

Verstromen der Abwärme aus Power-to-Gas Prozessen

Sowohl bei der Elektrolyse, wie auch bei der Methanisierung entsteht Abwärme die auf verschiedene Weisen genutzt werden kann. In diesem Dokument wird vorgestellt, wie sich eine Abwärmeverstromung in die Prozesse eingliedern lassen und welches Potenzial dabei ausgenutzt werden kann.

Organic Rankine Cycle

Eine Möglichkeit, um die Gesamteffizienz einer Power-to-Gas Anlage zu steigern, ist das Verstromen der Abwärme aus Elektrolyse und Methanisierung mittels Organic Rankine Cycle (ORC). Beim ORC wird ein organisches Arbeitsmedium (teilweise jedoch auch Ammoniak) verwendet, welches einen tieferen Siedepunkt hat als Wasser. Dadurch ist es möglich, Abwärme auf einem relativ tiefen Temperaturniveau für die Verdampfung zu verwenden (Abbildung 1). Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich angewendet, beispielsweise bei der Stromerzeugung durch Geothermie oder der Verstromung industrieller Abwärme. ORC-Systeme haben eine gute Teillastfähigkeit [1]. Die ist vor allem Interessant für die Verstromung der Elektrolyseabwärme.

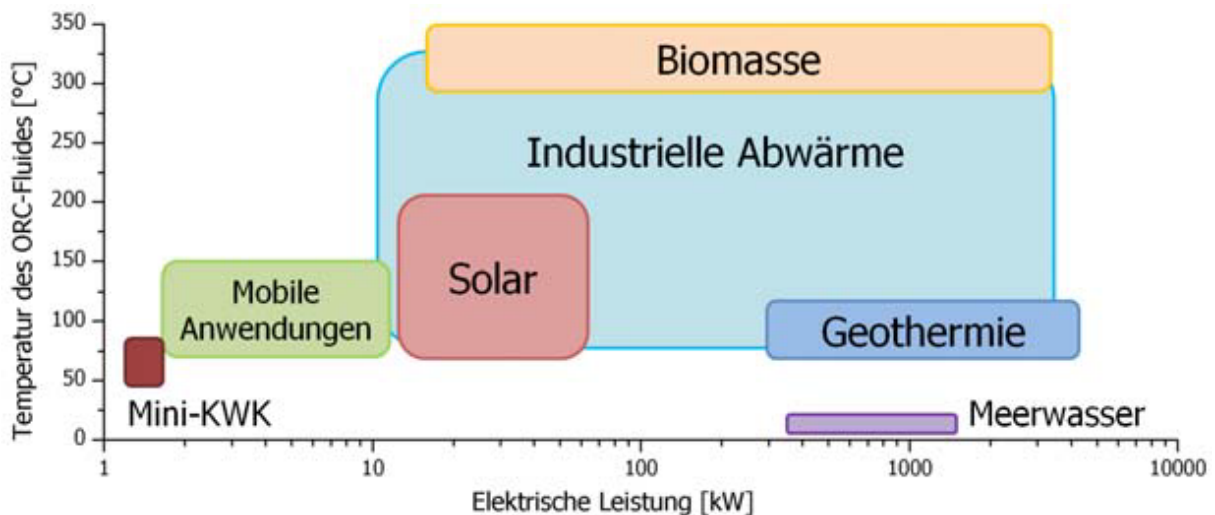


Abbildung 1. ORC-Anwendung nach Temperatur des ORC-Fluids. Quelle: Bericht "Multitalent Organic Rankine Cycle", Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann, Universität Bayreuth

Abbildung 2 zeigt das Potenzial der nutzbaren Abwärme im Verhältnis zur Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs. Diese entspricht bei der Elektrolyse etwa 31%, bei der Methanisierung etwa 12% der Elektrolyse-Anschlussleistung. Die ORC-Berechnungen werden für einen alkalischen Elektrolyseur mit einer Leistungsaufnahme von $P_{el,inp} = 1000 \text{ kW}$ durchgeführt.

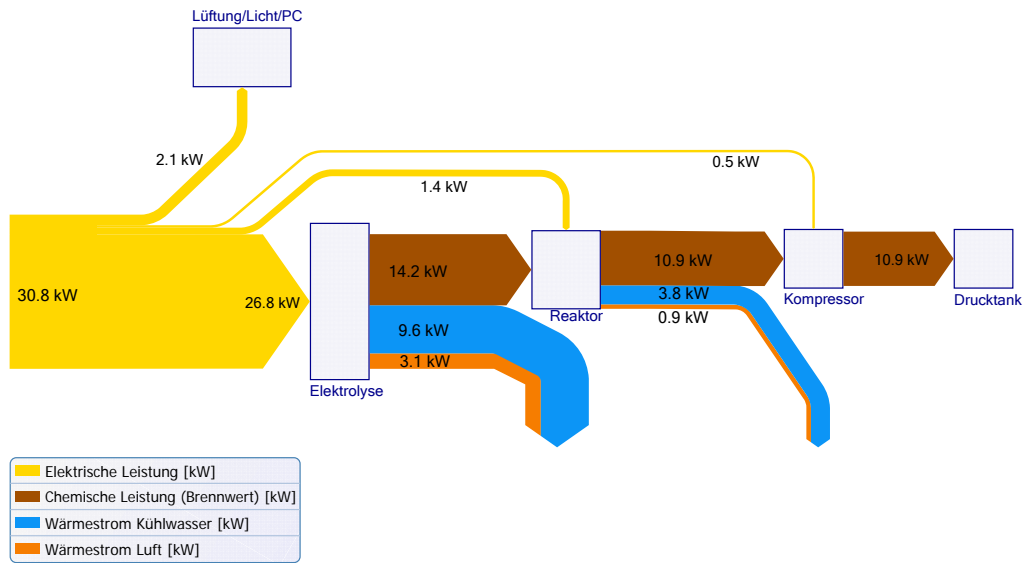


Abbildung 2. Übersicht über die Abwärmeströme in der Power-to-Gas Kette. Die Temperatur des Kühlwassers aus der alkalischen Elektrolyse beträgt etwa 60°C, die nutzbare Abwärme aus der Methanisierung etwa 200°C. Quelle: Institut für Energietechnik IET

Annahmen und Berechnungsgrundlagen

In Tabelle 1 sind die Annahmen und festgelegten Werte für die Berechnungen aufgelistet. Weiter werden folgende Punkte angenommen:

1. Punkt 4 (Abbildung 3) befindet sich auf der Siedelinie
2. Die kinetische und potentielle Energie wird vernachlässigt
3. Verdampfer, Kondensator und Rekuperator arbeiten isobar $\rightarrow p_2 = p_3 = p_4, p_5 = p_6 = p_1$
4. Zur Abführung der Kondensationswärme des Arbeitsmedium im ORC wird DI-Wasser verwendet, welches als Feed der Elektrolyse genutzt wird.

Tabelle 1. Berechnungsparameter für die Verstromung. Die Werte in a) stammen aus [2], die Werte in b) aus [3].

	ORC für Elektrolyseabwärme	ORC für Methanisierungsabwärme
Quelle Abwärme	Alkalische Elektrolyse	Katalytische Methanisierung
Arbeitsmedium ORC	Ammoniak NH ₃	Isobutan C ₄ H ₁₀
Verdampfungstemperatur T _{verd}	50°C	140°C
Überhitzung	10K	60K
Kondensationstemperatur T ₄		15°C
Isotroper Wirkungsgrad Verdichter ^{a)} η _{is,Verd}		0.8
Mechanischer Wirkungsgrad Verdichter ^{a)} η _{mech,Verd}		0.96
Isotroper Wirkungsgrad Turbine ^{a)} η _{is,Turb}		0.85
Mechanischer Wirkungsgrad Turbine ^{b)} η _{mech,Turb}		0.97
Wirkungsgrad Generator ^{a)} η _{Gen}		0.97
Wirkungsgrad Rekuperator ^{b)} η _{Rek}		0.8

Bei der Wahl der ORC-Arbeitsmedien wurde darauf geachtet, dass die Fluideigenschaften den Temperaturen von Quelle und Senke angepasst sind. Die Temperatur für die Verdampfung wurde unterhalb der kritischen Temperatur T_{krit} des jeweiligen Fluids angesetzt. Die Kondensationstemperatur wurde der Temperatur des Leitungswasser angepasst (12°C [4]).

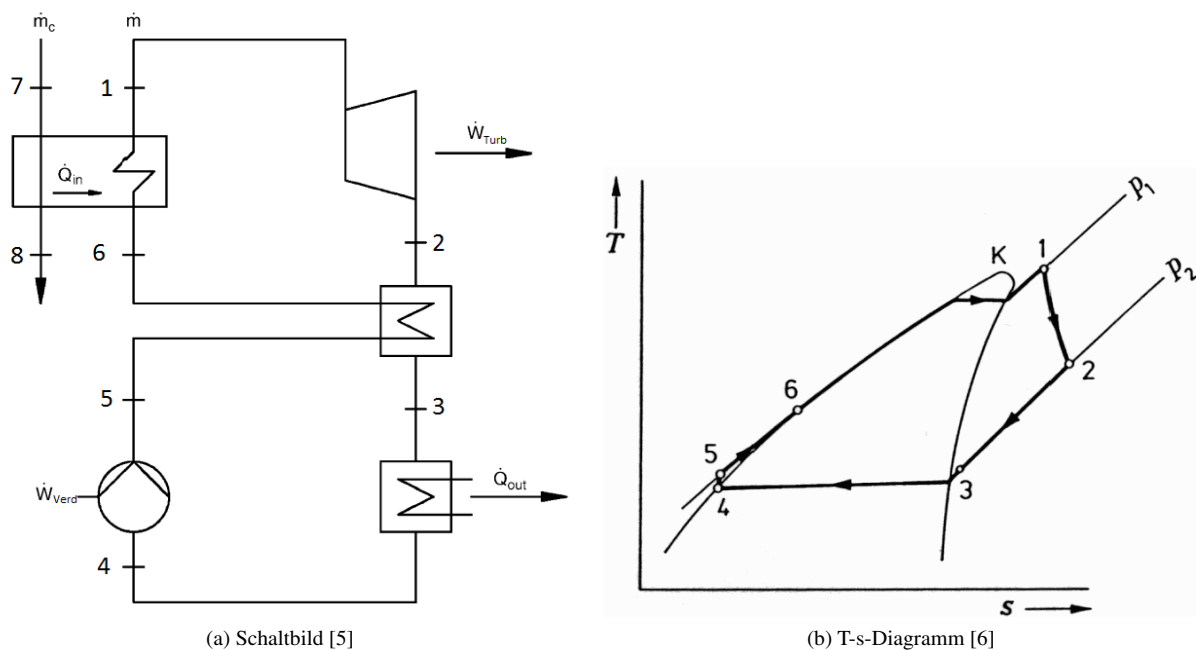


Abbildung 3. Schaltbild (links) und T-s-Diagramm (rechts) einer ORC Anlage mit Rekuperator

Gleichungen

Für die Berechnung der Drücke, Enthalpien, Entropien und Temperaturen wurden die Gleichungen aus diesem Kapitel verwendet und die Stoffdaten wurden mit dem Program RefProp ermittelt.

Expansion: 1 → 2

$$\dot{W}_{Turb} = \eta_{Turb} \cdot \eta_{Gen} \cdot \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

mit

$$h_1, s_1 = f(T_1, p_1) \quad (2)$$

und

$$h_2 = h_1 - \eta_{is, Turb} \cdot (h_1 - h_{2, is}) \quad (3)$$

Rekuperator: 2 → 3 | 5 → 6

$$\dot{Q}_{2 \rightarrow 3} = \eta_{Rek} \cdot \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6) = \dot{Q}_{5 \rightarrow 6} \quad (4)$$

und

$$h_3, s_3 = f(T_3, p_3) \quad (5)$$

Kondensator: 3 → 4

$$\dot{Q}_{3 \rightarrow 4} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) = \dot{Q}_{out} \quad (6)$$

Verdichter: 4 → 5

$$\dot{W}_{Verd} = \dot{m} \cdot (h_5 - h_4) \quad (7)$$

mit

$$h_5 = h_4 + \frac{1}{\eta_{is, Verd}} \cdot (h_{5, is} - h_4) \quad (8)$$

und

$$h_4, s_4, \rho_4, p_4 = f(T_4) \quad (9)$$

Verdampfer: 6 → 1 | 7 → 8

$$\dot{Q}_{6 \rightarrow 1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) = \dot{m}_c \cdot (h_8 - h_7) = \dot{Q}_{in} \quad (10)$$

Net Power Output

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Turb} - \dot{W}_{Verd} \quad (11)$$

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Man sieht, dass es möglich ist, mit der etablierten Technologie ORC den Gesamtwirkungsgrad von Power-to-Gas zu steigern, indem die Abwärme verstromt wird. Es ist möglich, den Wirkungsgrad der ORC-Prozesse weiter zu steigern, indem die Prozessparameter (ORC-Fluid, Drücke, Temperaturen, etc.) optimiert und auf die jeweiligen Abwärmeströme angepasst werden. Denkbar wäre auch eine Kombination der beiden Wärmequellen (Vorwärme mit Elektrolyseabwärme und Verdampfung/Überhitzung mit Methanisierungsabwärme) oder die Verwendung eines Kalina-Cycle für die tieferen Abwärmemetemperaturen.

Es ist fraglich, ob sich der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage durch eine Abwärmeverstromung markant steigern lässt. ORC-Systeme sind zwar marktreif, erhöhen die Komplexität der PtM Anlage jedoch extrem. Aus dieser Sicht macht es mehr Sinn zu versuchen, die Abwärme mit einer internen Wärmerückgewinnung zu nutzen.

Tabelle 2. Auswertung der Ergebnisse der ORC-Einbindung in Power-to-Gas Prozesse

	ORC für Elektrolyseabwärme	ORC für Methanisierungsabwärme
Eingangsleistung Elektrolyseur $P_{el,inp}$	1000 kW	
Abwärmemenge \dot{Q}_{in}	310 kW	120 kW
Massenstrom ORC Kreislauf \dot{m}	0.13 kg·s ⁻¹	0.16 kg·s ⁻¹
\dot{W}_{Turb}	8.93 kW	13.63 kW
\dot{W}_{Verd}	0.26 kW	1.06 kW
Net Power Output $\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Turb} - \dot{W}_{Verd}$	8.68 kW	12.61 kW
Carnot Wirkungsgrad η_{Carnot}	13.51%	39.10%
Wirkungsgrad ORC $\eta_{ORC} = \dot{W}_{Turb} \cdot (\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{Verd})^{-1}$	2.88%	11.26%
Rückgewinn $\frac{\dot{W}_{net}}{P_{el,inp}}$	0.87%	1.26%

Quellen

- [1] Electrathern. ORC Knowledge Center.
- [2] Costante Invernizzi Paola Bombarda, Mario Gaia and Claudio Pietra. Comparison of enhanced organic rankine cycles for geothermal power units, 2015.
- [3] Michel Feidt Milad Ashouri, Mohammad Hossein Ahmadi. Performance analysis of organic rankine cycle integrated with a parabolic through solar collector, 2014.
- [4] Wasserwerke Reinach und Umgebung. ORC-System Power + Generator, 2017.
- [5] Martin Wendland Johann Fischer Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer. Working fluids for low-temperature organic rankine cycles. Technical report, Institut fuer Verfahrens- und Energietechnik, Universitaet fuer Bodenkultur Wien, 2005.
- [6] Willhelms Gernot und Cerbe Günter. *Technische Thermodynamik*. 2011.