

INDUSTRIEPROZESSE MITTELS HOCHTEMPERATUR-WÄRMEPUMPEN EFFIZIENT DEKARBONISIEREN

21. FORUM Wärmepumpe

08. + 09. November 2023 in Berlin

Dr. Eberhard Nicke

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für CO₂-arme Industrieprozesse – Abteilung Hochtemperatur-Wärmepumpen



Inhaltsverzeichnis



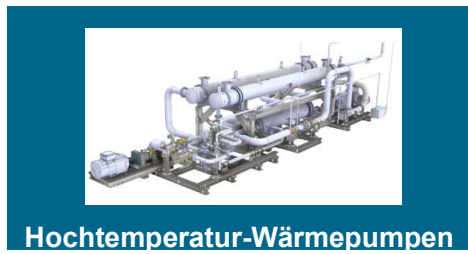
- **DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse**
- **DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP)**
- **Prozessintegration der HTWP**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Inhaltsverzeichnis



- **DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse**
- DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP)
- Prozessintegration der HTWP
- Zusammenfassung und Ausblick

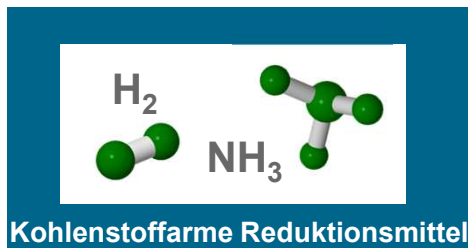
DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse



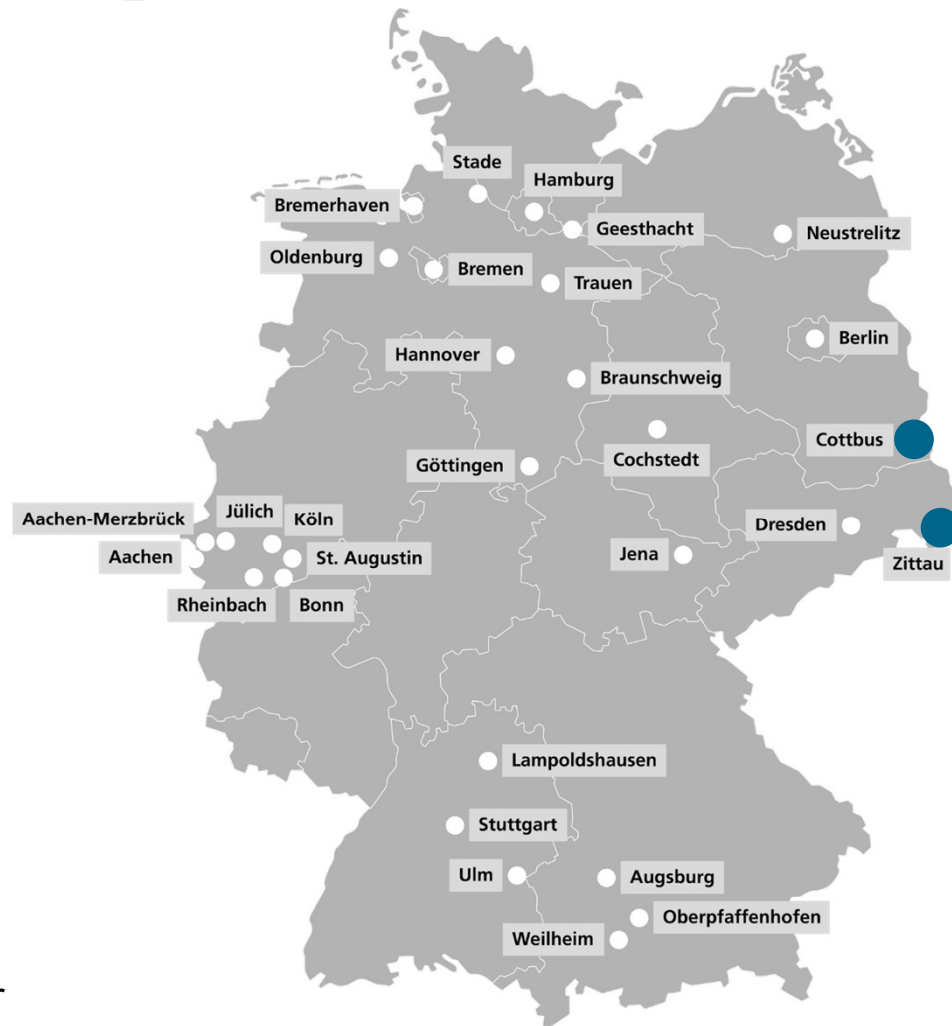
Hochtemperatur-Wärmepumpen



Simulation und Virtuelles Design



Kohlenstoffarme Reduktionsmittel



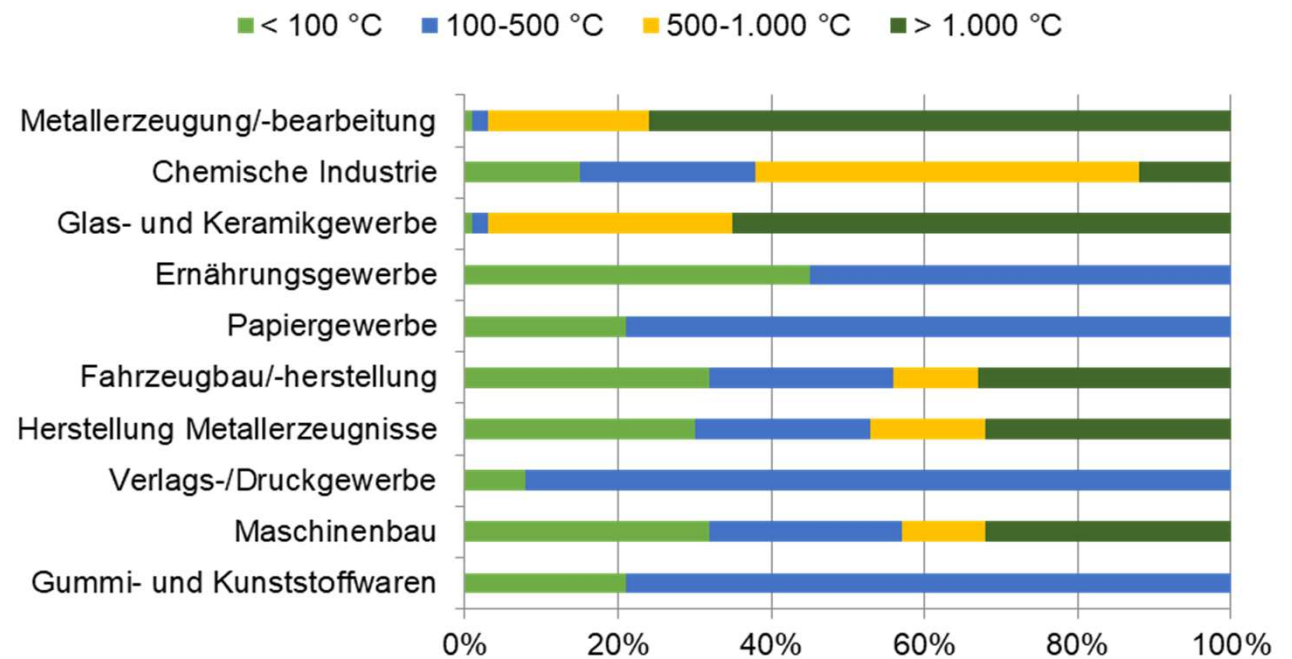
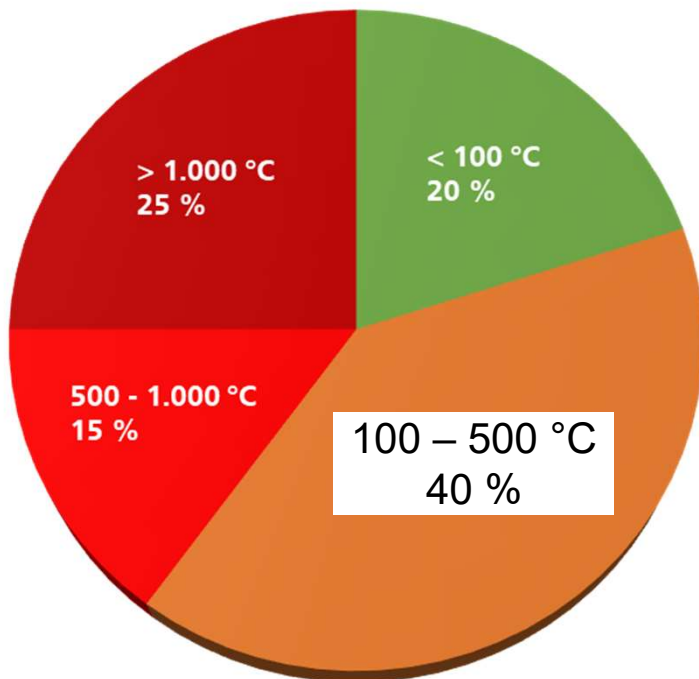
Bereits über 50 Mitarbeiter

Gegründet Mitte 2019

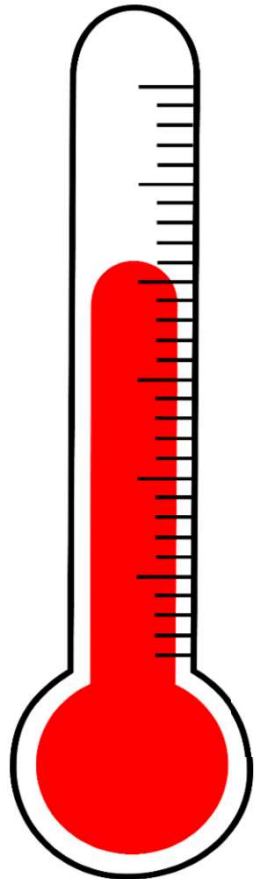
Prozesswärmebedarf der Industrie



Beispiel 2019: 1675 PJ, bei einem Bruttostromverbrauch in D: 1800 PJ



„Thermometer“ der Prozesswärmeversorgung



> 500 °C

- Direkte elektrische Beheizung
- Wasserstoffverbrennung (auch andere synthetische Brennstoffe möglich)

200-500 °C

- Hochtemperaturwärmepumpen (kommerziell nur bis 150°C)
- Direkte elektrische Beheizung
- Konzentrierte Solarthermie

100-200 °C

- Hochtemperaturwärmepumpen (kommerziell nur bis 150°C)
- Direkte elektrische Beheizung
- Solarthermie

< 100 °C

- Herkömmliche industrielle Wärmepumpen
- Solarthermie

Bezug zu Wasserstoff: Grüner Wasserstoff für die Bereiche, in denen es keine Alternative gibt

Mittlerer Temperaturbereich



bis zu ~500 °C: neue Lösungen und Produkte müssen entwickelt werden

Breitgefächerte Anforderungen, Energiebedarfe und Anwendungen:

- Industrielle Wärmenetze (z. B. Standorte der chemischen Industrie)
- Trocknungsprozesse
- Lebensmittelindustrie
- ...

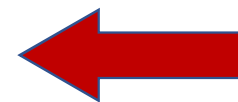
→ Nutzung von Strom oder E-Fuels

- Nicht oder weniger effizient
- Nicht das ökonomische Optimum

Forschung und Entwicklung:

- Hochtemperatur-Wärmepumpen
- konzentrierende Solarthermie
- Speichertechnologien
- Hybride Systeme / neue Art der Sektorenkopplung
- Systemintegration und -Optimierung

Niedriger TRL



Demonstratoren im industriellen Umfeld notwendig, um das Risiko für den Fertiger und den Anwender zu minimieren

Mittlerer und hoher Temperaturbereich

Nutzung von Wasserstoff und Biomasse

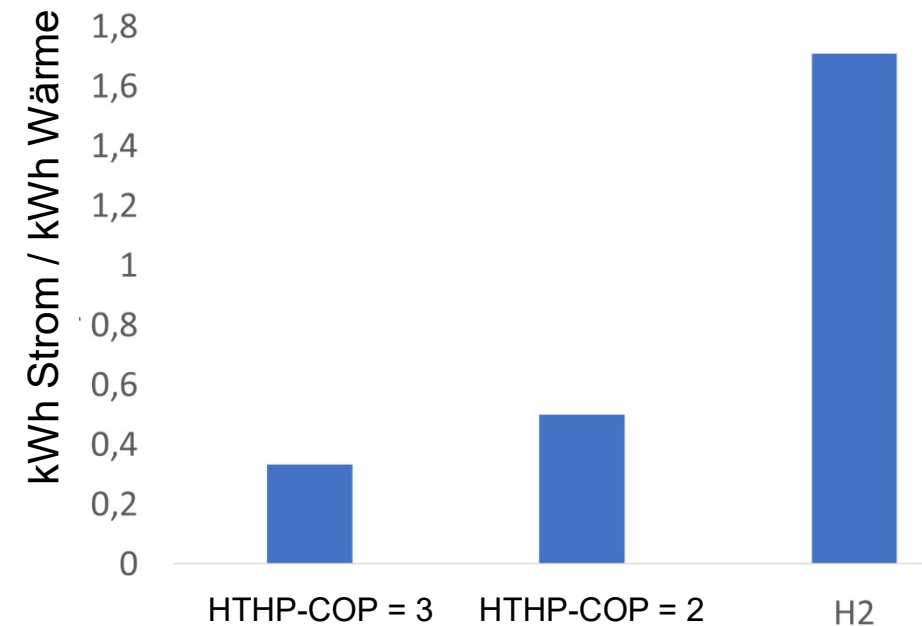


Thesen:

- Grüner Wasserstoff wird der teuerste Energieträger der Energiewende
- Biomasse ist nur begrenzt verfügbar, deren bevorzugte stoffliche Nutzung sorgfältig abgewogen werden muss

Mittlerer Temperaturbereich:

- Die hier diskutierten und in der Entwicklung befindlichen Technologien werden helfen den Einsatz von Wasserstoff und Biomasse zu reduzieren

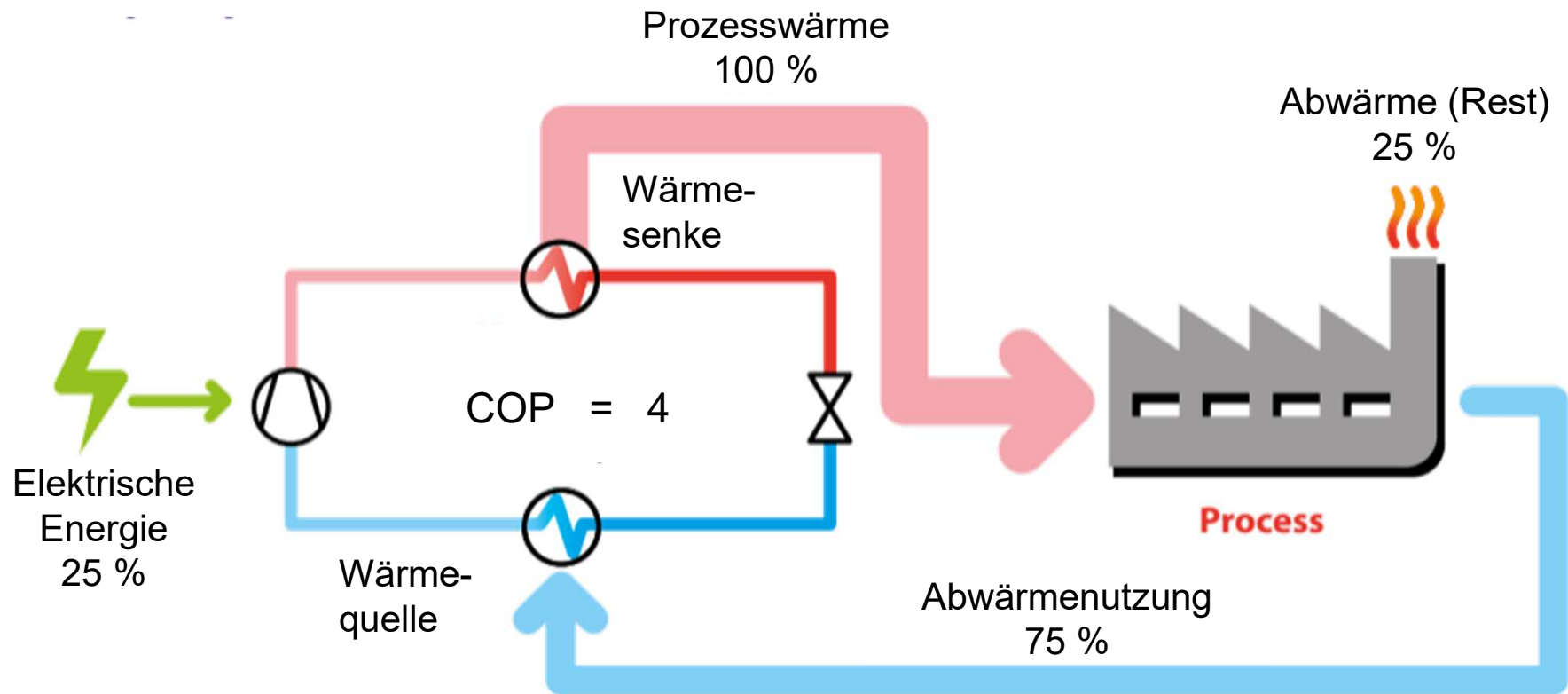


Inhaltsverzeichnis



- DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse
- **DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP)**
- Prozessintegration der HTWP
- Zusammenfassung und Ausblick

Hochtemperatur-Wärmepumpen



Stand der Technik

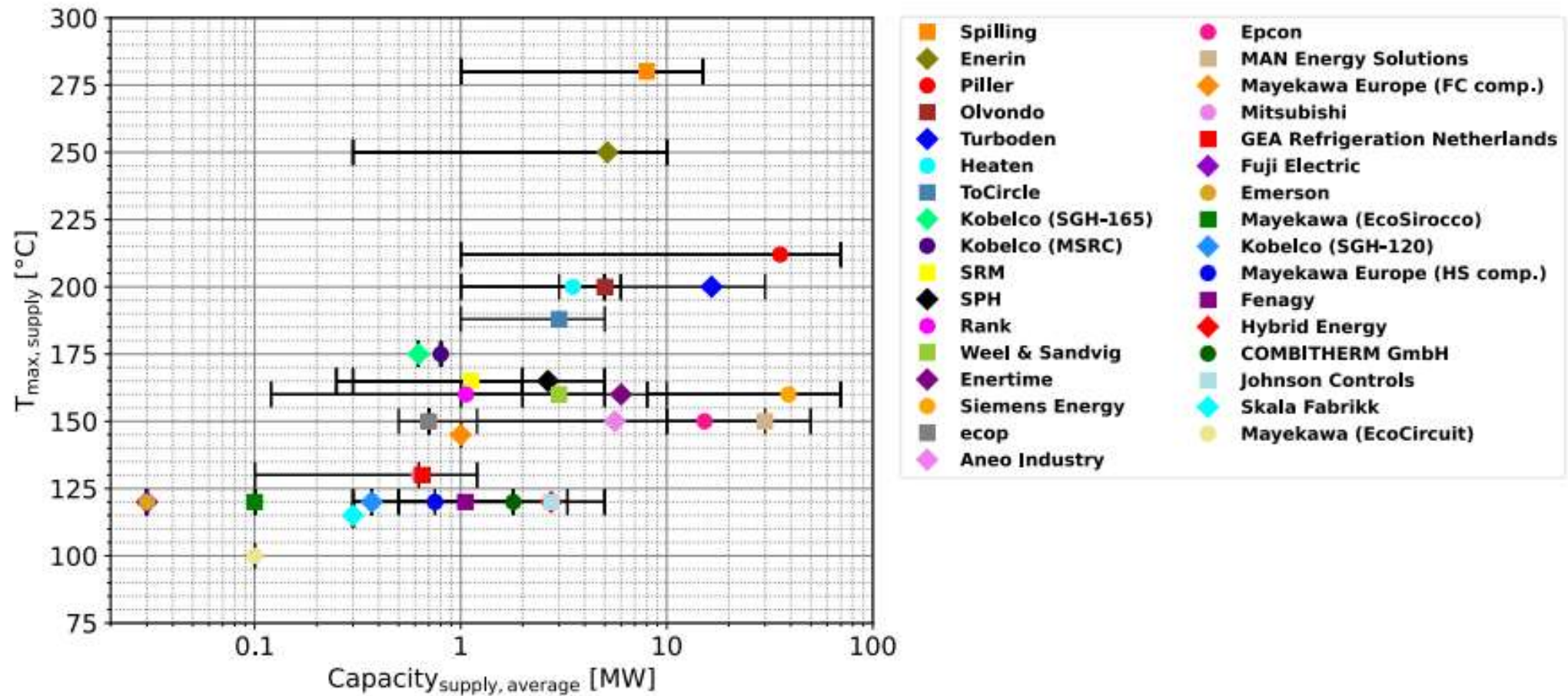


Figure 2-31: Maximum supply temperature as a function of capacity.

IEA Annex 58 about HTHP, Task 1: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>

Stand der Technik

Wärmesenke:

- Temperaturen bis 130 °C (bis zu 160 °C)

Leistung:

- im weiten Bereich (Gebäude bis Fernwärmenetze)

Wärmeträger (GWP?!)

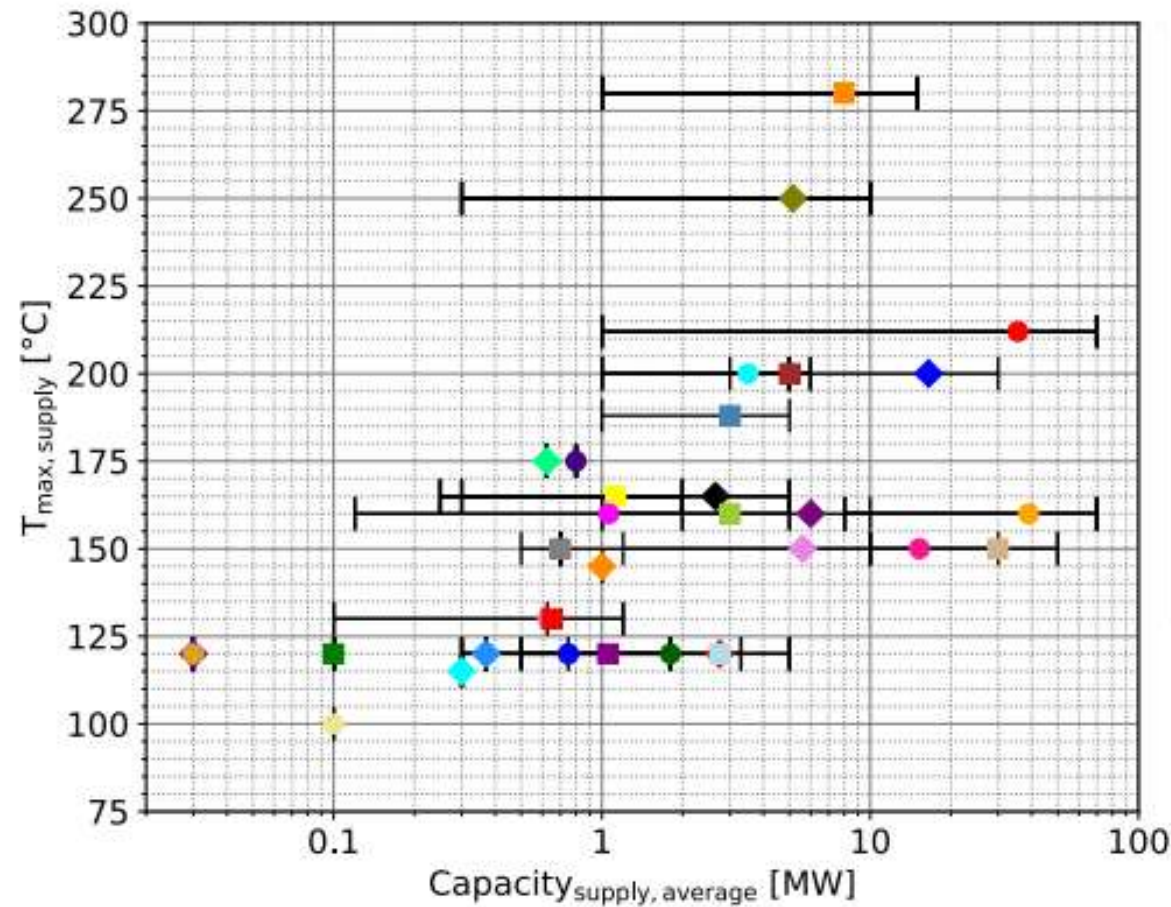
- Klassische
- Natürliche
 - (S)CO₂

Kreisprozesse

- Brayton
- Rankine
- ...

Verdichtertechnologie

- Alle Bauweisen und Funktionsprinzipien
- Mehrstufige Konzepte





Mittlerer Temperaturbereich:
Hochtemperatur-Wärmepumpen des DLR

Pilot Cobra (Brayton-Prozess)



DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe



Ziel

- Bereitstellung von CO₂-neutraler Hochtemperatur-Prozesswärme in für die Industrie relevanter Größe

Entwicklungsziel: Industrierelevante Leistungsdaten

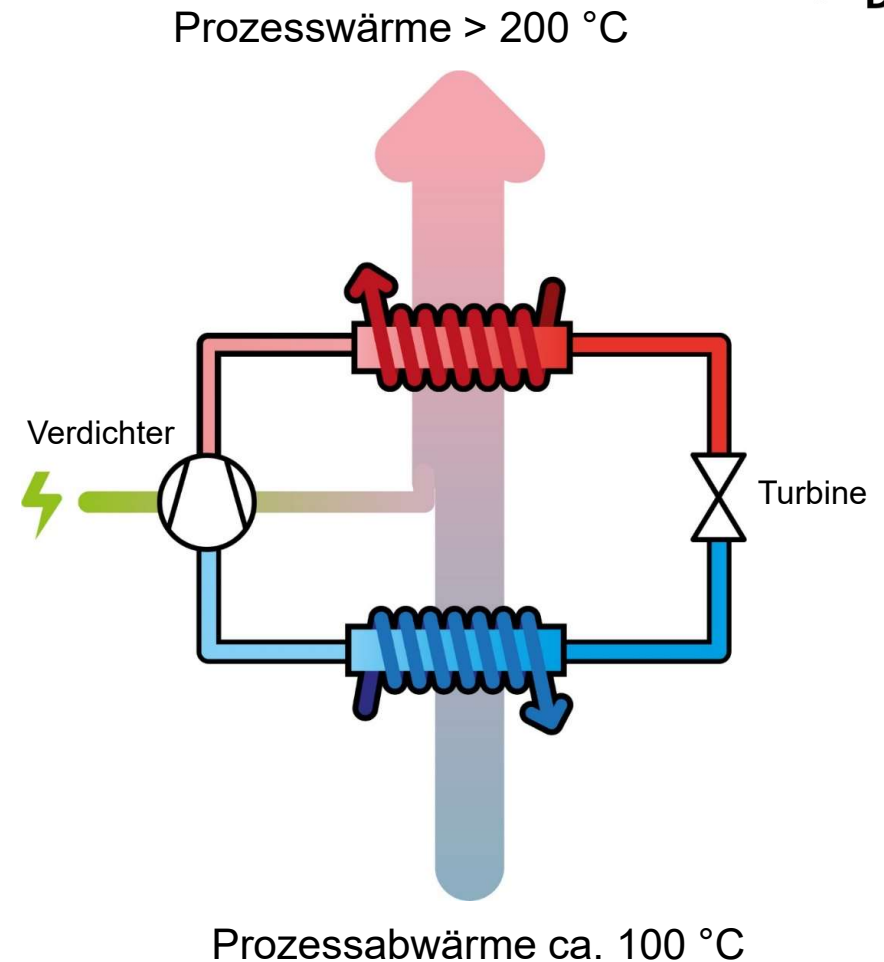
- Leistung: 100 kW – n * 10 MW
- Nutzttemperatur: 200 - 400 °C (Sonderfälle bis 600 °C)

Effizienz hängt ab von:

- Temperaturdifferenz
- Temperatur der Abwärme

Natürliche Kältemittel (mit/ohne Phasenwechsel):

- Luft, Argon, Wasser, CO₂



Eigene Darstellung, aufbauend auf TNO-Report Robert de Boer et al.

DLR-Pilotanlage CoBra nach dem Brayton Prozess



Verdichter und Turbine

- bekannte Komponenten aus der Luftfahrt

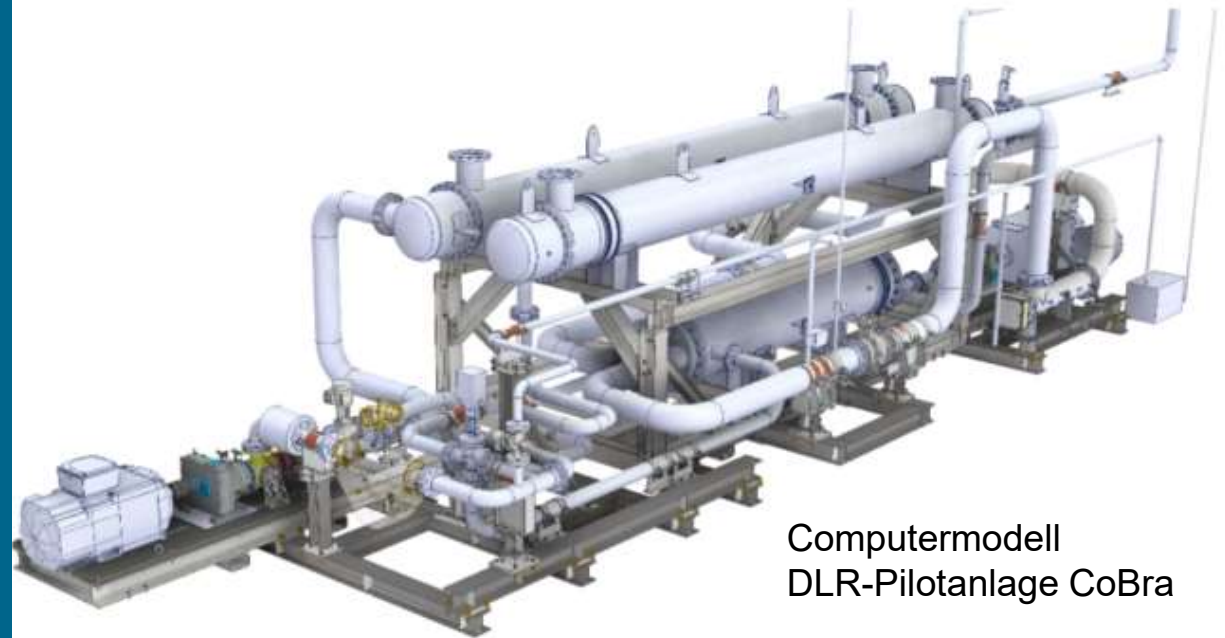
„First of its kind“ – Pilotanlage

Leistungsdaten:

- 280 °C
- 300 kW
- Arbeitsmedium Luft

Einmalig auch:

- Kälte bei - 40 °C
- Kälteleistung 50 kW



Computermodell
DLR-Pilotanlage CoBra

Inbetriebnahme – erfolgt in diesen Tagen und Wochen

DLR-Pilotanlage ZiRa nach dem Rankine Prozess



Herausforderung

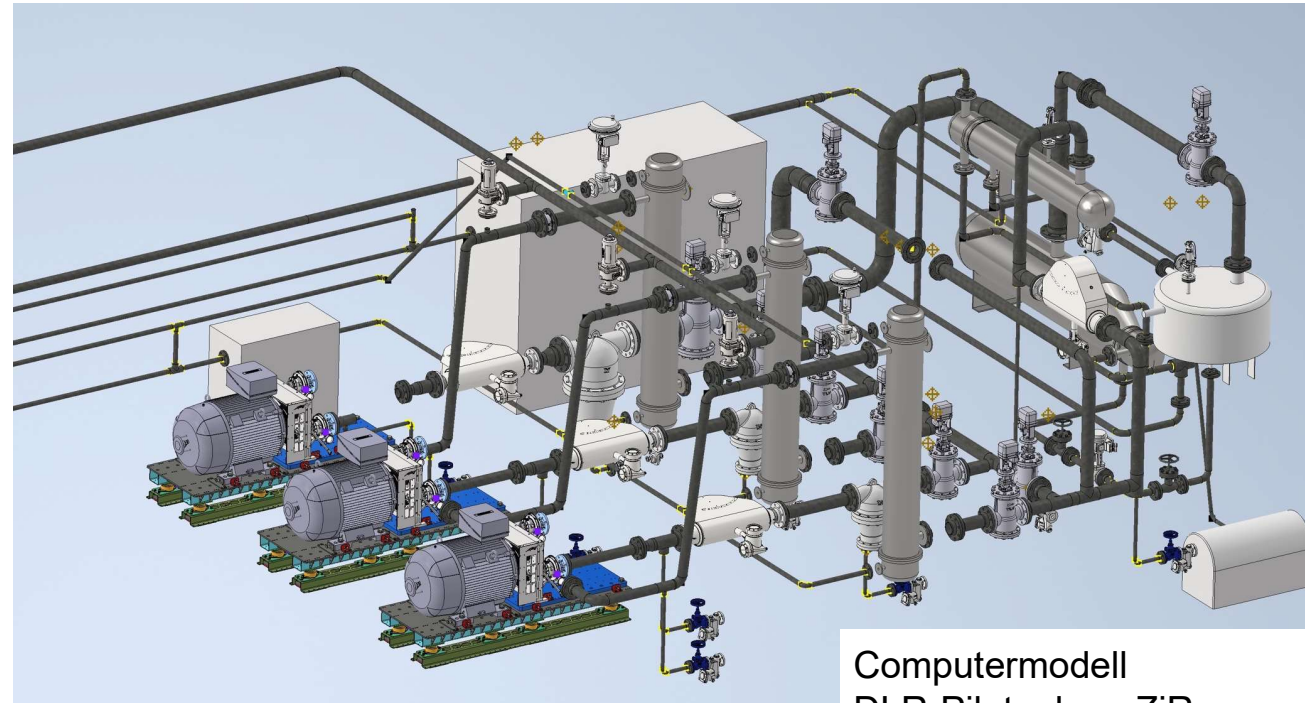
- Neues Medium für uns
- Wasser/-dampf

„First of its kind“ – Pilotanlage

Leistungsdaten:

	Stage 1	Stage 2
Quelle	100 °C	120 °C
Senke	140 °C	200 °C
Leistung	260 kW _{th}	860 kW _{th}
COP	6,4	3,5

Dreistufige Dampfverdichtung



Computermodell
DLR-Pilotanlage ZiRa

Inbetriebnahme:
Stage 1 in 2. HJ 2024
Stage 2 in 1. HJ 2025

Hochtemperatur-Wärmepumpen

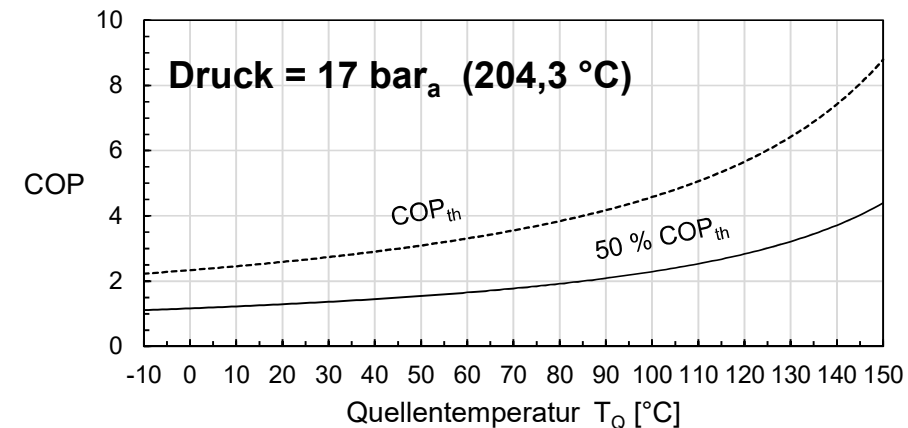
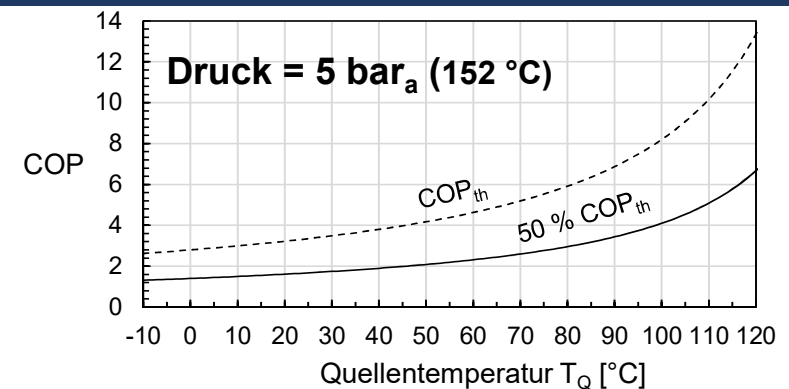
nach dem Rankine-Prozess

Herausforderungen

- Verdichtung des „leichten“ Gases – Wasserdampf
- Relativ geringe Druckverhältnisse pro Stufe bei hoher Überhitzung

Forschungs- und Entwicklungsziele

- Verdichterstufen mit: $\Delta T \geq 35 \text{ K}$
- Reduzierung der Stufenzahl
- Wärmesenke bei Temperaturen über 250 °C
- Neue Schaltungskonzepte und
- Neue Komponenten
 - Verdichter
 - Wärmeübertrager
 - Steuerung und Regelung



Leistungszahl (COP) für Dampfnetze

Inhaltsverzeichnis



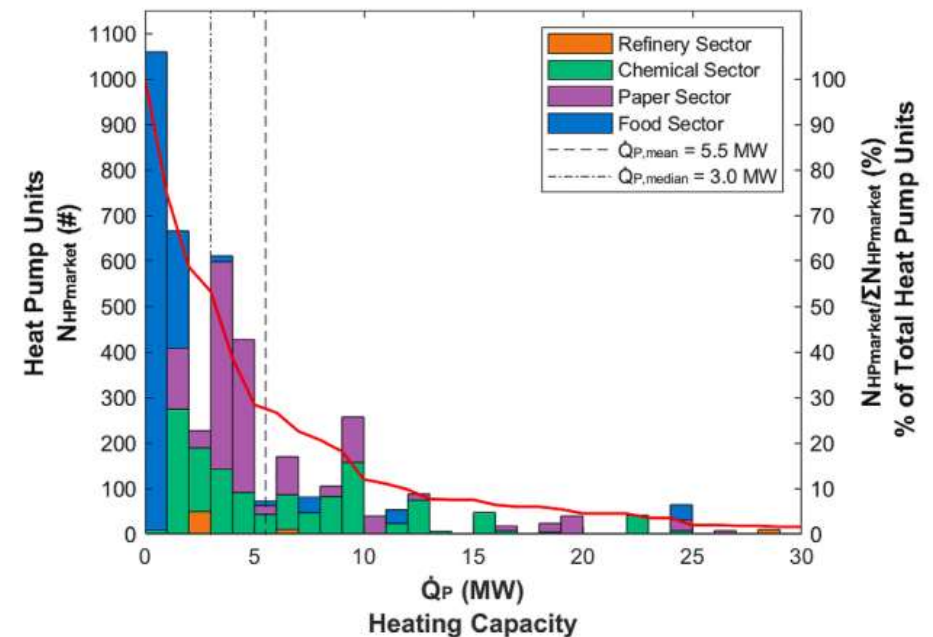
- DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse
- DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP)
- **Prozessintegration der HTWP**
- Zusammenfassung und Ausblick

Einsatzrandbedingungen für HTWP

Bedarf vs. Abwärme bzw. Wärmequellen

- Ein großer Teil der Industriegwärme wird im Temperaturbereich zwischen 100-300 °C benötigt
- Fossile Energieversorgung:
Viele Standorte sind bereits optimiert und haben kaum Abwärme, oder nur Abwärme bei tiefer Temperatur
- Elektrifizierung wird der einzige, sinnvolle Weg zur Dekarbonisierung der meisten Standorte sein
- Man kann durch Solarthermie oder durch Wärmenetze Wärmequellen bereitstellen oder bestehende aufwerten (Temperatur oder Wärmeleistung)
- Mit Ausnahme der großen Chemieparks liegt die größte Zahl von Industrieeinheiten mit Wärmebedarf bis 200°C unter 5 MW Wärmeleistung

Geschätzte Leistung der HTWP bis 200°C für vier Industriebranchen



Quelle: Marina et al.; 2021

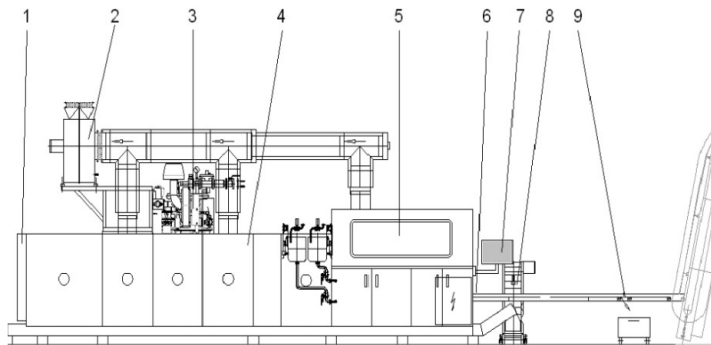
Einsatzrandbedingungen für HTWP

Dampfnetze



- Dampf als Wärmeträger-Medium
- Kondensation bei Umgebungsdruck ($< 100\text{ °C}$)
- HTWP erzeugt Frischdampf unter Nutzung von Abwärme (z. B. feuchte Abluft aus Trocknungsprozessen)

Backstraßen



1. Service door 2. Emission extraction unit 3. Burner device 4. Baking space 5. Wafer depositing station
6. Wafer take-off station 7. Control pane 8. Waste scraper 9. Wafer inspection device


- Backtemperatur des Teiges bei 190 °C
- Abluft an die Umgebung mit etwa 100 °C
- Wärmequelle derzeit: Gasbrenner
- Elektrifizierung – effizient mit einer WP (COP $\sim 2,5$)

Weitere Beispiele:

Milchpulverherstellung, Kaffeeröstung, ...

Dekarbonisierung / Elektrifizierung von Industrieprozessen

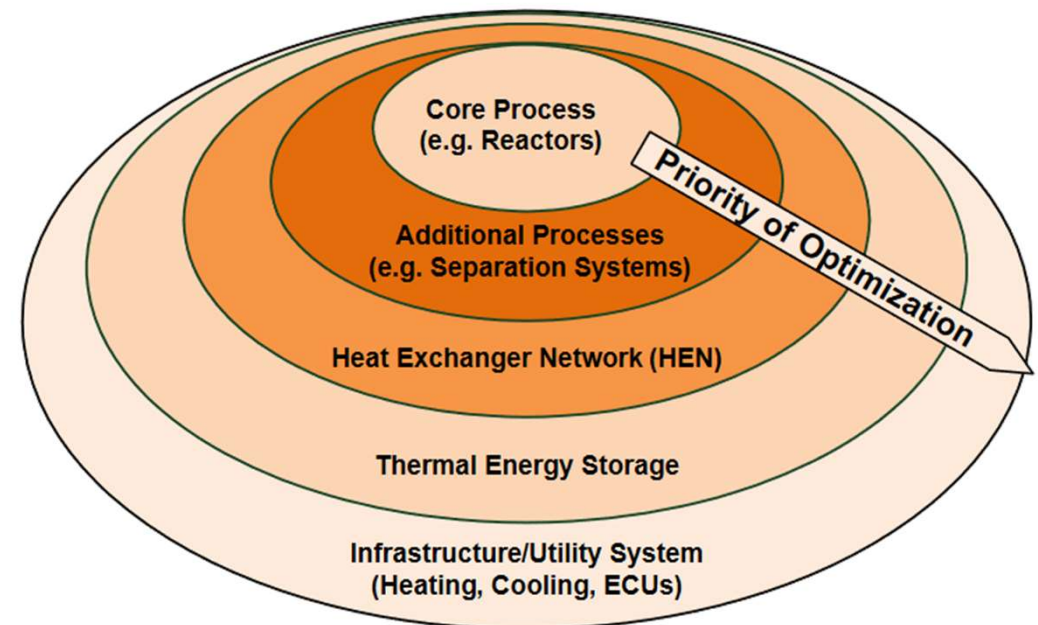


- Detaillierte Analyse der Prozesse
 - Energie- und Stoffströme
 - Stationär aber auch transiente Prozesse (Anfahren, Abfahren, Lastwechsel)
 - Pinchanalyse
 - Möglichkeiten der Effizienzsteigerung → Wärmetauschernetzwerk optimieren (mit und ohne WP)
 - Dekarbonisierungsstrategien
 - Wärmeerzeugung elektrifizieren
 - „Hebelwirkung“ der HTPW
 - Technoökonomische Analyse
 - Detaillierte Analyse der Elektrifizierten Prozesse
 - Energie- und Stoffströme
 - Stationär aber auch transiente Prozesse
 - Umsetzungsplan / Demonstrationsprojekte
- 
- Sicherung der Qualitätskriterien der Produktion
 - HTWP hat eine zweite Schnittstelle zum Prozess – Einfangen der Abwärme

Sparen soll zuerst kommen

Optimierte Wärmenutzung durch:

- **Wärmerückgewinnung**
- Abwärmenutzung mittels **Wärmepumpen**
- **Wärmespeicherung**
- **Verwendung in der Infrastruktur oder im Quartier**



Quelle: I. C. Kemp: *Pinch Analysis and Process Integration 2nd Ed.* (Linnhof, 1979)

Inhaltsverzeichnis



- DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse
- DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP)
- Prozessintegration der HTWP
- **Zusammenfassung und Ausblick**

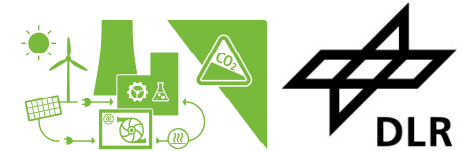
Dekarbonisierung der Industrie erfordert einen Fokus auf die Prozesswärme

- Die Lösung muss maximal auf die Produktion (Menge und Qualität) ausgerichtet sein
- Beachtung aller Randbedingungen – einschließlich des Standortes
- Die HTWP - eine Schlüsselkomponente für den CO₂-neutralen Umbau der Industrie
- Sie wird kein Massenprodukt
- Kundenangepasste Lösungen zur Bedienung aller Bedarfe: Wärme, Strom, auch Kälte
 - ➔ Neue Art der Sektorenkopplung

Forschung und Entwicklung

- Neue Technologien (z. B.: HTWP, Speicher, CSP, CST)
- Hybride Systeme
- Pilotanlagen: Aufbau und Versuchsprogramm
- Analyse der Industrieprozesse für passgenaue Konzepte zur deren Dekarbonisierung
 - ➔ Der nächste wichtige Schritt: Demonstrator unter industriellen Randbedingungen

Kontakt



Walther-Pauer-Straße 5
03046 Cottbus

Mandauhöfe, Haus 9
Äußere Oybiner Straße 14/16
02763 Zittau

Institut für CO₂-arme
Industrieprozesse
Deutsches Zentrum
für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR)

Prof. Dr. Uwe Riedel
Institutsdirektor
Uwe.Riedel@dlr.de
+49 355 355645 01

Dr.-Ing. Eberhard Nicke
Abteilungsleiter HTWP
Eberhard.nicke@dlr.de
+49 3583 58545 57