

Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz

Projekt 41458 Vertrag 81427

Ausgearbeitet durch

Niels Jungbluth, Rolf Frischknecht, Mireille Faist

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Überarbeiteter Schlussbericht Februar 2002

Auftraggeber:

Forschungs- und P+D Programm Biomasse des
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

ESU-services, ökologiebezogene Unternehmens- und Politikberatung
Kanzleistrasse 4
CH-8610 Uster
Tel. 01 940 61 32, Fax 01 940 61 94
jungbluth@esu-services.ch
www.esu-services.ch

Autoren:

Dr. Niels Jungbluth
Dr. Rolf Frischknecht
Dr. Mireille Faist

Critical Review:

Dr. Thomas Nussbaumer, Dr. Phillipp Hasler
Verenum, Langmauerstr. 109, CH-8006 Zürich

Begleitgruppe:

Daniel Binggeli, BfE
Christoph Rutschmann, Holzenergie Schweiz
Cornelia Brandes, Verein für umweltgerechte Elektrizität

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autor/in/en verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb:

ENET
Egnacherstrasse 69 · CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56
enet@temas.ch · www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch

Zusammenfassung

Ziel der Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holz ist die Beurteilung verschiedener Anlagen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Auszeichnung mit dem Qualitätslabel *naturemade star* für ökologisch erzeugten Strom. Für die Untersuchung der Energie- und Stoffströme wurden hierzu zunächst die drei in der Schweiz in Betrieb befindlichen Anlagen besucht und von den Anlagenbetreibern Informationen erfragt. Ergänzt wurde diese Erhebung durch eine Literaturrecherche. Für diese drei Schweizer Beispielanlagen, für eine weitere Beispielanlage in den Niederlanden, für drei sogenannte Standardanlagen (Verbrennung von Holzbrennstoffen in Anlagen mit Multi-Zyklon oder mit weitergehender Abgasreinigung (Elektrofilter und Entstickung) sowie für die Altholzverbrennung mit weitergehender Abgasreinigung) wurde je eine Sachbilanz erstellt.

Als wesentliche Einflussgrößen des mit der Methode Eco-indicator 99 (Hierarchist) bewerteten Ergebnisses wurden die direkten Emissionen von Partikeln und NO_x identifiziert. Bei der Verbrennung von Altholz sind auch Blei, Cadmium und Zink relevant. Weitere wichtige Größen für die Beurteilung der Umweltbelastungen des erzeugten Stromes sind die Jahresproduktion an Strom und Wärme mit dem damit zusammenhängenden Holzverbrauch und die Art der verwendeten Brennstoffe. Ausserdem ist die Aschemenge und Art des genutzten Entsorgungsweges für das Gesamtergebnis wichtig.

Zur Beurteilung der Stromerzeugung aus Holz im Rahmen der Ökostromzertifizierung wurden die Standardanlagen in einem Kenngrößenmodell modelliert. Hierzu müssen die Umweltbelastungen der Gesamtanlage auf die beiden Produkte Strom und Wärme aufgeteilt werden. Für die Wärmeerzeugung in der Anlage erfolgt in diesem Modell eine Gutschrift mit 50% der Umweltbelastungen für die gleiche Wärmemenge aus einer kondensierenden Gasheizung. Die restlichen Umweltbelastungen werden dem Strom angelastet.

Vom Betreiber einer Anlage müssen für einen einfachen Vergleich mit dem Grenzwert für das Labelling folgende Daten zur Verfügung gestellt werden: Anlagentyp, Holzverbrauch, Transportdistanz, Kesselwirkungsgrad und –wärmeabgabe, Emissionen von Staub und NO_x (plus Blei, Cadmium und Zink für Altholzfeuerungen), Jahresproduktion an Strom und genutzte Wärme, die Aschemenge und deren Entsorgungsweg.

Wärmeerkopplungsanlagen mit einer weitergehenden Abgasreinigung, die insbesondere die Staubemissionen reduziert, haben in der Regel keine Probleme den Grenzwert für *naturemade star* einzuhalten. Bei Anlagen, die nur mit einem Multi-Zyklon ausgerüstet sind, ist ein Einhalten des Grenzwertes für effiziente und emissionsarme Anlagen (d.h. vergleichsweise niedrige Staubemissionen und gute Strom- und Wärmeausbeute), ebenfalls möglich. Auch für reine Kraftwerke ohne Wärmenutzung erscheint ein Unterschreiten des Grenzwertes möglich, wenn diese über eine sehr gute Abgasreinigung und einen hohen elektrischen Wirkungsgrad (>22%) verfügen.

In einem weiteren Schritt wurde auch eine Sachbilanz für die Strom- und Wärmeerzeugung aus Holz mit den drei Varianten Holzbrennstoffe mit Multi-Zyklon oder weitergehender Abgasreinigung bzw. Altholz mit weitergehender Abgasreinigung erstellt. Hier erfolgte die Allokation der Umwelteinwirkungen auf Wärme und Strom anhand des Exergiegehalts der Energieträger. Diese Sachbilanzen können als Hintergrunddaten für zukünftige Ökobilanzstudien dienen. Allerdings müssen für diese Abschätzung grosse Unsicherheiten durch die Wahl des Allokationsverfahrens und Variationen der spezifischen Parameter zwischen verschiedenen Anlagen berücksichtigt werden.

Abstract

This life cycle assessment (LCA) of electricity production from wood has been carried out with the goal to evaluate different power plants and to analyse the possibilities for a labelling with the Swiss ecolabel *naturemade star*. Therefore, a life cycle inventory has been compiled for the three existing combined cycle power plants in Switzerland and a fourth power plant in operation in the Netherlands. The investigation of these case studies is based on information provided by the owners and operators as well as information from literature.

Additionally three standard technologies have been modelled. For that purpose, additional information especially for air pollutant emissions has been considered. These standard plants describe the production of electricity from wood in a combined cycle power plant with multi-cyclone waste gas purification or an advanced filter technology with nitrogen oxide reduction and electrostatic particle filter. Electricity production using waste wood in a plant with advanced waste gas treatment has been assessed as the third standard possibility.

A life cycle impact assessment with the method Eco-indicator 99 (hierarchist perspective) showed the main parameters for the environmental impacts caused. These are the direct emissions of particles and NO_x. Further on, emissions of the heavy metals lead, cadmium and zinc are important while burning waste wood. The energy efficiency of the plant, calculated from the amount of wood used and the produced electricity and heat, is another important entry to the inventory. In addition, the type of wood and its transports and the waste management for ashes and filter residues are important for the total Eco-indicator 99 (H) points.

These results have been used to develop a key-parameter-model that can be used for the assessment of electricity from wood combustion in comparison to the threshold level for the *naturemade star* label. Therefore, the environmental impacts of the whole plant must be allocated between the two co-products heat and electricity. Fifty percent of the environmental impacts due to the delivery of an equivalent amount of heat by a modern condensing gas furnace have been subtracted from the yearly environmental impacts of the plant. The remaining environmental impacts are allocated in this model to the electricity produced.

The operator of a plant needs to provide the following information for an efficient assessment of the global labelling criterion: type of plant, (waste) wood consumption, transport distance, boiler energy efficiency and heat production, emission factors for pesticides, NO_x, (lead, cadmium and zinc for waste wood boilers), yearly production of electricity and heat, type of ash management and amount of ashes.

Plants with an advanced waste gas purification technology cause normally much lower impacts than allowed for the labelling. Good plants with multi-cyclone filter, low particle- and NO_x emissions and a good overall energy efficiency can also achieve the label. The same holds true for power plants without co-production of heat. These plants have to have very low emissions and a very good electrical efficiency (>22%) if they want to achieve the label.

A further part of the study investigates a background life cycle inventory for the production of heat and electricity in wood burning power plants. Again the same three types of standard power plants have been used to model the environmental impacts, but in this case these impacts have been allocated to the two products heat and electricity based on the exergy content of the delivered energy (electricity and heat). These inventories may be used as background data for general life cycle assessment studies. Nevertheless, it has to be kept in mind that large variations due to the type of allocation and the specific plant parameters are possible.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT	II
GLOSSAR	V
ABKÜRZUNGEN	VI
DANKSAGUNG	VI
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1 Definition des Untersuchungsgegenstandes, der Systemgrenzen und der Vergleichssysteme	2
1.2 Erstellen der Sachbilanzen	4
1.3 Berechnen der kumulierten Energie- und Stoffflüsse	5
1.4 Auswertung der Ergebnisse	6
1.5 Erstellen des Kenngrößenmodells	6
2 SACHBILANZ	6
2.1 Ausgangslage	6
2.2 Datenerhebung	7
2.2.1 Hintergrunddaten der Ökobilanz	7
2.2.2 Holzbereitstellung	7
2.2.2.1 Flächennutzung	7
2.2.2.2 Altholz	11
2.2.2.3 Sachbilanzdaten Holzschnitzel	12
2.2.3 Beispielanlagen	13
2.2.3.1 Anlage Waffenplatz Bière	13
2.2.3.2 Anlage Furnierwerk Lengwil TG	15
2.2.3.3 Fernheizkraftwerk Meiringen	18
2.2.3.4 25MW Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL)	20
2.2.4 Abschätzung für die Verwendung von Altholz als Brennstoff	20
2.2.5 Emissionen in die Luft	21
2.2.6 Anlagenbau und -entsorgung	23
2.2.7 Entsorgung von Holzaschen	24
2.3 Zusammenstellung der Sachbilanzdaten für die Verbrennungsanlagen	28
2.4 Sachbilanzen der Strom- und Wärmeerzeugung aus Holz	30
3 ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ	31
3.1 Betrieb der Anlagen	31
3.1.1 Staubemissionen	31
3.1.2 Stickoxidemissionen	32
3.1.3 Schwefeldioxidemissionen	32
3.2 Betrieb der Anlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift	33
3.3 Strom- und Wärmeproduktion aus Holz (Allokation nach Exergiegehalt)	34
4 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	34
4.1 Bewertete Ergebnisse	35

4.1.1	Holzbrennstoffe	35
4.1.2	Infrastruktur	35
4.1.3	Anlagenbetrieb	36
4.1.4	Anlagenbetrieb mit Wärmegutschrift	36
4.1.5	Ascheentsorgung	36
4.2	Wichtige Inputgrössen beim Betrieb	37
4.3	Relevanz unterschiedlicher Schadenskategorien	38
4.4	Variation der Luftemissionen beim Anlagenbetrieb	40
4.5	Zertifizierung nach <i>naturemade star</i>	41
4.5.1	Prüfung der Beispielanlagen	41
4.5.2	Prüfung der Standardanlagen	42
4.5.3	Prüfung bei unterschiedlichen direkten Emissionen	42
4.5.4	Variation des Anteils der verwendeten Holzbrennstoffe	44
4.5.5	Variation des Gesamtwirkungsgrades	45
4.5.6	Kraftwerke ohne Wärmenutzung	46
4.6	Ökobilanz der Strom- und Wärmeerzeugung bei einer Allokation gemäss Exergiegehalt	46
5	KENNGRÖSSENMODELL FÜR DIE ZERTIFIZIERUNG	47
6	DISKUSSION UND AUSBLICK	49
6.1	Diskussion und Unsicherheiten	49
6.2	Empfehlungen	49
6.3	Ausblick	50
	ABBILDUNGEN	51
	TABELLEN	52
	PHYSIKALISCHE PARAMETER VON HOLZ	54
	Wassergehalt	54
	Holzdichte	55
	Heizwert	55
	Raum- und Gewichtsmasse	56
	ÖKOBILANZ BEWERTUNGSMETHODEN	57
	Übersicht zu den Methoden	57
	Eco-indicator 99	58
	Menschliche Gesundheit	58
	Ökosystem Qualität	59
	Ressourcenentwertung	60
	Zusammenfassung der Methode	60
	Klimaänderungspotential	61
	Methode der ökologischen Knappheit 1997	62
	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	64
	LITERATUR	66

Glossar

In dieser Arbeit werden einige Begriffe in einer bestimmten Art und Weise benutzt. Die zugrundeliegende Definition wird im folgenden Glossar erläutert.

Begriff	Bedeutung in dieser Arbeit
Altholz	In dieser Arbeit wird altes Holz aus Gebäudeabbrüchen, Umbauten, Renovationen und Altholz aus Verpackungen oder alte Holzmöbel (z.B. Holztische) sowie Gemische mit Holzbrennstoffen als Altholz bezeichnet. Dieses Holz darf gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) (LRV 2000) im Gegensatz zu → Holzabfällen nur in speziellen Altholzfeuerungen verbrannt werden (NUSSBAUMER 1994).
Holzabfälle	Gemäss (LRV 2000) dürfen (b.1.) Altholz und Holzabfälle, die mit Holzschutzmitteln nach einem Druckverfahren imprägniert wurden oder Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen (z.B. PVC) aufweisen, (b.2) mit Holzschutzmitteln wie Pentachlorphenol intensiv behandelte Holzabfälle und (b.3.) Gemische von solchen Abfällen mit Holzbrennstoffen oder Altholz nicht in Altholzfeuerungen verbrannt werden. Diese Abfälle werden in die Kehrichtverbrennung entsorgt (NUSSBAUMER 1994).
Holzbrennstoffe	<p>Gemäss (LRV 2000) werden drei Kategorien von Holzbrennstoffen unterschieden (NUSSBAUMER 1994):</p> <ul style="list-style-type: none"> a.) Naturbelassenes, stückiges Holz. b.) Naturbelassenes, nicht stückiges Holz, z.B. in Form von Hack- schnitzeln. c.) Restholz aus der holzverarbeitenden Industrie und dem holzverarbeitenden Gewerbe sowie von Baustellen, soweit das Holz nicht druckimprägniert ist und keine Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen wie z.B. PVC enthält. <p>Für kleine Feuerungen gibt es gemäss LRV unterschiedliche Vorschriften für die drei Kategorien. Für grössere Anlagen, wie sie in dieser Studie untersucht werden, gibt es diese Differenzierung hingegen nicht mehr. In dieser Arbeit werden deshalb alle drei Kategorien gemeinsam als Holzbrennstoffe bezeichnet.</p>
Restholz	Siehe Holzbrennstoffe.
Sm ³	Schüttkubikmeter (auch Schnitzelkubikmeter). Raummass zur Bestimmung der Schnitzelmenge. Ein Sm ³ entspricht etwa 200kg Holz.

Abkürzungen

	Deutsch
>A	Emissionen in die Atmosphäre
>R	Ressourcen
>S	Emissionen in den Boden
>W	Emissionen in Gewässer
a	Böden für Nahrungsmittelproduktion
eco ^{mc}	Ökobilanz Datenbank der Firma ESU-services
E-1	Exponentielle Schreibweise für Zahlen. Die Angabe 1.2E-2 wird z.B. als $1.2 * 10^{-2} = 0.012$ gelesen.
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
f	Emissionen ins Süsswasser
fg	Femto Gramm = 10^{-15} g
H	Hierarchist
I	Individualist
LCA	Ökobilanz
LCI	Sachbilanz
LRV	Luftreinhalte-Verordnung (der Schweiz)
m	mobile Quelle von Luftschadstoffen
n.a.	nicht angegeben
ÖvE	Ökoinventare von Energiesystemen
p	prozessbedingte Emission von Luftschadstoffen
s	Emissionen in Meere
s	stationäre Quelle von Luftschadstoffen
Sm ³	Schüttkubikmeter (teilweise auch für Schnitzelkubikmeter genutzt)
WKK	Wärmeerkraftkopplung

Danksagung

Wir danken allen Personen, die uns im Rahmen dieser Studie Informationen zur Verfügung gestellt haben. Insbesondere sei den Betreibern der bestehenden Anlagen für die Möglichkeit zur Besichtigung und der Bereitstellung von Informationen gedankt. Thomas Nussbaumer und Phillipp Hasler haben freundlicherweise das Review dieser Arbeit übernommen.

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Verband Holzenergie Schweiz möchte die Erzeugung von Elektrizität mit Holzbrennstoffen (naturbelassenes Holz und Restholz gemäss Luftreinhalte-Verordnung - LRV) und mit Altholz¹ nach den Kriterien für Ökostrom des Vereins für umweltgerechte Elektrizität (VUE)² zertifizieren lassen (NATUREMADE 2000). Die Bewertungskriterien für *naturemade star* sind eingeteilt in sogenannte *lokale* und *globale* Kriterien (siehe Fig. 1):

Die *lokalen* Kriterien umfassen die Kraftwerksumgebung plus einen wirkungsspezifischen Bereich. Bei Wasserkraftwerken sind dies insbesondere die Fischdurchlässigkeit und die Restwassermengen. Photovoltaikanlagen dürfen nur auf bereits überbauten Flächen installiert und Windkraftanlagen nur an speziell ausgeschiedenen, landschaftlich unkritischen Standorten errichtet werden.

Das *globale* Kriterium basiert auf einer Lebenszyklusbetrachtung aller Umweltauswirkungen in einer Ökobilanz. Mittels Kennwertmodellen können Anlagebetreiber in kurzer Zeit abklären, ob die eigene Anlage den Grenzwert unterschreitet, und damit das globale Kriterium für die Vergabe des Qualitätszeichens *naturemade star* erfüllt (FRISCHKNECHT & JUNGBLUTH 2000a, b). Die für die Verstromung von Holzbrennstoffen und Altholz zu erarbeitenden Ökobilanz-Ergebnisse bilden als globales Kriterium eine Grundlage zur Zertifizierung von Strom auf der Basis regenerierbarer Energieträger gemäss *naturemade star*. Hierzu muss zunächst eine Ökobilanz der Stromerzeugung aus Holz erarbeitet werden. Die Sachbilanzen sollen mit dem Eco-indicator 99 bewertet und für Holzbrennstoffe und Altholz in einem Kenngrössenmodell abgebildet werden.

Lokale Kriterien:

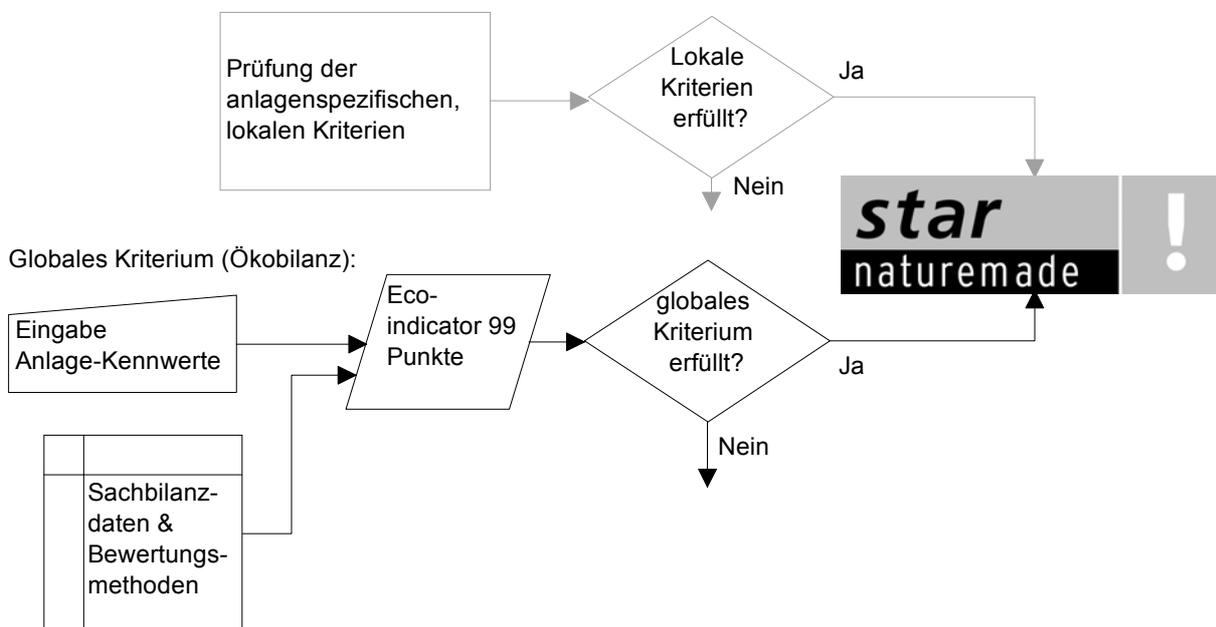


Fig. 1: Ablaufschema Vergabe des Qualitätszeichens *naturemade star*.

¹ Zur Definition der Begriffe Altholz und Holzbrennstoffe in dieser Arbeit siehe das Glossar. Hier werden nur Altholz Kategorien betrachtet, die gemäss Luftreinhalte-Verordnung für eine Verbrennung in speziell ausgerüsteten Altholzfeuerungen zugelassen sind.

² www.naturemade.org

Die Stromerzeugung mit Holzbrennstoffen erfolgt in der Schweiz bisher mit Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK-Anlagen), die wärmegeführt betrieben werden. Für die Verstromung von Holz stehen verschiedene Varianten von Dampfprozessen im Einsatz:

- Dampfturbine, Arbeitsmedium Wasser (z.B. Anlage in Meiringen),
- Dampfturbine, Arbeitsmedium organisches Kältemittel, (Organic Rankine Cycle, ORC-Verfahren, z.B. Anlage in Bière),
- Dampfkolbenmotor, Arbeitsmedium Wasser (z.B. Anlage in Lengwil).

Im Verdampfer wird mit einem im Prinzip beliebigen Brennstoff Dampf erzeugt und überhitzt. Der Dampf wird anschliessend in einer Turbine oder einem Kolbenmotor zur Gewinnung mechanischer Energie entspannt. In der Regel wird Wasser als Arbeitsmedium eingesetzt. Es können aber aus thermodynamischen Gründen auch sogenannte Thermoöle als Wärmeträger und organische Flüssigkeiten in den Turbinen eingesetzt werden (Organic Rankine Cycle).

Auf Grund der Vorbesprechung mit verschiedenen Fachleuten wurde folgendes Vorgehen für diese Studie festgelegt:

- Definition des Untersuchungsgegenstandes, der Systemgrenzen und der Vergleichssysteme
- Erstellen der Sachbilanzen
- Berechnen der kumulierten Energie- und Stoffflüsse und der bewerteten Ergebnisse
- Erarbeiten des Kenngrössenmodells

1.1 Definition des Untersuchungsgegenstandes, der Systemgrenzen und der Vergleichssysteme

Für die Bilanzierung der Stromerzeugung mit Holzbrennstoffen und mit Altholz kommt der Definition des Untersuchungsgegenstandes und der Festlegung der Systemgrenzen eine wichtige Rolle zu.

Im Rahmen der Ökobilanz-Studie werden Sachbilanzen für zwei verschiedene Brennstoffe (Schnitzel aus Holzbrennstoffen bzw. aus Altholz) und die drei in der Schweiz genutzten Technologien, Dampfturbine (Wasser und organische Flüssigkeit) und Dampfkolbenmotor erstellt. Die zu analysierenden Holz-WKK-Anlagen umfassen die in Fig. 2 skizzierten Prozesse. Im folgenden wird eine Übersicht zu den wichtigen Prozessen im Lebenszyklus gegeben. Hierzu wurden für die bestehenden Anlagen Daten erhoben:

- Holzwachstum, -ernte und Holzschnitzelproduktion, für die Bereitstellung von Holzschnitzeln aus Schwachholzbeständen (im Rahmen dieser Studie nicht neu erfasst).
- Flächennutzung für die Holzproduktion.
- *Altholzaufbereitung*, hier interessieren die Aufwendungen, Produktionsabfälle und allfällige Emissionen des Aufbereitungsprozesses sowie die erforderlichen Transportaufwendungen für das Anliefern des aufbereiteten Altholzes frei Kraftwerk.
- Holzlagerung, Kamin, Kessel, Gebäude etc., inkl. Herstellung resp. Bau, und Rückbau der Anlagenteile und der Gebäude.
- *Feuerung*, inkl. thermischem und elektrischem (Hilfs-)Energiebedarf, Emissionen in die Atmosphäre (limitierte Schadstoffe (insb. Staubpartikel, NO_x, Schwermetalle, Kohlenwasserstoffprofile, Dioxine, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe).

- *Flüssigkeitskreislauf*, inkl. Energiebedarf für Pumpen, Wasserbedarf (entkarbonisiert und vollentsalzt) resp. Thermoölbedarf, Betriebsmittelbedarf (z.B. Chemikalien für die Wasserkonditionierung), anfallende Abwassermenge und -qualität und deren Behandlung, Herstellungs-, Montage-, Wartungs- und Entsorgungsaufwendungen des (Wasser-)Kreislaufs insgesamt (Energie- und Materialaufwand, Emissionen, Produktionsabfälle).
- *Dampfturbinen resp. Dampfmaschinen*, v.a. Angaben über Herstellungs-, Montage-, Wartungs- und Entsorgungsaufwendungen (Energie- und Materialaufwand, Emissionen, Produktionsabfälle).
- *Holzaschen*, hier interessiert vor allem die chemische Zusammensetzung und die Entsorgungswege.
- *Thermoöl und organische Flüssigkeit*, Herstellungsaufwendungen und Emissionen, physikalisch-chemische Eigenschaften.

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Informationen sind auch folgende allgemeine Angaben zu den Anlagen erhoben worden:

- Funktionsbeschreibung der Anlagen und Anlagenschemata.
- Gesamtwirkungsgrad der Anlagen, sowie thermischer und elektrischer Wirkungsgrad.
- Verfeuerte Holzmenngen, sowie physikalisch-chemische Eigenschaften der eingesetzten (Alt-) Hölzer (insb. Kohlenstoff-, Wasser- und Aschegehalt, Art, chem. Zusammensetzung, Heiz- und Brennwert).
- Total installierte thermische und elektrische Leistung, als Parameter für die Grösse der Stromerzeugungsanlagen.

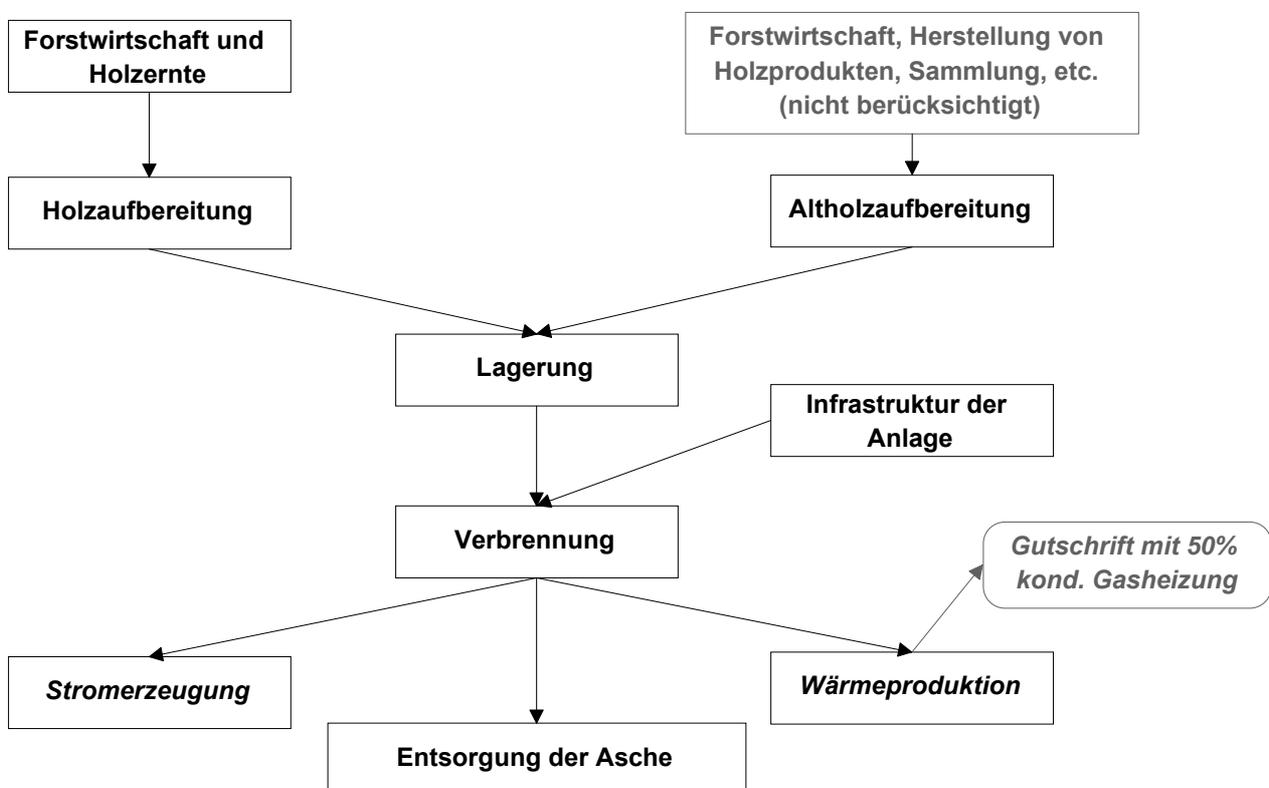


Fig. 2 Prozesse der Bilanzierung für die Bereitstellung von Strom und Wärme aus Holzbrennstoffen und Altholz.

Die Stromerzeugung findet im Verbund mit der Erzeugung von Wärme und bei Altholzanlagen zusätzlich mit der Entsorgung von Altholz statt. Es handelt sich also um einen Koppelprozess. Um die Umweltbelastung der Stromerzeugung getrennt ausweisen zu können, ist eine Allokation der gesamten Aufwendungen und Emissionen der Anlage auf die Koppelprodukte Strom, Wärme und eventuell Altholzentsorgung erforderlich.

Die Märkte der Koppelprodukte Wärme und Altholzentsorgung können wie folgt charakterisiert werden:

Auf dem Wärmemarkt sind elektrisch betriebene Wärmepumpen, Gas- und Ölkessel und gas- oder dieselbefeuerte Blockheizkraftwerke im Angebot. Alle Technologien können für Nahwärmeverbund-Lösungen eingesetzt werden.

Der schweizerische Altholzmarkt wird derzeit geprägt von Exporten nach Italien zur Herstellung von Spanplatten. Damit wird vor der thermischen Verwertung eine weitere stoffliche Nutzung ermöglicht. Inwiefern sich die damit hergestellten Spanplatten für eine spätere thermische Nutzung in Altholzfeuerungen eignen, ist derzeit nicht bekannt.

1.2 Erstellen der Sachbilanzen

Für die im ersten Schritt definierten Technologien wurden die Sachbilanzdaten erhoben und verarbeitet. Hierzu wurden einerseits die Betriebsaufwendungen und –emissionen und andererseits die Aufwendungen zur Anlagenherstellung in einem Fragebogen bei den Betreibern erfasst und die Daten für die Modellierung aufbereitet.

Die Bilanz für die Anlagen zur Stromerzeugung wird zunächst jeweils für den Betrieb der Gesamtanlage pro Jahr erstellt. Soweit möglich wurden dabei die Aufwendungen, die alleine für die Wärmebereitstellung notwendig sind, separiert und aus der Bilanz ausgeklammert. Dies betrifft z.B. den Gebrauch eines dieselbefeueren Heizkessels als Vorsorgeeinrichtung im Falle eines Ausfalls der holzbefeueren Kessel oder die Verteilung der Wärme im Fernwärmenetz. Da die Daten für Holzverbrauch und Wärmeerzeugung nicht detailliert genug vorlagen, wurde in der Bilanz ein gesamtes Jahr betrachtet. Zwei der drei Anlagen produzieren im Sommer allerdings nur Wärme in separaten Holzheizkesseln. Im Kapitel 2 werden die Sachbilanzen detailliert dargestellt.

Bei Anlagen die mit Holzbrennstoffen befeuert werden, wird die gesamte Bereitstellung von Schwachholz berücksichtigt (von der Waldbewirtschaftung bis und mit Anlieferung in die Silos der Kraftwerke). Hierfür wird auf die Daten in Frischknecht et al. (1996) zurückgegriffen.

Bei Altholz-WKK-Anlagen werden nur die für die Verbrennung notwendigen Aufbereitungsschritte (z.B. Zerkleinern) und die Lagerung in der Anlage berücksichtigt und erhoben. Auf eine vollständige Quantifizierung alternativer Nutzungen von Altholz (insb. Spanplattenherstellung) muss aus Aufwandgründen verzichtet werden. Eine qualitative Beurteilung wird jedoch durchgeführt.

Im folgenden wurden die für ein Betriebsjahr erstellten Bilanzen auf die funktionelle Einheit erzeugter Strom bzw. erzeugte Wärme in kWh respektive MJ umgerechnet. Folgende Varianten wurden in diesem Projekt betrachtet:

- Gesamtbilanz pro Betriebsjahr auf Grund der vorhandenen Angaben für drei Anlagen in der Schweiz (Bière, Lengwil und Meiringen) und eine Anlage in den Niederlanden. Gutschrift für die erzeugte Wärme bei der Berechnung der Sachbilanzen für die Stromerzeugung.
- Erweiterte Durchschnittsbilanz für drei Standardanlagen: Holzverbrennung mit Multi-Zyklon bzw. weitergehender Abgasreinigung und Altholzverbrennung mit weitergehender Abgasreini-

gung. Gutschrift für die erzeugte Wärme bei der Berechnung der Sachbilanzen für die Stromerzeugung.

- Abschätzung bei einer Annahme von minimalen und maximalen Emissionen von Luftschadstoffen sowie den Emissionen bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte aus der Luftreinhalteverordnung (LRV 2000) für die Verbrennung von Holzbrennstoffen und Altholz.
- Durchschnittsbilanz der Strom- und Wärmeproduktion in den drei Standardanlagen bei einer Allokation der Aufwendungen und Emissionen aufgrund des Exergiegehalts von Strom und Wärme.

1.3 Berechnen der kumulierten Energie- und Stoffflüsse

Die aufbereiteten Rohdaten werden in die firmeninterne Ökobilanz-Software eco^{mc} eingegeben. Dies ist eine relationale Datenbank, in der die Eingabe der Verknüpfungen für einen Prozess entsprechend der in Tab. 1 dargestellten Weise vorgenommen wird. Die Sachbilanzdaten des Beispiels in Spalte drei werden folgendermassen gelesen. Eine Kuh braucht pro kg Gewichtszuwachs 20kg Gras. Beim Wachstum scheidet sie 0.1kg Nitrat und 0.5kg Methan aus. Eine Wiese hingegen braucht zur Pflege Kühe die als „Rasenmäher“ eine Bewaldung verhindern sowie Nitrat aus dem Boden. Die Datenbank eco^{mc} enthält einen umfangreichen Basisdatensatz zur Energiebereitstellung, Transporten und Baumaterialien.

Emissionen in die Biosphäre werden in der Datenbank detailliert hinsichtlich des beeinträchtigten Umweltkompartiments unterschieden und durch ein Kürzel hinter dem Substanznamen kenntlich gemacht. Luftemissionen werden hinsichtlich mobiler (m), stationärer (s) oder prozessbedingter Quellen (p) unterschieden. Emissionen ins Wasser werden unterteilt nach Salzwasser (s) bzw. Frischwasser (f). Emissionen in landwirtschaftlich genutzten Boden werden mit einem (a) für agriculture gekennzeichnet.

Tab. 1 Beispiel einer Sachbilanz in eco^{mc} .

		Kuh	Gras
	Unit	kg	kg
Kuh	kg	0	0.002
Gras	kg	20	0
Nitrat in Boden a	kg	0.1	-0.002
Methan p	kg	0.5	0

Die Software berechnet dann die kumulierten, d.h. lebenszyklusbezogenen Ressourcenverbräuche und Schadstoffemissionen. Die Ausgabe der Ergebnisse ist ähnlich strukturiert. Sie enthält für alle Prozesse die kumulierten Werte. Tab. 2 zeigt das Ergebnis unseres kleinen Beispiels. Die Kuh (1kg) benötigt demnach inklusive der indirekten Bezüge 20.8kg/kg Gras und scheidet dabei 0.52kg Methan aus. Das Gras nimmt pro Kilogramm 1.9g Nitrat auf und verursacht im gesamten Lebenszyklus 1.04g Methanemissionen.

Tab. 2 Beispiel für das Ergebnis einer Sachbilanz in eco^{mc} .

		Kuh	Gras
	Unit	kg	kg
Kuh	kg	1.04	0.00208
Gras	kg	20.8	1.04
Nitrat in Boden a	kg	0.0625	-0.00188
Methan p	kg	0.52	0.00104

1.4 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden für ausgewählte Schadstoffe im Hinblick auf wichtige Teilprozessschritte ausgewertet. In einem zweiten Schritt werden die Sachbilanz-Ergebnisse mit der Ökobilanzbewertungsmethode „Eco-indicator 99“ (kurz EI99 - mit den drei Bewertungsperspektiven Egalitarist (E), Hierarchist (H) und Individualist (I), siehe Anhang) sowie mit den Methoden ökologische Knappheit und Eco-indicator 95+ bewertet. Dabei erfolgt eine Auswertung der Bilanz nach wichtigen Teilprozessschritten und Schadstoffen/Ressourcen.

Um die Stabilität der Ergebnisse zu prüfen, werden in Sensitivitätsanalysen resultatbestimmende Parameter variiert. Dies betrifft insbesondere einige Emissionen in die Luft sowie die Nutzung der Wärme und den Verbrauch von Holz. Ausserdem werden die Umweltbelastungen der Stromerzeugung mit dem Grenzwert für das Erreichen des *naturemade star* Labels verglichen. Hierzu wird die Bewertungsmethode Eco-indicator 99 (H) verwendet.

1.5 Erstellen des Kenngrössenmodells

Ausgehend von den erarbeiteten Sachbilanzdaten werden diejenigen Kenngrössen bestimmt,

- die das Endergebnis substantiell beeinflussen, und
- in denen sich einzelne WKK-Anlagen unterscheiden (können).

Die Dateneingabe und die Ergebnisse werden in einem EXCEL-Tabellenblatt angezeigt, währenddem die Hintergrunddaten für die Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (I, H, E) und anderen Bewertungsmethoden auf separaten Tabellen gespeichert sind. Die Ergebnisse werden mit dem festgelegten Grenzwert für Ökostrom in EI99 (H) Punkten (globales Kriterium für *naturemade star*) verglichen. Das Layout erlaubt eine einfache Bedienung durch Fachkundige und lehnt sich an die bereits realisierten Kenngrössenmodelle für andere erneuerbare Energieträger (Sonne, Wind, Wasser, etc.) an.

2 Sachbilanz

2.1 Ausgangslage

Bereits durchgeführte Bilanzen der Stromerzeugung aus Holz (FORSBERG 1999, 2000, MANN & SPATH 1997) und für die Verbrennung von Holz (FRISCHKNECHT *et al.* 1996) haben gezeigt, dass den direkten Emissionen bei der Verbrennung eine besondere Bedeutung zukommt. Deshalb wurde den Emissionen besondere Beachtung geschenkt. Wichtig sind danach ausserdem die Transporte des Brennstoffes. Von Bedeutung sind auch die Effizienz der Anlage und die Nutzung der Abwärme.

Die beiden erstgenannten Untersuchungen konnten aufgrund unterschiedlicher Zielsetzungen (Untersuchung der Holzvergasung (MANN & SPATH 1997) bzw. Betrachtung der Transportvorgänge (FORSBERG 1999, 2000)) allerdings nicht als Hintergrundinformation für diese Studie verwendet werden. Zu Vergleichszwecken konnten weitere Veröffentlichungen (JUNGMEIER *et al.* 1999, JUNGMEIER *et al.* 1998, MATTHEWS & MORTIMER 1999) zu Energie- und Ökobilanzen für die Stromerzeugung aus Holz herangezogen werden.

2.2 Datenerhebung

2.2.1 Hintergrunddaten der Ökobilanz

Die Ökobilanzierung basiert auf Sachbilanzdaten zur Energiebereitstellung (FRISCHKNECHT *et al.* 1996), Baumaterialien (WEIBEL & STRITZ 1995), Transportprozessen (MAIBACH *et al.* 1995) und Entsorgungsprozessen (ZIMMERMANN *et al.* 1996). Für die Ökobilanz und im Kenngrößenmodell werden diese sogenannten Hintergrunddaten mit anlagenspezifischen Daten zu Materialverwendung, Energieverbrauch, etc. verknüpft. Annahmen hinsichtlich der Bilanzgrenzen für die verwendeten Basisprozesse und –materialien werden aus diesen Nachschlagewerken übernommen.

Thermoöle und Schmieröle sind in der Herstellung aufwendiger als die bisher von (FRISCHKNECHT *et al.* 1996) bilanzierten Raffinerieprodukte. Auf Grundlage von Herstellerangaben wurde für diese Produktgruppe eine Sachbilanz ausgearbeitet (JUNGBLUTH & FRISCHKNECHT 2001).

2.2.2 Holzbereitstellung

Für die Holzbereitstellung wurde auf die vorhandenen Daten aus den Ökoinventaren von Energiesystemen zurückgegriffen (FRISCHKNECHT *et al.* 1996). Eine Aufdatierung dieser Daten wird für die Bilanz der Flächennutzung erstellt. Ausserdem wird die Bereitstellung von Altholz untersucht.

2.2.2.1 Flächennutzung

Die Sachbilanz für Holz und Holzbrennstoffe beruht auf den Erhebungen für die Ökoinventare von Energiesystemen (FRISCHKNECHT *et al.* 1996). Baumaterialien aus Holz wurden u.a. von (WEIBEL & STRITZ 1995) basierend auf (RICHTER *et al.* 1996) untersucht. Die Flächennutzung wurde damals im Hinblick auf eine Umwandlung (bspw. von Landwirtschaftsland zu Industriearealen oder von nahezu unberührten Flächen zu Stauseen) bilanziert. Deshalb wurde in den Ökoinventaren von Energiesystemen die Fläche für Forststrassen nicht aber die Fläche des Waldes bilanziert. In der Systematik für die Flächennutzung wurde davon ausgegangen, dass Waldfläche für die Nutzung nicht umgewandelt werden muss.

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen der Landnutzung mit dem Eco-indicator 99 (GOEDKOOP & SPRIENSMA 2000a) bzw. anderen Methoden (KÖLLNER 2001) ist eine genaue Erhebung auch der aktuellen Flächennutzung zusätzlich zur Erhebung der Flächenumwandlung notwendig. Deshalb werden im Folgenden die Flächennutzungen für verschiedene Holzprodukte bilanziert von den im Rahmen dieser Untersuchung Sachbilanzdaten verwendet werden.

2.2.2.1.1 Produktion in der Schweiz

In der Schweiz werden etwa 1.2Mio. Hektar als Waldfläche genutzt. Auf dieser Fläche wurden 1996 4Mio. m³ Holz produziert. Dies entspricht etwa 2Mio. Tonnen trockenem Holz (atro). Dabei könnte dem bestehenden Wald bei entsprechender Nachfrage auch 7.2Mio. m³ Holz entnommen werden, ohne die nachhaltige Nutzung zu gefährden (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001). Tab. 3 zeigt die Holzabgaben nach Sortimenten der öffentlichen und privaten Wälder 1996 (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001) und eigene Berechnungen zu den dabei erzielten Erlösen.

Tab. 3 Holzabgaben nach Sortimenten der öffentlichen und privaten Wälder 1996 (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001) und eigene Berechnungen zu den dabei erzielten Erlösen.

	Stammholz			Industrieholz			Brennholz			Total
	Total	Nadelholz	Laubholz	Total	Nadelholz	Laubholz	Total	Nadelholz	Laubholz	
Holzabgaben (m3)	2 663 438	2 215 339	448 099	478 349	308 329	170 020	853 128	272 386	580 742	3 994 915
Preise (CHF/m3)		90	140		50.4	47.5		35.25	37.59	79.39
Ertrag (CHF)		199 380 510	62 733 860	-	15 548 215	8 079 583	-	9 601 607	21 830 092	317 173 866
Holz atro (t)	1 288 167	996 903	291 264	249 261	138 748	110 513	500 056	122 574	377 482	2 037 484

2.2.2.1.2 Holzwirtschaft und andere Nutzungen

Neben der Bereitstellung des Rohstoffes Holz erfüllt der Wald eine Reihe weiterer Funktionen³:

Wohlfahrtsleistungen

Lebensraum	Der Wald bildet eine naturnahe Lebensgemeinschaft und beherbergt viele seltene und bedrohte Tiere und Pflanzen.
Erholungs- und Erlebnisraum	Im Wald kann sich der Mensch entspannen, Sport treiben und die Beziehung zur Natur pflegen.
Gliederung der Landschaft	Die mosaikartige Verteilung des Waldes prägt unsere Kulturlandschaft.
Produktion von Sauerstoff	Die Bäume nehmen mit ihren Blättern oder Nadeln riesige Mengen an Kohlendioxid auf und geben den für Lebewesen wichtigen Sauerstoff ab.
Wasserfilter und -speicher	Der Wald stellt unsere Trinkwasserversorgung sicher.
Luftfilter und Lärmschutz	Der Wald hilft mit, unsere verschmutzte Luft zu reinigen und den Lärm fernzuhalten.
Klima-Extreme	Im Innern des Waldes ist das Klima gegenüber dem Freiland geringeren Schwankungen unterworfen.

Schutzleistungen

Lawinen	Die Bäume halten die Schneedecke fest und verhindern das Anreissen von Lawinen.
Hochwasser	Der Waldboden und die Vegetation wirken wie ein Schwamm. Hochwassergefahren und -spitzen werden gedämpft.
Steinschlag	Die Bäume halten Steine auf.
Bodenerosion und Rutschungen	Das Wurzelwerk der Pflanzen hält die Erde zusammen.
Wind	Die Bäume dienen als Windschutzstreifen.

Für die Sachbilanz der Flächennutzung muss die Fläche auf die verschiedenen Nutzungen bzw. Leistungen des Waldes aufgeteilt werden. Tab. 4 zeigt die Einnahmen im Holzproduktionsbetrieb der öffentlichen und privaten Forstbetriebe 1996. Für die privaten Betriebe wurden die Einnahmen berechnet. Demnach wurden von der Holzwirtschaft etwa Erlöse von 318Mio. Franken durch den Holzverkauf erzielt. Dies entspricht in etwa den Berechnungen zum Ertrag in Tab. 3.

Im gleichen Zeitraum wurden etwa 175Mio. CHF an Subventionen für verschiedene Aufgabenbereiche an die Waldwirtschaft gezahlt. Damit werden nur 66% des Ertrages der in der Forstwirtschaft tätigen Betriebe durch den Verkauf von Holz erwirtschaftet.

³ Informationen des Bundesamtes für Statistik auf http://www.statistik.admin.ch/stat_ch/ber07/dber07.htm (Dez. 2001).

Tab. 4 Einnahmen im Holzproduktionsbetrieb der öffentlichen (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001) und privaten (eigene Berechnungen) Forstbetriebe 1996 in CHF.

	Total	Holzverkauf			Losholz und Eigenverbrauch	Neben- nutzungen	
		Total	Stammholz	Industrieholz			Brennholz
öffentlich	254 256 338	234 834 226	191 309 042	17 480 785	26 044 399	7 385 939	12 036 173
privat (berechnet)	91 025 995	84 072 709	65 520 618	3 588 026	14 964 065	2 644 231	4 309 055
Schweiz / Suisse	345 282 333	318 906 935	256 829 660	21 068 811	41 008 464	10 030 170	16 345 228

Die monetären Leistungen, die durch die Waldwirtschaft für die Allgemeinheit erbracht werden, sind u.U. allerdings sogar noch deutlich höher als die ausbezahlten Subventionen. (RAUCH 1994) berechnete die gesamten Waldleistungen für das Jahr 1994 mit 9Mrd. Franken. Davon entfielen nur 450Mio. CHF oder 5% auf die Holzproduktion. Die Lawinenschutzfunktion erbringt demnach knapp die Hälfte dieser Leistung. Bedeutend sind auch der Erholungswert und die Leistungen für die Artenvielfalt. Nicht ins Gewicht fällt demnach der Wert des jagdlich genutzten Wildes.

Zur Sicherstellung der Lawinenschutzfunktion sind forstwirtschaftliche Eingriffe in den Naturhaushalt notwendig. Ein natürlicher, sich ständig verändernder Wald könnte diese Funktion nicht erfüllen. Somit muss auch der in der Ökobilanz bewertete Schaden durch die Landnutzung und damit durch die Waldbewirtschaftung dieser Funktion zugeordnet werden.⁴

Eine andere Studie zu den Waldleistungen beziffert den Gesamtbetrag (ohne Holzertrag) zu 880 Mio. CHF (ALFTER 1996). Davon entfallen 334Mio. CHF auf die Luftreinigung und 400Mio. CHF auf den Erholungswert. Nicht quantifiziert wurden u.a. die Lawinenschutzfunktion, Klimabeeinflussung auf lokaler Ebene, Lärmverminderung und CO₂-Reduktion. Im Vergleich zum vorher berechneten Ertrag durch Holzprodukte von 318Mio. CHF ergibt sich somit ein Anteil von 26% für die Holzproduktion. Wird der Erholungswert bei der Rechnung nicht berücksichtigt so liegt der Anteil der Holzproduktion bei etwa 40%.

Eine Berechnung zu den externen Kosten, die durch das Waldsterben verursacht werden könnten, beziffert den Anteil durch Verluste bei der Holzproduktion zu nur etwa 10% an den gesamthaft erwarteten Schäden (FRISCHKNECHT *et al.* 1996:IX.7., INFRAS 1992). Dabei wurde zwischen den eigentlichen Schadenskosten und den Ersatzkosten, die anfallen, um die Schutzfunktion des Waldes wieder herzustellen oder zu ersetzen, unterschieden. Es wurde auch abgeschätzt, welchen externen Nutzen die Erholungsfunktion des Waldes in Agglomerationsgebieten verursacht.

Verschiedene Studien und Ansätze zur Abschätzung der Waldleistungen kommen also zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, nach denen zwischen 5% und 100% der Flächennutzung des Waldes der Holzproduktion anzulasten sind. Für die Aufteilung auf weitere Funktionen des Waldes werden in dieser Studie 10% der Flächennutzung des Waldes der Holzproduktion und der Rest den übrigen Wohlfahrts- und Schutzleistungen angerechnet. Damit wird insbesondere berücksichtigt, dass die Schutzfunktion des Waldes für die schweizerische Forstwirtschaft eine wichtige Rolle spielt.⁵

⁴ Persönliche Auskunft von Christoph Rutschmann, Holzenergie Schweiz am 1.2.2002.

⁵ Dieses Vorgehen stellt eine starke Vereinfachung dar und berücksichtigt z.B. nicht, dass die vom Wald erbrachte Leistung „Biodiversität“ gleichzeitig auch Massstab für die Bewertung des durch die Nutzung verursachten Schadens ist. Im Rahmen des Projektes ECOINVENT 2000 (www.ecoinvent.ch) wird die Landnutzung in der Forstwirtschaft neu untersucht werden.

2.2.2.1.3 Holzqualitäten

Mit verschiedenen Holzqualitäten aus dem Wald können unterschiedliche Erlöse erwirtschaftet werden. Für die Sachbilanz der Flächennutzung muss die unterschiedliche Beanspruchung durch die Produktion verschiedener Holzqualitäten berücksichtigt werden. Tab. 5 zeigt die Aufteilung von Erlös und Holzmenge auf verschiedene Holzqualitäten (Eigene Berechnungen auf der Grundlage von BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001). Das Verhältnis der Erträge wird zur Aufteilung der beanspruchten Waldfläche auf die Produktionsmengen genutzt.

Tab. 5 Aufteilung von Ertrag und Holzmenge auf verschiedene Holzqualitäten (Eigene Berechnungen auf der Grundlage von BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001).

		Stammholz	Industrieholz	Brennholz
Ertrag	CHF	74.4%	6.1%	11.9%
Menge	m ³	66.7%	12.0%	21.4%

2.2.2.1.4 Sachbilanzdaten der Flächennutzung

Tab. 6 zeigt die Flächenutzung für die Produktion verschiedener Holzqualitäten. Dabei werden die verschiedenen Schritte der Zuteilung durchgerechnet. In der ersten Zeile wird die Nutzung bei einer Aufteilung auf die tatsächlich produzierte Menge (4Mio. m³ oder 2Mio. Tonnen) gezeigt. Die zweite Zeile zeigt die Berechnung, wenn das Potential der Holznutzung (also 7.2Mio. m³ pro Jahr) als Gesamtmenge zu Grunde gelegt wird. Damit würde berücksichtigt, dass die Ausweitung der Holzproduktion ohne zusätzliche oder intensivere Flächennutzungen möglich wäre. Der ökologische Schaden würde sich durch die Ausweitung nicht vergrössern.

Für die weiteren Berechnungen wird von der tatsächlich produzierten Holzmenge ausgegangen. In Tab. 6 wird gezeigt, wie die Bilanz der Flächennutzung aussehen würde, wenn Subventionen, mögliche Schäden durch den Wegfall des Waldes bzw. die durch den Wald erbrachten Leistungen als Kriterium für die Aufteilung zwischen Holzproduktion und weiteren Funktionen des Waldes angenommen werden.

Die letzte Zeile zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Annahmen für die Flächennutzung für verschiedene Holzqualitäten. Deutlich wird aus dieser Gegenüberstellung, dass die Bilanz der Flächennutzung grosse Unsicherheiten in Abhängigkeit von getroffenen Annahmen zur Berücksichtigung von verschiedenen tatsächlichen oder möglichen Waldeleistungen aufweist.

Tab. 6 Flächennutzung für die Produktion verschiedener Holzqualitäten (m²a pro Tonne Holz atro).

		Stammholz	Industrieholz	Brennholz	Durchschnitt	Anteil Holzprod. an Fläche
Fläche für Holzproduktion	m ² a/t	6'965	2'953	2'865	5'921	100.0%
Fläche potentielle Produktion	m ² a/t	3'865	1'638	1'590	3'285	55.5%
Aufteilung nach Subventionen	m ² a/t	4'616	1'957	1'899	3'924	66.3%
Maximale Schäden	m ² a/t	662	281	272	562	9.5%
Waldeleistungen (1996)	m ² a/t	1'849	784	761	1'572	26.5%
Waldeleistungen (1994)	m ² a/t	348	148	143	296	5.0%
Diese Studie	m ² a/t	697	295	287	592	10.0%

Für Altholz und für Holzschnitzel aus der Holzverarbeitung wird davon ausgegangen, dass die gesamte Flächennutzung dem Erst- bzw. Hauptprodukt angelastet werden muss und für diese Neben-

produkte somit keine Flächennutzung des Waldes berücksichtigt werden muss. Diesen Holzprodukten werden auch keine sonstigen Aufwendungen der Forstwirtschaft, Holzverarbeitung und des Holztransportes angerechnet.

Tab. 7 zeigt die Nutzung von Waldfläche für verschiedene Holzprodukte aus den Ökoinventaren von Energiesystemen und Baumaterialien (FRISCHKNECHT *et al.* 1996, WEIBEL & STRITZ 1995) wie sie für diese Arbeit bilanziert wird.

Tab. 7 Nutzung von Waldfläche für verschiedene Holzprodukte.

MName	1m-Rugel frei Waldstrasse	Schwachholz		Waldrestholz	Nadelrundholz
		Buche frei Waldstrasse	Fichte frei Waldstrasse		
Unit	t	t	t	kg	kg
Nutzung, Wald > RI m2a	287	287	287	0	0.697

2.2.2.2 Altholz

Die Bereitstellung von Altholz musste neu erhoben werden. In der Regel werden verschiedene Holzqualitäten bereits am Anfallort vorsortiert. Hierbei werden die drei Kategorien Restholz, Altholz und stark verschmutzte Problemabfälle (Holzabfälle) unterschieden (siehe Glossar). Stark verschmutztes Altholz und Verbundstoffe, z.B. Sofas, werden als Holzabfälle in der Kehrichtverbrennung entsorgt. Das Restholz und Altholz wird soweit möglich von Metallbestandteilen gereinigt (evtl. mit einem Magnetabscheider) und geschreddert. In einer grösseren Anlage sind ausserdem Fahrzeuge bzw. Förderbänder zum Zwischentransport und zur Verladung notwendig.⁶

Im Gegensatz zur Schnitzelherstellung wird das Holz beim Schreddern nicht mit Messern zerschnitten sondern mit stumpfen Werkzeugen zerhackt. Der Elektrizitätsverbrauch beträgt etwa 9kWh/Sm³.⁷

Zur Zeit wird die Aufbereitung in der Regel durch den Erzeuger der zu behandelnden Holzprodukte bezahlt. Die Abnehmer (zu einem grossen Teil Spanplattenwerke in Italien) bezahlen nur einen kleinen Betrag, der nicht einmal die Transportkosten deckt.⁸

Für die Rest- und Altholzaufbereitung bei der Firma Jost AG lagen detaillierte Angaben zu Energie- und Wasserverbrauch, zu Maschinen, Abfällen und Flächenverbrauch vor, die für die Sachbilanz verwendet werden konnten (siehe Tab. 9). Es werden die Aufwendungen zur Schnitzelherstellung und die negativen CO₂-Emissionen durch die Kohlenstoffbindung beim Holzwachstum berücksichtigt. Die Aufbereitung von Holzabfällen, die hinterher in die Kehrichtverbrennung gelangen, wird als Aufbereitungsdienstleistung gesehen und nicht der Produktion der normalen Rest- und Altholzschnitzel angelastet. Transporte des Altholzes müssen im Kenngrössenmodell separat angegeben werden und werden für die hier dokumentierte Sachbilanz mit 50km angenommen. Alle Aufwendungen zur Produktion des Holzes (z.B. im Wald) werden der Erstnutzung (z.B. als Schalungsholz) zugeschrieben.

⁶ Telefonische Auskunft durch W. Riegger, IG Altholz.

⁷ Telefonische Auskunft durch T. Barmettler, WSA Wertstoff-Sortier-Anlage.

⁸ Telefonische Auskunft durch M. Weber, W. Jost Transport AG, Reinach.

2.2.2.3 Sachbilanzdaten Holzschnitzel

Tab. 9 zeigt die Zusammenstellung der Energie- und Stoffströme für die Bereitstellung von Holzbrennstoffen und für die Aufbereitung von Altholz (Jost AG). Die Angaben für die Schnitzelverarbeitung bei (FRISCHKNECHT *et al.* 1996) stimmen etwa mit den Informationen eines Herstellers von Holzschnitzeln überein. Dieser hat die in Tab. 8 gezeigten Verbräuche an Diesel pro Sm³ (Schnitzelkubikmeter) Holzschnitzel angegeben.⁹

Tab. 8 Angaben zum Treibstoffverbrauch bei der Herstellung von Holzschnitzeln.

Arbeitsschritt	Dieserverbrauch (l Diesel/Sm ³)
Holzfällen	0.32
Abtransport aus dem Wald	0.27
Transport zum Schnitzellager	0.51
Herstellung der Schnitzel	0.60
Lieferung zum Endverbraucher	0.33

Für die Umrechnung von Holzverbräuchen, die in Sm³ angegeben wurden, werden gemäss (FRISCHKNECHT *et al.* 1996:X-14) die Faktoren 4.18Sm³/t Holz atro (Buche) bzw. 5.92Sm³/t Holz atro (Fichte) verwendet.

Tab. 9 Energie- und Stoffströme für die Bereitstellung von Holzbrennstoffen (FRISCHKNECHT *et al.* 1996) und für die Aufbereitung von Altholz (Jost AG).

Modul-Namen eco ^{mc}			Holzschnitzel, Altholz, frei Lager	Holzschnitzel Buche frei Lager	Holzschnitzel Fichte frei Lager	Holzschnitzel Saegerei frei Lager
		Unit	t	t	t	t
Energie	Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	1.69E-4			1.60E-4
	Strom Niederspannung - Bezug in UCPT	TJ	0			2.63E-8
	Heizöl Petro ab Raffinerie Euro	t	0			1.91E-6
	Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	0			7.96E-8
	Diesel in Grosshacker	TJ	3.60E-5	2.50E-4	3.55E-4	
Materialien	Stahl niedriglegiert	kg	0			4.55E-3
	Holz im Wald	t	1.00E+0			1.00E+0
	Infra Saegerei frei Lager	Stk	0			1.00E+0
	Schwachholz Buche frei Waldstrasse	t	0	1.00E+0		
	Schwachholz Fichte frei Waldstrasse	t	0		1.00E+0	
	Trinkwasser CH	kg	4.36E+1			
Transport	Transport LKW 40 t	tkm	0			3.23E-4
	Transport Schiene	tkm	0			3.11E-3
Abfälle	Abfaelle in SAVA	kg	0			1.91E-3
	Abfall CH00: in KVA	kg	1.50E+0			
	Abwasser CH-Durchschnitt: pro m3 in ARA Gr.Kl. 2	m3	4.36E-2			
Emission	Nutzung, Industrieareal > RI	m2a	4.22E-2			
	Abwaerme in Luft p	TJ	1.69E-4			1.60E-4
Quelle			Jost AG		Frischknecht et al. 1996	

⁹ Angaben von J. Neuhaus, Plaquettes Forestières, Montricher.

2.2.3 Beispielanlagen

Die Datenerhebung wurde bei den drei in Betrieb befindlichen Anlagen zur Holzverstromung in der Schweiz durchgeführt. Hierzu wurden die Planer, Besitzer und Betreiber der Anlagen angeschrieben und mit einem Fragebogen um Informationen gebeten. Alle Anlagen wurden persönlich besichtigt. Die Angaben aus dem Fragebogen, persönliche Eindrücke bei der Besichtigung sowie zusätzliche Informationen aus Veröffentlichungen bilden die Grundlage für die Sachbilanzen. Tab. 10 zeigt die wichtigsten Kenngrößen der Schweizer und einer Niederländischen Beispielanlagen im Überblick. Im folgenden werden die Anlagen kurz beschrieben. Ausserdem wurden Literaturquellen insbesondere zu den Schadstoffemissionen als Grundlage für die Sachbilanzen verwendet.

Tab. 10 Wichtige Kenngrößen der vier Beispielanlagen. Emissionen in die Luft bezogen auf 11% O₂ im Abgasstrom (mit Bandbreite der angegebenen Messwerte in Klammern).

	Waffenplatz Bière	Furnierwerk Lengwil	Fernheizkraftwerk Meiringen	Holzkraftwerk Cuijk
Typ	Dampfturbine mit Organic Rankine Cycle (ORC), Multi-Zyklon	Dampfkolbenmotor (Wasser), Multi-Zyklon	Dampfturbine (Wasser), Elektrofilter	Wirbelschichtfeuerung, Elektrofilter, katalytische und nicht-katalytische DeNOx-Anlage
Holzverbrauch (Sm ³ /a)	12000 (10000 – 14000)	20000	21800	ca. 915000 (275 000 t/a)
Elektrische Leistung (kWel)	335	400	700	25000
Thermische Leistung (kWth)	1440	6400	3600	-
Elektrizitätsproduktion (MWh/a)	371.7	1400	1120	200000
Wärmeproduktion (MWh/a)	9000	13000	12100	-
Gesamtwirkungsgrad angeben	82%	83%	72%	29.8%
Gesamtwirkungsgrad berechnet	80%	85%	72%	19%
Staub (mg/Nm ³)	219 (118-305)	89 (80-91)	3	5.3
NOx (mg/Nm ³)	221	174 (149-181)	151	49.3
CO (mg/Nm ³)	70	14 (10-17)	30	n.a.

2.2.3.1 Anlage Waffenplatz Bière

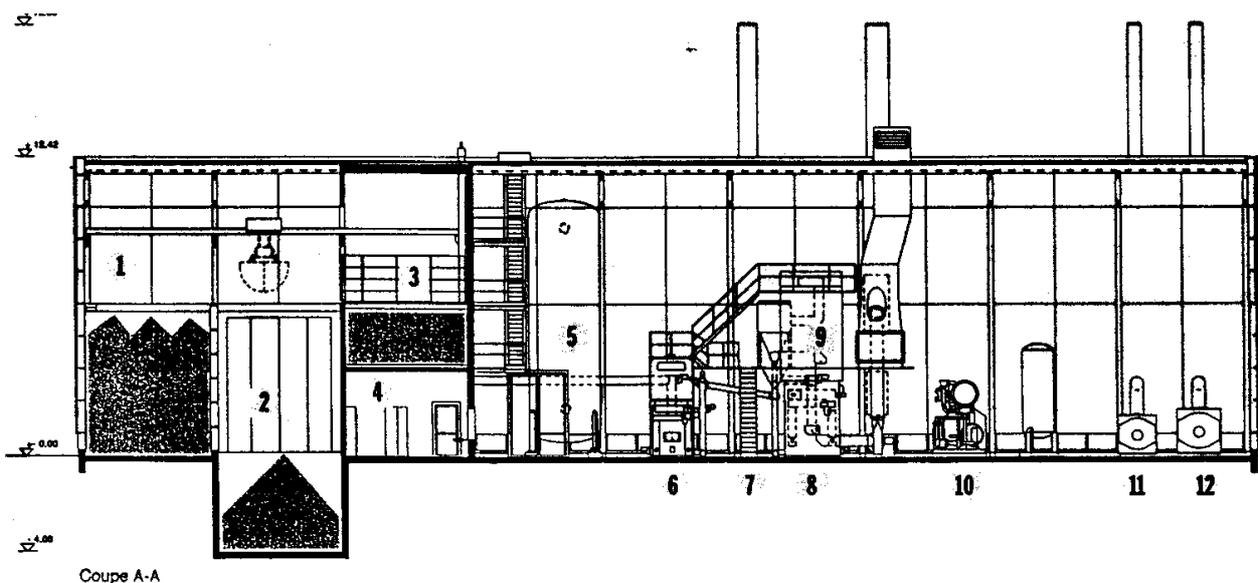
Die mit Biomasse betriebene Wärmekraftkopplungsanlage des Waffenplatzes Bière ist ein Demonstrationsprojekt für diese Technologie in der Schweiz. Fig. 3 zeigt einen Längsschnitt durch die Anlage. Die Sanierung der Heizzentrale wurde genutzt, um eine WKK-Holzenergienutzung mit einer Leistung von 3.2 MWth zu realisieren. Hierzu wurde erstmals in Europa eine mit "Organic Rankine Cycle" (ORC) ausgerüstete und mit Biomasse betriebenen WKK-Anlage installiert.

Pro Jahr werden 10000-14000Sm³ Holzschnitzel verbrannt. Hier wird mit dem Mittelwert von 12000Sm³ (entspricht 2300t Holz atro) gerechnet. Vom jährlichen Gesamtwärmebedarf von 15 Mio. kWh decken Holzbrennstoffe 9 Mio. kWh/a. Gleichzeitig wurden im letzten Jahr 371690 kWh Strom produziert. Lediglich 6143 kWh hiervon wurden ins öffentliche Netz eingespeist. Ein Grossteil wird für die Verteilung der Wärme (Pumpen, etc.) genutzt. Ursprünglich geplant war eine weitaus höhere Stromproduktion von 1.1 Mio. kWh. Realistisch erscheint nach Angaben der Betreiber eine Stromproduktion von etwa 500 MWh im Jahr. Die Summe des thermischen und elektrischen Wirkungsgrades liegt nach Angaben des Betreibers bei etwa 82% (berechnet 80%). Die Stromerzeugung findet nur in den Wintermonaten statt und ist vom Wärmeverbrauch abhängig.

Das Holz kommt aus einem Umkreis von etwa 20km. Die Holzschnitzel werden von einem Zwischenlager (6000Sm³) mit einem Lkw zur etwa 1km entfernten Anlage gebracht und dort ins etwa 800m³ grosse Silo umgeladen. Die Anlage enthält etwa 4500l Thermoöl. Neben Schmieröl werden auch noch einige Chemikalien als Betriebsmittel verbraucht. Die Anlage ist mit einem Multi-Zyklonabscheider zur Staubabscheidung ausgerüstet. Folgende Emissionswerte wurden für die Anlage gemessen: Staub zwischen 118-305 mg/Nm³, CO 70mg/Nm³, NO_x 221mg/Nm³ jeweils bezogen auf 11% O₂ im trockenen Abgas. Die anfallende Asche und der Filtrerrückstand werden als Dünger auf dem Gelände des Waffenplatzes verteilt. Zusätzlich fallen im Jahr etwa 200kg hausmüllähnlicher Gewerbeabfall an.

Diese Biomasse-WKK-Anlage liefert Energie für 37 Gebäude, 80 Arbeits- und 1'500 Ausbildungsplätze sowie 250'000 Übernachtungen pro Jahr. Die architektonische Gestaltung der Anlage wurde von verschiedenen Seiten als gelungen bezeichnet (siehe Fig. 4). Für den Bau (Grundriss etwa 48m*15m) wurde zu einem grossen Teil einheimisches Holz verwendet. Fig. 5 zeigt die technische Installation im Innern der Heizzentrale.

Die Anlage in Bière wurde am 10.8.2001 besichtigt. Der Fragebogen wurde von der zuständigen Person am Standort, Herrn Golay und Herrn Gisler beantwortet. Zusätzliche Informationen wurden vom Planer der Anlage, Kurt R. Scheidegger, Lausanne und vom Architekten Pierre Bonnet, Genève, zur Verfügung gestellt.¹⁰



- | | |
|--|---|
| 1 Holzschnittel-Zwischenlager 800 m ³ | 7 Automatische Ascheaustragung |
| 2 Entladestation | 8 Holzschnitzelfeuerung (Thermoöl) 1,8 MW |
| 3 Schnitzelsilo 120 m ³ | 9 Rauchgas-Rekuperator 460 kW |
| 4 Fernwärmeverteilstation | 10 Turbogenerator 335 kWel |
| 5 Technische Speicher 2mal 45 m ³ | 11 Sommer-Ölheizkessel 1 MW |
| 6 Holzschnitzelfeuerung (Wasser) 1,4 MW | 12 Winter-Ölheizkessel 1.4 MW |

Fig. 3 Längsschnitt durch die WKK-Anlage Bière.

¹⁰ Zusätzliche Informationen auf <http://www.vhe.ch/feuerung/biere.html>.



Fig. 4 Aussenansicht der Heizzentrale des Waffenplatzes in Bière.



Fig. 5 Innenansicht der Heizzentrale Bière: Links die Holzfeuerung, in der Mitte die Pumpen zum Antrieb des Flüssigkeits-Kreislaufes, rechts die Turbinengruppe zur Stromerzeugung

2.2.3.2 *Anlage Furnierwerk Lengwil TG*

Das Furnier- und Sägewerk Iseli AG im thurgauischen Lengwil plante eine Modernisierung und Erweiterung seines Betriebes. In diesem Zusammenhang galt es auch, eine sinnvolle Lösung für die

Erneuerung der Energieerzeugungsanlage zu finden. Da die Furnierherstellung sehr energieintensiv ist - die Wärmeleistung eines Trockners liegt bei 1,5 MW - und dabei sowohl thermische als auch elektrische Energie eingesetzt werden muss, stand schon früh fest, dass die Möglichkeit der Wärmekraftkopplung und damit die Herstellung von Wärme und Strom aus dem eigenen Restholz zumindest näher geprüft werden soll. Nach intensiven Diskussionen setzte man auf die bewährte Technologie des Dampfmotors.

2.2.3.2.1 *Materiallagerung und -Transport*

Für die Energieerzeugungsanlage wurde eine neue Heizzentrale gebaut, deren Standort sich zwischen den beiden Produktionsgebäuden (Säge- und Furnierwerk) befindet und die somit das Restholz aus beiden Betriebsteilen übernehmen kann. Fig. 6 zeigt den Grundriss Heizzentrale Lengwil (etwa 20m*40m). Das Rinden- und Trockensilo befindet sich ausserhalb des Gebäudes.

Für die Verbrennung stehen Produktionsabfälle zur Verfügung, welche in zwei Silos eingelagert werden können. Ein Silo enthält Rindenreste und Sägereiabfälle sowie Holzschnittel aus den Zuschnitten. Dieses Material wird über Kratzkettenförderer oder alternativ mit einem Frontlader in den Silo geführt. Der durchschnittliche Feuchtegehalt dieser Brennstoffe beträgt 70 bis 150%. Als Austragungsvorrichtung gelangt ein Schubboden zum Einsatz. Die zweite Lagereinrichtung ist ein achteckiger Hochsilo aus Betonelementen. In ihm wird das direkt aus der Furnierproduktion anfallende Restholz gelagert. Der Feuchtegehalt dieses pneumatisch in den Silo gepumpten Materials liegt zwischen 8 und 15%. Am Boden des Hochsilos befindet sich eine Konusausstragung. Das Brennmaterial aus den beiden Silos kann wahlweise gemischt werden. Der Transport in die Feuerung erfolgt über Kratzkettenförderer und Doppelstokerschnecken.

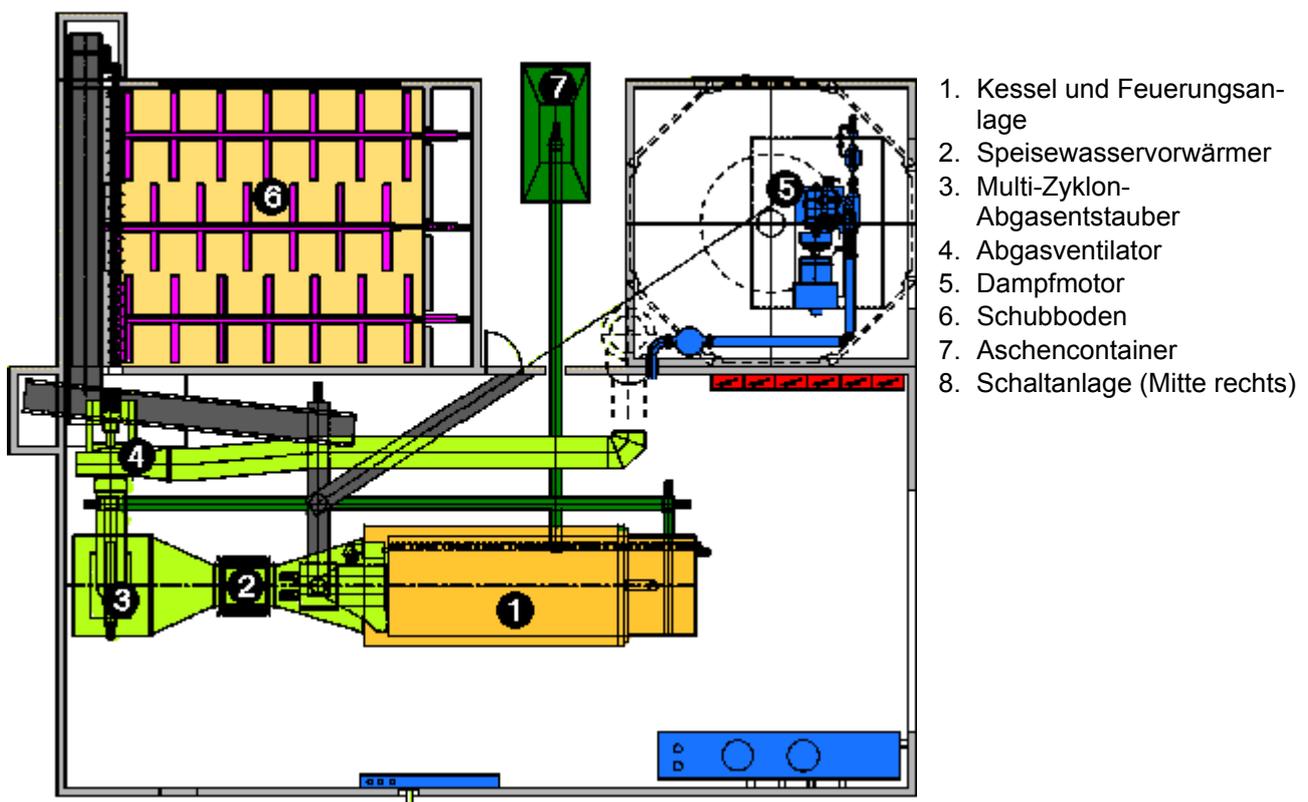


Fig. 6 Grundriss Heizzentrale Lengwil mit Rinden und Trockensilo.

2.2.3.2.2 Energieerzeugung

Installiert wurde eine Vorschubrostfeuerung mit gestufter Verbrennung und Low-NO_x-Verbrennungstechnik. Der Abbrand auf dem hydraulisch angetriebenen Vorschubrost erfolgt im Gegenstromprinzip. Die zonenweise Zuführung der Primär- und die stufenweise Eindüsung der Sekundärluft erlauben eine optimale Verbrennung. Zur Überwachung der Temperatur sind unterhalb der Roststäbe Thermoelemente angebracht, welche Unregelmäßigkeiten sofort melden. Die Entaschung der Feuerung erfolgt automatisch.

Der Dampfkessel besteht aus den Hauptkomponenten Kühlschirm, Abdampfkessel und Überhitzer und ist über dem Verbrennungsrost der Feuerung angeordnet. Nach dem Durchströmen des Kühlschirmes und des ersten Rauchrohrzuges treffen die Abgase in der wassergekühlten Wendekammer auf den Überhitzer und durchströmen anschließend die beiden anderen Rauchrohrzüge. Der Satteldampf durchfließt den Überhitzer und wird nach dem Austritt im Zwischenkühler auf 320°C gekühlt und dem Dampfmotor zugeführt. Die Stromerzeugung erfolgt mit einem schnelllaufenden 2-Zylinder-Spilling-Dampfmotor, welcher direkt einen Drehstromgenerator antreibt. In den Zylindern wird der Dampf vom Kesseldruck auf den Verbrauchsdruck des Werkes entspannt. Die Leistung lässt sich durch Veränderung der Öffnungszeiten der Ein- und Auslassventile der Zylinder regeln. Dadurch ist ein Betrieb mit variablen Dampfmengen und mit optimalen Wirkungsgraden möglich.

Alle Anlagenkomponenten wie Brennstofftransport, Feuerung, Dampf- und Stromerzeugung werden von einer zentralen Schaltschrankanlage aus überwacht und gesteuert. Die Kesselanlage ist auf einen 72-Stunden-Betrieb ohne Überwachung ausgelegt. Die Feuerungsanlage wird über 5 Regelkreise gesteuert: Leistungs-, Verbrennungs-, Unterdruck-, Lambda- und Luftmengenregulierung. Über eine PC-Visualisierung werden zudem alle wichtigen Werte wie Leistung, Dampfdruck, elektrische Energie etc. aufgezeichnet und dokumentiert.

Fig. 7 zeigt ein Energieflussdiagramm der Anlage. Die WKK produziert etwa 1400MWh Strom und 13000MWh Wärme im Jahr und verbraucht dafür 300Sm³ Holzschnitzel pro Woche. Dies entspricht etwa 3300t Holzschnitzel (Trockengewicht), die zu zwei Dritteln als Produktionsabfälle anfallen und zu einem Drittel als naturbelassene Holzschnitzel zugekauft werden. Die Produktionsabfälle stammen aus der Verarbeitung einer Reihe unterschiedlicher Hölzer (z.B. Ahorn, Buche, Fichte) die zum Teil aus Frankreich, Osteuropa, Russland und Finnland mit Lkw und Bahn importiert werden. Nach Angaben der Betreiber erreicht die Anlage einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 83% (thermisch 78% und elektrisch 6.5%, berechneter Wirkungsgrad 85%).

Die installierte Low-NO_x-Feuerung ermöglicht eine deutliche Reduktion der Stickoxidemissionen. Ausserdem wird das Abgas mit einem Multi-Zyklon entstaubt. Folgende Emissionswerte wurden für die Anlage gemessen: Staub 80-91mg/Nm³, CO 10-17mg/Nm³, NO_x 149-181mg/Nm³ bei 11% O₂ im Abgas. Für die Wasseraufbereitung werden verschiedene Chemikalien (Helamin und ein Herbizid) eingesetzt. Insgesamt werden vom Werk etwa 45tsd m³ Wasser/a (nicht nur für die WKK-Anlage) verbraucht. Die Holzasche muss auf einer Reaktordeponie entsorgt werden.

Die anfallenden Aschen und Filtrerrückstände (etwa 100m³/a) und deren Entsorgungsmöglichkeiten wurden im Rahmen von Studien untersucht. Eine Verwendung als Dünger kommt auf Grund zu hoher Schwermetallgehalte (Zink, Kupfer, Blei) nicht in Frage und die anfallenden Aschen müssen auf einer Reststoffdeponie entsorgt werden.

Die Anlage wurde am 21.8.2001 besichtigt. Der Fragebogen wurde aufgrund des Gespräches mit Herrn Eisenegger und zusätzlich zur Verfügung gestellten Unterlagen ausgefüllt. Zusätzliche In-

formationen¹¹ wurden vom Planer und Besitzer der Anlage, Schmid AG, Eschlikon, Herrn Stutz, zur Verfügung gestellt.

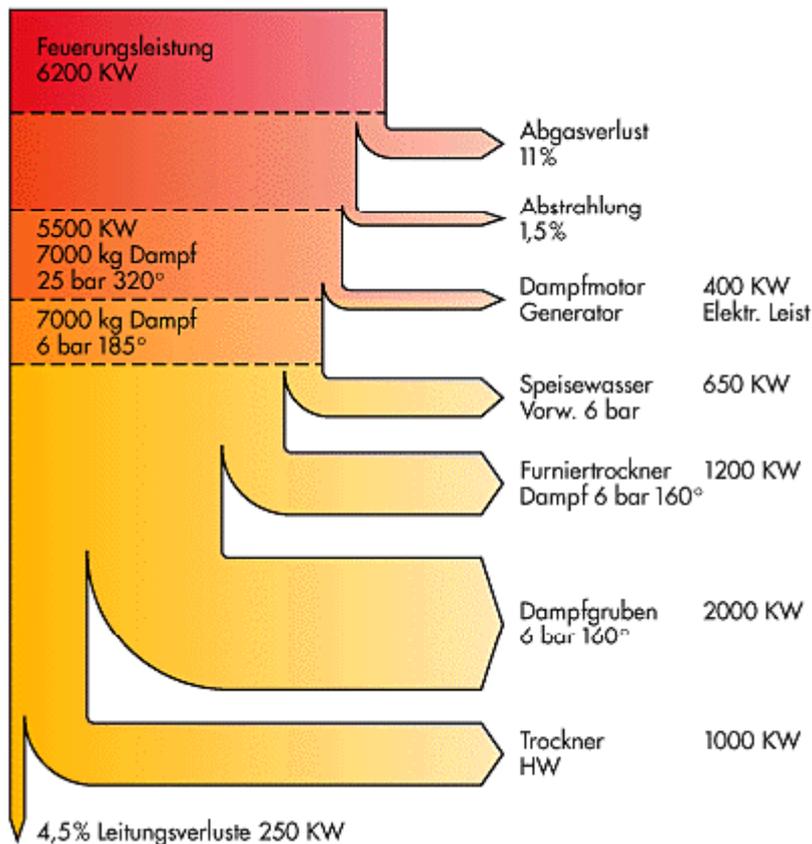


Fig. 7 Energieflussdiagramm der WKK-Anlage Lengwil.

2.2.3.3 Fernheizkraftwerk Meiringen

Das Fernheizkraftwerk Meiringen ist eine schweizerische Pilotanlage für die gekoppelte Gewinnung von Strom und Wärme aus Holzschnitzeln. An diese Energieversorgung, welche auf einheimischen Ressourcen aus der näheren Umgebung basiert, sind viele Unternehmen, Institutionen und Haushalte in der Gemeinde Meiringen angeschlossen. Die Stromproduktion erfolgt nur im Winter. Aufgrund technischer Probleme hat die Anlage bisher die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllt. Die in der Planung angestrebten Leistungsdaten werden nicht erreicht.

Fig. 8 zeigt einen Überblick zur Konstruktion der Anlage in Meiringen. Das Fernheizkraftwerk produzierte im Geschäftsjahr 2000/2001 1120MWh Strom und 12100MWh Wärme und verbrauchte dafür 21800Sm³ Holzschnitzel, die in der näheren Umgebung produziert werden. Zum Teil wird in der Anlage auch Restholz verbrannt. Für die Umrechnung in trockenes Holz wurden die Angaben des Betreibers zum Heizwert zu Grunde gelegt. Damit liegt der Verbrauch bei 3600t Holz (trocken). Der Gesamtwirkungsgrad beträgt etwa 72% (berechnet 72%).

Als einzige der drei in Betrieb befindlichen Anlagen ist sie mit einem Elektrofilter zur Staubabscheidung ausgerüstet. Folgende Emissionswerte wurden für die Anlage gemessen: Staub

¹¹ Informationen auf <http://www.energieholzboerse.de/holzenergie/lengwil.htm> und <http://www.voller-energie.ch/ANLAGEV/LENGWIL/LENGWIL.HTM>.

3mg/Nm³, CO 30 mg/Nm³, NO_x 151 mg/Nm³ (bei 11% O₂ im Abgas). Vom Netz werden etwa 110 MWh Strom pro Jahr bezogen. Wahrscheinlich liegt der Hauptfremdstrombezug im Sommer wenn die WKK-Anlage nicht in Betrieb ist. Dann wird Strom zur Reinigung der Abgase aus dem Heizkessel und für die Wärmeverteilung, z.B. Pumpen, benötigt. Die Holzasche wird in einer Inertstoffdeponie entsorgt. Zusätzlich fallen im Jahr etwa 200kg hausmüllähnlicher Gewerbeabfall an.

Die Anlage nutzt eine Fläche von etwa 30m*60m. Für die Wasseraufbereitung werden Natriumchlorid und verschiedene andere Chemikalien (R57 für Sauerstoffbindung und Konservierungsmittel KA) eingesetzt. Ausserdem wird etwas Schmieröl verbraucht.

Die Anlage wurde am 26.7.2001 besichtigt. Der Fragebogen wurde von Peter Röck, Colenco Power Engineering AG ausgefüllt. Er ist zur Zeit mit der Optimierung des Fernheizkraftwerkes beauftragt.

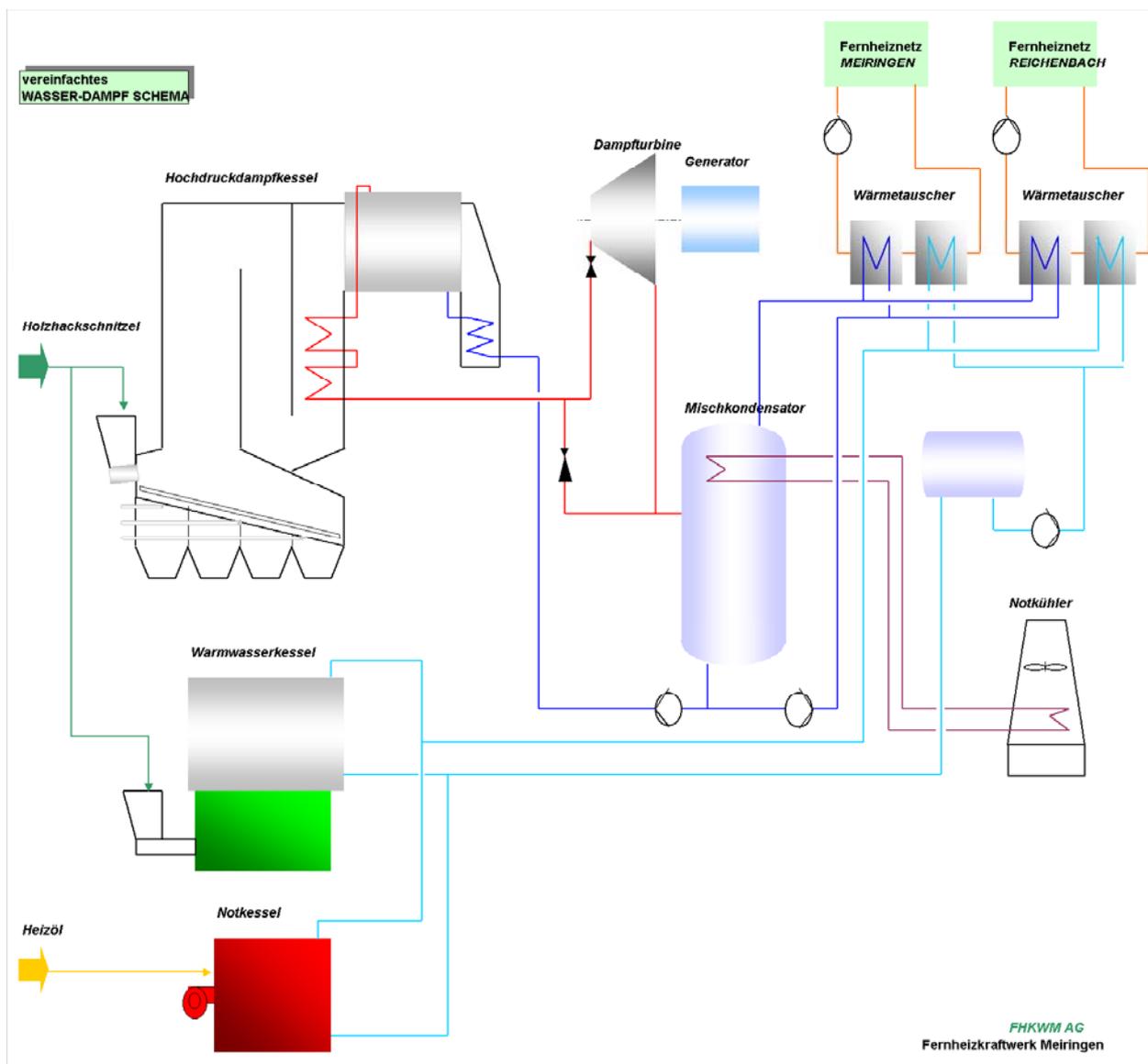


Fig. 8 Anlagenschema des Fernheizkraftwerkes Meiringen.

2.2.3.4 25MW Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL)

Für eine zusätzliche Abschätzung standen Daten für ein 25MW Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL) zur Verfügung (REMMERS 2000).¹² Dieses Kraftwerk ist deutlich grösser als die bestehenden Anlagen in der Schweiz, es nutzt eine andere Verbrennungstechnologie (Wirbelschichtfeuerung) und verfügt über eine weitergehende Abgasreinigung (katalytische und nicht-katalytische DeNOx-Anlage). Für Vergleichszwecke ist es deshalb besonders interessant.

Im Jahr werden 275 000t Frischholz (50% Feuchtgehalt) zu etwas mehr als 200GWh elektrischer Energie konvertiert. Die Wärme aus der Anlage wird z.Zt. noch nicht genutzt. Die Wärmenutzung wäre aber grundsätzlich möglich. Etwa 10% des produzierten Stroms werden innerhalb der Anlage, vor allem für den Brennstofftransport verbraucht. Der Nettowirkungsgrad liegt bei 29.8%. Zur Einhaltung der Luftreinhaltevorschriften werden eine kombinierte katalytische und nicht-katalytische DeNOx-Anlage und ein Elektrofilter eingesetzt. Tab. 11 zeigt die Emissionsdaten für dieses Kraftwerk. Pro Jahr werden 1000m³ NH₃ (25%ige Lösung) verbraucht.

Tab. 11 Emissionsdaten des Holzkraftwerkes Cuijk und Umrechnung auf einen Sauerstoffgehalt von 11% (REMMERS 2000:193).

	Grenzwert NL	Messung (max.)	Grenzwert NL	Messung (max.)
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
	bei 11% O ₂		bei 6% O ₂	
CxHy (in der Sachbilanz als NMVOC)	10.0	<1.33	15	<2
Staub	13.3	5.3	20	8
Schwermetalle (in der Sachbilanz als Zink)	1.0	0.20	1.5	0.3
Cadmium	0.05	0.00067	0.075	0.001
Quecksilber	0.05	0.0120	0.075	0.018
HCl	10.0	9.5	15	14.3
HF	1.0	0.353	1.5	0.53
SO ₂	167	4.7	250	7
NO _x	66.7	49.3	100	74
NH ₃	3.3	6.0	5	9

2.2.4 Abschätzung für die Verwendung von Altholz als Brennstoff

Bisher existieren in der Schweiz keine Anlagen, in denen Strom aus der Verbrennung von Altholz gewonnen wird. Für diese Studie wurde deshalb eine Abschätzung zur Verwendung dieses Brennstoffes in WKK-Anlagen durchgeführt. Grundlage hierzu waren Daten für bestehende Verbrennungsanlagen in denen Altholz für die Wärmebereitstellung genutzt wird.

Zur Zeit sind Planungen bzw. Vorstudien für den Bau solcher Anlagen in der Schweiz im Gange. Von der Firma eproplan GmbH werden in einer Vorstudie die Möglichkeiten eine Anlage für die Verbrennung von Altholz bei der Firma Kronospan AG untersucht. Hierzu und zu weiteren Anlagen wurden einige Informationen zur Verfügung gestellt. Aufgrund des frühen Planungsstadiums wurden bisher allerdings kaum konkrete Festlegungen getroffen. Angedacht ist eine Rostfeuerung mit etwa 50-70MW Feuerungsleistung. Für die Verbrennung von Altholz werden höhere Anforderungen an die Abgasreinigung gestellt. Deshalb müssten neben einem Zyklon, evt. ein Kessel mit SNCR-Entstickungsanlage (selektive nichtkatalytische Reduktion) und ein Gewebefilter zum Einsatz kommen. Mit einem Elektrofilter alleine können die bestehenden Luftreinhaltevorschriften dagegen nur schwer eingehalten werden.

¹² Zusätzliche Informationen wurden von R. Remmers schriftlich zur Verfügung gestellt.

Von der Firma Umtec Est. wird eine Altholzfeuerung im Kanton Zürich geplant. Hierzu standen keine Unterlagen zur Verfügung. Weitere Auskünfte wurden von Herrn W. Riegger von der IG Altholz erteilt.

Für die Quantifizierung erfolgt keine genaue Betrachtung der weiteren Entsorgungswege. Es wird davon ausgegangen, dass der Rohstoff Altholz kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Aufwendungen (z.B. in der Forstwirtschaft) für die primäre Herstellung des Holzes bzw. des Holzproduktes und für den Transport bis zur Aufbereitung werden dagegen der Erstanwendung zugeteilt und dementsprechend hier nicht berücksichtigt. Deshalb werden für die Ökobilanz nur die Aufwendungen für die Schnitzelherstellung und für den Transport der Altholzschnitzel vom Aufbereitungsort bis zur Altholzverbrennung betrachtet.

Für die Bilanz der Emissionen aus der Altholzverbrennung wurden Literaturangaben verwendet (siehe Kapitel 2.2.5). Es ist davon auszugehen, dass diese Anlagen generell mit einer weitergehenden Abgasreinigung ausgerüstet werden. Ansonsten wurden für die Bilanz der Altholzverbrennung die gleichen Annahmen hinsichtlich Brennstoffverbrauch, Infrastruktur, etc. getroffen wie für die Verbrennung von Holzbrennstoffen.

2.2.5 Emissionen in die Luft

Für Emissionen in die Luft lagen nur einzelne Messwerte der vier untersuchten Anlagen vor. Es werden keine kontinuierlichen Messungen durchgeführt, sondern nur eine Messung (etwa jährlich) der Schadstoffe Partikel, CO und NO_x.

Für die Sachbilanz der Emissionen wurden deshalb vor allem Literaturdaten verwendet (BÜHLER *et al.* 1996, FRISCHKNECHT *et al.* 1996, HASLER & NUSSBAUMER 1994, HASLER *et al.* 2000, MOHN 2000, NUSSBAUMER 1988, NUSSBAUMER *et al.* 1994, REMMERS 2000). Berücksichtigt wurden auch Angaben zu den Grenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung bei der Verwendung von Holzbrennstoffen und Altholz in einer Verbrennungsanlage (LRV 2000). In einigen Fällen wird es bei Altholzfeuerungen im Gegensatz hierzu noch verschärfte Grenzwerte geben.¹³ Für die Berechnung der Luftemissionen werden die Messwerte auf einen Sauerstoffgehalt von 11% normiert. Bei der Verbrennung von trockenem Holz entstehen bei 11% O₂-Gehalt 9600 Nm³ trockenes Abgas pro Tonne Holz (atro). Dieser Wert wird zur Umrechnung der Schadstoffkonzentrationen in Massenströme verwendet.

Die verschiedenen Untersuchungen zeigen folgende Einflussparameter auf die Zusammensetzung des Abgases:

- Schadstoffgehalt und Art des Holzes (z.B. Rinde, Altholz, Schnitzel, etc.)
- Verbrennungstechnik (Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung).
- Verbrennungsführung (Luftüberschuss, etc.)
- Filtertechnik (Zyklon, Gewebefilter, Elektrofilter, Entstickungsanlage, etc.)
- Abscheidegrad des Filters.

Tab. 12 zeigt minimale und maximale Emissionswerte aus der Literatur und den Grenzwert in der Schweiz gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV 2000). Für die in dieser Studie verwendete Abschätzung bei den Standardanlagen wurden soweit möglich Mittelwerte aus den ausgewerteten Un-

¹³ Mitteilung von W. Riegger, IG Altholz (Quelle: Bundesamt für Energie, DIANE 8, UVP von Altholzfeuerungsanlagen).

tersuchungen verwendet. In einigen Fällen basiert die Festsetzung des Standardwertes auf einer Einschätzung von Dr. Thomas Nussbaumer oder auf eigenen Abschätzungen zu einem wahrscheinlichen Wert auf Grundlage der in der Literatur vorhandenen Spannweite.

Tab. 12 Luftemissionen bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen und Altholz. Minimal- und Maximalwerte aus verschiedenen Studien (siehe Text). Abschätzung für die Emissionen bei der Verbrennung von Altholz mit weitergehender Abgasreinigung und Holzbrennstoffen mit Multi-Zyklon für die vorliegende Sachbilanz. Alle Angaben in mg/Nm³ ausser TCDD-Äquivalente in fg/Nm³ (10⁻¹⁵g oder 10⁶ng) bei 11% O₂ im trockenen Abgas. Die Abkürzung „s“ steht in eco^{mc} für Emissionen aus stationären Quellen. Für NO_x (>2.5kg NO_x/h), NMVOC (Anlage >1MW) und Partikel (Anlage <5MW) gelten die Grenzwerte nur unter bestimmten Bedingungen. Je nach Standort und Anlagengrösse sind strengere Grenzwerte möglich.

Modul-Namen eco ^{mc}	Feuerung Altholz min	Feuerung Altholz max	LRV-Grenzwert Altholz	Altholz-Feuerung Diese Studie	Feuerung Holz min Lit.	Feuerung Holz max Lit.	LRV-Grenzwert Holz	Holz-Feuerung Diese Studie
Acetaldehyd s				0.1175	0.118	0.45		0.1175
Alkane s				1.75	1.75	7.13		1.75
Alkene s				6.0	6.0	21.8		6.0
As Arsen s	0.00036	0.063		0.021	0.0013	0.005		0.002
BaP Benzo(a)pyren s				0.00101	0.00101	0.00101		0.00101
Benzol s				1.75	1.75	6.75		1.75
Br Brom s	0.18	0.36		0.214	0.1			0.1
Ca Calcium p	0.37	39		8.56	3.5	19		11.25
Cd Cadmium s	0.00018	0.2	0.2	0.069	0.00010	0.002		0.0002
CH4 Methan s				7.13	7.13	100		7.13
CO Kohlenmonoxid s	2	386	250	100	2	1860	250	100
CO2 Kohlendioxid s								
Cr Chrom s	0.0063	0.21		0.06	0.0063	0.313		0.007
Cu Kupfer s	0.021	0.38		0.189	0.04	0.0625		0.042
Ethylbenzol s				0.0588	0.0588	0.225		0.0588
Formaldehyd s				0.25	0.25	0.90		0.25
Hexachlorbenzol HCB s	4.60E-06	1.50E-04		5.15E-05	8.60E-07	1.90E-06		1.38E-06
HCl Salzsäure s	0.18	100	30	6.7	0.31	9.53		0.365
HF Fluorwasserstoff s	0.09	5	5	0.755	0.0625	0.35		0.0625
Hg Quecksilber s	0.00072	0.35	0.2	0.006	0.00054	0.012		0.00056
K Kalium s	0.18	39		25	43	47		45
Mg Magnesium s	0.18	5.4		0.986	0.18	1.2		0.69
Mn Mangan s	0.027	0.042		0.03	0.325			0.325
Na Natrium s	3.9	30		11	2.1	3		2.55
N2O Lachgas s		71		4.5	1.0	38		4.5
NH3 Ammoniak s	0	30	30	10	3.33	17.5		3.33
Ni Nickel s	0.0018	0.069		0.019	0.0094	0.012		0.011
NMVOC s	0	50	50	10	1.33	100	50	10
NOx Stickoxide als NO2 s	73	518	250	100	49.3	574	250	200
P Phosphor s	0.35	3.7		1.06	0.5	0.66		0.58
PAH Polyzyklische aromatische HC s	4.20E-05	1.50E-01		2.93E-02	2.10E-02			2.10E-02
Partikel s	1	20	50	10	3.78	1416	150	121
Pb Blei s	0.35	26	2.5	2	0.029	0.068		0.049
Pentachlorphenol PCP s	2.70E-05	1.30E-04		6.19E-05	1.50E-05	1.60E-05		1.55E-05
Sn Zinn s	0.005	0.023		0.01				0
SOx als SO2 s	10	100	250	20	2	167	250	5
TCDD-Aequivalente	30000	18020000	500000	1790000	4000	500000		59000
Toluol s				0.588	0.588	2.25		0.588
Xylol s				0.234	0.234	0.9		0.234
Zn Zink s	0.74	55	2.5	2	0.375	0.72		0.5

Für die Verfeuerung von Altholz wird für die Standardanlage von einer weitergehenden Abgasreinigung ausgegangen. Die normale Holzfeuerung verfügt nur über einen Multi-Zyklon. Für die Verbrennung von Holzbrennstoffen in einer Anlage mit weitergehender Abgasreinigung werden die reduzierten Staub- und NO_x-Emissionen sowie die erhöhten Ammoniak-Emissionen der Altholzfeuerung eingesetzt. Die Emissionen von CO₂ werden direkt an Hand der verbrauchten Holzmenge berechnet (1.81 kg/kg Holz). Eine Korrektur für CO und CH₄ Emissionen erfolgt nicht, da diese um Größenordnungen geringer sind. Insgesamt gilt die Holzverbrennung damit als CO₂-neutral, da beim Holzwachstum die gleiche Menge CO₂ als negative Emission gutgeschrieben wurde.

Für die Bewertung der Gesundheitsschäden durch Partikel ist die Partikelgrösse ein entscheidender Parameter. In der Methode Eco-indicator 99 wird zwischen PM2.5 und PM10, also Partikeln mit einem mittleren Durchmesser kleiner 2.5 respektive 10 Mikrometern, unterschieden (GOEDKOOP & SPRIENSMA 2000a). Für die Datenbank eco^{mc} wurden die Schadensfaktoren für PM2.5 für alle Partikel aus Verbrennungsprozessen angenommen (JUNGBLUTH & FRISCHKNECHT 2000). Die Untersuchung von (HASLER & NUSSBAUMER 1997) zeigt, dass der Hauptteil der Partikel aus der Holzverbrennung im Bereich < 1 µm liegt. Die Bewertungsmethode wird somit richtig angewendet.

2.2.6 Anlagenbau und -entsorgung

Tab. 13 zeigt die Sachbilanzdaten für die Infrastruktur einer Wärmekraftkopplungsanlage für die Verbrennung von Holz. Für die Anlage in Lengwil lag eine Abschätzung zu den beim Bau der Anlage (Kessel, Brennstoff Transport, Multi-Zyklon, etc.) verwendeten Materialien vor. Eine zweite Sachbilanz wurde basierend auf einer Hochrechnung der Infrastrukturdaten für einen 1MW Ölheizkessel (FRISCHKNECHT *et al.* 1996) erstellt. Die Abschätzung für die Sachbilanz für die Wärmekraftkopplungsanlage für Holzbrennstoffe mit 5MWth berücksichtigt diese beiden Datenquellen.

Tab. 13 Energie- und Stoffströme für die Infrastruktur einer Wärmekraftkopplungsanlage für die Verbrennung von Holz. Abschätzung der Sachbilanzen für Anlagenteile und Gebäude.

Modul-Namen eco ^{mc}		Unit	WKK-Anlagenteile Lengwil Stk	WKK-Anlage, Hochrechnung Stk	Infra Wärmekraftkopplungsanlage 5MW, Holz Stk	Kraftwerksgebäude Biere Stk	Kraftwerksgebäude Meiringen Stk	Infra Kraftwerksgebäude 20tsd. m3 Stk	Bemerkungen
Energie	Strom Mittelspannung - Bezug in CH Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ		8.60E-3	8.60E-3				
		TJ		3.00E-4	3.00E-4				
Materialien	Aluminium 0% Rec.	kg		3.20E+2	3.20E+2				
	Armierungsstahl	kg				1.34E+4	4.94E+4	3.14E+4	Für Stahlbeton
	Asphaltdeckschicht	kg				1.80E+4	1.80E+4	1.80E+4	Zufahrt 60m
	Asphalttragschicht	kg				6.00E+4	6.00E+4	6.00E+4	Zufahrt 60m
	Kies	kg				2.12E+5	2.12E+5	2.12E+5	Zufahrt 60m
	Schwarzanstrich	kg				1.33E+2	2.88E+2	2.10E+2	Für Dach
	Beton pc300	kg	3.40E+4		3.40E+4	6.54E+5	2.42E+6	1.54E+6	4*40*7.5 m a 30cm, eine Zwischenwand, Boden
	Gusseisen	kg		8.64E+3				0	
	Holzbaustoff Brettschichtholz	kg				1.04E+3	2.51E+4	1.31E+4	Schätzung Verschalung und Teilweise Holzaufbau
	Schnittholz Fichte saegerauh	m3				1.78E+2		8.90E+1	ohne CO2 Gutschrift
	Fichtenplatte	m3				4.50E+1		2.25E+1	ohne CO2 Gutschrift
	Harzfaserplatte	m3				7.00E+1		3.50E+1	ohne CO2 Gutschrift
	Holzwolle	kg				2.49E+4		1.25E+4	
	Kupfer	kg		3.20E+2	3.20E+2			0	
	Mineralwolle	kg		9.00E+1	9.00E+1			0	
	PE (HD)	kg		3.40E+2	3.40E+2			0	
	Stahlblech verzinkt	kg				7.58E+3	7.58E+3	7.58E+3	Dachabdeckung
	Stahl hochlegiert	kg		4.60E+2	4.60E+2			0	
	Stahl unlegiert	kg	7.60E+4	1.52E+4	7.60E+4		1.00E+3	5.00E+2	1000kg Zyklon; Schätzung für Treppen etc.
	Deckfarbe	kg		1.70E+2	1.70E+2			0	
	Aushub Hydraulikbagger	m3				8.00E+3	8.00E+3	8.00E+3	Baugrube
	Generator 200 kW	Stk.		1.00E+0	1.00E+0			0	
	Schaltschrank BHKW 160 kWel	Stk.	3.00E+0	3.00E+0	3.00E+0			0	
	Computer, PC, ab Werk	Stk	1.00E+0	1.00E+0	1.00E+0			0	
Transporte	Transport LKW 28 t	tkm	4.48E+3	1.28E+3	4.56E+3	2.65E+4	5.82E+4	4.23E+4	
	Transport LKW 40 t	tkm	3.30E+4		3.35E+4			0	
	Transport Schiene	tkm	4.56E+4	9.45E+3	4.59E+4	1.26E+4	3.48E+4	2.37E+4	
Abfälle	Beton in Inertstoffdeponie	kg	3.40E+4	9.94E+3	3.40E+4	6.54E+5	2.42E+6	1.54E+6	
	Holz unbehandelt in KVA	kg	0	2.00E+3	0	1.64E+5	2.51E+4	9.44E+4	
	Kunststoffe in KVA	kg		3.40E+2	3.40E+2			0	
	Mineralwolle in Inertstoffdeponie	kg		9.00E+1	9.00E+1			0	
Emissionen	Abwaerme in Luft s	TJ	0	8.60E-3	8.60E-3	0	0	0	Gutschrift für CO2-Aufnahme beim Holzwachstum der in m3 angegebenen Produkte.
	CO2 Kohlendioxid p	kg	0	0	0	-2.49E+5	0	-1.25E+5	

Die Anlage in Bière, für die detaillierte Baupläne und Mengenangaben vorlagen, zeichnet sich durch ihre Holzbauweise aus. Bei teilweiser Betonbauweise, wie sie für die Anlage in Meiringen abgeschätzt wurde, ist mit höheren Umweltbelastungen zu rechnen. Die Sachbilanz für das Anla-

engebäude wurde als Mittelwert dieser beiden Berechnungen erstellt. Das Gesamtgewicht des Bauwerks inkl. der Anlagenteile beträgt nach diesen Berechnungen etwa 2000 Tonnen. Von (MATTHEWS & MORTIMER 2000) wurde im Vergleich hierzu für eine Anlage mit 5MWel Leistung ein Gesamtgewicht von 4300 Tonnen bestimmt. Die Nutzungsdauer des Gebäudes wird mit 80 Jahren und die der Anlagenteile mit 30 Jahren angenommen.

2.2.7 Entsorgung von Holzaschen

Hinsichtlich der möglichen Entsorgungswege der Aschen aus der Holzverbrennung gibt es einige Unsicherheiten. Eine Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft ist aufgrund der hohen Schwermetallgehalte in der Regel nicht gestattet. Waldböden dürfen grundsätzlich nicht gedüngt werden. Aufgrund der Auslaugbarkeit der Schwermetalle ist eine Ablagerung auf der Inertstoffdeponie ohne vorhergehende Behandlung und Verfestigung auch nicht ohne weiteres möglich. In Frage kommt somit die Entsorgung auf der Reaktordeponie oder in der Kehrrechtverbrennungsanlage. Von den Anlagenbetreibern werden zur Zeit noch verschiedene Entsorgungswege gewählt.

Die Entsorgung von Aschen aus der Holz- bzw. Altholzverbrennung wurde neu bilanziert. Grundlage für die Eingabe der Daten ist die Arbeit von (ZIMMERMANN *et al.* 1996). Einige wichtige Kenngrößen in diesem Modell wurden von (HELLWEG *et al.* 1998) überarbeitet. Dieses neue EXCEL-Tool wurde für die Berechnungen zur Entsorgung von Holzaschen noch um das von (ZIMMERMANN *et al.* 1996) erstellte Modell für die Reaktordeponie erweitert.

Die Zusammensetzung der Aschen aus der Holzverbrennung wurde auf Grundlage der Angaben in (NOGER *et al.* 1996) berechnet. Als weitere Quelle wurde eine Messung verschiedener Elementgehalte der Aschen aus der Anlage Lengwil verwendet. Für Altholz wurde eine Mischung von- Rost, Zyklon- und Filterasche auf Grundlage der Mittelwerte aus (NOGER *et al.* 1996) mit den Angaben zum Anfall von (HASLER & NUSSBAUMER 1993) berechnet. Tab. 14 zeigt die Zusammensetzung von Holzaschen und die Anteile der Aschefraktionen, wie sie für dieses Projekt angenommen werden.

Tab. 14 Angenommene Zusammensetzung von Holzaschen für die Berechnung der Sachbilanzen der Entsorgung (NOGER *et al.* 1996) und Firmendaten. Anteile der Aschefractionen (HASLER & NUSSBAUMER 1993).

Stoffnamen	Asche Holz	Asche Altholz	Mittelwert Rostasche	Mittelwert Zyklonasche	Mittelwert Filterasche
	%	Mittelwert %	Altholz ppm	Altholz ppm	Altholz ppm
H2O	0.00E+0	0	-	-	-
O	4.70E-1	4.57E-1	460'000	410'000	330'000
H		2.44E-3	2'200	1'900	9'900
C	1.00E-2	1.19E-2	7'900	46'000	46'000
S	2.20E-2	1.93E-2	18'000	27'000	34'000
N		1.47E-4	36	690	2'100
P	1.10E-2	4.21E-3	4'100	6'100	1'900
B	3.40E-4	3.36E-4	340	300	190
Cl		6.76E-3	660	30'000	130'000
Br		0			
F		2.20E-4	86	1'700	630
J		0			
Ag		0			
As	5.10E-6	2.27E-5	17	59	100
Ba	5.60E-4	4.54E-3	4'700	3'700	540
Cd	4.30E-6	3.73E-5	20	70	460
Co	1.05E-5	2.13E-5	21	30	5
Cr	3.65E-5	5.39E-4	470	1'400	400
Cu	1.20E-4	1.13E-3	1'200	440	420
Hg	5.00E-7	5.19E-7	1	1	1
Mn	7.95E-3	1.82E-3	1'800	2'400	600
Mo	2.60E-6	7.47E-6	7	11	11
Ni	4.65E-5	1.78E-4	180	170	74
Pb	8.50E-6	4.05E-3	2'100	8'400	50'000
Sb		0			
Se	6.00E-4	0			
Sn		5.14E-5	38	60	410
V	2.52E-5	1.77E-4	170	260	150
Zn	3.15E-4	1.23E-2	6'900	16'000	160'000
Si		1.64E-1	170'000	130'000	7'500
Fe	1.20E-2	2.21E-2	22'000	29'000	3'900
Ca	3.30E-1	2.17E-1	220'000	200'000	120'000
Al	5.72E-3	2.36E-2	24'000	25'000	2'600
K	6.30E-2	2.08E-2	19'000	23'000	62'000
Mg	2.55E-2	1.68E-2	17'000	18'000	2'800
Na	1.17E-2	8.69E-3	8'100	8'000	25'000
Summe	97%	100%	991'046	989'691	991'691
Anteil am Anfall			90%	7%	3%
Anfall (kg/t Trockensubstanz Brennstoff)			61.8	4.9	2.1

Tab. 15 zeigt die Sachbilanzdaten für die Entsorgung von Holzaschen. Der Anfall von Holzaschen variiert stark (unter 1% bis über 10% von der eingesetzten Holzmenge) zwischen verschiedenen Anlagen und bei verschiedenen Brennstoffen (HASLER & KASSER 1994, HASLER & NUSSBAUMER 1993). Der Anfall hängt vom Aschegehalt des Brennstoffs und Verunreinigungen sowie vom Feuerungstyp (Abscheidung) ab. Für die Berechnung des Ascheanfalls in den Standardanlagen für Holzbrennstoffe und Altholz wird mit einem Wert von 1.5% respektive 7% der eingesetzten Holzmenge gerechnet und eine Entsorgung in der Reaktordeponie angenommen.

Es wurde jeweils ein Entsorgungsmodul für die Beseitigung in einer KVA bzw. in einer Reaktordeponie berechnet. Eine Abschätzung für die Umweltfolgen der direkten Beseitigung in einer Reststoffdeponie ist mit dem EXCEL-Tool zur Zeit nicht möglich und, da diese Entsorgungsmöglichkeit bisher nicht genutzt wird, auch nicht nötig. Bei einer Entsorgung in der Inertstoffdeponie sind die Umweltbelastungen unabhängig vom Abfall und deutlich niedriger als bei der Reaktordeponie.

Tab. 15 Energie- und Stoffströme für die Entsorgung von Aschen aus der Holz- und Altholzverbrennung.

MName	Unit	Altholzäsche	Altholzäsche	Altholzäsche	Holzäsche:	Holzäsche00	Holzäsche00	LT	LT	LT	LT
		: in Reaktordep. 0-150a	Altholzäsche 00: in KVA	Reststoffdep. 0-40a	Schlackeko mp. 0-75a	in Reaktordep. 0-150a	: in KVA	Reststoffdep. 0-40a	Schlackeko mp. 0-75a	Altholzäsche : in >150a	Altholzäsche 00: >40a
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Strom Mittelspannung - Bezug in CH	TJ	4.60E-9			4.76E-9						
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ		3.60E-7			3.60E-7					
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	3.15E-11			6.44E-11						
Ammoniak	kg	7.77E-9									
Chemikalien organisch	kg	1.01E-7			1.16E-8						
Kalk (CaO)	kg	3.12E-6			8.13E-6						
Transport LKW 16 t	tkm	1.03E-2	6.00E-2		1.07E-2	6.00E-2					
Heizöl EL in Heizung 10 kW	TJ	1.60E-9			1.81E-9						
Nutzwärme ab Industriefeuerung EL, CH	TJ		7.20E-8			7.20E-8					
Erdgas in Heizung Gebälsebr. <100 kW	TJ	1.43E-10			3.54E-10						
Nutzwärme ab Industriefeuer.LowNOx>100 k	TJ		1.68E-7			1.68E-7					
Abwärme in Luft p	TJ	1.11E-8			1.13E-8						
Abwärme in Luft s	TJ	1.34E-9	3.60E-7		1.13E-9	3.60E-7					
Cd Cadmium s	kg	2.32E-9			2.67E-10						
CH4 Methan p	kg	4.05E-5			3.41E-5						
CH4 Methan s	kg	1.43E-9			1.20E-9						
CN Cyanide s	kg	5.36E-11									
CO Kohlenmonoxid p	kg	6.92E-9			5.82E-9						
CO Kohlenmonoxid s	kg	1.90E-8			1.60E-8						
CO2 Kohlendioxid p	kg	9.40E-5			7.91E-5						
CO2 Kohlendioxid s	kg	2.26E-4			1.90E-4						
Cu Kupfer s	kg	3.45E-9			3.66E-10						
Fe Eisen s	kg	3.88E-9			2.10E-9						
HCl Salzsäure s	kg	9.77E-7									
HF Fluorwasserstoff s	kg	1.94E-6									
Hg Quecksilber s	kg	1.15E-9			1.11E-9						
N2 Stickstoff p	kg	2.51E-7									
N2O Lachgas p	kg	3.61E-10									
NH3 Ammoniak p	kg	9.13E-9									
NH3 Ammoniak s	kg	9.20E-11									
NM VOC s	kg	4.76E-10			4.00E-10						
NOx Stickoxide als NO2 p	kg	2.65E-9									
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	1.20E-8									
P Phosphor s	kg	3.73E-8			9.73E-8						
Partikel s	kg	6.39E-9			5.37E-9						
Pb Blei s	kg	5.43E-10			1.14E-12						
SOx als SO2 s	kg	1.38E-4			1.57E-4						
Zn Zink s	kg	6.12E-8			1.56E-9						
Ammoniak als N f	kg	5.45E-7		2.74E-5			1.84E-8		1.15E-4		
Chloride f	kg	6.66E-5		6.39E-3			6.69E-3		3.67E-4		
Fluoride f	kg	3.57E-7					2.17E-4				
Ion Blei f	kg	5.42E-8		3.36E-7	1.14E-10		4.01E-5		1.99E-5	8.42E-8	
Ion Cadmium f	kg	1.28E-7		1.55E-7	1.48E-8		1.84E-8	2.44E-5	1.22E-5	2.81E-6	
Ion Calcium f	kg		2.64E-5	1.20E-3		2.64E-5	1.88E-3		4.25E-2	9.67E-2	
Ion Chrom-III f	kg			7.55E-8			5.26E-9			1.88E-5	
Ion Eisen f	kg	3.10E-7		1.28E-7	1.68E-7		7.17E-8	1.53E-3	1.61E-4	7.75E-4	
Ion Kupfer f	kg	1.36E-6		4.87E-8	1.44E-7		5.31E-9	5.05E-4		2.55E-4	
Ion Quecksilber f	kg	6.81E-10		1.70E-8	6.56E-10		1.69E-8	3.08E-7		1.39E-7	
Ion Zink f	kg	5.13E-5		8.26E-7	1.31E-6		2.17E-8	8.30E-3		4.19E-3	
Nitrate f	kg	2.26E-6		2.17E-5			6.02E-4			2.12E-4	
Nitrite f	kg	2.34E-8									
Phosphate f	kg	4.37E-5			1.14E-4		1.28E-2			3.34E-2	
Phosphor Verb. f	kg	5.17E-7			1.35E-6						
Sulfate f	kg	4.88E-4		4.78E-3	7.28E-4		5.61E-3	5.73E-2	5.31E-2	6.53E-2	
TOC f	kg	7.06E-7		3.36E-5	5.94E-7		2.91E-5	1.18E-2	5.61E-4	9.90E-3	
C in Boden	kg	4.80E-7			4.04E-7						
Cd in Boden	kg	5.60E-8			6.46E-9						
Fe in Boden	kg	7.28E-6			3.95E-6						
Hg in Boden	kg	6.54E-10			6.30E-10						
N in Boden	kg	5.66E-8									
P in Boden	kg	1.32E-5			3.44E-5						
Pb in Boden	kg	1.69E-7			3.55E-10						
Zn in Boden	kg	1.81E-9			4.62E-11						
Infra KVA pro kg	kg		1.00E+0			1.00E+0					
Infra Reaktordep. pro kg	kg	1.00E+0			1.00E+0						
Infra Reststoffdep. pro kg	kg			1.00E+0			1.00E+0				
Infra Schlackekomp. pro kg	kg				1.00E+0			1.00E+0			
nur Traegerwasser: pro m3 in ARA Gr.Kl. 2	m3	3.00E-3			3.00E-3						
Prozessspezifisches KVA 00 pro kg	kg		1.00E+0			1.00E+0					
Prozessspezifisches KVA 95 pro kg	kg	1.53E-4			2.15E-4						
Prozessspezifisches Reaktordep. pro kg	kg	1.00E+0			1.00E+0						
Prozessspezifisches Reststoffdep. pro kg	kg	2.08E-5		1.00E+0	1.12E-5	1.00E+0					
Prozessspezifisches Schlackekomp. pro kg	kg	5.11E-5			6.94E-5		1.00E+0				
Altholzäsche00: Schlackekomp. 0-75a	kg		1.00E+0								
Holzäsche00: Schlackekomp. 0-75a	kg					9.71E-1					
LT Altholzäsche: in Reaktordep. >150a	kg	1.00E+0									
LT Altholzäsche00: Reststoffdep. >40a	kg		1.00E+0								
LT Altholzäsche00: Schlackekomp. >75a	kg			1.00E+0							
LT Holzäsche: in Reaktordep. >150a	kg				1.00E+0						
LT Holzäsche00: Reststoffdep. >40a	kg					1.00E+0					
LT Holzäsche00: Schlackekomp. >75a	kg						1.00E+0				

Aus der in Tab. 14 angegebenen Zusammensetzung von Holzaschen wurde eine Sachbilanz für die Ausbringung als Dünger berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Spurenelemente in den Boden emittiert werden. Für die Bewertung spielt dabei die Art der Nutzung (Nahrungsmittelproduktion auf landwirtschaftlichen Böden oder andere Böden (z.B. auf einem Waffenplatz; Dies wird hier als industrielle Nutzung bezeichnet) eine grosse Rolle.

Für die Sachbilanz der Ascheentsorgung (siehe Tab. 16) werden deshalb diese beiden Möglichkeiten unterschieden. Bei der Verwendung auf landwirtschaftlich genutztem Boden ersetzt die Holz- asche normalen zugekauften Dünger. Deshalb erfolgt hier eine Gutschrift für die vorhandenen Nährstoffgehalte mit den Ökobilanzdaten zur Düngeranwendung (JUNGBLUTH 2000). Für Asche aus der Altholzverbrennung wurde kein solches Entsorgungsmodul berechnet, da davon ausgegangen wird, dass diese Asche nicht als Dünger genutzt werden darf.

Tab. 16 Emissionen und Gutschriften für die Ausbringung von Holzasche als Dünger auf landwirtschaftlich genutzten Böden und anderen Böden.

	Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Entsorgung, Holzasche, auf	Entsorgung, Holzasche, auf
			Industrieböden	Landwirtschaftsböden
			kg	kg
Gutschrift	Anwendung K-Duenger	kg		-6.30E-2
	Anwendung Mg-Duenger	kg		-2.55E-2
	Anwendung P-Duenger	kg		-1.10E-2
Emissionen	Al in Boden	kg	5.72E-3	
	Al in Boden a	kg		5.72E-3
	As in Boden	kg	5.10E-6	-
	As in Boden a	kg		5.10E-6
	C in Boden	kg	1.00E-2	-
	C in Boden a	kg		1.00E-2
	Ca in Boden	kg	3.30E-1	-
	Ca in Boden a	kg		3.30E-1
	Cd in Boden	kg	4.30E-6	-
	Cd in Boden a	kg		4.30E-6
	Co in Boden	kg	1.05E-5	-
	Co in Boden a	kg		1.05E-5
	Cr in Boden	kg	3.65E-5	-
	Cr in Boden a	kg		3.65E-5
	Cu in Boden	kg	1.20E-4	-
	Cu in Boden a	kg		1.20E-4
	F in Boden	kg	0	-
	F in Boden a	kg		-
	Fe in Boden	kg	1.20E-2	-
	Fe in Boden a	kg		1.20E-2
	Hg in Boden	kg	5.00E-7	-
	Hg in Boden a	kg		5.00E-7
	Mn in Boden	kg	7.95E-3	-
	Mn in Boden a	kg		7.95E-3
	Mo in Boden	kg	2.60E-6	-
	Mo in Boden a	kg		2.60E-6
	N in Boden	kg	0	-
	N in Boden a	kg		-
	Ni in Boden	kg	4.65E-5	-
	Ni in Boden a	kg		4.65E-5
	P in Boden	kg	1.10E-2	-
	P in Boden a	kg		1.10E-2
	Pb in Boden	kg	8.50E-6	-
	Pb in Boden a	kg		8.50E-6
	S in Boden	kg	2.20E-2	-
	S in Boden a	kg		2.20E-2
Se in Boden	kg	6.00E-4	-	
Se in Boden a	kg		6.00E-4	
Sn in Boden	kg	0	-	
Sn in Boden a	kg		-	
Zn in Boden	kg	3.15E-4	-	
Zn in Boden a	kg		3.15E-4	

2.3 Zusammenstellung der Sachbilanzdaten für die Verbrennungsanlagen

Tab. 18 zeigt die Sachbilanzdaten für den Betrieb der vier untersuchten Anlagen (3 Anlagen in der Schweiz und eine in den Niederlanden) während eines Jahres. Hierbei wurden jeweils nur die für die Anlage vorhandenen Daten eingesetzt. Fehlende Angaben, z.B. zu weiteren Luftschadstoffen, werden nicht abgeschätzt.

Im weiteren zeigt Tab. 18 eine Abschätzung für den Betrieb je eine durchschnittliche Anlage zur Verbrennung von Holzbrennstoffen (ohne und mit weitergehender Abgasreinigung) und Altholz. Alle Angaben gelten pro Betriebsjahr. In der Regel wurden für die Standardanlagen durchschnittliche Werte der drei Schweizer Anlagen für die Sachbilanz benutzt. Für die durchschnittlichen Anlagen wurden ausserdem weitere Informationen berücksichtigt. Insbesondere wurden Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe aus Tab. 12 übernommen. Für die Verbrennung von Holzbrennstoffen in einer Anlage mit weitergehender Abgasreinigung wurden die Emissionen für Stickoxide und Partikel entsprechend der Werte für die Altholzverbrennung reduziert.

Der Stromertrag verringert sich bei den Anlagen mit weitergehender Abgasreinigung. Von (NUSSBAUMER 2001:377) wird ein Elektrizitätsbedarf von 0.75 bis 1.9 kWh/1000 Nm³ für Gewebefilter angegeben. Hier wird mit 1kWh gerechnet. Für die Entstickung wird zusätzlich Ammoniak eingesetzt. Ein direkter Energieverbrauch ist nicht nötig. Angaben zu evtl. Wirkungsgradverlusten bei der selektiven nicht-katalytischen Reduktion (SNCR) lagen nicht vor. Analog zu den Angaben in Tab. 10 werden in Tab. 17 wichtige Kenngrössen dieser drei Standardanlagen gezeigt.

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Annahmen wurde festgelegt, dass der Transport von Edelhölzern (aus denen Abfälle entstehen, die verbrannt werden) zum Furnierwerk nicht berücksichtigt wird. Diese Transporte werden dem Hauptprodukt (Furniere) zugeschrieben.

Tab. 17 Wichtige Kenngrössen der drei Standardanlagen. Emissionen in die Luft bezogen auf 11% O₂ im Abgasstrom.

	Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung
Holzverbrauch (Sm ³ /a)	15296	15296	15296
Elektrische Leistung (kWel berechnet)	110	107	107
Thermische Leistung (kWth berechnet)	4671	4671	4671
Elektrizitätsproduktion (MWh/a)	964	935	935
Wärmeproduktion (MWh/a)	11367	11367	11367
Gesamtwirkungsgrad berechnet	78.4%	78.2%	78.2%
Staub (mg/Nm ³)	121	10	10
NOx (mg/Nm ³)	200	100	100
CO (mg/Nm ³)	100	100	100
Blei (mg/Nm ³)	0.049	0.049	2
Cadmium (mg/Nm ³)	0.0002	0.0002	0.069
Zink (mg/Nm ³)	0.5	0.5	2

Tab. 18 Energie- und Stoffflüsse für die drei untersuchten Anlagen und Abschätzung für je eine durchschnittliche Standardanlage zur Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen (mit Multi-Zyklon bzw. mit weitergehender Abgasreinigung) und Altholz. Sachbilanzdaten pro Betriebsjahr. Berechneter Gesamtwirkungsgrad der Anlagen. Abk.: B-Bière, C-Cujik, L-Lengwil, M-Meiringen.

	Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Holz WKK	Holz WKK	Holz WKK	Holz WKK	Holz WKK	Holz WKK	Holz WKK	Bemerkung zur Abschätzung der Standardanlagen		
			Meiringen	Bière	Lengwil	Cujik, Wirbelschichtfeuerung	Anlage, mit Multi-Zyklon	Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung			
			a	a	a	a	a	a	a			
Strom	Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	3.96E-1					0	0	0	kein Bezug bei WKK	
Infrastruktur	Infra Wärmekraftkopplungsanlage 5MW, Holz	Stk	3.33E-2	3.33E-2	3.33E-2	1.67E-1		3.33E-2	3.33E-2	3.33E-2	30a Lebensdauer	
	Infra Kraftwerksgebäude 20tsd. m3	Stk	1.25E-2	1.25E-2	1.25E-2	6.25E-2		1.25E-2	1.25E-2	1.25E-2	80a Lebensdauer	
Material	Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg		5.00E-1		1.70E+5		5.00E-1	2.84E+3	2.84E+3	Wie C für weiterg. AbgasR	
	Chemikalien organisch	kg	5.00E+1	5.00E-1	1.00E+3			3.50E+2	3.50E+2	3.50E+2	Mittelwert	
	Entkarbonisierung Wasser	kg		2.00E+4				2.00E+4	2.00E+4	2.00E+4	Wie B	
	Natriumchlorid	kg	2.50E+2					2.50E+2	2.50E+2	2.50E+2	Wie M	
	Pestizid	kg			2.00E+1			2.00E+1	2.00E+1	2.00E+1	Wie L	
	Trinkwasser CH	kg		4.80E+4	4.50E+7			4.80E+4	4.80E+4	4.80E+4	Wert B da nur für WKK	
Holz	Schmieröl, ab Raffinerie RER	kg	1.00E+2	4.88E+2				2.00E+2	2.00E+2	2.00E+2	Nur Schmieröl B + M	
	Holzschnitzel Buche frei Lager	t	1.80E+3	8.61E+2				8.87E+2	8.87E+2		Mittelwert	
	Holzschnitzel Fichte frei Lager	t	1.80E+3	1.42E+3	8.60E+2	1.83E+5		1.36E+3	1.36E+3		Mittelwert	
	Holzschnitzel Saegerei frei Lager	t			2.44E+3			8.13E+2	8.13E+2		Mittelwert	
	Holzschnitzel, Altholz, frei Lager	t							3.06E+3		Summe der Mittelwerte	
Transporte	Transport LKW 28 t	tkm	1.80E+5	4.57E+4	4.30E+4	9.17E+6		1.53E+5	1.53E+5	1.53E+5	50km für Brennstoffe und Material	
Abfälle	Abfall CH00: in KVA	kg	2.00E+2	2.00E+2				2.00E+2	2.00E+2	2.00E+2	Mittelwert	
	Abwasser CH-Durchschnitt: pro m3 in ARA Gr.Kl. 2	m3	-	4.80E+1	4.50E+4	-		4.80E+1	4.80E+1	4.80E+1	= Wasserbezug	
	Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	7.19E+4					-	-	-		
	Entsorgung, Holzasche, auf Industrieboden	kg		3.50E+4				-	-	-		
	Altholzasche: in Reaktordep. 0-150a	kg			1.50E+5	1.10E+4		4.59E+4	4.59E+4	2.14E+5	7% vom Holz	
	Altholzasche: in Reaktordep. 0-150a	kg			1.60E+3	2.00E+4		1.98E+3	1.98E+3	1.98E+3	1.5% vom Holz	
Ressourcen	Nutzung, Industriareal > RI	m2a	3.60E+3	7.38E+2	1.60E+3	2.00E+4		1.98E+3	1.98E+3	1.98E+3	Mittelwert	
Luft Emissionen	Abwärme in Luft p	TJ	3.96E-1	-	-	-		-	-	-		
	Abwärme in Luft s	TJ	7.30E+1	4.63E+1	6.70E+1	3.72E+3		6.21E+1	6.21E+1	6.21E+1	Aus Holzverbrennung	
	Acetaldehyd s	kg						3.45E+0	3.45E+0	3.45E+0	Festsetzung für diese Studie	
	Alkane s	kg						5.14E+1	5.14E+1	5.14E+1		
	Alkene s	kg						1.76E+2	1.76E+2	1.76E+2		
	As Arsen s	kg						5.87E-2	5.87E-2	6.17E-1		
	BaP Benzo(a)pyren s	kg						2.97E-2	2.97E-2	2.97E-2		
	Benzol s	kg						5.14E+1	5.14E+1	5.14E+1		
	Br Brom s	kg						2.94E+0	2.94E+0	6.28E+0		
	Ca Calcium p	kg			1.00E+1			3.30E+2	3.30E+2	2.51E+2		
	Cd Cadmium s	kg				1.17E+0		5.87E-3	5.87E-3	2.03E+0		
	CH4 Methan s	kg						2.09E+2	2.09E+2	2.09E+2		
	CO Kohlenmonoxid s	kg	1.04E+3	1.53E+3	4.44E+2			2.94E+3	2.94E+3	2.94E+3		
	CO2 Kohlendioxid s	kg	6.51E+6	4.13E+6	5.97E+6	3.32E+8		5.54E+6	5.54E+6	5.54E+6		aus Holzverbrauch berechnet
	Cr Chrom s	kg						2.06E-1	2.06E-1	1.76E+0		
	Cu Kupfer s	kg			2.79E+0			1.23E+0	1.23E+0	5.55E+0		
	Ethylbenzol s	kg						1.73E+0	1.73E+0	1.73E+0		
	Formaldehyd s	kg						7.34E+0	7.34E+0	7.34E+0		
	Hexachlorbenzol HCB s	kg						4.05E-5	4.05E-5	1.51E-3		
	HCl Salzsäure s	kg				1.68E+4		1.07E+1	1.07E+1	1.97E+2		
	HF Fluorwasserstoff s	kg				6.22E+2		1.84E+0	1.84E+0	2.22E+1		
	Hg Quecksilber s	kg				2.11E+1		1.64E-2	1.64E-2	1.76E-1		
	K Kalium s	kg			6.25E+0			1.32E+3	1.32E+3	7.34E+2		
	Mg Magnesium s	kg			1.90E+0			2.03E+1	2.03E+1	2.90E+1		
	Mn Mangan s	kg						9.54E+0	9.54E+0	8.81E-1		
	Na Natrium s	kg						7.49E+1	7.49E+1	3.23E+2		
	N2O Lachgas s	kg						1.32E+2	1.32E+2	1.32E+2		
	NH3 Ammoniak s	kg				1.06E+4		9.79E+1	2.94E+2	2.94E+2	erhöht wg. weiterg. Abgasreini	
	Ni Nickel s	kg						3.23E-1	3.23E-1	5.58E-1	Festsetzung für diese Studie	
	NMVOc s	kg						2.94E+2	2.94E+2	2.94E+2		
	NOx Stickoxide als NO2 s	kg	5.21E+3	4.84E+3	5.51E+3	8.68E+4		5.87E+3	2.94E+3	2.94E+3	reduziert wg. weiterg. Abgasrei	
	P Phosphor s	kg			3.00E-1			1.70E+1	1.70E+1	3.12E+1	Festsetzung für diese Studie	
	PAH Polyzyklische aromatische HC s	kg						6.17E-1	6.17E-1	8.60E-1		
	Partikel s	kg	1.04E+2	4.95E+3	2.82E+3	9.39E+3		3.55E+3	2.94E+2	2.94E+2	reduziert wg. weiterg. Abgasrei	
	Pb Blei s	kg			1.00E+0			1.44E+0	1.44E+0	5.87E+1		
	Pentachlorphenol PCP s	kg						4.55E-4	4.55E-4	1.82E-3		
	Sn Zinn s	kg						-	-	2.94E-1		
	SOx als SO2 s	kg				8.21E+3		1.47E+2	1.47E+2	5.87E+2		
	TCDD-Aequivalente	ng						1.73E+6	1.73E+6	5.26E+7		
	Toluol s	kg						1.73E+1	1.73E+1	1.73E+1		
	Xylole s	kg						6.86E+0	6.86E+0	6.86E+0		
	Zn Zink s	kg			1.51E+1	3.52E+2		1.47E+1	1.47E+1	5.87E+1	Festsetzung für diese Studie	
Gutschrift	Nutzwärme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW	TJ	-2.18E+1	-1.62E+1	-2.34E+1	-		-2.05E+1	-2.05E+1	-2.05E+1	50% der Wärmeproduktion	
	Stromproduktion	kWh	1.12E+6	3.72E+5	1.40E+6	1.80E+8		9.64E+5	9.35E+5	9.35E+5	Mittelwert (- Strom f. E-filter)	
	Wärmeproduktion	MJ	4.36E+7	3.24E+7	4.68E+7	-		4.09E+7	4.09E+7	4.09E+7	Mittelwert	
	Wirkungsgrad berechnet	%	72%	80%	85%	19%		78%	78%	78%		

Für die Aufteilung der gesamten Umweltbelastungen auf die beiden Produkte Strom und Wärme ist eine Allokation notwendig. Für die Beurteilung nach den Kriterien des *naturemade star* Labels ist eine Gutschrift für die Wärme mit 50% der Umweltbelastungen eines kondensierenden Gasheizkes-

sels oder mit einer Gutschrift für eine vergleichbaren Holzheizung möglich (FRISCHKNECHT & JUNGBLUTH 2001a) um die Bilanz für die Stromproduktion zu rechnen. Damit wird gewährleistet, dass neben der Umweltbelastung der kWh Strom (die gemäss Grenzwert 50% der Umweltbelastung eines gasbefeuerten GuD Kraftwerkes nicht überschreiten darf) auch die Umweltbelastung pro kWh Wärme deutlich tiefer liegt als bei einem konventionellen System.

In dieser Studie erfolgt für die erzeugte Wärme eine Gutschrift mit 50% der Umweltbelastungen eines kondensierenden Gasheizkessels. Auswertungen haben ergeben, dass ein guter Holzheizkessel etwa die Hälfte der Umweltbelastungen (ausgedrückt in Eco-indicator 99 (H) Punkten) im Vergleich zum Gaskessel verursacht. D.h. eine Gutschrift mit dieser Erzeugungsart würde etwa gleich hoch ausfallen. Es müsste aber für jeden Fall einzeln die Umweltbelastungen einer vergleichbaren Holzfeuerung (Filtertechnologie, thermischer Wirkungsgrad, etc.) geprüft werden, was relativ aufwendig ist.

Tab. 18 zeigt ausserdem den berechneten Gesamtwirkungsgrad der Anlagen. Für das verbrannte Holz wurde dabei pauschal mit einem Heizwert von 18.5MJ/kg gerechnet. Der aufgrund der Angaben zur Wärme- und Stromproduktion und zum Holzverbrauch berechnete Gesamtwirkungsgrad weicht teilweise etwas von den für die Anlagen angegebenen Wirkungsgraden ab da die Anlagenbetreiber mit abweichenden Angaben zum Energiegehalt des Holzes gerechnet haben.

Aufgrund der möglichen Unsicherheiten bei der Umrechnung von Angaben zum Volumen von Holzschnitzeln in Trockenmasse Holz sollte im Kenngrössenmodell die Holzmenge deshalb zur Kontrolle auch indirekt über den Kesselwirkungsgrad und die am Kesselausgang gemessene Wärmeabgabe bestimmt werden.

2.4 Sachbilanzen der Strom- und Wärmeerzeugung aus Holz

Für Anwendungen ausserhalb der Labellings von Strom werden hier auch generische Sachbilanzen für die Stromerzeugung aus Holz erstellt. Wiederum werden die drei Fälle Holzbrennstoffe (ohne bzw. mit weitergehender Abgasreinigung) und Altholz unterschieden und die Sachbilanzdaten pro Betriebsjahr aus Tab. 18 verwendet. Von (JUNGMEIER *et al.* 1998) wurden unterschiedliche Allokationsverfahren ausführlich diskutiert. Sie zeigen, dass verschiedene Allokationsverfahren zu recht unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Für diese Studie wird der Exergiegehalt als Allokationskriterium verwendet. Der Exergiegehalt beschreibt die Wertigkeit verschiedener Energieformen in Relation zu Elektrizität. Diese ist dabei mit einem Exergiegehalt von 1 normiert. Für die Wärme ist der Exergiegehalt von der Temperatur des gelieferten Heisswassers bzw. Dampfes abhängig. In Bière wird das Wasser mit einer Temperatur von 90°C ins Fernwärmenetz eingespiesen. In Lengwil wird Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus (bis zu 185°C) genutzt. Für Meiringen lagen keine Angaben vor. Für die Rechnung wird von einem Exergiegehalt von 0.23, entsprechend einem Temperaturniveau von 90°C, ausgegangen. Tab. 19 zeigt die Umrechnung der in Tab. 18 gezeigten Daten anhand des Exergiegehaltes.

Tab. 19 Sachbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen. Allokation anhand des Exergiegehaltes.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Strom			Wärme		
		Strom, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Strom, ab Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Strom, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung
Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	a	2.75E-7			1.63E-9		
Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	a		2.77E-7			1.88E-9	
Betrieb, Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung	a			2.77E-7			1.88E-9

3 Ergebnisse der Ökobilanz

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Ökobilanz diskutiert. Hierzu werden die Sachbilanzen ausgewertet. Ausserdem wird eine Dominanzanalyse zu einzelnen Schadstoffen durchgeführt.

3.1 Betrieb der Anlagen

Tab. 20 zeigt ausgewählte Inventargrößen für den Betrieb der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen. Die drei Standardanlagen sind direkt mit einander vergleichbar. Hier gibt es grosse Unterschiede insbesondere bei den Partikelemissionen, die durch den Standard der Rauchgasreinigung begründet sind. Die mit Altholz betriebene Anlage beansprucht deutlich weniger Fläche, da die Flächennutzung für die Holzproduktion nicht berücksichtigt wird.

Tab. 20 Ausgewählte Inventargrößen für den Betrieb während einem Jahr der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	
		WKK Meiringen	WKK Bière	WKK Lengwil	Kraftwerk Cuijk, Wirbelschichtfeuerung	WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	WKK, mit weitergehender Abgasreinigung	
		a	a	a	a	a	a	a	
Ressourcen	Summe Holz trocken	t	3960	2510	3400	202000	3280	3280	3060
	Summe Flächeninanspruchnahme	m ² a	1110000	699000	284000	56900000	694000	695000	15400
	Summe Rohbraunkohle	kg	3400	1770	3990	159000	2830	2910	2280
	Summe Rohfördersteinkohle	kg	10600	6870	16200	376000	9160	9330	7550
	Summe Rohoel	t	57.5	33.8	35.3	3320	40.7	41.3	17.6
	Summe Uran	kg	1.62	0.134	2.23	11	0.659	0.665	1.97
	Summe Erdgas	Nm ³	1790	1130	2320	209000	1490	3760	3350
	Summe Wasser	kg	1590000000	600000000	2270000000	4260000000	5780000000	5800000000	2030000000
Luftemissionen	Summe NH ₃	kg	0.269	0.244	28.2	10600	98.2	294	294
	Summe CH ₄	kg	317	192	527	17200	448	463	358
	Summe CO ₂ total	kg	198000	119000	129000	11400000	144000	151000	73500
	Summe CO total	kg	2240	2310	1910	66300	3790	3790	3210
	Summe HCl	kg	2.84	1.52	3.71	16900	13.1	13.1	199
	Summe Hg	kg	0.00175	0.00104	0.00835	21.2	0.018	0.018	0.179
	Summe NMVOC	kg	933	558	493	56600	1260	1270	843
	Summe NO _x	kg	7380	6130	6340	214000	7380	4450	3450
	Summe N ₂ O total	kg	11.4	4.72	8.78	523	140	140	139
	Summe Partikel total	kg	475	5200	3050	28700	3820	565	406
	Summe R _n (inkl. Ra)	kBq	89000000	73500000	123000000	605000000	36200000	36600000	108000000
Summe SO _x	kg	388	220	483	28000	441	454	811	
Wasser	Summe CSB	kg	636	303	5320	34600	1700	1710	7370
	Summe Ra	kBq	30900	2920	42100	247000	12800	12900	37000
	Summe Zink	kg	0.512	0.367	35.2	17.7	10.2	10.2	1790

3.1.1 Staubemissionen

Fig. 9 zeigt eine Dominanzanalyse für die Emission von Partikeln beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen. Bei Anlagen ohne weitergehende Abgasreinigung (Lengwil, Bière) stammen Partikel vor allem aus der direkten Verbrennung, bei anderen Anlagen werden sie dagegen zu einem bedeutenden Teil auch während der Brennstoffbereitstellung emittiert.

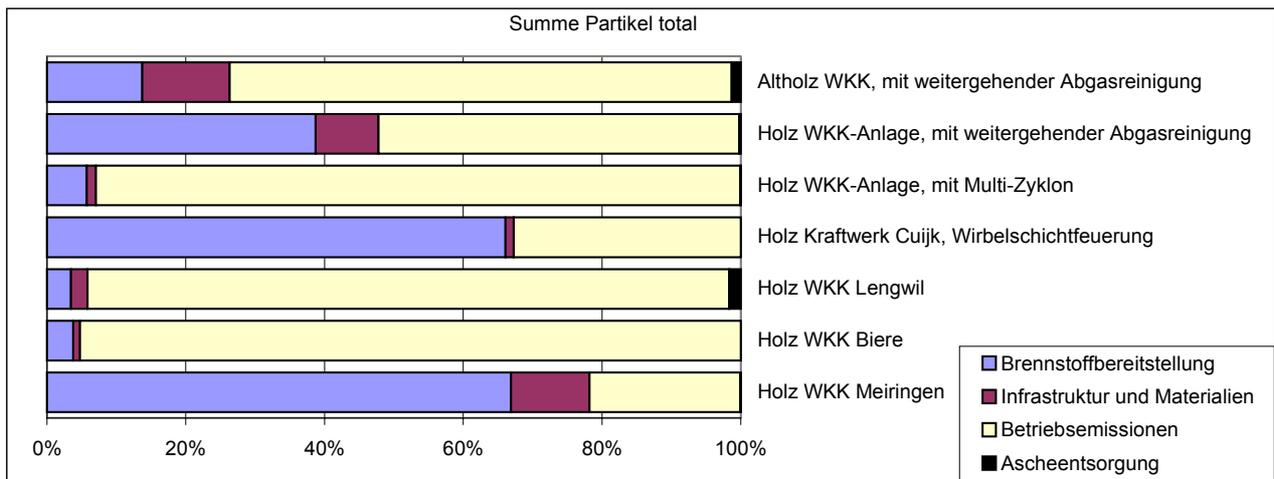


Fig. 9 Dominanzanalyse für die Emission von Partikeln beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

3.1.2 Stickoxidemissionen

Fig. 10 zeigt eine Dominanzanalyse für die Emission von NO_x beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen. Diese Emissionen werden zu mindestens Zweidrittel direkt bei der Verbrennung des Holzes verursacht. Nur für die Anlagen mit weitergehender Stickoxidelimination (Cuijk, Standardanlage mit weitergehender Abgasreinigung) hat auch die Brennstoffbereitstellung einen bedeutenden Anteil mit bis zu 60%.

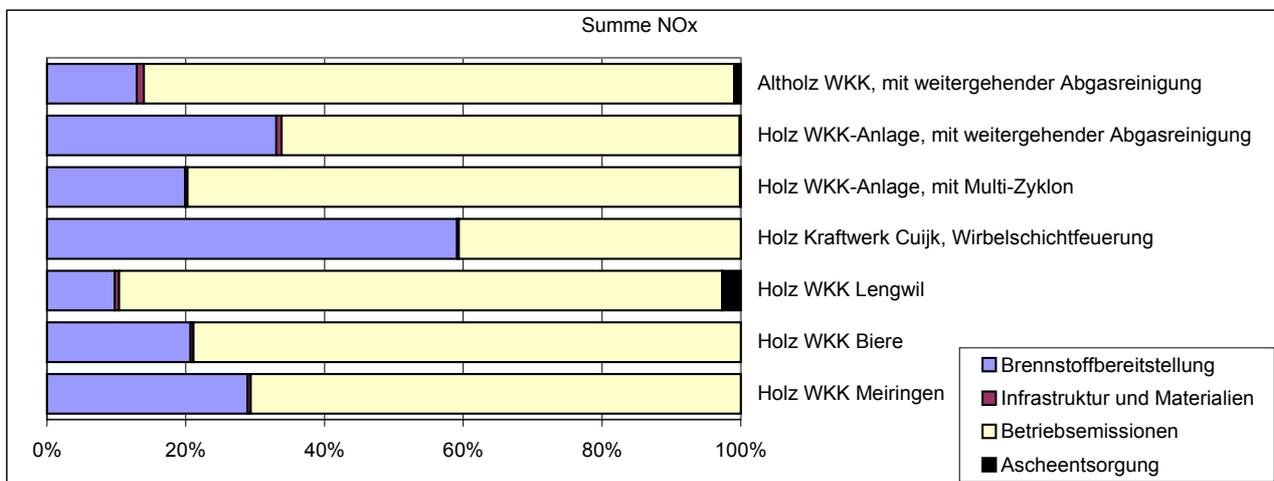


Fig. 10 Dominanzanalyse für die Emission von NO_x beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

3.1.3 Schwefeldioxidemissionen

Fig. 11 zeigt eine Dominanzanalyse für die Emission von SO_x beim Betrieb der drei Standardanlagen. In diesem Fall sind bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen die direkten Emissionen für einen geringeren Teil der gesamten Umweltbelastungen verantwortlich. Hier ist auch die Brennstoffbereitstellung (Holzproduktion und Transport) von Bedeutung. Für Altholz hingegen sind auch

die direkten (im Vergleich zu Holzbrennstoffen sehr viel höheren) Emissionen dieses Schadstoffes wichtig.

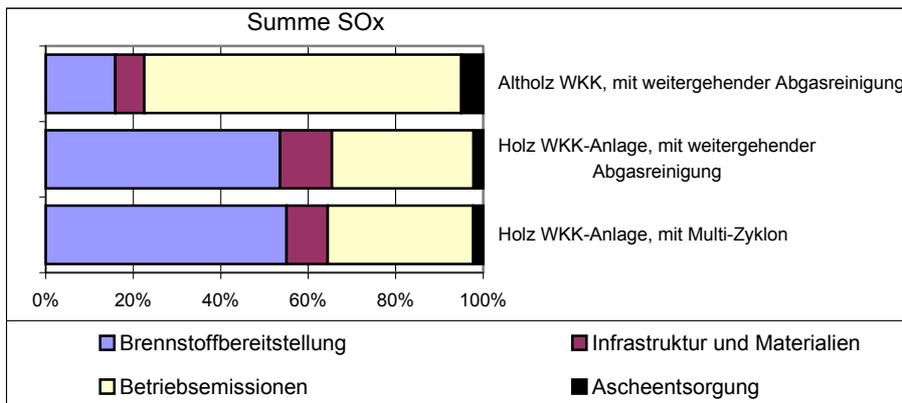


Fig. 11 Dominanzanalyse für die Emission von SO_x beim Betrieb der drei Standardanlagen.

3.2 Betrieb der Anlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift

Tab. 21 zeigt ausgewählte Inventargrößen für den Betrieb der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift (siehe Kapitel 2.3 zum Vorgehen). Im Vergleich zu Tab. 20 fällt auf, dass einige Einträge aufgrund der Gutschrift negativ sind. Dies betrifft insbesondere den Ressourcenverbrauch von Erdgas, die Emissionen von CH₄, CO₂ und radioaktiven Substanzen. Die Emissionen von Partikeln, NO_x und CO können hingegen durch die Gutschrift nicht ausgeglichen werden.

Tab. 21 Ausgewählte Inventargrößen für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Betrieb, Holz WKK Meiringen, mit Wärmegutschrift	Betrieb, Holz WKK Biere, mit Wärmegutschrift	Betrieb, Holz WKK Lengwil, mit Wärmegutschrift	Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon, mit Wärmegutschrift	Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung, mit Wärmegutschrift	Betrieb, Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung, mit Wärmegutschrift
		a	a	a	a	a	a
Ressourcen							
Summe Holz trocken	t	3960	2510	3400	3280	3280	3060
Summe Flaecheninanspruchnahme	m2a	1070000	672000	245000	660000	661000	-18700
Summe Rohbraunkohle	kg	515	-371	893	119	205	-428
Summe Rohfoerdersteinkohle	kg	-4250	-4150	230	-4760	-4600	-6370
Summe Rohoel	t	32.4	15.1	8.27	17	17.7	-6.06
Summe Uran	kg	-0.142	-1.18	0.34	-0.994	-0.988	0.319
Summe Erdgas	Nm3	-696000	-518000	-748000	-654000	-652000	-652000
Summe Wasser	kg	-187000000	-126000000	366000000	-109000000	-109000000	358000000
Luftemissionen							
Summe NH3	kg	-0.107	-0.036	27.8	97.8	294	294
Summe CH4	kg	-8660	-6490	-9120	-7990	-7970	-8080
Summe CO2 total	kg	-1250000	-956000	-1420000	-1210000	-1210000	-1280000
Summe CO total	kg	1080	1450	668	2700	2700	2120
Summe HCl	kg	0.246	-0.407	0.927	10.6	10.7	197
Summe Hg	kg	-0.00789	-0.00598	-0.00179	0.00913	0.00918	0.17
Summe NMVOC	kg	-363	-406	-899	41.6	48.9	-375
Summe NOx	kg	6280	5310	5150	6340	3410	2410
Summe N2O total	kg	-5.43	-7.82	-9.32	124	124	123
Summe Partikel total	kg	348	5100	2910	3700	446	287
Summe Rn (inkl. Ra)	kBq	-7830000	-64700000	18700000	-54700000	-54400000	17500000
Summe SOx	kg	-335	-318	-294	-239	-226	131
Wasser							
Summe CSB	kg	-63.9	-217	4570	1050	1050	6710
Summe Ra	kBq	-2230	-21700	6460	-18300	-18200	5890
Summe Zink	kg	-0.0388	-0.0427	34.6	9.72	9.73	1790

3.3 Strom- und Wärmeproduktion aus Holz (Allokation nach Exergiegehalt)

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse für die Sachbilanz der Strom- und Wärmeproduktion pro kWh Strom respektive MJ Wärme gezeigt. Die Allokation der Betriebsaufwendungen wurde in Kapitel 2.4 dokumentiert. Tab. 22 zeigt ausgewählte Inventargrößen für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen. Insgesamt gibt es recht deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Anlagentypen. So liegt z.B. die Gesamtemission von Partikeln bei der Anlage mit Multi-Zyklon bei etwa 1.05g/kWh Strom. Für die Stromerzeugung aus Altholz sind es nur 0.113g/kWh. Die Unterschiede bei den CO₂-Emissionen sind vor allem auf Unterschiede bei den Aufwendungen für die Holzbereitstellung begründet. Von (MATTHEWS & MORTIMER 2000) wurden Emissionsfaktoren zwischen 69g bis 74g CO₂ pro kWh Strom für die Holzverstromung berechnet. Die hier berechneten Emissionsfaktoren sind mit 20-42g CO₂/kWh Strom deutlich niedriger.

Tab. 22 Ausgewählte Inventargrößen für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen pro kWh Strom respektive MJ Wärme.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Strom			Wärme		
		Strom, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Strom, ab Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Strom, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung
		kWh	kWh	kWh	MJ	MJ	MJ
Ressourcen							
Summe Holz trocken	t	0.000904	0.000911	0.000849	0.0000536	0.00000618	0.00000576
Summe Flächenninanspruchnahme	m ² a	0.191	0.193	0.00428	0.00113	0.00131	0.0000291
Summe Rohbraunkohle	kg	0.000778	0.000808	0.000632	0.00000462	0.00000549	0.00000429
Summe Rohfördersteinkohle	kg	0.00252	0.00259	0.0021	0.000015	0.0000176	0.0000142
Summe Rohoel	t	0.0000112	0.0000115	0.00000488	6.64E-08	7.78E-08	3.31E-08
Summe Uran	kg	0.000000181	0.000000184	0.000000547	1.08E-09	1.25E-09	3.71E-09
Summe Erdgas	Nm ³	0.000409	0.00104	0.000929	0.00000243	0.00000707	0.00000631
Summe Wasser	kg	159	161	562	0.944	1.09	3.81
Luftemissionen							
Summe NH ₃	kg	0.000027	0.0000816	0.0000816	0.00000016	0.000000554	0.000000554
Summe CH ₄	kg	0.000123	0.000128	0.0000993	0.000000731	0.000000871	0.000000674
Summe CO ₂ total	kg	0.0397	0.0419	0.0204	0.000236	0.000285	0.000138
Summe CO total	kg	0.00104	0.00105	0.000891	0.00000618	0.00000714	0.00000605
Summe HCl	kg	0.00000359	0.00000364	0.0000553	2.13E-08	2.47E-08	0.000000375
Summe Hg	kg	4.95E-09	5.01E-09	4.97E-08	2.94E-11	3.4E-11	3.38E-10
Summe NMVOC	kg	0.000346	0.000351	0.000234	0.00000206	0.00000238	0.00000159
Summe NOx	kg	0.00203	0.00123	0.000957	0.000012	0.00000838	0.00000065
Summe N ₂ O total	kg	0.0000385	0.0000388	0.0000386	0.000000228	0.000000263	0.000000262
Summe Partikel total	kg	0.00105	0.00157	0.000113	0.00000624	0.00000106	0.000000765
Summe Rn (inkl. Ra)	kBq	9.97	10.1	30.1	0.0592	0.0689	0.204
Summe SO _x	kg	0.000121	0.000126	0.000225	0.00000072	0.000000854	0.00000153
Wasser							
Summe CSB	kg	0.000468	0.000475	0.00204	0.00000278	0.00000322	0.0000139
Summe Ra	kBq	0.00352	0.00359	0.0103	0.0000209	0.0000243	0.0000697
Summe Zink	kg	0.00000282	0.00000284	0.000497	1.67E-08	1.93E-08	0.00000337

4 Auswertung der Ergebnisse

Die Vielzahl der Einzelemissionen, die in der Sachbilanz erhoben werden, können mit einer Ökobilanz-Bewertungsmethode zusammengefasst werden. Für die vorliegende Aufgabenstellung kommen dafür vor allem vollaggregierende Methoden in Frage. Diese fassen viele der inventarisierten Umwelteinwirkungen zu einer Grösse zusammen.

Im Kenngrößenmodell stehen grundsätzlich verschiedene Bewertungsverfahren zur Auswahl. Dies ist unter anderem das Treibhausgaspotential (Stand 2001) (ALBRITTON & MEIRA-FILHO 2001, IPCC 1997). Die Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte 1997) spiegelt die Zielsetzungen der schweizerischen Umweltpolitik wieder (BRAND *et al.* 1998). Ausserdem können die vollaggregierenden Methoden Eco-indicator 95+ (GOEDKOOP 1995, JUNGLUTH 2000) und 99 (GOEDKOOP & SPRIENSMA 2000a, JUNGLUTH & FRISCHKNECHT 2000) sowie eine Auswertung zum kumulierten Primärenergieverbrauch im Kenngrößenmodell angewendet werden. Die verschiedenen Bewertungsmethoden werden im Anhang ab Seite 57 erläutert.

Für die Erteilung des Labels *naturemade star* ist lediglich eine Bewertung der Ergebnisse mit dem Eco-indicator 99 (Perspektive Hierarchist) von Bedeutung. Die weiteren Bewertungsmethoden werden zusätzlich bei der Diskussion der Ökobilanzergebnisse verwendet.

In diesem Kapitel wird die Bilanz für die vier untersuchten Anlagen und die drei Standardanlagen gezeigt und hinsichtlich wichtiger Einflussgrößen ausgewertet. Ausserdem wird auch die Durchschnittsbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holz-WKK ausgewertet.

4.1 Bewertete Ergebnisse

4.1.1 Holzbrennstoffe

Tab. 23 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsbilanz und die Flächennutzung für verschiedene Holzbrennstoffe und Altholz. Für die verschiedenen Bewertungsmethoden mit Ausnahme des Eco-indicator 99 sind die Unterschiede zwischen den Holzprodukten relativ gering. Bei der Bewertung mit dem Eco-indicator 99 kommt der Flächennutzung eine gewisse Bedeutung zu. Entsprechend schneiden Altholz- und Restholz in der Bereitstellung besser ab als das naturbelassene Holz.

Tab. 23 Ergebnisse der Wirkungsbilanz und Flächennutzung für verschiedene Holzbrennstoffe und Altholz.

		Holzschnitzel Buche frei Lager	Holzschnitzel Fichte frei Lager	Holzschnitzel Saegerei frei Lager	Holzschnitzel, Altholz, frei Lager
Modul-Namen eco^{mc}	Unit	t	t	t	t
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	521	769	311	349
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	22300	22300	20400	20500
Summe CO2 total	kg	-1780	-1760	-1810	-1800
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	-1770	-1760	-1810	-1800
Umweltbelastungspunkte	UBP	-311000	-288000	-340000	-342000
EI'99-aggregated, Egalitarian	EI99-points	0.145	2.53	-6.91	-6.7
EI'99-aggregated, Hierarchist	EI99-points	-2.43	0.16	-9.46	-9.15
EI'99-aggregated, Individualist	EI99-points	-18.8	-16.9	-22.6	-22.3
Summe Flaecheninanspruchnahme	m2a	300	309	2.74	2.51

4.1.2 Infrastruktur

Tab. 24 zeigt eine Auswertung der Ökobilanz für die Infrastruktur. Ein Vergleich der Ergebnisse für die Infrastruktur der Anlage mit den von (MATTHEWS & MORTIMER 1999) berechneten Werten zeigt eine ungefähre Übereinstimmung. Die hier bilanzierte Anlage hat eine elektrische Leistung von etwa 400kW. Bei der Herstellung von Bauwerk und Anlagenteilen sind zusammen 432t CO₂ emittiert wurden. Der Vergleichswert in der genannten Untersuchung beträgt für eine 5MWel Anlage 6600 t CO₂. Die wichtigsten Inputs für den WKK-Anlagenbau sind Stahl und Beton. Dieses Ergebnis wird auch durch die Untersuchung von (JUNGMEIER *et al.* 1998) bestätigt.

Tab. 24 Auswertung der Ökobilanz für die Infrastruktur.

		Infra Wärmeleistungsa nlag 5MW, Holz	Infra Kraftwerksgebäude 20tsd. m3
Modul-Namen eco^{mc}	Unit	Stk	Stk
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	3650000	2880000
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	97100	2500000
Summe CO2 total	kg	194000	238000
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	217000	251000

4.1.3 Anlagenbetrieb

Tab. 25 zeigt die bewerteten Ergebnisse der Ökobilanz für die Anlagen pro Betriebsjahr. Die Unterschiede zwischen den Anlagen sind durch unterschiedliche Leistungsklassen begründet. Deshalb sind die gezeigten Werte nicht direkt vergleichbar.

Tab. 25 Auswertung der Ökobilanz für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz	Betrieb, Holz WKK-	Betrieb, Altholz
		WKK Meiringen	WKK Biere	WKK Lengwil	Kraftwerk Cuijk, Wirbelschichtfeuerung	WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	WKK, mit weitergehender Abgasreinigung
	a	a	a	a	a	a	a	a
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	3850000	1900000	3190000	183000000	2550000	2670000	2060000
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	80800000	51000000	69500000	409000000	66800000	66800000	62600000
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	212000	128000	147000	12100000	202000	209000	128000
EI'99-aggregated, Egalitarian	EI99-points	50100	107000	74700	2510000	93100	42800	72800
EI'99-aggregated, Hierarchist	EI99-points	53600	132000	90200	2640000	112000	45400	73100
EI'99-aggregated, Individualist	EI99-points	36100	188000	119000	1940000	146000	35300	45100
Umweltbelastungspunkte	UBP	726000000	1090000000	4540000000	28800000000	2100000000	1560000000	3340000000
EI95+ Total	E-09 Pts.	3260	3670	5540	126000	5140	3430	5750

4.1.4 Anlagenbetrieb mit Wärmegutschrift

Tab. 26 zeigt die bewerteten Ergebnisse der Ökobilanz für den Anlagenbetrieb pro Betriebsjahr unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift. In der Bewertungsperspektive Individualist beim Eco-indicator 99 bleiben die Umweltbelastungen trotz der Gutschrift positiv, während bei den anderen beiden Bewertungsperspektiven die Gesamtbelastung bei den Anlagen mit weitergehender Rauchgasreinigung negativ ist. Das heisst, dass die gekoppelte Produktion von Strom und Wärme mit Holz bei dieser Bewertung zu geringeren Umweltbelastungen führt als die 50% der Umweltbelastungen, die durch das Erzeugen des Wärmeanteils mit einem Gaskessel erzeugt werden.

Tab. 26 Auswertung der Ökobilanz für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Betrieb, Holz WKK	Betrieb, Holz WKK	Betrieb, Holz WKK	Betrieb, Holz WKK-	Betrieb, Holz WKK-	Betrieb, Altholz WKK,
		Meiringen, mit Wärmegutschrift	Biere, mit Wärmegutschrift	Lengwil, mit Wärmegutschrift	Anlage, mit Multi-Zyklon, mit Wärmegutschrift	Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung, mit Wärmegutschrift	mit weitergehender Abgasreinigung, mit Wärmegutschrift
	a	a	a	a	a	a	a
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	-25700000	-20100000	-28600000	-25200000	-25100000	-25700000
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	80300000	50600000	69000000	66400000	66400000	62200000
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	-1450000	-1110000	-1640000	-1360000	-1350000	-1430000
EI'99-aggregated, Egalitarian	EI99-points	-39400	40600	-21500	8990	-41300	-11400
EI'99-aggregated, Hierarchist	EI99-points	-53100	52600	-24300	12100	-54800	-27000
EI'99-aggregated, Individualist	EI99-points	1830	163000	82200	114000	3200	12900
Umweltbelastungspunkte	UBP	158000000	672000000	3930000000	1560000000	1020000000	2810000000
EI95+ Total	E-09 Pts.	849	1880	2950	2880	1160	3490

4.1.5 Ascheentsorgung

Tab. 27 zeigt eine Auswertung der Ökobilanz für die Entsorgung der Aschen. Die Verwendung der Aschen als Dünger ist bei einer Bewertung der dadurch verursachten Emissionen in den Boden mit dem Eco-indicator 99 deutlich umweltbelastender als die Entsorgung in der Deponie. Falls Asche aus der Altholzverbrennung als Dünger verwendet werden würde, so würde dies zu nochmals deutlich höheren Umweltbelastungen führen. Werden die Umweltbelastungen dagegen mit der Methode der ökologischen Knappheit 1997 (Umweltbelastungspunkte) bewertet, wird die geregelte Entsorgung aufgrund des Verbrauchs von Deponievolumen sehr viel schlechter bewertet.

Die Entsorgung von Aschen aus der Verbrennung von Altholz verursacht aufgrund der damit verbundenen hohen Emissionen von Cadmium höhere Umweltbelastungen als die Entsorgung von Aschen aus Holzbrennstoffen. Die Gutschrift für den bei der Entsorgung von Holzasche auf Landwirtschaftsboden eingesparten Dünger führt zu einem negativen Wert für den Primärenergieverbrauch und den Treibhauseffekt. Trotzdem liegen die Umweltbelastungen bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 noch über null. Das heisst, dass durch die Verwendung von Asche insgesamt höhere Umweltbelastungen verursacht werden als durch die Herstellung und Verwendung der äquivalenten Menge Kunstdünger.

Tab. 27 Auswertung der Ökobilanz für die Entsorgung der Aschen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Unit	Entsorgung, Holzasche, auf	Entsorgung, Holzasche, auf	Holzasche: in	Altholzasche: in	Abfälle in
		Industrieboden	Landwirtschaftsboden	Reaktordep. 0-150a	Reaktordep. 0-150a	Inertstoffdeponie
		kg	kg	kg	kg	kg
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	0	-2.4	0.495	0.491	0.00821
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	0	-0.0438	0.0119	0.0117	0.0000255
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	0	-0.154	0.0223	0.0223	0.000557
EI'99-aggregated, Egalitarian	EI99-points	0.167	0.344	0.00778	0.0581	0.000135
EI'99-aggregated, Hierarchist	EI99-points	0.136	0.464	0.00922	0.0658	0.000131
EI'99-aggregated, Individualist	EI99-points	0.0218	0.0515	0.00973	0.073	0.0000933
Umweltbelastungspunkte	UBP	1170	-724	22200	11300	501
EI95+ Total	E-09 Pts.	0.0000287	3.21	0.0112	0.00455	0.0000353

4.2 Wichtige Inputgrössen beim Betrieb

In einem ersten Schritt der Auswertung wurde die Bedeutung verschiedener Einträge in der Sachbilanz mit unterschiedlichen Bewertungsmethoden überprüft. Bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (alle drei Perspektiven) sind der Holzbezug (inkl. der notwendigen Transporte) sowie Emissionen von NO_x und Partikeln für den Hauptteil der Umweltbelastungen von Bedeutung. Zusätzlich ist die Emission von (biogenem) CO₂ aus der Holzverbrennung eine sehr wichtige Grösse. Diese wird im folgenden aber nicht weiter diskutiert, da sie direkt vom Holzinput und damit der CO₂-Bindung beim Holzwachstum abhängig ist und nicht durch die Anlagen beeinflusst wird. In der Gesamtbewertung wird der biogene CO₂-Kreislauf somit als klimaneutral eingestuft.

Im Fall der Altholzfeuerung sind zusätzlich die Emissionen von Zink, Blei und Cadmium relevant. Alle Luftemissionen zusammen (ohne CO₂) sind bei den Anlagen ohne weitergehende Abgasreinigung für über 80% der verursachten Umweltbelastungen verantwortlich (siehe Fig. 12). Hiervon wiederum werden etwa 80-90% durch die zwei (Partikel und NO_x) respektive fünf (zusätzlich Zn, Pb und Cd) Hauptschadstoffe bei der Holz- bzw. Altholzverbrennung verursacht. Auch die Entsorgung der Asche hat einen relevanten Anteil an den gesamten Umweltbelastungen, insbesondere dann, wenn sie als Dünger verwendet wird (Bière) oder aus der Altholzverbrennung stammt und damit höhere Schwermetallgehalte hat.

Fig. 12 zeigt eine Dominanzanalyse für die mit dem Eco-indicator 99 (H) bewerteten Umweltbelastungen bezogen auf den Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen. Die Gutschrift für CO₂ (Kohlenstoffbindung beim Wachstum der Bäume) führt zu einem negativen Wert für die Brennstoffbereitstellung bei den Anlagen, die Alt- oder Restholz verwenden. Für die Anlagen die naturbelassene Holzschnitzel verwenden, führt die Gewichtung der Flächennutzung zu einem kleinen positiven Beitrag der Brennstoffbereitstellung an der Gesamtbelastung. Direkte Emissionen von CO₂ und anderen Schadstoffen sind für den Grossteil der gesamten Umweltbelastungen verantwortlich. Infrastruktur und Entsorgung haben insgesamt eher einen geringen Anteil an den Umweltbelastungen.

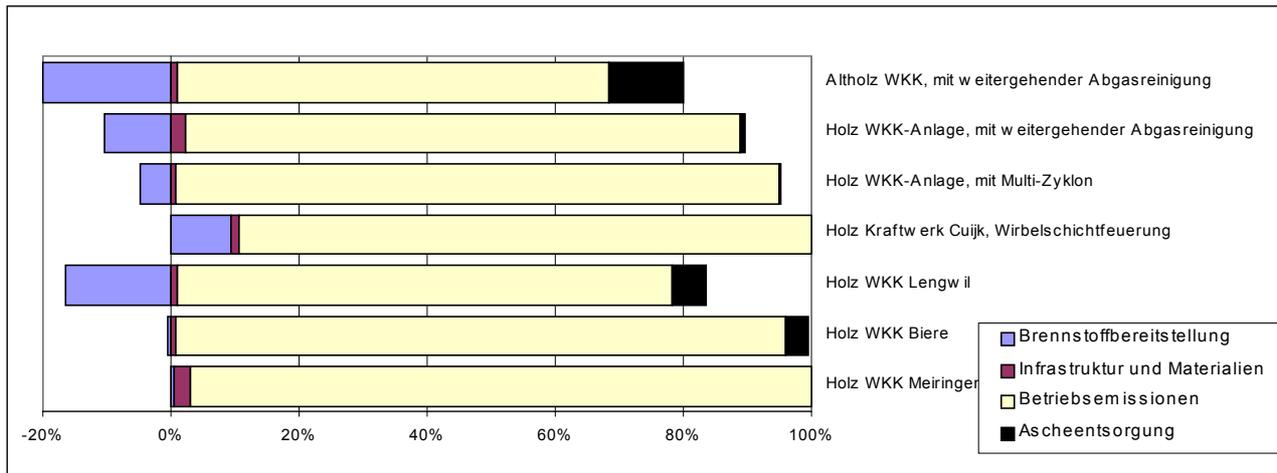


Fig. 12 Dominanzanalyse für die mit dem Eco-indicator 99 (H) bewerteten Umweltbelastungen bezogen auf 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

Bei der Bewertung mit Umweltbelastungspunkten ist die Entsorgung der Asche in jedem Fall relevant (neben den bereits genannten Faktoren). Die Entsorgung der Holzrasche ist auch im Fall einer Bewertung mit dem Eco-indicator 95+ für einige Anlagen von Bedeutung. Hier taucht neben den bereits genannten Einträgen und Schadstoffen auch der Bezug von Strom (Anlage in Meiringen) in der Liste der wichtigsten Einträge auf.

Alle anderen Einträge in der Sachbilanz (z.B. zur Infrastruktur oder zu den verwendeten Betriebsmitteln) sind für das Gesamtergebnis von untergeordneter Bedeutung. Unsicherheiten bei deren Bilanzierung sind somit trotz grosszügiger Schätzungen wenig relevant.

4.3 Relevanz unterschiedlicher Schadenskategorien

Im Eco-indicator 99 werden 9 sogenannte Schadenskategorien unterschieden (siehe Anhang ab Seite 58). Fig. 13 zeigt den Anteil dieser Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für den Betrieb einer WKK-Anlage für Holzbrennstoffe mit Multi-Zyklon. Atemwegserkrankungen werden bei der Bewertung als wichtiger Schaden ausgewiesen. Die Umweltbelastungen werden in dieser Schadenskategorie vor allem durch Partikel und zu etwa einem Fünftel durch NO_x verursacht. Eine weitere wichtige Kategorie ist die Landnutzung und hier insbesondere die genutzte Waldfläche.

Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon

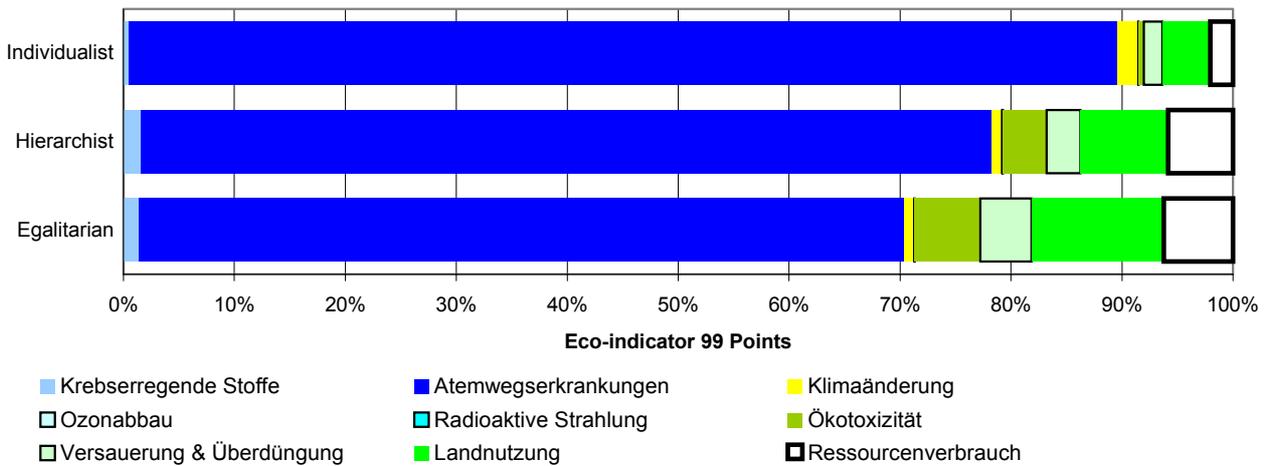


Fig. 13 Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon.

Fig. 14 zeigt den Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für den Betrieb einer Altholz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung. Auch hier sind Gesundheitseffekte von besonderer Bedeutung. Die in die Luft und den Boden emittierten Schwermetalle tragen auch zum Problem „Krebserregende Stoffe“ und „Ökotoxizität“ bei. Die Landnutzung ist in diesem Fall hingegen nicht von Bedeutung, da die forstwirtschaftliche Nutzung in diesem Fall vollständig dem Vorprodukt zugeschrieben wird.

Betrieb, Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung

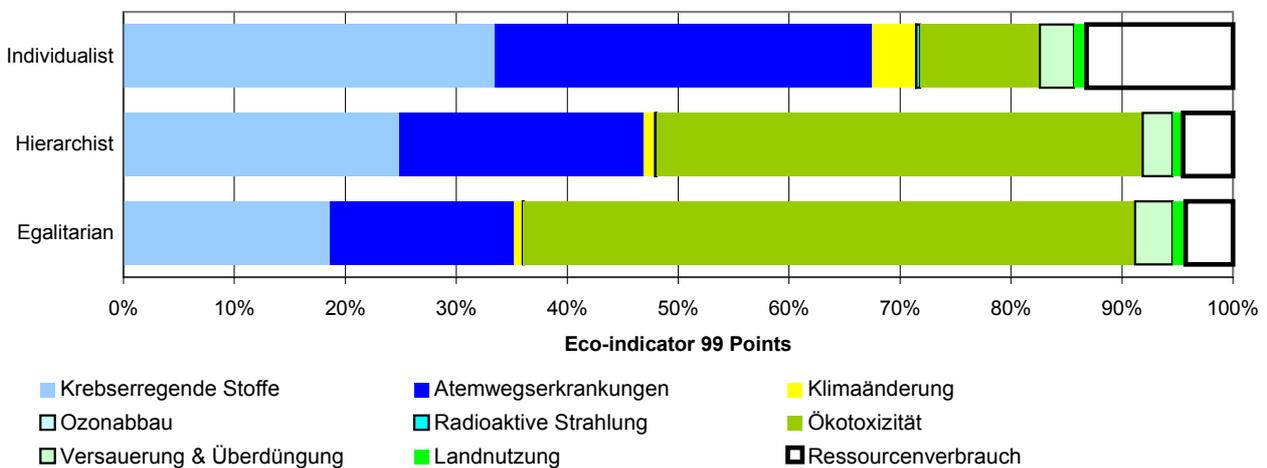


Fig. 14 Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Altholz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung.

Fig. 15 zeigt den Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für den Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift. Die Wärmegutschrift (50% der Umweltbelastungen eines kondensierenden Gaskessels) führt zu negativen Werten beim Ressourcenverbrauch und bei den Gesundheitsschäden aufgrund der Klimaänderungen. Dem stehen die durch die Holzverbrennung verursachten Schäden, z.B. bei den Atemwegserkrankungen und durch die Landnut-

zung gegenüber. Bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (H und E) ist die Gutschrift grösser als die Belastungen und das Gesamtergebnis ist somit negativ während bei einer Bewertung in der Perspektive des Individualisten insgesamt Umweltbelastungen grösser null zu gewärtigen sind (siehe auch Tab. 26).

Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung, mit Wärmegutschrift

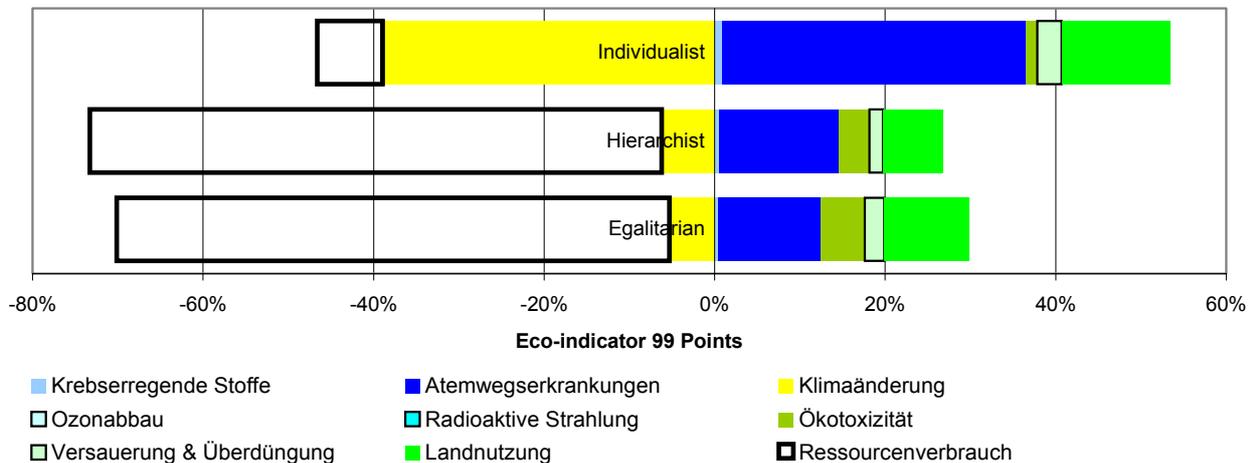


Fig. 15 Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.

4.4 Variation der Luftemissionen beim Anlagenbetrieb

Aufgrund der grossen Schwankungen bei den Messwerten für Luftschadstoffe beim Anlagenbetrieb (vgl. Tab. 12) wurde der Einfluss unterschiedlicher Annahmen auf das Ergebnis überprüft. Hierzu wurde die Berechnung mit allen in Tab. 12 angegebenen Varianten durchgeführt. Das Ergebnis für die Bewertung der Luftemissionen beim Anlagenbetrieb wird in Tab. 28 gezeigt.

Bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen sinkt die Umweltbelastung durch die Emissionen auf ein Neuntel, wenn die minimalen Emissionsfaktoren angenommen werden. Dagegen steigt sie auf fast das Zehnfache, wenn maximale Emissionsfaktoren angenommen werden. Bei Altholzfeuerungen reicht die Spannbreite von 27% der Werte für die Standardvariante bei minimalen Emissionsfaktoren bis zu knapp dem Zwölffachen der angenommenen Standardvariante bei maximalen Emissionsfaktoren. Die Variation der Ergebnisse wird fast ausschliesslich durch die schon genannten Hauptschadstoffe (Partikel und NO_x sowie Cadmium, Zink und Blei) und damit durch die Art der Abgasreinigung und die Schwermetallbelastung des Holzes bestimmt. Der Anteil der Hauptschadstoffe an den bewerteten Gesamtemissionen liegt bei etwa 90%. Bei den Feuerungen für Holzbrennstoffe erreichen die bewerteten Emissionen von Partikeln und NO_x (Top 2) zusammen fast immer 90%.

Tab. 28 Relative Bewertung der Emission von Luftschadstoffen aus dem Anlagenbetrieb mit dem Eco-indicator 99 (H) bei verschiedenen Annahmen für die Emissionsfaktoren. Angaben pro 1Mio. Nm³ Abgas.

El'99-aggregated, Hierarchist	Feuerung Altholz min	Feuerung Altholz max	LRV-Grenzwert Altholz	Altholz-Feuerung Diese Studie	Feuerung Holz min Lit.	Feuerung Holz max Lit.	LRV-Grenzwert Holz	Holz-Feuerung Diese Studie
Alle Emissionen (EI99 (H) Punkte/1Mio Nm³ Abgas)	4.78E+2	2.09E+4	4.01E+3	1.76E+3	3.32E+2	2.84E+4	3.83E+3	2.95E+3
Anteil Top5/Emission	95%	97%	88%	91%	89%	98%	90%	98%
Anteil Top2/Emission	46%	9%	40%	26%	62%	97%	90%	94%
Abweichung zur Standardvariante	27%	1187%	228%	100%	11%	961%	130%	100%

4.5 Zertifizierung nach *naturemade star*

4.5.1 Prüfung der Beispielanlagen

Tab. 29 zeigt die Ergebnisse für Strom aus den untersuchten Anlagen bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 in EI99 (H) Punkten. Für die Berechnung der Umweltbelastungen des erzeugten Stroms werden die Gesamtergebnisse der Anlage berechnet. Die erzeugte Wärme wird mit 50% der Umweltbelastungen aus der Wärmeproduktion mit einem kondensierendem Gasheizkessel gutgeschrieben. Der Grenzwert für die Auszeichnung mit dem Label *naturemade star* beträgt 0.014 EI99 (H) Punkte pro kWh Strom.

Bei den vier untersuchten Anlagen ergibt sich ein stark unterschiedliches Bild. Am besten schneidet die Anlage in Meiringen ab, die sogar auf eine negative Umweltbelastung kommt. Das heisst, die kombinierte Produktion von Strom und Wärme ist im Vergleich zu einer kondensierenden Gasheizung so gut, dass dem Strom keine Umweltbelastungen zugewiesen werden müssen. Hier wirkt sich insbesondere die weitergehende Abgasreinigung mit besonders niedrigen Emissionen positiv aus. Auch die Anlage in Lengwil bleibt deutlich unter dem Grenzwert. Die Anlage in Lengwil mit ihrer ganzjährigen Stromproduktion und einem guten Wirkungsgrad erreicht den Grenzwert nach den vorliegenden Daten auch dann, wenn die Emissionswerte für zusätzliche Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) abgeschätzt werden, die an der Anlage selbst nicht gemessen wurden, und wenn zusätzlich auf Restholz verzichtet und statt dessen nur naturbelassenes Holz verwendet wird. Aufgrund der relativ hohen Staubemissionen liegt die Anlage in Bière deutlich über dem Grenzwert.

Die zum Vergleich untersuchte Anlage aus den Niederlanden verfügt über eine relativ gute Abgasreinigung und einen hohen elektrischen Wirkungsgrad. Allerdings wird die Wärme bisher nicht genutzt. Sie liegt knapp über dem Grenzwert. Zu berücksichtigen ist bei den Bilanzen dieser vier Beispielanlagen allerdings, dass nur die Emissionen in der Sachbilanz berücksichtigt wurden, für die Messwerte vorlagen. Somit sind die wirklichen Umweltbelastungen noch etwas höher.

Tab. 29 Ergebnisse für die untersuchten Anlagen bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (H) in EI99 (H) Punkten pro Jahr bzw. pro kWh Strom. Grau hinterlegte Werte zeigen ein Unterschreiten des Grenzwertes von 0.014 EI99 (H) Punkte pro kWh an.

El'99-aggregated, Hierarchist	Holz WKK Meiringen	Holz WKK Biere	Holz WKK Lengwil	Holz Kraftwerk Cuijk, Wirbelschicht feuerung	Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung	Holz WKK Lengwil plus Zusatzemissionen, ohne Restholz
1 Jahr Betrieb	5.36E+4	1.32E+5	9.02E+4	2.64E+6	1.12E+5	4.54E+4	7.31E+4	1.08E+5
Strom (Abz. Gasheizung) pro kWh	-4.74E-2	1.41E-1	-1.74E-2	1.47E-2	1.25E-2	-5.87E-2	-2.90E-2	-4.62E-3

4.5.2 Prüfung der Standardanlagen

Auch für die beiden angenommenen Standardanlagen mit weitergehender Abgasreinigung ist die Umweltbelastung negativ und der Grenzwert für die Auszeichnung mit dem Label *naturemade star* wird problemlos eingehalten. Die Anlage für die Verbrennung von Altholz schneidet etwas schlechter ab als die Anlage zur Verbrennung von Holzbrennstoffen. Dank der im Normalfall besseren Filtertechnologie sind die durchschnittlichen Emissionen der wichtigen Luftschadstoffe relativ gering. Allerdings verursacht die Entsorgung der Asche aus Altholz höhere Umweltbelastungen. Die Standardanlage zur Holzverbrennung, die nur mit einem Multi-Zyklon ausgerüstet ist, liegt knapp unter dem Grenzwert. Neben den Emissionen spielt hierfür wie in Fig. 13 bereits gezeigt auch die forstwirtschaftliche Landnutzung für die Brennstoffbereitstellung eine Rolle.

Bei den bisher vorliegenden Angaben gibt es relativ grosse Unsicherheiten, da der Holzverbrauch sowie Strom- und Wärmeproduktion jeweils für das gesamte Jahr angegeben wurden. Im Sommerhalbjahr wird aber in den Anlagen Biere und Meiringen kein Strom, sondern nur Wärme produziert. Für die spätere Zertifizierung sind deshalb zusätzliche Informationen zur Aufteilung der Aufwendungen auf Strom und Wärme notwendig.

4.5.3 Prüfung bei unterschiedlichen direkten Emissionen

Wenn maximale Werte oder die geltenden LRV-Grenzwerte gemäss Tab. 12 für die Emissionsfaktoren der Luftschadstoffe bei den Standardanlagen eingesetzt werden (siehe Tab. 30), erfüllen die Anlagen den Grenzwert für *naturemade star* nicht mehr. Bei der Berechnung des Ergebnisses für den produzierten Strom steigt der Wert für die Eco-indicator 99 Punkte dabei stärker an als nach Tab. 28 zu erwarten wäre, da hier zunächst die Wärmeproduktion gutgeschrieben wird und sich die Erhöhung bei den Emissionen damit viel stärker auf den verbleibenden Rest auswirkt. Allerdings liegen die Grenzwerte der LRV für SO_x und NMVOC deutlich über den Werten, die bei der Holzverbrennung realistisch sind.

Tab. 30 Ergebnisse für die Standardanlagen bei einer Abschätzung der Luftemissionen mit minimalen und maximalen Werten sowie mit den Grenzwerten der LRV. Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (H) in EI99 (H) Punkten pro Jahr bzw. pro kWh Strom. Grau hinterlegte Werte zeigen ein Unterschreiten des Grenzwertes von 0.014 EI99 (H) Punkte pro kWh an.

EI'99-aggregated, Hierarchist	Feuerung Altholz min	Feuerung Altholz max	LRV-Grenzwert Altholz	Feuerung Holz min Lit.	Feuerung Holz max Lit.	LRV-Grenzwert Holz
1 Jahr Betrieb Strom (Abz. Gasheizung) pro kWh	3.55E+4	6.35E+5	1.39E+5	3.54E+4	8.58E+5	1.38E+5
	-6.93E-2	5.72E-1	4.18E-2	-6.73E-2	7.87E-1	3.92E-2

Fig. 16 zeigt den Einfluss der Partikelemissionen auf das Ergebnis für die Standardanlagen. Alle übrigen Emissionen und Annahmen wurden bei dieser Berechnung konstant gehalten (siehe Werte in Tab. 17). Bis zu einem Emissionswert von etwa 80mg Staub/Nm³ (bei 11% O₂ im Abgas) erreichen die Anlagen zur Verbrennung von Altholz den Grenzwert für das *naturemade star* Label. Für Anlagen, die mit Holzbrennstoffen befeuert werden, könnte der Wert sogar bis etwa 120mg/Nm³ steigen unter der Annahme, dass andere Emissionen und der Gesamtwirkungsgrad unverändert bleiben.

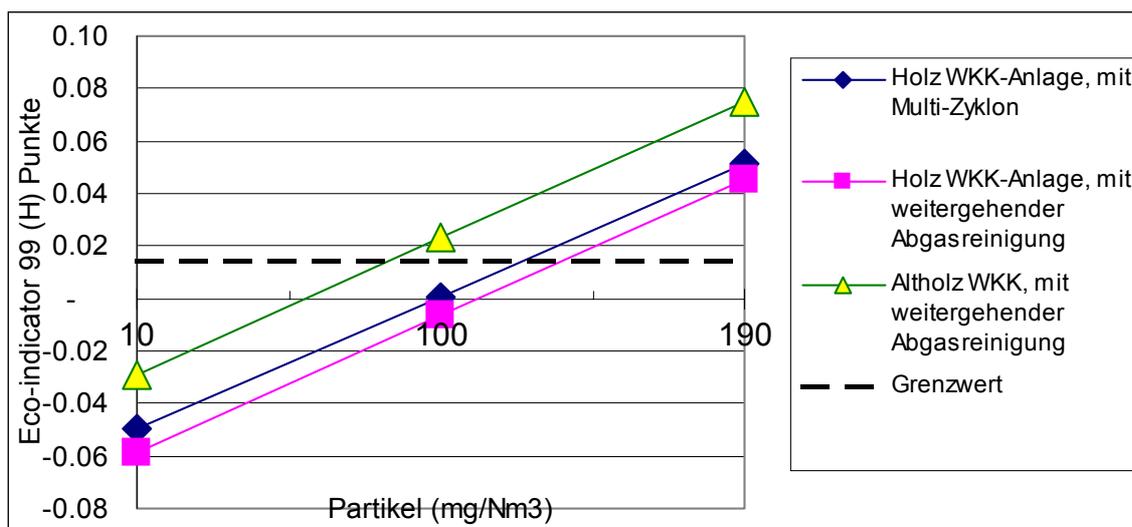


Fig. 16 Einfluss der Partikelemissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.

Fig. 17 zeigt den Einfluss der NO_x Emissionen auf das Ergebnis für die Standardanlagen. Anlagen mit Multi-Zyklon erreichen den Grenzwert unter sonst unveränderten Randbedingungen, wenn der NO_x Ausstoss unter dem Wert von 240mg/Nm³ (bei 11% O₂ im Abgas) liegt. Für Anlagen mit weitergehender Rauchgasreinigung (also insbesondere Staubreduktion) könnte die NO_x Emission theoretisch bis auf über 500mg/Nm³ steigen ohne das Erreichen des Labels zu gefährden.

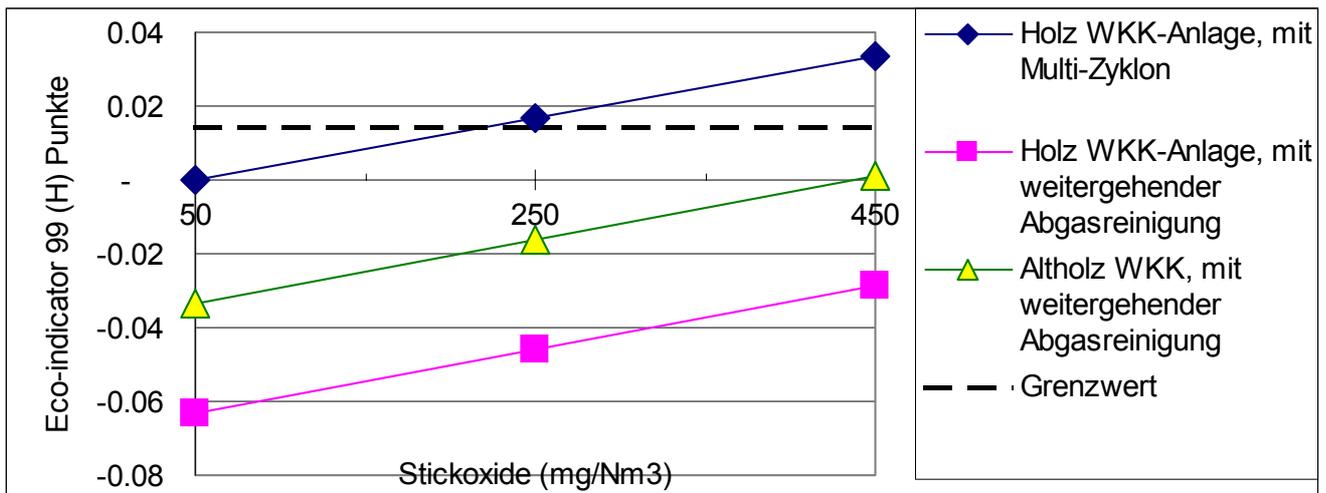


Fig. 17 Einfluss der NO_x Emissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.

Aus der Analyse verschiedener Annahmen für die Luftemissionen folgt, dass im Kenngrößenmodell die Emissionswerte für die wichtigsten Luftschadstoffe eingegeben werden müssen, um extrem schlechte Anlagen von der Zertifizierung ausschliessen zu können. Entscheidend für den Erfolg bei der Zertifizierung sind dabei vor allem geringe Staubemissionen während eine Entstickung wohl nicht zwingend notwendig ist.

4.5.4 Variation des Anteils der verwendeten Holzbrennstoffe

Die Berücksichtigung der Flächennutzung bei der Holzproduktion führt zu unterschiedlichen Eco-indicator 99 (H) Punkten für die verschiedenen Holzbrennstoffe. Holzschnitzel aus Sägereiabfällen und Altholz verursachen eine geringere Umweltbelastung als Holzschnitzel aus Brennholz.

In Fig. 18 wird die Zusammensetzung der Holzbrennstoffe für die drei Standardanlagen variiert. Die Anlage mit Multizyklon erreicht den Grenzwert für *naturemade star* wenn etwa 25% Restholz verfeuert wird. Die Anlagen mit weitergehender Rauchgasreinigung erreichen den Grenzwert unabhängig von der Brennstoffzusammensetzung. Für Altholzfeuerungen wurde dabei berücksichtigt, dass bei vermehrtem Einsatz von Brennholz die Emissionen und die Belastungen durch die Asche sich an die Werte für die Holz-WKK-Anlage angleichen.

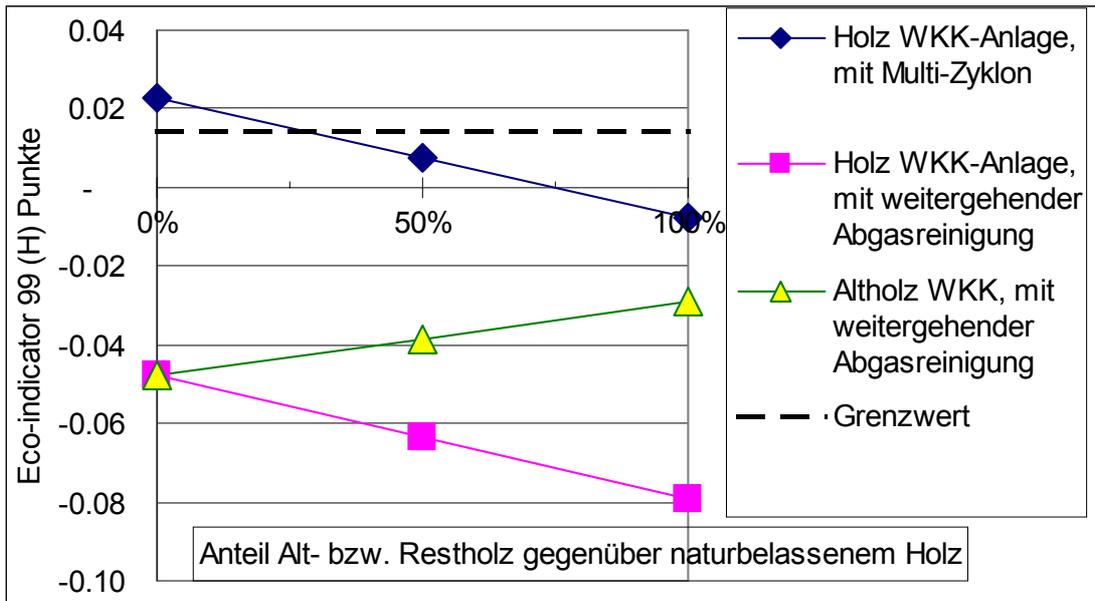


Fig. 18 Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Gezeigt wird die Umweltbelastung in Eco-indicator 99 (H) Punkten pro kWh Strom.

4.5.5 Variation des Gesamtwirkungsgrades

Der Gesamtwirkungsgrad ist eine wichtige Größe in der Sachbilanz. Durch ihn wird der Verbrauch von Holz und damit die hiervon abhängigen Emissionen bestimmt. Für diese Untersuchung wurde deshalb überprüft, wie sich eine Veränderung bei Strom- und Wärmeproduktion und damit beim Wirkungsgrad auf das Gesamtergebnis auswirkt (Fig. 19). Dabei wurde das Verhältnis zwischen Wärme und Strom konstant gelassen. Ab einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 78% erreicht die WKK-Anlage mit Multi-Zyklon den Grenzwert für das *naturemade star* Label. Sinkt der Gesamtwirkungsgrad unter 50% erreicht die Altholzverbrennungsanlage den Grenzwert nicht mehr.

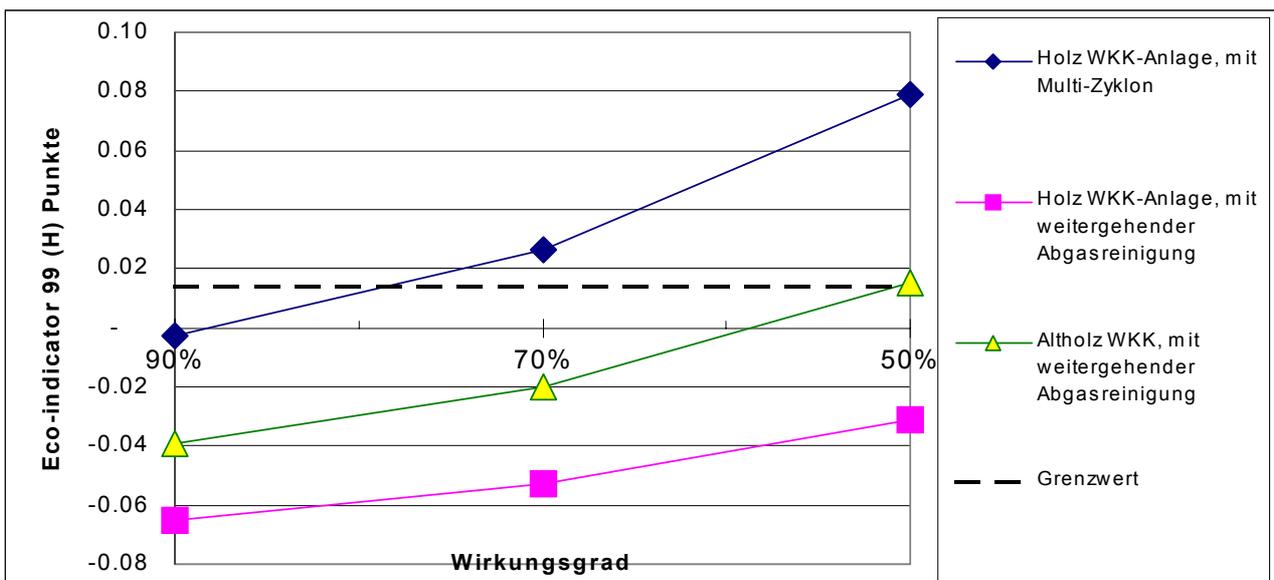


Fig. 19 Einfluss des Gesamtwirkungsgrades auf das Gesamtergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom.

4.5.6 Kraftwerke ohne Wärmenutzung

Hier wird nun überprüft ob auch Anlagen ohne Wärmenutzung unter Umständen das Label erreichen können. Fig. 20 zeigt eine Auswertung zum elektrischen Wirkungsgrad, der von den Standardanlagen erreicht werden muss, wenn keine Wärme genutzt wird und damit auch keine Gutschrift für die Wärmeproduktion erfolgt. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von etwas über 20% erreicht die Holz-WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung den Grenzwert für das *naturemade star* Label. Bei etwa 35% Wirkungsgrad liegt auch das Altholzkraftwerk unter diesem Wert.

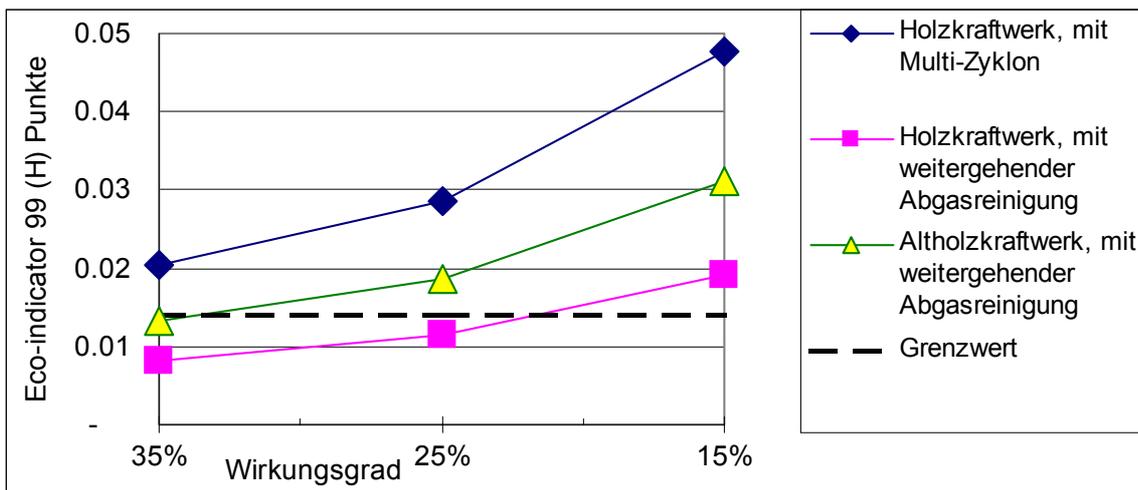


Fig. 20 Einfluss des Stromwirkungsgrades. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen bei ausschliesslicher Stromproduktion.

4.6 Ökobilanz der Strom- und Wärmeerzeugung bei einer Allokation gemäss Exergiegehalt

Tab. 31 zeigt Ergebnisse der Wirkungsbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen bei einer Allokation der Umweltbelastungen gemäss Exergiegehalt. Pro kWh Strom werden zwischen 0.57 und 0.74 MJ nicht erneuerbare Energieträger verbraucht. Die Energiebilanz ist also hinsichtlich der nicht-erneuerbaren Energieträger positiv. Von (MATTHEWS & MORTIMER 2000) wurde im Vergleich hierzu ein Energieverbrauch von 0.9 bis 1 MJ/kWh berechnet. Die Anlagen mit weitergehender Abgasreinigung schneiden bei einer Bewertung der Umweltbelastungen mit allen Methoden deutlich besser ab als die Anlage mit Multi-Zyklon.

Die Treibhausgasemissionen einer Reihe unterschiedlicher Systeme zur Strom- und Wärmeerzeugung wurden auch von (JUNGMEIER *et al.* 1999) bilanziert. Die Emissionen von Treibhausgasäquivalenten liegen bei der Verwendung von Holz zwischen 29g/kWh und 69g/kWh (jeweils für Wärme und Strom zusammen) und damit etwas höher als die Werte, die hier für Strom berechnet wurden (36 – 58g/kWh) und deutlich höher als die Werte für Wärme. Die höchsten Werte wurden dabei für Energieholzplantagen ermittelt, die hier nicht untersucht werden. Das Verhältnis von CO₂ zu CH₄ bzw. zu N₂O Emissionen (vgl. Tab. 22) stimmt zwischen den hier gezeigten Werten und den Ergebnissen bei (JUNGMEIER *et al.* 1999:A-203) in etwa überein.

Tab. 31 Wirkungsbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen.

Modul-Namen eco [™]	Unit	Strom, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Strom, ab Holz WKK Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Strom, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon	Wärme, ab Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung	Wärme, ab Altholz WKK mit weitergehender Abgasreinigung
		kWh	kWh	kWh	MJ	MJ	MJ
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	0.7	0.741	0.572	0.00416	0.00503	0.00388
Bedarf erneuerbarer energetischer Ressourcen	MJ-eq	18.4	18.5	17.4	0.109	0.126	0.118
Treibhauseffekt 100a 2001	kg CO2-equiv.	0.0555	0.0579	0.0355	0.000329	0.000393	0.000241
EI'99-aggregated, Egalitarian	EI99-points	0.0256	0.0119	0.0202	0.000152	0.0000806	0.000137
EI'99-aggregated, Hierarchist	EI99-points	0.0309	0.0126	0.0203	0.000183	0.0000855	0.000138
EI'99-aggregated, Individualist	EI99-points	0.0401	0.0098	0.0125	0.000238	0.0000666	0.0000848
Umweltbelastungspunkte	UBP	576	432	927	3.42	2.93	6.29
EI95+ Total	E-09 Pts.	0.00141	0.000951	0.0016	0.0000084	0.00000645	0.0000108

5 Kenngrößenmodell für die Zertifizierung

Für die Zertifizierung mit dem Qualitätslabel *naturemade star* müssen vom Betreiber verschiedene Informationen zur Anlage zur Verfügung gestellt werden. Diese Informationen werden in einem Kenngrößenmodell eingegeben. Das Kenngrößenmodell erlaubt ein effizientes Berechnen von Ökobilanzergebnissen auf Grundlage weniger Angaben zur konkreten Anlage. Ausserdem kann das Ergebnis für die einzelne Anlage mit dem Grenzwert für *naturemade star* verglichen werden.

Für das Kenngrößenmodell müssen wichtige Parameter der Ökobilanz festgelegt werden. Diese Größen sollen später von jedem an einer Zertifizierung interessierten Anlagenbetreiber erhoben werden. Aus der Diskussion der Ökobilanzergebnisse ergeben sich folgende wichtige Kenngrößen, die für den durchschnittlichen Anlagenbetrieb pro Jahr abgefragt werden müssen:

- Jährlicher Gesamtverbrauch von Holzbrennstoffen (naturbelassenes Holz bzw. Restholz) und Altholz (Schüttkubikmeter – Sm³) für die kombinierte Produktion von Strom und Wärme.
- Mittlere Transportentfernung für den Holzbezug (ohne Bezug von Qualitätsholz, von dem lediglich die Überreste als Abfall verbrannt werden).
- Kesselwirkungsgrad für den WKK-Kessel und den Heizkessel.
- Wärmeabgabe der vorhandenen Kessel.
- Nettostromproduktion: Bruttostromproduktion, abzüglich Stromverbrauch für Stromerzeugung in der WKK-Anlage (z.B. Abgasfilter, Brennstofftransport, Ventilatoren), jedoch einschliesslich Eigenproduktion für Nutzung ausserhalb der Stromerzeugung, z.B. Pumpen für den Warmwasserkreislauf, Abgasreinigung für Warmwasserkessel, etc..
- Genutzte Wärme aus der Wärmekraftkopplung und aus dem Heizkessel.
- Emission von Partikeln und NO_x (mg/Nm³) im letzten Jahresdurchschnitt bezogen auf 11% O₂ im Abgas der WKK-Anlage. Für die Bestimmung der Emissionswerte ist der Durchschnitt aller Messungen aus den letzten 12 Monaten vor der Prüfung massgeblich.
- Emission von Blei, Cadmium, Zink (mg/Nm³) im Jahresdurchschnitt bezogen auf 11% O₂ im Abgas der WKK-Anlage bei der Verbrennung von Altholz.
- Entsorgungsmengen Holzasche und Filterrückstände (t/a) und deren Entsorgungsweg.

Eine Erhebung der Filtertechnologie erscheint nicht notwendig. Die wesentlichen hierdurch verursachten Einflüsse auf die Ökobilanz (Hilfsstromverbrauch, Partikel und NO_x Emissionen) werden bereits im Kenngrößenmodell erhoben. Der Verbrauch von Ammoniak und evtl. erhöhte NH₃ Emissionen sind für das Gesamtergebnis nicht relevant.

Die Berechnung zum Energiegehalt des verbrannten Holzes erfolgt auf Grund der Angaben zum Kesselwirkungsgrad und zur Wärmeproduktion der Kessel. Die Holzmenge wird entsprechend dieser Angaben auf den WKK-Kessel und den Heizkessel verteilt.

Fig. 21 zeigt die Eingabemaske des Kenngrößenmodells für Anlagen zur Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen bzw. Altholz. Alle Berechnungen können in einem Excel-Tabellenblatt durchgeführt werden. Die weiteren Blätter enthalten Hintergrundinformationen und dürfen nicht verändert werden.

Ökostrom-Prüfung: Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz

Eingabe: Deutsch ▼

Anlagenname: **WKK Lengwil, 77%**

Bewertungsmethode: EI'99-aggregated, Hierarchist ▼

Anlagentyp: WKK Holz mit Multi-Zyklon ▼

Inputs

Holzschnitzel aus Frischholz (Laubbaum)

	Sm ³ /a	km	Bemerkungen:
Holzschnitzel aus Frischholz (Laubbaum)	6000	25	Jahresverbrauch von Holz in Schüttkubikmetern. Mittlere Transportentfernung ab Wald (Frischholz) bzw. ab Schnitzelherstellung.
Holzschnitzel aus Frischholz (Nadelbaum)	14000	25	
Holzschnitzel aus Restholz (z.B. Sägereiabfälle)	0	25	
Holzschnitzel aus Altholz	0	100	
Gesamt	20000		

Holzmenge (t atro) aus Sm³ berechnet, aber nicht weiter verwendet: 3'800

Umwandlung

	WärmeKraftkopplung		Heizkessel		
Kesselwirkungsgrad	84.0%	%	83.0%		Angaben des Kesselherstellers
Wärmeproduktion Kessel	15'652'174	kWh/a	-		Wärmeabgabe direkt aus dem Kessels (gemessen)
Holzverbrauch (t trocken) berechnet	3'626	3'626	-		Wird für Berechnungen verwendet
Netto Stromerzeugung	1'400'000	kWh/a	0		Einschliesslich Verbrauch für die Wärmeverteilung, abzüglich Eigenverbrauch für Brennstofftransport, Rauchgasreinigung und andere Anlagenteile der Stromerzeugung.
Wärme genutzt	13'000'000	kWh/a	-		Eigennutzung und Verkauf von Wärme aus der Anlage.
Luftemissionen im Reingas	WKK				
Partikel / Staub	89.0	mg/Nm ³	-		Angaben bezogen auf 11% O ₂ im trockenen Abgasvolumen
Stickoxide NOx als NO ₂	174.0	mg/Nm ³	-		
-	-	mg/Nm ³	-		
-	-	mg/Nm ³	-		
Outputs					
Aschen zur Entsorgung	kg	150'000			Gesamtmenge pro Jahr
Art der Entsorgung					Reaktordeponie ▼

Resultate:

Gesamtwirkungsgrad WKK (berechnet) **77%**

		Im Vergleich zur Standardanlage:	
WKK Lengwil, 77%	EI-99-points / a	1.18E+05	1.12E+05
WKK Lengwil, 77%	EI-99-points / kWh	2.32E-03	1.25E-02
Oekostrom Schweiz Grenzwert	EI-99-points / kWh	1.40E-02	16.6%

Ökostromkriterium erfüllt

© Niels Jungbluth, Rolf Frischknecht, ESU-services, Uster, CH

Fig. 21: Eingabemaske des Kenngrößenmodells für die Bestimmung der Umweltbelastung von Anlagen zur Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz.

Tab. 32 zeigt die Auswahlmöglichkeiten für verschiedene Listeneinträge im Kenngrößenmodell. Für die Ökostromprüfung darf dabei nur die Bewertungsmethode Eco-indicator 99, Hierarchist ausgewählt werden.

Tab. 32 Auswahlmöglichkeiten für verschiedene Listeneinträge.

Bewertungsmethode	Anlagentyp	Art der Entsorgung
El'99-aggregated, Hierarchist	WKK Holz mit Multi-Zyklon	Reaktordeponie
El'99-aggregated, Egalitarian	WKK Holz mit weitergehender Abgasreinigung	Kehrichtverbrennungsanlage
El'99-aggregated, Individualist	WKK Altholz mit weitergehender Abgasreinigung	Inertstoffdeponie
Umweltbelastungspunkte		Düngung von Industriefläche
El95+ Total		Düngung in der Landwirtschaft
Bedarf nichterneuerbarer energetischer Ressourcen		
Treibhauseffekt 100a 1996		

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Diskussion und Unsicherheiten

Die Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz zeigt eine grosse Schwankungsbreite bei den für die Bewertung relevanten Grössen. Eine eindeutige Bestimmung der richtigen Werte z.B. für die Emissionen erscheint aufgrund der Schwankungsbreite fast unmöglich. Für die Beurteilung verschiedener Anlagen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Auszeichnung mit dem Qualitätslabel *naturemade star* stellen diese grossen Unsicherheiten allerdings kein Problem da. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden durch einige wenige Kenngrössen so massgeblich bestimmt, dass eine zuverlässige Beurteilung der Umweltbelastungen einer spezifischen Anlage ohne weiteres möglich ist, wenn diese Kenngrössen bekannt sind.

Mit Vorsicht sind hingegen die erstellten allgemeinen Bilanzen für die Strom- und Wärmeerzeugung aus Holz zu verwenden. Sie geben nur eine ungefähre Abschätzung der durchschnittlichen Umweltbelastungen solcher Anlagen wieder. Neben der Höhe der Emissionsfaktoren beeinflusst auch die Wahl des Allokationskriteriums zwischen Wärme- und Stromproduktion das Endergebnis massgeblich. Zum Vergleich der Strom- (und Wärme-)erzeugung aus Holz mit anderen Arten der Energiebereitstellung ist eine vertiefende Diskussion dieser Unsicherheiten notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann. Diskutiert wurden die Variationen der Ergebnisse aufgrund der Festlegung zur Allokation z.B. von (JUNGMEIER *et al.* 1998).

Ein Vergleich der Bilanzergebnisse mit bereits durchgeführten vergleichbaren Studien ist schwierig. Für das Programm GEMIS 4.0 (ÖKO-INSTITUT 2000) wurde ebenfalls die Stromerzeugung aus Holz bilanziert. Der Vergleich der gewählten Werte für die Luftemissionen zeigt bereits einige Unterschiede zur vorliegenden Studie. Der Herkunft der einzelnen Annahmen in GEMIS 4.0 konnte hier aber nicht weiter nachgegangen werden. Auch von (JUNGMEIER *et al.* 1999, JUNGMEIER *et al.* 1998) wurde die Stromerzeugung aus Holz untersucht. Die Ergebnisse für eine Reihe unterschiedlicher WKK-Anlagen werden allerdings nur bezogen auf die Lebensdauer der Anlage bzw. auf die eingebrachte Holzmenge diskutiert. In Kapitel 4.5.6 wurden einige Werte mit den Ergebnissen dieser Studie verglichen und eine ungefähre Übereinstimmung nachgewiesen.

6.2 Empfehlungen

Es wird empfohlen, die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz grundsätzlich zur Zertifizierung mit dem Qualitätslabel *naturemade star* zuzulassen. Neben dem Unterschreiten des Grenzwertes bei einer Prüfung der Anlagendaten mit dem Kenngrössenmodell (globales Kriterium) wird vorgeschlagen folgende Aspekte bei den lokalen Kriterien zu berücksichtigen (FRISCHKNECHT & JUNGBLUTH 2001a):

- Die Anlage hält die geltenden gesetzlichen Vorschriften insbesondere bezüglich der Luftreinhaltung ein.
- Bei Holzverarbeitenden Betrieben, die auch Abfälle aus der Verarbeitung von Tropenholz verbrennen, sollte darauf geachtet werden, dass dieses Tropenholz aus FSC-zertifizierten Lieferungen stammt.
- Es soll für den Gesamtbetrieb (bspw. Kaserne, Furnier- oder Sägewerk) ein Energiekonzept zur Reduktion des gesamten Strom- und Wärmebedarfs entwickelt werden.

6.3 Ausblick

Die Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz zeigt, dass diese Art der Stromerzeugung ökologisch sinnvoll sein kann und eine Auszeichnung mit dem Qualitätslabel *naturemade star* grundsätzlich möglich ist. Durch Wärmekraftkopplungs-Anlagen mit weitergehender Abgasreinigung wird der Grenzwert in der Regel wohl ohne Probleme eingehalten. Anlagen, die nur mit einem Multi-Zyklon ausgerüstet sind, müssen einen guten Gesamtwirkungsgrad und Staubemissionswerte unter dem LRV-Grenzwert von $150\text{mg}/\text{Nm}^3$ erreichen. Kraftwerke ohne Wärmenutzung müssen neben einem guten elektrischen Wirkungsgrad auch über eine sehr gute Abgasreinigung verfügen, damit sie den Grenzwert erreichen. Die Einhaltung des Grenzwertes muss dabei in allen Fällen mit dem Kenngrößenmodell überprüft werden.

Grosse Unsicherheiten gibt es bei den verschiedenen Anlagenbetreibern hinsichtlich einer ökonomisch tragbaren und ökologisch sinnvollen Entsorgung der anfallenden Aschen. Hierzu sind genauere Vorgaben seitens der Gesetzgeber wünschenswert, um eine eindeutige Regelung und Planungssicherheit zu schaffen.

Zwei der drei bestehenden Anlagen in der Schweiz nutzen den bei ihnen erzeugten Strom vor allem betriebsintern. Im Sinne einer Ausweitung der Versorgung mit Ökostrom ist somit die Planung von neuen Anlagen wünschenswert. Hier sollte auch an eine Verbrennung von Altholz gedacht werden, da dieser Energieträger bisher auf Grund mangelnder Absatzmöglichkeiten vor allem ausserhalb der Schweiz genutzt wird. Für neue Anlagen tragen vor allem die beiden folgenden Faktoren zu einer erfolgreichen Zertifizierung bei:

- Möglichst ganzjährige Nutzung der produzierten Wärme und hohe Effizienz der Stromerzeugung.
- Tiefes Emissionsniveau insbesondere bei den wichtigen Luftschadstoffen Partikel und NO_x (sowie Blei, Cadmium und Zink bei der Altholzverbrennung), das durch die Art der Verbrennung und eine entsprechende Abgasreinigung erreicht werden kann.

Leider haben mindestens zwei der drei bestehenden Anlagen die in der Planung projektierten Leistungsdaten bisher nicht erreicht. Technische Probleme bei den Anlagen und wechselnde Brennstoffqualitäten führten und führen immer noch zu Problemen. Für neue Anlagen sollten die Erfahrung aus dem Betrieb bisheriger Anlagen deshalb besser berücksichtigt werden. Ausserdem ist eine qualifizierte Betreuung der Anlage durch den Anlagenplaner und -bauer zu gewährleisten bis die Anlage optimal läuft.

Abbildungen

Fig. 1:	Ablaufschema Vergabe des Qualitätszeichens <i>naturemade star</i>	1
Fig. 2	Prozesse der Bilanzierung für die Bereitstellung von Strom und Wärme aus Holzbrennstoffen und Altholz.....	3
Fig. 3	Längsschnitt durch die WKK-Anlage Bière.....	14
Fig. 4	Aussenansicht der Heizzentrale des Waffenplatzes in Bière.....	15
Fig. 5	Innenansicht der Heizzentrale Bière: Links die Holzfeuerung, in der Mitte die Pumpen zum Antrieb des Flüssigkeits-Kreislaufes, rechts die Turbinengruppe zur Stromerzeugung.....	15
Fig. 6	Grundriss Heizzentrale Lengwil mit Rinden und Trockensilo.....	16
Fig. 7	Energieflussdiagramm der WKK-Anlage Lengwil.....	18
Fig. 8	Anlagenschema des Fernheizkraftwerkes Meiringen.....	19
Fig. 9	Dominanzanalyse für die Emission von Partikeln beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.....	32
Fig. 10	Dominanzanalyse für die Emission von NO _x beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.....	32
Fig. 11	Dominanzanalyse für die Emission von SO _x beim Betrieb der drei Standardanlagen.....	33
Fig. 12	Dominanzanalyse für die mit dem Eco-indicator 99 (H) bewerteten Umweltbelastungen bezogen auf 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.....	38
Fig. 13	Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit Multi-Zyklon.....	39
Fig. 14	Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Altholz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung.....	39
Fig. 15	Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.....	40
Fig. 16	Einfluss der Partikelemissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.....	43
Fig. 17	Einfluss der NO _x Emissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.....	44
Fig. 18	Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Gezeigt wird die Umweltbelastung in Eco-indicator 99 (H) Punkten pro kWh Strom.....	45
Fig. 19	Einfluss des Gesamtwirkungsgrades auf das Gesamtergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom.....	45
Fig. 20	Einfluss des Stromwirkungsgrades. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen bei ausschliesslicher Stromproduktion.....	46
Fig. 21:	Eingabemaske des Kenngrössenmodells für die Bestimmung der Umweltbelastung von Anlagen zur Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz.....	48
Fig. 22:	Überblick über die Schritte der Schadensmodellierung ausgehend von Sachbilanzergebnissen (Inventory Analysis) bis zur Schadensbewertung (Damage Assessment) am Beispiel der Emission radioaktiver Isotope und den dadurch zusätzlich verursachten Krebserkrankungen (FRISCHKNECHT <i>et al.</i> 2000).....	59
Fig. 23:	Vereinfachendes Schema der Vorgehensweise beim Eco-indicator 99. Grau: (Zwischen-) Ergebnisse; Weiss: Modellierungen; GOEDKOOPT & SPRIENSMA (2000a:11).....	60
Fig. 24:	Schematische Darstellung der Methode der ökologischen Knappheit 1997.....	63

Tabellen

Tab. 1	Beispiel einer Sachbilanz in eco ^{mc}	5
Tab. 2	Beispiel für das Ergebnis einer Sachbilanz in eco ^{mc}	5
Tab. 3	Holzabgaben nach Sortimenten der öffentlichen und privaten Wälder 1996 (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001) und eigene Berechnungen zu den dabei erzielten Erlösen.....	8
Tab. 4	Einnahmen im Holzproduktionsbetrieb der öffentlichen (BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001) und privaten (eigene Berechnungen) Forstbetriebe 1996 in CHF.....	9
Tab. 5	Aufteilung von Ertrag und Holzmenge auf verschiedene Holzqualitäten (Eigene Berechnungen auf der Grundlage von BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001).....	10
Tab. 6	Flächennutzung für die Produktion verschiedener Holzqualitäten (m ² a pro Tonne Holz atro).....	10
Tab. 7	Nutzung von Waldfläche für verschiedene Holzprodukte.....	11
Tab. 8	Angaben zum Treibstoffverbrauch bei der Herstellung von Holzschnitzeln.....	12
Tab. 9	Energie- und Stoffströme für die Bereitstellung von Holzbrennstoffen (FRISCHKNECHT <i>et al.</i> 1996) und für die Aufbereitung von Altholz (Jost AG).....	12
Tab. 10	Wichtige Kenngrössen der vier Beispielanlagen. Emissionen in die Luft bezogen auf 11% O ₂ im Abgasstrom (mit Bandbreite der angegebenen Messwerte in Klammern).....	13
Tab. 11	Emissionsdaten des Holzkraftwerkes Cuijk und Umrechnung auf einen Sauerstoffgehalt von 11% (REMMERS 2000:193).....	20
Tab. 12	Luftemissionen bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen und Altholz. Minimal- und Maximalwerte aus verschiedenen Studien (siehe Text). Abschätzung für die Emissionen bei der Verbrennung von Altholz mit weitergehender Abgasreinigung und Holzbrennstoffen mit Multi-Zyklon für die vorliegende Sachbilanz. Alle Angaben in mg/Nm ³ ausser TCDD-Äquivalente in fg/Nm ³ (10 ⁻¹⁵ g oder 10 ⁶ ng) bei 11% O ₂ im trockenen Abgas. Die Abkürzung „s“ steht in eco ^{mc} für Emissionen aus stationären Quellen. Für NO _x (>2.5kg NO _x /h), NMVOC (Anlage >1MW) und Partikel (Anlage <5MW) gelten die Grenzwerte nur unter bestimmten Bedingungen. Je nach Standort und Anlagengrösse sind strengere Grenzwerte möglich.....	22
Tab. 13	Energie- und Stoffströme für die Infrastruktur einer Wärmekraftkopplungsanlage für die Verbrennung von Holz. Abschätzung der Sachbilanzen für Anlagenteile und Gebäude.....	23
Tab. 14	Angenommene Zusammensetzung von Holzaschen für die Berechnung der Sachbilanzen der Entsorgung (NOGER <i>et al.</i> 1996) und Firmendaten. Anteile der Aschefractionen (HASLER & NUSSBAUMER 1993).....	25
Tab. 15	Energie- und Stoffströme für die Entsorgung von Aschen aus der Holz- und Altholzverbrennung.....	26
Tab. 16	Emissionen und Gutschriften für die Ausbringung von Holzasche als Dünger auf landwirtschaftlich genutzten Böden und anderen Böden.....	27
Tab. 17	Wichtige Kenngrössen der drei Standardanlagen. Emissionen in die Luft bezogen auf 11% O ₂ im Abgasstrom.....	28
Tab. 18	Energie- und Stoffflüsse für die drei untersuchten Anlagen und Abschätzung für je eine durchschnittliche Standardanlage zur Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen (mit Multi-Zyklon bzw. mit weitergehender Abgasreinigung) und Altholz. Sachbilanzdaten pro Betriebsjahr. Berechneter Gesamtwirkungsgrad der Anlagen. Abk.: B-Bière, C-Cuijk, L-Lengwil, M-Meiringen.....	29
Tab. 19	Sachbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen. Allokation anhand des Exergiegehaltes.....	30
Tab. 20	Ausgewählte Inventargrössen für den Betrieb während einem Jahr der vier untersuchten Anlagen und für die drei Standardanlagen.....	31
Tab. 21	Ausgewählte Inventargrössen für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.....	33
Tab. 22	Ausgewählte Inventargrössen für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen pro kWh Strom respektive MJ Wärme.....	34
Tab. 23	Ergebnisse der Wirkungsbilanz und Flächennutzung für verschiedene Holzbrennstoffe und Altholz.....	35

Tab. 24	Auswertung der Ökobilanz für die Infrastruktur.....	35
Tab. 25	Auswertung der Ökobilanz für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.....	36
Tab. 26	Auswertung der Ökobilanz für 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.	36
Tab. 27	Auswertung der Ökobilanz für die Entsorgung der Aschen.	37
Tab. 28	Relative Bewertung der Emission von Luftschadstoffen aus dem Anlagenbetrieb mit dem Eco-indicator 99 (H) bei verschiedenen Annahmen für die Emissionsfaktoren. Angaben pro 1Mio. Nm ³ Abgas.	41
Tab. 29	Ergebnisse für die untersuchten Anlagen bei einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (H) in EI99 (H) Punkten pro Jahr bzw. pro kWh Strom. Grau hinterlegte Werte zeigen ein Unterschreiten des Grenzwertes von 0.014 EI99 (H) Punkte pro kWh an.	42
Tab. 30	Ergebnisse für die Standardanlagen bei einer Abschätzung der Luftemissionen mit minimalen und maximalen Werten sowie mit den Grenzwerten der LRV. Bewertung mit dem Eco-indicator 99 (H) in EI99 (H) Punkten pro Jahr bzw. pro kWh Strom. Grau hinterlegte Werte zeigen ein Unterschreiten des Grenzwertes von 0.014 EI99 (H) Punkte pro kWh an.	43
Tab. 31	Wirkungsbilanz für die Strom- und Wärmeproduktion in Holzverbrennungsanlagen.	47
Tab. 32	Auswahlmöglichkeiten für verschiedene Listeneinträge.	49
Tab. 33:	Übersicht über die in ausgewählten Ökobilanz-Bewertungsmethoden explizit berücksichtigten Umweltauswirkungen.	57
Tab. 34:	Treibhauspotenziale für verschiedene Integrationszeiträume infolge der Emission von 1 kg ausgewählter Gase, bezogen auf Kohlendioxid in der Version für 1996 (HOUGHTON <i>et al.</i> 1996) und 2001 (ALBRITTON & MEIRA-FILHO 2001).	62
Tab. 35:	Brennwert von Primärenergieträgern gemäss „Ökoinventare von Energiesystemen“ (FRISCHKNECHT <i>et al.</i> 1996:Tab. III.8.1).....	64

Physikalische Parameter von Holz

Auszug aus (FRISCHKNECHT *et al.* 1996). Für Literaturangaben siehe dort. Ergänzungen aus (FRISCHKNECHT & JUNGBLUTH 2001b).

Physikalische Parameter

Wassergehalt

Der Gehalt von Wasser im Holz kann entweder in Bezug auf die trockene Holzmasse oder auf die feuchte Holzmasse angegeben werden und wird durch die Holzfeuchte u oder durch den Wassergehalt w beschrieben. In dieser Arbeit wird jeweils die Holzfeuchte u angegeben oder verwendet.

$$\text{Holzfeuchte } u = \frac{\text{Masse}_{\text{Wasser}}}{\text{Masse}_{\text{trockenes Holz}}} = \frac{\text{Masse}_{\text{Wasser}}}{\text{Masse}_{\text{feuchtes Holz}} - \text{Masse}_{\text{Wasser}}}$$

$$\text{Wassergehalt } w = \frac{\text{Masse}_{\text{Wasser}}}{\text{Masse}_{\text{feuchtes Holz}}}$$

$$\text{Umrechnung zwischen } u \text{ und } w: \quad u = \frac{w}{1 - w} \quad w = \frac{u}{1 + u}$$

Die Holzfeuchte ist eine Schlüsselgrösse bei der Energiegewinnung durch Holz, da die Dichte, der Heizwert des Holzes und der Wirkungsgrad einer Feuerung von ihr abhängen. Im Gegensatz dazu bleibt das Volumen bei ändernder Holzfeuchte nahezu konstant. Dies hat zur Folge, dass sich in der Forstwirtschaft die Volumenmasse Ster oder Sm^3 (Schüttkubikmeter) gegenüber den Gewichtsmassen durchgesetzt haben. Da der Energieinhalt von Holz jedoch von der Masse abhängt, sollte diese in Fragen der Energiegewinnung auch verwendet werden. Um den Einfluss der Holzfeuchte auszuschliessen, wird deshalb oft die *atro* Tonne, also eine Tonne absolut trockenes Holz ($u = w = 0\%$) verwendet. Bei der Feuerung wirkt sich eine grosse Holzfeuchte in einer geringeren Energieausbeute aus, da im Wasserdampf latent Energie gespeichert ist, welche mit den heute verwendeten Feuerungen nicht zurückgewonnen werden kann. Eine teilweise Abhilfe würden hier Kondensationskessel bieten. In der Tabelle IX.4.4 sind typische Werte für die Holzfeuchte aufgeführt.

	Holzfeuchte u Bereich [%]	Holzfeuchte u Dieses Projekt [%]	Heizwert H _u [MJ/kg]
Stückholz			
absolut trocken	0	0	18.5
2 Jahre getrocknet	18-25	20	15
1 Jahr getrocknet	25-33	30	13.7
im Wald	60-100	80	8.1
Holzschnitzel			
absolut trocken	0	0	18.5
aus Sägerei	33-100	40	12.6
aus Wald	25-100	50	11.6
im Wald	60-100	60	10.7

Tab. IX.4.4: Holzfeuchte u von Stückholz und Holzschnitzeln und daraus berechneter Heizwert H_u des feuchten Holzes <BfK 1988>, <BUWAL 1990>, <Kym 1993>, <Nussbaumer 1988> und <Sell et al. 1988>.

Holzdichte

Die Dichte von Holz hängt von der Holzfeuchte und der Struktur des Holzes ab. Weiter spielen auch noch die Wachstumsbedingungen eine grosse Rolle. Die chemische Zusammensetzung des Holzes ist überraschenderweise bei fast allen Bäumen gleich und deshalb von untergeordneter Bedeutung. Die Struktur des Holzes hängt hauptsächlich von der Baumart (genetisch bedingt) ab und äussert sich in der Grösse der Hohlräume, der Dicke der Zellwände und ob und wie die Hohlräume gefüllt werden. Den weitaus grössten Einfluss haben jedoch die Wachstumsbedingungen auf die Dichte des Holzes. So ergaben Messungen innerhalb einer Fichte eine Variation der Dichte zwischen 0.38 g/cm^3 und 0.64 g/cm^3 . Die durchschnittliche Dichte der drei häufigsten Baumarten in der Schweiz betragen ($u=0\%$): Fichte 0.38 g/cm^3 , Buche 0.68 g/cm^3 und Tanne 0.41 g/cm^3 <Sell et al. 1988>.

$$Dichte(x\%) = Dichte(0\%) + \frac{Dichte(0\%) * x}{100} \quad (1)$$

Als Trockendichten kann, falls keine genaueren Angaben vorhanden sind, von den Werten 450 kg/m^3 für Weichholz und 650 kg/m^3 für Hartholz ausgegangen werden.

Heizwert

Für die energetische Nutzung von Holz ist der Heizwert von zentraler Bedeutung. Wie oben schon erwähnt, hängt der Heizwert stark vom Wassergehalt ab (Tab. IX.4.4). Bei Stückholz wird deshalb versucht, den Wassergehalt durch eine zweijährige Lagerung zu senken und auf ein konstantes Niveau zu bringen, welches bei $u=18-25\%$ liegt. Weiter hängt der Heizwert von der Zusammensetzung des Holzes, also vom Anteil der verschiedenen Makromoleküle ab. Der Heizwert von Zellulose liegt bei $17-18 \text{ MJ/kg}$, derjenige von Lignin bei 30 MJ/kg und derjenige von Harz bei $35-38 \text{ MJ/kg}$. Die drei häufigsten Bäume der Schweiz haben im trockenen Zustand ($u=0\%$) folgende Heizwerte: Fichte: 19.1 MJ/kg , Buche: 18.3 MJ/kg und Tanne: 18.9 MJ/kg <Sell et al. 1988>. Die Heizwerte der Rinde der entsprechenden Baumarten liegen nur einige Prozente unter denjenigen der reinen Hölzer. Als Mittelwert für alle Baumarten und Hölzer kann der Wert 18.5 MJ/kg für trockene-

nes Holz ($u=0\%$) verwendet werden <Sell et al. 1988>.

$$\text{Heizwert}_{th}(x\%)[MJ/kg] = \text{Brennwert}[MJ/kg] - 1.32[MJ/kg] - \frac{20[MJ/kg] * x}{100 + x} \quad (2)$$

Der Heizwert_{th} ist der theoretische untere Heizwert bei vollständiger Verbrennung.

	Holztyp (Feuchte) ¹⁾	Dichte feucht [kg/m ³]	Heiz- wert _{th} [MJ/kg]	Brennwert [MJ/kg]
Bauholz	Weichholz, Stammholz nass (70%) ²⁾	765	10.7	20.3
	Weichholz, Industrieholz nass (140%) ³⁾	1080	4.6	20.3
	Weichholz luftgetrocknet (20%)	540	15.6	20.3
	Weichholz technisch getrocknet (10%)	495	17.2	20.3
	Hartholz, Stammholz nass (70%)	1105	11.9	21.5
	Hartholz, Industrieholz nass (80%)	1170	11.3	21.5
	Hartholz luftgetrocknet (20%)	780	16.8	21.5
	Hartholz technisch getrocknet (10%)	715	18.4	21.5
Energieholz	Stückholz (Weich-), 2 Jahre getrocknet (20%)	540	15.6	20.3
	Stückholz (Weich-), im Wald (140%)	1080	4.6	20.3
	Stückholz (Hart-), 1 Jahr getrocknet (30%)	845	15.6	21.5
	Stückholz (Hart-), 2 Jahre getrocknet (20%)	780	16.8	21.5
	Stückholz (Hart-), im Wald (80%)	1170	11.3	21.5
	Holzschnitzel (Weich-), aus Sägerei (40%)	630	13.3	20.3
	Holzschnitzel (Weich-), aus Wald (50%)	675	12.3	20.3
	Holzschnitzel (Weich-), im Wald (60%)	720	11.5	20.3
	Holzschnitzel (Hart-), aus Sägerei (40%)	910	14.5	21.5
	Holzschnitzel (Hart-), aus Wald (50%)	975	13.5	21.5
	Holzschnitzel (Hart-), im Wald (60%)	1040	12.7	21.5
	Stückholz (CH un spez.), 1 Jahr getrocknet (30%)	658	14.7	20.6
	Stückholz (CH un spez.), 2 Jahre getrocknet (20%)	607	15.9	20.6
	Stückholz (CH un spez.), im Wald (80 – 140%)	1105	6.5	20.6
	Holzschnitzel (CH un spez.), aus Sägerei (40%)	708	13.6	20.6
	Holzschnitzel (CH un spez.), aus Wald (50%)	759	12.6	20.6
	Holzschnitzel (CH un spez.), im Wald (60%)	810	11.8	20.6

Tab. A2: Dichte und Heizwert von Bau- und Energiehölzern.

¹⁾: Die Feuchte wird in Gewichtsprozent bezogen auf die Holz trockenmasse angegeben.

²⁾: Stammholz = ganzer Stamm vor dem Einschneiden

³⁾: Industrieholz = kleinere Stücke, Äste

Raum- und Gewichtsmasse

Für die Bestimmung der Holzmenge gibt es eine Vielfalt von Masseinheiten, die zu einiger Verwirrung führen können. Der Ursprung dieser Vielfalt liegt darin, dass im Wald selbst nur das Volumen mit einfachen Mitteln – einem Metermass – bestimmbar ist. Je nachdem in welcher Form das Holz gerade vorliegt – Stamm, Spalte, Schnitzel, etc. – entspricht das messbare Volumen nicht dem effektiven Volumen an fester Holzmasse. Auch spielt die Masse für die meisten Arbeiten im Wald nur eine untergeordnete Rolle. So sind z.B. die Kosten der Holzproduktion proportional zum Volumen. Die Masse des Holzes kommt erst dann zum Tragen, wenn es um den Energieinhalt geht.

Die Verbindung zwischen dem Volumen und der Masse kann mit Hilfe des spezifischen Schüttvolumens für verschiedene Holzarten hergestellt werden:

$$\text{Effektives Volumen } V_{\text{eff}} = v_{\text{spez}} \cdot \text{Masse}_{\text{atro}} = v_{\text{spez}} \cdot \frac{\text{Masse}_{\text{feucht}}}{1 + u}$$

	Rundholz	Dieses Pro- jekt	Stückholz	Dieses Pro- jekt	Schnitzel	Dieses Pro- jekt
	[m ³ /t]	[m ³ /t]	[Ster/t]	[Ster/t]	[Sm ³ /t]	[Sm ³ /t]
Fichte/Tanne	2.3-2.53	2.53	3.33-3.4	3.39	5.88-6.2	5.92
Buche	1.38-1.67	1.47	2.38-2.7	2.39	4.17-4.8	4.18

Tab. IX.4.5: Spezifisches Schüttvolumen v_{spez} von Rundholz, Stückholz und Holzschnitzeln <BfK 1987>, <BfK 1988>, <BUWAL 1990> und <Sell et al. 1988>.

Ökobilanz Bewertungsmethoden

Übersicht zu den Methoden

In den folgenden Unterabschnitten werden einige ausgewählte Bewertungsmethoden kurz beschrieben und charakterisiert. Die Auswahl beinhaltet möglichst unterschiedliche Ansätze und stellt nicht den Anspruch, nur „Best practice“-Methoden zu enthalten. Für eine detailliertere Beschreibung der Methoden sei auf die jeweiligen Originalquellen verwiesen. Neben den Unterschieden in den Konzepten unterscheiden sich Bewertungsmethoden auch darin, welche Umwelteffekte überhaupt berücksichtigt werden (siehe Tab. 33).

Tab. 33: Übersicht über die in ausgewählten Ökobilanz-Bewertungsmethoden explizit berücksichtigten Umweltauswirkungen.

		Umweltauswirkung (nach Udo de Haes 1996:19)	Treibhauseffekt (GWP 2001, 100a)	Ökologische Knappheit, 1997	KEA	Eco-indicator 95	Eco-indicator 99
Ressourcen	Abiotische Ressourcen	∅	√ ¹⁾	√ ¹⁾	∅	∅	√ ⁶⁾
	Biotische Ressourcen	∅	∅	∅	∅	∅	∅
	Lebensräume/ Land	∅	∅	∅	∅	∅	√
Emissionen	Klimaveränderung	√	√	∅	√	√	√
	Ozonschichtabbau	∅	√	∅	√	√	√
	Humantoxische Wirkungen	∅	√	∅	√	√	√
	Ökotoxische Wirkungen	∅	√	∅	√	√	√
	Photooxidantenbildung	∅	√	∅	√	√	√
	Versäuerung ³⁾	∅	√	∅	√	√	√
	Überdüngung ²⁾	∅	√	∅	√	√	√
	Geruch	∅	∅	∅	∅	∅	∅
	Lärm	∅	∅	∅	∅	∅	∅ ⁹⁾
	Radioaktive Emissionen	∅	∅	∅	∅ ⁷⁾	√	√
	Unfallopfer	∅	∅	∅	∅	∅	∅
	Abfälle ⁴⁾	∅	√ ⁵⁾	∅	∅	∅	∅

- ¹): Berücksichtigt werden nichterneuerbare Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran) sowie Wasserkraft bei der ökologischen Knappheit.
³): Luft- und Wasseremissionen.
⁴): Die mit der Entsorgung von Abfällen verursachte Energiebedarf resp. die verursachten Emissionen sind unter Luft- und Wasserverschmutzung berücksichtigt.
⁵): Inklusive schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle aus der Kernenergiekette.
⁶): Inkl. nichterneuerbare Energieträger (aber ohne Uran).
⁷): Ein mit der CML-Vorgehensweise und mit Eco-indicator 95 kompatibler Vorschlag wird in Frischknecht (1998:129ff) gemacht.
⁹): Müller-Wenk (1999) hat einen kompatiblen Vorschlag zur Lärmbewertung gemacht.

Der geographische Geltungsbereich, der der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren zugrunde liegt, variiert ebenfalls. So orientiert sich die Methode der ökologischen Knappheit an schweizerischen, schwedischen, norwegischen, holländischen oder belgischen Umweltzielen, wogegen die Eco-indicator-Bewertungsmethoden sich auf durchschnittlich europäische Verhältnisse beziehen. Der Bedarf nicht erneuerbarer Energie ausgedrückt als Kumulierter Energieaufwand (KEA) ist vom geographischen Anwendungsbereich unabhängig. Die Darstellung der Resultate erfolgt bei den meisten Methoden vollaggregierend, d.h. das Endergebnis wird durch eine Zahl ausgedrückt, kann aber bei den beiden Eco-indicator Methoden auch auf der Stufe Wirkungsbilanz erfolgen (Ergebnis der Charakterisierung). Einzig die wirkungsorientierte Klassifizierung gemäss CML/UBA sieht keine Vollaggregation vor, sondern zeigt die kumulierten Umweltwirkungen pro Umwelteffekt als Endergebnis.

Eco-indicator 99

Die Methode Eco-indicator 99 (GOEDKOOP & SPRIENSMA 2000a, b) ist aus der Methode Eco-indicator 95 (GOEDKOOP 1995) heraus weiterentwickelt worden. Das Konzept der Schadensmodellierung wurde weiterentwickelt und verfeinert. Zudem konnten im Vergleich zum Eco-indicator 95 weitere Umwelteffekte berücksichtigt werden (insbesondere Ressourcenentwertung und Flächeninanspruchnahme).

Ausgangspunkt dieser Methode ist der Bewertungsschritt, d.h. sie wurde Top-Down entwickelt (und nicht Bottom-Up ausgehend vom Ergebnis der Sachbilanz). Als Schutzgüter, deren Beeinträchtigung mithilfe einer Ökobilanz zu quantifizieren sind, werden

- Menschliche Gesundheit,
- Ökosystem Qualität, und
- Ressourcenentwertung

berücksichtigt. Ausgehend von diesen drei Schutzgütern werden Umweltschadensmodelle für die als wichtig erachteten Umweltwirkungen entwickelt um damit eine Anbindung an die Sachbilanz-ergebnisse zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Schadensmodelle vorgestellt.

Menschliche Gesundheit

Schäden an der menschlichen Gesundheit werden in DALYs (disability adjusted life years) gemessen, ein Indikator welcher 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. Die verwendeten Modelle bestehen aus den fünf folgenden Teilschritten (siehe Fig. 22):

1. Analyse der Stoffverteilung nach der Emission: Damit wird eine Emission (in Masseinheiten oder als Zerfälle pro Sekunde) mit der vorübergehenden Änderung der Konzentration in Luft, Wasser und/oder Boden verknüpft.
2. Expositionsanalyse: Die modellierte Änderung der Konzentration wird in eine Dosis für die dadurch geschädigten Bevölkerung resp. des dadurch geschädigten Ökosystems überführt.
3. Effektanalyse: Mit der ermittelten Dosis werden die damit verbundenen Gesundheitseffekte (z.B. die Häufigkeit und Arten von Krebs) bestimmt.
4. Schadensanalyse: Die Gesundheitseffekte werden mithilfe des DALY-Konzeptes gewichtet. Dabei werden die Gesamtdauer (in Jahren), während der Personen mit einer Krankheit leben müssen (Years Lived Disabled, YLD), resp. die durch vorzeitigen Tod verlorenen Lebensjahre (Years of Life Lost, YLL) abgeschätzt.
5. Schadensbewertung: Die abgeschätzten beeinträchtigten und verlorenen Lebensjahre werden gewichtet und addiert. Dazu sind Werturteile nötig.

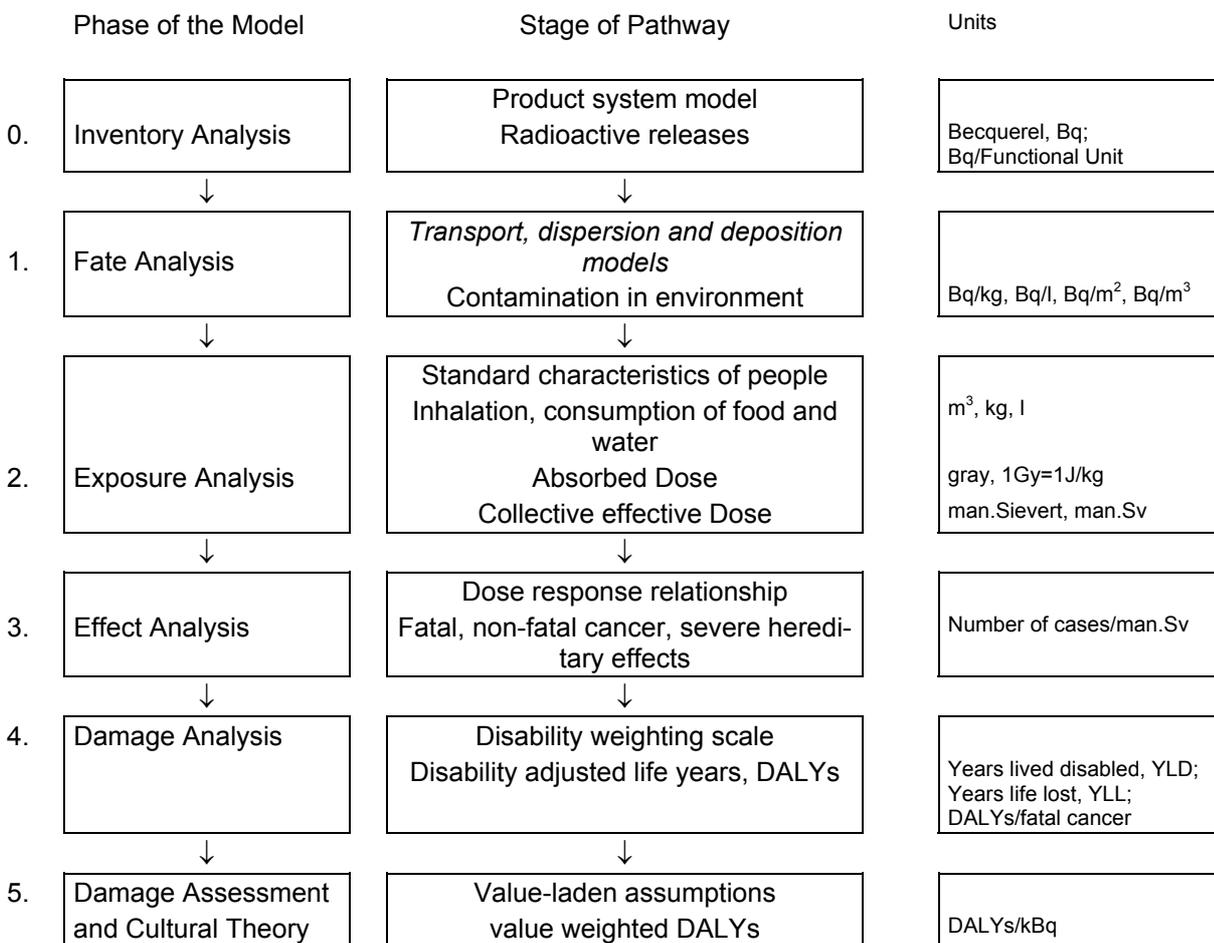


Fig. 22: Überblick über die Schritte der Schadensmodellierung ausgehend von Sachbilanzergebnissen (Inventory Analysis) bis zur Schadensbewertung (Damage Assessment) am Beispiel der Emission radioaktiver Isotope und den dadurch zusätzlich verursachten Krebserkrankungen (FRISCHKNECHT *et al.* 2000).

Ökosystem Qualität

Schäden an der Ökosystemqualität werden in Abhängigkeit des Prozentsatzes der durch die Umweltbelastung verschwundenen Arten ausgedrückt. Die Schadensmodellierung ist hier nicht so homogen wie beim Schutzgut „Menschliche Gesundheit“.

- Ökotoxizität wird durch den Anteil Arten quantifiziert, der in der Umwelt unter toxischem Stress leben muss (Potentially Affected Fraction, PAF). Da dieser Schaden nicht real beobachtbar ist, muss ein grober Umrechnungsfaktor verwendet werden, um toxischen Stress in tatsächlich beobachtbare Schäden überzuführen.
- Versäuerung und Überdüngung werden in einer gemeinsamen Umweltwirkungskategorie modelliert. Die Schadensmodellierung erfolgt über die Schäden an Gefässpflanzen.
- Schäden durch Landbedarf und Landveränderungen werden basierend auf empirischen Daten über das Auftreten von Gefässpflanzen in Abhängigkeit des Landtyps und der Flächengröße modelliert. Sowohl der lokale Schaden auf dem besetzten oder veränderten Gebiet als auch der regionale Schaden am Ökosystem werden berücksichtigt.
- Schäden an Ökosystemen infolge von Klimaänderungen, des Ozonschichtabbaus oder der Photooxidantenbildung werden in der Methode (noch) nicht berücksichtigt.

Ressourcenentwertung

Der Ressourcenverbrauch wird durch einen Indikator gewichtet, der die Qualität der verbleibenden mineralischen und fossilen Ressourcen beschreibt. Der Indikator drückt den Qualitätsverlust mit Hilfe erhöhter Energieverbräuche des zukünftigen Ressourcenabbaus aus.

Zusammenfassung der Methode

In Fig. 23 werden die verschiedenen Teilschritte (weiss) und (Zwischen-)Resultate (grau hinterlegt) für die Modellierung des Eco-indicator 99 gezeigt.

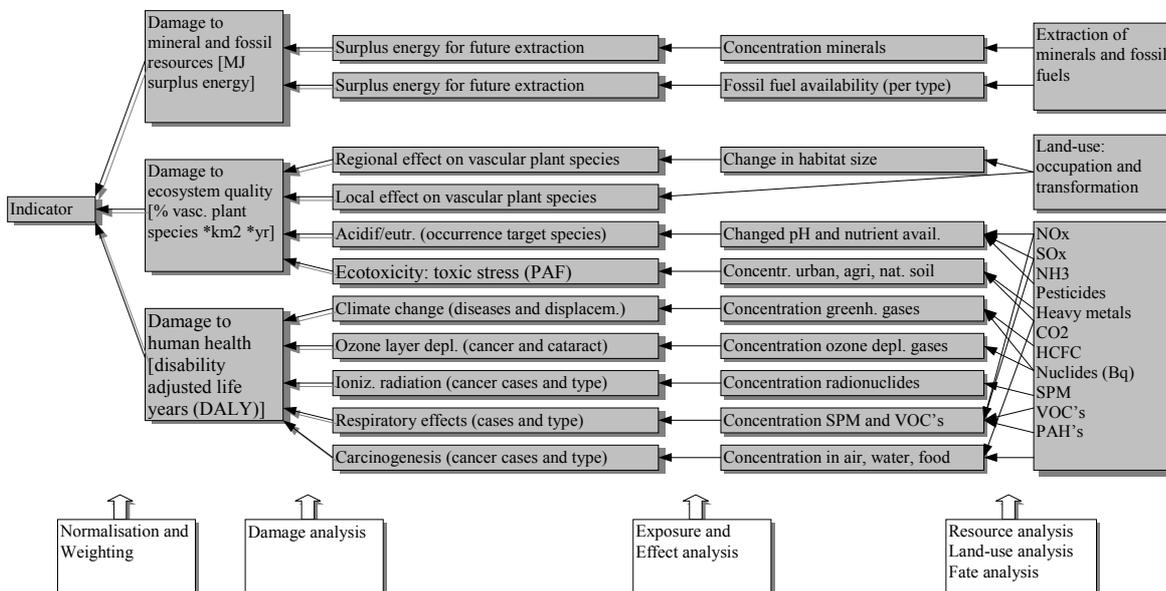


Fig. 23: Vereinfachendes Schema der Vorgehensweise beim Eco-indicator 99. Grau: (Zwischen-) Ergebnisse; Weiss: Modellierungen; GOEDKOOP & SPRIENSMA (2000a:11).

Alle Emissionen, Landinanspruchnahmen und -transformationen werden als in Europa auftretend angenommen. Gleiches gilt für die damit verbundenen Schäden, was eine einschränkende Annahme darstellt. Diese Einschränkung wurde aber für Schäden durch Ressourcenverbrauch, und infolge der Emission von Treibhausgasen, ozonschichtabbauenden Stoffen, persistenten karzinogenen Substan-

zen, anorganischen Luftschadstoffen mit einer weiträumigen Verfrachtung und einigen langlebigen radioaktiven Isotopen nicht gemacht.

Die Methode berücksichtigt zwei Arten von Unsicherheiten:

- Datenunsicherheiten, die mit technischen Problemen der Messung und der Bestimmung von Expositions-, Effekt- und Schadensfaktoren zusammenhängen und
- Unsicherheiten in den Modellen.

Datenunsicherheiten werden unter Annahme einer lognormalen Wahrscheinlichkeitsverteilung mithilfe der quadratischen geometrischen Standardabweichung quantifiziert. Die Unsicherheiten sind in einzelnen Bereichen beträchtlich und können zwei bis über drei Grössenordnungen betragen.

Modellunsicherheiten können nicht wie Datenunsicherheiten behandelt werden. Modelle sind entweder korrekt oder nicht. Bei der Modellbildung sind Annahmen des Anwenders über Parameter und Modellgrenzen notwendig, die Werturteile beinhalten und die die Ergebnisse beeinflussen können. Drei verschiedene Wertemuster für diese Entscheidungen werden in der Methode benutzt, was zu drei in sich konsistenten Schadensmodellen führt. Die Ausgestaltung der Wertemuster erfolgt auf der Basis der Kulturtheorie (siehe dazu auch HOFSTETTER 1998:41-79) und umfasst die folgenden drei Typen von Entscheidern (stark vereinfacht):

- E (Egalitarian): 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).
- I (Individualist): 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).
- H (Hierarchist): 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 Einbeziehen in Ökobilanzen.

Mit diesen drei Perspektiven umfassen die Ergebnisse einer Bewertung mit dem Eco-indicator 99 somit je drei Datensets für Humangesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen.

Die abschliessende Gewichtung zwischen diesen drei Dimensionen erfolgt auf der Basis der Ergebnisse eines an der ETH Zürich unter Ökobilanz-Experten durchgeführten schriftlichen Panels. Die dort eruierten Gewichtungsfaktoren, die nicht dem europäischen Durchschnitt entsprechen, können als Default-Werte verwendet werden. Andere, z.B. firmen- oder vereinspezifische Gewichtungstrippel sind jedoch denkbar resp. erwünscht. Die Methode wird in der Datenbank gemäss den Angaben in (JUNGBLUTH & FRISCHKNECHT 2000) verwendet.

Klimaänderungspotential

Für diejenigen Substanzen, welche zur Verstärkung des Treibhauseffekts beitragen, wird das „global warming potential“ (GWP) nach IPCC (ALBRITTON & MEIRA-FILHO 2001, HOUGHTON *et al.* 1996) als Wirkungsparameter beigezogen. Dabei werden Absorptionskoeffizienten für infrarote Wärmestrahlung, die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre und die erwartete Immissionsentwicklung berücksichtigt. Für verschiedene Zeithorizonte (20, 100 oder 500 Jahre) wird dann die potenzielle Wirkung eines Kilogramms eines Treibhausgases im Vergleich zu derjenigen eines Ki-

logramms CO₂ bestimmt. Somit können atmosphärische Emissionen in äquivalente Emissionsmengen CO₂ umgerechnet werden. Der kürzere Integrationszeitraum von 20 Jahren ist relevant, da dieser die Temperaturveränderungsrate massgeblich bestimmt, welche wiederum die erforderliche Adaptionfähigkeit für terrestrische Ökosysteme vorgibt. Die Verwendung der längeren Integrationszeiten von 500 Jahren entspricht auch etwa der Integration über einen unendlichen Zeithorizont und lässt Aussagen über das Potenzial der absoluten Veränderung zu (Meeresspiegelerhöhung, Veränderung der Durchschnittstemperatur). In Tab. 34 sind die Treibhauspotenziale ausgewählter Substanzen aufgeführt.

Tab. 34: Treibhauspotenziale für verschiedene Integrationszeiträume infolge der Emission von 1 kg ausgewählter Gase, bezogen auf Kohlendioxid in der Version für 1996 (HOUGHTON *et al.* 1996) und 2001 (ALBRITTON & MEIRA-FILHO 2001).

kg CO ₂ -Äquiv.	Integrationszeitraum			Version 2001
	20a	100a	500a	100a
CO ₂	1	1	1	1
CH ₄	56	21	6.5	23
N ₂ O	280	310	170	296
H-FKW 125	4'600	2'800	920	3400
H-FKW 134a	3'400	1'300	420	1300
SF ₆	16500	23900	36500	22200

Methode der ökologischen Knappheit 1997

Die Methode der ökologischen Knappheit erlaubt die Gewichtung der in einer Sachbilanz erfassten Grundlagendaten. Die Umweltbelastung wird zu sogenannten Umweltbelastungspunkten (UBP) zusammengefasst. Die Grundlagen der Methode wurden erstmals 1978 (MÜLLER-WENK 1978), die aktuellste Version 1998 publiziert (BRAND *et al.* 1998).

Die Methode der ökologischen Knappheit beruht auf dem Prinzip „Distance-to-target“. Dabei werden einerseits die gesamten gegenwärtigen Flüsse einer Umwelteinwirkung (z.B. Stickoxide) und andererseits die im Rahmen der umweltpolitischen Ziele als maximal zulässig erachteten (kritischen) Flüsse derselben Umwelteinwirkung verwendet. Sowohl kritische wie auch aktuelle Flüsse sind in Bezug auf schweizerische Verhältnisse definiert.

Fig. 24 zeigt ein vereinfachtes Vorgehensschema dieser Bewertungsmethode. Daraus geht hervor, dass die Schritte Klassifizierung und Charakterisierung nur für klimarelevante und ozon-schichtabbauende Substanzen und für Primärenergie (sowie für die Säuren HCl und HF) durchgeführt werden. Ansonsten werden die Umwelteinwirkungen (Emissionen und Ressourcenverbrauch) und Abfallmengen aus der Sachbilanz direkt gewichtet.

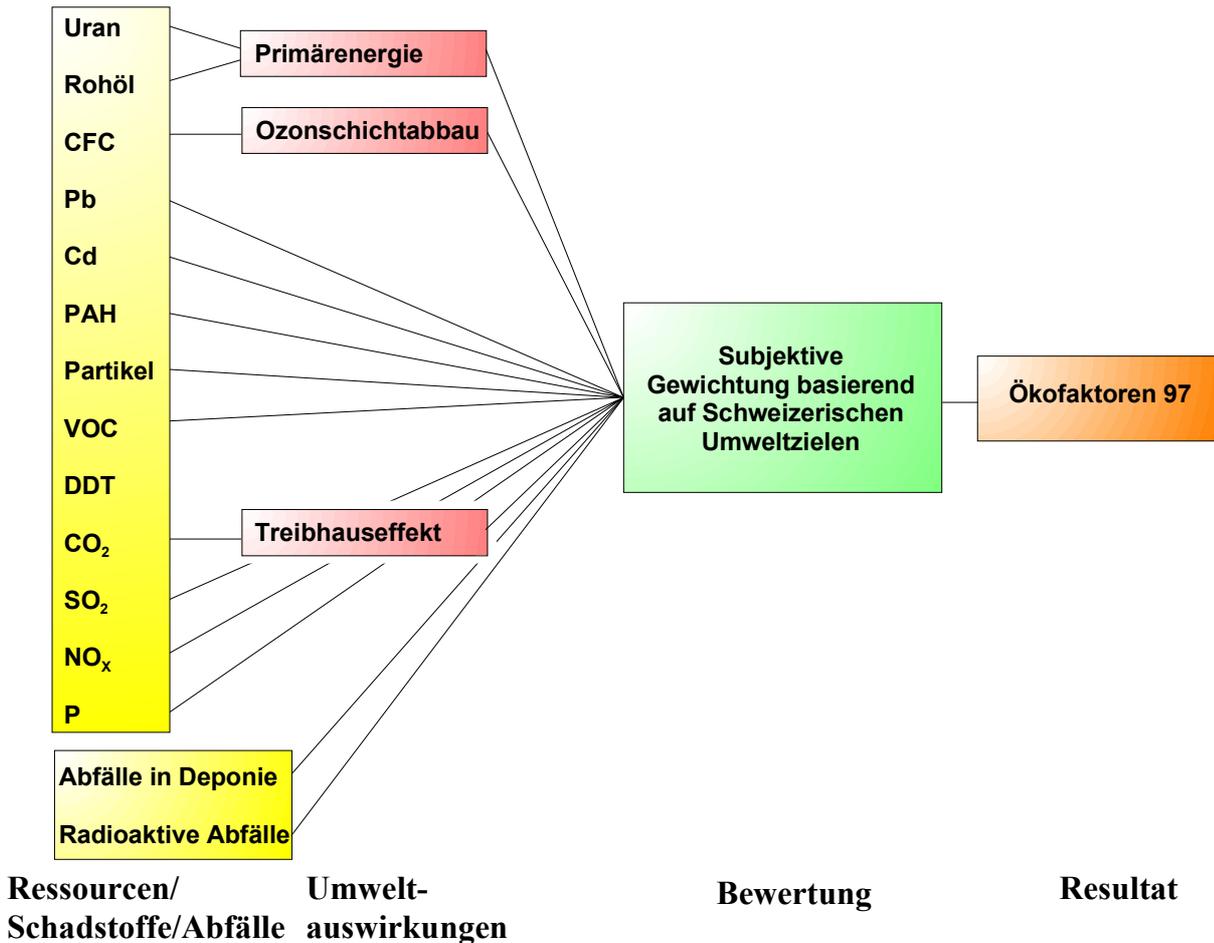


Fig. 24: Schematische Darstellung der Methode der ökologischen Knappheit 1997.

Die Bewertung erfolgt mittels Ökofaktoren w_j , welche wie folgt definiert sind:

$$w_j = c \cdot \frac{1}{f_{kj}} \cdot \frac{f_{aj}}{f_{kj}}$$

w_j Ökofaktor w_j , bezogen auf die Umwelteinwirkung j

c Konstante; $c = 10^{12} \text{ a}^{-1}$

f_{aj} aktueller Fluss pro Jahr und Fläche, bezogen auf die Umwelteinwirkung j ; Einheit meist (t/a).

f_{kj} Zielfluss (bzw. kritischer Fluss) pro Jahr und Fläche, bezogen auf die Umwelteinwirkung j . Einheit gleich wie f_{aj} , meist (t/a).

Der Faktor c ist für alle Ökofaktoren identisch und dient der besseren Handhabbarkeit der Zahlen. Der erste Quotient gewichtet die Emission am kritischen Fluss dieser Emission (Normalisierung; wie bedeutend ist die betrachtete Emission im Verhältnis zu ihrem kritischen Fluss?). Der zweite Quotient gewichtet mit dem Verhältnis aus heutigem Gesamtfluss und kritischem Fluss (Gewichtung; wie bedeutend sind die gesamten Emissionen im Verhältnis zu den kritischen Emissionen?).

Die Methode der ökologischen Knappheit verwendet im Normalisierungsschritt (siehe oben) die kritischen Flüsse. Werden dazu wie international üblich die aktuellen anstelle der kritischen Flüsse verwendet (f_{aj} statt f_{kj}), so lässt sich die obige Formel wie folgt umwandeln:

$$w_j = c \cdot \frac{1}{f_{aj}} \cdot \frac{f_{aj}}{f_{kj}} \cdot \frac{f_{aj}}{f_{kj}}$$

wobei der erste Faktor die Normalisierung darstellt, währenddem der zweite und dritte Faktor zusammen die Gewichtung der entsprechenden Emission j ausdrückt. Demzufolge beruht die Methode der ökologischen Knappheit auf einer quadratischen Funktion zur Bestimmung der Öko- oder Gewichtungsfaktoren. Eine Änderung des Verhältnisses von aktuellem zu kritischem Fluss eines Schadstoffes hat damit einen überproportionalen Einfluss auf dessen Gewichtung.

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der Indikator „Kumulierter Energieaufwand“ oder „Bedarf an erneuerbaren/nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen“ kann auf verschiedene Art und Weise quantifiziert werden (Zur Vorgehensweise siehe u.a. KASSER & PÖLL 1999, VDI 1997). Die Quantifizierung sollte sich dabei nach der Zielsetzung richten (was soll der Indikator aussagen? Siehe dazu auch Frischknecht et al. (1998)). Er kann beispielsweise basierend auf den folgenden drei Thesen definiert werden:

1. Nicht erneuerbare Ressourcen und nicht-nachhaltig genutzte Ressourcen haben einen Eigenwert.
2. Die aus diesen Ressourcen mit heutiger Technik nutzbare Energie bestimmt deren Eigenwert.
3. Alle anderen Aspekte wie Verfügbarkeit, Nachfrage, Substitutionsmöglichkeiten etc. tragen nichts zum Eigenwert der Ressourcen bei.

Aus diesen Thesen lässt sich die Berechnungsweise des Indikators ableiten. Der Indikator „Bedarf nicht erneuerbare Energie“ umfasst:

- Fossile Energieträger, aggregiert auf der Basis des Bedarfs an fossilen Ressourcen und gewichtet mit ihrem Brennwert.
- Uran, aggregiert auf der Basis des Bedarfs an spaltbarem Uran und gewichtet mit der in einem modernen Leichtwasserreaktor gewinnbaren Energiemenge.
- Nicht-nachhaltig genutzte Biomasse, aggregiert auf der Basis der geernteten Biomasse und gewichtet mit ihrem Brennwert.

Die Brennwerte der energetischen Ressourcen können z.B. den Ökoinventaren von Energiesystemen (FRISCHKNECHT *et al.* 1996:Teil III:Tab. III.8.1) entnommen werden. Sie sind in Tab. 35 aufgeführt.

Tab. 35: Brennwert von Primärenergieträgern gemäss „Ökoinventare von Energiesystemen“ (FRISCHKNECHT *et al.* 1996:Tab. III.8.1).

	Einheit	Brennwert (H ₀) MJ/Einheit
nicht-erneuerbare energetische Ressourcen		
- Erdölgas	Nm ³	45.0
- Grubengas (Methan)	kg	39.8
- Rohgas (Erdgas)	Nm ³	39.0
- Rohöl ab Bohrloch	t	45'600.0
- Rohbraunkohle vor Förderung ¹⁾	kg	9.5
- Rohfördersteinkohle vor Aufbereitung ¹⁾	kg	19.0
- Uran ab Erz (0.7 % U235) ²⁾	kg	900'000.0
erneuerbare energetische Ressourcen		
- Potentielle Energie Wasser	TJ	1'000'000.0
- Holz im Wald (atro)	t	20'300.0

¹⁾: Wert für durchschnittliche Einsatzkohle in Kraftwerken des westeuropäischen Stromverbundes UCPTÉ.

²⁾: inkl. Energieinhalt des U235 im abgereicherten Uran, das wegen seiner hohen spezifischen

Dichte in Bomben und zur Stabilisierung in Flugzeugen eingesetzt wird, und unter der Annahme, dass keine Wiederaufarbeitung erfolgt. Werden diese Verluste nicht berücksichtigt, würde der „Brennwert“ rund 460'000 MJ/kg Uran betragen.

Der hier aufgezeigte Indikator „Bedarf nicht erneuerbare Energie“ deckt somit explizit einen Teilbereich des Schutzgutes „Ressourcen“ ab, nicht jedoch andere Schutzgüter wie „menschliche Gesundheit“ und „Schädigung der Ökosysteme“.

Der Bedarf nicht erneuerbarer Energie erlaubt Aussagen zur Ressourceneffizienz (Schonung nicht erneuerbarer Ressourcen). Auf der Basis dieses Indikators können aber keine Aussagen über die *Umwelteffizienz* von Produkten gemacht werden, solange nicht erwiesen ist, dass der Kumulierte Energieaufwand und Umweltbelastung korrelieren und der KEA somit als Stellvertreter-Indikator verwendet werden kann.

Literatur

- ALBRITTON, D. L. & MEIRA-FILHO, L. G. 2001: *Technical Summary*. HOUGHTON, J. T., DING, Y., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J., XIAOSU, D., Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, www.ipcc.ch/pub/reports.htm, Cambridge, UK.
- ALFTER, P. 1996: *Projet NWGS: Quantification et valorisation des biens et services non-bois de la forêt suisse faisant l'objet d'une utilisation*. Rapport final OFEFP, Berne.
- BRAND, G., SCHEIDEGGER, A., SCHWANK, O., BRAUNSCHWEIG, A. 1998: *Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 1997*. Schriftenreihe Umwelt No. 297, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- BÜHLER, R., GOOD, J., NUSSBAUMER, T., JENNI, A., SCHAFFNER, H. 1996: *Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen*. BEW-Projekt No. 53894, Bundesamt für Energie, Bern.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK 2001: *Statistische Daten Fachbereich 7: Land und Forstwirtschaft*. www.statistik.admin.ch/stat_ch/ber07/dber07.htm.
- FORSBERG, G. 1999: *BioEnergy Transport Systems: Life cycle assessment of selected bioenergy systems*. Ph. D., Department of Forest Management and Products, The Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, SE.
- FORSBERG, G. 2000: "Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method." In *Biomass and Bioenergy* Vol. 00 (2000): 1-14.
- FRISCHKNECHT, R. 1998: *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation*. Ph.D.-thesis No. 12599, Inst. f. Energietechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 255 Seiten, Switzerland.
- FRISCHKNECHT, R., BOLLENS, U., BOSSHART, S., CIOT, M., CISERI, L., DOKA, G., DONES, R., GANTNER, U., HISCHIER, R., MARTIN, A. 1996: *Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Auflage No. 3, Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, www.energieforschung.ch, Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, CH.
- FRISCHKNECHT, R., BRAUNSCHWEIG, A., HOFSTETTER, P., SUTER, P. 2000: "Human Health Damages due to Ionising Radiation in Life Cycle Impact Assessment." In *Review Environmental Impact Assessment* Vol. 20 (2): 159-189.
- FRISCHKNECHT, R., HEIJUNGS, R., HOFSTETTER, P. 1998: "Einstein's lesson on energy accounting in LCA." In *Int. J. LCA* Vol. 3 (5): 266-272.
- FRISCHKNECHT, R. & JUNGBLUTH, N. 2000a: "Bewertung von "grünem Strom" mit Ökobilanzen." In *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* Vol. 50 (12): 922-925, www.et-energie-online.de.

- FRISCHKNECHT, R. & JUNGBLUTH, N. 2000b: *Globale Umweltkriterien für Ökostrom*. ESU-services im Auftrag des Vereins für umweltgerechte Elektrizität, Zürich, 28 Seiten, http://www.naturemade.org/common/texte/Stromlabel_7.2000.PDF, Uster.
- FRISCHKNECHT, R. & JUNGBLUTH, N. 2001a: *Ökobilanz von Strom aus Biogas von Kläranlagen: Festlegung der Systemgrenze für die Zertifizierung von Ökostrom gemäss naturemade star*. ESU-services im Auftrag von eam, Energie & Umwelt, Zürich, Uster.
- FRISCHKNECHT, R. & JUNGBLUTH, N. 2001b: *Qualitätsrichtlinien ECOINVENT 2000*. unveröffentlichtes Arbeitspapier No. 5.1, Zentrum für Ökoinventare im ETH-Bereich, Uster, CH.
- GOEDKOOP, M. 1995: *The Eco-indicator 95 - Weighting method for environmental effects that damage ecosystems or human health on a European scale*. Final Report Novem, rivm, Amersfoort.
- GOEDKOOP, M. & SPRIENSMA, R. 2000a: *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*. Methodology Report, 2nd revised ed. PRé Consultants, www.pre.nl/eco-indicator99/, Amersfoort, The Netherlands.
- GOEDKOOP, M. & SPRIENSMA, R. 2000b: *Methodology Annex: The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*. 2nd revised ed. PRé Consultants, www.pre.nl/eco-indicator99/, Amersfoort, The Netherlands.
- HASLER, P. & KASSER, U. 1994: *Rückstände aus der Altholzverbrennung*. DIANE 8: Energie aus Altholz und Altpapier, Bern.
- HASLER, P. & NUSSBAUMER, T. 1993: *Stofffluss bei der Verbrennung und Vergasung von Altholz*. DIANE 8: Energie aus Altholz und Altpapier, Bundesamt für Energie, Bern.
- HASLER, P. & NUSSBAUMER, T. 1994: *Dioxin- und Furanemissionen bei Altholzfeuerungen*. DIANE 8: Energie aus Altholz und Altpapier, Bundesamt für Energie, Bern.
- HASLER, P. & NUSSBAUMER, T. 1997: *Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse*. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- HASLER, P., NUSSBAUMER, T., JENNI, A. 2000: *Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen*. Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 81 Seiten, Bern.
- HELLWEG, S., BINDER, M., HUNGERBÜHLER, K. 1998: "Model for an environmental evaluation of waste treatment processes with the help of life cycle assessment." In SUNDERBERG, J., *Systems engineering models for waste management*. The Waste Research Council, Göteborg.
- HOFSTETTER, P. 1998: *Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere*. Kluwer Academic Publishers, ISBN/ISSN 0-7923-8377-X, 484 Seiten, Boston, Dordrecht, London.
- HOUGHTON, J. T., MEIRA-FILHO, L. G., CALLANDER, B. A., HARRIS, N., KATTENBERG, A., MASKELL, K. 1996: *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change*. LAKEMAN, J. A., Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- INFRAS 1992: *Externe Kosten der Wärme- und Energieversorgung*. Zürich.
- IPCC 1997: *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. I-III*. Intergovernmental Panel on Climate Change, WGI Technical Support Unit, Bracknell, UK.

- JUNGBLUTH, N. 2000: *Umweltfolgen des Nahrungsmittelkonsums: Beurteilung von Produktmerkmalen auf Grundlage einer modularen Ökobilanz*. Dissertation Nr. 13499, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, dissertation.de, 317 Seiten, www.jungbluth.de.vu, Berlin, D.
- JUNGBLUTH, N. & FRISCHKNECHT, R. 2000: *Eco-indicator 99 - Implementation: Assignment of Damage Factors to the Swiss LCI database "Ökoinventare von Energiesystemen"*. ESU-services, www.esu-services.ch, Uster.
- JUNGBLUTH, N. & FRISCHKNECHT, R. 2001: *Life Cycle Inventory for base oil and lubricants*. ESU-services, www.esu-services.ch, Uster.
- JUNGMEIER, G., CANELLA, L., SPITZER, J., STIGLBRUNNER, R. 1999: *Treibhausgasbilanz der Bioenergie: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus Bioenergie-Systemen und fossilen Energiesystemen*. Endbericht No. IEF-B-06/99, Joanneum Research, Inst. f. Energieforschung, Graz.
- JUNGMEIER, G., RESCH, G., SPITZER, J. 1998: "Environmental burdens over the entire life cycle of a biomass CHP plant." In *Biomass and Bioenergy* Vol. 15 (4/5): 311-323.
- KASSER, U. & PÖLL, M. 1999: *Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie*. Schriftenreihe Umwelt No. 307, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- KÖLLNER, T. 2001: *Land Use in Product Life Cycles and its Consequences for Ecosystem Quality*. Dissertation Nr. 2519, Difo-Druck GmbH, Bamberg, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), 237 Seiten, St. Gallen.
- LRV 2000: *Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV): (Stand am 28. März 2000)*. No. 814.318.142.1, Schweizerischer Bundesrat, www.admin.ch/ch/d/sr/c814_318_142_1.html.
- MAIBACH, M., PETER, D., SEILER, B. 1995: *Ökoinventar Transporte - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen*. Technischer Schlussbericht, Auftrag No. 5001-34730, ISBN 3-9520824-5-7, INFRAS, Zürich.
- MANN, M. K. & SPATH, P. L. 1997: *Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle Power System*. National Renewable Energy Laboratory Operated by Midwest Research Institute, www.eren.doe.gov/biopower/benefits/be_life_ca.htm, Cole Boulevard Golden, Colorado.
- MATTHEWS, R. W. & MORTIMER, N. D. 1999: "Estimation of Carbon Dioxide and Energy Budgets of Wood-fired Electricity Generation Systems in Britain." In ROBERTSON, K. A. & SCHLAMADINGER, B., *Workshop Bioenergy for mitigation of CO2 emissions the power, transportation and industrial sectors*. Pages: 59-78, Task 25: Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems, IEA Bioenergy, www.joanneum.ac.at/iea-bioenergy-task38/procchoi.htm, Gatlinburg, Tennessee, USA.
- MATTHEWS, R. W. & MORTIMER, N. D. 2000: *Estimation of Carbon Dioxide and Energy Budgets of Wood-fired Electricity Generation Systems in Britain*. ETSU No. B/U1/00601/05/REP, Forestry commission research agency and Sheffield Hallam University.

- MOHN, J. 2000: *Emissionen und Stoffflüsse von (Rest-)Holzfeuerungen: Messverfahren, Auswertung und Resultate*. Bericht No. 880'002/1, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik, <http://www.empa.ch/deutsch/fachber/abt134/download/downloads.htm>, Dübendorf.
- MÜLLER-WENK, R. 1978: *Die ökologische Buchhaltung: Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik*. Campus Verlag Frankfurt.
- MÜLLER-WENK, R. 1999: *Life-Cycle Impact Assessment of Road Transport Noise*. IWÖ - Diskussionsbeitrag No. 77, ISBN Nr. 3-906502-80-5, Hochschule St. Gallen, Switzerland.
- NATUREMADE 2000: *Grundsätze zur Zertifizierung mit naturemade star für Produzenten, Version 3.0*. Verein für Umweltgerechte Elektrizität (VUE), 25 Seiten, Zürich.
- NOGER, D., FELBER, H., PLETSCHER, E., HASLER, P. 1996: *Verwertung und Beseitigung von Holzaschen*. Schriftenreihe Umwelt No. 269, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- NUSSBAUMER, T. 1988: *Emissionen von Holzfeuerungen*. NF Projekt Nr. 4.971.0.86.12 Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- NUSSBAUMER, T. 1994: "Dioxinemissionen von Holzfeuerungen." In *HeizungKlima* Vol. 3: 83-87.
- NUSSBAUMER, T. 2001: "9.3 Abgasreinigung und -kondensation." In KALTSCHMITT, M. & HARTMANN, H., *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- NUSSBAUMER, T., HASLER, P., JENNI, A., ERNY, M., VOCK, W. 1994: *Emissionsarme Altholznutzung in 1 - 10 MW-Anlagen*. DIANE 8: Energie aus Altholz und Altpapier, Bern.
- ÖKO-INSTITUT 2000: *Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme GEMIS 4.01*. www.oeko.de/service/gemis/, Darmstadt.
- RAUCH, T. 1994: *Kapital Wald*. Trägerschaft Internationaler Tag des Waldes, Zürich.
- REMMERS, R. 20.10.2000: "25 MW Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL)." In NUSSBAUMER, T., *Luftreinhaltung, Haus-Systeme und Stromerzeugung, Tagungsband zum 6. Holzenergie-Symposium*. Bundesamt für Energie, ETH Zürich.
- RICHTER, K., KÜNNIGER, T., BRUNNER, K. 1996: *Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen verschiedener Rahmenmaterialien (ohne Verglasung)*. Studie im Auftrag der Schweizerischen Fachstelle für Fenster- und Fassadenbau SZFF EMPA Abteilung Holz, Dübendorf.
- VDI 1997: *Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation*. VDI-Richtlinien 4600, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- WEIBEL, T. & STRITZ, A. 1995: *Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen*. ESU-Reihe (Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt) No. 1/95, Zürich.
- ZIMMERMANN, P., DOKA, G., HUBER, F., LABHARDT, A., MÉNARD, M. 1996: *Ökoinventare von Entsorgungsprozessen. Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen*. ESU-Reihe No. 1/96, Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz.