



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG NEUER WKK- SYSTEME UND SYSTEMKOMBINATIONEN

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**A. Primas, Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG**

Forchstrasse 395, CH-8032 Zürich, basler-hofmann@bhz.ch, [www.bhz.ch](http://www.bhz.ch)

## **Impressum**

Datum: März 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie,**  
Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Projektnummer: 101465

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

## **Critical Reviewer:**

Rolf Frischknecht, ESU-services, Uster

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Zusammenfassung .....   | 3  |
| Abstract .....  | 5  |
| 1. Ausgangslage .....   | 7  |
| 1.1. Hintergrund dieser Untersuchung .....                        | 7  |
| 1.2. Absicht .....  | 7  |
| 2. Zielsetzung und Vorgehen .....                                 | 7  |
| 2.1. Problemstellung und Ziel .....                               | 7  |
| 2.2. Abgrenzung .....   | 7  |
| 2.3. Vorgehen .....   | 8  |
| 3. Untersuchungsmethodik .....                                    | 8  |
| 3.1. Festlegung der einbezogenen Systeme und Einsatzgebiete ..... | 8  |
| 3.2. Systemkenngrößen .....                                       | 9  |
| 3.3. Sachbilanzdaten .....  | 9  |
| 3.4. Bewertung und Interpretation .....                           | 9  |
| 3.5. Anwendungsmatrix .....                                       | 9  |
| 4. Systemgrenzen und Festlegungen .....                           | 9  |
| 4.1. Funktionelle Einheit .....                                   | 9  |
| 4.2. Systemgrenzen und berücksichtigte Elemente .....             | 10 |
| 4.3. Weitere Festlegungen .....                                   | 11 |
| 5. Systemcharakterisierung .....                                  | 13 |
| 5.1. Unterscheidung der Systeme .....                             | 13 |
| 5.2. Niedertemperaturwärme 30-40°C .....                          | 13 |
| 5.3. Wärmeabgabe 60°C .....                                       | 14 |
| 5.4. Wärmeabgabe 80°C .....                                       | 15 |
| 5.5. Kälteabgabe 6-8°C .....                                      | 16 |
| 5.6. Kälteabgabe 14-18°C .....                                    | 17 |
| 6. Umweltbelastung von WKK-Anlagen .....                          | 18 |
| 6.1. Einführung .....   | 18 |
| 6.2. Betrieb mit Erdgas .....                                     | 18 |
| 6.3. Betrieb mit Biogas bzw. Holzpellets .....                    | 21 |
| 7. Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme .....  | 24 |
| 7.1. Einführung .....   | 24 |
| 7.2. Niedertemperaturwärme 30-40°C .....                          | 25 |
| 7.3. Wärmeabgabe 60°C .....                                       | 27 |
| 7.4. Wärmeabgabe 80°C .....                                       | 32 |
| 7.5. Kälteabgabe 6-8°C .....                                      | 34 |
| 7.6. Kälteabgabe 14-18°C .....                                    | 37 |
| 8. Sensitivitätsanalyse .....                                     | 38 |
| 8.1. Einführung .....   | 38 |
| 8.2. Wärmeerzeugung .....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 8.3. Kälteerzeugung .....                                      | 48 |
| 8.4. Einfluss des verwendeten Stromes .....                    | 53 |
| 9. Systemkombinationen .....                                   | 55 |
| 9.1. Einführung .....  | 55 |
| 9.2. Anwendungen für Gebäude WKK-Systeme .....                 | 55 |
| 9.3. Anwendungen für Nahwärme-WKK .....                        | 59 |
| 9.4. Anwendungen Mit Kälteerzeugung .....                      | 62 |
| 10. Wirtschaftlichkeit .....                                   | 64 |
| 10.1. Einführung .....   | 64 |
| 10.2. Investitions- und Jahreskosten .....                     | 64 |
| 10.3. Kostenvergleich für Kälteerzeugung .....                 | 66 |
| 11. Anwendungsmatrix und Bewertung .....                       | 67 |
| 11.1. Einführung .....   | 67 |
| 11.2. Gebäudesysteme .....                                     | 67 |
| 11.3. Nahwärmenetze .....                                      | 70 |
| 11.4. Kälteerzeugung .....                                     | 73 |
| 12. Folgerungen .....  | 75 |
| 12.1. Entwicklungsbedarf .....                                 | 76 |
| 12.2. Rahmenbedingungen .....                                  | 76 |
| 13. Literatur/Referenzen .....                                 | 77 |
| 14. Anhang A, Review des Schlussberichts .....                 | 80 |
| 14.1. Zweck und Ablauf des Reviews .....                       | 80 |
| 14.2. Allgemeiner Eindruck .....                               | 80 |
| 14.3. Zielsetzung, Vorgehen und Untersuchungsmethodik .....    | 80 |
| 14.4. Systemgrenzen und Festlegungen .....                     | 80 |
| 14.5. Systemcharakterisierung .....                            | 81 |
| 14.6. Ergebnisse .....   | 81 |
| 14.7. Wirtschaftlichkeit, Anwendungsmatrix und Bewertung ..... | 81 |
| 14.8. Folgerungen und Diskussion .....                         | 82 |
| 14.9. Bericht .....  | 82 |
| 15. Anhang B, Resultate .....                                  | 83 |
| 15.1. Resultate Umweltbelastung von WKK-Anlagen .....          | 83 |
| 15.2. Resultate Betrieb .....                                  | 87 |
| 15.3. Resultate Sensitivitätsanalyse .....                     | 88 |
| 15.4. Resultate Systemkombinationen .....                      | 93 |
| 16. Anhang C, Inventare .....                                  | 95 |
| 16.1. Verwendete Inventare .....                               | 95 |
| 16.2. Anpassung Der Inventare .....                            | 95 |
| 16.3. StromVerteilung ab GuD-Kraftwerk .....                   | 96 |

## **Zusammenfassung**

### **Ausgangslage**

Neue Systeme zur kombinierten Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung (WKK) in stationären Anwendungen stehen an der Schwelle der Markteinführung oder in der Pilot- und Demonstrationsphase. Solche Systeme können zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen. Für die Entwicklung zukünftiger Anwendungen ist es wichtig zu wissen, in welchen Einsatzgebieten welche Systeme oder Systemkombinationen sowohl technisch, ökologisch aber auch wirtschaftlich optimal einsetzbar sind.

### **Ziel**

Hauptziel ist die ökologische und technische Bewertung verschiedener WKK-Systeme und Systemkombinationen bezüglich ihrer Eignung und ihrem Potential für unterschiedliche Einsatzgebiete. Kritische Parameter und notwendige Rahmenbedingungen sollen aufgezeigt werden. Dazu werden auch sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Technologien einbezogen. Die Bewertung erfolgt aufgrund der technisch- wirtschaftlichen Eignung, den Stärken und Schwächen sowie den ökologischen Vorteile der Systeme.

### **Vorgehen**

Für die Untersuchung wurden zur Differenzierung der Anwendungsbereiche fünf verschiedene Temperaturniveaus der Nutzwärme oder -Kälte unterschieden ( $6^{\circ}\text{C}$ ,  $14\text{--}18^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ). Damit können die Resultate auf unterschiedliche Anwendungen übertragen werden bzw. die Eignung einzelner Systemkombinationen für bestimmte Anwendungen hervorgehoben werden.

Es werden einerseits kommerziell erhältliche Systeme (BHKW, Mikrogasturbine), wie auch noch in der Entwicklung befindliche Systeme (Brennstoffzelle, Stirlingmotor) betrachtet. Als Vergleichsbasis dient die Stromerzeugung mit einem modernen Gaskombikraftwerk sowie die Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe mit Erdsonde (Referenzsystem) bzw. einem Gaskessel oder der Kälteerzeugung mit einer Kompressionskältemaschine.

### **Resultate**

Die Resultate der Ökobilanz zeigen, dass der Brennstoff und Anlagenbetrieb mit einem Anteil von 81% bis über 90% der Gesamtumweltbelastung für das Resultat bestimmt ist. Dies gilt auch für die komplexen Systeme wie z.B. Brennstoffzellen. Bei Brennstoffzellen wird zwar ein erhöhter Anteil der Anlageninfrastruktur an der Gesamtumweltbelastung festgestellt, aber der massgebende Faktor bleibt der Brennstoff und der Betrieb.

Im Vergleich zum Referenzsystem (Gaskombikraftwerk und Wärmepumpe) zeigt sich, dass mit Erdgas betriebene WKK-Systeme nur bei Wärmeabgabetermine um  $60^{\circ}\text{C}$  oder höher einen ökologischen Vorteil gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeproduktion im Referenzsystem aufweisen. Klein-BHKW's weisen infolge des derzeit noch tieferen elektrischen Wirkungsgrades auch bei einer Wärmeabgabe auf diesem Temperaturniveau kaum Vorteile gegenüber der Referenzsystem auf.

Es zeigt sich, dass für WKK-Systeme sehr hohe elektrische Nutzungsgrade oder Gesamtnutzungsgrade notwendig sind, um mit der getrennten Strom- und Wärmeproduktion ökologisch ebenbürtig zu sein. Beim Stirling Motor ist der hohe Gesamtnutzungsgrad und bei der Polymer Electrolyte Membran Brennstoffzelle (PEM) der hohe elektrische Nutzungsgrad massgebend. Es zeigt sich auch, dass Mikrogasturbinen ihre Vorteile nur dann ausspielen können, wenn hohe Temperaturen gefordert werden (deutlich über  $60^{\circ}\text{C}$ , bzw. Dampferzeugung).

WKK-Systeme mit geringeren elektrischen Wirkungsgraden (um 30%) weisen einen ökologischen Vorteil gegenüber dem Referenzsystem auf, wenn sie einen sehr hohen Gesamtnutzungsgrad (deutlich über 90%) aufweisen. Systeme mit einem guten elektrischen Wirkungsgrad ( $> 40\%$ ) müssen einen Gesamtnutzungsgrad von 80% oder mehr aufweisen. WKK-Systeme eignen sich vor allem dort, wo höhere Arbeitstemperaturen benötigt werden (z.B. Nahwärmenetze oder Warmwasser).

Im Vergleich zu einer klassischen Gasfeuerung kann mit der kombinierten Wärme-, und Stromerzeugung eine Reduktion der Umweltbelastung zwischen etwa 20% bis über 40% erreicht werden.

Eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung ist zudem durch die Verwendung von erneuerbaren Brennstoffen wie z.B. Biogas erzielbar. Für Biogasanwendungen zeigen WKK-Systeme auch deutlichere Vorteile gegenüber dem (ebenfalls mit Biogas betrieben) Referenzsystem. Das bessere Abschneiden gegenüber der getrennten Strom- Wärme-Produktion ist auf den bei Biogasbetrieb deutlich höheren Einfluss der Verteilverluste beim Referenzsystem zurückzuführen. Eine günstige Ausgangslage zeigt sich auch für den mit Holzpellets betriebenen Stirlingmotor. Mit diesem System kann eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung gegenüber konventionellen Pelletfeuerungen erzielt werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind grössere, in Nahwärmennetzen eingebundene Anlagen klar im Vorteil. Durch die, bei diesen Anlagen meist bivalente Betriebsweise, werden hohe Jahreslaufzeiten erreicht. Damit wird eine bessere Wirtschaftlichkeit erzielt. Ob eine Anlage sich rechnet, ist allerdings massgebend vom Rückliefertarif und damit von den Rahmenbedingungen abhängig.

Kleinanlagen haben aus wirtschaftlicher Sicht mehrere Nachteile. Zum einen führt der meist monovalente Betrieb, zu tiefen Jahreslaufzeiten. Zum andern wirken die höheren Investitionskosten für die Anlage und die elektrischen Installationen als Hindernis.

Eine ökologisch vorteilhafte Kälteproduktion mit WKK-Systemen ist nur in wenigen Fällen erreichbar. Die verwendeten WKK-Systeme müssen zwingend einen hohen Stromwirkungsgrad aufweisen, da der Strom das Hauptprodukt sein muss und die anfallende Wärme nur als Nebenprodukt in der Kälteversorgung Verwendung findet (geringe Allokation auf die Wärme). Dies ist nur der Fall, wenn die WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine einen Gesamtnutzungsgrad (Strom und Kälteenergie) von 70% oder mehr und einen elektrischen Wirkungsgrad von mindestens 40% erreicht. Für die Kälteproduktion von Interesse sind insbesondere grössere Festkeramik-Brennstoffzellen (SOFC), da solche Anlagen hohe Stromwirkungsgrade aufweisen und systembedingt (lange Starzeit, hohe Kosten) möglichst ganzjährig betrieben werden sollten.

Für übliche Klimakälteanwendungen im raumtemperaturnahen Bereich (14-18°C) sind WKK-Anlagen die weniger effiziente Wahl als eine intelligente Kombination aus Freecooling und Kompressionskältemaschinen. Als ökologisch optimale Kombination für die Kälteerzeugung erweist sich die Kombination von Kompressionskältemaschine und Photovoltaikanlage für die Stromproduktion.

## Fazit

Gegenüber klassischen Gaskesseln kann mit der kombinierten Wärme- und Stromerzeugung eine Reduktion der Umweltbelastung zwischen 20% und bis über 40% erzielt werden. Im Vergleich zu Wärmepumpensystemen ist das Reduktionspotential deutlich tiefer und auch nur bei höheren Heizwärmtemperaturen realisierbar. Dies ist bei der Auswahl des Heizsystems zu beachten.

Das wichtigste Ziel für zukünftige WKK-Systeme dürfte die Maximierung des elektrischen Wirkungsgrades sein, ohne jedoch markante Einbussen beim Gesamtnutzungsgrad in Kauf zu nehmen. Diesem Ziel kommen insbesondere die grösseren Festkeramik-Brennstoffzellen (SOFC) am nächsten sofern sich die noch anstehenden Kostenprobleme lösen lassen. Bei den Kleinanlagen sind einfach zu betreibende, integrierte Anlagen mit tiefen Investitionskosten und guter Effizienz wichtig für eine Verbreitung der Wärme-Kraft Kopplung.

Günstig für den Einsatz von WKK-Anlagen sind:

- Nutzungen mit hohem Temperatur und ganzjährigem Wärmebedarf wie z.B. Industrie, Spitäler etc.
- Ersatz für Heizkessel in Altbauten mit höheren Heizungsvorlauftemperaturen
- Warmwassererwärmung in grösseren Gebäuden mit Wärmepumpenheizung
- Nahwärmennetze in Kombination mit Wärmepumpen

## Abstract

### Introduction

New systems for combined heat and power generation (CHP) for stationary applications are on the threshold of market introduction (e.g. micro turbines). Other systems such as fuel cells or Stirling engines are in the demonstration phase and pilot plants are being tested. Such systems are of increasing interest because of their prospect for high total efficiency. For the development of new applications it is important to know in which areas, applications or combinations these systems are best suited (ecologically and economically).

### Objective and Approach

The objective of this study is an ecological and technical evaluation of different CHP systems and system combinations. This also includes suitable combinations with other technologies. In order to cover different applications in a general manner, five temperature levels are distinguished: 6°C, 14-18°C, 30-40°C, 60°C and 80°C.

The main goal is to quantify the environmental impact of these systems, investigate possible applications and compare them with a high efficient reference system. The reference system with separate heat and power generation, consists of a combined-cycle plant and a heat pump. For chilled water production a combination of the CHP-system with an absorption chiller is investigated. This system is compared with an efficient compression chiller (electricity from a combined-cycle plant). Critical parameters shall be identified as well as strengths, weaknesses and environmental benefits of the systems.

### Results

The life cycle analysis shows that for all CHP-systems investigated the fuel and the emissions from the operation are the main impact. They have a share of 81% to over 90% of the total environmental impact. This is also valid for complex systems such as fuel cells. Naturally the impact from the material and the production of fuel cell units is clearly higher than by other systems.

The comparison with the reference system (combined-cycle plant and heat pump) shows that CHP-systems operate ecologically equal or more efficient as the reference system only in applications with supply temperatures of about 60°C. Micro CHP-systems with reciprocating engines (below 10 kWel) hardly have an ecological advantage compared to the reference system at a supply temperature of 60°C. The reason is the lower electrical efficiency of such systems compared to larger CHP-systems.

The conclusion is, that CHP-systems must have a very high electrical efficiency or overall efficiency in order to reach an environmental benefit compared to the reference system. Systems with a moderate electrical efficiency (around 30%) must have a very high total efficiency (higher than 90%) to reach this target. Systems with a high electrical efficiency (over 40%) must have a total efficiency of 80% or more.

For Stirling engines, a high overall efficiency and for polymer electrolyte membrane fuel cells (PEM) a high electrical efficiency, are crucial for an environmental benefit compared to the reference system. In general, CHP-systems are suitable for applications where higher supply temperatures are needed e.g. district heating networks or domestic hot water production. The results also show that micro-gas turbines only have an ecological advantage in applications with a high temperature demand (significantly above 60°C, or steam generation).

A significant reduction of the environmental impact can be achieved by the use of renewable fuels, such as biogas or wood. Due to the higher share of transmission losses within the reference system (also operated with biogas), the decentralised CHP-systems show a higher benefit. For small CHP-applications the wood-pellet driven Stirling engine shows a good environmental efficiency especially compared to a conventional wood pellet boiler.

From an economic point of view, CHP-systems operated within a district-heating network are favourable. Usually such plants will have a peak boiler in order to cut down the investment costs. This leads to long operating periods at full load which are necessary for an economical operation. The economic efficiency is further determined by the revenue or avoided costs for electricity.

For small CHP-systems it is difficult to achieve a good economic efficiency due to the short operating periods at full load. The reason is that often no peak load boiler is installed. Furthermore the specific investment costs for the unit and for the electrical installation are higher.

The results show that chilled water production with CHP-systems combined with an absorption chiller only in few cases has an environmental benefit compared to the reference system. The reference system consists in this case of an electrical compression chiller supplied with electricity from a combined-cycle plant.

The CHP-system must have a very high electrical efficiency so the heat produced and used in the absorption chiller is a by-product of low value. Only systems with an electrical efficiency of over 40% and a total efficiency (electricity and cooling energy) of 70% or more are beneficial compared to the reference system.

Particularly of interest are larger Solid Oxide Fuel Cells (SOFC), which have a very high electrical efficiency and should run very long operating periods at full load in order to be operated economical. For common air conditioning applications (e.g. for offices), where a cold-water temperature of 14-18°C is sufficient, CHP-systems with absorption chillers are clearly less efficient than a good designed system with an electrical compression chiller and a certain amount of free cooling. Ecologically optimal for the chilled water production is a combination of an electrical compression chiller and a photovoltaic system for the electricity production.

## Conclusion

Compared to conventional gas boilers, CHP-systems achieve a reduction of the environmental impact from 20% to over 40%. Compared to the reference system with a heat pump, the environmental benefit is significantly lower and only available in buildings with a high supply temperature for heating.

The main target for future developments of CHP-systems should be the increase of the electrical efficiency without a drawback in total efficiency. Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) seem to have the most promising starting position to reach this goal if the cost problem can be solved. For CHP-applications with low power demand efficient low cost systems, which are easy to operate are needed in order to reach a mass market.

Advantageous applications for CHP-systems are:

- Applications with a high supply temperature requirement, such as industry, hospitals etc.
- Applications in non renovated buildings where a gas boiler has to be replaced (high supply temperatures of the heating system)
- Domestic hot water production in large buildings with heat pump heating system
- District heating networks in combination with heat pumps

## 1. Ausgangslage

### 1.1. HINTERGRUND DIESER UNTERSUCHUNG

Neue Systeme zur kombinierten Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung (WKK) in stationären Anwendungen im kleinen wie auch mittleren Leistungsbereich stehen an der Schwelle der Markteinführung (Mini BHKW, Mikro-Gasturbinen) oder in der Pilot- und Demonstrationsphase (Brennstoffzelle, Stirlingmotoren).

Die ökologischen Auswirkungen einzelner Systeme wurde bereits untersucht (z.B. in [1], [2], [3], [4]). Eine gesamtheitliche Aussage, welche Systeme oder Systemkombinationen in welchem Einsatzgebiet das grösste Potential und aus ökologischer Sicht den grössten Nutzen haben, ist jedoch noch offen.

### 1.2. ABSICHT

Für die Entwicklung zukünftiger Anwendungen ist es daher wichtig zu wissen, in welchen Einsatzgebieten (Temperaturniveau der benötigten Wärme bzw. Kälte) und in welchen Systemkombinationen (z.B. Wärmepumpe, Solaranlage, etc.) diese Technologien sowohl technisch, ökologisch aber auch wirtschaftlich optimal einsetzbar sind.

Damit können die noch notwendigen Entwicklungslücken erkannt werden und notwendige Rahmenbedingungen für eine Verbreitung der sinnvollen Anwendungen geschaffen werden. Für die Betrachtung der Verfügbarkeit der zu untersuchenden Technologien wird der Zeitraum bis 2010 einbezogen (Zeitpunkt der erwarteten Markteinführung).

Neben der Evaluation relevanter Einsatzgebiete neuer WKK-Technologien werden auch sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Technologien einbezogen. Die Bewertung erfolgt aufgrund der technisch-/ wirtschaftlichen Eignung, der ökologischen Vorteile (durch Life Cycle Analysis) sowie durch eine Bewertung der Stärken und Schwächen der Systeme.

## 2. Zielsetzung und Vorgehen

### 2.1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL

Hauptziel ist die technische und ökologische Bewertung verschiedener WKK-Systeme und Systemkombinationen bezüglich ihrer Eignung und ihrem Potential für verschiedene Einsatzgebiete. Abschätzung der dadurch möglichen Steigerung der Umwelteffizienz. Kritische Parameter und notwendige Rahmenbedingungen sollen aufgezeigt werden. Folgende Ergebnisse werden erwartet:

- Matrix mit Anwendungsmöglichkeiten im stationären Bereich für die Systeme und Systemkombinationen mit einer Bewertung der Eignung und der zu erwarteten Effizienzsteigerung
- Ökologische Bewertung der betrachteten Systeme (Datenbasis ecoinvent 1.3) mit Sensitivitätsanalyse für kritische Parameter (z.B. erreichte Nutzungsgrade). Vergleich zu energieeffizienter konventioneller Technologie (getrennte Produktion von Strom und Wärme)
- Aufzeigen der bestehenden Lücken und Entwicklungsbedarfs aus technischer und ökologischer Sicht sowie in Bezug auf die Rahmenbedingungen (z.B. Förderungen, Einspeisevergütungen, etc.)

### 2.2. ABGRENZUNG

Die Datensätze der Untersuchung "Life cycle inventories of bioenergy" [5], welche Ökobilanzdaten von Bioenergie entsprechend der ecoinvent Qualitätsrichtlinie untersucht, werden einbezogen.

Deutsche und internationale Forschungsprojekte zu WKK-Systemen: „Transformation and Innovation in Power Systems“ ([www.tips-project.de](http://www.tips-project.de)) finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie IEA/ECBCS Annex 42 „The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems“ (<http://cogen-sim.net>) [6].

Nicht untersucht wird in diesem Projekt die zu erwartenden Marktdurchdringung auf Basis der Lernkurven der Investitionskosten sowie der Preisentwicklung für fossiler Energien.

Die in der Studie erarbeiteten Inventardatensätze werden für eine Verwendung in der Datenbank ecoinvent im EcoSpold Format erstellt und gemäss den ecoinvent Richtlinien in einem separaten bericht dokumentiert [7]. Diese Daten werden in der Datenbank ecoinvent Version 2.0 integriert und stehen somit für weitergehende Untersuchungen zur Verfügung.

## 2.3. VORGEHEN

Die Vorgehensweise kann in drei Hauptschritte eingeteilt werden, welche nachfolgend kurz erläutert werden:

- Festlegung der einbezogenen Systeme und Einsatzgebiete
- Zusammenragen Systemkenngrößen und der Ökobilanzdaten. Dokumentation im EcoSpold Format. Dokumentation der Sachbilanzen im Rahmen des Datenbestandes 2.0 von ecoinvent.
- Ökologische Bewertung. Vergleich zu konventioneller „Best Technology“
- Erstellen einer Anwendungs- und Eignungsmatrix

Die Vorgehensweise und die Resultate werden zur Sicherung der Datenqualität durch ein externes Review überprüft. Für die Sachbilanzdaten wird das Review gemäss ecoinvent Richtlinien durchgeführt.

## 3. Untersuchungsmethodik

### 3.1. FESTLEGUNG DER EINBEZOGENEN SYSTEME UND EINSATZGEBIETE

Die Festlegung der in die Betrachtung einbezogenen Systeme, Systemkombinationen sowie der jeweils relevanten Energieträger bildet eine wichtige Grundlage für den Rahmen der Untersuchung. Ebenso ist die Festlegung der in die Untersuchung einbezogenen Einsatzgebiete (Temperaturniveaus) in diesem Schritt vorzunehmen. Folgende WKK-Systeme sind für die Untersuchung vorgesehen:

Tabelle 3.1 Einbezogene WKK-Systeme

| Erzeugungsseite (Strom / Wärme)             |                                   |                                | Nachfrageseite (Wärme- / Kältebedarf) |  |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| Stromerzeugung                              | Nahwärme-WKK                      | Gebäude WKK                    | Wärme- / Kältebezug                   | Temperaturniveau                       |
| GuD-Kraftwerk<br>(Pel = 400 MW)             | BHKW<br>(Erdgas, Biogas)          | Mini BHKW<br>(Pel = 5 kW)      | ab el. Wärmepumpe /<br>Kältemaschine  | Niedertemperatur<br>Heizung 30-40°C    |
| Brennstoffzellenkraftwerk<br>(Pel = 180 kW) | Brennstoffzelle<br>(Pel = 125 kW) | Brennstoffzelle<br>(Pel = 2kW) | ab Nahwärmenetz                       | Nutzwärme 60°C<br>Warmwasser           |
| Photovoltaik                                | Holz-WKK                          | Stirlingmotor<br>(Pel = 3 kW)  | ab Gebäude-WKK                        | Nutzwärme 80°C<br>Heizung / Prozesse   |
|   | Mikro Gasturbine (Pel bis 100 kW) |                                | ab Absorptionskältemaschine           | Kälte 14-18°C z.B.<br>Kühlung mit Tabs |
|   |                                   |                                |                                       | Kälte 6°C allg.<br>Kühlzwecke          |

Als Energieträger für die Strom bzw. Wärmeerzeugung werden Erdgas, Biogas, Holzschnitzel, Holzpellets, Solarenergie und Umweltwärme einbezogen (in Abhängigkeit der Einsatzmöglichkeiten des Systems).

Es werden sinnvolle Kombinationen der Prozesskette vom Energieträger, über die Stromerzeugung, Nahwärme, Gebäude systeme bis zu dem Temperaturniveau des Abnehmers (Wärme / Kälte) betrachtet. Als Basisvariante für den Vergleich wird die Kombination GuD-Kraftwerk und Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe festgelegt.

Für die Bewertung der Umweltbelastung der Strom- und Wärme production des WKK-Systems wird eine Betrachtung über das gesamte Allokationsspektrum vorgenommen. Der Vergleich bildet dabei die getrennte Strom- und Wärme production mit dem Referenzsystem (Basis Kombination GuD-Kraftwerk und Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe). Für die Bewertung wird bei den WKK-Systemen davon ausgegangen, dass sie wärmegeführt betrieben werden.

Aussagen zur Gleichzeitigkeit der Strom- und Wärmenutzung sowie zur Unterscheidung von Stromerzeugung im Sommer, Winter, Band- oder Spitzenlast erfolgen nur qualitativ.

### **3.2. SYSTEMKENNGRÖSSEN**

Das Zusammentragen der aktuellen und zukünftig (Zielgröße Jahr 2010) erwarteten Kenngrößen der betrachteten Systeme bildet die Datenbasis für die Untersuchung und die nachfolgende Bewertung. Hier werden Daten wie z.B. Anlagengrößen, Nutzungsgrade, Emissionen, spezifische Kosten, etc. erfasst. Die Erhebung dieser Daten erfolgt aus aktuellen Literaturquellen oder direkt durch Herstellerinformationen.

### **3.3. SACHBILANZDATEN**

Für die ökologische Bewertung werden weitere Daten zur Materialisierung der einzelnen Systeme benötigt. Dieser Schritt beinhaltet das Zusammentragen und Dokumentieren der Ökobilanzdaten zu den Systemen bestehend aus Prozessen zu den Energieträgern, Systemkomponenten und der benötigten Systemperipherie. Basis dazu liefern die bereits in der Datenbank ecoinvent [8] verfügbaren Prozesse, aktuelle Untersuchungen [2] Herstellerinformationen sowie durch eigene Erhebungen zu den verschiedenen Systemen. Die Basisdaten zu den Biogas Prozessen stammen aus [5]. Um eine Datennutzung in ecoinvent zu ermöglichen werden die erhobenen Daten im EcoSpold Format dokumentiert. Die Dokumentation der Sachbilanzen erfolgt in einem separaten Bericht [7] in Englisch (Veröffentlichung im Rahmen des ecoinvent Datenbestandes 2.0).

### **3.4. BEWERTUNG UND INTERPRETATION**

Ein wichtiges Ergebnis der Studie ist die Ökologische Bewertung der betrachteten Systeme, sowie der Vergleich zu konventioneller „Best Technology“ (GuD-Kraftwerk + Wärmepumpe). Die Resultate werden für den Vergleich der Technologien und System pro kWh Wärme (bzw. Kälte) sowie Strom ausgewiesen. Es wird auch eine Sensitivitätsanalyse für kritische Parameter (z.B. erreichte Nutzungsgrade) durchgeführt. Die Sachbilanzen werden anschliessend mit verschiedenen Bewertungsmethoden bewertet und die Resultate werden interpretiert. Für die Bewertung der Sachbilanzen kommen Ecoindicator 99, die Methode der ökologischen Knaptheit (UBP 06), der kumulierte nichterneuerbare Primärenergieaufwand ( $KEA_{fossil} + nuklear}$ ) und die Berechnung des Klimaänderungspotentials zur Anwendung.

### **3.5. ANWENDUNGSMATRIX**

Die Erstellung einer Matrix der Anwendungsmöglichkeiten mit Bewertung der Eignung aus technisch-/wirtschaftlicher und ökologischer Sicht bildet eine übersichtliche Zusammenfassung der erarbeiteten Resultate. In diesem Arbeitsschritt werden auch die Lücken und der Entwicklungsbedarf der Systeme aufgezeigt (Stärken / Schwächen). Die Anwendungsmatrix beinhaltet eine Synthese aller Auswertungen.

## **4. Systemgrenzen und Festlegungen**

### **4.1. FUNKTIONELLE EINHEIT**

Als funktionelle Einheit der Systemkombinationen wird die Herstellung, den Betrieb, die Erneuerung und die Entsorgung aller Komponenten bezogen auf 1 kWh produzierte Wärme (bzw. Kälte) sowie Strom definiert. Für die Berechnung werden die Aufwendungen für Herstellung, Erneuerung und Entsorgung entsprechend den jeweiligen Annahmen zur Anlagenlebensdauer und den Vollbetriebsstunden bezogen. Mit dem Bezug der Belastungen aus dem gesamten Lebenszyklus (inkl. Betrieb) auf die produzierte Wärme und Strom in einer Darstellung über den gesamten Allokationsbereich wird ein direkter Vergleich der verschiedenen Systemkombinationen für verschiedene Rahmenbedingungen möglich. Damit wird die Interpretation der Resultate stark erleichtert.

Für die Sensitivitätsanalyse werden die Resultate auf 1 kWh produzierte Wärme bezogen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der von der WKK Anlage erzeugte Strom vollständig für den Betrieb einer Wärmepumpe (oder Kältemaschine) verwendet wird.

## 4.2. SYSTEMGRENZEN UND BERÜCKSICHTIGTE ELEMENTE

Folgende Elemente wurden in die Betrachtungen einbezogen:

- Bereitstellung der verwendeten Endenergie (Erdgas, Biogas, Holzpellets, etc.)
- Emissionen aus dem Betrieb der Anlage zur Energieumwandlung
- Kraftwerk, Wärme- Kraftkopplungsanlage, Wärmepumpe oder Kältemaschine zur Energieumwandlung. Materialbedarf, Herstellungsenergie und Transporte für Erstellung, Unterhalt und Entsorgung der notwendigen Komponenten

Für die Sensitivitätsanalyse werden folgende Parameter variiert:

- Nutzungsgrad der Energieumwandlung im Kraftwerk bzw. der Wärme- Kraftkopplungsanlage (thermischer und elektrischer Wirkungsgrad)
- Je nach Relevanz im System wird der Einfluss der Emissionshöhe von Luftschadstoffen (v.A. PM bzw. NOx) analysiert
- Arbeitszahl der Energieumwandlung der Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen

Neben den WKK-Systemen und dem Vergleichssystem mit einer Wärmepumpe werden in die Betrachtung auch reine Wärmeproduktionssysteme (Kessel, Diffusions-Absorptions Wärmepumpe) einbezogen. Die innerhalb der Systemgrenze berücksichtigten Elemente sind in Abbildung 4.1, Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 dargestellt.

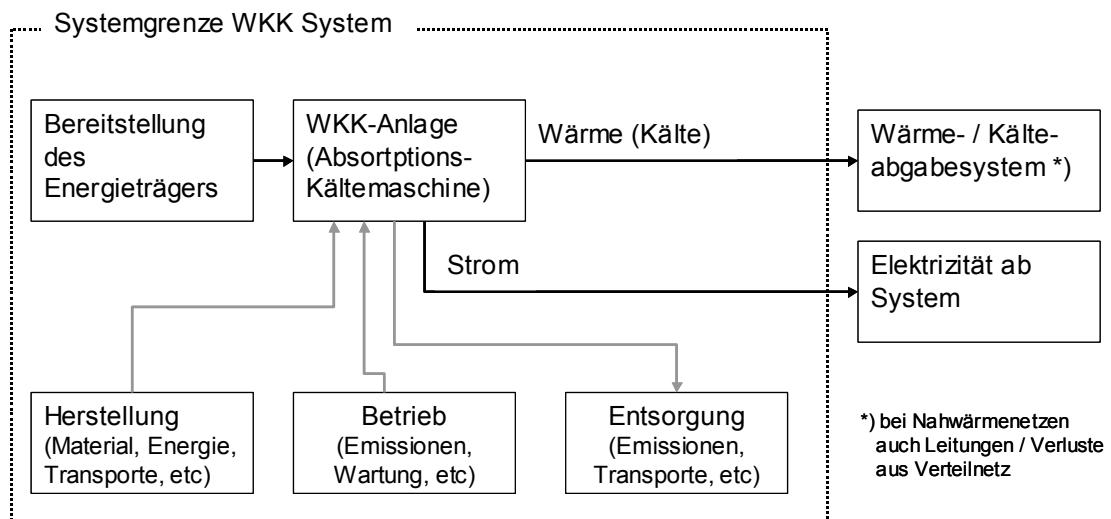


Abbildung 4.1 Systemgrenze der Ökobilanzbetrachtung für die WKK-Systeme

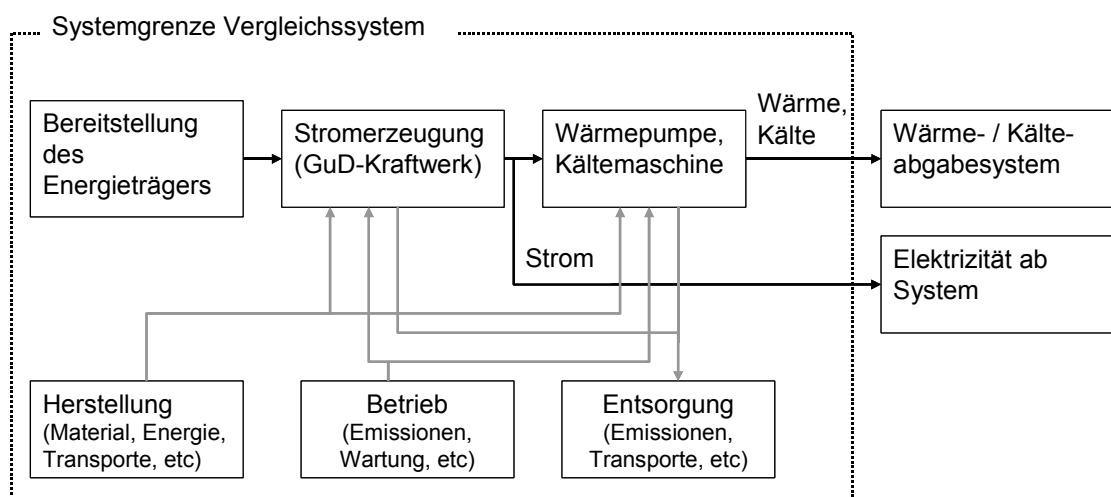


Abbildung 4.2 Systemgrenze der Ökobilanzbetrachtung für das Vergleichssystem

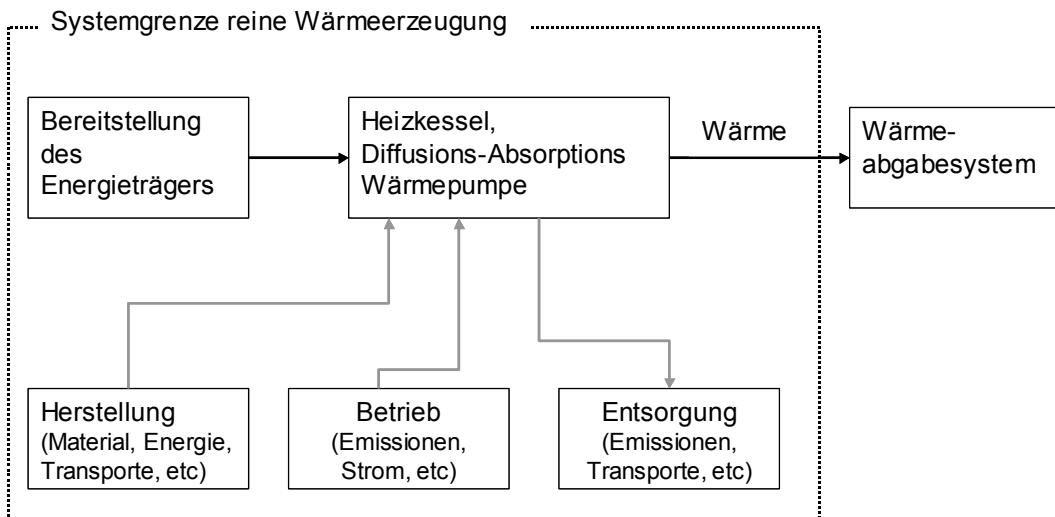


Abbildung 4.3 Systemgrenze der Ökobilanzbetrachtung für reine Wärmeproduktionssysteme (Kessel, Diffusions-Absorptions Wärmepumpe)

#### 4.2.1 Nicht berücksichtigte Elemente

Folgende Elemente und Prozesse werden nicht berücksichtigt:

- Wärme- bzw. Kälteverteilung im Gebäude (durch die Definition von typischen Temperaturen für die Wärmeabgabe wird von vergleichbaren Verlusten der Wärmeverteilung ausgegangen)
- Bei den Nahwärme WKK-Systemen wird das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale)

Separate Aggregate zur Spitzendeckung (z.B. Spitzenkessel, Kältemaschinen) werden nur in speziellen Auswertungen zu den Systemkombinationen berücksichtigt.

### 4.3. WEITERE FESTLEGUNGEN

#### 4.3.1 Gleichzeitigkeit

Für die Bewertung der Stromverwendung wird nur die jahreszeitliche Gleichzeitigkeit berücksichtigt (Aussentemperaturabhängigkeit). Verschiebungen von Angebot und Nachfrage, die auf abweichende Regelstrategien im Tagesverlauf (z.B. Speicherbewirtschaftung etc.) beruhen werden nicht einbezogen.

#### 4.3.2 Betriebsdauer

Es wird von einer Systemauslegung für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb ausgegangen. Für Grossanlagen (Kraftwerke) bedeutet dies einen ganzjährigen Betrieb (8'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr). Für WKK-Anlagen in Nahwärmennetzen wird von einem Betrieb mit mehr als 4'500 Vollbetriebsstunden pro Jahr ausgegangen. Für kleine Anlagen (bis 10 kWel) ist die Betriebsdauer stark von der Gebäudegrösse, dem Wärmebedarf und der Art der Einbindung abhängig. Es wird von einer Betriebsdauer von etwa 3'500 Vollbetriebsstunden pro Jahr ausgegangen. Bei monovalenten Anlagen ohne Spitzenkessel wird dieser Wert jedoch meist nicht erreicht. Solche Anlagen (meist für Einfamilienhäuser) erreichen maximal etwa 3'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

#### 4.3.3 Allokation und Cut-off Kriterien

Entstehen bei Prozessen neben dem interessierenden Erzeugnis noch andere Produkte (Koppelprodukte, Nebenprodukte, Abfälle) so muss eine Allokation der Aufwendungen und Emissionen vorgenommen werden, sofern diese nicht durch eine Erweiterung der Systemgrenzen vermieden werden kann. Die Allokation von Produkt und Koppelprodukt wird jeweils aufgrund von physikalischen oder ökonomischen Gesetzmässigkeiten vorgenommen und ist in der jeweiligen

Sachbilanz dokumentiert. Die Stromproduktion in der WKK-Anlage wird in den Resultatdarstellungen jeweils über den gesamten Allokationsbereich dargestellt.

Bei Prozessabfällen, welche rezykliert oder thermisch verwertet werden können (Metallspäne, Spritzgussabfälle, Kunststoffteile, etc.) sowie für rezyklierte Teile bei der Entsorgung des Systems, wird eine Strategie ohne Gutschriften oder Allokation von Aufwendungen gewählt (cut-off Ansatz). Dieser Ansatz führt zu folgenden Festlegungen:

- Keine Energie- und Umweltbelastungs-Gutschrift für Energierückgewinnung (z.B. von Kunststoff in KVA).
- Es erfolgt keine Gutschrift für das Rezyklieren, aber auch keine Belastung durch den üblichen Recyclingprozess und die dafür notwendigen Transporte.
- Belastung des Rezyklates nur mit den durch den Recyclingprozess verursachten Umweltbelastungen.

#### 4.3.4 Verwendete Inventardaten (ecoinvent)

Als Datengrundlage für diverse Basisprozesse werden die Sachbilanzdaten und die bewerteten Ergebnisse aus der Datenbank ecoinvent Datenbestand 1.3 (2006) verwendet ([www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)) [8]. Für die Betrachtungen mit Erdgas als Brennstoff wurde ein für den Erdgasbezug ab Schweizer Niederdrucknetz zutreffender Prozess verwendet (Erdgas, Niederdruck, an Abnehmer). Für die Betrachtungen mit Biogas als Brennstoff wurde ein für den Biogasbezug ab Schweizer Niederdrucknetz zutreffender Prozess verwendet (Methan, 96 Vol.-%, aus Biogas, Niederdruck, an Abnehmer). Dieser Prozess beinhaltet eine Aufbereitung des Biogases.

#### 4.3.5 Angewendete Bewertungsmethoden

Zur Darstellung der Resultate werden die Sachbilanzdaten mit den Wirkungskategorien der Bewertungsmethode Ecoindicator 99, Typus Hierarchist (H/A) bewertet [9]. Dabei werden folgende Schutzgüter unterschieden:

- Menschliche Gesundheit: Wirkungskategorien Klimawandel, Ozonabbau, Atemwegserkrankungen, Krebserregende Stoffe und Radioaktive Strahlung
- Ökosystemqualität: Wirkungskategorien Versauerung & Eutrophierung, Ökotoxizität und Landnutzung
- Ressourcen: Wirkungskategorien Fossile- und Mineralische Ressourcen

Als weitere vollaggregierende Methode wird für die Bewertung der Resultate die Methode der ökologischen Knappheit angewendet. Es wird hierzu die 2006 neu überarbeitete Version dieser Methode (Umweltbelastungspunkte UBP'06) eingesetzt [10]. Wo dies von Interesse oder von Bedeutung ist werden die Resultate zusätzlich mit der Version von 1997 (Umweltbelastungspunkte UBP'97, [11]) dargestellt.

Im weiteren wird eine Bewertung der Substanzen, welche zur Verstärkung des Treibhauseffekts beitragen (global warming potential, GWP 100) nach den Grundlagen von IPCC [12] durchgeführt. Es werden die Faktoren für einen Zeithorizont von 100 Jahren berücksichtigt.

Zudem wird der kumulierte Energieaufwand für nichterneuerbare Energie (fossile und nukleare Energieträger) berechnet. Bewertungsgrundlagen gemäss [13].

## 5. Systemcharakterisierung

### 5.1. UNTERSCHIEDUNG DER SYSTEME

Für die Untersuchung wurden zur Differenzierung der Einsatzgebiete fünf verschiedene Temperaturniveaus der Nutzwärme unterschieden. Damit können die Resultate für unterschiedliche Anwendungen übertragen werden bzw. die Eignung einzelner Systemkombinationen für bestimmte Anwendungen hervorgehoben werden. Die wichtigsten Kennwerte der betrachteten Systemvarianten und der unterschiedenen Temperaturniveaus sind in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

### 5.2. NIEDERTEMPERATURWÄRME 30-40°C

In Gebäuden mit gutem Dämmstandard kann mit tiefen Heizungstemperaturen gefahren werden. Dadurch werden für die Wärmebereitstellung keine hohen Temperaturen benötigt. Folgende Systemkombinationen werden für diesen Anwendungsfall untersucht:

#### 5.2.1 WKK-Systeme

- Wärme- und Stromerzeugung in Gebäude-WKK mit Erdgas<sup>1</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in Gebäude-WKK mit Biogas<sup>1</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in Stirling-Gebäude-WKK mit Holzpellets

#### 5.2.2 Vergleichssysteme mit getrennter Erzeugung

- Basisvergleich Erdgas: Stromerzeugung zentral in GuD-Kraftwerk (Erdgas); Wärmeerzeugung dezentral mit Wärmepumpe; Strom für Wärmepumpe aus GuD-Kraftwerk (Erdgas)
- Basisvergleich Biogas: Stromerzeugung zentral in GuD-Kraftwerk (Biogas); Wärmeerzeugung dezentral mit Wärmepumpe; Strom für Wärmepumpe aus GuD-Kraftwerk (Biogas)
- Option Wärmeerzeugung Holz: Wärmeerzeugung dezentral mit Holzpelletkessel
- Option: Stromerzeugung zentral in GuD-Kraftwerk (Erdgas); Wärmeerzeugung mit Erdgas oder Biogas dezentral mit einer Diffusions-Absorptions Wärmepumpe
- Option: Stromerzeugung zentral in Brennstoffzellen-Kraftwerk (SOFC-GT, Betrieb mit Erdgas oder Biogas, ohne Wärmenutzung); Wärmeerzeugung dezentral mit Wärmepumpe. Diese Variante wird im Rahmen eines Vergleiches verschiedener zentraler Stromerzeugungsvarianten betrachtet (siehe Kapitel 8.4).

#### 5.2.3 Nicht betrachtete Systemkombinationen

Nicht untersucht werden in diesem Anwendungsfall folgende Systemkombinationen:

- Nahwärme WKK: Bei einem Nahwärmenetz liegt die Auskopplungstemperatur meist im Bereich von 60-80°C. Daher werden diese Systeme in diesem Anwendungsfall nicht untersucht
- Mikro-Gasturbinen: Durch die hohe Auskopplungstemperatur sind Anwendungen im Niedertemperaturniveau für diese Anlagen wenig sinnvoll. Daher wird auf eine Untersuchung dieser Systemkombination verzichtet
- Stromerzeugung mit Photovoltaik: Da bei dieser Systemkombination die Stromproduktion sich entgegen der Nachfrage verhält wird diese Kombination nicht weiter untersucht

---

<sup>1</sup> motorisches Klein-BHKW, PEM-Brennstoffzelle, Stirling Motor

#### 5.2.4 Verwendete Systemkenndaten

Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Systemkombinationen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Aufgrund dieser Daten werden auch die zu inventarisierenden Systeme bzw. die zur Anwendung kommenden Ökobilanzdaten ausgewählt.

*Tabelle 5.1 Charakterisierung der untersuchten Systeme für Niedertemperaturwärme*

| Brennstoff     | Hauptsystem         | el. Leistung         | Stromproduktion    | Wärmeproduktion               |
|----------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Erdgas, Biogas | GuD-Kraftwerk       | 400 MW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$ | Wärmepumpe JAZ = 3.5          |
| Erdgas         | Gasmotor Mini-BHKW  | 5 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 25\%$ | in WKK mit $\eta_{th} = 65\%$ |
| Erdgas, Biogas | PEM-Brennstoffzelle | 2 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 32\%$ | in WKK mit $\eta_{th} = 55\%$ |
| Erdgas, Biogas | Stirling Motor      | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 26\%$ | in WKK mit $\eta_{th} = 70\%$ |
| Holzpellets    | Stirling Motor      | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 25\%$ | in WKK mit $\eta_{th} = 70\%$ |
| Erdgas, Biogas | DAP Wärmepumpe *)   | -                    | -                  | Arbeitszahl = 1.45            |

\*) Diffusions-Absorptions Wärmepumpe als Vergleichsvariante für hocheffiziente Heizwärmeproduktion; Arbeitszahl für einen Betrieb mit einer kurzen Erdsonde gültig (mittlere Quellentemperatur 0-5°C).

Wärmepumpen erreichen bei diesen Voraussetzungen günstige Jahresarbeitszahlen. Für die Jahresarbeitszahl der im System berücksichtigten Wärmepumpe wurde ein Wert von 3.5 angesetzt (Sole-Wasser Wärmepumpe). Da dieser Wert je nach Quelle für die Umgebungswärme (Luft, Sole, Wasser) variiert und auch von der Auslegung und Güte der Anlage abhängig ist, wird die Jahresarbeitszahl in der Sensitivitätsanalyse zwischen 2 und 5 variiert.

### 5.3. WÄRMEABGABE 60°C

Für die Warmwassererzeugung oder in bestehenden Gebäuden mit Radiatorheizung muss die Wärmeabgabe auf höherem Temperaturniveau erfolgen. Dies beeinflusst vor allem die Leistungskennzahlen der im System eingebundenen Elektrowärmepumpe. Folgende Systemkombinationen werden für diesen Anwendungsfall zusätzlich zu den bereits für den Anwendungsfall mit Niedertemperaturwärme (Kapitel 5.2) vorgestellten Systeme untersucht:

#### 5.3.1 WKK-Systeme

- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Erdgas<sup>2</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Biogas<sup>2</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Holzschnitzel<sup>3</sup>

#### 5.3.2 Vergleichssysteme mit getrennter Erzeugung

Siehe Kapitel 5.2.2

#### 5.3.3 Nicht betrachtete Systemkombinationen

Nicht untersucht werden in diesem Anwendungsfall folgende Systemkombinationen:

- Stromerzeugung mit Photovoltaik: Da bei dieser Systemkombination die Stromproduktion sich entgegen der Nachfrage verhält wird diese Kombination nicht untersucht

#### 5.3.4 Verwendete Systemkenndaten

Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Systemkombinationen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Aufgrund dieser Daten werden auch die zu inventarisierenden Systeme bzw. die zur Anwendung kommenden Ökobilanzdaten ausgewählt.

<sup>2</sup> motorisches BHKW, Mikro Gasturbine, SOFC-Brennstoffzelle

<sup>3</sup> ORC Prozess

Tabelle 5.2 Charakterisierung der untersuchten Systeme für Wärmeabgabe 60°C

| Brennstoff     | Hauptsystem             | el. Leistung         | Stromproduktion      | Wärmeproduktion                 |
|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|
| Erdgas, Biogas | GuD-Kraftwerk           | 400 MW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$   | Wärmepumpe JAZ = 2.5            |
| Erdgas, Biogas | Gasmotor-BHKW           | 160 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 32\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 55\%$   |
| Erdgas, Biogas | Mikro Gasturbine        | 100 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 30\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 45\%$   |
| Erdgas, Biogas | SOFC-GT Brennstoffzelle | 180 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 22\%$   |
| Erdgas, Biogas | SOFC-Brennstoffzelle    | 125 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 47\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 33\%$   |
| Holzschnitzel  | ORC-Turbine             | 335 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 15\% *$ | in WKK mit $\eta_{th} = 65\% *$ |
| Erdgas         | Gasmotor Mini-BHKW      | 5 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 25\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 65\%$   |
| Erdgas, Biogas | PEM-Brennstoffzelle     | 2 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 32\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 55\%$   |
| Erdgas, Biogas | Stirling Motor          | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 24\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 67\%$   |
| Holzpellets    | Stirling Motor          | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 23\%$   | in WKK mit $\eta_{th} = 67\%$   |
| Erdgas, Biogas | DAP Wärmepumpe **)      | -                    | -                    | Arbeitszahl = 1.32              |

\*) Werte abhängig von Systemauslegung ( $\eta_{el} = 10\%$ ,  $\eta_{th} = 70\%$ : thermisch optimiert,  $\eta_{el} = 20\%$ ,  $\eta_{th} = 60\%$ : elektrisch optimiert)

\*\*) Diffusions-Absorptions Wärmepumpe als Vergleichsvariante für hocheffiziente Heizwärmeproduktion; Arbeitszahl für einen Betrieb mit einer kurzen Erdsonde gültig (mittlere Quellentemperatur 0-5°C).

Wärmepumpen erreichen bei 60°C Vorlauftemperatur ungünstige Jahresarbeitszahlen. Für die Jahresarbeitszahl der im System berücksichtigten Wärmepumpe wurde ein Wert von 2.5 angesetzt. Da dieser Wert je nach Quelle für die Umgebungswärme (Luft, Sole, Wasser) variiert und auch von der Auslegung und Güte der Anlage abhängig ist, wird die Jahresarbeitszahl in der Sensitivitätsanalyse zwischen 2 und 5 variiert.

Bei den Nahwärme WKK-Systemen wird das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale)

#### 5.4. WÄRMEABGABE 80°C

Für Nahwärmenetze mit älteren Gebäuden bzw. Wärmedarf für Warmwasser sowie für Prozesswärme werden Temperaturen von 80°C oder mehr benötigt. Für diesen Anwendungsfall wird für die Wärmeerzeugung im Vergleichssystem nicht eine Wärmepumpe mit einem Temperaturniveau von 80°C verwendet, da dieses Niveau mit üblichen Wärmepumpen nicht erreicht wird und auch nicht sinnvoll ist. Teilweise werden solche Verbunde aber auch als Kombination einer Wärmepumpe (Temperaturen bis 55°C) und einem Spitzenkessel (Abdeckung von Leistungsspitzen und Temperaturen >55°C) realisiert. Diese Systemkombinationen werden in Kapitel 9.3 diskutiert. Für die Wärmeerzeugung wird der Vergleich auf Basis eines modernen Gaskessels (ohne Wärmepumpe) durchgeführt, da dies eine oft angewendete, günstige Lösung mit guter Effizienz ist.

##### 5.4.1 WKK-Systeme

Für die WKK-Systeme verändert sich durch die höhere Wärmeabgabedemperatur der Nutzungsgrad nur leicht. Daher erfolgt die Beurteilung dieses Anwendungsfalls mit den Daten der Wärmeabgabe mit 60°C im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der Nutzungsgrade.

##### 5.4.2 Vergleichssysteme mit getrennter Erzeugung

Gegenüber der in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Systemen wird aufgrund des hohen Temperaturniveaus (für Wärmepumpe ungeeignet) ein Vergleich mit einer Gasheizung als Basisvariante für Erdgas und Biogas (Heizungsbetrieb mit Biogas) gewählt.

##### 5.4.3 Nicht betrachtete Systemkombinationen

Aus technischen Gründen sind folgende Systeme für eine Wärmeabgabe auf 80°C Temperaturniveau ungeeignet (zu tiefe Abgabedemperatur):

- Reine Wärmepumpen Systeme (Vergleichssysteme mit getrennter Produktion)
- Kleine Gebäude WKK-Systeme: In kleinen Gebäudesystemen liegt die Systemtemperatur selten bei 80°C. Daher werden Mini-BHKW's und Stirling Motoren in diesem Anwendungsfall nicht untersucht
- PEM-Brennstoffzelle (Abgabeterminatur max. 70°C)

## 5.5. KÄLTEABGABE 6-8°C

Für die Kaltwassererzeugung für Klimakälte mit Luftentfeuchtung werden meist Vorlauftemperaturen von ca. 6-8°C verwendet (Rücklauf 12-14°C). Für die Kälteerzeugung wird die Wärme aus der WKK-Anlage in einer Absorptions-Kältemaschine genutzt. Folgende Systemkombinationen werden für diesen Anwendungsfall untersucht:

### 5.5.1 WKK-Systeme

- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Erdgas<sup>4</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Biogas<sup>4</sup>
- Wärme- und Stromerzeugung in zentraler WKK-Anlage mit Holzschnitzel<sup>5</sup>

### 5.5.2 Vergleichssysteme mit getrennter Erzeugung

- Basisvergleich Erdgas: Stromerzeugung zentral in GuD-Kraftwerk (Erdgas); Kälteerzeugung dezentral mit elektrisch betriebener Kältemaschine; Strom für Kältemaschine aus GuD-Kraftwerk (Erdgas)
- Basisvergleich Biogas: Stromerzeugung zentral in GuD-Kraftwerk (Biogas); Kälteerzeugung dezentral mit elektrisch betriebener Kältemaschine; Strom für Kältemaschine aus GuD-Kraftwerk (Biogas)
- Stromerzeugung mit Photovoltaikanlage; Kälteerzeugung mit elektrisch betriebener Kältemaschine; Strom für Kältemaschine aus Photovoltaikanlage
- Option: Stromerzeugung zentral in Brennstoffzellen-Kraftwerk (SOFC-GT, Betrieb mit Erdgas oder Biogas, ohne Wärmenutzung); Kälteerzeugung dezentral mit elektrisch betriebener Kältemaschine. Diese Variante wird im Rahmen eines Vergleiches verschiedener zentraler Stromerzeugungsvarianten betrachtet (siehe Kapitel 8.4).

### 5.5.3 Nicht betrachtete Systemkombinationen

Nicht untersucht werden in diesem Anwendungsfall folgende Systemkombinationen:

- Stromerzeugung mit Klein-WKK Systemen<sup>6</sup>: Da Kälteanwendungen meist grössere Gebäude betreffen wäre die Abwärmemenge für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine zu gering

### 5.5.4 Verwendete Systemkenndaten

Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Systemkombinationen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Aufgrund dieser Daten werden auch die zu inventarisierenden Systeme bzw. die zur Anwendung kommenden Ökobilanzdaten ausgewählt.

Für die Kältearbeitszahl der im System berücksichtigten konventionellen Kältemaschine wurde ein Wert von 4 angesetzt. Dies setzt eine sehr effiziente Anlagenkonfiguration voraus (Pumpen, Rückkühlung). Dieser Wert variiert je nach Kühlmedium für die Abgabe der anfallenden Abwärme (Luft, Wasser) und ist auch stark von der Auslegung und Güte der Anlage abhängig. Daher wird die Kältearbeitszahl in der Sensitivitätsanalyse zwischen 2 und 8 variiert.

<sup>4</sup> motorisches BHKW, Mikro Gasturbine, SOFC-Brennstoffzelle

<sup>5</sup> ORC Prozess mit Holzschnitzelfeuerung (Organic Rankine Cycle)

*Tabelle 5.3 Charakterisierung der untersuchten Systeme für Kälteabgabe 6-8°C*

| Brennstoff     | Hauptsystem             | el. Leistung         | Stromproduktion       | Kälteproduktion   |
|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|---|
| Erdgas, Biogas | GuD-Kraftwerk           | 400 MW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$    | Kältemaschine, AZ = 4   |
| (Sonne)        | Photovoltaik            | 3 kW <sub>el</sub>   | –                     | Kältemaschine, AZ = 4   |
| Erdgas, Biogas | Gasmotor-BHKW           | 160 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 32\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 39\%$ <sup>a)</sup>                     |
| Erdgas, Biogas | Mikro Gasturbine        | 100 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 30\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 32\%$ <sup>a)</sup> - 50% <sup>b)</sup> |
| Erdgas, Biogas | SOFC-GT Brennstoffzelle | 180 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 15\%$ <sup>a)</sup> - 24% <sup>b)</sup> |
| Erdgas, Biogas | SOFC-Brennstoffzelle    | 125 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 47\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 23\%$ <sup>a)</sup> - 36% <sup>b)</sup> |
| Holzschnitzel  | ORC-Turbine             | 335 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 15\%$ *) | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 46\%$ <sup>a)</sup> - 72% <sup>b)</sup> |

\*) Werte abhängig von Systemauslegung ( $\eta_{el} = 10\%$ ,  $\eta_{th} = 70\%$ : thermisch optimiert,  $\eta_{el} = 20\%$ ,  $\eta_{th} = 60\%$ : elektrisch optimiert)

<sup>a)</sup> Standardwert für 1-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Arbeitszahl von 0.7; Auskopplungstemperatur 90-120°C

<sup>b)</sup> Wert für 2-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Arbeitszahl von 1.1; Auskopplungstemperatur ab 140°C

## 5.6. KÄLTEABGABE 14-18°C

Für die Kaltwassererzeugung für Klimakälte ohne Luftentfeuchtung können höhere Vorlauftemperaturen (bis ca. 18°C) verwendet werden. Dadurch kann eine deutlich höhere Kältearbeitszahl der konventionellen Kältemaschine erreicht werden. Für die Kälteerzeugung aus der Wärme der WKK-Anlage wird ebenfalls eine Absorptions-Kältemaschine zugrundegelegt. Für diesen Anwendungsfall werden dieselben Systemkombinationen untersucht wie für die Kälteerzeugung mit 6-8°C Temperatur (siehe Kapitel 5.5).

### 5.6.1 Verwendete Systemkenndaten

Die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Systemkombinationen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Aufgrund dieser Daten werden auch die zu inventarisierenden Systeme bzw. die zur Anwendung kommenden Ökobilanzdaten ausgewählt.

Für die Kältearbeitszahl der im System berücksichtigten konventionellen Kältemaschine wurde hier aufgrund des geringeren Temperaturhubes ein Wert von 5 angesetzt. Dies setzt eine sehr effiziente Anlagenkonfiguration voraus (Pumpen, Rückkühlung). Dieser Wert variiert je nach Kühlmedium für die Abgabe der anfallenden Abwärme (Luft, Wasser) und ist auch stark von der Auslegung und Güte der Anlage abhängig. Daher wird die Kältearbeitszahl in der Sensitivitätsanalyse zwischen 2 und 8 variiert.

*Tabelle 5.4 Charakterisierung der untersuchten Systeme für Kälteabgabe 14-18°C*

| Brennstoff     | Hauptsystem             | el. Leistung         | Stromproduktion       | Kälteproduktion   |
|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|---|
| Erdgas, Biogas | GuD-Kraftwerk           | 400 MW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$    | Kältemaschine, AZ = 5   |
| (Sonne)        | Photovoltaik            | 3 kW <sub>el</sub>   | –                     | Kältemaschine, AZ = 5   |
| Erdgas, Biogas | Gasmotor-BHKW           | 160 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 32\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 44\%$ <sup>a)</sup>                     |
| Erdgas, Biogas | Mikro Gasturbine        | 100 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 30\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 36\%$ <sup>a)</sup> - 54% <sup>b)</sup> |
| Erdgas, Biogas | SOFC-GT Brennstoffzelle | 180 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 58\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 18\%$ <sup>a)</sup> - 26% <sup>b)</sup> |
| Erdgas, Biogas | SOFC-Brennstoffzelle    | 125 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 47\%$    | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 26\%$ <sup>a)</sup> - 40% <sup>b)</sup> |
| Holzschnitzel  | ORC-Turbine             | 335 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 15\%$ *) | ab Absorptions KM, $\eta_{Ka} = 52\%$ <sup>a)</sup> - 78% <sup>b)</sup> |

\*) Werte abhängig von Systemauslegung ( $\eta_{el} = 10\%$ ,  $\eta_{th} = 70\%$ : thermisch optimiert,  $\eta_{el} = 20\%$ ,  $\eta_{th} = 60\%$ : elektrisch optimiert)

<sup>a)</sup> Standardwert für 1-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Arbeitszahl von 0.8; Auskopplungstemperatur 90-120°C

<sup>b)</sup> Wert für 2-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Arbeitszahl von 1.2; Auskopplungstemperatur ab 140°C

<sup>6</sup> motorisches Klein-BHKW, PEM-Brennstoffzelle, Stirling Motor

## 6. Umweltbelastung von WKK-Anlagen

### 6.1. EINFÜHRUNG

Der folgende Vergleich der untersuchten WKK-Systeme erfolgt auf Basis des Energieinputs. Damit werden die von den einzelnen Anlagen erreichten Wirkungsgrad nicht in die Betrachtung einbezogen. Diese Betrachtung zeigt somit nicht die Effizienz der Systeme sondern nur die Umweltbelastung pro kWh Endenergieinput aufgeschlüsselt auf die folgenden fünf Teilbereiche:

- Infrastruktur: Beinhaltet die Herstellung der Anlage (Energie, Materialien, etc.)
- Unterhalt / Betrieb: Beinhaltet den Unterhalt der Anlage sowie benötigte Betriebsmittel
- Brennstoff: Beinhaltet die Umweltbelastung der Brennstoffbereitstellung
- CO<sub>2</sub> Emissionen: Beinhaltet die Umweltbelastung der im Betrieb verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Andere Emissionen: Beinhaltet die Umweltbelastung aus weiteren Emissionen aus dem Betrieb<sup>7</sup>

### 6.2. BETRIEB MIT ERDGAS

Beim Betrieb mit Erdgas sind die Umweltauswirkungen aus der Brennstoffbereitstellung und / oder den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung des verwendeten Erdgases bestimend für die Gesamtbela

Abbildung 6.1 zeigt die Resultate Bewertet mit Ecoindicator 99. Der Ressourcenbedarf für die Brennstoffbereitstellung wird in dieser Bewertungsmethode stark gewichtet (siehe Abbildung 6.2). Daher trägt das benötigte Erdgas für den Anlagenbetrieb bereits mit 86 bis 90% der Gesamtbela

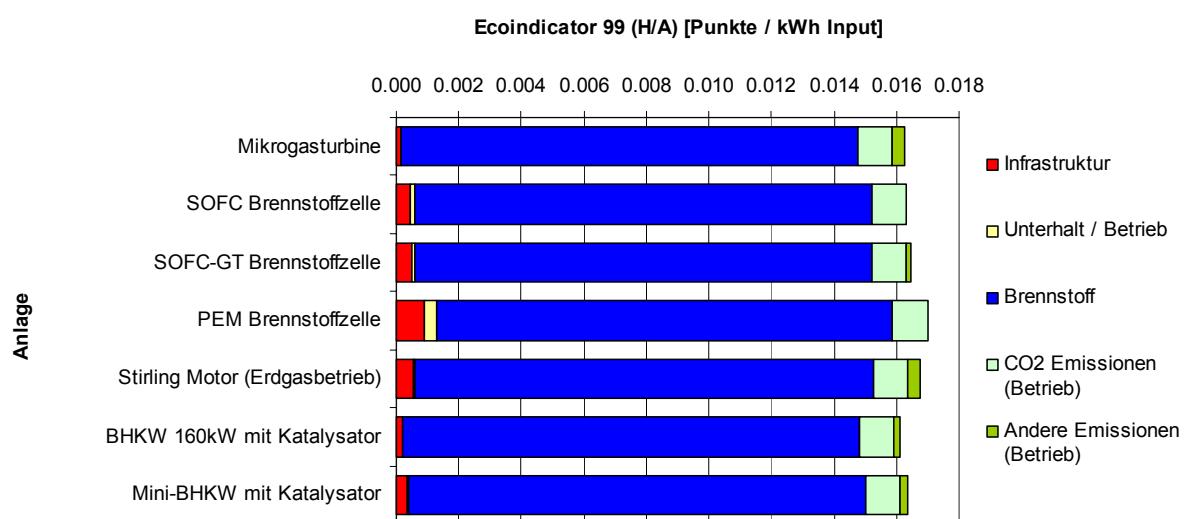


Abbildung 6.1 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

<sup>7</sup> Insbesondere NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen sowie weitere Luft- und Wasseremissionen

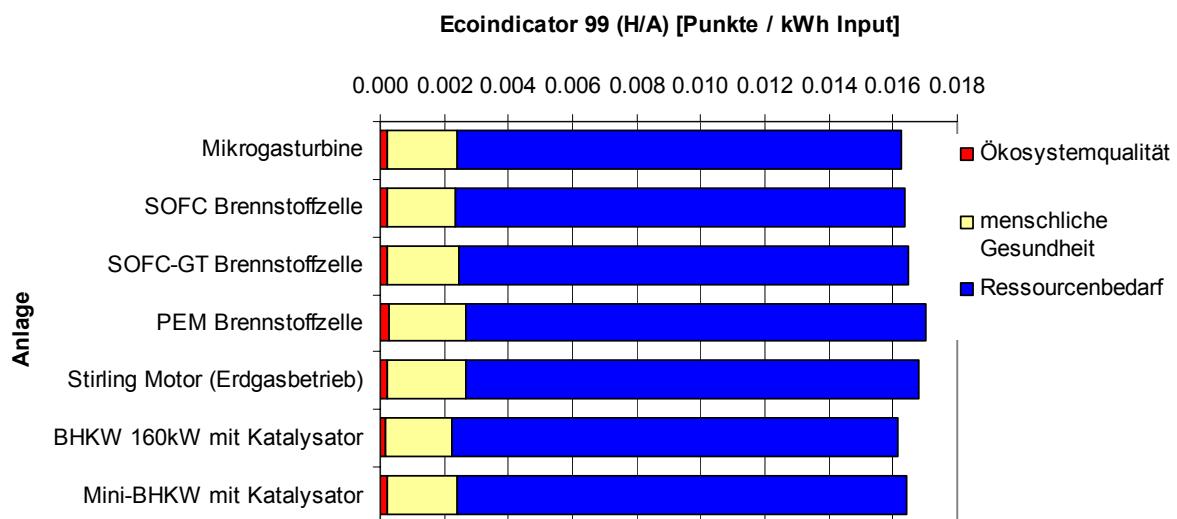


Abbildung 6.2 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input.  
Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A), Anteile der Schadenskategorien

Abbildung 6.3 zeigt die entstehenden Treibhausgasemissionen<sup>8</sup>. Auch hier ist die Bereitstellung und Verbrennung des verwendeten Erdgases mit 95 bis 99% der Gesamtbelastung bestimmend für das Resultat.

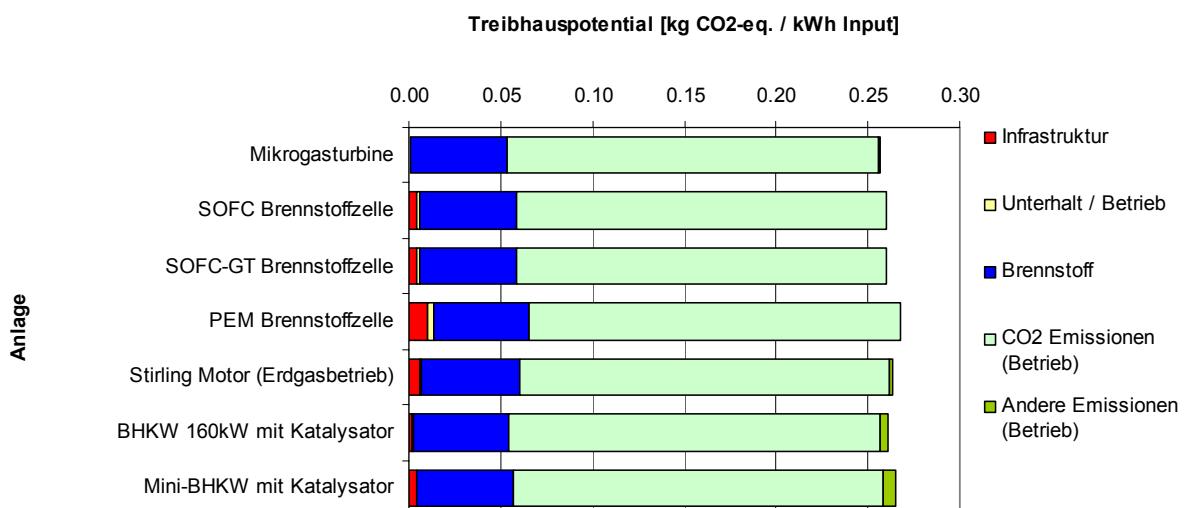


Abbildung 6.3 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input.  
Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Abbildung 6.4 zeigt den kumulierten Energieaufwand für nicht erneuerbare Energieträger (fossil und nuklear). Wie zu erwarten war bestimmt auch hier ist die Bereitstellung des verwendeten Erdgases mit 95 bis 99% der Gesamtbelastung das Resultat.

Mehr als 99% der nicht erneuerbaren Primärenergie stammt aus fossilen Quellen (v.A. Erdgas). Nur ein geringer Anteil der Primärenergie stammt aus Uran (vor allem Strombedarf für Brennstoffaufbereitung und Infrastruktur).

<sup>8</sup> Bewertet als Treibhauspotential gemäss IPCC 2001 (100 Jahre) ausgedrückt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten

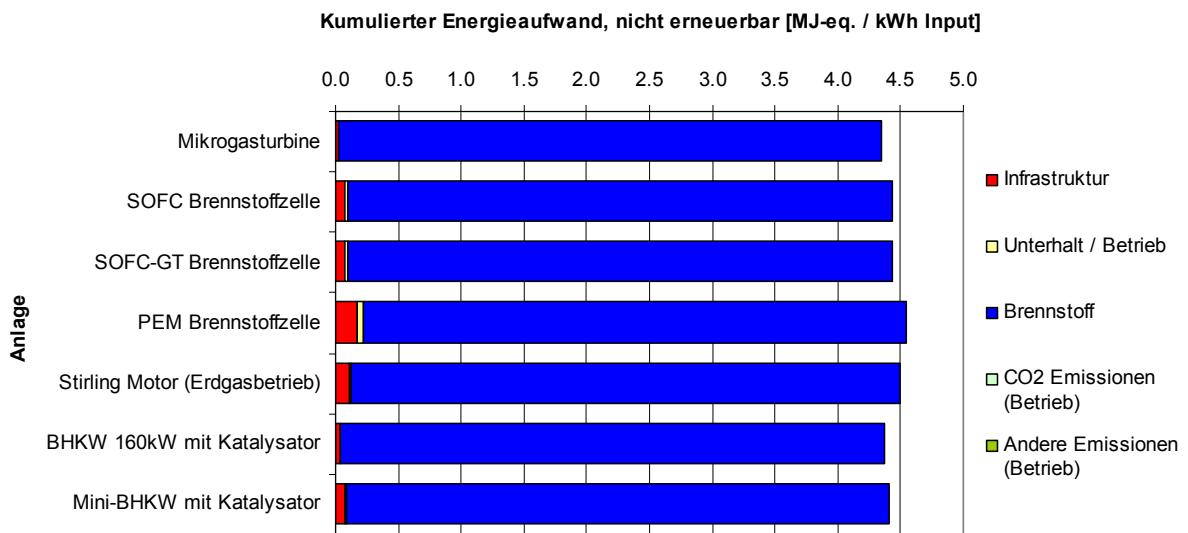


Abbildung 6.4 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input. Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear).

Abbildung 6.5 zeigt die Resultate Bewertet mit der Methode der ökologischen Knappeit 2006 [10]. In dieser Methode werden die Umweltauswirkungen gewichtet, indem sie in Relation zu einem Zielwert gesetzt werden. Dieser Zielwert entspricht bei den UBP den schweizerischen Grenzwerten. Je mehr die Belastung über diesem Zielwert liegt, desto stärker fällt sie ins Gewicht. Dadurch ergeben sich gewisse Verschiebungen in der Bewertung gegenüber z.B. der Methode Ecoindicator 99.

Auch in der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappeit 2006 macht das benötigte Erdgas sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung bereits zu 81 bis 93% der Gesamtbelastung aus. Die Luftemissionen machen insgesamt einen Anteil von etwa 80% der Gesamtbelastung aus. Der Bedarf an Energieressourcen ist mit einem Anteil von etwa 12% die zweit wichtigste Belastung.

Die Erstellung, Unterhalt und Entsorgung der Anlage fällt mit 3 bis 19% Anteil an der Gesamtbelastung klar stärker ins Gewicht als bei einer Bewertung mit Ecoindicator 99. Die höchsten Belastungen bei der Anlagenerstellung weist die PEM-Brennstoffzelle auf. Dies ist auf den relativ hohen Anteil hochwertiger Materialien bei der Herstellung zurückzuführen (Edelstähle, Platin).

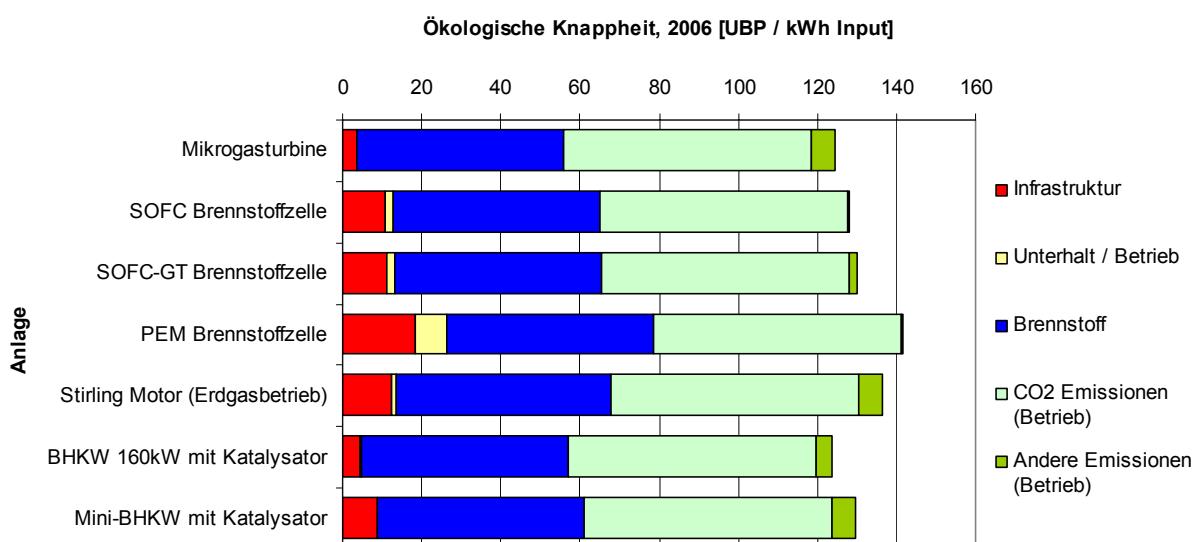


Abbildung 6.5 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input. Bewertung: Methode der ökologischen Knappeit 2006 (Umweltbelastungspunkte 2006)

### 6.3. BETRIEB MIT BIOGAS BZW. HOLZPELLETS

Für die Berechnungen in diesem Bericht wurde davon ausgegangen, dass die Anlage aufbereitetes Biogas aus dem Erdgasnetz bezieht. Der Einfluss des verwendeten Biogases wird in Kapitel 8.2.3 aufgezeigt.

Beim Betrieb mit Biogas oder Holzpellets sind die Umweltauswirkungen deutlich tiefer als beim Betrieb mit Erdgas. Damit werden auch die Umweltauswirkungen der Infrastruktur (Anlage) wichtiger. Vor allem beim Betrieb mit Holz sind zudem die Treibhausgasemissionen sehr tief. Durch die Aufbereitung des Biogases (Aufbereitung auf Erdgasqualität) ist dies nicht im selben Masse zutreffend für den Biogasbetrieb. Andererseits sind die übrigen Emissionen (Partikel und NOx) beim Betrieb mit Holz deutlich höher.

Abbildung 6.6 zeigt die Resultate Bewertet mit Ecoindicator 99. Gegenüber dem Betrieb mit Erdgas ist beim Betrieb mit Biogas (aufbereitet ab Erdgasnetz) oder Holzpellets die Umweltbelastung nur etwa einen Drittels so gross.

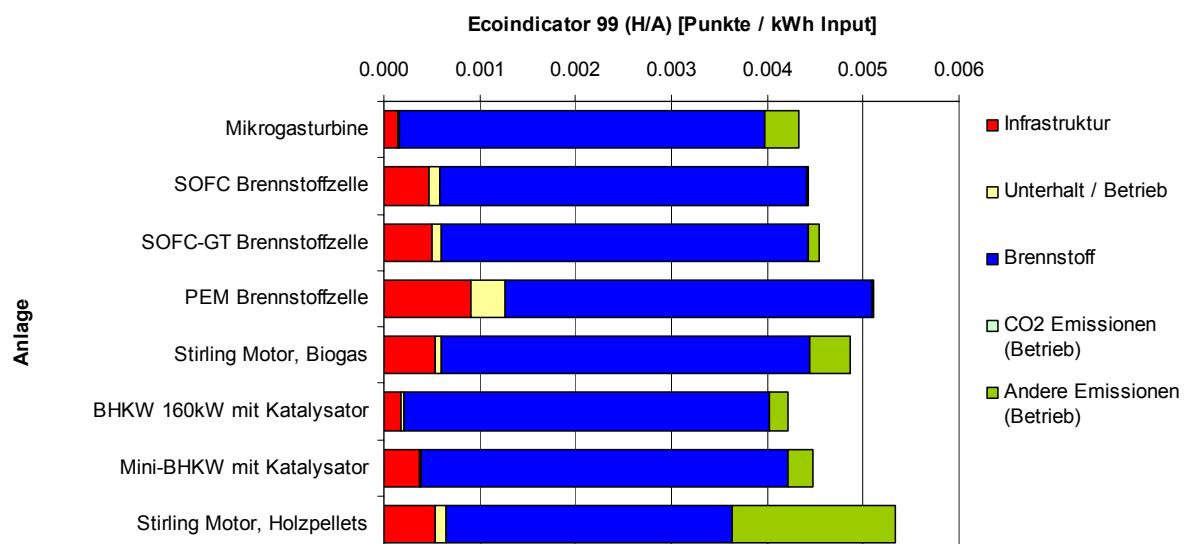


Abbildung 6.6 Umweltbelastungsanteile von mit Biogas bzw. Holzpellets betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Input. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

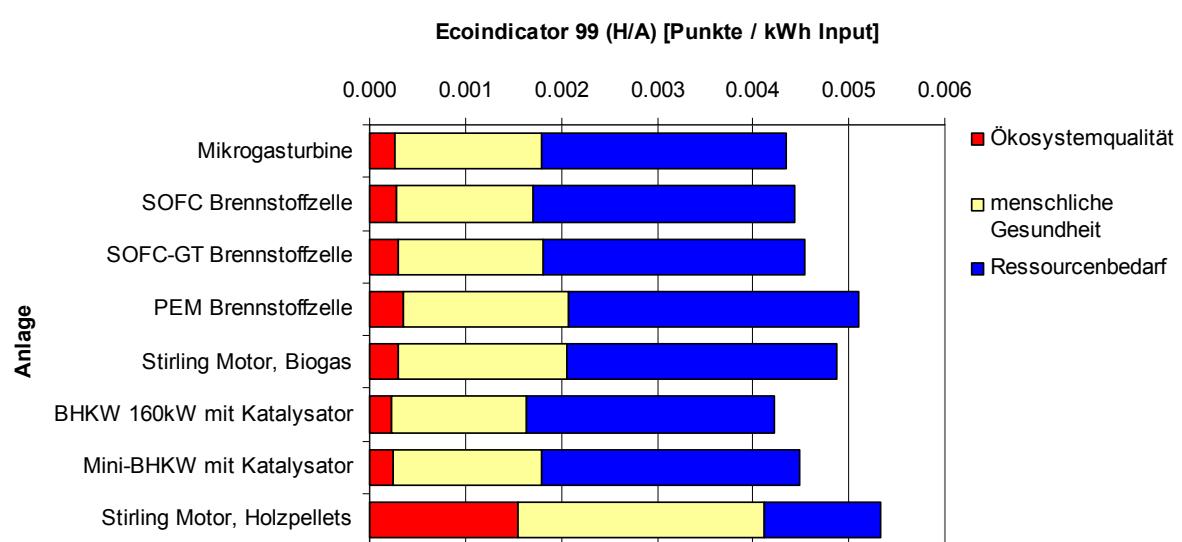


Abbildung 6.7 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A), Anteile der Schadenskategorien

Abbildung 6.8 zeigt die entstehenden Treibhausgasemissionen. Hier zeigt sich der Einfluss der Biogasaufbereitung sehr deutlich. Im Vergleich zum Betrieb mit Holzpellets sind die durch den Brennstoff verursachten Treibhausgasemissionen deutlich höher und bestimmd für das Resultat.

Gegenüber dem Betrieb mit Erdgas sind beim Biogas (aufbereitet ab Erdgasnetz) die Treibhausgasemissionen nur knapp halb so gross. Beim Betrieb mit Holzpellets dagegen reduzieren sich die Treibhausgasemissionen auf einen Sechstel.

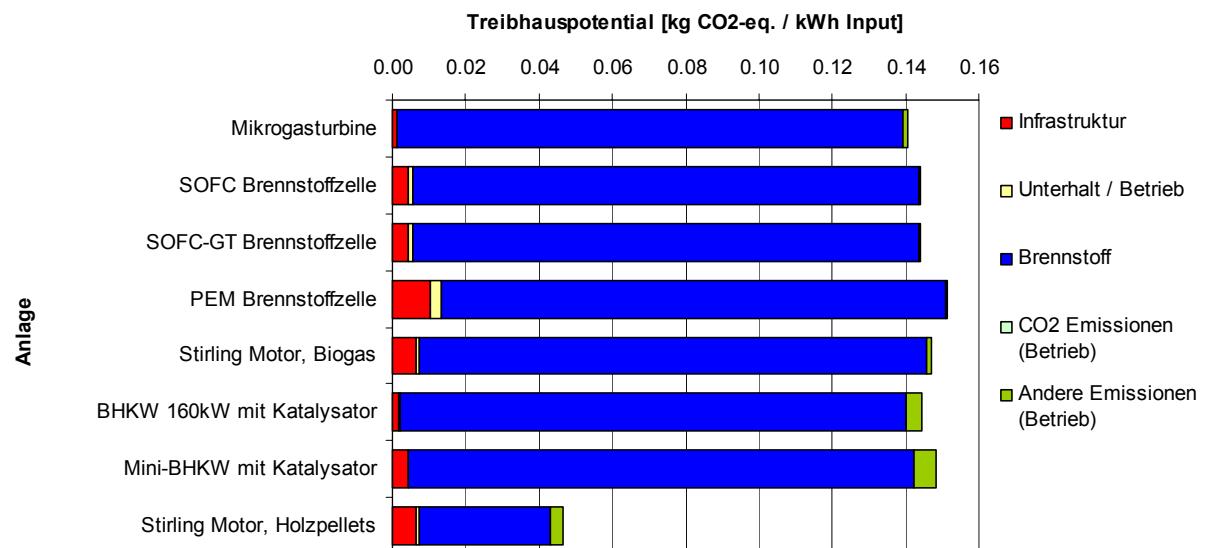


Abbildung 6.8 Umweltbelastungsanteile von mit Biogas bzw. Holzpellets betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Input. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Abbildung 6.9 zeigt den kumulierten Energieaufwand für nicht erneuerbare Energieträger (fossil und nuklear). Wie zu erwarten sind die Belastungen viel tiefer als beim Betrieb mit Erdgas. Trotzdem ist auch hier die Brennstoffaufbereitung für die Gesamtbelastung bestimmd. Knapp 40% der nichterneuerbaren Primärenergie stammt aus Uran, das vor allem durch den Strombedarf in der Biogasaufbereitung bzw. für die Herstellung der Holzpellets verursacht wird.

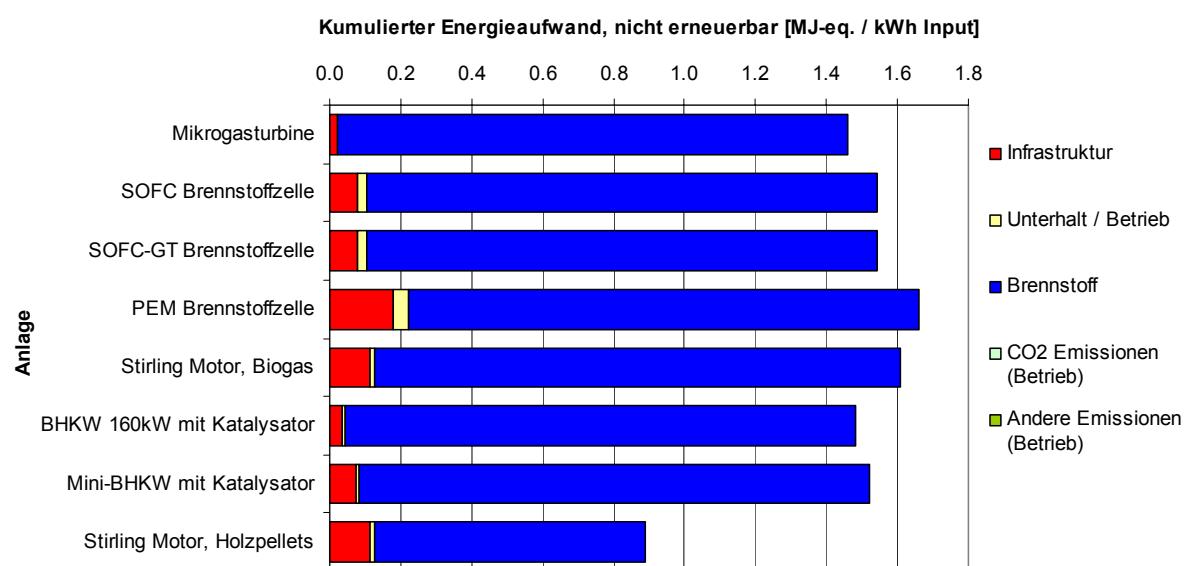


Abbildung 6.9 Umweltbelastungsanteile von mit Biogas bzw. Holzpellets betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Input. Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear).

Abbildung 6.10 zeigt die Resultate Bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006. Die Luftemissionen machen einen Anteil von etwa 65% der Gesamtbelastung aus. Umweltbelastungen aus Abfällen sind mit einem Anteil von gut 15% die zweit wichtigste Belastung. Sie sind hauptsächlich durch den Strombedarf in der Biogasaufbereitung verursacht (radioaktive Abfälle). Beim mit Holzpellets betriebenen Stirling Motor liegt der Anteil der Luftemissionen sogar bei 70% der Gesamtbelastung. Auch hier sind radioaktive Abfälle (Strom für Pelletsproduktion) mit einem Anteil von knapp 10% die zweit wichtigste Belastung. Gegenüber dem Betrieb mit Erdgas ist bei dieser Bewertungsmethode die Reduktion der Umweltbelastung für den Betrieb mit Biogas oder Holzpellets deutlich geringer. die Reduktion beträgt hier nur gut 20%. Der Grund liegt in der deutlich stärkeren Gewichtung von Emissionen und Abfällen gegenüber den nicherneuerbaren Energieressourcen.

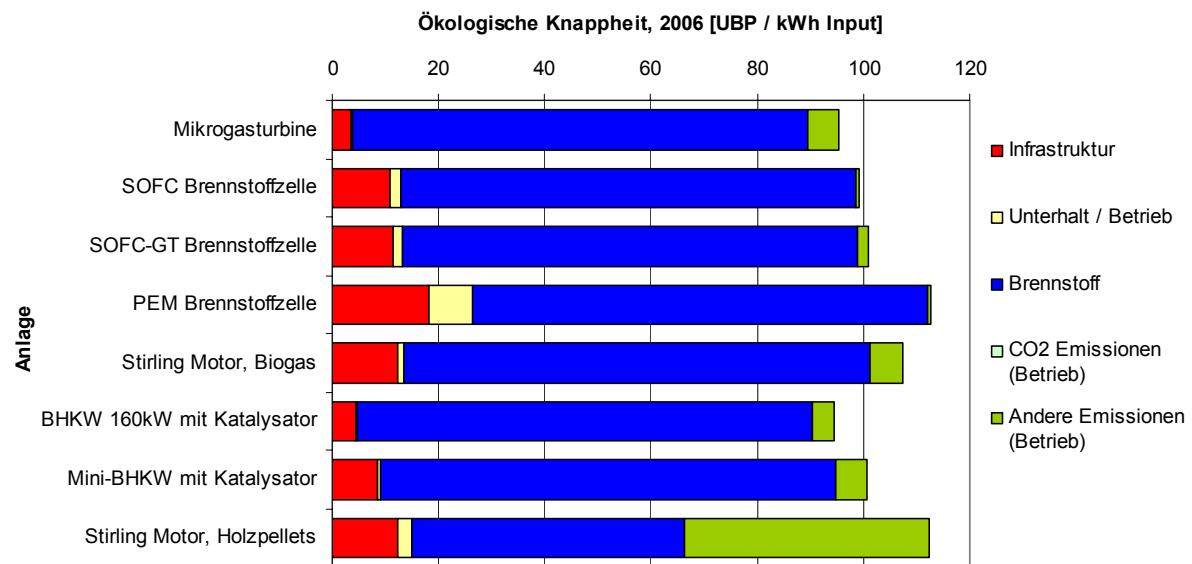


Abbildung 6.10 Umweltbelastungsanteile von mit Biogas bzw. Holzpellets betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Input. Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte 2006)

## 7. Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme

### 7.1. EINFÜHRUNG

Neben dem Gesamtwirkungsgrad und der Stromkennzahl der Wärme (Kälte)-Kraft-Kopplung bestimmen auch die technischen Randbedingungen der Anlage für welches Einsatzgebiet ein System geeignet ist. Dazu zählt neben der Auslegung (Jahresbetriebszeit) auch das erreichbare Temperaturniveau der Wärmeabgabe. In den folgenden Abschnitten werden die Resultate für die fünf unterschiedenen Temperaturniveaus besprochen. Die im folgenden präsentierten Resultate wurden mit der Methode Ecoindicator 99 (Typus Hierarchist, H/A) [9] bewertet. Wo die Resultate anderer Bewertungsmethoden von speziellem Interesse sind werden diese ebenfalls dargestellt. Die tabellarischen Resultate mit allen betrachteten Bewertungsmethoden sind im Anhang zu finden.

Da die Allokation der Umweltbelastung zwischen der Strom- und Wärmeproduktion je nach Anwendung (z.B. Temperaturniveau) und Vergleichsbasis (Substitution) unterschiedlich sein kann, wurde für die Resultatdiskussion eine Darstellung gewählt, welche den ganzen Allokationsbereich (als Gerade) einschließt [37]. Dabei stellt der Schnittpunkt mit der Y-Achse die Allokation der gesamten Belastung nur auf die Stromproduktion und der Schnittpunkt mit der X-Achse eine Allokation der gesamten Belastung nur auf die Wärmeproduktion dar. In Abbildung 7.1 sind beispielhaft einige Resultate zur Umweltbelastung für die Erzeugung von Wärme und Strom dargestellt.

Verglichen werden diese Systeme mit der Stromproduktion aus einem mit Erdgas oder Biogas betriebenen Gaskombikraftwerk (horizontale Linie) sowie der Wärmeproduktion mit einer Wärmepumpe mit (vertikale Linien). Für die Berechnung wird festgelegt, dass der Strom für die Wärmepumpe aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb) stammt. Der Schnittpunkt dieser beiden Geraden stellt die Umweltbelastung für die getrennte Strom- und Wärmeproduktion dar. Sobald die Linie, welche die Umweltbelastung der WKK-Anlage darstellt, diesen Punkt unterschreitet ist ein ökologisch vorteilhafter Betrieb möglich.

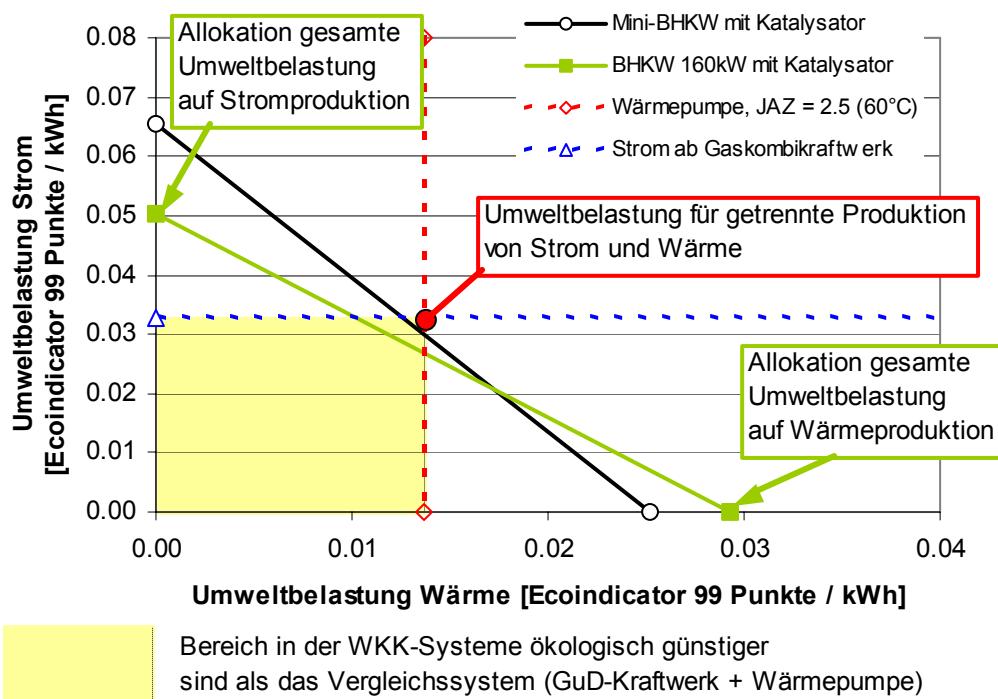


Abbildung 7.1 Beispielgraphik: Umweltbelastung von zwei mit Erdgas betriebenen BHKW im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme (Temperaturniveau 60°C)

## 7.2. NIEDERTEMPERATURWÄRME 30-40°C

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Wärme und Strom mit kleinen WKK-Systemen (Gebäude WKK) bei einer Wärmeabgabe in ein Niedertemperatursystem (30-40°C) dargestellt. Die Darstellungen basieren auf einer Bewertung mit Ecoindicator 99. Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfall sind in Kapitel 5.2 zu finden. Abbildung 7.2 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas und Abbildung 7.3 die Resultate für den Betrieb mit Biogas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Wärmeproduktion sind die Resultate für das Basissystem (Wärmepumpe, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Wärmepumpe stammt aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb). Zusätzlich ist als effiziente Art der Wärmeerzeugung die Diffusions-Absorptions Wärmepumpe (145% Nutzungsgrad) eingezeichnet.

Für den Betrieb mit Erdgas liegt die Umweltbelastung der betrachteten (mit Erdgas betriebenen) WKK-Systeme höher als für die getrennte Strom- und Wärmeproduktion. Dieses Resultat ist unabhängig von der Art der Allokation von Strom und Wärme.

Es zeigt sich, dass sehr hohe elektrische Nutzungsgrade oder Gesamtnutzungsgrade der WKK-Anlage notwendig sind um der getrennten Strom- / Wärmeproduktion ökologisch ebenbürtig zu sein. Beim Stirling Motor ist ein sehr hoher Gesamtnutzungsgrad und bei der PEM-Brennstoffzelle ein hoher elektrische Nutzungsgrad massgebend.

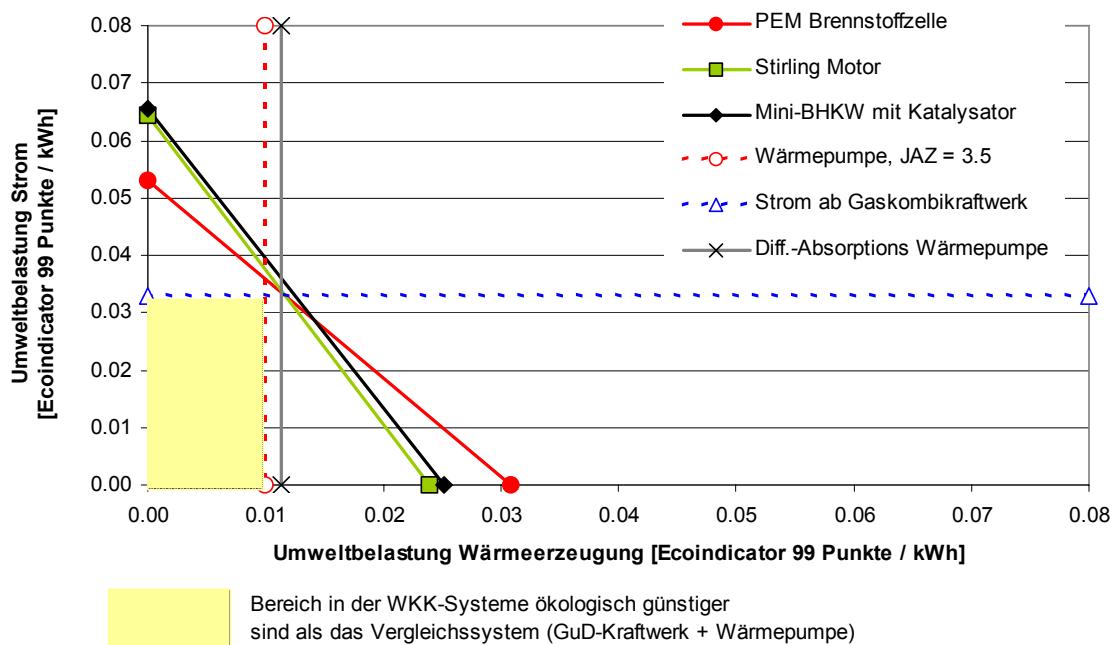


Abbildung 7.2 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen Mini-BHKW, Brennstoffzelle (PEM) und Stirlingmotor im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 30-40°C. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Für den Betrieb mit Biogas liegen die Umweltbelastungen der untersuchten WKK-Systeme, in einem deutlich günstigeren Bereich. Dies ist damit zu erklären, dass sich bei der getrennten Strom- und Wärmeproduktion (ebenfalls mit Biogas) die Verteilerverluste deutlich bemerkbar machen. Das Resultat in Abbildung 7.3 ist unabhängig von der Allokation von Strom und Wärme gültig.

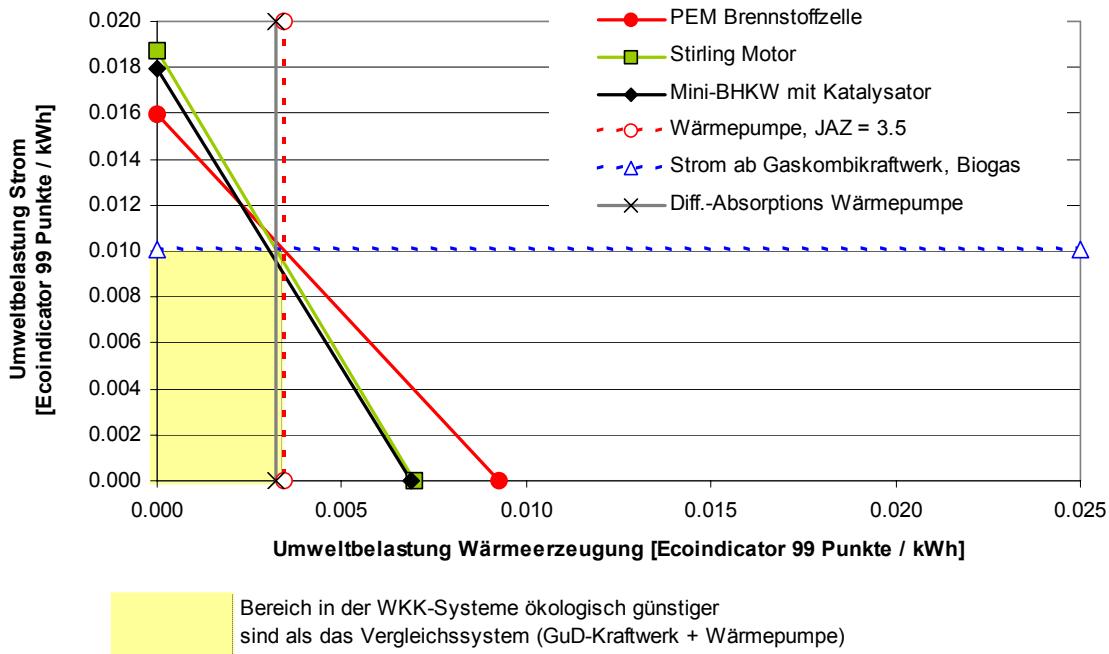


Abbildung 7.3 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen Mini-BHKW, Brennstoffzelle (PEM) und Stirlingmotor im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 30-40°C. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Für den Betrieb mit Holz (Holzschnitzel / Holzpellets) liegen die Umweltbelastungen der untersuchten WKK-Systeme vor allem bei den Treibhausgasemissionen deutlich günstiger als beim Betrieb mit Biogas (Abbildung 7.5). Dies ist damit zu erklären, dass sich bei der getrennten Strom- und Wärmeproduktion (mit Biogas) die Umwandlungsverluste bei der Biogasaufbereitung und –verteilung deutlich bemerkbar machen. Wie Abbildung 7.4 zeigt sind die Belastungen der Holz-WKK Anlagen bei einer Bewertung mit Ecoindicator 99 leicht höher. Dies ist durch die höheren Luftemissionen verursacht. Die Umweltbelastung des Stirling Motors ist somit stark durch die verwendeten Nutzungsgrade und Emissionsdaten bestimmt. Feldtests mit diesen Systemen müssen erst noch zeigen, ob diese Werte in der Praxis auch erreicht werden.

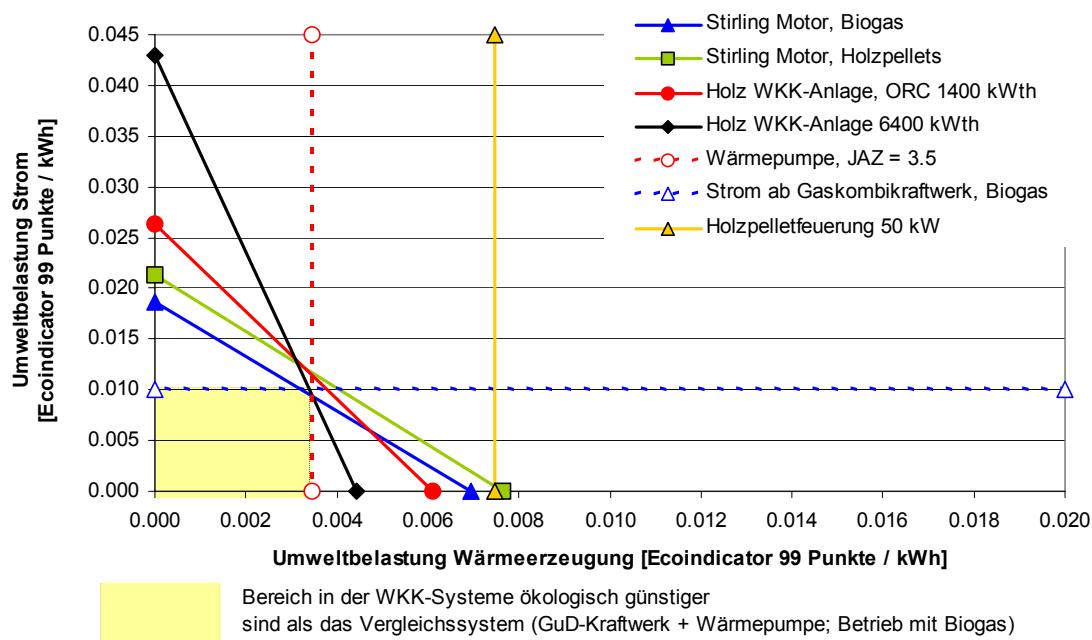


Abbildung 7.4 Umweltbelastung von mit Holzpellets betriebenen Stirlingmotor (3 kW<sub>e</sub>), grossen Holz-WKK Anlagen (1400 kW<sub>th</sub>, 6400 kW<sub>th</sub>), im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 30-40°C mit Biogas sowie reine Wärmeproduktion mit Holzpellets. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Wie Abbildung 7.5 zeigt, schneiden mit Holzbrennstoffen betriebene Systeme (Pellets, Schnitzel) vor allem bei den Treibhausgasemissionen sehr günstig ab. Gegenüber einer Holzpelletfeuerung und einem Strombezug ab Biogas betriebenem GuD-Kraftwerk weisen die Holz-WKK Anlagen unabhängig von der Bewertungsmethode eine deutlich geringere Umweltbelastung auf. Bei der Holzschnitzel-WKK Anlage mit ORC-Turbine (Organic Rankine Cycle) zeigt sich deutlich, dass diese Anlagen vor allem Sinn machen wenn die Wärmeproduktion im Vordergrund steht. Dies ist durch den niedrigen elektrischen Wirkungsgrad des Systems begründet. Noch deutlicher zeigt sich dieser Umstand beim zusätzlich in den Abbildungen dargestellten Holzkraftwerk mit Dampfmotor (Holz WKK-Anlage 6400 kW<sub>th</sub>;  $\eta_{el} = 8\%$ )

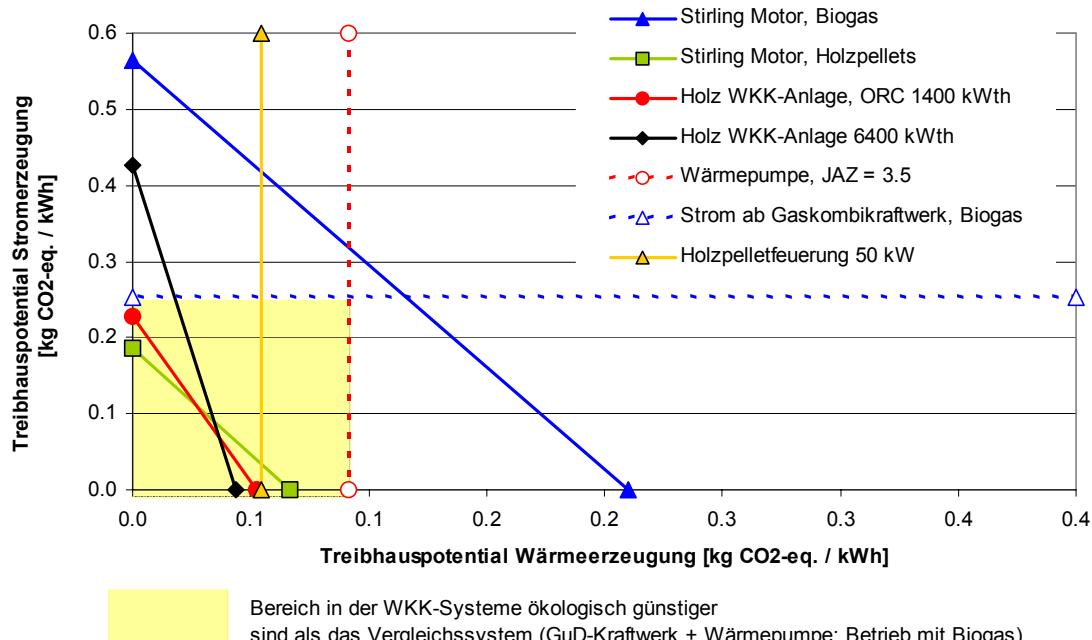


Abbildung 7.5 Umweltbelastung von mit Holzpellets betriebenen Stirlingmotor (3 kW<sub>el</sub>), grossen Holz-WKK Anlagen (1400 kW<sub>th</sub>, 6400 kW<sub>th</sub>), im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 30-40°C mit Biogas sowie reine Wärmeproduktion mit Holzpellets. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

### 7.3. WÄRMEABGABE 60°C

#### 7.3.1 Gebäude WKK-Systeme

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Wärme und Strom mit kleinen WKK-Systemen (Gebäude WKK) bei einer Wärmeabgabe in ein System mit ca. 60°C Vorlauftemperatur dargestellt. Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfall sind in Kapitel 5.3 zu finden. Abbildung 7.6 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas und Abbildung 7.7 die Resultate für den Betrieb mit Biogas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Wärmeproduktion sind die Resultate für das Basissystem (Wärmepumpe, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Wärmepumpe stammt aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb). Auch hier wird zusätzlich die Diffusions-Absorptions Wärmepumpe als effiziente Art der Wärmeerzeugung (132% Nutzungsgrad) eingezeichnet.

Es zeigt sich auch hier, dass beim Betrieb mit Erdgas die Umweltbelastungen der betrachteten WKK-Systeme (ebenfalls Betrieb mit Erdgas) unter den verwendeten Voraussetzungen vergleichbar sind wie die getrennte Strom- und Wärmeproduktion. Dieses Resultat ist unabhängig von der Art der Allokation von Strom und Wärme gültig.

Es müssten höhere elektrische Nutzungsgrade oder Gesamtnutzungsgrade erreicht werden um eine deutlich günstigere Umweltbelastung als die getrennte Strom- / Wärmeproduktion zu erreichen.

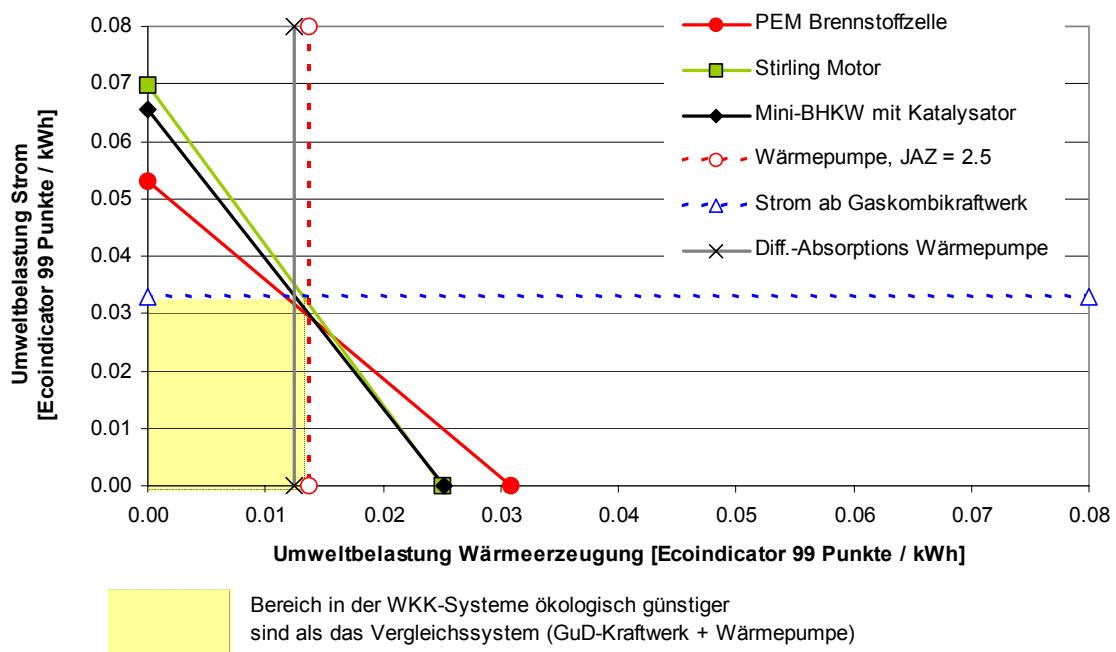


Abbildung 7.6 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen Mini-BHKW, Brennstoffzelle (PEM) und Stirlingmotor im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Für den Betrieb mit Biogas liegen die Umweltbelastungen der untersuchten WKK-Systeme in einem weiten Bereich deutlich tiefer als die getrennte Strom- und Wärmeleitung (ebenfalls mit Biogas). Die verschiedenen mit Biogas betriebenen Systeme zeigen allerdings sehr ähnliche Umweltauswirkungen. Dies bedeutet, dass es aus dieser Sicht kein klar zu favorisierendes System gibt<sup>9</sup>.

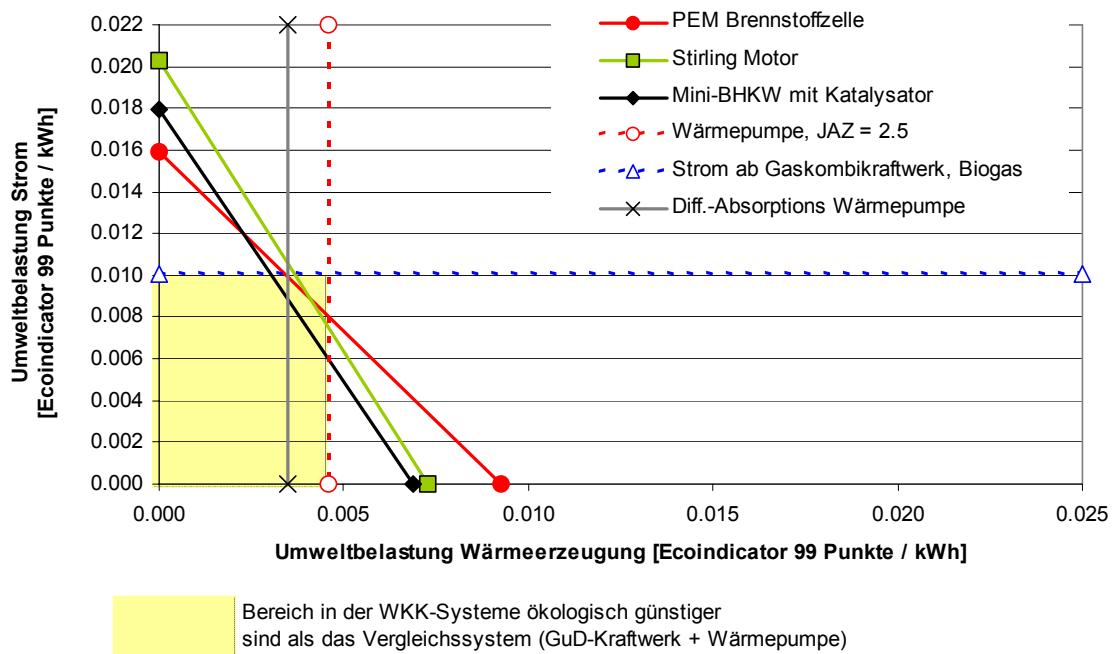


Abbildung 7.7 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen Mini-BHKW, Brennstoffzelle (PEM) und Stirlingmotor im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Beim Betrieb mit Biogas besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der Bewertung mit Ecoindicator 99 (oder auch UBP 06) und der Bewertung des nichterneuerbaren Primärenergieaufwandes sowie

<sup>9</sup> Basis dieser Aussage ist die Bewertung mit Ecoindicator 99. Die verschiedenen Systeme liegen jedoch auch bei den übrigen Bewertungsmethoden eng beieinander.

insbesondere des Treibhauspotentials. Wie in Abbildung 7.8 ersichtlich ist der Vorteil der WKK-Systeme bei der Bewertung des Treibhauspotentials nicht mehr gegeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei diesen Bewertungen praktisch ausschliesslich die Energieeffizienz zählt und weitere Emissionen kaum eine Rolle spielen.

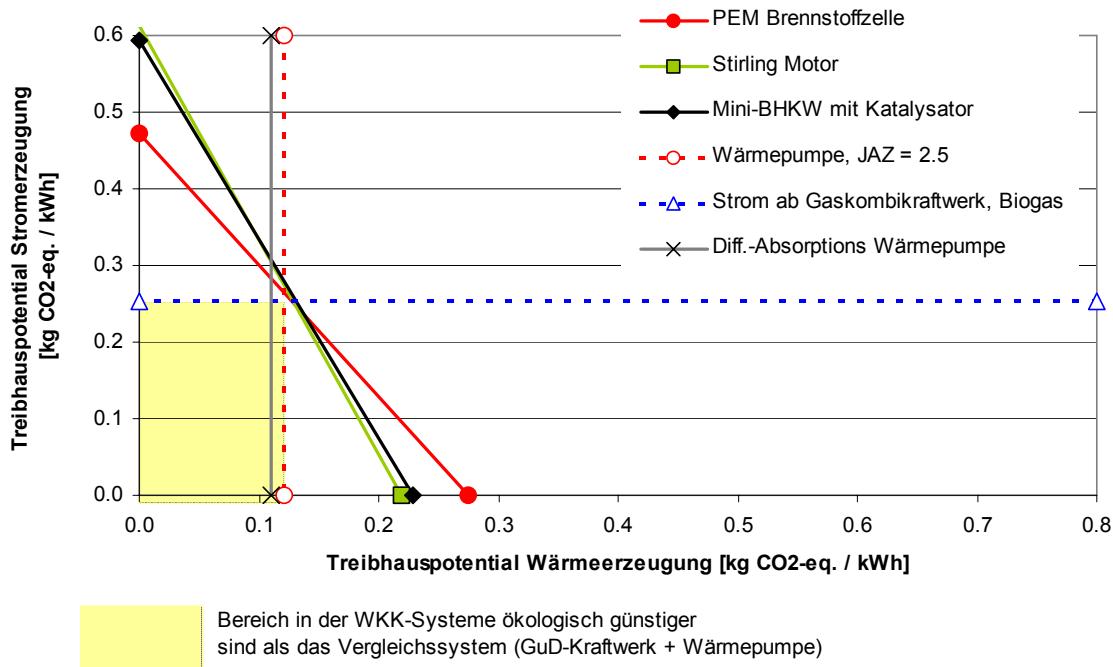


Abbildung 7.8 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen Mini-BHKW, Brennstoffzelle (PEM) und Stirlingmotor im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C. Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

### 7.3.2 WKK-Systeme mit Nahwärmennetz

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Wärme und Strom mit grösseren WKK-Systemen (Nahwärme WKK) und mit einer Wärmeabgabe in ein Wärmeverbundsystem mit ca. 60°C Vorlauftemperatur dargestellt. Bei den Nahwärme WKK-Systemen wird das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale). Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfall sind in Kapitel 5.3 zu finden. Abbildung 7.9 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas und Abbildung 7.10 die Resultate für den Betrieb mit Biogas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Wärmeproduktion sind die Resultate für das Basissystem (Wärmepumpe, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Wärmepumpe stammt auch hier aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb).

Es zeigt sich, dass nur die Brennstoffzellensysteme mit hohem elektrischem Wirkungsgrad zu einer deutlich tieferen Umweltbelastung als die getrennte Strom- und Wärmeproduktion führen. Dies gilt insbesondere wenn der Stromproduktion eine hohe Gewichtung zuschrieben wird. Dies ist bei Anlagen mit hohem Stromwirkungsgrad der Fall. Das konventionelle BHKW erreicht durch die guten Nutzungsgrade ein günstigeres Resultat als die getrennte Produktion von Strom und Wärme. Dieses Resultat ist jedoch stark abhängig vom elektrischen Wirkungsgrad und dem Gesamtwirkungsgrad. Die Mikrogasturbine kann ihre Vorteile auf dem Temperaturniveau von 60°C nicht ausspielen. Dazu sind der elektrische Wirkungsgrad und der Gesamtwirkungsgrad derzeit für diese Anwendung noch zu tief.

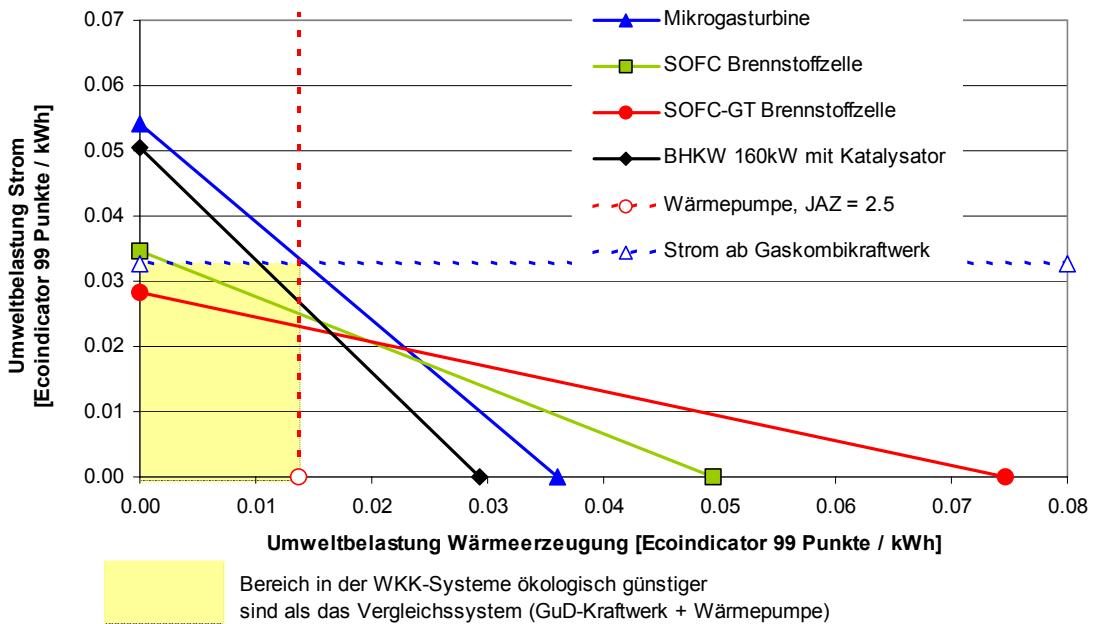


Abbildung 7.9 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von  $60^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Für den Betrieb mit Biogas liegen die Umweltbelastungen der WKK-Systeme meist deutlich tiefer als die getrennte Strom- und Wärmeproduktion (Kraftwerksbetrieb ebenfalls mit Biogas). Dies gilt insbesondere für Systeme wo die Stromproduktion einen wesentlichen Anteil ausmacht. Auch hier zeigt sich der positive Einfluss der hohen elektrischen Wirkungsgrade bei den Brennstoffzellensystemen. Das motorische BHKW schneidet auch hier günstiger ab als die Mikro-Gasturbine.

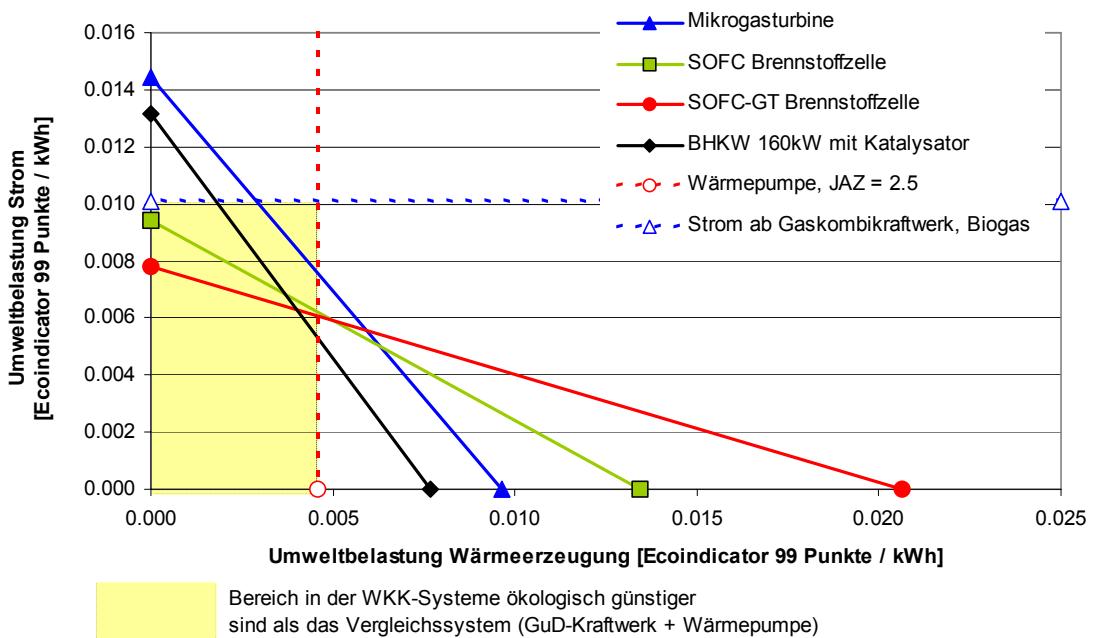


Abbildung 7.10 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von  $60^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Die Mikro-Gasturbine schneidet für den Betrieb mit Biogas bei der Bewertung mit Ecoindicator 99 und der Methode der ökologischen Knappeit (UBP 06) ebenfalls günstiger ab als die getrennte Strom-

und Wärmeproduktion. Bei der Bewertung des nichterneuerbaren Primärenergieaufwandes und insbesondere des Treibhauspotentials liegt die Mikro-Gasturbine, wie Abbildung 7.11 zeigt, nach wie vor in einem ungünstigeren Bereich als die getrennte Strom- und Wärmeproduktion.

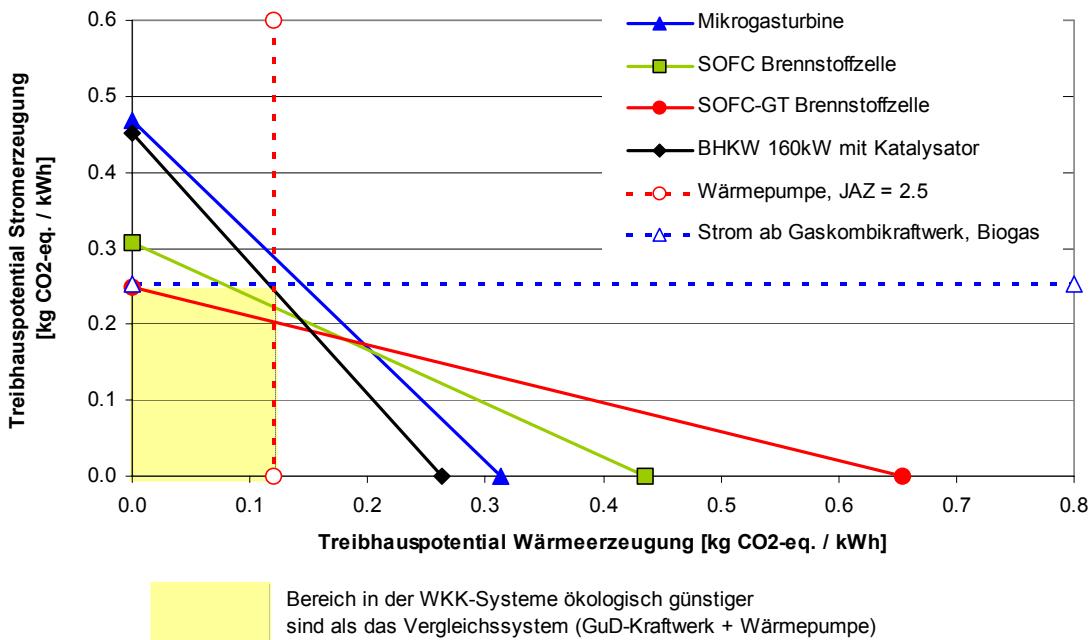


Abbildung 7.11 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen BHKW (160 kW<sub>e</sub>), Brennstoffzelle (SOFC, 125 kW<sub>e</sub>), Mikro-Gasturbine (100 kW<sub>e</sub>) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C. Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Für den Betrieb mit Holz (Holzschnitzel / Holzpellets) liegen die Umweltbelastungen der WKK-Systeme vor allem bei den Treibhausgasemissionen deutlich günstiger und bei einer Bewertung mit Ecoindicator 99 leicht höher als beim Betrieb mit Biogas. Dies ist bedingt durch die höheren Luftemissionen (NOx, PM) und die geringeren Treibhausgasemissionen innerhalb der Brennstoffaufbereitung.

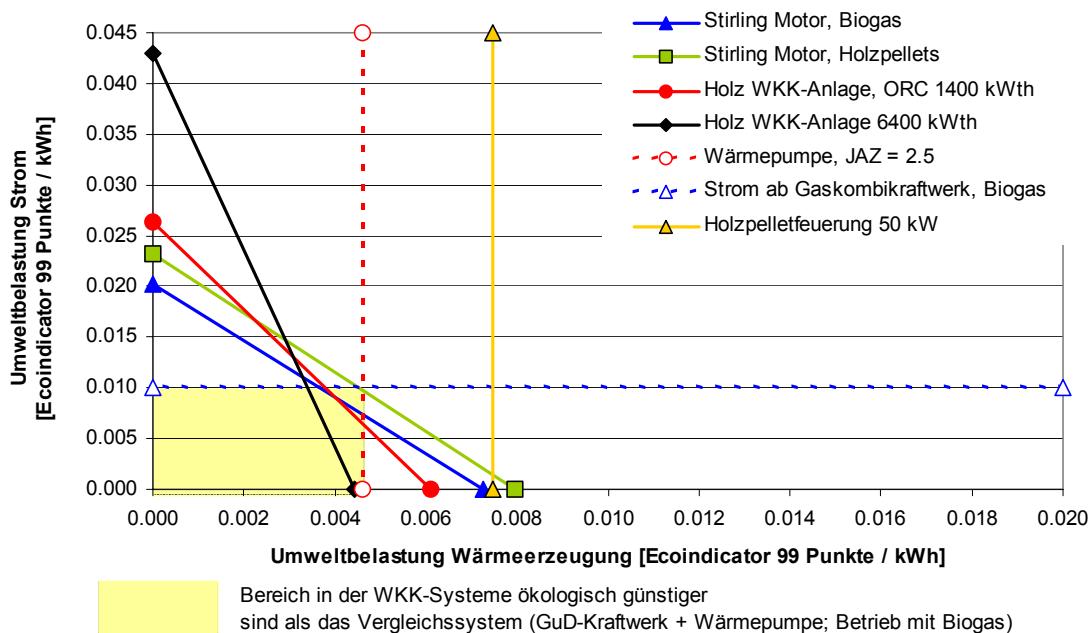


Abbildung 7.12 Umweltbelastung von mit Holzpellets betriebenen Stirlingmotor (3 kW<sub>e</sub>), grossen Holz-WKK Anlagen (1400 kW<sub>th</sub>, 6400 kW<sub>th</sub>), im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C mit Biogas sowie reine Wärmeproduktion mit Holzpellets. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Insbesondere bei Holzschnitzel-WKK Anlagen zeigt sich deutlich, dass diese Anlagen vor allem Sinn machen, wenn die Wärmeleitung im Vordergrund steht. Dies ist durch den niedrigen elektrischen Wirkungsgrad dieser Systeme begründet.

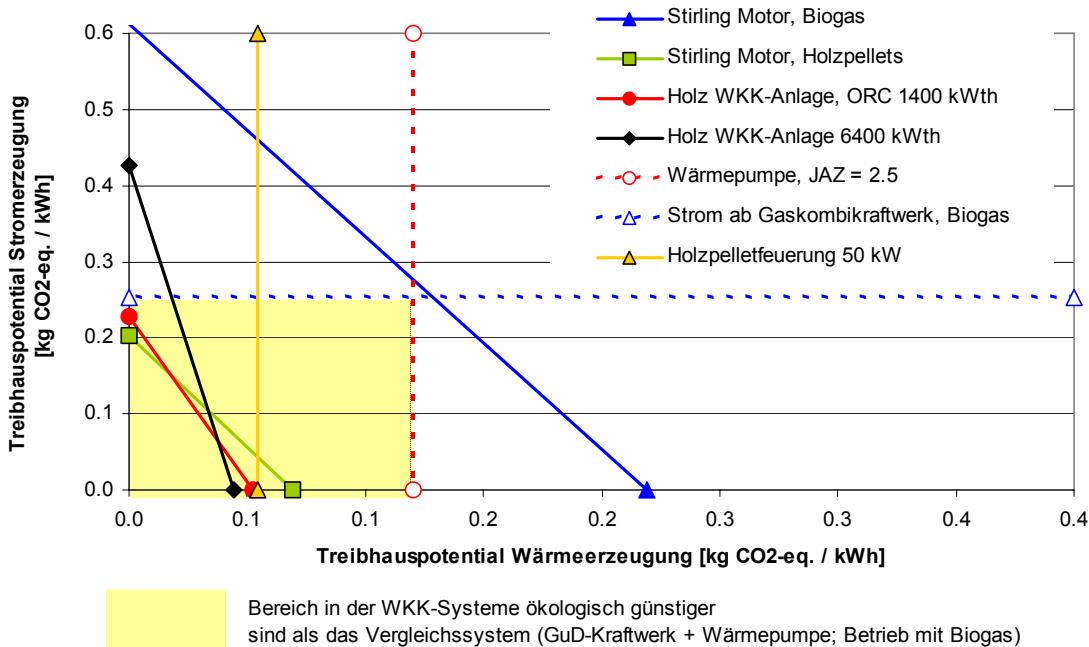


Abbildung 7.13 Umweltbelastung von mit Holzpellets betriebenen Stirlingmotor (3 kW<sub>el</sub>), grossen Holz-WKK Anlagen (1400 kW<sub>th</sub>, 6400 kW<sub>th</sub>), im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 60°C mit Biogas sowie reine Wärmeleitung mit Holzpellets. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

#### 7.4. WÄRMEABGABE 80°C

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Wärme und Strom mit grösseren WKK-Systemen (Nahwärme WKK) und mit einer Wärmeabgabe in ein Wärmeverbundsystem mit ca. 80°C Vorlauftemperatur dargestellt. Bei den Nahwärme WKK-Systemen wird das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale). Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfällen sind in Kapitel 5.3 und 5.4 zu finden. Abbildung 7.14 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas und Abbildung 7.15 die Resultate für den Betrieb mit Biogas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Wärmeleitung sind die Resultate für das Basissystem (Gaskessel, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Wärmepumpe stammt aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb).

Die PEM-Brennstoffzelle wird hier nicht dargestellt, da dieses System nur Temperaturen bis max. 70°C liefern kann. Hochtemperatur PEM-Brennstoffzellen sind erst in Entwicklung und wurden nicht mit einbezogen. Auch das Mini-BHKW und der Stirling Motor werden nicht dargestellt, da im kleinen Leistungsbereich (Gebäudeheizungen) so hohe Vorlauftemperaturen selten vorkommen.

Es zeigen sich hier ähnliche Resultate wie beim Betrieb mit 60°C Vorlauftemperatur. Die Beurteilung fällt allerdings in einem breiteren Bereich günstiger für die WKK-Systeme aus, da im Vergleichssystem durch die Gasheizung (statt Wärmepumpe) eine höhere Umweltbelastung verursacht wird. Auch hier gilt, dass nur mit hohen elektrischen Nutzungsgraden oder hohen Gesamtnutzungsgraden eine deutlich günstigere Umweltbelastung als für die getrennte Strom- und Wärmeleitung erzielt wird.

Ab grössten ist die Reduktion der Belastung bei der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappeit (UBP 06) und am geringsten bei der Bewertung des Treibhausgaspotentials. Die hier dargestellte Bewertung mit Ecoindicator 99 liegt in etwa in der Mitte.

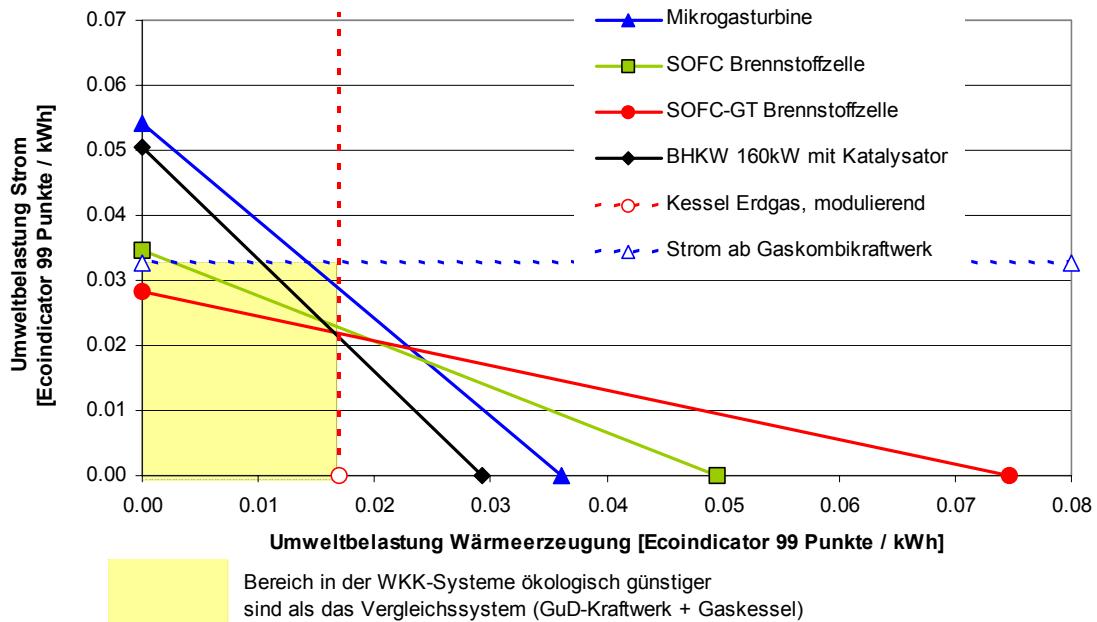


Abbildung 7.14 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von  $80^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Für den Betrieb mit Biogas liegen die Umweltbelastungen der WKK-Systeme sehr günstig im Vergleich zur getrennte Strom- und Wärmeproduktion. In dieser Darstellung erfolgt die Stromproduktion mit einem mit Biogas betriebenen Gaskombikraftwerk und die Wärmeerzeugung mit einem mit Biogas betriebenen Gaskessel.

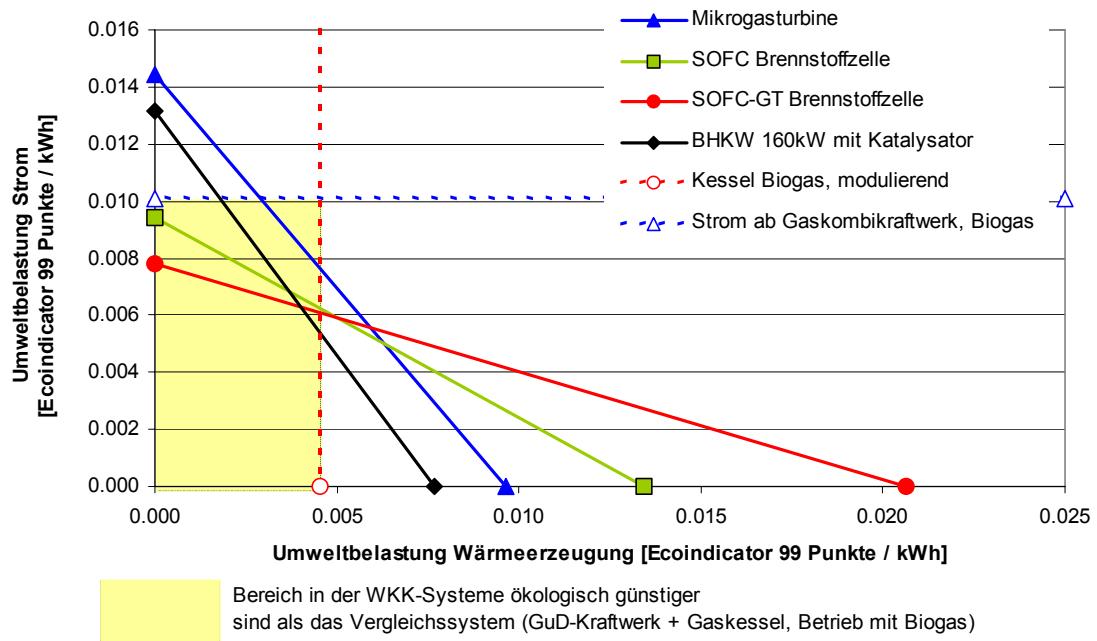


Abbildung 7.15 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von  $80^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Wie Abbildung 7.16 zeigt schneidet die Mikro-Gasturbine nun auch bei der Bewertung des Treibhauspotentials zumindest vergleichbar ab wie die getrennte Strom- und Wärmeproduktion.

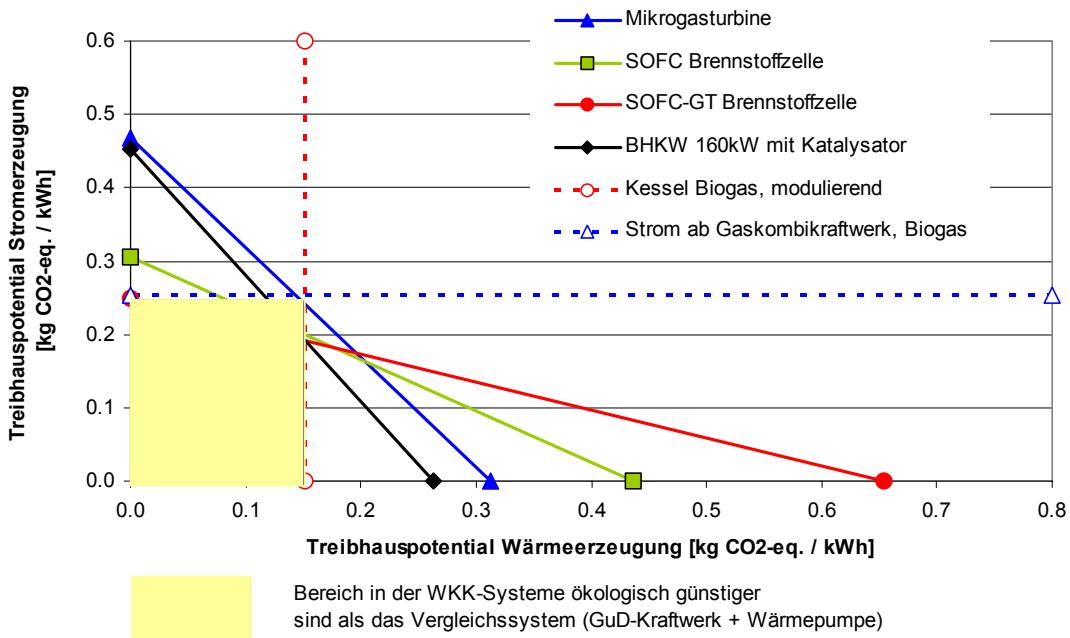


Abbildung 7.16 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW (160 kW<sub>e</sub>), Brennstoffzelle (SOFC, 125 kW<sub>e</sub>), Mikro-Gasturbine (100 kW<sub>e</sub>) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Wärme von 80°C. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Für den Betrieb mit Holz (Holzschnitzel / Holzpellets) sind vergleichbare Resultate wie beim Betrieb mit 60°C zu erwarten. Daher werden diese hier nicht noch einmal separat dargestellt.

## 7.5. KÄLTEABGABE 6-8°C

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Kälte und Strom mit grösseren WKK-Systeme (Nahwärme WKK) dargestellt. Die Kälteabgabe erfolgt in ein System mit ca. 6-8°C Vorlauftemperatur. Das Kälteverteilnetz (Leitungen, Verluste) wird nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale). Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfall sind in Kapitel 5.5 zu finden. Abbildung 7.17 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas und Abbildung 7.19 die Resultate für den Betrieb mit Biogas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Kälteproduktion sind die Resultate für das Basissystem (Kompressionskältemaschine, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Kältemaschine stammt aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb).

Es zeigte sich, dass nur Brennstoffzellensysteme mit sehr hohem elektrischem Wirkungsgrad in einen vergleichbaren Bereich der Umweltbelastung wie die getrennte Strom- und Kälteproduktion kommen. Dies bedeutet, dass die Wärme für die Absorptionskältemaschine eigentlich eher Nebenprodukt sein muss, welches „nebenbei“ noch entsteht. Das BHKW und die Mikrogasturbine schneiden in dieser Betrachtung deutlich schlechter ab.

Die Bewertung ist deutlich abhängig von der, mit der Kompressionskältemaschine erreichten Arbeitszahl. Allerdings verändert sich die Ausgangslage nicht drastisch wenn eine deutlich tiefere Arbeitszahl verwendet wird (siehe dazu Sensitivitätsanalyse in Kapitel 8.3.1). Dasselbe gilt für den Einsatz einer 2-stufigen Absorptionskältemaschine, welche zu einer deutlich höheren Effizienz für die Kälteproduktion im WKK-System führt (Abbildung 7.18).

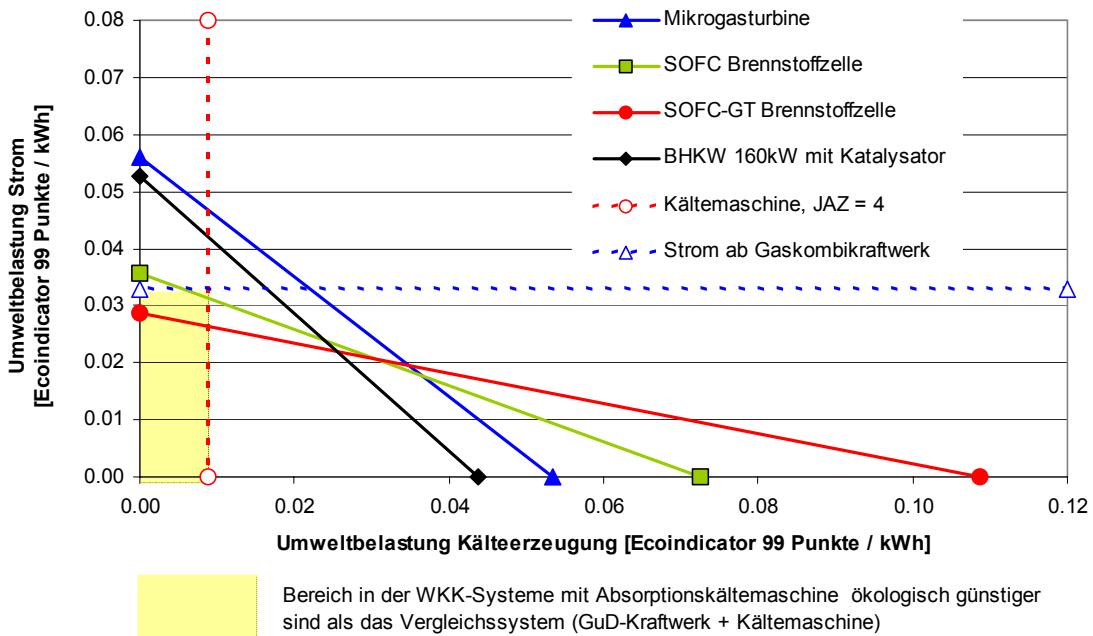


Abbildung 7.17 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) mit Kälteproduktion über eine Absorptionskältemaschine (1-stufig) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Kälte von  $6-8^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

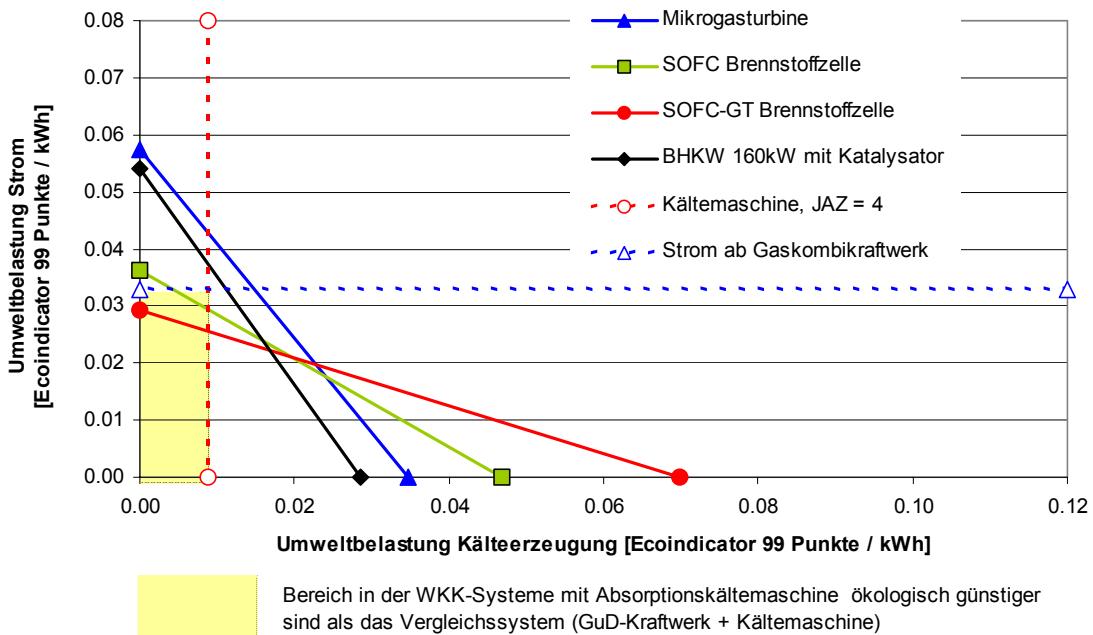


Abbildung 7.18 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) mit Kälteproduktion über eine Absorptionskältemaschine (2-stufig) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Kälte von  $6-8^\circ\text{C}$ . Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

Eine leicht günstigere Ausgangslage ist für die WKK-Systeme beim Betrieb mit Biogas vorhanden. Hier wird die Energienutzung in einer WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine günstiger bewertet wenn ein hoher Stromwirkungsgrad erreicht wird (SOFC Brennstoffzellen). Damit ist auch hier die Wärme für die Absorptionskältemaschine eigentlich ein Nebenprodukt des Prozesses mit geringem Wert.

Aus diesem Grund schneidet auch die Holz-WKK Anlagen bei der Bewertung mit Ecoindicator 99 schlecht ab (geringer Stromnutzungsgrad). Das günstige Resultat Holz-WKK Anlage beim Treibhauspotential ist vor allem auf die relativ hohen Treibhausgasemissionen der Biogasaufbereitung zurückzuführen (siehe dazu auch Abbildung 6.8).

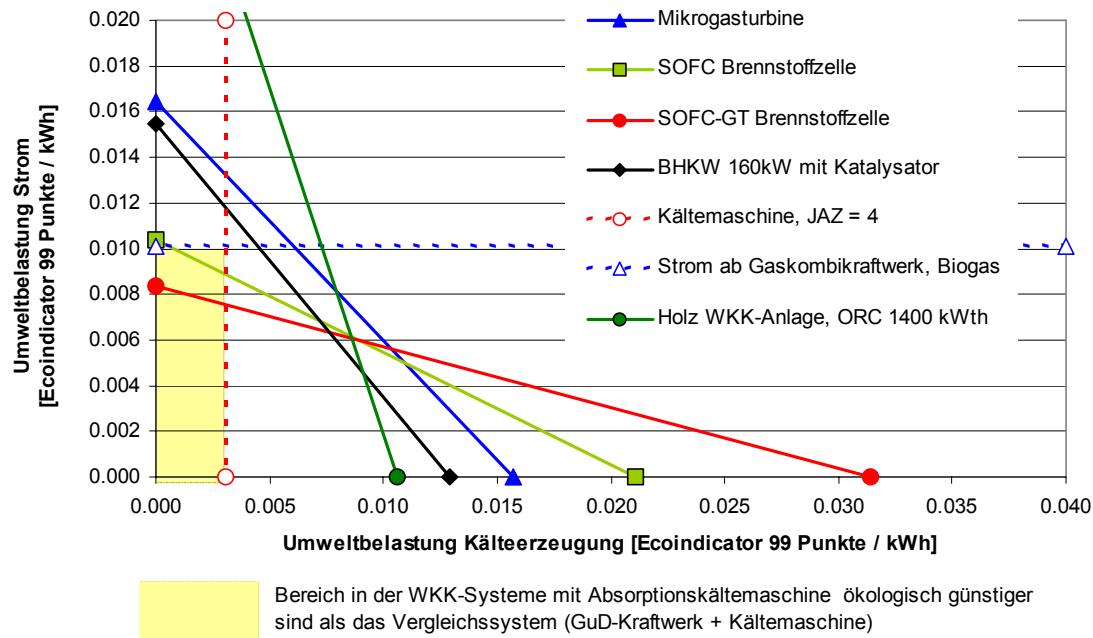


Abbildung 7.19 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ), Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) sowie Holzschnitzel-WKK Anlage mit Kälteproduktion über eine Absorptionskältemaschine (1-stufig) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Kälte von  $6-8^\circ\text{C}$  mit Biogas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

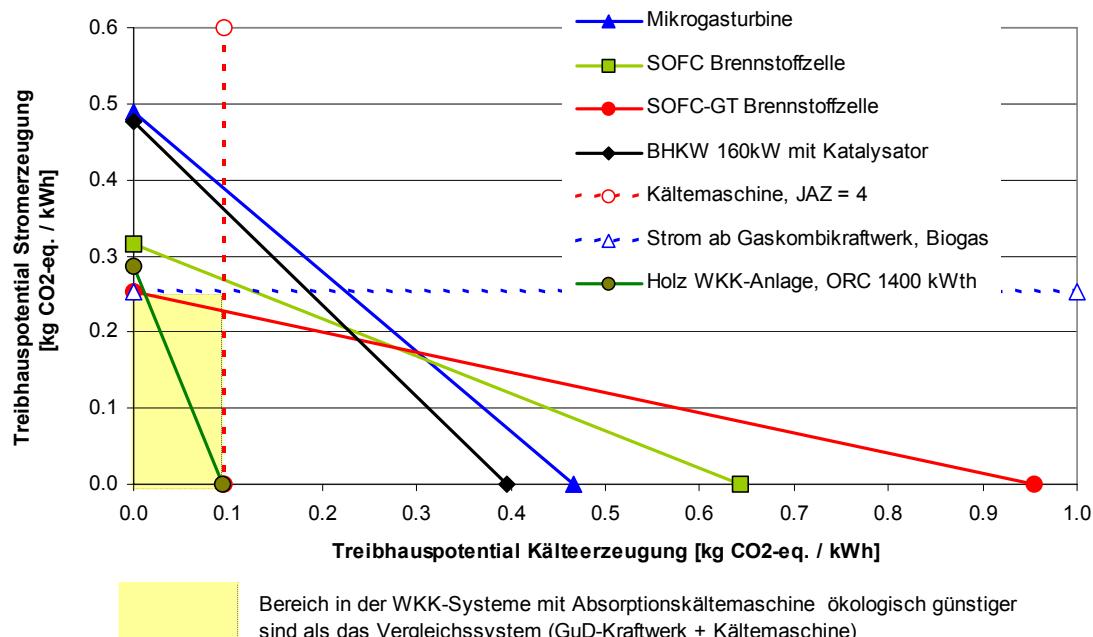


Abbildung 7.20 Umweltbelastung von mit Biogas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ), Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) sowie Holzschnitzel-WKK Anlage mit Kälteproduktion über eine Absorptionskältemaschine (1-stufig) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Kälte von  $6-8^\circ\text{C}$  mit Biogas. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

## 7.6. KÄLTEABGABE 14-18°C

In den folgenden zwei Abbildungen sind Resultate zur Erzeugung von Kälte und Strom mit grösseren WKK-Systeme (Nahwärme WKK) dargestellt. Die Kälteabgabe erfolgt in ein System mit 14-18°C Vorlauftemperatur. Das Kälteverteilnetz (Leitungen, Verluste) wird nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale). Die zugrundeliegenden Systemkenndaten für diesen Anwendungsfall sind in Kapitel 5.5 und 5.6 zu finden. Abbildung 7.21 zeigt die Resultate für den Betrieb mit Erdgas.

Als Vergleichsbasis für die getrennte Strom- und Kälteproduktion sind die Resultate für das Basissystem (Kompressionskältemaschine, Gaskombikraftwerk) dargestellt. Der Strom für die Kältemaschine stammt aus einem GuD-Kraftwerk (je nach Graphik Erdgas- oder Biogasbetrieb).

Noch deutlicher als bei der Kälteproduktion auf 6-8°C Temperaturniveau zeigt sich hier, dass die getrennte Produktion aufgrund der hohen Arbeitszahlen der Kompressionskältemaschine im Vorteil ist. Dies bedeutet, dass die Wärme für die Absorptionskältemaschine eigentlich nur in Systemen günstig ist, wo die produzierte Wärme nur ein Nebenprodukt ist, welches ohnehin anfallen würde (z.B. stromgeführter WKK-Betrieb). Dazu muss das WKK-System einen sehr hohen Stromwirkungsgrad aufweisen um günstiger als die getrennte Produktion abzuschneiden. Dies ist insbesondere bei der SOFC-GT Brennstoffzelle gegeben.

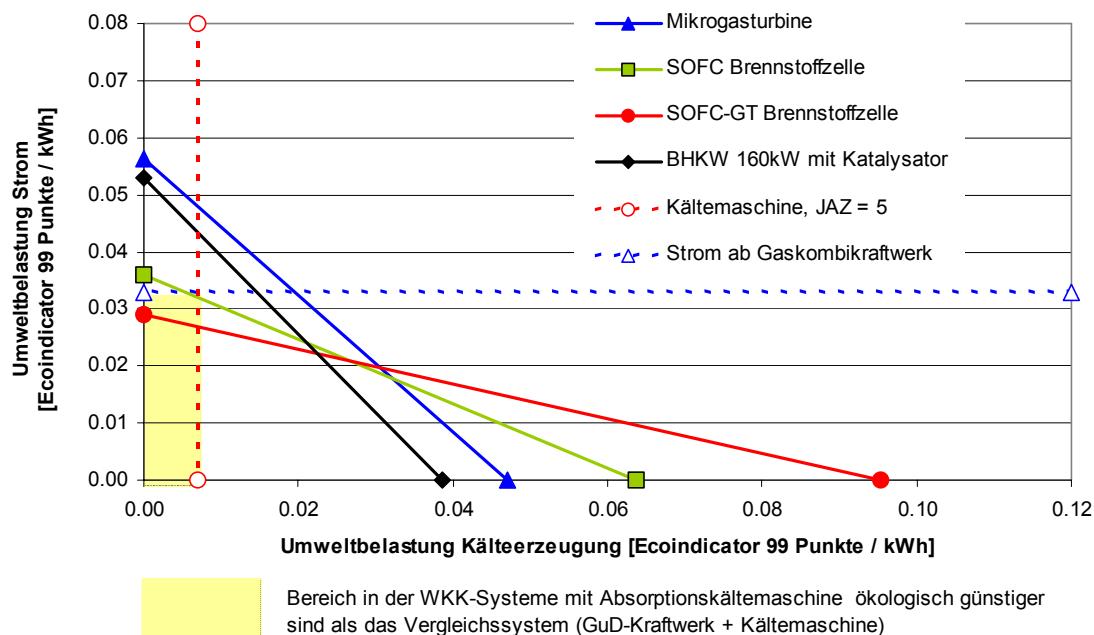


Abbildung 7.21 Umweltbelastung von mit Erdgas betriebenen BHKW ( $160 \text{ kW}_e$ ), Brennstoffzelle (SOFC,  $125 \text{ kW}_e$ ), Mikro-Gasturbine ( $100 \text{ kW}_e$ ) sowie Hybridsystem (SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine) mit Kälteproduktion über eine Absorptionskältemaschine (1-stufig) im Vergleich zur getrennten Produktion von Strom und Kälte von 14-18°C

Eine leicht günstigere Ausgangslage ist für die WKK-Systeme beim Betrieb mit Biogas vorhanden. Die Resultate sind jedoch ähnlich und damit ungünstiger als bei der Kälteproduktion auf 6°C Temperaturniveau. Auch hier muss die Stromproduktion der Antrieb für den WKK-Betrieb sein und der Stromwirkungsgrad sehr hoch.

## 8. Sensitivitätsanalyse

### 8.1. EINFÜHRUNG

Da sowohl der elektrische Wirkungsgrad wie auch der thermische Wirkungsgrad (bzw. der Gesamtnutzungsgrad) einer WKK-Anlage wichtige Einflussfaktoren für die Gesamtbewertung sind, werden diese in der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse genauer untersucht.

Auch Wärmepumpen (bzw. Kältemaschinen bei der Kälteerzeugung) erreichen je nach Quellentemperatur der Umgebungswärme (Luft, Sole, Wasser), der Vorlauftemperatur und der Anlagenauslegung sehr unterschiedliche Jahresarbeitszahlen. Da die Jahresarbeitszahl ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor für die Gesamtbeurteilung ist, wird die Jahresarbeitszahl in der Sensitivitätsanalyse zwischen 2 und 5 variiert (für Kältemaschinen zwischen 2 und 8).

### 8.2. WÄRMEERZEUGUNG

Für die Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wird davon ausgegangen, dass der von der WKK Anlage erzeugte Strom vollständig für den Betrieb einer Wärmepumpe verwendet wird. Für das Vergleichssystem wird angenommen, dass der Strom für die Wärmepumpe aus einem GuD-Kraftwerk stammt (je nach Betrachtung mit Erdgas- oder Biogasbetrieb). Damit wird ein Bezug der Umweltbelastungen pro kWh Wärme erreicht mit dem sich die Abhängigkeit der Resultate von der Anlageneffizienz aufzeigen lässt. Abbildung 8.1 zeigt die verwendeten Systemgrenzen für diese Betrachtungen. Zusätzlich wird in den Resultaten auch die reine Wärmeproduktion mit einer Diffusions-Absorptions Wärmepumpe (Betrieb mit Erdgas, Biogas) sowie einem Holzpelletkessel dargestellt.

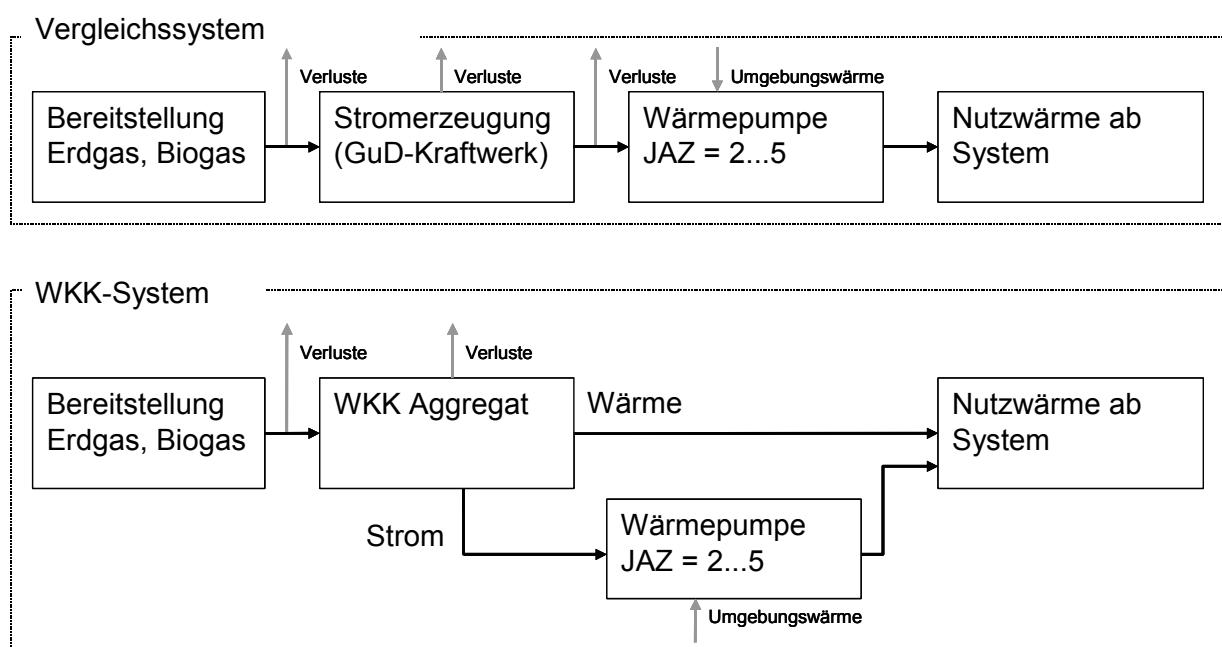


Abbildung 8.1 Systemgrenze für Wärmeerzeugung mit WKK-System und Vergleichssystem für die Sensitivitätsanalyse

#### 8.2.1 Variation des elektrischern und thermischern Wirkungsgrades der WKK-Anlage

Die Variation der Kenndaten (elektrischer und thermischer Wirkungsgrad) der untersuchten WKK-Systeme sind in Tabelle 5.2 für die Wärmeerzeugung zusammengefasst. Die für die Betrachtung verwendeten Wirkungsgrade stammen aus diversen Untersuchungen und Studien (u.A. [2], [6], [14], [15], [16], [17]), welche auch für die Erarbeitung der Sachbilanzdaten einbezogen wurden [7]. Die Wärmeverteilung im Gebäude sowie bei Nahwärme WKK-Systemen das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) wird dabei nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale).

Tabelle 8.1 Verwendeter Effizienzbereich der WKK Systeme für die Sensitivitätsanalyse; Wärmeproduktion

| WKK-System                              | el. Leistung         | unterer Wert                         | Standardwert                         | oberer Wert                          |
|---|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Gasmotor-BHKW                           | 160 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 30\%; \eta_{th} = 50\%$ | $\eta_{el} = 32\%; \eta_{th} = 55\%$ | $\eta_{el} = 35\%; \eta_{th} = 55\%$ |
| Mikro Gasturbine                        | 100 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 26\%; \eta_{th} = 44\%$ | $\eta_{el} = 30\%; \eta_{th} = 45\%$ | $\eta_{el} = 42\%; \eta_{th} = 38\%$ |
| SOFC-GT Brennstoffzelle                 | 180 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 55\%; \eta_{th} = 22\%$ | $\eta_{el} = 58\%; \eta_{th} = 22\%$ | $\eta_{el} = 63\%; \eta_{th} = 22\%$ |
| SOFC-Brennstoffzelle                    | 125 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 45\%; \eta_{th} = 30\%$ | $\eta_{el} = 47\%; \eta_{th} = 33\%$ | $\eta_{el} = 55\%; \eta_{th} = 30\%$ |
| PEM-Brennstoffzelle                     | 2 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 28\%; \eta_{th} = 52\%$ | $\eta_{el} = 32\%; \eta_{th} = 55\%$ | $\eta_{el} = 40\%; \eta_{th} = 50\%$ |
| Stirling Motor (Betrieb mit Gas)        | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 10\%; \eta_{th} = 75\%$ | $\eta_{el} = 24\%; \eta_{th} = 67\%$ | $\eta_{el} = 29\%; \eta_{th} = 67\%$ |
| Gasmotor Mini-BHKW                      | 5 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 20\%; \eta_{th} = 65\%$ | $\eta_{el} = 25\%; \eta_{th} = 65\%$ | $\eta_{el} = 30\%; \eta_{th} = 65\%$ |
| Stirling Motor (Betrieb mit Pellets)    | 3 kW <sub>el</sub>   | $\eta_{el} = 10\%; \eta_{th} = 75\%$ | $\eta_{el} = 23\%; \eta_{th} = 67\%$ | $\eta_{el} = 25\%; \eta_{th} = 65\%$ |
| ORC-Turbine (Holzschnitzel)             | 335 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 10\%; \eta_{th} = 70\%$ | $\eta_{el} = 15\%; \eta_{th} = 65\%$ | $\eta_{el} = 20\%; \eta_{th} = 60\%$ |
| GuD-Kraftwerk + Wärmepumpe *)           | 400 MW <sub>el</sub> |                                      | $\eta_{el} = 58\%; JAZ = 3$          |                                      |
| DAHP **)                                | -                    | 1.2                                  | $\eta_{el} = 58\%; JAZ = 1.32$       | 1.45                                 |
| Holzpelletfeuerung, 50 kW <sub>th</sub> | -                    | 80                                   | $\eta_{th} = 85\%$                   | 95                                   |

\*) Vergleichssystem für Wärmeproduktion mit getrennter Strom- und Wärmeproduktion

\*\*) Vergleichssystem für direkte Wärmeproduktion aus Erdgas oder Biogas

\*\*\*) Vergleichssystem für direkte Wärmeproduktion mit Holzpellets

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Effizienzwerte der WKK-Anlagen auf die erzielte Umweltbelastung dargestellt. In diesen Berechnungen wird für die Wärmeproduktion eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 zugrundegelegt. Wie sich die Variation der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Resultate auswirkt ist in Kapitel 8.2.2 erläutert.

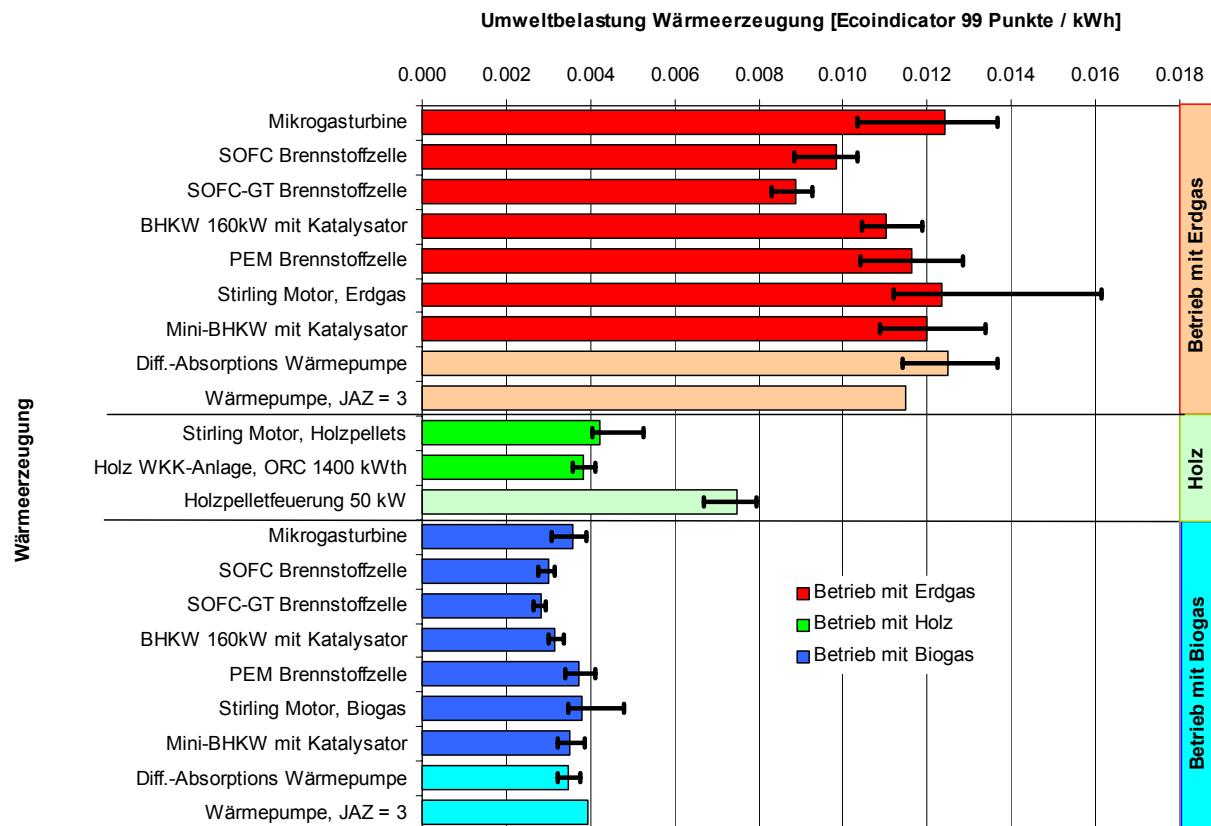


Abbildung 8.2 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Wie Abbildung 8.2 zeigt wird durch den Einsatz von Biogas oder Holz bei der Bewertung mit Ecoindicator 99 eine ca. drei mal tiefere Umweltbelastung erreicht. Größere Verschiebungen der Resultate sind vor allem bei der Mikrogasturbine und dem Stirlingmotor möglich. Bei der Mikrogasturbine könnten die Nutzungsgrade (v.A. Stromwirkungsgrad) durch neue Materialien noch stark gesteigert werden. Anlagen mit kleiner Leistung weisen aber heute auch noch deutlich tieferen Wirkungsgrade auf. Beim Stirlingmotor arbeiten verschiedene Produkte mit deutlich tieferen Stromwirkungsgraden. Dies wirkt sich deutlich in einer ungünstigeren Bewertung aus. Vor allem für erdgasbetriebene Stirlingmotoren sind gute Stromwirkungsgrade (ca. 25%) daher entscheidend.

Bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 8.3) zeigten sich vor allem die Vorteile des Betrieb mit Holz (Holzschnitzel / Holzpellets). Der Unterschied zwischen Erdgas und Biogas ist hier deutlich geringer, da die Aufbereitung und Verteilung des Biogases relevante Emissionen verursacht.

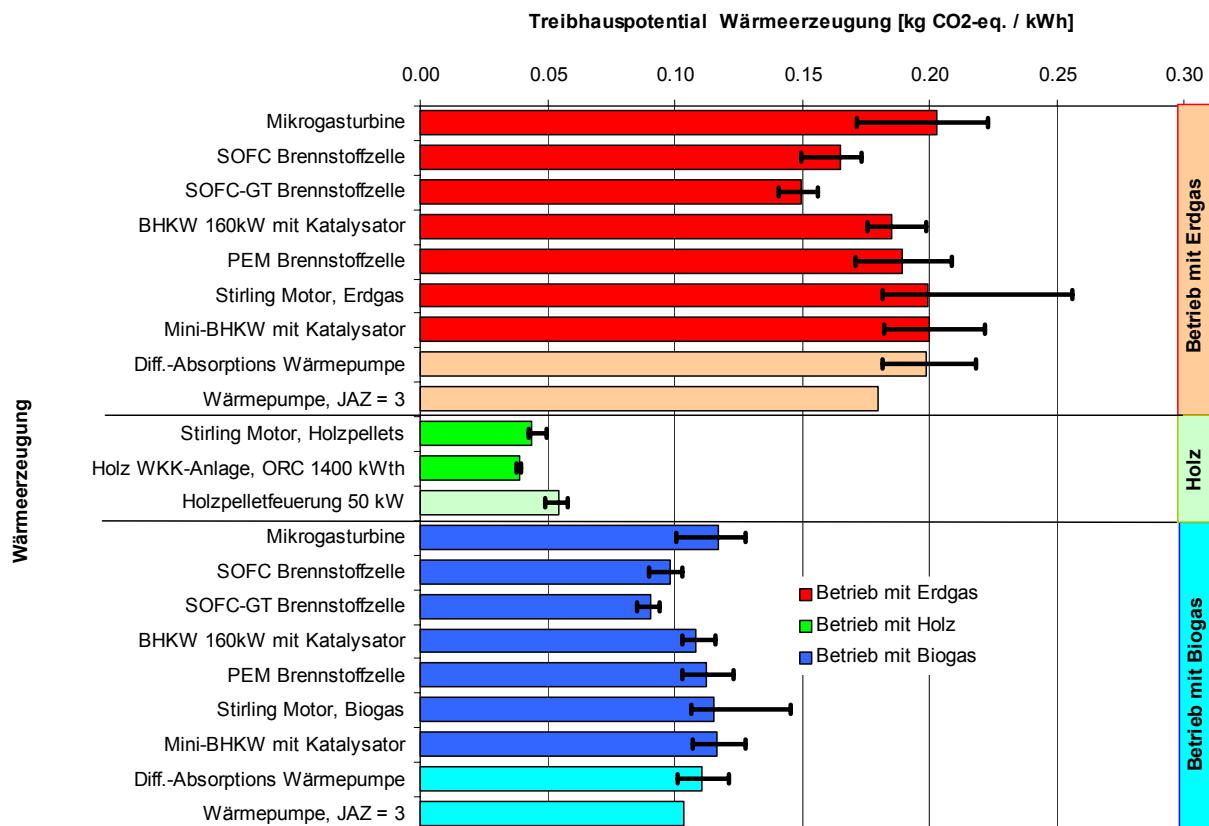


Abbildung 8.3 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Abbildung 8.4 zeigt die Bewertung des nicherneuerbaren Primärenergiebedarfs (fossil + nuklear). Bei dieser Bewertung macht sich die Variation der Nutzungsgrade insbesondere beim Erdgas direkt bemerkbar und ist für die grossen Unterschiede verantwortlich. Biogas schneidet ca. um den Faktor drei besser ab als Erdgas. Wiederum liegen die Werte für die Nutzung von Holz in WKK-Anlagen (v.a. Holzschnitzel) am günstigsten.

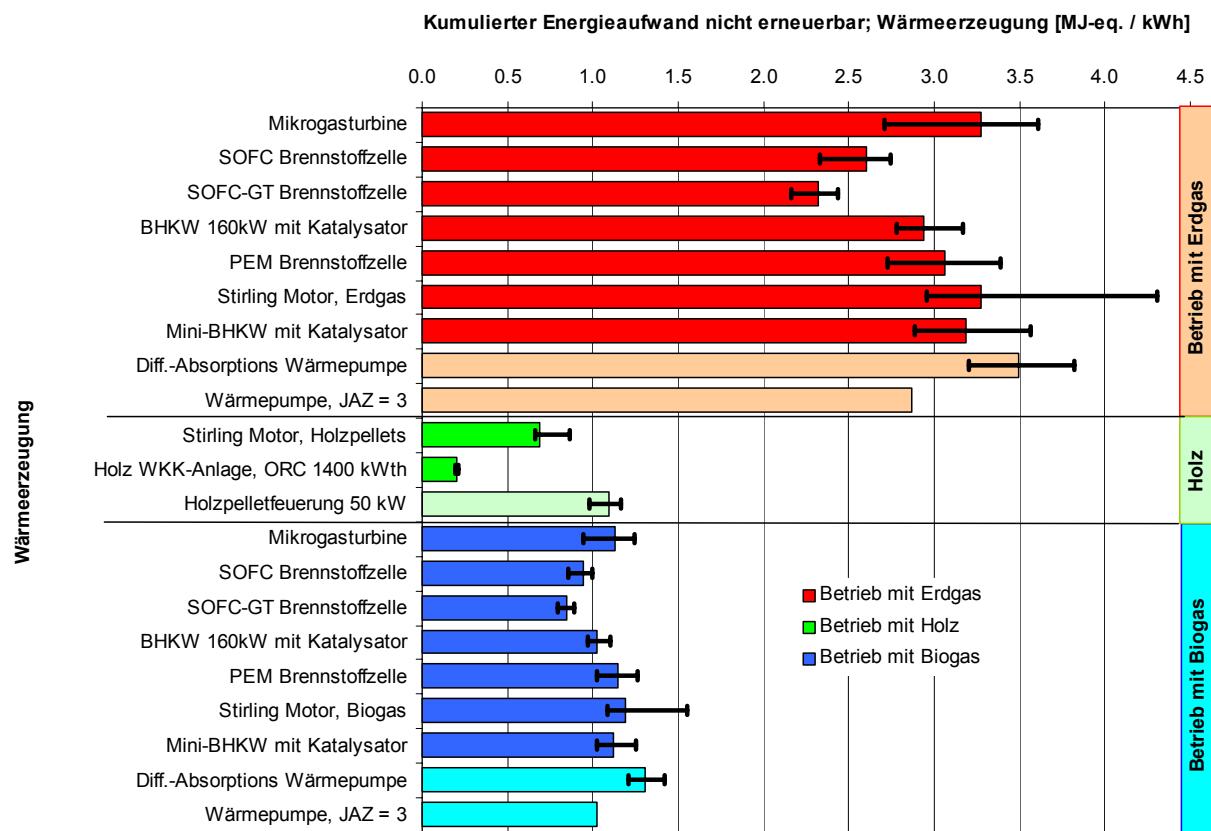


Abbildung 8.4 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear).

Abbildung 8.5 zeigt die Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06). Auffallend bei dieser Bewertungsmethode ist die geringe Differenz zwischen dem Betrieb mit Erdgas im Vergleich zum Betrieb mit erneuerbaren Brennstoffen (Biogas, Holz). Der Grund liegt in der deutlich stärkeren Gewichtung von Emissionen und Abfällen gegenüber den nichterneuerbaren Energieressourcen in dieser Methode. Wird jedoch nicht der Unterschied zwischen den Brennstoffen betrachtet sondern der Unterschied zwischen der getrennten Erzeugung und den WKK-Anlagen fällt auf, dass mit dieser Bewertungsmethode die WKK-Anlagen im Vergleich zur getrennten Erzeugung günstiger abschneiden. Die relativ hohe Umweltbelastung des Holzpelletkessels ist auf die Partikel und NOx Emissionen zurückzuführen.

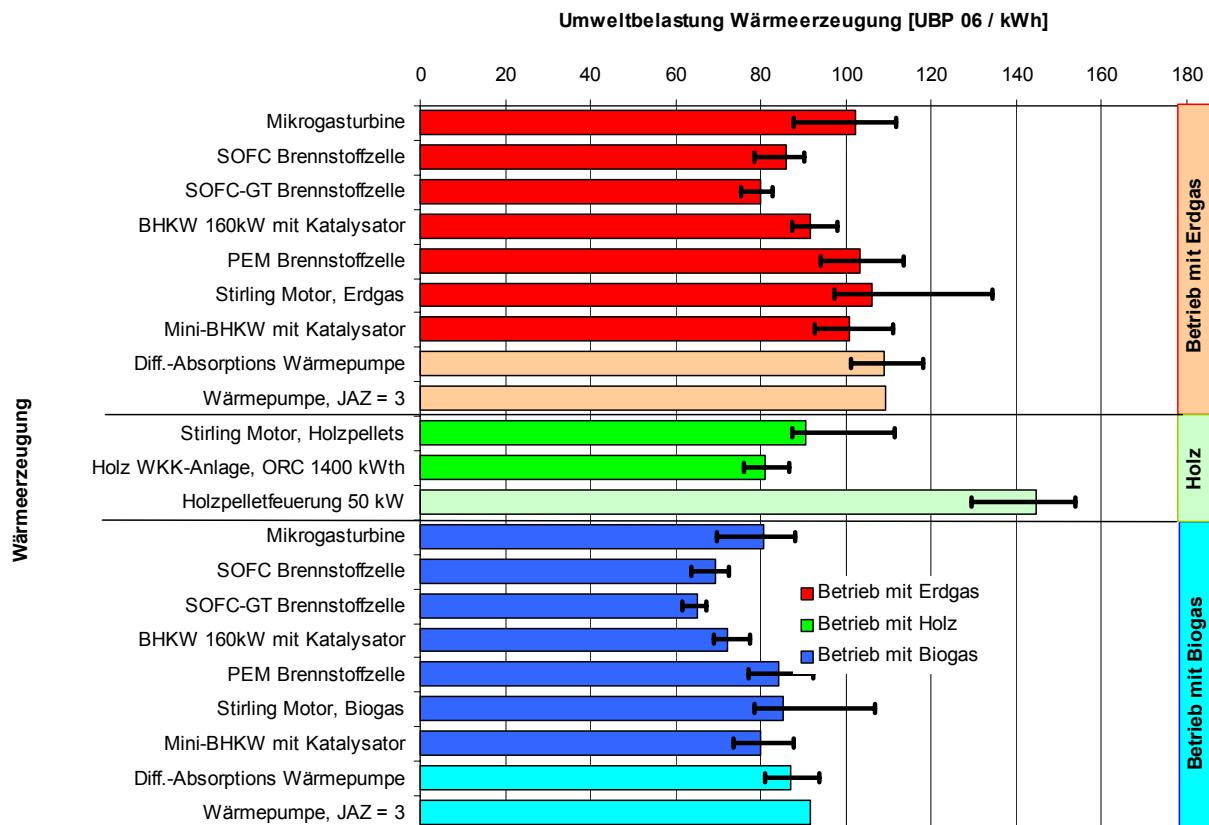


Abbildung 8.5 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte 2006)

### 8.2.2 Variation der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

In der folgenden Analyse wurde die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe zwischen 2 und 5 variiert. Dadurch zeigt sich in welchen Bereichen die Systemkombination WKK-Anlage und Wärmepumpe günstiger arbeitet als die getrennte Produktion von Strom und Wärme (Wärmepumpe betrieben mit Strom aus GuD-Kraftwerk). Für die Anlageneffizienz der WKK-Anlagen wurden die Standardwerte gemäss Tabelle 5.2 eingesetzt und nur die Effizienz der Wärmepumpe variiert.

Wie Abbildung 8.6 zeigt liegt der Punkt an dem die kleinen WKK-Anlagen günstiger abschneiden als die Wärmepumpe bei Jahresarbeitszahlen zwischen 2.5 und 3 bei der Bewertung mit Ecoindicator 99 und Betrieb mit Erdgas. Bei der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06) liegt dieser Punkt bei einer Jahresarbeitszahlen von etwa 3.5. Bei der Bewertung des Treibhauspotentials dagegen bereits bei einer Jahresarbeitszahl von etwa 2.5.

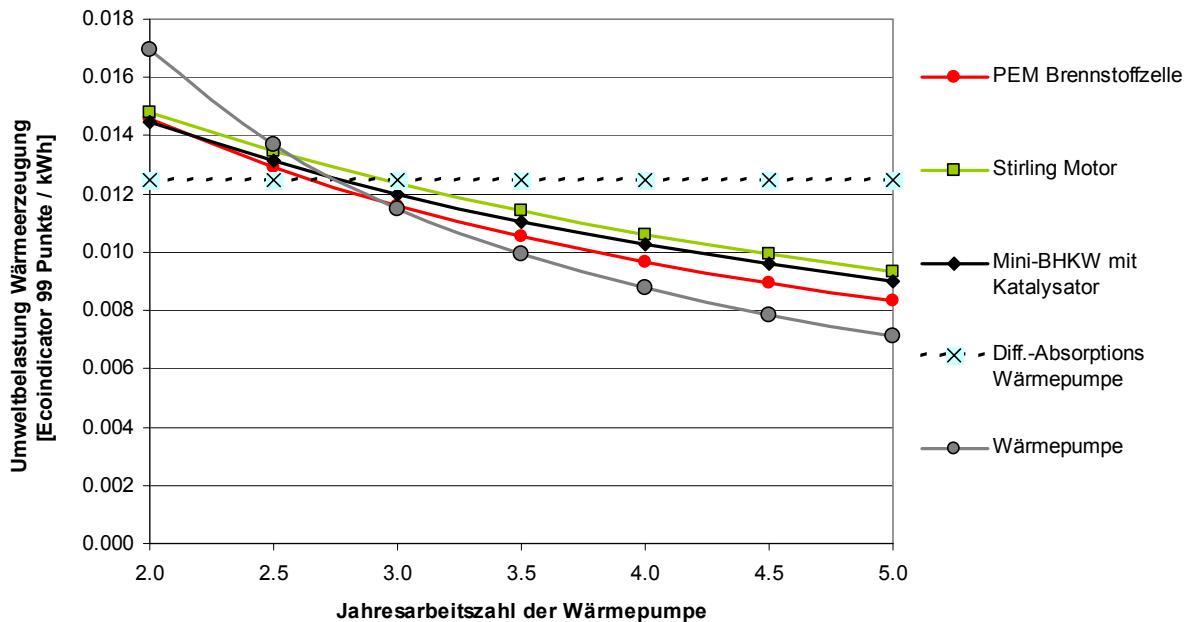


Abbildung 8.6 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von klein WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Abbildung 8.7 zeigt den Vergleich für grössere WKK-Anlagen. Im Vergleich zu den kleinen WKK-Anlagen liegen die verschiedenen Anlagen deutlicher auseinander. Daher ist der Schnittpunkt je nach Anlagentyp unterschiedlich. In jedem Fall günstiger sind die SOFC-Brennstoffzellen aufgrund ihres hohen Stromwirkungsgrades. Auch hier zeigen sich ähnliche Unterschiede zwischen den Bewertungsmethoden. Die dargestellte Bewertung mit Ecoindicator 99 liegt ebenfalls in etwa in der Mitte.

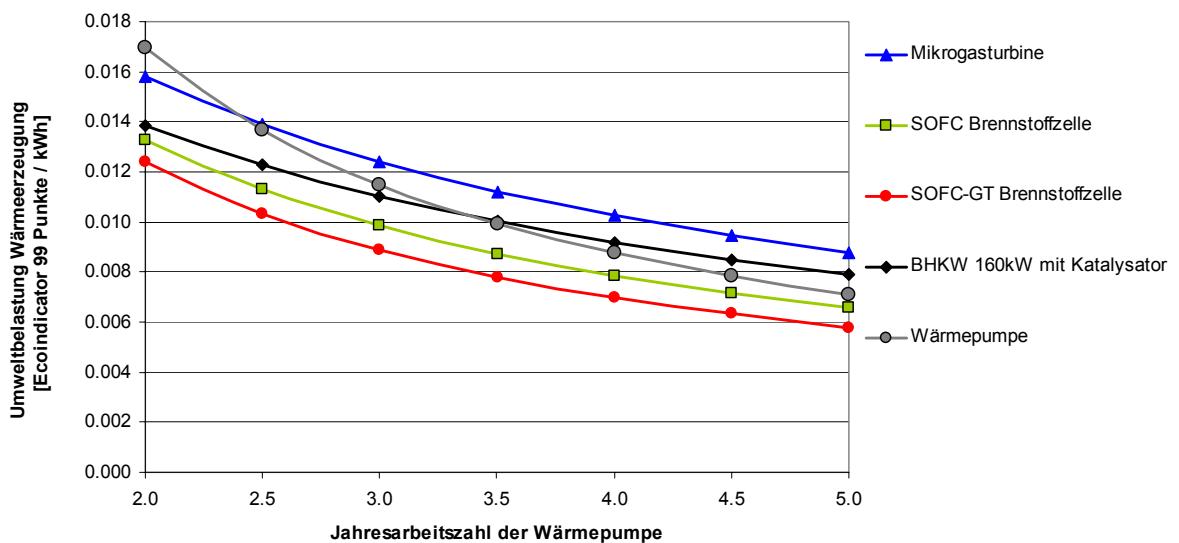


Abbildung 8.7 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von grösseren WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Abbildung 8.8 zeigt den Vergleich bewertet mit Ecoindicator 99 für kleine WKK-Anlagen, welche mit Biogas betrieben werden. Wie bereits früher festgestellt schneiden die WKK-Anlagen hier grundsätzlich günstiger ab. Es zeigt sich aber auch, dass die Belastungen bei hohen Arbeitszahlen

systemunabhängig sehr ähnlich sind. Ein ähnliches Resultat zeigt die Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06).

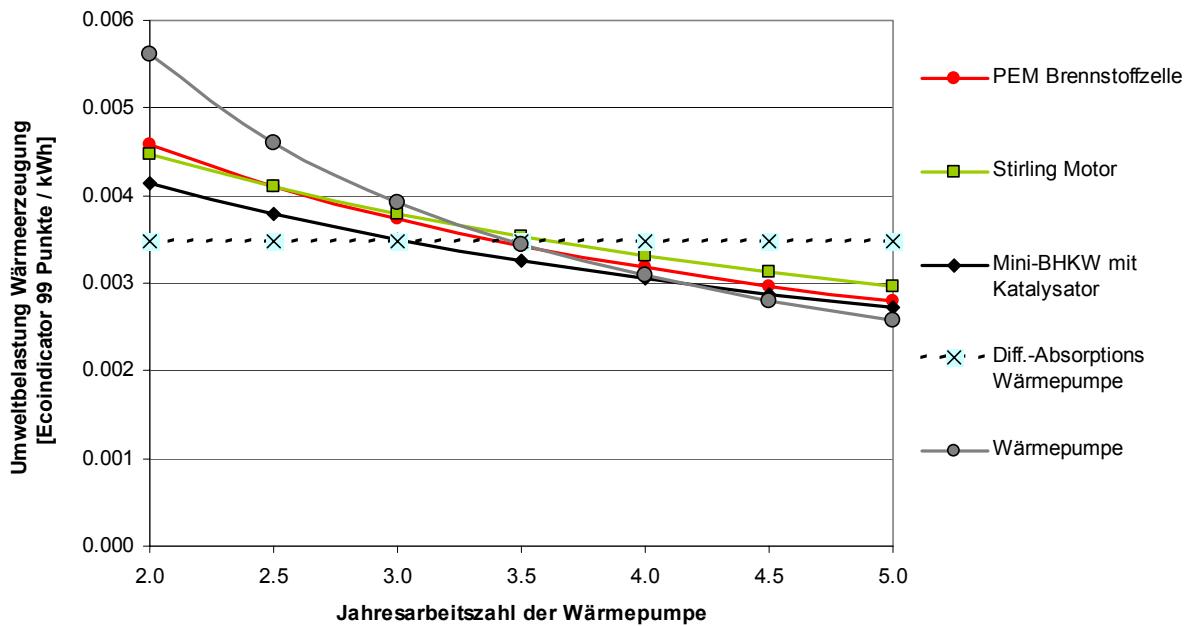


Abbildung 8.8 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von klein WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Biogas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Die Bewertung des Treibhauspotentials (Abbildung 8.9) dagegen zeigt nach wie vor einen Schnittpunkt bei einer Jahresarbeitszahl von knapp 2.5 und damit eine deutlich ungünstigere Ausgangslage. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Bewertung des nicherneuerbaren Primärenergieaufwandes.

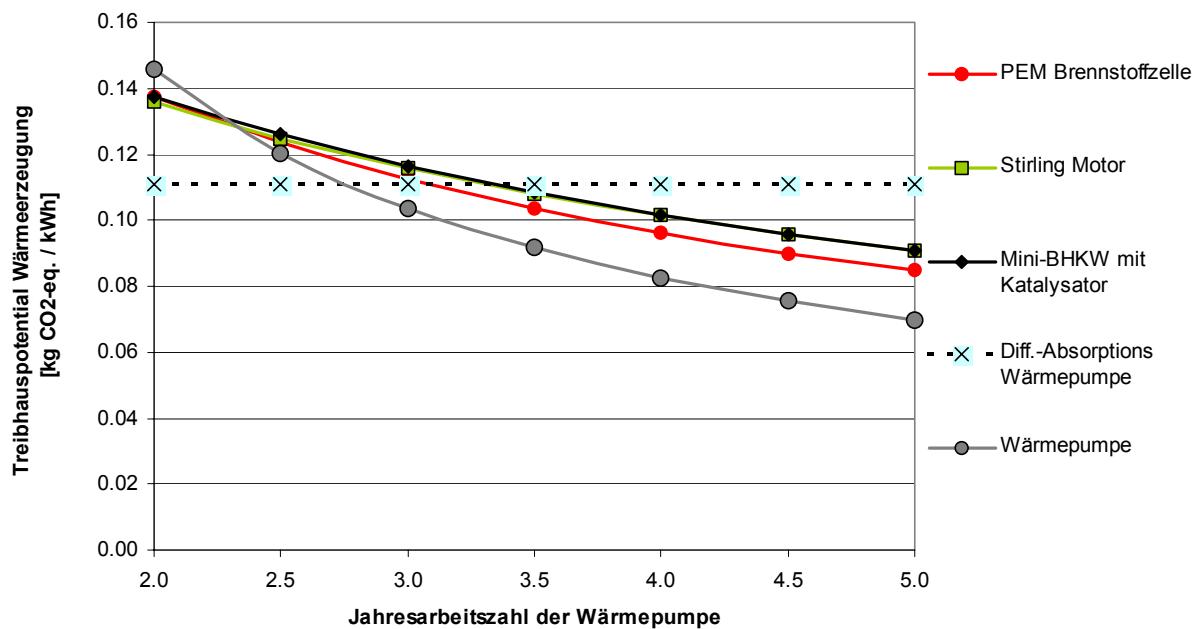


Abbildung 8.9 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von klein WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Biogas. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Abbildung 8.10 zeigt den Vergleich bewertet mit Ecoindicator 99 für grössere WKK-Anlagen, welche mit Biogas betrieben werden. Wie beim Betrieb mit Erdgas liegen die Anlagen deutlicher auseinander. Auch hier schneiden die WKK-Anlagen grundsätzlich günstiger ab als beim Betrieb mit Erdgas.

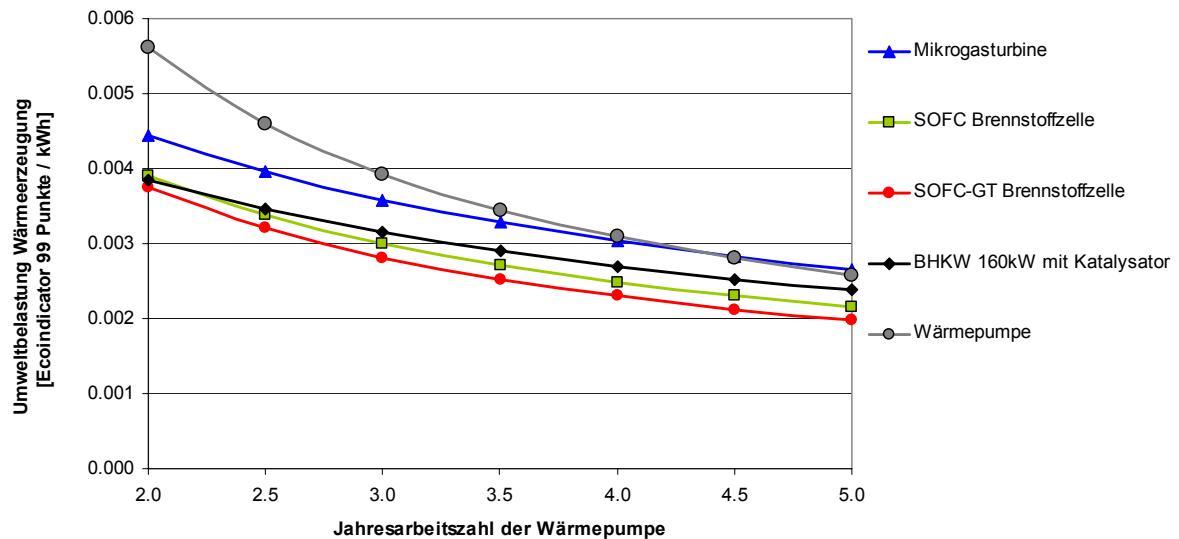


Abbildung 8.10 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von grossen WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Biogas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Wie bei den kleinen WKK-Anlagen ist die Bewertung des Treibhauspotentials (Abbildung 8.9) deutlich ungünstiger und zeigt ein fast identischer Verlauf wie beim Betrieb mit Erdgas (einfach auf einem tieferen Niveau). Wiederum zeigt sich auch bei der Bewertung des niederneuerbaren Primärenergieaufwandes ein ähnliches Bild.

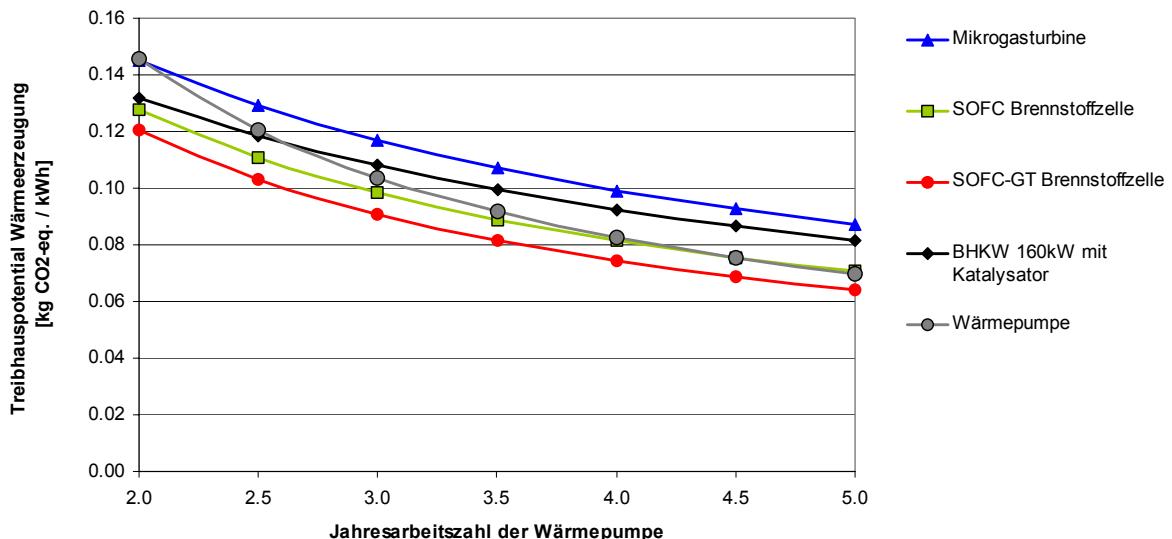


Abbildung 8.11 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von grossen WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Biogas. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

### 8.2.3 Einfluss des verwendeten Biogases

Für die Untersuchung wurde davon ausgegangen, dass das verwendete Biogas aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist wird. Dadurch sind die Resultate unabhängig vom effektiven Standort der Biogasproduktion. Für ausgewählte Standorte ist natürlich auch eine direkte Nutzung von lokal erzeugtem Biogas möglich. Abbildung 8.12 zeigt den Unterschied der Umweltbelastung bei WKK-Betrieb mit Biogas direkt ab Anlage (160 kWel BHKW mit Katalysator) im Vergleich zum Betrieb mit aufbereitetem Biogas ab Erdgasnetz. Der Vergleich bezieht sich auf ein Biogasmix ab Anlage, welcher zu 90% aus Biogas von Klärschlamm besteht.

Es zeigt sich deutlich, dass die Reinigung und Aufbereitung des Biogases einen deutlichen Umwelteinfluss hat. Daher sollte die lokale Nutzung von Biogas immer erste Priorität haben, sofern die erzielten Nutzungsgrade nicht wesentlich schlechter sind als bei einer Nutzung von aufbereitetem Biogas.

Je nach Anlage und Biogaszusammensetzung ist jedoch eine Aufbereitung des Rohgases unumgänglich (z.B. für PEM-Brennstoffzellen). Dies macht den Vorteil teilweise wieder zunicht. Andererseits ist Beispielsweise für eine Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC) der erhöhte CO<sub>2</sub>-Gehalt im Klärgas (ca. 30%) kein Nachteil sondern erhöht sogar die Anlagenleistung. Andere Komponenten des rohen Biogases wie z.B. H<sub>2</sub>S müssen insbesondere für Brennstoffzellensysteme entfernt werden.

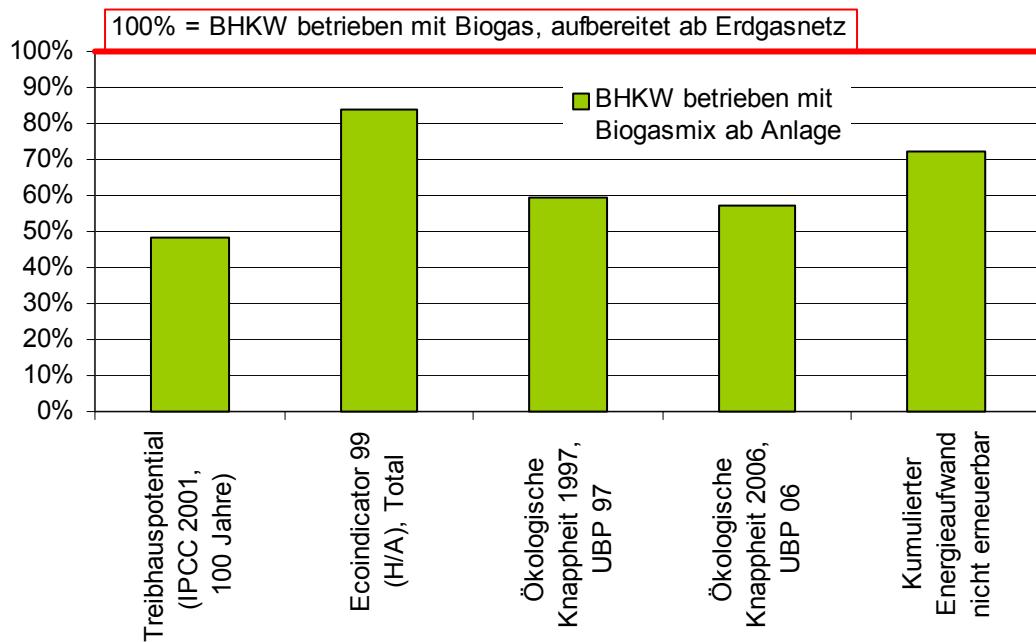


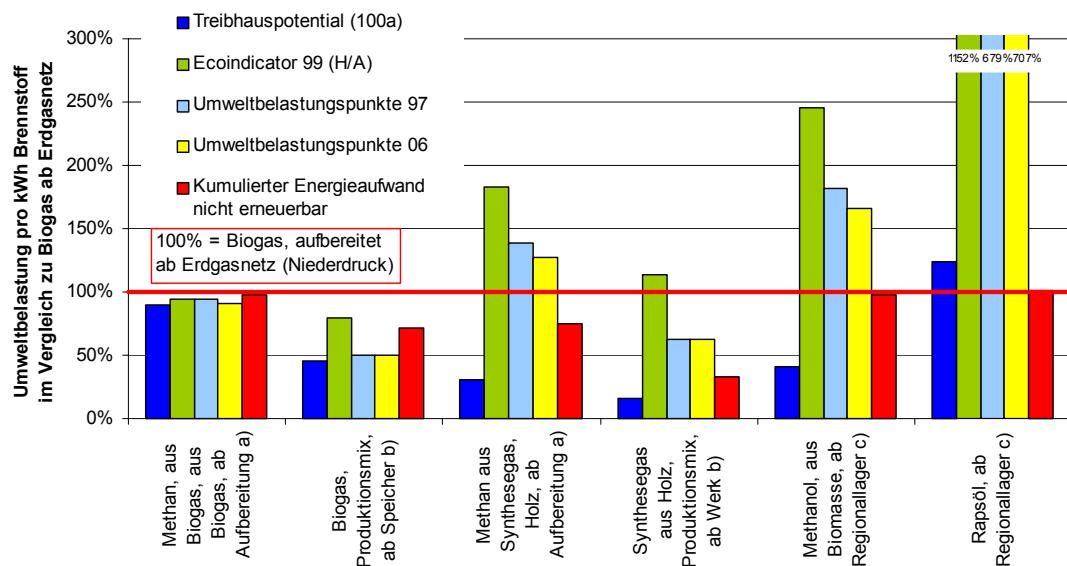
Abbildung 8.12 Vergleich der Umweltbelastung bei BHKW-Betrieb mit Biogas direkt ab Anlage (zu 90% aus Klärschlamm) anstatt mit aufbereitetem Biogas ab Erdgasnetz. Vergleich für 160 kWel BHKW mit Katalysator.

Neben der in Abbildung 8.12 dargestellten Nutzung eines Biogasmixes mit 90% Biogas aus Klärschlamm, können auch andere Quellen für die Herstellung von in WKK-Anlagen einsetzbarem Methangas genutzt werden. Abbildung 8.13 zeigt die Umweltbelastung der Brennstoffherstellung pro kWh Energieinhalt im Vergleich zum in dieser Studie verwendeten „Biogas ab Erdgasnetz“. Zur direkten Nutzung von nicht aufbereitetem Biogas müssen die Anlagen für den Betrieb mit niederkalorigem Brennstoff (20-25 MJ/Nm<sup>3</sup>) geeignet sein und allfälligen zusätzlichen Emissionen im Betrieb ist Beachtung zu schenken. Weniger klar ist ob die Nutzung von Holz mittels Vergasung eine günstigere Bilanz ergibt als eine direkte Nutzung in Anlagen (z.B. ORC WKK-Anlagen oder Pellet Stirling Motor). Das Resultat ist von vielen verschiedenen Parametern abhängig, welche im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden konnten. Es sind dies beispielsweise:

- Zentrale –Vergasung, Verteilung im Erdgasnetz versus dezentrale Vergasung mit direkter Nutzung
- Massnahmen zur Emissionsminderung in den jeweiligen Anlagen
- Wirkungsgrade und Gesamtnutzungsgrade v.A. bei direkter Nutzung des Holzgases.

Aus Holz hergestelltes Methanol könnte ebenfalls in WKK-Anlagen verwendet werden (z.B. in Anlagen ohne Anschluss ans Gasnetz). Gegenüber der direkten Nutzung von Holz in WKK-Anlagen (z.B. ORC WKK-Anlagen oder Pellet Stirling Motor) bringt dieser Weg jedoch aufgrund der hohen Umwandlungsverluste auch bei hohen elektrischen Wirkungsgraden (40-50%) keinen Umweltvorteil.

Für motorische WKK-Anlagen ist auch eine direkte Nutzung von Pflanzenölen möglich. Als Beispiel ist in Abbildung 8.13 die Umweltbelastung von Schweizer Rapsöl im Vergleich zu dem Studie verwendeten Biogas ab Erdgasnetz dargestellt. Zusätzlich zu der höheren Umweltbelastung aus der Brennstofferzeugung sind beim Pflanzenölbetrieb in motorischen WKK-Anlagen hohe NOx-Emissionen zu erwarten, welche in jedem Fall durch einen geeigneten Katalysator (SCR-Katalysator) zu reduzieren sind. Ein detaillierter Vergleich verschiedener Biogas- und Pflanzenölquellen ist in [18] zu finden.



- a) Biogas in Erdgasqualität (96% Methan) jedoch ohne Verteilerverluste durch Netz.  
b) Nicht aufbereitetes Biogas mit geringerem Heizwert. Nur in geeigneten Anlagen verwertbar, u.U. höhere Luftemissionen  
c) Flüssiger Brennstoff. Nur in geeigneten Anlagen verwertbar, u.U. höhere Luftemissionen

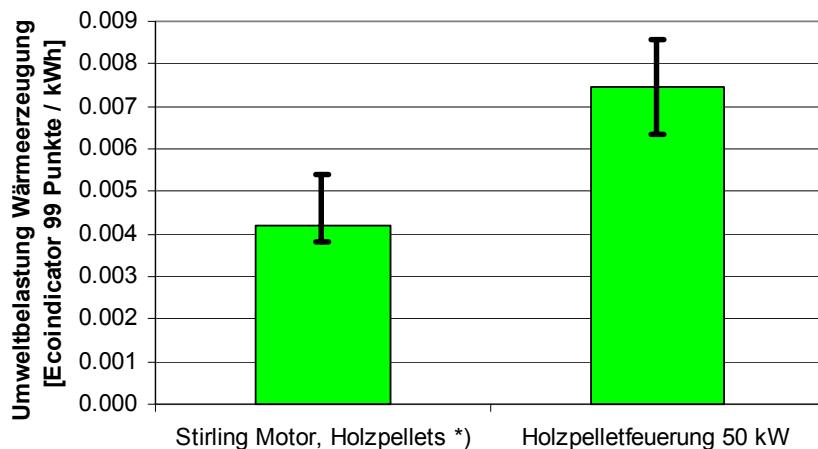
Abbildung 8.13 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Brennstoffe aus Biogas (anstatt mit aufbereitetem Biogas ab Erdgasnetz. Vergleich für 160 kWel BHKW mit Katalysator.

#### 8.2.4 Einfluss der Luftemissionen bei Pellet-Stirling Anlagen

Bei Anlagen, welche feste Biomasse verbrennen, sind die Partikel- und Stickoxydemissionen von Bedeutung für die Umweltbilanz. Der in dieser Untersuchung betrachtete Holzpellet-Stirlingmotor dürfte aufgrund der Betriebsanforderungen (Wartungsfreiheit) nur sehr geringe Partikelemissionen aufweisen. Da derzeit noch keine Emissionsmessdaten für diese Anlagen verfügbar sind, basieren die verwendeten Emissionsdaten auf Abschätzungen auf Basis modernster Holzpelletfeuerungen. Abbildung 8.14 zeigt der Einfluss der Höhe der Partikel- und Stickoxydemissionen auf die Umweltbelastung bewertet mit Ecoindicator 99 (H/A).

Im ungünstigen Fall könnte die Umweltbelastung der Wärmeerzeugung des Pellet-Stirlingmotors um bis zu 30% höher sein als in den Berechnungen angenommen. Im günstigen Fall wäre aber auch eine 10% tieferen Umweltbelastung plausibel. Im Vergleich mit der Holzpelletfeuerung liegt die Umweltbelastung des Pellet-Stirlingmotors in jedem Fall deutlich tiefer (im Mittel bei etwa 60%).

Werden die Resultate mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 1997 bzw. UBP 2006) bewertet ist der Einfluss der Partikel- und Stickoxydemissionen leicht tiefer und die Umweltbilanz in Vergleich zur Holzpelletfeuerung vergleichbar.



#### Bereich der Emissionswerte:

Stirling Motor: NOx: 50-100 mg/MJ<sub>Input</sub>; PM 2.5: 5-30 mg/MJ<sub>Input</sub>

Holzpelletfeuerung: NOx: 50-100 mg/MJ<sub>Input</sub>; PM 2.5: 9-30 mg/MJ<sub>Input</sub>

#### \*) WKK-System:

Produzierter Strom mit Wärmepumpe (JAZ = 3) in Wärme umgesetzt

Abbildung 8.14 Vergleich der Umweltbelastung für Stirling-Pellet WKK-System und Holzpelletfeuerung. Variation der Partikel und NOx-Emissionen. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)..

### 8.3. KÄLTEERZEUGUNG

Für die Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wird davon ausgegangen, dass der von der WKK Anlage erzeugte Strom vollständig für den Betrieb einer Kältemaschine verwendet wird. Damit wird ein Bezug der Umweltbelastungen pro kWh Kälte erreicht mit dem sich die Abhängigkeit der Resultate von der Anlageneffizienz aufzeigen lässt. Für das Vergleichssystem wird angenommen, dass der Strom für die Kältemaschine aus einem GuD-Kraftwerk stammt (je nach Betrachtung mit Erdgas- oder Biogasbetrieb). Zusätzlich wird eine Variante mit Betrieb der Kältemaschine mit Strom aus einer Photovoltaikanlage betrachtet. Abbildung 8.15 zeigt die verwendeten Systemgrenzen für diese Betrachtungen.

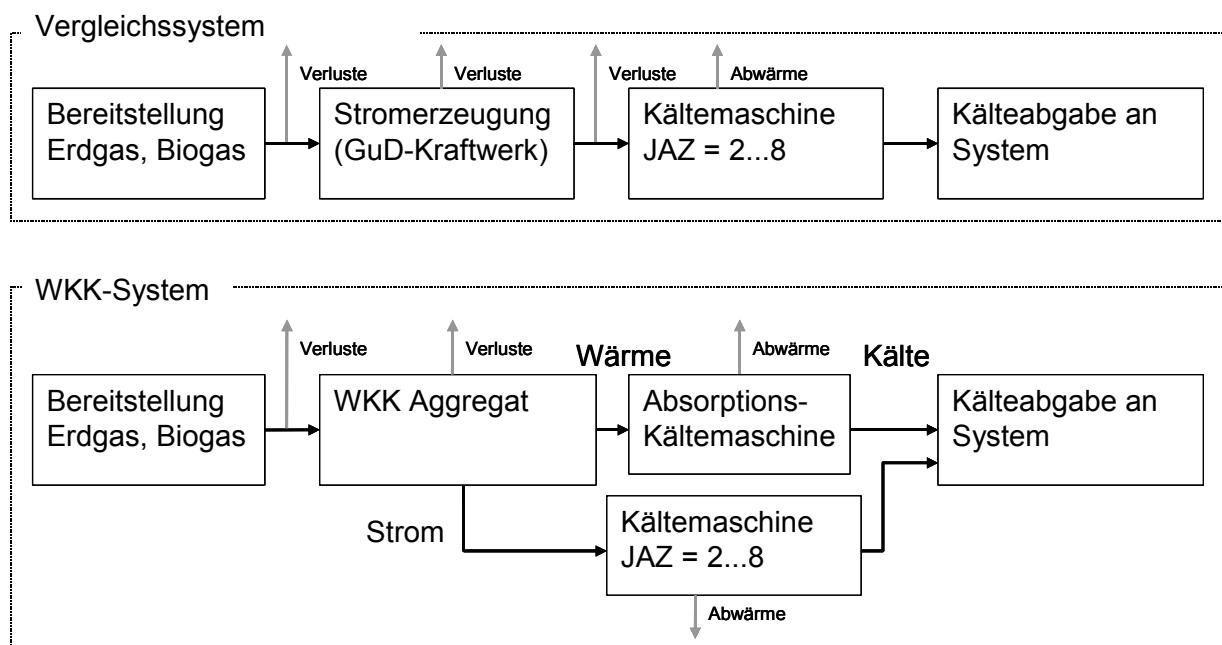


Abbildung 8.15 Systemgrenze für Kälteerzeugung mit WKK-System und Vergleichssystem für die Sensitivitätsanalyse

Tabelle 8.2 Verwendeter Effizienzbereich der WKK Systeme für die Sensitivitätsanalyse; Kälteproduktion

| WKK-System                       | el. Leistung         | unterer Wert                         | Standardwert                         | oberer Wert                          |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Gasmotor-BHKW                    | 160 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 30\%; \eta_{Ka} = 28\%$ | $\eta_{el} = 32\%; \eta_{Ka} = 39\%$ | $\eta_{el} = 35\%; \eta_{Ka} = 66\%$ |
| Mikro Gasturbine                 | 100 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 26\%; \eta_{Ka} = 24\%$ | $\eta_{el} = 30\%; \eta_{Ka} = 32\%$ | $\eta_{el} = 42\%; \eta_{Ka} = 46\%$ |
| SOFC-GT Brennstoffzelle          | 180 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 55\%; \eta_{Ka} = 12\%$ | $\eta_{el} = 58\%; \eta_{Ka} = 15\%$ | $\eta_{el} = 63\%; \eta_{Ka} = 26\%$ |
| SOFC-Brennstoffzelle             | 125 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 45\%; \eta_{Ka} = 17\%$ | $\eta_{el} = 47\%; \eta_{Ka} = 23\%$ | $\eta_{el} = 55\%; \eta_{Ka} = 36\%$ |
| ORC-Turbine (Holzschnitzel)      | 335 kW <sub>el</sub> | $\eta_{el} = 10\%; \eta_{Ka} = 39\%$ | $\eta_{el} = 15\%; \eta_{Ka} = 46\%$ | $\eta_{el} = 20\%; \eta_{Ka} = 72\%$ |
| GuD-Kraftwerk + Kältemaschine *) | 400 MW <sub>el</sub> |                                      | $\eta_{el} = 58\%; JAZ = 4$          |                                      |
| PV-Strom + Kältemaschine **)     | -                    |                                      | JAZ = 4                              |                                      |

$\eta_{th}$  beinhaltet neben dem therm. Wirkungsgrad der WKK-Anlage (siehe auch Tabelle 8.1) auch die folgenden Arbeitszahlen der Absorptionskältemaschine: Standardwert = 0.7; unterer Wert = 0.55, oberer Wert = 1.2 (2-stufige Anlage) gemäss [19]

\*) Vergleichssystem für Kälteproduktion aus Erdgas oder Biogas mit getrennter Strom- und Kälteproduktion

\*\*) Vergleichssystem für Kälteproduktion aus Sonnenenergie (Photovoltaik) mit getrennter Strom- und Kälteproduktion

In den Effizienzwerten wurde die Kälteverteilung im Gebäude sowie bei Nahwärme WKK-Systemen das Kälteverteilnetz (Verluste) nicht in die Systemgrenze einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale).

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Effizienzwerte der WKK-Anlagen auf die erzielte Umweltbelastung der Kälteproduktion dargestellt. In diesen Berechnungen wird für die Kälteproduktion mit einer Kältemaschine eine Jahresarbeitszahl von 4 zugrundegelegt. Wie sich die Variation der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf die Resultate auswirkt ist in Kapitel 8.3.1 erläutert.

Wie bei der Wärmeerzeugung wird durch den Einsatz von Biogas oder Holz bei der Bewertung mit Ecoindicator 99 (Abbildung 8.16) eine gut drei mal tiefere Umweltbelastung erreicht. Größere Verschiebungen der Resultate sind ebenfalls bei der Mikrogasturbine möglich, wo die Nutzungsgrade (v.A. Stromwirkungsgrad) durch neue Materialien noch stark gesteigert werden könnten. Eine Verringerung der Umweltbelastung ist vor allem bei SOFC Brennstoffzellen zu erwarten. Bei motorischen BHKW's ist die Umweltbelastung im günstigen Fall vergleichbar wie die getrennte Strom- und Kälteerzeugung.

Die geringste Umweltbelastung in diesem Vergleich ist mit einer elektrisch betriebenen Kältemaschine mit Strom aus einer Photovoltaikanlage zu erreichen.

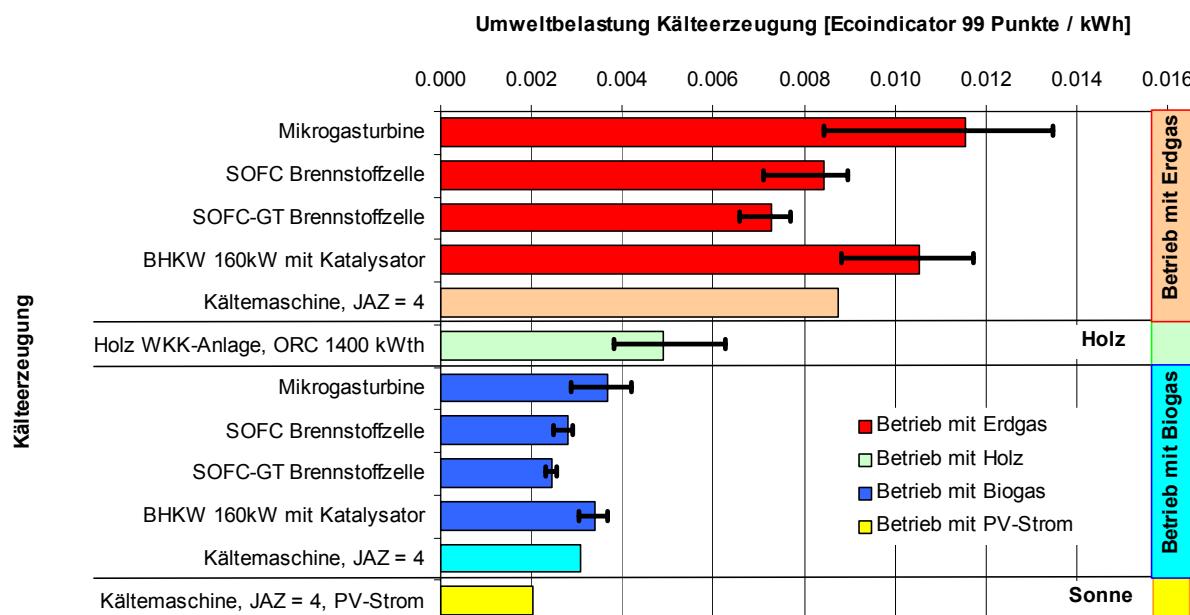


Abbildung 8.16 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 8.17) zeigten sich vor allem die Vorteile des Betriebs mit Holzschnitzel. Der Unterschied zwischen Erdgas und Biogas ist auch hier, wie bei der

Wärmeerzeugung deutlich geringen. Die Treibhausgasemissionen sind bei der Kälteerzeugung mit aufbereitetem Biogas nur gut 30% geringer als mit Erdgas. Die Unterschiede zwischen den Anlagetypen sind vergleichbar wie bei der Bewertung mit Ecoindicator 99.

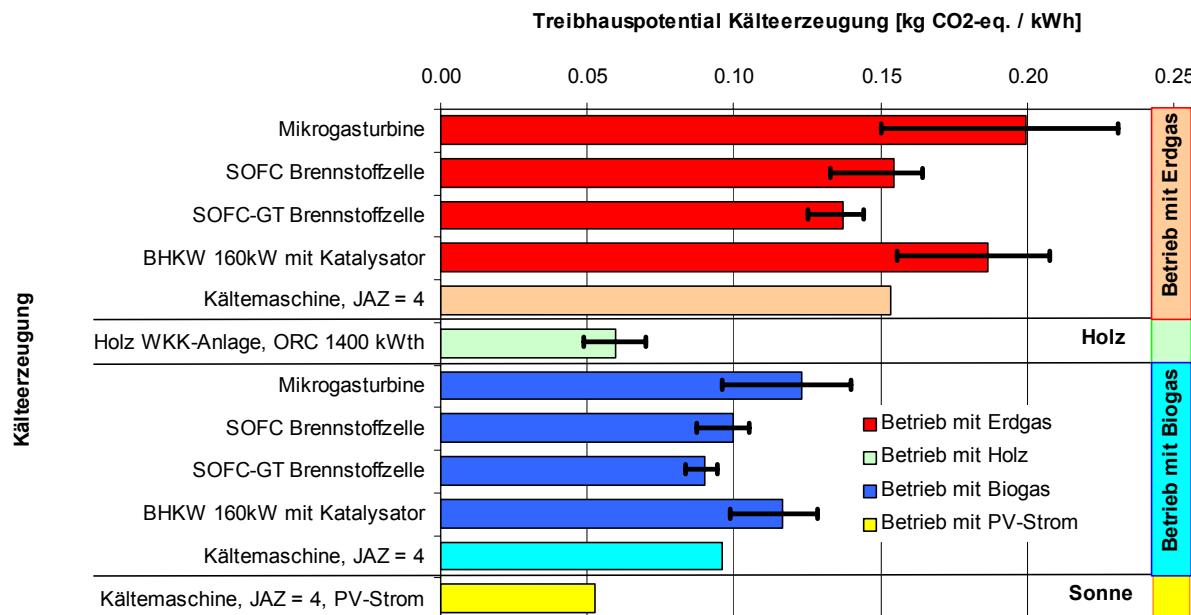


Abbildung 8.17 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001.

Abbildung 8.18 zeigt die Bewertung des nicherneuerbaren Primärenergiebedarfs (fossil + nuklear). Bei dieser Bewertung macht sich die Variation der Nutzungsgrade deutlich bemerkbar. Sie ist für die grossen Unterschiede verantwortlich. Wie bei der Bewertung der Treibhausgasemissionen schneiden die WKK-Anlagen eher ungünstiger ab als bei Ecoindicator 99 und den Umweltbelastungspunkten. Auch hier zeigt die Holzschnitzel WKK-Anlage die günstigsten Werte aller untersuchten WKK-Anlagen.

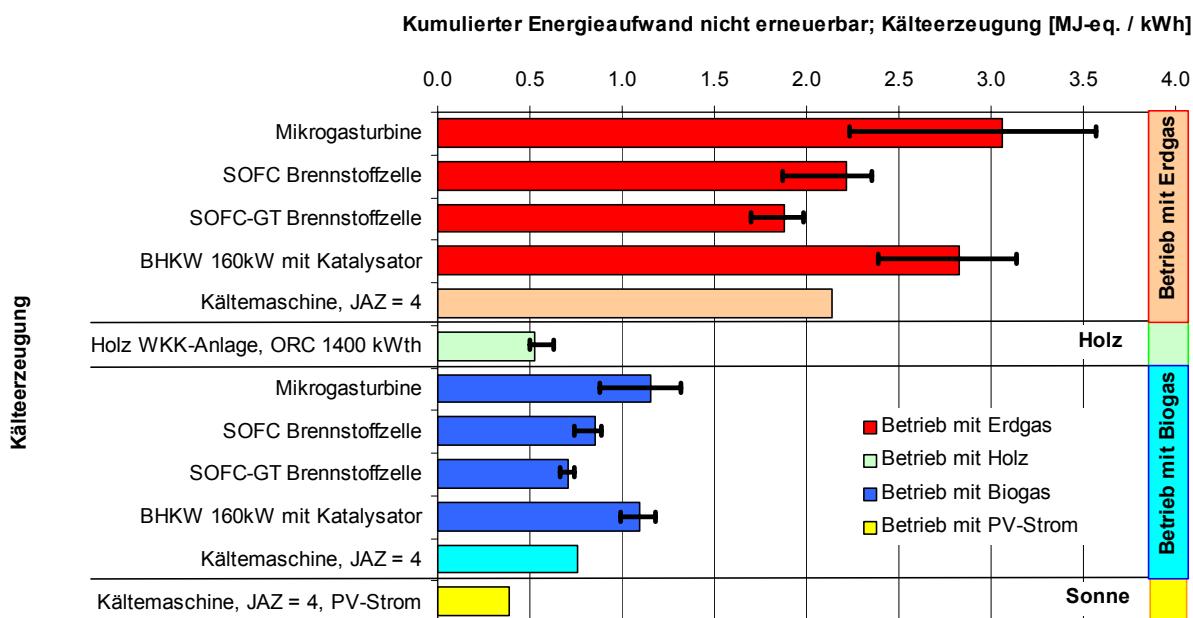


Abbildung 8.18 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear).

Abbildung 8.19 zeigt die Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06). Wie bei der Wärmeerzeugung zeigt sich nur eine geringe Differenz zwischen dem Betrieb mit Erdgas im Vergleich zum Betrieb mit erneuerbaren Brennstoffen (Biogas, Holz). Die hohe Umweltbelastung der Holzschnitzel WKK-Anlage ist vor allem auf die Partikel und NOx Emissionen zurückzuführen.

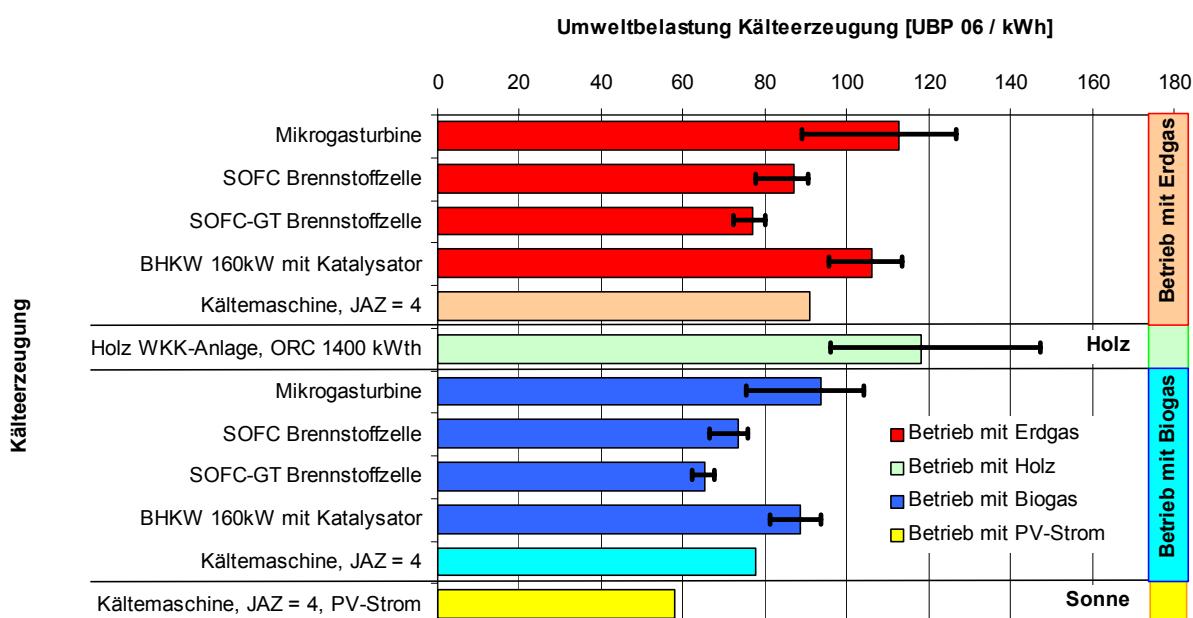


Abbildung 8.19 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte 2006)

### 8.3.1 Variation der Jahresarbeitszahl der Kältemaschine

In der folgenden Analyse wurde die Jahresarbeitszahl der Kältemaschine zwischen 2 und 8 variiert. Dadurch zeigt sich in welchen Bereichen die Systemkombination WKK-Anlage und Kältemaschine günstiger arbeitet als die getrennte Produktion von Strom und Wärme (Kältemaschine betrieben mit Strom aus GuD-Kraftwerk). Für die Anlageneffizienz der WKK-Anlagen wurden die Standardwerte gemäss Tabelle 5.3 eingesetzt und nur die Effizienz der Kältemaschine variiert.

Sowohl für den Betrieb mit Erdgas (Abbildung 8.20) wie auch mit Biogas (Abbildung 8.21) zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei höheren Arbeitszahlen der Kältemaschine ist die Umweltbelastung der Kälteerzeugung mit der SOFC-Brennstoffzelle mit Absorptionskältemaschine vergleichbar mit der Kälteerzeugung mit einer elektrisch betriebenen Kältemaschine (Strom aus GuD-Kraftwerk). Durch den sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad liegt die SOFC-GT Brennstoffzelle immer darunter und die übrigen gasbetriebenen WKK-Anlagen darüber. Nur bei tiefen Arbeitszahlen der Kältemaschine (<3) kommen diese WKK-Anlagen in einen Bereich mit vergleichbarer Umweltbelastung. Diese Feststellung gilt für die Bewertung mit Ecoindicator 99 und der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06).

Die Treibhausgasemissionen und der nicherneuerbare Primärenergieaufwand zeigen auch hier ein ungünstigeres Bild. Bei diesen Bewertungen bewegt sich die Kurve vor allem beim Biogasbetrieb noch deutlich länger entlang der Kurve der SOFC-Brennstoffzelle mit Absorptionskältemaschine. Für diese Betrachtungen stellt die SOFC-Brennstoffzelle damit die Minimaleffizienz für einen vergleichbaren Betrieb dar.

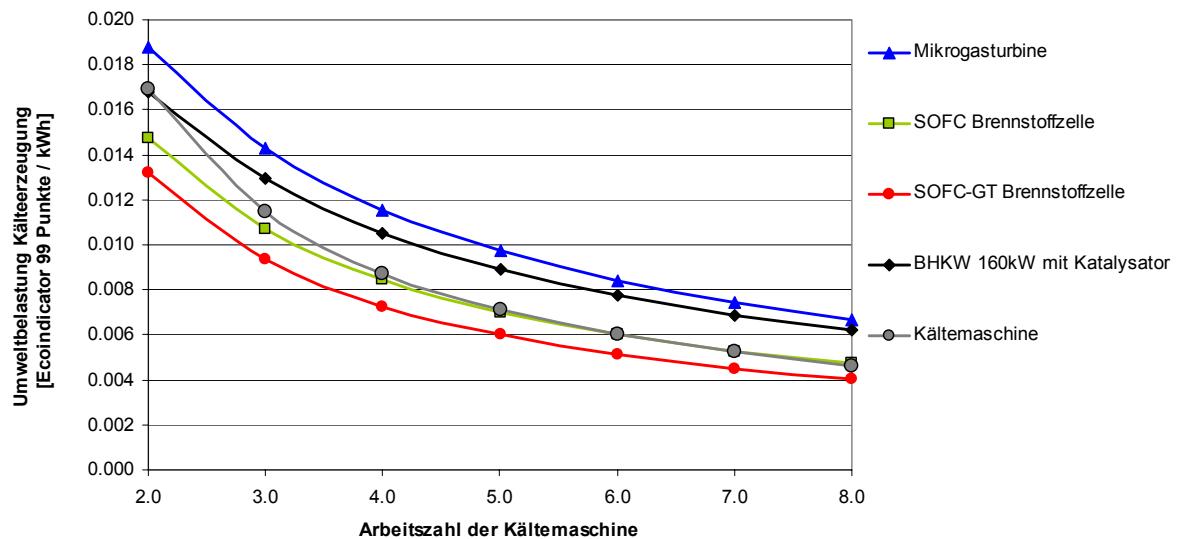


Abbildung 8.20 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Kältemaschine auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

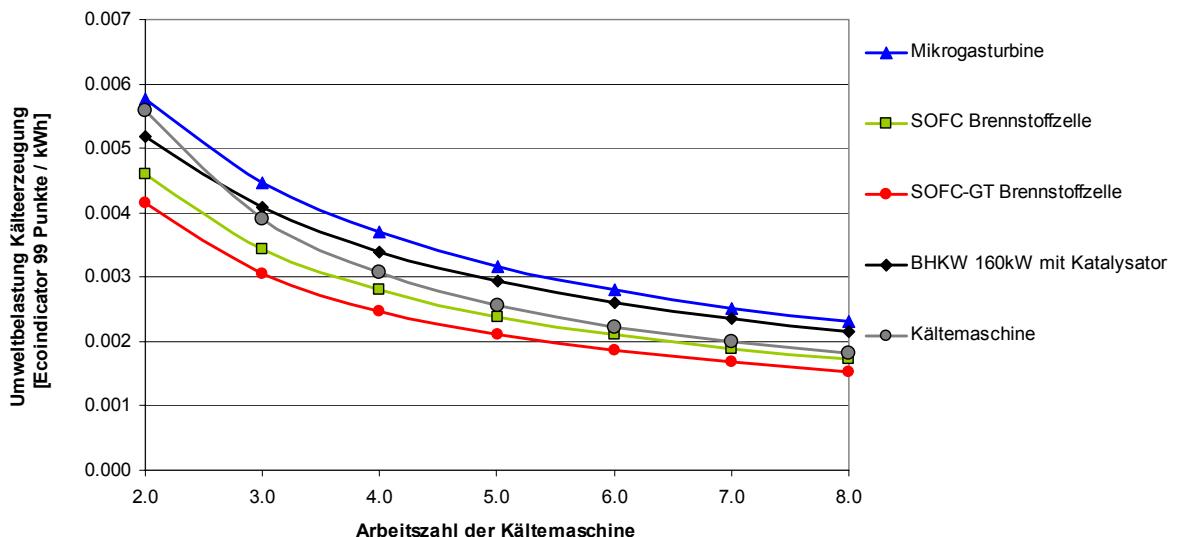


Abbildung 8.21 Einfluss der Jahresarbeitszahl der Kältemaschine auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Biogas. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

#### 8.4. EINFLUSS DES VERWENDETEN STROMES

Die Berechnungen basieren auf der Annahme, dass eine bestimmte Menge Erdgas oder Biogas möglichst effizient und mit geringst möglicher Umweltbelastung in Wärme (bzw. Strom für Betrieb von Wärmepumpen oder Kältemaschinen) umgewandelt werden soll. Da jedoch die Stromproduktion in Realität sehr unterschiedlich erfolgen kann und damit die resultierende Umweltbelastung des Vergleichssystems stark beeinflusst wird, stellt sich die Frage, welche Stromproduktionsarten massgebend für die Analyse sind.

Wie sich aus den bisher gezeigten Resultaten zeigt, ist die Wärme- und Kälteerzeugung über die Systemvariante GuD-Kraftwerk und Wärmepumpe oder Kältemaschine für viele Anwendungen eine sehr energieeffiziente Lösung und eine harte Konkurrenz für WKK-Systeme. Wird davon ausgegangen, dass bestehende (oder potentielle neue) Heizkessel durch effizientere Lösungen ersetzt werden sollen, führt dies bei verbreiteterem Einsatz von Wärmepumpen zu einem erhöhten Strombedarf.

Wird der erhöhte Strombedarf nicht durch andere Effizienzsteigerungen im Strombereich aufgefangen, wird eine zusätzliche Stromproduktion erforderlich. Dies wird in dieser Untersuchung angenommen. Als plausibles Szenario für diese Produktion wurden neben den dezentralen WKK-Anlagen die Stromproduktion mit zentralen Gaskombikraftwerken angenommen. Für den Sommerfall wurde zusätzlich die Stromproduktion mittels Photovoltaik betrachtet, da hier eine gute zeitliche Übereinstimmung von Produktion und Verbrauch vorhanden ist.

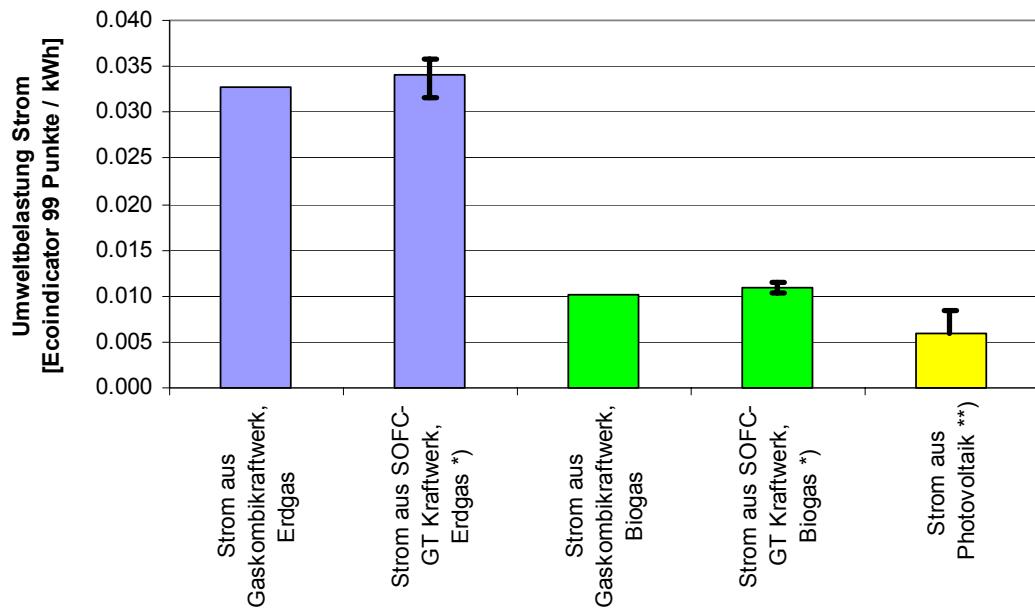
Wie Abbildung 8.22 zeigt, verursacht die Stromproduktion in einem grossen Gaskombikraftwerk (400 MW) eine vergleichbare Umweltbelastung wie wenn der Strom in einem kleineren Brennstoffzellenkraftwerk mit hohem elektrischem Wirkungsgrad (SOFC-GT) produziert würde. Die Anlagen könnten sowohl mit Erdgas als auch mit Biogas<sup>10</sup> betrieben werden.

Eine weitere Möglichkeit zur zentralen Produktion von Strom mit erneuerbaren Energieträgern ist die Vegasung von Holz in einer zentralen Anlage und die anschliessende Verwertung in einem mehrheitlich erdgasbetriebenen Gaskombikraftwerk. Diese Variante wurde in [20] aus wirtschaftlicher Sicht untersucht. Ökobilanzdaten standen jedoch nicht zur Verfügung und wurden im Rahmen der Studie auch nicht erhoben. Daher ist diese Variante in Abbildung 8.22 nicht enthalten.

Die geringsten Umweltbelastungen im gezeigten Vergleich verursacht die Stromproduktion mit Photovoltaik.

<sup>10</sup>

In der Betrachtung wurde von aufbereitetem Biogas ab Erdgasnetz ausgegangen.



\*) SOFC Gasturbinenkraftwerk ohne Wärmenutzung (nur Stromproduktion; inkl. Netzverluste)

Hauptwert bei  $\eta_{el} = 58\%$ ; unterer Grenzwert bei  $\eta_{el} = 63\%$ ; oberer Grenzwert bei  $\eta_{el} = 55\%$

\*\*) Hauptwert ohne Netzverluste; oberer Grenzwert inkl. Netzverluste von Niederspannungsnetz

Abbildung 8.22 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Stromproduktionsarten für die Kältemaschine des Vergleichssystems. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Die Differenz zwischen der Umweltbelastung der Stromproduktion mit Erdgas und mit Biogas ist stark von der Bewertungsmethode abhängig. Abbildung 8.23 zeigt die Unterschiede exemplarisch für die Stromproduktion in einem Brennstoffzellenkraftwerk (SOFC-GT). Diese Unterschiede sind auch in den in Kapitel 8.2 und 8.3 präsentierten Resultaten ersichtlich. Der Grund für die ungünstigere Bewertung des Biogases in der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 2006 und UBP 1997) ist in der starken Gewichtung der Luftemissionen (v.A. CH<sub>4</sub>, NOx, PM) und der Abfälle begründet. Demgegenüber wird in Ecoindicator 99 (H/A) der Bedarf an nichterneuerbaren Ressourcen stark gewichtet.

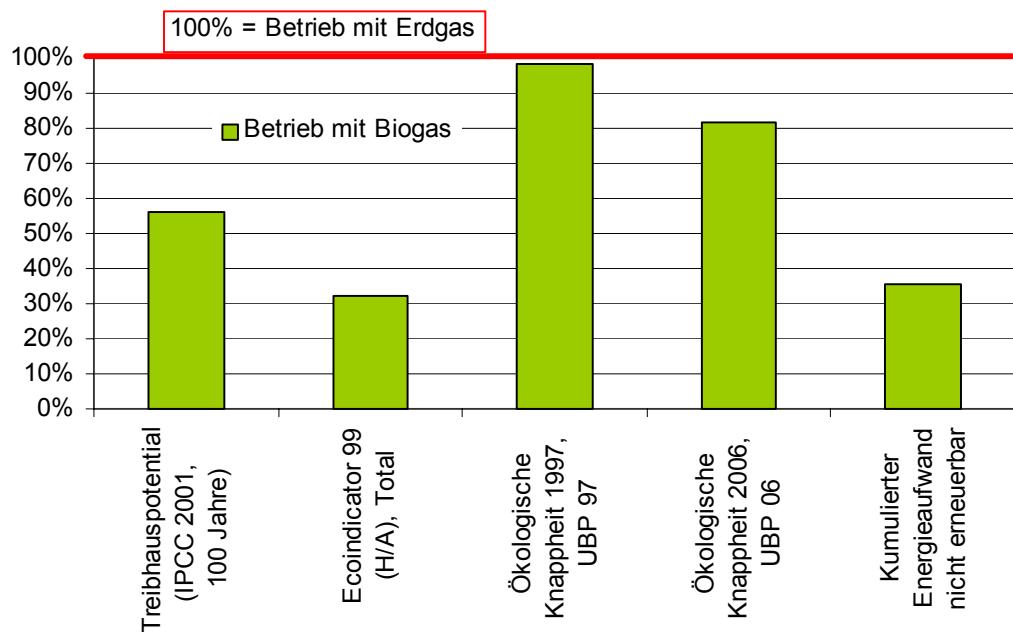


Abbildung 8.23 Vergleich der Umweltbelastung der Stromproduktion in einem Brennstoffzellenkraftwerk betrieben mit Biogas in Vergleich zum Betrieb mit Erdgas. Strombezug ab Niederspannungsnetz inkl. Netzverluste.

## 9. Systemkombinationen

### 9.1. EINFÜHRUNG

Die reale Anlagenauslegung muss neben den Anlagenkenngrössen (Nutzungsgrade, Leistungsmodulierbarkeit, etc.) auch die vom Gebäude oder dem Wärmenetz vorgegebenen Kenngrössen berücksichtigen. Dazu gehört neben dem Leistungsverlauf (Netzkennlinie) auch die Vor- und Rücklauftemperaturen (Heizkurve) und allenfalls weitere Verbraucher auf anderem Temperaturniveau und anderer Verbrauchsstruktur (Warmwasser). Insgesamt ergibt sich damit für jeden Einzelfall eine optimale Lösung, welche im Rahmen der Anlagenplanung zu suchen ist. Nachfolgend wird für die folgenden drei Anwendungsbereiche Aussagen zu verschiedenen Systemkombinationen gemacht:

- Gebäudesysteme: Anlage versorgt ein einzelnes Gebäude mit Wärme für Heizung und Warmwasser
- Nahwärmenetze: Anlage versorgt mehrerer Gebäude mit Wärme auf einem höheren Temperaturniveau (Temperaturniveau abhängig vom „schwäächsten“ Gebäude)
- Kälteerzeugung: Anlage versorgt das Gebäude zusätzlich mit Klima- oder Prozesskälte

### 9.2. ANWENDUNGEN FÜR GEBÄUDE WKK-SYSTEME

Bei Anlagen, welche nur ein einzelnes, kleineres Gebäude versorgen sind durch den geringen Leistungsbedarf und die geringeren Systemkosten monovalente Anlagen üblich. Dadurch ergeben sich für WKK-Anlagen Nachteile aufgrund des variierenden Wärmebedarfs. Je nach Systemauslegung wird der variierende Leistungsbedarf durch Wärmespeicher aufgefangen oder durch häufigen Betrieb im Teillastbereich aufgefangen. Beides wirkt sich ungünstig auf die Investitionskosten aus und schmälert zudem die erreichbare Anlageneffizienz.

Da die Gesamteffizienz der WKK-Anlagen nicht im selben Mass von den Versorgungstemperaturen abhängig ist wie die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe, ergibt sich ein zusätzlicher Nachteil der WKK-Anlagen gegenüber Wärmepumpen bei Gebäuden, welche mit tiefen Vor- und Rücklauftemperaturen betrieben werden (z.B. Minergie Bauten mit Bodenheizung).

Andererseits ist bei Wohngebäuden im Minergie- bzw. Minergie-P Standard der Wärmebedarf für Warmwasser anteilmässig deutlich höher und kann bei sehr gut gedämmten Gebäuden bis zu 70% des Gesamtwärmebedarfs ausmachen.

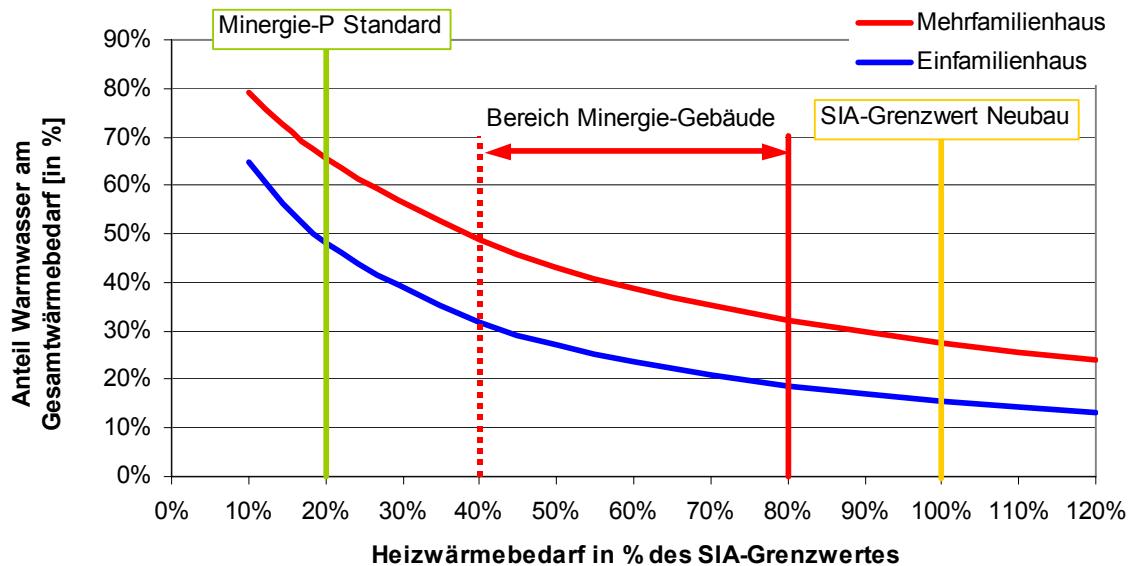


Abbildung 9.1 Anteil des Wärmebedarfs für Warmwasser am Gesamtwärmebedarf in Abhängigkeit der Güte der Gebäudehülle. Daten für typische Ein- und Mehrfamilienhäuser.

Nachfolgend werden die folgenden sechs Systemvarianten für die Wärmeerzeugung einander gegenübergestellt:

- Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe sowohl für Heizwärme wie auch Warmwasser
- Wärmeerzeugung für Heizwärme mit Wärmepumpe. Wärme für Warmwasser im Winter mit der Wärmepumpe und im Sommer mit thermischen Solarkollektoren (50% Jahresdeckungsgrad)
- Wärmeerzeugung mit WKK-Anlage sowohl für Heizwärme wie auch Warmwasser
- Wärmeerzeugung für Heizwärme mit WKK-Anlage. Wärme für Warmwasser im Winter mit der WKK-Anlage und im Sommer mit thermischen Solarkollektoren (50% Jahresdeckungsgrad)
- Wärmeerzeugung für Heizwärme (niedere Temperaturen) mit Wärmepumpe. Wärmeerzeugung für Warmwasser (hohe Temperaturen) mit WKK-Anlage
- Wärmeerzeugung für Heizwärme (niedere Temperaturen) mit Wärmepumpe. Wärmeerzeugung für Warmwasser (hohe Temperaturen) im Winter mit WKK-Anlage und im Sommer mit thermischen Solarkollektoren (50% Jahresdeckungsgrad)

Die ersten drei Systemvarianten sind übliche Kombinationen, welche in dieser Form für kleinere Gebäude öfters eingesetzt werden. Bei den letzten drei Systemvarianten soll gezeigt werden, welche Auswirkungen eine Systemkombination mit einer Wärmepumpe, bzw. einer thermischen Solaranlage für die WKK-Anlage hat.

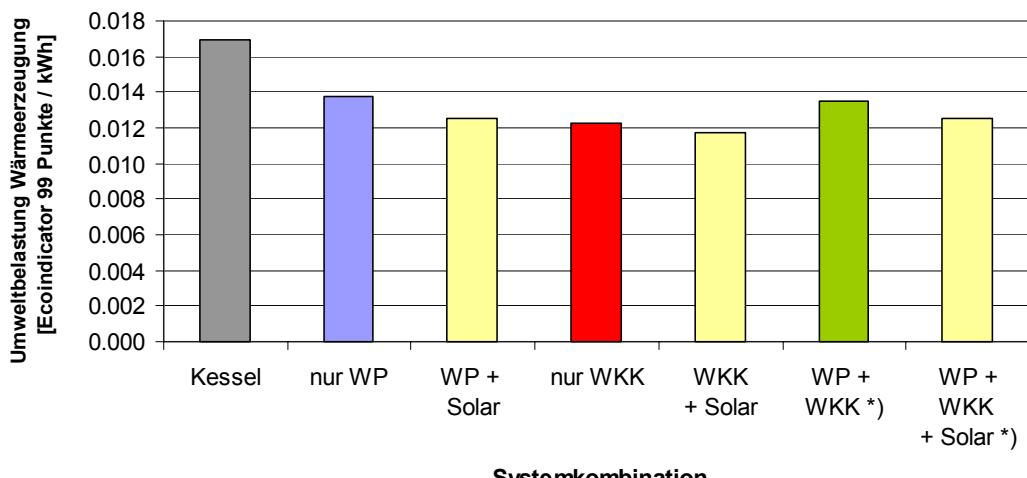
Für den Vergleich ist zum einen die benötigte Vorlauftemperatur für die Heizwärmeerzeugung wie auch der Anteil des Warmwasserbedarfs am Gesamtwärmebedarf von Bedeutung. Daher werden die drei in Tabelle 9.1 dargestellten Gebäudefälle unterschieden.

*Tabelle 9.1 Verwendete Kennwerte der Wärmeerzeugung für die drei Gebäudefälle*

| Kennwert / Gebäudefall                  | Altbau                               | Minergie Gebäude                     | Minergie-P Gebäude                   |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Anteil Warmwasser an Wärme              | $Q_{WW} / Q_{HWW} = 20\%$            | $Q_{WW} / Q_{HWW} = 40\%$            | $Q_{WW} / Q_{HWW} = 70\%$            |
| Vorlauftemperatur (bei $-10^{\circ}C$ ) | $60^{\circ}C$                        | $40^{\circ}C$                        | $30^{\circ}C$                        |
| JAZ Wärmepumpe nur Heizung              | JAZ = 2.7                            | JAZ = 3.5                            | JAZ = 4.0                            |
| JAZ Wärmepumpe Heizung + WW             | JAZ = 2.5                            | JAZ = 3.0                            | JAZ = 2.8                            |
| Effizienz WKK-Anlage                    | $\eta_{el} = 25\%; \eta_{th} = 65\%$ | $\eta_{el} = 25\%; \eta_{th} = 65\%$ | $\eta_{el} = 25\%; \eta_{th} = 65\%$ |

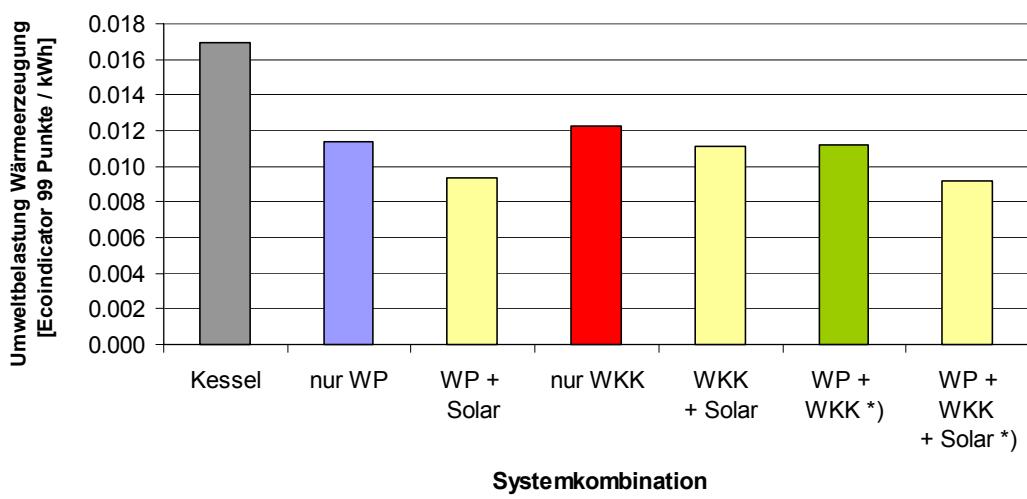
Während die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für die Erzeugung der Heizwärme mit sinkender Vorlauftemperatur und besserer Gebäudehülle deutlich steigt, ist dies bei Einbezug der Warmwassererzeugung nicht unbedingt der Fall. Der hohe Anteil des Warmwassers am Gesamtwärmebedarf beim Gebäudefall „Minergie-P“ führt durch die für die Warmwassererzeugung benötigten hohen Temperaturen zu einer sinkenden Jahresarbeitszahl des monovalenten Wärmepumpen-Systems. Für die WKK-Anlage dagegen ist ein hoher Wärmeanteil für Warmwasser günstig, da dies zu hohen Laufzeiten führt. Im Vergleich ungünstig für das WKK-System sind Gebäude mit tiefen Vorlauftemperaturen und einem tiefen Anteil des Wärmebedarfs für das Warmwasser.

In den folgenden Abbildungen sind die Systemvarianten für die drei untersuchten Gebäudefälle einander gegenübergestellt. Als Referenzvariante wird zusätzlich eine Wärmeerzeugung nur mit einem Gaskessel aufgetragen. Für den Vergleich wird davon ausgegangen, dass der für die Wärmepumpe benötigte Strom aus einem Gaskombi-Kraftwerk stammt und überschüssiger Strom aus der WKK-Anlage zeitgleich in umliegenden Liegenschaften mit Wärmepumpen (Jahresarbeitszahl = 3) verwendet werden kann. Die im folgenden präsentierten Resultate wurden mit der Methode Ecoindicator 99 (Typus Hierarchist, H/A) [9] bewertet.



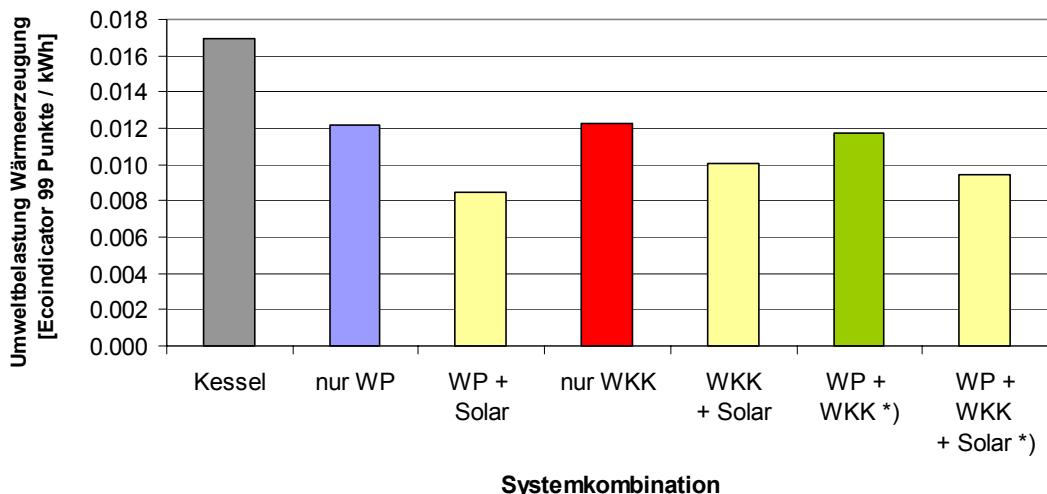
\*) Erzeugung Heizwärme mit Wärmepumpe  
WKK Anlage nur für Warmwassererzeugung

Abbildung 9.2 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Altbau mit hohen Vorlauftemperaturen. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).



\*) Erzeugung Heizwärme mit Wärmepumpe  
WKK Anlage nur für Warmwassererzeugung

Abbildung 9.3 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Gebäude im Minergie Standard. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).



\*) Erzeugung Heizwärme mit Wärmepumpe  
WKK Anlage nur für Warmwassererzeugung

Abbildung 9.4 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Gebäude im Minergie-P Standard. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Aus den Resultaten können folgende Folgerungen gezogen werden:

- WKK-Anlagen eignen sich vor allem für Gebäude welche hohen Vorlauftemperaturen benötigen
- Gegenüber Wärmepumpen meist im Nachteil sind WKK-Anlagen in Gebäuden mit niedrigen Vorlauftemperaturen und relativ geringem Anteil des Warmwassers am Gesamtwärmebedarf. In diese Kategorie gehören insbesondere Wohn- und Bürogebäude im Minergie Standard.
- Für Gebäude mit sehr tiefem Heizwärmebedarf und einem hohen Anteil des Warmwassers am Gesamtwärmebedarf (Minergie-P) eignen sich WKK-Systeme wieder besser. Ökologisch am günstigsten schneidet für diesen Gebäudetyp jedoch eine Kombination von Wärmepumpe und solarthermischer Warmwassererzeugung ab.
- In grösseren Gebäuden mit tiefen Heizungsvorlauftemperaturen und Wärmepumpenheizung kann die Einbindung einer WKK-Anlage für die Warmwassererzeugung ökologisch sinnvoll sein (Leistungsauslegung nur für Warmwasser). Damit wird zum einen die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe erhöht und andererseits eine lange Laufzeit der WKK-Anlage erreicht.

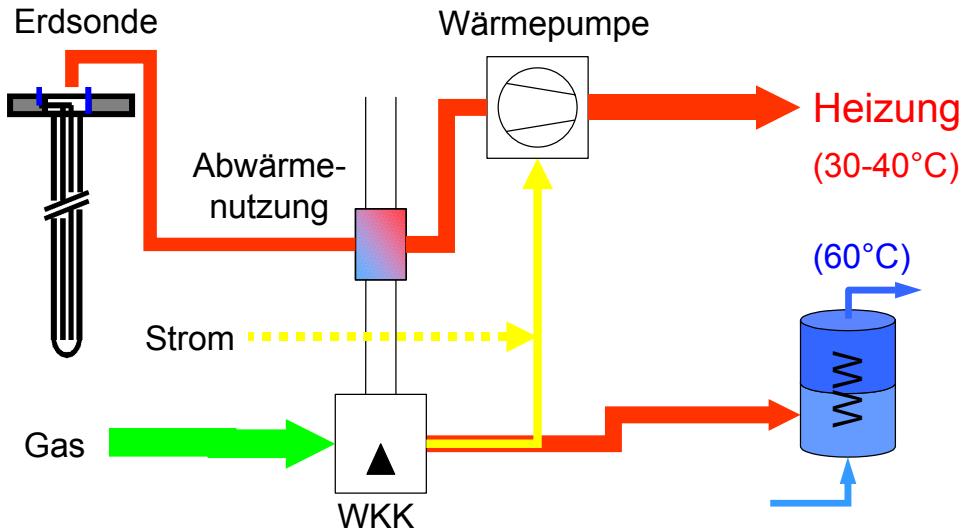
Die jeweils ökologisch günstigste Systemvariante ist stark objektabhängig. Neben der mit einer Wärmepumpe erzielbaren Arbeitszahl spielt die Effizienz der eingesetzten WKK Anlage (elektrischer Wirkungsgrad, Gesamtnutzungsgrad) eine entscheidende Rolle. Zudem ist auch das Systemdesign der WKK-Anlage von Bedeutung für das Resultat.

Vor allem Brennstoffzellen Aggregate werden oft mit einem integrierten Spitzenlastkessel konzipiert. Der Grund liegt im Ziel möglichst lange Laufzeiten der Brennstoffzelle mit Volllast zu erreichen. Durch den Spitzenlastkessel kann das Aggregat auch flexibler eingesetzt werden und deckt den gesamten Wärmebedarf des Gebäudes. Auf der anderen Seite wird damit je nach Anwendung die Gesamteffizienz der Wärmeerzeugung deutlich reduziert da bis zu 30% der Wärme nicht mit der WKK-Anlage sondern mit dem Zusatzkessel erzeugt wird.

In anderen Anlagenkonzepten wird mit einem Speicher zur Lastregelung gearbeitet. Damit wird eine minimale Laufzeit der WKK-Anlage je Einschaltung sichergestellt. Nachteilig ist bei diesem Konzept das zusätzliche Speicherverluste entstehen. Zudem wird damit die Jahreslaufzeit der Anlage (Vollbetriebsstunden) deutlich niedriger, was sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Für neue oder sanierte Wohngebäude (niedrige Heizungstemperaturen) wäre ein Anlagenkonzept optimal, welches die Vorteile der Wärmepumpe für die Raumwärmeerzeugung (hohe Effizienz) mit den Vorteilen der Wärmekraftkopplung für die Warmwassererzeugung (lange Anlagenlaufzeit) kombiniert. Durch die zusätzliche Wärmenutzung durch die Wärmepumpe könnte in der Heizperiode die WKK-Anlage mit einem sehr hohen Gesamtnutzungsgrad betrieben werden. Mit der Warmwassererzeugung durch die WKK-Anlage würde der geringe Effizienz der Warmwassererzeugung durch eine Wärmepumpe vermieden und zudem eine hohe Anlagenlaufzeit der WKK-Anlage erreicht. In Abbildung 9.5 ist das Anlagenkonzept schematisch dargestellt. Für

grössere Anlagen liesse sich ein solches Konzept bereits heute realisieren. Für einen breiten Einsatz müssten allerdings die Anlagenkomponenten zu einem integrierten Kompleksystem vereint werden können.



Maximierung des Gesamtnutzungsgrades durch erweiterte Abwärmenutzung im Heizfall  
 Hohe Effizienz der Heizwärmeerzeugung durch Wärmepumpe (Niedertemperatur)  
 Minimaler externer Strombedarf durch Eigenproduktion aus WKK-Anlage

Abbildung 9.5 Schema für Anlagenkonzept mit Wärmepumpenheizung und WKK-Anlage für Warmwassererzeugung

Für alle Gebäude wo der Wärmebedarf für das Warmwasser von grösserer Bedeutung ist sind Kombinationen mit solarthermischer Warmwassererzeugung ökologisch sinnvoll. Dadurch wird in diesen Fällen jedoch die Jahreslaufzeit der WKK-Anlage deutlich reduziert. Damit reduziert sich auch der Umweltvorteil gegenüber einer Anlage mit Gasheizung und Solaranlage wie auch in [21] festgestellt wurde. Daher dürften solche Kombinationen vor allem aus wirtschaftlichen Gründen wenig angewendet werden. Vor allem in Gebäuden mit niedrigen Heizungsvorlauftemperaturen ist die Kombination von Wärmepumpe und Solaranlage sowohl ökologisch wie auch ökonomisch klar überlegen.

### 9.3. ANWENDUNGEN FÜR NAHWÄRME-WKK

Bei Nahuwärmesystemen ist die benötigte Vorlauftemperatur oft höher als bei Systemen ohne Verbund. Der Grund ist neben dem Temperaturgradienten der Übergabestation vor allem auch der Umstand, dass die Systemtemperaturen durch den ungünstigsten Verbraucher bestimmt werden. Um die Effizienz zu steigern muss daher in erster Linie eine Optimierung der ungünstigsten Verbraucher erfolgen (Senkung von hohen Vor- und Rücklauftemperaturen).

Für den Einsatz von WKK-Anlagen eignen sich jedoch Wärmeverbünde aus folgenden Gründen:

- Durch die benötigten Temperaturen im Bereich von 60-80°C zeigen WKK-Systeme Effizienzvorteile gegenüber einer getrennten Erzeugung
- Durch die grösseren Leistungen sind bivalente Systeme sinnvoll, welche zu hohen Laufzeiten der WKK-Anlage führen und damit wirtschaftlich günstig sind.
- Durch die bei diesen Anlagen übliche technische Betreuung kann eine gute Anlageneffizienz gewährleistet werden.

Nachfolgend werden die folgenden drei Systemvarianten für die Wärmeerzeugung einander gegenübergestellt:

- Wärmeerzeugung mit WKK-Anlage und Spitzenkessel. Auslegung auf einen hohen Anteil der Wärmeerzeugung mit der WKK-Anlage

- Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe für die Niedertemperatur-Grundlast, WKK-Anlage und Spitzenkessel. Auslegung auf einen optimalen Anlagennutzungsgrad
- Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe für die Niedertemperatur-Grundlast und Gaskessel für Temperaturen über 50°C sowie Spitzendeckung. Auslegung auf einen optimalen Anlagennutzungsgrad

Für den Vergleich wird von einem Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 75 °C (55 °C Rücklauf) bei Auslegungsbedingungen (-10 °C) ausgegangen. Die verwendete Leistungsaufteilung zwischen BHKW, Wärmepumpe und Gaskessel ist in Tabelle 9.2 dargestellt. Die Leistung des Kessels wird aus Sicherheitsgründen (Redundanz bei Anlagenausfall) in der Realität deutlich höher sein, was jedoch auf das Resultat von untergeordneter Bedeutung ist.

Tabelle 9.2 Verwendete Kennwerte der Wärmeerzeugung für die betrachteten Nahwärmesysteme

| WKK-System    | Effizienzkennwerte                      | BHKW + Kessel       | WP + BHKW + Kessel        | WP + Kessel                 |
|---------------|---|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Gasmotor-BHKW | $\eta_{el} = 32\%$ ; $\eta_{th} = 55\%$ | $P_{BHKW} = 50\%$   | $P_{BHKW} = 35\%$         | –                           |
| Wärmepumpe *) | JAZ = 2.7-3.0                           | –                   | $P_{WP} = 15\%$ (JAZ = 3) | $P_{WP} = 25\%$ (JAZ = 2.7) |
| Gaskessel     | $\eta_{th} = 90\%$                      | $P_{Kessel} = 50\%$ | $P_{Kessel} = 50\%$       | $P_{Kessel} = 75\%$         |

\*) Es wird von einer Wärmepumpe mit Erdsonde bzw. Grundwasser ausgegangen.

In den verwendeten Daten und Effizienzkennwerten wird das Wärmeverteilnetz (Leitungen, Verluste) nicht einbezogen (Systemgrenze Heizzentrale).

Im Betrachteten Fall ist der Wärmeverbund 9 Monate im Jahr in Betrieb (Sommerabschaltung Juni, Juli, August). Unter der in Tabelle 9.2 dargestellten Leistungsaufteilung lassen sich für das BHKW günstige Laufzeiten von gut 5'000 h pro Jahr erreichen. Werden die Leistungsanteile der einzelnen Erzeuger (Wärmepumpe, BHKW, Gaskessel) in Abhängigkeit der Jahresstunden aufgetragen ergibt sich für das gewählte Beispiel folgendes Bild:

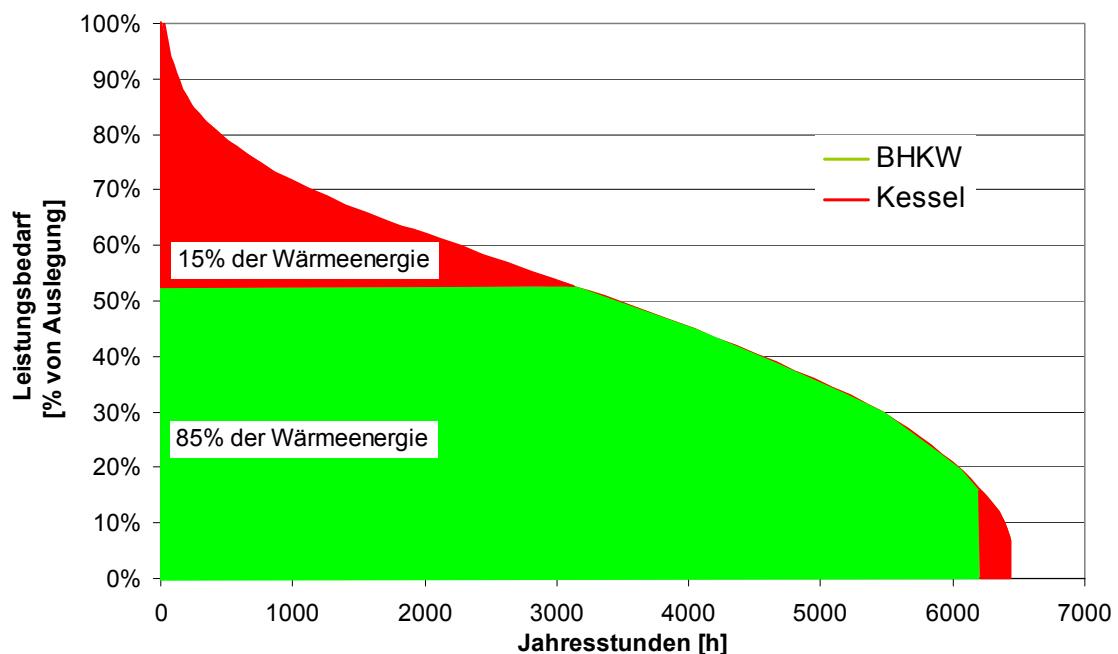


Abbildung 9.6 Leistungsanteile und Wärmeproduktion für Systemkombination mit BHKW und Spitzenkessel

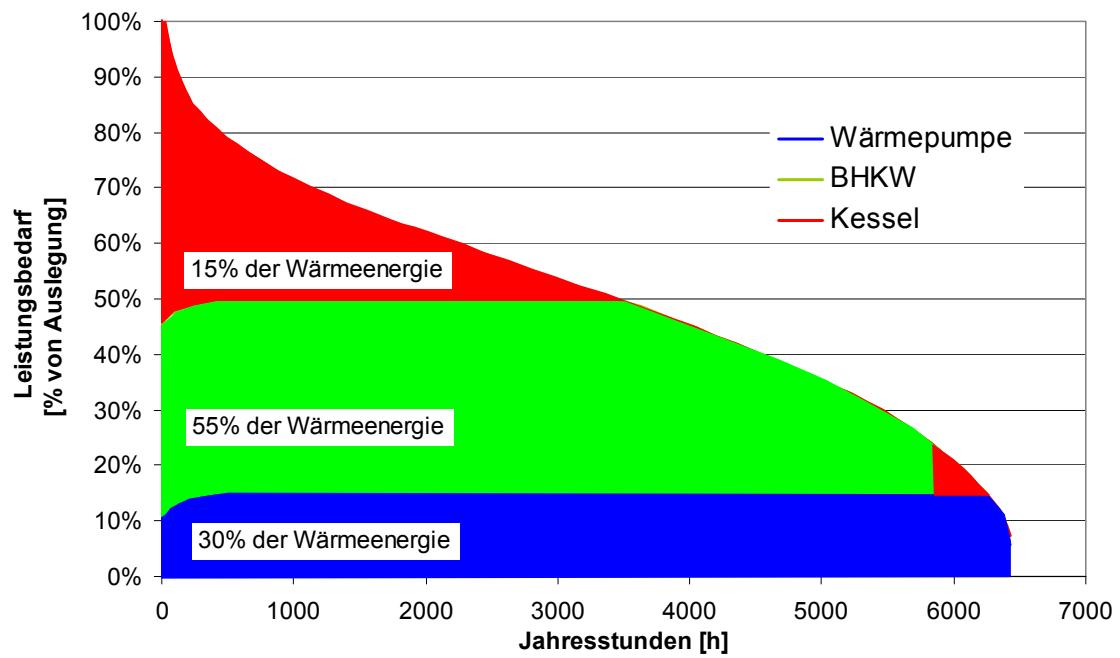


Abbildung 9.7 Leistungsanteile und Wärmeproduktion für Systemkombination mit Grundlast-Wärmepumpe, BHKW und Spitzenkessel

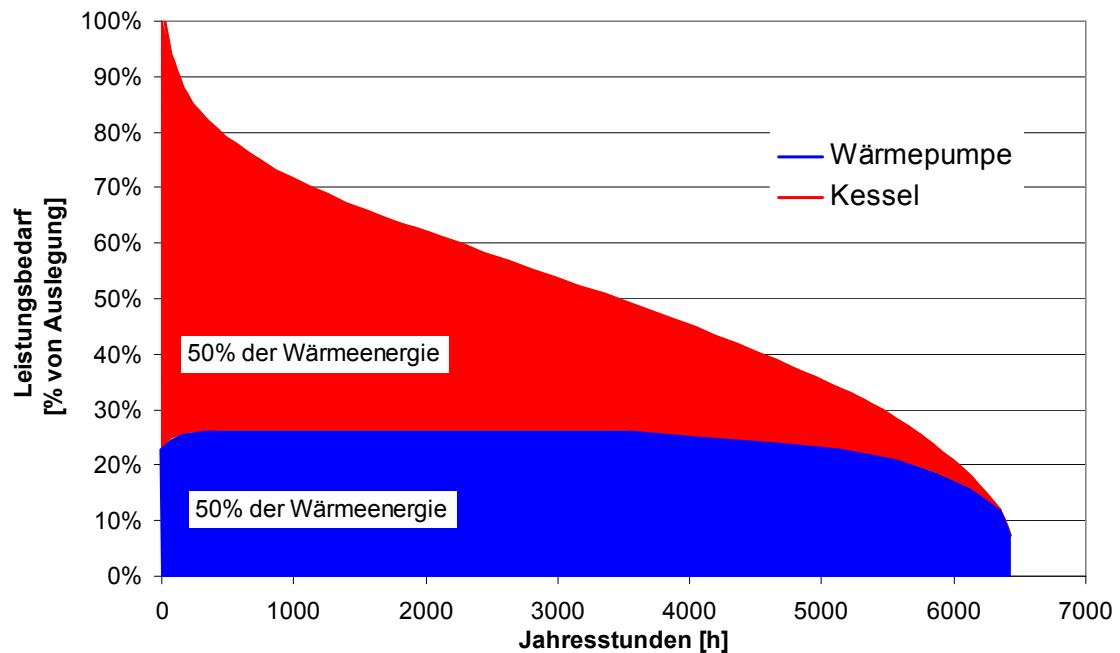


Abbildung 9.8 Leistungsanteile und Wärmeproduktion für Systemkombination mit Grundlast-Wärmepumpe und Spitzenkessel

Wird davon ausgegangen, dass der für die Wärmepumpe benötigte Strom aus einem Gaskombi-Kraftwerk stammt und überschüssiger Strom aus der WKK-Anlage zeitgleich in umliegenden Liegenschaften mit Wärmepumpen (Jahresarbeitszahl = 3) verwendet werden kann, ergibt sich für den Vergleich der Varianten folgendes Bild:

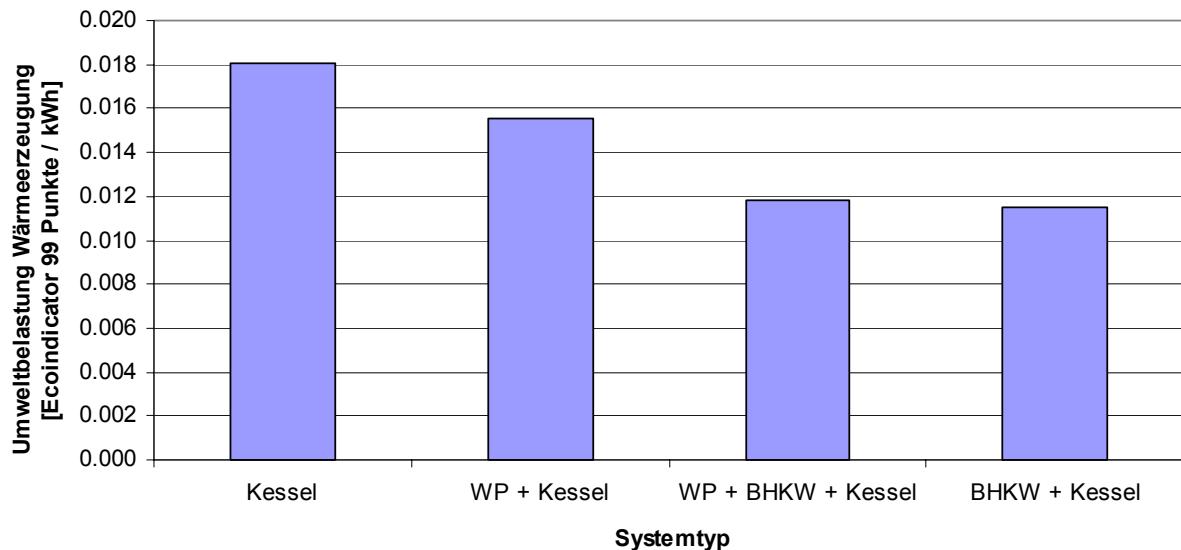


Abbildung 9.9 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung mit einem Nahwärmenetz. Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A).

Als Referenzvariante ist in Abbildung 9.9 zusätzlich eine Wärmeerzeugung nur mit einem Gaskessel aufgetragen. Bereits durch die Einbindung einer Wärmepumpe in den Verbund lässt sich die Umweltbelastung gegenüber der Referenzvariante (Gaskessel) eine Reduktion der Umweltbelastung um ca. 15% erzielen. Die Effizienzsteigerung ist primär Abhängig vom Nutzungsgrad des Kessels und der erzielten Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

In der Variante „Wärmepumpe + Kessel“ liegt die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für den energetisch optimalen Fall tiefer als in den Varianten mit WKK-Anlage. Dies ist durch die Optimierung der von der Wärmepumpe ans System gelieferten Temperatur begründet. Das Optimum liegt in diesem Fall etwa 5°C höher als in der Variante mit dem zusätzlichen BHKW.

Die Varianten „Wärmepumpe + BHKW + Kessel“ sowie „Wärmepumpe + BHKW“ zeigen für den berechneten Fall sehr ähnliche Umweltbelastungen, die etwa 35% unter denen der Referenzvariante liegen. Auch gegenüber der Variante „Wärmepumpe + Kessel“ liegt die Umweltbelastung in diesen Fällen um etwa 25% tiefer. Durch den guten Gesamtnutzungsgrad der WKK-Anlage und der Möglichkeit den produzierten Strom auch ausserhalb der Anlage (z.B. in nicht angeschlossenen Gebäuden) mit einer Wärmepumpe effizient in Wärme umzuwandeln, wird die Gesamteffizienz dieser Varianten deutlich erhöht.

Der Vorteil der beiden Varianten mit Wärme-Kraft Kopplung gegenüber einer Variante nur mit Wärmepumpe + Kessel zeigt sich ab einem elektrischen Wirkungsgrad von 20% bei 75% Gesamtnutzungsgrad. Damit sind die Varianten mit Wärme-Kraft Kopplung auch unter ungünstigeren Voraussetzungen noch ökologisch sinnvoll.

Je tiefer die Vorlauftemperatur im Wärmeverbund desto geringer wird die erzielte Effizienzsteigerung der Systemvarianten mit WKK-Anlage gegenüber einer Lösung nur mit Wärmepumpe und Kessel. Bei Vorlauftemperaturen im Auslegungsfall (- 10°C) unter 60°C kann mit der Variante „Wärmepumpe und Kessel“ durch einen hohen Anteil der Wärmeproduktion mittels Wärmepumpe eine ebenso gute bzw. sogar günstigere Umweltbilanz erreicht werden als mit einer Variante mit Wärme-Kraft Kopplung (Basis Anlage mit  $\eta_{el} = 32\%$  und  $\eta_{th} = 55\%$ ).

#### 9.4. ANWENDUNGEN MIT KÄLTEERZEUGUNG

Wie bereits aus den Resultaten in Kapitel 8.3 ersichtlich ist, sind ökologisch sinnvolle Anwendungen mit Kälteerzeugung deutlich schwieriger zu realisieren als der Wärmeerzeugung. Dies liegt zum einen daran, dass durch die Wärmenutzung mit einer Absorptionskältemaschine die Gesamteffizienz tiefer liegt als bei der Wärmenutzung. Andererseits ist bei der Kälteerzeugung mit elektrisch betriebenen Kältemaschinen bei gutem Systemdesign vor allem für die Klimakälte eine deutlich höhere Gesamteffizienz erzielbar ist als mit einer WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine.

Ein weiterer Punkt der sich nachteilig auswirkt ist die grosse Rückkühlleistung, welche bei einer WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine systembedingt notwendig ist. Dadurch wird die Anlage teurer und damit weniger wirtschaftlich gegenüber einer konventionellen Kälteerzeugung.

Bei einer Kälteerzeugung mit einer Mikrogasturbine ergeben sich zusätzliche Schwierigkeiten durch die Temperaturabhängigkeit der verfügbaren Leistung. Bei hohen Außentemperaturen (ab ca. 15°C) nimmt die Anlagenleistung deutlich ab, was zu einem ökologisch und wirtschaftlich ungünstigeren Betrieb für die Kälteerzeugung bei warmen Temperaturen (Sommer) führt [22].

Anwendungen für WKK-Anlagen mit Absorptionskältemaschine sind unter folgenden Voraussetzungen sinnvoll:

- Für Anlagen die einen Gesamtnutzungsgrad (Strom und Kälteenergie) von 70% oder mehr und einen elektrischen Wirkungsgrad von mindestens 40% erreichen. Diese hohen Nutzungsgrade sind vor allem mit grossen Brennstoffzellen WKK-Anlagen (SOFC bzw. MFC) erreichbar.
- Anlagenauslegung auf Basislast. Spitzenlastdeckung mit elektrisch betriebenen Kältemaschinen. Damit wird eine hohe Jahreslaufzeit der WKK-Anlage erreicht und die spezifischen Investitionskosten gesenkt.
- Anlagen in denen tiefe Kühlmediumtemperaturen benötigt werden (z.B. 6°C). Da die Arbeitszahl der Absorptionskältemaschine in diesem Bereich im Vergleich zu üblichen Kompressionskältemaschinen relativ günstig abschneidet. Für Klimakälteanwendungen mit 14-18°C Vorlauftemperaturen oder mit der Möglichkeit für Freecooling sind WKK-Systeme mit Absorptionskältemaschinen dagegen nicht geeignet.

Für die Produktion von Klimakälte, welche vor allem tagsüber im Sommer zukünftig einen steigenden Energiebedarf verursachen dürften, eignen sich WKK-Anlagen in Kombination Absorptionskältemaschine wenig. Aus ökologischer Sicht optimal ist für solche Anwendungen ein System mit einer Kompressionskältemaschine, niedrigem Temperaturhub und hohem Anteil Freecooling. Der benötigte Strom für die Anlage kommt dabei Idealerweise aus einer Photovoltaikanlage, da in diesem Fall das Maximum der Produktion mit dem Verbrauchsmaximum gut übereinstimmt.

Eine Kombination einer WKK-Anlage und einer Photovoltaikanlage kann insgesamt sinnvoller sein als der Sommerbetrieb der WKK-Anlage mit einer Absorptionskältemaschine. Wie in [3] gezeigt wird, kann eine Kombination von WKK-Anlage und Photovoltaikanlage bei günstigen Planungsvoraussetzungen zu Synergien bei den Investitionskosten führen und ergibt eine gute Abdeckung des Strombedarfs über das ganze Jahr. Ohne Kälteproduktion wird zwar im Sommer nur eine geringe Betriebsstundenzahl der WKK-Anlage erreicht (z.B. nur für Warmwasser). Vor allem für Klimakälteanwendungen ist diese Kombination aber die ökologisch sinnvollere Kombination.

## 10. Wirtschaftlichkeit

### 10.1. EINFÜHRUNG

Die Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen ist von vielen Faktoren abhängig. Nachfolgend sind die vier wichtigsten Einflussfaktoren aufgezählt:

- Investitionskosten: Die Investitionskosten sind abhängig von der Technologie (Komplexität, Serienfertigung) aber auch von der Anlagengröße (Skaleneffekt; tiefere spezifische Investitionskosten für grosse Anlagen)
- Jahresbetriebsstunden: Für die Umlegung der Fixkosten (Kapitalkosten und fixe Wartungskosten) auf die Strom- und Wärmeleitung ist die Laufzeit die wichtigste Kenngröße
- Rückliefertarif: Je nach Ausgangslage ist der Rückliefertarif bzw. der Strombezugspreis (vermiedene Kosten bei Eigenbedarf) von Bedeutung für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit.
- Brennstoffkosten: Vor allem das Verhältnis zwischen den Brennstoffkosten und dem maßgebenden Stromtarif ist von Bedeutung.

Im weiteren sind auch die Kenndaten der Anlage (Nutzungsgrad, Stromkennzahl), die vermiedenen Wärmekosten (Art der alternativen Wärmeerzeugung) und allfällige Zusatznutzen (z.B. Notstromversorgung) massgebend für die Beurteilung.

### 10.2. INVESTITIONS- UND JAHRESKOSTEN

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurden die spezifischen Investitionskosten [in Fr. pro kW<sub>el</sub>] und die Wartungs- und Unterhaltskosten [in Fr. pro kWh<sub>el</sub>] aus verschiedenen Quellen<sup>11</sup> zusammengetragen. Es zeigt sich eine grosse Spannbreite der Daten insbesondere bei den erst im Pilotstadium stehenden Technologien (z.B. Brennstoffzellen) da hier grosse Reduktionen für zukünftige Serienfertigungen erwartet werden. In Abbildung 10.1 sind die Angaben für die unterschiedlichen Technologien zusammengestellt. Ziel dieser Darstellung ist nicht eine präzise Aussage über die Anlagekosten zu machen jedoch den Bereich der Kostenerwartung darzustellen (Kosten Heute bzw. für Serienprodukt).

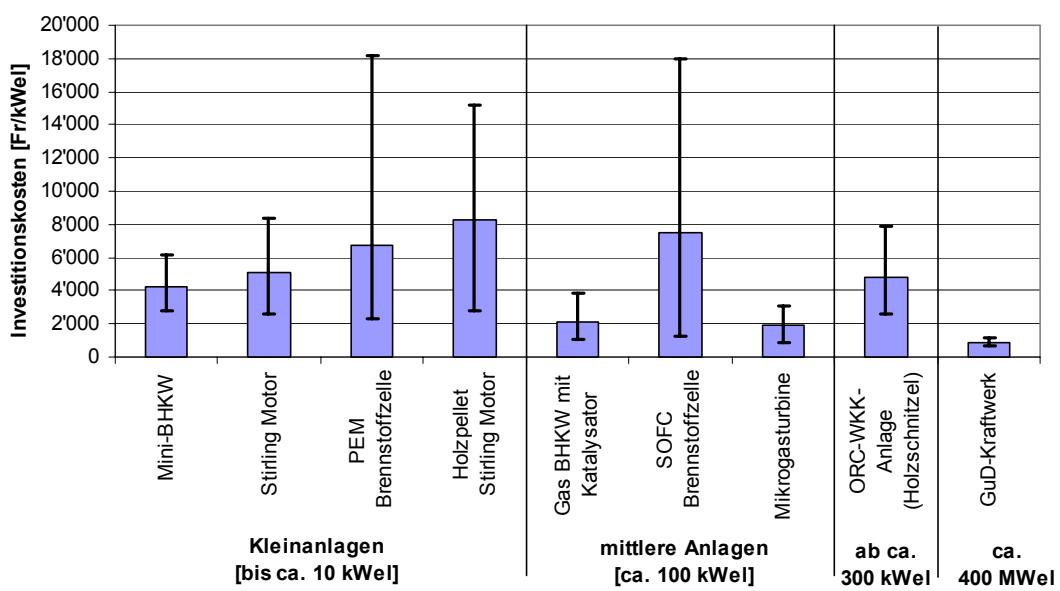


Abbildung 10.1 Spezifische Investitionskosten für verschiedene WKK Systeme

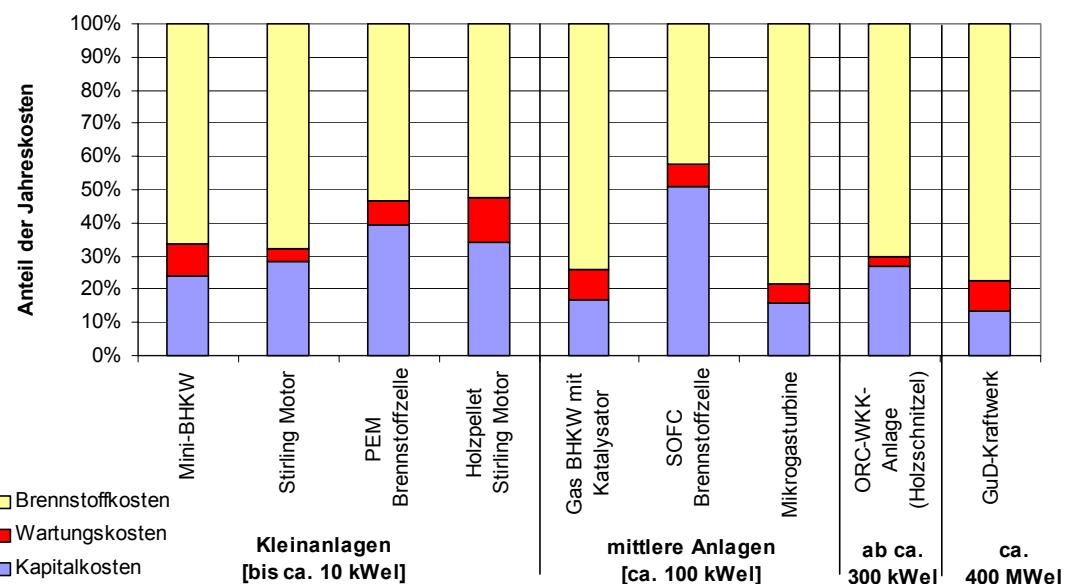
Die Jahreskosten beinhalten die Investitionskosten in jährliche Kapitalkosten umgelegt sowie die Wartungs- und Energiekosten. Eine optimale Wirtschaftlichkeit kann erreicht werden, wenn die Brennstoffkosten die Jahreskosten dominieren. Dazu sind zum einen tiefe Investitionskosten aber vor allem auch eine hohe Jahresbetriebsdauer (Vollaststunden) notwendig. Dies kann mit einer Auslegung auf die Grundlast (z.B. Warmwasserbedarf) erreicht werden. Vor allem für grössere

<sup>11</sup> Einbezogene Quellen: [2], [6], [14], [15], [16], [17], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34].

Anlagen ist dies der Normalfall. Je nach Situation kann die wirtschaftlichste Lösung auch in der Parallelschaltung von mehreren kleineren Anlagen liegen. Der Betrieb solcher Anlagen kann gut an die Lastanforderungen angepasst werden und die Anlagenkosten können sogar tiefer liegen (Verwendung von standardisierten Serienprodukten).

Für Kleinanlagen in Gebäuden mit tiefem Wärmeleistungsbedarf (z.B. EFH) werden bivalente Anlagen aus Kostengründen selten eingesetzt. Die Anlagen haben in diesen Anwendungsfällen daher oft tiefe Vollaststundenzahlen und daher hohe Strom- und Wärmegestehungskosten. Vor allem in Zusammenhang mit der Entwicklung von Brennstoffzellen wurden jedoch Kompaktanlagen mit integrierten Zusatzbrennern entwickelt, welche dazu führen, dass der WKK-Teil eine hohe Vollaststundenzahl aufweist. Diese Massnahme verringert allerdings auch den Umweltvorteil gegenüber einem konventionellen Gaskessel (Je nach Anlagenauslegung um 20-40%).

Abbildung 10.2 zeigt die Kostenanteile der Jahreskosten für verschiedene WKK-Systeme auf Basis der mittleren Investitionskosten gemäß Abbildung 10.1. Für die dargestellten Daten wurde für die WKK-Systeme von 4000 Vollbetriebsstunden pro Jahr ausgegangen.



Berechnungsbasis Kapitalkosten: Abschreibedauer 15 Jahre, Zinssatz 5%  
 Betriebszeit: 4000 h/a (GuD-Kraftwerk 8000 h/a)  
 Gaspreis 7 Rp/kWh (GuD-Kraftwerk 3.5 Rp/kWh); Pelletpreis 7 Rp/kWh; Preis Holzschnitzel 4.5 Rp/kWh

Abbildung 10.2 Jahreskostenanteile für verschiedene WKK Systeme; Berechnet auf Basis der mittleren Investitionskosten gemäß Abbildung 10.1

Tendenziell eine günstige Wirtschaftlichkeit weisen die Anlagen auf, wenn die Kapital- und Wartungskosten im Vergleich zu den Brennstoffkosten tief sind. Neben tiefen Investitionskosten sind dafür vor allem hohe Jahresbetriebszeiten nötig.

Ist dies erfüllt, so ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage aber auch nur möglich, wenn das Verhältnis zwischen Strompreis (je nach Betriebsart Strombezugs- oder Rückliefertarif) und Brennstoffkosten genügend gross ist. Da die Rückliefertarife für Strom aus fossil betriebenen WKK-Anlagen teilweise sogar tiefer liegen als der Gaspreis sind Anlagen mit tiefem Eigenbedarf auch bei günstigen Anlagevoraussetzungen (niedrige Investitionskosten, hohe Jahresbetriebsdauer) meist nicht wirtschaftlich betreibbar. Für wärmegeführte, fossil betriebene WKK-Anlagen ist daher nur ein wirtschaftlicher Betrieb möglich wenn der produzierte Strom mehrheitlich zeitgleich den Eigenbedarf deckt (Reduktion der Strombezugskosten).

Ein wirtschaftlicher Betrieb mit Stromrückspisung wäre dagegen möglich, wenn der Betrieb der Anlage mit Biogas oder Holzbrennstoffen erfolgt und der Rückliefertarif durch eine kostendeckende Einspeisevergütung<sup>12</sup> deutlich höher als der Brennstoffpreis ist. Für das in dieser Studie untersuchte Biogas ab Erdgasnetz ist jedoch im aktuellen Vernehmlassungsentwurf keine kostendeckende

<sup>12</sup>

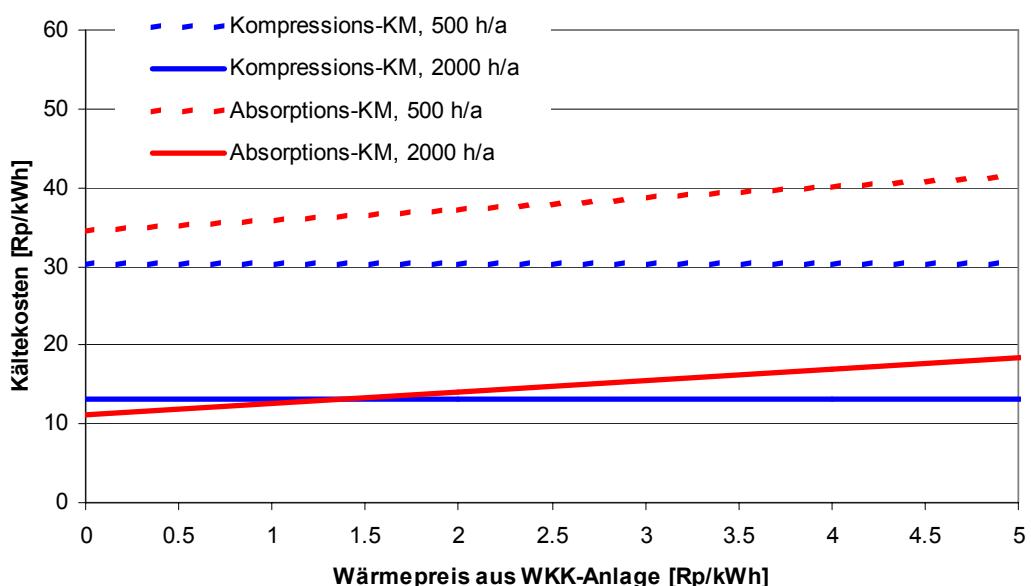
Gemäß Vernehmlassungsentwurf (27.6.2007) der Energieverordnung 19-24 Rp/kWh für Anlagen bis 500 kWel [35]

Einspeisevergütung vorgesehen (nur für Anlagen mit direkter Nutzung des Biogases wie z.B. in ARA's etc.).

### 10.3. KOSTENVERGLEICH FÜR KÄLTEERZEUGUNG

Für den Kostenvergleich zwischen einer Anlage mit Absorptionskältemaschine und einer Anlage mit elektrisch betriebener Kompressionskältemaschine sind in Abbildung 10.3 die Kältekosten [Rp/kWh] der beiden Erzeugungsarten einander gegenübergestellt. Als variable Grösse für die Kälteerzeugung mit der Absorptionskältemaschine ist der zu bezahlende Wärmepreis aufgeführt. Die Kostendaten basieren auf einer Anlagengrösse von ca. 100 kW [36]. Es zeigt sich, dass für Anlagen mit wenig Vollbetriebsstunden (500 h/a) ein wirtschaftlicher Betrieb unter den angenommenen Voraussetzungen (Arbeitszahl, Stromkosten) nicht erreicht wird. Auch bei hoher Vollbetriebsstundenzahl (2000 h/a) ist die Kälteerzeugung mit der Absorptionskältemaschine nur bei sehr tiefen Wärmekosten vorteilhaft.

Dies deckt sich mit der aus Umweltsicht getroffenen Empfehlung das sich nur WKK-Anlagen mit sehr hohem Stromwirkungsgrad, bei denen die Wärme ein „Nebenprodukt“ ist, für die Kälteproduktion eignen. Für solche Anlagen kann mit der Kälteproduktion die Vollbetriebsstundenzahl stark erhöht werden und damit die Wirtschaftlichkeit der WKK-Anlage verbessert werden. Die Absorptionskältemaschine ist dabei für die Basislast auszulegen. Für reine Klimakälteanwendungen im Sommer sind WKK-Anlagen mit Absorptionskältemaschinen unwirtschaftlich, da hier eine zu geringe Vollbetriebsstundenzahl erreicht wird. Zudem können elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen bei diesen Anwendungen hohe Arbeitszahlen erreichen<sup>13</sup> und sind damit klar günstiger.



Berechnungsbasis Kapitalkosten: Abschreibezeitdauer über 15 Jahre, Zinssatz 5%  
 Stromkosten: 16 Rp/kWh; Wasserkosten 4 Fr/m<sup>3</sup> (Wasserbedarf: 5-6 m<sup>3</sup>/MWh Kälte)  
 Arbeitszahl Kompressions-KM = 3; Arbeitszahl Absorptions-KM: 0.7; Temperatur: 6/12°C  
 Strombedarf Absorptions-KM: 70 kWh/MWh Kälte (v.A. Rückkühlung)

Abbildung 10.3 Kostenvergleich Anlage mit Absorptionskältemaschine und Anlage mit el. Kompressionskältemaschine

<sup>13</sup>

Bei Vorlauftemperaturen im Kältekreis von 14-18°C sind Arbeitszahlen von 5 und mehr erreichbar.

## 11. Anwendungsmatrix und Bewertung

### 11.1. EINFÜHRUNG

Die Anwendungsmatrix soll auf vereinfachte Art die optimale Anwendung von WKK-Anlagen aufzeigen. Wie bei der Analyse der Systemkombinationen werden für die Anwendungsmatrix die folgenden drei Anwendungsbereiche unterschieden:

- Gebäudesysteme: Anlage versorgt ein einzelnes Gebäude mit Wärme für Heizung und Warmwasser
- Nahwärmennetze: Anlage versorgt mehrerer Gebäude mit Wärme auf einem höheren Temperaturniveau (Temperaturniveau abhängig vom „schwächsten“ Gebäude)
- Kälteerzeugung: Anlage versorgt das Gebäude zusätzlich mit Klima- oder Prozesskälte

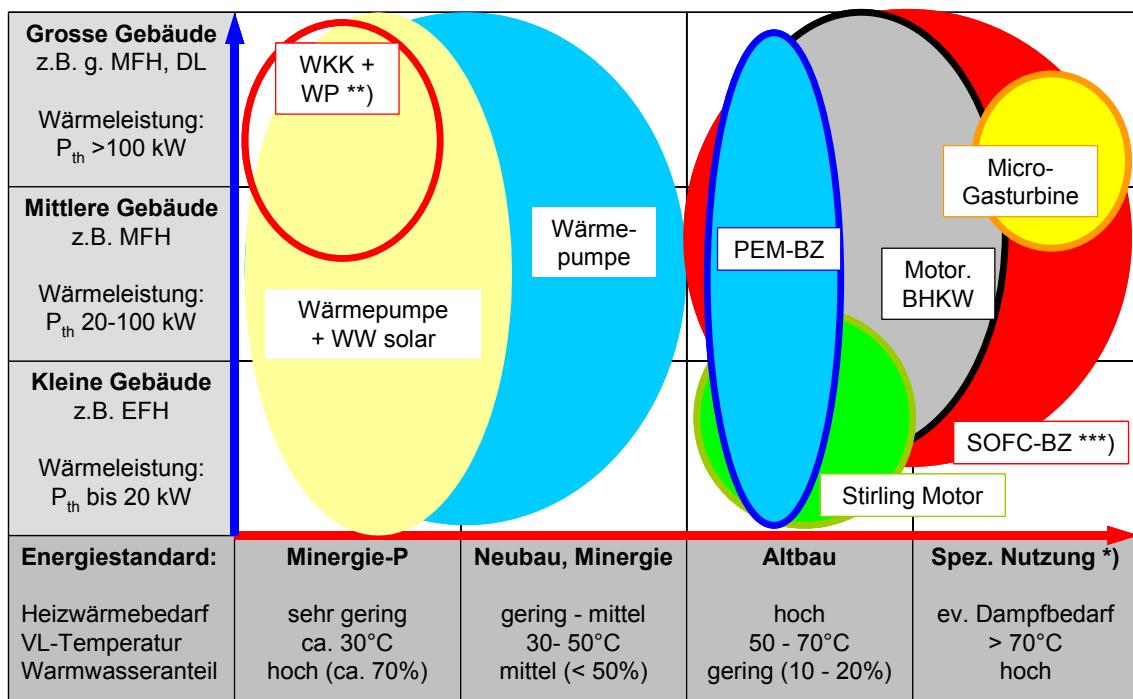
### 11.2. GEBÄUDESYSTEME

Abbildung 11.1 zeigt die Bereiche in denen die Anwendung von Gebäude WKK Systemen aus technischer und ökologischer Sicht als günstig beurteilt wird. Die Matrix unterscheidet dabei zum einen die Gebäudegrösse (Wärmeleistung) und zum anderen die thermische Gebäudequalität bzw. die benötigten Temperaturen im Heizsystem.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird für grosse Gebäude oft eine bivalente Lösung gewählt. Dies gilt sowohl für WKK-Systeme wie auch für Wärmepumpensysteme. Der Grund liegt in den hohen Investitionskosten, welche sich nur bei einer grossen Jahreslaufzeit rechnen. Je nach WKK System ergeben sich Begrenzungen bezüglich des Leistungsbereichs oder auch der sinnvollen Einsatztemperaturen.

Für SOFC-Brennstoffzellen wird davon ausgegangen, dass in Zukunft auch Systeme mit kleiner Leistung aber trotzdem hohen Stromwirkungsgraden entwickelt werden. Systembedingt werden bei den Schmelzkarbonat Brennstoffzellen kaum Anlagen mit kleiner Leistung entwickelt werden.

Mikrogasturbinen eignen sich aufgrund den derzeit noch relativ bescheidenen Wirkungsgraden vor allem für Anwendungen, welche hohe Temperaturen erfordern (Dampf). Daher werden diese Anlagen ihren Einsatzbereich vor allem in Krankenhäusern oder Hotels mit Wäschereien finden.



\*) z.B. Hotels, Wäschereien, Industrie

\*\*) Wärmepumpe für Heizwärme; WKK-Anlage nur für Warmwasser

\*\*\*) Bereich ab 100 kW ebenfalls für Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC) gültig

Abbildung 11.1 Günstige Anwendungsbereiche für verschiedene Gebäude WKK Systeme

Tabelle 11.1 und Tabelle 11.2 zeigen die Bewertung verschiedener kleinerer Gebäude WKK Systeme im Vergleich. Es wurden folgende Punkte bewertet:

- Reduktion der Umweltbelastung gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für WP aus Gaskombikraftwerk; Bewertung mit Ecoindicator 99)
- Reduktion des Treibhausgasausstosses gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für WP aus Gaskombikraftwerk)
- Eignung aus technisch- wirtschaftlicher Sicht (technische Reife, Entwicklungspotential und Kosten).
- Bewertung der Stärken und Schwächen, potentiell interessanten Anwendungen und des Entwicklungsbedarfs

Die Angaben zu grösseren WKK-Anlagen (um 100 kW<sub>el</sub>) sind im Kapitel 11.3 (Nahwärmenetze) dargestellt.

In den Daten zur Umweltbelastung wird ebenfalls der Bereich der Werte angegeben, der sich aus der in Kapitel 8 verwendeten Variationsbreite der Wirkungsgradkennwerte ergibt.

Für den Umweltvergleich wird davon ausgegangen, dass der Strom aus der WKK-Anlage zeitgleich in umliegenden Liegenschaften mit Wärmepumpen (Jahresarbeitszahl = 3) verwendet wird.

*Tabelle 11.1 Bewertung der Umweltauswirkung verschiedener WKK Systeme für kleinere Gebäude*

| WKK-System  |           | Mini-BHKW mit Katalysator  | PEM Brennstoffzelle | Stirling Motor      | Holzpellets Stirling Motor |
|---|-----------|--|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Betriebsart   |           | Monovalent (100% der Leistung mit WKK-Anlage); 2-3'000 Vollbetriebsstunden/a |                     |                     |                            |
| Reduktion der Umweltbelastung (Ecoindicator 99)   | Kessel a) | 29% (21% ... 31%)  | 31% (24% ... 39%)   | 27% (5% ... 34%)    | 44% (30% ... 46%) *)       |
|   | WP b)     | 12% (2% ... 15%)   | 15% (6% ... 24%)    | 10% (-18% ... 18%)  |                            |
|   | WP c)     | -4% (-16% ... -1%)   | -1% (-12% ... 10%)  | -7% (-40% ... 3%)   |                            |
| Reduktion der Treibhausgase (CO <sub>2</sub> -Äquivalente)  | Kessel a) | 26% (19% ... 29%)  | 30% (23% ... 37%)   | 27% (6% ... 33%)    | 20% (9% ... 22%) *)        |
|   | WP b)     | 6% (-5% ... 9%)  | 11% (2% ... 19%)    | 6% (-21% ... 14%)   |                            |
|   | WP c)     | -11% (-23% ... -7%)  | -5% (-16% ... 5%)   | -11% (-42% ... -1%) |                            |
| Betriebsart   |           | Bivalent (50% der Leistung mit WKK-Anlage); 4-5'000 Vollbetriebsstunden/a    |                     |                     |                            |
| Reduktion der Umweltbelastung (Ecoindicator 99)   | Kessel a) | 25% (18% ... 27%)  | 27% (20% ... 33%)   | 23% (4% ... 29%)    | 37% (25% ... 39%) *)       |
|   | WP b)     | 7% (-2% ... 9%)  | 9% (2% ... 17%)     | 5% (-19% ... 12%)   |                            |
|   | WP c)     | -11% (-21% ... -8%)  | -8% (-17% ... 1%)   | -13% (-41% ... -5%) |                            |
| Reduktion der Treibhausgase (CO <sub>2</sub> -Äquivalente)  | Kessel a) | 23% (16% ... 25%)  | 26% (20% ... 32%)   | 23% (5% ... 28%)    | 17% (8% ... 18%) *)        |
|   | WP b)     | 1% (-8% ... 3%)  | 5% (-3% ... 12%)    | 1% (-22% ... 8%)    |                            |
|   | WP c)     | -17% (-27% ... -14%)   | -12% (-21% ... -4%) | -17% (-44% ... -9%) |                            |
| Die in Klammer angegebenen Werte beziehen sich auf den Bereich der erwarteten Effizienzwerte<br>a) Reduktion bei Ersatz eines Gaskessels ( $\eta_{th} = 96\%$ ) durch die WKK-Anlage<br>b) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer Wärmepumpe mit einer JAZ von 2.5<br>c) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer Wärmepumpe mit einer JAZ von 3.0<br>*) Reduktion bei Ersatz eines Pelletkessels ( $\eta_{th} = 85\%$ ) durch die Pellet-Stirling Anlage |           |  |                     |                     |                            |

Werden die Anlagen als Ersatz für bestehende Gas- oder Ölheizungen eingesetzt so wird in jedem Fall eine positive Umweltbilanz erreicht. Im Vergleich zu Wärmepumpenlösungen muss der jeweilige Fall analysiert werden. Die Eignung von WKK-Anlagen liegt dabei klar bei Anwendungen die höhere Temperaturen verlangen (keine Niedertemperaturheizungen).

Mit einem bivalenten Betrieb (Spitzenkessel) wird der Umweltvorteil verringert aber die Jahreslaufzeit der Anlage und damit die Wirtschaftlichkeit stark erhöht. Bei grösseren Gebäuden (Mehrfamilienhäuser) dürfte daher diese Lösung der Normalfall sein.

Wie Tabelle 11.2 zeigt hat jede der Technologien spezifische Stärken und Schwächen. Insofern wird sich daraus und vor allem auch über die Kosten (Investitionskosten aber auch Einspeisevergütungen) für jede Technologie ein entsprechendes Anwendungsfeld eröffnen.

In Bezug auf die ökologischen Vorteile, aber auch durch mögliche Einspeisevergütungen dürfte sich die Nutzung von Biogas und fester Biomasse als günstiges Feld für Gebäude WKK-Anlagen erweisen. Beim Betrieb der Anlagen mit Erdgas werden die deutlich höheren Kosten (im Vergleich zu einer Erdgasfeuerung) ein starkes Hindernis für eine grösere Verbreitung sein.

*Tabelle 11.2 Bewertung der Technik und des Betriebs verschiedener WKK Systeme für kleinere Gebäude*

| <b>WKK-System</b>                              | <b>Mini-BHKW mit Katalysator</b>                      | <b>PEM Brennstoffzelle</b>                                   | <b>Stirling Motor</b>  | <b>Holzpellets Stirling Motor</b>                                    |
|--|---|--|--|--|
| Technische Reife                               | Marktreife  | Pilotanlagen   | Pilotanlagen   | Pilotanlagen   |
| Kostensenkungspotential für Investitionskosten | mittel, Grossserienherstellung                        | hoch, Anlagen derzeit noch sehr teuer                        | mittel-hoch, Anlagen derzeit noch teuer                                | mittel-hoch, Anlagen derzeit noch teuer                              |
| Wartungskosten                                 | ehler hoch, abhängig vom Wartungsintervall des Motors | potentiell tief aber stark von der Stacklebensdauer bestimmt | potentiell tief aber noch keine Erfahrung                              | potentiell vergleichbar wie Pelletfeuerung, noch keine Erfahrung     |
| Betriebsart monovalent                         | Ja, Speicher nötig jedoch teuer *)                    | Nein, aus Kostengründen nicht sinnvoll                       | Ja, Speicher nötig jedoch teuer *)                                     | Ja, Speicher nötig jedoch teuer *)                                   |
| Betriebsart bivalent                           | Geeignet  | Standardfall   | Geeignet   | Geeignet   |
| Eignung für nicht aufbereitetes Biogas         | für gewisse Fabrikate möglich                         | Aufwändige Aufbereitung nötig                                | geeignet   | -  |
| Eignung für feste Biomasse                     | nur indirekt mit Biomassevergasung **)                | nur indirekt über Biomassevergasung oder Methanol **)        | nur indirekt mit Biomassevergasung **)                                 | Ja   |
| Elektrischer Wirkungsgrad                      | mittel-gut (20% ... 30%)                              | mittel-sehr gut ***) (28% ... 40%)                           | gering-mittel ***) (10% ... 29%)                                       | gering-mittel ***) (10% ... 25%)                                     |
| Gesamtnutzungsgrad                             | gut (85% ... 95%)                                     | mittel ***) (80% ... 90%)                                    | gut ***) (85% ... 96%)   | mittel-gut ***) (85% ... >90%)                                       |
| Stärken  | Bewährte Technik Eignung für Biogas                   | El. Wirkungsgrad Tiefe Emissionen Leise                      | Brennstoffflexibilität Gesamtnutzungsgrad Tiefe Emissionen Geräuscharm | dir. Biomassenutzung Gesamtnutzungsgrad Emissionen ****) Geräuscharm |
| Schwächen                                      | Geräusche Wartungsintervalle Emissionen               | Entwicklungsstand Kosten (heute) Brennstoff-aufbereitung     | El. Wirkungsgrad Entwicklungsstand Erfahrungen bez. Wartungsaufwand    | El. Wirkungsgrad Entwicklungsstand Betriebserfahrung                 |
| Potential                                      | Biogasnutzung   | zukünftiger Ersatz für Gasheizungen                          | Biogasnutzung  | Ersatz für Pelletheizungen   |
| Entwicklungsbedarf                             | Wartungsfreiheit Nutzungsgrade Kompaktsysteme         | Kosten Nutzungsgrade Gasaufbereitung                         | Serienprodukt Biobrennstoffe Nutzungsgrade                             | Betriebserfahrungen Nutzungsgrade Kosten                             |

\*) Für Wohngebäude werden nur 2-3'000 Vollbetriebsstunden erreicht, was zu hohen spezifischen Kosten führt

\*\*) Wirkungsgrad der Vergasung ca. 50%, der Methanolherstellung aus Holz ca. 25%

\*\*\*) Werte in Pilotanlagen teilweise noch deutlich tiefer (Erfahrungswerte fehlen noch)

\*\*\*\*) Im Vergleich zu einer Pelletfeuerung potentiell tiefe Emissionen (Betriebserfahrung fehlt noch)

### 11.3. NAHWÄRMENETZE

Abbildung 11.2 zeigt die Bereiche in denen die Anwendung von WKK Systemen in Nahwärmenetzen aus technischer und ökologischer Sicht als günstig beurteilt wird. Die Matrix unterscheidet dabei zum einen die Verbundgrösse (Wärmeleistung) und zum anderen die thermische Gebäudequalität der am Verbund angeschlossenen Gebäude bzw. die benötigten Temperaturen im Verbund.

Aus wirtschaftlichen und auch technischen Gründen stehen in Wärmeverbünden bivalente Lösungen mit Spitzenkesseln im Vordergrund. Dies gilt sowohl für Verbunde mit WKK-Anlagen wie auch mit Wärmepumpen. Für grosse Verbunde mit tiefen Rücklauftemperaturen (hohe Differenz zwischen Vorlauf und Rücklauf) ist aus Sicht der Effizienz und Umweltbelastung die Kombination von Wärmepumpe, WKK-Anlage und Spitzenkessel ideal. Solche Anlagen bedürfen jedoch einer guten Betreuung und Überwachung, da ein effizienter Betrieb nicht einfach zu bewerkstelligen ist.

Für grosse Anlagen ist zudem die Kombination einer SOFC-Brennstoffzelle mit einer Gasturbine eine vielversprechende Option (SOFC-GT). Aufgrund der komplexen Anlagentechnik werden solche Anlagen jedoch eher als „Kraftwerke“ denn als „Heizkessel“ eingesetzt werden. Zudem Verlangen die hohen Investitionskosten bei diesen Anlagen auch hohe Jahreslaufzeiten.

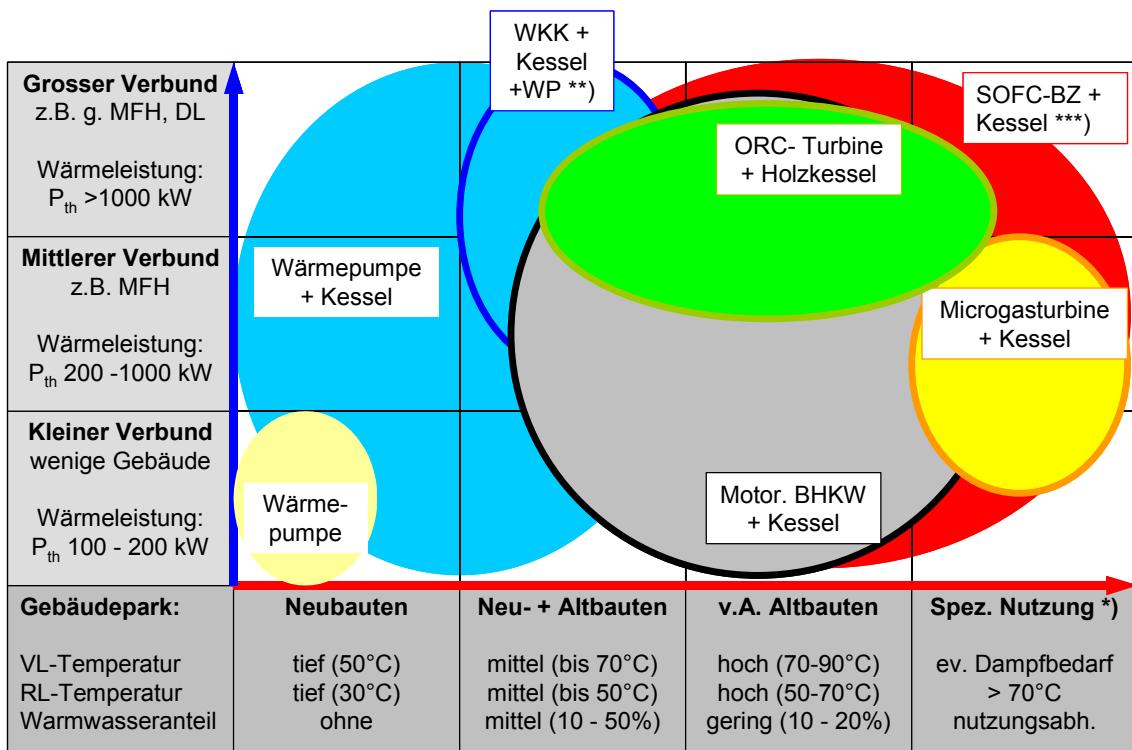


Abbildung 11.2 Günstige Anwendungsbereiche für Nahwärmenetze mit verschiedenen WKK Systemen

Tabelle 11.3 und Tabelle 11.4 zeigen die Bewertung der verschiedenen Nahwärme WKK Systeme im Vergleich. Es wurden folgende Punkte bewertet:

- Reduktion der Umweltbelastung gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für WP aus Gaskombikraftwerk; Bewertung mit Ecoindicator 99)
- Reduktion des Treibhausgasausstosses gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für WP aus Gaskombikraftwerk)
- Eignung aus technisch- wirtschaftlicher Sicht (technische Reife, Entwicklungspotential und Kosten)
- Bewertung der Stärken und Schwächen, potentiell interessanten Anwendungen und des Entwicklungsbedarfs

In den Daten zur Umweltbelastung wird ebenfalls der Bereich der Werte angegeben, der sich aus der in Kapitel 8 verwendeten Variationsbreite der Wirkungsgradkennwerte ergibt.

Für den Umweltvergleich wird davon ausgegangen, dass der Strom aus der WKK-Anlage zeitgleich in umliegenden Liegenschaften mit Wärmepumpen (Jahresarbeitszahl = 3) verwendet wird.

Tabelle 11.3 Bewertung der Umweltauswirkung verschiedener Nahwärme WKK Systeme

| WKK-System  |           | BHKW 160kW mit Katalysator  | Mikrogasturbine     | SOFC Brennstoffzelle SOFC-GT BZ *)        | Holz WKK-Anlage, ORC     |
|---|-----------|---|---------------------|---|--------------------------|
| Betriebsart   |           | Bivalent (50% der Leistung mit WKK-Anlage); 4-5'000 Vollbetriebsstunden/a   |                     |   |                          |
| Reduktion der Umweltbelastung (Ecoindicator 99)   | Kessel a) | 30% (25% ... 33%)   | 23% (16% ... 33%)   | 36% (33% ... 41%)<br>40% (38% ... 43%) *) | 41% (38% ... 44%)<br>**) |
|   | WP b)     | 16% (11% ... 20%)   | 8% (1% ... 20%)     | 23% (20% ... 29%)<br>29% (27% ... 33%) *) |                          |
|   | WP c)     | 12% (6% ... 16%)  | 3% (-5% ... 16%)    | 19% (16% ... 26%)<br>25% (23% ... 29%) *) |                          |
| Reduktion der Treibhausgase (CO <sub>2</sub> -Äquivalente)  | Kessel a) | 27% (23% ... 30%)   | 21% (15% ... 31%)   | 33% (31% ... 38%)<br>38% (36% ... 41%) *) | 25% (23% ... 26%)<br>**) |
|   | WP b)     | 12% (7% ... 15%)  | 5% (-3% ... 17%)    | 19% (16% ... 25%)<br>25% (23% ... 29%) *) |                          |
|   | WP c)     | 7% (2% ... 11%)   | 0% (-8% ... 13%)    | 15% (12% ... 21%)<br>21% (19% ... 25%) *) |                          |
| Betriebsart   |           | Bivalent (25% der Leistung mit WKK-Anlage); ca. 6'000 Vollbetriebsstunden/a |                     |   |                          |
| Reduktion der Umweltbelastung (Ecoindicator 99)   | Kessel a) | 17% (15% ... 19%)   | 13% (10% ... 19%)   | 21% (19% ... 24%)<br>24% (23% ... 25%) *) | 24% (22% ... 26%)<br>**) |
|   | WP b)     | 2% (-1% ... 4%)   | -3% (-7% ... 4%)    | 6% (4% ... 9%)<br>9% (8% ... 11%) *)      |                          |
|   | WP c)     | -3% (-6% ... -1%)   | -8% (-13% ... 0%)   | 2% (0% ... 5%)<br>5% (4% ... 7%) *)       |                          |
| Reduktion der Treibhausgase (CO <sub>2</sub> -Äquivalente)  | Kessel a) | 16% (13% ... 18%)   | 13% (9% ... 18%)    | 20% (18% ... 22%)<br>22% (21% ... 24%) *) | 14% (14% ... 15%)<br>**) |
|   | WP b)     | -2% (-5% ... 0%)  | -6% (-10% ... 1%)   | 3% (1% ... 6%)<br>6% (5% ... 8%) *)       |                          |
|   | WP c)     | -6% (-9% ... -4%)   | -10% (-15% ... -3%) | -2% (-4% ... 2%)<br>2% (1% ... 4%) *)     |                          |
| Die in Klammer angegebenen Werte beziehen sich auf den Bereich der erwarteten Effizienzwerte<br>a) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zum Betrieb mit einem Gaskessels ( $\eta_{th} = 96\%$ )<br>b) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer bivalenten Wärmepumpe; WP mit JAZ 2.8 und Kessel $\eta_{th} = 96\%$<br>c) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer bivalenten Wärmepumpe; WP mit JAZ 3.0 und Kessel $\eta_{th} = 96\%$<br>*) SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine. Entsprechende Werte mit „*)“ bezeichneten.<br>**) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zum Betrieb mit einem Pelletkessel ( $\eta_{th} = 85\%$ ) |           |   |                     |   |                          |

Werden die Anlagen als Ersatz für bestehende Gas- oder Ölkessel eingesetzt so wird eine beträchtliche Reduktion der Umweltbelastung erreicht. Im Vergleich zu Wärmepumpenlösungen weisen diese Anlagen länger eine positive Umweltbilanz auf als klein WKK-Anlagen in Gebäuden. Durch eine geschickte Kombination von Wärmepumpe, WKK-Anlage und Spitzenkessel können zudem die Energiekosten tief gehalten werden. Nicht zu empfehlen sind WKK-Systeme in Wärmeverbunden, welche mit tiefen Vorlauftemperaturen arbeiten.

In Nahwärmennetzen wird die WKK-Anlage (bzw. mehrere parallel) immer mit einem Spitzenkessel kombiniert um die Investitionskosten zu reduzieren. Ein kleiner Leistungsanteil der WKK-Anlage verringert den Umweltvorteil, erhöht aber auch die Jahreslaufzeit der Anlage und damit die Wirtschaftlichkeit. Für die Systemauslegung ist daher ein Anlagespezifischer Kompromiss zu finden.

Wie Abbildung 11.2 und Tabelle 11.4 zeigen hat die SOFC-Brennstoffzelle<sup>14</sup> ein potentiell sehr breites Anwendungsgebiet, welches sich vor allem auch durch die hohen elektrischen Wirkungsgrade erschließt. Der grosse Entwicklungsbedarf liegt bei dieser Technologie bei den Kosten und den Materialien. Bei den bereits im Markt erhältlichen Technologien wird die Entwicklung in Bezug auf Wirkungsgrad (v.A. elektrischer) und Kosten entscheidend für die Verbreitung sein. Hier dürfte die

<sup>14</sup>

Diese Aussagen gilt zum grossen Teil auch für die Karbonat-Brennstoffzellen (MCFC)

Mikroturbine noch das grösste Entwicklungspotential haben und vor allem Anwendungen in Industrie und Anwendungen mit höheren Temperaturanforderungen optimal erschliessen.

In Bezug auf die ökologischen Vorteile aber auch durch mögliche Einspeisevergütungen dürfte sich die Nutzung von Biogas und fester Biomasse auch bei den Nahwärme-WKK Anlagen als günstiges Anwendungsfeld erweisen. Eine gute Ausgangslage haben hier die motorischen BHKW's aufgrund ihrer erprobten Technik. Für feste Biomasse (v.A. Holz) dürften die ORC-Turbinen aufgrund ihres für diese Anwendung relativ guten elektrischen Wirkungsgrades eine gute Chance haben. Hinderlich sind dabei vor allem die hohen Investitionskosten für solche Anlagen.

*Tabelle 11.4 Bewertung der Technik und des Betriebs verschiedener Nahwärme WKK Systeme*

| WKK-System                                     | BHKW 160kW mit Katalysator   | Mikrogasturbine   | SOFC Brennstoffzelle SOFC-GT BZ *)   | Holz WKK-Anlage, ORC  |
|--|--|---|--|---|
| Technische Reife                               | Marktreife   | Markteintritt   | Pilotanlagen   | Markteintritt   |
| Kostensenkungspotential für Investitionskosten | ehrer gering   | mittel bis hoch Standardmodule  | hoch, Anlagen derzeit noch sehr teuer  | ehrer gering bis mittel, Standardmodule   |
| Wartungskosten                                 | ehrer hoch, abhängig vom Wartungsintervall des Motors                          | tief bis mittel   | potentiell tief aber von der Stacklebensdauer bestimmt                                 | ORC Anlage tief aber Wartungsaufwand für Biomassekessel   |
| Betriebsart monovalent *)                      | möglich aber wenig sinnvoll  | Nein, ungeeignet  | Nein, ungeeignet   | Abhängig vom eingesetzten Kessel  |
| Betriebsart bivalent                           | Standardfall   | Standardfall  | Standardfall   | Standardfall  |
| Eignung für nicht aufbereitetes Biogas         | ja in weitem Bereich   | ja  | potentiell geeignet Entwicklungsbedarf   | -   |
| Eignung für feste Biomasse                     | nur indirekt mit Biomassevergasung **)   | nur indirekt mit Biomassevergasung **)  | nur indirekt mit Biomassevergasung **)   | Ja  |
| Elektrischer Wirkungsgrad                      | gut (30% ... 35%)  | mittel-sehr gut (***) (26% ... 42%)   | sehr gut (****) (45% ... 63%)  | gering (10% ... 20%)  |
| Gesamtnutzungsgrad                             | gut (80% ... 90%)  | gering-mittel (70% ... 80%)   | mittel (75% ... 85%)   | mittel (75% ... 85%)  |
| Stärken  | Bewährte Technik<br>Brennstoffflexibel (Klärgas, Deponiegas, Pflanzenöl, etc.) | Hohe Abgabeterminatur möglich (Dampf)<br>potent. Tiefe Kosten<br>NOx-Emissionen<br>Wartungsintervalle | Ei. Wirkungsgrad<br>Hohe Abgabeterminatur möglich (Dampf)<br>Tiefe Emissionen<br>Leise | dir. Biomassenutzung<br>Nutzung von Rest- und Altholz möglich                                     |
| Schwächen                                      | Geräusche<br>Wartungsintervalle<br>Emissionen                                  | Ei. Wirkungsgrad<br>Gesamtnutzungsgrad<br>Erfahrung mit Biogasbetrieb                                 | Entwicklungsstand<br>Kosten (heute)<br>Materialprobleme                                | Ei. Wirkungsgrad<br>Emissionen aus Feuerung (*****)   |
| Potential                                      | Direkte Nutzung von Biogas   | Ersatz von fossilen Feuerungen bei Bedarf von hohen Temperaturen                                      | zukünftiger Ersatz für Gasheizungen<br>potentiell breites Einsatzgebiet                | Ersatz für grössere Holzschnitzelanlagen  |
| Entwicklungsbedarf                             | Wartungsfreiheit<br>Nutzungsgrade<br>Emissionen                                | Nutzungsgrade (Keramikmaterialien)<br>Serienprodukt (tiefe Kosten)<br>Biobrennstoffbetrieb            | Kosten<br>Materialien<br>Serienprodukt   | Betriebserfahrungen<br>Kostenreduktion für Standardsysteme<br>Nutzungsgrade<br>Emissionsreduktion |

\*) Aus Kostengründen (Investitionskosten) ist für grössere Anlagen ein monovalenter Betrieb nicht sinnvoll  
Ein Wirtschaftlicher Betrieb ist ab ca. 5000 Vollbetriebsstunden pro Jahr möglich (bivalente Anlagen)

\*\*) Wirkungsgrad der Vergasung ca. 50%

\*\*\*) oberer Bereich mit heutiger Technologie noch nicht erreicht (= erwartete Entwicklung)

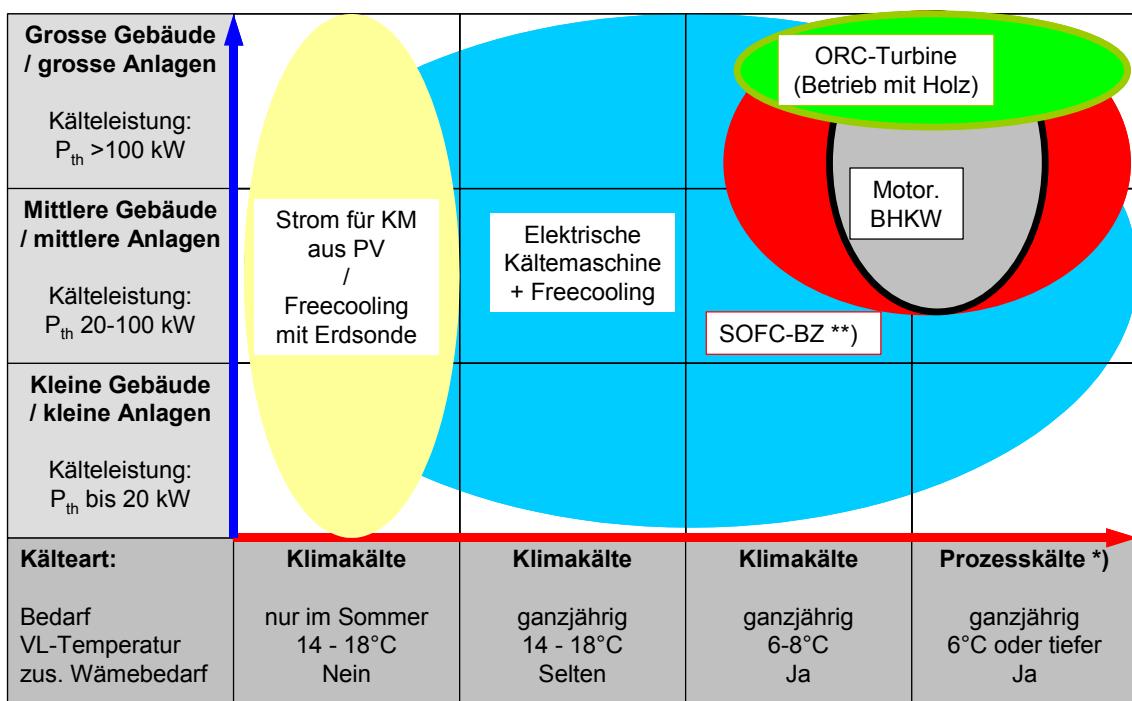
\*\*\*\*) Werte für Anlagen >100kW; oberer Bereich = erwartete Entwicklung für SOFC-GT Anlagen

\*\*\*\*\*) Stark Abhängig vom eingesetzten Brennstoff und den Massnahmen zur Emissionsminderung (Filter)

#### 11.4. KÄLTEERZEUGUNG

Abbildung 11.2 zeigt die Bereiche in denen die Anwendung von WKK Systemen für die Kälteerzeugung aus technischer und ökologischer Sicht als günstig beurteilt wird. Die Matrix unterscheidet dabei zum einen die Anlagengröße (Kälteleistung) und zum anderen die benötigten Temperaturen im Vorlauf der Kälteverteilung sowie die zeitliche Verteilung des Kältebedarfs.

Dabei wird für die Kälteerzeugung üblicherweise eine Absorptionskältemaschine (1- oder 2-stufig) eingesetzt. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es sinnvoll nur die Bandlast mit der WKK-Anlage abzudecken und auftretende Spitzen mit einer konventionellen Kompressionskältemaschine zu erbringen. Aus ökologischer Sicht ist die Kälteerzeugung mit einer WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine nur sinnvoll, wenn der Wärme nur eine geringe Umweltbelastung alloziert werden muss (hoher Stromwirkungsgrad der Anlage). Für Klimakältesysteme mit raumtemperurnahen Temperaturen dagegen sind gut dimensionierte Systeme mit Kompressionskältemaschinen effizienter.



\*) z.B. Industrie, Kühl Lager

\*\*) Bereich ab 100 kW ebenfalls für Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC) gültig

Abbildung 11.3 Günstige Anwendungsbereiche für die Kälteerzeugung mit verschiedenen WKK Systemen

Tabelle 11.5 und Tabelle 11.6 zeigen die Bewertung der verschiedenen WKK Systeme zur Kälteerzeugung im Vergleich. Es wurden folgende Punkte bewertet:

- Reduktion der Umweltbelastung gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für KM aus Gaskombikraftwerk; Bewertung mit Ecoindicator 99)
- Reduktion des Treibhausgasausstosses gegenüber einer Anlage mit Wärmepumpe sowie einer Anlagen mit Gaskessel (Strom für WP aus Gaskombikraftwerk)
- Eignung aus technisch- wirtschaftlicher Sicht (technische Reife, Entwicklungspotential und Kosten)
- Bewertung der Stärken und Schwächen, potentiell interessanten Anwendungen und des Entwicklungsbedarfs

In den Daten zur Umweltbelastung wird ebenfalls der Bereich der Werte angegeben, der sich aus der in Kapitel 8 verwendeten Variationsbreite der Wirkungsgradkennwerte ergibt.

Für den Umweltvergleich wird davon ausgegangen, dass der Strom aus der WKK-Anlage zeitgleich in umliegenden Liegenschaften mit Kältemaschinen (Jahresarbeitszahl = 4) verwendet wird. Im Umweltvergleich ist die Holz WKK-Anlage (ORC) nicht aufgeführt, da ein fairer Vergleich aufgrund der fehlenden Stromerzeugung aus Holz für die elektrische Kältemaschine nicht möglich war.

**Tabelle 11.5 Bewertung verschiedener WKK Systeme zur Kälteerzeugung**

| WKK-System   |           | BHKW 160kW mit Katalysator  | Mikrogasturbine      | SOFC Brennstoffzelle | SOFC-GT Brennstoffzelle *) |
|--|-----------|---|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Betriebsart  |           | Betrieb mit einer Absorptionskältemaschine mit COP = 0.7 (0.55 ... 1.2) |                      |                      |                            |
| Reduktion der Umweltbelastung (Ecoindicator 99) **)  | el. KM a) | 8% (-2% ... 23%)  | -1% (-17% ... 26%)   | 27% (22% ... 38%)    | 37% (33% ... 43%)          |
|  | el. KM b) | -21% (-34% ... -1%)   | -32% (-54% ... 3%)   | 4% (-3% ... 19%)     | 17% (12% ... 25%)          |
|  | el. KM c) | -48% (-65% ... -24%)  | -63% (-90% ... -19%) | -19% (-26% ... 0%)   | -2% (-8% ... 7%)           |
| Reduktion der Treibhausgase (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) **)   | el. KM a) | 4% (-7% ... 20%)  | -3% (-19% ... 22%)   | 20% (15% ... 31%)    | 29% (25% ... 35%)          |
|  | el. KM b) | -22% (-35% ... -1%)   | -30% (-51% ... 2%)   | -1% (-7% ... 13%)    | 11% (6% ... 18%)           |
|  | el. KM c) | -44% (-60% ... -20%)  | -55% (-79% ... -16%) | -20% (-27% ... -3%)  | -6% (-12% ... 3%)          |
| Die in Klammer angegebenen Werte beziehen sich auf den Bereich der erwarteten Effizienzwerte<br>a) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer konv. Kältemaschine mit einer JAZ von 3 (ca. 6°C Vorlauf)<br>b) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer konv. Kältemaschine mit einer JAZ von 4 (ca. 8°C Vorlauf)<br>c) Reduktion durch die WKK-Anlage im Vergleich zu einer konv. Kältemaschine mit einer JAZ von 5 (14-18°C Vorlauf)<br>*) SOFC Brennstoffzelle mit Gasturbine.<br>**) Reduktion (positive Werte) bzw. Erhöhung (negative Wert) der Belastungen durch die WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine im Vergleich zu einer Kälteerzeugung mit elektrisch betriebener Kompressionskältemaschine |           |   |                      |                      |                            |

Gegenüber elektrischen Kältemaschinen ist eine Reduktion der Umweltbelastung nur schwer erreichbar und bedarf hoher elektrischer Wirkungsgrade. Bei Mikrogasturbinen ist zudem die Temperaturabhängigkeit der Leistung (geringer bei hohen Temperaturen) ein zusätzliches Hindernis [22]. Den potentiell grössten Anwendungsbereich bietet sich für SOFC-Brennstoffzellen, da für diese Anlagen lange Jahreslaufzeiten sehr wichtig sind und der elektrische Wirkungsgrad sehr hoch ist.

Tabelle 11.6 zeigt nur spezifisch für die Kälteerzeugung relevante Punkte ansonsten gelten hier ebenfalls die in Tabelle 11.4 dargestellten Angaben.

**Tabelle 11.6 Bewertung der Technik und des Betriebs verschiedener WKK Systeme mit Kälteerzeugung**

| WKK-System   | BHKW 160kW mit Katalysator   | Mikrogasturbine   | SOFC Brennstoffzelle SOFC-GT BZ  | Holz WKK-Anlage, ORC   |
|--|--|---|--|--|
| Geeignet für   | Anlagen mit ganzjährigem Kältebedarf auf tiefem Niveau 6°C oder tiefer   |   |  |  |
| Ungeeignet für   | Anlagen mit Klimakältbedarf (Sommerbetrieb) auf raumtemperaturnahem Niveau (14-18°C)   |   |  |  |
| Wirtschaftlichkeit   | Nur bei sehr tiefen Wärmekosten (Hauptbetriebssziel Stromerzeugung) und langen Jahreslaufzeiten wirtschaftlich   |   |  |  |
| Betriebsart monovalent **)   | Nicht sinnvoll   | Nein, ungeeignet  | Nein, ungeeignet   | Nicht sinnvoll   |
| Betriebsart bivalent **)   | Standardfall   | Standardfall  | Standardfall   | Standardfall   |
| Stärken  | Bewährte Technik   | Hohe Abgabeterminatur möglich (2-stufige Absorptions Kältemaschine)           | Hoher elektrischer Wirkungsgrad („tiefer“ Wärmepreis)<br>Hohe Abgabeterminatur möglich (2-stufige Absorptions Kältemaschine) | dir. Biomassenutzung   |
| Schwächen  | Meist zu tiefer elektr. Wirkungsgrad für günstigen Betrieb   | Zu tiefer elektrischer Wirkungsgrad für günstigen Betrieb, Temperaturabhängig | Anlagekosten   | Zu tiefer elektrischer Wirkungsgrad für günstigen Betrieb            |
| Potential  | Beschränkt (Abhängig vom Rückspeisetarif)  | Beschränkt (Abhängig vom Rückspeisetarif)                                     | Zukünftig in grossen Gebäuden (z.B. Spital) zur maxim. der Jahreslaufzeit  | Beschränkt (Abhängig vom Rückspeisetarif und der Einspeisevergütung) |
| Entwicklungsbedarf   | WKK-Teil wie bei Wärmeproduktion zusätzlich COP von Absorptionskältemaschinen sowie Wasser- und Strombedarf der Rückkühlung und die Investitionskosten |   |  |  |
| **) Aus Kostengründen (Investitionskosten) ist ein monovalenter Betrieb nicht sinnvoll. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist unter ca. 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr für die Kälteerzeugung kaum möglich |  |   |  |  |

## 12. Folgerungen

Folgende zusammenfassenden Folgerungen können aus den Resultaten gezogen werden:

- Es zeigt sich, dass WKK-Systeme nur in jenem Fall einen ökologischen Vorteil gegenüber dem Vergleichssystem aufweisen, wenn sie bei Systemen mit geringeren elektrischen Wirkungsgraden (< 30%) einen sehr hohen Gesamtnutzungsgrad (deutlich über 90%) oder einen sehr guten elektrischen Wirkungsgrad aufweisen (> 40% bei 80% Gesamtnutzungsgrad)
- Bezüglich dem Einsatzbereich eignen sich WKK-Systeme vor allem dort wo höhere Arbeitstemperaturen benötigt werden (z.B. Nahwärmenetze, Warmwasserbereitstellung oder Prozesswärme). Bei Niedertemperaturanwendungen (30-40°C Vorlauftemperatur) ist der Einsatz von WKK-Systemen aus ökologischer Sicht gegenüber dem Vergleichssystem meist ungünstiger
- Bei den Systemen mit höherer Leistung werden meist höhere elektrische Wirkungsgrade erreicht. Damit sind grössere WKK-Systeme, welche z.B. Nahwärmenetze versorgen ökologisch günstig zu betreiben. Bei diesen Anlagen lassen sich auch leichter hohe Laufzeiten erreichen und damit ein wirtschaftlicher Betrieb erzielen
- Systeme mit kleinen Leistungen werden oft monovalent eingesetzt. Neben den gegenüber grösseren Anlagen tieferen elektrischen Wirkungsgrade ergeben sich hier zusätzliche Probleme bezüglich der Auslastung (Taktbetrieb, grosse Wärmespeicher), welche zu einer Reduktion des Gesamtnutzungsgrades führen. Aus ökologischer Sicht sind kleine, monovalente Systeme nur sinnvoll, wenn der Wärmeverbraucher relativ hohe Vorlauftemperaturen benötigt (50-60°C Vorlauftemperatur) und das System dennoch ein hoher Gesamtnutzungsgrad erreicht (min 90% bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 30%)
- Bei Gebäuden mit tiefen Heizungstemperaturen sollte eine WKK-Anlage nur für die Warmwasserbereitstellung eingesetzt werden. Damit können lange Betriebszeiten bei günstigen Voraussetzungen erreicht werden (60°C Temperaturbedarf)
- Eine Kombination von WKK-Anlagen mit thermischen Solarkollektoren ist wenig sinnvoll, da dadurch die Jahresbetriebsdauer deutlich reduziert wird und zudem die Kosten steigen
- Für grosse Anlagen (Nahwärmenetze) mit professioneller Betreuung ist eine Systemkombination von WKK-Anlage mit Spaltenkessel und einer Grundlastwärmepumpe eine aus ökologischer Sicht interessante Systemvariante. Das komplexe Anlagendesign führt allerdings zu hohen Investitionskosten, welche die Anlagenwirtschaftlichkeit je nach Stromtarifstruktur einschränken
- Mikrogasturbinen weisen derzeit noch tiefere elektrische Wirkungsgrade und Gesamtnutzungsgrade auf als andere WKK-Anlagen im vergleichbaren Leistungsbereich. Aufgrund der bei Mikrogasturbinen vorhandenen Möglichkeit Wärme auf hohem Temperaturniveau auszukoppeln, eignen sich diese Anlagen vor allem bei Anwendungen wo Dampf oder Prozesswärme benötigt wird. Für ökologisch günstige Anwendungen in konventionellen Nahwärmenetzen müssten die Wirkungsgrade dieser Anlagen noch deutlich gesteigert werden können. Das Potential zu deutlichen Wirkungsgradsteigerungen und zu Kostensenkungen ist bei Mikrogasturbinen vorhanden
- Aufgrund hoher elektrischer Wirkungsgraden bei gutem Gesamtnutzungsgrad eignen sich SOFC-Brennstoffzellen (und auch MCFC) grundsätzlich für einen sehr breiten Einsatzbereich und bringen die deutlichsten Umweltvorteile. Noch zu lösen sind bei diesen Systemen Kosten- und Materialprobleme
- Eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung ist durch die Verwendung von erneuerbaren Brennstoffen zu erreichen. Damit lässt sich der Bedarf an nicht erneuerbaren Energieträger auf 1/3 reduzieren. Die Treibhausgasemissionen sinken auf etwa die Hälfte. Wird ebenfalls für die nicht gekoppelte Stromproduktion im Gaskombi-Kraftwerk Biogas eingesetzt wird das Abschneiden der WKK-Anlagen wie beim Betrieb mit Erdgas vor allem durch die Anlageneffizienz bestimmt
- Für feste Biomasse (Holz) sind Stirlingmotoren eine sehr interessante Möglichkeit die Effizienz von Holzfeuerungen zu erhöhen. Sofern die Anlagekosten noch deutlich gesenkt werden können und die Betriebserwartungen erfüllt werden kann mit einer Einspeisevergütung auch bei kleineren Anlagen ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb erreicht werden
- Für Anwendungen mit Biogas direkt ab Anlage eignen sich motorische WKK-Anlagen gut, da sie relativ tolerant gegenüber der Gaszusammensetzung sind und trotzdem hohe Wirkungsgrade erreichen können. Diese Nutzung schneidet bezüglich Umweltbelastung günstiger ab da weitere

Verluste durch Aufbereitung und Verteilung wegfallen. Für diese Anwendungen sollte daher der Einsatz von WKK-Anlagen Priorität haben und gefördert werden

- Eine ökologisch vorteilhafte Kälteproduktion ist nur mit WKK-Systemen zu erzielen, welche einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad aufweisen. Damit ist der Strom das Hauptprodukt und die anfallende Wärme kann als niederwertiges Nebenprodukt in der Kälteversorgung Verwendung finden (geringe Allokation auf die Wärme). Dies ist nur der Fall, wenn die WKK-Anlage mit Absorptionskältemaschine einen Gesamtnutzungsgrad (Strom und Kälteenergie) von 70% oder mehr und einen elektrischen Wirkungsgrad von mindestens 40% erreicht
- Für die Erzeugung von Klimakälte auf einem Temperaturniveau von 14-18°C sind optimal ausgelegte Systeme mit elektrisch betriebenen Kältemaschinen gegenüber der Kälteproduktion mit WKK-Systemen und Absorptionskältemaschinen deutlich im Vorteil
- Als ökologisch optimale Kombination für die Kälteerzeugung zeigt sich die Kombination von Kompressionskältemaschine und Photovoltaikanlage für die Stromproduktion. Insbesondere für Klimakälteanwendungen nur mit Sommerbetrieb ist diese Variante ökologisch sehr günstig.

## **12.1. ENTWICKLUNGSBEDARF**

Für die weitere Entwicklung der Anlagen sind für alle Anlagetypen der elektrische Wirkungsgrad und der Gesamtnutzungsgrad ein zentraler Punkt. Je nach Technologie sind hier noch deutliche Steigerungen zu erwarten.

Daneben spielen die Investitionskosten eine entscheidende Rolle für den Installationsentscheid. Vor allem bei kleinen Anlagen ist eine Standardisierung und Massenproduktion nötig um vertretbare Kosten zu erreichen. Bei den Brennstoffzellen sind die Kosten nach wie vor der kritische Punkt für eine Verbreitung.

Eine günstige Ausgangslage dürften dezentrale WKK-Anlagen bei der Nutzung von Biogas und auch fester Biomasse haben. Bei verschiedenen Technologien ist für diese Brennstoffe noch intensive Entwicklungsarbeit notwendig.

## **12.2. RAHMENBEDINGUNGEN**

Zentrale Rahmenbedingungen für die WKK-Anlagen sind die Strompreise (Bezugs wie auch Rückliefertarif). Unsichere Entwicklungen (z.B. Gaspreis) erschweren Entscheide für eine WKK-Anlage. Für mit Erdgas erzeugten Strom aus WKK-Anlagen ist eine Netzrückspeisung infolge tiefer Rückliefertarife meist uninteressant.

Wichtig und von grosser Bedeutung für mit Biogas oder andere Biomasse betriebenen WKK-Anlagen ist die Einspeisevergütung. Eine solche Vergütung dürfte den Investitionsentscheid für die Installation von biogen betriebenen WKK-Anlagen stark erleichtern.

### 13. Literatur/Referenzen

- [1] Pehnt M., Cames M., Fischer C., Praetorius B., Schneider L., Schumacher K., Voss J-P. (2006) Micro Cogeneration, Towards decentralized Energy Systems Springer, Berlin.
- [2] Krewitt W., Pehnt M., Temming H., Fischedick M. (2004) Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung, Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotentiale. In: Beiträge zur Umweltgestaltung, Band A 156. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- [3] Kröni R. (2001) Wärme-Kraft-Kopplung und Photovoltaik Oekologische Energieversorgung nach Bedarf. Enecolo AG im Auftrag vom Forschungsfonds der Erdölvereinigung Projekt- und Forschungsfonds der Elektrizitätswirtschaft, Mönchaltorf.
- [4] Gantner U., Jakob M. und Hirschberg S. (2000) Perspektiven der zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz unter Berücksichtigung von nachfrageorientierten Massnahmen, Ökologische und ökonomische Betrachtungen. Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.
- [5] Jungbluth, N., Faist M., Dinkel F., Stettler C., Doka G., Chudacoff M., Dauriat A., Gnansounou E., Sutter J., Spielmann M., Kljun N., and Keller M. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. Final report ecoinvent Data v2.0, Swiss Centre for Swiss Centre for Life Cycle Inventories, ESU-services, Duebendorf and Uster.
- [6] Knight I., Ugursal I., Beausoleil-Morrison I. (2005) Residential Cogeneration Systems: A Review of The Current Technologies. A Report of Subtask A of FC+COGEN-SIM, The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems. Annex 42 of the International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme.
- [7] Primas A. (2007) Life Cycle Inventories of new CHP systems. Final report ecoinvent Data v2.0, Swiss Centre for Swiss Centre for Life Cycle Inventories, B&H AG, Duebendorf and Zurich. Online-Version unter: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- [8] Datenbank ecoinvent Datenbestand 1.3, 2006, Swiss Centre for Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf. Online-Version unter: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- [9] Goedkoop M., Spriensma R. (2001) The Eco-indicator 99, A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report, Third revised edition. , PRé Consultants B.V., Amersfoort (NL).
- [10] Frischknecht, R., Steiner R., Braunschweig A., Egli N. und Hildesheimer G. (2006) Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006. Publication in preparation.
- [11] Brand G., Braunschweig A., Scheidegger A. and Schwank O. (1998) Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit Oekofaktoren 1997. In: BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- [12] IPCC (2001) Technical Summary of the Working Group I Report; Co-ordinating Lead Authors: D.L. Albritton, L.G. Meira Filho. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Online-Version under: [www.ipcc.ch/pub/reports.htm](http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm).
- [13] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischier R., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2004a) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000 No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Retrieved from: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- [14] Hansen J-E., Riikinen A., Noren C., Karlson G., Malmrup L., Ernebrandt S., Stokholm R., Veland B., Fock F., Mosbech H., de Witt J., Pedersen A. (2004) Operational Experiences from Micro-Turbine Energy Systems. "The OMES Project". 19. World Energy Congress, Sidney.
- [15] Goldstein L., Hedman B., Knowles D., Freedman S., Woods R., Schweizer T. (2003) Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations, NREL/TP-620-34783. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado.

- [16] DEA (2005) Technology Data for Electricity and Heat Generating Plants. Danish Energy Authority, ISBN: 87-7844-502-7.
- [17] ASUE (2005) BHKW-Kenndaten 2005, Module Anbieter Kosten. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern. Online-Version unter: [www.asue.de](http://www.asue.de).
- [18] Zah R., Böni H., Gauch M., Hischier R., Lehmann M. und Wäger P. (2007) Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen Projektleitung: N. Jungbluth, ESU-services, Uster. Empa, Abteilung Technologie und Gesellschaft, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Landwirtschaft, Bern.
- [19] Bine (1998) KWKK, Kraft Wärme Kälte Kopplung. In: BINE profiinfo 11/98. BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen. Online-Version under: [www.bine.info](http://www.bine.info).
- [20] Nussbaumer T. (2005) Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung Input-Papier für die Stromangebots Perspektiven 2035 des Bundesamts für Energie. Verenum, Zürich.
- [21] Dorer V., Weber R. and Weber A. (2005) Performance of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings In: Energy and Building 37, pp 1132-1146. Elsevier Science B.V.
- [22] Baumann D. (2004) Energiewirtschaftliche Bewertung der dezentralen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Energietechnik, Nr. 514. VDI Verlag, Düsseldorf.
- [23] Eicher H. und Rigassi R. (2003) Zukünftige Marktbedeutung von WKK-Anlagen mit 1 - 1000 kW elektrischer Leistung. Dr. Eicher+Pauli AG im Auftrag vom Bundesamt für Energie, Liestal und Bern.
- [24] Energytech (2002) Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU Graz im Auftrag der Energieverwertungsagentur – E.V.A., Graz und Wien. Online-Version unter: <http://energytech.at/kwk/portrait.html>.
- [25] Stadler M., Lipman T., und Marnay C. (2007) Aktuelle Trends in der dezentralen KWK Technologie Integration - Das kalifornische Fördermodell und dessen Implikation für die Endenergieeffizienzrichtlinie. Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division.
- [26] Simader G., Krawinkler R., und Trnka G. (2006) Micro CHP systems: state-of-the-art. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Wien. Online-Version unter: <http://www.energyagency.at>.
- [27] Kralemann M. (2006) Statusbericht Kraft-Wärme-Kopplung mit biogenen Festbrennstoffen im kleinen Leistungsbereich. 3N-Kompetenzzentrum Nachwachsende Rohstoffe, Werlte.
- [28] WKK-Fachverband (2001) Wärme-Kraft-Kopplung, die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom, Potentiale Markt Innovationen. Vol. 3, ISBN 3-9521-009. Schweizerischer Fachverband für Wärmekraftkopplung, Zürich.
- [29] ASUE (2001) Mikro-KWK Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern. Online-Version unter: [www.asue.de](http://www.asue.de).
- [30] Lutsch W., Neuffer H., Witterhold F., Pfaffenbergh W., Pfeifer T., Sander T., Zschernig J., Klobasa M., Radgen P., Schmid C., Bartels M., Beier C. und Dötsch C. (2004) Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderen Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerierbaren Energien. AGFW Hauptstudie – Band 2: Technikentwicklung und -bewertung,

ISBN 3-89999-005-6. Arbeitsgemeinschaft für Wärme- und Heizkraftwirtschaft (AGFW), Frankfurt.

- [31] Salazar M. and Rodriquez R. (2003) Combined Heat and Power Technologies, Applied Studies of Options including Micro turbines. Diploma Thesis for Mechanical Engineering. Technische Universität Wien, Wien.
- [32] Schneider L. (2004) Ökoenthusiasmus oder lukrativer Nebenverdienst? Wirtschaftlichkeit der Mikro-KWK. In: Präsentation an Berliner Energietage, 17. Mai 2004. Öko-Institut e.V., Berlin.
- [33] Simader G., Ritter H., Benke G und Pinter H. (2004) Mikro- und Mini-KWK-Anlagen in Österreich. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Wien. Online-Version unter: <http://www.eva.ac.at>.
- [34] Chernick P., Tracey B. and Geller S. (2003) Costs and Environmental Effects of Wind Turbines and Natural-Gas Generation. Resource Insight, Inc.
- [35] Energieverordnung (2007). Vernehmlassungsentwurf vom 27. Juni 2007 (EnV).
- [36] Beuchat F., Corbaz C., Utz C. (2005) Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine Migros-Genossenschafts-Bund (MGB)-Zürich, Schlussbericht. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bundesamt für Energie (BfE), Bern. Reust Marti+ Beuchat AG im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE), Bern.
- [37] Frischknecht, R. (1998) Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making; Scope-dependent Inventory System Models and Context-specific Joint Product Allocation, ETH Ph.D.-thesis Nr. 12599, Uster.

## **14. Anhang A, Review des Schlussberichts**

Reviewer : R. Frischknecht, ESU-services GmbH  
18.06.2007 - 15.02.2008

### **14.1. ZWECK UND ABLAUF DES REVIEWS**

Dieses Review beurteilt den Abschlussbericht der Studie „Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen“ von A. Primas, Basler & Hofmann, im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Ziel dieser Studie ist es, die Umweltauswirkungen von neuen Systemen der gekoppelten Strom- und Wärmeleitung mithilfe der Ökobilanzierung zu quantifizieren sowie die technische Eignung und die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Die Ökobilanz-Datenerhebung erfolgte im Sommer 2007 im Rahmen der Arbeiten zur Erstellung der neuen Sachbilanzdaten des ecoinvent Datenbestandes v2.0. Das Review wurde begleitend durchgeführt. Neben diesem Reviewtext hat der Reviewer nach Abschluss der Datenerhebung die zusammengestellten und dokumentierten Sachbilanzdaten kommentiert.

Die Studie beinhaltet eine wirtschaftlich-technische und eine ökologische Bewertung. Die datenbezogene Prüfung beschränkt sich auf den Teil der ökologischen Bewertung (Ökobilanz).

### **14.2. ALLGEMEINER EINDRUCK**

Die Studie macht einen sehr guten Eindruck. Die angewendete Ökobilanz-Methode entspricht dem heutigen Stand. Die Empfehlungen und Vorgaben der ISO-Normen sind insbesondere bezüglich Sachbilanz vorbildlich umgesetzt. Die Sachbilanzdaten werden in einem separaten, englischsprachigen Bericht transparent dargelegt und begründet. Die bewerteten Resultate werden ausführlich diskutiert. Sachbilanzergebnisse werden ebenfalls im englischsprachigen Bericht gezeigt. Zu mehreren wichtigen Systemparametern werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt und deren Einfluss auf die Ergebnisse diskutiert. Die Folgerungen sind klar geschrieben, aus den Ergebnissen abgeleitet und weitgehend auf Rahmen und Zielsetzung der Studie abgestimmt. Sie orientieren sich an der Sichtweise des Praktikers (Energie- und Heizungsplaner). Im Folgenden werden die einzelnen Teile der Studie im Detail gewürdigt.

### **14.3. ZIELSETZUNG, VORGEHEN UND UNTERSUCHUNGSMETHODIK**

Zielsetzung, Vorgehen und Untersuchungsmethodik der Studie wie auch der daraus abgeleitete Untersuchungsrahmen sind klar und konzis beschrieben. Die Kapitel enthalten die für eine Beurteilung der Studienergebnisse wesentlichen Informationen insbesondere auch bezüglich Einschränkungen und Abgrenzungen.

### **14.4. SYSTEMGRENZEN UND FESTLEGUNGEN**

Als funktionelle Einheit und Vergleichsbasis werden die in Wärmekraftkopplungsanlagen erzeugten Produkte Wärme und Strom verwendet. Dies erlaubt einen Vergleich mit konventionellen Systemen, die nur Wärme beziehungsweise nur Strom produzieren.

Dem Aspekt der Allokation wird entsprechend der grossen Bedeutung bei den hier untersuchten Systemen der Wärmekraftkopplung ein spezielles Augenmerk gewidmet. Die Vergleich der in der Studie untersuchten Systeme mit konventionellen Systemen berücksichtigt das ganze Spektrum möglicher Allokationsfaktoren (von 0 bis 100 %). Durch diesen Ansatz sind die Folgerungen aus der Studie äusserst robust, das heisst von der Allokation unabhängig.

Die ökologische Bewertung basiert auf vier konzeptionell unterschiedlichen Methoden (Eco-indicator 99, Umweltbelastungspunkte 2006, Klimawandel und Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar). Diese Vielfalt ist an sich begrüssenswert. Allerdings sind drei der vier Methoden in ihrer Ausrichtung sehr ähnlich, was de facto dazu führt, dass nicht vier sondern lediglich zwei unterschiedliche Bewertungsmuster Verwendung finden.

## 14.5. SYSTEMCHARAKTERISIERUNG

Die untersuchten Systeme werden, gruppiert nach ihrem Einsatzgebiet, beschrieben. Der deutsche Bericht enthält Informationen zu ausgewählten technischen Kenngrößen, welche die Systeme ausreichend charakterisieren. Nicht berücksichtige Systemkombinationen werden kurz erwähnt und das Nichtberücksichtige wird begründet. Aspekte, die bei einem Vergleich der betrachteten Systeme wichtig sein können, in der ökologischen Beurteilung aber nicht quantifizierbar sind, werden ebenfalls angesprochen. Die Auswahl der Systeme und Systemkombinationen sind nach Einschätzung des Reviewers sinnvoll, ebenso die Wahl der Vergleichssysteme (modernes Erdgas GuD Kraftwerk beziehungsweise Wärmepumpe anderseits). Sie erlauben Aussagen darüber, ob die untersuchten Systeme und Systemkombinationen gegenüber einer zentralen beziehungsweise getrennten Strom- und Wärmeleitung auf der Basis des selben Energieträgers umweltbezogene Vorteile aufweisen. Die Studie ermöglicht weniger einen Energieträger als einen Technologievergleich.

Die Sachbilanzdaten wurden gemäss den Vorgaben des ecoinvent Reviews geprüft und validiert. Es konnte festgestellt werden, dass die relevanten Informationsquellen zur Bilanzierung herangezogen worden sind. Modellannahmen und Vereinfachungen sind plausibel und die Fehlerquote in den Sachbilanzen war ausserordentlich gering. Den Sachbilanzdaten kann deshalb eine hohe Datenqualität attestiert werden.

## 14.6. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse werden in vier Kapiteln unter verschiedenen Blickwinkeln dargestellt und diskutiert. Einerseits erfolgt die Ergebnisdiskussion bezogen auf die in den untersuchten WKK Anlagen eingesetzte Energie. Die Dominanzanalysen zeigen die Bedeutung der einzelnen Lebenswegabschnitte. Die gewählte Unterteilung in Infrastruktur, Unterhalt und Betriebsmittel, Brennstoffbereitstellung, CO2-Emissionen und übrige Emissionen ist sinnvoll. Die so strukturierten Dominanzanalysen sind für das Verständnis der Umweltauswirkungen der bilanzierten Systeme sehr hilfreich.

In einem weiteren Kapitel werden die gekoppelt erzeugten Produkte Strom und Wärme mit konventionellen Systemen verglichen. Dem arbiträren Charakter der Allokation wird Rechnung getragen, indem die Vergleiche mit maximal variierenden Allokationsfaktoren durchgeführt werden. Durch diesen eleganten Ansatz kann die ökologische Beurteilung der neuen WKK-Systeme unabhängig von bestimmten Allokationsfaktoren erfolgen.

Die Sensitivitätsanalysen werden auf der Basis einer reinen Wärmebereitstellung durchgeführt. Damit wird auch in diesem Kapitel die Allokationsproblematik umgangen. Gleichzeitig werden in diesem Kapitel erstmals Vergleiche über alle untersuchten Systeme hinweg präsentiert. Die Parameter, die variiert werden, sind gut gewählt und plausibel begründet. Sie erlauben eine gute Einschätzung der Stabilität der Ergebnisse.

Im Kapitel „Systemkombinationen“ werden technisch sinnvolle Konfigurationen für ausgewählte Standardsituationen beschrieben und deren Umweltbelastung quantifiziert. Daraus ziehen die Autoren Schlüsse bezüglich ökologisch optimaler Systemkombinationen.

Es ist eine Stärke und ein Verdienst dieser Studie, dass sie mehrere Bewertungsmethoden parallel anwendet. Es wäre wünschenswert, allfällige Korrelationen zwischen den angewendeten Methoden zu thematisieren. Mit Ausnahme der Methode der ökologischen Knapheit 2006 werden in allen Methoden die fossilen Energieressourcen oder die mit deren Nutzung verbundenen CO2-Emissionen sehr stark gewichtet. Deshalb erstaunt eine relativ grosse Übereinstimmung in den Ergebnissen von drei der vier Bewertungsmethoden kaum.

## 14.7. WIRTSCHAFTLICHKEIT, ANWENDUNGSMATRIX UND BEWERTUNG

Die Wirtschaftlichkeit der analysierten Systeme wird ausgedrückt in Investitionskosten pro kW elektrisch. Die ausgewiesenen spezifischen Kosten sind damit nicht direkt vergleichbar mit den Umweltauswirkungen, die pro kWh Energieinput ausgewiesen werden. Eine Vorgehensweise analog der Umweltbewertung (Bezug auf den Energieinput; Allokation auf Strom zwischen 0 und 100 % variieren) hätte hier die Vergleichbarkeit ermöglicht.

Die prioritären Einsatzgebiete der analysierten Systeme werden in drei Anwendungsmatrizen für Gebäude, für Wärmeverbunde und für die Kälteversorgung dargestellt. Zudem werden Technik und

Betrieb der untersuchten Anlagen eingeschätzt und die Umweltbelastung im Vergleich zu Referenzvarianten dargestellt. Diese Vergleiche beschränken sich auf Eco-indicator 99 und Treibhausgase. Es werden keine Gründe angegeben, weshalb die beiden anderen Indikatoren (Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar und insbesondere Umweltbelastungspunkt 2006) nicht verwendet werden.

#### **14.8. FOLGERUNGEN UND DISKUSSION**

Die Folgerungen sind sorgfältig und ausgewogen formuliert. Sie stehen im Einklang mit der in Kapitel 2 beschriebenen Zielsetzung und dem daraus abgeleiteten Untersuchungsumfang wie auch den gezeigten Ergebnissen. Die Folgerungen fassen die wesentlichen Erkenntnisse in knappen und klaren Worten zusammen. Durch die Ausrichtung auf typische Anwendungsfälle werden neben Umweltinteressierten auch die Planer neuartiger Energiesysteme angesprochen.

#### **14.9. BERICHT**

Der Bericht ist gut strukturiert und klar in der Sprache. Die Zusammenfassung in deutscher und englischer Sprache enthält alle wesentlichen Informationen in kompakter Form. Es besteht eine gewisse Redundanz der Information in den Kapiteln 3 und 4. Es gelingt dem Autor die ökologischen Aspekte und die technisch-wirtschaftliche Eignung sinnvoll zu kombinieren. Der Bericht ist damit für die Praxis eine wertvolle Informationsquelle.

Uster, 15. Februar 2008

*R. Fischer*

## 15. Anhang B, Resultate

### 15.1. RESULTATE UMWELTBELASTUNG VON WKK-ANLAGEN

#### 15.1.1 Betrieb mit Erdgas

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten WKK-Anlagen bezogen auf 1 kWh Gasinput (Erdgas).

Tabelle 15.1 Betrieb mit Erdgas, Resultate bezogen auf Erdgasinput

| Bewertungsmethode<br>Prozess      | Treibhaus-<br>potential<br>IPCC 2001,<br>100a | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knappeit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knappeit 97 |
|-----------------------------------|---|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--|--|
| Unterbezeichnung                  | Total   | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | Punkte / kWh             | fossil und<br>nuklear   | Total                                      | Total                                      |
| Einheit                           | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh                    | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                               | UBP 97 / kWh                               |
| Erdgas in Mikrogasturbine         | 2.57E-01                                      | 1.62E-02                 | 2.01E-04                  | 2.21E-03                 | 1.38E-02                 | 4.35E+00                | 1.24E+02                                   | 8.43E+01                                   |
| Erdgas in SOFC Brennstoffzelle    | 2.60E-01                                      | 1.63E-02                 | 2.16E-04                  | 2.11E-03                 | 1.40E-02                 | 4.43E+00                | 1.28E+02                                   | 8.36E+01                                   |
| Erdgas in SOFC-GT Brennstoffzelle | 2.60E-01                                      | 1.64E-02                 | 2.36E-04                  | 2.20E-03                 | 1.40E-02                 | 4.43E+00                | 1.30E+02                                   | 8.58E+01                                   |
| Erdgas in BHKW 160kW mit Kat.     | 2.61E-01                                      | 1.61E-02                 | 1.65E-04                  | 2.09E-03                 | 1.39E-02                 | 4.37E+00                | 1.24E+02                                   | 8.21E+01                                   |
| Erdgas in PEM Brennstoffzelle     | 2.68E-01                                      | 1.70E-02                 | 2.86E-04                  | 2.41E-03                 | 1.43E-02                 | 4.55E+00                | 1.42E+02                                   | 9.35E+01                                   |
| Erdgas in Stirling Motor          | 2.63E-01                                      | 1.68E-02                 | 2.40E-04                  | 2.45E-03                 | 1.41E-02                 | 4.50E+00                | 1.37E+02                                   | 9.19E+01                                   |
| Erdgas in Mini-BHKW mit Kat.      | 2.66E-01                                      | 1.64E-02                 | 1.94E-04                  | 2.23E-03                 | 1.40E-02                 | 4.41E+00                | 1.30E+02                                   | 8.70E+01                                   |

Ergänzend zur obenstehenden Tabelle die Anteile der einzelnen Bewertungskategorien in der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappeit (UBP 06). Es zeigt sich, dass die Luftemissionen (v.a. CO<sub>2</sub>) den grössten Anteil an der Umweltbelastung in dieser Bewertungsmethode ausmachen.

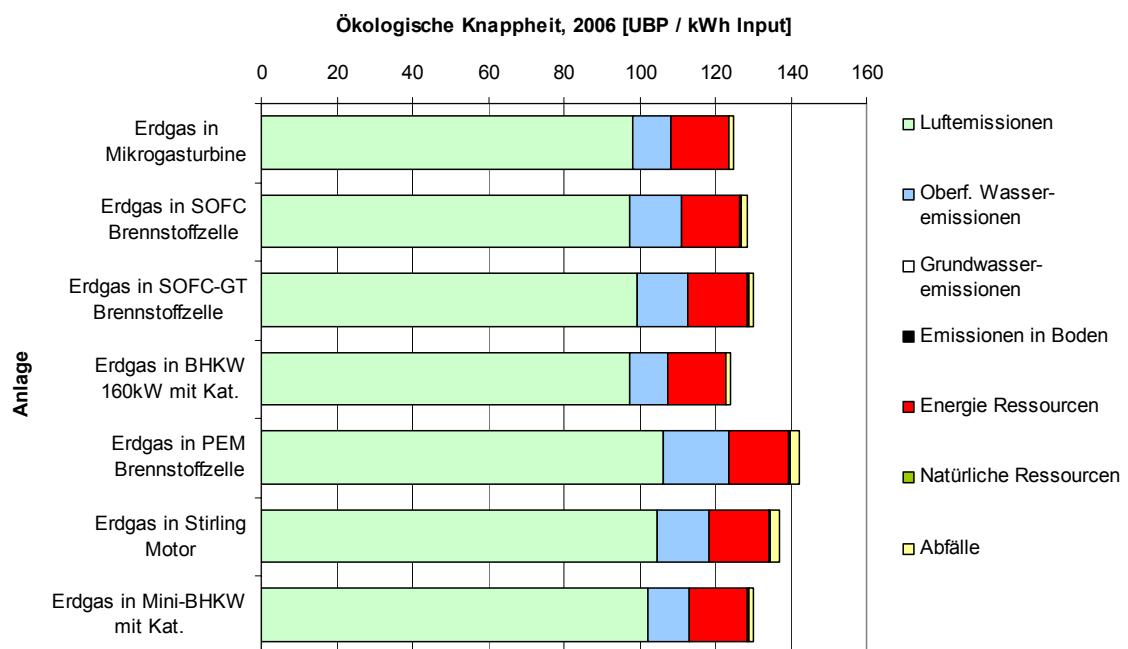


Abbildung 15.1 Anteile der Bewertungskategorien gemäss Methode der ökologischen Knappeit 2006 (Umweltbelastungspunkte 06). Erdgas betriebene WKK-Anlagen. Belastung pro kWh Erdgas Input.

Nachfolgend ist zur Vollständigkeit die im Hauptteil nicht enthaltene Graphik zur Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappeit (UBP 97) dargestellt.

Auch hier machen die Luftemissionen machen einen Anteil von etwa 90% der Gesamtbelastung aus. Der Bedarf an Energieressourcen ist mit einem Anteil von etwa 5% die zweit wichtigste Belastung.

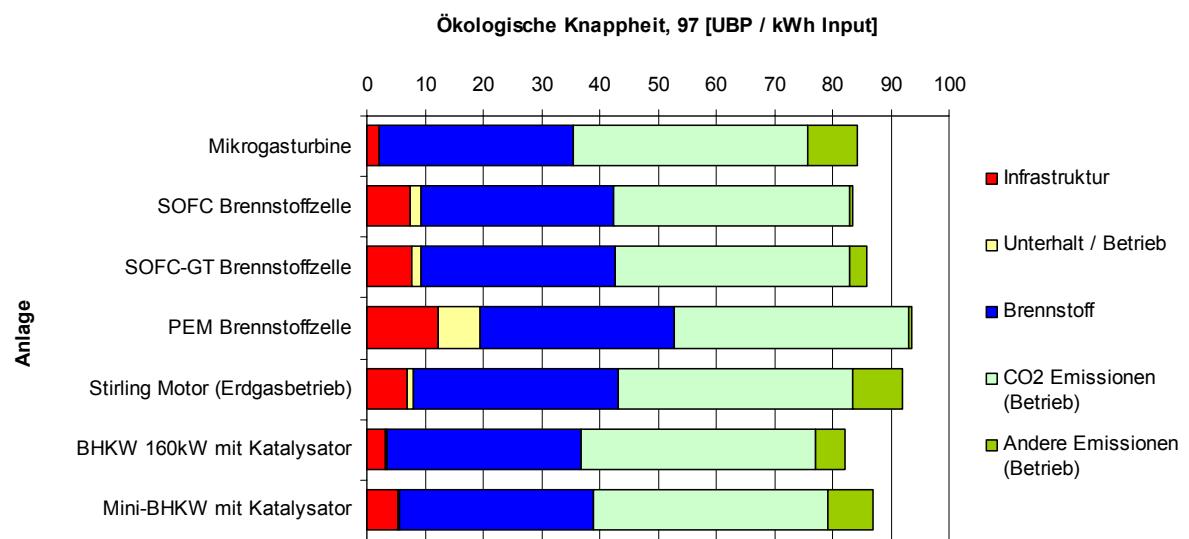


Abbildung 15.2 Umweltbelastungsanteile von mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Erdgas Input.  
Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 1997 (Umweltbelastungspunkte 1997)

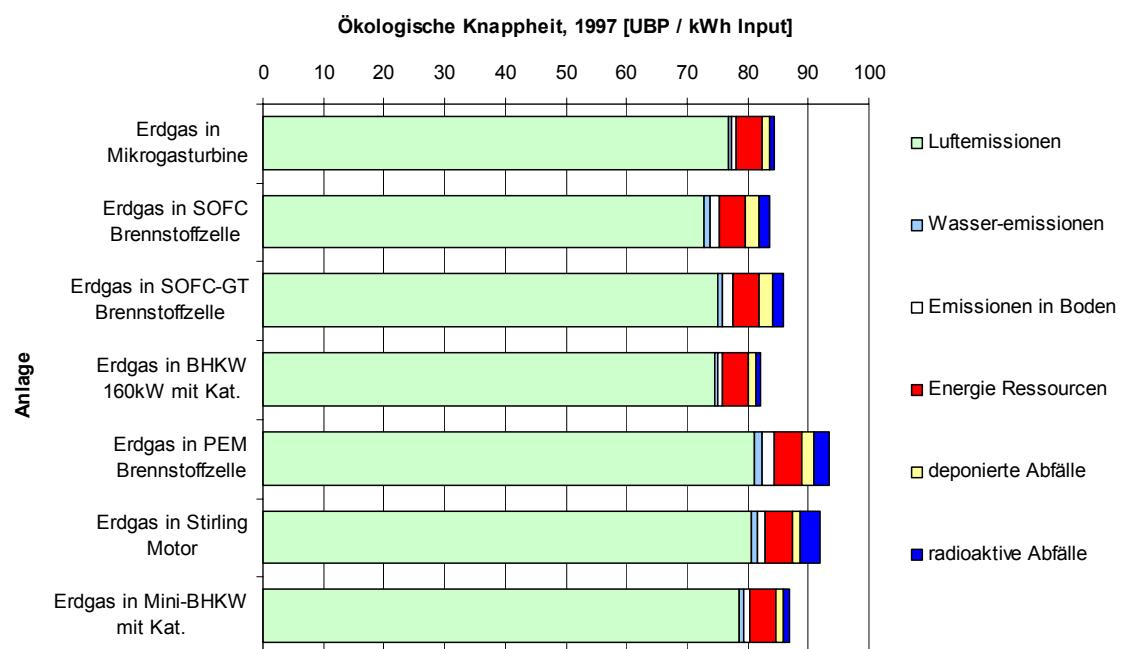


Abbildung 15.3 Anteile der Bewertungskategorien gemäss Methode der ökologischen Knappheit 1997 (Umweltbelastungspunkte 97). Erdgas betriebene WKK-Anlagen. Belastung pro kWh Erdgas Input.

### 15.1.2 Betrieb mit Biogas bzw. Holz

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten WKK-Anlagen bezogen auf 1 kWh Input (Biogas, Holz).

Tabelle 15.2 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Resultate bezogen auf Biogas- bzw. Holzinput

| Bewertungsmethode<br>Prozess         | Treibhaus-<br>potential    | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 97 |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| Unterbezeichnung                     | IPCC 2001,<br>100a         | Total                    | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | fossil und<br>nuklear   | Total                                       | Total                                       |
| Einheit                              | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                                | UBP 97 / kWh                                |
| Biogas in Mikrogasturbine            | 1.41E-01                   | 4.33E-03                 | 2.61E-04                 | 1.53E-03                  | 2.55E-03                 | 1.46E+00                | 9.54E+01                                    | 8.26E+01                                    |
| Biogas in SOFC Brennstoffzelle       | 1.44E-01                   | 4.43E-03                 | 2.77E-04                 | 1.43E-03                  | 2.73E-03                 | 1.54E+00                | 9.91E+01                                    | 8.19E+01                                    |
| Biogas in SOFC-GT Brennstoffzelle    | 1.44E-01                   | 4.54E-03                 | 2.97E-04                 | 1.51E-03                  | 2.74E-03                 | 1.54E+00                | 1.01E+02                                    | 8.42E+01                                    |
| Biogas in BHKW 160kW mit Kat.        | 1.45E-01                   | 4.22E-03                 | 2.25E-04                 | 1.40E-03                  | 2.59E-03                 | 1.48E+00                | 9.46E+01                                    | 8.03E+01                                    |
| Biogas in PEM Brennstoffzelle        | 1.51E-01                   | 5.10E-03                 | 3.46E-04                 | 1.72E-03                  | 3.04E-03                 | 1.66E+00                | 1.13E+02                                    | 9.19E+01                                    |
| Biogas in Stirling Motor             | 1.47E-01                   | 4.87E-03                 | 3.01E-04                 | 1.77E-03                  | 2.80E-03                 | 1.61E+00                | 1.07E+02                                    | 9.02E+01                                    |
| Biogas in Mini-BHKW mit Kat.         | 1.49E-01                   | 4.48E-03                 | 2.54E-04                 | 1.54E-03                  | 2.69E-03                 | 1.52E+00                | 1.01E+02                                    | 8.49E+01                                    |
| Holzschnitzel in ORC WKK-Anlage      | 3.41E-02                   | 3.96E-03                 | 1.21E-03                 | 2.32E-03                  | 4.25E-04                 | 1.91E-01                | 8.21E+01                                    | 4.57E+01                                    |
| Holzpellets in Pellet-Stirling Motor | 4.65E-02                   | 5.34E-03                 | 1.54E-03                 | 2.57E-03                  | 1.22E-03                 | 8.88E-01                | 1.12E+02                                    | 7.79E+01                                    |

Bemerkung zur mit Holzschnitzel betriebenen ORC WKK-Anlage: Für die Bewertung wurde eine Anlage mit weitergehenden Abgasgasreinigung vorausgesetzt (Partikel, NOx)

Ergänzend zur obenstehenden Tabelle die Anteile der einzelnen Bewertungskategorien in der Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 06). Es zeigt sich, dass die Luftemissionen auch hier den grössten Anteil an der Umweltbelastung ausmachen.

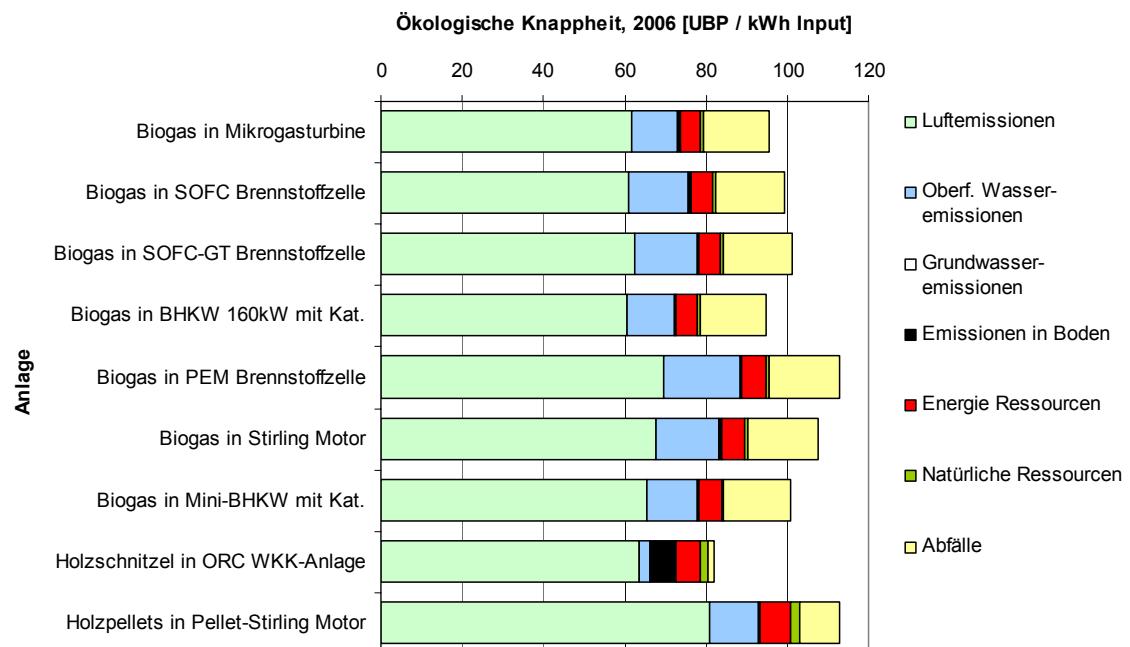


Abbildung 15.4 Anteile der Bewertungskategorien gemäss Methode der ökologischen Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte 06). Biogas- bzw. Holz-betriebene WKK-Anlagen. Belastung pro kWh Biogas / Holz Input.

Nachfolgend ist zur Vollständigkeit die im Hauptteil nicht enthaltene Graphik zur Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 97) dargestellt.

Luftemissionen machen einen Anteil von etwa 55% der Gesamtbelastung aus. Radioaktive Abfälle sind mit einem Anteil von etwa 35% die zweit wichtigste Belastung. Sie sind hauptsächlich durch den Strombedarf in der Biogasaufbereitung verursacht. Beim mit Holzpellets betriebenen Stirling Motor liegt der Anteil der Luftemissionen sogar bei 70% der Gesamtbelastung. Auch hier sind radioaktive Abfälle (Strom für Pelletproduktion) mit einem Anteil von gut 20% die zweit wichtigste Belastung.

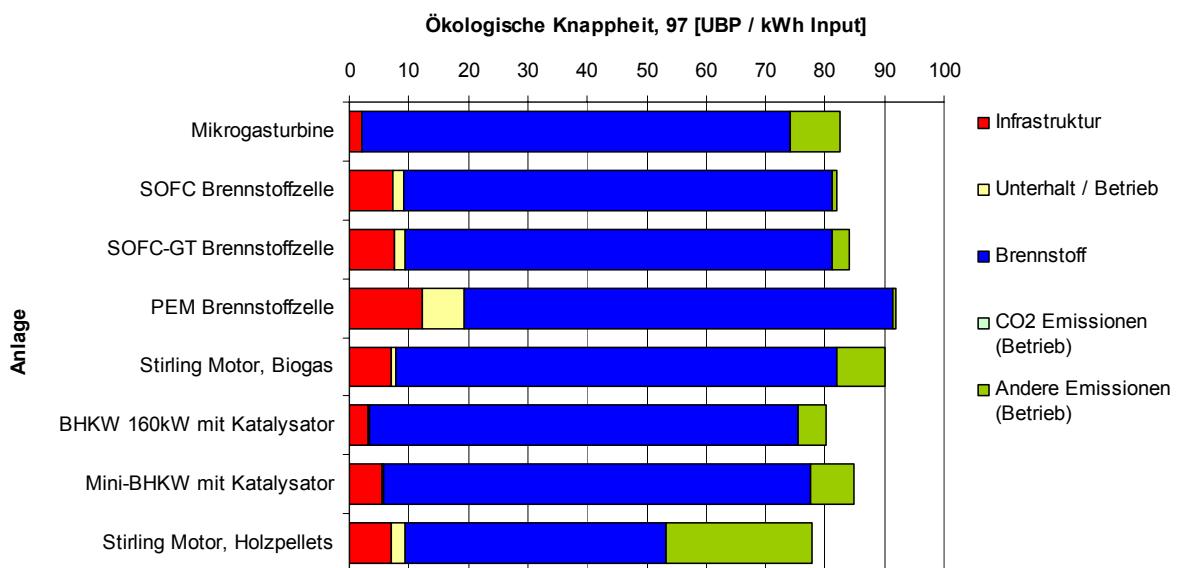


Abbildung 15.5 Umweltbelastungsanteile von mit Biogas bzw. Holzpellets betriebenen WKK-Anlagen pro kWh Input Input Bewertung: Methode der ökologischen Knaptheit 1997 (Umweltbelastungspunkte 1997)

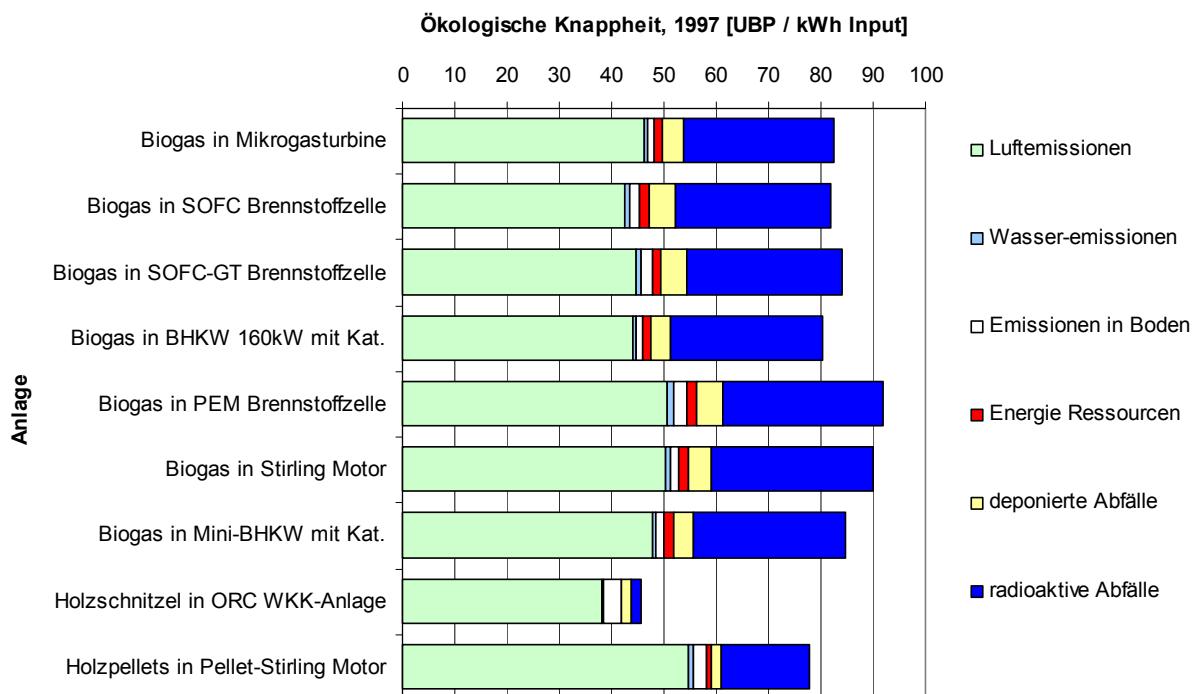


Abbildung 15.6 Anteile der Bewertungskategorien gemäss Methode der ökologischen Knaptheit 1997 (Umweltbelastungspunkte 97). Biogas- bzw. Holz-betriebene WKK-Anlagen. Belastung pro kWh Biogas / Holz Input.

## 15.2. RESULTATE BETRIEB

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten WKK-Anlagen bezogen auf 1 kWh Strom- bzw. 1 kWh Wärmeoutput. Die Allokation zwischen Strom und Wärme erfolgte in diesen Resultaten gemäss dem Exergieinhalt (Für Details siehe [7]). Für die dargestellten Resultate kommen die mittleren Nutzungsgrade gemäss Tabelle 5.2 zu Anwendung.

Tabelle 15.3 Betrieb mit Erdgas, Resultate bezogen auf 1kWh Wärme (Allokation nach Exergieinhalt)

| Bewertungsmethode<br>Prozess     | Treibhaus-<br>potential    | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 97 |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| Unterbezeichnung                 | IPCC 2001,<br>100a         | Total                    | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | fossil und<br>nuklear   | Total                                       | Total                                       |
| Einheit                          | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                                | UBP 97 / kWh                                |
| Wärme ab Mikrogasturbine         | 1.19E-01                   | 7.50E-03                 | 9.41E-05                 | 1.03E-03                  | 6.39E-03                 | 2.01E+00                | 5.81E+01                                    | 3.92E+01                                    |
| Wärme ab SOFC Brennstoffzelle    | 8.41E-02                   | 5.29E-03                 | 7.28E-05                 | 7.04E-04                  | 4.52E-03                 | 1.43E+00                | 4.27E+01                                    | 2.76E+01                                    |
| Wärme ab SOFC-GT Brennstoffzelle | 7.16E-02                   | 4.54E-03                 | 6.90E-05                 | 6.33E-04                  | 3.84E-03                 | 1.22E+00                | 3.75E+01                                    | 2.44E+01                                    |
| Wärme ab BHKW 160kW mit Kat.     | 1.08E-01                   | 6.65E-03                 | 6.89E-05                 | 8.73E-04                  | 5.72E-03                 | 1.80E+00                | 5.17E+01                                    | 3.42E+01                                    |
| Wärme ab PEM Brennstoffzelle     | 7.25E-02                   | 4.74E-03                 | 1.21E-04                 | 8.11E-04                  | 3.81E-03                 | 1.24E+00                | 4.79E+01                                    | 3.03E+01                                    |
| Wärme ab Stirling Motor          | 8.63E-02                   | 5.56E-03                 | 1.01E-04                 | 8.83E-04                  | 4.58E-03                 | 1.48E+00                | 4.96E+01                                    | 3.26E+01                                    |
| Wärme ab Mini-BHKW mit Kat.      | 1.13E-01                   | 7.07E-03                 | 1.10E-04                 | 1.03E-03                  | 5.94E-03                 | 1.89E+00                | 6.02E+01                                    | 3.96E+01                                    |
| Wärme ab DAHP *)                 | 1.99E-01                   | 1.25E-02                 | 1.96E-04                 | 1.68E-03                  | 1.06E-02                 | 3.50E+00                | 1.09E+02                                    | 7.18E+01                                    |
| Wärme ab Gaskessel               | 2.72E-01                   | 1.69E-02                 | 1.98E-04                 | 2.23E-03                  | 1.45E-02                 | 4.65E+00                | 1.38E+02                                    | 8.93E+01                                    |

\*) DAHP = Diffusions Absorptions Wärmepumpe (Nutzungsgrad: 132%)

Tabelle 15.4 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Resultate bezogen auf 1kWh Wärme (Allokation nach Exergieinhalt)

| Bewertungsmethode<br>Prozess     | Treibhaus-<br>potential    | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 97 |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| Unterbezeichnung                 | IPCC 2001,<br>100a         | Total                    | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | fossil und<br>nuklear   | Total                                       | Total                                       |
| Einheit                          | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                                | UBP 97 / kWh                                |
| Wärme ab Mikrogasturbine         | 6.65E-02                   | 2.06E-03                 | 1.25E-04                 | 7.30E-04                  | 1.21E-03                 | 6.92E-01                | 4.57E+01                                    | 3.93E+01                                    |
| Wärme ab SOFC Brennstoffzelle    | 4.67E-02                   | 1.46E-03                 | 9.22E-05                 | 4.84E-04                  | 8.90E-04                 | 5.04E-01                | 3.34E+01                                    | 2.71E+01                                    |
| Wärme ab SOFC-GT Brennstoffzelle | 3.99E-02                   | 1.29E-03                 | 8.55E-05                 | 4.46E-04                  | 7.63E-04                 | 4.32E-01                | 2.96E+01                                    | 2.40E+01                                    |
| Wärme ab BHKW 160kW mit Kat.     | 5.98E-02                   | 1.76E-03                 | 9.38E-05                 | 5.90E-04                  | 1.07E-03                 | 6.15E-01                | 3.98E+01                                    | 3.34E+01                                    |
| Wärme ab PEM Brennstoffzelle     | 4.35E-02                   | 1.78E-03                 | 1.36E-04                 | 6.40E-04                  | 1.00E-03                 | 5.18E-01                | 4.07E+01                                    | 2.99E+01                                    |
| Wärme ab Stirling Motor          | 4.94E-02                   | 1.79E-03                 | 1.20E-04                 | 6.66E-04                  | 1.01E-03                 | 5.61E-01                | 4.04E+01                                    | 3.21E+01                                    |
| Wärme ab Mini-BHKW mit Kat.      | 6.48E-02                   | 2.13E-03                 | 1.35E-04                 | 7.44E-04                  | 1.25E-03                 | 6.87E-01                | 4.80E+01                                    | 3.88E+01                                    |
| Wärme ab DAHP *)                 | 1.11E-01                   | 3.47E-03                 | 2.42E-04                 | 1.16E-03                  | 2.08E-03                 | 1.31E+00                | 8.71E+01                                    | 7.06E+01                                    |
| Wärme ab Gaskessel               | 1.51E-01                   | 4.52E-03                 | 2.61E-04                 | 1.52E-03                  | 2.75E-03                 | 1.64E+00                | 1.08E+02                                    | 8.76E+01                                    |
| Wärme ab ORC Holz WKK-Anlage     | 3.71E-02                   | 4.28E-03                 | 1.32E-03                 | 2.53E-03                  | 4.50E-04                 | 2.04E-01                | 8.93E+01                                    | 4.97E+01                                    |
| Wärme ab Pellet-Stirling Motor   | 1.76E-02                   | 1.95E-03                 | 5.13E-04                 | 9.21E-04                  | 5.10E-04                 | 3.34E-01                | 4.20E+01                                    | 2.82E+01                                    |
| Wärme ab Holzpelletfeuerung **)  | 5.47E-02                   | 7.47E-03                 | 1.81E-03                 | 4.26E-03                  | 1.39E-03                 | 1.09E+00                | 1.45E+02                                    | 1.11E+02                                    |

\*) DAHP = Diffusions Absorptions Wärmepumpe betrieben mit Biogas ab Erdgasnetz (Nutzungsgrad: 132%)

\*\*) In Abweichung zu den Daten in ecoindex V1.3 wurde ein Holzpelletinput von 8.21 E-5 m<sup>3</sup>/MJ Input verwendet (anstatt 9.76 E-5 m<sup>3</sup>/MJ)

Tabelle 15.5 Betrieb mit Erdgas, Resultate bezogen auf 1kWh Strom (Allokation nach Exergieinhalt)

| Bewertungsmethode<br>Prozess       | Treibhaus-<br>potential    | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knappheit 97 |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| Unterbezeichnung                   | IPCC 2001,<br>100a         | Total                    | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | fossil und<br>nuklear   | Total                                       | Total                                       |
| Einheit                            | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                                | UBP 97 / kWh                                |
| Strom ab Mikrogasturbine           | 6.98E-01                   | 4.41E-02                 | 5.44E-04                 | 5.99E-03                  | 3.76E-02                 | 1.18E+01                | 3.37E+02                                    | 2.29E+02                                    |
| Strom ab SOFC Brennstoffzelle      | 4.95E-01                   | 3.10E-02                 | 4.09E-04                 | 4.00E-03                  | 2.67E-02                 | 8.43E+00                | 2.43E+02                                    | 1.58E+02                                    |
| Strom ab SOFC-GT Brennstoffzelle   | 4.22E-01                   | 2.66E-02                 | 3.81E-04                 | 3.55E-03                  | 2.27E-02                 | 7.18E+00                | 2.10E+02                                    | 1.39E+02                                    |
| Strom ab BHKW 160kW mit Kat.       | 6.31E-01                   | 3.89E-02                 | 3.96E-04                 | 5.03E-03                  | 3.36E-02                 | 1.06E+01                | 2.98E+02                                    | 1.98E+02                                    |
| Strom ab PEM Brennstoffzelle       | 7.12E-01                   | 4.50E-02                 | 6.86E-04                 | 6.13E-03                  | 3.82E-02                 | 1.21E+01                | 3.60E+02                                    | 2.40E+02                                    |
| Strom ab Stirling Motor            | 8.94E-01                   | 5.67E-02                 | 7.50E-04                 | 8.09E-03                  | 4.79E-02                 | 1.52E+01                | 4.49E+02                                    | 3.05E+02                                    |
| Strom ab Mini-BHKW mit Kat.        | 7.67E-01                   | 4.71E-02                 | 4.90E-04                 | 6.23E-03                  | 4.05E-02                 | 1.27E+01                | 3.63E+02                                    | 2.45E+02                                    |
| Strom ab Strom ab GuD-Kraftwerk *) | 4.82E-01                   | 3.28E-02                 | 1.27E-03                 | 4.57E-03                  | 2.69E-02                 | 8.38E+00                | 2.77E+02                                    | 1.69E+02                                    |

\*) GuD = Gaskombikraftwerk; Prozess bezieht sich auf Strombezug ab Niederspannungsnetz (inkl. Netzverluste)

**Tabelle 15.6** Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Resultate bezogen auf 1kWh Strom (Allokation nach Exegieinhalt)

| Bewertungsmethode<br>Prozess       | Treibhaus-<br>potential    | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A) | Ecoindicator 99<br>(H/A)  | Ecoindicator 99<br>(H/A) | KEA nicht<br>erneuerbar | Methode der<br>ökologischen<br>Knapheit 06 | Methode der<br>ökologischen<br>Knapheit 97 |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--|--|
| Unterbezeichnung                   | IPCC 2001,<br>100a         | Total                    | Ökosystem-<br>qualität   | Menschliche<br>Gesundheit | Ressourcen-<br>bedarf    | fossil und<br>nuklear   | Total                                      | Total                                      |
| Einheit                            | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh             | Punkte / kWh             | Punkte / kWh              | Punkte / kWh             | MJ-eq/kWh               | UBP 06 / kWh                               | UBP 97 / kWh                               |
| Strom ab Mikrogasturbine           | 3.69E-01                   | 1.14E-02                 | 6.84E-04                 | 3.99E-03                  | 6.70E-03                 | 3.83E+00                | 2.50E+02                                   | 2.16E+02                                   |
| Strom ab SOFC Brennstoffzelle      | 2.74E-01                   | 8.40E-03                 | 5.24E-04                 | 2.70E-03                  | 5.19E-03                 | 2.93E+00                | 1.87E+02                                   | 1.55E+02                                   |
| Strom ab SOFC-GT Brennstoffzelle   | 2.33E-01                   | 7.33E-03                 | 4.79E-04                 | 2.43E-03                  | 4.43E-03                 | 2.50E+00                | 1.63E+02                                   | 1.36E+02                                   |
| Strom ab BHKW 160kW mit Kat.       | 3.49E-01                   | 1.02E-02                 | 5.43E-04                 | 3.37E-03                  | 6.26E-03                 | 3.58E+00                | 2.27E+02                                   | 1.93E+02                                   |
| Strom ab PEM Brennstoffzelle       | 3.98E-01                   | 1.29E-02                 | 8.49E-04                 | 4.28E-03                  | 7.78E-03                 | 4.30E+00                | 2.82E+02                                   | 2.36E+02                                   |
| Strom ab Stirling Motor            | 4.95E-01                   | 1.59E-02                 | 9.57E-04                 | 5.74E-03                  | 9.24E-03                 | 5.35E+00                | 3.50E+02                                   | 2.99E+02                                   |
| Strom ab Mini-BHKW mit Kat.        | 4.26E-01                   | 1.24E-02                 | 6.66E-04                 | 4.22E-03                  | 7.51E-03                 | 4.30E+00                | 2.77E+02                                   | 2.39E+02                                   |
| Strom ab ORC Holz WKK-Anlage       | 1.95E-01                   | 2.24E-02                 | 6.74E-03                 | 1.29E-02                  | 2.72E-03                 | 1.17E+00                | 4.60E+02                                   | 2.56E+02                                   |
| Strom ab Pellet-Stirling Motor     | 1.51E-01                   | 1.76E-02                 | 5.21E-03                 | 8.50E-03                  | 3.82E-03                 | 2.89E+00                | 3.67E+02                                   | 2.57E+02                                   |
| Strom ab Strom ab GuD-Kraftwerk *) | 2.53E-01                   | 1.01E-02                 | 1.39E-03                 | 3.29E-03                  | 5.38E-03                 | 2.86E+00                | 2.24E+02                                   | 1.71E+02                                   |

\*) GuD = Gaskombikraftwerk; Prozess bezieht sich auf ein mit Biogas (ab Erdgasnetz) betriebenes GuD-Kraftwerk; Strombezug ab Niederspannungsnetz (inkl. Netzverluste)

## 15.3. RESULTATE SENSITIVITÄTSANALYSE

### 15.3.1 Wärmeproduktion

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten WKK-Anlagen bezogen auf 1 kWh Wärmeoutput. Für den produzierten Strom wird in diesen Resultaten eine Verwendung in einer Wärmepumpe angenommen. Die Resultate beinhalten eine Variation der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe zwischen 2 und 5.

**Tabelle 15.7** Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

| Wärme aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ WP       | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|--------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | Punkte / kWh | 1.58E-02 | 1.39E-02 | 1.24E-02 | 1.12E-02 | 1.02E-02 | 9.44E-03 | 8.76E-03 |
| SOFC Brennstoffzelle           | Punkte / kWh | 1.33E-02 | 1.13E-02 | 9.84E-03 | 8.74E-03 | 7.87E-03 | 7.17E-03 | 6.59E-03 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | Punkte / kWh | 1.24E-02 | 1.03E-02 | 8.88E-03 | 7.81E-03 | 6.98E-03 | 6.33E-03 | 5.79E-03 |
| PEM Brennstoffzelle            | Punkte / kWh | 1.46E-02 | 1.29E-02 | 1.16E-02 | 1.06E-02 | 9.68E-03 | 8.95E-03 | 8.33E-03 |
| Stirling Motor                 | Punkte / kWh | 1.48E-02 | 1.35E-02 | 1.24E-02 | 1.14E-02 | 1.06E-02 | 9.93E-03 | 9.33E-03 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | Punkte / kWh | 1.38E-02 | 1.23E-02 | 1.10E-02 | 1.00E-02 | 9.20E-03 | 8.51E-03 | 7.91E-03 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | Punkte / kWh | 1.45E-02 | 1.31E-02 | 1.20E-02 | 1.11E-02 | 1.03E-02 | 9.58E-03 | 8.99E-03 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe   | Punkte / kWh | 1.25E-02 |
| Wärmepumpe                     | Punkte / kWh | 1.70E-02 | 1.37E-02 | 1.15E-02 | 9.93E-03 | 8.76E-03 | 7.85E-03 | 7.12E-03 |

**Tabelle 15.8** Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

| Wärme aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ WP       | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|-----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | Punkte / kWh | 4.45E-03 | 3.96E-03 | 3.59E-03 | 3.28E-03 | 3.04E-03 | 2.83E-03 | 2.65E-03 |
| SOFC Brennstoffzelle              | Punkte / kWh | 3.90E-03 | 3.38E-03 | 3.00E-03 | 2.71E-03 | 2.48E-03 | 2.30E-03 | 2.15E-03 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | Punkte / kWh | 3.76E-03 | 3.20E-03 | 2.81E-03 | 2.52E-03 | 2.30E-03 | 2.12E-03 | 1.98E-03 |
| PEM Brennstoffzelle               | Punkte / kWh | 4.59E-03 | 4.11E-03 | 3.74E-03 | 3.43E-03 | 3.18E-03 | 2.97E-03 | 2.79E-03 |
| Stirling Motor                    | Punkte / kWh | 4.47E-03 | 4.10E-03 | 3.79E-03 | 3.53E-03 | 3.32E-03 | 3.13E-03 | 2.96E-03 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | Punkte / kWh | 3.85E-03 | 3.46E-03 | 3.15E-03 | 2.90E-03 | 2.70E-03 | 2.53E-03 | 2.38E-03 |
| Mini-BHKW mit Katalysator         | Punkte / kWh | 4.14E-03 | 3.79E-03 | 3.50E-03 | 3.26E-03 | 3.05E-03 | 2.88E-03 | 2.73E-03 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe      | Punkte / kWh | 3.47E-03 |
| Wärmepumpe                        | Punkte / kWh | 5.61E-03 | 4.60E-03 | 3.93E-03 | 3.45E-03 | 3.09E-03 | 2.81E-03 | 2.58E-03 |
| Wärme aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP       | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Stirling Motor, Holzpellets       | Punkte / kWh | 4.96E-03 | 4.55E-03 | 4.21E-03 | 3.93E-03 | 3.68E-03 | 3.47E-03 | 3.29E-03 |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | Punkte / kWh | 3.78E-03 | 3.64E-03 | 3.52E-03 | 3.41E-03 | 3.31E-03 | 3.21E-03 | 3.12E-03 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | Punkte / kWh | 4.35E-03 | 4.07E-03 | 3.83E-03 | 3.62E-03 | 3.44E-03 | 3.27E-03 | 3.13E-03 |
| Holzpelletfeuerung 50 kW          | Punkte / kWh | 7.47E-03 |

**Tabelle 15.9** Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001

| Wärme aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ WP                     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|--------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 8.63E+01 | 7.68E+01 | 6.94E+01 | 6.35E+01 | 5.87E+01 | 5.47E+01 | 5.13E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.35E+01 | 6.37E+01 | 5.65E+01 | 5.10E+01 | 4.67E+01 | 4.32E+01 | 4.03E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.10E+01 | 6.04E+01 | 5.30E+01 | 4.76E+01 | 4.33E+01 | 3.99E+01 | 3.72E+01 |
| PEM Brennstoffzelle            | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 8.42E+01 | 7.55E+01 | 6.86E+01 | 6.30E+01 | 5.84E+01 | 5.45E+01 | 5.13E+01 |
| Stirling Motor                 | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 8.43E+01 | 7.73E+01 | 7.15E+01 | 6.67E+01 | 6.26E+01 | 5.90E+01 | 5.59E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.46E+01 | 6.70E+01 | 6.10E+01 | 5.62E+01 | 5.22E+01 | 4.88E+01 | 4.59E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 8.02E+01 | 7.33E+01 | 6.77E+01 | 6.30E+01 | 5.90E+01 | 5.56E+01 | 5.26E+01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe   | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.18E+01 |
| Wärmepumpe                     | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 9.49E+01 | 7.80E+01 | 6.68E+01 | 5.87E+01 | 5.27E+01 | 4.80E+01 | 4.42E+01 |

**Tabelle 15.10 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001**

| Wärme aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ WP                     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|-----------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.45E-01 | 1.29E-01 | 1.17E-01 | 1.07E-01 | 9.92E-02 | 9.26E-02 | 8.69E-02 |
| SOFC Brennstoffzelle              | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.28E-01 | 1.11E-01 | 9.84E-02 | 8.90E-02 | 8.15E-02 | 7.56E-02 | 7.06E-02 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.20E-01 | 1.03E-01 | 9.05E-02 | 8.13E-02 | 7.43E-02 | 6.86E-02 | 6.40E-02 |
| PEM Brennstoffzelle               | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.38E-01 | 1.24E-01 | 1.13E-01 | 1.04E-01 | 9.62E-02 | 9.00E-02 | 8.48E-02 |
| Stirling Motor                    | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.36E-01 | 1.25E-01 | 1.16E-01 | 1.08E-01 | 1.01E-01 | 9.58E-02 | 9.09E-02 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.32E-01 | 1.19E-01 | 1.08E-01 | 9.95E-02 | 9.25E-02 | 8.66E-02 | 8.16E-02 |
| Mini-BHKW mit Katalysator         | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.38E-01 | 1.26E-01 | 1.16E-01 | 1.08E-01 | 1.02E-01 | 9.59E-02 | 9.08E-02 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe      | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.11E-01 |
| Wärmepumpe                        | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.46E-01 | 1.20E-01 | 1.04E-01 | 9.15E-02 | 8.25E-02 | 7.55E-02 | 6.99E-02 |
| Wärme aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP                     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Stirling Motor, Holzpellets       | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 4.90E-02 | 4.62E-02 | 4.39E-02 | 4.20E-02 | 4.04E-02 | 3.89E-02 | 3.77E-02 |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 3.98E-02 | 3.90E-02 | 3.82E-02 | 3.75E-02 | 3.68E-02 | 3.62E-02 | 3.56E-02 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 4.20E-02 | 4.03E-02 | 3.89E-02 | 3.77E-02 | 3.65E-02 | 3.56E-02 | 3.47E-02 |
| Holzpelletfeuerung 50 kW          | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 5.47E-02 |

**Tabelle 15.11 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear)**

| Wärme aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ WP    | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | MJeq./kWh | 4.18E+00 | 3.67E+00 | 3.27E+00 | 2.95E+00 | 2.69E+00 | 2.47E+00 | 2.29E+00 |
| SOFC Brennstoffzelle           | MJeq./kWh | 3.54E+00 | 3.00E+00 | 2.61E+00 | 2.30E+00 | 2.07E+00 | 1.87E+00 | 1.72E+00 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | MJeq./kWh | 3.27E+00 | 2.72E+00 | 2.32E+00 | 2.03E+00 | 1.81E+00 | 1.63E+00 | 1.49E+00 |
| PEM Brennstoffzelle            | MJeq./kWh | 3.86E+00 | 3.41E+00 | 3.06E+00 | 2.77E+00 | 2.54E+00 | 2.34E+00 | 2.17E+00 |
| Stirling Motor                 | MJeq./kWh | 3.94E+00 | 3.57E+00 | 3.27E+00 | 3.02E+00 | 2.80E+00 | 2.61E+00 | 2.45E+00 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | MJeq./kWh | 3.71E+00 | 3.28E+00 | 2.94E+00 | 2.66E+00 | 2.44E+00 | 2.25E+00 | 2.09E+00 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | MJeq./kWh | 3.86E+00 | 3.49E+00 | 3.19E+00 | 2.93E+00 | 2.72E+00 | 2.53E+00 | 2.37E+00 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe   | MJeq./kWh | 3.50E+00 |
| Wärmepumpe                     | MJeq./kWh | 4.26E+00 | 3.42E+00 | 2.86E+00 | 2.46E+00 | 2.17E+00 | 1.93E+00 | 1.75E+00 |

**Tabelle 15.12 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear)**

| Wärme aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ WP    | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|-----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | MJeq./kWh | 1.43E+00 | 1.26E+00 | 1.13E+00 | 1.02E+00 | 9.38E-01 | 8.65E-01 | 8.04E-01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | MJeq./kWh | 1.27E+00 | 1.08E+00 | 9.45E-01 | 8.41E-01 | 7.59E-01 | 6.93E-01 | 6.39E-01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | MJeq./kWh | 1.18E+00 | 9.86E-01 | 8.50E-01 | 7.50E-01 | 6.72E-01 | 6.11E-01 | 5.61E-01 |
| PEM Brennstoffzelle               | MJeq./kWh | 1.43E+00 | 1.27E+00 | 1.15E+00 | 1.04E+00 | 9.58E-01 | 8.87E-01 | 8.26E-01 |
| Stirling Motor                    | MJeq./kWh | 1.43E+00 | 1.30E+00 | 1.19E+00 | 1.10E+00 | 1.03E+00 | 9.62E-01 | 9.05E-01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | MJeq./kWh | 1.28E+00 | 1.14E+00 | 1.03E+00 | 9.35E-01 | 8.60E-01 | 7.96E-01 | 7.42E-01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator         | MJeq./kWh | 1.35E+00 | 1.23E+00 | 1.12E+00 | 1.04E+00 | 9.65E-01 | 9.02E-01 | 8.47E-01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe      | MJeq./kWh | 1.31E+00 |
| Wärmepumpe                        | MJeq./kWh | 1.50E+00 | 1.21E+00 | 1.02E+00 | 8.88E-01 | 7.86E-01 | 7.07E-01 | 6.43E-01 |
| Wärme aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP    | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Stirling Motor, Holzpellets       | MJeq./kWh | 8.14E-01 | 7.46E-01 | 6.89E-01 | 6.40E-01 | 5.99E-01 | 5.64E-01 | 5.32E-01 |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | MJeq./kWh | 2.12E-01 | 2.07E-01 | 2.01E-01 | 1.96E-01 | 1.92E-01 | 1.87E-01 | 1.83E-01 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | MJeq./kWh | 2.24E-01 | 2.12E-01 | 2.03E-01 | 1.94E-01 | 1.87E-01 | 1.80E-01 | 1.74E-01 |
| Holzpelletfeuerung 50 kW          | MJeq./kWh | 1.09E+00 |

**Tabelle 15.13 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (UBP 06)**

| Wärme aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | UBP 06/kWh | 1.27E+02 | 1.13E+02 | 1.02E+02 | 9.36E+01 | 8.65E+01 | 8.06E+01 | 7.56E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | UBP 06/kWh | 1.12E+02 | 9.69E+01 | 8.59E+01 | 7.75E+01 | 7.09E+01 | 6.56E+01 | 6.12E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | UBP 06/kWh | 1.07E+02 | 9.09E+01 | 7.98E+01 | 7.15E+01 | 6.51E+01 | 6.00E+01 | 5.59E+01 |
| PEM Brennstoffzelle            | UBP 06/kWh | 1.27E+02 | 1.14E+02 | 1.03E+02 | 9.50E+01 | 8.80E+01 | 8.22E+01 | 7.72E+01 |
| Stirling Motor                 | UBP 06/kWh | 1.25E+02 | 1.15E+02 | 1.06E+02 | 9.89E+01 | 9.27E+01 | 8.74E+01 | 8.28E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | UBP 06/kWh | 1.12E+02 | 1.01E+02 | 9.16E+01 | 8.43E+01 | 7.83E+01 | 7.32E+01 | 6.89E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | UBP 06/kWh | 1.19E+02 | 1.09E+02 | 1.01E+02 | 9.39E+01 | 8.79E+01 | 8.28E+01 | 7.84E+01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe   | UBP 06/kWh | 1.09E+02 |
| Wärmepumpe                     | UBP 06/kWh | 1.55E+02 | 1.27E+02 | 1.09E+02 | 9.61E+01 | 8.64E+01 | 7.88E+01 | 7.27E+01 |

**Tabelle 15.14 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Methode der ökologischen Knaptheit 2006 (UBP 06)**

| Wärme aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|-----------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | UBP 06/kWh | 9.94E+01 | 8.89E+01 | 8.08E+01 | 7.42E+01 | 6.89E+01 | 6.44E+01 | 6.07E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | UBP 06/kWh | 8.91E+01 | 7.76E+01 | 6.92E+01 | 6.28E+01 | 5.78E+01 | 5.37E+01 | 5.04E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | UBP 06/kWh | 8.58E+01 | 7.36E+01 | 6.50E+01 | 5.86E+01 | 5.37E+01 | 4.97E+01 | 4.66E+01 |
| PEM Brennstoffzelle               | UBP 06/kWh | 1.03E+02 | 9.23E+01 | 8.42E+01 | 7.76E+01 | 7.22E+01 | 6.76E+01 | 6.37E+01 |
| Stirling Motor                    | UBP 06/kWh | 9.97E+01 | 9.18E+01 | 8.52E+01 | 7.96E+01 | 7.49E+01 | 7.08E+01 | 6.73E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | UBP 06/kWh | 8.76E+01 | 7.90E+01 | 7.23E+01 | 6.68E+01 | 6.24E+01 | 5.86E+01 | 5.54E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator         | UBP 06/kWh | 9.40E+01 | 8.63E+01 | 8.00E+01 | 7.47E+01 | 7.02E+01 | 6.63E+01 | 6.30E+01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe      | UBP 06/kWh | 8.71E+01 |
| Wärmepumpe                        | UBP 06/kWh | 1.28E+02 | 1.06E+02 | 9.15E+01 | 8.10E+01 | 7.31E+01 | 6.70E+01 | 6.21E+01 |
| Wärme aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Stirling Motor, Holzpellets       | UBP 06/kWh | 1.06E+02 | 9.73E+01 | 9.04E+01 | 8.45E+01 | 7.95E+01 | 7.52E+01 | 7.14E+01 |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | UBP 06/kWh | 8.50E+01 | 8.22E+01 | 7.96E+01 | 7.71E+01 | 7.49E+01 | 7.28E+01 | 7.08E+01 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | UBP 06/kWh | 9.11E+01 | 8.56E+01 | 8.08E+01 | 7.66E+01 | 7.30E+01 | 6.97E+01 | 6.68E+01 |
| Holzpelletfeuerung 50 kW          | UBP 06/kWh | 1.45E+02 |

**Tabelle 15.15 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Methode der ökologischen Knaptheit 1997 (UBP 97)**

| Wärme aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | UBP 97/kWh | 8.63E+01 | 7.68E+01 | 6.94E+01 | 6.35E+01 | 5.87E+01 | 5.47E+01 | 5.13E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | UBP 97/kWh | 7.35E+01 | 6.37E+01 | 5.65E+01 | 5.10E+01 | 4.67E+01 | 4.32E+01 | 4.03E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | UBP 97/kWh | 7.10E+01 | 6.04E+01 | 5.30E+01 | 4.76E+01 | 4.33E+01 | 3.99E+01 | 3.72E+01 |
| PEM Brennstoffzelle            | UBP 97/kWh | 8.42E+01 | 7.55E+01 | 6.86E+01 | 6.30E+01 | 5.84E+01 | 5.45E+01 | 5.13E+01 |
| Stirling Motor                 | UBP 97/kWh | 8.43E+01 | 7.73E+01 | 7.15E+01 | 6.67E+01 | 6.26E+01 | 5.90E+01 | 5.59E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | UBP 97/kWh | 7.46E+01 | 6.70E+01 | 6.10E+01 | 5.62E+01 | 5.22E+01 | 4.88E+01 | 4.59E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | UBP 97/kWh | 8.02E+01 | 7.33E+01 | 6.77E+01 | 6.30E+01 | 5.90E+01 | 5.56E+01 | 5.26E+01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe   | UBP 97/kWh | 7.18E+01 |
| Wärmepumpe                     | UBP 97/kWh | 9.49E+01 | 7.80E+01 | 6.68E+01 | 5.87E+01 | 5.27E+01 | 4.80E+01 | 4.42E+01 |

**Tabelle 15.16 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Wärme, Bewertung: Methode der ökologischen Knaptheit 1997 (UBP 97)**

| Wärme aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
|-----------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | UBP 97/kWh | 8.46E+01 | 7.53E+01 | 6.81E+01 | 6.24E+01 | 5.76E+01 | 5.37E+01 | 5.04E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | UBP 97/kWh | 7.23E+01 | 6.26E+01 | 5.56E+01 | 5.02E+01 | 4.60E+01 | 4.25E+01 | 3.97E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | UBP 97/kWh | 6.98E+01 | 5.95E+01 | 5.22E+01 | 4.68E+01 | 4.27E+01 | 3.94E+01 | 3.67E+01 |
| PEM Brennstoffzelle               | UBP 97/kWh | 8.28E+01 | 7.43E+01 | 6.75E+01 | 6.20E+01 | 5.75E+01 | 5.37E+01 | 5.05E+01 |
| Stirling Motor                    | UBP 97/kWh | 8.28E+01 | 7.60E+01 | 7.03E+01 | 6.55E+01 | 6.15E+01 | 5.80E+01 | 5.49E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | UBP 97/kWh | 7.31E+01 | 6.57E+01 | 5.98E+01 | 5.51E+01 | 5.12E+01 | 4.79E+01 | 4.51E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator         | UBP 97/kWh | 7.84E+01 | 7.17E+01 | 6.62E+01 | 6.17E+01 | 5.78E+01 | 5.44E+01 | 5.15E+01 |
| Diff.-Absorptions Wärmepumpe      | UBP 97/kWh | 7.06E+01 |
| Wärmepumpe                        | UBP 97/kWh | 9.59E+01 | 7.88E+01 | 6.74E+01 | 5.93E+01 | 5.32E+01 | 4.84E+01 | 4.46E+01 |
| Wärme aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Stirling Motor, Holzpellets       | UBP 97/kWh | 7.32E+01 | 6.74E+01 | 6.26E+01 | 5.85E+01 | 5.50E+01 | 5.20E+01 | 4.94E+01 |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | UBP 97/kWh | 4.50E+01 | 4.36E+01 | 4.22E+01 | 4.10E+01 | 3.99E+01 | 3.89E+01 | 3.79E+01 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | UBP 97/kWh | 5.14E+01 | 4.84E+01 | 4.58E+01 | 4.36E+01 | 4.16E+01 | 3.98E+01 | 3.83E+01 |
| Holzpelletfeuerung 50 kW          | UBP 97/kWh | 1.11E+02 |

Nachfolgend ist zur Vollständigkeit die im Hauptteil nicht enthaltene Graphik zur Bewertung mit der Methode der ökologischen Knaptheit (UBP 97) dargestellt. Sie beinhaltet die Resultate zur Sensitivitätsanalyse der Effizienzparameter (Strom- und Wärmenutzungsgrad) dargestellt.

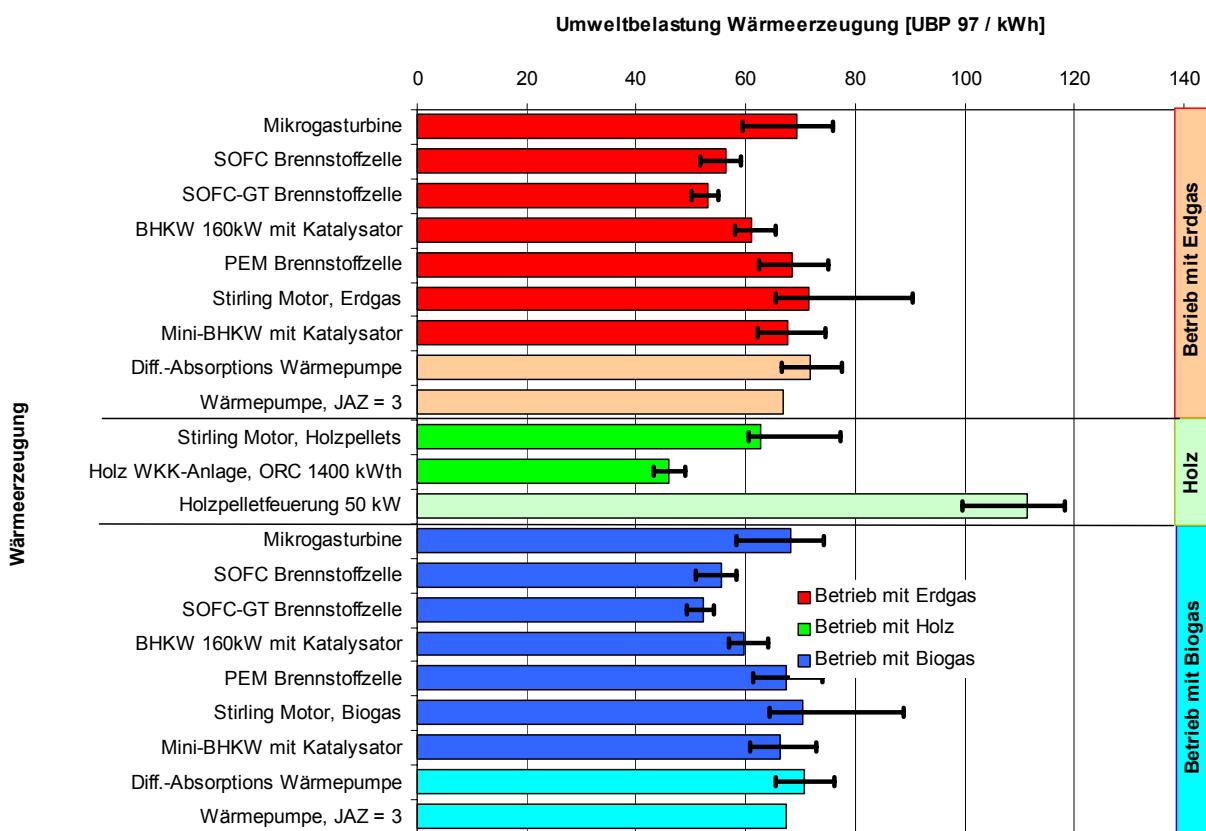


Abbildung 15.7 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Wärmeproduktion. Vergleich von WKK-System und Wärmepumpe betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Methode der ökologischen Knapphheit (Umweltbelastungspunkte 1997)

### 15.3.2 Kälteproduktion

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten WKK-Anlagen bezogen auf 1 kWh Kälteoutput (Umwandlung von Wärme der WKK-Anlage in Kälte über Absorptionskältemaschine mit einer Arbeitszahl von 0.7). Für den produzierten Strom wird in diesen Resultaten eine Verwendung in einer elektrischen Kompressionskältemaschine angenommen. Die Resultate beinhalten eine Variation der Jahresarbeitszahl der Kältemaschine zwischen 2 und 8.

Tabelle 15.17 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

| Kälte aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ KM      | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | Punkte /kWh | 1.88E-02 | 1.43E-02 | 1.15E-02 | 9.73E-03 | 8.43E-03 | 7.45E-03 | 6.68E-03 |
| SOFC Brennstoffzelle           | Punkte /kWh | 1.48E-02 | 1.07E-02 | 8.43E-03 | 7.00E-03 | 6.00E-03 | 5.27E-03 | 4.72E-03 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | Punkte /kWh | 1.32E-02 | 9.33E-03 | 7.27E-03 | 6.00E-03 | 5.13E-03 | 4.50E-03 | 4.02E-03 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | Punkte /kWh | 1.68E-02 | 1.29E-02 | 1.05E-02 | 8.93E-03 | 7.77E-03 | 6.89E-03 | 6.20E-03 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | Punkte /kWh | 1.84E-02 | 1.47E-02 | 1.22E-02 | 1.05E-02 | 9.25E-03 | 8.26E-03 | 7.47E-03 |
| Kältemaschine                  | Punkte /kWh | 1.69E-02 | 1.15E-02 | 8.74E-03 | 7.10E-03 | 6.01E-03 | 5.23E-03 | 4.64E-03 |

Tabelle 15.18 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Ecoindicator 99 (H/A)

| Kälte aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ KM      | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | Punkte /kWh | 5.76E-03 | 4.47E-03 | 3.69E-03 | 3.17E-03 | 2.80E-03 | 2.52E-03 | 2.30E-03 |
| SOFC Brennstoffzelle              | Punkte /kWh | 4.60E-03 | 3.44E-03 | 2.79E-03 | 2.39E-03 | 2.10E-03 | 1.89E-03 | 1.73E-03 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | Punkte /kWh | 4.16E-03 | 3.05E-03 | 2.46E-03 | 2.10E-03 | 1.85E-03 | 1.67E-03 | 1.54E-03 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | Punkte /kWh | 5.18E-03 | 4.08E-03 | 3.40E-03 | 2.94E-03 | 2.60E-03 | 2.35E-03 | 2.16E-03 |
| Kältemaschine                     | Punkte /kWh | 5.59E-03 | 3.91E-03 | 3.07E-03 | 2.56E-03 | 2.23E-03 | 1.99E-03 | 1.81E-03 |
| Kälte aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP      | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | Punkte /kWh | 6.51E-03 | 5.90E-03 | 5.40E-03 | 4.99E-03 | 4.64E-03 | 4.35E-03 | 4.09E-03 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | Punkte /kWh | 6.62E-03 | 5.62E-03 | 4.89E-03 | 4.35E-03 | 3.93E-03 | 3.59E-03 | 3.32E-03 |

**Tabelle 15.19 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001**

| Kälte aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ KM                     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 3.09E-01 | 2.41E-01 | 2.00E-01 | 1.72E-01 | 1.52E-01 | 1.38E-01 | 1.26E-01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 2.53E-01 | 1.90E-01 | 1.55E-01 | 1.33E-01 | 1.17E-01 | 1.06E-01 | 9.73E-02 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 2.29E-01 | 1.69E-01 | 1.37E-01 | 1.17E-01 | 1.04E-01 | 9.42E-02 | 8.67E-02 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 2.83E-01 | 2.23E-01 | 1.87E-01 | 1.62E-01 | 1.44E-01 | 1.30E-01 | 1.20E-01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 3.05E-01 | 2.48E-01 | 2.11E-01 | 1.85E-01 | 1.66E-01 | 1.51E-01 | 1.39E-01 |
| Kältemaschine                  | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 2.74E-01 | 1.94E-01 | 1.53E-01 | 1.29E-01 | 1.13E-01 | 1.02E-01 | 9.31E-02 |

**Tabelle 15.20 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Treibhauspotential 100 a, gemäss IPCC 2001**

| Kälte aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ KM                     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.82E-01 | 1.45E-01 | 1.23E-01 | 1.08E-01 | 9.74E-02 | 8.94E-02 | 8.31E-02 |
| SOFC Brennstoffzelle              | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.53E-01 | 1.19E-01 | 9.97E-02 | 8.75E-02 | 7.91E-02 | 7.29E-02 | 6.82E-02 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.41E-01 | 1.08E-01 | 9.02E-02 | 7.94E-02 | 7.19E-02 | 6.66E-02 | 6.25E-02 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.69E-01 | 1.37E-01 | 1.17E-01 | 1.03E-01 | 9.34E-02 | 8.61E-02 | 8.03E-02 |
| Kältemaschine                     | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 1.46E-01 | 1.20E-01 | 1.04E-01 | 9.15E-02 | 8.25E-02 | 7.55E-02 | 6.99E-02 |
| Kälte aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP                     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.12E-02 | 6.73E-02 | 6.41E-02 | 6.15E-02 | 5.92E-02 | 5.73E-02 | 5.57E-02 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | kg CO <sub>2</sub> eq./kWh | 7.01E-02 | 6.39E-02 | 5.95E-02 | 5.62E-02 | 5.36E-02 | 5.16E-02 | 4.99E-02 |

**Tabelle 15.21 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear)**

| Kälte aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ KM    | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | MJeq./kWh | 5.04E+00 | 3.81E+00 | 3.06E+00 | 2.56E+00 | 2.20E+00 | 1.93E+00 | 1.72E+00 |
| SOFC Brennstoffzelle           | MJeq./kWh | 3.97E+00 | 2.84E+00 | 2.22E+00 | 1.82E+00 | 1.55E+00 | 1.35E+00 | 1.19E+00 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | MJeq./kWh | 3.50E+00 | 2.44E+00 | 1.88E+00 | 1.53E+00 | 1.29E+00 | 1.12E+00 | 9.87E-01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | MJeq./kWh | 4.57E+00 | 3.49E+00 | 2.83E+00 | 2.38E+00 | 2.06E+00 | 1.81E+00 | 1.62E+00 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | MJeq./kWh | 5.00E+00 | 3.97E+00 | 3.29E+00 | 2.82E+00 | 2.46E+00 | 2.19E+00 | 1.97E+00 |
| Kältemaschine                  | MJeq./kWh | 4.23E+00 | 2.83E+00 | 2.13E+00 | 1.72E+00 | 1.44E+00 | 1.24E+00 | 1.09E+00 |

**Tabelle 15.22 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (fossil + nuklear)**

| Kälte aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ KM    | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | MJeq./kWh | 1.88E+00 | 1.43E+00 | 1.15E+00 | 9.69E-01 | 8.37E-01 | 7.38E-01 | 6.61E-01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | MJeq./kWh | 1.50E+00 | 1.08E+00 | 8.50E-01 | 7.02E-01 | 6.00E-01 | 5.25E-01 | 4.68E-01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | MJeq./kWh | 1.30E+00 | 9.13E-01 | 7.08E-01 | 5.81E-01 | 4.95E-01 | 4.32E-01 | 3.85E-01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | MJeq./kWh | 1.75E+00 | 1.35E+00 | 1.09E+00 | 9.25E-01 | 8.02E-01 | 7.09E-01 | 6.36E-01 |
| Kältemaschine                     | MJeq./kWh | 1.47E+00 | 9.93E-01 | 7.55E-01 | 6.12E-01 | 5.17E-01 | 4.49E-01 | 3.98E-01 |
| Kälte aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP    | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | MJeq./kWh | 8.56E-01 | 7.73E-01 | 7.05E-01 | 6.48E-01 | 6.01E-01 | 5.60E-01 | 5.25E-01 |

**Tabelle 15.23 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (UBP 06)**

| Kälte aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ KM     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | UBP 06/kWh | 1.73E+02 | 1.35E+02 | 1.13E+02 | 9.78E+01 | 8.70E+01 | 7.89E+01 | 7.26E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | UBP 06/kWh | 1.40E+02 | 1.06E+02 | 8.71E+01 | 7.52E+01 | 6.70E+01 | 6.09E+01 | 5.63E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | UBP 06/kWh | 1.26E+02 | 9.39E+01 | 7.69E+01 | 6.65E+01 | 5.93E+01 | 5.41E+01 | 5.02E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | UBP 06/kWh | 1.59E+02 | 1.26E+02 | 1.06E+02 | 9.24E+01 | 8.26E+01 | 7.52E+01 | 6.93E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | UBP 06/kWh | 1.78E+02 | 1.46E+02 | 1.24E+02 | 1.09E+02 | 9.81E+01 | 8.95E+01 | 8.26E+01 |
| Kältemaschine                  | UBP 06/kWh | 1.60E+02 | 1.14E+02 | 9.10E+01 | 7.71E+01 | 6.79E+01 | 6.13E+01 | 5.64E+01 |

**Tabelle 15.24 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 2006 (UBP 06)**

| Kälte aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ KM     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | UBP 06/kWh | 1.41E+02 | 1.11E+02 | 9.36E+01 | 8.17E+01 | 7.32E+01 | 6.68E+01 | 6.18E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | UBP 06/kWh | 1.15E+02 | 8.81E+01 | 7.34E+01 | 6.40E+01 | 5.75E+01 | 5.27E+01 | 4.90E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | UBP 06/kWh | 1.04E+02 | 7.85E+01 | 6.52E+01 | 5.70E+01 | 5.13E+01 | 4.73E+01 | 4.42E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | UBP 06/kWh | 1.30E+02 | 1.04E+02 | 8.85E+01 | 7.77E+01 | 6.99E+01 | 6.41E+01 | 5.95E+01 |
| Kältemaschine                     | UBP 06/kWh | 1.34E+02 | 9.64E+01 | 7.77E+01 | 6.65E+01 | 5.91E+01 | 5.37E+01 | 4.97E+01 |
| Kälte aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | UBP 06/kWh | 1.65E+02 | 1.50E+02 | 1.38E+02 | 1.28E+02 | 1.20E+02 | 1.13E+02 | 1.07E+02 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | UBP 06/kWh | 1.56E+02 | 1.34E+02 | 1.18E+02 | 1.06E+02 | 9.67E+01 | 8.92E+01 | 8.31E+01 |

Tabelle 15.25 Betrieb mit Erdgas, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 1997 (UBP 97)

| Kälte aus Anlage Erdgasbetrieb | JAZ KM     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                | UBP 97/kWh | 1.17E+02 | 9.05E+01 | 7.48E+01 | 6.42E+01 | 5.67E+01 | 5.10E+01 | 4.66E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle           | UBP 97/kWh | 9.01E+01 | 6.75E+01 | 5.49E+01 | 4.69E+01 | 4.14E+01 | 3.73E+01 | 3.43E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle        | UBP 97/kWh | 8.09E+01 | 5.95E+01 | 4.82E+01 | 4.11E+01 | 3.63E+01 | 3.28E+01 | 3.02E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator     | UBP 97/kWh | 1.06E+02 | 8.32E+01 | 6.93E+01 | 5.99E+01 | 5.32E+01 | 4.80E+01 | 4.40E+01 |
| Mini-BHKW mit Katalysator      | UBP 97/kWh | 1.21E+02 | 9.79E+01 | 8.30E+01 | 7.24E+01 | 6.46E+01 | 5.85E+01 | 5.37E+01 |
| Kältemaschine                  | UBP 97/kWh | 9.56E+01 | 6.74E+01 | 5.33E+01 | 4.49E+01 | 3.92E+01 | 3.52E+01 | 3.22E+01 |

Tabelle 15.26 Betrieb mit Biogas bzw. Holz, Pro 1kWh Kälte, Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit 1997 (UBP 97)

| Kälte aus Anlage Biogasbetrieb    | JAZ KM     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mikrogasturbine                   | UBP 97/kWh | 1.15E+02 | 8.91E+01 | 7.36E+01 | 6.33E+01 | 5.59E+01 | 5.03E+01 | 4.60E+01 |
| SOFC Brennstoffzelle              | UBP 97/kWh | 8.87E+01 | 6.65E+01 | 5.41E+01 | 4.63E+01 | 4.09E+01 | 3.69E+01 | 3.38E+01 |
| SOFC-GT Brennstoffzelle           | UBP 97/kWh | 7.97E+01 | 5.87E+01 | 4.75E+01 | 4.06E+01 | 3.59E+01 | 3.25E+01 | 2.99E+01 |
| BHKW 160kW mit Katalysator        | UBP 97/kWh | 1.04E+02 | 8.19E+01 | 6.83E+01 | 5.90E+01 | 5.24E+01 | 4.73E+01 | 4.34E+01 |
| Kältemaschine                     | UBP 97/kWh | 9.66E+01 | 6.81E+01 | 5.38E+01 | 4.53E+01 | 3.96E+01 | 3.55E+01 | 3.24E+01 |
| Kälte aus Anlage Betrieb mit Holz | JAZ WP     | 2        | 2.5      | 3        | 3.5      | 4        | 4.5      | 5        |
| Holz WKK-Anlage 6400 kWth         | UBP 97/kWh | 9.85E+01 | 8.95E+01 | 8.23E+01 | 7.62E+01 | 7.11E+01 | 6.68E+01 | 6.30E+01 |
| Holz WKK-Anlage, ORC 1400 kWth    | UBP 97/kWh | 9.50E+01 | 8.11E+01 | 7.11E+01 | 6.36E+01 | 5.78E+01 | 5.32E+01 | 4.93E+01 |

Nachfolgend ist zur Vollständigkeit die im Hauptteil nicht enthaltene Graphik zur Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 97) dargestellt. Sie beinhaltet die Resultate zur Sensitivitätsanalyse der Effizienzparameter (Strom- und Kältenutzungsgrad) dargestellt.

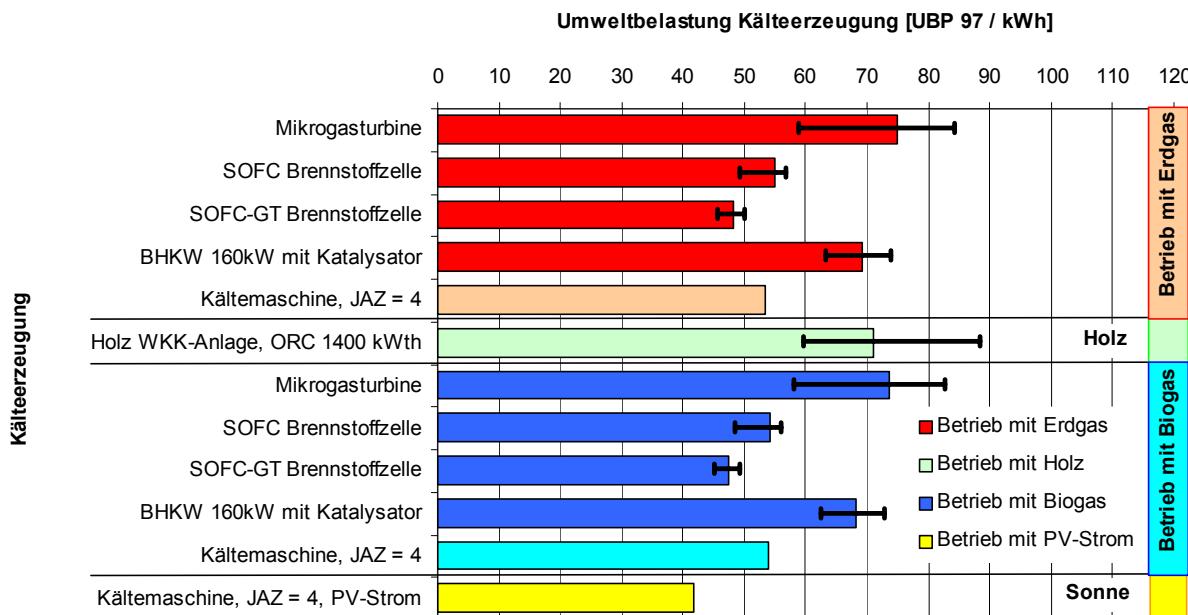


Abbildung 15.8 Einfluss der Effizienz der WKK-Anlage auf die Umweltbelastung der Kälteproduktion. Vergleich von WKK-System mit Absorptionskältemaschine und Kältemaschine betrieben mit Strom aus Gaskombikraftwerk. Betrieb mit Erdgas, Biogas sowie Holz. Bewertung: Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte 1997)

## 15.4. RESULTATE SYSTEMKOMBINATIONEN

Nachfolgend die Resultate zur Umweltbelastung der untersuchten Systemkombinationen bezogen auf 1 kWh Wärmeoutput. Für den produzierten Strom wird in diesen Resultaten eine Verwendung in einer Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 angenommen.

**Tabelle 15.27 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Altbau mit hohen Vorlauftemperaturen.**

| <b>Bewertungsmethode</b>     | <b>Treibhaus-potential</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>KEA nicht erneuerbar</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 06</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 97</b> |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|
| <b>Systemvariante Altbau</b> |                            |                              |                              |                              |                              |                             |  |  |
| Unterbezeichnung             | IPCC 2001, 100a            | Total                        | Ökosystem-qualität           | Menschliche Gesundheit       | Ressourcenbedarf             | fossil und nuklear          | Total  | Total  |
| Einheit                      | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | MJ-eq/kWh                   | UBP 06 / kWh                                 | UBP 97 / kWh                                 |
| Kessel                       | 2.72E-01                   | 1.69E-02                     | 1.98E-04                     | 2.23E-03                     | 1.45E-02                     | 4.65E+00                    | 1.38E+02                                     | 8.93E+01                                     |
| nur WP                       | 2.13E-01                   | 1.37E-02                     | 5.59E-04                     | 2.12E-03                     | 1.10E-02                     | 3.43E+00                    | 1.28E+02                                     | 7.83E+01                                     |
| WP + Solar                   | 1.92E-01                   | 1.25E-02                     | 5.32E-04                     | 1.96E-03                     | 9.98E-03                     | 3.11E+00                    | 1.18E+02                                     | 7.23E+01                                     |
| nur WKK                      | 2.03E-01                   | 1.22E-02                     | 2.05E-04                     | 1.99E-03                     | 1.00E-02                     | 3.17E+00                    | 1.06E+02                                     | 7.51E+01                                     |
| WKK + Solar                  | 1.93E-01                   | 1.17E-02                     | 2.09E-04                     | 1.92E-03                     | 9.59E-03                     | 3.02E+00                    | 1.02E+02                                     | 7.24E+01                                     |
| WP + WKK *)                  | 2.15E-01                   | 1.35E-02                     | 4.24E-04                     | 2.13E-03                     | 1.10E-02                     | 3.43E+00                    | 1.22E+02                                     | 7.93E+01                                     |
| WP + WKK + Solar *)          | 1.94E-01                   | 1.25E-02                     | 4.92E-04                     | 2.02E-03                     | 9.99E-03                     | 3.12E+00                    | 1.18E+02                                     | 7.46E+01                                     |

\*) Erzeugung der Heizwärme mit Wärmepumpe; WKK-Anlage nur für Warmwassererzeugung  
Anteil Warmwasser an Wärme Q<sub>WW</sub> / Q<sub>HWW</sub> = 20%; Vorlauftemperatur (bei -10°C) 60°C; JAZ Wärmepumpe nur Heizung = 2.7; JAZ Wärmepumpe Heizung + WW = 2.5;  
Effizienz WKK-Anlage ETA<sub>el</sub> = 25%; ETA<sub>th</sub> = 65%

**Tabelle 15.28 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Gebäude im Minergie Standard.**

| <b>Bewertungsmethode</b>           | <b>Treibhaus-potential</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>KEA nicht erneuerbar</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 06</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 97</b> |
|------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|
| <b>Systemvariante Minergie Bau</b> |                            |                              |                              |                              |                              |                             |  |  |
| Unterbezeichnung                   | IPCC 2001, 100a            | Total                        | Ökosystem-qualität           | Menschliche Gesundheit       | Ressourcenbedarf             | fossil und nuklear          | Total  | Total  |
| Einheit                            | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | MJ-eq/kWh                   | UBP 06 / kWh                                 | UBP 97 / kWh                                 |
| Kessel                             | 2.72E-01                   | 1.69E-02                     | 1.98E-04                     | 2.23E-03                     | 1.45E-02                     | 4.65E+00                    | 1.38E+02                                     | 8.93E+01                                     |
| nur WP                             | 1.78E-01                   | 1.14E-02                     | 4.69E-04                     | 1.80E-03                     | 9.11E-03                     | 2.84E+00                    | 1.08E+02                                     | 6.62E+01                                     |
| WP + Solar                         | 1.45E-01                   | 9.40E-03                     | 4.32E-04                     | 1.55E-03                     | 7.40E-03                     | 2.31E+00                    | 9.27E+01                                     | 5.68E+01                                     |
| nur WKK                            | 2.03E-01                   | 1.22E-02                     | 2.05E-04                     | 1.99E-03                     | 1.00E-02                     | 3.17E+00                    | 1.06E+02                                     | 7.51E+01                                     |
| WKK + Solar                        | 1.83E-01                   | 1.11E-02                     | 2.14E-04                     | 1.84E-03                     | 9.07E-03                     | 2.86E+00                    | 9.77E+01                                     | 6.93E+01                                     |
| WP + WKK *)                        | 1.86E-01                   | 1.12E-02                     | 2.06E-04                     | 1.83E-03                     | 9.16E-03                     | 2.88E+00                    | 9.82E+01                                     | 6.92E+01                                     |
| WP + WKK + Solar *)                | 1.44E-01                   | 9.15E-03                     | 3.41E-04                     | 1.61E-03                     | 7.20E-03                     | 2.26E+00                    | 9.00E+01                                     | 5.97E+01                                     |

\*) Erzeugung der Heizwärme mit Wärmepumpe; WKK-Anlage nur für Warmwassererzeugung  
Anteil Warmwasser an Wärme Q<sub>WW</sub> / Q<sub>HWW</sub> = 40%; Vorlauftemperatur (bei -10°C) 40°C; JAZ Wärmepumpe nur Heizung = 3.5; JAZ Wärmepumpe Heizung + WW = 3;  
Effizienz WKK-Anlage ETA<sub>el</sub> = 25%; ETA<sub>th</sub> = 65%

**Tabelle 15.29 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung in einem Gebäude im Minergie-P Standard.**

| <b>Bewertungsmethode</b>             | <b>Treibhaus-potential</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>KEA nicht erneuerbar</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 06</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 97</b> |
|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|
| <b>Systemvariante Minergie-P Bau</b> |                            |                              |                              |                              |                              |                             |  |  |
| Unterbezeichnung                     | IPCC 2001, 100a            | Total                        | Ökosystem-qualität           | Menschliche Gesundheit       | Ressourcenbedarf             | fossil und nuklear          | Total  | Total  |
| Einheit                              | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | MJ-eq/kWh                   | UBP 06 / kWh                                 | UBP 97 / kWh                                 |
| Kessel                               | 2.72E-01                   | 1.69E-02                     | 1.98E-04                     | 2.23E-03                     | 1.45E-02                     | 4.65E+00                    | 1.38E+02                                     | 8.93E+01                                     |
| nur WP                               | 1.90E-01                   | 1.22E-02                     | 5.01E-04                     | 1.91E-03                     | 9.78E-03                     | 3.05E+00                    | 1.15E+02                                     | 7.05E+01                                     |
| WP + Solar                           | 1.27E-01                   | 8.44E-03                     | 4.25E-04                     | 1.43E-03                     | 6.57E-03                     | 2.05E+00                    | 8.55E+01                                     | 5.24E+01                                     |
| nur WKK                              | 2.03E-01                   | 1.22E-02                     | 2.05E-04                     | 1.99E-03                     | 1.00E-02                     | 3.17E+00                    | 1.06E+02                                     | 7.51E+01                                     |
| WKK + Solar                          | 1.64E-01                   | 1.01E-02                     | 2.21E-04                     | 1.70E-03                     | 8.16E-03                     | 2.57E+00                    | 9.05E+01                                     | 6.39E+01                                     |
| WP + WKK *)                          | 1.95E-01                   | 1.17E-02                     | 1.98E-04                     | 1.91E-03                     | 9.62E-03                     | 3.03E+00                    | 1.02E+02                                     | 7.23E+01                                     |
| WP + WKK + Solar *)                  | 1.48E-01                   | 9.45E-03                     | 3.48E-04                     | 1.67E-03                     | 7.43E-03                     | 2.33E+00                    | 9.26E+01                                     | 6.18E+01                                     |

\*) Erzeugung der Heizwärme mit Wärmepumpe; WKK-Anlage nur für Warmwassererzeugung  
Anteil Warmwasser an Wärme Q<sub>WW</sub> / Q<sub>HWW</sub> = 70%; Vorlauftemperatur (bei -10°C) 30°C; JAZ Wärmepumpe nur Heizung = 4.0; JAZ Wärmepumpe Heizung + WW = 2.8;  
Effizienz WKK-Anlage ETA<sub>el</sub> = 25%; ETA<sub>th</sub> = 65%

**Tabelle 15.30 Vergleich der Umweltbelastung verschiedener Systemkombinationen für die Wärmeerzeugung mit einem Nahwärmennetz.**

| <b>Bewertungsmethode</b>             | <b>Treibhaus-potential</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>Ecoindicator 99 (H/A)</b> | <b>KEA nicht erneuerbar</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 06</b> | <b>Methode der ökologischen Knaptheit 97</b> |
|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|
| <b>Systemvariante Minergie-P Bau</b> |                            |                              |                              |                              |                              |                             |  |  |
| Unterbezeichnung                     | IPCC 2001, 100a            | Total                        | Ökosystem-qualität           | Menschliche Gesundheit       | Ressourcenbedarf             | fossil und nuklear          | Total  | Total  |
| Einheit                              | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | Punkte / kWh                 | MJ-eq/kWh                   | UBP 06 / kWh                                 | UBP 97 / kWh                                 |
| Kessel                               | 2.90E-01                   | 1.80E-02                     | 2.11E-04                     | 2.38E-03                     | 1.55E-02                     | 4.96E+00                    | 1.47E+02                                     | 9.53E+01                                     |
| WP + Kessel                          | 2.46E-01                   | 1.55E-02                     | 3.67E-04                     | 2.20E-03                     | 1.30E-02                     | 4.10E+00                    | 1.34E+02                                     | 8.48E+01                                     |
| WP + BHKW + Kessel                   | 1.96E-01                   | 1.17E-02                     | 1.48E-04                     | 1.65E-03                     | 9.96E-03                     | 3.14E+00                    | 9.82E+01                                     | 6.45E+01                                     |
| BHKW + Kessel                        | 1.91E-01                   | 1.14E-02                     | 1.44E-04                     | 1.61E-03                     | 9.67E-03                     | 3.05E+00                    | 9.56E+01                                     | 6.29E+01                                     |

Vorlauftemperatur (bei -10°C) ca. 75°C  
System BHKW + Kessel: Leistungsanteil Kessel = 50%; System BHKW + WP + Kessel: Leistungsanteil Kessel = 50%, Leistungsanteil WP = 15% (JAZ = 3)  
System WP + Kessel: Leistungsanteil WP = 25% (JAZ = 2.7)  
Effizienz WKK-Anlage: ETA<sub>el</sub> = 32%; ETA<sub>th</sub> = 55%; Effizienz Kessel: ETA<sub>th</sub> = 90%;

## 16. Anhang C, Inventare

### 16.1. VERWENDETE INVENTARE

Für die Berechnungen wurden grundsätzlich die Datensätze aus ecoinvent V1.3 (2006) verwendet. Die verwendeten Inventardaten und Resultate aus dem Biofuel-Projekt [5] wurden ebenfalls auf der Basis der Grundlagendaten aus ecoinvent V1.3 (2006) verwendet.

### 16.2. ANPASSUNG DER INVENTARE

#### 16.2.1 Gaskombikraftwerk

Für die Anpassung des Inventars „electricity, natural gas, at combined cycle plant, best technology“ von Erdgasbetrieb auf Biogasbetrieb wurden folgende Prozessflüsse verändert.

- „natural gas, high pressure, at consumer“ geändert auf „methane, 96 vol-%, from biogas, high pressure, at consumer“
- „Carbon dioxide fossile“ geändert auf „Carbon dioxide, biogenic“
- „Carbon monoxide, fossile“ geändert auf „Carbon monoxide, biogenic“
- „Methane, fossile“ geändert auf „Methane, biogenic“

Die Emissionswerte wurden unverändert beibehalten.

#### 16.2.2 Gaskessel

Für die Anpassung des Inventars „heat, natural gas, at boiler modulating <100kW“ von Erdgasbetrieb auf Biogasbetrieb wurden folgende Prozessflüsse verändert.

- „natural gas, low pressure, at consumer“ geändert auf „methane, 96 vol-%, from biogas, low pressure, at consumer“
- „Carbon dioxide fossile“ geändert auf „Carbon dioxide, biogenic“
- „Carbon monoxide, fossile“ geändert auf „Carbon monoxide, biogenic“
- „Methane, fossile“ geändert auf „Methane, biogenic“

Die Emissionswerte wurden unverändert beibehalten.

#### 16.2.3 Kältemaschine

Für die Bilanzierung der Kältemaschine wurde der Prozess „heat, at air-water heat pump 10kW“ verwendet. Entsprechend einer reversiblen Wärmepumpe wurde für die Berechnungen die Wärmeabgabe der rückzukühlenden Energiemengen gleichgesetzt.

Sowohl die Datensätze der Wärmepumpe (Prozess „heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW“ verwendet) wie auch der Kältemaschine wurden mit den für die entsprechende Berechnung relevanten Stromprozesse verknüpft (Strom ab GuD-Kraftwerk auf Niederspannungsniveau bzw. Strom ab WKK-Anlage).

#### 16.2.4 Holzpelletkessel

In Abweichung zu den Daten in ecoinvent V1.3 wurde ein für den Holzpelletkessel ein Holzpelletinput von 8.21 E-5 m3/MJ Input verwendet (anstatt 9.76 E-5 m3/MJ ). Der Grund für diese Anpassung ist ein zu hoher Inputwert in den Daten von ecoinvent V1.3.

### 16.3. STROMVERTEILUNG AB GUD-KRAFTWERK

Für die Berücksichtigung der Verluste und Aufwendungen bei der Stromverteilung vom Kraftwerk zum betrachteten Niederspannungsverbraucher wurden die Inventardaten wie sie für andere Kraftwerkstypen in der Schweiz bilanziert wurde übernommen. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Bilanzdaten zur Vollständigkeit aufgeführt.

Tabelle 16.1 Verwendete Inventardaten für Stromnetz von Kraftwerk bis Niederspannungsnutzer

|                             | Name   | Location | Category | Sub Category | Infrastructure Process | Unit | Value    |
|-----------------------------|--|----------|----------|--------------|------------------------|------|----------|
| product                     | transmission, high to low voltage grid   | CH       | -        | -            | 0                      | kWh  | 1        |
|                             | transmission network, electricity, high voltage  | CH       | -        | -            | 1                      | km   | 9.38E-9  |
|                             | transmission network, long-distance  | UCTE     | -        | -            | 1                      | km   | 3.52E-10 |
| technosphere                | electricity process, (e.g. electricity, natural gas, at combined cycle plant, best technology) | RER      | -        | -            | 0                      | kWh  | 1.12E+0  |
|                             | sulphur hexafluoride, liquid, at plant   | RER      | -        | -            | 0                      | kg   | 5.22E-8  |
|                             | distribution network, electricity, low voltage   | CH       | -        | -            | 1                      | km   | 2.94E-7  |
|                             | transmission network, electricity, medium voltage  | CH       | -        | -            | 1                      | km   | 3.56E-8  |
| emission air, unspecified   | Dinitrogen monoxide  | -        | air      | unspecified  | -                      | kg   | 5.56E-6  |
|                             | Heat, waste  | -        | air      | unspecified  | -                      | MJ   | 1.53E-1  |
|                             | Ozone  | -        | air      | unspecified  | -                      | kg   | 5.00E-6  |
|                             | Sulfur hexafluoride  | -        | air      | unspecified  | -                      | kg   | 5.22E-8  |
| emission water, unspecified | Heat, waste  | -        | water    | unspecified  | -                      | MJ   | 3.01E-1  |