

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Verstromung von KWK-Abwärme mit ORC-Anlage

KfW-Aktenzeichen: MBe1 - 001785

Fördernehmerin:

Stadtwerke Kempen GmbH
Heinrich-Horten-Straße 50
47906 Kempen

Umweltbereich:

Klimaschutz, Energie, Integrierter Umweltschutz

Laufzeit des Vorhabens:

21.09.2010 – 30.04.2013

Autor/Ansprechpartner:

Stadtwerke Kempen (Bauherrin und Betreiberin)
Herr Leibauer
Tel. 02152 1496 339

Planer:

ETI Energietechnik Ingenieure
Herr Bernert
Tel. 06221 138 11 23

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Datum der Erstellung: August 2014

Berichts-Kennblatt					
KfW Aktenzeichen: NKA3 - 001785	Vorhaben-Nr.: 1785				
Titel des Vorhabens: Verstromung von KWK-Abwärme mit ORC-Anlage					
Autoren: Dipl.-Ing. Wilfried Bernert Rüdiger Leibauer M.Sc.Eng. Martina Dreher (FH D) Prof. Dr.-Ing. Matthias Neef (FH D)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Vorhabensbeginn</th> <th>Vorhabensende</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>21.09.2010</td> <td>30.04.2013</td> </tr> </tbody> </table>	Vorhabensbeginn	Vorhabensende	21.09.2010	30.04.2013
Vorhabensbeginn	Vorhabensende				
21.09.2010	30.04.2013				
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift) Stadtwerke Kempen GmbH Heinrich-Horten-Str. 50 47906 Kempen	Veröffentlichungsdatum: 16.05.2014 Seitenzahl: 43				
Gefördert im Rahmen des BMU Umweltinnovationsprogramms					
Kurzfassung / Summary Siehe S. 3-6					
Schlagwörter Kraft-Wärme-Kopplung; ORC-Anlage; Verstromung von KWK-Abwärme; Energieeffizienz					
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 10 Elektronischer Datenträger: 1	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet geplant				

Kurzfassung / Abstract

Beschreibung / Description

Die Steigerung von Energieeinspar- und Energieeffizienzmaßnahmen in Privathaushalten macht sich durch einen sinkenden Energieverbrauch und eine sinkende Wärmabnahme bei den Energieversorgungsunternehmen [EVU] bemerkbar. Die sinkende Nachfrage, die sich auch aus den gesetzlichen Anforderungen der Energieeinsparverordnung [EnEV] 2009 ergibt, führt zu einer geringeren Auslastung der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen [KWK]. Die Antwort auf die langfristig sinkende Wärmenachfrage sehen die Stadtwerke Kempen GmbH in innovativen, technischen Lösungen, die das vorhandene KWK-Potenzial gewinnbringend für das Unternehmen und ressourcenschonend für die Umwelt nutzt.



Abbildung 1: Erdgas-betriebene KWK-Module mit ORC-Anlage im BHKW am Standort Stadtwerke Kempen GmbH [1]

Fallende Energiepreise fördern dabei das Bestreben der EVU, die angebotsseitige Energieeffizienz der vorhandenen KWK-Module zu steigern und damit auch fossil befeuerte Erzeugungsanlagen wirtschaftlich und umweltfreundlich zu betreiben.

Der Ansatz der Stadtwerke Kempen, dieses Ziel zu erreichen, ist die Kombination der vorhandenen fossil befeuerten KWK-Module im Heizkraftwerk (HKW) und des angebundenen Fernwärmenetzes mit einer Organic-Rankine-Cycle-Anlage (ORC-Anlage). Durch diese Kombination wird die Abwärme der Gasmotoren für die Stromerzeugung genutzt und somit die Stromkennzahl erhöht.

Anwendbarkeit der Technik / Applicability

KWK- und ORC-Anlagen sind heute Stand der Technik. KWK-Module mit Gasmotoren werden überwiegend zur Wärmeversorgung in kleinen und mittleren Fernwärmeversorgungsgebieten oder in der Objektversorgung eingesetzt. ORC-Anlagen haben ihre Hauptanwendung in der Stromerzeugung durch Biomasse. Sie werden oftmals mit holzbefeuerten Kesselanlagen gekoppelt und vereinzelt in Biogasanlagen eingesetzt.

Wesentliche Vorteile für die Umwelt / Main environmental benefits, main achieved emission levels

Die Kopplung einer KWK-Anlage mit einer ORC-Anlage führt zu Entlastungen der Umwelt und hat ein hohes Potenzial an grundlegenden Klima- und Umweltschutzwirkungen:

- Unmittelbare Emissionseinsparungen durch die höhere Auslastung der vorhandenen KWK-Module
- Ressourceneinsparung fossiler Energieträger für die Stromproduktion und durch die Wärmeauskopplung in ein bestehendes Fernwärmenetz
- Höherer Gesamtnutzungsgrad des BHKW (Ressourcenschonung und Emissionsminderung)

Nach den ersten Betriebserfahrungen mit der ORC-Anlage hat sich gezeigt, dass diese pro Jahr zwischen 3.000 und 4.000 MWh Strom zusätzlich erzeugen kann und außerdem die vorhandenen KWK-Module aufgrund der zusätzlichen Stromerzeugung durch die ORC-Anlage höhere Laufzeiten besitzen.

Im Betrachtungszeitraum April 2012 bis März 2013 erzeugte die ORC-Anlage 3.074 MWh Strom. Die gesamte Stromerzeugung konnte durch die höheren Laufzeiten der KWK-Module um rund 9.448 MWh gesteigert werden. Dies entspricht der Vermeidung von etwa 2.863 Tonnen CO₂ im Vergleich zur Stromproduktion durch den Kraftwerksmix Deutschland. Der Nutzungsgrad der Stromerzeugung der Stadtwerke Kempen ist in Tabelle 1 dargestellt und konnte im HKW Kempen im Betrachtungszeitraum durch die zugebaute ORC-Anlage um 2,44 % gesteigert werden, wobei der Gesamtwirkungsgrad des Heizkraftwerks bei rund 85 % konstant gehalten wurde.

Anlagendaten	Ausgangslage Mittelwerte 2009 - 2011	Geplant lt. Projektbeschreibung	Betrachtungszeitraum April 2012 bis März 2013	1 Betriebsjahr 2012 (Inbetriebnahme der ORC Februar 2012, Testbetrieb bis September 2012)
Stromerzeugung KWK	69.048 MWh	86.790 MWh	75.421 MWh	75.162 MWh
Stromerzeugung ORC	0 MWh	4.129 MWh	3.074 MWh	2.656 MWh
Stromerzeugung KWK mit ORC		90.919 MWh	78.496 MWh	77.818 MWh
Wärmeerzeugung KWK	76.574 MWh	66.168 MWh	62.781 MWh	64.287 MWh
Wärmeerzeugung ORC		20.249 MWh	14.913 MWh	12.968 MWh
Wärmeerzeugung KWK mit ORC		86.417 MWh	77.694 MWh	77.255 MWh
Brennstoffverbrauch KWK	169.692 MWh	206.493 MWh	181.989 MWh	181.986 MWh
Elektrischer Nutzungsgrad	40,69%	44,03%	43,13%	42,76%
Thermischer Nutzungsgrad	45,13%	41,85%	42,69%	42,45%
Gesamtnutzungsgrad	85,82%	85,88%	85,82%	85,21%

Tabelle 1: Wirkungsgrade der Stromerzeugung im HKW der Stadtwerke Kempen [2]

Kostendaten / Economics

Der Bau der ORC-Anlage wurde mit rund 2,4 Mio. Euro kalkuliert. Zusätzliche Anforderungen aus dem Genehmigungsverfahren erhöhten nachträglich die Kosten sowohl beim Anlagenbau wie auch beim Rohbau (s. Tabelle 2).

Investitions- und Finanzierungsplan Zeitraum ab Fördermittelzusage 2010 - 2013			
Teilvorhaben	geplant (EUR)	tatsächlich (EUR)	Differenzen gegenüber Planung
Los 1. ORC-Anlage	968.850,00 €	968.850,00 €	- €
Los 2. Thermoölsystem	690.430,71 €	1.092.703,56 €	402.272,85 €
Los 3. Rohbau	322.368,14 €	441.340,76 €	118.972,62 €
Los 4. Elektrotechnik	239.500,00 €	279.116,79 €	39.616,79 €
Planung	71.000,00 €	84,00 €	- 70.916,00 €
Gutachten	29.000,00 €	39.062,90 €	10.062,90 €
Bauüberwachung	25.000,00 €	8.131,31 €	- 16.868,69 €
Projektmanagement	81.000,00 €	98.872,13 €	17.872,13 €
Förderfähige Ausgaben	2.427.148,85 €	2.928.161,45 €	501.012,60 €
Zuschuss aus dem BMU Umweltinnovationsprogramm	485.400,00 €	445.400,00 €	- 40.000,00 €
Eigene Mittel	1.941.748,85 €	2.482.761,45 €	541.012,60 €

Tabelle 2: Darstellung der Kosten für den Bau der ORC-Anlage [2]

Die Anforderungen aus dem Genehmigungsverfahren betrafen vorrangig die Bereiche Schallschutz und Wasserrecht. Ebenso führten erforderliche Änderungen am Thermoölsystem und bei der Wärmedämmung zu erheblichen Mehrkosten.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde bei der Planung (in 2009) der Anlage ein Strompreis von 60 €/MWh_{el} unterstellt. Unter Berücksichtigung der Förderung nach dem BMU-Innovationsprogramm konnten Amortisationszeiten unter 7 Jahren errechnet werden. Seitdem ist der Strompreis an der Strombörse „EEX“ stark gefallen und betrug in 2012 durchschnittlich nur noch 38 €/MWh_{el}. Unter diesen Gesichtspunkten ist ein wirtschaftlicher Betrieb der eigenen Stromerzeugungsanlagen nur noch eingeschränkt zu Zeiten mit auskömmlichen Strompreisen möglich.

Die Förderung nach dem KWK-Gesetz 2012 ermöglicht trotz der Mehrkosten und geringeren Stromerlösen an der Strombörse nicht nur einen wirtschaftlichen Betrieb der ORC-Anlage sondern des gesamten BHKW. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist in

Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung KWK mit und ohne ORC					
Anlagendaten		Planung		1 Betriebsjahr (2012)	
		KWK ohne ORC	KWK mit ORC	KWK ohne ORC	KWK mit ORC
A	Stromerzeugung nur KWK	73.198,00 MWh/a	86.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	75.162,44 MWh/a
B	Stromerzeugung nur ORC	0,00 MWh/a	4.000,00 MWh/a	0,00 MWh/a	2.655,82 MWh/a
C	Stromerzeugung gesamt (= A + B)	73.198,00 MWh/a	90.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	77.818,25 MWh/a
C1	Stromerzeugung KWK-Bonus (KWK2,3,4 und ORC)			0,00 MWh/a	47.194,93 MWh/a
D	Wärmeerzeugung nur KWK Gesamt				
E	Wärmeerzeugung nur KWK in das Fernwärmenetz	76.553,22 MWh/a	66.694,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	64.286,66 MWh/a
F	Wärmeerzeugung aus ORC Kondensator - Einspeisung FW Rücklauf	0,00 MWh/a	19.600,00 MWh/a	0,00 MWh/a	12.968,01 MWh/a
G	Wärmeinspeisung KWK + ORC in das Fernwärmenetz (= E + F)	76.553,22 MWh/a	86.294,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	77.254,67 MWh/a
H	Wärmeinspeisung Spitzenlastkessel	37.310,78 MWh/a	27.569,17 MWh/a	36.057,27 MWh/a	40.924,38 MWh/a
I	Wärmeinspeisung in das Fernwärmenetz Gesamt (= G + H)	113.864,00 MWh/a	113.864,00 MWh/a	118.179,05 MWh/a	118.179,05 MWh/a
J	Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	174.759,30 MWh/a	206.200,30 MWh/a	181.985,77 MWh/a	181.985,77 MWh/a
K	Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	44.019,33 MWh/a	32.526,15 MWh/a	37.188,21 MWh/a	42.207,98 MWh/a
Gegenüberstellung Ertrag - Kosten					
	Erträge				
	spez. Wärmeerlös	50,00 €/MWh	50,00 €/MWh	53,00 €/MWh	53,00 €/MWh
	Wärmevergütung (= I x spez. Wärmeerlös)	5.693.200,00 €	5.693.200,00 €	6.263.489,65 €	6.263.489,65 €
	spez. Stromerlös	60,00 €/MWh	60,00 €/MWh	38,00 €/MWh	38,00 €/MWh
	Stromvergütung (= C x spez. Stromerlös)	4.391.880,00 €	5.447.400,00 €	2.856.172,53 €	2.957.093,65 €
	spez. Netzkosten	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh
	Gutschrift vermiedene Netzkosten (= C x spez. Netzkosten)	139.808,18 €	173.408,90 €	143.560,25 €	148.632,87 €
	spez. KWK-Bonus	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	20,20 €/MWh
	KWK-Bonus (= C1 x spez. KWK-Bonus)	- €	- €	- €	953.337,59 €
	Gesamtertrag	10.224.888,18 €	11.314.008,90 €	9.263.222,43 €	10.322.553,75 €
	Kosten				
	spez. Brennstoffkosten (Kessel plus 5,5 €/MWh Erdgassteuer)	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho
	Brennstoffkosten KWK (= J/0,903 x spez. Brennstoffkosten)	4.838.297,34 €	5.708.756,92 €	5.038.365,85 €	5.038.365,85 €
	Brennstoffkosten Kessel (= K/0,903 x spez Brennstoffkosten + 5,5€/MWh)	1.486.810,15 €	1.098.613,04 €	1.256.080,22 €	1.425.629,41 €
	Wartung Instandhaltung Bau (ORC)		6.447,36 €		
	Wartung / Instandhaltung (Wartungsvertrag Hersteller Turboden)		19.000,00 €	19.000,00 €	19.000,00 €
	spez. Wartung / Instandhaltung KWK	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung KWK (= A x spez. Kosten)	1.097.970,00 €	1.301.850,00 €	1.127.436,53 €	1.127.436,53 €
	spez. Wartung Spitzenlastkessel	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung Spitzenlastkessel (= H x spez. Kosten)	186.553,90 €	137.845,85 €	180.286,35 €	204.621,90 €
	Personalkosten	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €
	Versicherung / Verwaltung	105.000,00 €	142.157,23 €	142.157,23 €	142.157,23 €
	Gesamtkosten	8.032.007,39 €	8.732.046,40 €	8.080.702,18 €	8.274.586,92 €
	Überschuss (Gesamtertrag - Gesamtkosten)	2.192.880,79 €	2.581.962,50 €	1.182.520,25 €	2.047.966,84 €
			389.081,71 €		865.446,58 €
	Investitionskosten		2.427.148,85 €		2.928.161,45 €
	Amortisationsdauer		6,24 Jahre		3,38 Jahre

Tabelle 3 dargestellt. Statt der ursprünglich geplanten Amortisationszeit von etwa 6,2 Jahren amortisiert sich die ORC-Anlage durch die KWK-Förderung bereits nach ca. 3,4 Jahren.

Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung KWK mit und ohne ORC					
Anlagendaten		Planung		1 Betriebsjahr (2012)	
		KWK ohne ORC	KWK mit ORC	KWK ohne ORC	KWK mit ORC
A	Stromerzeugung nur KWK	73.198,00 MWh/a	86.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	75.162,44 MWh/a
B	Stromerzeugung nur ORC	0,00 MWh/a	4.000,00 MWh/a	0,00 MWh/a	2.655,82 MWh/a
C	Stromerzeugung gesamt (= A + B)	73.198,00 MWh/a	90.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	77.818,25 MWh/a
C1	Stromerzeugung KWK-Bonus (KWK2,3,4 und ORC)			0,00 MWh/a	47.194,93 MWh/a
D	Wärmeerzeugung nur KWK Gesamt				
E	Wärmeerzeugung nur KWK in das Fernwärmenetz	76.553,22 MWh/a	66.694,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	64.286,66 MWh/a
F	Wärmeerzeugung aus ORC Kondensator - Einspeisung FW Rücklauf	0,00 MWh/a	19.600,00 MWh/a	0,00 MWh/a	12.968,01 MWh/a
G	Wärmeinspeisung KWK + ORC in das Fernwärmenetz (= E + F)	76.553,22 MWh/a	86.294,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	77.254,67 MWh/a
H	Wärmeinspeisung Spitzenlastkessel	37.310,78 MWh/a	27.569,17 MWh/a	36.057,27 MWh/a	40.924,38 MWh/a
I	Wärmeinspeisung in das Fernwärmenetz Gesamt (= G + H)	113.864,00 MWh/a	113.864,00 MWh/a	118.179,05 MWh/a	118.179,05 MWh/a
J	Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	174.759,30 MWh/a	206.200,30 MWh/a	181.985,77 MWh/a	181.985,77 MWh/a
K	Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	44.019,33 MWh/a	32.526,15 MWh/a	37.188,21 MWh/a	42.207,98 MWh/a
Gegenüberstellung Ertrag - Kosten					
	Erträge				
	spez. Wärmeerlös	50,00 €/MWh	50,00 €/MWh	53,00 €/MWh	53,00 €/MWh
	Wärmevergütung (= I x spez. Wärmeerlös)	5.693.200,00 €	5.693.200,00 €	6.263.489,65 €	6.263.489,65 €
	spez. Stromerlös	60,00 €/MWh	60,00 €/MWh	38,00 €/MWh	38,00 €/MWh
	Stromvergütung (= C x spez. Stromerlös)	4.391.880,00 €	5.447.400,00 €	2.856.172,53 €	2.957.093,65 €
	spez. Netzkosten	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh
	Gutschrift vermiedene Netzkosten (= C x spez. Netzkosten)	139.808,18 €	173.408,90 €	143.560,25 €	148.632,87 €

spez. KWK-Bonus	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	20,20 €/MWh
KWK-Bonus (= C1 x spez. KWK-Bonus)	- €	- €	- €	953.337,59 €
Gesamtertrag	10.224.888,18 €	11.314.008,90 €	9.263.222,43 €	10.322.553,75 €
Kosten				
spez. Brennstoffkosten (Kessel plus 5,5 €/MWh Erdgassteuer)	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho
Brennstoffkosten KWK (= J/0,903 x spez. Brennstoffkosten)	4.838.297,34 €	5.708.756,92 €	5.038.365,85 €	5.038.365,85 €
Brennstoffkosten Kessel (= K/0,903 x spez Brennstoffkosten + 5,5€/MWh)	1.486.810,15 €	1.098.613,04 €	1.256.080,22 €	1.425.629,41 €
Wartung Instandhaltung Bau (ORC)		6.447,36 €		
Wartung / Instandhaltung (Wartungsvertrag Hersteller Turboden)		19.000,00 €	19.000,00 €	19.000,00 €
spez. Wartung / Instandhaltung KWK	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.
Wartung Instandhaltung KWK (= A x spez. Kosten)	1.097.970,00 €	1.301.850,00 €	1.127.436,53 €	1.127.436,53 €
spez. Wartung Spitzenlastkessel	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.
Wartung Instandhaltung Spitzenlastkessel (= H x spez. Kosten)	186.553,90 €	137.845,85 €	180.286,35 €	204.621,90 €
Personalkosten	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €
Versicherung / Verwaltung	105.000,00 €	142.157,23 €	142.157,23 €	142.157,23 €
Gesamtkosten	8.032.007,39 €	8.732.046,40 €	8.080.702,18 €	8.274.586,92 €
Überschuss (Gesamtertrag - Gesamtkosten)	2.192.880,79 €	2.581.962,50 €	1.182.520,25 €	2.047.966,84 €
		389.081,71 €		865.446,58 €
Investitionskosten		2.427.148,85 €		2.928.161,45 €
Amortisationsdauer		6,24 Jahre		3,38 Jahre

Tabelle 3: Vergleichende Amortisationsberechnungen mit geplanten und realen Daten [2]

Erste Betriebserfahrungen / Initial operating experience

In der täglichen Praxis gestaltet sich der Betrieb der ORC-Anlage in Verbindung mit der KWK-Anlage als unproblematisch. Die elektrische Leistung der ORC-Anlage passt sich dem Wärmeangebot am Verdampfer an. Sind alle drei KWK-Module in Betrieb, arbeitet die ORC-Anlage mit 100 % Leistung. Beim Betrieb mit zwei KWK-Modulen arbeitet die Anlage mit noch etwa zwei Drittel der Nennleistung und bei einem KWK-Modul immer noch mit ca. einem Drittel der Nennleistung.

Probleme gibt es noch immer mit der Eintrittstemperatur der Fernwärme in den Kondensator. Die Rücklauftemperatur ist gerade in den Sommermonaten höher als die geplanten 50°C. Zwei Ursachen haben sich hierbei herauskristallisiert: Zum einen halten einige größere Kundenanlagen die vertraglich vereinbarte maximale Rücklauftemperatur nicht ein. Zum anderen besteht ein Problem darin, dass im Kühlkreislauf des Kondensators auf der Fernwärmeseite mehr Wasser umgewälzt wird als im Fernwärmenetz zirkuliert (siehe Abbildung 2). Hierdurch kommt es zu einer Anhebung der Rücklauftemperatur, was wiederum den Einsatz des Notkühlers erforderlich macht, um die Austrittstemperatur aus dem Kondensator auf 60°C zu begrenzen. Eine Lösung für das Problem ist bereits gefunden, jedoch noch nicht umgesetzt worden.

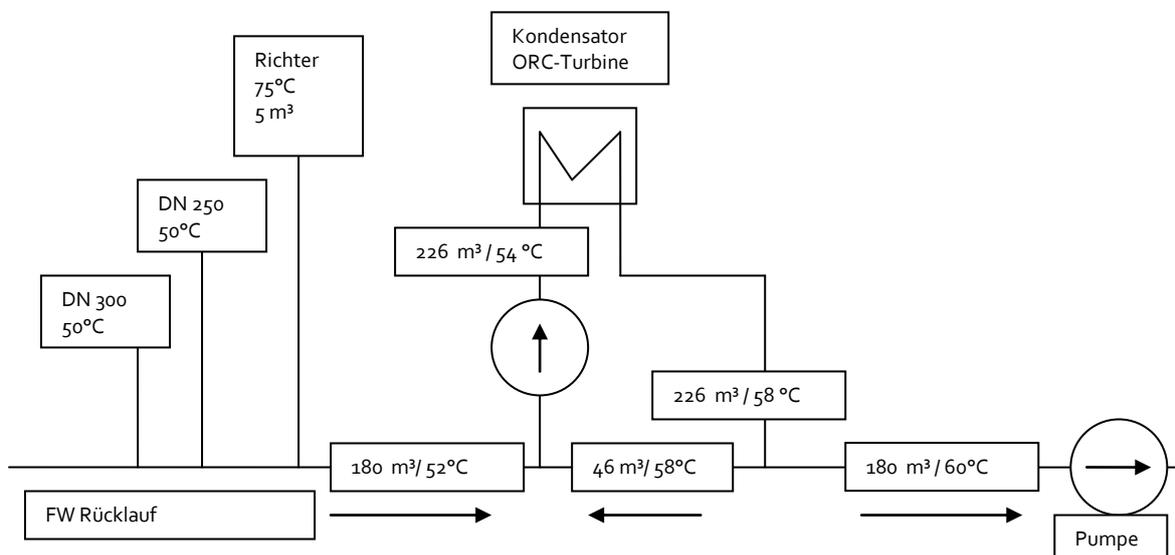


Abbildung 2: Schema Fernwärmeeinbindung Kühlwasserpumpe ORC-Kondensator [2]

Zusammenfassung/Summary

Die Stadtwerke Kempen GmbH hat bisher gute Erfahrungen mit der errichteten ORC-Anlage gemacht. Die Innovation dieser Pilotanlage liegt darin, dass erstmals in dieser Größenordnung Gasmotoren mit einer ORC-Anlage kombiniert wurden und die Wärme aus dem Kondensator der ORC-Anlage nicht als Verlustwärme verloren geht, sondern der Fernwärme im Rücklauf wieder zugeführt wird.

Vorhandene KWK-Anlagen wie die im HKW Kempen entsprechen durch die Kombination mit einer ORC-Anlage den Anforderungen einer modernisierten KWK-Anlage im Sinne des KWK-Gesetzes 2012 und erlangen hierdurch den Anspruch auf Förderung nach dem KWK-Gesetz. Dies wirkt sich sehr positiv auf die Wirtschaftlichkeit vorhandener KWK-Anlagen aus.

ORC Plant –Final Report / Abstract

Description

The popular trend to lower energy and heat consumption by making use of energy conservation and efficiency measures affects the heat sales of public and municipal utilities. The falling demand in heat supply, also resulting from the legal requirements of the German Energy Saving Ordinance (EnEV 2009), leads to underutilised combined heat and power (CHP) plants. A diminishing heat demand calls for innovative technical solutions, which help to exploit the cogeneration potential for increasing company profit and for lowering environmental impact.

In the same way, falling energy prizes encourage utilities to increase the efficiency of their existing cogeneration plants and also to operate fossil-fuelled generating units in an economical and environmentally friendly way.

To achieve this goal, Stadtwerke Kempen (Kempen municipal utility company) combines its fossil-fueled CHP units and the district heating network with an ORC plant. By doing this, the waste heat of the gas engines can be used for electricity generation, which results in an increased power-to-heat ratio.

Applicability of the Technology

Both CHP and ORC plants represent state-of-the-art technologies. Gas engine CHP plants are mainly used to supply heat for small or medium-sized district heating networks. Electricity generation from biomass is the main field of application for ORC plants, often combined with wood-fueled boiler systems. Occasionally, ORC technology is also used in biogas plants.

Stadtwerke Kempen GmbH has built the first power unit of this kind and size – a combination of a natural gas-fueled CHP plant with an ORC plant. The second innovation of the plant in Kempen is the use of the condensation heat of the ORC to feed the recirculation of the district heating.

Main benefits in terms of environmental and emission-related performance

The combination of a cogeneration unit with an ORC plant offers direct and indirect environmental benefits and has a large potential to reduce the climatic impact:

- Higher capacity utilisation of the existing CHP plant
- Generating power in a cogeneration process, among other things, results in protection of primary energy resources by saving fossil fuels for power production
- Higher overall utilisation ratio of the CHP unit (resource conservation and emission reduction per kWh)

Stadtwerke Kempen estimates that the CHP plant can produce an additional 3,000 to 4,000 MWh of electrical Energy per year by adding the proposed ORC cycle. Additionally, this facilitates a higher capacity utilisation of the existing CHP modules due to an increased demand in base heat output.

During the period under review for this report (from April 2012 to March 2013) the ORC plant produced 3,074 MWh of electricity. In total, the electricity generation could be increased by approximately 9,448 MWh. This corresponds to a prevention of CO₂ emissions of 2.658 t.

The efficiency for generating electrical power of the Kempen cogeneration plant was increased by 2,44 %, while the overall plant efficiency remained at a constant level of approximately 85 %.

Cost Breakdown

The design and erection cost for the ORC plant were calculated at about EUR 2.4 million. Approval process requirements resulted in increased costs for plant construction and building infrastructure (see table below).

		Planned costs in euros (as of 2010)	Actual costs in euros (as of 2013)
Lot 1	ORC plant	968,850.00	968,850.00
Lot 2	Plant engineering, thermal oil system, thermal oil waste gas heat exchanger	690,430.71	1,092,703.56
Lot 3	Shell construction	322,368.14	441,340.76
Lot 4	Electrical engineering	239,500.00	279,116.79
	Costs for planning, expert opinion, construction supervision, project management, staff	206,000.00	146,150.34
	eligible expenditure	2,427,148.85	2,928,161.45
	includes grant under the environmental innovation programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU)	485,400.00	445.400,0
	remaining expenditure from own resources	1,941,748.85	2,482,761.45

The additional approval requirements mainly apply to noise insulation and water legislation. Moreover, thermo oil system and thermal insulation modifications have incurred significant additional costs.

Despite the increased investment cost, the financial support from the BMU environmental innovation programme as well as the promotion of cogeneration under the German CHP law allow an economically viable operation not only of the ORC unit, but of the cogeneration plant as a whole.

Initial operating experience

In daily practice, the ORC plant and the cogeneration unit operate smoothly together. The ORC plant electrical output depends on the rate of heat supplied to the evaporator. When all three CHP modules are being operated, the ORC plant is working at full capacity. Two modules in operation lead to about two-thirds capacity, a of the ORC and one module being operative therefore means that about one third of the installed ORC capacity is activated.

There are still problems with the district heating feedback temperature at the inlet of the ORC condenser. Particularly in the summer months the feedback temperature exceeds the maximum allowed condenser temperature of 50° C. This mainly results from two causes. Firstly, various larger customers do not keep to the maximum return temperature contractually agreed upon. Secondly, in the condenser cooling circuit more water (district heating return water) is being circulated than in the district heating network itself. This leads to a feedback temperature increase which, in turn, requires emergency cooling to limit the condenser outlet temperature to 60° C.

Summary

Stadtwerke Kempen GmbH has reported good experiences with its newly installed ORC unit. It is for the first time that, in an innovative pilot plant of this scale, CHP gas engines have been combined with an ORC unit. Heat losses are kept at a minimum as the condenser heat is fed back into the district heating network.

The plant boasts reliable operation, although there are some problems with the excessive return temperature from the district heating that have yet to be solved.

Existing cogeneration plants of the Stadtwerke Kempen type are, in combination with an ORC unit, eligible for support under the CHP law as such plants comply with the requirements for modernised CHP plants as set forth in said law. This has a positive impact on the cost-effectiveness of the existing cogeneration plants. With the financial support from the CHP innovation programme, the ORC extension leads to a positive annual revenue, which promises a payback interval of the additional invest within less than 3 years.

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	11
2	Einleitung	12
2.1	Kurzbeschreibung der beteiligten Unternehmen.....	12
2.1.1	Stadtwerke Kempen GmbH	12
2.1.2	ETI Energietechnische Ingenieure GmbH	12
2.1.3	Turboden	12
2.1.4	AGO AG Energie + Anlagen.....	13
2.2	Ausgangssituation	13
3	Vorhabensumsetzung.....	14
3.1	Ziel des Vorhabens	14
3.2	Darstellung der technischen Lösung	15
3.2.1	Technische Daten der KWK-Module.....	15
3.2.2	Technische Daten der ORC-Anlage	15
3.2.3	Beschreibung der kombinierten Anlagenschaltung	16
3.3	Darstellung der Umsetzung des Vorhabens.....	18
3.3.1	Vorbereitende Arbeiten bis September 2010	18
3.3.2	Bauabwicklung	19
3.3.3	Inbetriebnahme / Abnahme	21
3.3.4	Probetrieb.....	21
3.4	Behördliche Anforderungen.....	21
3.4.1	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm)	22
3.4.2	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)	23
3.4.3	Wassergefährdende Stoffe / Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS).....	23
3.4.4	Arbeitsschutz	23
3.4.5	Baurecht	24
3.4.6	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	24
3.4.7	Erfahrungen aus dem Genehmigungsverfahren	24
3.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	24
4	Ergebnisse	25
4.1	Bewertung der Vorhabensdurchführung	25
4.2	Stoff- und Energiebilanz	29
4.2.1	Messwerte HKW-Kempen, hier KWK-Module; ORC-Anlage; Kesselanlage	29
4.2.2	Auslastung	30
4.3	Umweltbilanz	30
4.3.1	Unmittelbare Entlastungen	30
4.3.2	Mittelbare Entlastungen	31
4.4	Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms	31
4.5	Wirtschaftlichkeitsanalyse	31
4.5.1	Investitionen – Geplant / Tatsächlich	31
4.5.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung – Geplant / Tatsächlich	32
4.6	Förderung nach dem KWK-Gesetz	34
4.7	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	34
5	Empfehlungen	34
5.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	34
5.2	Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens / der Anlage / des Produktes)....	35
5.3	Zusammenfassung	36
6	Literaturverzeichnis	37
7	Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse	38
8	Anhang.....	39
8.1	Messwerte von April 2012 bis März 2013 zum Kapitel „4.2Stoff- und Energiebilanz/ 4.2.1 Messwerte HKW-Kempen, hier KWK-Module; ORC-Anlage; Kesselanlage“	39
8.2	Vergleichende Emissionsberechnung aus: „4.3Umweltbilanz“	39
8.3	Datengrundlagen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	39

1 Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BET	Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BMU	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
EEX	European Energy Exchange (Energiebörse)
ENEV	Energieeinsparverordnung
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GuD-Kraftwerk	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
HKW	Heizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
KWKModG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
ORC	Organic-Rankine-Cycle
TA-Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
VAWs	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdetes Stoffen

2 Einleitung

2.1 Kurzbeschreibung der beteiligten Unternehmen

2.1.1 Stadtwerke Kempen GmbH

Die Stadtwerke Kempen GmbH ist ein kommunales Energieversorgungsunternehmen, das sich zu 100 % im Besitz der Stadt Kempen befindet. Als Verbundunternehmen betreiben die Stadtwerke folgende Geschäftsfelder:

- Stromversorgung (10 kV und 0,4 kV)
- Gasversorgung
- Wasserversorgung inkl. Wassergewinnung
- Fernwärmeversorgung
- Betrieb des Badebetriebes „Sauna und Wasserwelt aqua-sol“

Einige Kennzahlen der Stadtwerke Kempen GmbH sind:

Umsatzerlöse in 2012: 49,4 Mio. €
Mitarbeiter in 2012: insgesamt 83 Mitarbeiter, plus 7 Auszubildende

Die Stadtwerke Kempen engagieren sich seit vielen Jahren im Bereich der Energieeinsparung und der regenerativen Energieerzeugung wie z.B. die Stromerzeugung mittels Photovoltaikanlagen. Die Stadtwerke Kempen haben im Jahr 2010 gemeinsam mit 25 anderen Stadtwerken und der RWE AG das Gemeinschaftsunternehmen „Green GECCO GmbH“ gegründet. Ziel der Gesellschaft sind die gemeinsame Entwicklung deutscher und europäischer Projekte in den Bereichen Biomasse, Windkraft, Geothermie, Biogas, Wasser und Solarthermie.

Im Rahmen der Fernwärmeversorgung betreiben die Stadtwerke Kempen ein Blockheizkraftwerk (BHKW), in dem Wärme und Strom erzeugt wird. Die in diesem Projekt beschriebene innovative Abwärmeverstromung wurde in diesem BHKW der Stadtwerke Kempen umgesetzt.

2.1.2 ETI Energietechnische Ingenieure GmbH

Die ETI sind ein Ingenieurtechnisches Planungsbüro mit Schwerpunkt in der Energietechnik. Firmensitz der ETI ist Heidelberg. Für die Stadtwerke Kempen GmbH wurde im Jahr 2007 die Erneuerung der aus dem Jahr 1990 stammenden vier KWK-Module geplant, inkl. Modernisierung der gesamten übergeordneten Steuerung. Mit einer Machbarkeitsstudie hat die ETI GmbH im Jahre 2009 die Grundlage für eine zusätzliche Erweiterung des BHKWs um eine ORC-Anlage gelegt.

2.1.3 Turboden

Turboden ist ein Unternehmen mit Sitz in Norditalien und ist auf Anwendungen im Bereich der ORC-Technologie (ORC: Organic-Rankine-Cycle) spezialisiert. Seit 1980 konzentriert Turboden seine Betriebsaktivität auf den Entwurf und die Herstellung von ORC-Anlagen für dezentrale Stromerzeugung in Anwendungsbereichen mit erneuerbarer Energie und industrieller Wärmerückgewinnung. Weltweit hat Turboden bisher 276 Anlagen mit einer elektrischen Leistung von über 365 MW_{el} gebaut [3]. Die Firma Turboden hat die im hier beschriebenen Projekt verbaute ORC-Anlage geliefert.

2.1.4 AGO AG Energie + Anlagen

Die AGO AG Energie + Anlagen ist Spezialist im Bereich innovativer und effizienter Energieversorgungsanlagen für Industriekunden und Kommunen. Die Kernkompetenz der Gesellschaft liegt vor allem bei Blockheizkraftwerken, im wärme-, kälte- und lufttechnischen Anlagenbau, Biomasseheizkraftwerken und der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts war die AGO AG vor allem für die Thermoöl- und Fernwärmeverrohrung sowie für den Bau der Lüftungsanlagen und den Stahlbau zuständig [4].

2.2 Ausgangssituation

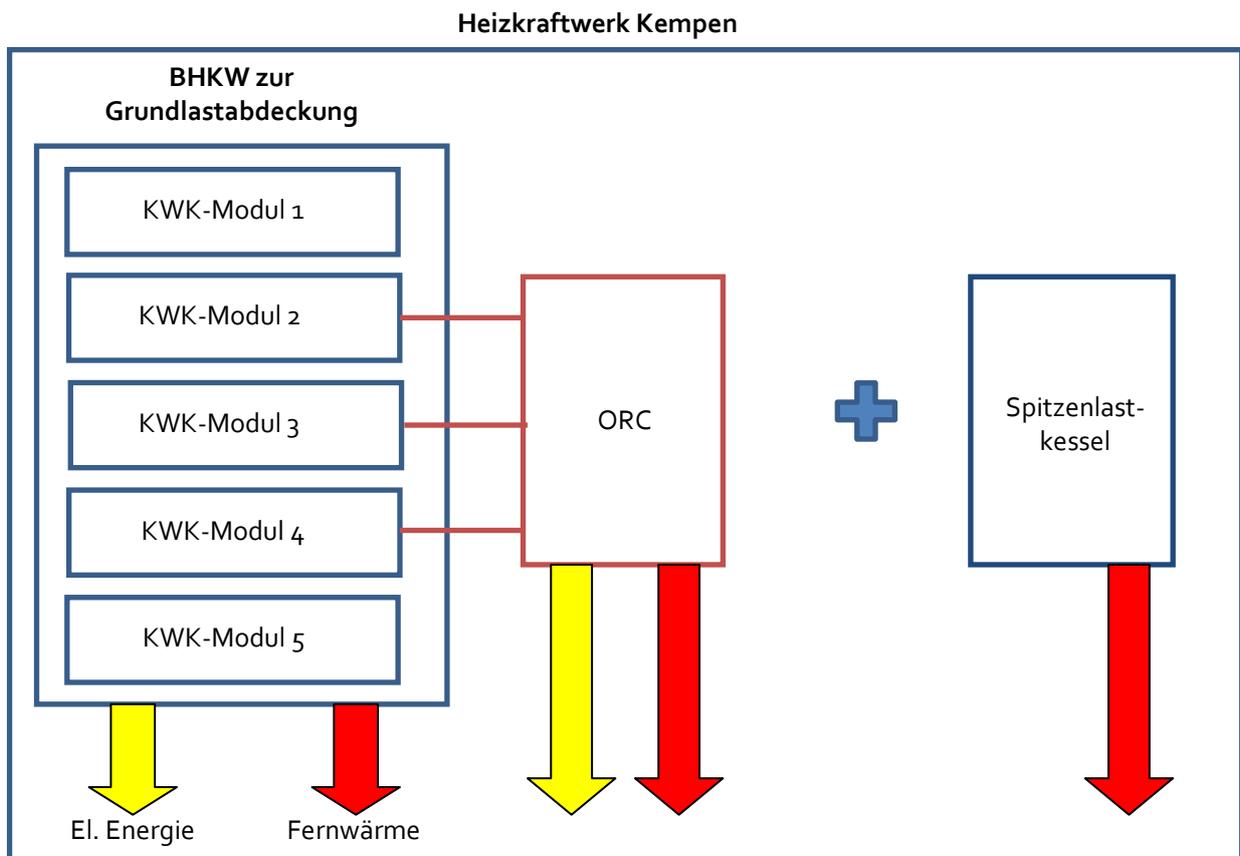


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau des Heizkraftwerks in Kempen [2]

Das Heizkraftwerk (HKW) der Stadtwerke Kempen GmbH besteht aus einem BHKW mit fünf KWK-Modulen zur Grundlastabdeckung sowie einer Kesselanlage zur Spitzenlastabdeckung (blauer Teil in Abbildung 3). Die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme in den KWK-Modulen wird zur Fernwärmeerzeugung genutzt. Dabei werden die KWK-Module „wärmegeführt“ betrieben. Das bedeutet, die Anlage wird durch die nachgefragte Wärmemenge geregelt und hat somit höhere Laufzeiten als eine „stromgeführte“ Anlage, was wiederum der Wirtschaftlichkeit der Anlage zugute kommt.

Der Fernwärmeabsatz der Stadtwerke Kempen ist in Abbildung 4 dargestellt.

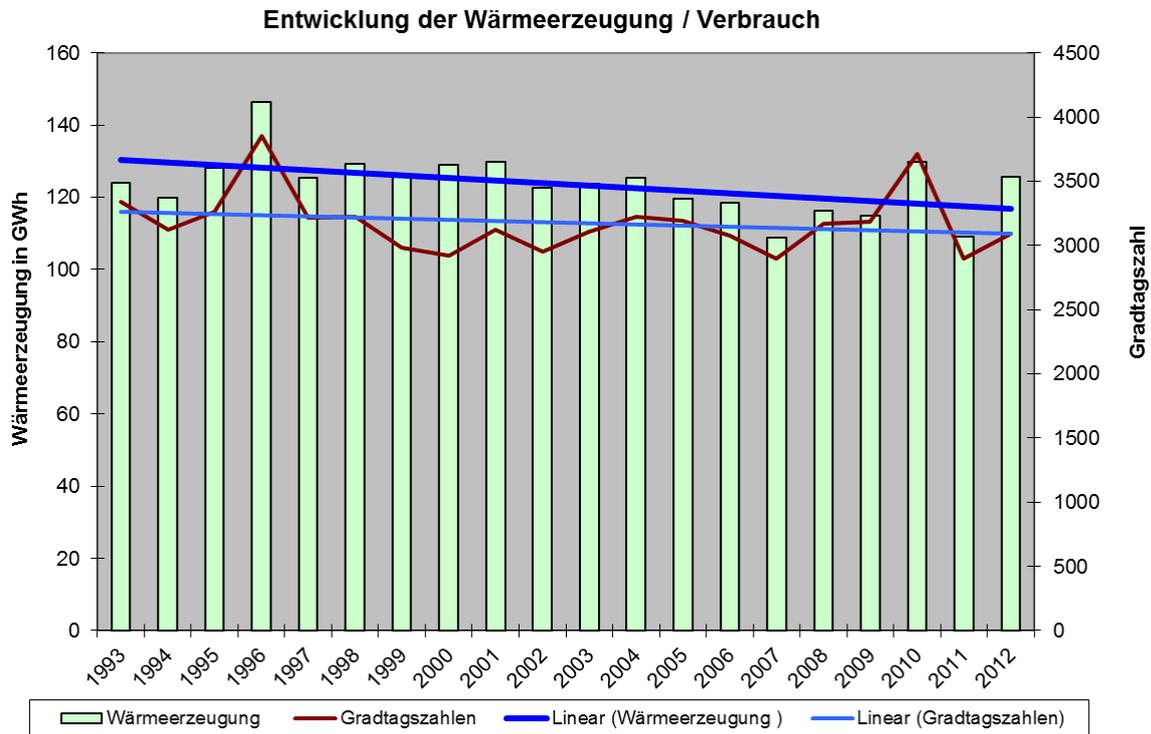


Abbildung 4: Fernwärmeerzeugung der Stadtwerke Kempen [2]

In der Grafik ist ein absteigender Trend im Fernwärmeabsatz ersichtlich. Liegt die Fernwärmeerzeugung im Jahre 2000 noch bei etwa 130 GWh sind es im Jahre 2011 bei annähernd gleicher Gradtagszahl nur noch etwa 110 GWh. Dies liegt vor allem an den gesetzlichen Anforderungen (EnEV 2009) und den inzwischen sichtbaren Ergebnissen von Energieeffizienzberatungen und Modernisierungsmaßnahmen. Die Wärmenachfrage seitens der Verbraucher sinkt und führt damit zu einer geringeren Auslastung der KWK-Module. Als Folge der geringeren Erzeugungsmengen müssen die Energieversorgungsunternehmen mit Umsatzeinbußen bei der Strom- und Wärmeerzeugung rechnen. Aus diesem Grund müssen Maßnahmen getroffen werden, um die Auslastung der KWK-Erzeugungsanlagen auf anderem Wege zu stabilisieren.

Die Stadtwerke Kempen haben sich daher dazu entschlossen, die bestehenden KWK-Module mit einem zusätzlichen ORC-Prozess zu koppeln (roter Teil in Abbildung 3) und somit einen Teil der Abwärme für die Stromerzeugung nutzen zu können. Dies erhöht die Stromkennzahl und die KWK-Module werden besser ausgelastet.

Allgemeine Erfahrungen mit der ORC-Technik bestehen bereits bei der Stromerzeugung mit Biomasse-Kraftwerken.

3 Vorhabensumsetzung

3.1 Ziel des Vorhabens

Wie schon im Kapitel „2.2 Ausgangssituation“ beschrieben, ist der Wärmeverbrauch rückläufig. Die hierdurch frei werdenden Kapazitäten der KWK-Module sollen in einer ORC-Anlage zur Stromerzeugung genutzt werden. Ein Ziel des Projektes war es, mit Hilfe der ORC-Anlage die Auslastung der vorhandenen KWK-Module zu gewährleisten bzw. im Idealfall sogar zu erhöhen. Gleichzeitig sollte mit dem Projekt die

Stromerzeugung mittels KWK erhöht werden, damit sollten die spezifischen CO₂-Emissionen gesenkt werden.

3.2 Darstellung der technischen Lösung

Das gesamte Heizkraftwerk (HKW) besteht aus fünf KWK-Modulen, die eine Gesamtleistung von rund 13,5 MW_{el} und 14 MW_{th} aufweisen. Die Planung sah vor, die Abgase der baugleichen KWK-Module 1 bis 4 für den Betrieb der ORC-Anlage zu nutzen. Aus Kostengründen wurde dann entschieden, nur die KWK-Module 2, 3 und 4 mit Thermoöl-Wärmetauschern zu versehen und hiermit die ORC-Anlage zu betreiben.

3.2.1 Technische Daten der KWK-Module

Aggregat 1-4	
Typ/Bezeichnung	JMS 616GS mit je
Feuerungsleistung	5 751 kW _{th}
elektrische Leistung	2 427 kW _{el}
Abgas-Wärmeleistung	1 244 kW _{th}
Kühlwärmeleistung	397 kW _{th}
Gemischkühlwärmeleistung	671 kW _{th}
Ölwärmeleistung	241 kW _{th}

Aggregat 5	
Typ/Bezeichnung	MWM 632 V16
Feuerungsleistung	8 560 kW _{th}
elektrische Leistung	3 537 kW _{el}
Abgas-Wärmeleistung	2 217 kW _{th}
Kühlwärmeleistung	1.289 kW _{th}
Schmierölwärmeleistung	290 kW _{th}

Die Aggregate 2, 3 und 4 wurden im Rahmen des Projektes jeweils mit einem zusätzlichen Abgaswärmetauscher ausgerüstet. Die Abgaswärme (3 x ca. 1.000 kW_{th}) treibt den ORC-Prozess an.

3.2.2 Technische Daten der ORC-Anlage

elektrische Leistung:	528 kW _{el}
thermische Leistung (Input)	3.000 kW _{th}
Fernwärme – Leistung (Output)	2.452 kW _{th}
Thermoöltemperatur (Verdampfer)	310°C / 142°C
Fernwärmtemperatur (Kondensator)	50°C / 60°C

3.2.3 Beschreibung der kombinierten Anlagenschaltung

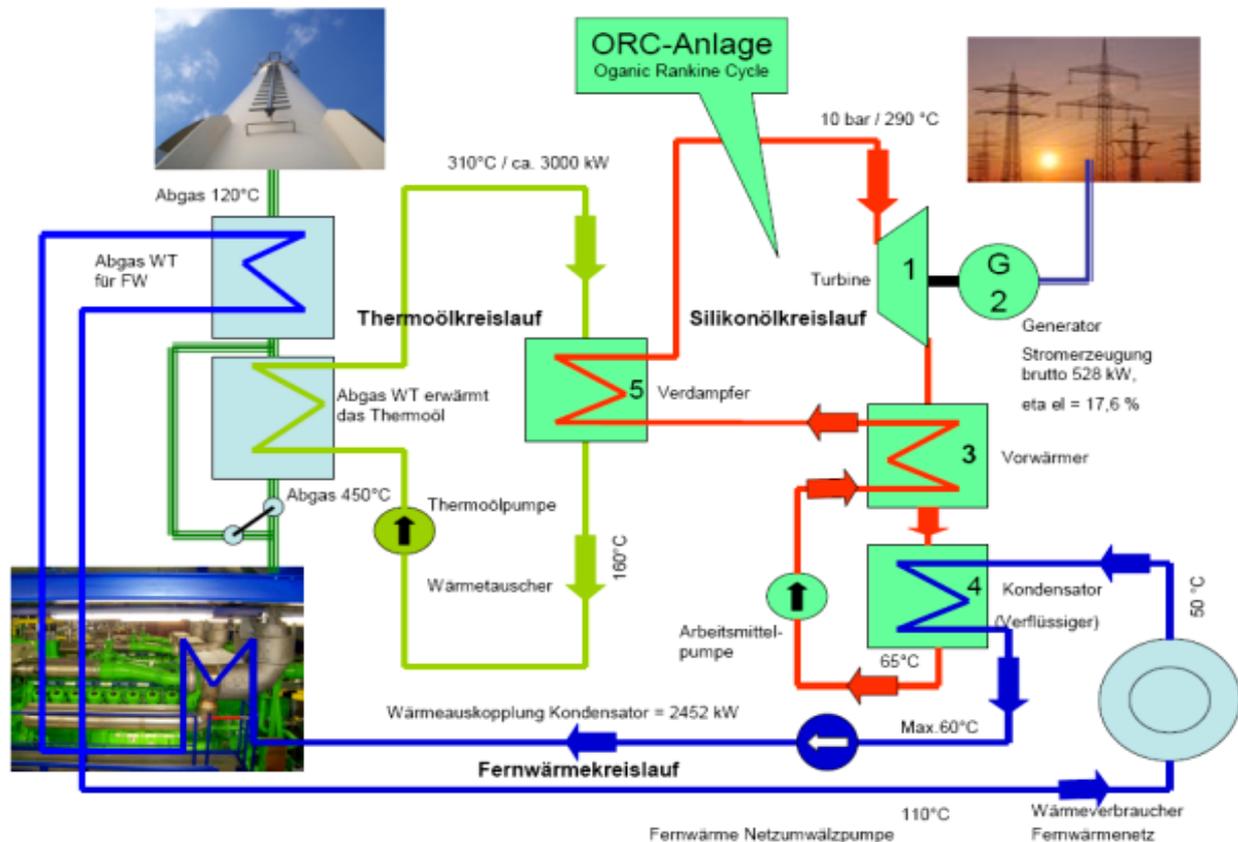


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema der Anlagenschaltung im HKW [2]

In Abbildung 5 ist das vereinfachte Schema der Anlagenschaltung dargestellt. Obwohl im HKW Kempen die Abgase aus drei KWK-Modulen für die ORC-Anlage genutzt werden, ist zur Vereinfachung - sowohl in der Abbildung als auch in der nachfolgenden Beschreibung - nur der Abgaswärmetauscher aus einem KWK-Modul aufgeführt.

Abgasprozess der KWK-Module

Die Abgase aus den KWK-Modulen werden zum Thermoölkessel geleitet. Dort geben die rund 450 °C warmen Abgase ihre Energie an den Thermoölkreislauf ab. Dabei erwärmt sich das Thermoöl auf 310 °C. Die Abgase verlassen den Thermoölkessel mit maximal 180 °C und treten in den Abgaswärmetauscher für den Fernwärmekreislauf ein. Dabei wird das Abgas weiter auf 90 bis 120 °C abgekühlt und erwärmt gleichzeitig den Fernwärmekreislauf auf ca. 85 bis 110 °C. In den Abgasleitungen sind Absperrklappen eingebaut, mit denen wahlweise zwei Betriebsweisen gewählt werden können:

1. Betrieb der ORC-Anlage

In diesem Betriebspunkt wird Abgas primär zum Thermoölkessel und anschließend zum Abgaswärmetauscher für die Fernwärme transportiert.

2. Betrieb Fernwärme

In Zeiten eines sehr hohen Fernwärmebedarfs (Außentemperatur 0 °C oder niedriger) wird die ORC-Anlage gestoppt und die Abgase werden direkt über einen Bypass zum Abgaswärmetauscher für die Fernwärme geleitet.

Thermoölkreislauf

Im Thermoölkessel wird das Thermoöl auf maximal 310 °C erwärmt und gelangt dann zum Verdampfer der ORC-Anlage. Dort findet ein Energieübertrag vom Thermo- auf das Silikonöl (Arbeitsmittel im ORC-Prozess) statt. Anschließend verlässt das Thermoöl den Verdampfer mit etwa 142 °C, wird von einer Umwälzpumpe angesaugt und wieder zum Thermoölkessel gefördert. Der Thermoölkreislauf ist drucklos.

ORC-Prozess (Silikonkreislauf)

Der Funktionsweise eines ORC- Prozesses ist in Abbildung 6 in einem T,s-Diagramm dargestellt.

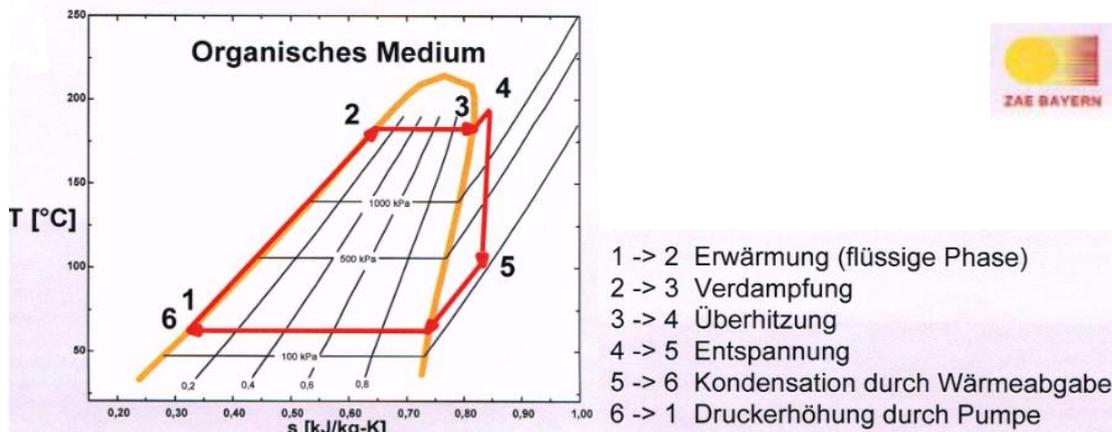


Abbildung 6: ORC-Prozess im T,s Diagramm [5]

Das Silikonöl wird im Verdampfer verdampft und erwärmt sich bei einem Druck von circa 10 bar auf rund 290 °C (Schritt 1→4). Der Silikon Dampf tritt in die Turbine der ORC-Anlage ein (Punkt 4). Die Turbine treibt einen Generator an und erzeugt eine elektrische Leistung von 528 kW. Dieser Strom wird in das Niederspannungsnetz der Stadtwerke Kempen eingespeist. Das Silikonöl tritt aus der Turbine aus (Punkt 5) und durchströmt im dampfförmigen Zustand zuerst einen Wärmetauscher in dem das flüssige Silikonöl vorgewärmt wird. Dem Vorwärmer ist ein Kondensator nachgeschaltet, in dem der Dampf gekühlt und damit verflüssigt wird (Schritt 5→6). Als Kühlmedium dient im HKW Kempen das 50 °C warme Wasser aus dem Rücklauf des Fernwärmekreises. Es wird dabei auf maximal 60°C am Kondensatoraustritt vorgewärmt.

Die Nutzung der Kondensationswärme zur Vorwärmung des Fernwärmekreises stellt eine neuartige Verfahrenskombination dar, wobei die Kondensationswärme nicht über Rückkühler an die Umgebung abgeführt, sondern effektiv und ressourcenschonend zur Vorwärmung der Fernwärme genutzt wird. Ein Notkühler soll bei Störungen im Fernwärmenetz die Eintrittstemperatur am Kondensator auf 55 °C begrenzen, wenn die Fernwärmerücklauftemperatur auf über 55 °C ansteigt. . Der Notkühler dient der Anlagensicherheit und verhindert Schäden durch Überhitzung. Im Normalbetrieb wird er nicht benötigt. Das verflüssigte Silikonöl verlässt den Kondensator mit etwa 80 °C und wird von einer Speisepumpe wieder auf einen Druck von etwa 10 bar verdichtet (Schritt 6→1). Ein Teil des Silikonöls fließt durch den Wärmetauscher und wird durch das dampfförmige Silikonöl vorgewärmt. Ein anderer Teil fließt direkt zum Verdampfer und der Kreislauf beginnt von neuem.

3.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte von der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme und die eventuell damit verbundenen Hemmnisse dargestellt.

Das gesamte Projekt „Verstromung von KWK-Abwärme durch eine ORC-Anlage“ lief in der Zeit von 2008 bis März 2013.

Die wichtigsten Meilensteine in dem Projekt waren:

2009	Aufsichtsrat - Beschluss zum Bau der ORC-Anlage
2010	Ausschreibung der Gewerke
24.09.2010	Förderzusage BMU-Umweltinnovationsprogramm
20.10.2010	Erster Spatenstich durch den ehem. Bundesumweltminister Dr. Norbert Röttgen
2011	Bau der ORC-Anlage
2012	Inbetriebnahme der ORC-Anlage und Probebetrieb
19.09.2012	Aufnahme des regulären Betriebes
2013	Ende der Test und Erprobungsphase

3.3.1 Vorbereitende Arbeiten bis September 2010

In 2009 wurde das Ingenieurbüro ETI beauftragt, eine Machbarkeitsstudie über den Einsatz einer ORC-Anlage im HKW Kempen zu erstellen. Im Zuge dieser Arbeiten wurde zur Grundlagenermittlung unter anderem auf Basis vorhandener Betriebsdaten eine Jahresdauerganglinie für die Fernwärmeerzeugung im HKW Kempen erstellt.

Anhand dieser Daten konnte untersucht werden, ob und mit welcher thermischen Leistung eine ORC-Anlage in das HKW Kempen eingebunden werden kann. Als Ergebnis der Machbarkeitsstudie ergab sich eine optimale Größe der ORC-Anlage von ca. 500 kW elektrischer Leistung. Abschließende Wirtschaftlichkeitsberechnungen mündeten letztendlich im Beschluss zum Bau der ORC-Anlage durch den Aufsichtsrat der Stadtwerke Kempen GmbH im September 2009.

Ende 2009 wurden die Ausschreibungsunterlagen für die Lose 1 bis 4 verschickt.

Los 1 = ORC-Turbine	3 Angebote
Los 2 = Anlagenbau:	7 Angebote
Los 3 = Rohbau:	2 Angebote
Los 4 = Elektrotechnik:	2 Angebote

Aus Kostengründen wurde entschieden, aus dem Los 2 „Anlagenbau“ die Thermoölwärmetauscher herauszunehmen und diese separat bei zwei Lieferanten anzufragen.

Entgegen der Planung, die vorsah, die KWK-Module 1 bis 4 mit Thermoölwärmetauscher zu versehen, wurde ebenfalls aus Kostengründen entschieden, nur noch 3 KWK-Module mit Wärmetauschern zu versehen.

Die Auswertung der Angebote und der Vergabegespräche – speziell der technischen und kaufmännischen Klärung – erfolgten im Zeitraum März bis Juni 2010. Die Auftragsvergabe der einzelnen Lose wurde ab Oktober 2010 entschieden.

Viel Zeit und Arbeit nahm die Erstellung des Genehmigungsantrages nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), siehe hierzu auch Punkt 2.4, und die Beantragung auf Förderung im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms in Anspruch.

3.3.2 Bauabwicklung

Im Folgenden wird die Bauabwicklung anhand der Lose in zeitlich chronologischer Reihenfolge dargestellt.

Los 3: Rohbau

18.04.2011 - 27.05.2011: Errichtung Maschinenhalle (siehe Abbildung 7)
02.05.2011 – 20.05.2011: Fundamentplatte Thermoölmwärmetauscher



Abbildung 7: Rohbau Maschinenhalle [1]

Los 2: Anlagenbau

27.05.2011 – 08.11.2011: Montage der Rohsysteme und Anlagenteile wie z. B.

- Aufstellung Thermoölmwärmetauscher
- Montage der Notkühler
- Thermoölverrohrung
- Fernwärmerohrleitungen
- Kühlwasserverrohrung
- Anschluss der Fernwärmeverrohrung an das vorhandene Fernwärmesystem
- Montage der Lüftungsanlage
- Änderung und Anpassung der Abgasverrohrung der KWK-Module
- Diverse Stahlbaukonstruktionen
- Montage diverser Pumpen und Behälter
- Befüllung der Anlage und Druckprobe

Der Rohrleitungsbau wurde während der gesamten Bauzeit vom TÜV Rheinland überwacht.

20.06.2011: Anlieferung der Thermoölmwärmetauscher

Los 1: ORC-Anlage

- 24.08.2011: Anlieferung der ORC-Turbine und Einbringung in die Maschinenhalle (s. Abbildung 8)
- September 2011: Verkabelung der ORC-Anlage intern
- Oktober 2011: Wärmedämmung der ORC-Anlage



Abbildung 8: Anlieferung der ORC-Turbine [1]

Los 4: Elektroarbeiten

- 17.06.2011 – 08.11.2011: Montagezeitraum
- Lieferung und Montage einer zusätzlichen Niederspannungsverteilung
 - Einbindung der Niederspannungsverteilung in die vorhandene Verteilung
 - Lieferung und Montage der Hilfsantriebsfelder
 - Anpassung der Zentralen Leittechnik
 - Verkabelung der Niederspannung und Leittechnik

Die geplante Inbetriebnahme der ORC-Anlage im November 2011 konnte nicht durchgeführt werden. Eine Ursache hierfür war ein Fehler in der internen Verrohrung der ORC-Anlage. Dieser führte dazu, dass beim Befüllen des Thermoölkreislaufes ca. 1.500 Liter Thermoöl in den Silikonölkreislauf gelangten. Die Fehlersuche und das anschließende Reinigen des Silikonkreislaufes führten zu einer Verzögerung von rund 4 Wochen.

Eine weitere Verzögerung trat durch den falsch montierten Leistungsschalter der ORC-Anlage auf. Dieser war nicht richtig justiert, so dass die Anschlusskontakte des Leistungsschalters nicht korrekt in die Anschlusslaschen im Schaltschrank einführen. Beim Einschalten kam es daher zu sehr hohen Einschaltströmen, die letztendlich den Leistungsschalter beschädigten (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Schaltschrank des Leistungsschalters [1]

3.3.3 Inbetriebnahme / Abnahme

Die Inbetriebnahme der Gesamtanlage fand im Zeitraum von Dezember 2011 bis März 2012 statt. Die Abnahme der Leistungen aller Gewerke wurde am 07.03.12 durchgeführt.

Vor der warmen Inbetriebnahme wurden alle Systeme befüllt und der Thermoöl- und Silikonölkreislauf ausgekocht. Damit wurde möglicherweise vorhandenes Wasser durch Auskochen entfernt. Die eigentliche Inbetriebnahme der ORC-Anlage verlief nach Beseitigung der zuvor beschriebenen Störungen reibungslos. Zuerst wurde das Thermoöl auf 300°C erwärmt und anschließend die Startprozedur der ORC-Turbine eingeleitet. Nachdem die Turbine eine Drehzahl von 3005 U/min erreicht hat, wurde der Leistungsschalter des Synchrongenerators geschlossen. Die Leistungssteigerung der ORC-Anlage erfolgt durch Vergrößerung des Thermoöldurchflusses durch den Verdampfer.

Während der Inbetriebnahme wurden sämtliche Sicherheitseinrichtungen getestet, insbesondere die Steuerung der Abgasklappen. Die Turbine wurde langsam auf 100 % Leistung hochgefahren. Getestet wurde nacheinander der Betrieb mit drei, zwei und einem KWK-Modul zur Beheizung des Thermoölkreislaufes.

3.3.4 Probetrieb

Die Inbetriebnahme der ORC-Anlage erfolgte im Februar/März 2012. Bei der Leistungsabnahme am 07.03.2012 wurde ein Mängelprotokoll für die Gesamtanlage erstellt und alle Mängel bis zum 31.08.2012 beseitigt. Die Test- und Probetriebsphase fand damit zwischen dem 01.03.2012 und dem 31.08.2012 statt. Anschließend begann der reguläre Dauerbetrieb am 19.09.2012.

Der planmäßige Probetrieb betrug einen Monat. Dieser wurde aufgrund verschiedener Probleme verlängert. Zum einen gab es Probleme mit der Vakuumbhaltung im Kondensator und zum anderen wurde seitens der Firma Turboden bei der Montage im Werk im „Inneren ORC Rohrsystem“ eine Silikonleitung mit der Thermoölvorwärmeleitung vertauscht. Der Fehler wurde offensichtlich von der Fa. Turboden bei der Werksabnahme nicht bemerkt.

Aufgrund dessen mussten weitere Maßnahmen durchgeführt werden. Zunächst wurde das Thermoöl aus dem ORC-System restlos wieder entfernt, und es fand eine Nachkontrolle im Beisein der Stadtwerke Kempen statt. Die falsche Rohrführung wurde geändert und das System erneut einer Druckprobe unterzogen. Abschließend wurde ein Schadensbericht erstellt und vorgelegt.

3.4 Behördliche Anforderungen

Das BHKW Kempen ist eine genehmigungsbedürftige Anlage im Sinne der Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV). Die Feuerungswärmeleistung des BHKW beträgt insgesamt 81 MW.

Für die ORC-Anlage war ein Genehmigungsantrag auf wesentliche Änderung nach § 16 des BImSchG zu stellen. Der Änderungsantrag wurde am 21.04.2010 bei der Bezirksregierung Düsseldorf eingereicht und am 08.12.2010 wurde eine Genehmigung nach §§ 6, 16 BImSchG in Verbindung mit Nummer 11, Spalte 1 des Anhangs der Verordnung für genehmigungsbedürftige Anlagen (BImSchV) erteilt.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ergaben sich die in Kapitel 2.4.1 bis 2.4.7 aufgeführten Probleme.

3.4.1 Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm)

Das BHKW befindet sich in einem Gewerbegebiet im Norden von Kempen. Ein Plan des Gebietes ist in Abbildung 10 dargestellt. Westlich des Heizkraftwerks in ca. 180 m Entfernung befindet sich am Immissionspunkt „lo 2“ ein reines Wohngebiet und nordwestlich am Immissionspunkt „lo 3“ ein allgemeines Wohngebiet. Das Nebeneinander von Gewerbe-/Industriegebiet und Wohngebiet geht auf die städtebauliche Entwicklung der 1960er und 1970er Jahre zurück, als die Belange des Lärmschutzes noch nicht den heutigen Stellenwert hatten. An den Immissionspunkten darf die Summe der Lärmbelastung aller Betriebe nicht über den Grenzwerten liegen (s. Tabelle 4).

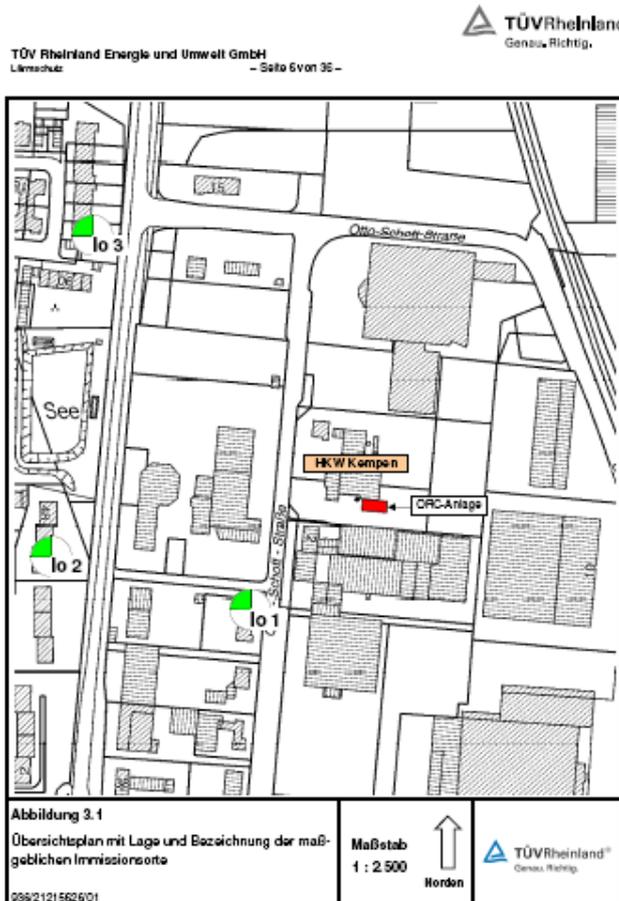


Abbildung 10: Übersichtplan für die Schallprognose im Gewerbegebiet im Norden von Kempen [6]

Immissionspunkt	tags	nachts
lo 1 Otto-Schott-Str.	65 dB(A)	50 dB(A)
lo 2 Röntgenstraße	50 dB(A)	35 dB(A)
lo 3 Behring Str. 94	55 dB(A)	40 dB(A)

Tabelle 4: Zulässige Grenzwerte für die Immissionspunkte „lo 1“, „lo 2“ und „lo 3“ [6]

Kritisch einzuhalten war hierbei der Nachtwert für den Immissionspunkt „lo 2“ in der Röntgenstraße. Aufgrund der Anforderung „reines Wohngebiet“ darf der Gesamtpegel von 35dB(A) dort nachts nicht überschritten werden. Das BHKW inkl. neuer ORC-Anlage muss nach TA-Lärm 6 dB(A) unter dem Grenzwert liegen, d. h. der maximale Schallpegel darf 29 dB(A) betragen. Da das BHKW aber schon ohne ORC einen Pegel von 32 dB(A) hat und bereits in der Vergangenheit schalltechnisch optimiert wurde, war eine Einhaltung der 29 dB(A) nicht zu erwarten. Die einzige Möglichkeit, kurzfristig eine Genehmigung zu erteilen, bot die Formulierung des Punktes 3.2.1 (Absatz 5) der TA-Lärm: „Kann eine Überdeckung der

Anlagengeräusche in mehr als 95 % der Zeit durch Fremdgeräusche nachgewiesen werden, wäre das Projekt trotz Überschreitung genehmigungsfähig“.

Eine zweite Möglichkeit war die Beantragung der Ausnahme nach Ziffer 6.7 der TA-Lärm, die aufgrund der vorhandenen Gemengelage (Gebiete mit grundsätzlich unterschiedlichen Nutzungen) in Anspruch genommen werden konnte.

Beide Möglichkeiten mussten für die Genehmigung jedoch nicht zum Einsatz kommen, da bei der Abnahme am 10.2 ein gemessener Immissionspegel von 28,3 dB(A) vorhanden war und damit die Gesamtgeräuschbelastung um 6,7 dB(A) unterschritten wurde.

Zur Geräuschminimierung der ORC-Anlage wurde der Notkühler mit reduzierten Schallemissionswerten installiert, was wiederum aufgrund der höheren Gewichte einen verstärkten Stahlbau erforderte. Des Weiteren wurden die Abluftöffnungen der Lüftungsanlage von der Westseite der Maschinenhalle zur Nordseite verlegt. Dies wiederum hatte einen zusätzlichen Aufwand bei der Luftführung in der Maschinenhalle durch den Bau von zusätzlichen Zugluftkanälen zur Folge.

3.4.2 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)

Da sich an der Feuerungswärmeleistung und damit an den maximal genehmigten Schadstoffemissionen der vorhandenen KWK-Module durch den Zubau der ORC-Anlage nichts geändert hat, konnte hier mit Zustimmung der Genehmigungsbehörde auf ein Emissionsgutachten verzichtet werden.

3.4.3 Wassergefährdende Stoffe / Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS)

Vor dem Hintergrund des Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen wurde ein Sachverständiger nach § 11 VAwS mit der gutachterlichen Beurteilung des Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen und der Erstellung der Bescheinigung gemäß § 7 (4) VAwS beauftragt.

Auf Grundlage der oben genannten gutachterlichen Beurteilung wurde der Boden des Aufstellraumes der ORC-Anlage als Auffangwanne errichtet. Desgleichen wurde die Fundamentplatte der im Freien stehenden Thermoöl-Abgaswärmetauscher als Auffangwanne ausgebildet. Sollte es hier zu einer Leckage beim Thermoöl kommen, wird der Schmutzwasser-Kanalanschluss über einen Motorschieber automatisch geschlossen.

3.4.4 Arbeitsschutz

Die Kombination der Gasmotoren-KWK-Module in Verbindung mit einer ORC-Anlage ist in dieser Form und Größe erstmalig in Kempen verwirklicht worden. Somit wurde hinsichtlich des Arbeitsschutzes und der Anlagensicherheit technisches Neuland betreten. In enger Abstimmung mit dem zuständigen Dezernat für Arbeitsschutz bei der Bezirksregierung Düsseldorf konnten gute Lösungen erarbeitet werden. Neben den üblichen Absicherungen für Wärmetauscher wie z.B. Sicherheitstemperaturbegrenzer wurden weitere Sicherheitsmaßnahmen wie z.B. redundante Thermoölpumpen, elektronische Sicherheitstemperaturbegrenzer und -wächter, leittechnische Absicherung der Thermoöltemperatur durch Regelung der Abgasklappen und die Überwachung der Differenzdrücke thermoölseitig über die Abgaswärmetauscher ergriffen.

Sämtliche Schweißarbeiten an den Thermoölleitungen wurden durch einen Sachverständigen des TÜV Rheinland begleitet, begutachtet und abgenommen. Abschließend wurde die fertige Anlage einer Druckprobe unterzogen. Die sicherheitstechnische Abnahme erfolgte ebenfalls durch einen Sachverständigen vom TÜV Rheinland.

3.4.5 Baurecht

Der Brandschutz stellte sich bei der baurechtlichen Genehmigung vor allem für die vorhandene Bestandsanlage als sehr aufwändig dar. Das vorgelegte Brandschutzkonzept für die neue Maschinenhalle der ORC-Anlage wurde nicht akzeptiert. Deshalb musste für das gesamte BHKW einschließlich der neuen ORC-Halle ein Brandschutzkonzept erstellt werden. Da es keinen Bestandsschutz beim Brandschutz gibt, mussten die Stadtwerke Kempen durch die beantragte Änderung nach § 16 BImSchG ein neues Brandschutzkonzept erstellen, welches den zum Zeitpunkt geltenden Vorschriften entsprach. Um den neuen Vorschriften Genüge zu leisten, wurden im Gebäudebestand umfangreiche Maßnahmen, wie z. B. der Austausch und Einbau von Feuerschutztüren, die Errichtung von Rauchabzugsanlagen und Entlüftungsöffnungen durchgeführt.

3.4.6 Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens musste eine Bewertung der Umweltverträglichkeit durchgeführt werden. Hierzu reichte aufgrund der Anlagengröße eine Vorprüfung nach Anlage 2 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) aus.

3.4.7 Erfahrungen aus dem Genehmigungsverfahren

Der Betreiber hat seit 1990 mehrfach Genehmigungsanträge nach dem BImSchG erstellt. Der Umfang der Anträge wird hierbei von Projekt zu Projekt jedes Mal größer. Erfahrungsgemäß werden die Genehmigungsverfahren aufwendiger und erfordern mittlerweile auch für kleine Anlagen, wie sie von den Stadtwerken Kempen betrieben werden, Sachverständige und Gutachter für jedes Fachgebiet.

Für eine zügige und koordinierte Durchführung des Vorhabens empfiehlt es sich, frühzeitig im Vorfeld der Planungen die Genehmigungsbehörden mit einzubeziehen.

Rückblickend entstanden die größten Herausforderungen für die Genehmigungen bei der TA-Lärm durch die unmittelbare Nähe zu den Wohngebieten.

3.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Die erdgasbetriebenen KWK-Module 2, 3 und 4 sind durch den Einbau der zusätzlichen Thermoöl-abgaswärmetauscher modernisiert und um die ORC-Anlage erweitert worden. Wie das Schema in Abbildung 11 zeigt, bilden die Module 2, 3 und 4 in Verbindung mit der ORC-Anlage den Block 2 und stellen ein modernisiertes BHKW im Sinne des KWK-Gesetzes 2012 dar. Die KWK-Module 1 und 5 werden unverändert weiterbetrieben und sind als Block 1 dargestellt.

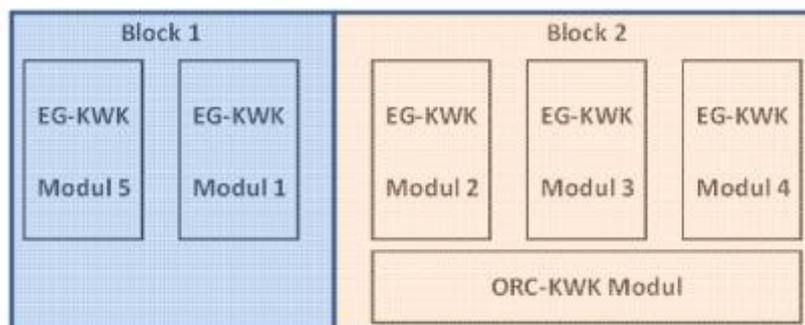


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anlagenblöcke im BHKW [7]

Nach § 8 des KWK-Gesetzes in der aktuellsten Version vom 12. Juli 2012 ist folgende Regel für die Messung von Strom und Wärme vorgesehen:

„Zur Feststellung der eingespeisten Strommenge und der abgegebenen Nutzwärmemenge hat der Netzbetreiber auf Kosten des Betreibers der KWK-Anlage Messeinrichtungen anzubringen, die den eichrechtlichen Vorschriften entsprechen“[8]

Wie in Abbildung 12 dargestellt werden die Energieflüsse für jedes Modul getrennt gemessen.

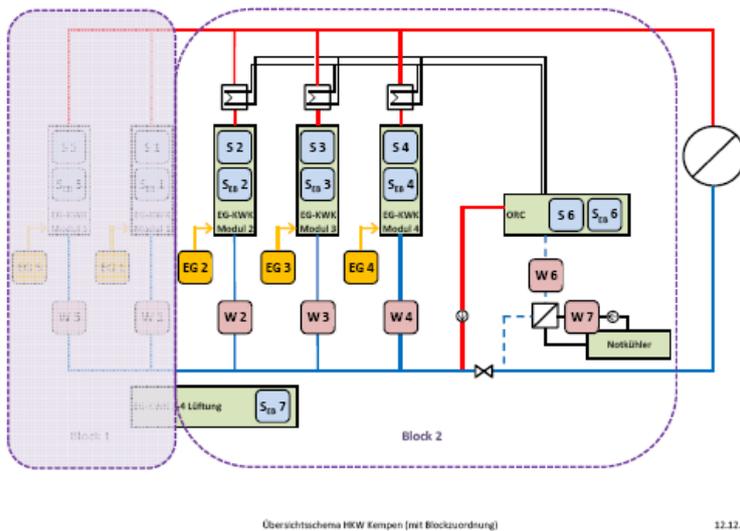


Abbildung 12: Schematische Anordnung der Messstellen [7]

Es wird sowohl der Gasverbrauch als auch die erzeugten Strom- und Wärmemengen der KWK-Module sowie die Stromerzeugung der ORC-Anlage messtechnisch erfasst. Der Eigenstrombedarf der Anlage wird aus dem Stromnetz entnommen und für jedes Modul getrennt gemessen.

Der Abdampf der ORC-Anlage überträgt im Kondensator die Energie auf den Fernwärmerücklauf. Da die ORC-Anlage über einen Notkühler verfügt, der bei zu hohen Rücklauftemperaturen (> 55°C) aus dem Fernwärmenetz die Fernwärmeeintrittstemperatur in den Kondensator absenkt, muss für eine Energiebilanz diese Energiemenge messtechnisch erfasst und von der Fernwärmeeinspeisung abgezogen werden.

Alle Energieströme werden über - zum Teil - geeichte Zähler monatlich erfasst und für statistische Zwecke in einer Exceltabelle abgespeichert. Zusätzlich werden die Stromzähler per Fernauslesung erfasst und ebenfalls gespeichert. Es ist vorgesehen sowohl die Wärmezähler als auch die Gaszähler in die Fernauslesung mit einzubinden.

4 Ergebnisse

4.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Der Betrieb der ORC-Anlage verläuft unproblematisch. Im Betrieb ist es für die Regelung technisch irrelevant, ob die Beheizung des Verdampfers durch ein, zwei oder alle drei KWK-Module erfolgt. Die elektrische Leistung der ORC-Turbine passt sich dem Wärme-Input an. Das Dampfventil wie auch das Bypassventil im Thermoölkreis bleiben hierbei immer voll geöffnet.

Die Kombination KWK-Module mit der ORC-Anlage steigert die Effizienz der Gesamtanlage. Wie Abbildung 13 zeigt, konnte der elektrische Nutzungsgrad der Anlage in den ersten Betriebsmonaten um 1,2 bis 2,5% gesteigert werden.

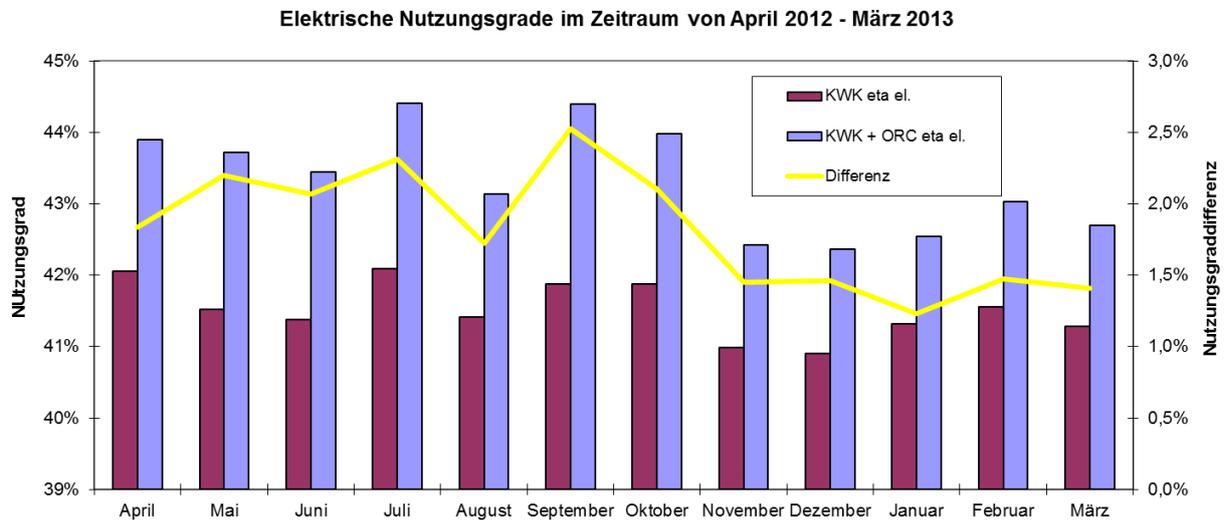


Abbildung 13: Elektrische Nutzungsgrade des BHKWs [2]

Es zeigt sich deutlich, dass die Nutzungsgradsteigerung bis November 2012 deutlich höher war als danach. Diese Werte korrelieren mit der Wärmeauskopplung der Fernwärme und den Einsatzzeiten des Notkühlers die in Abbildung 14 dargestellt sind.

Im BHKW Kempen wird der Kondensator der ORC-Anlage durch den Fernwärmerücklauf (Solltemp. = 50°C) gekühlt. Bei der Kondensation des Arbeitsmittels im Kondensator soll das FW-Wasser hierbei von 50°C bis auf max. 60°C erwärmet werden.

In Abbildung 14 sind sowohl die Wärmeabgabe an die Fernwärme und die Verluste am Notkühler sowie der Gesamtwirkungsgrad der Anlage dargestellt.

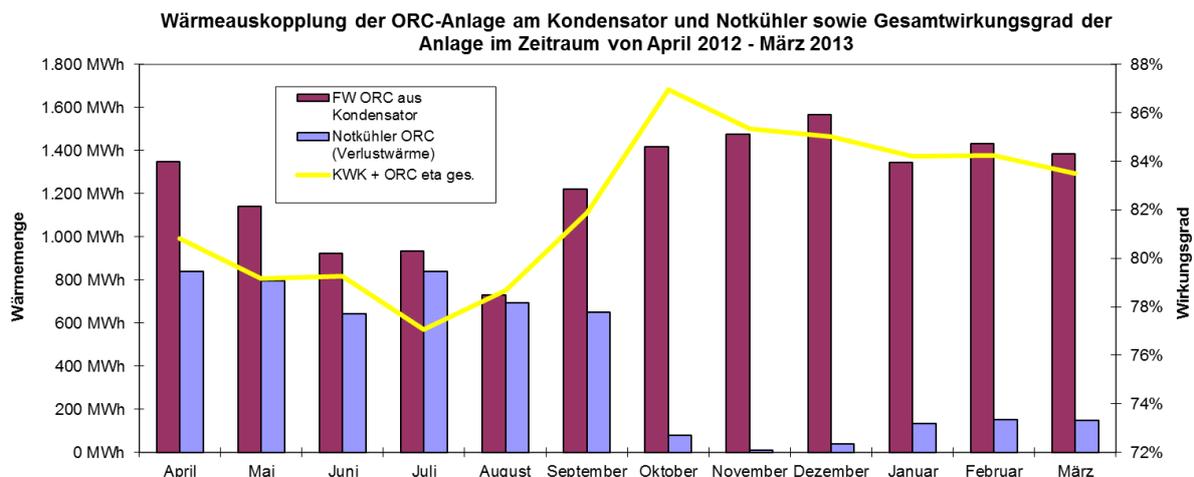


Abbildung 14: Wärmeauskopplung aus Kondensator und durch Notkühler [2]

Es zeigt sich, dass in den ersten Monaten nach der Inbetriebnahme die Wärmeverluste am Notkühler wesentlich höher waren. Dies lag daran, dass die Notkühlung zu Beginn darauf eingestellt war, die Temperatur der Fernwärme am Kondensatoraustritt auf 60°C zu begrenzen. Nachdem der ORC-Prozess ab September 2012 stabil lief und ausreichend Erfahrung gesammelt war, wurde die Notkühlung in den Automatikbetrieb gestellt und springt damit nur dann an, wenn im Fernwärmerücklauf eine zu hohe Temperatur aus dem Netz zurückkommt. Dies ist der Fall, wenn die Fernwärmerücklauftemperatur aufgrund von Störungen bei den Verbrauchern bei über 50°C liegt. Der Einschaltpunkt für den Notkühler wurde auf 55°C am Kondensatoreintritt eingestellt, was jedoch eine Wirkungsgradverschlechterung im Kondensator durch die höheren Kondensationstemperaturen nach sich zieht. Zurzeit wird daran gearbeitet, die Rücklauftemperaturen gemäß Fernwärmeliefervertrag bei den Fernwärmekunden auf maximal 50°C zu begrenzen.

In Abbildung 15 sind die monatliche Stromerzeugung und die durchschnittliche elektrische Leistung der ORC-Anlage abgebildet.

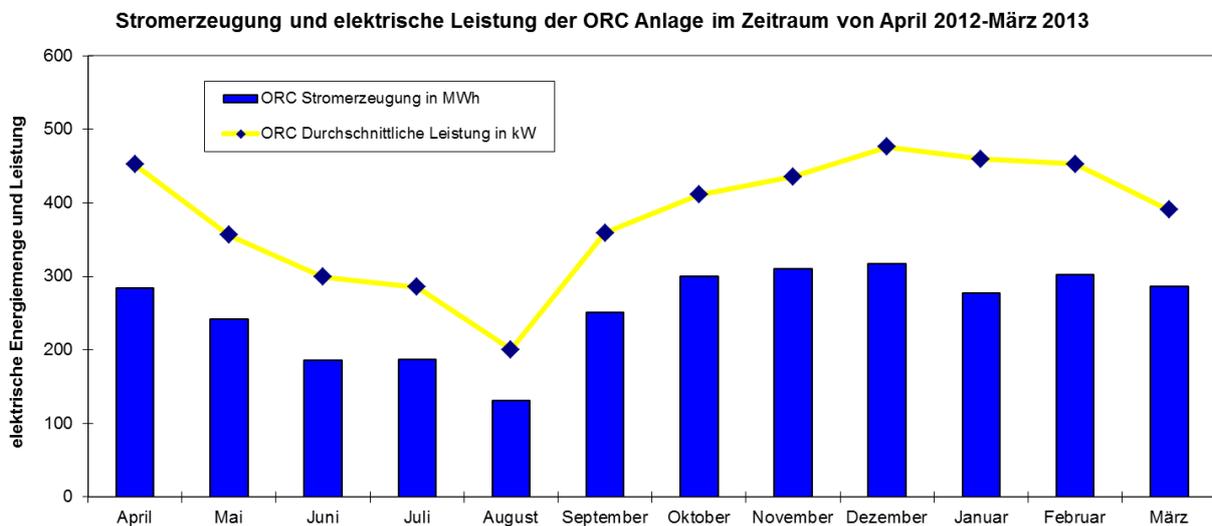


Abbildung 15: Stromerzeugung und durchschnittliche Leistung der ORC Anlage [2]

Auch hier ist ersichtlich, dass die hohen Wärmeverluste an den Notkühlern in den ersten Monaten eine Auswirkung auf die Effizienz der Turbine haben und die Stromerzeugung in diesem Zeitraum durchschnittlich 200 kWh beträgt. Die durchschnittliche jährliche elektrische Leistung der ORC-Anlage betrug ca. 390 kW. Die Nennleistung von 500 kW wurde an einzelnen Tagen unter optimalen Bedingungen (z.B. Fernwärmerücklauftemperatur < 50°C) erreicht.

Die geringste elektrische Leistung wurde in den Sommermonaten erzeugt. Dies liegt zum einen an der niedrigen Wärmeabnahme im Fernwärmenetz. Somit versorgen nur maximal zwei KWK-Module die ORC-Anlage mit Thermoöl. Zum anderen liegt dies an den höheren Fernwärmerücklauftemperaturen in den Sommermonaten. In den Sommermonaten wird Fernwärme nur zur Warmwasserbereitung bei den Kunden benötigt. Aus Hygienegründen wird eine sogenannte „thermische Desinfektion“ in den Warmwasserboilern durchgeführt. Hierbei wird das Warmwasser auf eine Temperatur von mindestens 60°C erhitzt, um Legionellen abzutöten. Damit liegt auch die Fernwärmerücklauftemperatur nicht unter 60°C, wie dies im Winter in den Heizungsanlagen der Fall ist.

Ein Problem der Anlage ist die richtige Einbindung der Kühlwasserpumpe für den ORC-Kondensator. In Abbildung 16 ist das Schema der Fernwärmeeinbindung an den ORC-Kondensator dargestellt.

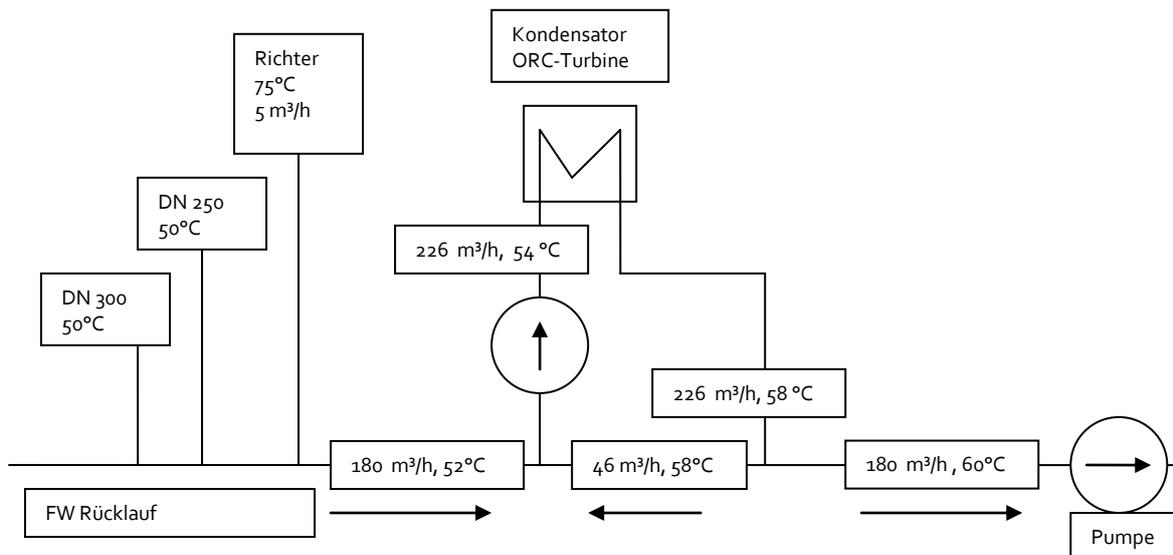


Abbildung 16: Schematische Fernwärmeeinbindung der Kühlwasserpumpe im ORC-Kondensator [2]

Die Kühlung des Kondensators der ORC-Anlage erfolgt mit Wasser aus dem Fernwärmerücklauf. Hierzu wird direkt aus dem Rücklaufsammler Wasser angezapft und mit einer Pumpe zum Kondensator gefördert. Dort erwärmt es sich bis auf maximal 60°C und wird wieder auf der Saugseite der Netzumwälzpumpen dem Fernwärmerücklauf zurückgeführt. Im Sommer ist, wie in Abbildung 16 dargestellt, die Umwälzmenge im Fernwärmenetz mit 180 m³/h niedriger als die Umwälzmenge im ORC-Kühlkreislauf mit 226 m³/h. Das hat zur Folge, dass 60°C warmes Wasser aus der ORC-Anlage im Kurzschluss wieder zurückströmt und die Fernwärmerücklauftemperatur aus dem Fernwärmenetz anhebt. Dies wiederum bewirkt, dass der Notkühler anspringt und versucht, die Fernwärmeeintrittstemperatur in den Kondensator zu begrenzen.

Um das Problem zu lösen, soll das Thermoöl-Bypassventil im Bedarfsfall über die Software gedrosselt werden. Dieses Ventil regelt die Thermoölmenge, mit der der Verdampfer im ORC-Kreislauf beheizt wird. Wird das Thermoöl-Bypassventil gedrosselt, bedeutet dies, dass mehr Abgasenergie der KWK-Module in den Fernwärme-Abgas-Wärmetauscher geleitet wird und damit auch mehr Energie in das Fernwärmenetz. Dies wiederum führt dazu, dass dadurch die Temperaturen im Fernwärmenetz ansteigen. Daraus resultiert eine Reduzierung der KWK-Leistung bei gedrosseltem Thermoöl-Bypassventil, was letztendlich zu einem geringeren Volumenstrom im Fernwärmekreislauf zur ORC-Kühlung führt. Damit wird der Volumenstrom immer kleiner gehalten als im Fernwärmerücklauf vorhanden ist. Damit wird das Problem der Kurzschlussströmung vermieden. Dies zu automatisieren, ist eine anspruchsvolle Aufgabe und wurde bisher noch nicht umgesetzt.

Ein weiteres Problem stellt immer noch die Unterdruckhaltung im ORC-Kondensator dar. Beim Anfahren der Anlage aus einem längeren Stillstand von ca. 1 bis 2 Wochen gibt es Probleme mit der Erzeugung des Vakuums. Auch wenn der Hersteller in der Lage ist, den Unterdruck per Fernwartung zu erzeugen, ist das Problem noch nicht behoben.

Ein unerwartetes Problem ergab sich bei den Kohlenmonoxid-Emissionen. Kurz nach der Inbetriebnahme der ORC-Anlage überschritten die Kohlenmonoxid-Emissionen die zugelassenen Grenzwerte. Messungen ergaben, dass die Oxidationskatalysatoren der Gasmotoren im BHKW nicht mehr arbeiteten. Die Katalysatoren wurden ausgewechselt und zur Analyse zum Hersteller geschickt. Dabei stellte sich heraus, dass die Katalysatoren vergiftet waren, d.h. es wurde eine Konzentration von 14,2 % Silizium gefunden. Als Ursache für die hohen Siliziumgehalte wurde der Staub bei den Bauarbeiten im Zuge der Anlagenerrichtung vermutet.

Nach circa 3000 Betriebsstunden im Oktober/November 2012 wurde erneut eine Überschreitung der Grenzwerte für Kohlenmonoxid-Emissionen bemerkt. Da Bautätigkeiten nun definitiv ausgeschlossen werden konnte, wurde der TÜV mit Luftmessungen und einer Analyse des Energieträgers Erdgas beauftragt. Die Messungen ergaben hohe Werte für Siliziumverbindungen in der Ansaugluft der KWK-Module. Daraufhin kam der Verdacht auf, dass das Silizium aus der ORC-Anlage stammt.

Die Abdämpfe der Vakuumpumpe, die ständig aus dem Kondensator silikonhaltigen Dampf absaugt und damit den Unterdruck hält, wurden über eine Rohrleitung ins Freie geleitet. Diese Dämpfe wurden wiederum im Kurzschluss von den Verbrennungsluft-Lüftern der Gasmotoren angesaugt. Das Silizium setzt sich dann auf den Katalysatoren ab und verhindert letztlich, dass diese arbeiten können.

Die Lösung für dieses Problem bestand darin, dass die Ausblasleitung der Vakuumpumpe verlegt wurde. Inzwischen werden die Siliziumabdämpfe aus dem Kondensator über eine Rohrleitung bis zur Schornsteinmündung in 26 m Höhe geleitet.

Folgemessungen vom TÜV Rheinland bestätigten, dass sich kein Silizium mehr in der Verbrennungsluft befindet.

Hervorzuheben ist hier die konstruktive Zusammenarbeit mit der Überwachungsbehörde bei der Problemlösung.

4.2 Stoff- und Energiebilanz

4.2.1 Messwerte HKW-Kempen, hier KWK-Module; ORC-Anlage; Kesselanlage

Die Messwerte im Heizkraftwerk werden entsprechend dem Messkonzept als Monatswerte aufgenommen und in einer Exceltabelle verarbeitet. Die Daten werden für die KWK-Module, die ORC-Anlage sowie für die Kesselanlage einzeln erhoben.

Anhand der Messdaten vom ersten Betriebsjahr der KWK-Module mit der ORC-Anlage von April 2012 bis März 2013 wurden die jährlichen Nutzungsgrade ermittelt und sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die zugrunde liegenden monatlichen Messdaten befinden sich im Anhang 8.1.

Anlagendaten	Ausgangslage Mittelwerte 2009 - 2011	Geplant lt. Projektbeschreibung	Betrachtungszeitraum April 2012 bis März 2013	1 Betriebsjahr 2012 (Inbetriebnahme der ORC Februar 2012, Testbetrieb bis September 2012)
Stromerzeugung KWK	69.048 MWh	86.790 MWh	75.421 MWh	75.162 MWh
Stromerzeugung ORC	0 MWh	4.129 MWh	3.074 MWh	2.656 MWh
Stromerzeugung KWK mit ORC		90.919 MWh	78.496 MWh	77.818 MWh
Wärmeerzeugung KWK	76.574 MWh	66.168 MWh	62.781 MWh	64.287 MWh
Wärmeerzeugung ORC		20.249 MWh	14.913 MWh	12.968 MWh
Wärmeerzeugung KWK mit ORC		86.417 MWh	77.694 MWh	77.255 MWh
Brennstoffverbrauch KWK	169.692 MWh	206.493 MWh	181.989 MWh	181.986 MWh
Elektrischer Nutzungsgrad	40,69%	44,03%	43,13%	42,76%
Thermischer Nutzungsgrad	45,13%	41,85%	42,69%	42,45%
Gesamtnutzungsgrad	85,82%	85,88%	85,82%	85,21%

Tabelle 5: Nutzungsgrade der Anlage von April 2012 – März 2013 [2]

Der durchschnittliche elektrischen Nutzungsgrad betrug in den Jahren 2009 – 2011 = 40,69 %. Durch die ORC-Anlage konnte dieser Wert um 2,44 % angehoben werden auf 43,13 %. Damit ist das Ziel, den elektrischen Nutzungsgrad um 2 % zu erhöhen, erreicht worden.

Der Gesamtnutzungsgrad von 85,82 % entspricht dem der Vorjahre.

4.2.2 Auslastung

In Abbildung 17 ist die Eigenstromerzeugung der Stadtwerke Kempen für die Jahre 2004 bis 2013 dargestellt.

Die Abbildung zeigt die Stromerzeugung über alle Erzeugungsanlagen und beinhaltet die Stromerzeugung der KWK- und ORC-Anlagen im HKW Kempen sowie die KWK-Module im Hospital und im Schwimmbad „aqua-sol“. Bis 2006 wurden durchschnittlich 50 GWh Strom erzeugt. 2007 wurden die ersten vier KWK-Module im HKW Kempen (Baujahr 1990) gegen neue ersetzt. Durch die verbesserte Leistung konnte die jährliche Stromproduktion ab 2008 auf durchschnittlich 72 GWh gesteigert werden.

Durch die ORC-Anlage und die damit verbesserte Auslastung der KWK-Module konnte die Eigenstromerzeugung im Jahr 2012 auf 82,5 GWh gesteigert werden. Dies entspricht einer erneuten Steigerung von rund 15 %. Der Rückgang in der Stromerzeugung im Jahr 2013 liegt an den schlechten Strompreisen an der Börse. Die Anlagen hatten in 2013 geringere Laufzeiten. Das Ziel ist es, die Erzeugung langfristig auf 86 Mio. kWh zu steigern, was jedoch zurzeit aufgrund der Strompreise an der Börse keine Option darstellt.

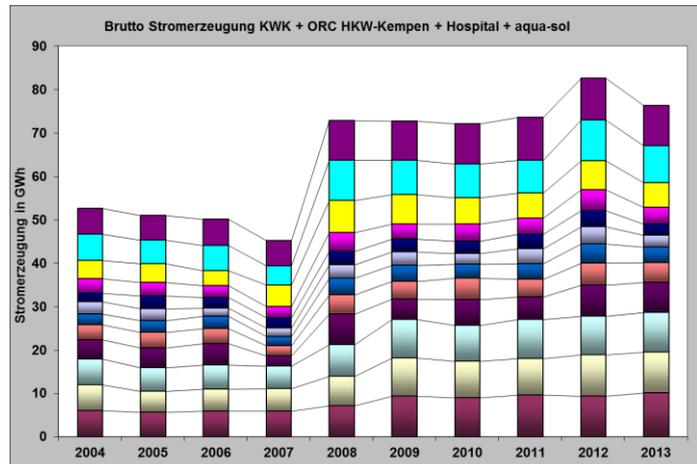


Abbildung 17: Stromerzeugung KWK+ORC im HKW-Kempen, sowie KWK Hospital und aqua-sol [2]

4.3 Umweltbilanz

Die Kopplung einer KWK- mit einer ORC-Anlage führt sowohl zu unmittelbaren als auch mittelbaren Entlastungen der Umwelt.

4.3.1 Unmittelbare Entlastungen

Durch den Einsatz der ORC-Anlage haben die vorhandenen KWK-Module im BHKW höhere Vollbenutzungsstunden und werden damit stärker ausgelastet. Damit lassen sich durch die Stromerzeugung im KWK-Prozess Ressourcen fossiler Energieträger für die Stromproduktion einsparen. Der Gesamtnutzungsgrad des BHKW erhöht sich und führt zu einer Minderung der CO₂-Emissionen.

Im Betrachtungszeitraum April 2012 bis März 2013 konnte die Stromerzeugung im HKW um rund 9,4 GWh gesteigert werden. Hierbei erzeugte die ORC-Anlage 3,1 GWh. Die restlichen 6,3 GWh kommen durch die höheren Laufzeiten der KWK-Module zustande.

4.3.2 Mittelbare Entlastungen

Zur Bestimmung der mittelbaren Entlastungen wird das BHKW Kempen mit Steinkohle-, Braunkohle- und Gas- und Dampfturbinen (GuD)- Kraftwerken sowie dem Kraftwerksmix Deutschland verglichen. Die Datentabelle befindet sich im Anhang 9.2.

Die Berechnung zeigt deutlich, dass BHKWs aufgrund der Wärmegutschrift gegenüber der reinen Stromerzeugung deutlich niedrigere CO₂-Emissionen haben. Im Vergleich zum Kraftwerksmix Deutschland können im Jahr 2.863 t CO₂ vermieden werden. Im Vergleich zur Stromproduktion in einer GuD-Anlage mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 58% können ca. 865 t CO₂ vermieden werden. Dies entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von 2.362 durchschnittlichen Drei-Personen-Haushalten (angenommener Stromverbrauch pro Haushalt: 4.000 kWh pro Jahr).

4.4 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms

Ein spezielles Messprogramm wurde nicht durchgeführt. Die ORC-Anlage, in Verbindung mit den KWK-Modulen und den übrigen Erzeugungsanlagen im HKW-Kempen, wurde im Normalbetrieb getestet. So wurden auch die Messwerte als Monatswerte erfasst und ausgewertet. Die Erfassung und Aufbereitung der Messwerte ist im Abschnitt 3.5 und die Ergebnisse der Messungen sind im Abschnitt 4.1 beschrieben.

4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse

4.5.1 Investitionen – Geplant / Tatsächlich

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die geplanten und tatsächlichen Investitionskosten zum Bau der ORC-Anlage aufgeführt. Insgesamt wurde der Planungsansatz um 27 % überschritten.

Investitions- und Finanzierungsplan für den Zeitraum ab Fördermittelzusage 2010 - 2013			
Teilvorhaben	geplant (EUR)	tatsächlich (EUR)	Differenzen gegenüber Planung (EUR)
Los 1. ORC-Anlage	968.850,00	968.850,00	-
Los 2. Thermoölsystem	690.430,71	1.092.703,56	402.272,85
Los 3. Rohbau	322.368,14	441.340,76	118.972,62
Los 4. Elektrotechnik	239.500,00	279.116,79	39.616,79
Planung	71.000,00	84,00	- 70.916,00
Gutachten	29.000,00	39.062,90	10.062,90
Bauüberwachung	25.000,00	8.131,31	- 16.868,69
Projektmanagement	81.000,00	98.872,13	17.872,13
Förderfähige Ausgaben	2.427.148,85	2.928.161,45	501.012,60
Davon Zuschuss aus dem BMU-Umweltinnovationsprogramm	485.400,00	445.400,00 €	- 40.000,00
Davon Eigene Mittel	1.941.748,85	2.482.761,45	541.012,60

Tabelle 6: Investitionsplan für den Bau der ORC-Anlage im Zeitraum 2010-2013 [2]

Die höchsten Mehrkosten sind beim Anlagenbau (Los 2) angefallen. Dabei entstanden die Mehrkosten im Wesentlichen für die folgenden Gewerke:

- für die Schalldämmung der Notkühler aufgrund Anforderungen nach TA-Lärm
- für den Stahlbau aufgrund der Massenmehrung von 3,5 Tonnen auf 7 Tonnen
- für die Abgasanlage (11 statt 6 Kompensatoren)
- für das Thermoölsystem durch Nennweitenänderung von DN 80 auf DN 125
- für den Einbau eines anderen Typen der Heizungsanlage
- für die Wärmedämmung aufgrund der Mengenmehrung bei der Abgasanlage (von 30 m auf 65 m)
- für zusätzliche Armaturen und Anlagen wie z.B. Schmutzfänger, Thermoölpumpen und Stickstoffanlage
- für die Bauzeitverlängerung

Die Mehrkosten beim Rohbau (Los 3) sind im Wesentlichen durch erhöhte Anforderungen nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und durch Änderungen in der Anlagentechnik (z.B. den Einbau der größeren Notkühler) entstanden.

4.5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung – Geplant / Tatsächlich

In Tabelle 7 ist eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsberechnung dargestellt. Es wird einerseits der Betrieb ohne und mit Berücksichtigung der ORC-Anlage gegenübergestellt (jeweils linke & rechte Spalte), andererseits werden Kosten und Erlösstrukturen gemäß ursprünglicher Planung und tatsächliche Werte aus dem Betriebszeitraum 2012 für die Auswertung verwendet. Dabei wurden in der Betrachtung die Betriebskosten des gesamten Heizkraftwerks inklusive Spitzenlastkessel berücksichtigt. Die Strommehrerzeugung durch die Kopplung von KWK und ORC geht dabei zu Lasten der ungekoppelten Wärmeerzeugung.

Bei der Planung wurde ein Stromerlös von 60€/MWh zugrunde gelegt und damit ein Mehrgewinn (Differenz Gesamtertrag mit/ohne ORC) von knapp 0,4 Million Euro/a durch den Zubau errechnet. Damit ergibt sich für die ORC Anlage eine überschlägige statische Amortisationszeit von gut 6,24 Jahren. Aufgrund dieser Daten wurde eine positive Entscheidung für den Bau der ORC-Anlage getroffen.

Wie bekannt, hat sich der Energiemarkt für Strom seit dem Nuklearreaktorunfall in Fukushima 2011 und der daraufhin eingeleiteten Energiewende sehr verändert. Die regenerativen Stromeinspeisungen haben deutlich zugenommen. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Strompreise an der europäischen Strombörse EEX stark gesunken sind. Die tatsächlichen Strompreise betragen nur noch knapp 38€/MWh (Stand 2013) mit weiter fallender Tendenz, und liegen damit deutlich unter den für die Planung angenommenen 60 €/MWh. Die stark gefallenen Strompreise führen dazu, dass der Betrieb der KWK-Anlage und damit auch der ORC-Anlage den Marktbedingungen angepasst wurde, d.h. die Anlagen werden bevorzugt zu Zeiten mit auskömmlichen Stromerlösen betrieben. Das hat zur Folge, dass statt der geplanten Stromerzeugung von 90.790 MWh lediglich 77.818 MWh im Jahr 2012 erzeugt worden sind. In 2013 wurde aufgrund der weiter fallenden Strompreise, die Stromproduktion auf 70.142 MWh reduziert.

Dass die Anlage dennoch wirtschaftlich betrieben werden kann, ist dem neuen KWK-Gesetz von 2012 zu verdanken. Nach dem KWK-Gesetz von 2012 werden vorhandene KWK-Anlagen, die modernisiert werden, mit einem KWK-Bonus gefördert. Konkret bedeutet dies, dass die von der ORC-Anlage und den KWK-Modulen 2,3 und 4 erzeugte Strommenge einen KWK-Bonus in Höhe von 20.20 €/MWh erhält

Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung KWK mit und ohne ORC					
Anlagendaten	Planung		1 Betriebsjahr (2012)		
	KWK ohne ORC	KWK mit ORC	KWK ohne ORC	KWK mit ORC	
A	Stromerzeugung nur KWK	73.198,00 MWh/a	86.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	75.162,44 MWh/a
B	Stromerzeugung nur ORC	0,00 MWh/a	4.000,00 MWh/a	0,00 MWh/a	2.655,82 MWh/a
C	Stromerzeugung gesamt (= A + B)	73.198,00 MWh/a	90.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	77.818,25 MWh/a
C1	Stromerzeugung KWK-Bonus (KWK2,3,4 und ORC)			0,00 MWh/a	47.194,93 MWh/a
D	Wärmeerzeugung nur KWK Gesamt				
E	Wärmeerzeugung nur KWK in das Fernwärmenetz	76.553,22 MWh/a	66.694,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	64.286,66 MWh/a
F	Wärmeerzeugung aus ORC Kondensator - Einspeisung FW Rücklauf	0,00 MWh/a	19.600,00 MWh/a	0,00 MWh/a	12.968,01 MWh/a
G	Wärmeeinspeisung KWK + ORC in das Fernwärmenetz (= E + F)	76.553,22 MWh/a	86.294,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	77.254,67 MWh/a
H	Wärmeeinspeisung Spitzenlastkessel	37.310,78 MWh/a	27.569,17 MWh/a	36.057,27 MWh/a	40.924,38 MWh/a
I	Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz Gesamt (= G + H)	113.864,00 MWh/a	113.864,00 MWh/a	118.179,05 MWh/a	118.179,05 MWh/a
J	Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	174.759,30 MWh/a	206.200,30 MWh/a	181.985,77 MWh/a	181.985,77 MWh/a
K	Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	44.019,33 MWh/a	32.526,15 MWh/a	37.188,21 MWh/a	42.207,98 MWh/a
Gegenüberstellung Ertrag - Kosten					
	Erträge				
	spez. Wärmeerlös	50,00 €/MWh	50,00 €/MWh	53,00 €/MWh	53,00 €/MWh
	Wärmevergütung (= I x spez. Wärmeerlös)	5.693.200,00 €	5.693.200,00 €	6.263.489,65 €	6.263.489,65 €
	spez. Stromerlös	60,00 €/MWh	60,00 €/MWh	38,00 €/MWh	38,00 €/MWh
	Stromvergütung (= C x spez. Stromerlös)	4.391.880,00 €	5.447.400,00 €	2.856.172,53 €	2.957.093,65 €
	spez. Netzkosten	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh
	Gutschrift vermiedene Netzkosten (= C x spez. Netzkosten)	139.808,18 €	173.408,90 €	143.560,25 €	148.632,87 €
	spez. KWK-Bonus	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	20,20 €/MWh
	KWK-Bonus (= C1 x spez. KWK-Bonus)	- €	- €	- €	953.337,59 €
	Gesamtertrag	10.224.888,18 €	11.314.008,90 €	9.263.222,43 €	10.322.553,75 €
	Kosten				
	spez. Brennstoffkosten (Kessel plus 5,5 €/MWh Erdgassteuer)	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho
	Brennstoffkosten KWK (= J/0,903 x spez. Brennstoffkosten)	4.838.297,34 €	5.708.756,92 €	5.038.365,85 €	5.038.365,85 €
	Brennstoffkosten Kessel (= K/0,903 x spez Brennstoffkosten + 5,5€/MWh)	1.486.810,15 €	1.098.613,04 €	1.256.080,22 €	1.425.629,41 €
	Wartung Instandhaltung Bau (ORC)		6.447,36 €		
	Wartung / Instandhaltung (Wartungsvertrag Hersteller Turboden)		19.000,00 €	19.000,00 €	19.000,00 €
	spez. Wartung / Instandhaltung KWK	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung KWK (= A x spez. Kosten)	1.097.970,00 €	1.301.850,00 €	1.127.436,53 €	1.127.436,53 €
	spez. Wartung Spitzenlastkessel	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung Spitzenlastkessel (= H x spez. Kosten)	186.553,90 €	137.845,85 €	180.286,35 €	204.621,90 €
	Personalkosten	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €
	Versicherung / Verwaltung	105.000,00 €	142.157,23 €	142.157,23 €	142.157,23 €
	Gesamtkosten	8.032.007,39 €	8.732.046,40 €	8.080.702,18 €	8.274.586,92 €
	Überschuss (Gesamtertrag - Gesamtkosten)	2.192.880,79 €	2.581.962,50 €	1.182.520,25 €	2.047.966,84 €
			389.081,71 €		865.446,58 €
	Investitionskosten		2.427.148,85 €		2.928.161,45 €
	Amortisationsdauer		6,24 Jahre		3,38 Jahre

Tabelle 7: Vergleichende Amortisationsberechnung zwischen planerischen und realen Betriebsdaten und Energiekosten [2]

Vergleicht man die Zahlen für das Jahr 2012 so erkennt man sehr deutlich, dass der Unterschied im Überschuss ausschließlich vom KWK-Bonus herrührt. Dank des KWK-Bonus beträgt die rechnerische Amortisationsdauer 3,38 Jahre und liegt damit noch unter den Ansätzen der Planung.

Ohne den KWK-Bonus könnte die Anlage bei geringen Stromerlösen nicht mehr wirtschaftlich betreiben werden. Aus den Zahlen wird deutlich, dass ein wirtschaftlicher Betrieb zum einen von den Stromerlösen abhängt aber vor allem vom KWK-Bonus, ohne den ein wirtschaftlicher Betrieb zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich ist.

Durch den Zuschuss von 20% des BMU bezogen auf die Investitionskosten der ORC-Anlage stellt sich die Wirtschaftlichkeit für die Stadtwerke Kempen noch besser dar als in Tabelle 7 angegeben. Wenn für die Berechnung der statischen Amortisationszeit nur der Eigenanteil der Stadtwerke Kempen zugrunde gelegt wird (Investitionskosten abzüglich 20% Zuschuss), fällt diese noch geringer aus.

4.6 Förderung nach dem KWK-Gesetz

Gemäß § 5 aus dem KWK-Gesetz 2012 erhalten vorhandene KWK-Anlagen, die modernisiert werden, eine Förderung. Hierzu ist ein Nachweis erforderlich, dass die Investitionssumme der Modernisierungsmaßnahmen über 25 % bzw. über 50 % liegt.

Eine Rückfrage beim BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) ergab, dass hierbei nicht nur die neue ORC-Anlage nach dem KWK-Gesetz förderfähig ist, sondern die komplette KWK-Anlage da hier eindeutig eine Modernisierung im Sinne des KWK-Gesetzes vorliegt.

In dem bei der „BET“ (Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH) in Auftrag gegebenen Sachverständigengutachten vom 12.12.2012 wurde nachgewiesen, dass es sich bei der vorliegenden Anlage um eine hocheffiziente modernisierte KWK-Anlage im Sinne des § 5 Absatz 3 KWKModG 2012/1 handelt [7]. Dadurch erhielten die Stadtwerke Kempen am 11.03.2013 für die KWK-Module 2, 3 und 4 plus ORC-Anlage den Zulassungsbescheid des BAFA, das dieser mit Wirkung zum 19.09.2012 die Zulassung als hocheffiziente modernisierte KWK-Anlage erteilt wird.

Für die Wirtschaftlichkeit hat dies natürlich einen sehr großen positiven Effekt, siehe [9]. Dort wird genau der oben beschriebene Punkt bestätigt, dass die Ergänzung von KWK-Anlagen mit einer ORC-Anlage eine Modernisierung der Gesamtanlage im Sinne des KWK-Gesetzes darstellt, sofern die festgesetzten Investitionsgrenzen überschritten werden. Es ist also nicht erforderlich, allein zur Erlangung der Förderfähigkeit eigentlich intakte KWK-Module auszuwechseln.

4.7 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Im Bereich Abwärmenutzung von Industrieanlagen für elektrische Stromerzeugung konkurriert die ORC-Technik mit andern Verfahren wie z.B. Brennstoffzellen und Thermoelektrischen Generatoren. Wie die ORC-Technik selbst sind diese Verfahren noch nicht flächendeckend zu einer marktreifen Entwicklung gelangt und können daher nicht zu einem Vergleich zu etablierten Technologien herangezogen werden. Ein direkter Vergleich ist nur zu bekannten Wasser/Dampf-Kreisläufen möglich.

Vorteil der ORC-Anlage ist, dass diese Technik im Vergleich zu konventionellen Wasser/Dampf-Kreisläufen schon bei niedrigen Temperaturen und niedrigem Druck einen hohen Wirkungsgrad aufweist. So kann eine ORC-Anlage mit z.B. schon bei 300°C (gegenüber 550°C bei Wasserdampf) und Drücken von 10 bar (gegenüber 50 bar und mehr bei Wasserdampf) eingesetzt werden.

In konventionellen Dampfkraftwerken hält der Trend zu höheren Leistungen und Dampfparametern an. Diese vorteilhaften Bedingungen zur Erhöhung des Wirkungsgrades lassen sich bei Anlagen kleinster Leistungen oder bei gegebenen Abwärmeangeboten nicht nutzen. Deshalb wurden speziell für diesen Anwendungsbereich Arbeitsmittel mit vorteilhafteren Eigenschaften entwickelt. Diese kommen in ORC-Anlagen zum Einsatz, die damit die logische Weiterentwicklung der konventionellen Dampfkraftanlage im Bereich kleiner Leistung darstellt.

5 Empfehlungen

5.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Technisch sind die Erwartungen weitestgehend erfüllt worden. Die geplante Steigerung des elektrischen Nutzungsgrades von 2% konnte mit 1,68 % nahezu erreicht werden. Mit ORC-Anlagen kann die Effizienz

von KWK-Anlagen erhöht werden. Die Stromerzeugung aller KWK-Anlagen inklusive der ORC-Anlage stieg mit der Inbetriebnahme der ORC-Anlage im Jahr 2012 im Vergleich zu dem Mittelwert 2008 bis 2011 um rund 15% an. Die erhoffte Steigerung von 24 % – wie im Förderantrag ausgewiesen – wurde zumindest im Jahr der Inbetriebnahme aufgrund der häufigen Notkühlereinsätze nicht erreicht. Nach aktuellem Stand sieht es für das Jahr 2014 ebenfalls nicht danach aus, dass die Stromerzeugung gesteigert werden konnte, was jedoch in erster Linie wirtschaftliche Gründe hat. Bei den derzeitigen niedrigen Strompreisen an der Börse lohnt es sich wirtschaftlich nicht, die Anlagen mit langen Laufzeiten zu betreiben.

Die Stadtwerke Kempen haben in der Planungsphase die Integration der ORC-Anlage in die vorhandene Anlagentechnik als aufwändig und problematisch eingeschätzt. Diese Einschätzung bewahrheitete sich nicht.

Wie im Abschnitt 2.3.2 beschrieben, kam es wegen im Herstellerwerk vertauschten Rohrleitungsanschlüssen zu einer irrtümlichen Befüllung des Silikonölkreislaufes mit Thermoöl. Hier wird empfohlen, zukünftig unterschiedliche Anschlüsse, die nicht verwechselt werden können, zu verwenden. Der nicht richtig justierte Leistungsschalter, durch den es zu hohen Einschaltströmen und einer Beschädigung des Schalters bzw. des Schaltschranks und letztlich zu einer erheblichen Verzögerung im Projektablauf kam, wird auf einen Montagefehler zurückgeführt.

Die Einhaltung der Fernwärme-Rücklauftemperatur ist die größte technische Herausforderung in der in Kempen realisierten Anlagenkombination. Hier treten im Betrieb zwei Probleme auf, die zu Leistungsminderungen führen. Zum einem sind dies die generell zu hohen Rücklauftemperaturen aus dem Fernwärmenetz und zum anderen der in Kapitel 3.1 beschriebene Kurzschluss zwischen dem Kühlkreis-Generator und dem Fernwärmerücklauf. Letzteres ist bei der Planung nicht betrachtet worden, da auch für den Sommerbetrieb der Anlage mit höheren Durchflüssen gerechnet wurde.

Positiv auf die Wirtschaftlichkeit wirken sich die Förderungen durch das BMU-Innovationsprogramm und dem KWK-Gesetz aus. Im Gegensatz zur Planungsgrundlage konnten nach Realisierung der ORC-Anlage die erwarteten Betriebsstunden des ORC nur zu 75% realisiert werden. Zusätzlich war der Stromerlös durch inzwischen gefallene Energiepreise geringer als geplant. Nur durch die KWK-Förderung kann die Anlage dennoch wirtschaftlich betrieben werden.

Die Investitionskosten sind gegenüber der Planung um 27 % überschritten worden. Behördliche Anforderungen wie auch technische Änderungen bzw. Ergänzungen führten zu den Mehrkosten. Für den Fall, dass es technisch gelingt, auf den Thermoölkreislauf zu verzichten und den Verdampfer direkt mit den Abgasen zu beheizen, könnten sich damit bei zukünftigen Anlagen Kosteneinsparungen ergeben.

5.2 Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens / der Anlage / des Produktes)

Auf der Fachmesse „BIO ENERGY Decentral“ in Hannover im Jahr 2012 war die Stromerzeugung aus Abwärme bzw. nicht genutzter Wärme ein großes Thema bei den Ausstellern. Viele Firmen präsentierten verschiedenste technische Lösungen, um bei gasmotorischen Biogasanlagen die Wärme zur Stromerzeugung zu nutzen. Diese Lösungen beinhalteten sowohl ORC-Anlagen als auch Dampfmaschinen oder auch Dampfturbinen. Bei kleinen Biogasanlagen kann es sein, dass keine oder nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Wärmenutzung vorhanden ist. In solchen Fällen ist es wirtschaftlich sinnvoll, die Abwärme mit Hilfe einer ORC-Anlage in Strom umzuwandeln, zumal hier die Förderung nach dem EEG sehr lukrativ ist (siehe auch [9]).

Die Kombination eines mit Erdgas betriebenen BHKWs mit einer ORC-Anlage wurde erstmalig bei der Stadtwerke Kempen GmbH in dieser Größenordnung verwirklicht und hat gezeigt, dass ein Betrieb möglich ist. Damit kann es auch in erdgasbetriebenen Gasmotoren/KWK-Anlagen für den Betreiber interessant sein, eine vorhandene KWK-Anlage durch den Zubau einer ORC-Anlage zu modernisieren,

um in den Genuss der Förderung nach dem KWK-Gesetz zu kommen. Diese Möglichkeit wurde in Kempen erfolgreich umgesetzt und erhöht die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage. Zudem ist die Kopplung mit der Rückkühlung des ORC-Kondensators neuartig und kann vor allem für Fernwärmebetreiber eine attraktive Lösung zur Verbesserung ihrer BHKWs darstellen.

5.3 Zusammenfassung

Die Stadtwerke Kempen GmbH hat gezeigt, dass in einem vorhandenen BHKW auf Basis von Gasmotoren durch eine Kombination mit einer ORC-Anlage die Stromerzeugung erhöht werden kann und es zu längeren Laufzeiten des BHKWs kommt, was die Anlage effizienter macht. Gerade in Zeiten knapper werdender Ressourcen und eines wirtschaftlich schwierigen Umfeldes ist es sinnvoll, die Energieerzeugung so effizient wie möglich zu betreiben.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die technischen Anforderungen bei der Kombination von KWK-Modulen mit einer ORC-Anlage beherrschbar sind und sich der Betrieb der Anlagenkombination problemlos gestalten kann. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Möglichkeit interessant, dass durch die Kombination vorhandener KWK-Module mit einer neuen ORC-Anlage die Anforderungen für eine modernisierte KWK-Anlage im Sinne des KWK-Gesetzes erfüllt werden.

Auch, oder gerade wegen der heutigen schwierigen Marktbedingungen, würden die Stadtwerke Kempen die Entscheidung für eine ORC-Anlage wieder tätigen. Die Förderung nach dem KWK-Gesetz bedeutet für vorhandene erdgasbetriebene KWK-Anlagen, dass ihr Weiterbetrieb trotz der niedrigen Strompreise an der Börse möglich ist.

Die Umsetzung des Projektes wurde durch die Förderung nach dem BMU-Innovationsprogramm durch eine nicht rückzahlbare Zuwendung in Höhe von 20 % unterstützt. Hierfür danken die Stadtwerke Kempen ganz ausdrücklich dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, den Mitarbeitern des Umweltbundesamtes und der KfW Bankengruppe. Als mittelgroßes Versorgungsunternehmen wurden die Stadtwerke Kempen, vor allem was die administrative Abwicklung anging, hervorragend von den Mitarbeitern der KfW Bankengruppe unterstützt.

Die Stadtwerke Kempen GmbH planen in Verbindung mit dem Planungsbüro ETI in Absprache mit dem Umweltbundesamt, ihre Erfahrungen aus diesem Projekt in der Fachpresse zu veröffentlichen.

Über dieses Projekt wurde bereits in der Lokalpresse mehrfach berichtet. Weitere Berichte finden sich in der Kundenzeitschrift der Stadtwerke Kempen GmbH.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Datenmaterial Stadtwerke Kempen GmbH
- [2] Eigene Darstellungen von Herrn Ruediger Leibauer, Stadtwerke Kempen GmbH
- [3] Turboden (2014): <http://www.turboden.eu/de/home/index.php> [Stand: 21.04.2014]
- [4] AGO AG Energie + Anlagen (2014): <http://www.ago.ag/> [Stand: 21.04.2014]
- [5] ZAE Bayern – Bayrisches Zentrum für angewandte Energieforschung
- [6] Schallprognose zum Betrieb der ORC-Anlage im Heizkraftwerk der Stadtwerke Kempen GmbH (Stand 23.11.2010); hier TÜV Bericht Nr.: 936/21215626/01
- [7] Sachverständigengutachten der BET, gemäß §6 Abs. 1 KWK Gesetz, Stand 2012
- [8] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz), § 8, Stand 12.07.2012
- [9] Stadelmaier, Fabian: Mehr Leistung durch Effizienzsteigerung von KWK-Anlagen - KWK-Betrieb einer ORC-Anlage, in: Euro Heat & Power, Heft Jul – Aug 2013, Seite 80-82

7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse

Abbildung 1: Erdgas-betriebene KWK-Module mit ORC-Anlage im BHKW am Standort Stadtwerke Kempen GmbH [1]	3
Abbildung 2: Schema Fernwärmeeinbindung Kühlwasserpumpe ORC-Kondensator [2]	6
Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau des Heizkraftwerks in Kempen [2]	13
Abbildung 4: Fernwärmeerzeugung der Stadtwerke Kempen [2]	14
Abbildung 5: Vereinfachtes Schema der Anlagenschaltung im HKW [2]	16
Abbildung 6: ORC-Prozess im T,s Diagramm [5]	17
Abbildung 7: Rohbau Maschinenhalle [1]	19
Abbildung 8: Anlieferung der ORC-Turbine [1]	20
Abbildung 9: Schaltschrank des Leistungsschalters [1]	20
Abbildung 10: Übersichtsplan für die Schallprognose im Gewerbegebiet im Norden von Kempen [6]	22
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anlagenblöcke im BHKW [7]	24
Abbildung 12: Schematische Anordnung der Messstellen [7]	25
Abbildung 13: Elektrische Nutzungsgrade des BHKWs [2]	26
Abbildung 14: Wärmeauskopplung aus Kondensator und durch Notkühler [2]	26
Abbildung 15: Stromerzeugung und durchschnittliche Leistung der ORC Anlage [2]	27
Abbildung 16: Schematische Fernwärmeeinbindung der Kühlwasserpumpe im ORC-Kondensator [2]	28
Abbildung 17: Stromerzeugung KWK+ORC im HKW-Kempen, sowie KWK Hospital und aqua-sol [2]	30
Tabelle 1: Wirkungsgrade der Stromerzeugung im HKW der Stadtwerke Kempen [2]	4
Tabelle 2: Darstellung der Kosten für den Bau der ORC-Anlage [2]	4
Tabelle 3: Vergleichende Amortisationsberechnungen mit geplanten und realen Daten [2]	5
Tabelle 4: Zulässige Grenzwerte für die Immissionspunkte „lo 1“, „lo 2“ und „lo 3“ [6]	22
Tabelle 5: Nutzungsgrade der Anlage von April 2012 – März 2013 [2]	29
Tabelle 6: Investitionsplan für den Bau der ORC-Anlage im Zeitraum 2010-2013 [2]	31
Tabelle 7: Vergleichende Amortisationsberechnung zwischen planerischen und realen Betriebsdaten und Energiekosten [2]	33

8 Anhang

- 8.1 Messwerte von April 2012 bis März 2013 zum Kapitel „4.2 Stoff- und Energiebilanz/
4.2.1 Messwerte HKW-Kempen, hier KWK-Module; ORC-Anlage; Kesselanlage“
- 8.2 Vergleichende Emissionsberechnung aus: „4.3 Umweltbilanz“
- 8.3 Datengrundlagen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

8.1 Messwerte von April 2012 bis März 2013 zum Kapitel „4.2Stoff- und Energiebilanz/ 4.2.1 Messwerte HKW-Kempen, hier KWK-Module; ORC-Anlage; Kesselanlage“

HKW-Kempen			April 12	Mai 12	Juni 12	Juli 12	August 12	September 12	Oktober 12	November 12	Dezember 12	Januar 13	Februar 13	März 13
KWK	Gasverbrauch	kWh Hu	15.496.579,95	10.993.192,27	8.988.877,51	8.089.946,13	7.576.006,34	9.930.528,14	14.253.154,74	21.443.530,14	21.715.132,08	22.572.987,50	20.542.641,46	20.386.290,80
KWK	Stromerzeugung	kWh	6.517.527,00	4.563.969,00	3.719.536,00	3.405.546,00	3.137.260,00	4.158.359,00	5.969.198,00	8.787.735,00	8.882.989,00	9.325.800,00	8.536.287,50	8.417.200,00
KWK	Wärmeerzeugung	kWh	5.211.718,00	3.551.787,00	2.936.776,00	2.546.302,00	2.656.922,00	3.150.127,00	4.788.442,00	7.737.875,00	7.735.672,00	8.195.962,00	7.188.767,00	7.080.311,00
KWK	Nutzungsgrad el.	%	42,06%	41,52%	41,38%	42,10%	41,41%	41,87%	41,88%	40,98%	40,91%	41,31%	41,55%	41,29%
KWK	Nutzungsgrad th.	%	33,63%	32,31%	32,67%	31,47%	35,07%	31,72%	33,60%	36,08%	35,62%	36,31%	34,99%	34,73%
KWK	Nutzungsgrad ges.	%	75,69%	73,83%	74,05%	73,57%	76,48%	73,60%	75,48%	77,07%	76,53%	77,62%	76,55%	76,02%
ORC	Stromerzeugung brutto	kWh	284.458,00	241.429,00	185.957,00	187.161,00	130.681,00	250.547,00	299.954,00	310.407,00	317.155,00	277.556,00	302.338,00	286.779,00
ORC	Thermöl	kWh	1.622.452,00	1378817	1163707	1126309	865671	1440266	1696739	1778231	1880515	1617570	1728945	1663000
ORC	FW aus Kondensator	kWh	1.348.069,00	1140824	924319	934958	730426	1219543	1416090	1474010	1565910	1343771	1431219	1384180
ORC	Kühlwasser	kWh	840.375,00	796825	642640	839311	694793	648556	77549	7971	39252	134170	150058	147667
ORC	Nutzungsgrad el.	%	17,53%	17,51%	15,98%	16,62%	15,10%	17,40%	17,68%	17,46%	16,87%	17,16%	17,49%	17,24%
ORC	Nutzungsgrad th.	%	31,29%	24,95%	24,21%	8,49%	4,12%	39,64%	78,89%	82,44%	81,18%	74,78%	74,10%	74,35%
ORC	Nutzungsgrad ges.	%	48,82%	42,46%	40,19%	25,11%	19,21%	57,04%	96,57%	99,90%	98,05%	91,94%	91,59%	91,60%
ORC	Betriebsstunden	Bh	629,00	678,00	621,00	656,00	652,00	698,00	730,00	712,00	666,00	604,00	668,00	734,00
KWK + ORC	Stromerzeugung	kWh	6.801.985,00	4.805.398,00	3.905.493,00	3.592.707,00	3.267.941,00	4.408.906,00	6.269.152,00	9.098.142,00	9.200.144,00	9.603.356,00	8.838.625,50	8.703.979,00
KWK + ORC	Wärmeerzeugung	kWh	5.719.412,00	3.895.786,00	3.218.455,00	2.641.949,00	2.692.555,00	3.721.114,00	6.126.983,00	9.203.914,00	9.262.330,00	9.405.563,00	8.469.928,00	8.316.824,00
KWK + ORC	Nutzungsgrad el.	%	43,89%	43,71%	43,45%	44,41%	43,14%	44,40%	43,98%	42,43%	42,37%	42,54%	43,03%	42,70%
KWK + ORC	Nutzungsgrad th.	%	36,91%	35,44%	35,80%	32,66%	35,54%	37,47%	42,99%	42,92%	42,65%	41,67%	41,23%	40,80%
KWK + ORC	Nutzungsgrad ges.	%	80,80%	79,15%	79,25%	77,07%	78,68%	81,87%	86,97%	85,35%	85,02%	84,21%	84,26%	83,49%
KWK + ORC	Steigerung elektrischer Nutzungsgrad		1,84%	2,20%	2,07%	2,31%	1,72%	2,52%	2,10%	1,45%	1,46%	1,23%	1,47%	1,41%
Kesselanlage	Gasverbrauch	kWh Hu	3.547.438,57	1.429.467,28	851.324,70	654.640,58	308.472,89	697.108,57	2.247.090,34	3.407.259,14	7.015.130,21	9.061.404,06	8.807.904,94	11.640.146,99
Kesselanlage	HEL Verbr.	kWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	305,21	0,00	203,48
Kesselanlage	Gesamt Brennstoffverbr.	kWh	3.547.438,57	1.429.467,28	851.324,70	654.640,58	308.472,89	697.108,57	2.247.090,34	3.407.259,14	7.015.130,21	9.061.709,28	8.807.904,94	11.640.350,46
Kesselanlage	Wärmeerzeugung	kWh	3.380.840,00	1.390.510,00	880.740,00	687.840,00	437.330,00	786.000,00	2.174.000,00	3.341.000,00	6.907.380,00	8.805.620,00	8.515.000,00	8.828.120,00
Kesselanlage	Nutzungsgrad th.	%	95,30%	97,27%	103,46%	105,07%	141,77%	112,75%	96,75%	98,06%	98,46%	97,17%	96,67%	75,84%
HKW-Kempen	Stromerzeugung	kWh	6.801.985,00	4.805.398,00	3.905.493,00	3.592.707,00	3.267.941,00	4.408.906,00	6.269.152,00	9.098.142,00	9.200.144,00	9.603.356,00	8.838.625,50	8.703.979,00
HKW-Kempen	Wärmeerzeugung	kWh	9.100.252,00	5.286.296,00	4.099.195,00	3.329.789,00	3.129.885,00	4.507.114,00	8.300.983,00	12.544.914,00	16.169.710,00	18.211.183,00	16.984.928,00	17.144.944,00
HKW-Kempen	Gesamt Brennstoffverbr.	kWh Hu	19.044.018,52	12.422.659,55	9.840.202,21	8.744.586,71	7.884.479,23	10.627.636,72	16.500.245,08	24.850.789,28	28.730.262,29	31.634.391,56	29.350.546,41	32.026.437,79
HKW-Kempen	Nutzungsgrad el.	%	35,72%	38,68%	39,69%	41,08%	41,45%	41,49%	37,99%	36,61%	32,02%	30,36%	30,11%	27,18%
HKW-Kempen	Nutzungsgrad th.	%	47,79%	42,55%	41,66%	38,08%	39,70%	42,41%	50,31%	50,48%	56,28%	57,57%	57,87%	53,53%
HKW-Kempen	Nutzungsgrad ges.	%	83,50%	81,24%	81,35%	79,16%	81,14%	83,89%	88,30%	87,09%	88,30%	87,93%	87,98%	80,71%

8.2 Vergleichende Emissionsberechnung aus: „4.3 Umweltbilanz“

	Steinkohlekraftwerk ohne Wärmenutzung	Braunkohlekraftwerk ohne Wärmenutzung	GUD Kraftwerk ohne Wärmeauskopplung	KWK und ORC-Anlage	Wärmeerzeugung in einer Kesselanlage, Brennstoff Erdgas
Elektrische Leistung	750 MW	1.000 MW	500 MW	14 MW	
Vollaststunden	7.500 Bh	8.250 Bh	7.500 Bh	6.150 Bh	
Stromerzeugung	5.625.000 MWh	8.250.000 MWh	3.750.000 MWh	75.421 MWh	
eta Strom	43,00%	43,00%	58,00%	43,11%	
Stromerzeugung	5.625.000 MWh	8.250.000 MWh	3.750.000 MWh	78.496 MWh	
Brennstoffverbrauch	13.081.395 MWh	19.186.047 MWh	6.465.517 MWh	182.083 MWh	86.327 MWh
Wärmeerzeugung eta	0,00%	0,00%	0,00%	42,67%	90,00%
Wärmeerzeugung	0 MWh	0 MWh	0 MWh	77.694 MWh	77.694 MWh
	Vollwertkohle Import Südafrika	Braunkohlestaub Rheinland	Erdgas L	Erdgas L	Erdgas L
Emissionsfaktor	0,0960 t CO2/GJ	0,0980 t CO2/GJ	0,0560 t CO2/GJ	0,0560 t CO2/GJ	0,0560 t CO2/GJ
Heizwert	25,20 GJ/ t	22,00 GJ/ t	36,00 GJ/ 1000 Nm³	36,00 GJ/ 1000 Nm³	36,00 GJ/ 1000 Nm³
Heizwert	7,00 MWh/t	6,11 MWh/t	10,00 kWh/nm³	10,00 kWh/nm³	10,00 kWh/nm³
Brennstoffverbrauch	1.868.771 to	3.139.535 to	646.551.724 Nm³	18.208.265 Nm³	8.632.664 Nm³
Art der Angabe	Istdaten	Istdaten	Istdaten	Istdaten	Istdaten
Stoff	Vollwertkohle Import Südafrika	Braunkohlestaub Rheinland	Erdgas L	Erdgas Niederlande L-Gas	Erdgas Niederlande L-Gas
Emissionsfaktor	0,0960 to CO2/GJ	0,0980 to CO2/GJ	0,0560 to CO2/GJ	0,0560 to CO2/GJ	0,0560 to CO2/GJ
Oxidationsfaktor	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Unterer Heizwert	25,20 GJ/ t	22,00 GJ/ t	36,00 GJ/ 1000 Nm³	36,00 GJ/ 1000 Nm³	36,00 GJ/ 1000 Nm³
Netto Aktivitätsrate	1.868.771 to	3.139.535 to	646.552 1000 Nm³	18.208 1000 Nm³	8.633 1000 Nm³
Netto Aktivitätsrate	47.093.023 GJ	69.069.767 GJ	23.275.862 GJ	655.498 GJ	310.776 GJ
Berechnete Emission	4.520.930,23 to CO2	6.768.837,21 to CO2	1.303.448,28 to CO2	36.707,86 to CO2	17.403,45 to CO2
	Steinkohlekraftwerk ohne Wärmenutzung	Braunkohlekraftwerk ohne Wärmenutzung	GUD Kraftwerk ohne Wärmeauskopplung	HKW bestehend aus KWK und Kesselanlage - Erdgas	
CO2 Emissionen für Strom- und Wärmeerzeugung	4.520.930,23 to CO2	6.768.837,21 to CO2	1.303.448,28 to CO2	36.707,86 to CO2	
CO2 Gutschrift für Wärmeerzeugung alternativ in einer Kesselanlage	0,00 to CO2	0,00 to CO2	0,00 to CO2	17.403,45 to CO2	
Endgültige CO2 Menge für Stromerzeugung	4.520.930,23 to CO2	6.768.837,21 to CO2	1.303.448,28 to CO2	19.304,41 to CO2	
spez. CO2 Emission für Strom	803,72 gr/kWh el	820,47 gr/kWh el	347,59 gr/kWh el	255,95 gr/kWh el	
Kraftwerksmix in Deutschland			559,00 gr/kWh el		
KWK - CO2 Einsparung bezogen auf die kWh Strom gegenüber dem Kraftwerksmix			303,05 gr/kWh el		
KWK - CO2 Einsparung bezogen auf die kWh Strom gegenüber dem Kraftwerksmix			54,21%		
CO2 Einsparung im HKW-Kempen im Vergleich zur Stromproduktion bezogen auf Kraftwerksmix Deutschland bei einer Stromproduktion von:		9.448 MWh	pro Jahr	2.863,21 to CO2	
CO2 Einsparung im HKW-Kempen im Vergleich zur Stromproduktion bezogen auf ein Steinkohlekraftwerk bei einer Stromproduktion von:		9.448 MWh	pro Jahr	5.175,36 to CO2	
CO2 Einsparung im HKW-Kempen im Vergleich zur Stromproduktion bezogen auf ein GUD-Kraftwerk bei einer Stromproduktion von:		9.448 MWh	pro Jahr	865,75 to CO2	

8.3 Datengrundlagen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Datentabelle zum wirtschaftlichen Vergleich zwischen Planung und Betriebsdaten mit Energiekosten aus der Planung

Vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung KWK mit und ohne ORC					
Anlagendaten		Planung		1 Betriebsjahr (2012)	
		KWK ohne ORC	KWK mit ORC	KWK ohne ORC	KWK mit ORC
A	Stromerzeugung nur KWK	73.198,00 MWh/a	86.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	75.162,44 MWh/a
B	Stromerzeugung nur ORC	0,00 MWh/a	4.000,00 MWh/a	0,00 MWh/a	2.655,82 MWh/a
C	Stromerzeugung gesamt (= A + B)	73.198,00 MWh/a	90.790,00 MWh/a	75.162,44 MWh/a	77.818,27 MWh/a
C1	Stromerzeugung KWK-Bonus (KWK2,3,4 und ORC)			0,00 MWh/a	47.194,93 MWh/a
D	Wärmeerzeugung nur KWK Gesamt				
E	Wärmeerzeugung nur KWK in das Fernwärmenetz	76.553,22 MWh/a	66.694,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	64.286,66 MWh/a
F	Wärmeerzeugung aus ORC Kondensator - Einspeisung FW Rücklauf	0,00 MWh/a	19.600,00 MWh/a	0,00 MWh/a	12.968,01 MWh/a
G	Wärmeeinspeisung KWK + ORC in das Fernwärmenetz (= E + F)	76.553,22 MWh/a	86.294,83 MWh/a	82.121,78 MWh/a	77.254,67 MWh/a
H	Wärmeeinspeisung Spitzenlastkessel	37.310,78 MWh/a	27.569,17 MWh/a	36.057,27 MWh/a	40.924,38 MWh/a
I	Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz Gesamt (= G + H)	113.864,00 MWh/a	113.864,00 MWh/a	118.179,05 MWh/a	118.179,05 MWh/a
J	Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	174.759,30 MWh/a	206.200,30 MWh/a	181.985,77 MWh/a	181.985,77 MWh/a
K	Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	44.019,33 MWh/a	32.526,15 MWh/a	37.188,21 MWh/a	42.207,98 MWh/a
Gegenüberstellung Ertrag - Kosten					
	Erträge				
	spez. Wärmeerlös	50,00 €/MWh	50,00 €/MWh	53,00 €/MWh	53,00 €/MWh
	Wärmevergütung (= I x spez. Wärmeerlös)	5.693.200,00 €	5.693.200,00 €	6.263.489,65 €	6.263.489,65 €
	spez. Stromerlös	60,00 €/MWh	60,00 €/MWh	38,00 €/MWh	38,00 €/MWh
	Stromvergütung (= C x spez. Stromerlös)	4.391.880,00 €	5.447.400,00 €	2.856.172,53 €	2.957.093,65 €
	spez. Netzkosten	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh	1,91 €/MWh
	Gutschrift vermiedene Netzkosten (= C x spez. Netzkosten)	139.808,18 €	173.408,90 €	143.560,25 €	148.632,87 €
	spez. KWK-Bonus	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	0,00 €/MWh	20,20 €/MWh
	KWK-Bonus (= C1 x spez. KWK-Bonus)	- €	- €	- €	953.337,59 €
	Gesamtertrag	10.224.888,18 €	11.314.008,90 €	9.263.222,43 €	10.322.553,75 €
	Kosten				
	spez. Brennstoffkosten (Kessel plus 5,5 €/MWh Erdgassteuer)	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho	25,00 €/MWh Ho
	Brennstoffkosten KWK (= J/0,903 x spez. Brennstoffkosten)	4.838.297,34 €	5.708.756,92 €	5.038.365,85 €	5.038.365,85 €
	Brennstoffkosten Kessel (= K/0,903 x spez Brennstoffkosten + 5,5€/MWh)	1.486.810,15 €	1.098.613,04 €	1.256.080,22 €	1.425.629,41 €
	Wartung Instandhaltung Bau (ORC)		6.447,36 €		
	Wartung / Instandhaltung (Wartungsvertrag Hersteller Turboden)		19.000,00 €	19.000,00 €	19.000,00 €
	spez. Wartung / Instandhaltung KWK	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.	15,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung KWK (= A x spez. Kosten)	1.097.970,00 €	1.301.850,00 €	1.127.436,53 €	1.127.436,53 €
	spez. Wartung Spitzenlastkessel	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.	5,00 €/MWh el.
	Wartung Instandhaltung Spitzenlastkessel (= H x spez. Kosten)	186.553,90 €	137.845,85 €	180.286,35 €	204.621,90 €
	Personalkosten	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €	317.376,00 €
	Versicherung / Verwaltung	105.000,00 €	142.157,23 €	142.157,23 €	142.157,23 €
	Gesamtkosten	8.032.007,39 €	8.732.046,40 €	8.080.702,18 €	8.274.586,92 €
	Überschuss (Gesamtertrag - Gesamtkosten)	2.192.880,79 €	2.581.962,50 €	1.182.520,25 €	2.047.966,84 €
			389.081,71 €		865.446,58 €
	Investitionskosten		2.427.148,85 €		2.928.161,45 €
	Amortisationsdauer		6,24 Jahre		3,38 Jahre

Datentabelle zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit realen Betriebsdaten und realen Energiepreisen
aus 2012

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung KWK mit ORC		
	Jahreswerte 2012	
Betriebsstunden / Jahr		
KWK-Anlage	5.676 Bh	
ORC	7.066 Bh	
Wirkungsgrad		
Stromerzeugung	42,76%	
Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz	42,45%	
Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	85,21%	
Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	96,96%	
A Stromerzeugung nur KWK (KWK 1,2,3,4 + 5)	75.162,44 MWh/a	lt. Messung
B Stromerzeugung nur ORC	2.655,82 MWh/a	
C Stromerzeugung gesamt (= A + B)	77.818,25 MWh/a	
C1 Stromerzeugung nur KWK 2, 3 + 4 und ORC für KWK Förderung	47.194,93 MWh/a	
D Wärmeezeugung nur KWK Gesamt		
E Wärmeezeugung nur KWK in das Fernwärmenetz	64.286,66 MWh/a	
F Wärmeezeugung aus ORC Kondensator - Einspeisung FW Rücklauf	12.968,01 MWh/a	
G Wärmeeinspeisung KWK + ORC in das Fernwärmenetz (= E + F)	77.254,67 MWh/a	
H Wärmeeinspeisung Spitzenlastkessel	40.924,38 MWh/a	
I Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz Gesamt (= G + H)	118.179,05 MWh/a	
J Brennstoffverbrauch KWK (Hu)	181.985,78 MWh/a	
K Brennstoffverbrauch Spitzenlastkessel (Hu)	42.207,98 MWh/a	
Brennstoffverbrauch Gesamt (Hu)	224.193,75 MWh/a	
L Brennstoffverbrauch KWK (Ho) Abrechnungsrelevant	248.276,58 MWh/a	
Gegenüberstellung Ertrag - Kosten		
Erträge		
Wärmevergütung (= I x spez. Wärmeerlös)	6.263.489,65 €	53,00 €/MWh
Stromvergütung (= C x spez. Stromerlös)	2.957.093,65 €	38,00 €/MWh
Gutschrift vermiedene Netzkosten (= C x spez. Netzkosten)	148.632,87 €	1,91 €/MWh
KWK Förderung nach dem KWK Gesetz (=C1 x KWK-Bonus)	953.337,59 €	20,20 €/MWh
Gesamtertrag	10.322.553,75 €	
Kosten		
Brennstoffkosten KWK (= J/0,903 x spez. Brennstoffkosten)	5.038.365,86 €	25,00 €/MWh Ho
Brennstoffkosten Kessel (= K/0,903 x spez Brennstoffkosten + 5,5€/MWh)	1.425.629,41 €	25,00 €/MWh Ho
Wartung Instandhaltung Bau (ORC)		
Wartung / Instandhaltung (Wartungsvertrag Hersteller Turboden)	19.000,00 €	
Wartung Instandhaltung KWK (= A x spez. Kosten)	1.127.436,53 €	15,00 €/MWh el.
Wartung Instandhaltung Spitzenlastkessel (= H x spez. Kosten)	204.621,90 €	5,00 €/MWh th.
Personalkosten	317.376,00 €	
Versicherung / Verwaltung	142.157,23 €	
Gesamtkosten	8.274.586,93 €	
Überschuss (Gesamtertrag - Gesamtkosten)	2.047.966,82 €	