

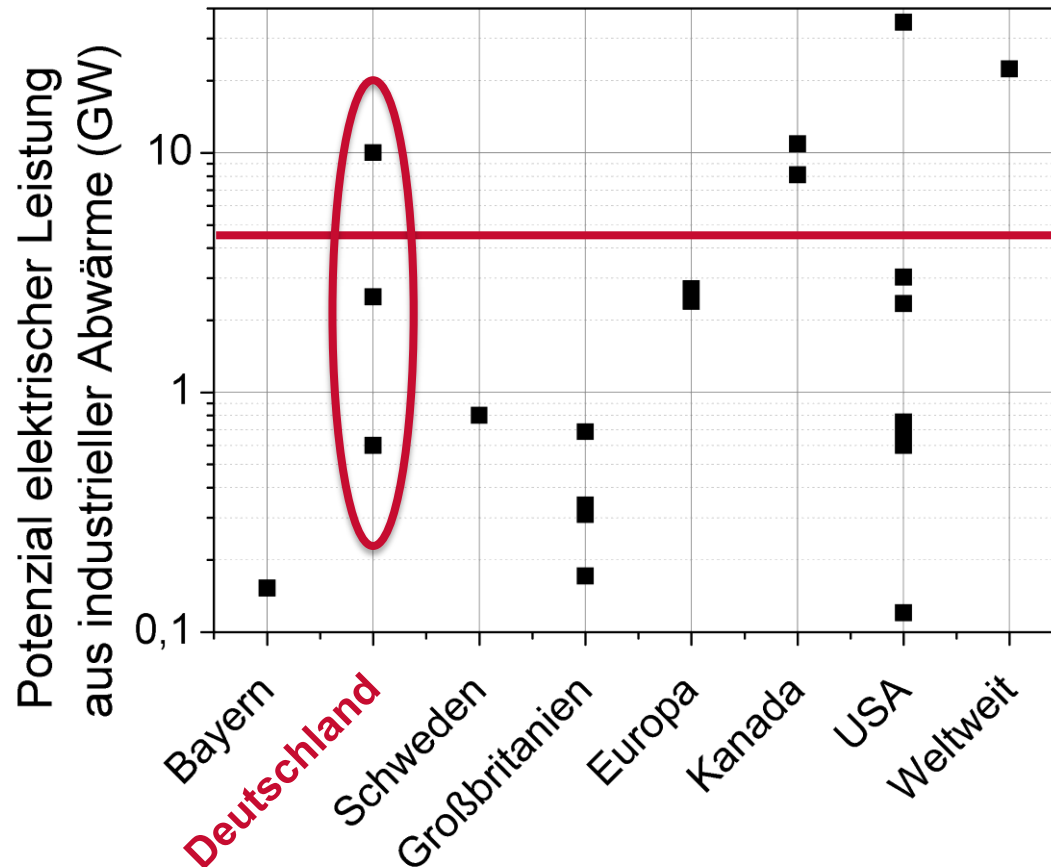
Thermoökonomische Betrachtung der industriellen Abwärmenutzung durch ORC

1. Schweizer ORC-Symposium, 21.11.2014, Luzern

M. Preißinger, F. Heberle, D. Brüggemann

Forschungsthema der Dissertation

Stromerzeugung aus industrieller Abwärme – Potenziale



Zum Vergleich:

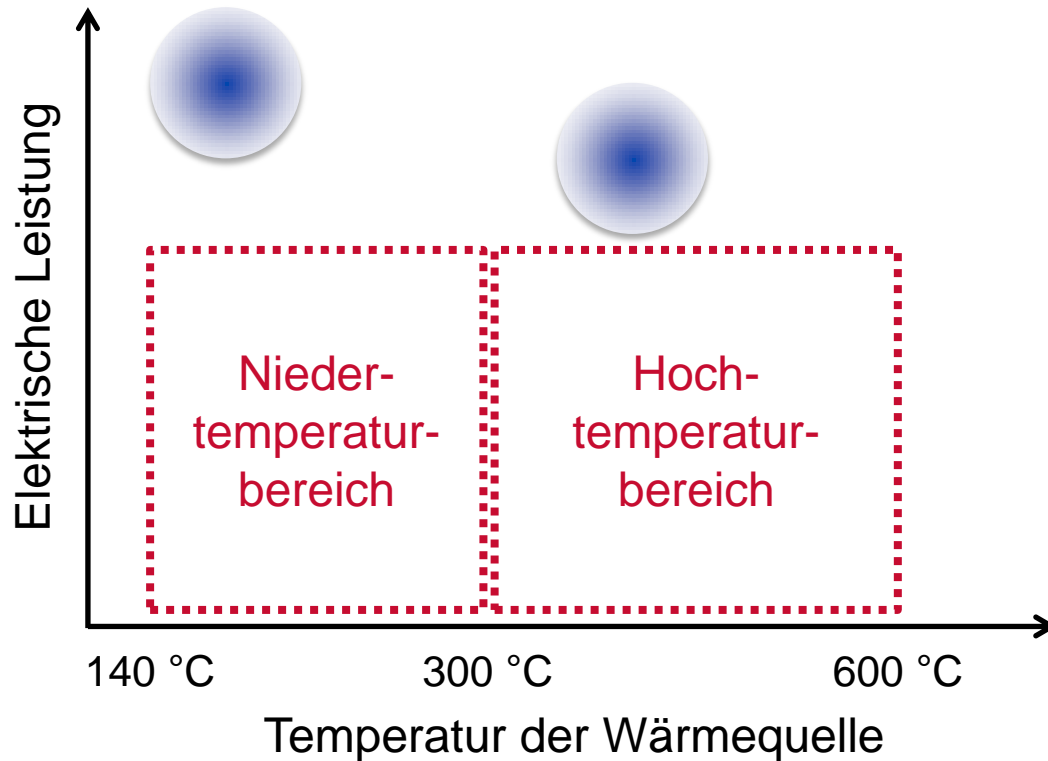
Leistung der drei größten, sich noch am Netz befindlichen Kernkraftwerke in Deutschland:

Isar 2	1485 MW
Brokdorf	1480 MW
Philippsburg 2	1468 MW

	4433 MW

Forschungsthema der Dissertation

Der Organic Rankine Cycle – Anwendungsgebiete



Geothermie

- $\approx 120/150$ °C
- > 1000 kW

Biomasse

- ≈ 350 °C (TÖ-Temperatur)
- > 600 kW

Industrielle Abwärme

- Nieder- und Hoch-temperaturbereich
- Leistungen zwischen 15 kW und 500 kW

Forschungsthema der Dissertation

Nutzung industrieller Abwärme

Probleme bei der Nutzung industrieller Abwärme:

- Starke Variation der Randbedingungen (Temperaturniveau, Leistungsklasse)
- Veränderte Kriterien hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit
- Hohe spezifische Investitionskosten da bisher keine Marktdurchdringung

Chancen bei der Nutzung industrieller Abwärme:

- Sehr hohes Potenzial der Stromerzeugung
- Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsgebiete (Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Brennstoffzellen)

Die Nutzung industrieller Abwärme kann der Schlüssel zum „Durchbruch“ der Technologie werden

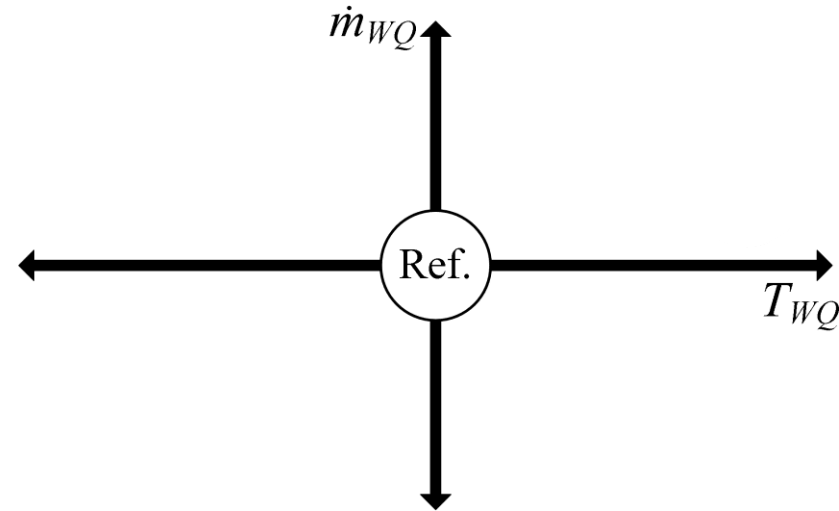
Modularisierte ORC-Anlagen

Gliederung

1. Nutzung industrieller Abwärme – Chancen und Potenziale
- 2. Methodik, Simulationsmodell und Arbeitsfluide**
3. Thermodynamische und anlagentechnische Bewertung
4. Thermoökonomische Analyse und Bewertung
5. Modularisierte ORC-Anlagen
6. Zusammenfassung und Ausblick

Methodischer Ansatz

Zielsetzung und Fragestellungen



Ziel:

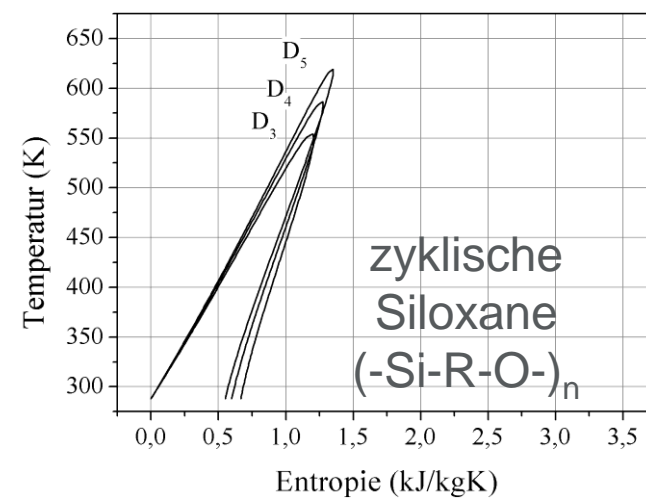
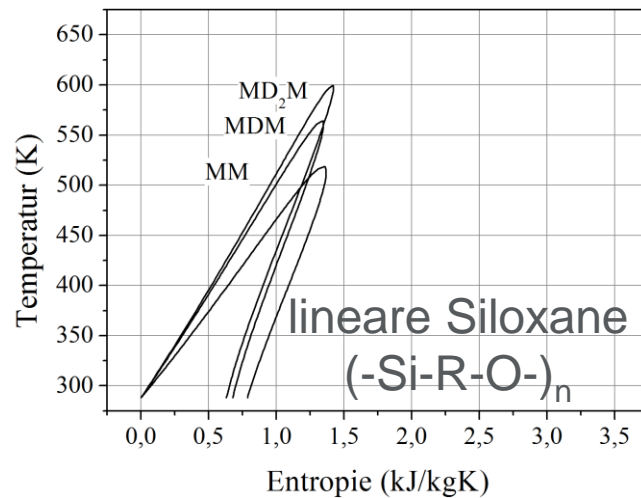
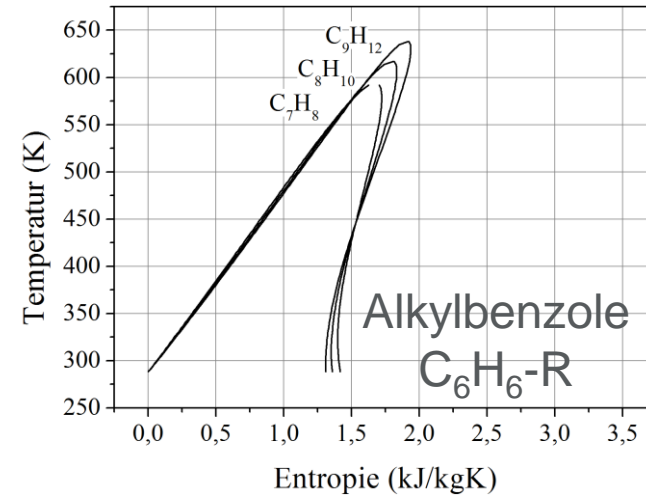
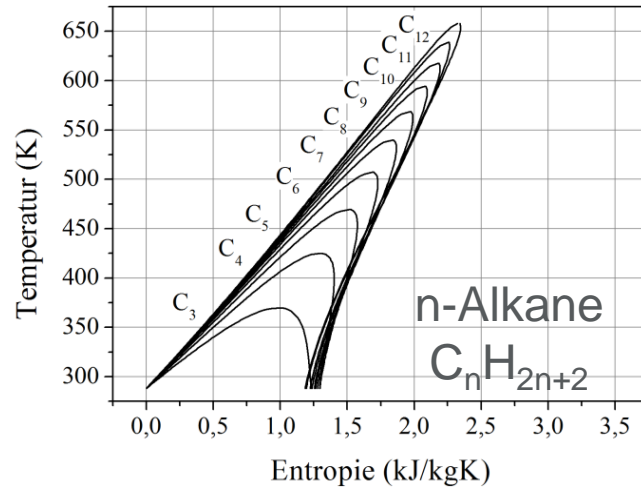
aus bestehender Referenzanlage sollen Anlagen für unterschiedliche Wärmequellen (T_{WQ}, \dot{m}_{WQ}) abgeleitet werden, die sich durch eine hohe Effizienz und geringe Investitionskosten auszeichnen.

Fragestellungen:

1. Welche Arbeitsfluide und welche Verschaltungsvariante sind thermodynamisch für den Nieder- und Hochtemperaturbereich zu wählen?
2. Wie verhalten sich anlagen- und sicherheitstechnische Parameter?
3. In welchem Temperatur- und Leistungsbereich ist eine Modularisierung von ORC-Anlagen thermoökonomisch sinnvoll?

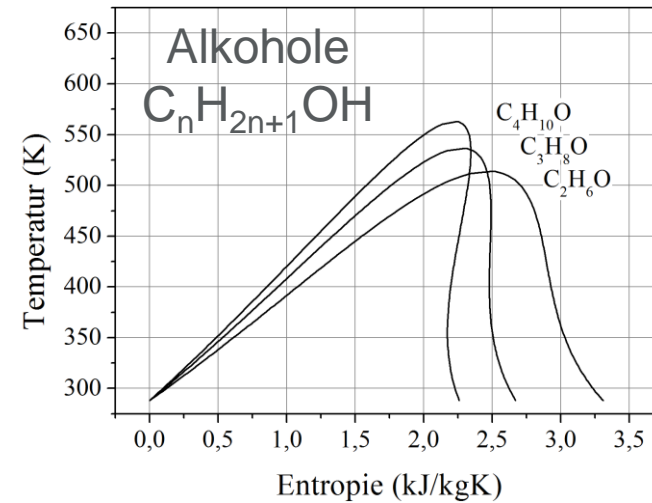
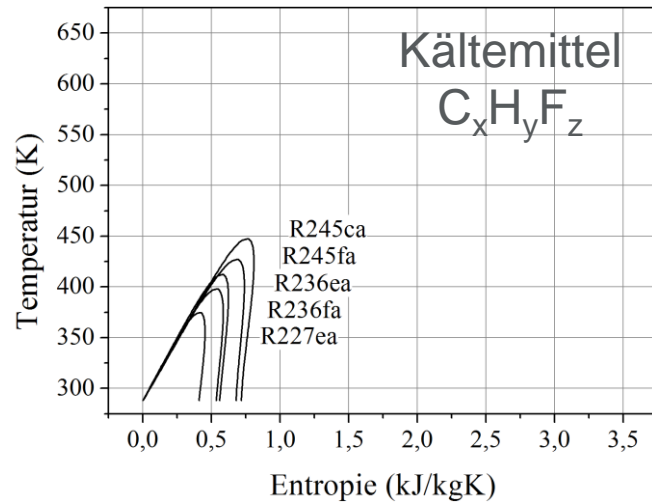
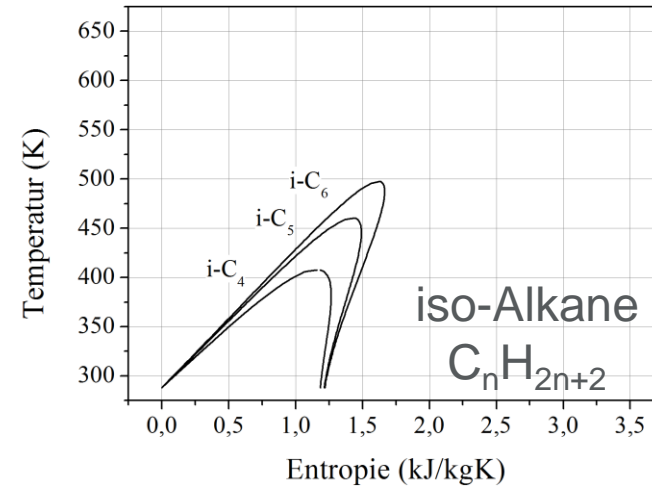
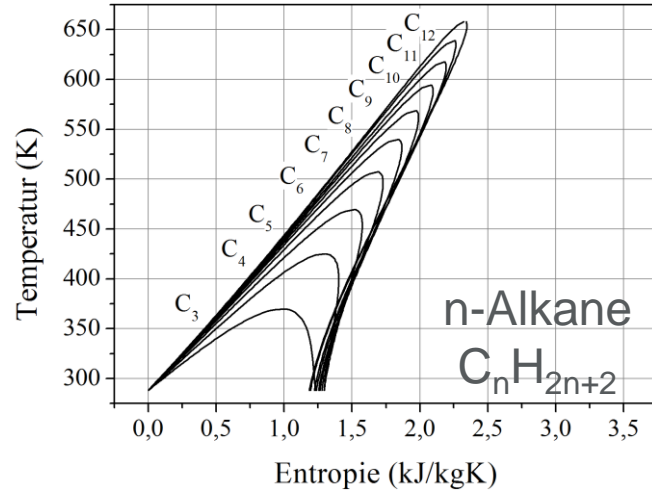
Der Organic Rankine Cycle

Arbeitsfluide – Hochtemperaturbereich



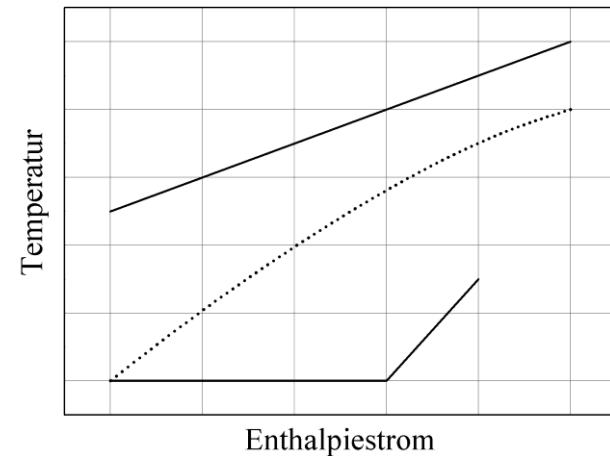
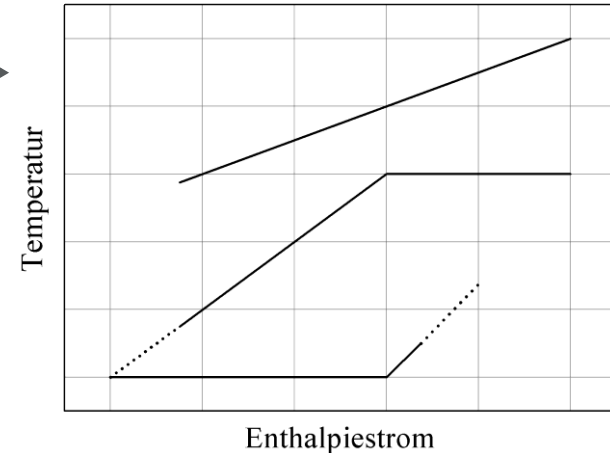
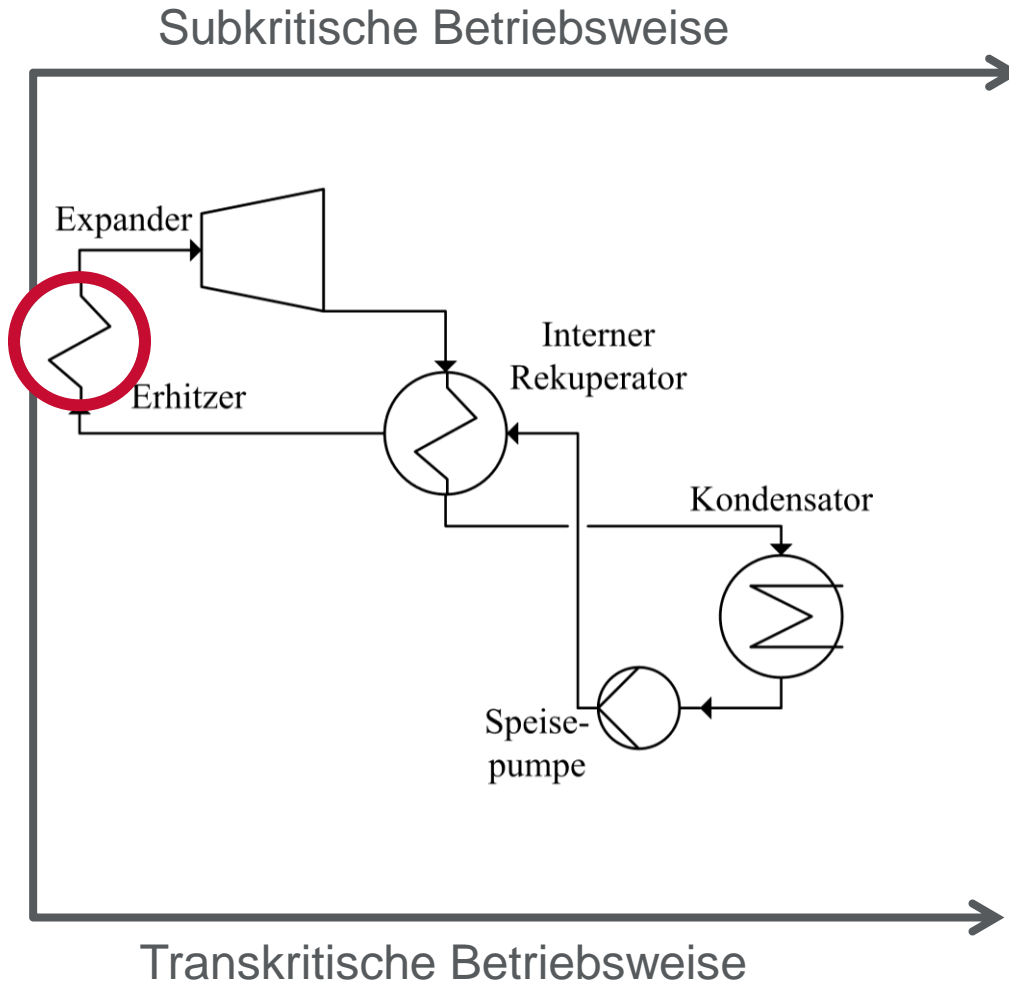
Der Organic Rankine Cycle

Arbeitsfluide – Niedertemperaturbereich



Der Organic Rankine Cycle

Anlagenverschaltung mit internem Rekuperator



Methodischer Ansatz

Bewertungskriterien

- Nettoleistung

$$P_{net} = |P_T| - P_P$$

- Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{P_{net}}{\dot{Q}_{Erh}}$$

- Exergetischer Wirkungsgrad

$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}}$$

- Exergiestrom

$$\dot{E}_{WQ} = \dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]$$

Methodischer Ansatz

Bewertungskriterien

- Wärmeübertragungskapazität
- Volumenstromverhältnis der Turbine
- Größenparameter der Turbine
Angelino et al. (1984)
- Drehzahl der Turbine
Angelino et al. (1984)

$$UA = \frac{\dot{Q}}{LMTD} = \frac{\dot{Q}}{\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}}$$

$$V_{Ratio} = \frac{\dot{V}_{aus,T}}{\dot{V}_{ein,T}}$$

$$VH_T = \frac{\sqrt{\dot{V}_{aus,T}}}{\Delta h_{is,T}^{1/4}}$$

$$n = \frac{\Delta h_{is,T}^{3/4}}{10 \cdot \sqrt{\dot{V}_{aus,T}}}$$

↑

$$N_s = n \frac{\sqrt{\dot{V}_{aus,T}}}{\Delta h_{is,T}^{3/4}} = 0,1$$

Astolfi et al. (2011)

Modularisierte ORC-Anlagen

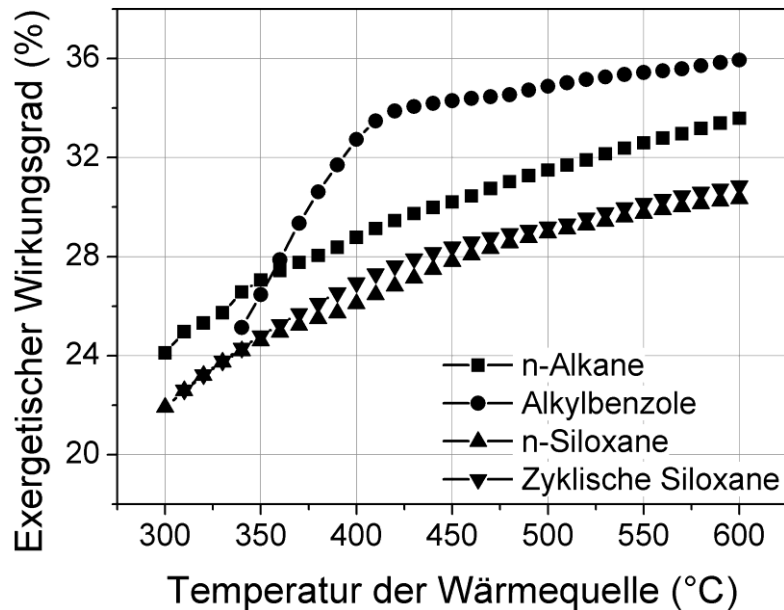
Gliederung

1. Nutzung industrieller Abwärme – Chancen und Potenziale
2. Methodik, Simulationsmodell und Arbeitsfluide
- 3. Thermodynamische und anlagentechnische Bewertung**
4. Ökonomische Analyse und Bewertung
5. Modularisierte ORC-Anlagen
6. Zusammenfassung und Ausblick

Thermodynamische Bewertung von ORC-Anlagen

Vergleich der betrachteten Fluidklassen: η_{ex}

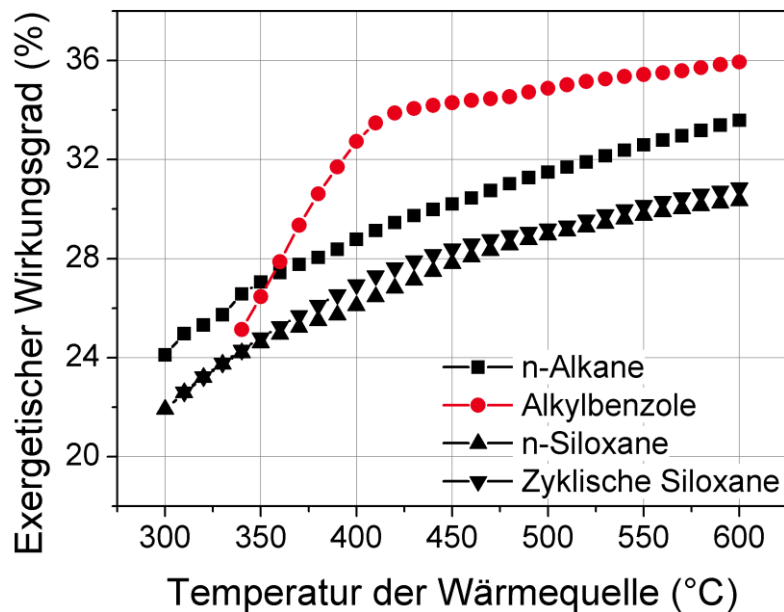
$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}} = \frac{|P_T| - P_P}{\dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]}$$



Thermodynamische Bewertung von ORC-Anlagen

Vergleich der betrachteten Fluidklassen: η_{ex}

$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}} = \frac{|P_T| - P_P}{\dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]}$$

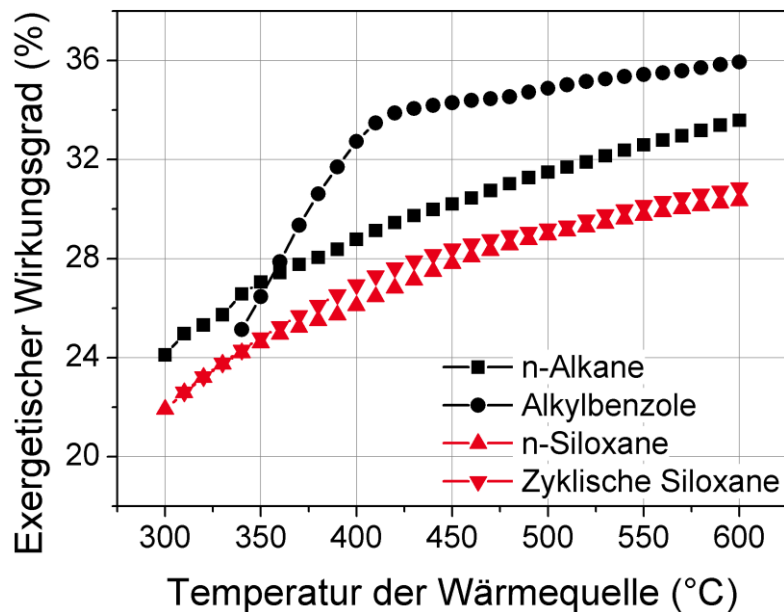


- Alkylbenzole thermodynamisch zu bevorzugen
- Alkylbenzole weisen erst ab ca. 420 °C eine gleichmäßige Wirkungsgradsteigerung mit der Temperatur auf

Thermodynamische Bewertung von ORC-Anlagen

Vergleich der betrachteten Fluidklassen: η_{ex}

$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}} = \frac{|P_T| - P_P}{\dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]}$$

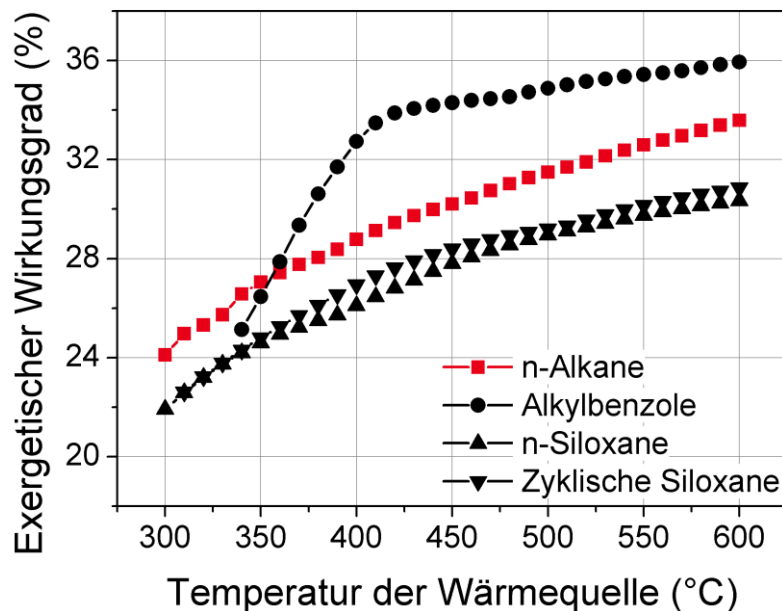


- Alkylbenzole thermodynamisch zu bevorzugen
- Alkylbenzole weisen erst ab ca. 420 °C eine gleichmäßige Wirkungsgradsteigerung mit der Temperatur auf
- lineare und zyklische Siloxane haben deutlich geringere Wirkungsgrade

Thermodynamische Bewertung von ORC-Anlagen

Vergleich der betrachteten Fluidklassen: η_{ex}

$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}} = \frac{|P_T| - P_P}{\dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]}$$

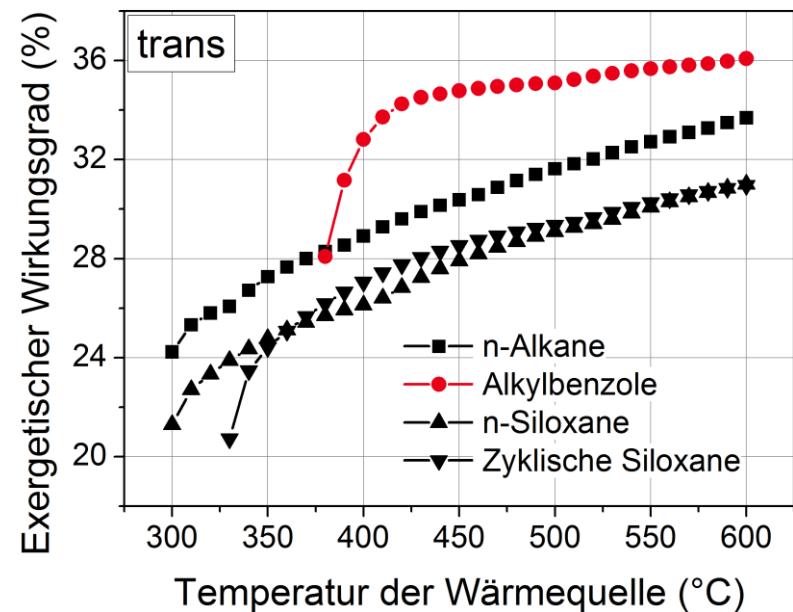
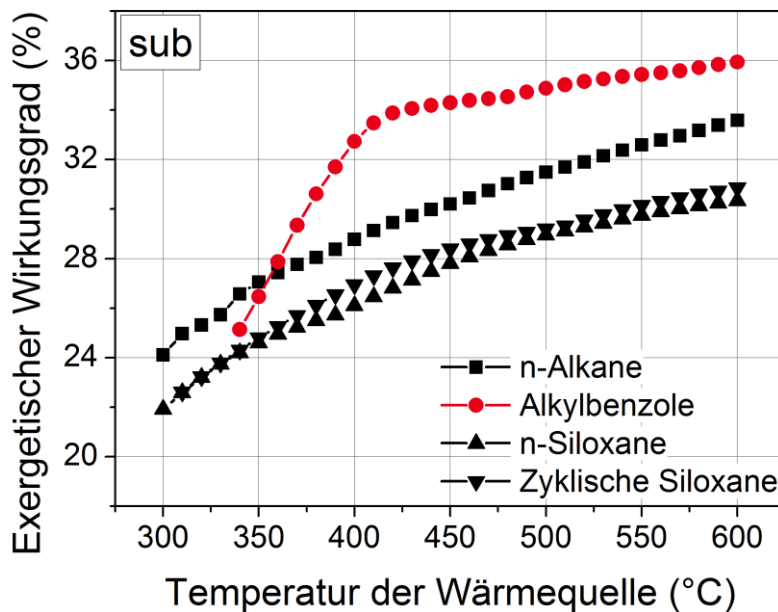


- Alkylbenzole thermodynamisch zu bevorzugen
- Alkylbenzole weisen erst ab ca. 420 °C eine gleichmäßige Wirkungsgradsteigerung mit der Temperatur auf
- lineare und zyklische Siloxane haben deutlich geringere Wirkungsgrade
- n-Alkane erreichen mittlere Werte

Thermodynamische Bewertung von ORC-Anlagen

Vergleich der betrachteten Fluidklassen: η_{ex}

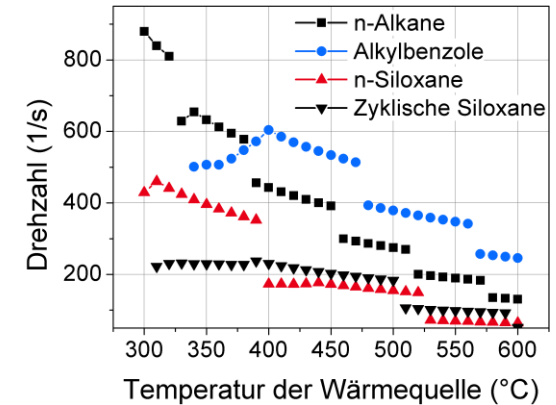
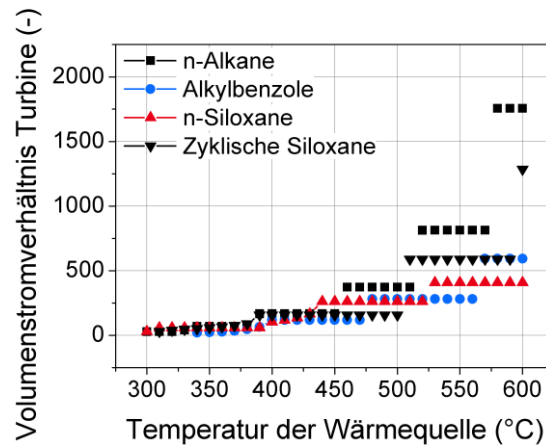
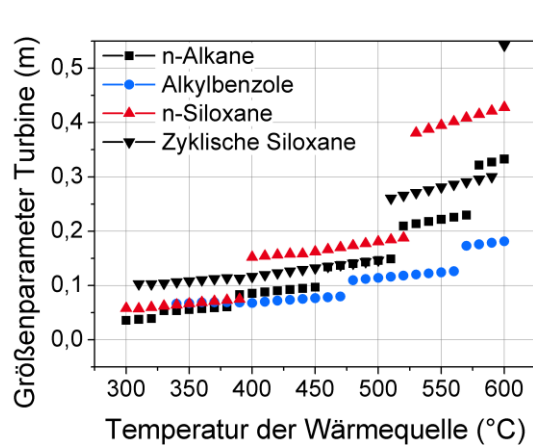
$$\eta_{ex} = \frac{P_{net}}{\dot{E}_{WQ}} = \frac{|P_T| - P_P}{\dot{m}_{WQ} \cdot [h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0)]}$$



→ Alkylbenzole in transkritischer Betriebsweise sind thermodynamisch zu bevorzugen

Anlagentechnische Bewertung von ORC-Anlagen

Hochtemperaturbereich



- Siloxane benötigen größere Turbinen
- Volumenstromverhältnis nahezu konstant
- Drehzahl für Siloxane deutlich geringer

→ ein ORC-spezifisches Thermoökonomiemodell muss auch diese Effekte berücksichtigen

Modularisierte ORC-Anlagen

Gliederung

1. Nutzung industrieller Abwärme – Chancen und Potenziale
2. Methodik, Simulationsmodell und Arbeitsfluide
3. Thermodynamische und anlagentechnische Bewertung
- 4. Thermoökonomische Analyse und Bewertung**
5. Modularisierte ORC-Anlagen
6. Zusammenfassung und Ausblick

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$K_{ORC} = I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\ \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]$$

→ Realisierte ORC-Anlage mit bekannter Kostenverteilung

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$K_{ORC} = I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\ \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]$$

Kolbenmembranpumpe

$$\frac{K_{ORC}}{K_{ORC,ref}} = \left(\frac{C_{ORC}}{C_{ORC,ref}} \right)^m$$

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$\begin{aligned}
 K_{ORC} = & I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\
 & \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]
 \end{aligned}$$

Rohrbündelwärmeübertrager

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$K_{ORC} = I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\ \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]$$

Skalierung und Komplexität

$$k_{TGE} = \frac{K_{TGE,ref}}{P_{Gen,ref}} \left(0,7 \cdot \left(\frac{VH_T}{VH_{T,ref}} \right)^{2,5} + 0,1 \cdot \left(\frac{n_T}{n_{T,ref}} \right)^{1,5} + 0,2 \cdot \left(\frac{n_T}{n_{T,ref}} \right)^{1,5} \right)$$

Material

Lagerung

Engineering

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$K_{ORC} = I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\ \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]$$

Technologiesprünge

$$k_{TGE} = \begin{cases} k_{TGE} \cdot 1,25 & \text{für } V_{Ratio} > 100 \\ \end{cases}$$

Mehrstufige Turbine

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

ORC-spezifisches Kostenmodell

$$K_{ORC} = I_{spez,0} \cdot \frac{PI_{2013}}{PI_0} \cdot P_{Gen,ref} \cdot \left[k_{P,ref} \cdot \left(\frac{P_{el,P}}{P_{el,P,ref}} \right)^{0,43} \cdot \frac{F_{P,P}}{F_{P,P,ref}} + k_{IR,ref} \left(\frac{A_{IR}}{A_{IR,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,IR}}{F_{P,IR,ref}} \right. \\ \left. + k_{Erh,ref} \left(\frac{A_{Erh}}{A_{Erh,ref}} \right)^{0,59} \cdot \frac{F_{P,Erh}}{F_{P,Erh,ref}} + k_{Kond,ref} \left(\frac{A_{Kond}}{A_{Kond,ref}} \right)^{0,39} \cdot \frac{F_{P,Kond}}{F_{P,Kond,ref}} + k_{TGE} + k_{Rohre} \right]$$

Technologiesprünge

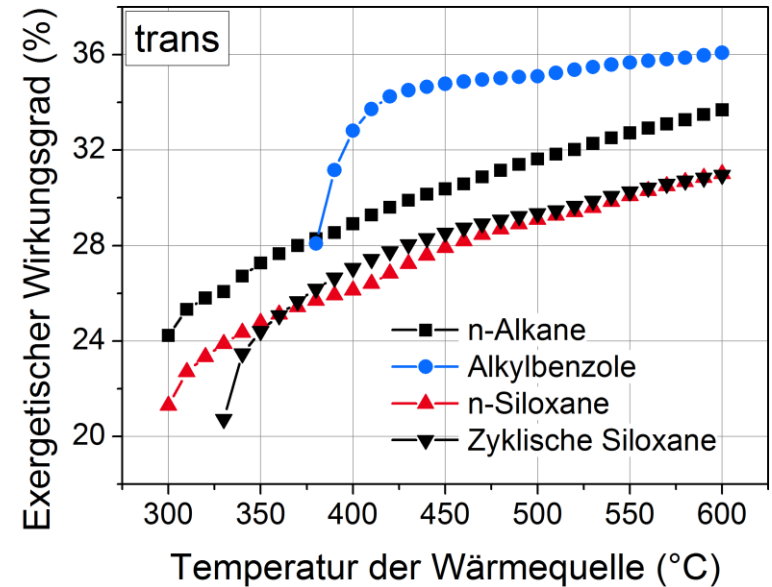
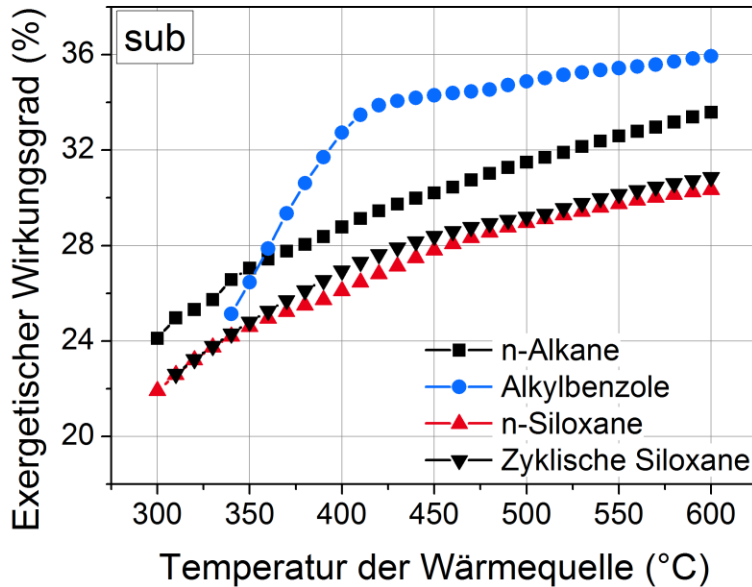
$$k_{TGE} = \begin{cases} k_{TGE} \cdot 1,25 & \text{für } V_{Ratio} > 100 \\ k_{TGE} \cdot 1,90 & \text{für } n_T > 500 \frac{1}{s} \end{cases}$$

Mehrstufige Turbine

Magnetlagerung

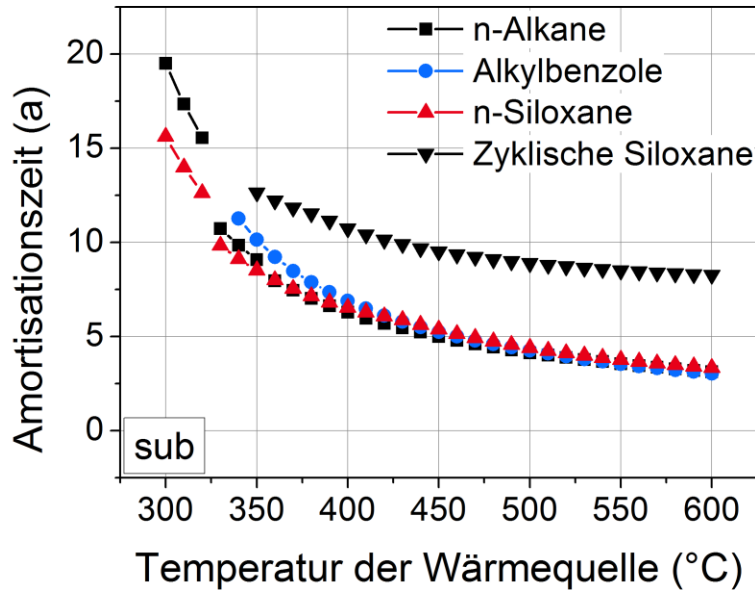
Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

Hochtemperaturbereich, subkritisch vs. transkritisch

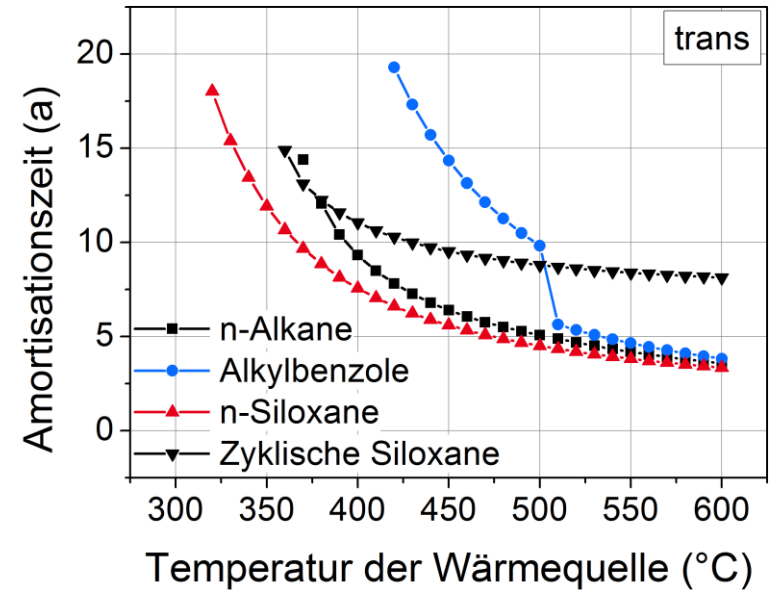


Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

Hochtemperaturbereich, subkritisch vs. transkritisch



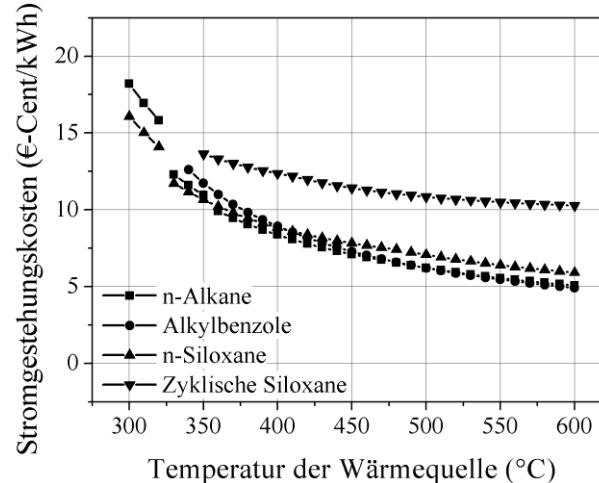
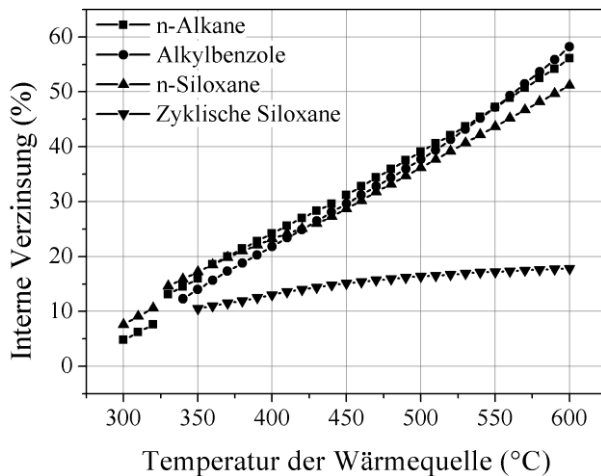
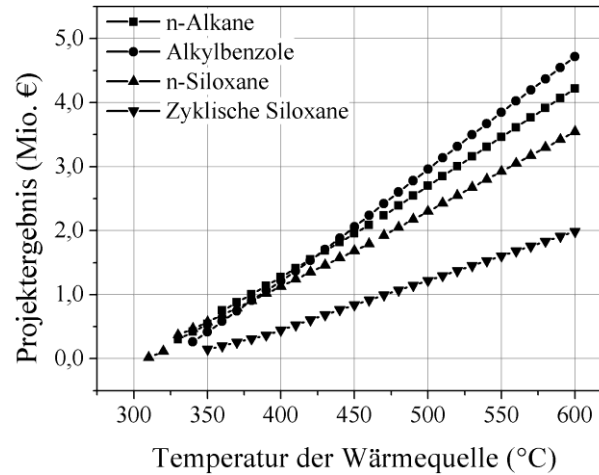
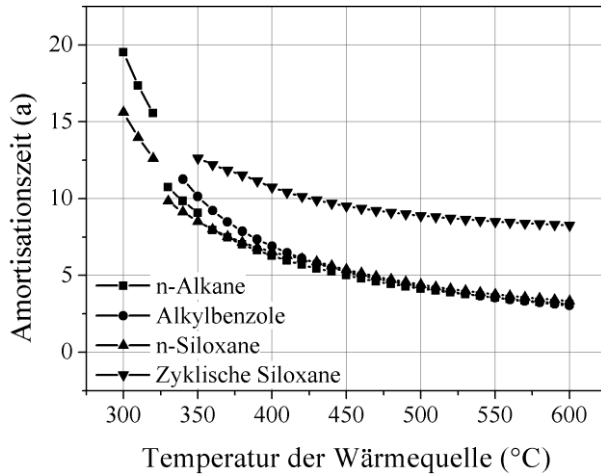
Nahezu einheitliche Amortisationszeiten
(mit Ausnahme der zyklischen Siloxane)



Transkritischer Betrieb thermo-
ökonomisch nicht empfehlenswert

Thermoökonomische Bewertung von ORC-Anlagen

Hochtemperaturbereich, subkritisch



Unter Einbeziehung von Größe, Komplexität und Technologiesprüngen ist das lineare Siloxan Hexamethyldisiloxan (MM) in subkritischer Betriebsweise ist vielversprechendes Fluid für eine Modularisierung

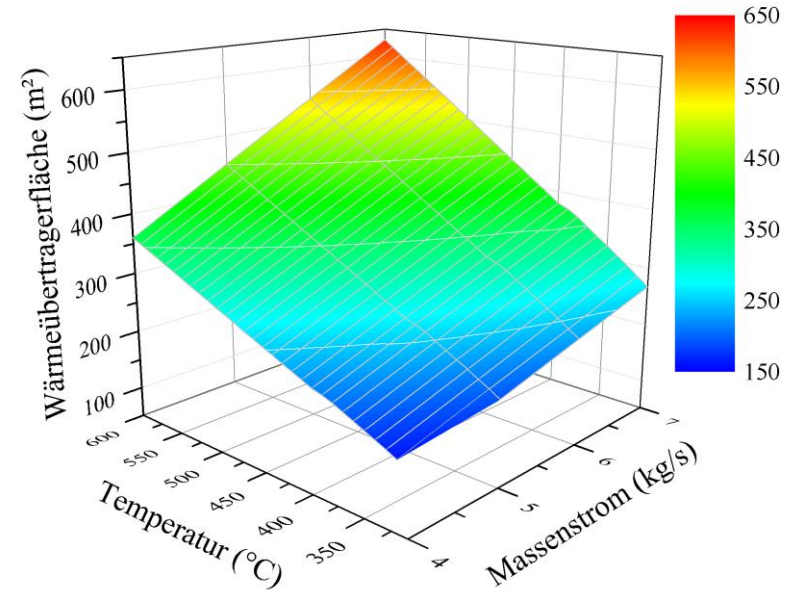
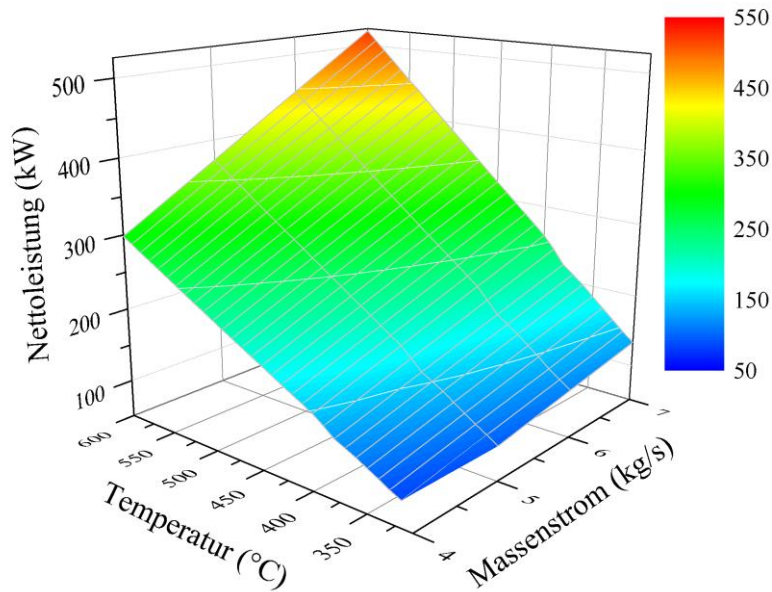
Modularisierte ORC-Anlagen

Gliederung

1. Nutzung industrieller Abwärme – Chancen und Potenziale
2. Methodik, Simulationsmodell und Arbeitsfluide
3. Thermodynamische und anlagentechnische Bewertung
4. Thermoökonomische Analyse und Bewertung
- 5. Modularisierte ORC-Anlagen**
6. Zusammenfassung und Ausblick

Modularisierung von ORC-Anlagen

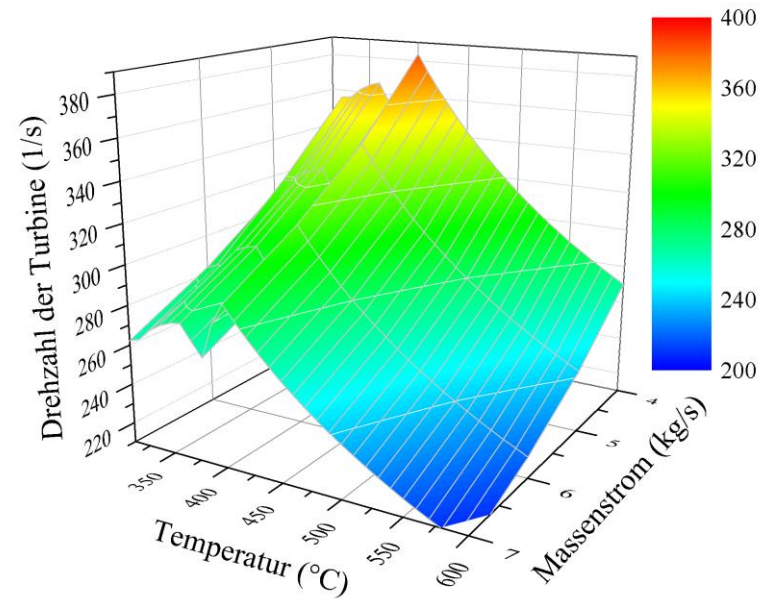
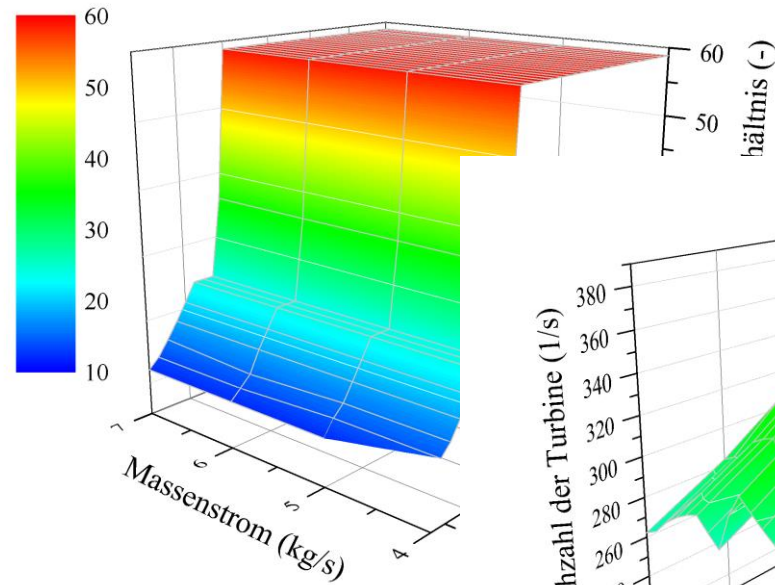
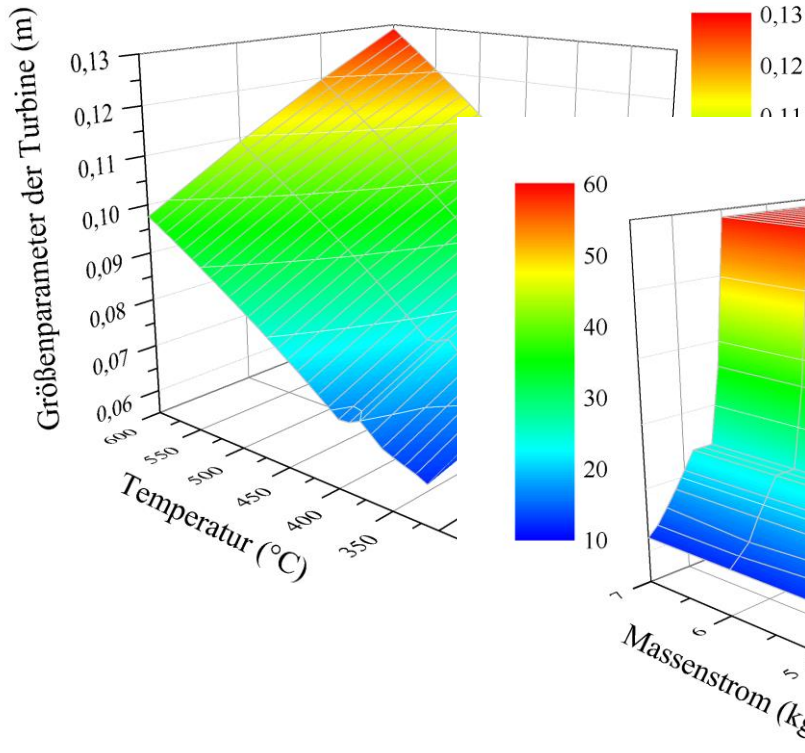
Hochtemperaturbereich, Arbeitsfluid: MM



- stetiger Verlauf der Nettoleistung und der Wärmeübertragerfläche
- vorteilhaft für Modularisierung über breiten Temperatur- und Massenstrombereich

Modularisierung von ORC-Anlagen

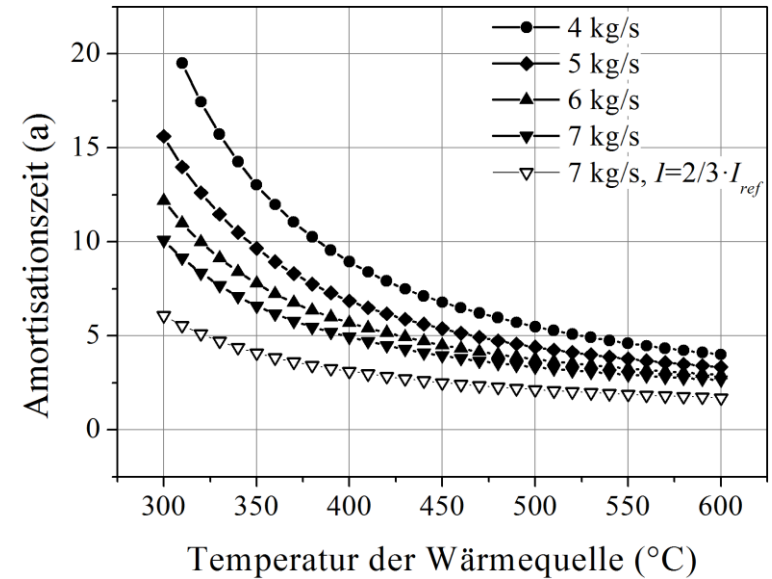
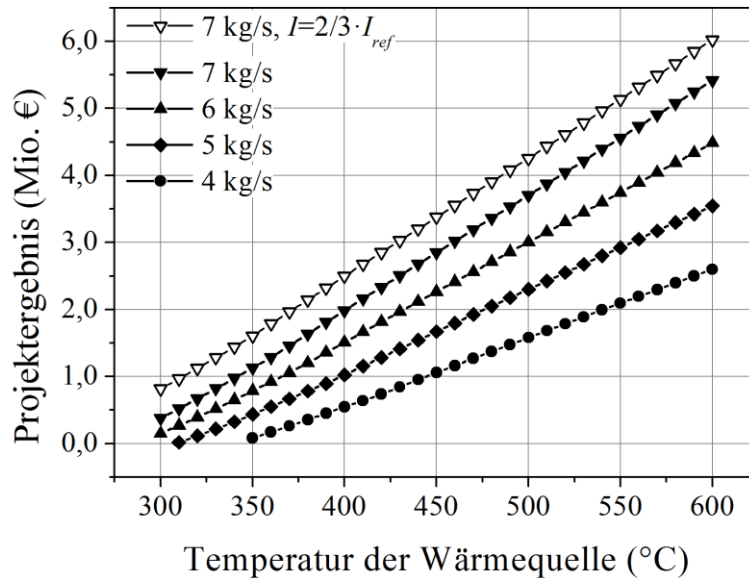
Hochtemperaturbereich, Arbeitsfluid: MM



→ Stetiger Verlauf der Turbinendaten
ab 400 °C

Modularisierung von ORC-Anlagen

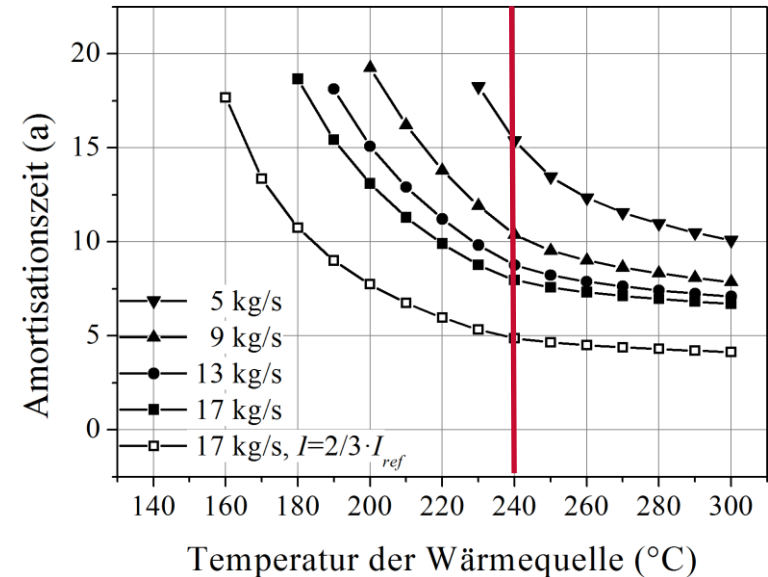
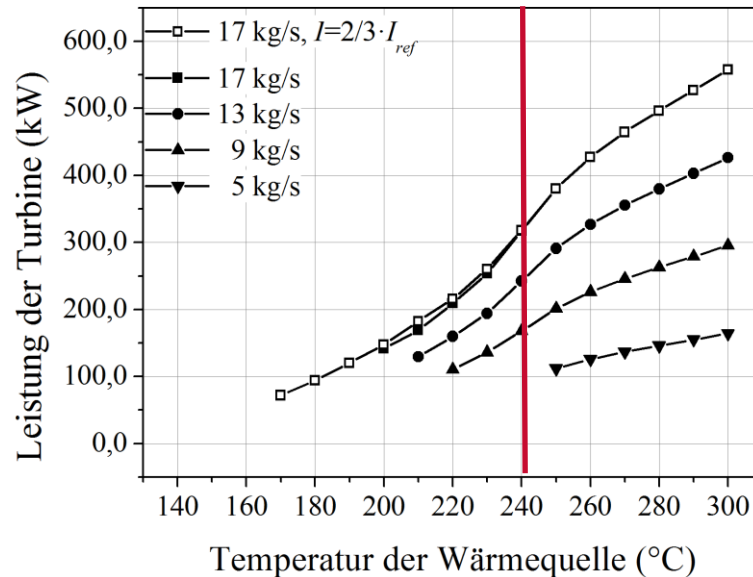
Hochtemperaturbereich, Arbeitsfluid: MM



- mit derzeitigen Investitionskosten sind Amortisationszeiten unter 5 Jahren nur ab ca. 450 °C möglich
- bei einer Verringerung der Investitionskosten um 1/3 können Amortisationszeiten von 2,5 Jahren erreicht werden

Modularisierung von ORC-Anlagen

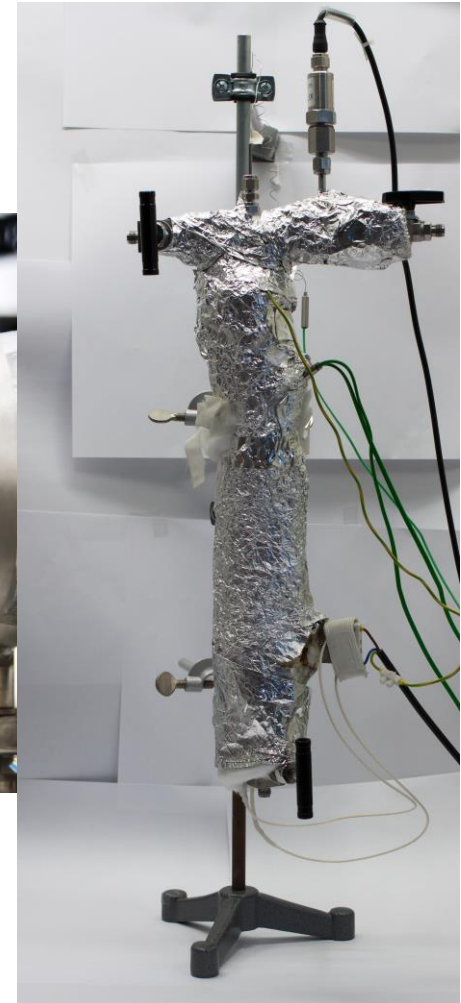
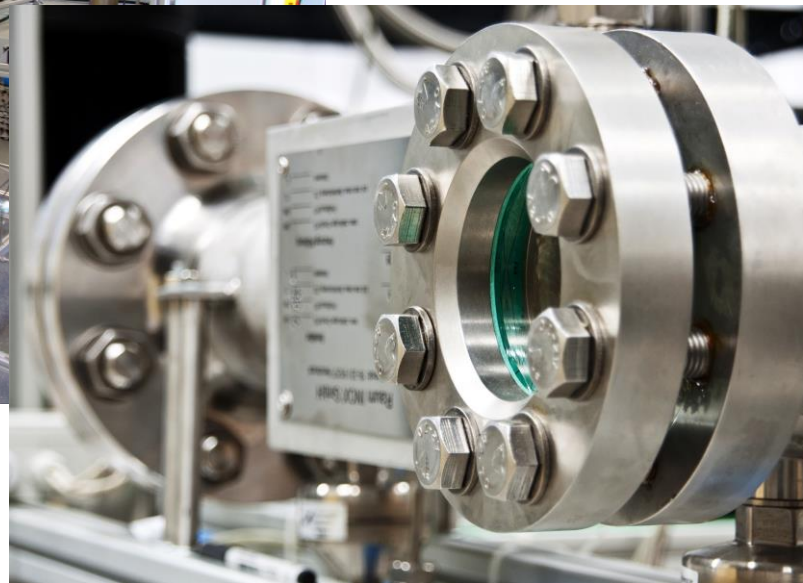
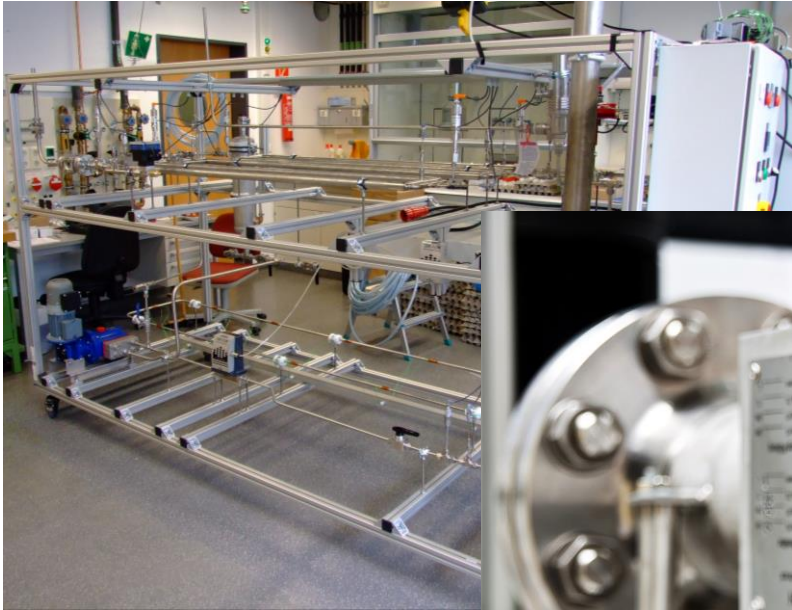
Niedertemperaturbereich, Arbeitsfluid: Isopentan



- mit derzeitigen Investitionskosten sind Amortisationszeiten unter 5 Jahren nicht zu realisieren
- bei einer Verringerung der Investitionskosten um 1/3 kann ab 240 °C eine Amortisation in knapp 5 Jahren erfolgen

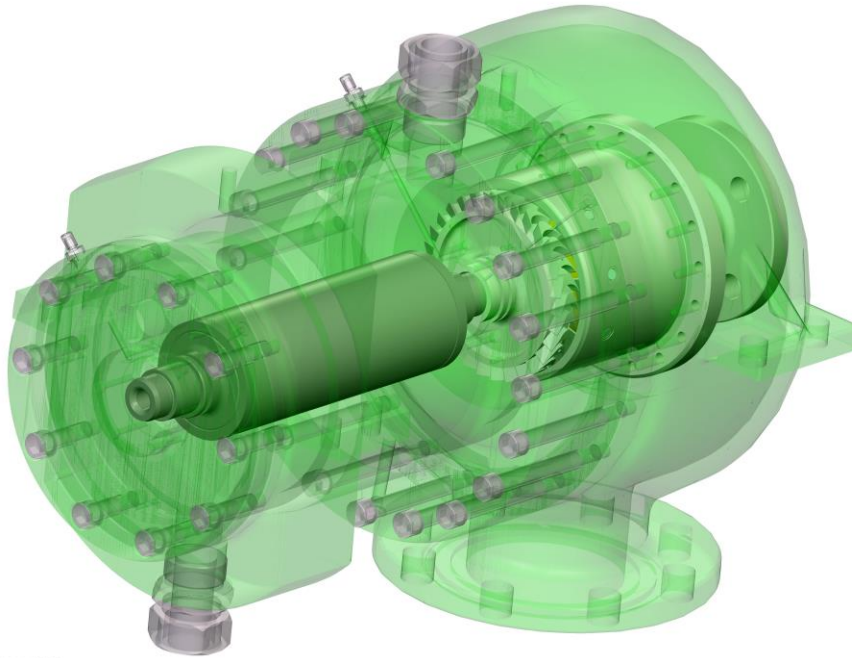
Modularisierung von ORC-Anlagen

ORC-Teststände und ORC-Testfeld am ZET

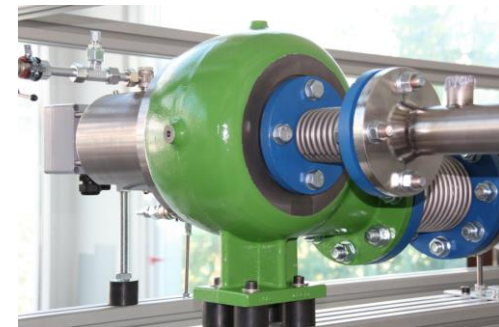
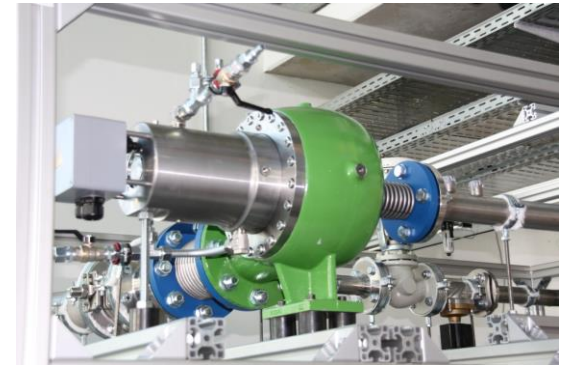


Modularisierung von ORC-Anlagen

ORC-Teststände und ORC-Testfeld am ZET



Vereinigt Darst auf Anfrage: BILD



LEHRSTUHL FÜR
TECHNISCHE
THERMODYNAMIK UND
TRANSPORTPROZESSE
PROF. DR.-ING. D. BRÜGGEMANN



Thermoökonomische
Betrachtung der industriellen
Abwärmenutzung durch ORC

21.11.2014

Seite 25



Modularisierte ORC-Anlagen

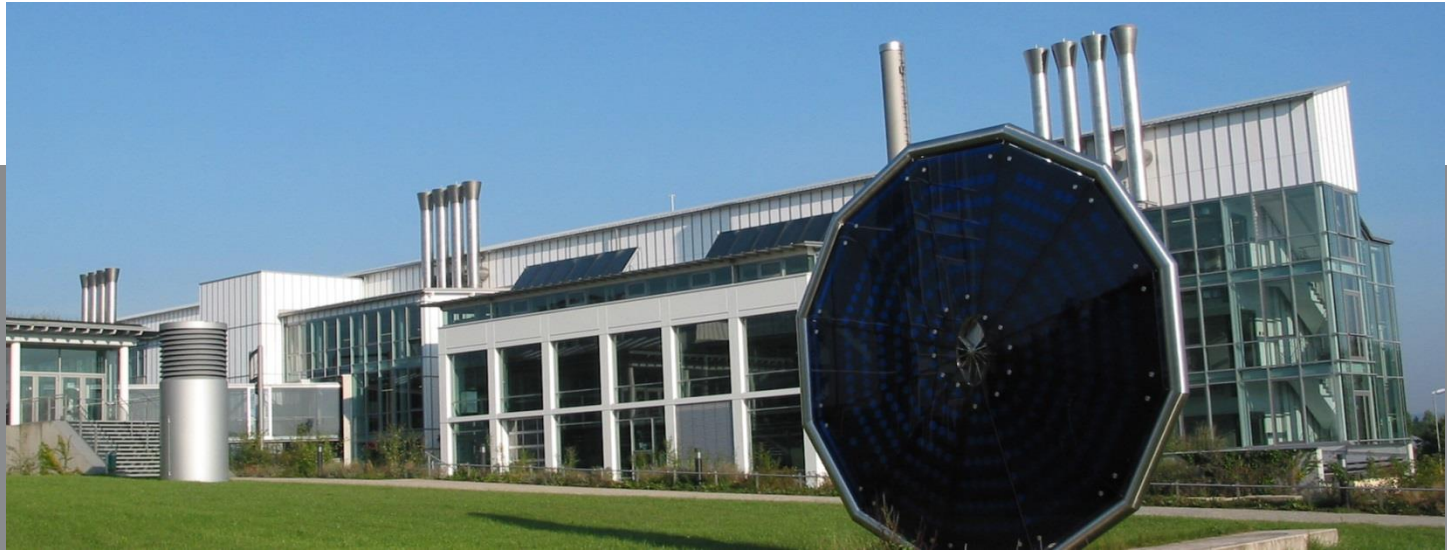
Gliederung

1. Nutzung industrieller Abwärme – Chancen und Potenziale
2. Methodik, Simulationsmodell und Arbeitsfluide
3. Thermodynamische und anlagentechnische Bewertung
4. Thermoökonomische Analyse und Bewertung
5. Modularisierte ORC-Anlagen
6. **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

Industrielle Abwärme als Zukunftsmarkt für den ORC

- Die Nutzung industrieller Abwärme ist der Zukunftsmarkt des ORCs, über den eine Marktdurchdringung erfolgen kann.
- Es gibt eine Vielzahl effizienter Arbeitsfluide und Verschaltungsvarianten, jedoch sind nur wenige davon thermoökonomisch vorteilhaft.
- Eine Modularisierung von ORC-Anlagen im Hochtemperaturbereich ist insbesondere im Bereich 400 – 600 °C auf Basis des Arbeitsfluides Hexamethyldisiloxan empfehlenswert.
- Durch einen Beginn der Serienfertigung und damit einhergehender Verringerung der spezifischen Investitionskosten um 1/3 sind Amortisationszeiten von unter 3 Jahren möglich.
- Das ZET forscht im Hinblick auf Flexibilität, technisch-wirtschaftlichem Optimum und Kleinanlagen für hohe Stückzahlen.
- Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Wärmeübertragung/Zersetzung.



Vielen Dank

www.zet.uni-bayreuth.de

M. Preißinger, F. Heberle, D. Brüggemann