



## 3.10 Stromerzeugung in Wärmekraftkopplungsanlagen

### Autoren

Konstantinos Boulouchos (Chair), ETH Zürich; Daniel Favrat, EPF Lausanne; Stefan Hirschberg, PSI, Villigen; Hans Pauli, Eicher+Pauli AG, Liestal; Heinrich Schwendener, Swissgas AG, Zürich

Bei der Wärmekraftkopplung (WKK) wird gleichzeitig Strom und Wärme mit Diesel- oder Gasmotoren, Brennstoffzellen oder durch Frischdampfkopplung in GuD-Anlagen erzeugt. Damit der technisch mögliche hohe Gesamtwirkungsgrad erreicht werden kann, braucht es eine gesicherte Stromabnahme sowie einen ausreichenden Wärmebezug.

### 3.10.1 Stand der Technologie heute

WKK-Anlagen können entweder nach dem Strom- oder nach dem Wärmebedarf dimensioniert und betrieben werden (Pauli 2009). Grundsätzlich unterscheidet man bei der WKK zwischen Klein- und Grossanlagen; die Grenze liegt bei einer installierten elektrischen Leistung von 1 MW. Grossanlagen (bis 50 MW<sub>el</sub>) kommen vor allem in der Chemie-, der Papier- und der mineralölverarbeitenden Industrie zum Einsatz und dienen oft gleichzeitig der Verbrennung von Prozessrückständen. Kleine WKK-Anlagen werden hauptsächlich in Kläranlagen, Gewerbe- und Industriebetrieben, Büro- und Wohngebäuden sowie Spitälern und Heimen eingesetzt. Blockheizkraftwerke (BHKW) sind modular aufgebaute WKK-Anlagen.

Als Energieträger kommen fossile (Erdgas, Erdölprodukte), biogene (Biogas/Kompogas, Holzgas, synthetisches Erdgas) und aus Abfallprodukten stammende Energieträger (Gruben-, Deponie-, Klärgas) in Frage. Diese Brennstoffe unterscheiden sich in Bezug auf ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Vor allem biogene Energieträger

eignen sich besonders gut für die Nutzung in dezentralen Anlagen.

Je nach Grösse der Anlage und den verwendeten Energieträgern kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Insbesondere wird zwischen zwei Kategorien von Energiewandlern unterschieden: Die thermomechanische Umwandlung findet in extern befeuerten Stirling-Motoren oder intern befeuerten (Mikro-)Gasturbinen und Verbrennungsmotoren statt; die elektrochemische Energieumwandlung in Brennstoffzellen. In einzelnen Fällen wird Frischdampf aus GuD-Anlagen ausgekoppelt, was jedoch die elektrische Leistung reduziert.

Zurzeit sind in der Schweiz rund 1000 WKK-Anlagen in Betrieb. Davon sind rund drei Viertel Klein-WKK-Anlagen mit einer Leistung unter 1 MW<sub>el</sub>. In den letzten Jahren stagnierte die Zahl der Anlagen oder war sogar leicht rückläufig.

Rund 2,5 % der Schweizer Stromproduktion werden heute in WKK-Anlagen produziert. Davon entfällt gut die Hälfte (1,6 %) auf Grossanlagen. 38 % der Energie, die für den Betrieb der Anlagen benötigt wird, stammt aus regenerativen Energiequellen. Dazu gehören die erneuerbaren Anteile der Abfälle

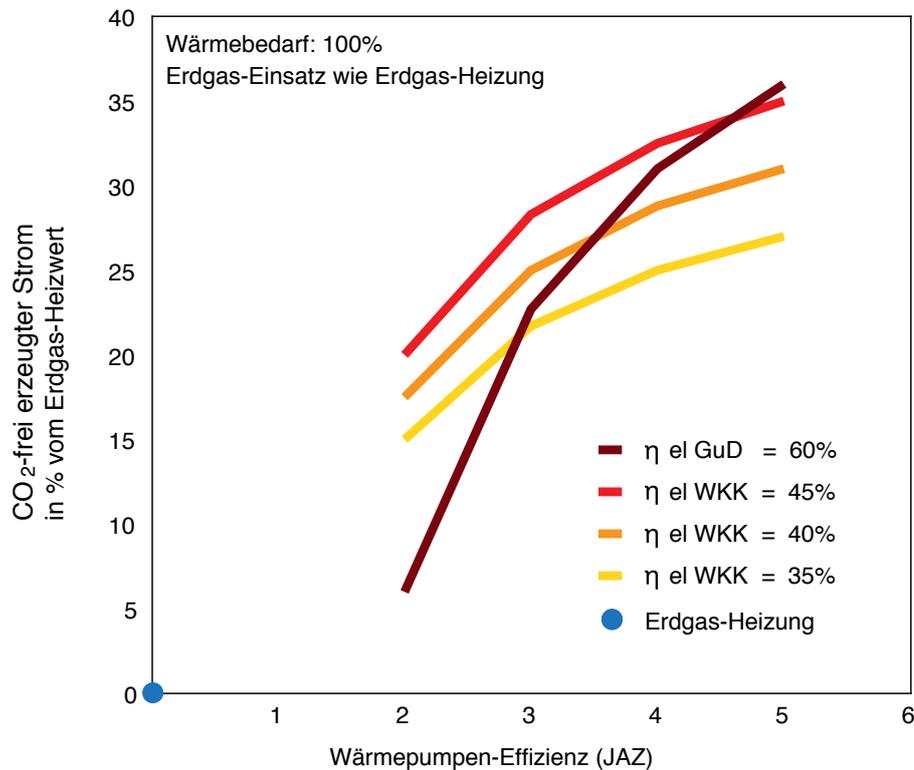


Abbildung 3.8: Zusätzliche Stromerzeugung bei der Produktion einer bestimmten Wärmemenge mit vorgegebenem Gasverbrauch: Wird Erdgas nicht in einer Gasheizung verbrannt, sondern dieselbe Gasmenge in einer WKK- oder GuD-Anlage genutzt, dann kann neben dem Betrieb einer Wärmepumpe zur Erzeugung der Wärme zusätzlich «CO<sub>2</sub>-freier» Strom (d. h. ohne zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emission) erzeugt werden. Bei hohem elektrischem Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  der WKK-Anlage und geringer Effizienz der Wärmepumpe (tiefe Jahresarbeitszahl JAZ<sup>14</sup>) ist die dezentrale WKK-Anlage einem GuD-Kraftwerk überlegen. Bei GuD-Grosskraftwerken werden dabei Netzverluste von 7% angenommen. (Boulouchos 2012)

in Kehrriechverbrennungsanlagen und Industriebetrieben sowie etwa 5% Biogas.

### 3.10.2 Ökologische und wirtschaftliche Aspekte

In Bezug auf die Emissionen können keine allgemein gültigen Kennwerte angegeben werden, weil bei der WKK eine Vielfalt von Technologien, Brennstoffen, Anlagegrössen, Strom-/Wärme-Verhältnissen zur Anwendung kommt. Für die ökologische Bilanz entscheidend ist, ob fossiler oder biogener Brennstoff eingesetzt wird. Wird die erforderliche Wärme statt mit einer Gasheizung mit einer WKK-Anlage erzeugt, dann lässt sich mit derselben

Erdgasmenge (und CO<sub>2</sub>-Ausstoss) zusätzlich CO<sub>2</sub>-freier Strom erzeugen (Abbildung 3.8). Überdies werden WKK-Anlagen im Heizbereich im Winter eingesetzt, wenn der Strombedarf gross ist und die Schweiz Strom importiert.

Die Gesamtwirtschaftlichkeit einer WKK-Anlage ergibt sich einerseits aus dem Ertrag, der mit der erzeugten Wärme und dem produzierten Strom erwirtschaftet werden kann, sowie andererseits den Investitionskosten und den Ausgaben für Wartung, Brennstoff und Versicherungen. Da der Preis pro kWh Wärme in der Grössenordnung der Brennstoffpreise liegt, bestimmt der erzielbare Strompreis die Wirtschaftlichkeit. Aus diesem Grund sind

<sup>14</sup> Jahresarbeitszahl JAZ der Wärmepumpe: erzeugte Nutzwärme pro eingesetzte elektrische Energie, gemittelt über das ganze Jahr.

stromgeführte Systeme eindeutig im Vorteil, da sie bei Bedarf teuren Spitzenstrom produzieren können, sofern sie über einen genügend grossen Wärmespeicher verfügen. Die Wirtschaftlichkeit fossil betriebener WKK-Anlagen hängt zudem entscheidend von der Preisentwicklung des Brennstoffs ab. Steigende Preise von Erdgas oder Heizöl wirken sich stark auf die Stromerzeugungskosten und damit auf die Konkurrenzfähigkeit aus.

### 3.10.3 Potenzial bis 2050

WKK-Anlagen stehen bei der Stromproduktion in Konkurrenz zu etablierten Technologien, in erster Linie also mit der Stromproduktion in Grosskraftwerken (Wasser-, Kern-, Gaskraftwerke). WKK-Anlagen stehen auch bei der Wärmeerzeugung im Wettbewerb zu anderen Technologien, insbesondere zu den Wärmepumpen, die mit Strom aus Grosskraftwerken angetrieben werden (Bauer 2009). Neue Chancen eröffnen sich durch die Möglichkeit, mit dezentralen Anlagen, die biogene Brennstoffe verwenden, Spitzenstrom zu erzeugen. Solche Anlagen könnten einen wichtigen Beitrag leisten, um die fluktuierende Produktion der erneuerbaren Energien auszugleichen (Balzer 2010).

Von den verschiedenen Typen an WKK-Anlagen scheinen heute High-Tech-Gasmotoren (Nellen 2000), sowie Mittel- bis Hochtemperatur-Brennstoffzellen die vielversprechendsten Technologien zu sein. Einem tendenziell höheren elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzellen steht die mangelnde Eignung für schnelle Lastfolgen gegenüber. Entscheidend für die Marktchancen wird auch sein, wie sich die Kosten der momentan noch sehr teuren Brennstoffzellen entwickeln werden. In kleinen Brennstoffzellen-Produktionsserien mit Leistungen zwischen ein paar kW und mehreren hundert kW (Yamada, 2011) konnte ein Wirkungsgrad der Umwandlung in Elektrizität von 50–60 % erreicht werden. In Brennstoffzellen-Gasturbinen-Hybridgeneratoren werden Wirkungsgrade von mehr als 70 % erwartet (Faccinetti 2011). Ziel eines amerikanischen Technologie-Programms sind Brennstoffzellen zu einem Preis von unter 400 \$/kWe.

Biogene WKK-Anlagen haben den Vorteil, dass sie erneuerbare Energieträger nutzen. Allerdings stehen sie in Konkurrenz zu anderen Technologien, die sich ebenfalls auf die begrenzte Biomasse stützen. Die Nutzung von biogenen Energieträgern für die kombinierte Strom- und Wärmeproduktion jedenfalls ist einer reinen Nutzung zu Heizzwecken eindeutig vorzuziehen.

Nach dem Ereignis von Fukushima haben sich die Marktchancen von WKK-Anlagen markant verbessert. Für das Jahr 2035 wird geschätzt, dass eine Gesamtproduktion von max. 10 TWh Strom und bis zu 20 TWh Wärme möglich wäre, wovon etwa die Hälfte biogenen Ursprungs sein könnte. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, wäre eine gezielte Förderung nötig.

### 3.10.4 Technologiespezifische Bewertung und Folgerungen

Kleine WKK-Anlagen sind dezentral und verbrauchernah. Sofern der eingesetzte Brennstoff gelagert werden kann, stützen sie die Versorgungssicherheit. Bei gleicher erzeugter Wärmemenge wie bei einer hierkömmlichen Öl- oder Gasheizung kann aus der gleichen Menge Brennstoff zusätzlich hochwertiger, spitzenlastfähiger Strom gewonnen werden.

Je nach Leistung und Einsatzgrösse sind dezentrale WKK-Anlagen heute vergleichsweise nahe an der Wirtschaftlichkeitsgrenze (Pauli 2009, Erb 2012). Dennoch ist das entsprechende Potenzial nicht unbegrenzt: Einerseits ist in der Schweiz der Bedarf an Hochtemperaturindustriewärme nicht so gross wie z. B. in Deutschland und andererseits sind für WKK-Anlagen zusätzlich zur Warmwassererzeugung bei der Raumheizung entweder der Altgebäudebestand mit Hochtemperaturheizsystemen oder Fälle, wo die Erdwärme nicht genutzt werden kann, interessant.

Einen wesentlichen Marktanteil können WKK-Anlagen nur erreichen, wenn die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wie folgt angepasst werden:

- Förderung des Energie-Contracting: Energiedienstleister liefern Nutzenergie zu einem garantierten Tarif und kümmern sich im Gegenzug

- um die Anlage während ihrer Lebensdauer. Dies würde Anlagebauern erlauben, Produkte zu modularisieren, in Serie zu fertigen und damit die Kosten wesentlich zu reduzieren.
- Begünstigung der kombinierten Strom-, Wärme- und Kälteproduktion gegenüber fossil betriebenen Heizungen ohne Stromproduktion – zum Beispiel durch einen hohen CO<sub>2</sub>-Preis oder durch Gesetze und Normen.
  - Einheitliche, langfristig geltende Abnahmebedingungen für den erzeugten Strom, oder alternativ: Orientierung der Stromvergütung an Spitzenlastpreisen, was einen weitestgehend liberalisierten Strommarkt voraussetzt.
  - Stärkerer Einbezug von WKK-Projekten in die kommunalen Planungen (Energienetze mit verschiedenen Strom-, Wärme- und Kälteerzeugern)

## Literatur

Boulouchos 2012: interne Berechnungen zum Vergleich von WKK- und GuD-Anlagen.

Bauer 2009: Systemvergleich von Strom- und Wärmeversorgung mit zentralen und dezentralen Anlagen. Eine Studie im Rahmen des «Energietrialog Schweiz». Bauer C. et al., PSI und Axpo Holding AG. [www.proclim.ch/news?2389](http://www.proclim.ch/news?2389)

Balzer 2010: BHKW und Wärmepumpe von Endkunden fernsteuern, H. Balzer u. L. Lorenz, Vattenfall Europe Wärme AG, Energy 2.0, Ausgabe 07/2010. [www.proclim.ch/news?2397](http://www.proclim.ch/news?2397)

Erb 2012: Fossile BHKW - Potenzial und Standortevaluation im Rahmen der Entwicklung der BFE WKK-Strategie, M. Erb, Eicher+Pauli AG im Auftrag des BFE, 2012. [www.proclim.ch/news?2473](http://www.proclim.ch/news?2473)

Facchinetti 2012: Innovative Hybrid Cycle Solid Oxide Fuel Cell-Inverted Gas Turbine with CO<sub>2</sub> Separation, E. Facchinetti, D. Favrat, and F. Marechal, Fuel Cells 2012. [www.proclim.ch/news?2414](http://www.proclim.ch/news?2414)

Nellen 2000: Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero Emissions, C. Nellen u. K. Boulouchos, SAE Paper 2000-01-2825, Transactions, Journal of Fuels and Lubricants. [www.proclim.ch/news?2404](http://www.proclim.ch/news?2404)

Pauli 2009: Technische und wirtschaftliche Entwicklung von WKK-Anlagen, H. Pauli, Eicher+Pauli AG, 2009. [www.proclim.ch/news?2413](http://www.proclim.ch/news?2413)

Yamada 2011: Perspectives for decentralized power production with fuel cells, K. Yamada, M. Suzuki, Proc. of the 4th World Engineers Convention, Geneva 2011