

# ORC\*-Prozesse zur Abwärmenutzung an BHKW-Motoren

\*Organic Rankine Cycle



*mit UMSICHT*

Fraunhofer UMSICHT  
Geschäftsfeld Energie-Effizienz-Technologien

Vortragender:

**Dipl.-Ing. Tim Schulzke**

Ansprechpartner:

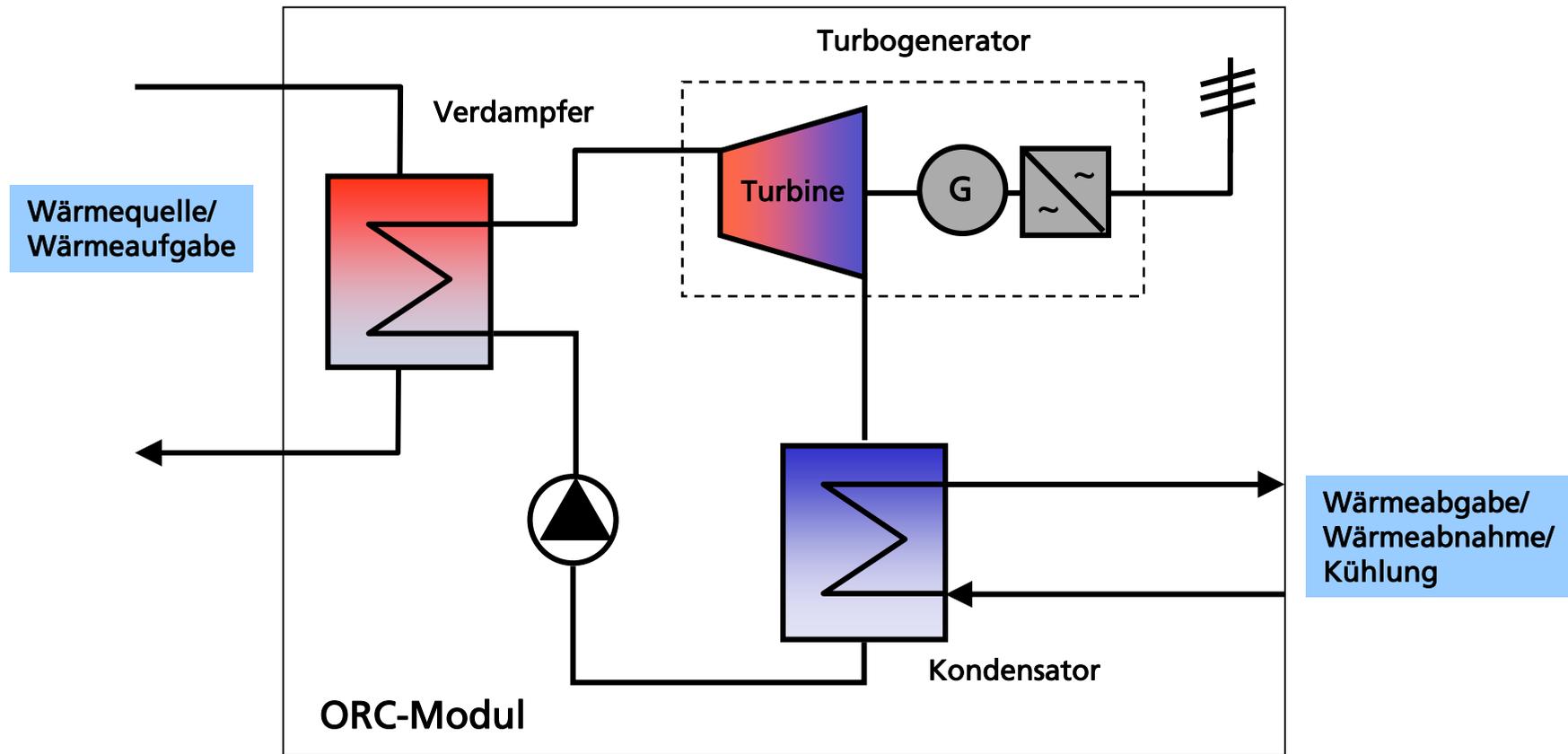
**Dr.-Ing. Wilhelm Althaus**

**Tel. 0208/8598-1186**

[wilhelm.althaus@umsicht.fraunhofer.de](mailto:wilhelm.althaus@umsicht.fraunhofer.de)

[orc@umsicht.fraunhofer.de](mailto:orc@umsicht.fraunhofer.de)

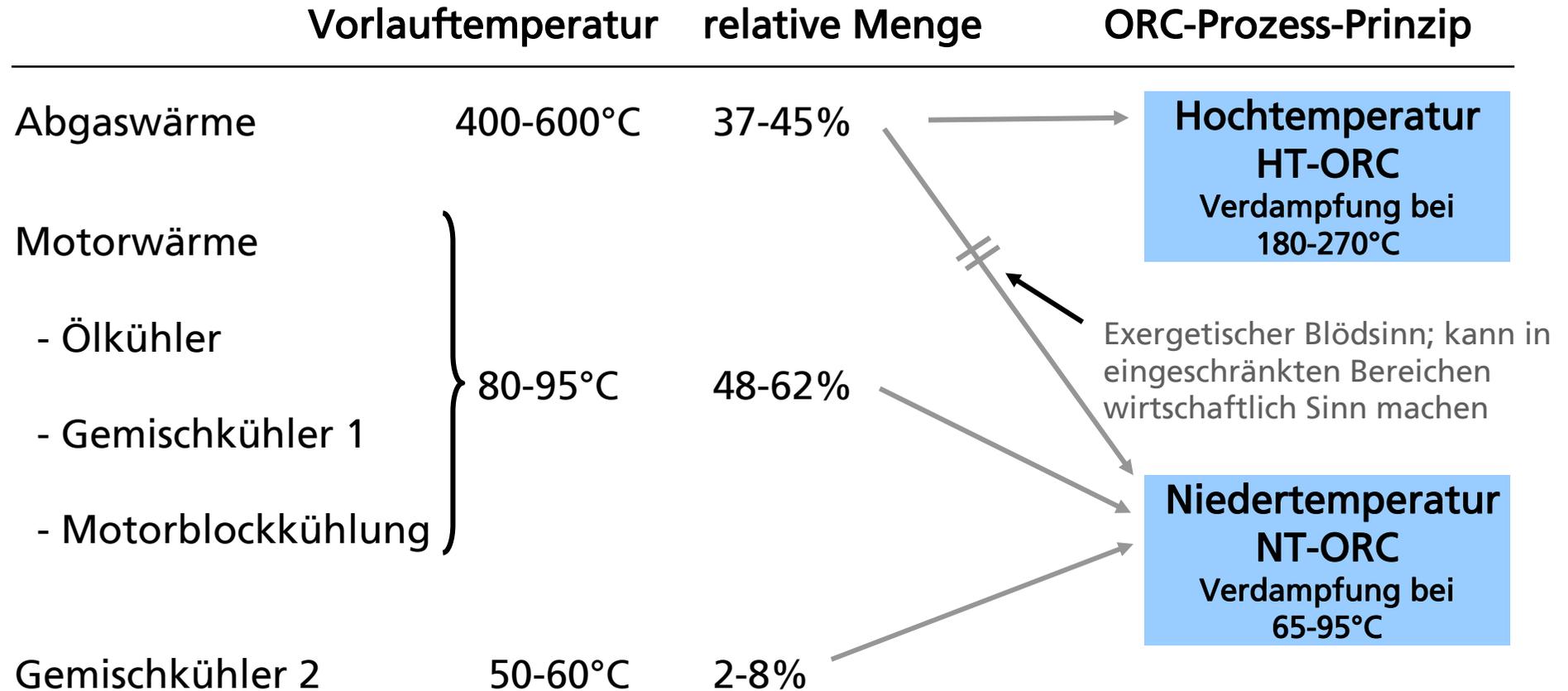
# ORC (Organic Rankine Cycle) – Prozessprinzip



# ORC – Einsatzgebiete

- ORC selbst **spezifisch relativ teuer**, gerade in kleinen Dimensionen, daher wirtschaftliche ***Einsatzrandbedingungen*** wie folgt:
  - Antriebswärme unentgeltlich oder preiswert verfügbar
  - Strom als Energieprodukt von hohem Wert, ggf. KWK
  - Betriebsstunden >> 6000 h/a
- **Etablierte Applikationsgebiete:**
  - **Mittelgroße ORC-Module an Holzfeuerungen** o.ä. in Kraft-Wärme-Kopplung; Antriebswärme Rauchgas 700-900°C; **500-2.500 kW<sub>el,ORC</sub>**; (Turboden/It)
  - **Große ORC-Module mit Antrieb durch Geothermie, Solarthermie und Industrieabwärme**; 150–350°C; **1.000–7.500 kW<sub>el,ORC</sub>**; (Ormat/USA)

# ORC (Organic Rankine Cycle) – Abwärmequellen eines Motors



# Wichtig: Real erzielbare Effizienz eines ORC-Prozesses

Wirkungsgrad ist beschränkt:

$$\eta_{\text{ORC, C}} = 1 - T_U / T_{\text{cycle, max}}$$

Carnot-Wirkungsgrad

% Irreversibilität der Turbine

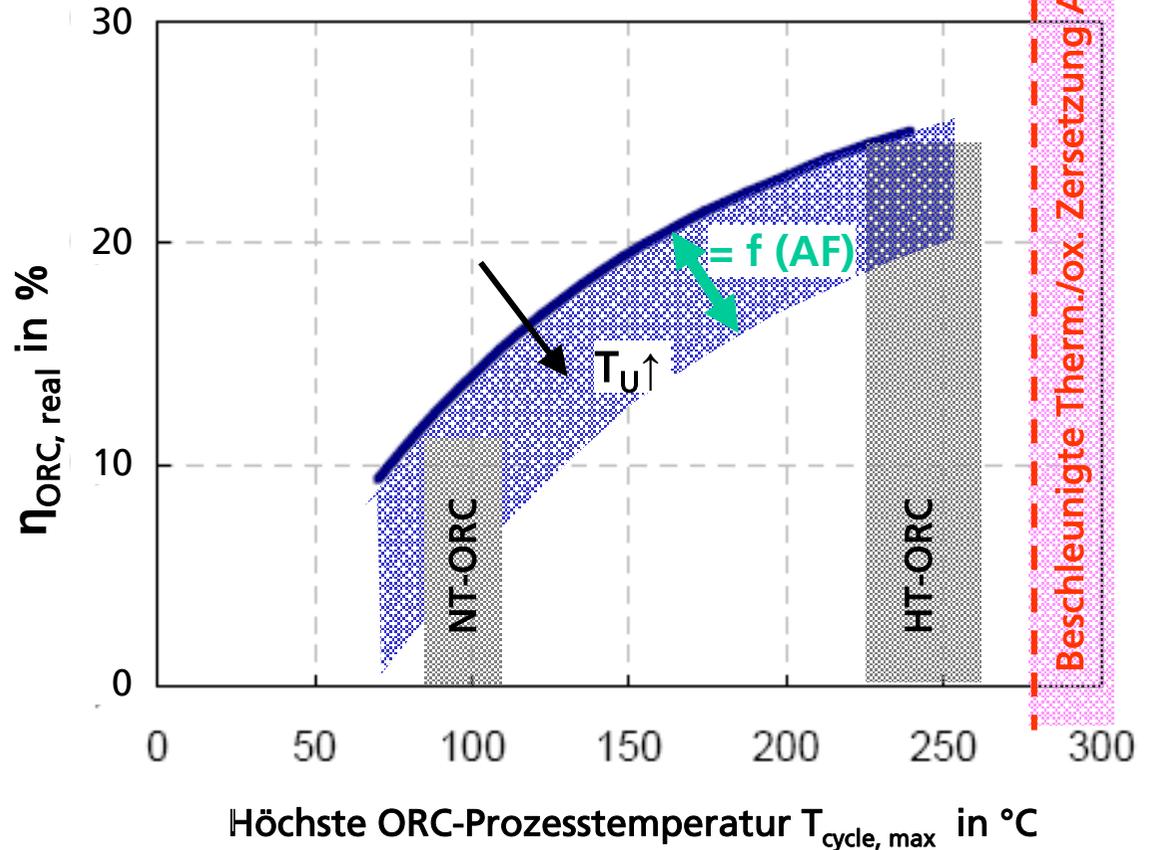
% Irreversibilität der Wärmeübergänge

% Irreversibilität der Reibungs- und Wärmeverluste

$$\Rightarrow \eta_{\text{ORC, real}} < 0,6 \eta_{\text{ORC, C}}$$

$\eta_{\text{ORC, real}} = 10 - 25\%$  „machbar“

NT HT



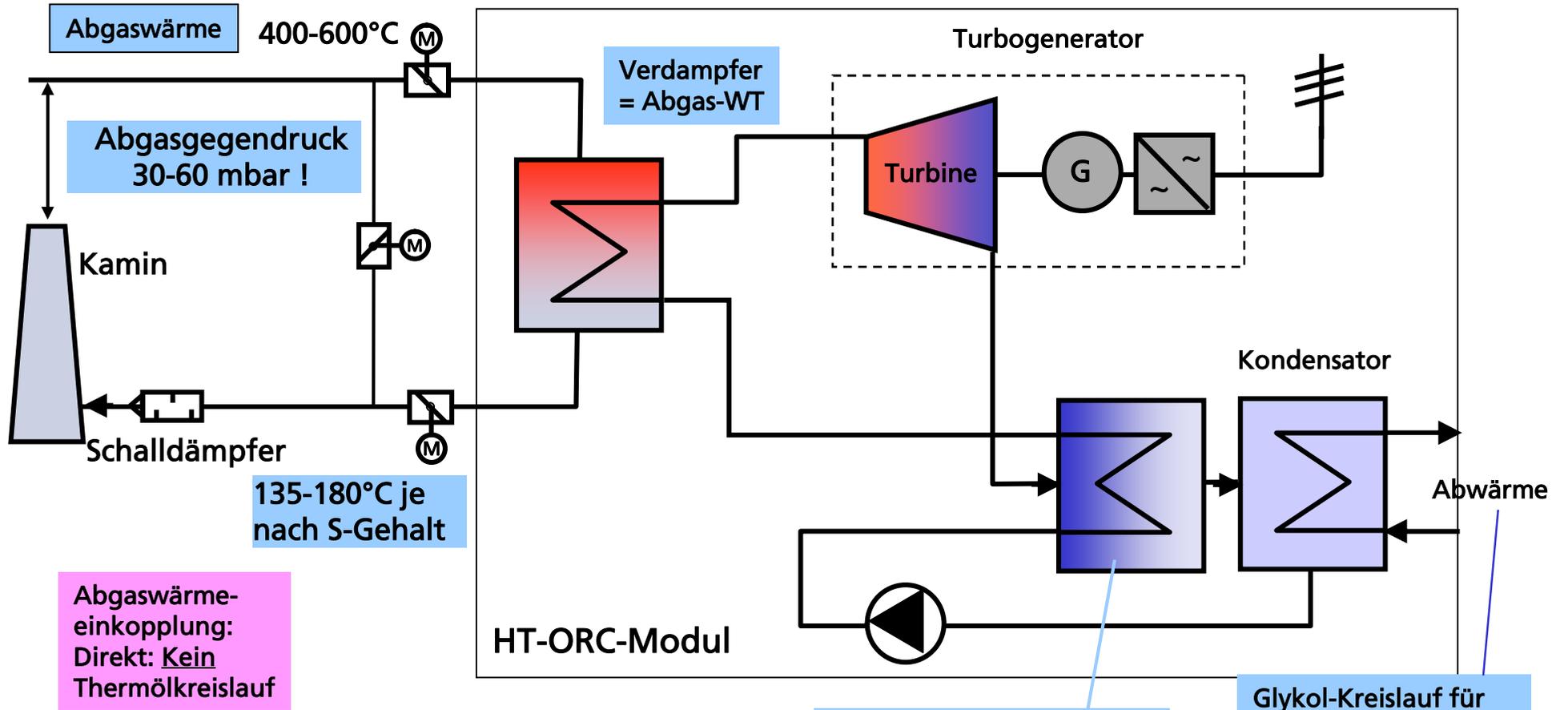
Nach: Steinbeis-Transferzentrum Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, EU-NEGST, 2005 mit Ergänzungen Fraunhofer UMSICHT 2008

# ORC zur Abgaswärmenutzung an Biogasmotoren

## – Anforderungen (Auszug)

- Leistungen im Bereich 20-150 kW<sub>el, ORC</sub> (sehr viel kleiner als marktüblich)
- hohe Verfügbarkeit, hohe Effizienz, niedriger Eigenbedarf, Vollautomatik-Betrieb
- Systemkosten (ORC-Modul + Einbindung)  $\leq$  anlegbarer Preis (~ 2500-3500 €/kW<sub>el, ORC</sub>); niedrige Betriebs- und Wartungskosten
- sicher: **CE** Konformität nach PED/DGRL 97/23/EG; ausgelegt nach AD2000, DIN 4754, BGR 104; Betrieb nach BGR 500, VDI 3033, möglichst unbedenkliches Arbeitsmittel  
**Schutzmaßnahmen bei Wartung** erforderlich (Inertisierung, Lüftung, keine Zündquellen, Potenzialausgleich)
- Einhaltung des zulässigen Gegendruckes im Abgasweg
- ausreichend korrosionsbeständige Werkstoffe auf der Abgasseite
- Einhaltung EMV-Richtlinie 89/336/EWG und Niederspannungsrichtlinie 73/23/EWG
- Einhaltung VWEW/BDEW Richtlinie für den Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am NS-Netz

# ORC (Organic Rankine Cycle) – Motorenabgaswärme-HT-ORC



Mai 2011

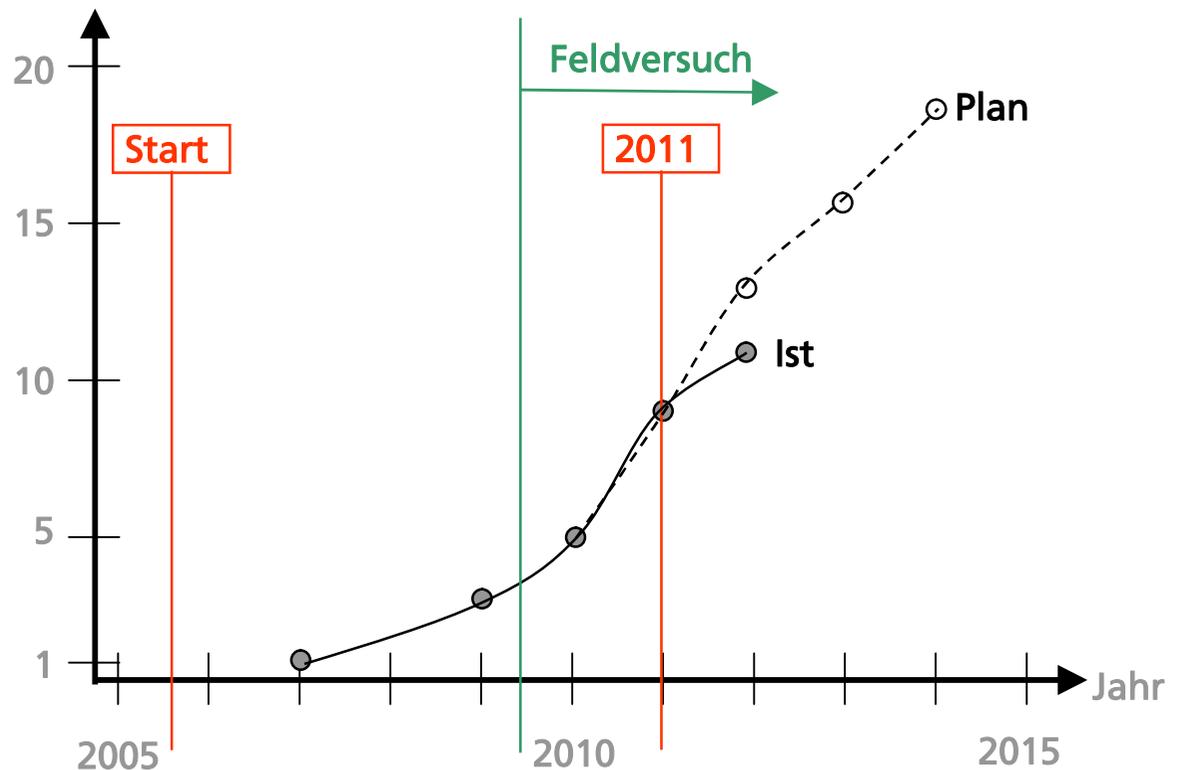
# ORC (Organic Rankine Cycle) – Fraunhofer Typenprogramm

ORC Modul Typ	A-100 (HT)	A-50 (HT)	W-25 (NT)
Ausgangsspannung	50 Hz, 400V, 3Phasen		
Nettleistung Modul	60-120 kW <sub>el,ORC</sub>	30-60 kW <sub>el,ORC</sub>	20-40 kW <sub>el,ORC</sub>
Wirkungsgrad Volllast / 50%Teillast	18% / 14%	18% / 14%	8% / 6%
Wärmezufuhr	<b>Abgas aus Motoren 400-500°C</b>		<b>Kühlwasser (KW) aus Motoren 85-110°C</b>
Zugeführte Wärmeleistung	430-670 kW <sub>th</sub>	215-335 kW <sub>th</sub>	330-500 kW <sub>th</sub>
Maximale Prozesstemperatur	300°C	300°C	75°C
Kühlung max.	Trockenkühler 550 kW <sub>th</sub>	Trockenkühler 275 kW <sub>th</sub>	Direktverflüssiger 460 kW <sub>th</sub>
Abmaße ORC-Modul L x B x H in (m)	ca. 10 x 2,5 x 3,3	ca. 7 x 2,5 x 3,3	ca. 5 x 2,5 x 3,3
Gewicht	15.000 kg	10.500 kg	6.000 kg

# Prozessentwicklung ORC für Biogas-BHKW's

- Arbeitsfluid-Auswahl
- Prozesskonzept incl. MSR
- Auswahl/Entwicklung der Expansionsmaschine
- El. Einspeisekonzept
- Sicherheitskonzept
- Wärmetauscherauswahl /-konstruktion
- Komponentenauswahl
- Prozesskonstruktion
- Pilotanlagen
- Feldversuch

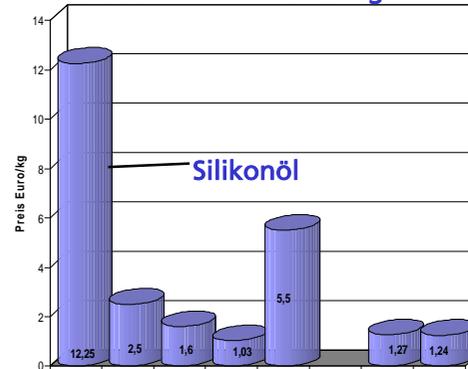
Gesamtzahl gebaute ORC-Module für Biogas-BHKW



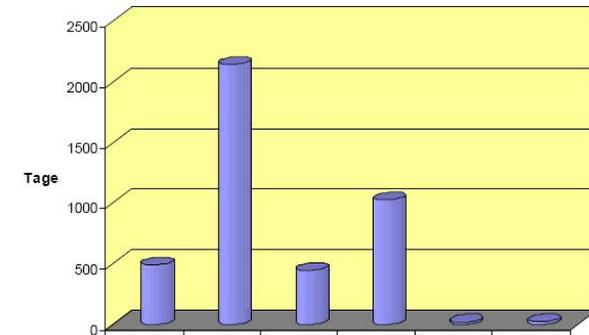
# ORC - Arbeitsfluide

- Preis (10% Verlust/a)
- Toxizitätsparameter
- Umweltverträglichkeit (z.B. WGK, ODP)
- Sicherheitsparameter
- Thermische Zersetzungstemperaturen (Labortests)

Marktpreis ausgewählter HT-Arbeitsfluide in €/kg

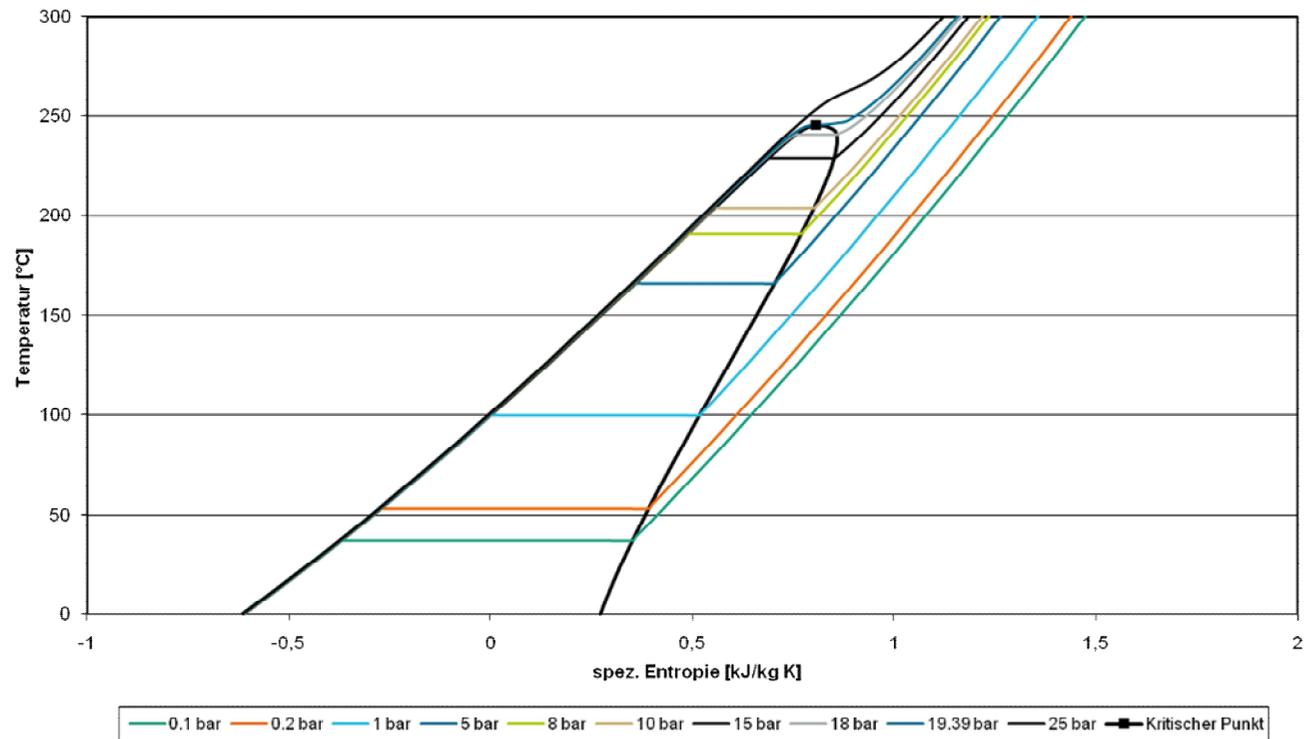


Thermostabilität HT-AF bei 270°C

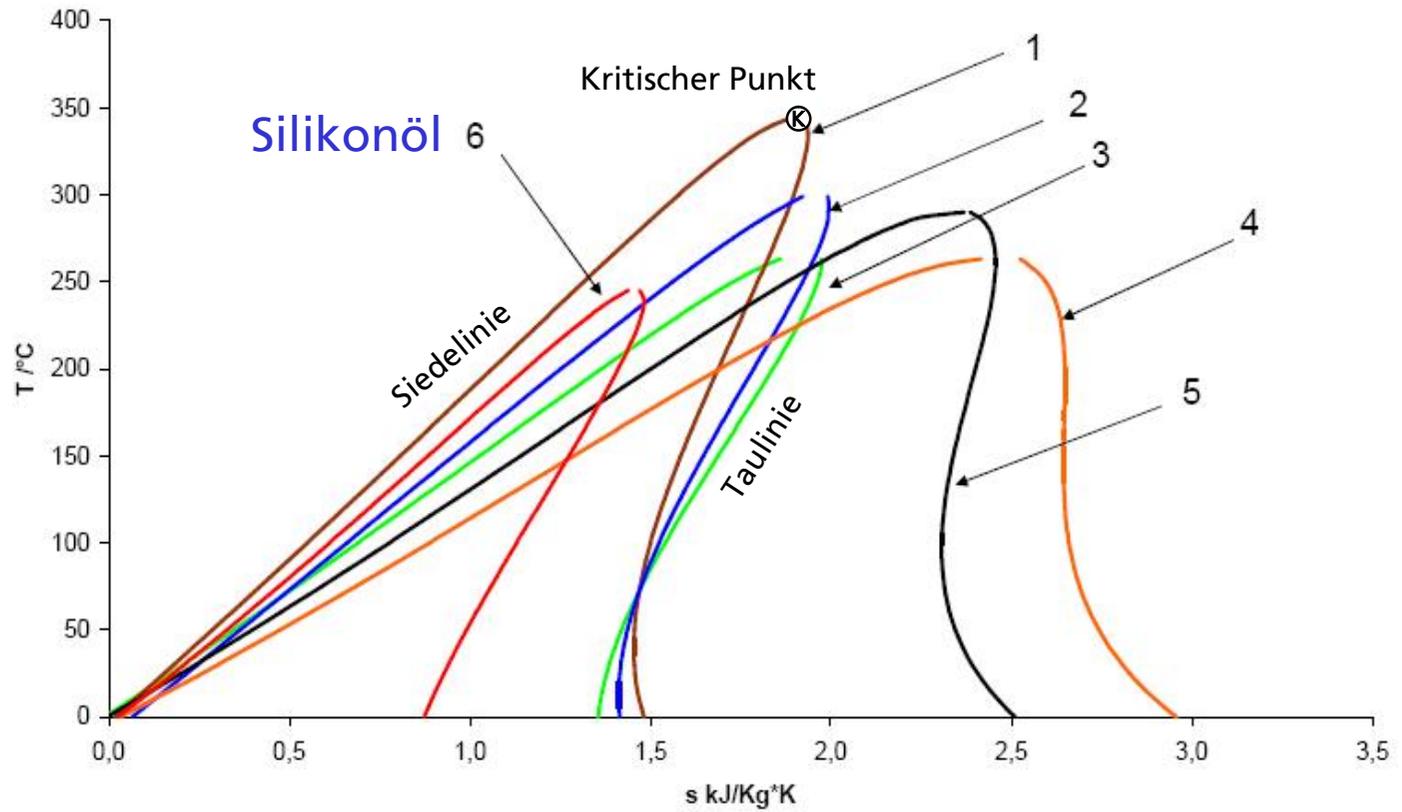


# ORC-Arbeitsfluide - Stoffdaten

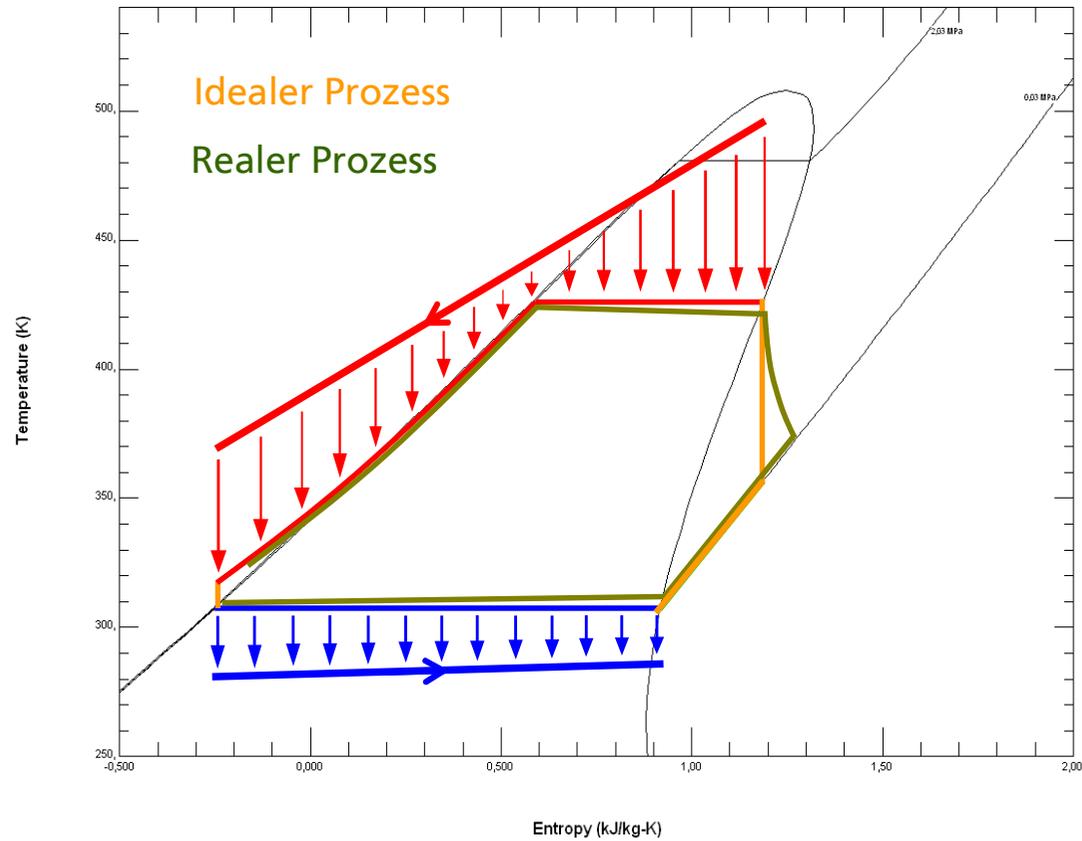
- Thermodynamische Daten



# HT-ORC – Siede- und Taulinien versch. AF im T, s-Diagramm



# HT-ORC – Kreisprozessverlauf im T, s Diagramm



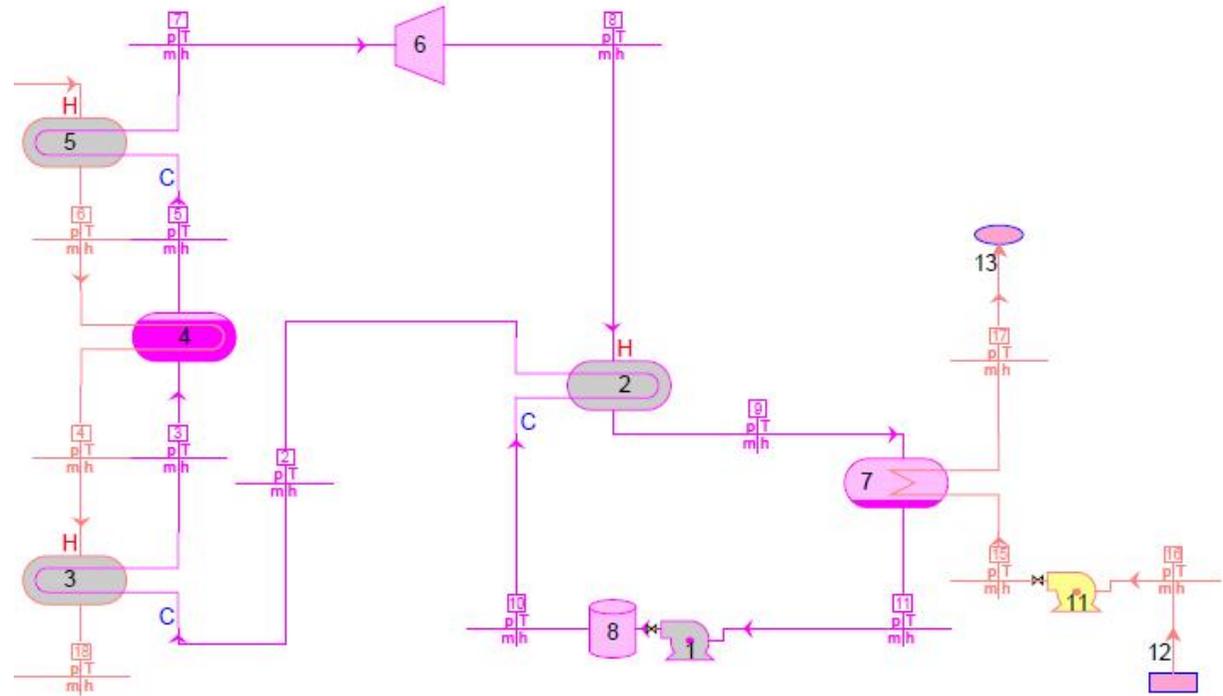
Arbeitsmittel: Hexan

# ORC - Prozeß-Simulationen

Bild:  
Simulation eines Hoch-  
temperatur-ORC-Prozesses

ASPEN, THERMOFLEX

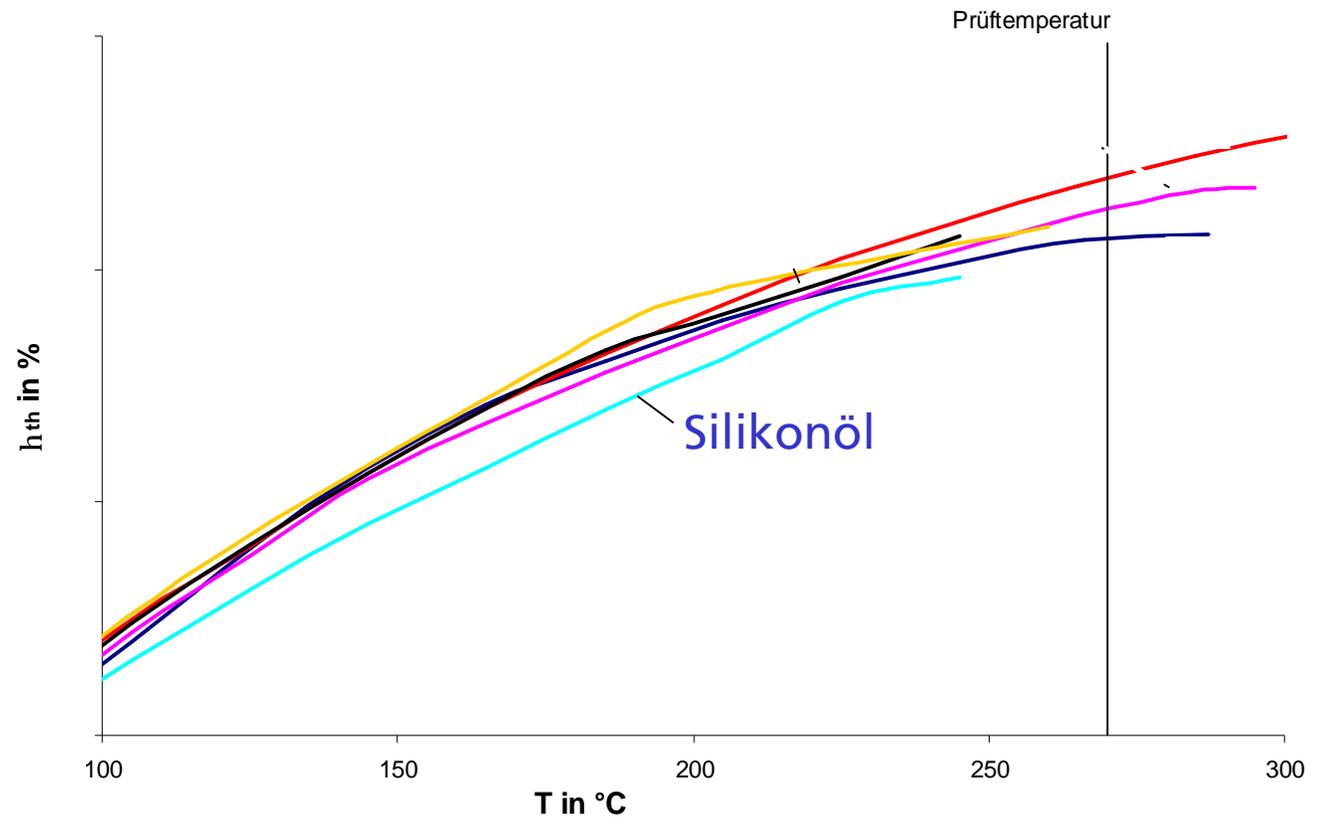
- Arbeitsfluidauswahl
- Prozeßspezifikation
- Prozeßoptimierung



		10	2	3	5	7	8	9	11
p	bar	21,4	20,76	20,47	20,47	20	0,8387	0,672	0,672
T	°C	86,33	181,8	245	246,7	256	190,7	98	85
m	kg/s	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
h	kJ/kg	146,7	347,8	617,7	757,1	792,6	697,1	493,9	141,8

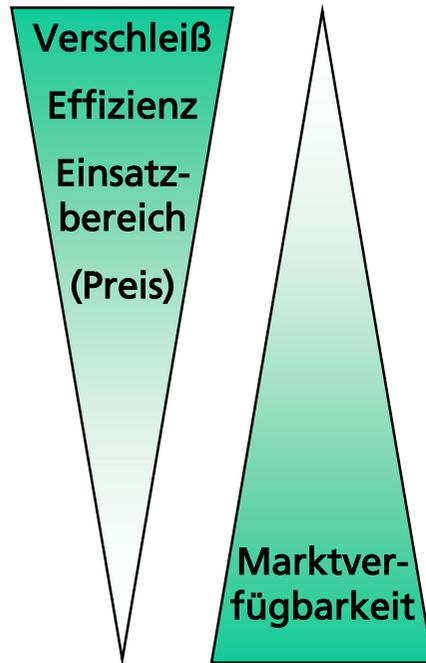
# HT-ORC – Stationäre Prozesssimulation mit versch. AF

Vergleich der Wirkungsgrade von Referenzprozessen bei Verwendung unterschiedlicher Arbeitsfluide



# ORC

- Auswahl der Kraftmaschine,
- Optimierung der Turbinengeometrie



- Turbinen
  - [Radial-Gleichdruckturbinen](#)
  - Axial-Gleichdruckturbinen
  - Radial-Reaktionsturbinen
- Weitere Expansionsmaschinen z.B.
  - Dampfschraubenmotoren
  - Kolbendampfmaschinen
  - Scroll-Expander



# Direktverdampferkonstruktion

- Preiswürdigkeit
- Sichere Verdampfung

Kleine Konzentrationen, aber relativ hohe Partikelfracht von Motorenabgas, daher weiteres Kriterium:

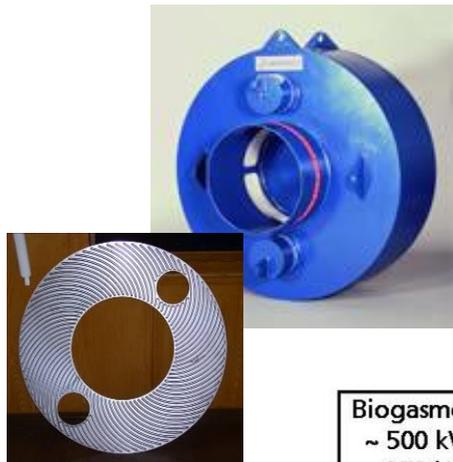
- Einfache Abreinigung auf der Abgasseite

Verwendung spezieller, einfach abzu-  
reinigender Rohrbündelwärmeaustauscher

# HT-ORC zur Abgaswärmenutzung an Biogasmotoren

## – mit UMSICHT: Wichtige Konzeptmerkmale

skalierbare Hochleistungs-  
wärmeübertrager



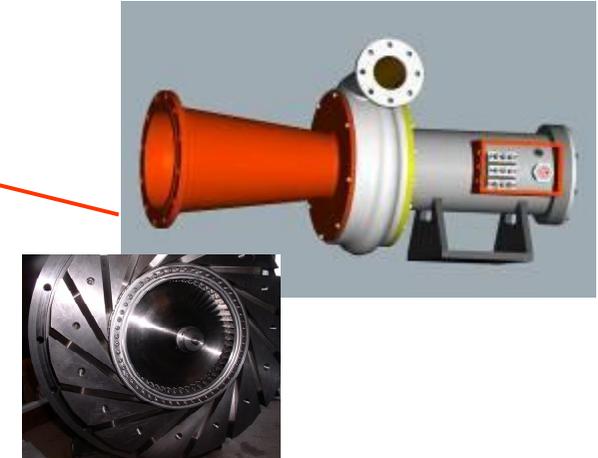
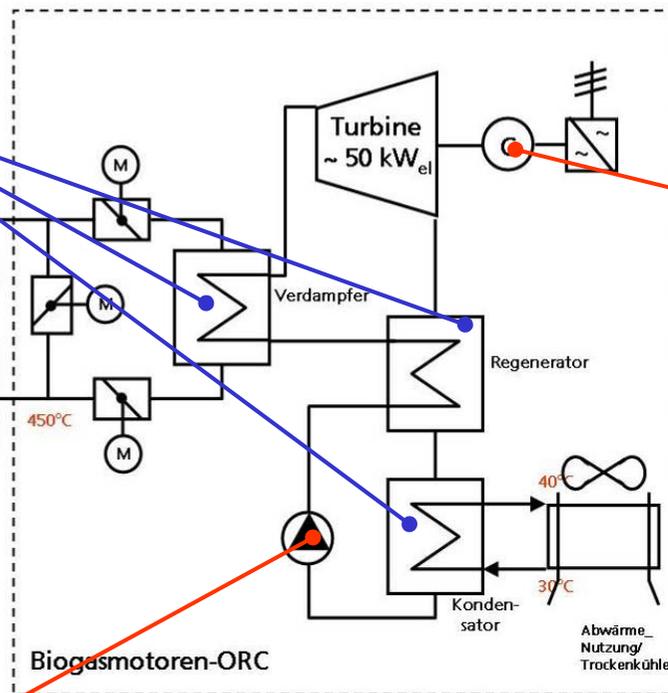
Wärmezufuhr direkt;  
kein sekundärer Wärmeträgeröl-  
kreislauf zur Abgaswärmezuführung

Hochtourige Turbine mit Synchron-  
generator und Umrichter, keine  
rotierenden Dichtungen; Gleitlager,  
Generator arbeitsmittelbeaufschlagt



Biogasmotor  
~ 500 kW<sub>el</sub>  
~ 250 kW<sub>th</sub>

Gasmotor-  
BHKW



Arbeitsfluide des ORC:  
1) Silikonöle  
2) Kohlenwasserstoffe

Hocheffizienz-Low-NPSH-Pumpe  
mit Magnetkupplung, keine  
rotierenden Dichtungen

# Feldanlagen – EGST, Altenberge, Anlieferung



- Weitgehend vormontiertes ORC-Modul

- Anbringung Wärmedämmung vor Ort



# Feldanlagen – EGST, Altenberge, Anschlüsse



- Anbindung ORC an Einspeisung, PLS und Telefon/DSL
- Anbindung Abgasweg an Abwasser (Kondensat)

- Anbindung ORC an Abgasleitung mit 3 Abgasklappen
- Anbindung ORC an Trockenkühler

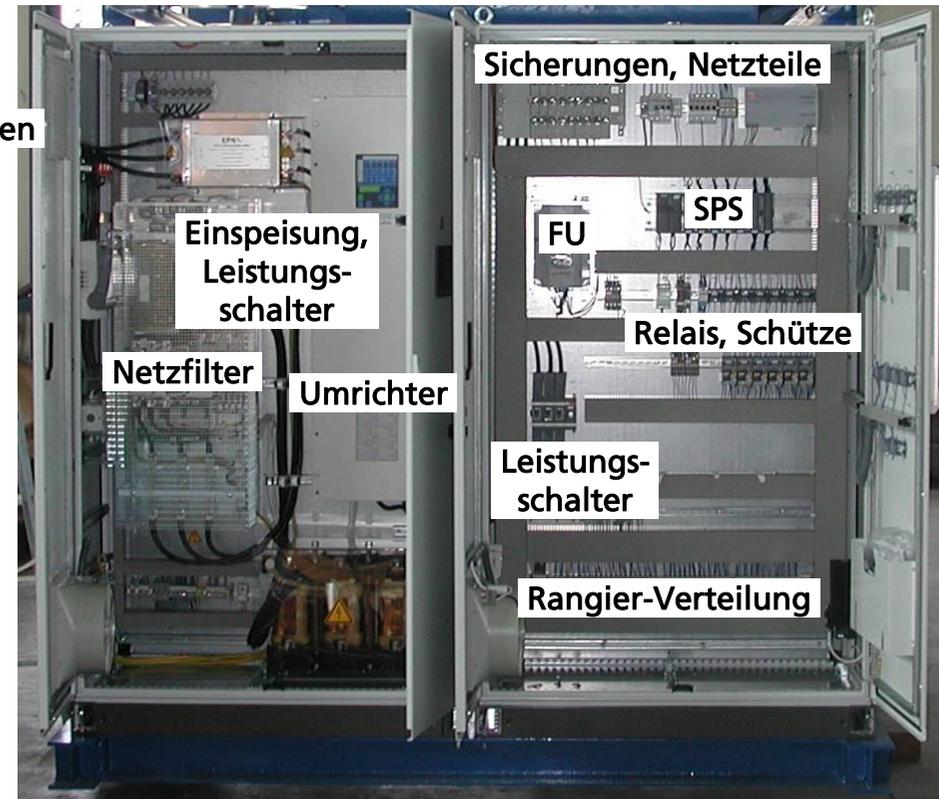
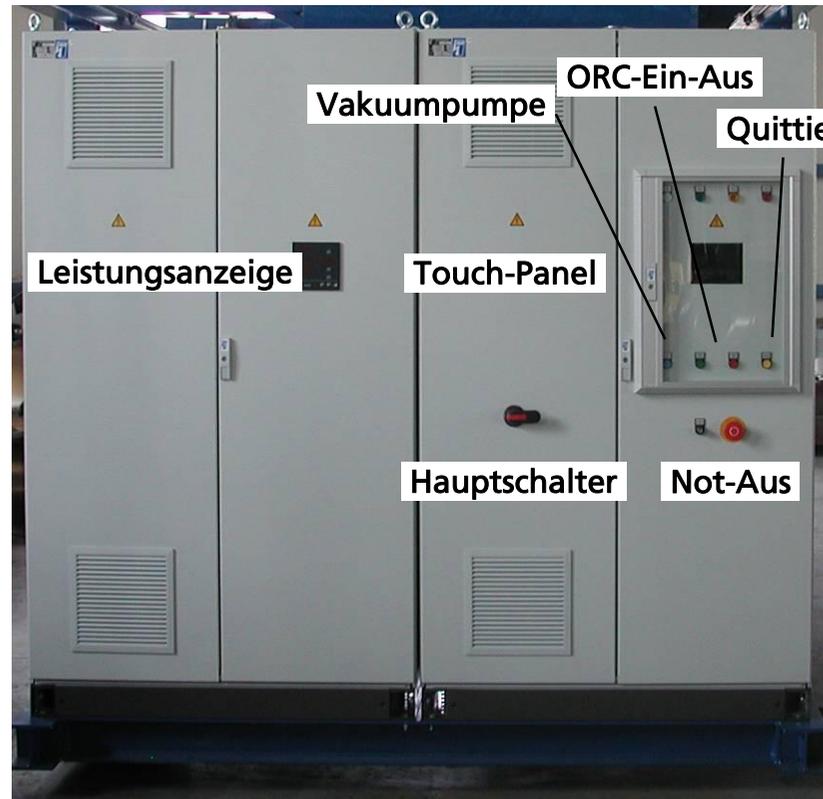


# Feldanlagen – EGST, Altenberge, Überdachung

- Einfache, seitlich offene Überdachung als Korrosions- und Witterungsschutz

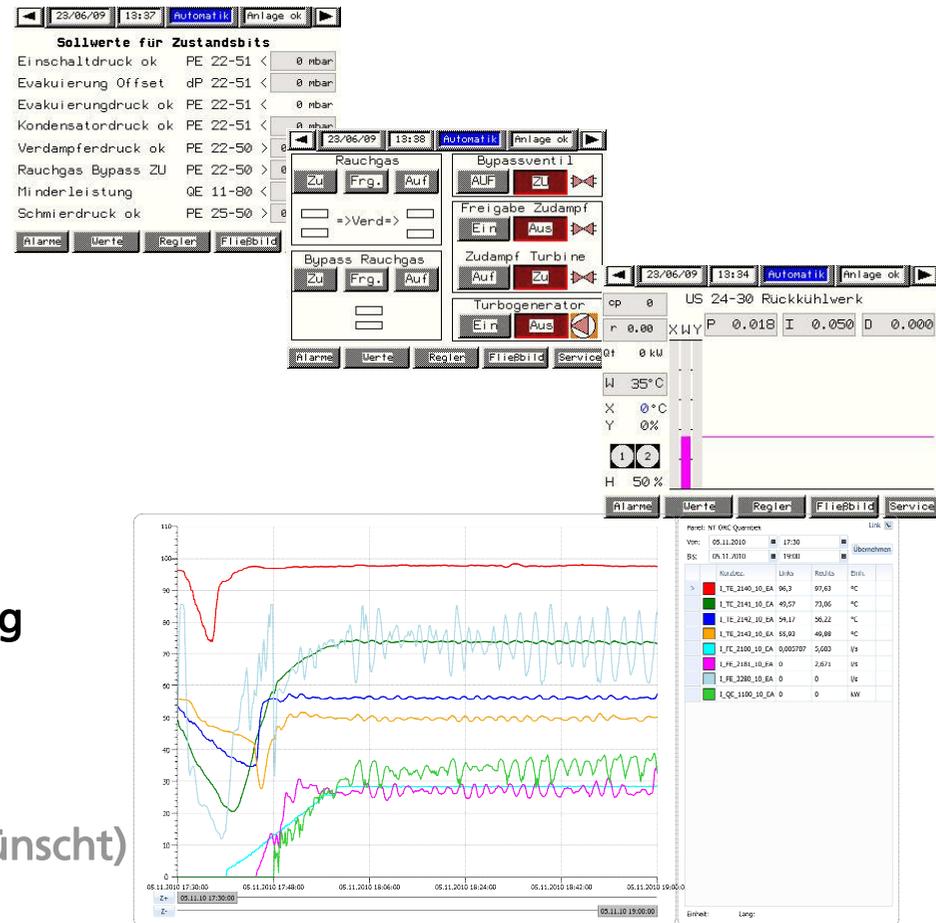


# Schaltanlage HT-ORC-Prozess – Einfache Bedienung



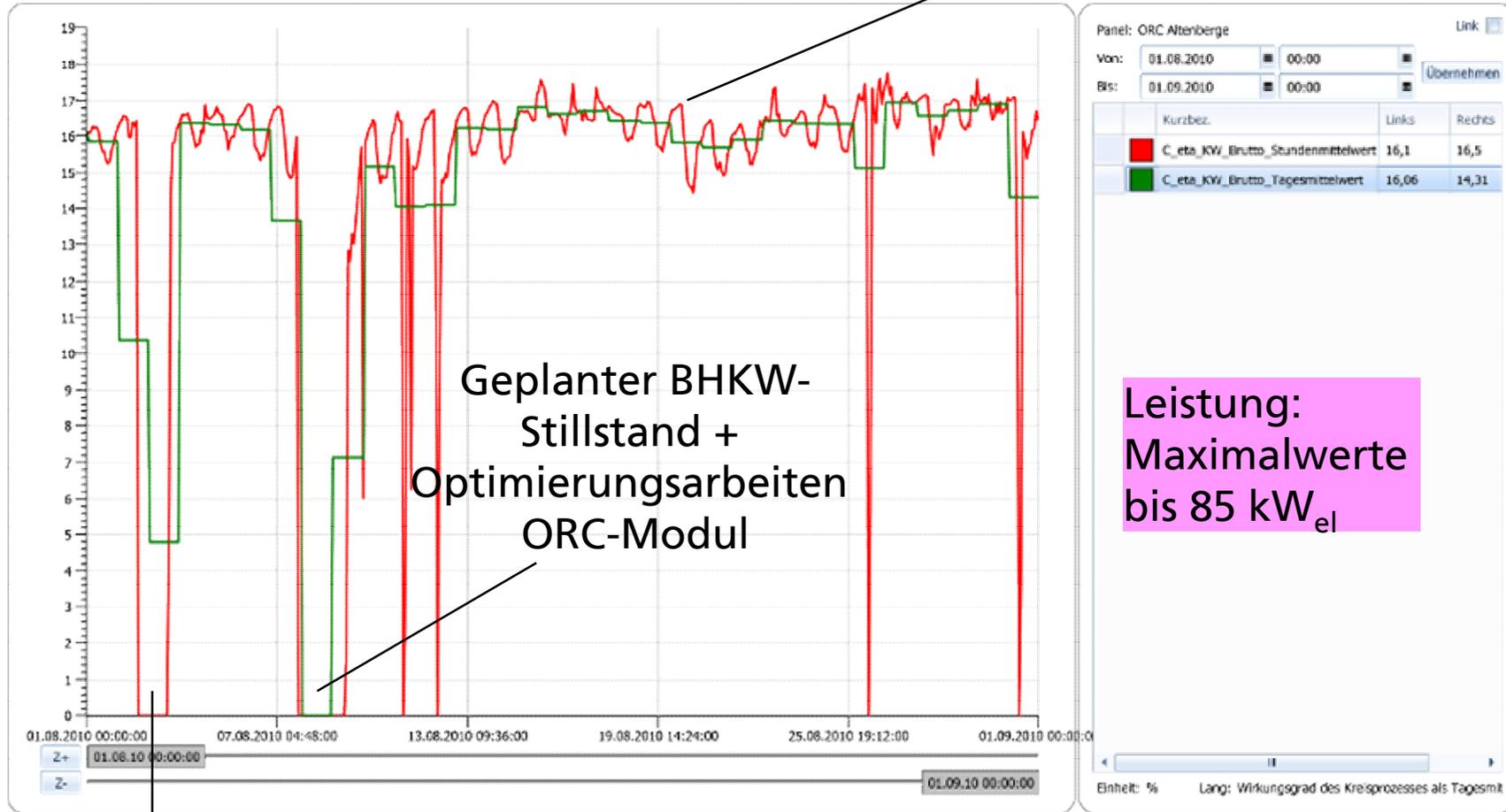
# Steuerungs-/Monitoring/Fernwartungs-Lösung

- Handparametrierung, Handbedienung, Messdatenvisualisierung vor Ort (S7/300 + Touchpanel)
- Prozessdatenspeicherung vor Ort
- SPS-Parameteränderung und SPS-Programmeinspielung von extern
- Messdatenspeicherabfrage von extern
- Konfigurierbare Messdatenvisualisierung
- Automatisierte Auswertungen und Überwachungsrountinen (demnächst)
- Fernsteuerung möglich (aber nicht erwünscht)



# ORC Altenberge – Wirkungsgrade

Tag-Nacht-Zyklus



Panel: ORC Altenberge Link

Von: 01.08.2010 00:00 Übernehmen

Bis: 01.09.2010 00:00

Kurzbez.	Links	Rechts
<span style="color: red;">■</span> C_eta_KW_Brutto_Stundenmittelwert	16,1	16,5
<span style="color: green;">■</span> C_eta_KW_Brutto_Tagesmittelwert	16,06	14,31

Leistung:  
Maximalwerte  
bis 85 kW<sub>el</sub>

Einheit: %      Lang: Wirkungsgrad des Kreisprozesses als Tagesmit

Fehler Speisepumpen-FU

Mai 2011

No. 24

Geplanter BHKW-Stillstand,  
Restarbeiten Wärme-  
dämmung Abgasleitungen

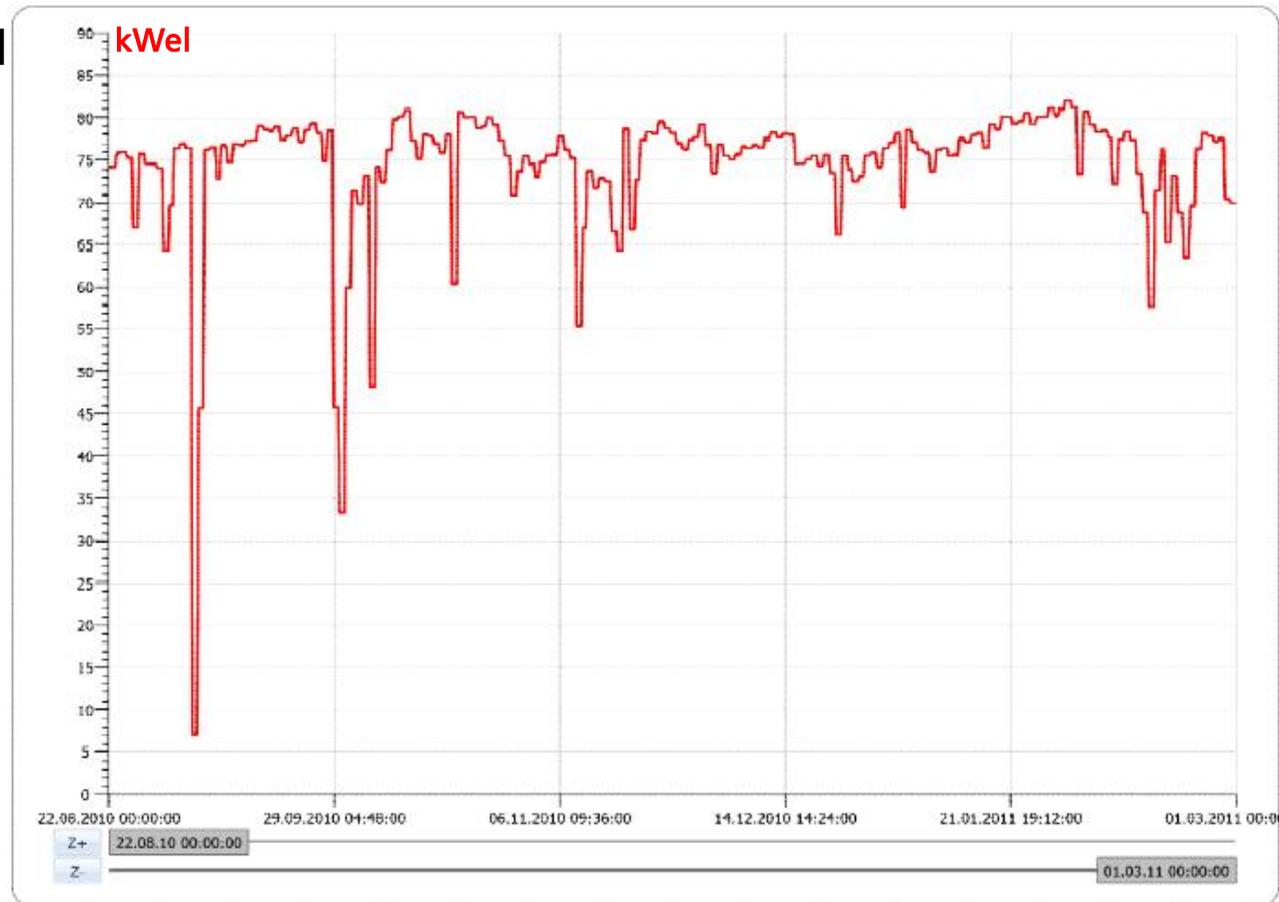
# ORC Altenberge – Eigenverbrauch



# ORC Altenberge – Tagesmittlere Leistung, Verfügbarkeit

Seit Abschluss IBN und Optimierung vom 22.08.2010 - 01.03.2011:

- 4560 h von 4569 h verfügbar (99,8%)



# ORC Altenberge – Zusammenfassung

- Motor: Jenbacher, 802 kW<sub>el</sub>
- Abgaswärme: 536/180°C, 470 kW<sub>th</sub>
- Arbeitsfluid: Kohlenwasserstoff
- Maximal erzeugte Leistung: 85 kW<sub>el</sub>
- Eigenbedarf etwa 10% der erzeugten Leistung
- Wirkungsgrad bis 18% brutto, 16% netto (unterhalb der Auslegungsleistung des Moduls A-100)
- Kaltinbetriebnahme und Anschlussphase nach Anlieferung vor Ort: ca. 4 Wochen
- Eigentliche heiße Inbetriebnahme nach komplettem Anschluss: ca. 2 Wochen, danach noch 2 kleinere Umbauten zur Optimierung
- Verfügbarkeit im letzten halben Jahr: 99,8%

## ORC-Betrieb – Mitwirkung des Betreibers

- Vollautomatischer überwachter Betrieb des ORC
- Mindestleistung der Wärmezufuhr für Start des ORC notwendig
- Schnelle Kontrolle des ORC-Moduls und Fehlerquittierung bei gemeldeten Störungen (noch sehr konservative Sicherheitsphilosophie)
- Täglicher Kontrollgang
- Erledigung minimaler Wartungsarbeiten (Filterreinigung alle 6-12 w, Arbeitsfluidnachfüllung 3-6 m, Filtertausch an Schaltanlage 6-12 m)
- Ggf. Reinigung des Rückkühlers und des Abgasweges im ORC-Verdampfer
- Diskussion in der Anlagenüberwachung erkennbarer Verschlechterungen und kleinerer Betriebsprobleme mit dem Hersteller

# A-100 – CE-Erklärung, TÜV-Abnahme, Herstellerschild



## ZERTIFIKAT

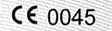
**CERTIFICATE**  
 (Konformitätsbescheinigung)  
 (Certificate of conformity)

**EG-Einzelprüfung**  
 nach Richtlinie 97/23/EG  
 EC-Unit Verification according to Directive 97/23/EC

**Zertifikat-Nr.:** 07 202 1403 Z 0212 / 9 / D / 0131  
 Certificate No.:

**Name und Anschrift des Herstellers:** Fraunhofer Institut Umsicht  
 Osterfelder Straße 3  
 46047 Oberhausen

Hiermit wird bescheinigt, dass die Ergebnisse der an der unten genannten Baugruppe vorgenommenen Prüfungen die Anforderungen der Richtlinie 97/23/EG erfüllen. Die Baugruppe ist mit dem abgebildeten Zeichen gekennzeichnet.  
 It is hereby certified, that the results of the tests on the above mentioned assembly fulfil the requirements of the Pressure Equipment Directive 97/23/EC. The assembly is marked with the following sign:



**Geprüft nach Richtlinie 97/23/EG:** EG-Einzelprüfung (Modul G)  
 Examined according to Directive 97/23/EC: EC-Unit Verification (Module G)

**Prüfbericht-Nr.:** 07 202 1403 P 0212 / 9 / D / 0131  
 Test Report No.:

**Beschreibung der Baugruppe:** ORC-Modul, Typ Rankine 100/BHKW  
 Description of the assembly: PS: HD -1/16 bar, ND -1/10 bar

**Herstell-Nr.:** 01/2007  
 Identification No.:

**Kategorie:** IV  
 Category:

**Fertigungsstätte:** Fraunhofer Institut Umsicht  
 Production facility: Osterfelder Straße 3  
 46047 Oberhausen

Dortmund, den 20.02.2009



Zertifizierungsstelle für Druckgeräte  
 der TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG  
 Certification Body for Pressure Equipment  
 of TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG

Benannte Stelle, Kennnummer 0045



Mitglied der

TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG Tel. +49 (0)231-6186-253  
 Ondtje-Bahnstraße 31 Fax +49 (0)231-6186-266  
 D-22526 Hamburg e-mail: zalelke@tuv-nord.de

<b>Hersteller und Adresse:</b> Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik <b>UMSICHT</b> Osterfelder Straße 3 46047 Oberhausen Telefon +49 208 8598-0					
<b>Baujahr:</b> <b>Auftrags-Nummer:</b> <b>Fertigungs-Nummer:</b> <b>Typ:</b> <b>Generatorleistung</b> <b>Leergewicht:</b> <b>Betriebsgewicht:</b>	Rankine 100/BHKW/A-100 100 kW <sub>el</sub> 14 500 kg 15 500 kg				
<b>Betriebsdruck (min/max):</b> <b>Betriebstemperatur min/max:</b> <b>Volumen:</b> <b>Einstellwert der Sicherheitseinrichtung:</b> <b>Medium:</b> <b>Fluidgruppe:</b>	<b>Abgasseite/Heizseite</b> 0/6,7 bar -10/478 °C 985 Liter STB 350 °C Abgas	<b>Druckseite ORC-Prozess</b> -1/18 bar -10/250 °C 1250 Liter 18 bar	<b>Vakuumsseite ORC-Prozess</b> -1/6,7 bar -10/170 °C 1800 Liter 3,2 bar	<b>Kühlseite</b> 1/6 bar -10/80 °C 280 Liter 2,5 bar Wasser/Glyköl	2 1 1 2

# ORC-Entwicklung für BHKW-Motoren – Derzeitige Erfahrungen

- Versagen oder nicht spezifikationsgerechte Funktion eingesetzter Prozesskomponenten durch raue Betriebsbedingungen bei Außenbetrieb
- Gelegentlich noch kleine Fehler in der Anlagensteuerungssoftware
- Gelegentlich fehlerhafte Parametrierung der Steuerung (Regelkreise) oder von Prozesskomponenten (FU, Wechselrichter, Meßsensoren)
- Gelegentlich versteckte Montagefehler (mechanisch oder elektrisch)
- Gelegentlich kleinere Undichtigkeiten des Prozesses am Vakuumteil
- Die ORC-Felderprobungsmodule laufen sonst mit Wirkungsgraden zwischen 13 und 18% netto und Verfügbarkeiten zwischen 6500 h/a bis 8500 h/a
- Herstellungspreis fällt langsam, Wirkungsgrad und Verfügbarkeit steigen

Anzahl der Störungen am ORC Modul < Anzahl der Störungen am Motor (!)

Dauer der Fehlerbeseitigung: ORC > Motor (noch kein ausgebauter Service)

Startdauer ORC >> Startdauer Motor (thermische Masse)

**Danke für Ihre Aufmerksamkeit!**



Mai 2011

No. 31