

# **Lebenszyklusanalysen innovativer Stromerzeugungstechniken mit Biomasse**

## **VDI-GET-Expertenforum**

### **„Entwicklungslinien der Energietechnik“**

#### **Workshop**

#### **„Lebenszyklusanalysen zukünftiger Stromerzeugungstechniken“ in Bochum am 07. und 08.09.2004**

Dr. Johannes Moerschner

Dr. Ludger Eltrop

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

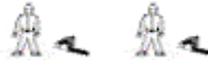
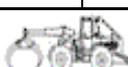
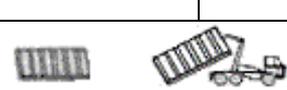
## **Gliederung**

- Einleitung
- Vorgehensweise
  - Systemauswahl
  - Brennstoffe/Brennstoffketten
  - Methodische Aspekte
- Ergebnisse
  - Massengerüste
  - Spezifische Stoff- und Energieaufwendungen
  - Lebensweganteile
  - Wirkungsbilanz
- Kritische Würdigung der Ergebnisse, Schlussfolgerungen

## Systemparameter Stromerzeugung aus Biomasse

| Parameter                     | Dampfturbine                               | ORC-HKW  | Holzvergaser+<br>Gas-BHKW                               |
|-------------------------------|--|--|---|
| Feuerungswärmeleistung        | 26,7 MW                                    | 8,7 MW   | 9 MW (Vergaser)   |
| Kessel-/Vergaserleistung      | 23,3 MW                                    | 7,61 MW  | 7 MW (Kaltgas 50°C)                                     |
| Kessel-/Vergaserwirkungsgrad  | 87,3 %                                     | 87,5 %   | 78 % (Vergaser)   |
| elektr. Nennleistung (brutto) | 6,1 MW                                     | 1,0 MW   | 2 x 1,2 MW  |
| Thermische Leistung           | max. 22 MW an WT<br>bei 4 MW <sub>el</sub> | 4,65 MW ORC-Modul<br>1,61 MW HW-Eco<br>= 6,26 MW an WT | 1,2 MW Gaskühlung<br>3,2 MW BHKW<br>= 4,4 MW max. an WT |
| Volllaststunden Strom         | 6 560 h/a                                  | 4 600 h/a  | 7 500 h/a   |
| Volllaststunden Wärme         | 4 660 h/a                                  | 4 890 h/a  | 2 620 h/a   |
| Wirkungsgrad Vergaser         | -  | -  | 78,0 %  |
| Wirkungsgrad el BHKW          | -  | -  | 35,0 %  |
| Wirkungsgrad th BHKW          | -  | -  | 46,0 %  |
| Nutzungsgrad el System        | 19,5 %                                     | 10,6 %   | 28,9 %  |
| Nutzungsgrad th System        | 50,1 %                                     | 70,4 %   | 13,3 %  |
| Jahresnutzungsgrad System     | 69,7 %                                     | 81,0 %   | 42,2 %  |

## Brennstoffgewinnung Waldhackgut Beispiel Verfahren teilmechanisiert, Schwachholz, Hacken im Wald

| Arbeitsort<br>Arbeitsschritt | Bestand   | Rückegasse  | Waldstrasse  | Zielort |
|------------------------------|---|---|--|---------|
| Fällen,<br>Aufarbeiten       |  |   |  |         |
| Vorliefern                   |   |  |  |         |
| Rücken                       |   |   |   |         |
| Hacken                       |   |   |  |         |
| Transport                    |   |   |  |         |

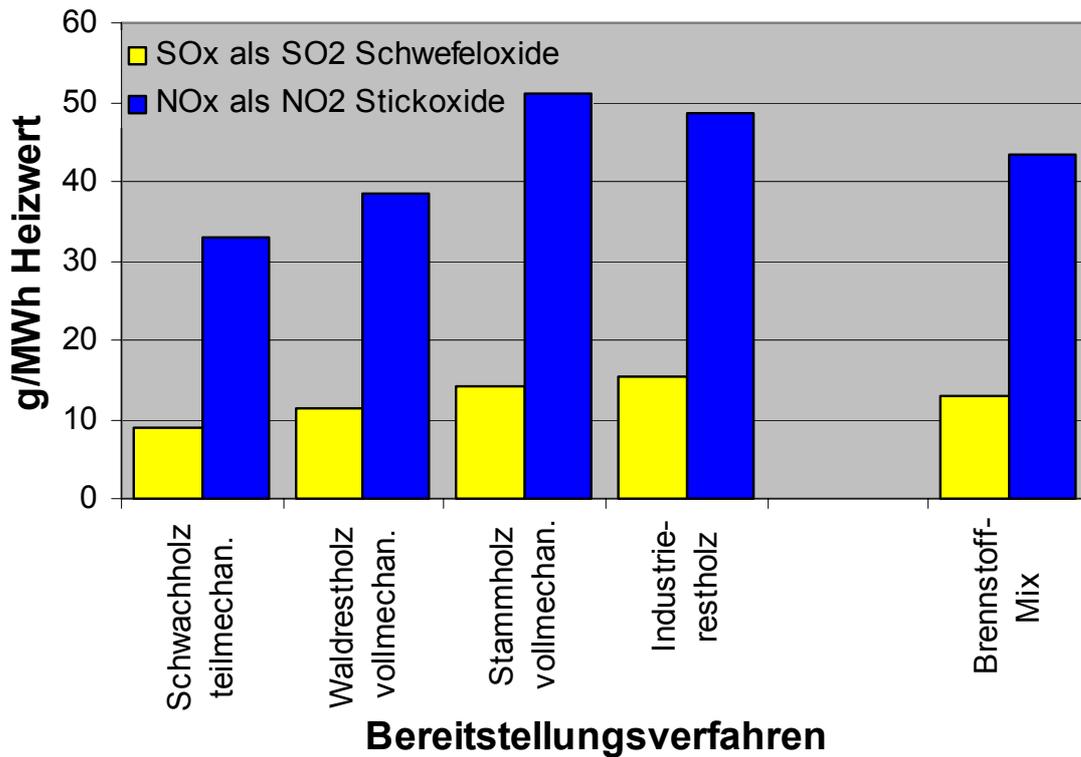
## Verfahrensmix der Brennstoffbereitstellung und angenommene Anteile der Verfahrenstypen

| Holzsortiment/Verfahren           | Anteil am Mix |
|-----------------------------------|---------------|
| WHG teilmechanisiert Schwachholz  | 30 %          |
| WHG vollmechanisiert Waldrestholz | 10 %          |
| WHG vollmechanisiert Stammholz    | 20 %          |
| Säge-/Industrierestholz           | 40 %          |

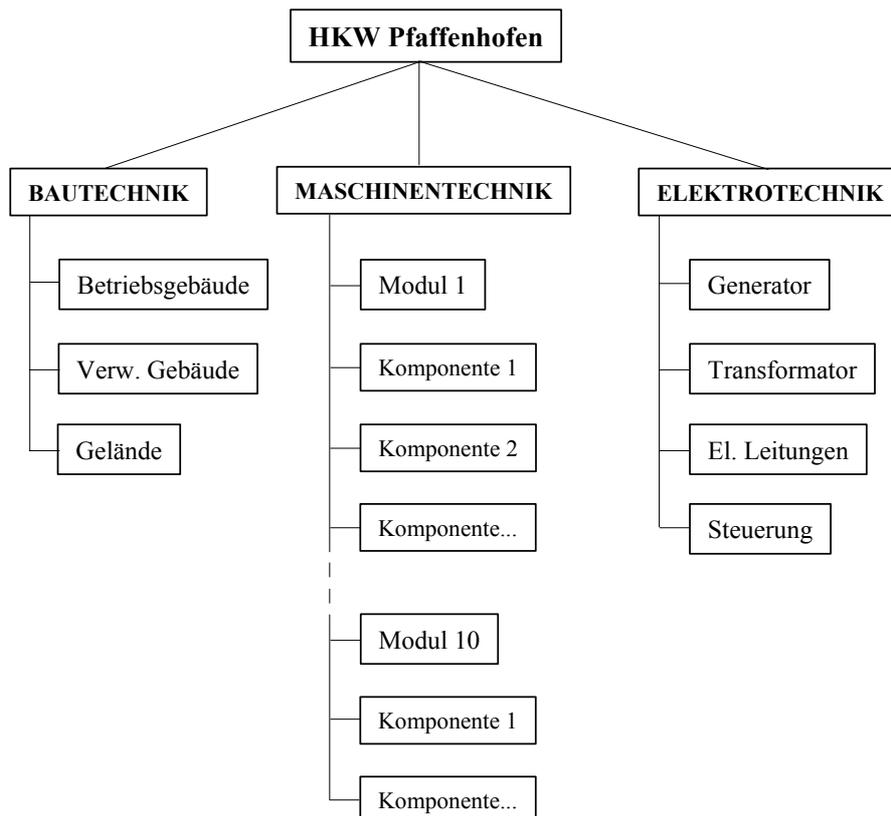
## Brennstoffparameter der mittleren Holzhackschnitzel

| Parameter         | Einheit                              |
|-------------------|--------------------------------------|
| Energiegehalt     | 9,08 MJ Hu/kg FM<br>18,5 MJ Hu/kg TM |
| Schüttraumdichte  | 0,277 t/Sm <sup>3</sup> FM           |
| Schnitzelgröße    | 15-60 mm                             |
| Wassergehalt      | 45 %/kg FM                           |
| Kohlenstoffgehalt | 49,091 Gew.-%TM                      |
| Wasserstoffgehalt | 6,273 Gew.-%TM                       |
| Sauerstoffgehalt  | 41,745 Gew.-%TM                      |
| Stickstoffgehalt  | 0,345 Gew.-%TM                       |
| Schwefelgehalt    | 0,036 Gew.-%TM                       |

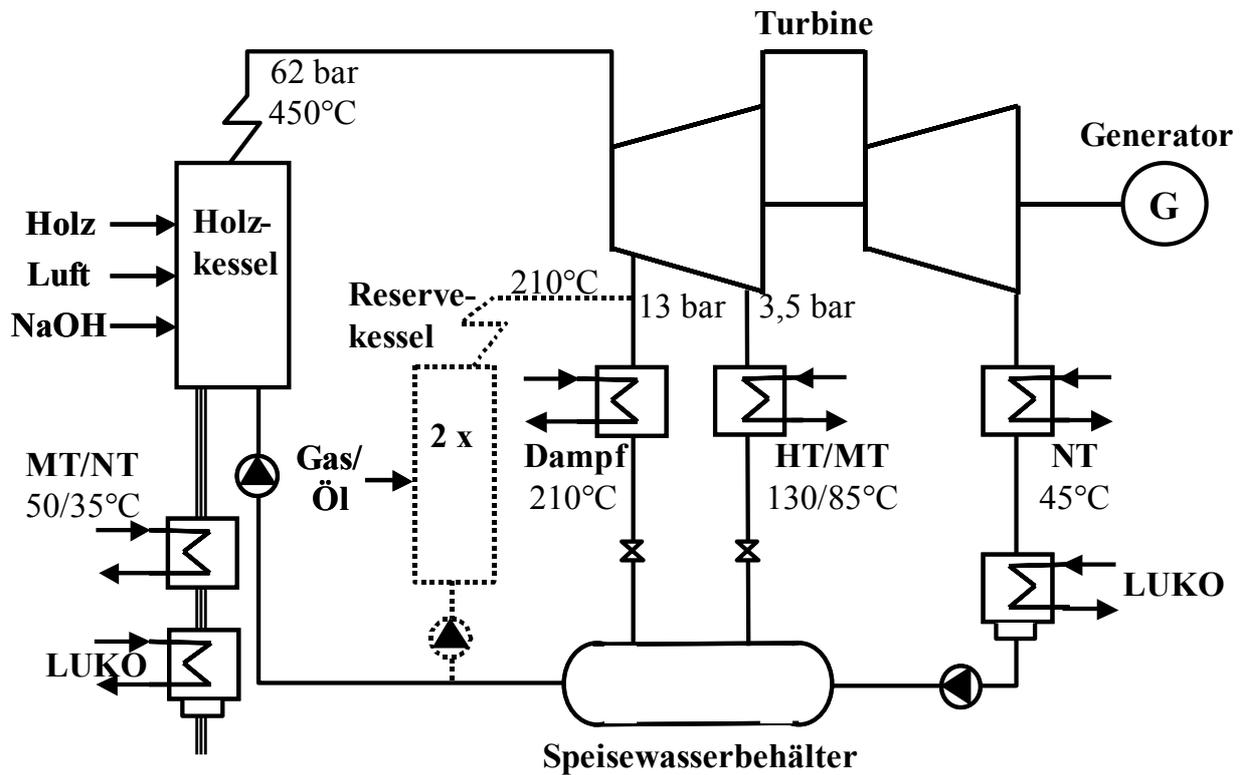
## Vergleich der Holzhackschnitzelbereitstellung anhand ihrer spezifischen SO<sub>x</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen



## Modulare Abbildung der Kraftwerkskomponenten



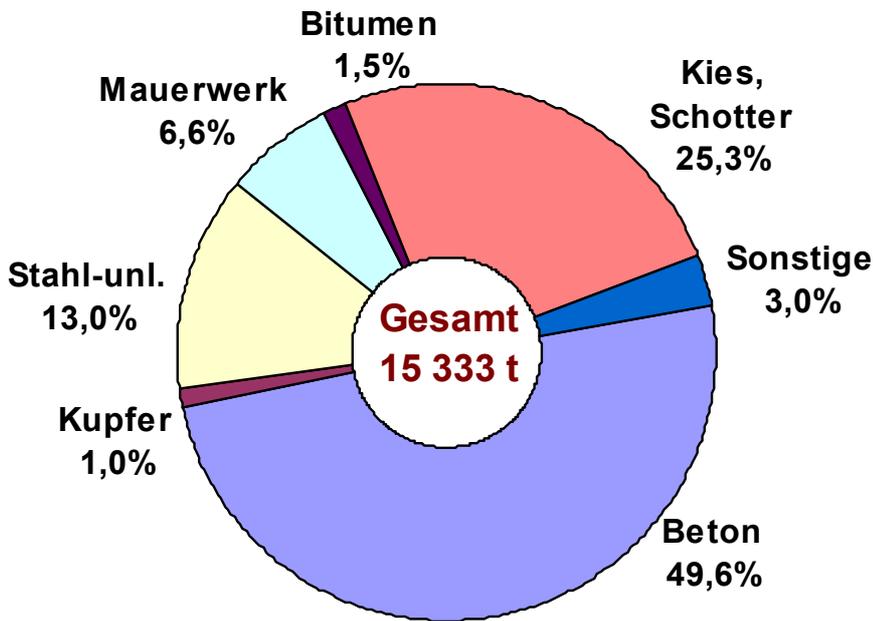
## Wärmeschaltbild Biomasse-Dampfturbinen-HKW, vereinfacht



## Spezifische Verbrennungs-Emissionen der betrachteten Biomasseanlagen im Vergleich [mg/kWh<sub>exerg</sub>]

|                 | Dampf-<br>turbine | ORC-<br>HKW | Holzvergaser+<br>Gasmotor |
|-----------------|-------------------|-------------|---------------------------|
| CO              | 818,93            | 603,07      | 16,03                     |
| NO <sub>x</sub> | 549,94            | 1206,15     | 896,74                    |
| SO <sub>x</sub> | 298,88            | 502,56      | 22,97                     |
| HC              | 59,78             | 100,51      | 9,31                      |
| HCl             | 3,59              | 6,03        | 0,14                      |
| Staub           | 59,78             | 150,77      | 67,60                     |

## Massenbilanz des Biomasse-Dampf-HKW's

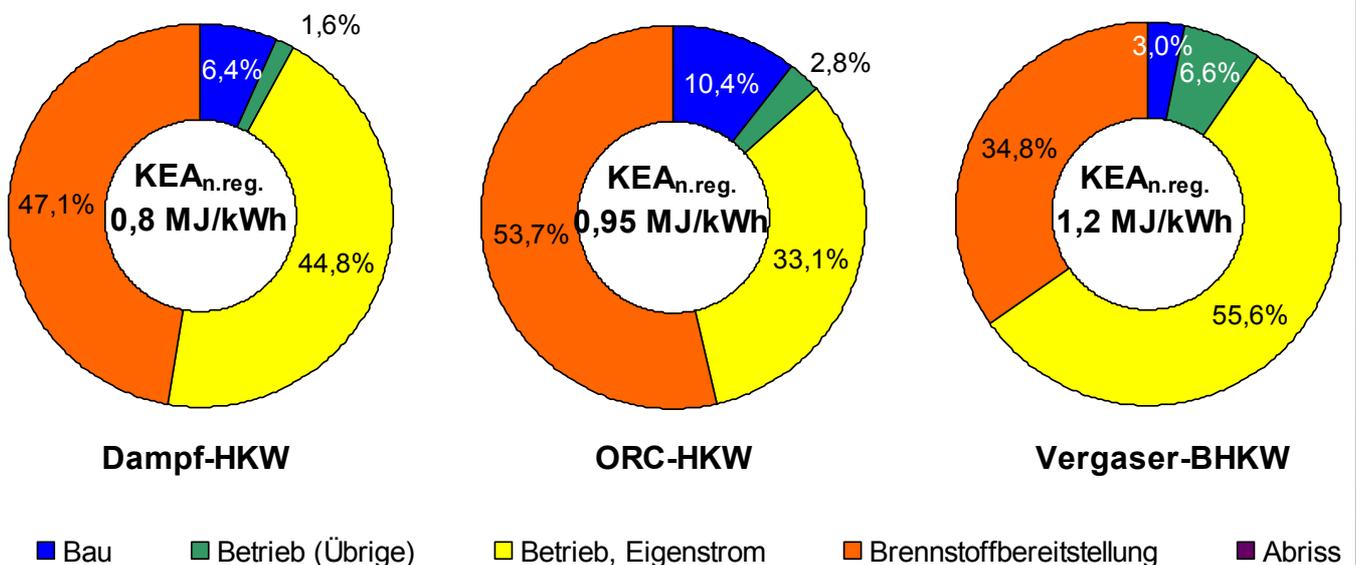


| Massenanteile    |       |
|------------------|-------|
| Bautechnik       | 91,3% |
| Maschinentechnik | 7,3%  |
| Elektrotechnik   | 1,4%  |

| Material       | g/kWh Exergie* |
|----------------|----------------|
| Beton          | 5,289          |
| Kupfer         | 0,107          |
| Stahl-unl.     | 1,387          |
| Mauerwerk      | 0,704          |
| Bitumen        | 0,158          |
| Kies, Schotter | 2,703          |
| Sonstige       | 0,318          |

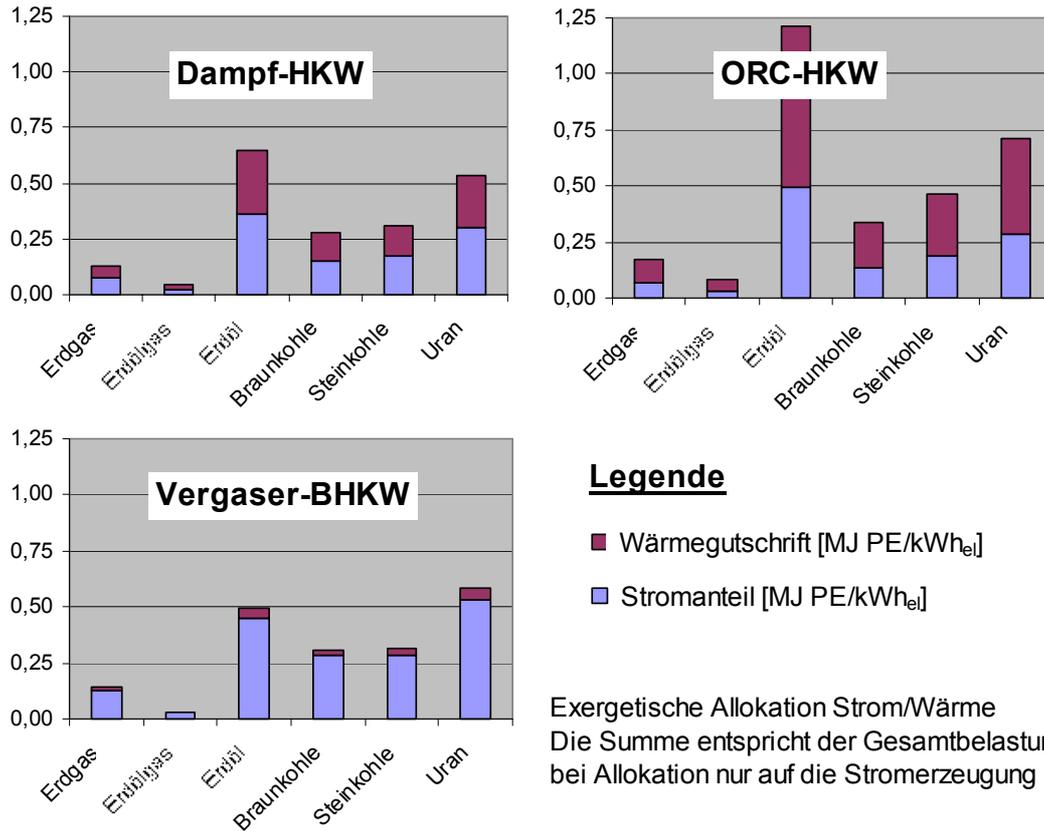
\*Bei 20a Betriebsdauer

## KEA nicht regenerativ der Biomasse-HKW's Vergleich der Lebenswegverteilungen

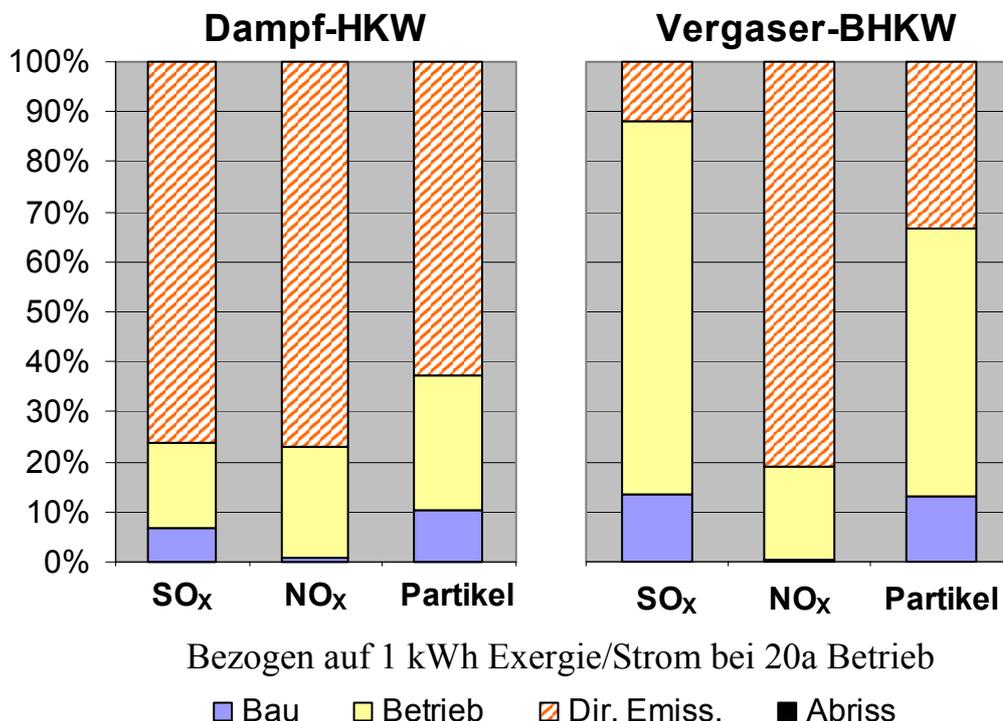


Betriebsdauer 20a, exergetische Betrachtungsweise

## Spezif. Einsatz nicht regenerativer Energieträger



## Lebenswegbilanzen ausgewählter Emissionen Anteile der Lebenswegabschnitte an den Gesamtbelastungen



## Lebenswegbilanzen der Biomasse-Stromerzeugungsanlagen im Vergleich

|  | Dampf-<br>turbine | ORC-<br>HKW | Holzvergasung+<br>Gasmotor |
|--|-------------------|-------------|----------------------------|
| <b><i>Kumulierte Emissionen</i></b> [g/kWh <sub>el</sub> ] |                   |             |                            |
| CO <sub>2</sub> nicht reg.                                 | 61,49             | 69,17       | 93,66                      |
| CO <sub>2</sub> Biomasse                                   | 1098,20           | 1477,09     | 1366,68                    |
| N <sub>2</sub> O   | 0,01              | 0,01        | 0,03                       |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>                        | 0,39              | 0,64        | 0,13                       |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>                        | 0,72              | 1,42        | 1,11                       |
| Partikel gesamt  | 0,10              | 0,20        | 0,07                       |
| <b><i>Brennstoff</i></b> [MJ/kWh <sub>el</sub> ]           |                   |             |                            |
| Biomasse   | 10,26             | 13,79       | 11,30                      |

Bei 20a Betrieb, exergetische Betrachtungsweise

## Wirkungsabschätzung Die Biomasse-Stromerzeugungsanlagen im Vergleich

|                              | Einheit                     | Dampf-<br>turbine | ORC-<br>HKW | Holzvergasung+<br>Gasmotor |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------|----------------------------|
| Treibhauspotential 100 Jahre | g CO <sub>2</sub> -Äqu./kWh | 66                | 74          | 109                        |
| Versauerungspotenzial        | g SO <sub>2</sub> -Äqu./kWh | 0,98              | 1,72        | 1,04                       |
| Eutrophierungspotenzial      | g PO <sub>4</sub> -Äqu./kWh | 0,09              | 0,19        | 0,15                       |
| KEA - Ressourcenmethode      | MJ/kWh                      | 0,80              | 0,95        | 1,20                       |

Bei 20a Betrieb, exergetische Betrachtungsweise

## Schlussfolgerungen

- Stromerzeugung aus Holz mit KWK als Biomasse-Option 2010
- Ergebnis-Unterschiede zwischen Technologien sind bedingt durch
  - Spezifische elektrische Systemwirkungsgrade der Technologien
  - Spezifische, technikbedingte Verbrennungsemissionen
- Anteil des Kraftwerksbaus an den Gesamtbelastungen i.d.R. gering (3-10,5% KEA), Betriebsphase verursacht häufig >90% der Lebenswegbelastungen
- CO<sub>2</sub> nicht reg. etwa 1/50, Rest CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Biobrennstoff
- Dampfkraft-HKW:
  - Bei optimierter Wärmeabnahme geringste Belastungen im Systemvergleich
- ORC-HKW:
  - Höhere Lebenswegbelastungen als Dampfkraft-System durch ger. elektrischen Wirkungsgrad, ger. Exergie der Wärmeauskopplung, höhere Feuerungsemiss.
- Vergaser-BHKW:
  - Noch unausgereifte Technik: Datenlage verbesserbar
  - Bei geringen Jahresnutzungsgraden höchste ökologische Belastungen im Systemvergleich

## Vergleich mit Ergebnissen anderer Ökoinventare von Stromerzeugungsanlagen

|                                  | Einheit                           | Biomasse-<br>HKW | Erdgas-<br>BHKW | Steink.-<br>KW |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------|----------------|
| elektrische Leistung             | MW <sub>el</sub>                  | 6                | 2,1             | 509            |
| Wärmeleistung                    | MW <sub>th</sub>                  | 23,3             | 12,5            | -              |
| Nutzungsdauer                    | a                                 | 20               | 15              | 40             |
| Nettostromerzeugung Lebensdauer  | TJ                                | 2880             | 580             | 367200         |
| Nettowärmeerzeugung Lebensdauer  | TJ                                | 7388             | 1218            | -              |
| Spezifischer Masseneinsatz       | t/MW <sub>el</sub>                | 2534             | 922             | 642            |
| Spezifischer Masseneinsatz       | t/GWh <sub>el</sub>               | 19,2             | 12,0            | 3,2            |
| Massenanteil der Bautechnik      | %                                 | 92,1             | 91              | 90             |
| Massenanteil der Maschinenteknik | %                                 | 6,5              | 8               | 9              |
| Massenanteil der Elektrotechnik  | %                                 | 1,4              | 1               | 1              |
| HKW-Flächenbedarf                | m <sup>2</sup>                    | 10150            | 1568            | 53000          |
| spezifischer Flächenbedarf       | m <sup>2</sup> /GWh <sub>el</sub> | 12,7             | 9,7             | 0,5            |
| KEA Herstellung                  | TJ/MW <sub>el</sub>               | 16,65            | 5,33            | 5,18           |
| KEA Betrieb, spezifisch          | TJ/TJ <sub>el</sub>               | 0,23             | 0,10            | 0,02           |
| KEA Abriss                       | TJ/MW <sub>el</sub>               | 0,53             | -3,7            | -338           |