wurde aus einem bestehenden Life Cycle Assessment einer Windturbine entnommen und zusammengefasst. (Nalukowe, 2006) Materialien wie glasfaserver-

	Turm (105m Höhe)	Rotor			Maschinenhaus			Fundament (15m*15m)	Summe
		3 Flügel	Nase	Hub	Generator	Getriebe	Gehäuse und Rest		
Stahl (t)	275				5,53	22,54	31,45		334,52
Fiberglas (t)		13,14	11,5				1,11		25,75
Epoxid (t)		8,76							8,76
Eisen (t)				8,5					8,5
Kupfer (t)					2,98	0,23	1,48		4,69
Aluminium (t)						0,23	2,96		3,19
Beton (t)								1200	1200

Tabelle 17 – Materialeinsatz - Windturbine

stärkter Kunststoff und Epoxid wurden aus der ecoinvent-Datenbank entnommen und daraus SPI Datensätze erstellt. (siehe A.6 im Anhang)

Variante 1 - Strommix Norwegen

In dieser Variante werden zur Kalkulation die Angaben der Firma Vestas verwendet, bezüglich der Strombereitstellung zur Produktion der Turbinen.

Der Fußabdruck setzt sich zusammen aus Energieaufwand und Materialeinsatz. Die 7312,4 MWh Elektrizität bestehen aus 54% norwegischem Strom (fast ausschließlich Wasserkraft) und 31% EU-Strommix. Die restlichen 15% werden von den eigenen Windturbinen geliefert und werden hier nicht eingerechnet. (Vestas, 2003) Der gesamte ökologische Fußabdruck einer 3MW Windturbine beträgt 1.780.510.417 m². Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren ergeben sich 89.025.521 m² pro Betriebsjahr. Um die Windturbine mit anderen Technologien besser vergleichen zu können kann man den Fußabdruck auf eine Kilowattstunde beziehen, indem die im LCA Bericht von Vestas angegebene Jahresproduktion der Turbine zur Kalkulation verwendet wird. Die Jahresleistung der Turbine ist vor allem vom Standort und von

7. Windkraft

output		Process Name:	Unit	$a_{\text{tot}} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	a_{partproc} [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20238	1 N 42	Vestas V90_3MW	#	1780510417,250	1,00	1,781E+09	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/g]	a_{part} [m ² .a/unit]	
10133	N 27	Steel unalloyed SP	kg	1534,515	874,798	1342391,273	0,08%
10139	N 27	Cast iron SP	t	8,500	1740980,802	14798336,820	0,83%
10107	N 27	Copper SP	t	4,690	3961841,072	18581034,628	1,04%
10157	N 27	Aluminium 0% Recycling SP	t	3,190	10925311,910	34851744,993	1,96%
10020	N 42	Net electricity NO SP	MWh	3948,700	20087,154	79318146,494	4,45%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	MWh	2266,800	553673,913	1255068026,608	70,49%
20112	N 26	glass fibre, reinforced	t	25,750	1327260,513	34176958,219	1,92%
20113	N 26	Epoxy, resin	t	8,760	2064529,925	18085282,145	1,02%
10133	N 27	Steel unalloyed SP	t	334,520	874798,404	292637562,166	16,44%
10137	N 26	Concrete SP	t	1200,000	26375,778	31650933,903	1,78%

Abbildung 30 – Screenshot, Windturbine

			Wind Turbine 3MW	Verteilung
	area	m2.a	148760,433	0%
	non renewable	m2.a	11968,359	0%
	fossil C	m2.a	686154800,209	39%
	renewable	m2.a	126704,618	0%
	air	m2.a	97641144,654	5%
	water	m2.a	995089580,424	56%
	soil	m2.a	1337458,554	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	1780510417,250	

Tabelle 18 – SPI-Report, Windturbine

den Windverhältnissen des Bezugsjahres abhängig. Somit kann man die folgende Kalkulation bestenfalls als Orientierungswert sehen. Bei einem Kapazitätsfaktor von 30% werden pro Jahr 7890 MWh elektrische Energie produziert. Der Kapazitätsfaktor ist das Verhältnis zwischen der maximal möglichen Kapazität der Turbine und der tatsächlich erbrachten Leistung. Somit ergibt sich ein Fußabdruck von 11,3 m²/kWh. Die Emission an CO₂ beträgt 24,5 g/kWh.

Variante 2 - Strommix EU25

In dieser zweiten Variante wird der EU25 Strommix eingesetzt. Somit gilt die Kalkulation nicht nur für den Produktionsstandort Dänemark. Der ökologische Fußabdruck beträgt 3.887.484.452 m² bzw. 194.374.223 m² pro Betriebsjahr. Bei den gleichen Produktionsbedingungen wie zuvor, ergeben sich 24,6 m²/kWh. Die Emission an CO₂ beträgt 49,1 g/kWh.

output		Process Name:	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20254	1 N 42	Vestas V90_3MW (EU25)	#	3887484452,098	1,00	3,887E+09	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
10133	N 27	Steel unalloyed SP	kg	1534,515	874,798	1342391,273	0,03%
10139	N 27	Cast iron SP	t	8,500	1740980,802	14798336,820	0,38%
10107	N 27	Copper SP	t	4,690	3961841,072	18581034,628	0,48%
10157	N 27	Aluminium 0% Recycling SP	t	3,190	10925311,910	34851744,993	0,90%
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	MWh	6215,500	553673,913	3441360207,951	88,52%
20112	N 26	glass fibre, reinforced	t	25,750	1327260,513	34176958,219	0,88%
20113	N 26	Epoxy, resin	t	8,760	2064529,925	18085282,145	0,47%
10133	N 27	Steel unalloyed SP	t	334,520	874798,404	292637562,166	7,53%
10137	N 26	Concrete SP	t	1200,000	26375,778	31650933,903	0,81%

Abbildung 31 – Screenshot, Windturbine (EU25)

			Wind Turbine 3MW (EU25)	Verteilung
	area	m2.a	279568,593	0%
	non renewable	m2.a	20611,970	0%
	fossil C	m2.a	1376119229,936	35%
	renewable	m2.a	285167,255	0%
	air	m2.a	195362322,162	5%
	water	m2.a	2313319434,948	60%
	soil	m2.a	2098117,232	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	3887484452,098	

Tabelle 19 – SPI-Report, Windturbine (EU25)

Auswertung der SPI-Kalkulation

Die Menge an Strom zur Herstellung der Windräder ist der größte Faktor. Der hohe Anteil an norwegischem Strom kommt dem Fußabdruck zugute. Verglichen zum EU-Strommix ist der norwegische Strommix äußerst gering (bedingt durch den hohen Anteil an Wasserkraft). Die Schwankungsbreite bei den Windrädern ist wie in den 2 Varianten gezeigt wird sehr groß. Durch den Einsatz von Ökostrom könnte sich der Fußabdruck leicht senken lassen.

8. Thermische Solaranlage

Sonnenkollektoren stellen seit vielen Jahren eine bewährte Methode dar, den Warmwasserbedarf von Häusern zu decken. Vermehrt kommen Solarkollektoren auch in Freibädern oder in der Landwirtschaft für Heutrocknungsanlagen zum Einsatz.

8.1. Technologie

Es gibt verschiedene Typen von Solarkollektoren. Flachkollektoren sind der am meisten verbreiteste Kollektortyp. In Abbildung 32 ist das Schema eines Flachkollektors dargestellt. Die

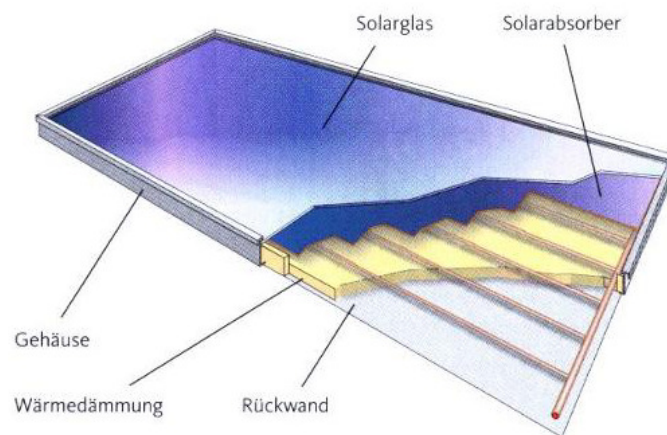


Abbildung 32 – Flachkollektor, Quelle: <http://www.arcso.de/4.html>

Absorberfläche ist dabei normal zur Sonne ausgerichtet. Im Gegensatz dazu werden in Vakuumröhrenkollektoren die Absorberstreifen in Glasröhren verarbeitet. Ein Vakuum zwischen Streifen und Glasrohr dient dazu, den Wärmeverlust durch Konvektion zu verringern. In den Flachkollektoranlagen wird als Wärmedämmung an der Rückwand Mineralwolle eingesetzt, um die Wärmeverluste gering zu halten. Vakuumkollektoren besitzen einen höheren Wirkungsgrad, was den Ertrag im Winter steigert, und der Einsatz des Kollektors bei ungünstigen Neigungen am Dach ist ebenfalls möglich. Die Kosten der Vakuumröhrenkollektoren sind jedoch höher. Die Evaluierung von Solarkollektoren beschränkt sich hier auf die Flachkollektoren, da diese am weitesten verbreitet sind.

8.2. Flachkollektor

Die folgende Berechnung stammt ebenfalls aus der ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent, 2001) und schließt die Prozesse zur Herstellung eines Flachkollektors mit einer Fläche von einem

m² ein. Der ökologische Fußabdruck des Moduls beträgt 119.542 m²/m²(Kollektorfläche). Die

The screenshot shows a software interface with the following data:

Updated: LEPPE_v1		Current: LEPPE_v1		more >>		
output	Process Name:	Unit	a _{tot} = Σ a	K	a _{partproc}	Value
			[m ² .a/unit]	[-]	[m ² .a/unit]	[\$/unit]
20187	1 N 93 flat plate collector, at plant	m2	119541,933	1,00	1,195E+05	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y _{spec}	a _{part}	
					[m ² .a/q]	[m ² .a/unit]	
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	1,160	553,674	642,262	0,54%
10112	N 41	Water desalted SP	kg	1,380	4,301	5,936	0,00%
10182	N 24	Mineral wool SP	kg	2,430	497,278	1208,386	1,01%
10187	N 26	Flat glass uncoated SP	kg	9,120	288,396	2630,167	2,20%
10170	N 24	Rubber (Ethylene-Propylene) SP	kg	0,732	3564,736	2609,387	2,18%
20130	N 24	silicone product, at plant	kg	0,059	169939,065	9992,417	8,36%
10183	N 24	Propylene glycol SP	kg	1,010	822,976	831,205	0,70%
10157	N 27	Aluminium 0% Recycling SP	kg	3,930	10925,312	42936,476	35,92%
10107	N 27	Copper SP	kg	2,820	3961,841	11172,392	9,35%
10158	N 27	Chromium SP	kg	4,140	10868,228	44994,465	37,64%
10074	N 61	Transport Tankship overseas SP	tkm	95,500	2,778	265,291	0,22%
10048	N 60	Transport 28t Truck SP	tkm	1,400	84,945	118,923	0,10%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	11,700	125,226	1465,141	1,23%
10046	N 60	Transport Railway SP	tkm	16,800	39,850	669,485	0,56%

Abbildung 33 – Screenshot, Solarmodul

			flat plate collector, at plant	Verteilung
	area	m2.a	7,722	0%
	non renewable	m2.a	1,153	0%
	fossil C	m2.a	46346,287	39%
	renewable	m2.a	6,859	0%
	air	m2.a	14952,613	13%
	water	m2.a	58133,955	49%
	soil	m2.a	93,385	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end p	119541,975	

Tabelle 20 – SPI-Report, Solarmodul

Emission an CO₂ beträgt 260,8 kg/m²(Kollektorfläche).

8.3. Anlage

Der in Kapitel 8.2 evaluierte Flachkollektor wird auf einer Dachkonstruktion eines Einfamilien-Hauses eingesetzt. Dabei wird die der Kollektor, ein Warmwasserspeicher, Trägermedium, Umwälzpumpe (40 W), Expansionsgefäß (25 l), Kupferrohre, Dachkonstruktion und der Transport berücksichtigt. Der ökologische Fußabdruck beträgt 16,5 m²/MJ und die Emission an CO₂ 35,3 g/MJ.

8. Thermische Solaranlage

Workbook 2.00 (2)		Updated: LEPPE v1		Current: LEPPE v1		more >>	
output	Process Name:	heat, at flat plate collector, one-family house, for hot water	Unit	$a_{tot} = \sum a$	K	$a_{partproc}$	Value
				[m ² .a/unit]	[-]	[m ² .a/unit]	[\$/unit]
20192	1 N 93	heat, at flat plate collector, one-family house, for hot water	MJ	16,469	1,00	1,647E+01	0,000E+00
ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec}	a_{part}	
					[m ² .a/q]	[m ² .a/unit]	
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	0,016713	553,674	9,254	56,19%
20189	N 93	solar system, flat plate collector, one-family house, h	#	0,000005	1325369,059	6,826	41,45%
10070	N 60	Transport Delivery truck <3,5t SP	tkm	0,000567	687,906	0,390	2,37%

Abbildung 34 – Screenshot, Solaranlage

			heat, at flat plate collector, one-family house, for hot water	Verteilung
	area	m2.a	0,001	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	6,086	37%
	renewable	m2.a	0,001	0%
	air	m2.a	1,290	8%
	water	m2.a	9,079	55%
	soil	m2.a	0,011	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	16,469	

Tabelle 21 – SPI-Report, Solaranlage

Auswertung der SPI-Kalkulation

Im Falle der Solarkollektoren sind die größten Faktoren Aluminium und Kupfer, welche zusammen ca. 70% des ökologischen Drucks verursachen. Ein mit Ökostrom arbeitender Aluminium- oder Kupferhersteller würde automatisch auch den Fußabdruck der Solarmodule verbessern. Die Solaranlage selbst verbraucht Strom. Wenn dieser wie im berechneten Fall vom Netz bezogen wird, verursacht dies ca. 55% des Fußabdrucks pro MJ Wärme. Der Rest des Fußabdrucks entfällt fast gänzlich auf die vorher kalkulierten Module.

9. Photovoltaik

Die Photovoltaik stellt eine Möglichkeit dar die Energie der Sonne direkt in Strom umzuwandeln, im Gegensatz zu anderen Energietechnologien welche Primärenergieträger wie Biomasse, Kohle, Erdöl und Gas als Input benötigen. Aus ökologischer und ökonomischer Hinsicht verursacht die Produktion der Photovoltaikmodule praktisch den gesamten Aufwand.

9.1. Technologie

Die Photovoltaik bietet eine Möglichkeit, das eingestrahlte Licht direkt in hochwertigen Strom umzuwandeln. Ansonsten kann immer nur die Sonnenenergie indirekt genutzt werden, indem man die in primären Rohstoffen gespeicherte Energie umwandelt und daraus Strom gewinnt. Dabei müssen hohe Verluste in der Umwandlung in Kauf genommen werden.

Der photovoltaische Effekt beruht auf der Einstrahlung von Photonen, woraufhin in einem pn-dotierten Material (meist hochreines Silizium) ein elektrisches Feld aufgebaut wird. Durch die Dotierung wird in das Siliziumgitter (4-wertige Silizium Atome) bei einer p-Dotierung ein Loch eingebracht, indem man gezielt mit Bor-Atomen (3-wertig) verunreinigt. Im Gegensatz dazu wird bei der n-Dotierung gezielt mit Phosphor-Atomen (5-wertig) verunreinigt. Beide Schichten werden aufeinander gelegt und durch die Sonneneinstrahlung und einen externen Verbraucher (Widerstand) ist der elektrische Kreislauf geschlossen. Der erzeugte Strom steht als Gleichstrom zur Verfügung, weshalb meist ein Inverter (= Wechselrichter) nach der Anlage geschaltet ist, um Wechselstrom zu erzeugen. Der Wirkungsgrad bei der Konversion von

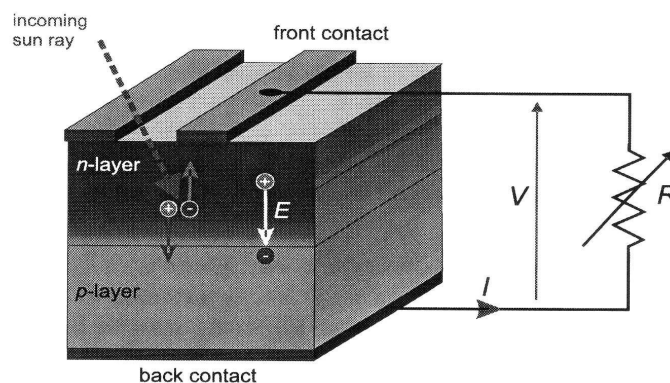


Abbildung 35 – Schema - Photovoltaik, Quelle: Krauter,2006,22

Sonneneinstrahlung zu elektrischer Energie ist unter anderem abhängig von der Reinheit des Siliziumträgers. Der Großteil der verwendeten Module sind multikristalline und monokristalli-

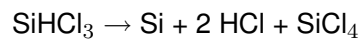
ne Photovoltaikzellen. Die Produktion der monokristallinen Zellen erfordert mehr Energie aufgrund der höheren Reinheit. Dadurch erhält man auch einen besseren Wirkungsgrad bei der Wandlung von Sonnenstrahlen in elektrische Energie. Dies schlägt sich im Preis und durch den hohen Energieeinsatz im ökologischen Fußabdruck nieder.

(Krauter, 2006)

Produktion der Photovoltaikzellen

Großtechnisch wird MG-Si für die Aluminium und Stahlindustrie hergestellt. Silizium zählt zu den häufigsten Elementen in der Erdkruste und kommt in oxidierter Form als Quarzsand (SiO_2) vor. Der Quarzsand wird bei 1500°C reduziert. Daraus erhält man das metallurgische Silizium mit einer Reinheit von bis zu 99,5%. (Krauter, 2006)

Um aus dem metallurgischen Silizium Photovoltaikzellen zu erhalten muss die Reinheit weiter erhöht werden. Der Siemens C-process ist die Standardverfahrensweise um MG-Si in EG-Si zu wandeln. EG-Si besitzt die Reinheit um daraus Halbleiterchips zu fertigen und auch Photovoltaikzellen. Dabei wird MG-Si bei ca. $300-400^\circ\text{C}$ mit HCl und einem Cu-Katalysator zu Trichlorsilan (SiHCl_3) gewandelt. Dabei entsteht als Nebenprodukt H_2 -Gas. Aus Trichlorsilan wird das reine Silizium bei ca. 1000°C nach folgender Reaktion gewonnen:



Das Produkt ist das polykristalline Silizium (als Granulat) welches bereits für die Photovoltaiktechnik eingesetzt werden kann, jedoch mit geringerem Wirkungsgrad im Vergleich zu monokristallinen Zellen.

Um monokristalline Zellen zu produzieren, wird der Czochralski-Prozess angewandt. Dabei wird das EG-Si wieder geschmolzen und aus der Schmelze ein Einkristall gezogen. Zu der Schmelze wird bereits Bor gegeben um daraus einen p-dotierten Kristall zu erhalten. Dieser Prozess dauert mehrere Stunden und findet bei 1450°C statt.

Aus dem Einkristall werden dünne Platten (Wafer) geschnitten. Auf den Wafern wird mittels POCl_3 und O_2 eine Phosphoroxidschicht erzeugt um einen pn-Übergang zu schaffen. Die Phosphoratome diffundieren in das Silizium bei $800-900^\circ\text{C}$. Die Zellengröße ist abhängig von der Größe des gezüchteten Einkristalls. Es werden in einem Photovoltaikmodul mehrere Zellen hintereinander geschaltet um eine bestimmte Modulgröße zu erreichen. (Krauter, 2006)

Man kann solche Zellen auch auf Basis anderer Materialien wie Gallium herstellen, jedoch werden hier nur Si-Zellen betrachtet, da diese die größte Verbreitung haben.

Sonneneinstrahlung

Die energetische Amortisation ist wesentlich vom Standort abhängig und kann sehr stark variieren. Die Solarkonstante beträgt 1.353 W/m^2 . Mit dieser Leistung trifft das Licht auf die Erdatmosphäre. Dieser Wert kann sich aufgrund der leicht elliptischen Umlaufbahn der Erde zur Sonne leicht verändern. Dies kann jedoch vernachlässigt werden da der Unterschied weniger als 1% beträgt.

Das eingestrahlte Licht wird in der Atmosphäre teilweise absorbiert und gestreut, sodass auf der Erdoberfläche direkt eingestrahktes Licht und gestreutes Licht auftritt. Die auf die Zelle eingestrahkte Energie ist auch vom Einstrahlwinkel abhängig, wie folgendes Jahreseinstrahlprofil zeigt. Dieses Profil gilt als Beispiel für Mitteleuropa (51°N , $11,5^\circ \text{E}$). Dabei ist ersichtlich,

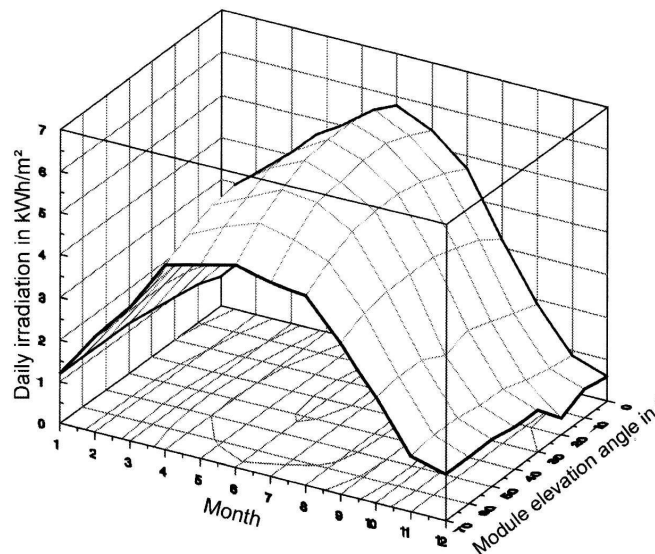


Abbildung 36 – Sonneneinstrahlung - Mitteleuropa, Quelle: (Krauter, 2006)

wie sich der Winkel und die Jahreszeit auf die Energiemenge auswirkt. (Krauter, 2006)

9.2. PV - Module

Wie bereits zuvor erwähnt wurde, gibt es mehrere Arten von PV-Modulen. In diesem Kapitel wurde jeweils ein monokristallines und ein polykristallines Modul evaluiert. Da der Herstellungsprozess für die monokristallinen Zellen aufwändiger ist, ist auch der Fußabdruck ent-

sprechend höher.

Zur Berechnung wurden die Rohdaten aus der ecoinvent-Datenbank entnommen und daraus Prozesse im SPInExcel generiert. Weiters diente ein Bericht des Swiss Centre for Life Cycle Inventories als Datengrundlage (Jungbluth, 2007b). Welche Datensätze aus der ecoinvent entnommen wurden findet man unter Kapitel A.8 im Anhang. Dabei wurden nur die Photovoltaikmodule berechnet. Konkrete Anlagen wo die Module jeweils zum Einsatz kommen werden in Kapitel 9.3 berechnet.

Monokristallines Modul

Der ökologische Fußabdruck eines monokristallinen Photovoltaikmoduls beträgt 222.911 m²/m² (Modulfläche). Die Emission an CO₂ beträgt 585 kg/m² (Modulfläche).

output		Process Name:	photovoltaic panel, single-Si, at plant	Unit	a _{tot} = Σ a	K	a _{partproc}	Value
20114	1 N 31		photovoltaic panel, single-Si, at plant	m ²	[m ² .a/unit]	[-]	[m ² .a/unit]	[\$/unit]
					222910,693	1,00	2,229E+05	
							0,000E+00	
ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y _{spec}		a _{part}	
					[m ² .a/q]		[m ² .a/unit]	
10011	N 42	Net electricity EU25 SP	kWh	4,711	553,674		2608,192	1,17%
10173	N 11	Natural gas High Pressure distributed FP	MJ	5,407	14,278		77,203	0,03%
10187	N 26	Flat glass uncoated SP	kg	10,079	288,396		2906,739	1,30%
10107	N 27	Copper SP	kg	0,113	3961,841		446,460	0,20%
20115	N 27	aluminium alloy, AlMg3, at plant	kg	2,629	11116,124		29228,738	13,11%
10160	N 27	Nickel SP	kg	0,000	18427,605		2,999	0,00%
20112	N 26	glass fibre, reinforced	kg	0,188	1327,261		249,273	0,11%
10147	N 24	Ethylene SP	kg	1,375	1352,060		1858,636	0,83%
44	air	Acetone	kg	0,013	154,000		1,996	0,00%
99	air	Methanol	kg	0,002	154,000		0,332	
10136	N 24	Lubricant oil SP	kg	0,002	264,671		0,425	0,00%
20131	N 31	photovoltaic cell, single-Si, at plant	m ²	0,932	176752,677		164805,964	73,99%
20130	N 24	silicone product, at plant	kg	0,122	169939,065		20724,069	9,30%

Abbildung 37 – Screenshot, PVModul (monokristallin)

			photovoltaic panel, single-Si, at plant	Verteilung
	area	m ² .a	14,502	0%
	non renewable	m ² .a	1,258	0%
	fossil C	m ² .a	103977,658	47%
	renewable	m ² .a	42,790	0%
	air	m ² .a	12006,990	5%
	water	m ² .a	106798,034	48%
	soil	m ² .a	69,459	0%
	NACE	m ² .a	0,000	0%
	A part	m ² .a/unit end product	222910,693	

Tabelle 22 – SPI-Report, PVModul (monokristallin)

Polykristallines Modul

Der ökologische Fußabdruck eines monokristallinen Photovoltaikmoduls beträgt 179.277 m²/m² (Modulfläche).

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
10001	N 42	Net electricity AT SP	kWh	4,711	214,853	1012,110	0,56%
10040	N 40	Process energy, natural gas, industrial heater >100 t	MJ	5,407	19,584	105,894	0,06%
20222	N 42	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	m2	0,932	132469,783	123516,151	68,90%
722	renewable	Water	kg	21,286	0,000	0,000	0,00%
10187	N 26	Flat glass uncoated SP	kg	10,079	288,396	2906,739	1,62%
10107	N 27	Copper SP	kg	0,113	3961,841	446,460	0,25%
20115	N 27	aluminium alloy, AlMg3, at plant	kg	2,629	11116,124	29228,738	16,30%
10160	N 27	Nickel SP	kg	0,000	18427,605	2,999	0,00%
20112	N 26	glass fibre, reinforced	kg	0,188	1327,261	249,273	0,14%
10147	N 24	Ethylene SP	kg	0,373	1352,060	504,278	0,28%
44	air	Acetone	kg	0,013	154,000	1,996	0,00%
99	air	Methanol	kg	0,002	154,000	0,332	
10136	N 24	Lubricant oil SP	kg	0,002	264,671	0,425	0,00%
20130	N 24	silicone product, at plant	kg	0,122	169939,065	20724,069	11,56%
10049	N 60	Transport 16t Truck SP	tkm	1,609	125,226	201,526	0,11%
10046	N 60	Transport Railway SP	tkm	9,448	39,850	376,522	0,21%

Abbildung 38 – Screenshot, PVModul (polykristallin)

			photovoltaic panel, multi-Si, at plant	Verteilung
	area	m2.a	11,056	0%
	non renewable	m2.a	1593,291	1%
	fossil C	m2.a	90700,510	51%
	renewable	m2.a	25,978	0%
	air	m2.a	9933,388	6%
	water	m2.a	76956,811	43%
	soil	m2.a	56,143	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	179277,178	

Tabelle 23 – SPI-Report, PVModul (polykristallin)

Die Emission an CO₂ beträgt 510,5 kg/m²(Modulfläche).

9.3. PV-Anlagen

Die zuvor in Kapitel 9.2 kalkulierten Module werden nun in einer 3 kWp Flachdachanlage eingesetzt. Berücksichtigt wird außer dem Modul noch der Transport, Inverter, Verkabelung und die Dachkonstruktion. Die Lebensdauer der Anlage ist mit 30 Jahren angegeben. Die Berechnung bezieht sich auf eine Installation in der Schweiz und auf die dort herrschenden Einstrahlungsverhältnisse.

PV-Anlage mit monokristallinem Modul

Die ökologische Druck einer Kilowattstunde entspricht 71,8 m² oder 19,9 m²/MJ.

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]
20186	N 42	electricity, PV, at 3kWp flat roof installation, single-Si	kWh	0,000012	5955599,351	71,771

Abbildung 39 – Screenshot, PVAnlage (monokristallin)

			electricity, PV, at 3kWp flat roof installation, single-Si	Verteilung
	area	m2.a	0,005	0%
	non renewable	m2.a	0,001	0%
	fossil C	m2.a	31,970	45%
	renewable	m2.a	0,012	0%
	air	m2.a	5,738	8%
	water	m2.a	34,015	47%
	soil	m2.a	0,030	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	71,771	

Tabelle 24 – SPI-Report, PVAnlage (monokristallin)

Die Emission an CO₂ beträgt 179,9 g/kWh.

PV-Anlage mit polykristallinem Modul

Die ökologische Druck einer Kilowattstunde entspricht 63,2 m².

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]
20228	N 42	electricity, PV, at 3kWp flat roof installation, multi-Si	kWh	0,000012	5246901,094	63,230

Abbildung 40 – Screenshot - PV Anlage (polykristallin)

Die Emission an CO₂ beträgt 169,1 g/kWh.

9. Photovoltaik

			electricity, PV, at 3kWp flat roof installation, multi-Si	Verteilung
	area	m2.a	0,004	0%
	non renewable	m2.a	0,463	1%
	fossil C	m2.a	30,051	48%
	renewable	m2.a	0,008	0%
	air	m2.a	5,364	8%
	water	m2.a	27,313	43%
	soil	m2.a	0,027	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	63,230	

Tabelle 25 – SPI-Report, PVAnlage (polykristallin)

Auswertung der SPI-Kalkulation

Der Fußabdruck der Module besteht in beiden Fällen (mono- und polykristallin) zum Großteil aus den Photovoltaikzellen. Zur Produktion dieser muss wieder viel elektrische Energie eingesetzt werden. desto reiner das Silizium sein soll, je mehr Energie muss man in den Prozess aufwenden. Einen weiteren wesentlichen Anteil am Gesamtfußabdruck hat die verwendete Menge an Aluminiumlegierung.

In der Berechnung der Photovoltaikanlage spiegelt sich der hohe Fußabdruck der Module wider.

10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich

Die in dieser Arbeit evaluierten Energietechnologien wurden im Falle der Strombereitstellung auf m^2/kWh , der Wärmebereitstellung auf m^2/MJ und der Bioethanolherstellung auf m^2/kg bezogen. Durch die Berechnung des SPI ist es möglich die verschiedenen Methoden zur Energiebereitstellung untereinander ökologisch zu vergleichen. Die in diesem Kapitel dargestellten Tabellen und Diagramme dienen als erster Überblick der errechneten Fußabdrücke. Die einzelnen Berechnungen der Technologien werden in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

10.1. Strombereitstellung

Als relative Bezugsgröße wurden für den Strom ein Erdgaskraftwerk und ein Ölkraftwerk zum Vergleich herangezogen. Die Fußabdruckdetails dieser fossilen Vergleichstechnologien sind im Anhang A.1 dargestellt. In Abbildung 41 sind die fossilen und erneuerbaren Energietechnologien zur Strombereitstellung anhand der Fußabdrücke und CO_2 -Emissionen gegenübergestellt. Im Vergleich zu den fossilen Energietechnologien schneiden die erneuerbaren Technologien besser ab. Besonders die Biomasse-ORC-Technologie weist einen um ca. 70% geringeren Fußabdruck als ein Erdgaskraftwerk auf. Im Vergleich der Biomasse-ORC und dem Ölkraftwerk ist der Fußabdruck um ca. 95% niedriger. Einen sehr hohen Fußabdruck weist der Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen auf. Was daran liegt dass die Herstellung von reinem Biogas (mind. 96 vol-% CH_4) viel Strom benötigt. Der Biogaseinsatz in einem Gasmotor zur Strombereitstellung (Biogas Freistadt) weist einen nur minimal höheren ökologischen Druck auf, im Vergleich zur Biomasse-ORC. Diese Berechnung fußt auf einem spezifischen Fallbeispiel der Brauerei in Freistadt in Oberösterreich. Insbesondere der Einsatz der Biogasgülle zur Düngung wirkt sich sehr positiv auf den Fußabdruck aus. Da auf konventionellen Dünger verzichtet wird, welcher energieintensiv erzeugt wird. Diese Darstellung muss somit nicht für jede Biogasanlage gelten.

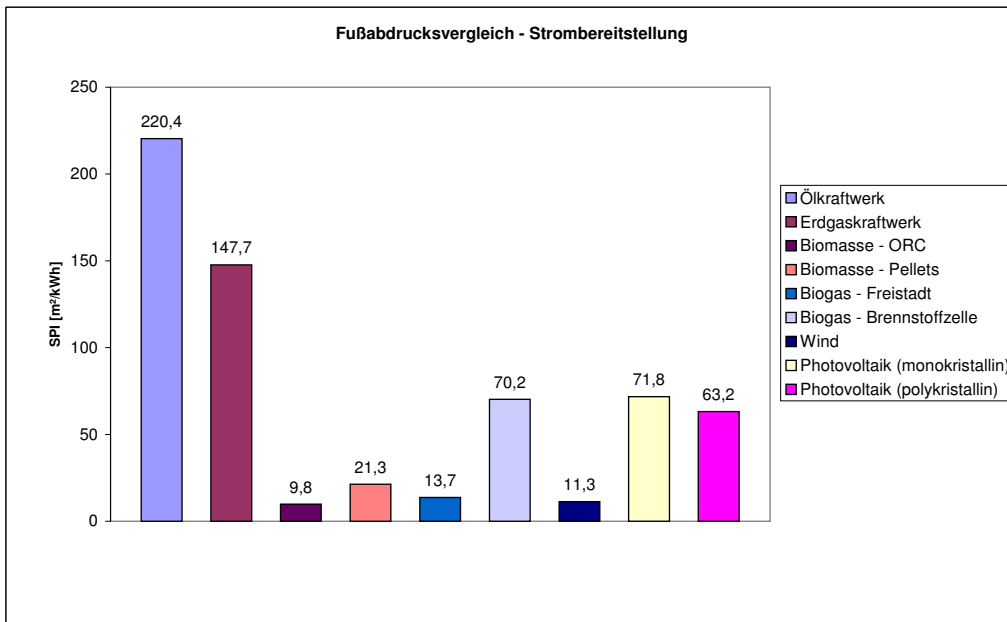
Der Fußabdruck der Holzpellets zur Stromerzeugung ist zwar schlechter als die andere Biomassetechnologie liegt jedoch noch niedriger als jener von Photovoltaik. Strom wird in diesem Beispiel mit einem Stirlingmotor erzeugt.

Die Photovoltaik hat zwar einen geringeren Fußabdruck als die fossilen Technologien, jedoch im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Technologien einen relativ hohen. Die Produktionsphase der Photovoltaikmodule ist derart energieintensiv, dass ein hoher Gesamtfußab-

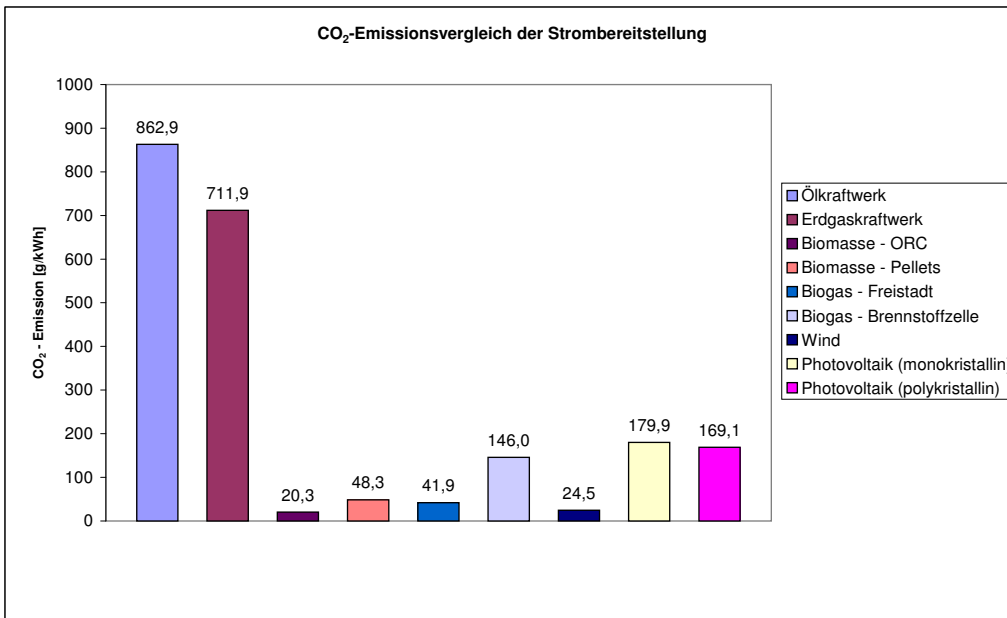
10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich

Vergleich der Strombereitstellung aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern									
	fossil		erneuerbar						
	Ölkraftwerk	Erdgaskraftwerk	Biomasse - ORC	Biomasse - Pellets	Biogas - Freistadt	Biogas - Brennstoffzelle	Wind	Photovoltaik (monokristallin)	Photovoltaik (polykristallin)
SPI [m ² /kWh]	220,4	147,7	9,8	21,3	13,7	70,2	11,3	71,8	63,2
CO ₂ - Emissionen [g/kWh]	862,9	711,9	20,3	48,3	41,9	146,0	24,5	179,9	169,1

(a) Übersicht



(b) SPI



(c) CO₂

Abbildung 41 – SPI - Strombereitstellung

druck die Folge ist.

Die Windenergie schneidet ebenfalls sehr gut ab, was jedoch nicht allgemein gültig sein muss. Die Produktion der Windturbine als einziger Fußabdrucksfaktor ist spezifisch auf dänische Produktions- und Windverhältnisse gerechnet. Somit darf man die Kalkulation der Windenergie nicht als allgemein gültig ansehen.

Wie in Kapitel 2.4 bereits erläutert, wurde bei Prozessen mit Strom und Wärme als Output eine Allokation nach Menge und nach Preis errechnet. Die in den Diagrammen gezeigten Werte stammen aus der Allokation nach Output.

10.1.1. Allokationsvariante - Preis

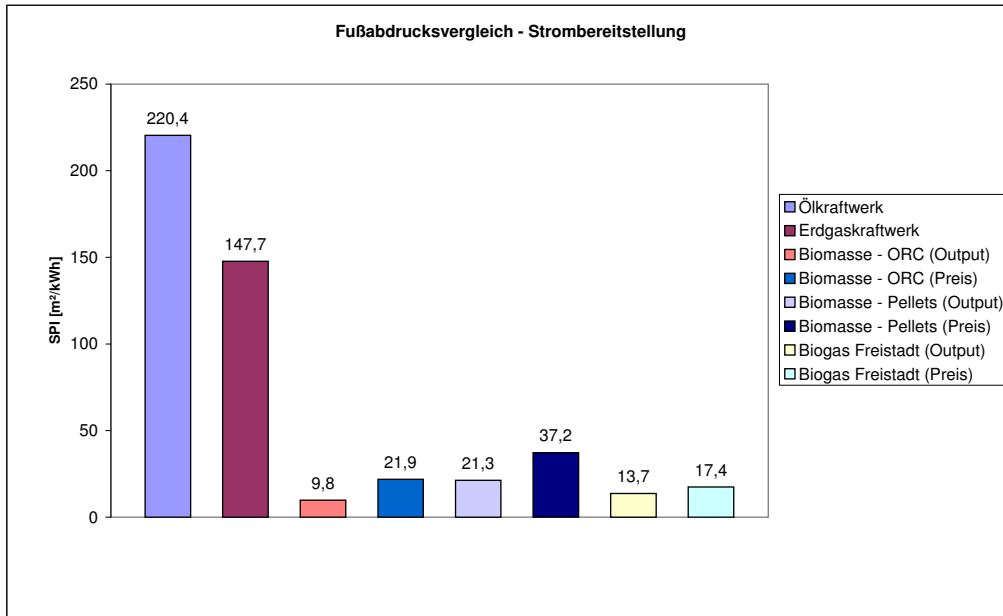
Der in den Kapiteln 4.3.2 und 4.2.2 errechnete Fußabdruck, durch Allokation nach Preis, wird in Abbildung 42 dargestellt. In beiden Fällen der Allokation liegen die ökologischen Fußabdrücke wesentlich unter jenen der fossilen Vertreter. Untereinander betrachtet ist der Unterschied zwischen Output- und Preisallokation im Biomasse-ORC sehr groß. Der Grund für diese Differenz liegt an der Menge an Wärme pro kWh Strom. Als Sekundärprodukt der Biomasse-ORC erhält man pro kWh Strom ca. 86MJ (=24kWh) Wärme. Jedoch hat Strom, ökonomisch gesehen, den 8,5-fachen Wert von Wärme. Deshalb bekommt es in dieser Betrachtung auch einen wesentlich größeren Fußabdruck zugewiesen, als in der Allokation nach Output.

10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich

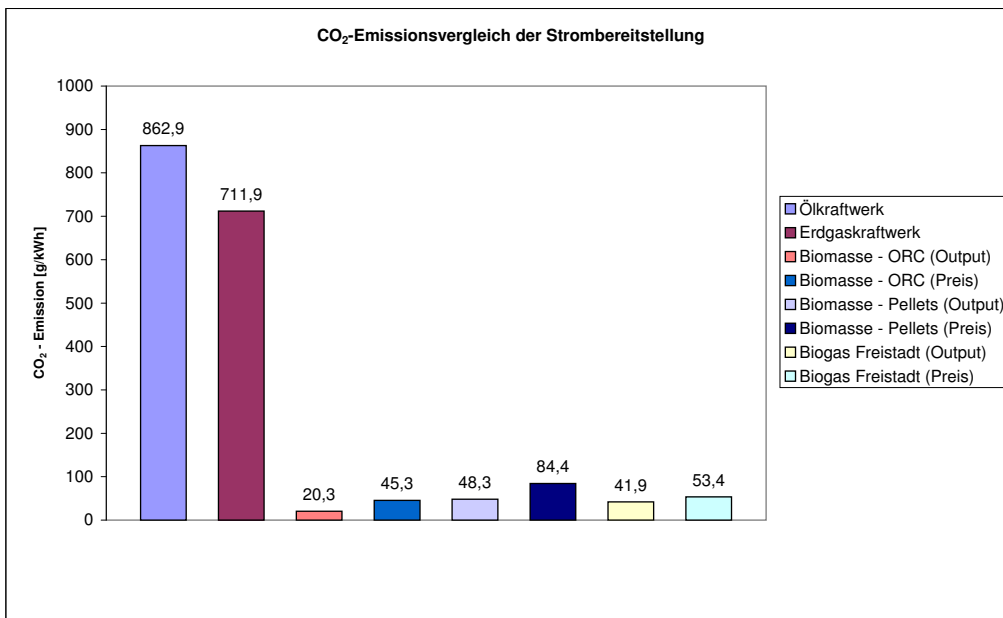
Vergleich der Strombereitstellung aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern

	fossil		erneuerbar					
	Ölkraftwerk	Erdgaskraftwerk	Biomasse - ORC (Output)	Biomasse - ORC (Preis)	Biomasse - Pellets (Output)	Biomasse - Pellets (Preis)	Biogas Freistadt (Output)	Biogas Freistadt (Preis)
SPI [m ² /kWh]	220,4	147,7	9,8	21,9	21,3	37,2	13,7	17,4
CO ₂ - Emissionen [g/kWh]	862,9	711,9	20,3	45,3	48,3	84,4	41,9	53,4

(a) Übersicht



(b) SPI



(c) CO₂

Abbildung 42 – SPI - Strombereitstellung (Preis)

10.2. Wärmebereitstellung

Als relative Bezugsgrößen wurden für den Strom eine Gasheizung und eine Ölheizung zum Vergleich herangezogen. Die Fußabdruckdetails dieser fossilen Vergleichstechnologien sind im Anhang A.2 dargestellt. In Abbildung 43 sind die SPI- und CO₂-Werte dargestellt. In Abbildung 43 sind die fossilen und erneuerbaren Energietechnologien zur Strombereitstellung gegenübergestellt. Der Fußabdruck der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage oder Biogas (Abwärme vom Gasmotor) ist nur um ca. 15% geringer als die Bereitstellung mit fossilen Energietechnologien. Wiederum hat die Biomasse-ORC-Technologie einen ca. 90% geringeren Fußabdruck als die Ölheizung. Die Holzpellets weisen ebenfalls einen wesentlich geringeren Fußabdruck als die Ölheizung auf (ca. 75%).

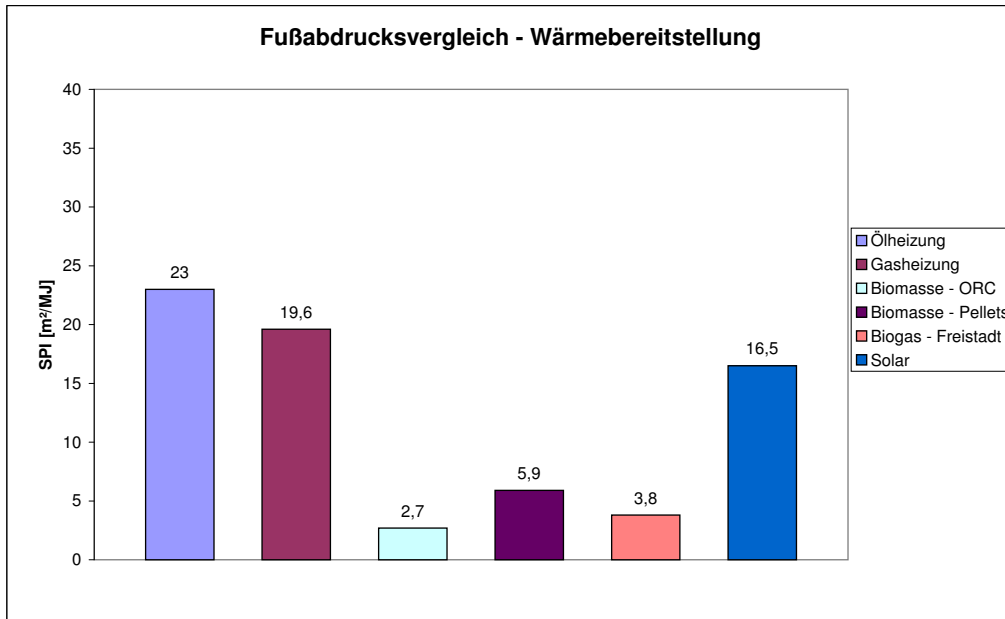
10.2.1. Allokationsvariante - Preis

Der in den Kapiteln 4.3.2 und 4.2.2 errechnete Fußabdruck, durch Allokation nach Preis, wird in Abbildung 44 dargestellt. Im Falle der Wärme ist der Unterschied zwischen Allokation nach Output und Preis gering. Während sich für Strom die Preisallokation negativ auf den Fußabdruck auswirkt, ergibt sich bei der Wärme eine positive Auswirkung auf den Fußabdruck.

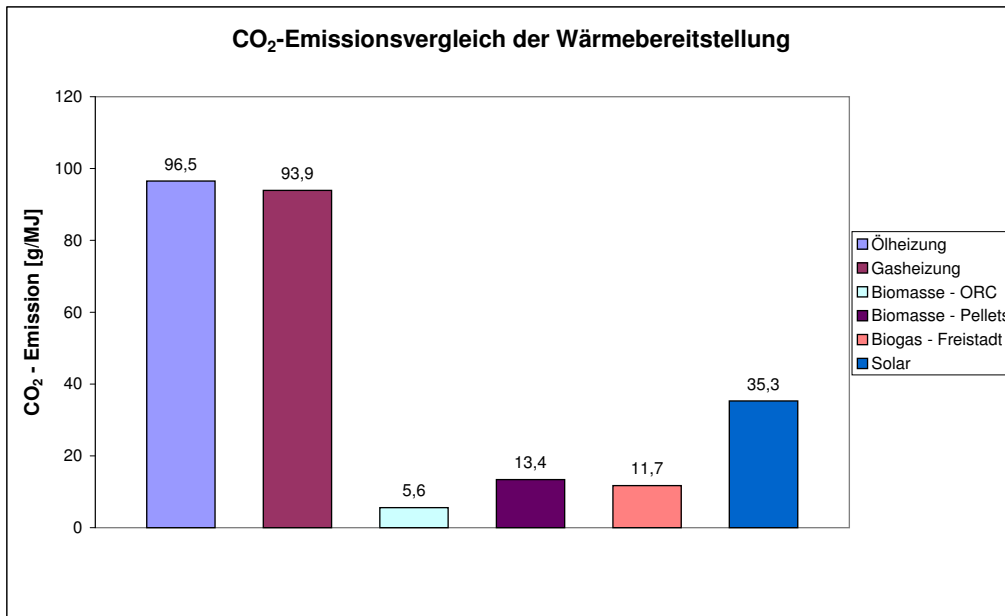
Vergleich der Wärmebereitstellung aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern

	fossil		erneuerbar			
	Ölheizung	Gasheizung	Biomasse - ORC	Biomasse - Pellets	Biogas - Freistadt	Solar
SPI [m ² /MJ]	23	19,6	2,7	5,9	3,8	16,5
CO ₂ - Emissionen [g/MJ]	96,5	93,9	5,6	13,4	11,7	35,3

(a) Übersicht



(b) SPI



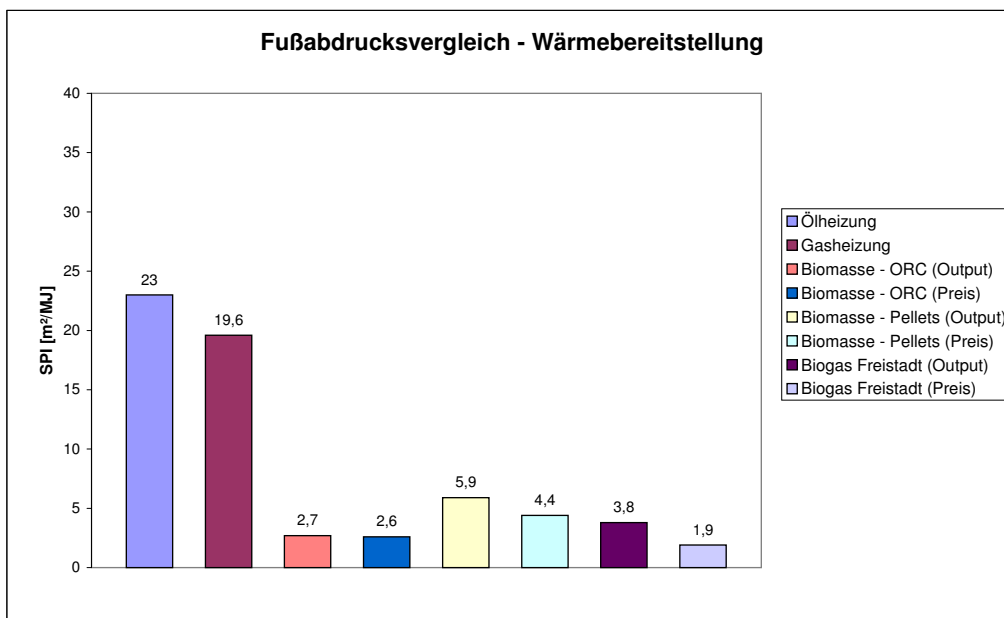
(c) CO₂

Abbildung 43 – SPI - Wärmebereitstellung

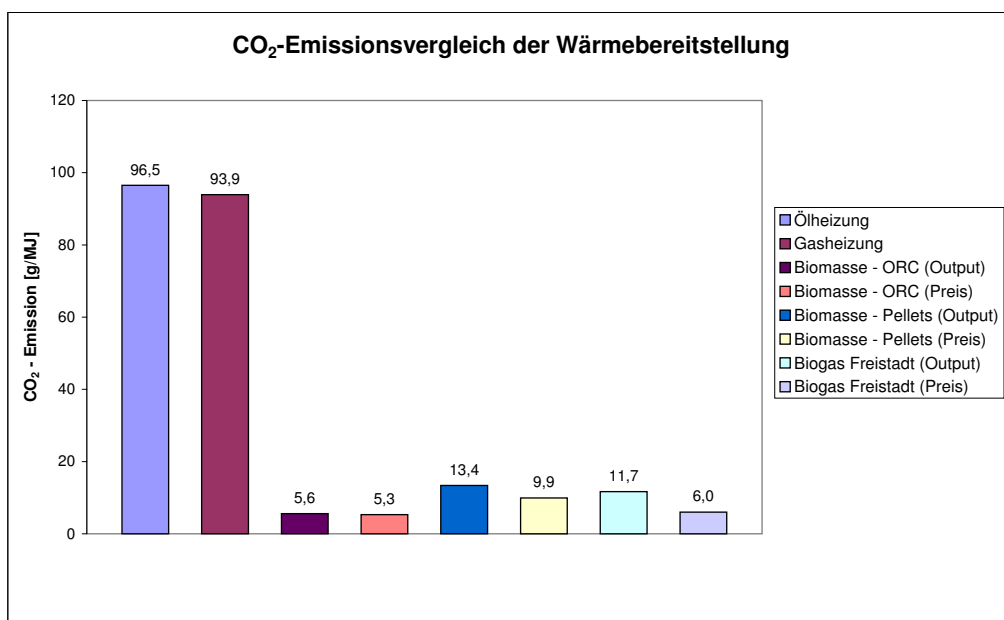
10. Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich

Vergleich der Wärmebereitstellung aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern								
	fossil		erneuerbar					
	Ölheizung	Gasheizung	Biomasse - ORC (Output)	Biomasse - ORC (Preis)	Biomasse - Pellets (Output)	Biomasse - Pellets (Preis)	Biogas Freistadt (Output)	Biogas Freistadt (Preis)
SPI [m ² /MJ]	23	19,6	2,7	2,6	5,9	4,4	3,8	1,9
CO ₂ - Emissionen [g/MJ]	96,5	93,9	5,6	5,3	13,4	9,9	11,7	6,0

(a) Übersicht



(b) SPI



(c) CO₂

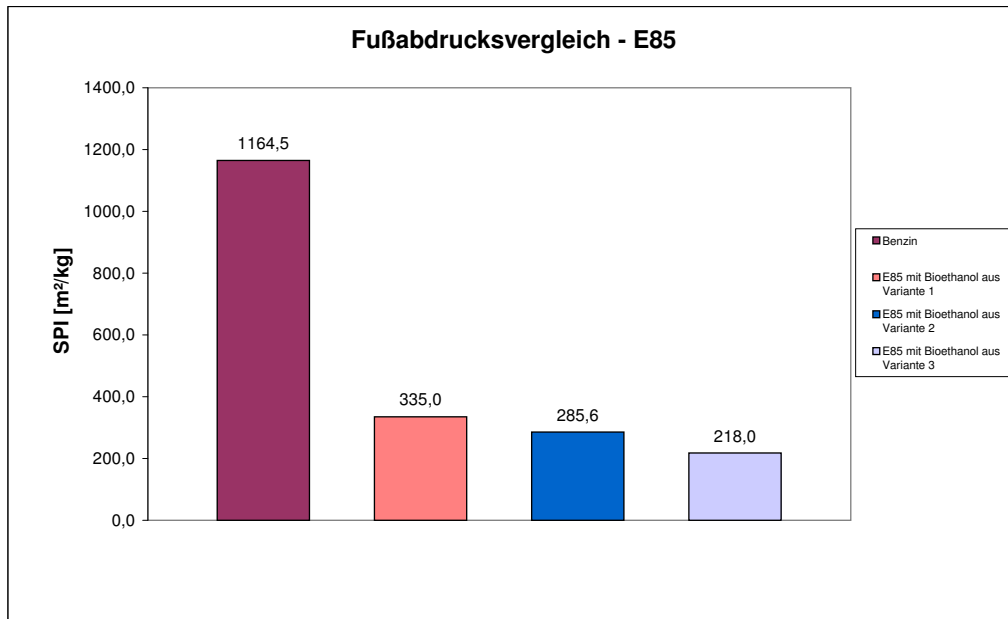
Abbildung 44 – SPI - Wärmebereitstellung (Preis)

10.3. Bioethanol

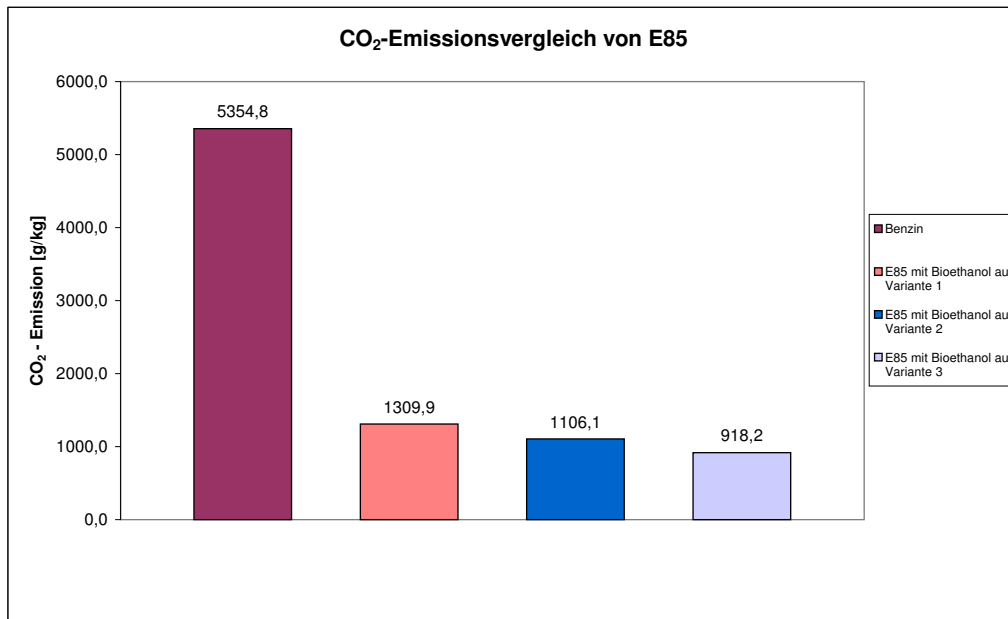
Das in Kapitel 5 evaluierte Bioethanol wurde hier direkt mit fossilem Benzin verglichen. In den Darstellungen des Fußabdrucks und der CO₂-Emissionen (Abbildung 45 ist das mengenmäßige Verhältnis aus Bioethanol und fossilem Benzin jeweils berücksichtigt, da der E85 immer einen Anteil an fossilem Benzin enthält. Die 3 Varianten der Bioethanolherstellung beziehen sich allesamt auf Mais als Ausgangsprodukt. Sie unterscheiden sich durch die Quelle der Rohdaten zur Berechnung und der verwendeten Energiequelle zur Herstellung. Die Verwendung von Bioethanol ergibt eine große Fußabdrucksreduktion dar. Die Variante 3 ist bezüglich der Energiebereitstellung bereits optimiert.

Vergleich der Herstellung von Bioethanol				
	fossil	Mais		
	Benzin	E85 mit Bioethanol aus Variante 1	E85 mit Bioethanol aus Variante 2	E85 mit Bioethanol aus Variante 3
SPI [m ² /kg]	1164,5	335,0	285,6	218,0
CO ₂ - Emissionen [g/kg]	5354,8	1309,9	1106,1	918,2

(a) Übersicht



(b) SPI



(c) CO₂

Abbildung 45 – SPI - E85

Literatur

- Bauer, Christian. 2007. Holzenergie, ecoinvent report No. 6-IX. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.
- BMVIT. 2007. Abschätzung der Machbarkeit von ökologischen und ökonomischen Bioethanol-Kleinanlagen. *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)*.
- EcolInvent. 2001. ecolInvent Database 2.01. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.
- Eder, Gottfried. 2007. *Perspektiven des Einsatzes landwirtschaftlicher Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Pelletsbrennstoffen*. Ph.D. thesis, Johannes-Kepler-Universität Linz.
- Gutschi, Bachhiesl. 2007. Vorlesungsskript Innovative Energietechnologien und Energieeffizienz WS07/08. *Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz*.
- Jungbluth, Niels. 2007a. Life Cycle Inventories of Bioenergy. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, 177–273.
- Jungbluth, Niels. 2007b. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.
- Krauter, Stefan. 2006. *Solar Electric Power Generation*. Springer.
- Krotschek, Christian. 1995. *Prozessbewertung in der nachhaltigen Wirtschaft*. Ph.D. thesis, Technische Universität Graz.
- Lange, Jean-Paul. 2007. Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics.
- Lebensministerium. 2006. Einspeiseverordnung 2006. *BGBl. II Nr. 401/2006*.
- LK-NRW. 2008. Silomais-Streifenversuch. *Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen*.
- Nalukowe, Liu, Damien Lukawski. 2006. Life cycle assessment of a wind turbine. *Royal Institute of Technology Stockholm*.
- Narodoslawsky, Michael. 2008. Ökologische Bewertung von Bioethanol-Prozessen für Desmet Ballestra. *Institut für Prozesstechnik, TU Graz*.

- Obernberger, Gaia. 2005. Biomasse - Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses - Stand der Technik und Möglichkeiten der Prozessoptimierung. *BIOS Bioenergiesysteme Graz*.
- Pimentel, David. 2008. *Biofuels, solar and Wind as Renewable Energy Systems*. Springer.
- Salchenegger, Stefan. 2005. Biogas im Verkehrssektor. *Österreichisches Umweltbundesamt*.
- Schwab, Markus. 2009. Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. *Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft*.
- Vestas. 2003. Vestas Environmental Statement 2003. *Vestas Corporation*.
- Vestas. 2004a. Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0MW turbines. *Vestas Corporation*.
- Vestas. 2004b. Vestas Environmental Statement 2004. *Vestas Corporation*.
- Weiland, Peter. 2006. Stand der Technik von Biogasanlagen und aktueller Forschungsbedarf. *Institut für Technologie und biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig*.
- Wyman, Charles. 1996. *Handbook on Bioethanol: Production and Utiliation*. Taylor&Francis.

Abbildungsverzeichnis

1.	SPI - Beispiel	2
2.	SPI Screenshot	4
3.	CO ₂ - Berechnungsbeispiel	6
4.	Cellulose	9
5.	T,s-Diagramm (Clausius Rankine)	10
6.	T,s-Diagramm - ORC	11
7.	ORC - Prozess	12
8.	Screenshot, ORC (Output)	13
9.	Screenshot - ORC (Preis)	15
10.	Heizwertzusammenhang - Pellets	18
11.	Screenshot - Holzpellets	18
12.	Die 4 Takte des Stirlingmotors und T,s-Diagramm	20
13.	Screenshot - Holzpellets KWK (Output)	20
14.	Screenshot, Holzpellets KWK (Preis)	21
15.	Bioethanolproduktion, Trockenmahlprozess	23
16.	Screenshot, BioEtOH Mais ecoInvent	24
17.	Biogasausbeuten	27
18.	Biogaszusammensetzung	27
19.	CO ₂ -Abtrennung, Biogas(Absorption)	28
20.	CO ₂ -Abtrennung, Biogas(Adsorption)	29
21.	Screenshot, Biogasanlage Freistadt	30
22.	Screenshot, Biogasanlage - Freistadt (Output)	31
23.	Screenshot, Biogasanlage - Freistadt (Preis)	32
24.	Screenshot, Biogas (gereinigt)	33
25.	Prinzip der Brennstoffzelle	34
26.	Funktion der Brennstoffzelle	34
27.	Screenshot, Brennstoffzelle	35
28.	SPI, Biogas aus verschiedenen Substraten	36
29.	Windturbine	39
30.	Screenshot, Windturbine	41
31.	Screenshot, Windturbine (EU25)	42

32.	Flachkollektor	43
33.	Screenshot, Solarmodul	44
34.	Screenshot, Solaranlage	45
35.	Schema - Photovoltaik	46
36.	Sonneneinstahlung - Mitteleuropa	48
37.	Screenshot, PVModul (monokristallin)	49
38.	Screenshot, PVModul (polykristallin)	50
39.	Screenshot, PVAnlage (monokristallin)	51
40.	Screenshot - PV Anlage (polykristallin)	51
41.	SPI - Strombereitstellung	54
42.	SPI - Strombereitstellung (Preis)	56
43.	SPI - Wärmebereitstellung	58
44.	SPI - Wärmebereitstellung (Preis)	59
45.	SPI - E85	61
46.	Screenshot, Ölkraftwerk	68
47.	Screenshot, Erdgasheizung	69
48.	Screenshot, Ölheizung	70
49.	Screenshot, Gasheizung	71
50.	Holzchips - Fußabdruckszuteilung(EU25)	72
51.	Holzchips - Fußabdruckszuteilung(AT)	72
52.	ORC - Prozesse 1	73
53.	Screenshot - Holzabfälle	75
54.	Prozesschart - Pellets (KWK)	75
55.	Prozesschart - Bioethanol - Mais (ecoInvent)	76
56.	SPI-Report, Benzin (fossil)	77
57.	Maissilage - Fußabdruckszuteilung	78
58.	Grassilage - Fußabdruckszuteilung	78
59.	Prozesschart - Biogas(gereinigt)	79
60.	Prozesschart - Brennstoffzelle	80
61.	Prozesschart - Wind	81
62.	Prozesschart - Solarmodul	82
63.	Prozesschart - Solaranlage	83
64.	PV (monokristallin) - Prozesschar	84

65.	PV (monokristallin) - Prozess 1	85
66.	Prozesschart - PV Prozesse 3	86
67.	Prozesschart - PV Prozesse 3	87
68.	Prozesschart - PV(polykristallin)	88
69.	PV (polykristallin) - Prozess 1	89
70.	PV (polykristallin) - Prozesse 3	90
71.	PV (polykristallin) - Prozesse 3	91
72.	Prozesschart - PV Anlage(monokristallin)	92
73.	Prozesschart - PV Anlage(polykristallin)	93

Tabellenverzeichnis

1.	SPI Chain Report	5
2.	ORC-Anlage	13
3.	SPI-Report, ORC (Output)	14
4.	SPI-Report, ORC (Preis)	15
5.	SPI-Report, Holzpellets	19
6.	SPI-Report, Holzpellets KWK (Output)	21
7.	SPI-Report, Holzpellets KWK (Preis)	22
8.	SPI-Report, BioEtOH Mais ecolInvent	24
9.	Vergleich E85/Benzin	25
10.	Biogaszusammensetzung	26
11.	Biogasanlage Freistadt, Daten	29
12.	SPI-Report, Biogasanlage Freistadt	30
13.	SPI-Report, Biogasanlage - Freistadt (Output)	31
14.	SPI-Report, Biogasanlage - Freistadt (Preis)	32
15.	SPI-Report, Biogas (gereinigt)	33
16.	SPI-Report, Brennstoffzelle	35
17.	Materialeinsatz - Windturbine	40
18.	SPI-Report, Windturbine	41
19.	SPI-Report, Windturbine (EU25)	42
20.	SPI-Report, Solarmodul	44
21.	SPI-Report, Solaranlage	45
22.	SPI-Report, PVModul (monokristallin)	49
23.	SPI-Report, PVModul (polykristallin)	50
24.	SPI-Report, PVAnlage (monokristallin)	51
25.	SPI-Report, PVAnlage (polykristallin)	52
26.	Prozesschart - Pellets (Rohstoff)	74

A. Anhang

Folgende Tabellen stellen die neu erstellten Prozesse in der SPI Datenbank dar. Es wurden aus den ecoInvent-Datensätzen nicht alle Daten verwendet. Vernachlässigt wurden sehr geringe Inputs. Weiters sind die Detailfußabdrücke von Rohstoffen oder Energie zu den einzelnen Kapiteln dargestellt wie Holz, Benzin, Strommix,...

A.1. Vergleichsenergiesysteme - Strom

Um die evaluierten Energietechnologien vergleichen zu können, sind hier die Fußabdruckdetails eines Erdgaskraftwerks und eines Ölkraftwerks dargestellt.

A.1.1. Ölkraftwerk

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	Y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]
20074	1 N 40	Net electricity oil fired power stations EU25 DP	kWh	1,059	208,114	220,372

			Net electricity oil fired power stations EU25	Verteilung
	area	m2.a	0,027	0%
	non renewable	m2.a	0,025	0%
	fossil C	m2.a	153,303	70%
	renewable	m2.a	0,294	0%
	air	m2.a	40,768	18%
	water	m2.a	25,845	12%
	soil	m2.a	0,109	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	220,372	

Abbildung 46 – Screenshot, Ölkraftwerk

Der ökologische Fußabdruck eines Ölkraftwerks beträgt 220,4 m²/kWh. Dabei entstehen 862,9 g/kWh an CO₂-Emissionen.

A.1.2. Erdgaskraftwerk

Der ökologische Fußabdruck eines Erdgaskraftwerks beträgt 147,7 m²/kWh. Dabei entstehen 711,9 g/kWh an CO₂-Emissionen.

Workbook 2.00 (2) Updated: LEPPE_v1
 03 Current: Electricity DP more >>

output	Process Name:	Net electricity gas fired power stations EU25	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20123	1 N 40	Net electricity gas fired power stations EU25 DP	kWh	147,650	1,00	1,476E+02	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/g]	a_{part} [m ² .a/unit]
20122	N 40	Gross electricity gas fired power stations DP	kWh	1,055	140,006	147,650 100,00%

			Gross electricity gas fired power stations DP	Verteilung
	area	m2.a	0,005	0%
	non renewable	m2.a	0,000	0%
	fossil C	m2.a	126,489	86%
	renewable	m2.a	0,005	0%
	air	m2.a	13,677	9%
	water	m2.a	7,464	5%
	soil	m2.a	0,009	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end p	147,650	

Abbildung 47 – Screenshot, Erdgasheizung

A.2. Vergleichensenergiesysteme - Wärme

Um die evaluierten Energietechnologien vergleichen zu können, sind hier die Fußabdruckdetails einer Ölheizung und einer Gasheizung dargestellt.

A.2.1. Ölheizung

Workbook 2.00 / 2		Updated: LEPPE v1		Current: LEPPE v1		more >>	
output	Process Name:	Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
10037	1 N 40	Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP	MJ	23,022	1,00	2,302E+01	0,000E+00
ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
1	area	Area	m2a	0,003	1,000	0,003	0,01%
322	non renewable	Area for non renewable resources	m2a	0,003	1,000	0,003	0,01%
290	fossil C	Area for fossile carbon	m2a	17,150	1,000	17,150	74,50%
290	renewable	Area for renewable resources	m2a	0,001	1,000	0,001	0,00%
291	air	Area for emissions in air	m2a	1,430	1,000	1,430	6,21%
292	water	Area for emissions in water	m2a	4,427	1,000	4,427	19,23%
293	soil	Area for emissions in soil	m2a	0,007	1,000	0,007	0,03%

			Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP	Verteilung
	area	m2.a	0,003	0%
	non renewable	m2.a	0,003	0%
	fossil C	m2.a	17,150	74%
	renewable	m2.a	0,001	0%
	air	m2.a	1,430	6%
	water	m2.a	4,427	19%
	soil	m2.a	0,007	0%
	NACE	m2.a	0,000	0%
	A part	m2.a/unit end product	23,022	

Abbildung 48 – Screenshot, Ölheizung

Der ökologische Fußabdruck einer Ölheizung beträgt 23,0 m²/MJ. Dabei entstehen 96,5 g/MJ an CO₂-Emissionen.

A.2.2. Gasheizung

Der ökologische Fußabdruck einer Ölheizung beträgt 19,6 m²/MJ. Dabei entstehen 93,9 g/MJ an CO₂-Emissionen.

Workbook 2.00 [2]		Updated: LEPPE v1		Current: LEPPE v1		more >>	
output	Process Name:	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
10040	1 N 40	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP	MJ	19,584	1,00	1,958E+01	0,000E+00

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/g]	a_{part} [m ² .a/unit]	
1	area	Area	m2a	0,001	1,000	0,001	0,00%
322	non renewable	Area for non renewable reources	m2a	0,000	1,000	0,000	0,00%
320	fossil C	Area for fossile carbon	m2a	16,698	1,000	16,698	85,28%
290	renewable	Area for renewable resources	m2a	0,000	1,000	0,000	0,00%
291	air	Area for emissions in air	m2a	0,830	1,000	0,830	4,24%
292	water	Area for emissions in water	m2a	2,054	1,000	2,054	10,49%
293	soil	Area for emissions in soil	m2a	0,002	1,000	0,002	0,01%

		Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP	Verteilung
area	m2.a	0,001	0%
non renewable	m2.a	0,000	0%
fossil C	m2.a	16,698	85%
renewable	m2.a	0,000	0%
air	m2.a	0,830	4%
water	m2.a	2,054	10%
soil	m2.a	0,002	0%
NACE	m2.a	0,000	0%
A part	m2.a/unit end product	19,584	

Abbildung 49 – Screenshot, Gasheizung

A.3. Strom und Wärme aus thermischer Biomassenutzung

A.3.1. ORC

Als Energieträger für die ORC-Anlage wurden für die Berechnung Holzchips von der Sägemühle verwendet. Der Fußabdruck beinhaltet das eingesetzte Holz, Energie für die Verarbeitung, Transport und die Infrastruktur.

In Abbildung 52 sind die aus ecoInvent verwendeten Datensätze dokumentiert.

Wood chips Sawmill ex store DP

	m2.a	%
Direct Process Pressure	1,000	3,354
Transport	0,000	0,000
Energy provision	0,002	0,005
Electricity provision	27,910	93,600
Water provision	0,000	0,000
Resource provision renewable	0,900	3,019
Resource provision nonrenewable	0,005	0,017
Resource provision fossil	0,001	0,004
Resource provision misc	0,000	0,000
Waste processing	0,000	0,000

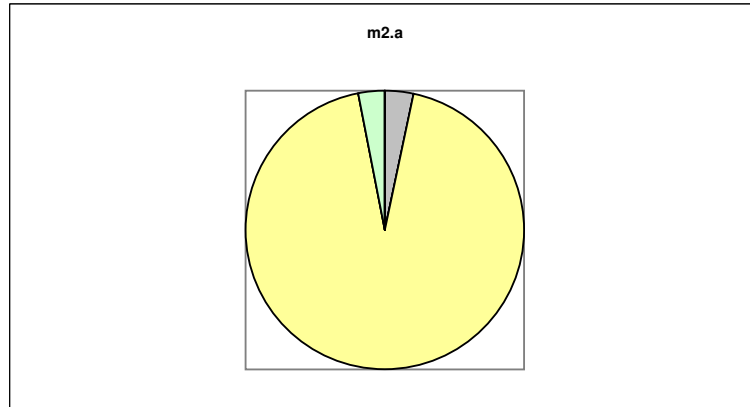


Abbildung 50 – Holzchips - Fußabdruckszuteilung(EU25)

Wood chips Sawmill ex store DP

	m2.a	%
Direct Process Pressure	1,000	7,850
Transport	0,000	0,001
Energy provision	0,002	0,012
Electricity provision	10,830	85,020
Water provision	0,000	0,000
Resource provision renewable	0,900	7,067
Resource provision nonrenewable	0,005	0,039
Resource provision fossil	0,001	0,010
Resource provision misc	0,000	0,000
Waste processing	0,000	0,000

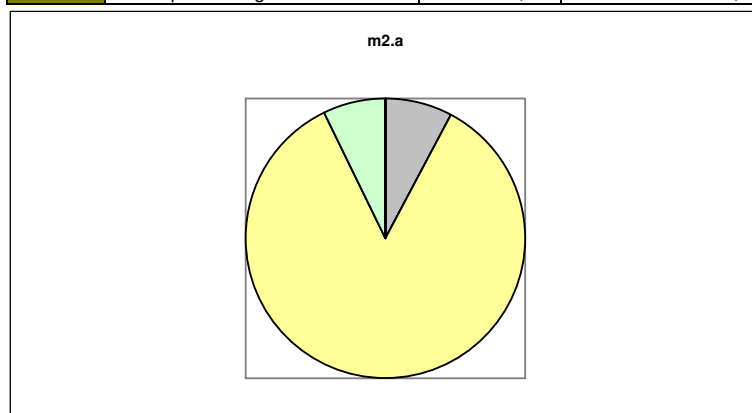
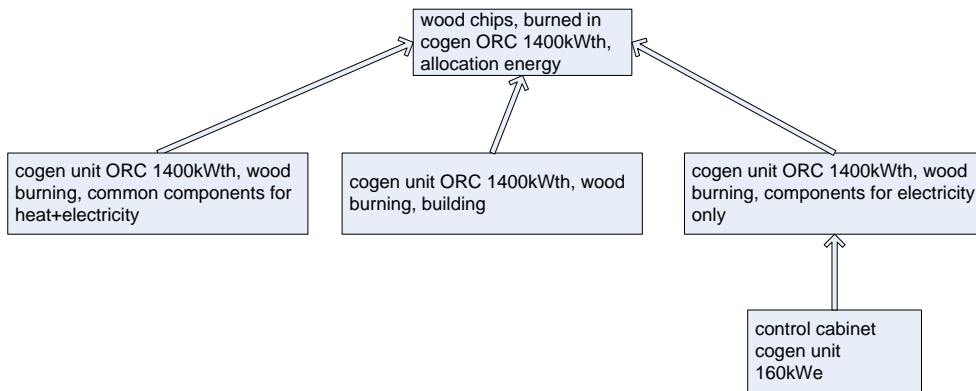


Abbildung 51 – Holzchips - Fußabdruckszuteilung(AT)

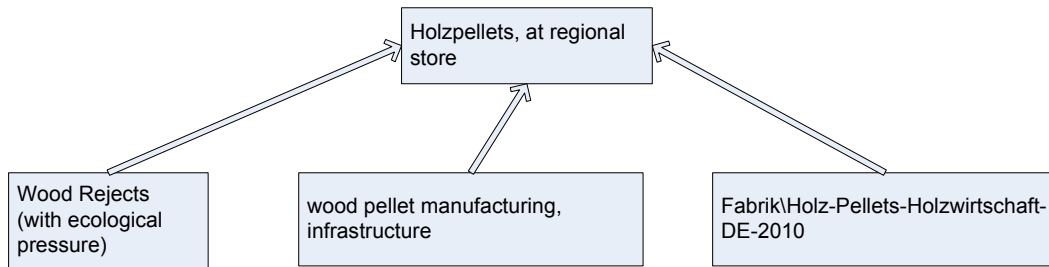


ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
wood chips, burned in cogen ORC 1400kWth, allocation energy	Lubricant oil SP	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, common components for heat+electricity	Net electricity EU25 SP
	Organic chemicals SP		Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP
	Ammonia SP		Aluminium 0% Recycling SP
	Chlorine (by-product) SP		Chromium SP
	Sodium chloride SP		Copper SP
	Wood chips Sawmill ex store DP		Steel low alloyed SP
	Transport 28t Truck SP		Organic chemicals SP
	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, common components for heat+electricity		Concrete SP
	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, building		Polyethylene HD SP
	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, components for electricity only		Mineral wool SP
cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, building	Concrete SP	cogen unit ORC 1400kWth, wood burning, components for electricity only	Transport 28t Truck SP
	Excavation Hydraulic excavator SP		Transport Railway SP
	Gravel SP		Transport 28t Truck SP
	Steel low alloyed SP		Transport Railway SP
	Mineral wool SP		generator 200kWe
	Transport 28t Truck SP		control cabinet cogen unit 160kWe
control cabinet cogen unit 160kWe	Transport Railway SP	control cabinet cogen unit 160kWe	Aluminium 0% Recycling SP
			Lead 0% Recycling SP
			Copper SP
			Nickel SP
			Platinum SP
			Steel low alloyed SP
			Tin
			Zinc SP
			Polyethylene LD SP
			Polyvinylechloride
			Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP
			Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP
			Net electricity EU25 SP
			Transport 16t Truck SP
			Transport Railway SP

Abbildung 52 – ORC - Prozesse 1

A.3.2. Holzpellets

Für die Kalkulation des Rohstoffs Holzpellets wurde die Infrastruktur und der Transport von der ecoinvent-Datenbank verwendet. Die Menge an Holz und Energieeinsatz stammen aus der PROBAS-Datenbank. Als Presshilfsmittel wurden 2% Mais eingesetzt (bezogen auf die Masse von Holz).



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
wood pellet manufacturing, infrastructure	Concrete SP
	Steel low alloyed SP
	Transport Railway SP
	Transport 16t Truck SP
	Area

ProBas Datensatz	SPI Datensatz
Fabrik\Holz-Pellets-Holzwirtschaft-DE-2010	Wood Rejects (with ecological pressure)
	Net electricity EU25 SP

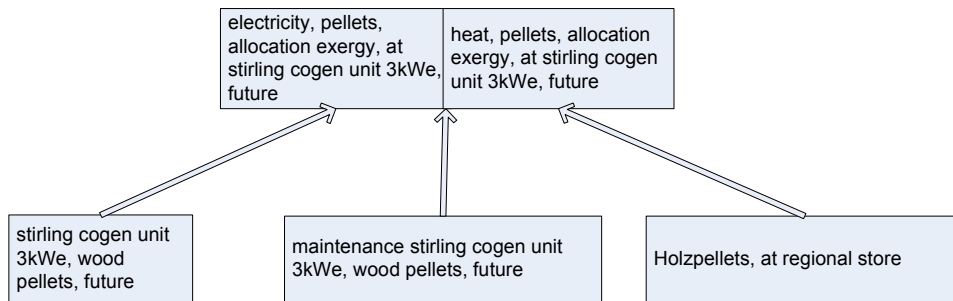
SPI Datensatz (neu)	SPI Datensatz (alt)
Wood Rejects (with ecological pressure)	Area II-IV
	Rubber (Ethylene-Propylene) SP
	Engine output construction machinery SP
	Use of Motor saw SP
	Transport 28t Truck SP
	Transport Railway SP
	Wood
	Infrastructure Lumber ex wood FP

Tabelle 26 – Prozesschart - Pellets(Rohstoff)

Workbook 2.00 (2)		Updated: LEPPE_v1		Current: LEPPE_v1		more >>	
output	Process Name:	Wood Rejects (with ecological pressure)	Unit	$a_{tot} = \sum a$ [m ² .a/unit]	K [-]	$a_{partproc}$ [m ² .a/unit]	Value [\$/unit]
20170	1 N 90	Wood Rejects (with ecological pressure)	kg	1,601	1,00	1,601E+00	
						0,000E+00	

ID	Type	Intermediates / Impact	Unit	Inventory	y_{spec} [m ² .a/q]	a_{part} [m ² .a/unit]	
3	area	Area II-IV	m2a	0,00260	1,000	0,003	0,16%
10170	N 24	Rubber (Ethylene-Propylene) SP	g	0,00334	3,565	0,012	0,74%
10052	N 40	Engine output construction machinery SP	MJ	0,03780	26,966	1,019	59,59%
10164	N 02	Use of Motor saw SP	h	0,00017	1921,938	0,322	20,10%
10048	N 60	Transport 28t Truck SP	tkm	0,00000	84,945	0,000	0,00%
10046	N 60	Transport Railway SP	tkm	0,00000	39,850	0,000	0,00%
37	renewable	Wood	kg	0,24000	1,000	0,240	14,99%
20169	N 02	Infrastructure Lumber ex wood FP	kg	0,20000	0,025	0,005	0,31%

Abbildung 53 – Screenshot - Holzabfälle



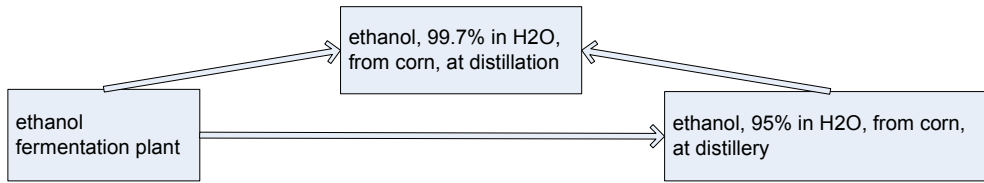
ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	
stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, future	Area	maintenance stirling cogen unit 3kWe, wood pellets, future	Steel low alloyed SP	
	Steel low alloyed SP		Ceramics SP	
	Cast iron SP		Transport automobile SP	
	Copper SP			
	Aluminium 0% Recycling SP			
	Lead 0% Recycling SP			
	Nickel SP			
	Tin			
	Zinc SP			
	Polyethylene HD SP			
	Polyvinylechloride			
	Ceramics SP			
	Mineral wool SP			
	Transport Railway SP			
	Transport 16t Truck SP			
	Transport automobile SP			
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP			
Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP				
Net electricity EU25 SP				
heating, sanitary equipment				

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
Holzpellets, at regional store	Wood Rejects (with ecological pressure)
	Net electricity EU25 SP
	Transport Railway SP
	Transport 16t Truck SP
	wood pellet

Abbildung 54 – Prozesschart - Pellets(KWK)

A.4. Bioethanol

Bioethanol aus Mais - Variante 1



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
ethanol, 99.7% in H2O, from corn, at distillation	ethanol, 95% in H2O, from corn, at distillery
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP
	Net electricity EU25 SP
	ethanol fermentation plant

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
ethanol fermentation plant	Concrete SP
	Area
	Steel low alloyed SP
	Chromium SP
	Zinc SP
	Copper SP
	Nickel SP
	Transport 28t Truck SP
	Transport Railway SP
	Diesel ex regional store SP
Net electricity EU25 SP	

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
ethanol, 95% in H2O, from corn, at distillery	Corn (EtOH, 10000 t/a, V3)
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP
	Net electricity EU25 SP
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP
	ethanol fermentation plant

Abbildung 55 – Prozesschart - Bioethanol - Mais (ecoinvent)

E85 Die Zuweisung des ökologischen Fußabdrucks von fossilem Benzin ist hier dargestellt.

Gasoline ex regional store DP			
		m2.a	%
	Direct Process Pressure	0,678	0,059
	Transport	10,730	0,941
	Energy provision	0,729	0,064
	Electricity provision	21,919	1,922
	Water provision	0,000	0,000
	Resource provision renewable	0,000	0,000
	Resource provision nonrenewable	0,000	0,000
	Resource provision fossil	1106,139	97,013
	Resource provision misc	0,000	0,000
	Waste processing	0,000	0,000

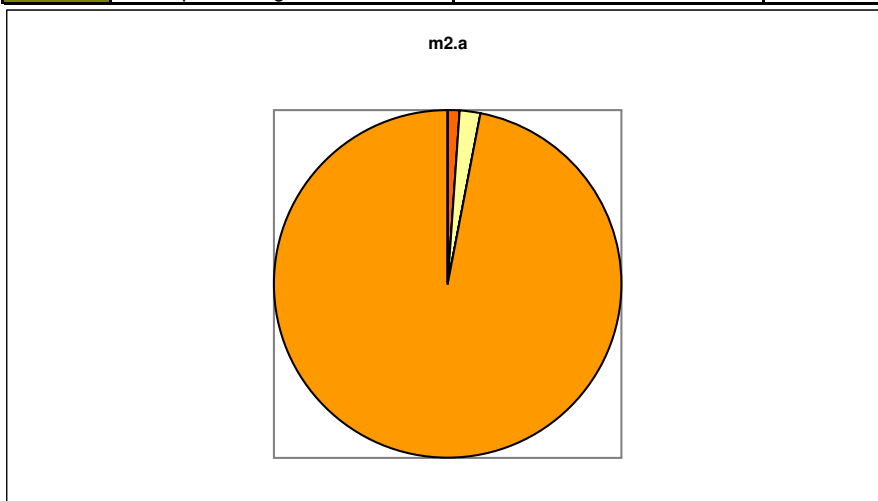


Abbildung 56 – SPI-Report, Benzin (fossil)

A.5. Biogas

A.5.1. Rohbiogas

Die Substrate Grassilage und Maissilage sind hier noch detailliert dargestellt.

		Corn Silage Production (32,5% Dry Matter) DP	
		m2.a	%
	Direct Process Pressure	1,330	1,547
	Transport	0,000	0,000
	Energy provision	0,000	0,000
	Electricity provision	0,000	0,000
	Water provision	0,000	0,000
	Resource provision renewable	84,609	98,453
	Resource provision nonrenewable	0,000	0,000
	Resource provision fossil	0,000	0,000
	Resource provision misc	0,000	0,000
	Waste processing	0,000	0,000

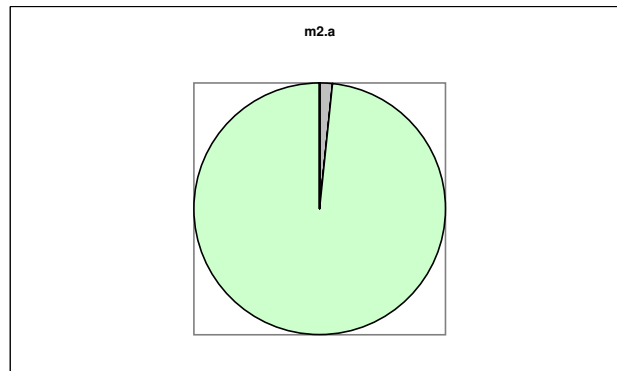


Abbildung 57 – Maissilage - Fußabdruckszuteilung

		Grassland Silage DP	
		m2.a	%
	Direct Process Pressure	0,000	0,000
	Transport	0,000	0,000
	Energy provision	0,000	0,000
	Electricity provision	0,000	0,000
	Water provision	0,000	0,000
	Resource provision renewable	50,499	100,000
	Resource provision nonrenewable	0,000	0,000
	Resource provision fossil	0,000	0,000
	Resource provision misc	0,000	0,000
	Waste processing	0,000	0,000

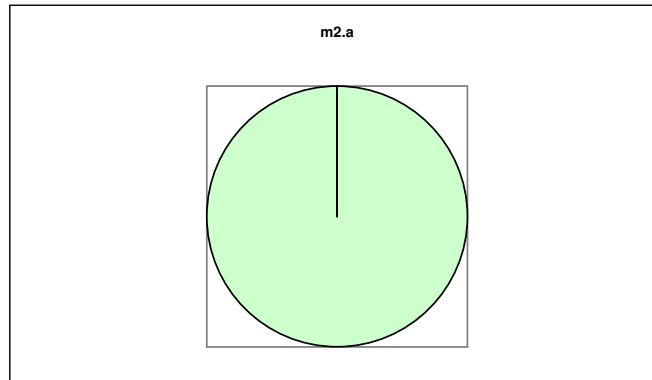
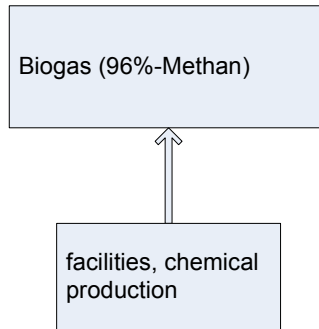


Abbildung 58 – Grassilage - Fußabdruckszuteilung

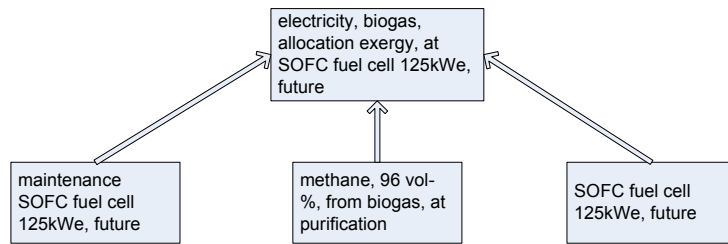
A.5.2. Biogas - Reinigung



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
Biogas (96%-Methan)	Biogas Freistadt
	Net electricity EU25 SP
	facilities, chemical production

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
facilities, chemical production	Steel low alloyed SP
	Chromium SP
	Mineral wool SP
	Net electricity EU25 SP
	Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP
	Transport 16t Truck SP

Abbildung 59 – Prozesschart - Biogas(gereinigt)

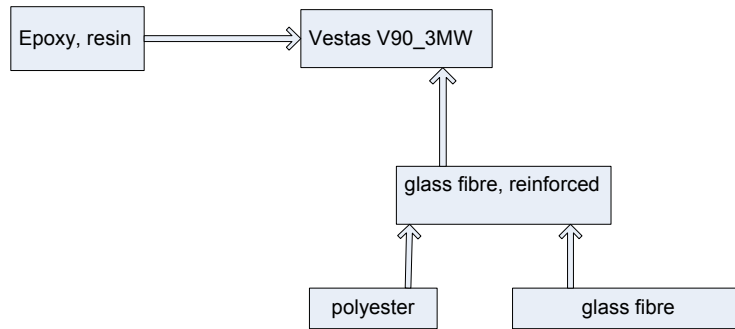


ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
SOFC fuel cell 125kWe, future	Steel unalloyed SP
	Chromium SP
	Iron
	Nickel SP
	Zinc SP
	Aluminium oxide with nickel pigments SP
	inverter, 2500W, at plant
	Transport Railway SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport 28t Truck SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP
Net electricity EU25 SP	

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
maintenance SOFC fuel cell 125kWe, future	Steel unalloyed SP
	Chromium SP
	Zinc SP
	Transport automobile SP

Abbildung 60 – Prozesschart - Brennstoffzelle

A.6. Wind



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
Vestas V90_3MW	Steel unalloyed SP
	Cast iron SP
	Copper SP
	Aluminium 0% Recycling SP
	Net electricity NO SP
	Net electricity EU25 SP
	glass fibre, reinforced
	Epoxy, resin
	Steel unalloyed SP
	Concrete SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre, reinforced	polyester
	glass fibre
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
Epoxy, resin	Crude oil (provision Europe) SP
	Natural gas (energy production) SP
	Hard Coal (energy production) SP
	Lignite
	Sodium chloride SP

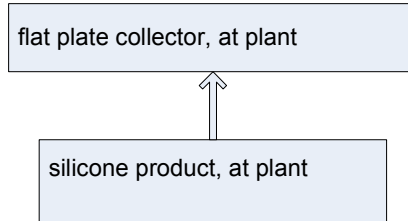
ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
polyester	Propylene glycol SP
	Dimethylene p-phthalate (DMT) SP
	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Aluminium oxide with nickel pigments SP
	Clay SP
	Limestone, CaCO3 SP
	Transport Railway SP
Transport 16t Truck SP	

Abbildung 61 – Prozesschart - Wind

A.7. Thermische Solaranlage

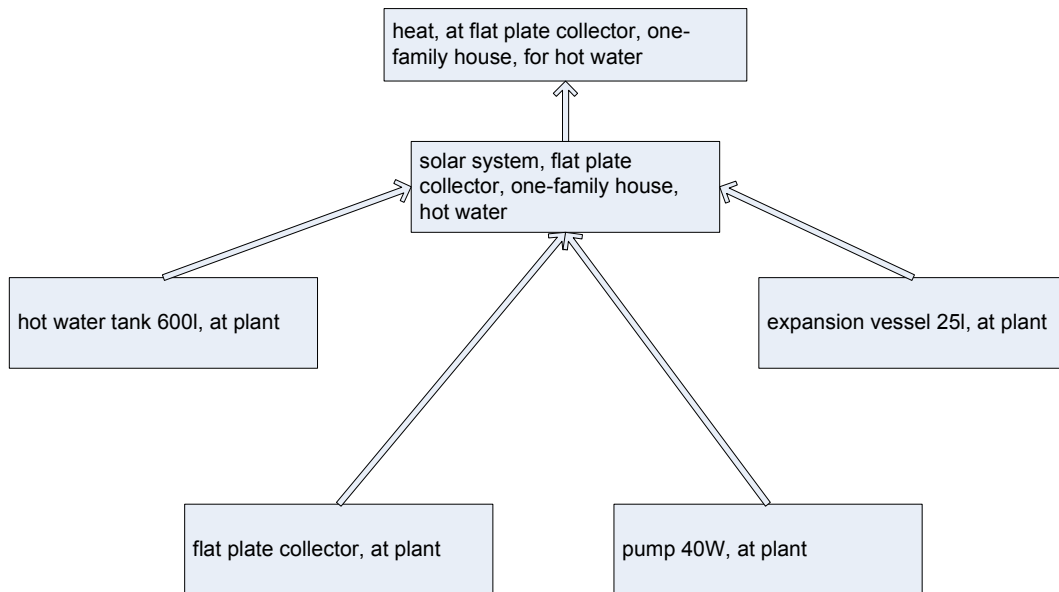
A.7.1. Flachkollektor



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
flat plate collector, at plant	Net electricity EU25 SP	silicone product, at plant	Natural gas High Pressure distributed FP
	Water desalted SP		Net electricity EU25 SP
	Mineral wool SP		Process Energy, heavy fuel oil, industrial heater 1MW SP
	Flat glass uncoated SP		Methylene chloride
	Rubber (Ethylene-Propylene) SP		Methanol
	silicone product, at plant		Copper SP
	Propylene glycol SP		MG-Silicon DP
	Aluminium 0% Recycling SP		Ethylene SP
	Copper SP		Sodium chloride SP
	Chromium SP		Sodium hydroxide SP
	Transport Tankship overseas SP		Polyethylene HD SP
	Transport 28t Truck SP		Transport 16t Truck SP
	Transport 16t Truck SP		Transport Railway SP
Transport Railway SP			

Abbildung 62 – Prozesschart - Solarmodul

A.7.2. Anlage



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
flat plate collector, at plant	Net electricity EU25 SP	silicone product, at plant	Natural gas High Pressure distributed FP
	Water desalted SP		Net electricity EU25 SP
	Mineral wool SP		Process Energy, heavy fuel oil, industrial heater 1MW SP
	Flat glass uncoated SP		Methylene chloride
	Rubber (Ethylene-Propylene) SP		Methanol
	silicone product, at plant		Copper SP
	Propylene glycol SP		MG-Silicon DP
	Aluminium 0% Recycling SP		Ethylene SP
	Copper SP		Sodium chloride SP
	Chromium SP		Sodium hydroxide SP
	Transport Tankship overseas SP		Polyethylene HD SP
	Transport 28t Truck SP		Transport 16t Truck SP
	Transport 16t Truck SP		Transport Railway SP
Transport Railway SP			

Abbildung 63 – Prozesschart - Solaranlage

A.8. Photovoltaik

A.8.1. Module

Monokristallines Modul:

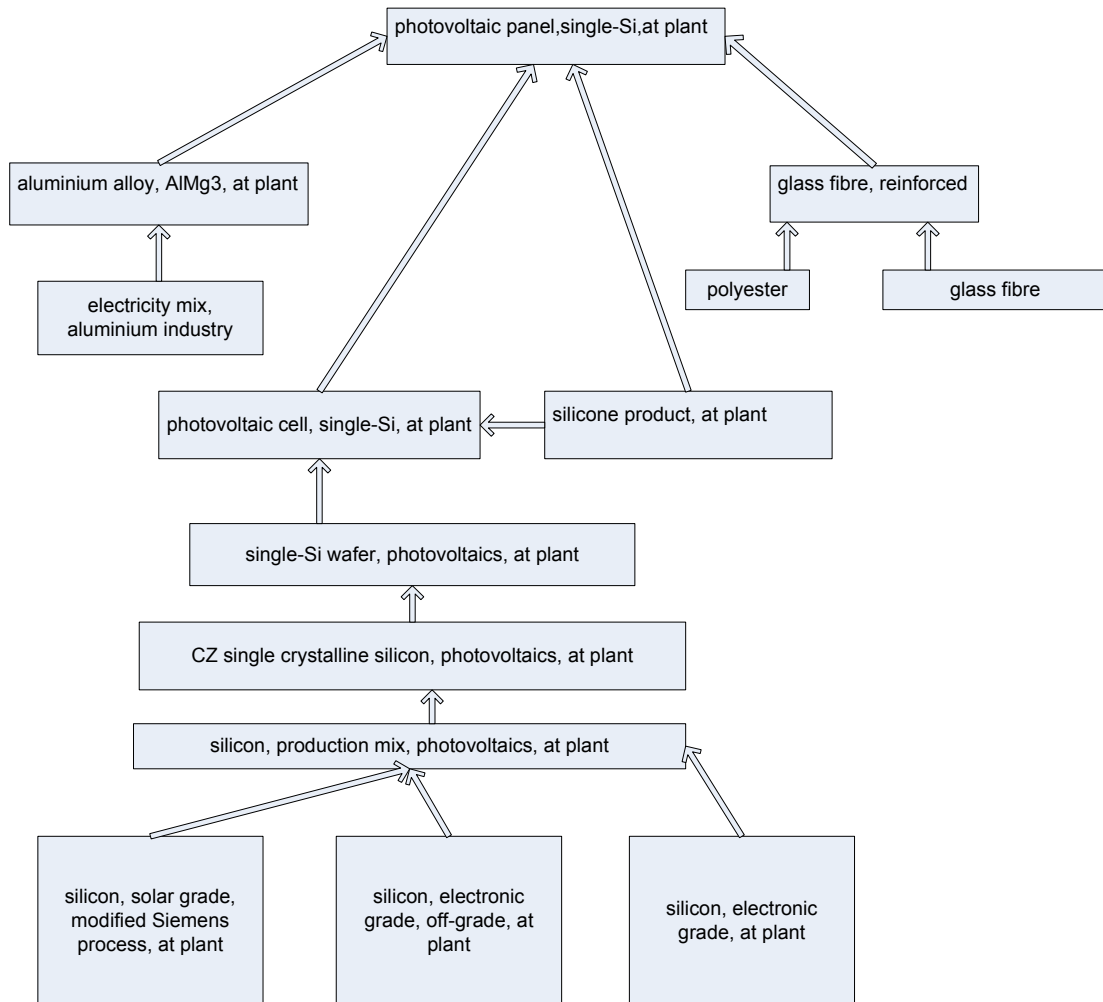


Abbildung 64 – PV (monokristallin) - Prozesschart

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
photovoltaic panel, single-Si, at plant	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Flat glass uncoated SP
	Copper SP
	aluminium alloy, AlMg3, at plant
	Nickel SP
	glass fibre, reinforced
	Ethylene SP
	Acetone
	Methanol
	Lubricant oil SP
	photovoltaic cell, single-Si, at plant
	silicone product, at plant

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre, reinforced	polyester
	glass fibre
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Aluminium oxide with nickel pigments SP
	Clay SP
	Limestone, CaCO3 SP
	Transport Railway SP
	Transport 16t Truck SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
aluminium alloy, AlMg3, at plant	electricity mix, aluminium industry
	Aluminium 0% Recycling SP
	Chromium SP
	Cast iron SP
	Copper SP
	Manganese SP
	MG-Silicon DP
	Zinc SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
electricity mix, aluminium industry	Net electricity hard coal fired power stations EU25 DP
	Net electricity lignite fired power stations EU25 DP
	Net electricity oil fired power stations IT DP
	Net electricity gas fired power stations EU25 DP
	Net electricity nuclear power plants EU25 DP
	Net electricity hydro power plants FR DP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
polyester	Propylene glycol SP
	Dimethylene p-phthalate (DMT) SP
	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP

Abbildung 65 – PV (monokristallin) - Prozess 1

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
silicon, production mix, photovoltaics, at plant	silicon, electronic grade, at plant
	silicon, electronic grade, off-grade, at plant
	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	MG-Silicon DP
	Hydrochloric acid SP
	Hydrogen gas SP
	Sodium hydroxide SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP
	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
silicon, electronic grade, off-grade, at plant	Hydrogen gas SP
	Sodium hydroxide SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Net electricity EU25 SP
	MG-Silicon DP
	Transport 16t Truck SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
silicon, electronic grade, at plant	Hydrogen gas SP
	Sodium hydroxide SP
	Hydrochloric acid SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Net electricity EU25 SP
	MG-Silicon DP
	Transport 16t Truck SP

Abbildung 67 – Prozesschart - PV Prozesse 3

Polykristallines Modul:

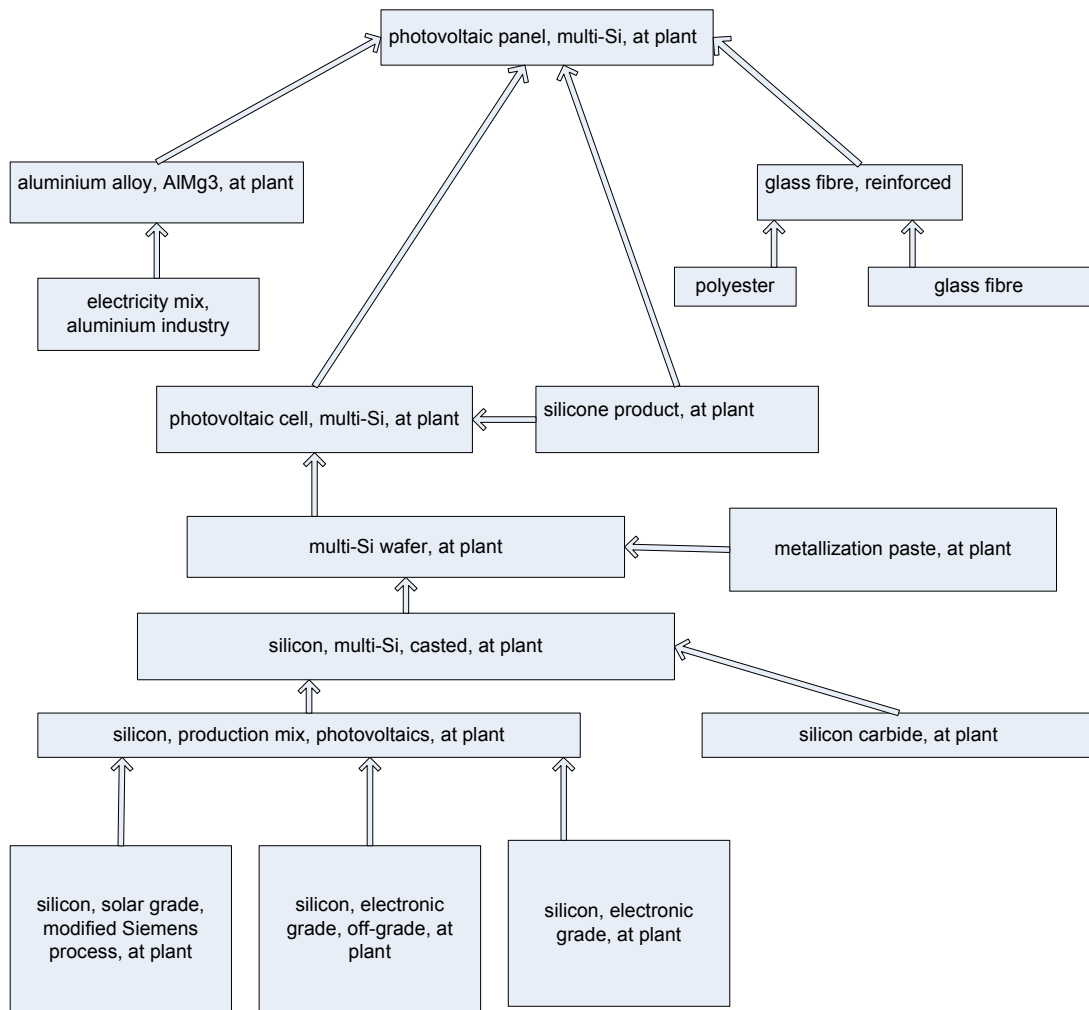


Abbildung 68 – Prozesschart - PV(polykristallin)

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
photovoltaic panel, multi-Si, at plant	Net electricity AT SP
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP
	photovoltaic cell, multi-Si, at plant
	Water
	Flat glass uncoated SP
	Copper SP
	aluminium alloy, AlMg3, at plant
	Nickel SP
	glass fibre, reinforced
	Ethylene SP
	Acetone
	Methanol
	Lubricant oil SP
	silicone product, at plant
	Transport 16t Truck SP
Transport Railway SP	

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
aluminium alloy, AlMg3, at plant	electricity mix, aluminium industry
	Aluminium 0% Recycling SP
	Chromium SP
	Cast iron SP
	Copper SP
	Manganese SP
	MG-Silicon DP
	Zinc SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre, reinforced	polyester
	glass fibre
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	Net electricity AT SP
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP
	Process energy, extra light fuel oil, industrial heater 1MW SP
	multi-Si wafer, at plant
	metallization paste, at plant
	Ammonia SP
	Phosphoric acid SP
	silicone product, at plant
	Sodium silicate Na ₂ SiO ₃ SP
	Hydrochloric acid SP
	Nitric acid SP
	Sodium hydroxide SP
	Argon gas SP
	Oxygen gas SP
	Nitrogen gas SP
	Ethanol
	Polystyrene SP
	Transport Tankship overseas SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP
	Water decarbonized SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
glass fibre	Net electricity EU25 SP
	Natural gas High Pressure distributed FP
	Aluminium oxide with nickel pigments SP
	Clay SP
	Limestone, CaCO ₃ SP
	Transport Railway SP
	Transport 16t Truck SP

Abbildung 69 – PV (polykristallin) - Prozess 1

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	
silicone product, at plant	Natural gas High Pressure distributed FP	multi-Si wafer, at plant	Net electricity AT SP	
	Net electricity EU25 SP		Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP	
	Process Energy, heavy fuel oil, industrial heater 1MW SP		Water decarbonized SP	
	Methylene chloride		silicon, multi-Si, casted, at plant	
	Methanol		silicon carbide, at plant	
	Copper SP		Sodium hydroxide SP	
	MG-Silicon DP		Hydrochloric acid SP	
	Ethylene SP		Hydrocarbons total	
	Sodium chloride SP		Triethylene glycole	
	Sodium hydroxide SP		Mineral wool SP	
	Polyethylene HD SP		Paper SP	
	Transport 16t Truck SP		Polystyrene SP	
	Transport Railway SP		Polyethylene LD SP	
metallization paste, at plant	Silver	silicon carbide, at plant	Brass SP	
	Lead 0% Recycling SP		Steel low alloyed SP	
	Organic chemicals SP		Transport 16t Truck SP	
	Net electricity AT SP		Transport Railway SP	
	Process energy, natural gas, industrial heater >100 kW SP			
	Transport 16t Truck SP			
Transport Railway SP				
silicon, multi-Si, casted, at plant	Net electricity AT SP		silicon, production mix, photovoltaics, at plant	silicon, electronic grade, at plant
	Argon gas SP			silicon, electronic grade, off-grade, at plant
	Nitrogen gas SP			silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant
	Ceramics SP			
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant			
	Transport 16t Truck SP			
	Transport Railway SP			

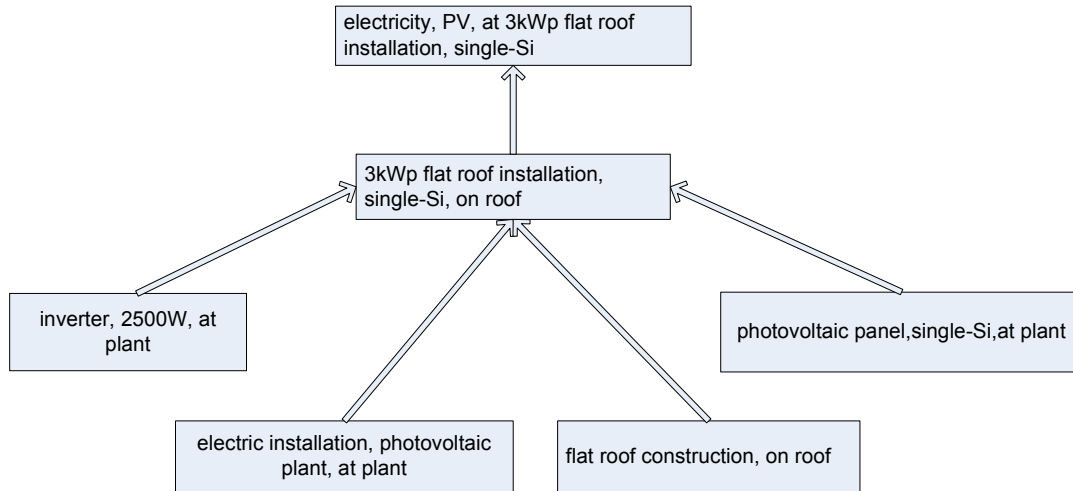
Abbildung 70 – PV (polykristallin) - Prozesse 3

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz	ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
silicon, electronic grade, at plant	Hydrogen gas SP	silicon, electronic grade, off-grade, at plant	Hydrogen gas SP
	Sodium hydroxide SP		Sodium hydroxide SP
	Hydrochloric acid SP		Natural gas High Pressure distributed FP
	Natural gas High Pressure distributed FP		Net electricity EU25 SP
	Net electricity EU25 SP		MG-Silicon DP
	MG-Silicon DP		Transport 16t Truck SP
	Transport 16t Truck SP		
ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz		
silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	MG-Silicon DP		
	Hydrochloric acid SP		
	Hydrogen gas SP		
	Sodium hydroxide SP		
	Transport 16t Truck SP		
	Transport Railway SP		
	Net electricity EU25 SP		
	Natural gas High Pressure distributed FP		

Abbildung 71 – PV (polykristallin) - Prozesse 3

A.8.2. Anlagen

Monokristalline Anlage:



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
3kWp flat roof installation, single-Si, on roof	Net electricity EU25 SP
	inverter, 2500W, at plant
	electric installation, photovoltaic plant, at plant
	flat roof construction, on roof
	photovoltaic panel, single-Si, at plant
	Transport Delivery truck <3,5t SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Tankship overseas SP

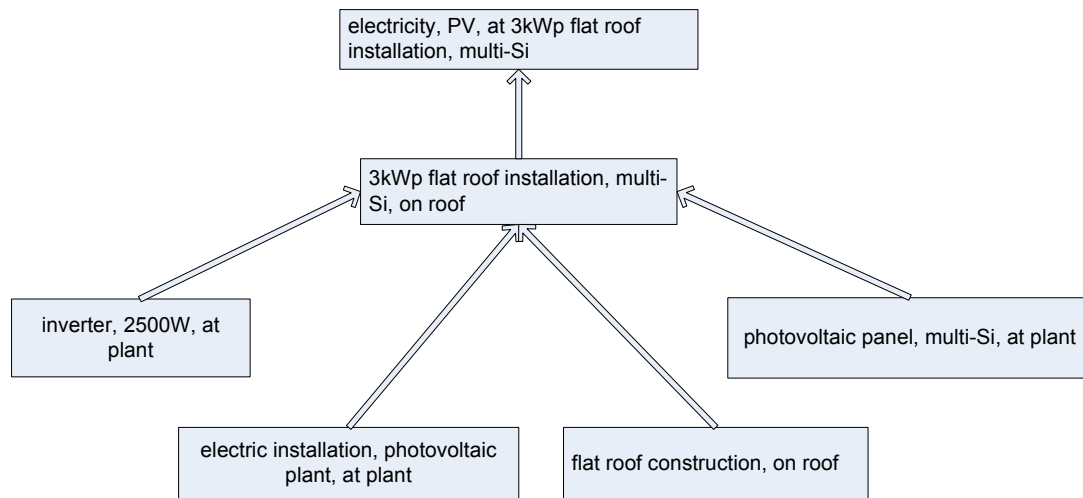
ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
inverter, 2500W, at plant	Net electricity EU25 SP
	Aluminium 0% Recycling SP
	Copper SP
	Steel low alloyed SP
	Styrene SP
	Polyvinylechloride
	Polyethylene LD SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP
	Transport Freighter overseas SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
flat roof construction, on roof	Aluminium 0% Recycling SP
	Steel low alloyed SP
	Polyethylene HD SP
	Polystyrene SP
	Transport 28t Truck SP
	Transport Delivery truck <3,5t SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
electric installation, photovoltaic plant, at plant	Copper SP
	Brass SP
	Zinc SP
	Steel low alloyed SP
	Polyethylene HD SP
	Polyvinylechloride
	Polycarbonate SP
	Epoxy, resin
	Transport 28t Truck SP
Transport Railway SP	

Abbildung 72 – Prozesschart - PV Anlage(monokristallin)

Polykristallines Anlage:



ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
3kWp flat roof installation, multi-Si, on roof	Net electricity EU25 SP
	inverter, 2500W, at plant
	electric installation, photovoltaic plant, at plant
	flat roof construction, on roof
	photovoltaic panel, multi-Si, at plant
	Transport Delivery truck <3,5t SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Tankship overseas SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
inverter, 2500W, at plant	Net electricity EU25 SP
	Aluminium 0% Recycling SP
	Copper SP
	Steel low alloyed SP
	Styrene SP
	Polyvinylechloride
	Polyethylene LD SP
	Transport 16t Truck SP
	Transport Railway SP
	Transport Freighter overseas SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
flat roof construction, on roof	Aluminium 0% Recycling SP
	Steel low alloyed SP
	Polyethylene HD SP
	Polystyrene SP
	Transport 28t Truck SP
	Transport Delivery truck <3,5t SP
	Transport Railway SP

ecoinvent Datensatz	SPI Datensatz
electric installation, photovoltaic plant, at plant	Copper SP
	Brass SP
	Zinc SP
	Steel low alloyed SP
	Polyethylene HD SP
	Polyvinylechloride
	Polycarbonate SP
	Epoxy, resin
	Transport 28t Truck SP
	Transport Railway SP

Abbildung 73 – Prozesschart - PV Anlage (polykristallin)