

Ökobilanz für effiziente Systeme zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme aus Erdgas

Martin Zogg

Eine im Auftrag des Bundesamts für Energie erstellte Ökobilanz [4] zeigt, dass die Kombination **Kombikraftwerk-Wärmepumpe** (GuD-WP) einen geringeren Treibhauseffekt und einen nur etwa halb so grossen Beitrag zur Sommersmogbildung aufweist wie der Betrieb von Wärmepumpen mit dem heutigen westeuropäischen Strommix. Bei der Kombination **Blockheizkraftwerke-Wärmepumpe** (BHKW-WP) erreichen diese Umwelteinwirkungen etwa die gleichen Werte wie bei der heutigen westeuropäischen Stromproduktion.

Abgrenzung

In [1 bis 3] wurde gezeigt, dass sich zur Erzeugung von Niedrigtemperaturwärme mit Wärmepumpen (WP) und elektrischem Strom aus Kombikraftwerken (GuD, Gas- und Dampfturbinenkraftwerke) oder effizienten Blockheizkraftwerken (BHKW) Gesamtnutzungsgrade über 150% erreichen lassen. Das Bild 1 illustriert die mit der Kombination moderner Kombikraftwerke ohne Abwärmenutzung mit Wärmepumpen (GuD-WP) und mit der Kombination Blockheizkraftwerke mit Wärmepumpen (BHKW-WP) im Stromgleichgewicht erreichbaren Werte. Stromgleichgewicht bedeutet, dass der ganze durch das GuD-Kraftwerk beziehungsweise durch Blockheizkraftwerke produzierte elektrische Strom durch Wärmepumpen verbraucht wird.

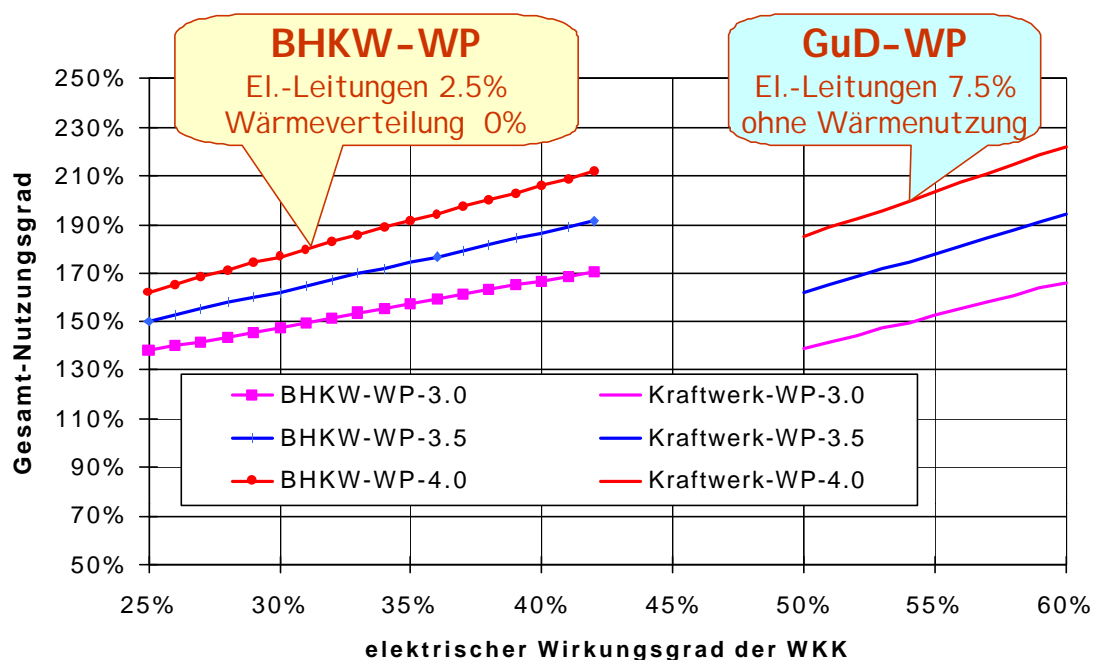


Bild 1: Gesamtnutzungsgrad der Kombinationen BHKW-Wärmepumpe (links) und GuD-Kraftwerk-Wärmepumpe (rechts) im Stromgleichgewicht für Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen von 3, 3.5 und 4. Nutzungsgrad auf den unteren Heizwert bezogen. Verluste in den elektrischen Leitungen bei BHKW-WP 2% und bei GuD-WP 7.5%. Gesamtwirkungsgrad des BHKWs 90%.

Keine Verluste in der Wärmeverteilung von BHKW und Wärmepumpe. GuD-Kraftwerk ohne Abwärmenutzung.

Da mit Blockheizkraftwerken mit elektrischen Wirkungsgraden über 33% und GuD-Kraftwerken ohne Abwärmenutzung in Kombination mit Elektrowärmepumpen etwa ähnliche Ergebnisse erzielt werden, interessiert ein ökologischer Vergleich der beiden Stromerzeugungsarten untereinander wie auch mit dem heutigen schweizerischen Strommix und dem heutigen europäischen Strommix.

Durchgeführte Ökobilanz

Im Auftrag des Bundesamts für Energie wurde eine umfassende Ökobilanz [4] zur Klärung der Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel (CO₂ und Propan) für Wärmepumpen und Kälteanlagen erstellt. Die Studie umfasst nebst der Raumheizung mit Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen auch die Raumkühlung mit Kaltwassersätzen, die Erzeugung von Industriekälte mit Solesätzen und die Supermarktkühlung.

In diesem Bericht wird nur auf die Ergebnisse für Wärmepumpen eingegangen. Hier zeigte sich eine klare Dominanz der Stromerzeugung auf die meisten Umwelteinwirkungen. Deshalb werden in [4] auch Ökobilanzen für die nachstehenden vier Stromerzeugungsarten durchgeführt:

1. Schweizerischer Strommix mit Inlanderzeugung und 65% des importierten Stroms (die restlichen 35% des importierten Stroms werden als zeitgleicher Transit betrachtet).
2. Westeuropäischer Strommix UCPTE¹
Der UCPTE-Mix enthält die durchschnittliche Stromproduktion von Belgien, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Italien, Kroatien/Slowenien/ Restjugoslawien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweiz und Spanien in den Jahren 1990-1994.
3. Erdgas-Kombikraftwerk GuD mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 57%.
4. Gasmotor-Blockheizkraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 32.5% und einem thermischen Wirkungsgrad von 55%. Von den Emissionen des Gasmotors werden gemäss dem Exergieverhältnis von Strom und Wärme 76% der Stromproduktion angerechnet. Dabei wird von einer Bereitstellung der Wärme bei 85°C und einer Wärmenutzung von 20°C (Raumheizung) ausgegangen. Gemäss der neuen schweizerischen Luftreinhalteverordnung wird mit NO_x-Emissionen von 250 mg/Nm³ gerechnet (Magermotor ohne Katalysator).

Die Fälle 1 und 2 beschreiben die heutige Stromproduktion. Die Fälle 3 und 4 stehen für Zukunftsszenarien (entscheidungsorientierte Analyse).

Die Ökobilanz [2] umfasst die im Bild 2 gezeigten **acht Umwelteinwirkungen**. Diese werden für die nachstehenden **Teilvorgänge** in sehr detaillierter Weise vom Rohstoff bis zur Entsorgung mit Einbezug des Transports berechnet:

¹ Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité

- Kältemittlemission im Betrieb und bei der Kältemittelfüllung
- Stromproduktion für den Betrieb der Wärmepumpe
- Fertigung der Anlagen ab den Rohstoffen (Wärmepumpenanlage: ohne Wärmeverteilung, mit Wärmequelle)
- Entsorgung der Anlagen mit Kältemittelverlust bei den Wärmepumpen
- Kältemittelherstellung.

Den nachfolgend gezeigten Ergebnissen liegen die in der Tabelle 1 zusammengestellten Annahmen für eine 7 kW Wärmepumpe mit Erdwärmesonden zugrunde. Die Tabelle 2 enthält die wichtigsten Annahmen für die Strom- und Wärmeherzeugung in Blockheizkraftwerken und GuD-Kraftwerken. Für Einzelheiten zum schweizerischen Strommix und zum westeuropäischen Strommix UCPTe sei auf [4] verwiesen.

					untersuchte Umwelteinwirkungen
					nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf
					Treibhauseffekt
					Ozonschichtabbau
					Versäuerung
					Sommersmogbildung
					Aquatische Ökotoxizität
					Terrestrische Ökotoxizität
					Radioaktivität
Kältemittlemission	Strombereitstellung	Fertigung der Anlage	Entsorgung der Anlage	Kältemittelherstellung	
					untersuchte Teilvorgänge

Bild 2: In [4] untersuchte Umwelteinwirkungen und Teilvorgänge. Markierter Bereich: in diesem Beitrag erörterter Treibhauseffekt und Sommersmogbildung.

Sole/Wasser Wärmepumpe mit 7 kW Heizleistung (Basis für die Bilder 3 und 4)	In [2] ebenfalls behandelte Varianten
Einstufiger Prozess (1 Kompressor, 1 Expansionsventil)	
Bilanzgrenze: Wärmepumpe und Wärmequelle (aber ohne Wärmeverteilung!)	
Sole/Wasser (mit Bau der Erdwärmesonde)	Luft/Wasser
Jahresarbeitszahlen (JAZ) Sole-Wasser mit den Kältemitteln CO ₂ : 3.62 (Annahme), Propan: 3.82, R134a: 4.16, R404A: 3.62, R407C: 3.70, Isceon 59: 4.16 (Annahme), R22: 3.82	Variation der JAZ von 3 bis 4.5.
Heizleistung: 7 kW _{th} bei 0/35°C	50 kW _{th}

Heizungssystem mit 45°C Vorlauftemperatur bei -8°C Aussentemperatur	
Kältemittelfüllung: 1 kg bei Propan und bei CO ₂ ; 2 kg bei FKW	L/W 7 kW _{th} : 1.5 / 3 kg S/W 50 kW _{th} : 5 / 10 kg L/W 50 kW _{th} : 7.5 / 15 kg
Kältemittelleckage im Betrieb 8% pro Jahr (Mittel heute) Kältemittelverluste beim Füllen 3% der Füllung Kältemittelverluste beim Entsorgen 20 % der Füllung bei CO ₂ 100%.	2% pro Jahr (Ziel)
Betrieb mit CH-Strommix (inklusive 65% des Imports - 35% zeitgleicher Transitanteil des Imports)	Europäischer Mix (UCPTE), Gas-Kombikraftwerk, Gas-BHKW
Lebensdauer Wärmepumpe 15 a Lebensdauer Erdwärmesonde 15 a Jahresbetriebsdauer 1850 h / a	

Tabelle 1: Bilanzierungsannahmen für die Wärmepumpe.

	BHKW (LRV 98)	GuD-Kraftwerk
elektrischer Wirkungsgrad	32.5%	57%
thermischer Wirkungsgrad	55%	ohne Abwärmenutzung
Deckungsgrad Wärme (Rest durch Low- NO _x -Spitzenkessel erbracht)	60%	-
Emissionszuordnung gemäss dem Exergieverhältnis von Wärme und Strom		
- elektrischer Strom	76.2%	100%
- Wärme (85°C)	23.8%	-
NO _x -Emissionen	78 kg/TJ _{input}	14.5 kg/TJ _{input}
Basis für Bau und Entsorgung: Anlage von	192 kW _{el}	271 MW _{el}
Lebensdauer	20 a	25 a
Jahresbetriebsdauer	4850 h	7000 h

Tabelle 2: Wichtige Bilanzierungsannahmen für die Strom- und Wärmeproduktion mit erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken und GuD-Kraftwerken. Weitere Einzelheiten in [4].

Resultate

Von den im Bild 2 aufgeführten Umwelteinwirkungen werden im Folgenden zwei herausgegriffen, die im Zusammenhang mit der Diskussion um Blockheizkraftwerke besonders bedeutungsvoll scheinen. Es sind dies der Treibhauseffekt und die Sommersmogbildung. Bei der Interpretation der folgenden Bilder ist zu beachten, dass in dem hier behandelten Beispiel einer Sole-Wasser-Wärmepumpe auch der Bau der Erdwärmesonde berücksichtigt wurde und dass sich die für unterschiedliche Kältemittel gemäss der Tabelle 1 angenommenen Jahresarbeitszahlen direkt auf den Stromverbrauch auswirken.

Das Bild 3 zeigt das Treibhauseffekt-Potenzial der vier oben erwähnten Stromerzeugungsarten. Zunächst zu den Ergebnissen für den **schweizerischen Strommix** mit 65% des Importstroms. Bei den natürlichen Kältemitteln (CO₂ und Propan) sind über 90% des Treibhauseffekts durch das bei der Stromerzeugung anfallende CO₂ bedingt. Der direkte Beitrag der natürlichen Kältemittel ist marginal. Bei den angenommenen hohen Kältemittlemissionen von 8% pro Jahr ergeben sich dagegen bei den Fluorkohlenwasserstoffen (R134a, R404A, R407C und Isceon 59) hohe Beiträge durch die direkte Kältemittlemission. Besonders auffallend ist hier R404A, welches bei Wärmepumpen allerdings selten Verwendung findet. Bei schon heute realisierten (jährliche Kältemittelverluste unter 1% werden bereits garantiert) und sich künftig wohl allgemein durchsetzenden geringeren FKW-Kältemittleckagen werden die Anteile der direkten Kältemittlemission wesentlich geringer. Sie verschwinden bei der Verwendung natürlicher Kältemittel (wie Propan, Ammoniak, CO₂) praktisch vollständig.

Die **anderen Stromproduktionsarten** ergeben höhere treibhausrelevante Emissionen als der schweizerische Strommix. Die relativen Unterschiede zwischen natürlichen und FKW-Kältemitteln werden entsprechend geringer. Die direkten Kältemittlemissionen wirken sich dann – trotz dem hohen angenommenen Kältemittelverlust von jährlich 8% - nur noch wenig aus. Einzige Ausnahme ist hier das für Wärmepumpen selten benützte R404A.

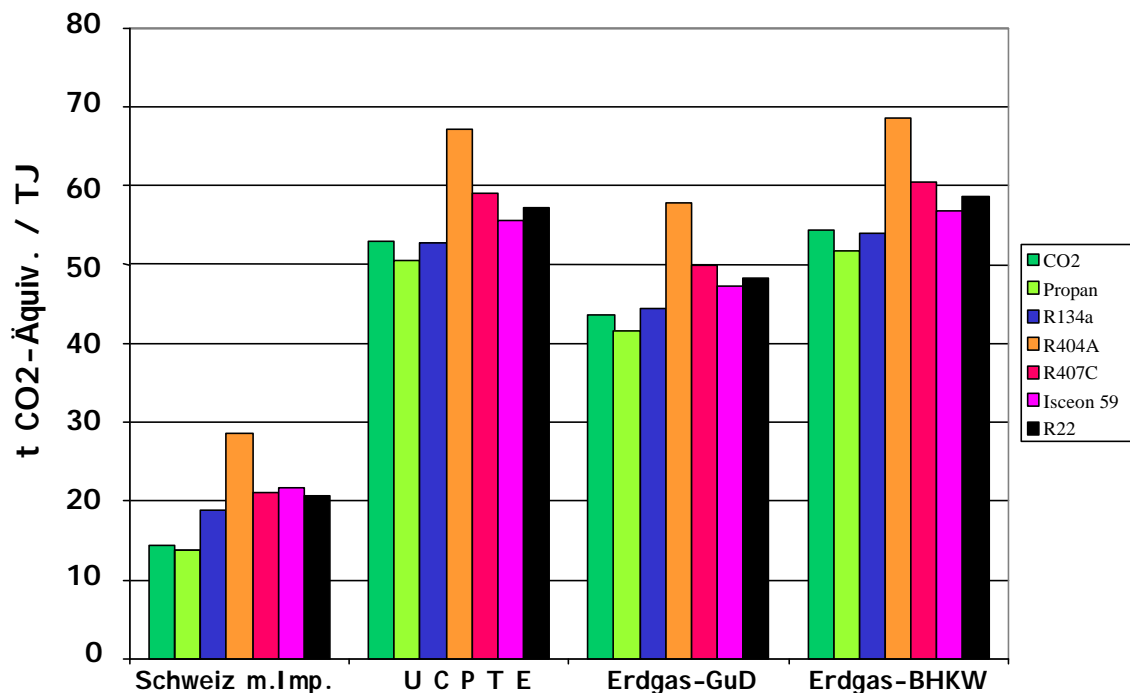


Bild 3: Einfluss der Stromerzeugungsarten auf den Treibhauseffekt für 7 kW Sole/Wasser-Wärmepumpenheizungen mit unterschiedlichen Kältemitteln für eine Heizleistung von 1TJ. Kältemittelverlust 8% pro Jahr [nach 4].

Die Hauptursache für die Umwelteinwirkungen Versäuerung, Sommersmogbildung, aquatische Ökotoxizität und Radioaktivität liegt wie beim Primärenergiebedarf in der Stromerzeugung. Zur Reduktion dieser Umwelteinwirkungen ist das Erreichen einer hohen thermodynamischen Effizienz der Wärmepumpe (hohe Leistungszahlen, hohe Jahresarbeitszahlen des Gesamtsystems) entscheidend. In dieser Richtung können Wärmepumpen sowohl mit natürlichen wie auch mit FKW-Kältemitteln verbessert werden. Für die **Sommersmogbildung** sind die bei der Stromerzeugung entstehenden Stickoxide (Beitrag gut 67%) und Kohlenwasserstoffe die Hauptursache. Wie das

Bild 4 verdeutlicht, ergibt die Kombination moderner GuD-Kraftwerke mit Wärmepumpen nur einen leicht höheren Beitrag zur Sommersmogbildung als der Wärmepumpenbetrieb mit dem angenommenen schweizerischen Strommix. Blockheizkraftwerke ergeben als Folge der auf 250 mg/Nm³ erhöhten Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung 98 für Stickoxidemissionen leider vergleichbar hohe Werte wie die heutige mittlere westeuropäische Stromproduktion!

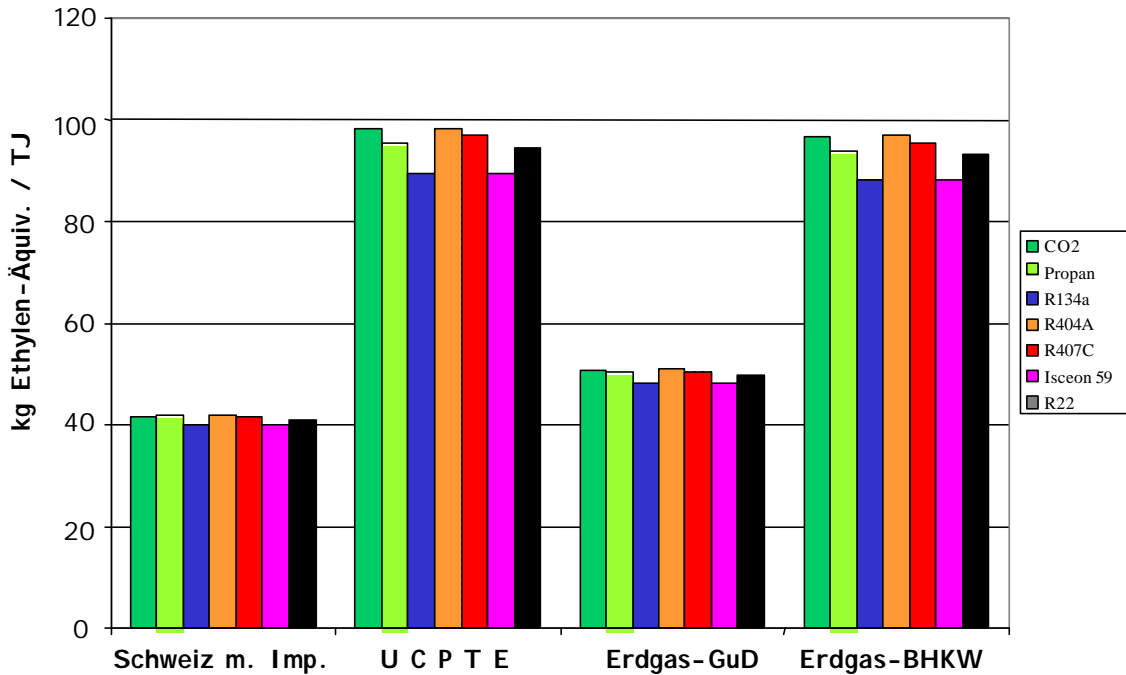


Bild 4: Beitrag zur Sommersmogbildung für 7 kW Sole/Wasser-Wärmepumpenheizungen mit unterschiedlichen Kältemitteln für eine Heizleistung von 1 TJ [nach 4].

Schlussfolgerungen

Aufgrund der hier vorgestellten zwei Umwelteinwirkungen ist zusammenfassend das Folgende festzustellen:

1. Die Kombination **GuD-Kraftwerk-Wärmepumpe** (GuD-WP) weist einen geringeren Treibhauseffekt und einen nur etwa halb so grossen Beitrag zum Sommersmog auf als der Betrieb von Wärmepumpen mit dem heutigen europäischen Strommix.
2. Die Kombination **Blockheizkraftwerke-Wärmepumpe** (BHKW-WP) schneidet nicht besser ab als der Betrieb von Wärmepumpen mit dem heutigen europäischen Strommix. Eine Reduktion der Stickoxidemissionen gegenüber der LRV98 ist bei den Blockheizkraftwerken dringend anzustreben.
3. Der Betrieb von Wärmepumpen mit dem heutigen **schweizerischen Strommix** ergibt auch bei der Annahme eines zeitgleichen Transitanteils von nur 35% sowohl beim Treibhauseffekt wie auch bei der Sommersmogbildung die geringsten Umwelteinwirkungen.

4. Durch eine konsequente **Reduktion der Kältemittelverluste** bei Füllung, Betrieb, Wartung und Entsorgung von Wärmepumpenanlagen lassen sich auch bei FKW-Kältemitteln die direkten Auswirkungen von Kältemittlemissionen auf den Treibhauseffekt vernachlässigen.

Dr. Martin Zogg
Leiter des BFE-Forschungsprogramms
Umgebungswärme, Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung

-
- [1] Zogg, M.: Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll?
Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)12, 959/966;
in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [2] Zogg, M.: Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen,
Heizung Klima 25(1998)7, 60/63;
in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [3] Zogg, M: Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpen-
heizsystemen, Bundesamt für Energie 1998;
in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [4] Frischknecht,R: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel, Ökobilanzen für Wärme-
pumpen und Kälteanlagen. Forschungsprojekt des Bundesamts für Energie 1999;
in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.