

# 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](mailto:jungbluth@esu-services.ch)  
[www.esu-services.ch](http://www.esu-services.ch)

**Autoren:**

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

**Critical Review:**

Dr. Thomas Nussbaumer, Dr. Philipp 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](mailto:office@bfe.admin.ch) • [www.admin.ch/bfe](http://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](mailto:enet@temas.ch) · [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) · [www.energie-schweiz.ch](http://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  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  (plus Blei, Cadmium und Zink für Altholzfeuerungen), Jahresproduktion an Strom und genutzte Wärme, die Aschemenge und deren Entsorgungsweg.

Wärme- und Krafteinsparungsanlagen 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<sub>x</sub>. 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<sub>x</sub>, (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<sub>x</sub> 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

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ZUSAMMENFASSUNG</b>                                                                    | <b>I</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>                                                                           | <b>II</b> |
| <b>GLOSSAR</b>                                                                            | <b>V</b>  |
| <b>ABKÜRZUNGEN</b>                                                                        | <b>VI</b> |
| <b>DANKSAGUNG</b>                                                                         | <b>VI</b> |
| <b>1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</b>                                                       | <b>1</b>  |
| 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         |
| <b>2 SACHBILANZ</b>                                                                       | <b>6</b>  |
| 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        |
| <b>3 ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ</b>                                                         | <b>31</b> |
| 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        |
| <b>4 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE</b>                                                        | <b>34</b> |
| 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        |
| <b>5 KENNGRÖSSENMODELL FÜR DIE ZERTIFIZIERUNG</b>                                     | <b>47</b> |
| <b>6 DISKUSSION UND AUSBLICK</b>                                                      | <b>49</b> |
| 6.1 Diskussion und Unsicherheiten                                                     | 49        |
| 6.2 Empfehlungen                                                                      | 49        |
| 6.3 Ausblick                                                                          | 50        |
| <b>ABBILDUNGEN</b>                                                                    | <b>51</b> |
| <b>TABELLEN</b>                                                                       | <b>52</b> |
| <b>PHYSIKALISCHE PARAMETER VON HOLZ</b>                                               | <b>54</b> |
| Wassergehalt                                                                          | 54        |
| Holzdichte                                                                            | 55        |
| Heizwert                                                                              | 55        |
| Raum- und Gewichtsmasse                                                               | 56        |
| <b>ÖKOBILANZ BEWERTUNGSMETHODEN</b>                                                   | <b>57</b> |
| 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        |
| <b>LITERATUR</b>                                                                      | <b>66</b> |

## 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"><li>a.) Naturbelassenes, stückiges Holz.</li><li>b.) Naturbelassenes, nicht stückiges Holz, z.B. in Form von Hack-<br/>schnitteln.</li><li>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.</li></ul> <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 <sup>3</sup> | Schüttkubikmeter (auch Schnitzelkubikmeter). Raummass zur Bestimmung der Schnitzelmenge. Ein Sm <sup>3</sup> 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 <sup>mc</sup> | Ökobilanz Datenbank der Firma ESU-services                                                                  |
| E-1               | Exponentielle Schreibweise für Zahlen. Die Angabe 1.2E-2 wird z.B. als $1.2 \cdot 10^{-2} = 0.012$ 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 <sup>3</sup>   | Schüttkubikmeter (teilweise auch für Schnitzelkubikmeter genutzt)                                           |
| WKK               | Wärmelektrische Kopplung                                                                                    |

## 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 Altholz<sup>1</sup> nach den Kriterien für Ökostrom des Vereins für umweltgerechte Elektrizität (VUE)<sup>2</sup> 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:

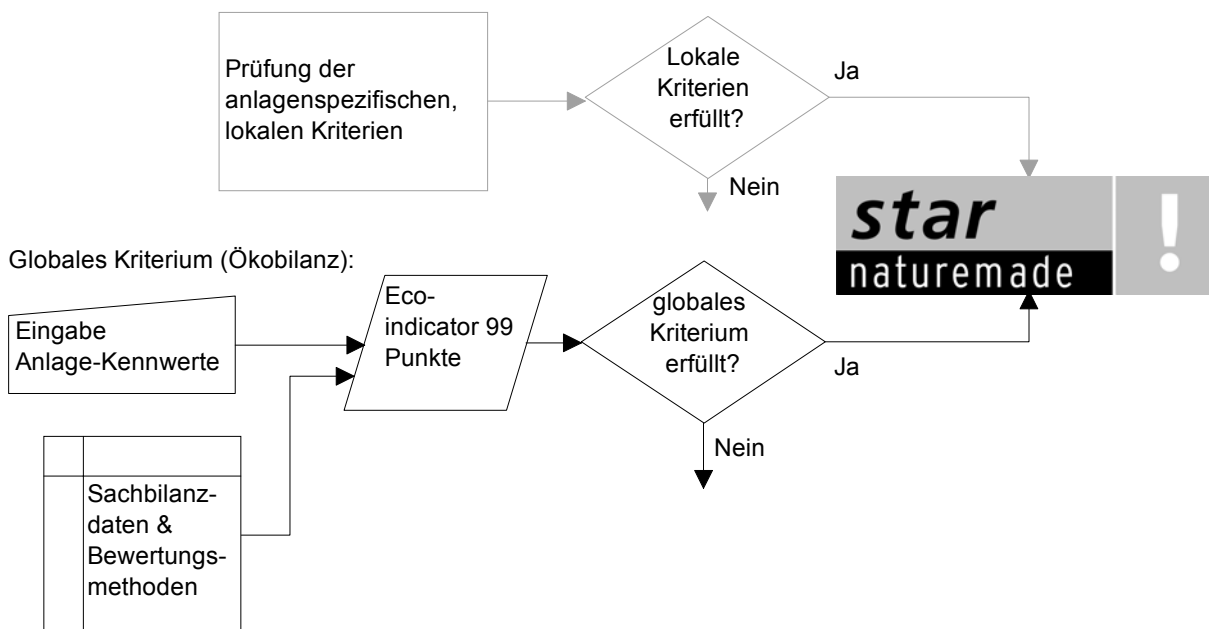


Fig. 1: Ablaufschema Vergabe des Qualitätszeichens *naturemade star*.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> [www.naturemade.org](http://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 Anlageile und der Gebäude.
- *Feuerung*, inkl. thermischem und elektrischem (Hilfs-)Energiebedarf, Emissionen in die Atmosphäre (limitierte Schadstoffe (insb. Staubpartikel, NO<sub>x</sub>, 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 Holzmengen, 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.

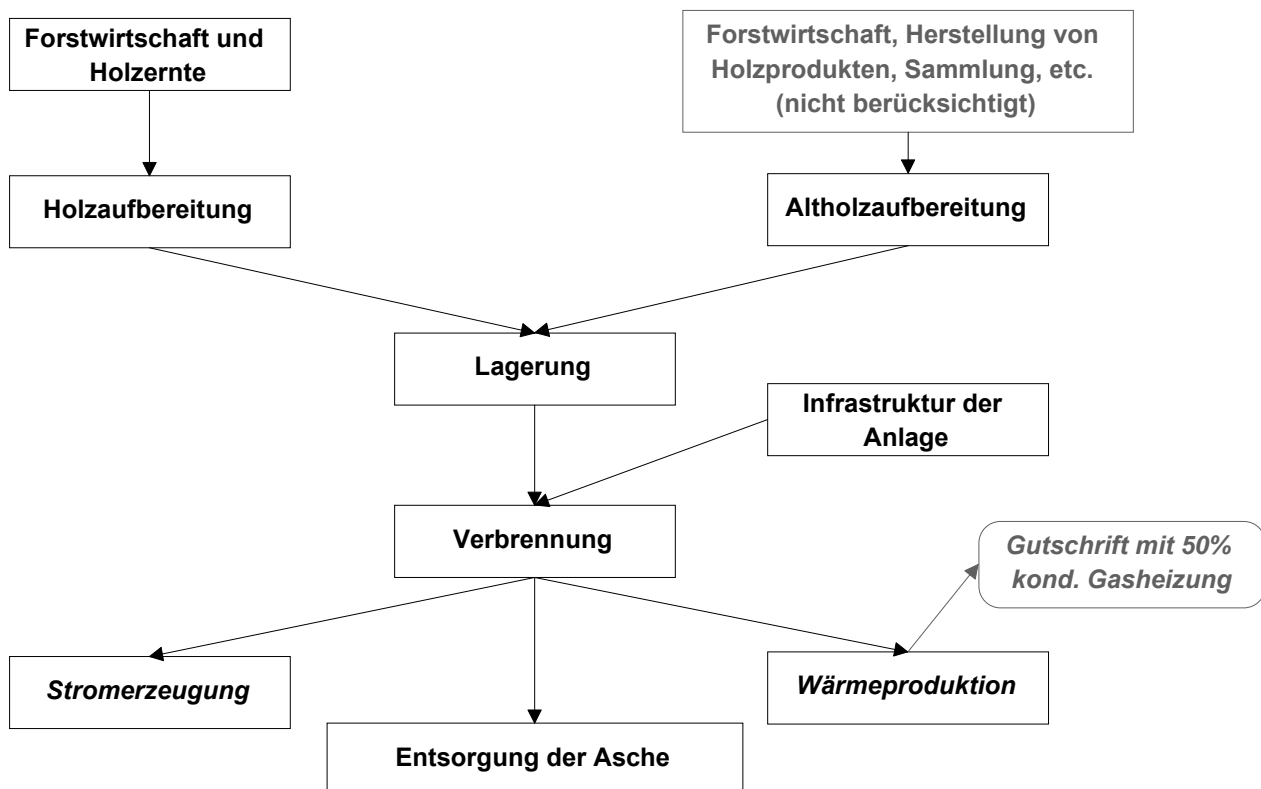


Fig. 2 Prozesse der Bilanzierung für die Bereitstellung von Strom und Wärme aus Holzbrennstoffen und Altholz.

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 Altholzentorgung erforderlich.

Die Märkte der Koppelprodukte Wärme und Altholzentorgung 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<sup>mc</sup>* 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<sup>mc</sup>* 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<sup>mc</sup>*.

|                   | Unit | Kuh | Gras   |
|-------------------|------|-----|--------|
|                   |      | 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<sup>mc</sup>*.

|                   | Unit | Kuh    | Gras     |
|-------------------|------|--------|----------|
|                   |      | 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. m<sup>3</sup> Holz produziert. Dies entspricht etwa 2Mio. Tonnen trockenem Holz (atro). Dabei könnte dem bestehenden Wald bei entsprechender Nachfrage auch 7.2Mio. m<sup>3</sup> 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 Funktionen<sup>3</sup>:

#### 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.

<sup>3</sup> Informationen des Bundesamtes für Statistik auf [http://www.statistik.admin.ch/stat\\_ch/ber07/dber07.htm](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<br>Eigenverbrauch | Neben-<br>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 .....   | <b>345 282 333</b> | 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.<sup>4</sup>

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 CO<sub>2</sub>-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.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Persönliche Auskunft von Christoph Rutschmann, Holzenergie Schweiz am 1.2.2002.

<sup>5</sup> 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](http://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 <sup>3</sup> | 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. m<sup>3</sup> oder 2Mio. Tonnen) gezeigt. Die zweite Zeile zeigt die Berechnung, wenn das Potential der Holznutzung (also 7.2Mio. m<sup>3</sup> 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 (m<sup>2</sup>a pro Tonne Holz atro).

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

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<br>Waldstrasse | Schwachholz               |                            | Waldrestholz | Nadelrundholz |
|------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|---------------|
|                        |                              | Buche frei<br>Waldstrasse | Fichte frei<br>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.<sup>6</sup>

Im Gegensatz zur Schnitzelherstellung wird das Holz beim Schreddern nicht mit Messern zerschnitten sondern mit stumpfen Werkzeugen zerhackt. Der Elektrizitätsverbrauch beträgt etwa 9kWh/Sm<sup>3</sup>.<sup>7</sup>

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.<sup>8</sup>

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 CO<sub>2</sub>-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.

<sup>6</sup> Telefonische Auskunft durch W. Riegger, IG Altholz.

<sup>7</sup> Telefonische Auskunft durch T. Barmettler, WSA Wertstoff-Sortier-Anlage.

<sup>8</sup> 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 Sm<sup>3</sup> (Schnitzelkubikmeter) Holzschnitzel angegeben.<sup>9</sup>

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

| Arbeitsschritt               | Dieserverbrauch (l Diesel/Sm <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|---------------------------------------------|
| 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 Sm<sup>3</sup> angegeben wurden, werden gemäss (FRISCHKNECHT *et al.* 1996:X-14) die Faktoren 4.18Sm<sup>3</sup>/t Holz atro (Buche) bzw. 5.92Sm<sup>3</sup>/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 <sup>mc</sup> |                                                  |      | Holzschnitzel, Altholz, frei Lager | Holzschnitzel Buche frei Lager | Holzschnitzel Fichte frei Lager | Holzschnitzel Saegerei frei Lager |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|                               |                                                  | Unit | t                                  | t                              | t                               | t                                 |
| <b>Energie</b>                | Strom Niederspannung - Bezug in CH               | TJ   | 1.69E-4                            |                                |                                 | 1.60E-4                           |
|                               | Strom Niederspannung - Bezug in UCPTE            | 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                         |                                   |
| <b>Materialien</b>            | 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                            |                                |                                 |                                   |
| <b>Transport</b>              | Transport LKW 40 t                               | tkm  | 0                                  |                                |                                 | 3.23E-4                           |
|                               | Transport Schiene                                | tkm  | 0                                  |                                |                                 | 3.11E-3                           |
| <b>Abfälle</b>                | Abfälle 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                            |                                |                                 |                                   |
| <b>Emission</b>               | Nutzung, Industrieareal > RI                     | m2a  | 4.22E-2                            |                                |                                 |                                   |
|                               | Abwärme in Luft p                                | TJ   | 1.69E-4                            |                                |                                 | 1.60E-4                           |
| <b>Quelle</b>                 |                                                  |      | Jost AG                            |                                | Frischknecht et al. 1996        |                                   |

<sup>9</sup> 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% O<sub>2</sub> im Abgasstrom (mit Bandbreite der angegebenen Messwerte in Klammern).

|                                    | <b>Waffenplatz<br/>Bière</b>                               | <b>Furnierwerk<br/>Lengwil</b>          | <b>Fernheizkraft-<br/>werk Meiringen</b> | <b>Holzkraftwerk Cuijk</b>                                                             |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 <sup>3</sup> /a) | 12000<br>(10000 – 14000)                                   | 20000                                   | 21800                                    | ca. 915000<br>(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 <sup>3</sup> )        | 219 (118-305)                                              | 89 (80-91)                              | 3                                        | 5.3                                                                                    |
| NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )          | 221                                                        | 174 (149-181)                           | 151                                      | 49.3                                                                                   |
| CO (mg/Nm <sup>3</sup> )           | 70                                                         | 14 (10-17)                              | 30                                       | n.a.                                                                                   |

#### 2.2.3.1 Anlage Waffenplatz Bière

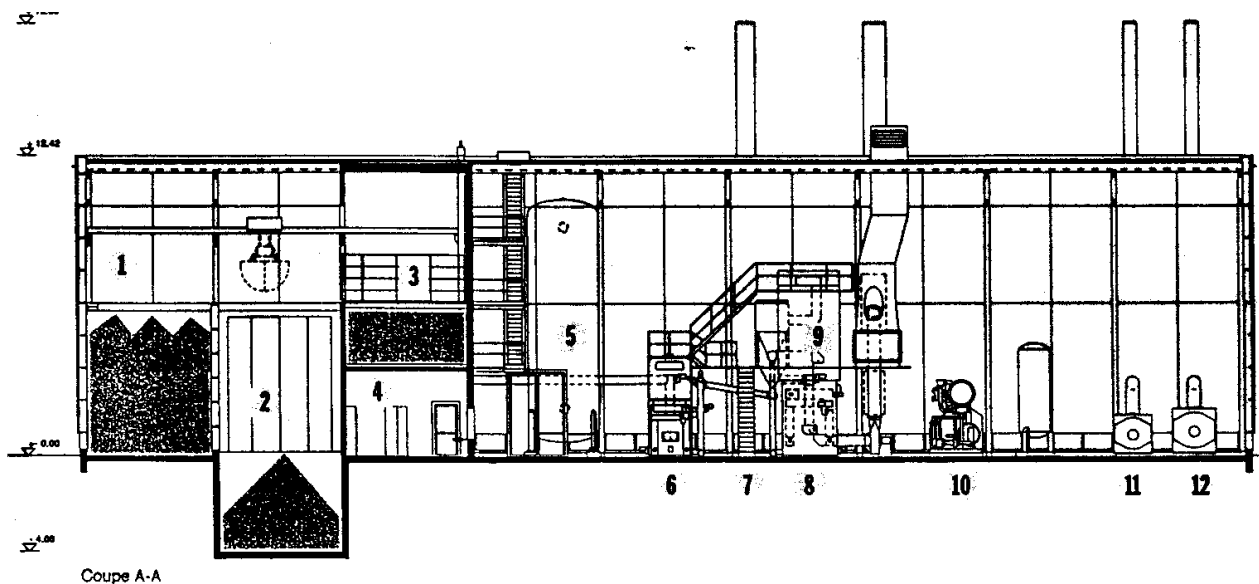
Die mit Biomasse betriebene Wärmekraftkopplungsanlage des Waffenplatzes Bière ist ein Demonstrationsprojekt für diese Technologie in der Schweiz. Fig. 3 zeigt einen Längsschnitt durch die Anlage. Die Sanierung der Heizzentrale wurde genutzt, um eine WKK-Holzenergienutzung mit einer Leistung von 3.2 MWth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

Pro Jahr werden 10000-14000Sm<sup>3</sup> Holzschnitzel verbrannt. Hier wird mit dem Mittelwert von 12000Sm<sup>3</sup> (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 ( $6000\text{Sm}^3$ ) mit einem Lkw zur etwa 1km entfernten Anlage gebracht und dort ins etwa  $800\text{m}^3$  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  $118\text{--}305\text{ mg/Nm}^3$ ,  $\text{CO}$   $70\text{mg/Nm}^3$ ,  $\text{NO}_x$   $221\text{mg/Nm}^3$  jeweils bezogen auf 11%  $\text{O}_2$  im trockenen Abgas. Die anfallende Asche und der Filterrückstand 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  $48\text{m} \times 15\text{m}$ ) 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.<sup>10</sup>



- |                                                |                                           |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 Holzschnitzel-Zwischenlager $800\text{ m}^3$ | 7 Automatische Ascheaustragung            |
| 2 Entladestation                               | 8 Holzschnitzelfeuerung (Thermoöl) 1,8 MW |
| 3 Schnitzelsilo $120\text{ m}^3$               | 9 Rauchgas-Rekuperator 460 kW             |
| 4 Fernwärmeverteilstation                      | 10 Turbogenerator 335 kWel                |
| 5 Technische Speicher 2mal $45\text{ m}^3$     | 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.

<sup>10</sup> 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 Holzschnitzel aus den Zugschnitten. 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 Konusaustragung. Das Brennmaterial aus den beiden Silos kann wahlweise gemischt werden. Der Transport in die Feuerung erfolgt über Kratzkettenförderer und Doppelstokerschnecken.

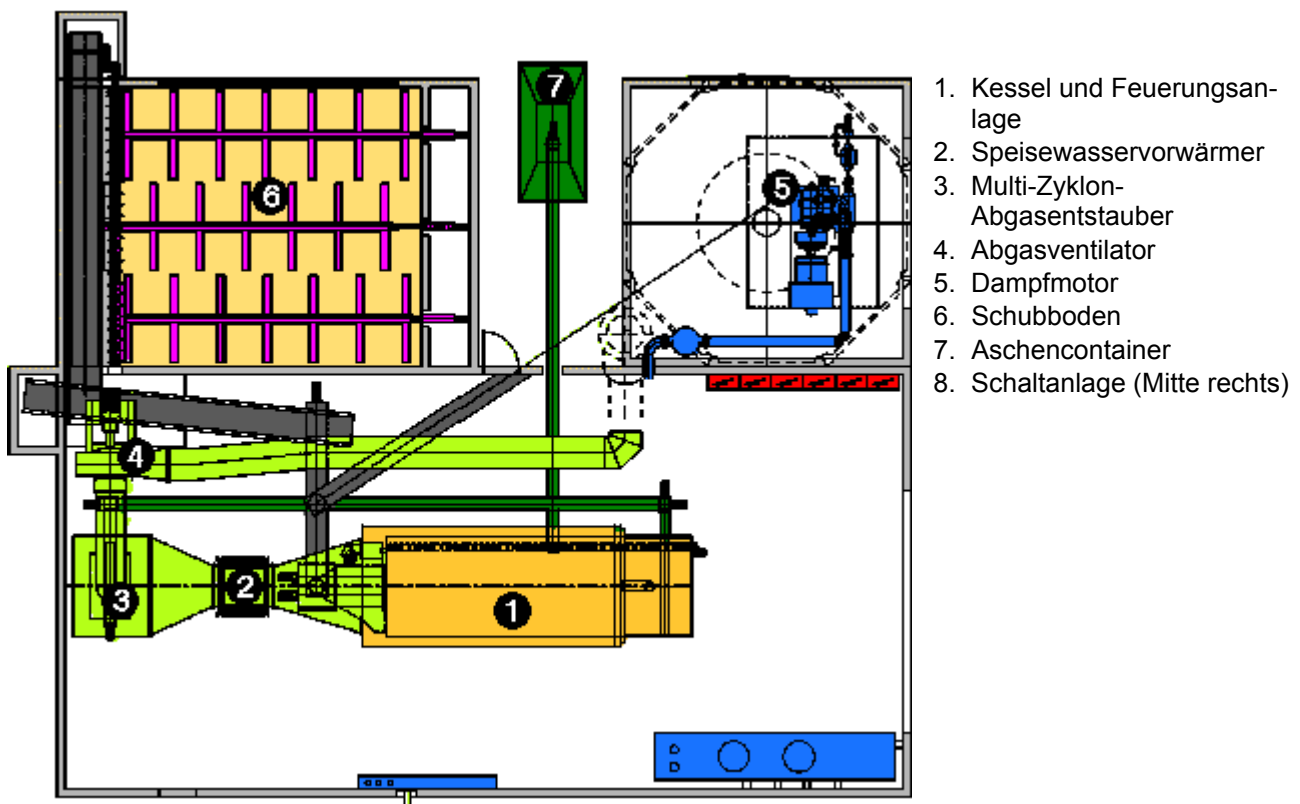


Fig. 6 Grundriss Heizzentrale Lengwil mit Rinden und Trockensilo.

### 2.2.3.2.2 Energieerzeugung

Installiert wurde eine Vorschubrostfeuerung mit gestufter Verbrennung und Low-NO<sub>x</sub>-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 Kühlturm, Abdampfkessel und Überhitzer und ist über dem Verbrennungsrost der Feuerung angeordnet. Nach dem Durchströmen des Kühlturmes 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 300Sm<sup>3</sup> 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<sub>x</sub>-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/Nm<sup>3</sup>, CO 10-17mg/Nm<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 149-181mg/Nm<sup>3</sup> bei 11% O<sub>2</sub> im Abgas. Für die Wasseraufbereitung werden verschiedene Chemikalien (Helamin und ein Herbizid) eingesetzt. Insgesamt werden vom Werk etwa 45tsd m<sup>3</sup> Wasser/a (nicht nur für die WKK-Anlage) verbraucht. Die Holzasche muss auf einer Reaktordeponie entsorgt werden.

Die anfallenden Aschen und Filtrerrückstände (etwa 100m<sup>3</sup>/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-

formationen<sup>11</sup> wurden vom Planer und Besitzer der Anlage, Schmid AG, Eschlikon, Herrn Stutz, zur Verfügung gestellt.

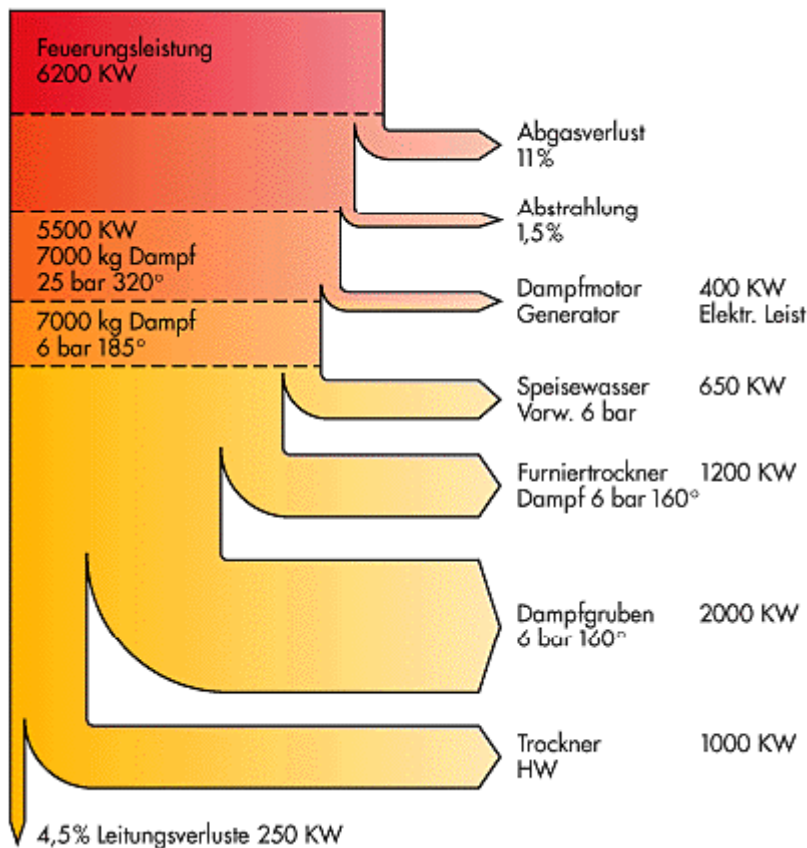


Fig. 7 Energieflussdiagramm der WKK-Anlage Lengwil.

### 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 21800Sm<sup>3</sup> 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

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

3mg/Nm<sup>3</sup>, CO 30 mg/Nm<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 151 mg/Nm<sup>3</sup> (bei 11% O<sub>2</sub> 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.

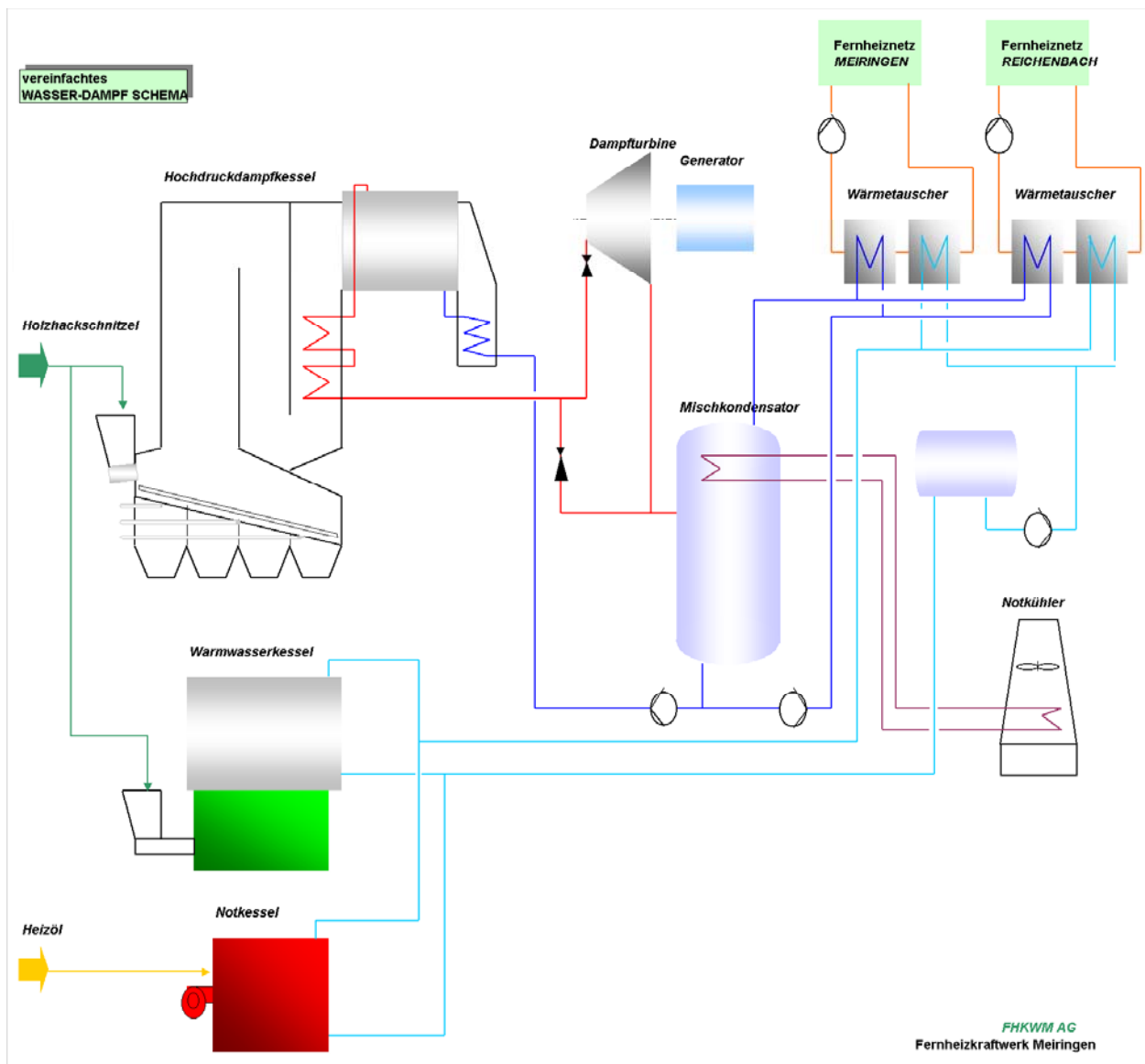


Fig. 8 Anlagenschema des Fernheizkraftwerkes Meiringen.

#### 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).<sup>12</sup> 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 1000m<sup>3</sup> NH<sub>3</sub> (25%ige Lösung) verbraucht.

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

|                                            | Grenzwert NL<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Messung (max.)<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Grenzwert NL<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Messung (max.)<br>mg/Nm <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
|                                            | bei 11% O <sub>2</sub>             |                                      | bei 6% O <sub>2</sub>              |                                      |
| 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 <sub>2</sub>                            | 167                                | 4.7                                  | 250                                | 7                                    |
| NO <sub>x</sub>                            | 66.7                               | 49.3                                 | 100                                | 74                                   |
| NH <sub>3</sub>                            | 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.

<sup>12</sup> 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<sub>x</sub>.

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.<sup>13</sup> Für die Berechnung der Luftemissionen werden die Messwerte auf einen Sauerstoffgehalt von 11% normiert. Bei der Verbrennung von trockenem Holz entstehen bei 11% O<sub>2</sub>-Gehalt 9600 Nm<sup>3</sup> 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-

---

<sup>13</sup> 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  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  ausser TCDD-Äquivalente in  $\text{fg}/\text{Nm}^3$  ( $10^{-15}\text{g}$  oder  $10^6\text{ng}$ ) bei 11%  $\text{O}_2$  im trockenen Abgas. Die Abkürzung „s“ steht in  $\text{eco}^{\text{mc}}$  für Emissionen aus stationären Quellen. Für  $\text{NO}_x$  ( $>2.5\text{kg NO}_x/\text{h}$ ), NMVOC (Anlage  $>1\text{MW}$ ) und Partikel (Anlage  $<5\text{MW}$ ) gelten die Grenzwerte nur unter bestimmten Bedingungen. Je nach Standort und Anlagengrösse sind strengere Grenzwerte möglich.

| Modul-Namen $\text{eco}^{\text{mc}}$             | Feuerung<br>Altholz min | Feuerung<br>Altholz<br>max | LRV-<br>Grenzwert<br>Altholz | Altholz-<br>Feuerung<br>Diese Studie | Feuerung<br>Holz min<br>Lit. | Feuerung<br>Holz max<br>Lit. | LRV-<br>Grenzwert<br>Holz | Holz-Feuerung<br>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                        |
| CH <sub>4</sub> Methan s                         |                         |                            |                              | 7.13                                 | 7.13                         | 100                          |                           | 7.13                          |
| CO Kohlenmonoxid s                               | 2                       | 386                        | 250                          | 100                                  | 2                            | 1860                         | 250                       | 100                           |
| CO <sub>2</sub> 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                          |
| N <sub>2</sub> O Lachgas s                       |                         | 71                         |                              | 4.5                                  | 1.0                          | 38                           |                           | 4.5                           |
| NH <sub>3</sub> 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                            |
| NO <sub>x</sub> Stickoxide als NO <sub>2</sub> 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                             |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> s            | 10                      | 100                        | 250                          | 20                                   | 2                            | 167                          | 250                       | 5                             |
| TCDD-Äquivalente                                 | 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  $\text{NO}_x$ -Emissionen sowie die erhöhten Ammoniak-Emissionen der Altholzfeuerung eingesetzt. Die Emissionen von  $\text{CO}_2$  werden direkt an Hand der verbrauchten Holzmenge berechnet ( $1.81 \text{ kg}/\text{kg Holz}$ ). Eine Korrektur für CO und  $\text{CH}_4$  Emissionen erfolgt nicht, da diese um Grössenordnungen geringer sind. Insgesamt gilt die Holzverbrennung damit als  $\text{CO}_2$ -neutral, da beim Holzwachstum die gleiche Menge  $\text{CO}_2$  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 & SPIENSMA 2000a). Für die Datenbank eco<sup>mc</sup> 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  $< 1 \mu\text{m}$  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 <sup>mc</sup> |                                                              | 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                                                                   |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Energie</b>                | Strom Mittelspannung - Bezug in CH Heizöl EL in Heizung 1 MW | TJ   |                              | 8.60E-3                      | 8.60E-3                                       |                             |                                 |                                       |                                                                               |
|                               |                                                              | TJ   |                              | 3.00E-4                      | 3.00E-4                                       |                             |                                 |                                       |                                                                               |
| <b>Materialien</b>            | 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                               |                                                                               |
|                               | Schnittholz Fichte saegerau                                  | m3   |                              |                              |                                               | 1.78E+2                     |                                 | 8.90E+1                               | Schätzung Verschalung und Teilweise Holzaufbau                                |
|                               | Fichtenplatte                                                | m3   |                              |                              |                                               | 4.50E+1                     |                                 | 2.25E+1                               | ohne CO2 Gutschrift                                                           |
|                               | Hartfaserplatte                                              | m3   |                              |                              |                                               | 7.00E+1                     |                                 | 3.50E+1                               | ohne CO2 Gutschrift                                                           |
|                               | Holzwohle                                                    | kg   |                              |                              |                                               | 2.49E+4                     |                                 | 1.25E+4                               | ohne CO2 Gutschrift                                                           |
|                               | Kupfer                                                       | kg   |                              | 3.20E+2                      | 3.20E+2                                       |                             |                                 | 0                                     |                                                                               |
|                               | Mineralwohle                                                 | 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                                     |                                                                               |
| <b>Transporte</b>             | Transport LKW 28 t                                           | tkm  |                              | 4.48E+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                      | 4.59E+4                                       | 1.26E+4                     | 3.48E+4                         | 2.37E+4                               |                                                                               |
| <b>Abfälle</b>                | 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                                     |                                                                               |
|                               | Mineralwohle in Inertstoffdeponie                            | kg   |                              | 9.00E+1                      | 9.00E+1                                       |                             |                                 | 0                                     |                                                                               |
| <b>Emissionen</b>             | Abwärme in Luft s                                            | TJ   | 0                            | 8.60E-3                      | 8.60E-3                                       | 0                           | 0                               | 0                                     |                                                                               |
|                               | CO2 Kohlendioxid p                                           | kg   | 0                            | 0                            | 0                                             | -2.49E+5                    | 0                               | -1.25E+5                              | Gutschrift für CO2-Aufnahme beim Holzwachstum der in m3 angegebenen Produkte. |

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 Kehrichtverbrennungsanlage. 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<br>% | Asche<br>Altholz<br>Mittelwert<br>% | Mittelwert<br>Rostasche<br>Altholz<br>ppm | Mittelwert<br>Zyklonasche<br>Altholz<br>ppm | Mittelwert<br>Filterasche<br>Altholz<br>ppm |
|------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O                         | 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                                    | <b>97%</b>      | <b>100%</b>                         | 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 | Altholz-asche<br>: in<br>Reaktordep.<br>0-150a<br>kg | Altholz-asche<br>00: in KVA<br>kg | Altholz-asche<br>Reststoffdep.<br>0-40a<br>kg | Altholz-asche<br>00: in KVA<br>Schlackeko<br>mp. 0-75a<br>kg | Holz-asche:<br>in<br>Reaktordep.<br>0-150a<br>kg | Holz-asche00<br>: in KVA<br>kg | Holz-asche00<br>Reststoffdep.<br>0-40a<br>kg | Holz-asche00<br>Schlackeko<br>mp. 0-75a<br>kg | LT<br>Altholz-asche<br>: in<br>Reaktordep.<br>>150a<br>kg | LT<br>Altholz-asche<br>00:<br>Reststoffdep.<br>>40a<br>kg | LT<br>Altholz-asche<br>00:<br>Schlackeko<br>mp. >75a<br>kg | LT<br>Holtz-asche:<br>in<br>Reaktordep.<br>>150a<br>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                                              |                                   |                                               |                                                              | 1.16E-8                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Chemikalien organisch                     | kg   | 1.01E-7                                              |                                   |                                               |                                                              | 8.13E-6                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Kalk (CaO)                                | kg   | 3.12E-6                                              |                                   |                                               |                                                              | 1.07E-2                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Transport LKW 16 t                        | tkm  | 1.03E-2                                              | 6.00E-2                           |                                               |                                                              | 1.81E-9                                          | 6.00E-2                        |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Heizöl EL in Heizung 10 kW                | TJ   | 1.60E-9                                              |                                   |                                               |                                                              |                                                  | 7.20E-8                        |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Nutzwärme ab Industriefeuerung EL, CH     | TJ   |                                                      | 7.20E-8                           |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Erdgas in Heizung Gebälasebr. <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                                             |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| NMOC 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                                              |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               | 4.01E-5                                                   |                                                           | 1.99E-5                                                    | 8.42E-8                                                |
| Ion Cadmium f                             | kg   | 1.28E-7                                              |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               | 2.44E-5                                                   |                                                           | 1.22E-5                                                    | 2.81E-6                                                |
| Ion Calcium f                             | kg   |                                                      |                                   | 2.64E-5                                       |                                                              |                                                  |                                | 2.64E-5                                      |                                               |                                                           | 4.25E-2                                                   | 9.67E-2                                                    |                                                        |
| Ion Chrom-III f                           | kg   |                                                      |                                   |                                               | 7.55E-8                                                      |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           | 1.88E-5                                                    |                                                        |
| Ion Eisen f                               | kg   | 3.10E-7                                              |                                   |                                               | 1.28E-7                                                      | 1.68E-7                                          |                                |                                              |                                               |                                                           | 1.61E-4                                                   | 7.75E-4                                                    | 8.32E-4                                                |
| Ion Kupfer f                              | kg   | 1.36E-6                                              |                                   |                                               | 4.87E-8                                                      | 1.44E-7                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           | 2.55E-4                                                    | 5.35E-5                                                |
| Ion Quecksilber f                         | kg   | 6.81E-10                                             |                                   |                                               | 1.70E-8                                                      | 6.56E-10                                         |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           | 1.39E-7                                                    | 2.97E-7                                                |
| Ion Zink f                                | kg   | 5.13E-5                                              |                                   |                                               | 8.26E-7                                                      | 1.31E-6                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           | 4.19E-3                                                    | 2.12E-4                                                |
| Nitrate f                                 | kg   | 2.26E-6                                              |                                   |                                               | 2.17E-5                                                      |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Nitrite f                                 | kg   | 2.34E-8                                              |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Phosphate f                               | kg   | 4.37E-5                                              |                                   |                                               |                                                              | 1.14E-4                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Phosphor Verb. f                          | kg   | 5.17E-7                                              |                                   |                                               |                                                              | 1.35E-6                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            | 3.34E-2                                                |
| Sulfate f                                 | kg   | 4.88E-4                                              |                                   |                                               | 4.78E-3                                                      | 7.28E-4                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| TOC f                                     | kg   | 7.06E-7                                              |                                   |                                               | 3.36E-5                                                      | 5.94E-7                                          |                                |                                              |                                               | 5.61E-3                                                   |                                                           | 5.31E-2                                                    | 6.53E-2                                                |
| C in Boden                                | kg   | 4.80E-7                                              |                                   |                                               |                                                              | 4.04E-7                                          |                                |                                              |                                               | 2.91E-5                                                   |                                                           | 5.61E-4                                                    | 9.90E-3                                                |
| 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                                          | 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                                              |                                   |                                               | 1.00E+0                                                      | 6.94E-5                                          |                                |                                              | 1.00E+0                                       |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Altholz-asche00: Schlackekomp. 0-75a      | kg   |                                                      | 1.00E+0                           |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| Holz-asche00: Schlackekomp. 0-75a         | kg   |                                                      |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Altholz-asche: in Reaktordep. >150a    | kg   | 1.00E+0                                              |                                   |                                               |                                                              |                                                  | 9.71E-1                        |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Altholz-asche00: Reststoffdep. >40a    | kg   |                                                      |                                   | 1.00E+0                                       |                                                              |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Altholz-asche00: Schlackekomp. >75a    | kg   |                                                      |                                   |                                               | 1.00E+0                                                      |                                                  |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Holz-asche: in Reaktordep. >150a       | kg   |                                                      |                                   |                                               |                                                              | 1.00E+0                                          |                                |                                              |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Holz-asche00: Reststoffdep. >40a       | kg   |                                                      |                                   |                                               |                                                              |                                                  |                                | 1.00E+0                                      |                                               |                                                           |                                                           |                                                            |                                                        |
| LT Holz-asche00: 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 Düngieranwendung (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 Holz- asche als Dünger auf landwirtschaftlich genutzten Böden und anderen Böden.

|                   | Modul-Namen eco <sup>mc</sup> | Unit | Entsorgung, Holz- asche, auf Industrieböden | Entsorgung, Holz- asche, auf Landwirtschaftsböden |
|-------------------|-------------------------------|------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                   |                               |      | kg                                          | kg                                                |
| <b>Gutschrift</b> | Anwendung K-Dünger            | kg   |                                             | -6.30E-2                                          |
|                   | Anwendung Mg-Dünger           | kg   |                                             | -2.55E-2                                          |
|                   | Anwendung P-Dünger            | kg   |                                             | -1.10E-2                                          |
| <b>Emissionen</b> | Al in Böden                   | kg   | 5.72E-3                                     |                                                   |
|                   | Al in Böden a                 | kg   |                                             | 5.72E-3                                           |
|                   | As in Böden                   | kg   | 5.10E-6                                     | -                                                 |
|                   | As in Böden a                 | kg   |                                             | 5.10E-6                                           |
|                   | C in Böden                    | kg   | 1.00E-2                                     | -                                                 |
|                   | C in Böden a                  | kg   |                                             | 1.00E-2                                           |
|                   | Ca in Böden                   | kg   | 3.30E-1                                     | -                                                 |
|                   | Ca in Böden a                 | kg   |                                             | 3.30E-1                                           |
|                   | Cd in Böden                   | kg   | 4.30E-6                                     | -                                                 |
|                   | Cd in Böden a                 | kg   |                                             | 4.30E-6                                           |
|                   | Co in Böden                   | kg   | 1.05E-5                                     | -                                                 |
|                   | Co in Böden a                 | kg   |                                             | 1.05E-5                                           |
|                   | Cr in Böden                   | kg   | 3.65E-5                                     | -                                                 |
|                   | Cr in Böden a                 | kg   |                                             | 3.65E-5                                           |
|                   | Cu in Böden                   | kg   | 1.20E-4                                     | -                                                 |
|                   | Cu in Böden a                 | kg   |                                             | 1.20E-4                                           |
|                   | F in Böden                    | kg   | 0                                           | -                                                 |
|                   | F in Böden a                  | kg   |                                             | -                                                 |
|                   | Fe in Böden                   | kg   | 1.20E-2                                     | -                                                 |
|                   | Fe in Böden a                 | kg   |                                             | 1.20E-2                                           |
|                   | Hg in Böden                   | kg   | 5.00E-7                                     | -                                                 |
|                   | Hg in Böden a                 | kg   |                                             | 5.00E-7                                           |
|                   | Mn in Böden                   | kg   | 7.95E-3                                     | -                                                 |
|                   | Mn in Böden a                 | kg   |                                             | 7.95E-3                                           |
|                   | Mo in Böden                   | kg   | 2.60E-6                                     | -                                                 |
|                   | Mo in Böden a                 | kg   |                                             | 2.60E-6                                           |
|                   | N in Böden                    | kg   | 0                                           | -                                                 |
|                   | N in Böden a                  | kg   |                                             | -                                                 |
|                   | Ni in Böden                   | kg   | 4.65E-5                                     | -                                                 |
|                   | Ni in Böden a                 | kg   |                                             | 4.65E-5                                           |
|                   | P in Böden                    | kg   | 1.10E-2                                     | -                                                 |
|                   | P in Böden a                  | kg   |                                             | 1.10E-2                                           |
|                   | Pb in Böden                   | kg   | 8.50E-6                                     | -                                                 |
|                   | Pb in Böden a                 | kg   |                                             | 8.50E-6                                           |
|                   | S in Böden                    | kg   | 2.20E-2                                     | -                                                 |
|                   | S in Böden a                  | kg   |                                             | 2.20E-2                                           |
|                   | Se in Böden                   | kg   | 6.00E-4                                     | -                                                 |
|                   | Se in Böden a                 | kg   |                                             | 6.00E-4                                           |
|                   | Sn in Böden                   | kg   | 0                                           | -                                                 |
|                   | Sn in Böden a                 | kg   |                                             | -                                                 |
|                   | Zn in Böden                   | kg   | 3.15E-4                                     | -                                                 |
|                   | Zn in Böden 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 Nm<sup>3</sup> 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% O<sub>2</sub> im Abgasstrom.

|                                                   | Holz WKK-Anlage,<br>mit Multi-Zyklon | Holz WKK-Anlage,<br>mit weitergehender<br>Abgasreinigung | Altholz WKK, mit<br>weitergehender<br>Abgasreinigung |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Holzverbrauch (Sm <sup>3</sup> /a)                | 15296                                | 15296                                                    | 15296                                                |
| Elektrische Leistung (kW <sub>el</sub> berechnet) | 110                                  | 107                                                      | 107                                                  |
| Thermische Leistung (kW <sub>th</sub> 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 <sup>3</sup> )                       | 121                                  | 10                                                       | 10                                                   |
| NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )             | 200                                  | 100                                                      | 100                                                  |
| CO (mg/Nm <sup>3</sup> )                          | 100                                  | 100                                                      | 100                                                  |
| Blei (mg/Nm <sup>3</sup> )                        | 0.049                                | 0.049                                                    | 2                                                    |
| Cadmium (mg/Nm <sup>3</sup> )                     | 0.0002                               | 0.0002                                                   | 0.069                                                |
| Zink (mg/Nm <sup>3</sup> )                        | 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 <sup>mc</sup>                       |      | Holz WKK<br>Meiringen | Holz WKK<br>Biere | Holz WKK<br>Lengwil | Holz<br>Kraftwerk<br>Cuijk,<br>Wirbelschicht<br>feuerung | Holz WKK-<br>Anlage, mit<br>Multi-<br>Zyklon | Holz WKK-Anlage,<br>mit weitergehender<br>Abgasreinigung | Altholz WKK, mit<br>weitergehender<br>Abgasreinigung | Bemerkung zur<br>Abschätzung der<br>Standardanlagen |                                  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|------|-----------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|
|                                  |                                                     | Unit | a                     | a                 | a                   | a                                                        | a                                            | a                                                        | a                                                    |                                                     |                                  |
| Strom                            | Strom Niederspannung - Bezug in CH                  | TJ   | 3.96E-1               |                   |                     |                                                          | 0                                            | 0                                                        | 0                                                    | kein Bezug bei WKK                                  |                                  |
| Infra-<br>struktur               | Infra Wärmekraftkopplungsanlage<br>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           |                     | 1.83E+5                                                  | 8.87E+2                                      | 8.87E+2                                                  |                                                      | Mittelwert                                          |                                  |
|                                  | Holzschnitzel Fichte frei Lager                     | t    | 1.80E+3               | 1.42E+3           | 8.60E+2             |                                                          | 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<br>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<br>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<br>Industrieboden        | kg   |                       | 3.50E+4           |                     |                                                          | -                                            | -                                                        | -                                                    |                                                     |                                  |
|                                  | Altholzasche: in Reaktordep. 0-150a                 | kg   |                       |                   |                     |                                                          |                                              |                                                          | 2.14E+5                                              | 7% vom Holz                                         |                                  |
| Ressourcen<br>Luft<br>Emissionen | Holzasche: in Reaktordep. 0-150a                    | kg   |                       |                   | 1.50E+5             | 1.10E+4                                                  | 4.59E+4                                      | 4.59E+4                                                  | -                                                    | 1.5% vom Holz                                       |                                  |
|                                  | Nutzung, Industriearéal > RI                        | m2a  | 3.60E+3               | 7.38E+2           | 1.60E+3             | 2.00E+4                                                  | 1.98E+3                                      | 1.98E+3                                                  | 1.98E+3                                              | Mittelwert                                          |                                  |
|                                  | Abwärme in Luft p                                   | TJ   | 3.96E-1               |                   | -                   | -                                                        | -                                            | -                                                        | -                                                    | Festsetzung für diese Studie                        |                                  |
|                                  | 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                                              |                                                     |                                  |
|                                  | Acetaldehyd s                                       | kg   |                       |                   |                     |                                                          | 3.45E+0                                      | 3.45E+0                                                  | 3.45E+0                                              |                                                     |                                  |
|                                  | 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                                              | aus Holzverbrauch berechnet                         |                                  |
|                                  | 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                                              |                                                     |                                  |
|                                  | 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                                              | Festsetzung für diese Studie                        |                                  |
|                                  | 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                        |                                  |
|                                  | NM VOC 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                                              | Festsetzung für diese Studie                        |                                  |
|                                  | 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                                                  |                                                      |                                                     |                                  |
| Gutschrift                       | Nutzwärme ab Heizung LowNOx<br>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 <sup>mc</sup>                               | 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 <sup>mc</sup> | Unit             | Betrieb, Holz WKK Meiringen | Betrieb, Holz WKK Bière | Betrieb, Holz WKK Lengwil | Betrieb, Holz Kraftwerk Cuijk, Wirbelschichtfeuerung | Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon | Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung | Betrieb, Altholz 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 <sup>2</sup> 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 Rohöl                   | 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 <sup>3</sup>  | 1790                        | 1130                    | 2320                      | 209000                                               | 1490                                       | 3760                                                        | 3350                                                    |
|                | Summe Wasser                  | kg               | 1590000000                  | 600000000               | 2270000000                | 4260000000                                           | 5780000000                                 | 5800000000                                                  | 2030000000                                              |
| Luftemissionen | Summe NH <sub>3</sub>         | kg               | 0.269                       | 0.244                   | 28.2                      | 10600                                                | 98.2                                       | 294                                                         | 294                                                     |
|                | Summe CH <sub>4</sub>         | kg               | 317                         | 192                     | 527                       | 17200                                                | 448                                        | 463                                                         | 358                                                     |
|                | Summe CO <sub>2</sub> 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 <sub>x</sub>         | kg               | 7380                        | 6130                    | 6340                      | 214000                                               | 7380                                       | 4450                                                        | 3450                                                    |
|                | Summe N <sub>2</sub> 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 Rn (inkl. Ra)           | kBq              | 89000000                    | 7350000                 | 123000000                 | 605000000                                            | 36200000                                   | 36600000                                                    | 108000000                                               |
|                | Summe SO <sub>x</sub>         | 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.

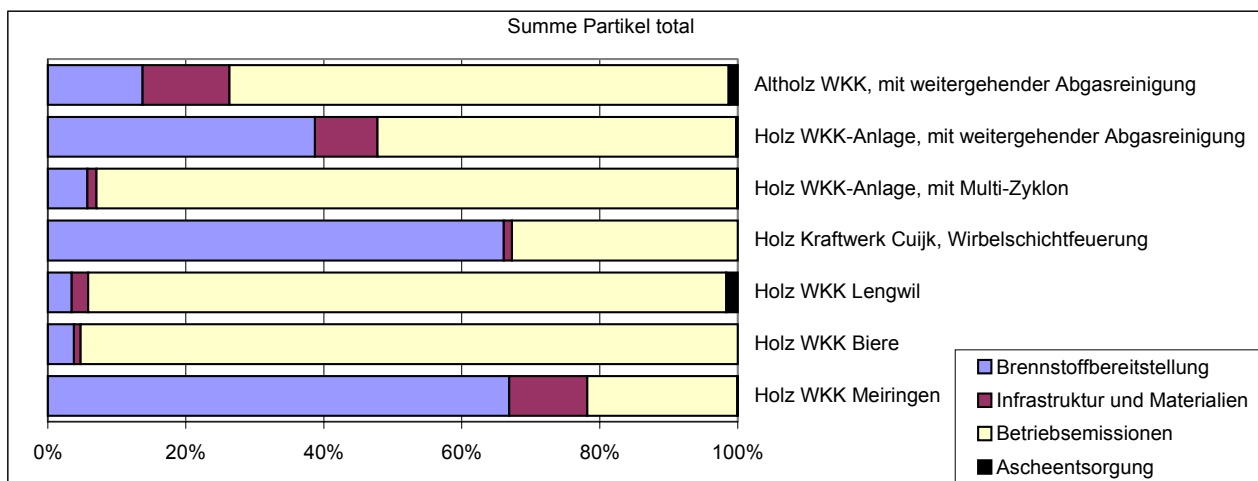


Fig. 9 Dominanzanalyse für die Emission von Partikeln beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

### 3.1.2 Stickoxidemissionen

Fig. 10 zeigt eine Dominanzanalyse für die Emission von  $\text{NO}_x$  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%.

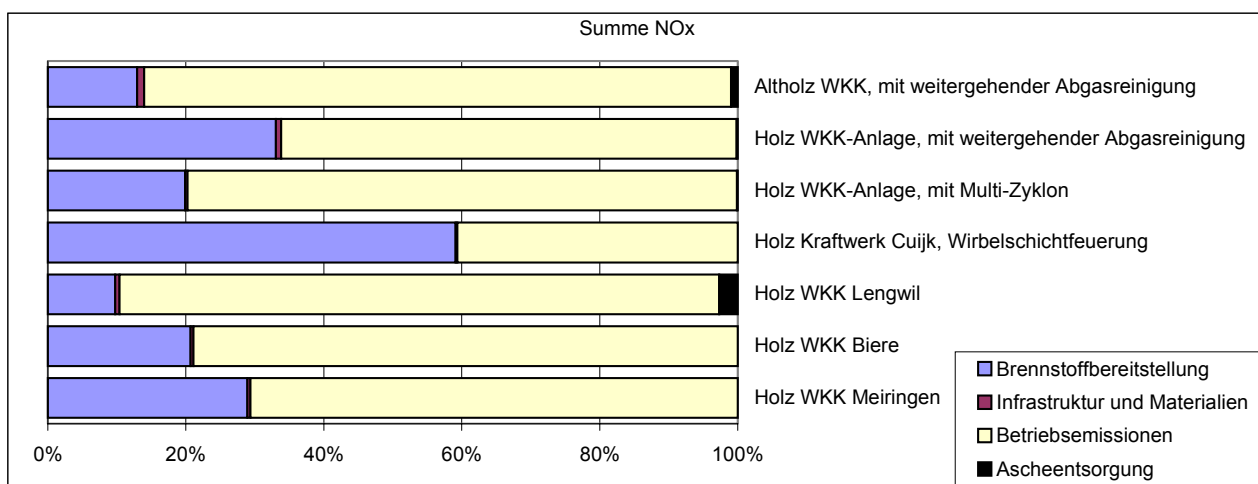


Fig. 10 Dominanzanalyse für die Emission von  $\text{NO}_x$  beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

### 3.1.3 Schwefeldioxidemissionen

Fig. 11 zeigt eine Dominanzanalyse für die Emission von  $\text{SO}_x$  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.

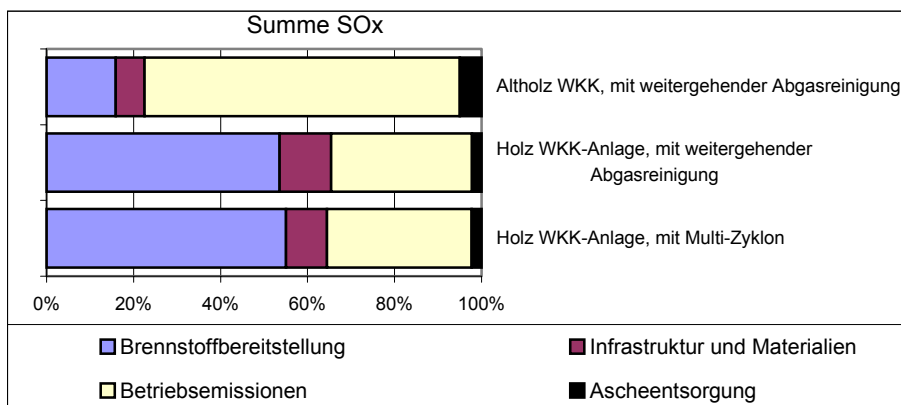


Fig. 11 Dominanzanalyse für die Emission von SO<sub>x</sub> beim Betrieb der drei Standardanlagen.

### 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 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und radioaktiven Substanzen. Die Emissionen von Partikeln, NO<sub>x</sub> 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 <sup>mc</sup> |                              | 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 |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                               | Unit                         | a                                                | a                                            | a                                              | a                                                               | a                                                                                | a                                                                            |
| Ressourcen                    | Summe Holz trocken           | t                                                | 3960                                         | 2510                                           | 3400                                                            | 3280                                                                             | 3060                                                                         |
|                               | Summe Flächeninanspruchnahme | m <sup>2</sup> a                                 | 1070000                                      | 672000                                         | 245000                                                          | 660000                                                                           | -187000                                                                      |
|                               | Summe Rohbraunkohle          | kg                                               | 515                                          | -371                                           | 893                                                             | 119                                                                              | -428                                                                         |
|                               | Summe Rohfördersteinkohle    | kg                                               | -4250                                        | -4150                                          | 230                                                             | -4760                                                                            | -6370                                                                        |
|                               | Summe Rohöl                  | t                                                | 32.4                                         | 15.1                                           | 8.27                                                            | 17                                                                               | -6.06                                                                        |
|                               | Summe Uran                   | kg                                               | -0.142                                       | -1.18                                          | 0.34                                                            | -0.994                                                                           | 0.319                                                                        |
|                               | Summe Erdgas                 | Nm <sup>3</sup>                                  | -696000                                      | -518000                                        | -748000                                                         | -654000                                                                          | -652000                                                                      |
|                               | Summe Wasser                 | kg                                               | -187000000                                   | -126000000                                     | 366000000                                                       | -109000000                                                                       | 358000000                                                                    |
| Luftemissionen                | Summe NH <sub>3</sub>        | kg                                               | -0.107                                       | -0.036                                         | 27.8                                                            | 97.8                                                                             | 294                                                                          |
|                               | Summe CH <sub>4</sub>        | kg                                               | -8660                                        | -6490                                          | -9120                                                           | -7990                                                                            | -7970                                                                        |
|                               | Summe CO <sub>2</sub> total  | kg                                               | -1250000                                     | -956000                                        | -1420000                                                        | -1210000                                                                         | -1280000                                                                     |
|                               | Summe CO total               | kg                                               | 1080                                         | 1450                                           | 668                                                             | 2700                                                                             | 2120                                                                         |
|                               | Summe HCl                    | kg                                               | 0.246                                        | -0.407                                         | 0.927                                                           | 10.6                                                                             | 197                                                                          |
|                               | Summe Hg                     | kg                                               | -0.00789                                     | -0.00598                                       | -0.00179                                                        | 0.00913                                                                          | 0.00918                                                                      |
|                               | Summe NMVOC                  | kg                                               | -363                                         | -406                                           | -899                                                            | 41.6                                                                             | -375                                                                         |
|                               | Summe NO <sub>x</sub>        | kg                                               | 6280                                         | 5310                                           | 5150                                                            | 6340                                                                             | 2410                                                                         |
|                               | Summe N <sub>2</sub> O total | kg                                               | -5.43                                        | -7.82                                          | -9.32                                                           | 124                                                                              | 123                                                                          |
|                               | Summe Partikel total         | kg                                               | 348                                          | 5100                                           | 2910                                                            | 3700                                                                             | 446                                                                          |
|                               | Summe Rn (inkl. Ra)          | kBq                                              | -7830000                                     | -64700000                                      | 18700000                                                        | -54700000                                                                        | 17500000                                                                     |
| Wasser                        | Summe SO <sub>x</sub>        | kg                                               | -335                                         | -318                                           | -294                                                            | -239                                                                             | 131                                                                          |
|                               | Summe CSB                    | kg                                               | -63.9                                        | -217                                           | 4570                                                            | 1050                                                                             | 6710                                                                         |
|                               | Summe Ra                     | kBq                                              | -2230                                        | -21700                                         | 6460                                                            | -18300                                                                           | 5890                                                                         |
|                               | Summe Zink                   | kg                                               | -0.0388                                      | -0.0427                                        | 34.6                                                            | 9.72                                                                             | 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen sind vor allem auf Unterschiede bei den Aufwendungen für die Holzbereitstellung begründet. Von (MATTHEWS & MORTIMER 2000) wurden Emissionsfaktoren zwischen 69g bis 74g CO<sub>2</sub> pro kWh Strom für die Holzverstromung berechnet. Die hier berechneten Emissionsfaktoren sind mit 20-42g CO<sub>2</sub>/kWh Strom deutlich niedriger.

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

|                               |                              | Strom                                      |                                                             |                                                         | Wärme                                      |                                                             |                                                         |             |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|
| Modul-Namen eco <sup>mc</sup> |                              | 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 |             |
|                               | Unit                         | kWh                                        | kWh                                                         | kWh                                                     | MJ                                         | MJ                                                          | MJ                                                      |             |
| Ressourcen                    | Summe Holz trocken           | t                                          | 0.000904                                                    | 0.000911                                                | 0.000849                                   | 0.00000536                                                  | 0.00000618                                              | 0.00000576  |
|                               | Summe Flaecheinanspruchnahme | m <sup>2</sup> a                           | 0.191                                                       | 0.193                                                   | 0.00428                                    | 0.00113                                                     | 0.00131                                                 | 0.000291    |
|                               | 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 Rohöl                  | 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 <sup>3</sup>                            | 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 NH3                    | kg                                         | 0.000027                                                    | 0.0000816                                               | 0.0000816                                  | 0.00000016                                                  | 0.000000554                                             | 0.000000554 |
|                               | Summe CH4                    | kg                                         | 0.000123                                                    | 0.000128                                                | 0.0000993                                  | 0.000000731                                                 | 0.000000871                                             | 0.000000674 |
|                               | Summe CO2 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 N2O 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 SOx                    | 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  |
| 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, JUNGBLUTH 2000) und 99 (GOEDKOOP & SPRIENSMA 2000a, JUNGBLUTH & 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<br>Buche frei Lager | Holzschnitzel<br>Fichte frei Lager | Holzschnitzel<br>Saegerei frei Lager | Holzschnitzel,<br>Altholz, frei Lager |
|---------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Modul-Namen eco <sup>mc</sup>                     | 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 Flächenninanspruchnahme                     | 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 CO<sub>2</sub> emittiert wurden. Der Vergleichswert in der genannten Untersuchung beträgt für eine 5MWel Anlage 6600 t CO<sub>2</sub>. 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<br>Wärmekraftkopplungs-<br>anlage 5MW, Holz | Infra<br>Kraftwerksgebäude<br>20tsd. m3 |
|---------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Modul-Namen eco <sup>mc</sup>                     | 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 <sup>mc</sup>                     |                            | Betrieb, Holz WKK Meiringen | Betrieb, Holz WKK Biere | Betrieb, Holz WKK Lengwil | Betrieb, Holz Kraftwerk Cuijk, Wirbelschichtfeuerung | Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon | Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung | Betrieb, Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                                   | Unit                       | 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 CO <sub>2</sub> -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                   | 109000000               | 454000000                 | 2880000000                                           | 210000000                                  | 156000000                                                   | 334000000                                               |
| 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 <sup>mc</sup>                     |                            | 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 |
|---------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                                   | Unit                       | 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 CO <sub>2</sub> -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                                    | 393000000                                      | 156000000                                                       | 102000000                                                                        | 281000000                                                                    |
| 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 <sup>mc</sup>                     | Unit                       | Entsorgung, Holzasche, auf | Entsorgung, Holzasche, auf | Holzasche: in      | Altholzasche: in   | Abfälle in        |
|---------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|                                                   |                            | Industrieböden             | Landwirtschaftsböden       | 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 CO <sub>2</sub> -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            | 0.00000353        |

## 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<sub>x</sub> und Partikeln für den Hauptteil der Umweltbelastungen von Bedeutung. Zusätzlich ist die Emission von (biogenem) CO<sub>2</sub> aus der Holzverbrennung eine sehr wichtige Grösse. Diese wird im folgenden aber nicht weiter diskutiert, da sie direkt vom Holzinput und damit der CO<sub>2</sub>-Bindung beim Holzwachstum abhängig ist und nicht durch die Anlagen beeinflusst wird. In der Gesamtbewertung wird der biogene CO<sub>2</sub>-Kreislauf somit als klimaneutral eingestuft.

Im Fall der Altholzfeuerung sind zusätzlich die Emissionen von Zink, Blei und Cadmium relevant. Alle Luftemissionen zusammen (ohne CO<sub>2</sub>) 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<sub>x</sub>) 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 CO<sub>2</sub> (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 CO<sub>2</sub> und anderen Schadstoffen sind für den Grossteil der gesamten Umweltbelastungen verantwortlich. Infrastruktur und Entsorgung haben insgesamt eher einen geringen Anteil an den Umweltbelastungen.

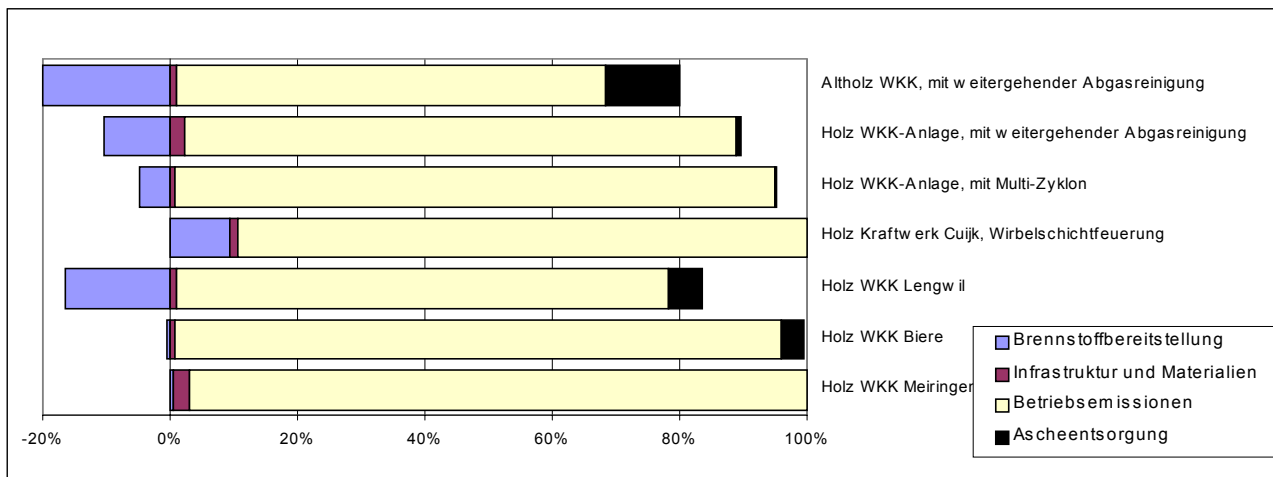


Fig. 12 Dominanzanalyse für die mit dem Eco-indicator 99 (H) bewerteten Umweltbelastungen bezogen auf 1 Jahr Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.

Bei der Bewertung mit Umweltbelastungspunkten ist die Entsorgung der Asche in jedem Fall relevant (neben den bereits genannten Faktoren). Die Entsorgung der Holzasche 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  $\text{NO}_x$  verursacht. Eine weitere wichtige Kategorie ist die Landnutzung und hier insbesondere die genutzte Waldfläche.

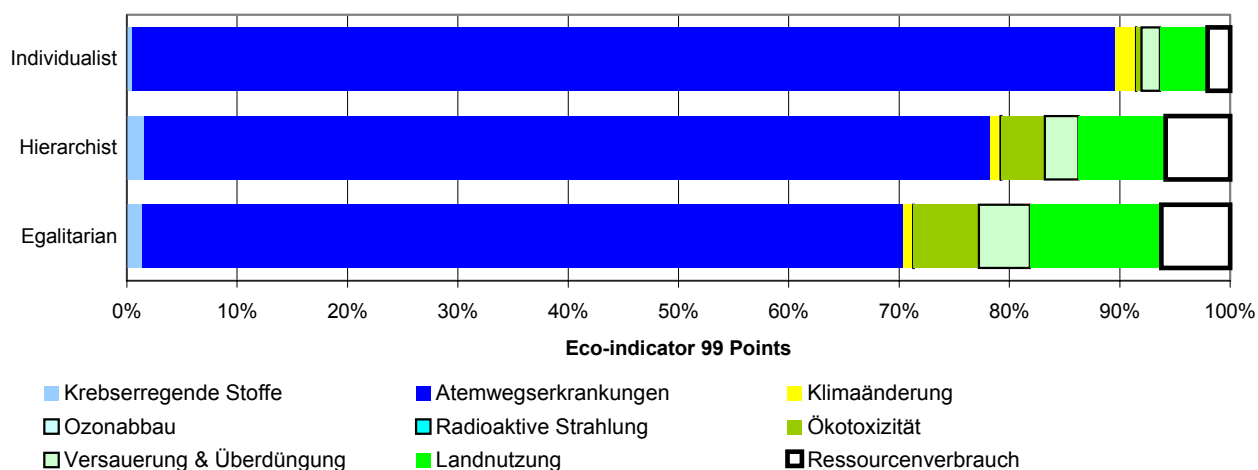
**Betrieb, Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon**

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.

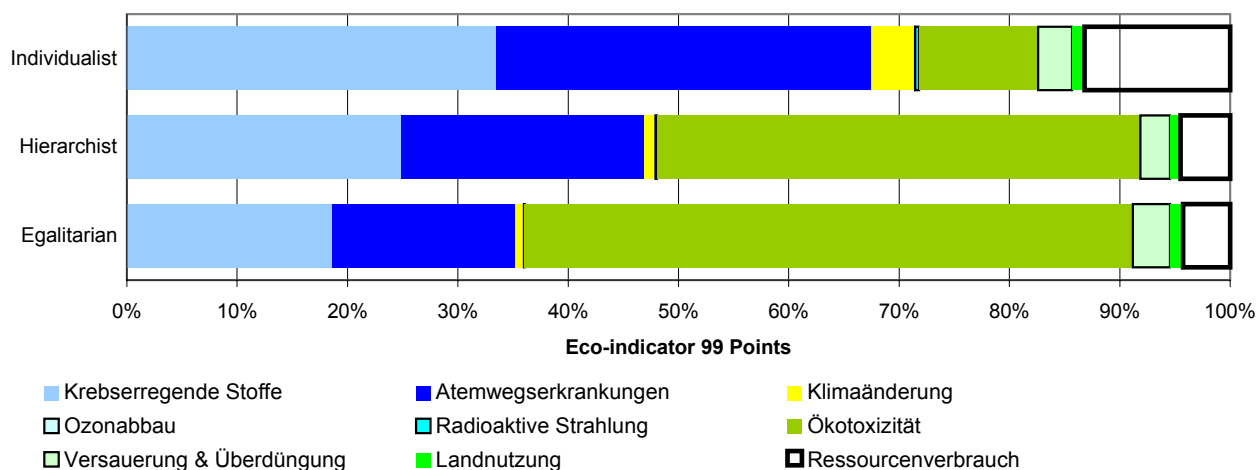
**Betrieb, Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung**

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

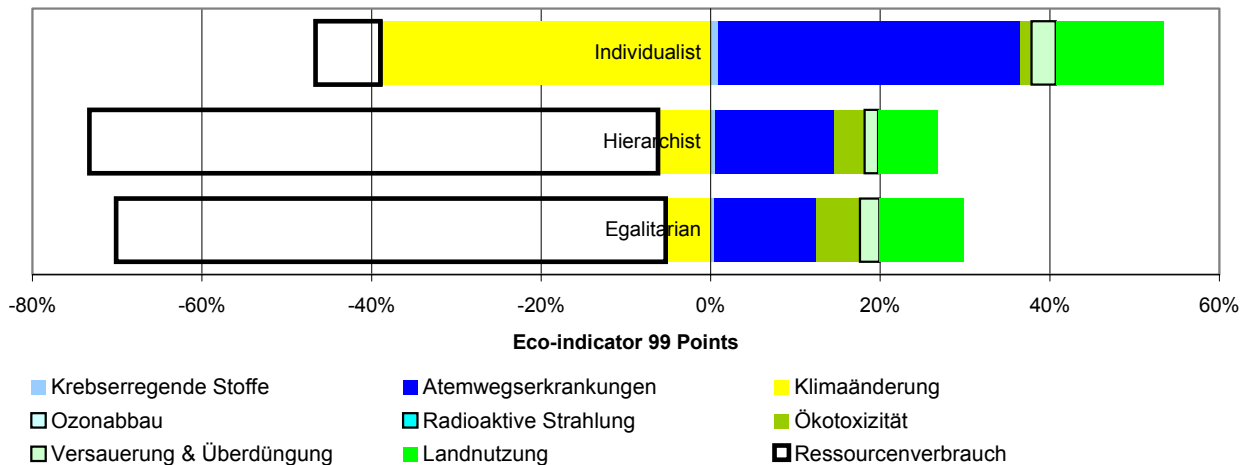


Fig. 15 Anteil der neun Schadenskategorien bei der Bewertung der Umweltbelastungen mit dem Eco-indicator 99 für 1 Jahr Betrieb einer Holz WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung unter Berücksichtigung der Wärmegutschrift.

## 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  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  (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. Nm<sup>3</sup> Abgas.

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

| EI'99-aggregated,<br>Hierarchist   | Holz WKK<br>Meiringen | Holz WKK<br>Bière | Holz WKK<br>Lengwil | Holz<br>Kraftwerk<br>Cuijk,<br>Wirbelschicht<br>feuerung | Holz WKK-<br>Anlage, mit<br>Multi-Zyklon | Holz WKK-<br>Anlage, mit<br>weitergehender<br>Abgasreinigung | Altholz WKK,<br>mit<br>weitergehender<br>Abgasreinigung | Holz WKK Lengwil<br>plus<br>Zusatzemissionen<br>, 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)<br>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 Bière 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<sub>x</sub> 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.

| El'99-aggregated,<br>Hierarchist   | Feuerung<br>Altholz min | Feuerung<br>Altholz max | LRV-<br>Grenzwert<br>Altholz | Feuerung<br>Holz min Lit. | Feuerung<br>Holz max<br>Lit. | LRV-<br>Grenzwert<br>Holz |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 Jahr Betrieb                     | 3.55E+4                 | 6.35E+5                 | 1.39E+5                      | 3.54E+4                   | 8.58E+5                      | 1.38E+5                   |
| Strom (Abz. Gasheizung)<br>pro kWh | -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/Nm<sup>3</sup> (bei 11% O<sub>2</sub> 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/Nm<sup>3</sup> steigen unter der Annahme, dass andere Emissionen und der Gesamtwirkungsgrad unverändert bleiben.

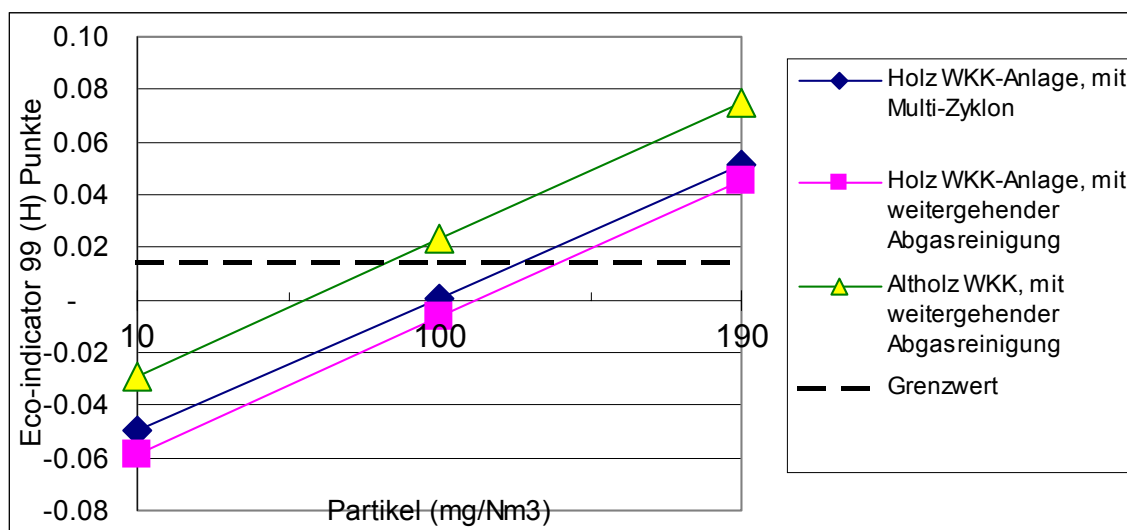


Fig. 16 Einfluss der Partikelemissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.

Fig. 17 zeigt den Einfluss der NO<sub>x</sub> Emissionen auf das Ergebnis für die Standardanlagen. Anlagen mit Multi-Zyklon erreichen den Grenzwert unter sonst unveränderten Randbedingungen, wenn der NO<sub>x</sub> Ausstoss unter dem Wert von 240mg/Nm<sup>3</sup> (bei 11% O<sub>2</sub> im Abgas) liegt. Für Anlagen mit weitergehender Rauchgasreinigung (also insbesondere Staubreduktion) könnte die NO<sub>x</sub> Emission theoretisch bis auf über 500mg/Nm<sup>3</sup> steigen ohne das Erreichen des Labels zu gefährden.

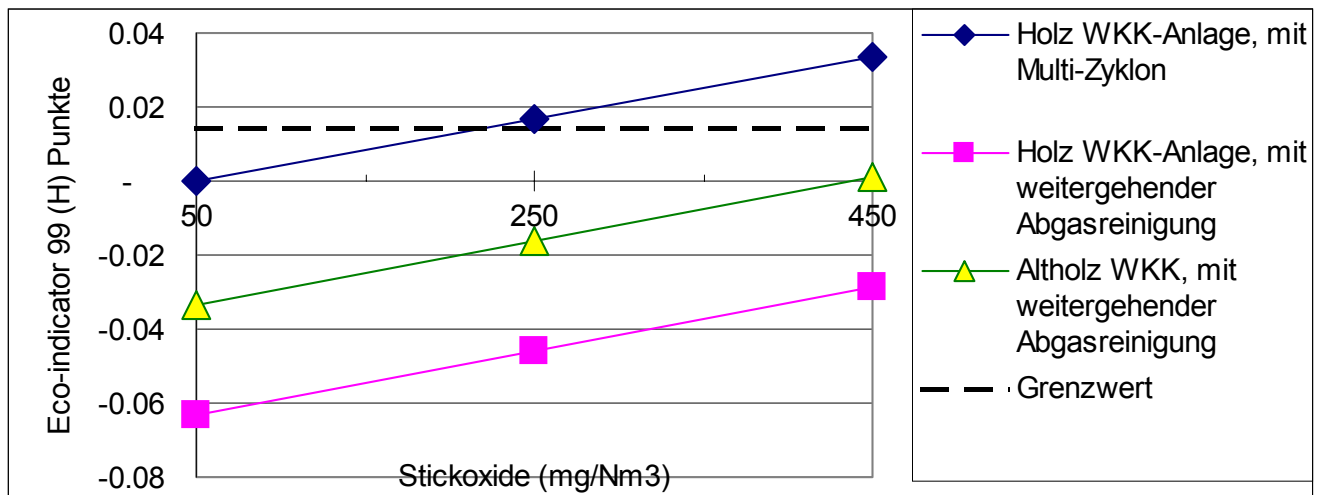


Fig. 17 Einfluss der NO<sub>x</sub> Emissionen auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen.

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.

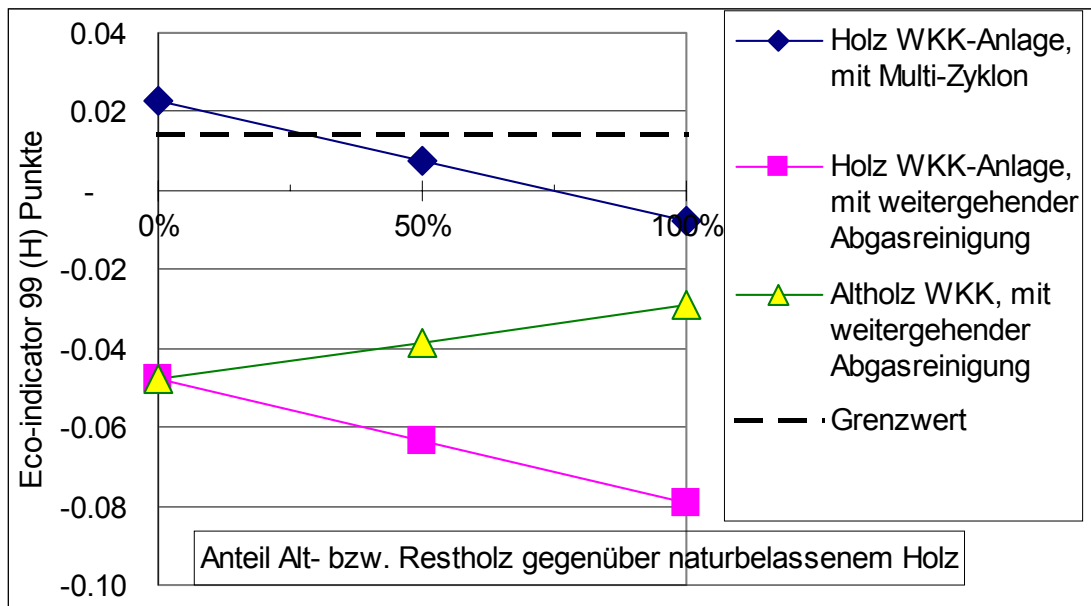


Fig. 18 Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf das Ergebnis der drei Standardanlagen. Gezeigt wird die Umweltbelastung in Eco-indicator 99 (H) Punkten pro kWh Strom.

#### 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.

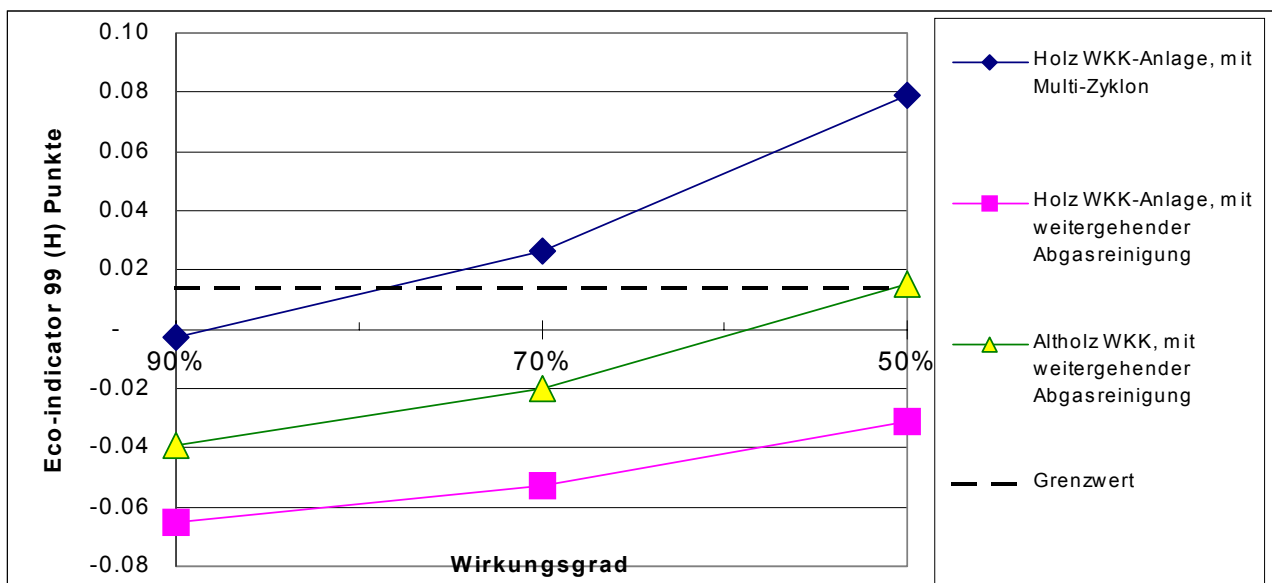


Fig. 19 Einfluss des Gesamtwirkungsgrades auf das Gesamtergebnis der drei Standardanlagen. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom.

#### 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.

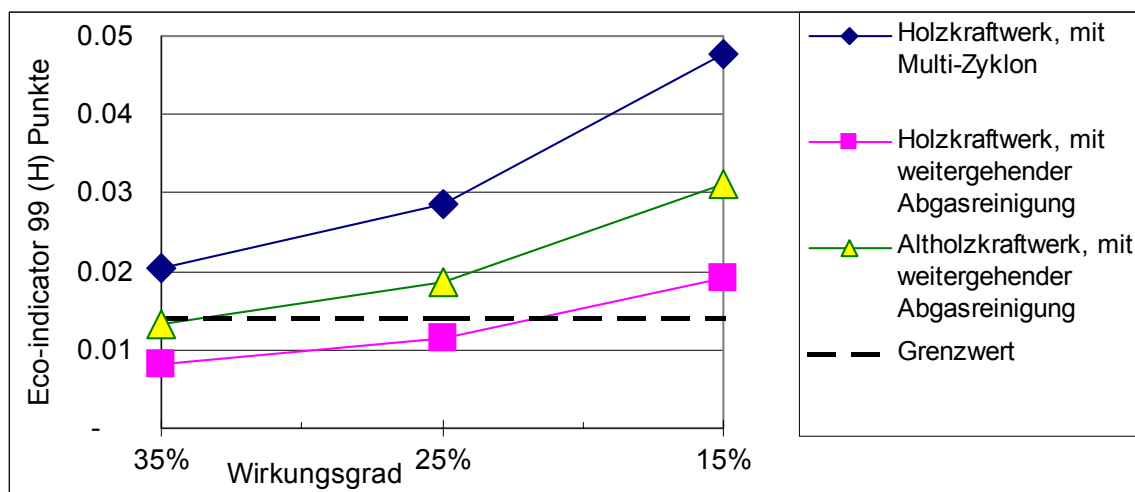


Fig. 20 Einfluss des Stromwirkungsgrades. Eco-indicator 99 (H) Punkte pro kWh Strom für die Standardanlagen bei ausschliesslicher Stromproduktion.

#### 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 CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub> bzw. zu N<sub>2</sub>O 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 <sup>mc</sup>                     | Unit                       | Strom, ab Holz              | Strom, ab Holz WKK                       | Strom, ab Altholz                     | Wärme, ab Holz              | Wärme, ab Holz                               | Wärme, ab Altholz                     |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                   |                            | WKK-Anlage mit Multi-Zyklon | Anlage mit weitergehender Abgasreinigung | WKK mit weitergehender Abgasreinigung | WKK-Anlage mit Multi-Zyklon | WKK-Anlage mit weitergehender Abgasreinigung | 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 CO <sub>2</sub> -equiv. | 0.0555                      | 0.0579                                   | 0.0355                                | 0.000329                    | 0.000393                                     | 0.000241                              |
| EI99-aggregated, Egalitarian                      | EI99-points                | 0.0256                      | 0.0119                                   | 0.0202                                | 0.000152                    | 0.0000806                                    | 0.000137                              |
| EI99-aggregated, Hierarchist                      | EI99-points                | 0.0309                      | 0.0126                                   | 0.0203                                | 0.000183                    | 0.0000855                                    | 0.000138                              |
| EI99-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 – Sm<sup>3</sup>) 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<sub>x</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>) im letzten Jahresdurchschnitt bezogen auf 11% O<sub>2</sub> 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/Nm<sup>3</sup>) im Jahresdurchschnitt bezogen auf 11% O<sub>2</sub> 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<sub>x</sub> Emissionen) werden bereits im Kenngrössenmodell erhoben. Der Verbrauch von Ammoniak und evtl. erhöhte NH<sub>3</sub> 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 <sup>3</sup> /a | km  | Bemerkungen:                                      |
|--------------------------------------------------|--------------------|-----|---------------------------------------------------|
| Holzschnitzel aus Frischholz (Laubbaum)          | 6000               | 25  | Jahresverbrauch von Holz in Schüttkubikmetern.    |
| Holzschnitzel aus Frischholz (Nadelbaum)         | 14000              | 25  | Mittlere Transportentfernung ab Wald (Frischholz) |
| Holzschnitzel aus Restholz (z.B. Sägereiabfälle) | 0                  | 25  | bzw. ab Schnitzelherstellung.                     |
| Holzschnitzel aus Altholz                        | 0                  | 100 |                                                   |
| <b>Gesamt</b>                                    | <b>20000</b>       |     |                                                   |

Holzmenge (t atro) aus Sm<sup>3</sup> 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 <sup>3</sup> | - |
| Stickoxide NOx als NO2 | 174.0 | mg/Nm <sup>3</sup> | - |
| -                      | -     | mg/Nm <sup>3</sup> | - |
| -                      | -     | mg/Nm <sup>3</sup> | - |
| -                      | -     | mg/Nm <sup>3</sup> | - |

Angaben bezogen auf 11% O2 im trockenen Abgasvolumen

**Outputs**

Aschen zur Entsorgung: kg 150'000

Art der Entsorgung: Reaktordeponie ▼

Gesamtmenge pro Jahr

**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  $\text{NO}_x$  (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 <sub>x</sub> beim Betrieb der vier untersuchten Anlagen und der drei Standardanlagen.                                                                                                                                                                          | 32 |
| Fig. 11  | Dominanzanalyse für die Emission von SO <sub>x</sub> 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 <sub>x</sub> 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; GOEDKOOP & SPRIENSMA (2000a:11).                                                                                                                                                 | 60 |
| Fig. 24: | Schematische Darstellung der Methode der ökologischen Knappheit 1997.                                                                                                                                                                                                                                  | 63 |

## Tabellen

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1  | Beispiel einer Sachbilanz in $\text{eco}^{\text{mc}}$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 5  |
| Tab. 2  | Beispiel für das Ergebnis einer Sachbilanz in $\text{eco}^{\text{mc}}$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 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 ( $\text{m}^2\text{a}$ 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% $\text{O}_2$ 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 $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ausser TCDD-Äquivalente in $\text{fg}/\text{Nm}^3$ ( $10^{-15}\text{g}$ oder $10^6\text{ng}$ ) bei 11% $\text{O}_2$ im trockenen Abgas. Die Abkürzung „s“ steht in $\text{eco}^{\text{mc}}$ für Emissionen aus stationären Quellen. Für $\text{NO}_x$ ( $>2.5\text{kg NO}_x/\text{h}$ ), NMVOC (Anlage $>1\text{MW}$ ) und Partikel (Anlage $<5\text{MW}$ ) 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% $\text{O}_2$ 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 <sup>3</sup> 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.

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

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

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

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  $\text{Ster}$  oder  $\text{Sm}^3$  (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<br>Bereich [%] | Holzfeuchte u<br>Dieses Projekt [%] | Heizwert H <sub>u</sub><br>[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<sub>u</sub> 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<sup>3</sup> und 0.64 g/cm<sup>3</sup>. Die durchschnittliche Dichte der drei häufigsten Baumarten in der Schweiz betragen (u=0%): Fichte 0.38 g/cm<sup>3</sup>, Buche 0.68 g/cm<sup>3</sup> und Tanne 0.41 g/cm<sup>3</sup> <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<sup>3</sup> für Weichholz und 650 kg/m<sup>3</sup> 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 MJ/kg, derjenige von Lignin bei 30 MJ/kg und derjenige von Harz bei 35-38 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<sub>th</sub> ist der theoretische untere Heizwert bei vollständiger Verbrennung.

|             | Holztyp (Feuchte) <sup>1)</sup>                    | Dichte<br>feucht<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Heiz-<br>wert <sub>th</sub><br>[MJ/kg] | Brennwert<br>[MJ/kg] |
|-------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|
| Bauholz     | Weichholz, Stammholz nass (70%) <sup>2)</sup>      | 765                                      | 10.7                                   | 20.3                 |
|             | Weichholz, Industrieholz nass (140%) <sup>3)</sup> | 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 unspez.), 1 Jahr getrocknet (30%)    | 658                                      | 14.7                                   | 20.6                 |
|             | Stückholz (CH unspez.), 2 Jahre getrocknet (20%)   | 607                                      | 15.9                                   | 20.6                 |
|             | Stückholz (CH unspez.), im Wald (80 – 140%)        | 1105                                     | 6.5                                    | 20.6                 |
|             | Holzschnitzel (CH unspez.), aus Sägerei (40%)      | 708                                      | 13.6                                   | 20.6                 |
|             | Holzschnitzel (CH unspez.), aus Wald (50%)         | 759                                      | 12.6                                   | 20.6                 |
|             | Holzschnitzel (CH unspez.), im Wald (60%)          | 810                                      | 11.8                                   | 20.6                 |

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

<sup>1)</sup>: Die Feuchte wird in Gewichtsprozent bezogen auf die Holz trockenmasse angegeben.

<sup>2)</sup>: Stammholz = ganzer Stamm vor dem Einschneiden

<sup>3)</sup>: 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, Spälte, 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:

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

|              | <b>Rundholz</b> | <b>Dieses Pro-<br/>jekt</b> | <b>Stückholz</b> | <b>Dieses Pro-<br/>jekt</b> | <b>Schnitzel</b> | <b>Dieses Pro-<br/>jekt</b> |
|--------------|-----------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
|              | [m³/t]          | [m³/t]                      | [Ster/t]         | [Ster/t]                    | [Sm³/t]          | [Sm³/t]                     |
| Fichte/Tanne | 2.3-2.53        | <b>2.53</b>                 | 3.33-3.4         | <b>3.39</b>                 | 5.88-6.2         | <b>5.92</b>                 |
| Buche        | 1.38-1.67       | <b>1.47</b>                 | 2.38-2.7         | <b>2.39</b>                 | 4.17-4.8         | <b>4.18</b>                 |

Tab. IX.4.5: Spezifisches Schüttvolumen  $v_{\text{spez}}$  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<br>(GWP 2001, 100a) | Ökologische Knappheit, 1997 | KEA             | Eco-indicator<br>95 | Eco-indicator<br>99 |
|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| Ressourcen                                  | Abiotische Ressourcen     | Ø                                   | √ <sup>1)</sup>             | √ <sup>1)</sup> | Ø                   | √ <sup>6)</sup>     |
|                                             | Biotische Ressourcen      | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø                   | Ø                   |
|                                             | Lebensräume/ Land         | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø                   | √                   |
| Emissionen                                  | Klimaveränderung          | √                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Ozonschichtabbau          | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Humantoxische Wirkungen   | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Ökotoxische Wirkungen     | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Photooxidantenbildung     | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Versäuerung <sup>3)</sup> | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Überdüngung <sup>2)</sup> | Ø                                   | √                           | Ø               | √                   | √                   |
|                                             | Geruch                    | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø                   | Ø                   |
|                                             | Lärm                      | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø                   | Ø <sup>9)</sup>     |
|                                             | Radioaktive Emissionen    | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø <sup>7)</sup>     | √                   |
|                                             | Unfallopfer               | Ø                                   | Ø                           | Ø               | Ø                   | Ø                   |
|                                             | Abfälle <sup>4)</sup>     | Ø                                   | √ <sup>5)</sup>             | Ø               | Ø                   | Ø                   |

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

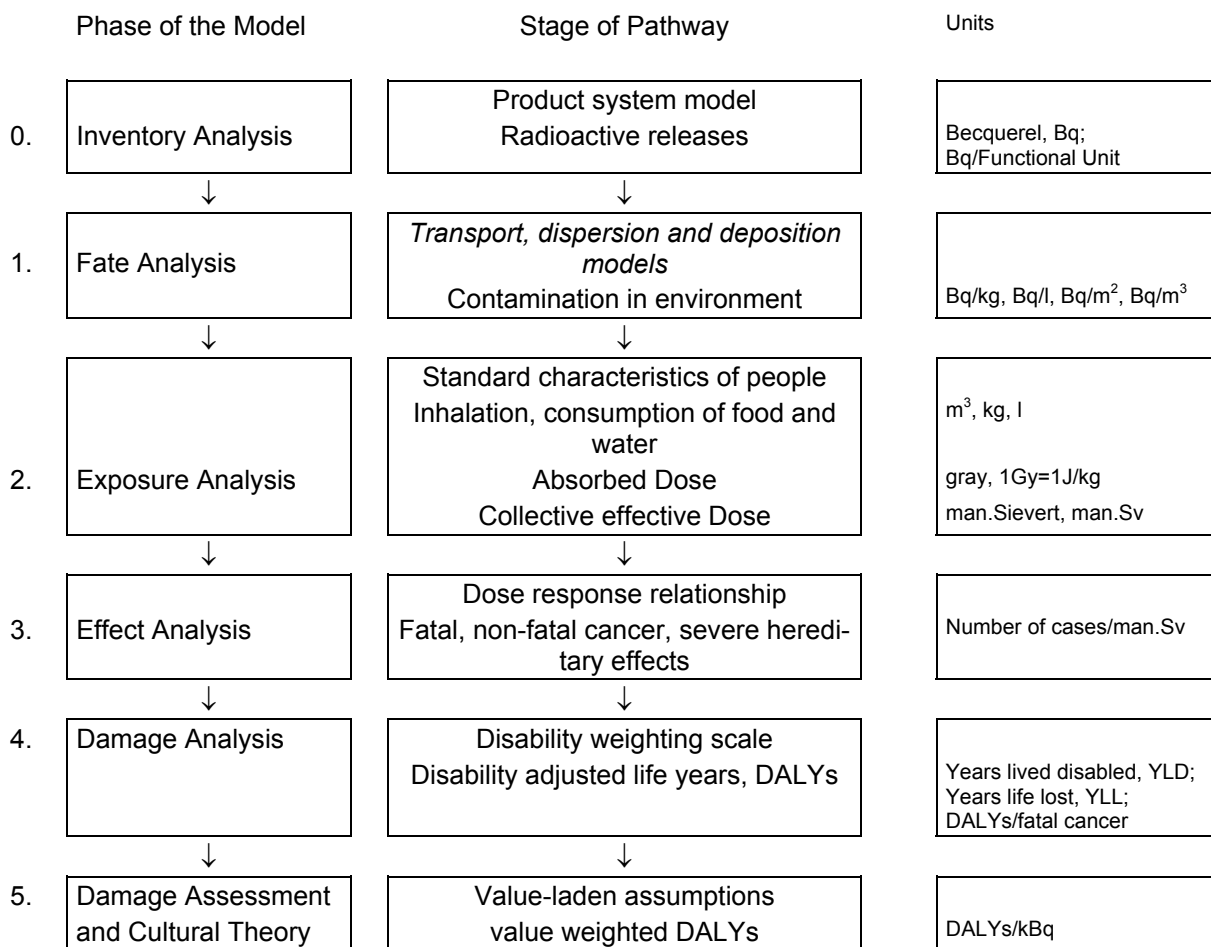


Fig. 22: Überblick über die Schritte der Schadensmodellierung ausgehend von Sachbilanzergebnissen (Inventory Analysis) bis zur Schadensbewertung (Damage Assessment) am Beispiel der Emission radioaktiver Isotope und den dadurch zusätzlich verursachten Krebserkrankungen (FRISCHKNECHT *et al.* 2000).

### 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.

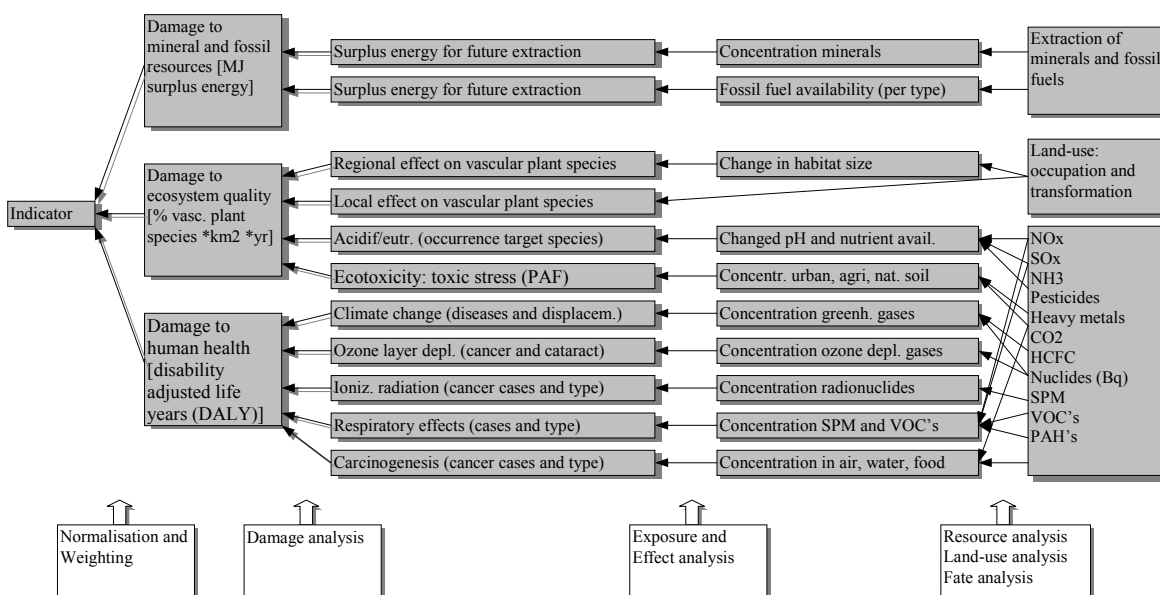


Fig. 23: Vereinfachendes Schema der Vorgehensweise beim Eco-indicator 99. Grau: (Zwischen-) Ergebnisse; Weiss: Modellierungen; GOEDKOOP & SPRIENSMA (2000a:11).

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 vereinsspezifische 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 CO<sub>2</sub> bestimmt. Somit können atmosphärische Emissionen in äquivalente Emissionsmengen CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> -Äquiv. | Integrationszeitraum |       |       | Version 2001<br>100a |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|----------------------|
|                            | 20a                  | 100a  | 500a  |                      |
| CO <sub>2</sub>            | 1                    | 1     | 1     | 1                    |
| CH <sub>4</sub>            | 56                   | 21    | 6.5   | 23                   |
| N <sub>2</sub> O           | 280                  | 310   | 170   | 296                  |
| H-FKW 125                  | 4'600                | 2'800 | 920   | 3400                 |
| H-FKW 134a                 | 3'400                | 1'300 | 420   | 1300                 |
| SF <sub>6</sub>            | 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 ozonschichtabbauende 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.

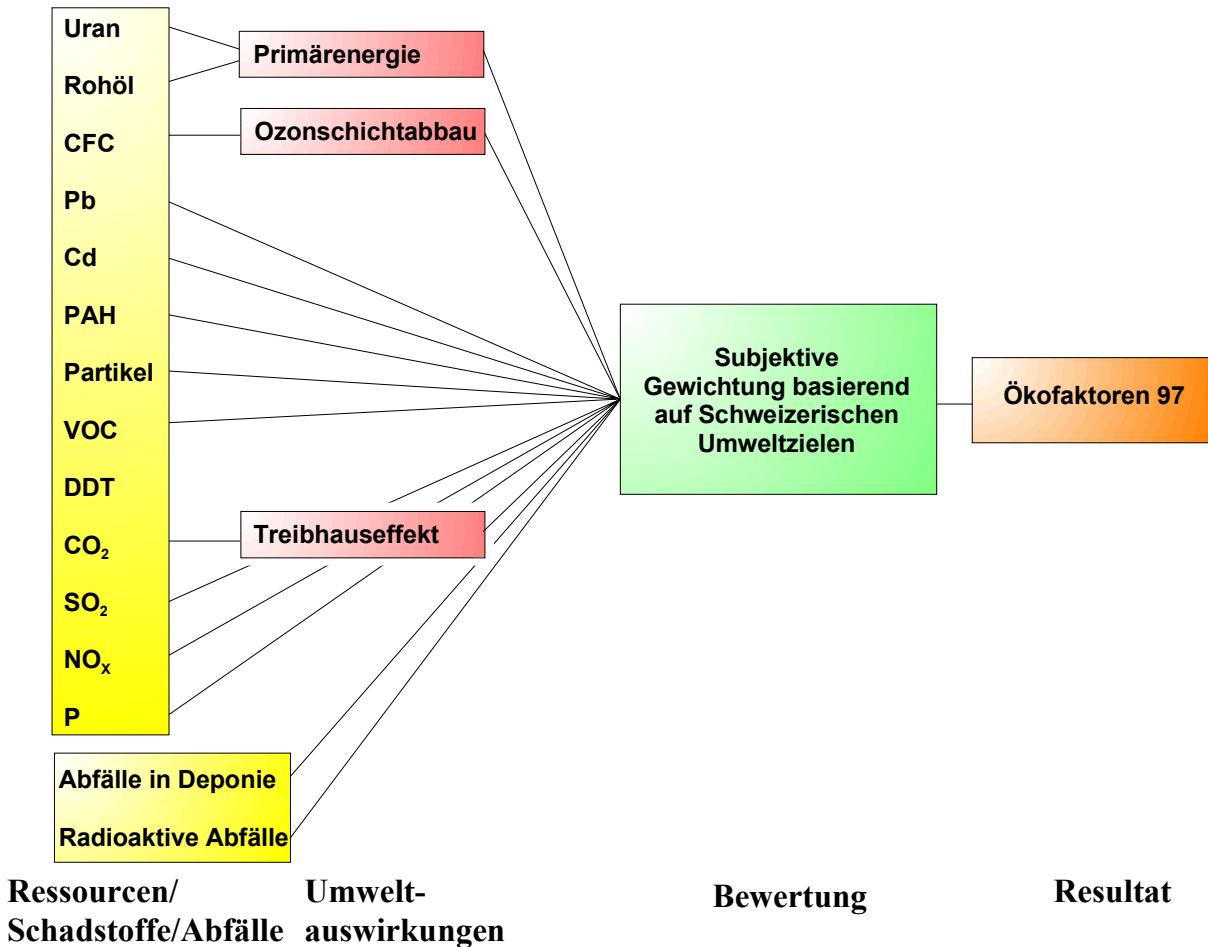


Fig. 24: Schematische Darstellung der Methode der ökologischen Knappheit 1997.

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

<sup>1)</sup>: Wert für durchschnittliche Einsatzkohle in Kraftwerken des westeuropäischen Stromverbundes UCPT.

<sup>2)</sup>: 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](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/](http://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/](http://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, dissertati-on.de, 317 Seiten, [www.jungbluth.de.vu](http://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](http://www.esu-services.ch), Uster.
- JUNGBLUTH, N. & FRISCHKNECHT, R. 2001: *Life Cycle Inventory for base oil and lubricants*. ESU-services, [www.esu-services.ch](http://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](http://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](http://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](http://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 comission 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/](http://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.