# Hochtemperatur Wärmepumpen für industrielle Anwendungen

Input Referat für VEA Beratungs-GmbH

16. März 2023, Webinar «Wie die Dekarbonisierung gelingen kann»

Dr. Cordin Arpagaus
cordin.arpagaus@ost.ch
Tel. +41 81 377 94 34

**Institut für Energiesysteme IES**
www.ost.ch/ies

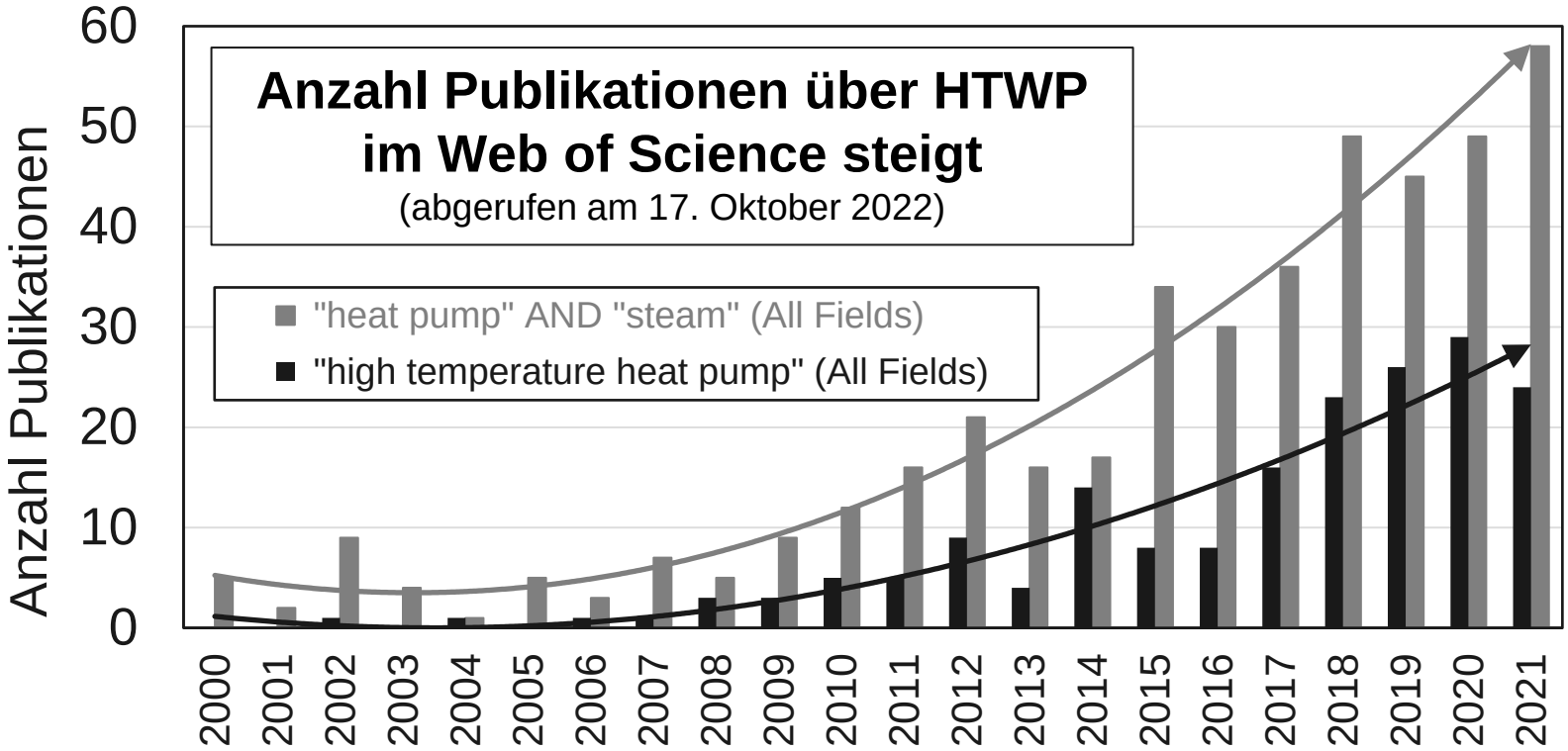
**Co-Autoren:**
- Dr. Frédéric Bless
- Michael Uhlmann
- Dr. Sidharth Paranjape
- Leon Brendel, PhD
- Prof. Stefan Bertsch, PhD

# Übersicht – HTWP für industrielle Anwendungen

- **Neuste Entwicklungen und Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C**
- **Marktübersicht und aktueller Stand der Technik**
- **Effizienz, $CO_2$-Reduktion und Energieeinsparpotenziale**
- **Anwendungsbeispiele aus der Lebensmittel- und Chemieindustrie**

cordin.arpagaus@ost.ch

# Forschung zu HTWP und dampferzeugenden Wärmepumpen

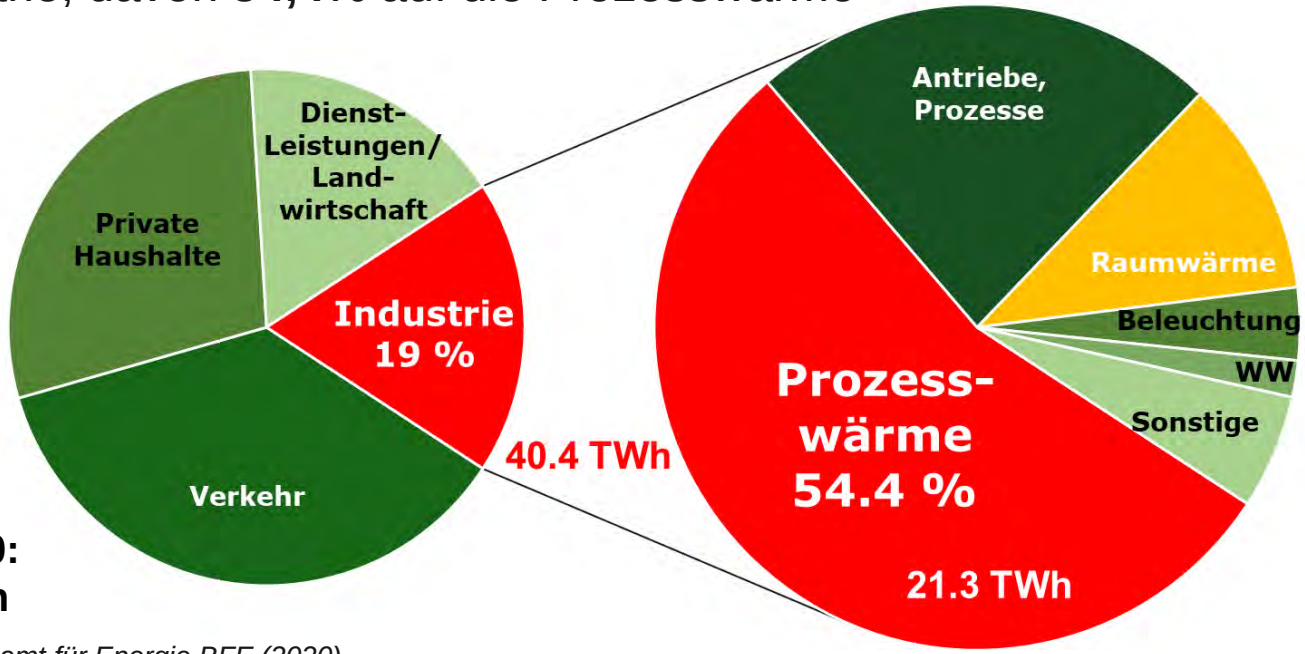




cordin.arpagaus@ost.ch

# Energieverbrauch in der Schweiz

Rund **19%** des gesamten Energieverbrauchs der Schweiz entfallen auf die Industrie, davon **54,4%** auf die Prozesswärme




**Total 2020:**
**207.6 TWh**

*Quelle: Bundesamt für Energie BFE (2020)*


cordin.arpagaus@ost.ch

## Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

# Innerbetriebliche Abwärmenutzung

**Wärmesenken:**

- Pasteurisieren / Sterilisieren 70 bis 120°C
- Trocknungsprozesse 40 bis 250°C
- Verdampfung 40 bis 170°C
- Destillation 100 bis 300°C
- usw.

Effizienz:

$$COP = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Antriebsenergie}}$$

**Wärmequellen:**

- Kühlwasser 20 bis 50°C
- Abwasser 20 bis 60°C
- Druckluft Abwärme 30 bis 70°C
- Abluft aus Öfen 20 bis 100°C
- usw.

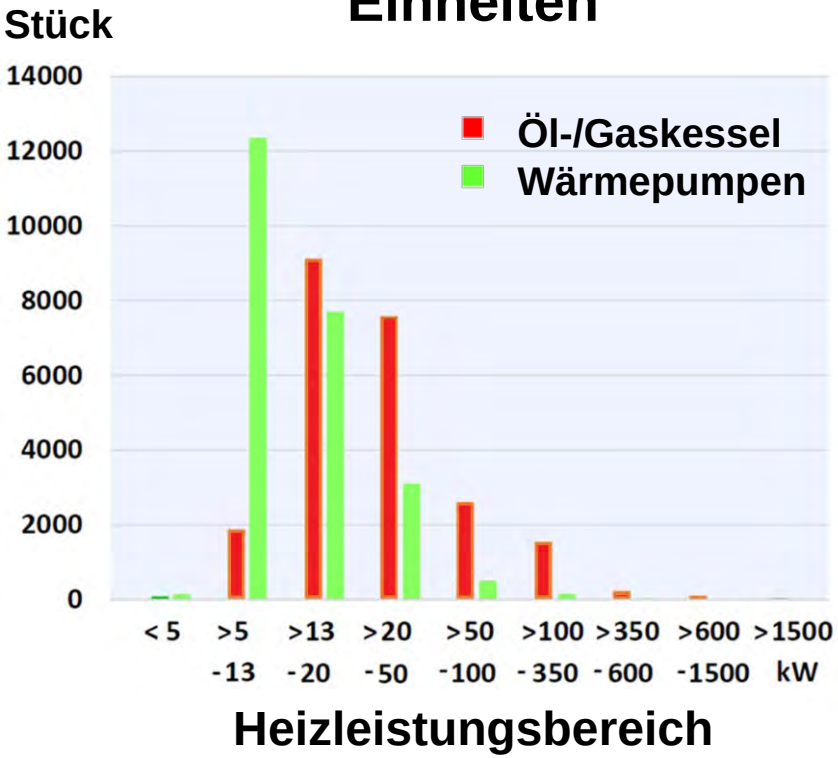


cordin.arpagaus@ost.ch

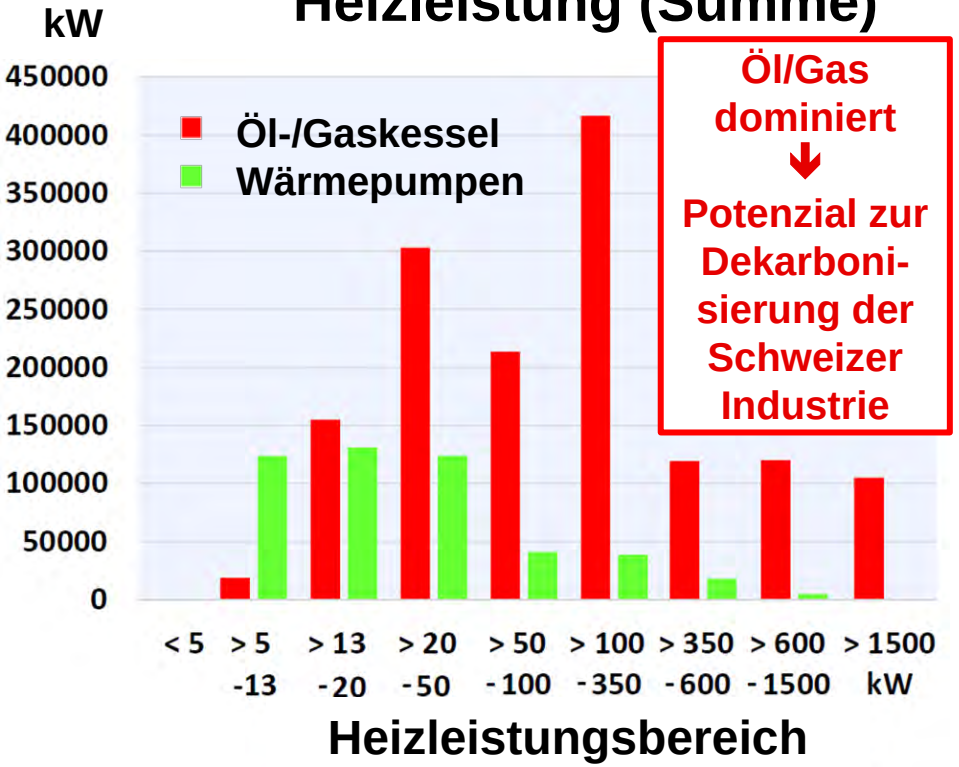
Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

# Vergleich von Wärmepumpen und Öl-/Gasheizkesseln (2019)

## Einheiten




## Heizleistung (Summe)




**Öl/Gas dominiert**
↓
**Potenzial zur Dekarboni-sierung der Schweizer Industrie**

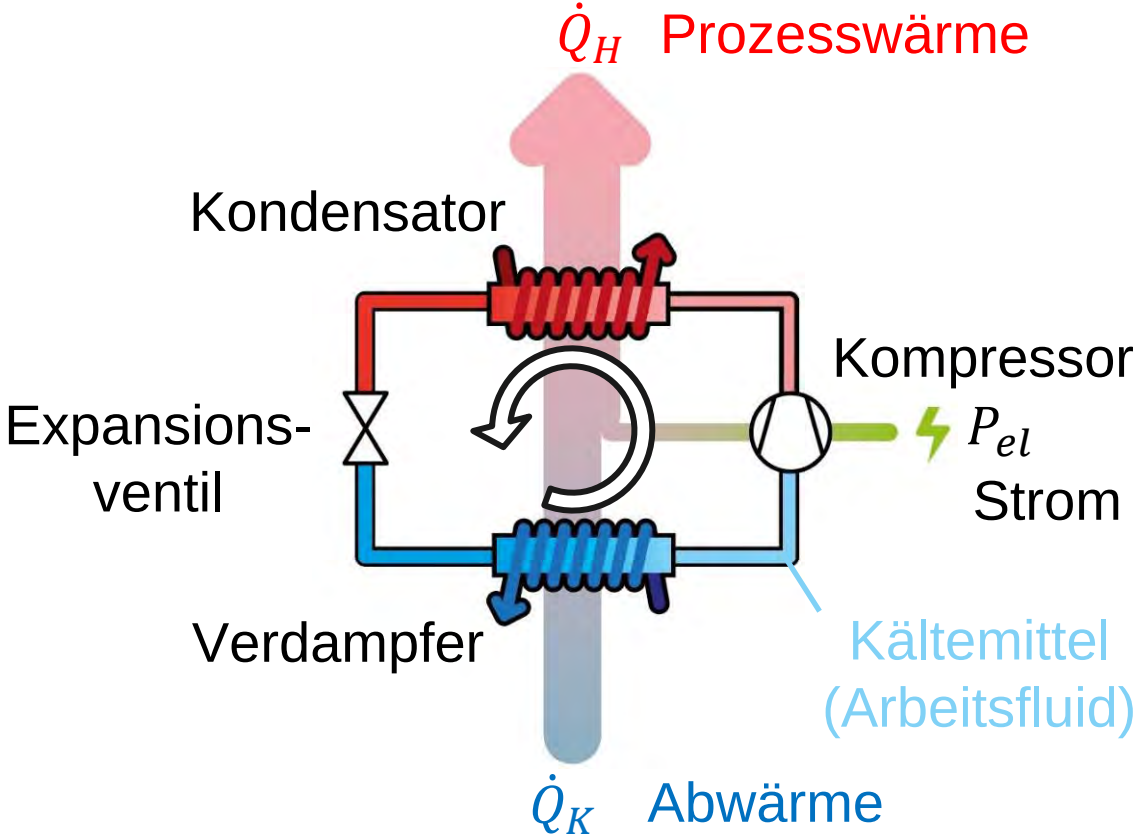
*Eigene Darstellung*
*Datenquelle: www.fws.ch*



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Fokus auf Kompressionswärmepumpen




COP
(Coefficient of
Performance)
(Leistungszahl)

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}}$$


cordin.arpagaus@ost.ch

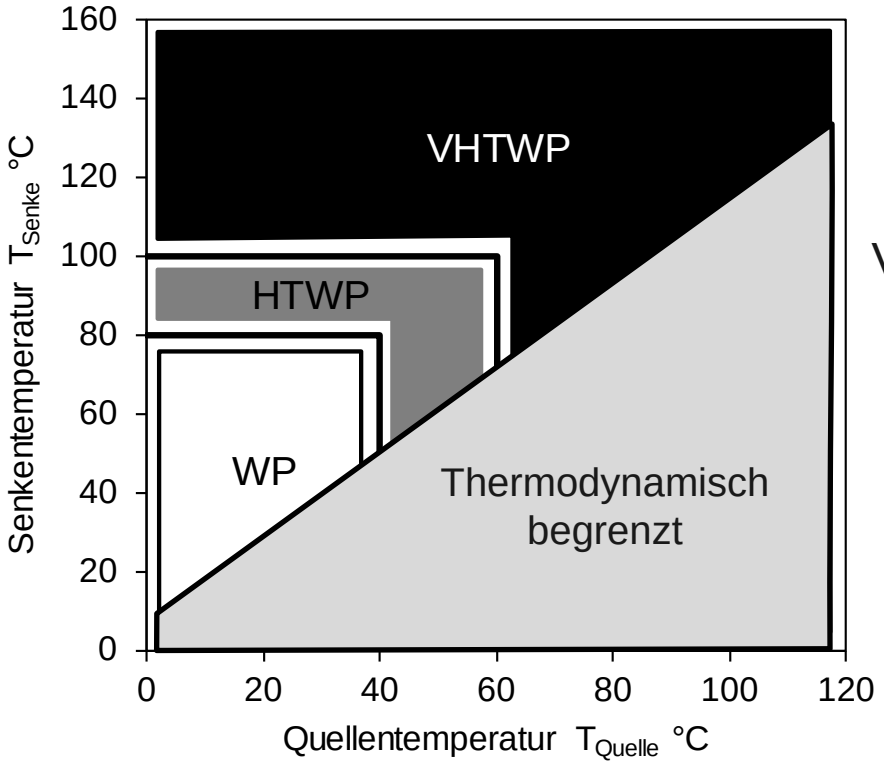
# Definition einer Industriewärmepumpe

Wärmepumpen im **mittleren und hohen Leistungsbereich** und Temperaturen **bis 200 °C**, die zur **Wärmerückgewinnung** und Wärmeaufwertung in industriellen Prozessen, aber auch zum **Heizen, Kühlen und Klimatisieren** in **Gewerbe- und Industriegebäuden** eingesetzt werden können.

*Quelle: IEA HPT Annex 48 Industrial Heat Pumps (https://heatpumpingtechnologies.org/annex48)*


cordin.arpagaus@ost.ch

# Temperaturniveaus für Kompressionswärmepumpen




VHTWP: Höchsttemperatur Wärmepumpe

HTWP: Hochtemperatur-Wärmepumpe

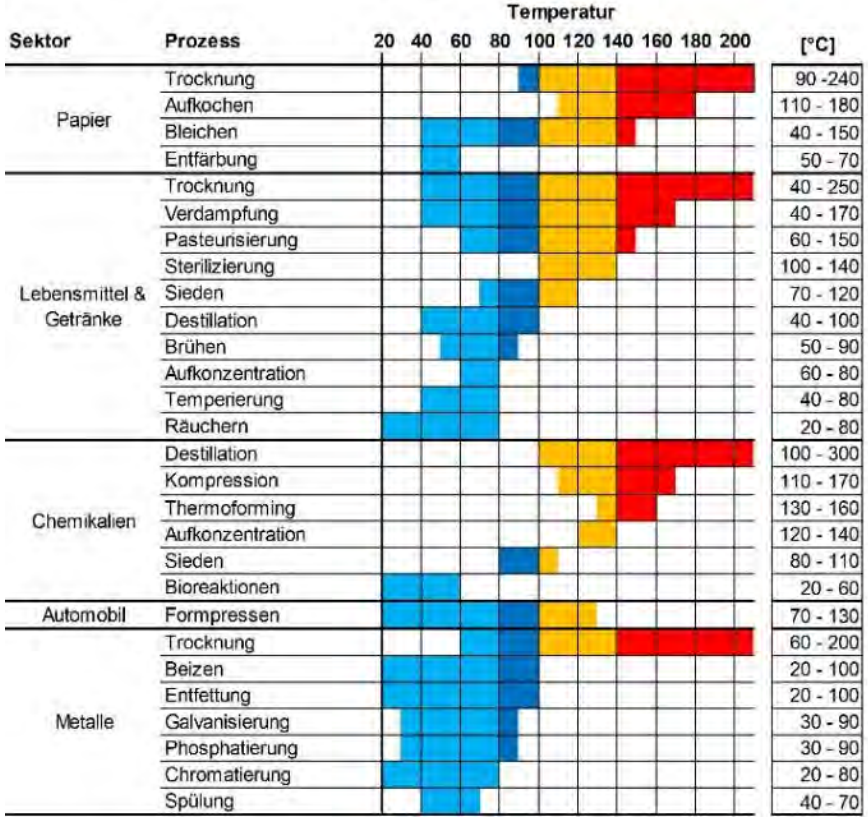
WP: Konventionelle Wärmepumpe

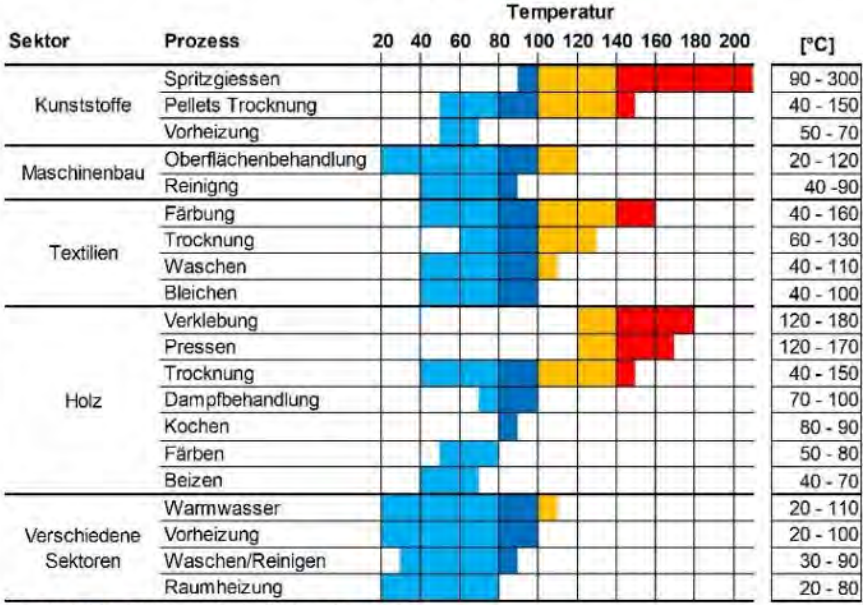


cordin.arpagaus@ost.ch

## Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

# Temperaturniveaus und Technologie Reifegrad von Wärmepumpen



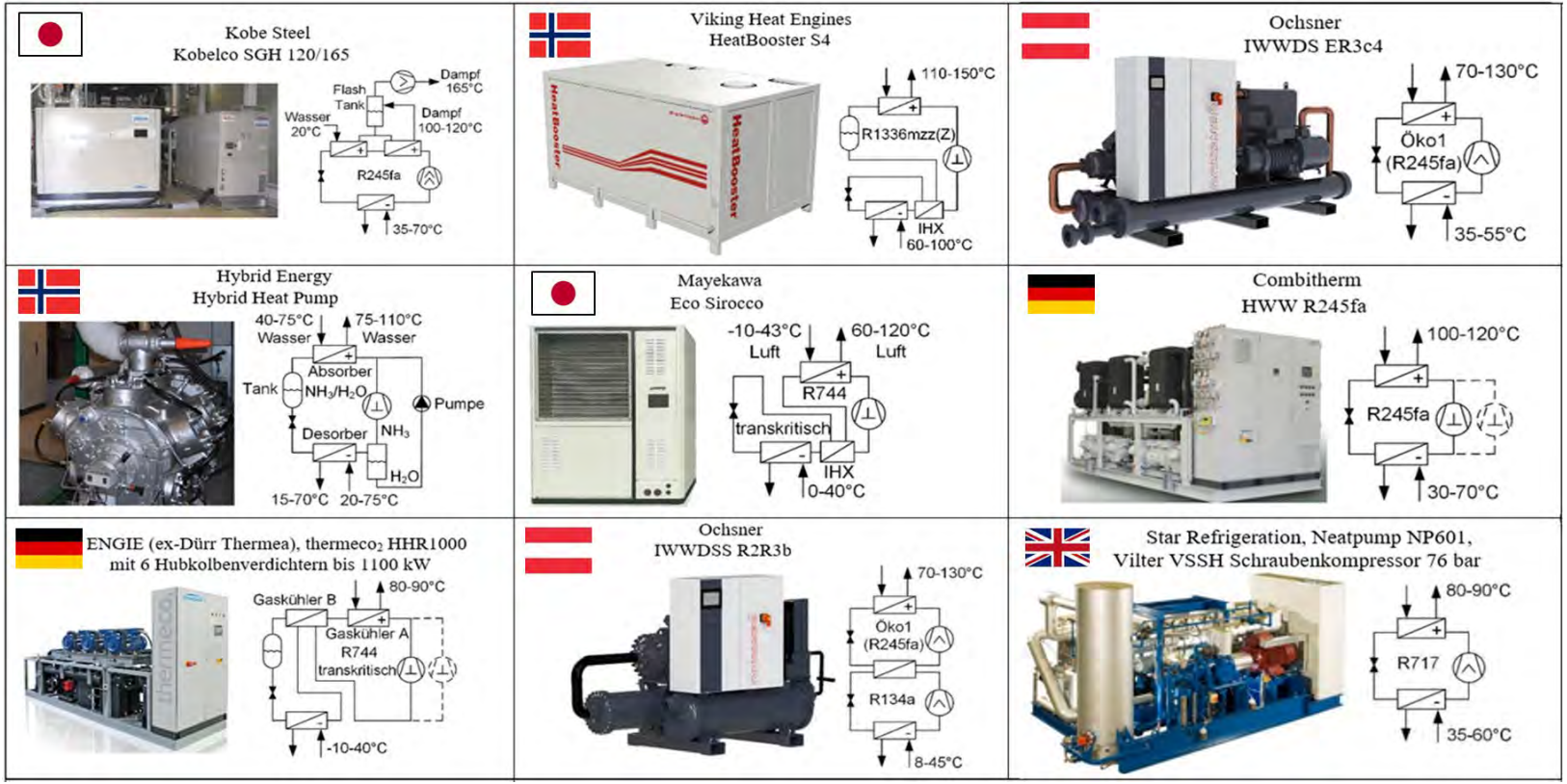

**Technologie Reifegrad von Wärmepumpen:**

- konventionelle Wärmepumpen < 80°C, etabliert in der Industrie
- kommerziell erhältliche HTWP 80 - 100°C, Schlüsseltechnologie
- Prototypenstatus, Technologieentwicklung, HTWP 100 - 140°C
- Forschung im Labormaßstab, Funktionsmodelle, Proof of Concept, HTWP > 140°C


cordin.arpagaus@ost.ch

## Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

# Auswahl an industriellen HTWP mit Keisläufen

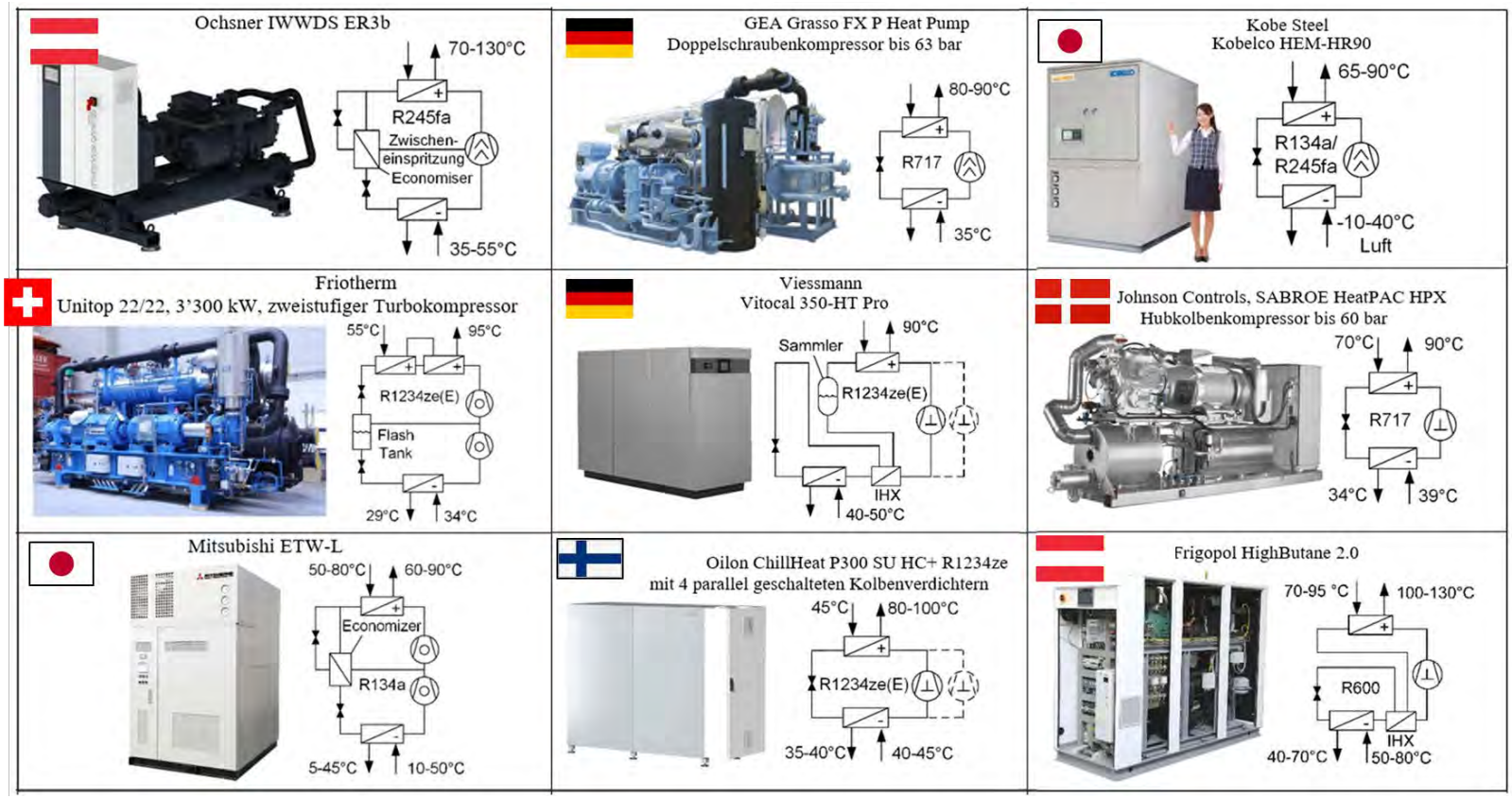





cordin.arpagaus@ost.ch

## Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

# Auswahl an industriellen HTWP mit Keisläufen



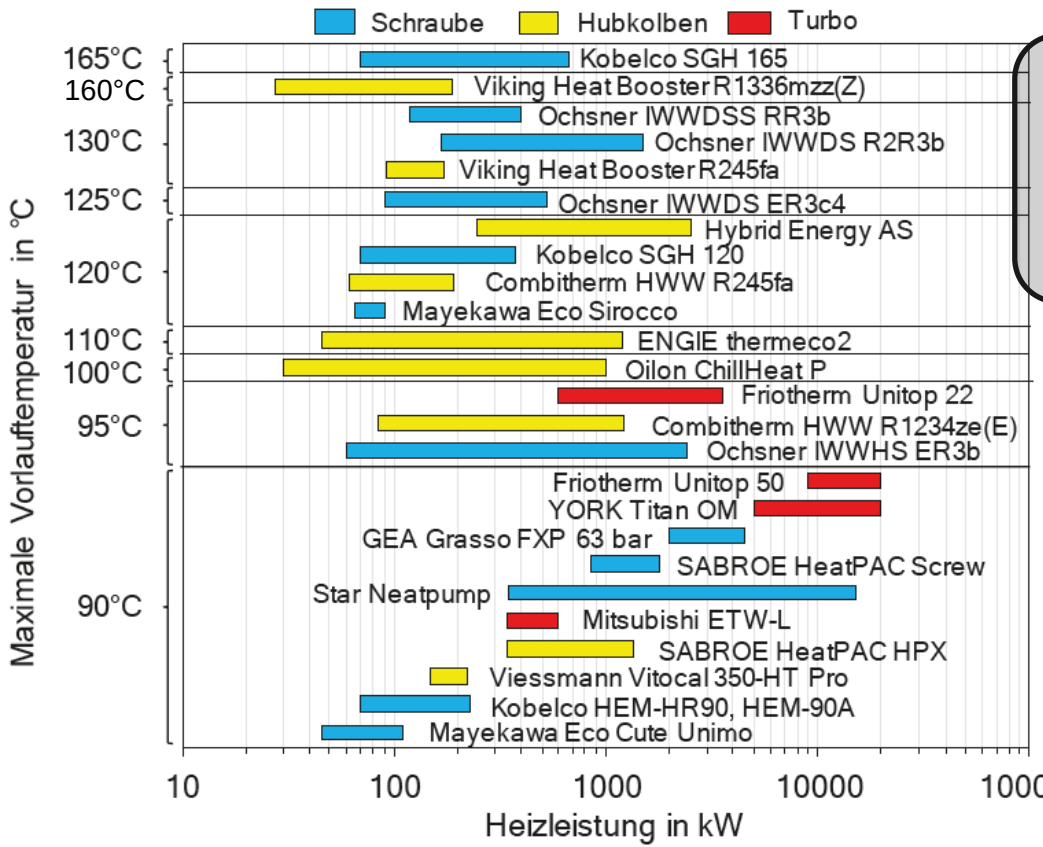



cordin.arpagaus@ost.ch

## Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

(Status Ende 2018)

# Auswahl an industriellen HTWP mit Vorlauftemperatur über 90 °C




**Kältemittel**

R134a/**R245fa**
***R1336mzz(Z)***
**R245fa**
**R245fa**
**R245fa**
**R245fa**
R717 ($NH_3$)
**R245fa**
**R245fa**
R744 ($CO_2$)
R744 ($CO_2$)
R134a/R1234ze(E)
***R1234ze(E)***
***R1234ze(E)***
***R1233zd(E)***
R134a
R717 ($NH_3$)
R717 ($NH_3$)
R717 ($NH_3$)
R717 ($NH_3$)
R134a
R717 ($NH_3$)
***R1234ze(E)***
R134a/**R245fa**
R744 ($CO_2$)

Kobelco SGH 120/165
(Steam Grow Heat Pump)

HeatBooster
(ex-Viking Heat
Engines AS)

HEATEN

OCHSNER
ENERGIE TECHNIK

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# IEA HPT TCP Annex 58 – HTHP Technology review

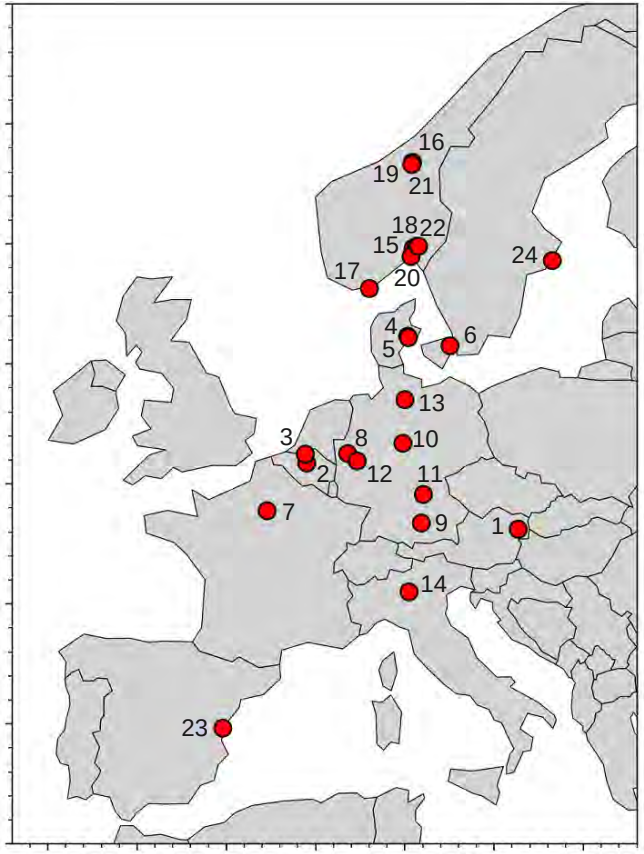
- **Task 1 Report** wird auf der Homepage veröffentlicht: https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1
- **13 teilnehmende Länder:** Österreich, Belgien, China, Kanada, Dänemark, Frankreich, Deutschland, Japan, Norwegen, Niederlande, Südkorea, Schweiz, USA
- **Operating agent:** Danish Technological Institute

| | |
|---|---|
| **TRL** | 4 to 9 (Technologie Reifegrad) |
| **Spezifische Kosten** | 200 to 1’500 EUR/kW |
| **Heizleistung** | 0.03 to 70 MW |
| **Max. VL-Temperatur** | 100 to 280 °C |
| **Verfügbarkeit** | Geographical dependent, e.g. Europa und Japan |
| **Übersicht der Lieferanten und Technologien** | 28 Hersteller, 33 Technologien,<br>83 Fallbeispiele |


cordin.arpagaus@ost.ch

## Neuste Entwicklungen & Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C

# Hauptsitze der HTWP Lieferanten in Europa




| | |
|---|---|
| 1 | Ecop (AT) |
| 2 | Mayekawa MYCOM (BE) |
| 3 | Qpinch (BE) |
| 4 | Fenagy (DK) |
| 5 | Johnson Controls (DK) |
| 6 | Weel and Sandvig (DK) |
| 7 | Enertime (FR) |
| 8 | GEA (DE) |
| 9 | MAN (DE) |
| 10 | Piller (DE) |
| 11 | Siemens (DE) |
| 12 | SPH (DE) |
| 13 | Spilling (DE) |
| 14 | Turboden (IT) |
| 15 | Enerin (NO) |
| 16 | Epcon (NO) |
| 17 | Heaten (NO) |
| 18 | Hybrid Energy (NO) |
| 19 | Ohmia (NO) |
| 20 | Olvondo (NO) |
| 21 | Skala Fabrikk (NO) |
| 22 | ToCircle (NO) |
| 23 | Rank (ES) |
| 24 | SRM (SE) |

## Japan

| | |
|---|---|
| 25 | Fuji (JP) |
| 26 | KOBELCO (JP) |
| 27 | Mitsubishi (JP) |

Basierend auf Daten von IEA HPT Annex 58:

https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1



cordin.arpagaus@ost.ch

# Neuste Entwicklungen & Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C

| HTHP supplier (High-Temperature Heat Pump) | Country | Compressor type | Working fluid (Refrigerant) | Max. heating capacity (MW) | Max. supply temp (°C) | TRL (Technology Readiness Level) | Spec. invest. cost (EUR/kW) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spilling | DE | Piston (MVR) | R718 (water) | 15 | 280 | 9 | 100 to 400 |
| Enerin | NO | Piston | R704 (helium) | 10 | 250 | 6 | 600 to 800 |
| Qpinch | BE | Chemical heat transformer | R718, $H_3PO_4$ and derivatives | 2 | 230 | 9 | 1000 to 2000 |
| Piller | DE | Turbo (MVR) | R718 | 70 | 212 | 8 to 9 | 850 |
| Olvondo | NO | Piston (double acting) | R704 | 5 | 200 | 9 | 1200 |
| Turboden | IT | Turbo | Application specific | 30 | 200 | 7 to 9 | 300 to 700 |
| ToCircle | NO | Rotary vane | R717 (ammonia), R718 | 5 | 188 | 6 to 7 | 250 to 430 |
| Kobelco MSRC160 | JP | Twin -screw (MVR) | R718 | 0.8 | 175 | 9 | n.a. |
| Kobelco SGH165 | JP | Twin-screw (MVR) | R245fa/R134a (mixture), R718 | 0.62 | 175 | 9 | n.a. |
| Heaten | NO | Reciprocating, custom design | HFOs (hydrofluorolefins) | 6 | 165 | 7 to 9 | 250 to 350 |
| SPH | DE | Piston | HFOs (hydrofluorolefins) | 5 | 165 | 6 to 8 | 150 to 1000 |
| SRM | SE | Screw (MVR) | R718 | 2 | 165 | 5 | n.a. |
| Siemens Energy | DE | Turbo (geared or single-shaft) | R1233zd(E), R1234ze(E) | 70 | 160 | 9 (to 90 °C) | 250 to 800 |
| Enertime | FR | 1- or 2-stage centrifugal | R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R1233zd(E) | 10 | 160 | 4 to 8 | 300 to 400 |
| Weel & Sandvig | DK | Turbo (MVR) | R718 | 5 | 160 | 4 to 9 | 150 to 250 |
| Rank | ES | Screw | R245fa, R1336mzz(Z), R1233zd(E) | 2 | 160 | 7 | 200 to 400 |
| MAN | DE | Centrifugal turbo with expander | R744 ($CO_2$) | 50 | 150 | 7 to 8 | 300 to 500 |
| Epcon | NO | Centrifugal fan / Blower | R718 | 30 | 150 | 9 | 200 to 400 |
| Ohmia Industry | NO | Piston, Centrifugal fan (MVR) | R717, R718 | 10 | 150 | 7 to 8 | n.a. |
| ecop | AT | Rotational heat pump | ecop fluid 1 (He, Kr, Ar) | 0.7 | 150 | 6 to 7 | 700 |
| Mayekawa FC Comp | BE | Screw | R601 (n-pentane) | 1 | 145 | 5 | 720 |
| GEA Refrigeration | NL | Semi-hermetic piston | R744 | 1.2 | 130 | 8 | 200 to 300 |
| Mitsubishi Heavy Ind. | JP | Two-stage centrifugal | R134a | 0.6 | 130 | 9 | n.a. |
| Hybrid Energy | NO | Piston/screw | R717/R718 mixture | 5 | 120 | 9 | 200 to 600 |
| Johnson Controls | DK | Reciprocating | R717, R600 (n-butane) (cascade) | 5 | 120 | 7 to 8 | n.a. |
| Fenagy | DK | Reciprocating | R744 | 1.8 | 120 | 5 to 6 | 250 to 425 |
| Mayekawa HS Comp | BE | Piston | R600 (n-butane) | 0.75 | 120 | 7 | 450 |
| Kobelco SGH120 | JP | 2-stage twin-screw | R245fa | 0.37 | 120 | 9 | n.a. |
| Mayekawa EcoCircuit | JP | Reciprocating | R1234ze(Z) | 0.1 | 120 | 9 | n.a. |
| Fuji Electric | JP | Reciprocating | R245fa | 0.03 | 120 | 9 | n.a. |
| Emerson | US | Scroll and EVI scroll | R245fa, R410a, R718 | 0.03 | 120 | 6 | n.a. |
| Skala Fabrikk | NO | Piston (semihermetic) | R290 (propane), R600 (cascade) | 0.3 | 115 | 7 | 500 to 700 |
| Mayekawa EcoSirocco | JP | Reciprocating | R744 (CO2) | 0.1 | 100 | 8 to 9 | n.a. |

Datenquelle:
IEA HPT Annex 58
https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1

**Hinweis:**

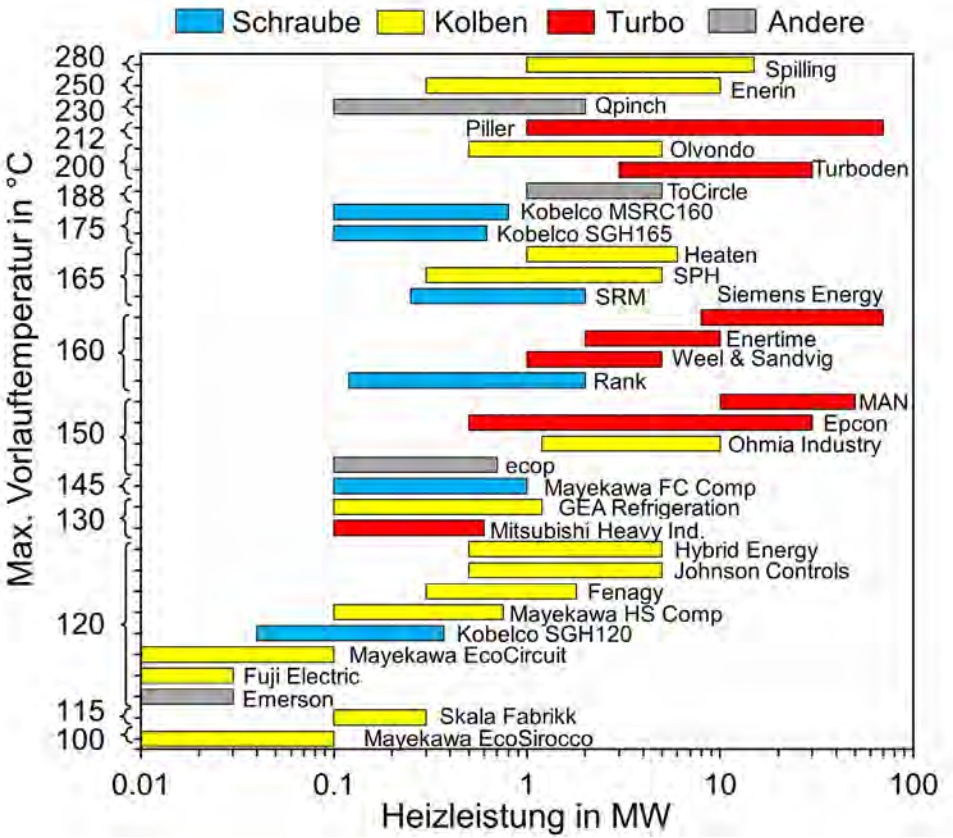
Alle Informationen wurden von den Anbietern ohne Überprüfung durch Dritte bereitgestellt.

Die Informationen wurden als Richtwerte bereitgestellt und können in den endgültigen Installationen je nach anwendungsspezifischen Parametern abweichen.


cordin.arpagaus@ost.ch

## Neuste Entwicklungen & Produkte für Versorgungstemperaturen > 100 °C

# Max. Vorlauftemperatur vs. Heizleistung verschiedener HTWP




Quelle: Arpagaus, C.; Brendel, L.; Paranjape, S.; Bless, F.; Uhlmann, M.; Bertsch, S.: High-Temperature Heat Pumps for Industrial Applications - New Developments and Products for Supply Temperatures above 100 °C, China Heat Pump Conference (CHPC2022), Hangzhou, 24.-27. Oktober, 2022.

Basiert auf Daten von IEA HPT Annex 58
https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1


cordin.arpagaus@ost.ch

Hersteller

# Anlagenentwickler in der Schweiz

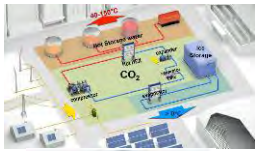
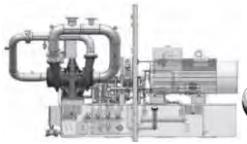
| | |
|---|---|
| Scheco AG | https://www.scheco.ch |
| Walter Wettstein AG Kältetechnik | https://www.wwag.ch |
| Zero-C | www.zero-c.ch |
| Friotherm AG | https://www.friotherm.com |
| MAN Energy Solutions | https://www.man-es.com |


cordin.arpagaus@ost.ch

## Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

# Beispiele für Großwärmepumpen (>1 MW) für Fernwärme und industrielle Anwendungen

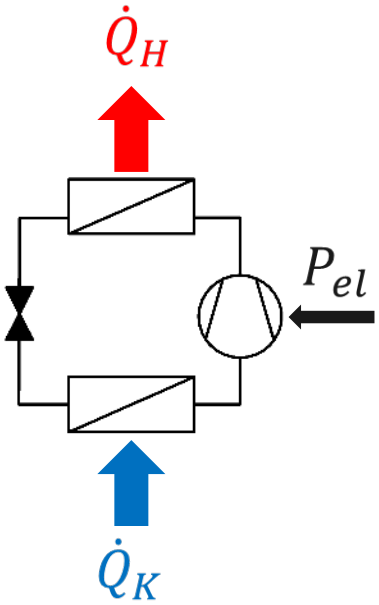
| Friotherm (CH) | Turboden (IT) | MAN Energy (CH) | Mitsubishi MHPS (DE) | Siemens (DE) | Ochsner (AT) | Kobelco (JP) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FRIOTHERM Heat Pump | LHP30<br>LHP150 | ETES | D-GWP | Gross-WP | IWWDSS R2R3b<br>IWWHS ER3b TWIN | SGH 120/165 |
| R1233zd(E) + R718 (Wasser) | R601 + R718 (n-Pentan + Wasser) | R744 ($CO_2$) | R600a + R718 (Iso-Butan + Wasser) | HFOs | Öko (R245fa)<br>R1233zd(E) (HFOs) | R245fa + R718 |
| **25 MW** | **2.7 MW<br>14.4 MW** | **5 bis 100 MW** | **4.3 MW** | **4 bis 70 MW** | **bis 750 kW<br>TWIN bis 2.4 MW** | **bis 624 kW<br>Kaskade 2.5 MW** |
| 137 °C | 115 °C | 150 °C | 174 °C | 150 °C | 130 °C | 165 °C |

FRIOTHERM TURBODEN MAN MITSUBISHI POWER SIEMENS energy OCHSNER ENERGIE TECHNIK KOBELCO


cordin.arpagaus@ost.ch

# Effizienz (Leistungszahl COP) und Gütegrad




$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}}$$

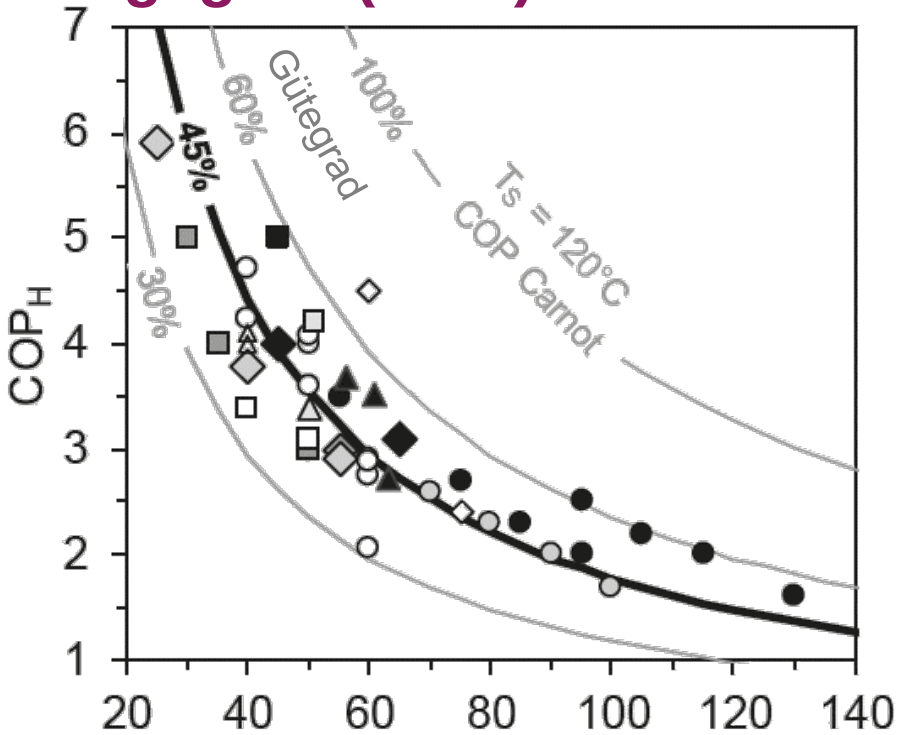
$$COP_{Carnot} = \frac{T_S}{T_S - T_Q}$$

Gütegrad = $COP_H / COP_{Carnot}$

Temperaturhub von Quelle zu Senke


cordin.arpagaus@ost.ch

# Wirkungsgrad (COP) von industriellen HTWP




$(= T_{Senke,aus} - T_{Quelle,ein})$

Temperaturhub von Quelle zu Senke

COP Fit-Kurve
(45% Gütegrad)

$$COP_H = 68.455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0.76}$$

| $\Delta T_{Hub}$ | $COP_H$ |
|---|---|
| 30 K | 5.2 |
| 40 K | 4.1 |
| 50 K | 3.5 |
| 60 K | 3.0 |
| 70 K | 2.7 |
| 80 K | 2.4 |

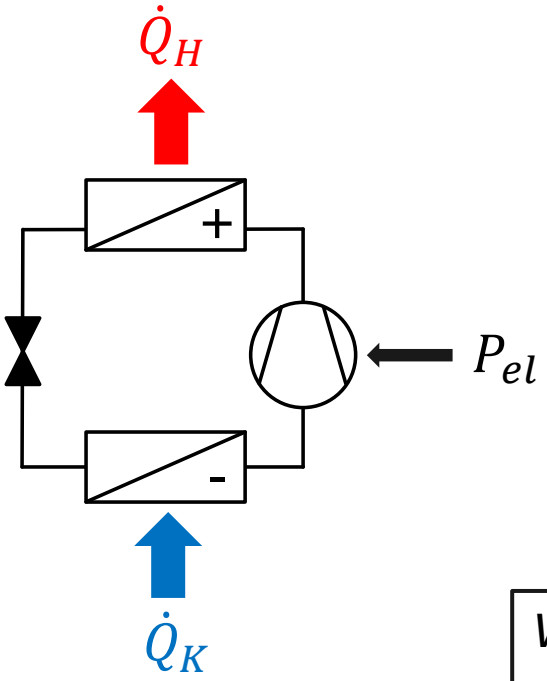
Arpagaus C., Bless F., Uhlmann M., Schiffmann J, Bertsch S.S. (2018): Review on High-Temperature Heat Pumps, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Effizienz einer Wärmepumpe mit simultaner Kühlanwendung




*Energiebilanz*

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_H - P_{el}$$

*COP Heizen*

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}}$$

*COP Kühlen*

$$COP_K = \frac{\dot{Q}_K}{P_{el}}$$

***Gesamt-COP***

$$\mathbf{COP_{H+K} = COP_H + COP_K = 2 \cdot COP_H - 1}$$

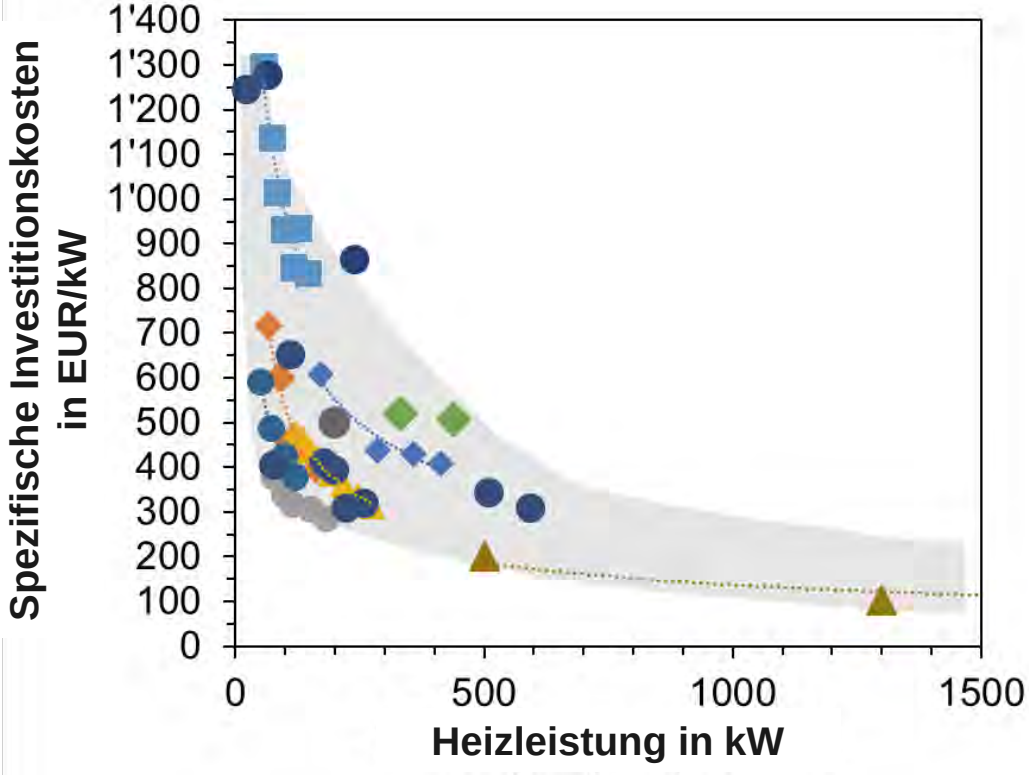
(H: Heizen und K: Kühlen)

Beispiel: $\mathbf{COP_H = 4 \rightarrow COP_{H+K} = 7}$

*Wird **gleichzeitig** mit der **Heizanwendung** auch eine **Kühlanwendung** genutzt, so verdoppelt sich der **Gesamt-COP** der Wärmepumpe fast.*


cordin.arpagaus@ost.ch

# Spezifische Investitionskosten für Industriewärmepumpen in Funktion der Heizleistung




*Eigene Darstellung*
*Abschätzung basierend auf Preisinformationen von Wärmepumpen-Herstellern in Europa*


cordin.arpagaus@ost.ch

# VDI 4646 Richtlinie: Anwendungen von Großwärmepumpen

**Mögliches Erscheinungsdatum**
2023-08

**Autor**
VDI-Fachbereich Energietechnik

**Herausgeber**
VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt

**Zugehörige Handbücher**
VDI-Handbuch Energietechnik

Link: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4646-anwendung-von-grosswaermepumpen

- **Anwendungen von Großwärmepumpen (Leistung > 100 kW)** in den Bereichen Produktionsprozessen/ Industrie, kommunale Versorgung (Schwimmbäder), Versorgung von Quartieren/Wohnsiedlungen, Fernwärme usw.
- Die Richtlinie wird einen **Planungsprozess für die Integration** von Wärmepumpen in Produktionsanlagen/Versorgungsobjekten definieren.
- **Methodik mit Analyse** der örtlichen Gegebenheiten, Rahmenbedingungen, geeigneter Integrationspunkt, Auswahl von Wärmepumpentyp und Systemauslegung, Dimensionierung der Systemkomponenten (Wärmeübertrager, Speicher, Wärmepumpe), usw.


cordin.arpagaus@ost.ch

# Herausforderungen für eine raschere Umsetzung von Wärmepumpen in der Industrie

- **Geringer Bekanntheitsgrad** der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlich realisierbaren Anwendungspotenziale von industriellen Wärmepumpen bei Anwendern, Beratern, Investoren, Anlagenplanern, Herstellern und Installateuren
- **Mangelndes Wissen über die Integration** von Wärmepumpen in bestehende industrielle Prozesse
- **Massgeschneiderte Designs**, d.h. kleine Losgrössen (geringer Skaleneffekt)
- **Zu lange Amortisation Zeiten**, die grösser sind als bei gas- oder ölbefeuerten Kesseln (gefordert sind oft ≤ 3 Jahre). Mit sinkenden Strom- und steigenden Gaspreisen werden geringere Amortisationszeiten erreicht.
- **Konkurrierende Heizungstechnologien** (z.B. mit fossilen Brennstoffen zu niedrigen Energiepreisen, oder Biomasse, Solarthermie, usw.)
- **Anforderungen im Bereich Wärmespeicherung**, um den **zeitlichen Versatz** zwischen Bedarf und Angebot auszugleichen (z.B. WP für Bandlast, Gaskessel für Leistungsspitzen)
- **Mangel an verfügbaren Verdichtern und Kältemitteln** mit niedrigem Treibhauspotenzial (GWP) und Ozonabbaupotenzial (ODP) von Null


cordin.arpagaus@ost.ch

## Fallbeispiele

# Industrielle Wärmepumpen in der Schweiz

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

**Innosuisse – Swiss Innovation Agency**

SCCER EIP
EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES

www.sccer-eip.ch

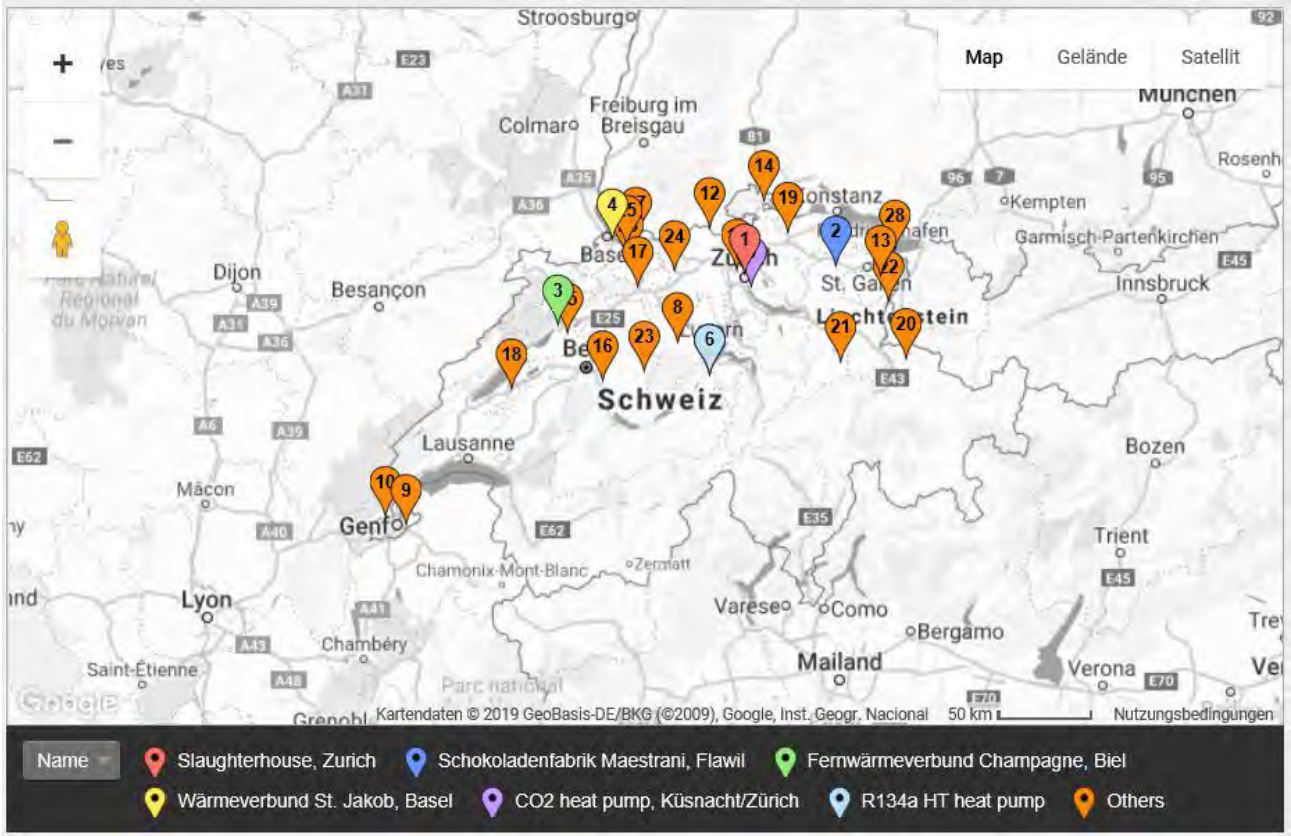
**Link zum Schlussbericht**
https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=66033



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Standorte der Fallbeispiele




## Datenquellen:

- Internet
- Hersteller
- Planer
- Kontakte

**Hinweis:**

Die Grafik stellt nicht die tatsächliche Reichweite von WP-Installationen in der Schweiz dar, sondern bezieht sich auf das Kontaktnetz.


cordin.arpagaus@ost.ch

# Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz

## Übersicht

| Unternehmen, Ort | Industrie | Anwendung | Integrations-ebene | Heizleistung (kW) | Temperatur Bereich (°C) | | Nr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Schlachthof, Zurich | Lebensmittel | Warmwasser, Reinigungswasser | Prozess | 800 | 20 | 90 | CH01 |
| Schokoladenfabrik Maestrani, Flawil | Lebensmittel | Warmwasser, Heizung, Kühlung | Prozess | 276 | 17 | 70 | CH02 |
| Käserei Gais, Appenzell | Lebensmittel | Warmwasser, Heizung | Prozess | 520 | 18 | 92 | CH13 |
| Kambly SA, Trubschachen | Lebensmittel | Warmwasser für Biskuit Produktion | Prozess | 471 | 30 | 65 | CH23 |
| Kellermann AG, Ellikon an der Thur | Lebensmittel | Warmwasser für Gewächshäuser Heizung | Betrieb | 1'000 | 6 | 65 | CH19 |
| Hilcona AG, Schaan | Lebensmittel | Warmwasser für frische Fertiggerichte | Betrieb | 507 | 31 | 67 | CH29 |
| Nutrex, Busswil bei Büren | Lebensmittel & Getränke | Essiggärung und Pasteurisierung | Prozess | 194 | 30 | 70 | CH15 |
| GVS Schaffhausen Landi | Lebensmittel & Getränke | Prozess-/Warmwasser, Heizung, Kühlung | Betrieb | 63 | 37 | 95 | CH14 |
| Bachem AG, Bubendorf | Pharma | Erwärmung und Kühlung von Peptiden | Prozess | 480 | 14 | 70 | CH26 |
| R134a Wärmepupme, Geistlich Wolhusen | Pharma | Warmwasser, Heizung | Betrieb | 606 | 2 | 67 | CH08 |
| Mifa AG Mibelle Group, Frenkendorf | Home Care and Nutrition | Warm-/Kaltwasser, Heizung, Kühlung | Betrieb | 885 | 35 | 70 | CH25 |
| Härterei Gerster AG, Egerkingen | Metalle | Prozesswärme für Härteverfahren | Betrieb | 260 | 17 | 65 | CH17 |
| Georg Fischer AG, Grüsch | Maschinen | Prozesswärme für Herstellung Kunststoffventilen | Betrieb | 382 | 8 | 65 | CH20 |
| Feldschlösschen Brauerei, Rheinfelden | Fernwärme, Brauerei | Warmwasser, Fernwärme | Betrieb/Netzwerk | 1'350 | 16 | 81 | CH27 |
| Champagne, Biel | Fernwärme | Warmwasser und Gebäudeheizung | Netzwerk | 650 | 11 | 63 | CH03 |
| St. Jakob Quartier, Basel | Fernwärme | Warmwasser und Gebäudeheizung | Netzwerk | 181 | 0 | 65 | CH04 |
| Laurana Qura, Thônex | Fernwärme | Warmwasser und Gebäudeheizung | Netzwerk | 338 | 14 | 63 | CH09 |
| Les Vergers, Meyrin | Fernwärme | Beheizung von Wohngebäuden | Netzwerk | 5'000 | 12 | 50 | CH10 |
| Stadt Lausanne | Fernwärme | Warmwasser für Wohngebäude | Netzwerk | 4500 | 6 | 68 | CH16 |
| Casino Aarau | Fernwärme/Kühlung | Fernwärme- und Fernkältenetz | Netzwerk | 1'975 | 9 | 70 | CH24 |
| Kokon Corporate Campus, Ruggell | Wellness und Restaurant | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 341 | 10 | 35 | CH22 |
| Schweizer Armee, $CO_2$ Wärmepumpe, Payerne | Militär | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 60 | 9 | 45 | CH18 |
| Schweizer Armee, Truppengebäude, Matt | Militär | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 270 | 8 | 60 | CH21 |
| Abwasserreinigung (ARA), Altenrhein | Abwasserbehandlung | Warmwasser für die Klärschlammtrocknung | Betrieb | 2'840 | 8 | 65 | CH28 |
| Abwasserreinigung, Zürich | Abwasserbehandlung | Warmwasser | Betrieb | 410 | 7 | 50 | CH11 |
| Bad Zurzach | Thermalbad | Warmwasser | Betrieb | 550 | 29 | 55 | CH12 |
| $CO_2$ Wärmepumpe, Küsnacht | Gebäude | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 101 | 5 | 65 | CH05 |
| R134a HT Wärmepumpe, Kerns | Gebäude | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 800 | 20 | 75 | CH06 |
| R134a HT Wärmepumpe, Kerns | Gebäude | Warmwasser und Gebäudeheizung | Gebäude | 500 | 3 | 70 | CH07 |


cordin.arpagaus@ost.ch

# Aufruf zur Eingabe von Projekten zur Dekarbonisierung der Prozesswärme

energieschweiz

**Finanzierung:**
40% der Mehrkosten vgl. mit konventionellen Techniken

Link zu den Förderkriterien

Kontakt:
Dylan Battistolo, dylan.battistolo@bfe.admin.ch
Frédéric Maurer, frederic.maurer@bfe.admin.ch

# Käserei im Gais Appenzell

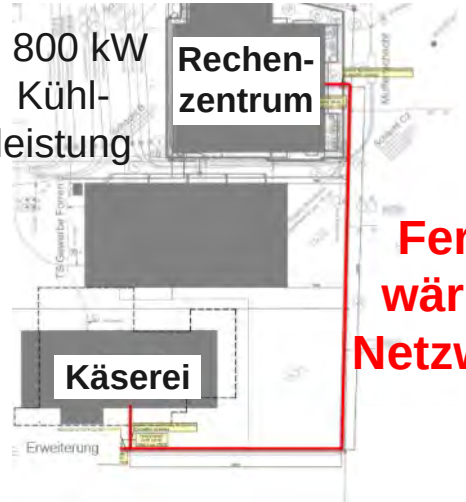
Heat Pumping Technologies MAGAZINE

VOL.37 NO 2/2019

## Rechenzentrum

Abwärme von Serverräumen 16 bis 20 °C

~ 800 kW Kühl-leistung




**Fern-wärme Netzwerk**

## Käserei

- Energiebedarf ~1’800 MWh/Jahr
- ~10 Mio. Liter Milch pro Jahr
- ~300 Tonnen Käse pro Jahr

**Temperaturniveaus:**

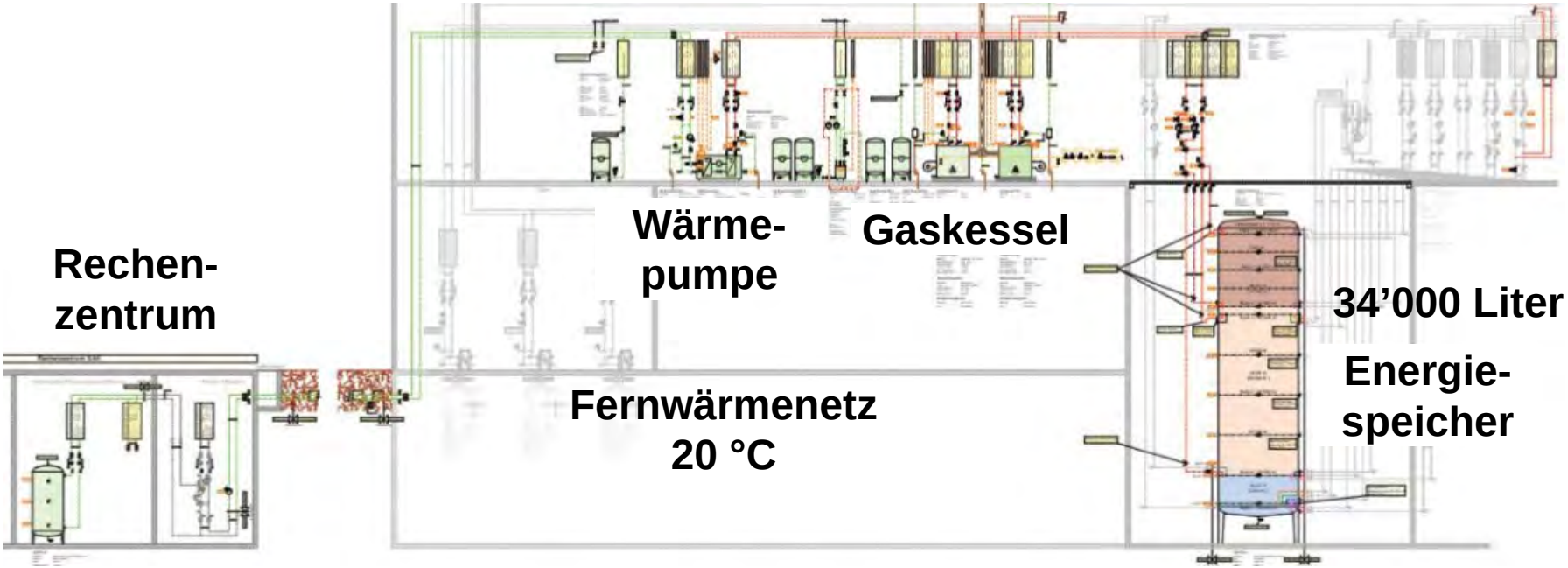
- Wärmerückgewinnung (Waschwasser, Lüftung): <42 °C
- Raumheizung/WW (Lagerung): 65°C
- Prozesswärme 1 (Käsewannen, Reinigungswasser): 92 °C
- Prozesswärme 2 (Mehrzweckheizung, Pasteurisierung): 105 °C



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Käserei im Gais Appenzell

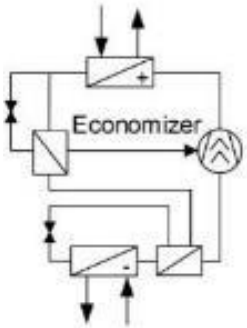




cordin.arpagaus@ost.ch

# Käserei im Gais Appenzell

- **IWWHS 570 ER6c2**
- **~520 kW**
- 2-stufiger Schraubenkompressor
- **Economizer-Zyklus**
  - Kältemittel-Massenstrom ↑
  - Heissgastemperatur ↓
  - Unterkühlung ↑ (COP ↑)
- **R1234ze(E)** (130 kg, Sicherheitsgruppe: A2L, leicht entflammbar, **besondere Maßnahmen für Brandschutz und Fluchtwege)**
- **2020/21 Erstbetrieb** (Nutzung der Abwärme des Rechenzentrums)




## Leistungsdaten (W18-14/W82-92)

| Teillast (%) | 100 | 75 | 50 |
|---|---|---|---|
| Effektive Teillast (%) | 100 | 81 | 62 |
| **Kondensator Heizleistung (kW)** | **520** | **419** | **321** |
| Kondensator Wasserdurchfluss ($m^3/h$) | 44.7 | 36.0 | 27.6 |
| Temperaturdifferenz Kondensator (K) | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| Verdampferleistung (kW) | 338 | 264 | 195 |
| Verdampfer Wasserdurchfluss ($m^3/h$) | 82.7 | 82.7 | 82.7 |
| Temperaturdifferenz Verdampfer (K) | 3.5 | 2.7 | 2.0 |
| Kompressorleistung (kW) | 182 | 155 | 126 |
| **$COP_H$ (-)** | **2.85** | **2.70** | **2.55** |


cordin.arpagaus@ost.ch

# Schokoladenfabrik

WP Hersteller: CTA AG
Bauunternehmer: Seiz AG
Berater: Carnotech AG

**Anwendung: Kühlen und Heizen von Schokoladen-Conchiermaschinen**
Temperaturbereich: von 5 bis 70 °C
Platz für 8 Wärmepumpen mit je 220 kW
Einsparung fossile Brennstoffe = 2'590 MWh
Einsparung $CO_2$-Emissionen = 30% (510 t/a)

| Technische Daten | Kühlen | Heizen |
|---|---|---|
| Kühlleistung | 222.6 kW | 183.7 kW |
| Elektrische Leistung | 70.4 kW | 96.8 kW |
| Wärmequelle ein/aus | 5/11°C | 11/17°C |
| Heizleistung | 289.8 kW | 276.2 kW |
| **COP (Heizen)** | **4.12** | **2.85** |
| Wasser ein/aus | 35/45°C | **60/70°C** |
| Kältemittel (HFO) | R-1234ze | **R-1234ze** |
| Kolbenkompressoren | 4 | 4 |
| Anzahl Kühlkreise | 2 | 2 |


cordin.arpagaus@ost.ch

# GVS Schaffhausen, Landi – Getränke

**Einsparungen:**
**$CO_2$ Emissionen (-40%)**
**~ 26’000 Liter Öl/Jahr (~ 1 Fass Öl/Tag)**

**Wärmesenke: 80 bis 95 ºC**
- Prozesswasser zur Desinfektion von Getränkeabfüllanlagen und Weintanks
- Beheizung von Lagerräumen
- Heizung der Produktion

**Wärmequelle: 37 ºC**
- Abwärme der Kälteerzeugung (Kühlung der Lagerräume)

| | |
|---|---|
| **Typ Wärmepumpe:** | **ISWHS 60 ER3** |
| Heizleistung: | 63 kW |
| Kühlleistung: | 48 kW |
| Kompressor: | Schraube |
| Kältemittel: | ÖKO 1 (R245fa) |
| COP-Heizung: | 4,2 |
| EER Kühlung: | 3,2 |
| Jahr der Installation: | 2017 |


cordin.arpagaus@ost.ch

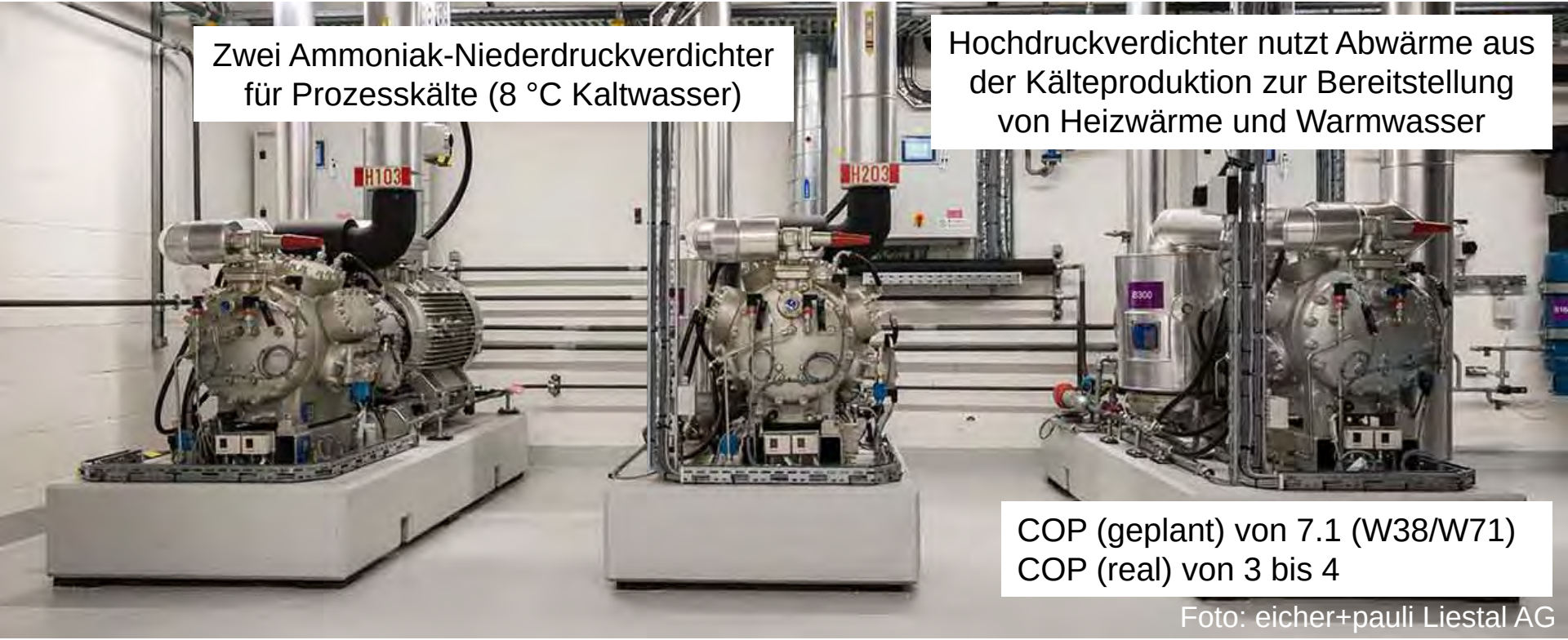
## Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz

# Schlachthaus Zurich – Fleischproduktion

| | |
|---|---|
| **Anwendung** | **Warmwasser für Reinigungsprozesse bis 90°C und Raumheizung** |
| Ort | Zürich (mitten in der Stadt, historisches Gebäude) |
| Jahr der Inbetriebnahme | 2011 |
| WP Hersteller | Thermea, Deutschland |
| Auftragnehmer | ewz Energiedienstleistungen |
| Berater | Stadt Zürich |
| **Kältemittel** | **$CO_2$ (R744)** |
| Kompressor | Schraube |
| Heiz-/Kühlleistung (kW) | 800/564 |
| **Wärmequelle** | **Abwärme aus Kälteprozessen** (geschlossener Wasserkreislauf mit Speicher) **und Abwärme aus der Drucklufterzeugung** |
| Wärmequelle (°C) ein/aus | 20/14 |
| **Wärmesenke (°C) ein/aus** | **Wasser, 30/90** |
| Effizienz (COP) | 3.4 |
| Einsparung $CO_2$ Emissionen | 30% (510 t/Jahr), Einsparung von 2’590 MWh fossilen Brennstoffen |


cordin.arpagaus@ost.ch

# Biotechnologie-Unternehmen Bachem AG (Bubendorf, BL)




Zwei Ammoniak-Niederdruckverdichter für Prozesskälte (8 °C Kaltwasser)

Hochdruckverdichter nutzt Abwärme aus der Kälteproduktion zur Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser

COP (geplant) von 7.1 (W38/W71)
COP (real) von 3 bis 4

Foto: eicher+pauli Liestal AG



cordin.arpagaus@ost.ch

# Essiggärung und Pasteurisierung

**Anwendung:**

- **Kühlung: Essiggärungsprozess über 10 Tage bei 30°C**
- **Heizen: Essigpasteurisierung >70°C**, um ein nicht verderbliches Lebensmittel zu erhalten
- Kühlleistung: 136 kW
- Heizleistung: 194 kW
- COP: 3,4
- Einsparung fossile Brennstoffe: bis zu 65'000 L/a
- Einsparung $CO_2$-Emissionen: ~310 t/a

Quelle: EHPA (2017)
Large scale heat pumps in Europe

Technical details of the application

Heating capacity: 194 kW

COP: 3,4

Refrigerant: R134a

Heating source: Water

Supplied temperature: > 70°C

By VIESSMANN climate of innovation



cordin.arpagaus@ost.ch

*Annahme $CO_2$ Emissionsfaktoren (BAFU, 2019)
Gas: 0.203 t $CO_2$/MWh, Öl: 0.00265 t $CO_2$/L Öl

# Energieeinsparungen und Reduzierung der $CO_2$-Emissionen

| Fallbeispiel | Energieeinsparungen | Reduktion der $CO_2$ Emissionen |
|---|---|---|
| Schlachthaus Zürich | 2'560 MWh fossile Brennstoffe | **30%** (510 t $CO_2$/a) *(520 t $CO_2$/a*)* |
| Schokoladenfabrik Maestrani | *882 MWh Gas** | 179 t $CO_2$/a (2013 bis 2020) |
| Fernwärme Champagne | *3'054 MWh Gas** | 620 t $CO_2$/a |
| Fernwärme Laurana | 1'435 MWh fossile | **42%** (1'746 t $CO_2$/a) |
| Käserei Gais Appenzell | 1'500 MWh Gas | *305 t $CO_2$/a** |
| GVS Landi Getränke | 26'000 L Öl/a | **40%** *(69 t $CO_2$/a*)* |
| Nutrex AG Fermentation | bis zu 65'000 L Öl/a | 310 t $CO_2$/a *(bis zu 172 t $CO_2$/a*)* |
| Härterei Gerster AG Metalle | **80%** (800 MWh Gas) | 160 t $CO_2$/a *(162 t $CO_2$/a*)* |
| Kellermann Gemüse | *4'729 MWh Gas** | 960 t $CO_2$/a |
| Kambly SA Biscuits | **25%** *(493 MWh Gas*)* | **90%** (100 t $CO_2$/a) |
| Fernwärme Casino Aarau | **40%** bis 2035 | n.v. |
| Mifa AG Home Care & Nutrition | **20%** *(4'729 MWh Gas*)* | **60%** (960 t $CO_2$/a) |
| Bachem AG Biotech | *1'478 MWh Gas** | 300 t $CO_2$/a |
| Feldschlösschen Bier | **75%** (11'160 MWh fossile) | *2'265 t $CO_2$/a** |
| ARA Altenrhein Abwasser | *14'778 MWh Gas** | 3'000 t $CO_2$/a |

- **Ersatz von Gas- und Ölkesseln** durch WP führt zu **signifikanten Energieeinsparungen und Reduktion der $CO_2$-Emissionen**


cordin.arpagaus@ost.ch

## Potenzielle Anwendungen

# HEISSWASSER

# HEISSLUFT

# DAMPF

- **Warmwassererzeugung für Wasch- und Reinigungsprozesse** (Lebensmittel, Fleisch, Produktwäsche) **in Kombination mit der Kälteerzeugung**
- **Heißlufterzeugung und Luftvorwärmung für Trocknungsprozesse** (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung) durch Abwärmenutzung
- **Prozessdampferzeugung (Niederdruckdampf)** für die Sterilisation und Pasteurisation von Lebensmitteln (z.B. Milch) mit Kühlwasser oder feuchter Abluft
- **Wärmerückgewinnung durch Rauchgaskondensation** in Biomasseverbrennungsanlagen
- **Nah- und Fernwärmenetze** (z.B. von Stadtwerken und Gemeinden)


cordin.arpagaus@ost.ch

# Aktuelle / zukünftige Arbeiten am Institut für Energiesysteme (IES)

- **Demonstration** von Wärmepumpen zur **Dampferzeugung**
- **Prozessintegration** von Wärmepumpentechnologien
- **HTWP-Technologien**, die genau zu den Temperaturanforderungen passen
- **Fallbeispiele** für erfolgreiche Integrationen

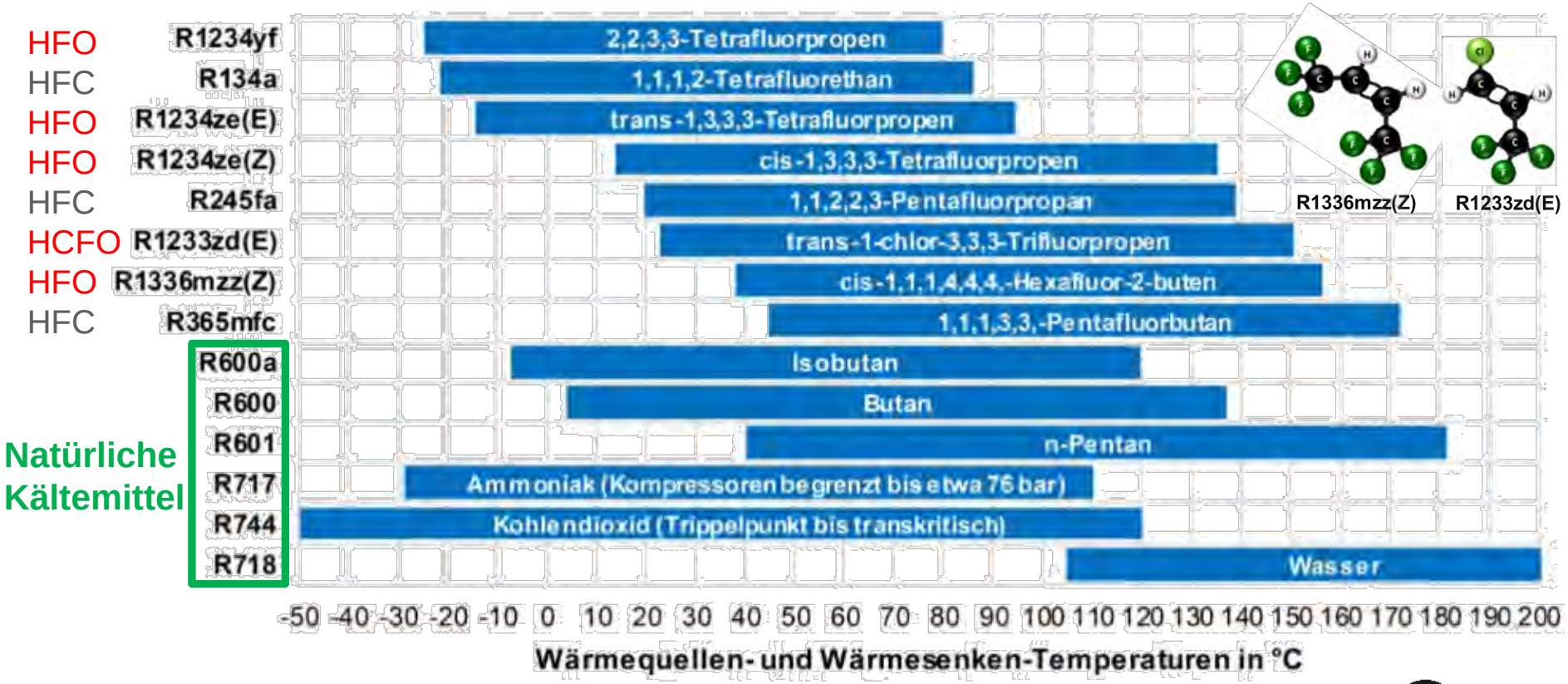

cordin.arpagaus@ost.ch

# Wo gibt es Forschungsbedarf?

- Erweiterung der Grenzen der Quellen- und Vorlauftemperaturen auf höhere Werte
- Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer HFO Kältemittel mit niedrigem GWP
- Einsatz natürlicher Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe (Butan, Pentan), $CO_2$ oder $H_2O$
- Steigerung der Effizienz (COP) von Wärmepumpen (z. B. durch mehrstufige Kreislaufe, mit ölfreien Kompressoren)
- Entwicklung temperaturbeständiger Komponenten (z.B. Ventile, Kompressoren)
- Optimierung und Entwicklung von Wärmepumpen-Systemen mit neuen Regelungsstrategien für höhere Temperaturen
- Scale-up von Funktionsmodellen in den industriellen Maßstab (Demonstrationsprojekte)

cordin.arpagaus@ost.ch

# Einsatzbereiche von verschiedenen Kältemitteln für HTWP

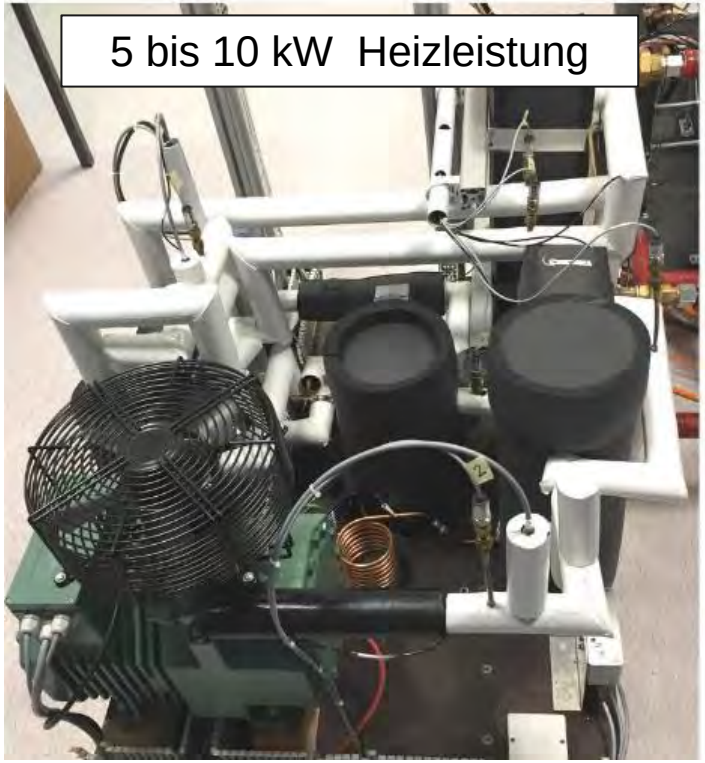





cordin.arpagaus@ost.ch

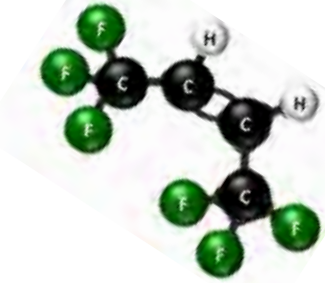
OST

# Prototyp HTWP mit 80 °C bis 150 °C Vorlauftemperatur im Labor

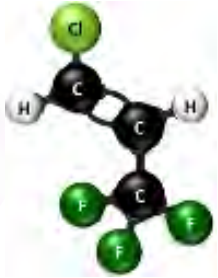



*(Arpagaus et al., 2018, 2019)*

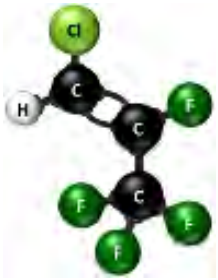
## Untersuchung verschiedener synthetischer HFO/HCFO Kältemittel



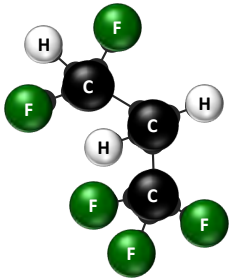
**R1336mzz(Z)**



**R1233zd(E)**



**R1224yd(Z)**



**R245fa**

**HFO: Hydrofluorolefine, HCFO: Hydrochlorfluorolefine**

**Eigenschaften:**

- Niedriges GWP (Treibhauspotential)
- Null/niedrig ODP (Ozonabbaupotential)
- kurze atm. Lebensdauer
- Nicht brennbar
- Nicht toxisch

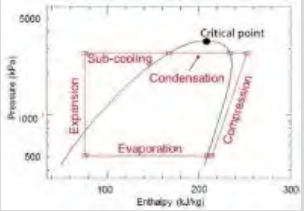
| Kältemittel | ODP | $GWP_{100}$ | SG |
|---|---|---|---|
| R1336mzz(Z) | 0 | 2 | A1 |
| R1233zd(E) | 0.00034 | 1 | A1 |
| R1224yd(Z) | 0.00023 | 0.88 | A1 |
| R245fa | 0 | 858 | B1 |



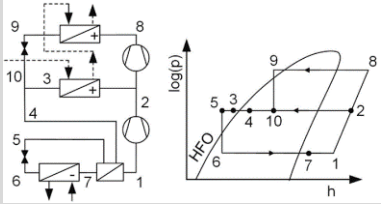
cordin.arpagaus@ost.ch

# Kreislauf Design für hohe Temperaturspreizungen

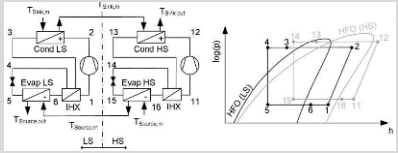
- **Kreislauf mit Unterkühler**



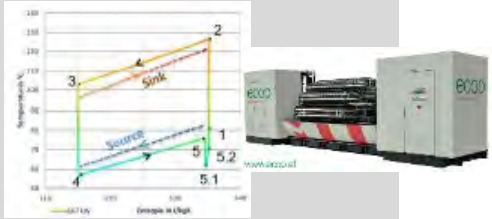

- **Zweistufiger Kreislauf**



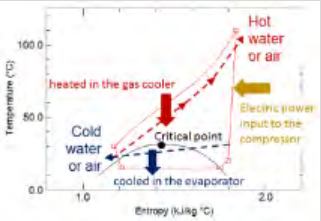

- **Zwei parallele Kreisläufe**



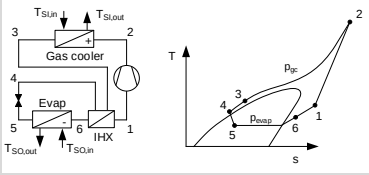

- **Reverse Brayton Cycle**



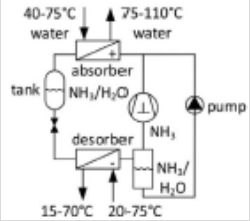

- **Transkritischer $CO_2$ Kreislauf**



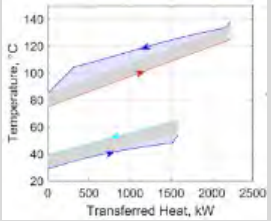

- **Transkritische Kreisläufe (HFOs, Butan, Pentan)**




- **Hybrid WP mit $NH_3/H_2O$**




- **Kältemittel Mischungen**




**zur Erzeugung von**

**HEISSWASSER oder HEISSLUFT**

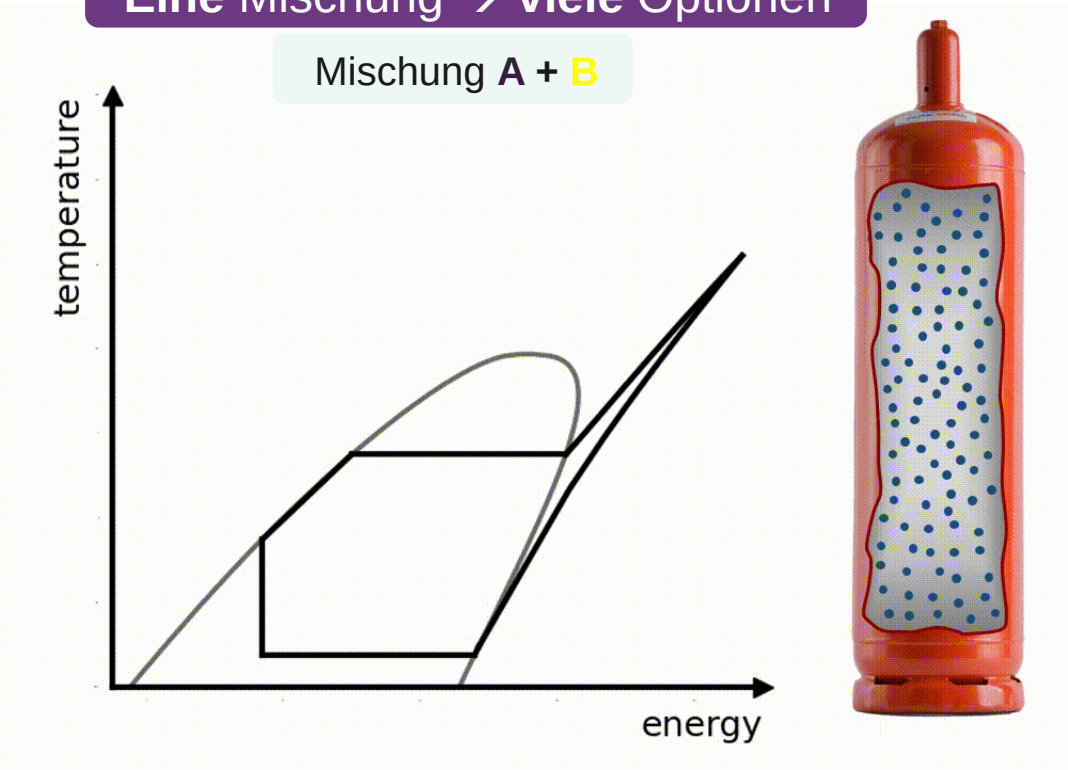


cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Kältemittelmischungen für große Temperaturspreizungen

**Eine** Mischung → **viele** Optionen



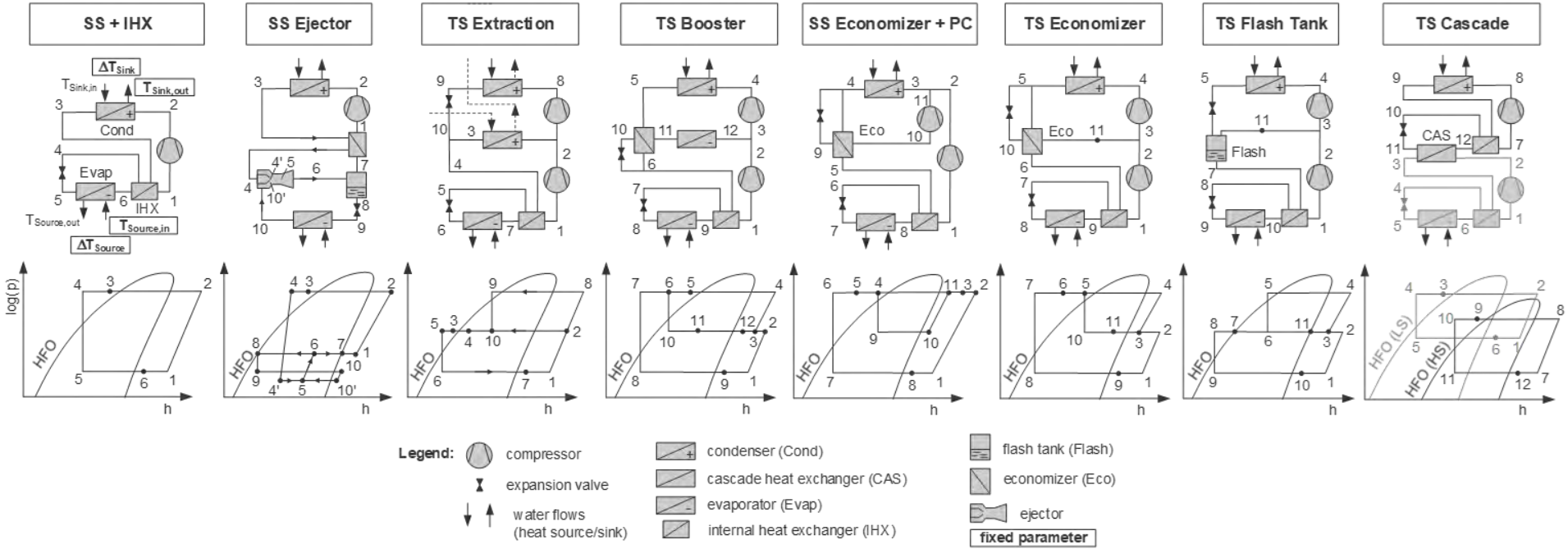
Hohe Flexibilität

Animation aus dem Schweizer Bridge Projekt:
High-efficiency high-temperature heat pumps
with temperature glide



cordin.arpagaus@ost.ch

# Optimimierung des HTWP-Kreislaufs

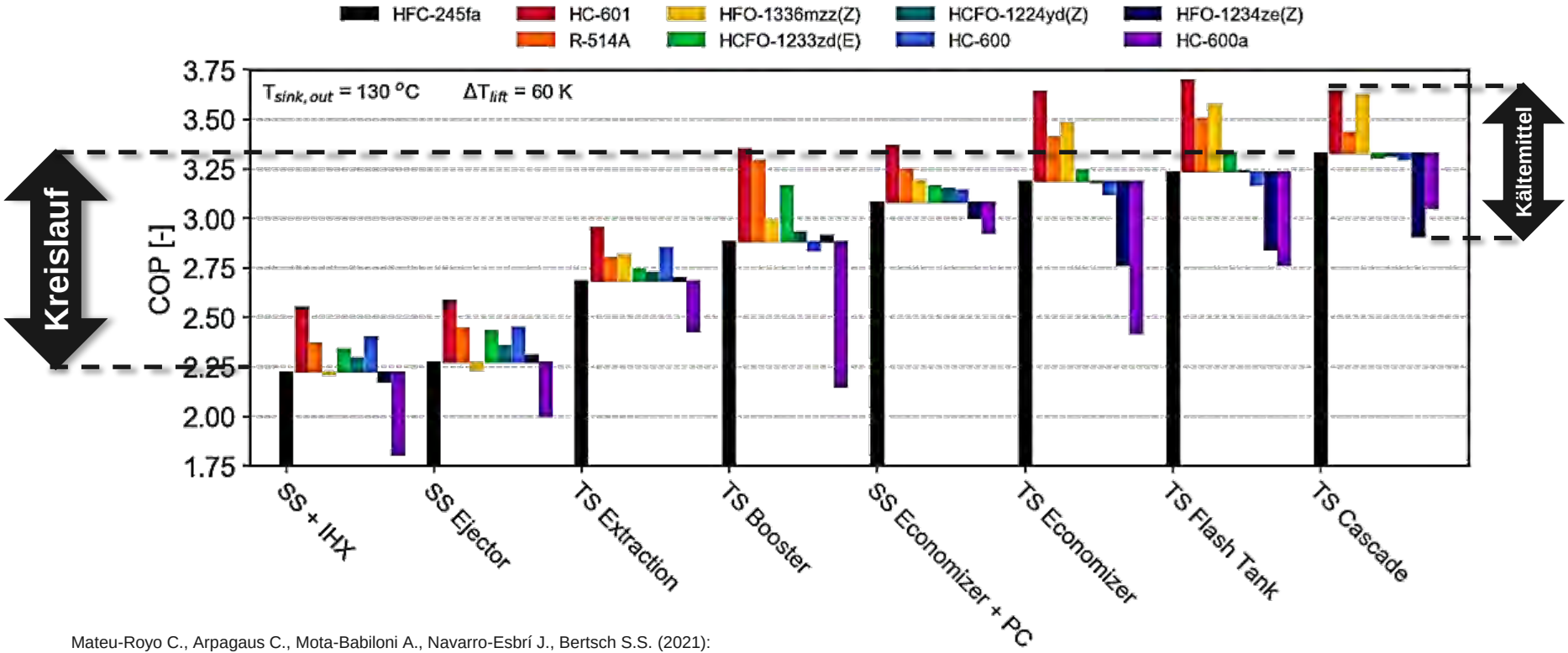



Mateu-Royo C., Arpagaus C., Mota-Babiloni A., Navarro-Esbrí J., Bertsch S.S. (2021): Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752



cordin.arpagaus@ost.ch

# Einfluss von Kreislaufdesign und Kältemittel auf die Effizienz (COP)



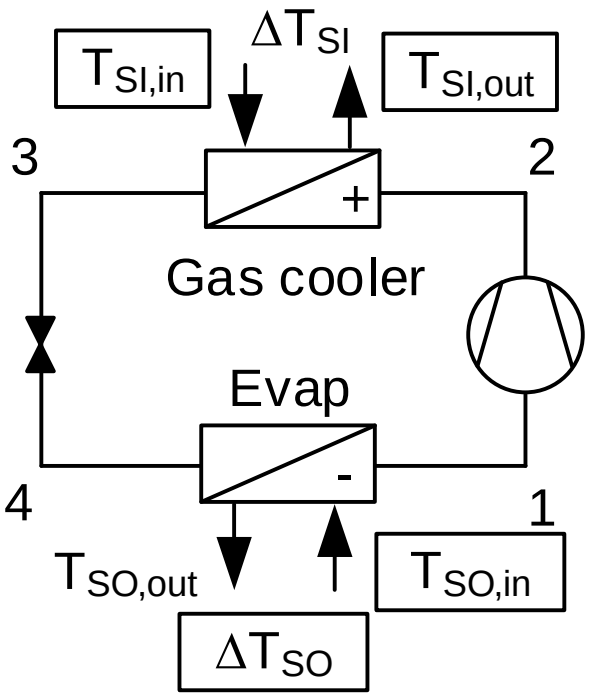

Mateu-Royo C., Arpagaus C., Mota-Babiloni A., Navarro-Esbrí J., Bertsch S.S. (2021): Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752

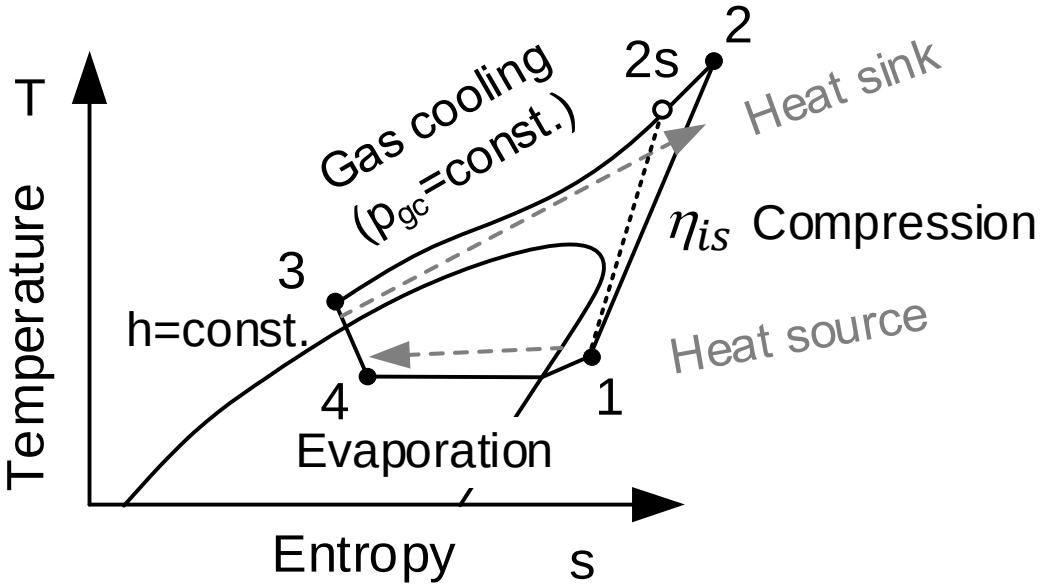


cordin.arpagaus@ost.ch

OST

# Prozesswärme mit transkritischen Wärmepumpen

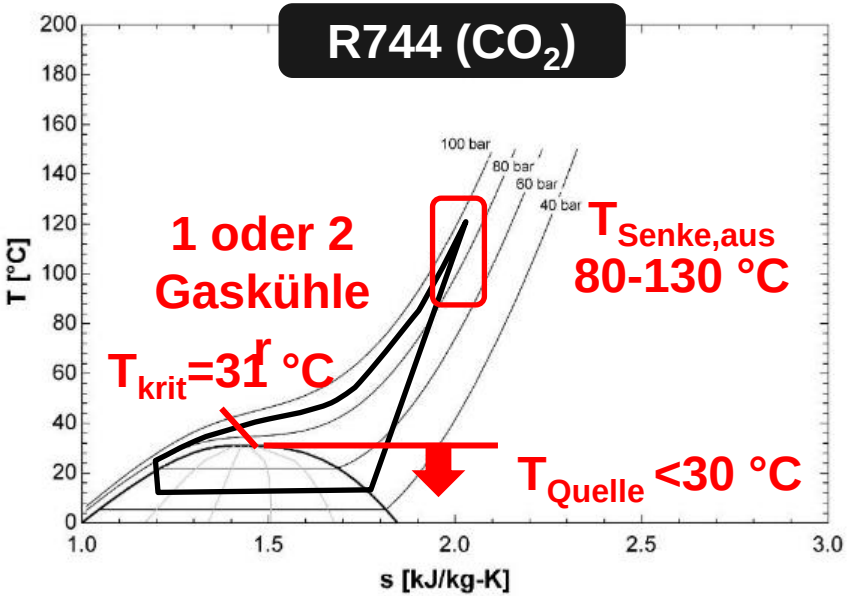


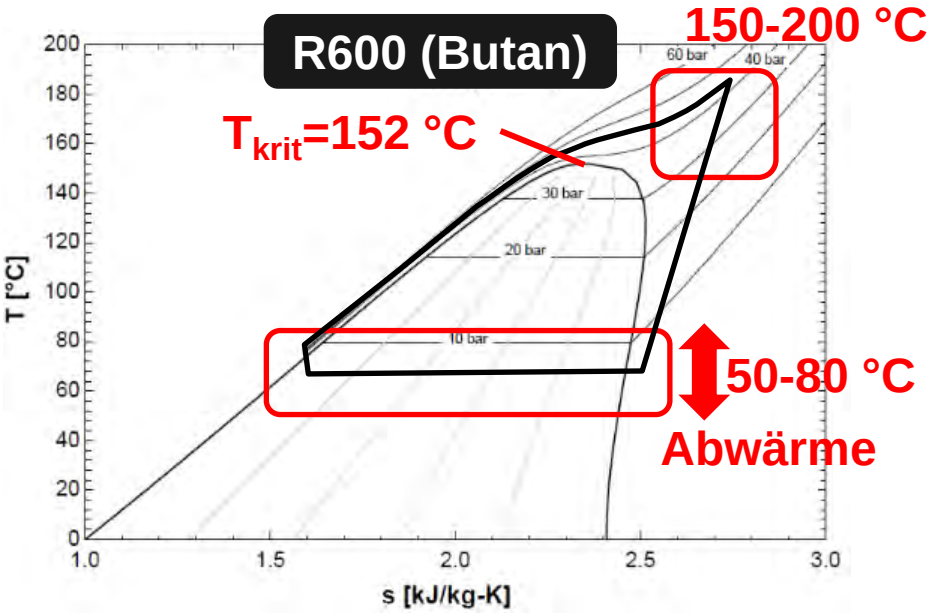





cordin.arpagaus@ost.ch

# Transkritisch $CO_2$ (R744) vs. Butan (R600)




**Geeignet für gleichzeitiges Heizen (z.B. Wasser oder Luft von 20 bis 90 °C) und Kühlen (<30 °C)**

**Geeignet für Wärmequellen wie Abwärme (z.B. Rauchgas 50 bis 80 °C) und zur Erzeugung von Heißluft von 150 bis 200 °C**



cordin.arpagaus@ost.ch

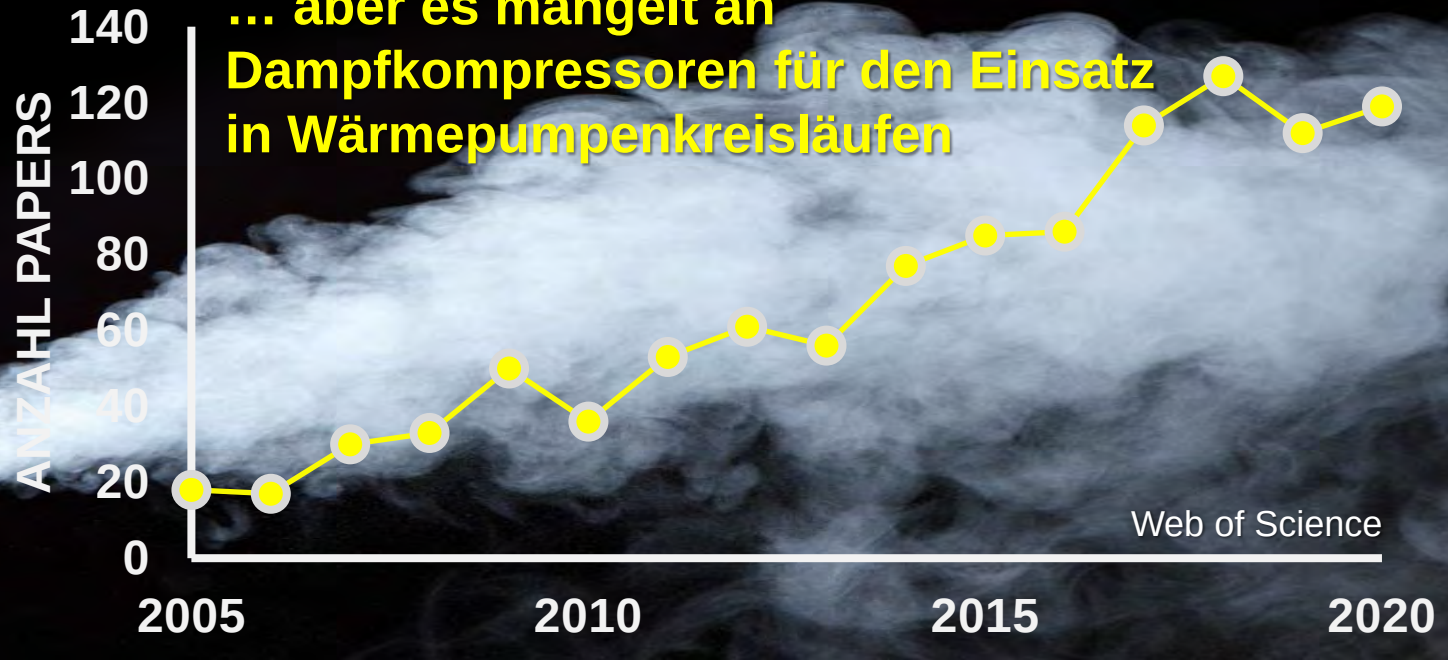
OST

# Dampferzeugende Wärmepumpen

DAMPF

## Veröffentlichungen über "Dampf + Wärmepumpe" nehmen zu

… aber es mangelt an Dampfkompressoren für den Einsatz in Wärmepumpenkreisläufen




Quelle: Bless F., Arpagaus C., Bertsch S. (2021): Theoretical investigation of HTHP cycles for steam generation, 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea, April 26-29, 2021



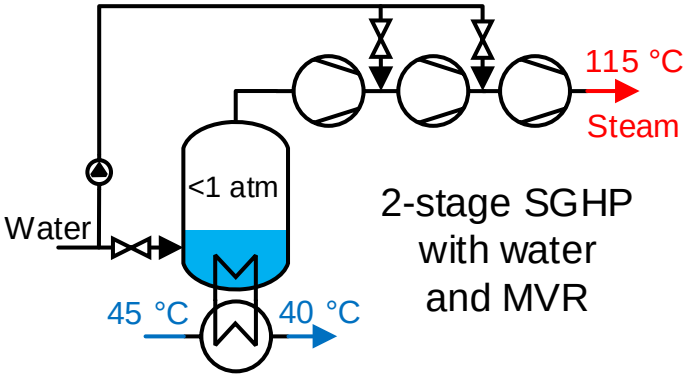
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

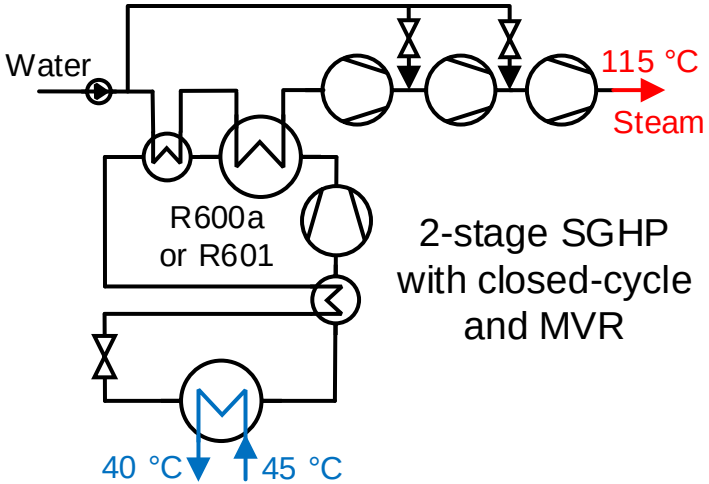
# Konzepte von Wärmepumpen zur Dampferzeugung

DAMPF

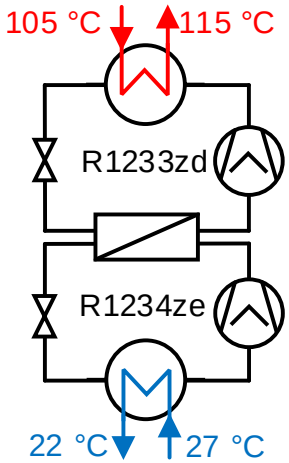
## Offener Kreislauf mit Wasser und MVR




## Kombinierter Kreislauf mit geschlossenem Kreislauf und MVR




## 2-stufige Kaskade mit Flash-Tank




Source: Arpagaus C., Bless F., Bertsch,S. (2022): Techno-economic analysis of steam generating heat pumps for integration into distillation processes, 15th IIR-Gustav Lorentzen conference on Natural Refrigerants, June 13-15, 2022, Trondheim, Norway, http://dx.doi.org/10.18462/iir.gl2022.0029


cordin.arpagaus@ost.ch

# Dampferzeugende Version des ThermBooster™

Bild mit freundlicher Genehmigung von SPH Sustainable Process Heat GmbH

- Hochtemperatur-4-Zylinder-Kolbenkompressor
- Heizleistung: 400 kW bis 1 MW (abhängig vom Betriebspunkt)
- Synthetische Kältemittel: R1233zd(E), R1336mzz(E), R1336mzz(Z)
- Max. Dampfdruck: 6 bar(a), 165 °C


cordin.arpagaus@ost.ch

# Testlabor ThermBooster™

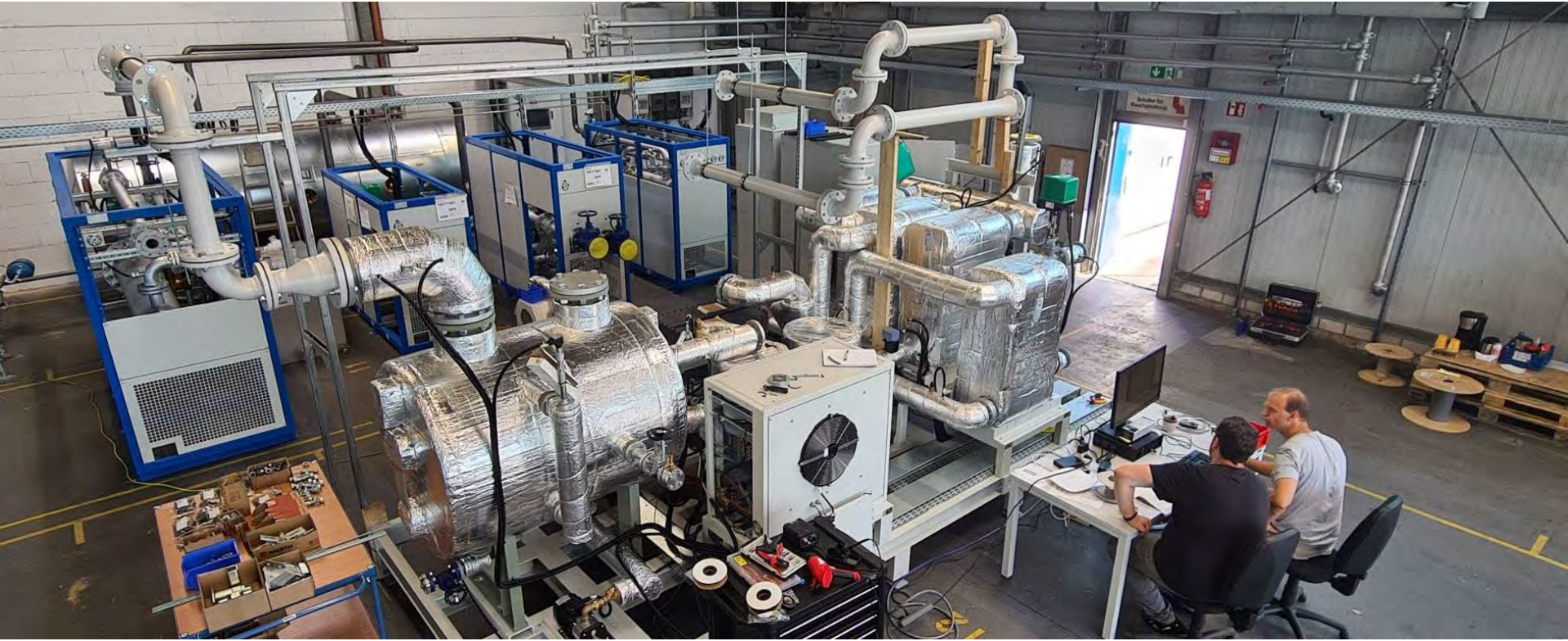
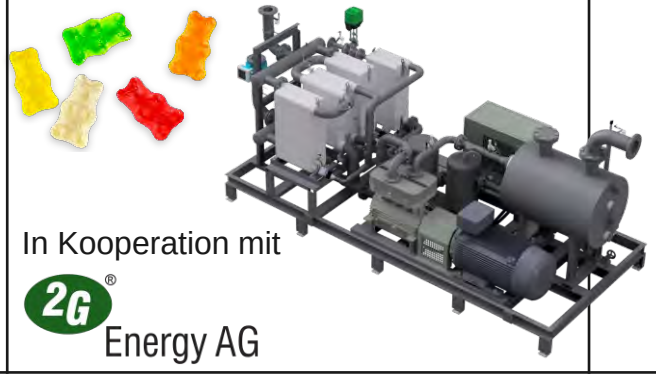


Bild mit freundlicher Genehmigung von SPH Sustainable Process Heat GmbH


cordin.arpagaus@ost.ch

# Anwendungen mit ThermBooster™

| Anwendung | Gelatine | Thermoplastik |
|---|---|---|
| **Wärmequelle** | 85/70 °C | 75/65 °C (Waser) |
| **Wärmesenke** | 812 kg/h Dampf bei 2 bar | 90/130 °C (Heisswasser) für Trockungsprozess |
| **Heizleistung** | 514 kW | 1’017 kW (2 Kreisläufe) |
| **Kälteleistung** | 407 kW | 809 kW |
| **Elektrische Leistungr** | 118 kW | 229 kW (2 Kompressoren) |
| **COP** | 4.4 | 4.4 |
| **Energieeinsparung** | 4.1 $GWh_{th}$/a | 1.25 Mio. $m^3$ Gas/a |
| **$CO_2$ Emission Reduktion** | 550 t $CO_2$/a | ~2’400 t $CO_2$/a |
| |  In Kooperation mit 2G Energy AG | In Kooperation mit technotrans |

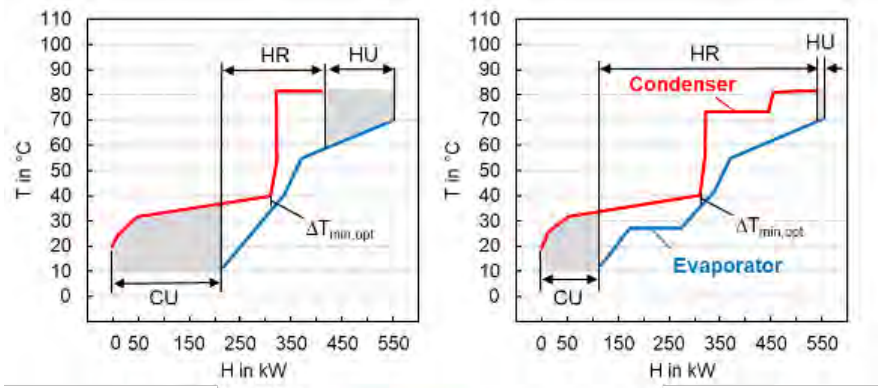
Bilder mit freundlicher Genehmigung von SPH Sustainable Process Heat GmbH

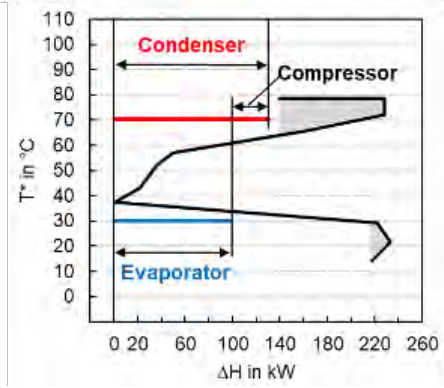

cordin.arpagaus@ost.ch

# Fragestellungen

1) Gibt es Prozesse mit **Wärmebedarf**?
2) Gibt es Prozesse mit **Kühlbedarf**?
3) Wie hoch ist die erforderliche **Wärmeversorgungstemperatur**?
4) Sind ausreichend **Wärmequellen** für hohe Wärmebereitstellungstemperaturen vorhanden?
5) Hat die Wärmequelle etwa dieselbe **Größenordnung** wie der Wärmebedarf?
6) Ist die Wärmequelle etwa zur gleichen **Zeit** verfügbar wie die Wärmesenke?
7) Wie gross ist das **Wärmerückgewinnungspotenzial** (WRG)?
8) Wie ist das **Betriebsprofil** der Wärmepumpe (Laufzeit, Teillast, Schwankungen)?

## Pinch Analyse
## Fallbeispiel – Süßwarenherstellung



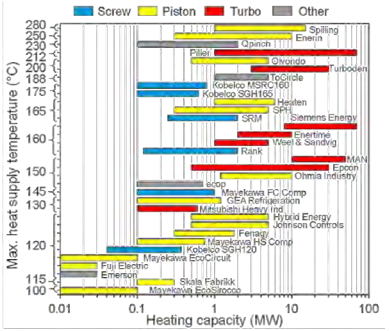




HR: heat recovery
CU: cold utility
HU: hot utility

Data from Olsen et al. (2017)

# Zusammenfassung

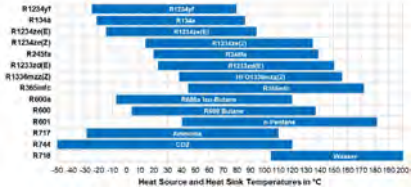
- Kommerzielle HTWP-Produkte und -Technologien mit Vorlauftemperaturen >100 °C sind zunehmend auf dem Markt verfügbar (verschiedene Hersteller, >100 kW bis >10 MW Heizleistung)
- IEA HPT Annex 58 gibt Übersicht über verschiedene erfolgreiche Fallstudien, Demonstrationsprojekte und HTHP-Prozessintegrationen (Heißwasser, Heißluft, Dampf)
- Zukünftige Entwicklungen in Richtung HTWP-Zyklusoptimierung, um spezifische Temperaturanforderungen zu erfüllen (Trocknung: große Temperaturspreizungen, Dampferzeugung und Groß-HTWP)
- HTWP-Integrationskonzepte variieren von Fall zu Fall → maßgeschneidert
- Signifikante Energieeinsparungen und $CO_2$-Emissionsreduktion sind möglich
- Hohe Forschungsaktivität weltweit
- Trend zu natürlichen Kältemitteln: R600 (Butan), R601 (Pentan), R744 ($CO_2$), R718 ($H_2O$), R717 ($NH_3$) und synthetischen HFOs mit niedrigem GWP, wie R1336mzz(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E), R1224yd(Z), R1234ze(E), etc.




HOT WATER

HOT AIR

STEAM





cordin.arpagaus@ost.ch

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

OST
Ostschweizer
Fachhochschule

sweet swiss energy research for the energy transition
DeCarbCH

www.sweet-decarb.ch

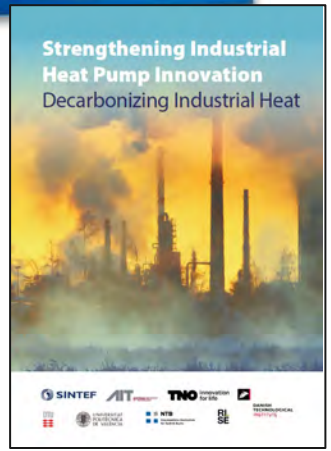
Dr. Cordin Arpagaus

Ostschweizer Fachhochschule
Departement Technik
Institut für Energiesysteme IES

cordin.arpagaus@ost.ch
Tel. +41 58 257 34 94
www.ost.ch/ies

**Project: Annex 58 HTHP-CH**
Integration of High-Temperature Heat Pumps (HTHPs) in Swiss Industrial Processes
(SI/502336-01)

# Literatur Referenzen





Mateu-Royo, C.; Arpagaus, C.; Mota-Babiloni, A.; Navarro-Esbrí, J.; Bertsch, S.: Advanced High Temperature Heat Pump Configurations using low GWP Refrigerants for Industrial Waste Heat Recovery: A Comprehensive Study, Energy Conversion and Management, Vol. 229, 1 February 2021, 113752, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752

Kosmadakis, G.; Arpagaus, C.; Neofytou, P.; Bertsch, S.: Techno-Economic Analysis of High-Temperature Heat Pumps with low-GWP Refrigerants for upgrading Waste Heat up to 150 °C, Energy Conversion and Management, Vol. 226, 113488, pp. 1-19, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113488

Schiffmann, J.; Kontomaris, K.; Arpagaus, C.; Bless, F.; Bertsch, S.: Scale Limitations of Gas Bearing Supported Turbocompressors for Vapor Compression Cycles, International Journal of Refrigeration, Vol. 109, pp. 92-104, 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.019

Schlosser, F.; Jesper, M.; Vogelsang, J.; Walmsley, T.G.; Arpagaus, C.; Hesselbach, J.: Large-Scale Heat Pumps: Applications, Performance, Economic Feasibility and Industrial integration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 133, 1102019, pp. 1-20, 2020, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219

Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Industrial Heat Pumps in Switzerland – Application Potentials and Case Studies, Final Report, on behalf of the Swiss Federal Office of Energy, SFOE contract number: SI/501782-01, Bern, 23 July 2020.

De Boer, R.; Marina, A.; Zühlsdorf, B.; Arpagaus, C.; Bantle, M.; Wilk, V.; Elmegaard, B.; Corberán, J.; Benson, J.: Strengthening Industrial Heat Pump Innovation, Decarbonizing Industrial Heat, White Paper, 14 July 2020.

Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Experimental Comparison of R1224yd(Z) and R1233zd(E) in a High Temperature Heat Pump, 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea, 26-29 April 2021.

Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Successful Application Examples of Industrial Heat Pumps in Switzerland, IIR International Rankine 2020 Conference, 27-31 July 2020, Glasgow, UK, https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1183

Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Experimental Comparison of HCFO R1233zd(E) and R1224yd(Z) in a High Temperature Heat Pump up to 150 °C, IIR International Rankine 2020 Conference, 27 to 31 July 2020, Glasgow, UK, https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1129

Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Experimental Comparison of HCFO and HFO R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(Z), and HFC R245fa in a High Temperature Heat Pump up to 150 °C Supply Temperature, 18th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 23-27 May 2021.

Arpagaus, C.; Bless, F.; Bertsch, S.: Theoretical Analysis of Transcritical HTHP Cycles with low GWP HFO Refrigerants and Hydrocarbons for Process Heat Applications up to 200 °C, IIR International Rankine 2020 Conference, 27-31 July 2020, Glasgow, UK, https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1168

Bless, F.; Arpagaus, C.; Bertsch, S.: Theoretical Investigation of High-Temperature Heat Pump Cycles for Steam Generation, 13th IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea, 26 -29 April 2021.

Diewald, K; Arpagaus, C.; Hebenstreit, B.: Thermodynamic Analysis of low GWP HFO and HCFO Refrigerants in HTHP with Large Temperature Glides on the Heat Sink, IIR International Rankine 2020 Conference, 27-31 July 2020, Glasgow, UK, https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1166





cordin.arpagaus@ost.ch


OST

# Buch «Hochtemperatur-Wärmepumpen»

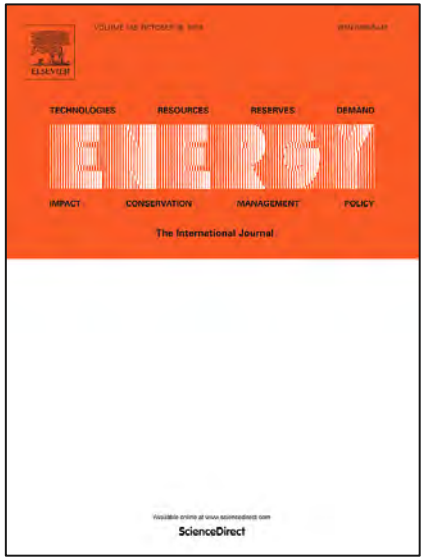
Link: https://www.vde-verlag.de/buecher/494550/hochtemperatur-waermepumpen.html


cordin.arpagaus@ost.ch

## Übersichtsarbeiten

Arpagaus C., Bless F., Schiffmann J., Bertsch S.S.: **Multi-temperature heat pumps: A literature review**, International Journal of Refrigeration, 2016, 69, 437–465.

Arpagaus C., Bless F., Uhlmann M., Schiffmann J., Bertsch S.S.: **Review - High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials**, Energy, 2018, 152, 985-1010






cordin.arpagaus@ost.ch

OST