

# Globale Umweltkriterien für Ökostrom

## Schlussbericht

ausgearbeitet durch

**ESU-services**

Dr. Rolf Frischknecht

Dr. Niels Jungbluth

im Auftrag des

**Vereins für umweltgerechte Elektrizität, Zürich**

Uster, 5. Mai 2000

**Auftraggeber:**

Verein für umweltgerechte Elektrizität  
Dr. Bernd Kiefer, Geschäftsführer  
Schindlersteig 5  
8006 Zürich

**Autoren:**

Dr. Rolf Frischknecht  
Dr. Niels Jungbluth  
ESU-services  
Zentralstrasse 8  
8610 Uster

**Umfang:**

Schlussbericht „Globale Umweltkriterien für Ökostrom“  
Kennwertemodell Wasserkraft  
Kennwertemodell Windkraft  
Kennwertemodell Biogasanlagen (Grüngut)  
Kennwertemodell Photovoltaik

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Auftrag und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Verwendete Methode</b>	<b>1</b>
2.1	Die Methode der Ökobilanzierung	1
2.2	Die Bewertungsmethode Eco-indicator 99	2
<b>3</b>	<b>Analysierte Systeme</b>	<b>4</b>
3.1	Einführung	4
3.2	Wasserkraft und Kleinwasserkraftwerke	4
3.3	Windkraftanlagen	5
3.4	Biogasanlagen	7
3.5	Photovoltaikanlagen	9
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>11</b>
4.1	Übersicht	11
4.2	Eco-indicator 99 Ergebnisse	11
4.2.1	Wasserkraftwerke	11
4.2.2	Windkraftwerke	12
4.2.3	Biogasanlagen	13
4.2.4	Photovoltaikanlagen	13
4.2.5	Referenzsysteme	15
4.2.6	Vergleichende Betrachtung	15
4.3	Dominanzanalysen	16
4.3.1	Wasserkraftwerke	16
4.3.2	Windkraftwerke	16
4.3.3	Biogasanlagen	16
4.3.4	Photovoltaikanlagen	17
4.3.5	Referenzsysteme	17
<b>5</b>	<b>Empfehlung Ökolabel-Grenzwert</b>	<b>17</b>
5.1	Wasserkraftwerke	18
5.2	Windkraftwerke	19
5.3	Biogasanlagen	19
5.4	Photovoltaikanlagen	20
<b>6</b>	<b>Einschätzung der Datenqualität</b>	<b>22</b>
6.1	Wasserkraftwerke	22
6.2	Windkraftwerke	22
6.3	Biogasanlagen	22
6.4	Photovoltaikanlagen	23
<b>7</b>	<b>Folgerungen</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Kritische Würdigung und Ausblick</b>	<b>25</b>
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>26</b>
	<b>Anhang: Eingabemasken Kennwertmodelle</b>	<b>27</b>



## Zusammenfassung

Ziel der Kurzstudie „Globale Umweltkriterien für Ökostrom“ ist es, einen Grenzwert für die lebenszyklusbezogene Umweltbelastung der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien festzulegen. Dieser Grenzwert dient als globales Kriterium zur Vergabe eines Ökolabels für Strom aus erneuerbaren Energiequellen (siehe Abbildung 1). Zudem sollen Kennwertmodelle erarbeitet werden, die es Anlagebetreibern ermöglichen, in kurzer Zeit abzuklären, ob die eigene Anlage den Grenzwert unterschreitet, und damit das globale Kriterium für die Vergabe des Ökolabels (Niveau 1) erfüllt.

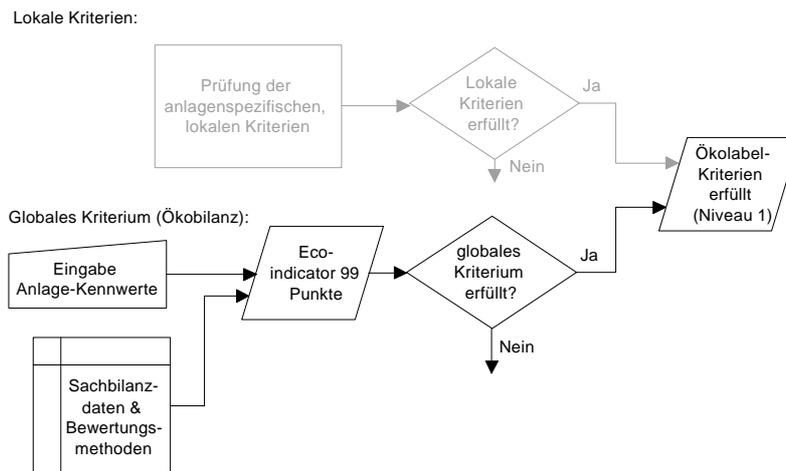


Abbildung 1: Ablaufschema Vergabe des Ökolabels (Niveau 1).

Die lebenszyklusbezogene Umweltbelastung wird mithilfe der Ökobilanzmethode quantifiziert. Die Sachbilanzdaten stammen aus bereits veröffentlichten Studien der neunziger Jahre. Sie wurden mithilfe der schadensorientierten Bewertungsmethode Eco-indicator 99 gewichtet. Diese Bewertungsmethode offeriert drei in sich konsistente Gewichtungssets, die sich durch unterschiedliche Werthaltungen kennzeichnen, nämlich

- Egalitarist (E, zukünftige Generationen ebenso wichtig wie heutige, handelt vorsichtig),
- Hierarchist (H, Abwägen zwischen Heute und Zukunft, handelt risikoneutral) und
- Individualist (I, auf sich selbst bezogen, handelt risikofreudig).

Die Wahl der Bewertungsmethode und die Festlegung der Grenzwerte (für bestehende und Neuanlagen) wurde in der Arbeitsgruppe Kriterien des Vereins für umweltgerechte Elektrizität diskutiert und in der hier beschriebenen Fassung gutgeheissen.

Für die Quantifizierung des Grenzwertes als globales Kriterium des Ökostromlabels wird hier die hierarchistische Perspektive verwendet.

Die Festlegung des Grenzwertes erfolgt auch unter Berücksichtigung der Umweltbelastung konventionell thermischer Kraftwerke. Es wird empfohlen, den Grenzwert so festzulegen, dass die Umweltbelastung von bestehenden zu prüfenden Anlagen der  *Hälfte*  der Umweltbelastung eines modernen gasbefeuerten Gas und Dampf Kraftwerkes entspricht (siehe Tabelle 1). Für Neuanlagen wird der Grenzwert um ein Drittel tiefer angesetzt, was 33% der Umweltbelastung des Gaskombikraftwerkes entspricht.

Die Umweltbelastung der hier zur Diskussion stehenden Energieträger unterscheiden sich deutlich. Zudem schwanken die Ergebnisse auch innerhalb einer Energieform recht stark. Strom aus Biogasanlagen kann als emissionsfrei betrachtet werden (reine Kompostieranlagen sind gemäss Eco-

indicator 99 insgesamt umweltbelastender als Vergärungsanlagen) und Wasserkraftwerke (inkl. Kleinwasserkraftwerke) weisen sehr tiefe Eco-indicator 99-Werte auf.

	Grenz- wert	zu prüfende Systeme				Referenzsysteme				
		Wasser	Wind <sup>1)</sup>	Biogas <sup>2)</sup>	Sonne <sup>3)</sup>	Erdgas	Atom	Heizöl	Kohle	UCPTE
Min	<b>13'950</b>	367	1'160	neg.	6'730	27'900	6'260	61'600	28'000	24'600
Max		637	9'680	neg.	19'000					

Tabelle 1: Grenzwert und Umweltbelastung der zu prüfenden Kraftwerke, von Referenzkraftwerken und vom westeuropäischen Stromproduktionsmix (UCPTE) in Eco-indicator 99- $\mu$ Punkten (Hierarchist) pro kWh Strom.  
<sup>1)</sup>: Nur Anlagen mit einer Leistung von mind. 30kW.  
<sup>2)</sup>: Vergärungsanlagen weisen eine tiefere Umweltbelastung auf als reine Kompostieranlagen. Deshalb resultieren negative Werte.  
<sup>3)</sup>: Anlagen vor 1995

Grosse Windkraftwerke liegen mindestens doppelt so hoch wie Wasserkraftwerke. Kleinere Windenergieanlagen (<15kW) kommen auf wesentlich höhere Werte. Photovoltaikstrom ist durchwegs mit deutlich erhöhten Eco-indicator 99-Werten verbunden. Innerhalb dieser Technologie sind zudem signifikante Unterschiede festzustellen. An erster Stelle sei hier die Zellenart (mono- oder polykristallin) als Grund genannt.

Unter Anwendung der hierarchistischen Perspektive des Eco-indicator 99 liegen kleine Windkraftanlagen (Abbildung 3) und Photovoltaikanlagen mit polykristallinen Solarzellen und unterdurchschnittlichen Erträgen (Abbildung 4) *über* dem hier empfohlenen Grenzwert und sind demzufolge nicht berechtigt, das Ökostromlabel zu führen.

Biogasanlagen, grosse Windkraftanlagen (Grenchenberg und Mont Croisin, Simplon, Sool und Chürstein) und Wasserkraftwerke (sowohl Gross- als auch Kleinwasserkraftwerke) haben diesbezüglich keine Probleme (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3) und unterschreiten den Grenzwert um bis das Zwanzigfache (Wasserkraft).

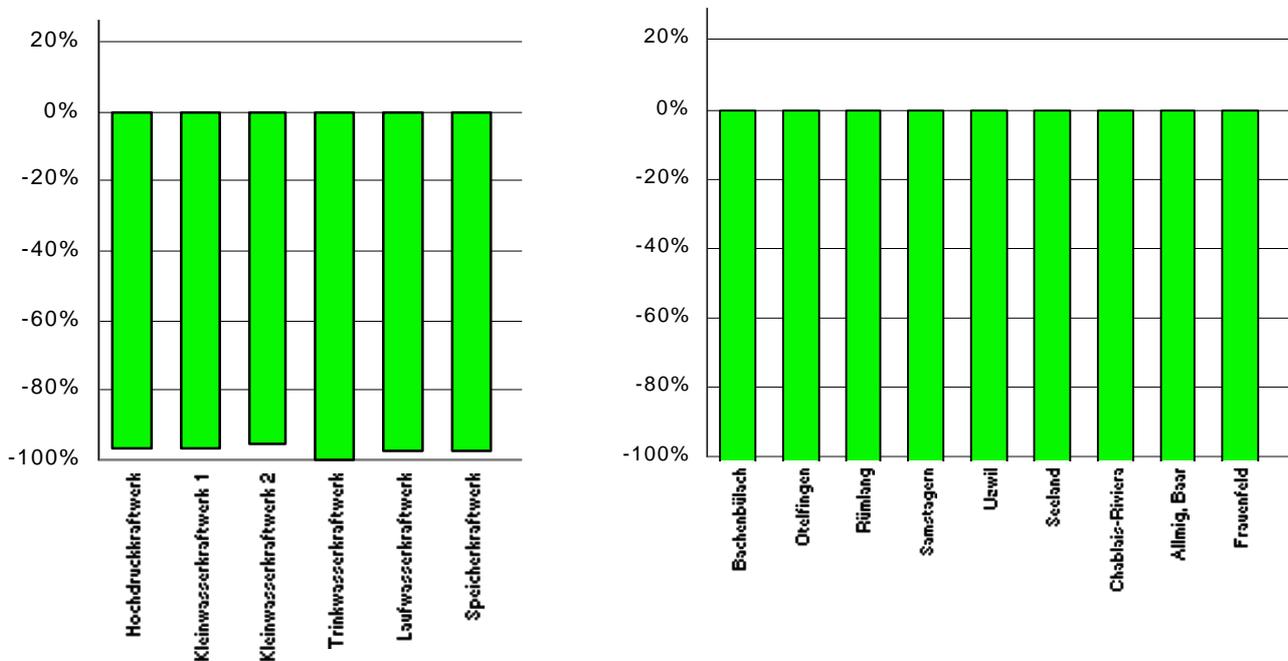


Abbildung 2: Vergleich der untersuchten Wasserkraft- und Biogasanlagen (links resp. rechts) mit dem Grenzwert für Ökostrom. Basis Eco-indicator 99, Perspektive des Hierarchisten. Plus bedeutet Überschreiten, Minus Unterschreiten des Grenzwertes.

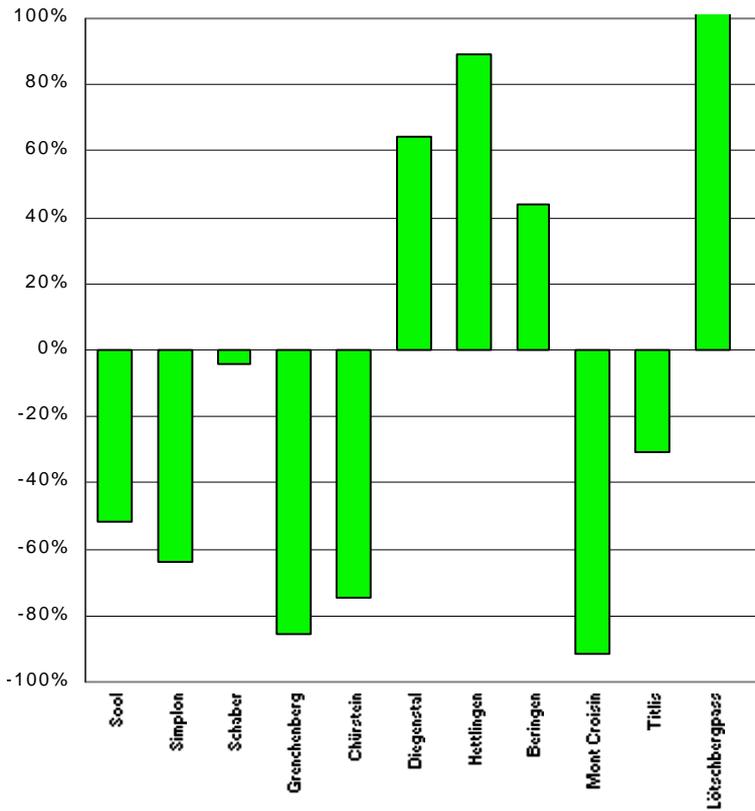


Abbildung 3: Vergleich der untersuchten Windkraftanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom. Basis Eco-indicator 99, Perspektive des Hierarchisten. Plus bedeutet Überschreiten, Minus Unterschreiten des Grenzwertes.

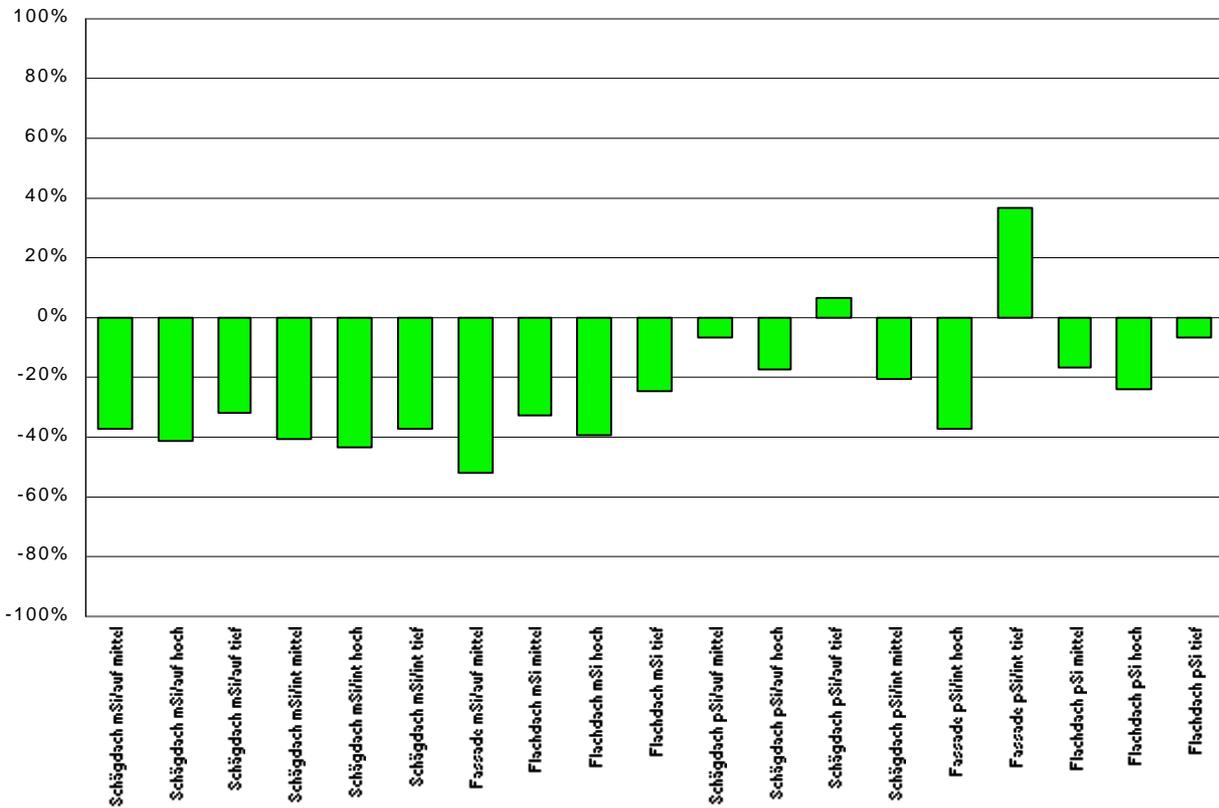


Abbildung 4: Vergleich der untersuchten Photovoltaikanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom. Basis Eco-indicator 99, Perspektive des Hierarchisten. Plus bedeutet Überschreiten, Minus Unterschreiten des Grenzwertes.

Von den untersuchten Photovoltaikanlagen (Inbetriebnahme 1989 bis 1994) unterschreiten 96 der 112 untersuchten Anlagen den Grenzwert. Der für das Ökolabel erforderliche Mindestenergieertrag liegt zwischen 450 und über 840 kWh/kW<sub>p</sub>.a (fassadenintegrierte Anlage mit monokristallinen Zellen resp. Flachdachanlage mit polykristallinen Zellen, siehe Tabelle 2).

Installation	monokristalline Zellen					polykristalline Zellen				
	SD	SD	F	F	FD	SD	SD	F	F	FD
Bauart	auf	int	auf	int	-	auf	int	auf	int	-
Mindestenergieertrag	534	475	532	455	552	823	790	817	769	844
Anzahl untersuchte Anlagen	37	4	1	0	21	27	1		2	19
davon Grenzwert erfüllt	37	4	1		20	18	1		1	14

Tabelle 2: Mindestenergieertrag pro installierte Leistung in kWh/kW<sub>p</sub>.a zur Erfüllung des Grenzwertes in Abhängigkeit vom Zellentyp, der Installation und der Bauart, sowie Anzahl der untersuchten und der davon ökostromberechtigten Anlagen. Gültig für bestehende Anlagen der neunziger Jahre. SD: Schrägdach; F: Fassade; FD: Flachdach; auf: aufgesetzt; int: (fassaden- resp. dach-)integriert.

Für Speziallösungen wie in Isolierverglasung eingesetzte Solarzellen, die einen geringeren (resp. von den hier zugrundegelegten Sachbilanzdaten deutlich abweichenden) Materialaufwand verursachen, sind die hier gemachten Aussagen und die parallel zu diesem Bericht erarbeiteten Kennwertmodelle nicht gültig resp. nicht anwendbar.

Biogasanlagen können auch dann den Grenzwert unterschreiten, wenn sie mehr Strom vom Netz beziehen als sie selber einspeisen (z.B. Kompogasanlage Seeland). Damit eine derartige „Stromveredelung“ nicht möglich ist, müssen im Bereich der lokalen Kriterien flankierende Anforderungen formuliert werden (z.B. Strombezug maximal 20% der ins Netz eingespeisten Strommenge, bezogen auf ein Jahr).

Aufgrund der für diese Untersuchung verfügbaren Unterlagen und den Erfahrungen mit den Ökobilanzergebnissen werden die folgenden Schlüsse gezogen:

Für *Wasserkraftanlagen* und *grosse Windkraftanlagen* sind keine weiteren Abklärungen notwendig, da diese Anlagen den Grenzwert mühelos unterschreiten.

*Biogasanlagen* führen im Vergleich zu reinen Kompostieranlagen zu tendenziell tieferen Umweltbelastungen (gemäss Eco-indicator 99, Hierarchist). Demzufolge unterschreiten auch die Biogasanlagen den Grenzwert deutlich. Bei den Biogasanlagen sind die *in situ* Emissionen (insb. Ammoniak und Methan) während des Betriebs der Anlagen sehr wichtig. Diese wurden jedoch nur stichprobenartig erfasst. Hier würde es sich lohnen, die Datenbasis zu erweitern, um eine grössere Sicherheit bezüglich der Ergebnisse zu erreichen.

Die Umweltbelastung des Stroms aus *Photovoltaikanlagen* der neunziger Jahre ist in der Nähe oder, bei Anlagen mit polykristallinen Zellen und unterdurchschnittlichem Ertrag über dem hier vorgeschlagenen Grenzwert. Für neue Anlagen, bei denen der tiefere Grenzwert angewendet werden soll, ist es angezeigt, die jetzigen Daten mit vor Ort Erhebungen in neuen Fabrikationsstätten (z.B. von BP Solar in Deutschland) zu aktualisieren.

## 1 Auftrag und Zielsetzung

Die Arbeitsgruppe Kriterien des Vereins für umweltgerechte Elektrizität ist für die Bereitstellung von Bewertungskriterien zur Vergabe eines Ökolabels (Niveau 1) für Strom aus erneuerbaren Energien zuständig. Die Bewertungskriterien sind eingeteilt in sogenannte *lokale* und *globale* Kriterien. Die *lokalen* Kriterien umfassen den Kraftwerkssperimeter plus eine wirkungsspezifische Grauzone, das *globale* Kriterium basiert auf einer Lebenszyklusbetrachtung aller Umweltauswirkungen (Ökobilanz, siehe auch Abb. 1).

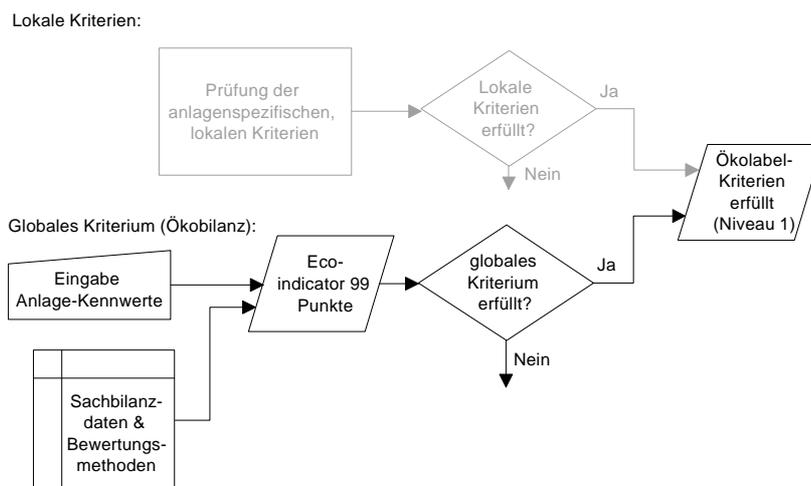


Abb. 1: Ablaufschema Vergabe des Ökolabels (Niveau 1).

Der vorliegende Bericht ist auf Aussagen zum globalen Kriterium beschränkt. Er enthält die Ergebnisse der Parametrisierung der Ökobilanzen für die Stromerzeugung mittels Wasserkraft, Wind, Biogas und Photovoltaik. Dazu wurden Kenngrößenmodelle entwickelt, die auf der Basis weniger Anlageparameter das Berechnen der Ökobilanz erlauben. Zudem werden ökobilanzbezogene Grenzwerte auf der Basis der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 vorgeschlagen, die von bestehenden resp. Neuanlagen zur Erlangung des Ökolabels (Niveau 1) unterschritten werden müssen.

## 2 Verwendete Methode

### 2.1 Die Methode der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung ist eine Methode zur Quantifizierung der mit einem Produkt oder einer Dienstleistung, hier mit der Erzeugung von Elektrizität in Netzverbundanlagen, verbundenen Umweltauswirkungen. Dazu werden die Emissionen und Ressourcenverbräuche in der *Sachbilanz* (siehe Abb. 2) von der Wiege bis zur Bahre, d.h. von der Entnahme der Ressourcen bis zur Entsorgung des Produktes und der Produktionsabfälle erfasst und in der darauf aufbauenden *Wirkungsabschätzung* beurteilt.

In Rahmen der Zertifizierung von Ökostrom wird die Wirkungsabschätzung mithilfe der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 durchgeführt. Sie wird im folgenden Unterkapitel kurz vorgestellt.

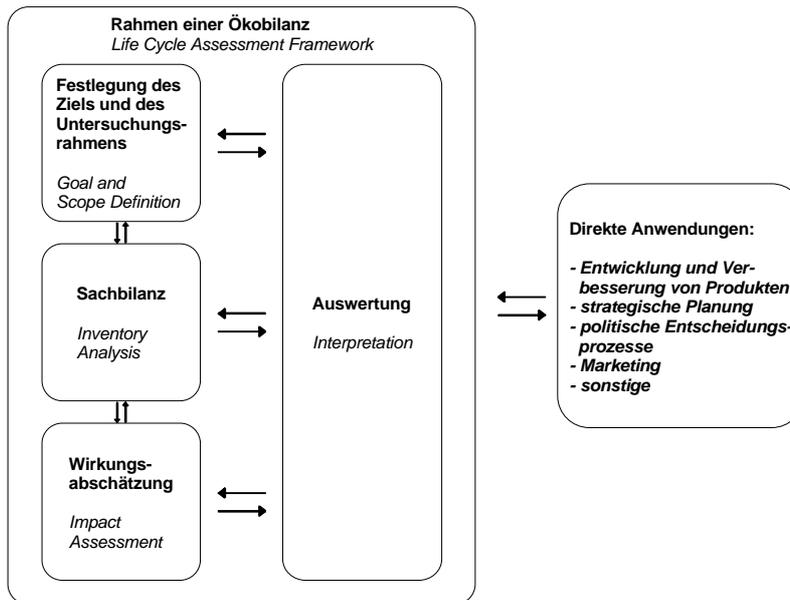


Abb. 2: Bestandteile einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA); Bezeichnungen in deutsch und englisch; gemäss (ISO 1997).

## 2.2 Die Bewertungsmethode Eco-indicator 99

Die schadensorientierte Bewertungsmethode Eco-indicator 99 (Goedkoop & Spriensma 2000) berücksichtigt die folgenden drei Schutzgüter, deren Beeinträchtigung mithilfe der Ökobilanz zu quantifizieren ist:

- Menschliche Gesundheit,
- Ökosystemgesundheit, und
- Ressourcenentwertung.

Ausgehend von diesen drei Schutzgütern werden Umweltschadensmodelle für die als wichtig erachteten Umweltwirkungen verwendet, um damit eine Anbindung an die Sachbilanzergebnisse zu ermöglichen. Die folgenden Schadensmodelle werden verwendet:

- Schäden an der *menschlichen Gesundheit* werden in DALYs (disability adjusted life years) gemessen, ein Indikator, der von der Weltgesundheitsorganisation und der Weltbank entwickelt wurde und sowohl vorzeitige Todesfälle als auch Krankheiten unterschiedlicher Schweregrade einschliesst. Schäden an der menschlichen Gesundheit werden für respiratorische und karzinogene Effekte, Effekte infolge der Klimaänderung, des Ozonschichtabbaus und radioaktiver Strahlung quantifiziert.
- Schäden an der *Ökosystemqualität* werden in Funktion des Prozentsatzes der durch die Umweltbelastung verschwundenen resp. beeinträchtigten Arten ausgedrückt. Es werden Schäden durch direkte Landnutzung, durch Versäuerung und Überdüngung und durch die Emission ökotoxischer Substanzen berücksichtigt. Die Schadensmodellierung ist hier nicht so homogen wie beim Schutzgut "Menschliche Gesundheit".
- Der *Ressourcenverbrauch* wird durch einen Indikator gewichtet, der die Qualität der verbleibenden mineralischen und fossilen Ressourcen beschreibt. Der Indikator drückt den Qualitätsverlust mit erhöhten Energieverbräuchen des zukünftigen Ressourcenabbaus aus.

In Abb. 3 werden die verschiedenen Modellierungsschritte (weiss) und (Zwischen-)Resultate (grau hinterlegt) der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 gezeigt.

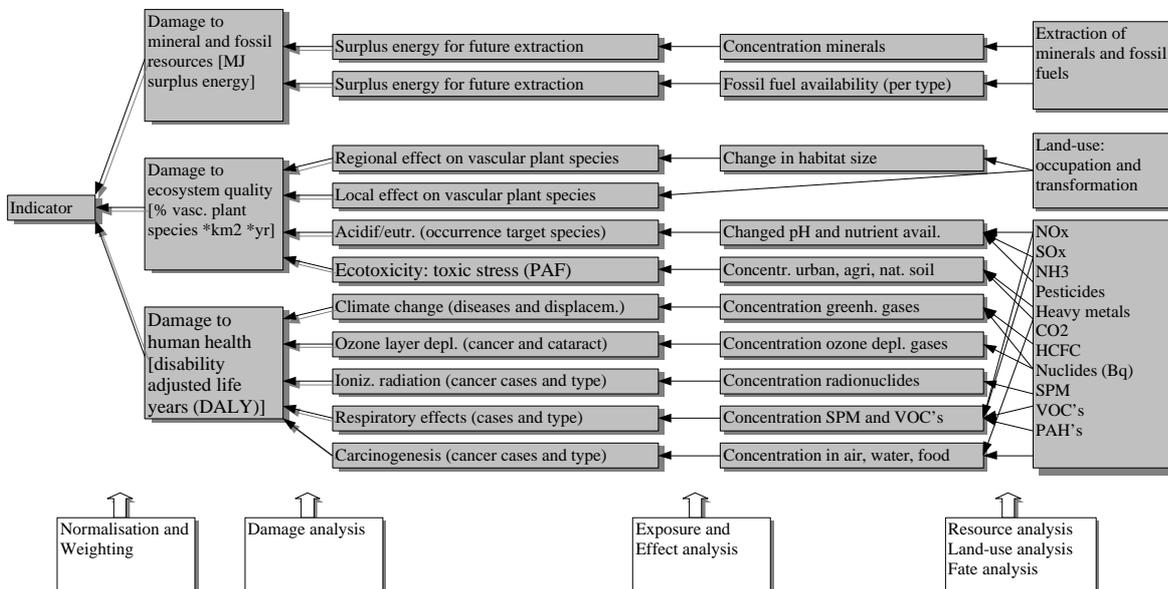


Abb. 3: Vereinfachendes Schema der Vorgehensweise beim Eco-indicator 99. Grau: (Zwischen-)Ergebnisse; Weiss: Modellierungen; Goedkoop & Spriensma 2000:11).

Alle Emissionen, Landinanspruchnahmen und Landtransformationen wie auch die damit verbundenen Schäden werden als in Europa auftretend angenommen. Diese Einschränkung gilt nicht für Schäden durch Ressourcenverbrauch, und infolge der Emission von Treibhausgasen, ozonschichtabbauenden Stoffen, persistenten karzinogenen Substanzen, anorganischen Luftschadstoffen mit einer weiträumigen Verfrachtung und einigen langlebigen radioaktiven Isotopen.

Die Bewertungsmethode verwendet drei unterschiedliche, bei Menschen beobachtbare Wertemuster (Grundhaltungen), was zu drei in sich konsistenten Schadensmodellen führt. Die Ausgestaltung der Wertemuster erfolgt auf der Basis der Kulturtheorie (siehe dazu Hofstetter 1998:S. 41-79). Sie können wie folgt umschrieben werden:

*Egalitarist (E):* Zukünftige Generationen ebenso wichtig wie heutige (Langzeitperspektive); weit entfernt lebende Menschen ebenso wichtig wie die eigene Familie; minimale wissenschaftliche Indizien der Umweltschädlichkeit eines Schadstoffes reichen aus, um ihn in einer Ökobilanz zu bewerten (vorsichtige Grundhaltung).

*Hierarchist (H):* Wägt jeweils zwischen der Gegenwart und der Zukunft, zwischen dem Hier und der Welt und zwischen Risiken und den Nutzen ab. Ein Konsens der Wissenschaftler/-innen über Zusammenhänge zwischen Umweltschäden und potenziellen Schadstoffen rechtfertigt deren Einbezug in Ökobilanzen.

*Individualist (I):* Hier und Heute sind sehr wichtig (Kurzzeitperspektive, eigene Familie und nähere Umgebung sind wichtiger als Menschen anderer Regionen); nur wissenschaftlich klar beweisbare Zusammenhänge zwischen Umweltschäden und potenziellen Schadstoffen werden anerkannt (risikofreudige Grundhaltung).

Mit diesen drei Perspektiven umfassen die Ergebnisse einer Bewertung nach Eco-indicator 99 somit drei Datensets mit Werten zu Humangesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen.

Die abschliessende Gewichtung zwischen den drei Schutzgütern Humangesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen erfolgt auf der Basis der Ergebnisse einer an der ETH Zürich unter Ökobilanz-Experten durchgeführten schriftlichen Panelbefragung. Die dort eruierten Gewichtungsfaktoren werden hier als Default-Werte verwendet. In der hierarchistischen Perspektive werden menschliche Gesundheit und Ökosystemqualität je mit 40%, die Ressourcenqualität mit 20% gewichtet.

### 3 Analytierte Systeme

#### 3.1 Einführung

In den folgenden Unterkapiteln werden die wesentlichen Charakteristika der Modellierung der Stromerzeugung auf der Basis der erneuerbaren Energieträger Wasserkraft, Windenergie, Biogas und Photovoltaik beschrieben. Die wichtigsten Modellannahmen und wesentliche Parameter werden beschrieben. Die Modellierung der Systeme beruht auf den Ökoinventaren von Energiesystemen (Frischknecht et al. 1996), der Ökobilanz der Biogasverstromung (Schleiss 1999), der Energiebilanz von Kleinwasserkraftwerken (Baumgartner & Doka 1998) und Angaben über Energieproduktion und weiterer Kenngrössen von in Betrieb stehenden Anlagen.

#### 3.2 Wasserkraft und Kleinwasserkraftwerke

Die hier berechneten Ökobilanzdaten beruhen für Lauf- resp. Speicherkraftwerke auf den unveränderten Sachbilanzdaten aus Frischknecht et al. (1996:Teil VIII). Für die Kleinwasserkraftwerke (KWKW) wurden die Informationen in Baumgartner & Doka (1998) verwendet.

Die Grosswasserkraftwerke werden unterteilt in Lauf- und Speicherkraftwerke. Die durch reinen Pumpspeicherbetrieb erzeugte Elektrizität wird nicht berücksichtigt. Bei den Kleinwasserkraftwerken werden ein Trinkwasserkraftwerk, ein Hochdruck- und zwei Gewerbekanal-Kleinwasserkraftwerke getrennt bilanziert. Abb. 4 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Bilanzierung des durchschnittlichen Laufwasserkraftwerkes. Die Bilanz umfasst neben den gezeigten Materialien und Dienstleistungen auch die Bereitstellung von Elektrizität sowie die Gewinnung der Energieträger und Rohstoffe.

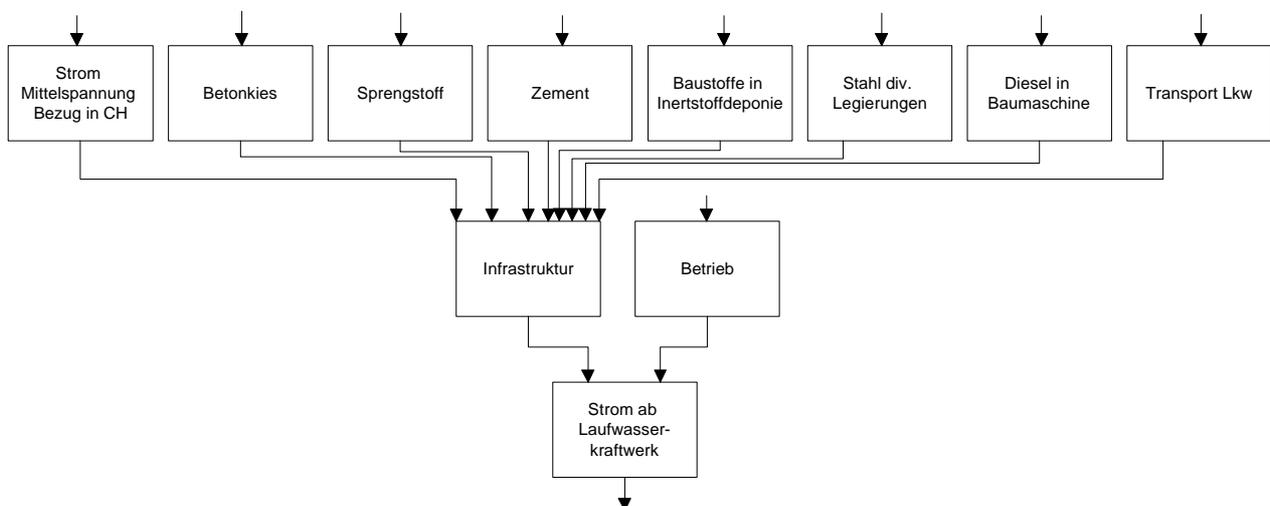


Abb. 4: Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Stromerzeugung mit einem durchschnittlichen Laufkraftwerk, wie sie in Frischknecht et al. (1996:Teil VIII) modelliert ist.

Neben der Flächeninanspruchnahme im Betrieb der Anlage sind vorwiegend die Infrastrukturaufwendungen relevant. Diese unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Kraftwerkstypen recht stark.

Bei allen Wasserkraftwerkstypen (Lauf-, Speicher-, Trinkwasser- und Durchflusskraftwerk) werden die jährliche Stromproduktion pro installiertes kW, die installierte Leistung und der Kraftwerkstyp als ergebnisrelevante Parameter verwendet (siehe Tab. 1). Diese Parameter können von Kraftwerksbetreibern mit vertretbarem Aufwand erhoben werden.

Anlage	Anlagentyp	Installierte Leistung [kW]	Jahresproduktion [kWh]	Lebensdauer [a]	Spezifische Produktion [kWh/kW.a]
Champagna Samedan	Hochdruck-KWKW	361	1'978'000	80	5'479
Obermühle Baar	KWKW	150	800'000	80	5'333
Mühlbach Burgdorf	KWKW	70	547'000	70	7'814
Buechetsmatt Sarnen	Trinkwasserkraftwerk	18.5	117'700	30	6'362

Tab. 1: Installierte Leistung, Jahresstromproduktion, Lebensdauer und spezifische Stromproduktion pro installierte Leistung. Daten aus Baumgartner & Doka (1998).

Bei den Kleinwasserkraftwerken handelt es sich um Einzelanlagen, währenddem die Werte für Lauf- und Speicherkraftwerke den schweizerischen Durchschnitt Anfang der neunziger Jahre repräsentieren. Ausgewählte Inventardaten nach Baumgartner & Doka (1998) und Frischknecht et al. (1996:Teil VIII) für die Stromproduktion aus Wasserkraft werden in Tab. 2 gezeigt.

Es zeigt sich eine etwas höhere Materialintensität der Kleinwasserkraftwerke gegenüber den beiden grossen Lauf- und Speicherkraftwerken. Beim Trinkwasserkraftwerk wurden lediglich die zusätzlichen, der Stromerzeugung dienenden Anlageteile berücksichtigt. Die anderen Aufwendungen und Beeinträchtigungen werden der Trinkwassergewinnung zugeordnet. Die durch die Wasserkraftnutzung beeinträchtigte Fläche ist bei den Kleinwasserkraftwerken deutlich geringer.

Anlage	Beton [kg/TJ]	Stahl [kg/TJ]	Diesel für Bau [l/TJ]	Beeinträchtigte Fläche [m <sup>2</sup> a/TJ]	Überbaute Fläche [m <sup>2</sup> a/TJ]
Champagna Samedan	4'049	154	32	6.7	37.7
Obermühle Baar	6'313	203	47.8	8.5	8.8
Mühlbach Burgdorf	6'997	311	179	6.1	6.3
Buechetsmatt Sarnen	0	54	1.4	0	36
Laufwasserkraftwerk CH	5'200	126	29.9	1'250	12
Speicherkraftwerk CH	5'500	151	11.9	1'230	12

Tab. 2: Ausgewählte Inventardaten für die Stromproduktion aus Wasserkraft. Daten aus Baumgartner & Doka (1998) und Frischknecht et al. (1996:Teil VIII).

### 3.3 Windkraftanlagen

Für die Ökobilanz von Windkraftanlagen wurde auf die detaillierte Sachbilanz der Anlage Simplon und auf die extrapolierten Daten der Anlage Grenchenberg abgestützt (Frischknecht et al. 1996:Teil XIII). Ausschnitte dieser Daten werden in Tab. 3 gezeigt. Für den grossen Windkraftanlagenpark auf dem Mont Croisin und die kleinen Anlagen wurden die Daten extrapoliert.

Ähnlich wie bei der Wasserkraft, fallen bei der Windkraft beim Betrieb neben der Flächeninanspruchnahme und dem Wechsel des Getriebeöls kaum weitere, ökobilanzrelevante Umweltein-

wirkungen an. Die Infrastruktur ist demzufolge für den überwiegenden Teil der lebenszyklusbezogenen Umweltbelastung verantwortlich.

Abb. 5 zeigt einen Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Bilanzierung des Windkraftwerkes auf dem Simplon.

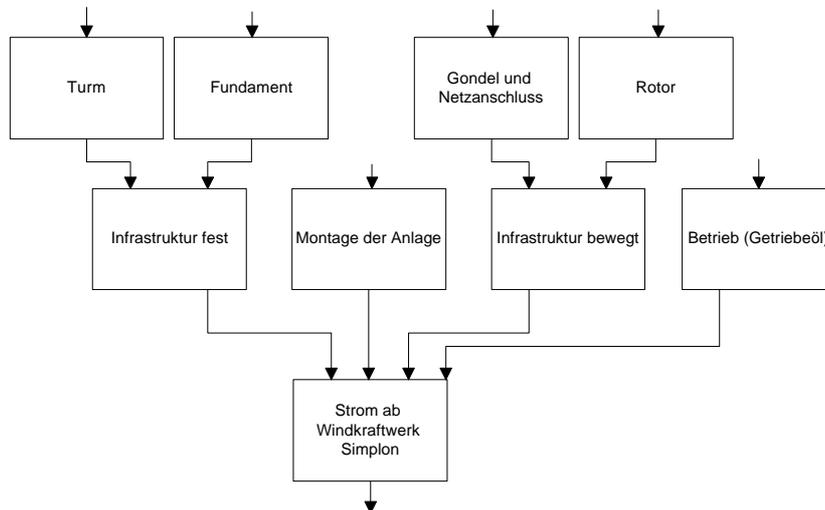


Abb. 5: Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Stromerzeugung mit der Windkraftanlage Simplon, wie sie in Frischknecht et al. (1996:Teil XIII) modelliert ist.

Anlage	Beton [kg/TJ]	Stahl [kg/TJ]	Diesel für Bau [l/TJ]	Beeinträchtigte Fläche [m <sup>2</sup> a/TJ]	Überbaute Fläche [m <sup>2</sup> a/TJ]
Sool	19'171	4'167	47	2'678	71
Simplon	14'352	3'139	35	2'005	53
Schaber	46'149	9'009	112	6'447	172
Grenchenberg	2'209	1'431	5	309	8
Chürstein	5'050	2'679	12	705	19
Diegenstal	98'087	17'122	239	13'702	365
Hettlingen	122'930	20'551	299	17'173	458
Beringen	90'984	15'412	221	12'710	339
Mont Croisin	578	719	1	81	2
Titlis	27'405	5'993	67	3'828	102
Lötschbergpass	628'970	102'363	1'530	87'863	2'343

Tab. 3: Ausgewählte Inventardaten für die Stromproduktion aus Windkraftanlagen, extrapoliert aus (Frischknecht et al. 1996:Teil XIII).

Für alle in der Schweiz in Betrieb stehenden netzgekoppelten Anlage liegen die Stromproduktionswerte seit der Inbetriebnahme vor. Über die Turmhöhe werden die Materialaufwendungen für jede Anlage aus den Daten der Simplon- resp. der Grenchenberganlage extrapoliert. Die spezifischen Aufwendungen sind recht deutlich von der Grösse der Anlage abhängig (siehe Tab. 4).

Für Windkraftanlagen sind demzufolge die jährliche Stromproduktion pro installierte Leistung, die Leistung und die Turmhöhe ergebnisrelevante Parameter.

Anlage	Installierte Leistung [kW]	Turmhöhe [m]	verkaufter Strom [kWh/a]	Spezifische Produktion [kWh/kW]
Sool	28	21 <sup>1)</sup>	13'366	477
Simplon	30	22	18'705	624
Schaber	15	18 <sup>1)</sup>	4'759	317
Grenchenberg	150	30	121'504	810
Chürstein	80	27 <sup>1)</sup>	47'842	598
Diegenstal	5.5	15 <sup>1)</sup>	1'866	339
Hettlingen	2	10 <sup>1)</sup>	993	497
Beringen	3	12 <sup>1)</sup>	1'609	536
Mont Croisin	2'460 (4 x 615)	40 <sup>1)</sup> <sup>2)</sup>	2'478'812 619'703	1'008
Titlis	30	22	9'796	327
Lötschbergpass	1	10 <sup>1)</sup>	194	194

Tab. 4: Installierte Leistung, Turmhöhe, durchschnittliche Jahresproduktion und spezifischer jährlicher Ertrag pro installierte Leistung der netzgekoppelten Windkraftanlagen in der Schweiz, Auswertungen auf der Basis von Horbaty (2000).

<sup>1)</sup>: Annahme.

<sup>2)</sup>: Als Skalierungsgrösse; reale Turmhöhe 45 Meter.

### 3.4 Biogasanlagen

Die Ökobilanzen der Biogasanlagen beruhen auf der Arbeit von Schleiss (1999) und zusätzlichen Angaben von neun Anlagenbetreibern (Schleiss 2000). Bei den Biogasanlagen werden folgende drei Anlagentypen unterschieden:

- Einstufige Vergärung mit Nachrottung (VN),
- Einstufige Vergärung mit geschlossener Kompostierung (VG),
- Mehrstufige Vergärung mit offener Kompostierung (VO).

Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Prozessfliessbild der Strombereitstellung in einer Vergärungsanlage mit Nachrottung (VN). Im Gegensatz zu den anderen Systemen (Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik) sind hier direkte Schadstoff-Emissionen aus dem Betrieb zu gewärtigen. Einerseits fallen Verbrennungsemissionen in der Biogas-Verbrennung im Blockheizkraftwerk an und andererseits sind Prozessemissionen, v.a. Kohlendioxid und Methan, aber auch Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Lachgas zu gewärtigen.

Eine Vergärungsanlage produziert neben Biogas, das verstromt, ins Erdgasnetz eingespeist oder als Treibstoff eingesetzt wird, auch Kompost. Für die Labelvergabe wird angenommen, dass der Kompost aus der Vergärung dieselben Aufwendungen und Emissionen aufweist, wie der in einer offenen Kompostierungsanlage hergestellte Kompost. Der Kompost aus Vergärung ersetzt somit nicht industriell hergestellten Mineraldünger. Wird Kompost als umweltfreundliche Alternative im Vergleich zu Mineraldünger betrachtet, so stellen reine Kompostieranlagen eine geeignete Vergleichsbasis dar zur Bestimmung der Gesamtumweltbelastung der in Vergärungsanlagen erzeugten Elektrizität.

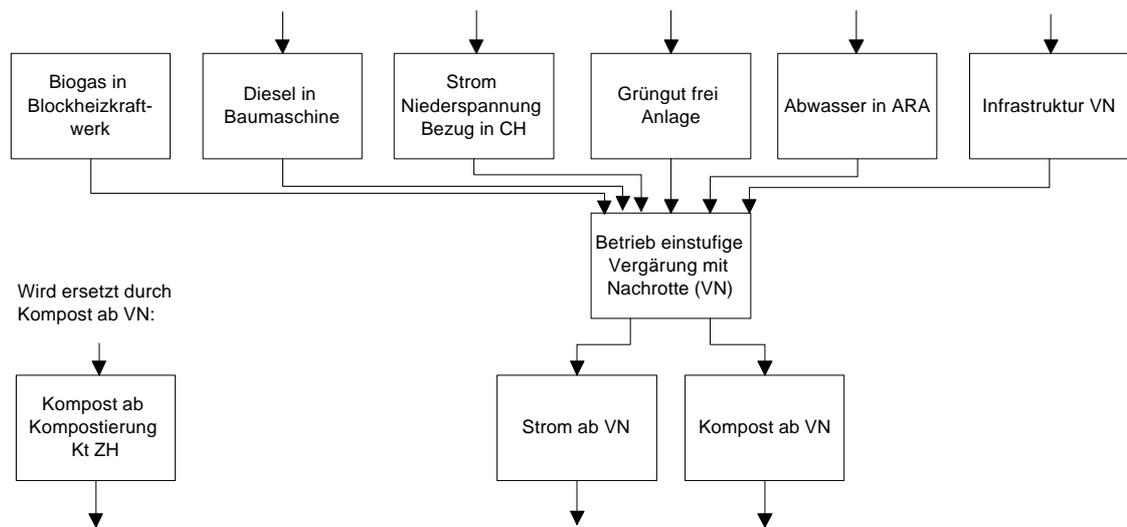


Abb. 6: Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Stromerzeugung mit einer Vergärungsanlage mit Nachrotte (VN), wie sie in Schleiss (1999) modelliert ist.

Die Umweltbelastung der Grüngutanlieferung und der eigentlichen Vergärung wird nach Massgabe des zur Verstromung eingesetzten Anteils des Biogases berücksichtigt. Der Verwendungszweck des Biogases (Treibstoff, Verstromung, Erdgasnetz) hat deshalb keinen Einfluss auf die Bereitstellungsaufwendungen und -emissionen.

Anlage	Jahresmenge Grüngut [t]	Strombezug vom Netz [kWh]	Dieselbedarf [l]	Biogasmenge [Nm <sup>3</sup> ]	Anteil verstromt [%]	verkaufter Strom [kWh]
Kompogas Bachenbülach	7'765	523'016	1'000	844'594	86	1'160'488
Kompogas Otelfingen	11'242	53'190	1'000	843'523	94	739'565
Kompogas Rümlang	2'556	60'603	1'000	305'459	84	257'679
Kompogas Samstagen	7'078	88'456	4'000	621'046	76	223'680
Kompogas Uzwil	6'324	20'997	6'632	538'768	100	536'496
Vergärungsanlage Seeland	1'386	108'096	200	30'085	100	37'352
SA Compost Chablais-Riviera	7'118	207'516	14'000	73'646	100	283'002
Kompostier- und Vergäranlage Allmig	18'024	0	24'883	377'480	100	342'370
ROMOPUR Frauenfeld	5'420	18'500	4'680	50'700	100	44'100
Kompostieranlagen Kt. ZH	10'000	43'333	27'000	0	-	-

Tab. 5: Verarbeitetes Grüngut, Strombezug vom Netz, Dieselbedarf, Biogasproduktion, Anteil Biogas zur Verstromung und Stromproduktion von 9 ausgewählten Biogasanlagen und dem Durchschnitt der reinen Kompostieranlagen des Kantons Zürich (Schleiss 2000).

Ergebnisrelevante Parameter sind neben dem Verfahren die vom Netz für den Betrieb bezogene Elektrizität, der Dieselbedarf, die Biogasproduktion, der Anteil des Biogases, der verstromt wird und die verkaufte Strommenge (siehe Tab. 5). Die *in situ*-Emissionen, d.h. die Prozessemissionen des Vergärungsvorgangs und die Verbrennungsemissionen des Blockheizkraftwerks beeinflussen zwar das Ergebnis recht stark, konnten jedoch nicht von jeder einzelnen Anlage erhoben werden.

Bei der in Tab. 5 aufgeführten Anlage Seeland fällt auf, dass das Verhältnis Strombezug zu Stromabgabe knapp 3 beträgt, was bedeutet, dass für jede erzeugte und abgegebene kWh Biogasstrom rund 3 kWh Netzstrom bezogen wurde. Die Anlage SA Compost Chablais-Riviera weist einen nur geringen Stromüberschuss aus.

Die reinen Kompostieranlagen des Kantons Zürich benötigten – bezogen auf die verarbeitete Grün-gutmenge - mit Abstand am meisten Diesel. Beim Stromverbrauch liegt der Durchschnitt der kantonalzürcherischen Kompostieranlagen etwa im Mittelfeld der Vergärungsanlagen.

### 3.5 Photovoltaikanlagen

Die Ökobilanzen der Photovoltaik basieren auf Frischknecht et al. (1996:Teil XII) und den Angaben aus der Photovoltaik-Datenbank von Meier (1999). Bei den in Frischknecht et al. (1996) bilanzierten Systemen werden Schrägdach-, Flachdach- und Fassadenanlagen, und integrierte resp. aufgesetzte Anlagen unterschieden. Zudem liegen Bilanzen für Anlagen mit mono- resp. polykristallinen Zellen vor.

Die Bilanzen umfassen die Fertigung der Panels bis hin zur Herstellung von MG-Silizium, die Fertigung der Tragkonstruktion, des Wechselrichters und der elektrischen Installationen. Die Strombereitstellung bei der Herstellung der Solarzellen und beispielsweise der Materialien der Tragkonstruktion erfolgt mit dem im europäischen Verbundnetz (UCPTE<sup>1</sup>, heute UCTE) erzeugten Strom, da der Herstellungsort der Zellen und der andern Materialien nicht bekannt ist.

Die Originaldaten stammen aus Anfang der neunziger Jahre veröffentlichten Fachpublikationen. Wesentliche Kenngrößen wie Dicke der Wafer und des Sägespaltes wurden an die Situation Mitte der neunziger Jahre angepasst. Die Stromerträge entsprechen den Produktionszahlen von in der Schweiz montierten Anlagen. Abb. 7 zeigt einen Ausschnitt aus dem Prozessfliessbild einer dachintegrierten Schrägdachanlage mit monokristallinen Zellen.

Bei den gebäudeintegrierten Anlagen werden der durch das Solarpanel erbrachten Funktion „Wetterschutz“ keine Aufwendungen und Emissionen, der Stromproduktion demzufolge alles zugeordnet. Aufgrund von Abschätzungen in Frischknecht et al. (1996:Teil XII:67/72) sind die eingesparten Aufwendungen (in Primärenergieeinheiten) gering. Für Speziallösungen wie beispielsweise in Isolierverglasung eingebaute Solarzellen sind die vorliegenden Bilanzen und das entwickelte Kennwertemodell nicht geeignet.

Im Gegensatz zu Biogasanlagen, die einen gewissen Eigenbedarf an Elektrizität aufweisen und dort deshalb die ins Netz *ingespeiste* Strommenge relevant ist, wird hier die gesamte *produzierte* Strommenge berücksichtigt.

---

<sup>1</sup> Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité. Heute : Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité.

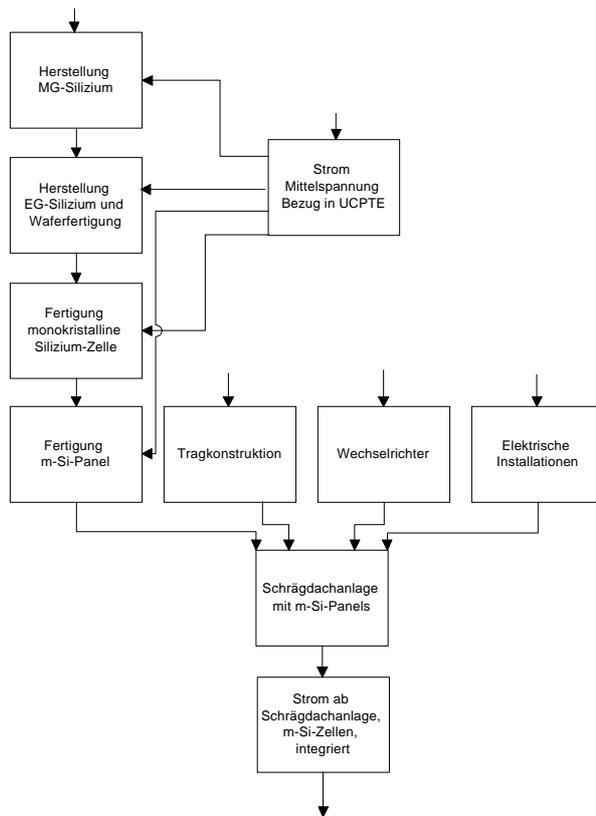


Abb. 7: Ausschnitt aus dem Prozessflussbild der Stromerzeugung mit einer 3kW Photovoltaikanlage, Schrägdach, dach-integriert mit monokristallinen Solarzellen, wie sie in Frischknecht et al. (1996:Teil XII) modelliert ist.

Neben dem spezifischen Ertrag pro installierter Leistung sind Zellenart und Bauweise ergebnisrelevante Kenngrößen, die durch Informationen der Anlagenbesitzer erhoben werden können (siehe Tab. 6). Über unterschiedliche Herstellungsaufwendungen bei Zellen oder Wechselrichter verschiedener Anbieter liegen keine Angaben vor.

Installation		monokristalline Zellen				polykristalline Zellen				Alle Anlagen
		SD	SD	F	FD	SD	SD	F	FD	
Bauart		auf	int	auf	-	auf	int	int	-	
Anzahl Anlagen		37	4	1	21	27	1	2	19	112
min	kWh/kWp	569	637		377	90		478	325	90
max	kWh/kWp	1'103	817		1'053	978		1'044	1'093	1'103
Mittelwert	kWh/kWp	792	726	1'029	756	763	850		865	799
hoch	kWh/kWp	851	763		837	860		478	955	883
tief	kWh/kWp	734	689		675	667		1044	775	716

Tab. 6: Spezifischer Ertrag pro installierte Leistung (Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung) von 112 Anlagen in der Schweiz (Inbetriebnahme 1989 bis 1994) in Abhängigkeit des Zellentyps, der Installation und der Bauart. Daten von Meier (1999).  
SD: Schrägdach; F: Fassade; FD: Flachdach; auf: aufgesetzt; int: (fassaden- resp. dach-)integriert.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Übersicht

Zur Beurteilung der verschiedenen Stromerzeugungsvarianten wurden die Umweltauswirkungen der Anlagen mit der Methode Eco-indicator 99 bewertet. Im Folgenden werden die Gesamtergebnisse gezeigt und verglichen. In einer Dominanzanalyse wird anschliessend untersucht, welche Anlageneigenschaften für die Bewertung der Umweltauswirkungen relevant sind. Ausserdem wird aufgezeigt, welchen Einzelemissionen bei der Bewertung eine besonders hohe Bedeutung zukommt.

### 4.2 Eco-indicator 99 Ergebnisse

Von den drei im Eco-indicator 99 verwendeten Bewertungsperspektiven „Egalitarist“ (E), „Hierarchist“ (H) und „Individualist“ (I) wird diejenige des „Hierarchisten“ als Grundlage zur Quantifizierung des globalen Kriteriums für Ökostrom vorgeschlagen. Die Sichtweise des „Individualisten“ gewichtet den Verbrauch mineralischer Erze sehr stark und wird aus diesem Grund nicht empfohlen. Die Sichtweise des „Egalitaristen“ ist in den Ergebnissen derjenigen des „Hierarchisten“ sehr ähnlich.

#### 4.2.1 Wasserkraftwerke

Tab. 7 zeigt das bewertete Inventar für die Stromproduktion mit Wasserkraft. Das Trinkwasserkraftwerk schneidet bei allen Bewertungsperspektiven am besten ab. Dies liegt daran, dass bei diesem Kraftwerkstyp lediglich die für die Strombereitstellung zusätzlich notwendigen Aufwendungen und Emissionen angerechnet werden. Die übrigen Aufwendungen werden der Trinkwasserbereitstellung zugeteilt. Vergleichsweise schlecht schneiden die beiden Kleinwasserkraftwerke ab. Die beiden grossen Wasserkraftwerke liegen gut 10 bis 40% tiefer als die Kleinwasserkraftwerke.

El 99- $\mu$ Punkte/kWh	Egalitarist	Hierarchist	Individualist
Hochdruckkraftwerk	400	428	407
Kleinwasserkraftwerk 1	425	461	486
Kleinwasserkraftwerk 2	590	634	702
Trinkwasserkraftwerk	49.3	41.4	65.2
Laufwasserkraftwerk	418	367	360
Speicherkraftwerk	432	371	385

Tab. 7: Bewertetes Inventar für die Stromproduktion mit Wasserkraft in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive. Angaben in Eco-indicator 99- $\mu$ Punkten pro kWh Strom.

Abb. 8 zeigt einen grafischen Vergleich der verschiedenen Wasserkraftwerke aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

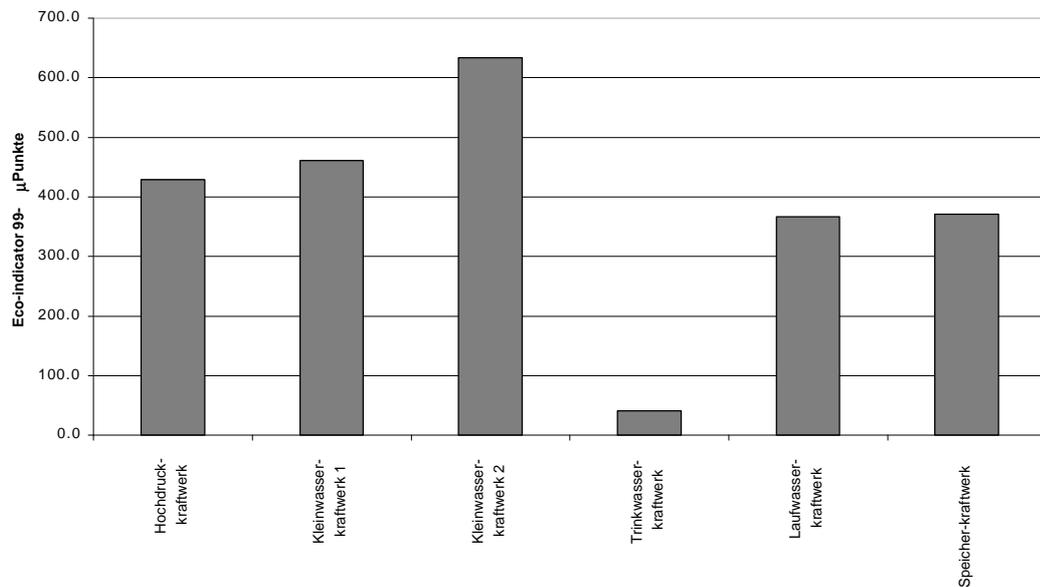


Abb. 8: Eco-indicator 99-μPunkte pro kWh Strom aus Wasserkraftanlagen aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

#### 4.2.2 Windkraftwerke

Tab. 8 zeigt das bewertete Inventar für die Stromproduktion mit Windkraftwerken. Mit zunehmender Anlagegrösse sinkt die spezifische Umweltbelastung pro produzierte kWh. Mit Abstand die höchste Umweltbelastung wurde für das kleine 1kW Windkraftwerk auf dem Lötschbergpass berechnet.

EI 99-μPunkte/kWh	Egalitarist	Hierarchist	Individualist
Sool	7'160	6'700	37'100
Simplon	5'440	5'080	28'200
Schaber	14'400	13'400	63'000
Grenchenberg	2'080	2'000	6'660
Chürstein	3'710	3'500	10'500
Diegenstal	25'100	23'000	82'100
Hettlingen	28'900	26'400	79'900
Beringen	22'000	20'100	64'100
Mont Croisin	1'180	1'160	4'500
Titlis	10'400	9'680	54'000
Lötschbergpass	140'000	127'000	337'000

Tab. 8: Bewertetes Inventar für die Stromproduktion mit Windkraftwerken in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive. Angaben in Eco-indicator 99-μPunkten pro kWh Strom.

Abb. 9 zeigt einen grafischen Vergleich der verschiedenen Windkraftwerke aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

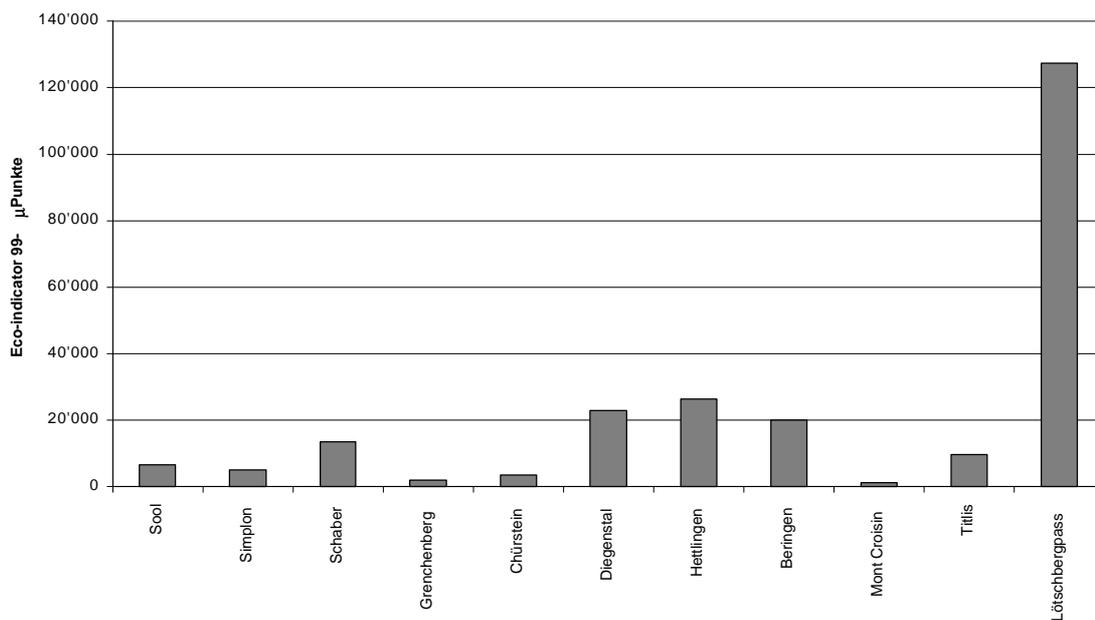


Abb. 9: Eco-indicator 99-μPunkte pro kWh Strom aus Windkraftanlagen aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

### 4.2.3 Biogasanlagen

Tab. 9 zeigt das bewertete Inventar für die Stromproduktion mit Biogasanlagen. Bei den Bewertungsperspektiven (E) und (H) sind die Ergebnisse aller Anlagen negativ, d.h. die Anlagen verursachen – im Vergleich zu einer reinen Kompostieranlage – eine geringere Umweltbelastung. Die negativen Werte sind durch das Vorgehen bei der Allokation zwischen Stromerzeugung und Kompostierung bedingt, das in Unterkapitel 3.4 beschrieben und in Unterkapitel 6.3 diskutiert wird.

EI 99-μPunkte/kWh	Egalitarist	Hierarchist	Individualist
Kompogas Bachenbülach	-3'230	-4'570	10'200
Kompogas Otefingen	-13'900	-17'000	-1'530
Kompogas Rümlang	-6'080	-7'700	4'570
Kompogas Samstagen	-18'600	-23'000	5'980
Kompogas Uzwil	-7'880	-9'540	1'430
Kompogas Seeland	-22'100	-31'600	76'700
SA Compost Chablais-Riviera	-7'670	-10'200	28'400
Kompostier- und Vergäranlage Allmig	-31'700	-32'400	81'400
ROMOPUR Frauenfeld	-31'600	-38'200	152'000

Tab. 9: Bewertetes Inventar für die Stromproduktion mit Vergärungsanlagen (Biogasanlagen) in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive. Angaben in Eco-indicator 99-μPunkten pro kWh Strom.

### 4.2.4 Photovoltaikanlagen

Tab. 10 zeigt das bewertete Inventar für die Stromproduktion mit Photovoltaikanlagen. Die verschiedenen Anlagen unterscheiden sich recht deutlich voneinander. Insbesondere Anlagen mit polykristallinen Zellen und unterdurchschnittlichem Ertrag sowie die fassadenintegrierten Anlagen weisen deutlich erhöhte Werte auf.

EI 99-µPunkte/kWh			Egalitarist	Hierarchist	Individualist	
Monokristallin	Schrägdach aufgesetzt	mittel	9'290	8'780	26'700	
		hoch	8'640	8'170	24'900	
		niedrig	10'000	9'470	28'900	
	Schrägdach integriert	mittel	8'890	8'280	25'000	
		hoch	8'460	7'880	23'800	
		niedrig	9'360	8'710	26'400	
	Fassade aufgesetzt <sup>1)</sup>			7'090	6'730	20'800
	Flachdach	mittel	9'860	9'400	28'400	
		hoch	8'890	8'500	25'600	
		niedrig	11'100	10'500	31'800	
	Polykristallin	Schrägdach aufgesetzt	mittel	14'200	13'000	31'100
			hoch	12'600	11'600	27'600
niedrig			16'200	14'900	35'600	
Schrägdach integriert			12'200	11'100	26'200	
Fassade integriert		hoch	9'540	8'710	20'400	
		niedrig	20'800	19'000	44'600	
Flachdach		mittel	12'600	11'700	27'800	
		hoch	11'400	10'600	25'200	
		niedrig	14'100	13'000	31'000	

Tab. 10: Bewertetes Inventar für die Stromproduktion mit Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive pro kWh Strom. Abstufung nach dem Mittelwert und der Standardabweichung (mittel, hoch, tief) des Ertrags von 112 ausgemessenen Anlagen.  
<sup>1)</sup>: Panels sind geneigt montiert.

Abb. 10 zeigt einen grafischen Vergleich der verschiedenen Photovoltaikanlagen aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

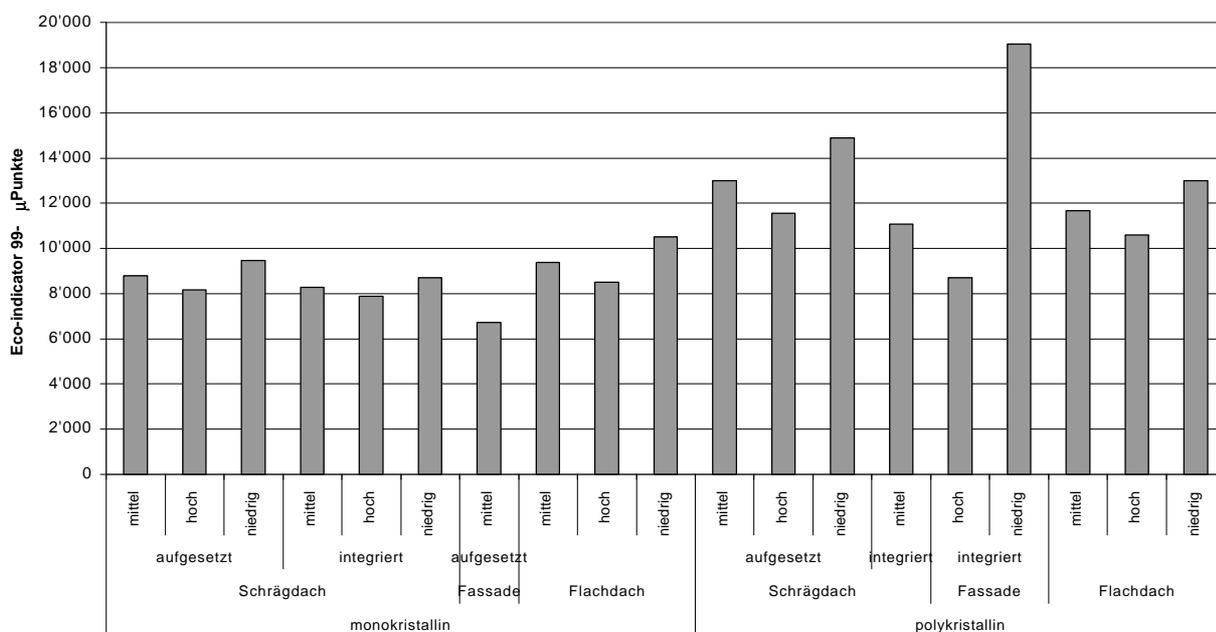


Abb. 10: Eco-indicator 99-µPunkte pro kWh Strom aus Photovoltaikanlagen aus der Bewertungsperspektive des Hierarchisten.

### 4.2.5 Referenzsysteme

Die bisher gezeigten Resultate lassen für sich alleine keinen Schluss darüber zu, ob die vier analysierten Energieträger nun besonders umweltfreundlich Strom produzieren oder ob Systeme auf der Basis nicht erneuerbarer Energien ähnliche oder gar tiefere Werte erzielen. Aus diesem Grund werden hier die bewerteten Inventare von vier Stromerzeugungstechnologien und dem schweizerischen Produktionsmix gezeigt (siehe Tab. 11).

Eco-indicator 99- µPunkte	Kernkraftwerk in der Schweiz	gasbefeuetes Gas und Dampf Kraftwerk	ölthermisches Kraftwerk in der Schweiz	Steinkohle- kraftwerk in Deutschland	Strompro- duktionsmix Schweiz	Strompro- duktionsmix UCPTE
Egalitarist	7'056	23'292	50'760	47'880	3'672	27'864
Hierarchist	6'264	27'900	61'560	28'044	3'442	24'624
Individualist	6'624	6'624	30'276	39'240	3'218	25'560

Tab. 11: Eco-indicator 99-µPunkte pro kWh Strom aus Kernkraft, sowie aus mit Erdgas, Heizöl resp. Steinkohle befeuerten Kraftwerken, für den schweizerischen und den westeuropäischen Produktionsmix in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive.

Aus einer hierarchistischen (H) und egalitaristischen (E) Perspektive des Eco-indicators 99 ist der Kernkraftstrom deutlich weniger umweltbelastend als Strom aus fossilen Quellen. Der Individualist gewichtet die Umweltbelastungen eines modernen Gas und Dampfkraftwerkes etwa gleich wie diejenigen eines Kernkraftwerkes. Strom aus Öl- oder Steinkohlekraftwerken sind aber auch aus dieser Perspektive deutlich umweltschädigender als Strom aus einem Kernkraftwerk.

Beim schweizerischen Produktionsmix macht sich der hohe Wasserkraftanteil, beim westeuropäischen Produktionsmix der hohe Anteil fossiler Stromerzeugung deutlich bemerkbar.

### 4.2.6 Vergleichende Betrachtung

Im Vergleich der vier verschiedenen Stromerzeugungsarten untereinander zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Wasserkraft weist erwartungsgemäss die tiefsten Werte auf. Die Kleinwasserkraftwerke weisen zwar im Vergleich zu den Grosskraftwerken höhere spezifische Umweltbelastungen auf. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich zu z.B. Windenergieanlagen bescheiden.

Bei den Windenergieanlagen sind die sehr kleinen Anlagen (<15kW) deutlich weniger effizient als die Anlagen ab ca. 30kW. Zudem liegen die Umweltbelastungen im Vergleich zur Wasserkraft um etwa einen Faktor 2.5 (Mont Croisin) bis 15 (Simplon, Sool) höher.

Die Biogasanlagen weisen gar negative Werte auf, führen somit im Vergleich zur Grüngutbehandlung in einer offenen Kompostieranlage (Kompostherstellung *ohne* Stromerzeugung) zu tieferen Umweltbelastungen. Bezüglich Teibhausgasemissionen alleine sieht die Bilanz aber deutlich weniger vorteilhaft aus.

Die Umweltbelastung der Photovoltaikanlagen liegt etwa im Bereich der Umweltbelastung kleinerer Windkraftanlagen (z.B. Titlis). Somit weist die Elektrizität aus manchen Photovoltaikanlagen mit die höchste Umweltbelastung (ausgedrückt in Eco-indicator 99 Punkten) der hier betrachteten Technologien auf der Basis erneuerbarer Energien auf.

Insgesamt zeigt die Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer Energien nicht eine *à priori* bessere Ökobilanz im Vergleich zur konventionell-thermischen Erzeugung. Die Umwelteffekte des Kernenergiestroms beispielsweise werden mit der hier verwendeten Bewertungsmethode und –perspektive tiefer gewichtet als Strom aus Photovoltaikanlagen.

Da in Ökobilanzen Risikoaspekte und Aspekte der Proliferation nicht berücksichtigt werden und der Verbrauch der Ressource Uran im Eco-indicator 99 mangels Daten nicht gewichtet wird, ist der tiefe Wert der Kernenergie jedoch nur bedingt aussagekräftig.

### 4.3 Dominanzanalysen

Um sich ein besseres Bild über das Zustandekommen der Ergebnisse machen zu können, sollen in den folgenden Abschnitten für die bilanzierten Systeme diejenigen Schadstoffe und Prozesse erwähnt werden, die das Gesamtergebnis in Eco-indicator 99-Punkten massgeblich prägen.

#### 4.3.1 Wasserkraftwerke

Für die Wasserkraft verursacht die Infrastruktur (d.h. der Kraftwerksbau) neben der Flächeninanspruchnahme während des Betriebs die gesamten Umweltbelastungen. Die Nutzung der Energieresource Wasser wird nicht bewertet. Unter den Infrastrukturaufwendungen sind die Baustoffe Stahl und Zement sowie der Verbrauch von Treibstoff für Baumaschinen wichtige Einflussgrößen in allen drei Bewertungsperspektiven.

Wichtigste Einzelparameter für die Bewertung der Kleinwasserkraftwerke sind in der Perspektive des Egalitaristen (E) bzw. Hierarchisten (H) die Flächeninanspruchnahme, der Ressourcenverbrauch von Rohöl und die Feinpartikel-Emissionen.

#### 4.3.2 Windkraftwerke

Auch für die Stromerzeugung mit Windkraft bestimmt die Infrastruktur, d.h. die Konstruktionsaufwendungen für den Turm und das Fundament sowie für die bewegten Teile (Generator und Rotor), das Ergebnis. Für die Perspektiven (E) und (H) sind bewegte und unbewegte Teile je etwa zur Hälfte an der Gesamtumweltbelastungen beteiligt, für die Perspektive (I) dominiert die bewegliche Infrastruktur mit über 70%. In dieser Perspektive kommt dem Ressourcenverbrauch von Kupfer mit über 50% an den Gesamtbelastungen eine besonders hohe Bedeutung zu. Direkte Aufwendungen für den Betrieb (Getriebeöl) tragen nur etwa 1% zur Gesamtbewertung bei.

Wichtigste Einzelparameter für die Bewertung mit dem Eco-indicator 99 sind der Ressourcenverbrauch von Rohöl (E, H) resp. von Kupfererz (I). Wichtig sind auch Feinpartikel- und Zink-Emissionen in die Luft.

#### 4.3.3 Biogasanlagen

Für Vergärungsanlagen (die Kompost und Strom produzieren) wie auch für reine Kompostieranlagen sind die Schwermetallemissionen auf Grund der Kompostverwendung die wichtigste Emissionsquelle unabhängig von der gewählten Bewertungsperspektive. Für die Perspektive (I) sind zusätzlich die Methan-Emissionen und die Verbrennungsemissionen des Blockheizkraftwerkes von Bedeutung. Für die dem erzeugten Strom zugeordnete Umweltbelastung sind die direkten Ammoniak-Emissionen, der Diesel-Verbrauch und die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen wichtige Einflussparameter. Insbesondere die höheren Ammoniak-Emissionen aber auch der höhere Dieselbedarf

und die damit verbundenen erhöhten Stickoxid- und Feinpartikel-Emissionen bei reinen Kompostieranlagen sind für die negativen Gesamtwerte hauptverantwortlich.

#### 4.3.4 Photovoltaikanlagen

Für Photovoltaikanlagen ist die Infrastruktur unabhängig von der gewählten Perspektive die wichtigste Einflussgrösse. Wichtigste Einzelparameter sind der Ressourcenverbrauch von Kohle (E), Rohöl (H) bzw. Kupfererz (I). Weiter sind Feinpartikel- und SO<sub>x</sub>-Emissionen in die Luft von Bedeutung. Insgesamt sind die Bilanzen der Photovoltaik stark durch die Umweltbelastung der Strombereitstellung in Westeuropa geprägt.

#### 4.3.5 Referenzsysteme

Als Referenzsysteme wurden der bestehende Stromproduktionsmix der Schweiz und Westeuropas sowie die Stromerzeugung mit einem Kernkraftwerk, einem Gas und Dampf (GuD) Kraftwerk, einem ölthermischen und einem Steinkohlekraftwerk betrachtet (Sachbilanzdaten aus Frischknecht et al. 1996 und Frischknecht 1998).

Für das Kernkraftwerk ist die Flächeninanspruchnahme (durch Schlammteiche der Uranaufbereitung während ca. 80'000 Jahren) der wichtigste einzelne Bewertungsindikator (40% bis 70%). Die Langzeitemissionen von Radon-222 aus den uranhaltigen Schlammteichen steuern aus Sicht des Egalitaristen, Hierarchisten bzw. Individualisten einen Anteil von 10%, 15% respektive 31% bei.

Für das Gas und Dampf Kraftwerk sind der Verbrauch von Erdgas (E, H) bzw. die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit jeweils über 75% Anteil die wichtigsten Einzelindikatoren. Für das in der Schweiz (noch) betriebene ölthermische Kraftwerk sind der Verbrauch der Ressource Erdöl (E, H) resp. die CO<sub>2</sub>-Emissionen (I) relevant. Beim durchschnittlichen deutschen Steinkohlekraftwerk sind es der Verbrauch der Ressource Steinkohle (E) resp. die CO<sub>2</sub>-Emissionen (H, I). Für den schweizerischen Stromproduktionsmix dominieren der Flächenverbrauch (E, H) bzw. die Nutzung von Kupfererz (Stromverteilnetz).

## 5 Empfehlung Ökolabel-Grenzwert

Das einleitend beschriebene Konzept des Vereins für umweltgerechte Elektrizität sieht vor, dass stromerzeugende Technologien auf der Basis erneuerbarer Energien beim globalen Kriterium einen Grenzwert zu unterschreiten haben, um das Ökolabel (Niveau 1) verwenden zu dürfen (siehe Abb. 1). Diese Bedingung ist notwendig, nicht aber hinreichend, da die Systeme zusätzlich lokale, energieträgerspezifische Kriterien erfüllen müssen.

Aufgrund der Ökobilanzergebnisse der verschiedenen bestehenden Anlagen und Anlagentypen wird ein Grenzwert gemäss des in Tab. 12 gezeigten Wertes der Bewertungsperspektive „Hierarchist“ vorgeschlagen. Er entspricht 50% der Umweltbelastung eines modernen gasbefeuerten Gaskombikraftwerkes.

Für Neuanlagen, insbesondere neue Photovoltaikanlagen wird ein tieferer Grenzwert festgelegt. Die Umweltbelastung darf bei Neuanlagen maximal 33% der Umweltbelastung des Gaskombikraftwerkes betragen. Zur Überprüfung des globalen Kriteriums für Neuanlagen sind jedoch gleichzeitig auch aktuellere Sachbilanzdaten, in erster Linie der Solarzellen-Herstellung, zugrunde zu legen.

Zur Orientierung wird gleichzeitig auch das Verhältnis des Grenzwertes zu den Ökobilanzergebnissen anderer stromerzeugender Technologien aufgeführt. Daraus wird ersichtlich, dass der Grenz-

wert mindestens um einen Faktor zwei tiefer liegt als die Stromerzeugung auf der Basis fossiler Energieträger (Heizöl, Erdgas, Kohle) und dem westeuropäischen Verbundstrom (Strommix UCPTÉ). Gegenüber dem schweizerischen Produktionsmix mit rund 60% Wasserkraft und der in Kernkraftwerken erzeugten Elektrizität liegt der Grenzwert aber um 120% bis gut 300% höher (Egalitaristen- und Hierarchistenperspektive, Störfälle und Proliferationsprobleme bei der Kernenergienutzung nicht berücksichtigt).

	<b>Grenzwert Ökostrom</b>	Strom ab KKW CH	gasbefeuerter Gas und Dampf Kraftwerk	ölthermisches Kraftwerk in CH	Steinkohlekraftwerk in Deutschland	Stromproduktionsmix Schweiz	Stromproduktionsmix UCPTÉ
	<b>Eco-indicator 99-µPunkte</b>						
Egalitarist	<b>11'600</b>	165%	50.0%	22.9%	24.3%	317%	41.8%
Hierarchist	<b>13'950</b>	223%	50.0%	22.7%	49.7%	405%	56.7%
Individualist	<b>3'310</b>	50.0%	50.0%	10.9%	8.4%	103%	13.0%

Tab. 12: Festlegung des Grenzwertes für 1kWh Ökostrom in der Schweiz in Abhängigkeit der Bewertungsperspektive. Vergleich des Grenzwertes mit den Eco-indicator 99-Werten von vier konventionellen Stromerzeugungsarten resp. dem schweizerischen und westeuropäischen Produktionsmix.

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse der Vergleiche der bilanzierten Anlagen mit dem vorgeschlagenen Grenzwert für Ökostrom gezeigt.

### 5.1 Wasserkraftwerke

Für die Stromerzeugung aus Wasserkraft liegen alle untersuchten Anlagen für alle Bewertungsperspektiven deutlich (d.h. 95% und höher) unter dem Grenzwert für Ökostrom. Abb. 11 zeigt den Vergleich aus der hier empfohlenen Perspektive des Hierarchisten.

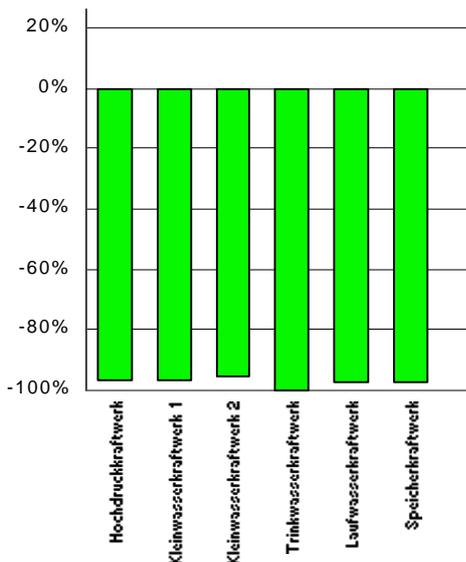


Abb. 11: Vergleich der untersuchten Wasserkraftanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom aus Sicht des Hierarchisten.

## 5.2 Windkraftwerke

Abb. 12 zeigt den Vergleich der Ergebnisse für Windkraftwerke mit dem Grenzwert aus Sicht des Hierarchisten. Hier zeigt sich ein gemischtes Bild, indem die Umweltbelastung bei einigen Anlagen über dem Grenzwertwert liegt. Dies gilt für die sehr kleinen Anlagen. Der überwiegende Anteil der gesamtschweizerischen Windenergieproduktion (Mont Croisin, Grenchenberg und Chürstein) unterschreitet den Grenzwert jedoch deutlich.

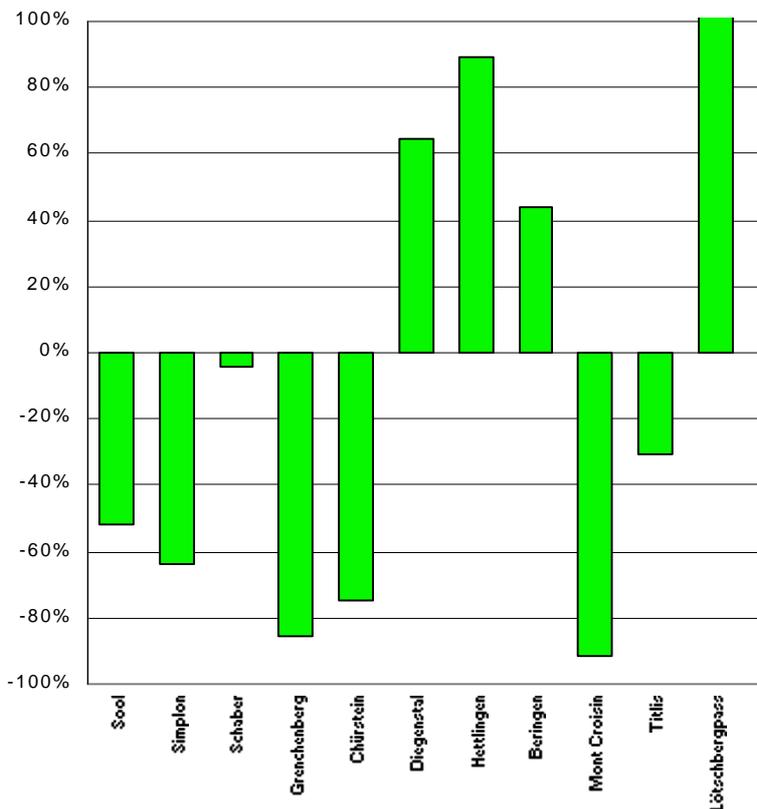


Abb. 12: Vergleich der untersuchten Windkraftanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom aus Sicht des Hierarchisten.

## 5.3 Biogasanlagen

Abb. 13 zeigt den Vergleich der Ergebnisse für Biogasanlagen mit dem Grenzwert aus Sicht des Hierarchisten. Da die Vergärungsanlagen im Vergleich zur durchschnittlichen, zürcherischen reinen Kompostieranlage weniger Umweltbelastung verursachen, kann der Strom als umweltbelastungsfrei betrachtet werden. Somit liegen in der Bewertungsperspektive des Hierarchisten alle Anlagen unterhalb des Grenzwertes.

Wird der Strom aus Vergärungsanlagen mit dem Grenzwert belastet und die restliche Umweltbelastung auf den gleichzeitig erzeugten Kompost umgelegt, so liegt die Umweltbelastung des Kompostes um lediglich 0.6% tiefer gegenüber der Situation, wenn die gesamte Umweltbelastung der Vergärungsanlage auf den Kompost überwält würde. Dies zeigt, dass Biogasstrom lediglich einen sehr geringen Anteil der Gesamtumweltbelastung von Vergärungsanlagen übernehmen kann.

Der Kompost der Vergärungsanlage Seeland liegt ebenfalls unterhalb des Grenzwertes, obwohl diese Anlage mehr Netzstrom bezieht als sie selber Biogasstrom ins Netz einspeist. Sie entspricht damit eher der Art eines Pumpspeicherkraftwerkes (die als nicht ökostromtauglich betrachtet

werden). Um derartige „Veredelungs“-Effekte aber zu verhindern, sind im Rahmen der lokalen Kriterien entsprechende Anforderungen zu formulieren (z.B. Netzstrombezug < 20% der produzierten Biogasstrommenge).

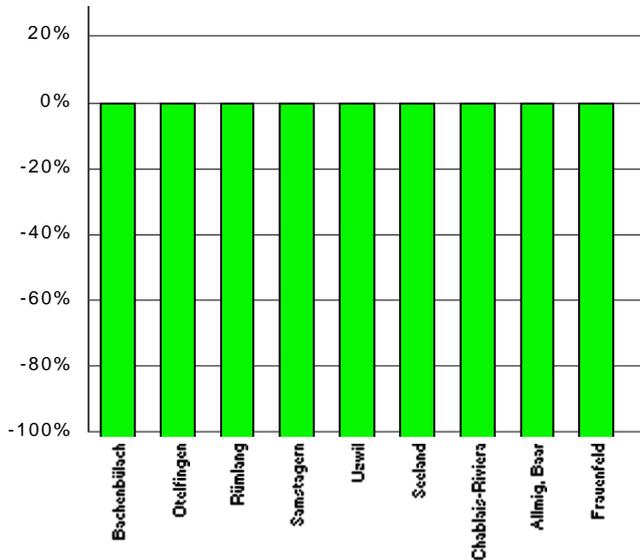


Abb. 13: Vergleich der untersuchten Vergärungsanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom aus der Perspektive des Hierarchisten.

## 5.4 Photovoltaikanlagen

Abb. 14 zeigt den Vergleich der Ergebnisse für Photovoltaikanlagen mit dem Grenzwert aus Sicht des Egalitaristen. Auffallend ist der deutliche Unterschied zwischen Anlagen mit mono- und Anlagen mit polykristallinen Solarzellen. Die Tatsache, dass die Sägeabfälle polykristalliner Wafer nicht rezykliert werden können, ist ein Hauptgrund für den höheren Aufwand und die damit verbundenen höheren Umweltbelastungen. Bei den Anlagen mit polykristallinen Zellen unterschreitet einzig die Flachdachanlage mit überdurchschnittlichem Ertrag den Grenzwert.

Mit der hier empfohlenen hierarchistischen Bewertungsperspektive liegt die Umweltbelastung der Strombereitstellung der Anlagen mit polykristallinen Zellen und unterdurchschnittlichen Erträgen *über* dem Grenzwert (Abb. 15). Bei den Anlagen mit monokristallinen Solarzellen wird der Grenzwert von allen Anlagentypen unterschritten.

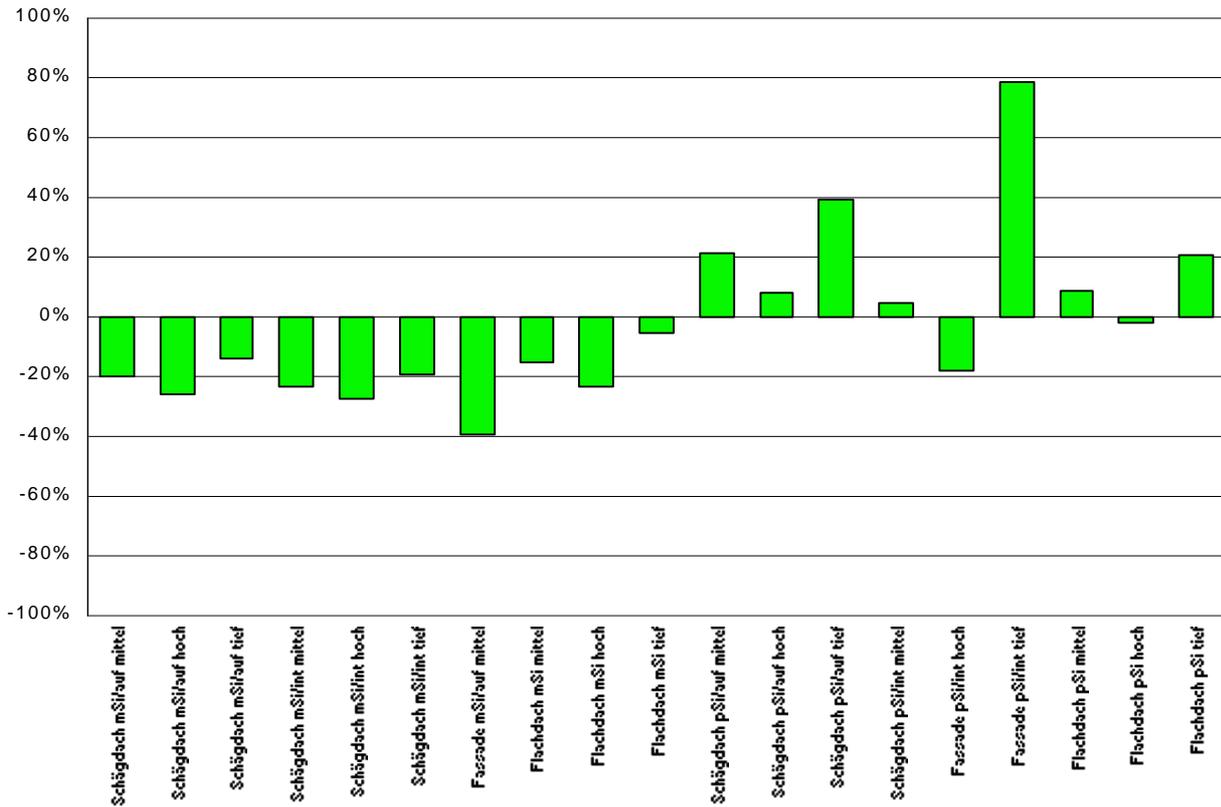


Abb. 14: Vergleich der untersuchten Photovoltaikanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom aus der Perspektive des Egalitaristen.

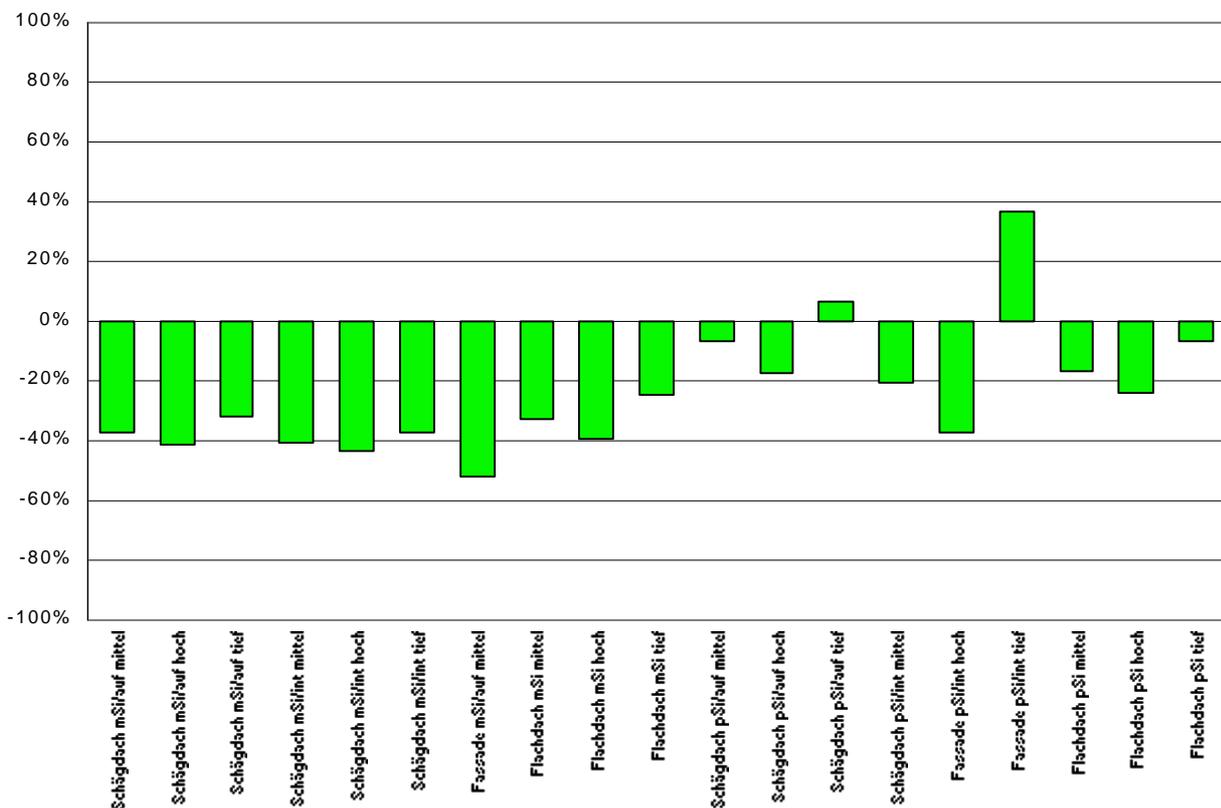


Abb. 15: Vergleich der untersuchten Photovoltaikanlagen mit dem Grenzwert für Ökostrom aus der Perspektive des Hierarchisten.

## 6 Einschätzung der Datenqualität

Im Folgenden werden die gezeigten Ergebnisse diskutiert und eine Einschätzung zur Datenqualität gegeben. Dieses Kapitel zeigt auch auf, wo zukünftige Verbesserungen der Ökostromprüfung sinnvoll und denkbar sind.

### 6.1 Wasserkraftwerke

Die Varianz der Umweltbelastungen bei verschiedenen Kleinwasserkraftwerken werden mit den gewählten Einflussparametern Anlagengrösse und verkaufter Strom relativ zuverlässig erfasst. Nicht resp. nur sehr rudimentär erfasst werden mit der Bewertungsmethode Eco-indicator 99 die u.U. relevanten Auswirkungen auf Ökosysteme durch die Wasserentnahme oder die Barrierenwirkung der Anlagen. Diese Auswirkungen können besser über die lokalen Prüfkriterien bewertet werden.

Aus Geheimhaltungsgründen konnten die Umweltauswirkungen einer Reihe von Materialien für die betrachteten Kleinwasserkraftwerke nur mit dem Energieverbrauch und nicht mit den produktionsspezifischen Emissionen abgeschätzt werden.

Alle Anlagen (grosse wie kleine) liegen deutlich unter dem hier vorgeschlagenen Ökostrom-Grenzwert. Es gibt keine aussergewöhnlich grossen Schwankungen zwischen den Anlagen (Ausnahme Trinkwasserkraftwerke).

### 6.2 Windkraftwerke

Die Varianz der Umweltbelastungen bei verschiedenen Windkraftanlagen werden mit den gewählten Einflussparametern Anlagengrösse (Turmhöhe, installierte Leistung) und verkaufter Strom relativ zuverlässig erfasst. Aus den vorliegenden Anlagedaten war ersichtlich, dass es über die Jahre hinweg relativ starke Schwankungen beim Stromertrag gab. Es wird vorgeschlagen, als Eingabegrösse für die Beurteilung den mittleren Stromertrag seit Anlagenbau zu verwenden. Nicht bewertet werden mit dem Eco-indicator 99 Einflüsse auf das Landschaftsbild und Lärmemissionen der Anlagen. Diese Auswirkungen können über die lokalen Kriterien erfasst werden.

Zur Beurteilung der Windkraftnutzung wurden mittelgrosse Anlagen bilanziert (30kW und 150kW). Die Aufwendungen für die Infrastruktur wurden für grosse und kleine Anlagen entsprechend der Anlagengrösse linear skaliert. Es ist unklar inwieweit diese Annahme für sehr kleine (<5kW) und sehr grosse (>200 kW) Anlagen zu realistischen Ergebnissen führt. Das gewählte Vorgehen führt insbesondere für sehr kleine Anlagen zu einer relativ hohen spezifischen Umweltbelastung.

### 6.3 Biogasanlagen

Die Varianz der Umweltbelastungen bei verschiedenen Kompostierungsanlagen werden mit den gewählten Einflussparametern Strom- und Dieserverbrauch und verkaufter Strom bzw. erzeugtes Biogas relativ zuverlässig erfasst. Nicht individuell erfasst werden die relevanten NH<sub>3</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen aus dem Anlagenbetrieb. Nach Möglichkeit sollten hierzu Daten anlagenspezifisch erhoben und als zusätzliche Kenngrössen mitberücksichtigt werden.

Die wichtigste Frage für die Beurteilung der Stromerzeugung bei der Kompostierung von Abfällen, ist das Vorgehen bei der Allokation (Aufteilung) der Umweltbelastung zwischen Stromerzeugung und Kompostierung. Für diese Studie wurde die durchschnittliche Umweltbelastung der kantonal-zürcherischen reinen Kompostierungsanlagen von der Umweltbelastung der zu untersuchenden Vergärungsanlagen subtrahiert und der verbleibende Rest dem in den Vergärungsanlagen erzeugten Strom zugeschlagen. Deutliche Unterschiede in den Betriebsaufwendungen zwischen reinen Kompostierungsanlagen und Vergärungsanlagen sind mit Ausnahme des in Kompostieranlagen höheren Dieselbedarfs nicht festzustellen. Für eine Reihe von Anlagen und Bewertungsgrößen führt diese Art der Berechnung zu einer negativen Umweltbelastung, d.h. die Umweltbelastungen der durchschnittlichen Kompostierung waren meist höher als diejenige der Vergärungsanlagen.

Die meisten Anlagen liegen deshalb deutlich unter dem Ökostrom-Grenzwert. Dieses Ergebnis könnte sich verändern, wenn als Referenzanlage nicht die durchschnittliche sondern eine optimal und energieeffizient betriebene und damit weniger umweltbelastende Kompostieranlage verwendet würde. Zudem ist zu überprüfen, ob die Ammoniakemissionen in reinen Kompostieranlagen systematisch höher liegen als in Vergärungsanlagen.

Zur Beurteilung der Kompostierung ist auch die Frage von Bedeutung, wie die Schwermetallemissionen des Komposts bewertet werden. Für die Bewertung der Stromerzeugung spielen sie auf Grund des gewählten Vorgehens für die Aufteilung der Umweltbelastungen zwischen Strom und Kompost aber keine Rolle.

## 6.4 Photovoltaikanlagen

Die Varianz der Umweltbelastungen bei verschiedenen Photovoltaikanlagen werden mit den gewählten Einflussparametern Anlagengröße und verkaufter Strom relativ zuverlässig erfasst. Es sind keine wesentlichen Umweltauswirkungen von Photovoltaikanlagen bekannt, die mit dem Eco-indicator 99 nicht bewertet werden. Die Flächeninanspruchnahme wird nicht bewertet, da die hier untersuchten Anlagen auf bereits bebauten Flächen (z.B. Hausdächern) montiert sind, die in erster Linie zu Wohn- und anderen Zwecken genutzt werden.

Auf Grund der in den letzten Jahren erfolgten Weiterentwicklungen bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen (Energieverbrauch bei der Herstellung, Schichtdicke der Wafer), ist zu vermuten, dass die Umweltbelastungen im Vergleich zu den hier verwendeten Daten eher gesunken sind. Um dies zu berücksichtigen, müsste aber das Ökobilanzinventar für den gesamten Herstellungsprozess überarbeitet werden.

## 7 Folgerungen

Die Ökobilanzuntersuchungen der Strombereitstellung mit Wasserkraft, Windenergie, Biogas und Photovoltaik haben bei Verwendung der Bewertungsmethode Eco-indicator 99, hierarchistische Perspektive, zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Wasserkraft weist mit Abstand die tiefsten Umweltbelastungen pro kWh Strom auf.
- Biogasanlagen belasten die Umwelt weniger als durchschnittliche reine Kompostieranlagen. Deshalb sind die Umweltbelastungen der zusätzlich produzierten Elektrizität vernachlässigbar.
- Bei Windkraftanlagen ist die Umweltbelastung von der Grösse der Anlage und dem spezifischen Ertrag abhängig. Grosse Anlagen liegen im Bereich von Kleinwasserkraftwerken, kleine Anlagen weisen ähnliche Werte auf wie Photovoltaikanlagen.
- Strom aus Photovoltaikanlagen, die zwischen 1989 und 1994 in Betrieb genommen wurden, verursachen im Schnitt die höchste Umweltbelastung der hier untersuchten Energiesysteme.

Wird der Grenzwert als globales Kriterium zur Vergabe eines Labels für Ökostrom bei der  *Hälfte*  der Umweltbelastung eines modernen gasbefeuerten Gas und Dampf Kraftwerkes angesetzt, so hat dies zur Konsequenz, dass

- die Umweltbelastung der Elektrizität  *kleiner Windkraftanlagen*  und von  *Photovoltaikanlagen*  mit  *polykristallinen Zellen*  und  *tiefem Ertrag über*  dem Grenzwert liegt,
- die Umweltbelastung der Elektrizität der  *Wasserkraftwerke, grosser Windkraftanlagen*  und von  *Biogasanlagen*  deutlich  *unter*  dem Grenzwert liegt,
- die Umweltbelastung der Elektrizität aus  *Kernkraftwerken*  (hier als eine der Referenztechnologien verwendet) ebenfalls  *unterhalb*  des Grenzwertes liegt<sup>2</sup>.

Ein Vergleich mit andern Bewertungsmethoden zeigt, dass die Umweltbelastung durch die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien vergleichbar ist mit derjenigen von modernen gasbefeuerten Kraftwerken. Bezüglich der Schonung nicht erneuerbarer Energieträger weisen Wasser-, Wind-, Biogas- und Solarkraftwerke meist erkennbare bis deutliche Vorteile auf.

---

<sup>2</sup> Da es sich dabei um eine Technologie auf der Basis nicht erneuerbarer Energie handelt, ist Kernenergiestrom aber nicht zur Ökostromprüfung zugelassen.

## 8 Kritische Würdigung und Ausblick

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Untersuchungen basieren auf Sachbilanzen, die Anfang (Wasserkraft und Photovoltaik), Mitte (Windkraft) resp. Ende (Biogas) der neunziger Jahre publiziert worden sind. In einigen Bereichen müssen deshalb zwangsläufig Einschränkungen bezüglich der Datenqualität gemacht werden.

Die Sachbilanzen der grossen und der ganz kleinen Windkraftanlagen wurden aus den Bilanzen für 30 resp. 150kW-Anlagen extrapoliert. Bei den Photovoltaikanlagen wurde auf eine fallspezifische Bilanzierung der Aufwendungen insbesondere von gebäudeintegrierten Anlagen ebenso verzichtet werden wie auf eine Aktualisierung der Daten zur Herstellung der Wafer und der Solarpanels. Aufgrund der neu in Betrieb genommenen Fabrikationsanlagen sind hier deutliche Reduktionen im Aufwand zu erwarten. Eine Bilanzierung auf der Basis der Betriebsdaten dieser neuen Fabrikationsstätten steht jedoch noch aus. Für Neuanlagen, bei denen ein tieferer Grenzwert zur Anwendung gelangt, sollen der Ökostromprüfung aktuellere Sachbilanzdaten zugrundegelegt werden.

Bei den Biogasanlagen sind die *in situ*-Emissionen (insb. Ammoniak) für die Höhe der Umweltbelastung (auch und gerade im Vergleich mit reinen Kompostieranlagen) sehr bedeutsam. Da Schadstoffmessungen mit einem erheblichen Aufwand verbunden sind, musste im Rahmen dieses Projektes auf Daten zu anlagenspezifischen Emissionen verzichtet werden.

Die verfügbaren Daten zu Kleinwasserkraftwerken haben zum Schluss geführt, dass auch kleine Anlagen keine Probleme haben, den Grenzwert für Ökostrom zu unterschreiten.

Die Festlegung des Grenzwertes ist ein normativer Prozess. Die hier verwendete Methode und der vorgeschlagene Grenzwert wurden von der Arbeitsgruppe „Kriterien“ des Vereins für umweltgerechte Elektrizität diskutiert und gutgeheissen.

Mit den Erfahrungen aus diesem Projekt können nun Ökobilanzen und Kennwertmodelle für weitere Kandidaten des Ökostromlabels an die Hand genommen werden. Hierbei handelt es sich um Strom aus Abwasserreinigungsanlagen, aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen, aus biogenen Abfällen in Kehrichtverbrennungsanlagen oder aus (Alt-)Holzfeuerungsanlagen. Bei den drei Erstgenannten ist, ähnlich wie schon bei den Biogasanlagen, der Allokationsfrage ein besonderes Augenmerk zu schenken.

## 9 Literatur

- Baumgartner W., G. Doka, 1998. *Energiebilanzen von Klein-Wasserkraftwerken; Energierückzahl-dauern – Energieerntefaktoren*, 2. Auflage, DIANE 10 Klein-Wasserkraftwerke, ITECO Ingenieur-unternehmung AG, Affoltern am Albis
- Frischknecht R. (final editor), U. Bollens, S. Bosshart, M. Ciot, L. Ciseri, G. Doka, R. Hischier, A. Martin (ETH Zürich), R. Dones, U. Gantner (PSI Villigen), 1996. *Ökoinventare von Energiesystemen, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*, 3<sup>rd</sup> Edition, CD-ROM, Gruppe Energie - Stoffe – Umwelt, ETH Zürich, Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, PSI Villigen
- Frischknecht R., 1998. *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making; Scope-dependent Inventory System Models and Context-specific Joint Product Allocation*, Dissertation Nr. 12599, Institut für Energietechnik, ETH Zürich
- Goedkoop M., R. Spriensma, 2000. *The Eco-indicator 99; A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*, Methodology Report, 2nd revised Edition 17.4.2000, PRé Consultants B.V., Amersfoort
- Hofstetter P., 1998. *Perspectives in Life Cycle Impact Assessment; A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere*, Kluwer Academic Publishers, Boston/ Dordrecht/ London
- Horbaty R., 2000. *Persönliche Informationen zu Windkraftanlagen in der Schweiz*, 11. April 2000
- ISO, 1997. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, 1<sup>st</sup> edition 1997-06-15, International Organization for Standardization (Hrsg.), Geneva
- Meier C., 1999. *Photovoltaik-Energiestatistik - Gemeinschaftsprojekt Bundesamt für Energiewirtschaft BEW und Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke VSE*; energiebüro Zürich, 1999
- Schleiss K., 1999. *Stromproduktion aus der Vergärung; Ökobilanz im Auftrag des Biogasforum Schweiz*, unveröffentlichter Bericht, Baar
- Schleiss K., 2000. *Persönliche Informationen zu neun Vergärungsanlagen*, 19. April 2000

## Anhang: Eingabemasken Kennwertmodelle

**Ökostrom-Prüfung: Stromerzeugung mit Wasserkraft**

**Eingabe:**

**Anlagenname:**

Bewertungsmethode:

Anlagentyp:

Installierte Leistung: kW

Wirkungsgrad:

Verkaufter Strom pro Jahr: GWh

Lebensdauer der Anlage: a

**Resultate:**

		pro kWh	Im Vergleich zu:
<b>Champagna</b>	EI-99-points	2.35E-04	
Strom ab Wasserkraft CH	EI-99-points	3.67E-04	63.9%
Oekostrom Schweiz Grenzwert	EI-99-points	1.40E-02	1.7%

**Ökostromkriterium erfüllt**

Abb. 16: Eingabemaske Kennwertmodell Wasserkraftwerke

**Ökostrom-Prüfung: Stromerzeugung mit Windkraft**

**Eingabe:**

**Anlagenname:**

Bewertungsmethode:

**Inputs**

Installierte Leistung: kW

Turmhöhe: m

**Outputs**

Verkaufter Strom pro Jahr (Mittelwert): kWh

Lebensdauer bewegliche Teile: a

Lebensdauer Turm: a

**Resultate:**

		pro kWh	Im Vergleich zu:
<b>Sool</b>	EI-99-points	5.07E-03	
Windmix CH	EI-99-points	3.12E-03	162.3%
Oekostrom Schweiz Grenzwert	EI-99-points	1.40E-02	36.4%

**Ökostromkriterium erfüllt**

Abb. 17: Eingabemaske Kennwertmodell Windkraftwerke

### Ökostrom-Prüfung: Stromerzeugung mit Biogas

**Eingabe:**

Anlagenname:

Bewertungsmethode:

Anlagentyp:

**Inputs**

Jahresmenge Grüngut	t	2556
Stromverbrauch pro Jahr	kWh	6.06E+04
Dieserverbrauch pro Jahr	l	1000

**Outputs**

Biogasmenge pro Jahr	m3	3.05E+05
Anteil zur Verstromung	%	84%
Verkaufter Strom pro Jahr	kWh	2.58E+05

**Resultate:**

			pro kWh	Im Vergleich zu:
Kompogas Rümlang	pro kg Grüngut	EI-99-points	4.63E-02	
Betrieb KO Durchschnitt ZH	pro kg Grüngut	EI-99-points	4.72E-02	98.0%
Kompogas Rümlang	pro kWh Strom	EI-99-points	3.86E-01	
Kompogas Rümlang	pro kWh Strom alloziiert	EI-99-points	0.00E+00	-2.0%
Oekostrom Schweiz Grenzwert		EI-99-points	1.40E-02	0.0%

**Ökostromkriterium erfüllt**

Abb. 18: Eingabemaske Kennwertemodell Biogasanlagen

### Ökostrom-Prüfung: Solarstromerzeugung

**Eingabe:**

Anlagenname:

Bewertungsmethode:

Anlagentyp:

Nennleistung:  kWp

**Outputs**

Verkaufter Strom pro Jahr	kWh/a	2'700
---------------------------	-------	-------

**Resultate:**

			pro kWh	Im Vergleich zu:
<b>Familie Muster</b>		EI-99-points	1.12E-02	
Strom ab 3kWp Flachdachanlage p-Si		EI-99-points	1.18E-02	95.2%
Oekostrom Schweiz Grenzwert		EI-99-points	1.40E-02	80.4%

**Ökostromkriterium erfüllt**

Abb. 19: Eingabemaske Kennwertemodell Photovoltaikanlagen