Hochtemperatur-Wärmepumpen: Potenziale und Einsatzmöglichkeiten für die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie

VEA-Veranstaltung: Wie die Dekarbonisierung gelingen kann: Einsatz alternativer Energien und Technologien im Unternehmen
5. April 2022, Online Seminar

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

Institut für Energiesysteme IES
www.ost.ch/ies

Zum Einstieg das Buch über «Hochtemperatur-Wärmepumpen»

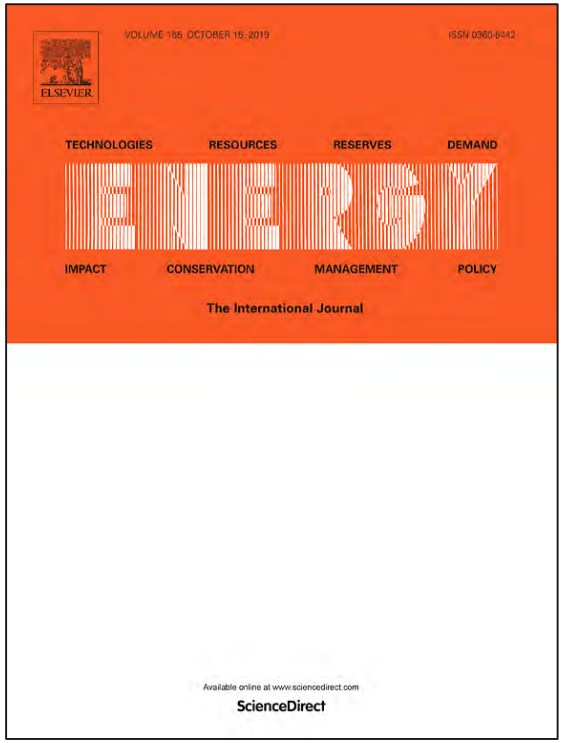
Link: https://www.vde-verlag.de/buecher/494550/hochtemperatur-waermepumpen.html

cordin.arpagaus@ost.ch

Zum Einstieg unsere 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.

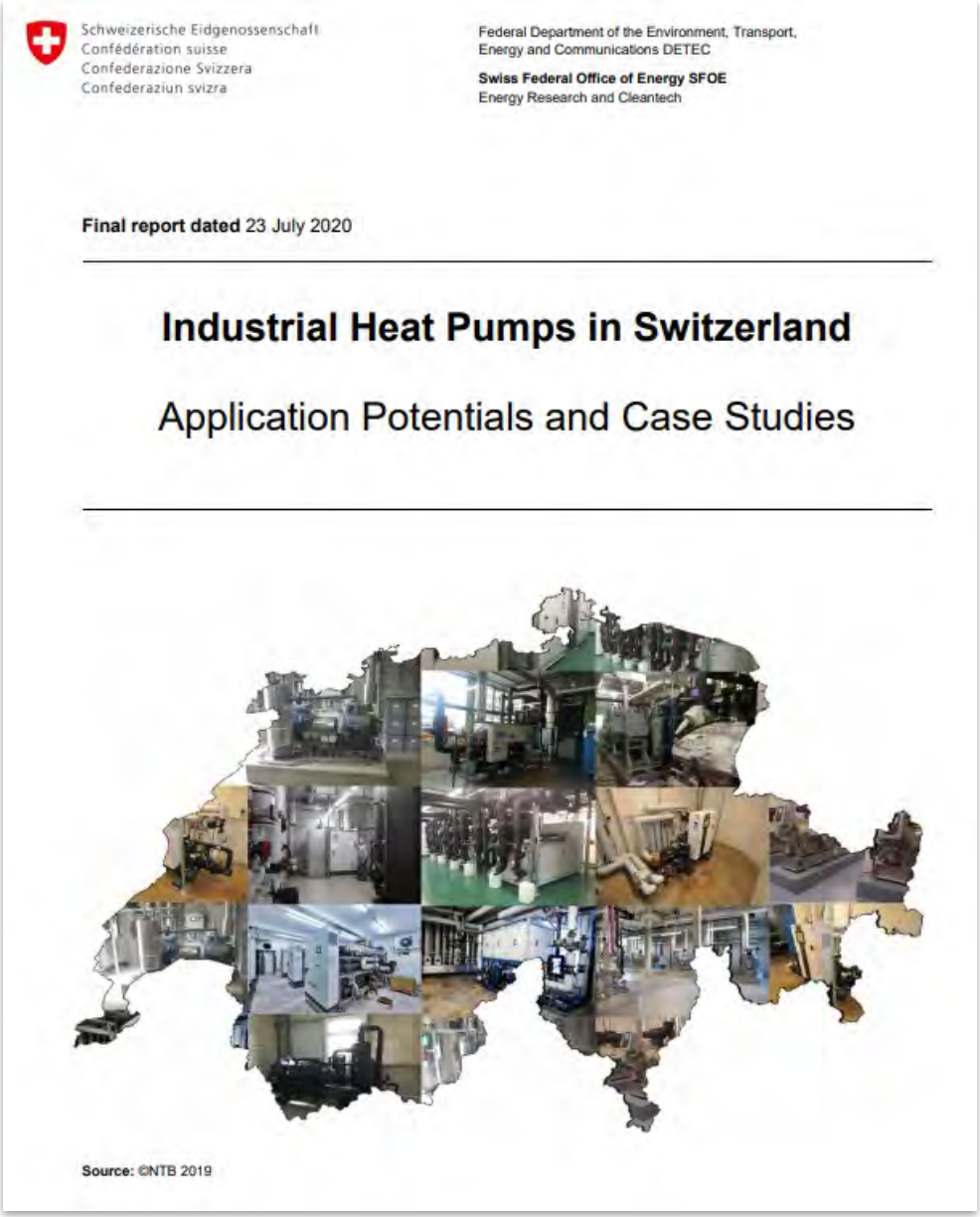
Arpagaus C., Bless F., Uhlmann M., Schiffmann J., Bertsch S.S.: **Review - High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials**, Energy, 2018, 152, 985-1010



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Zum Einstieg Schlussbericht Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications DETEC

Swiss Federal Office of Energy SFOE
Energy Research and Cleantech

Final report dated 23 July 2020

Industrial Heat Pumps in Switzerland

Application Potentials and Case Studies

Source: ©NTB 2019

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Innosuisse – Swiss Innovation Agency

SCCER
EFFICIENCY OF
INDUSTRIAL PROCESSES

www.sccer-eip.ch

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

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Übersicht zur Vorlesung

- Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen
- Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen
- Anwendungsbeispiele von Industriewärmepumpen
- Aktuelle Entwicklungen im Bereich Hochtemperatur-Wärmepumpen

cordin.arpagaus@ost.ch

Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

cordin.arpagaus@ost.ch

Definition einer Industriewärmepumpe

”

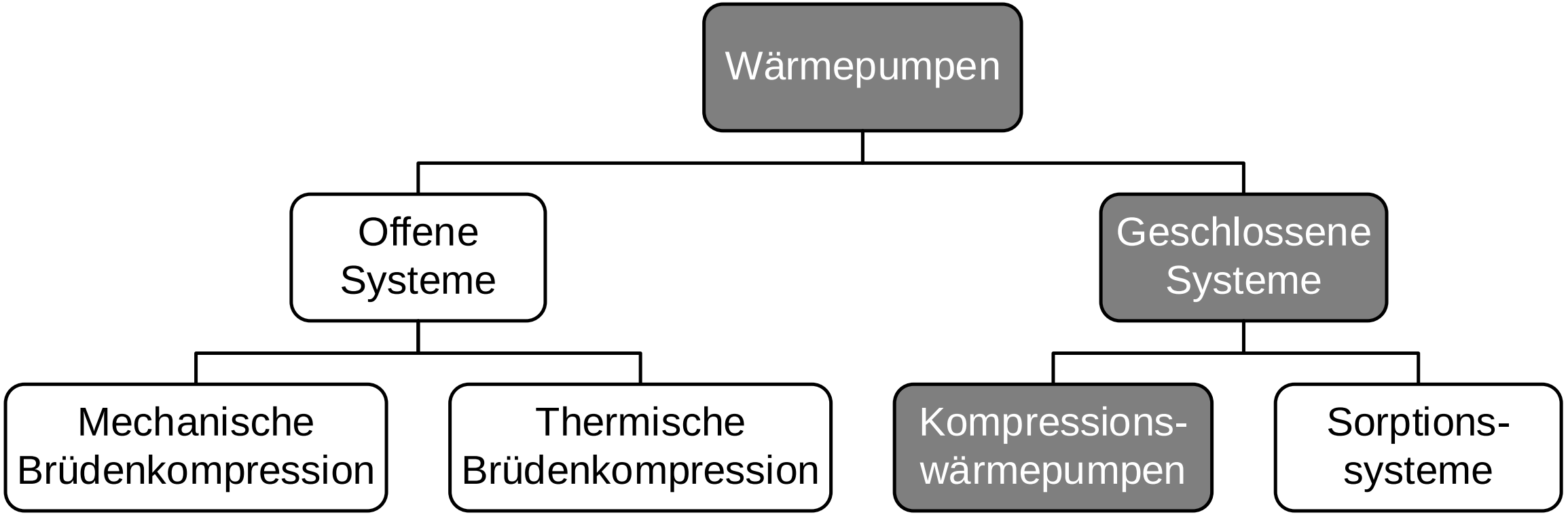
Wärmepumpen im **mittleren und hohen Leistungsbereich** und Temperaturen **bis 200 °C**, die zur **Wärmerückgewinnung** und Wärmeaufwertung in industriellen Prozessen, aber auch zum **Heizen, Kühlen und Klimatisieren** in **Gewerbe- und Industriegebäuden** eingesetzt werden können.

“

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

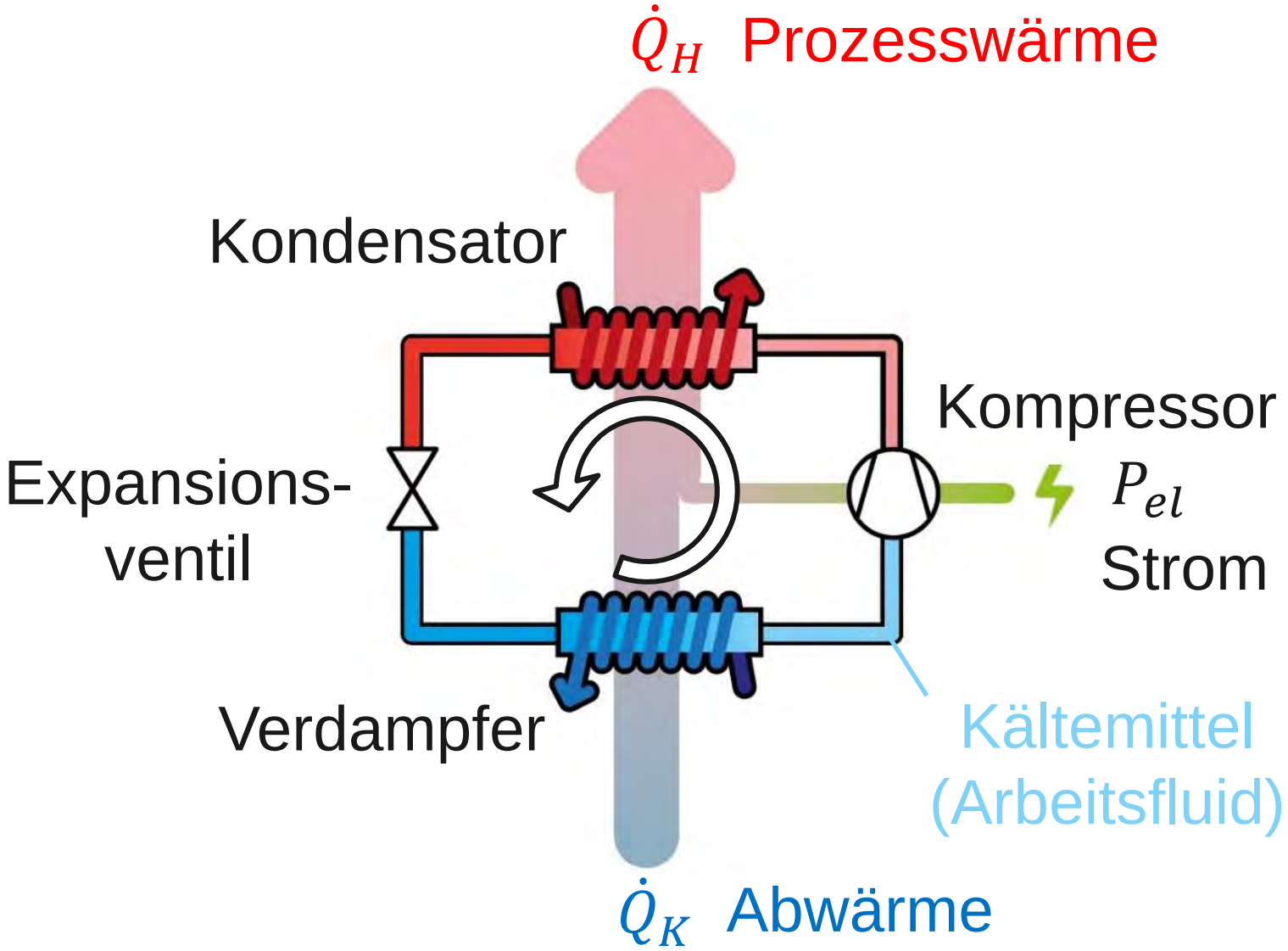
cordin.arpagaus@ost.ch

Klassifizierung von Wärmepumpentechnologien



cordin.arpagaus@ost.ch

Fokus auf Kompressionswärmepumpen

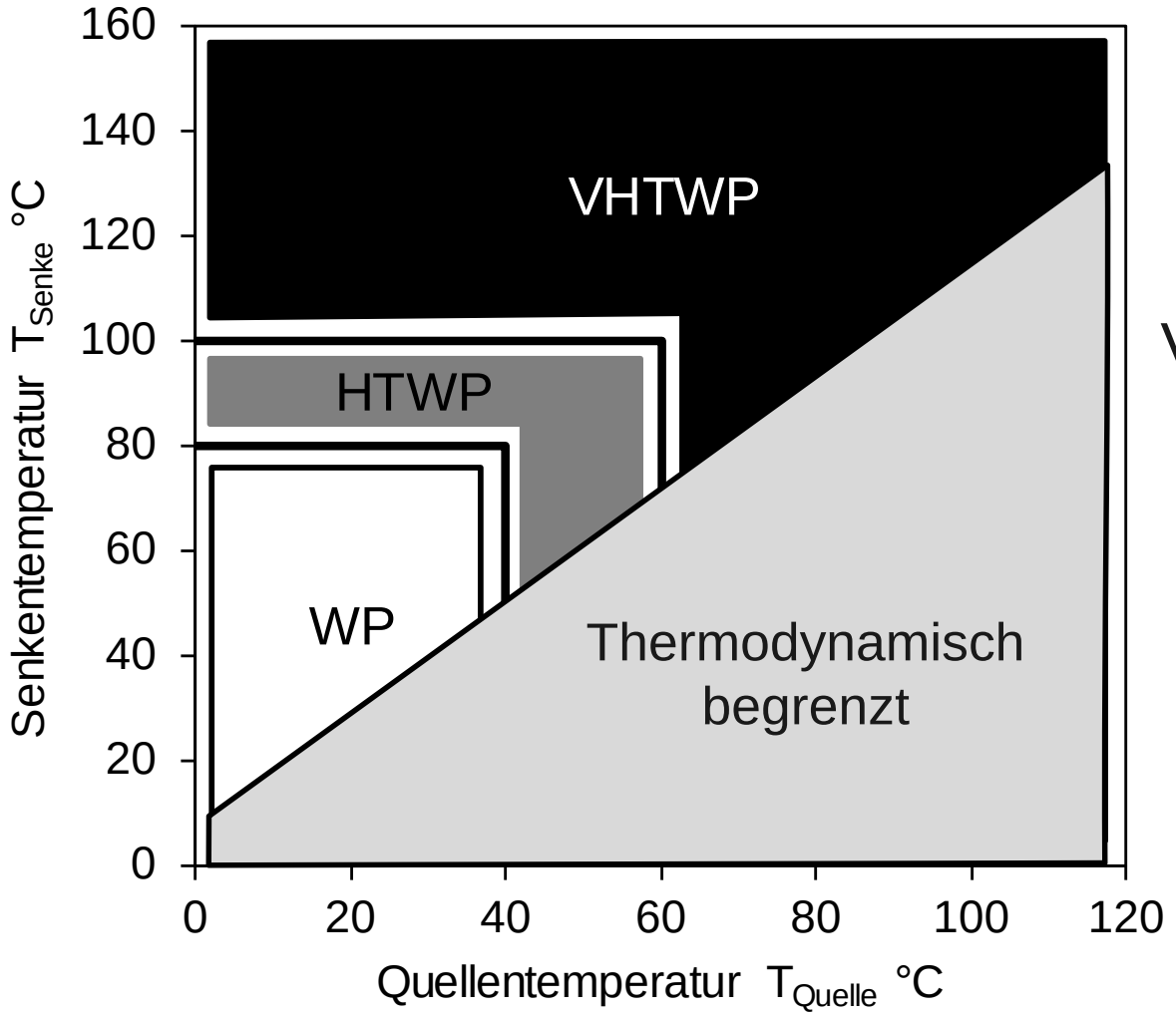


COP
(Coefficient of Performance)
(Leistungszahl)

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

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

Innerbetriebliche Abwärmenutzung

Wärmesenken:

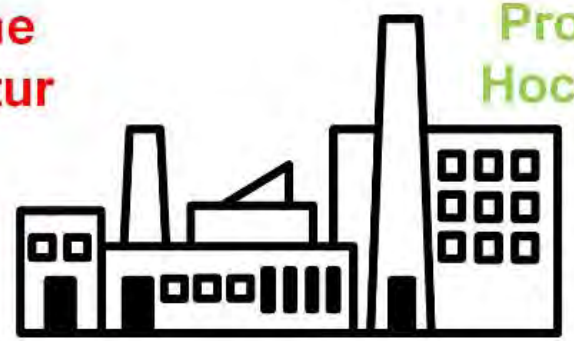
• Pasteurisieren / Sterilisieren	70 bis 120°C
• Trocknungsprozesse	40 bis 250°C
• Verdampfung	40 bis 170°C
• Destillation	100 bis 300°C
• usw.	

Effizienz:

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

Prozesswärme Hochtemperatur

Primäre Energie (Gas, Öl, Kohle, Biomasse)



Prozesswärme Hochtemperatur

Industrie Wärmepumpe

Primäre Energie (erneuerbarer Strom)

Wärmequellen:

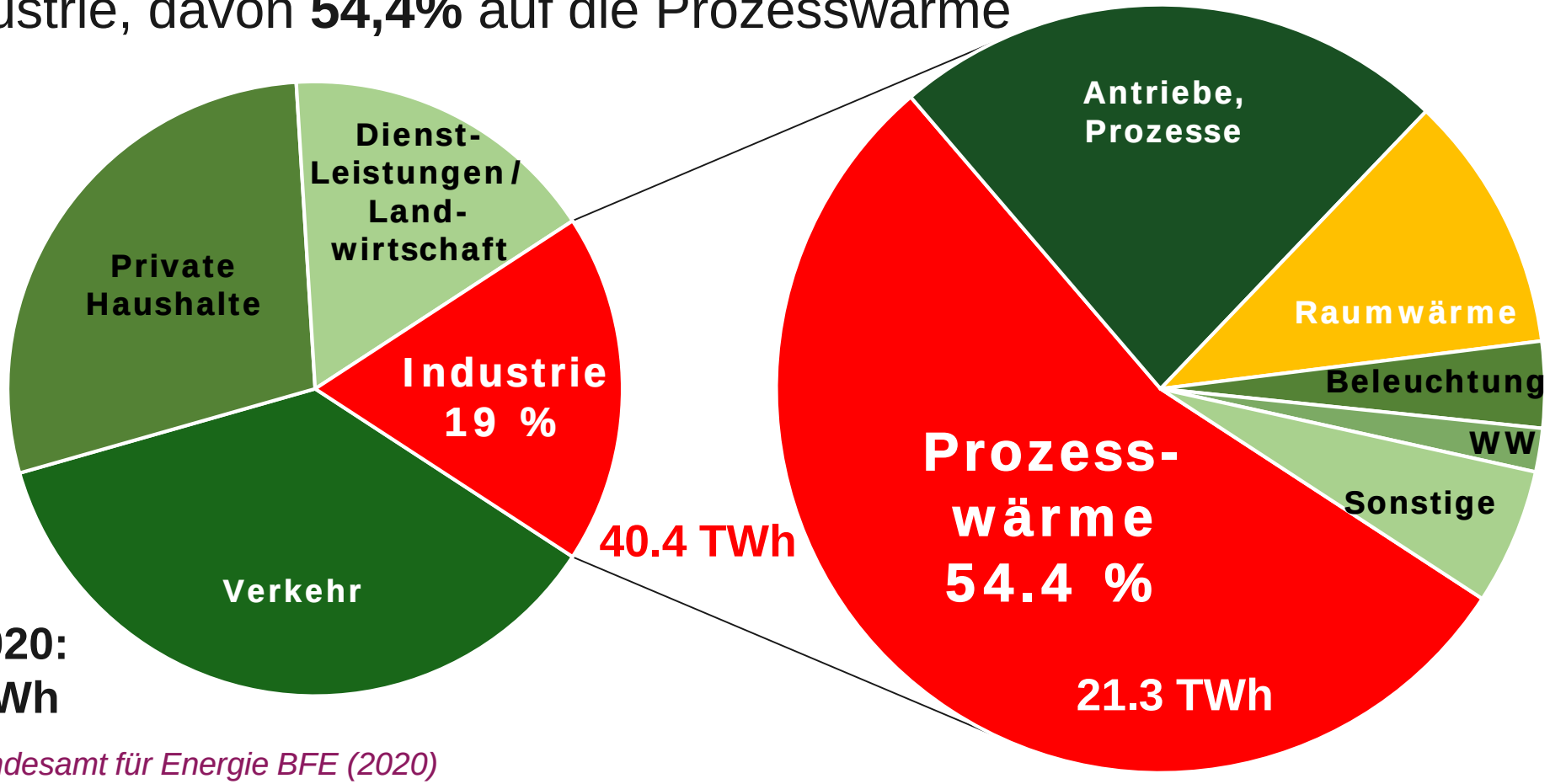
• Kühlwasser	20 bis 50°C
• Abwasser	20 bis 60°C
• Druckluft Abwärme	30 bis 70°C
• Abluft aus Öfen	20 bis 100°C
• usw.	

Abwärme Niedertemperatur

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

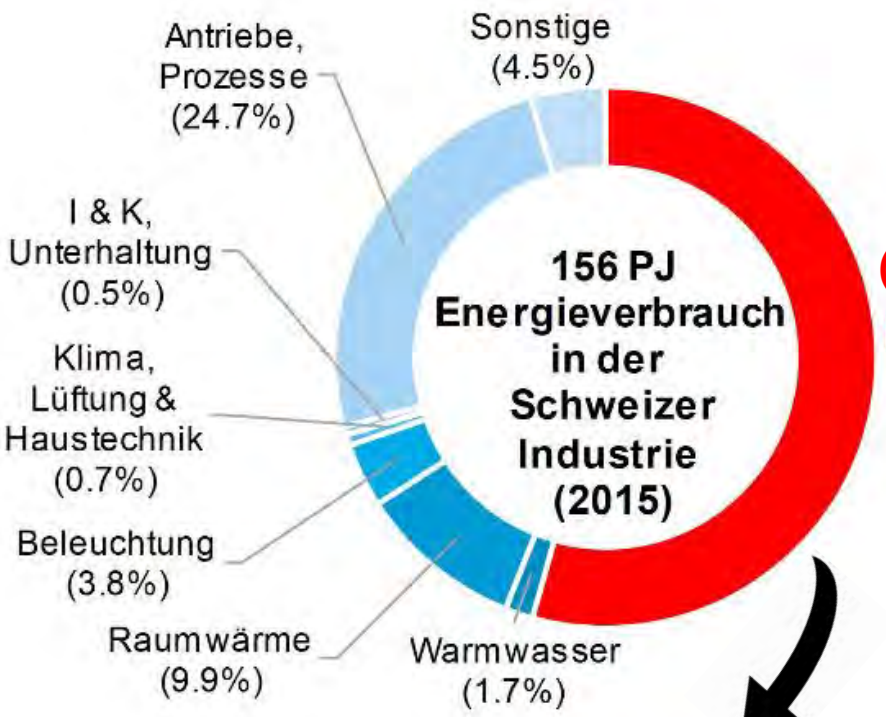


Total 2020: 207.6 TWh

Quelle: Bundesamt für Energie BFE (2020)

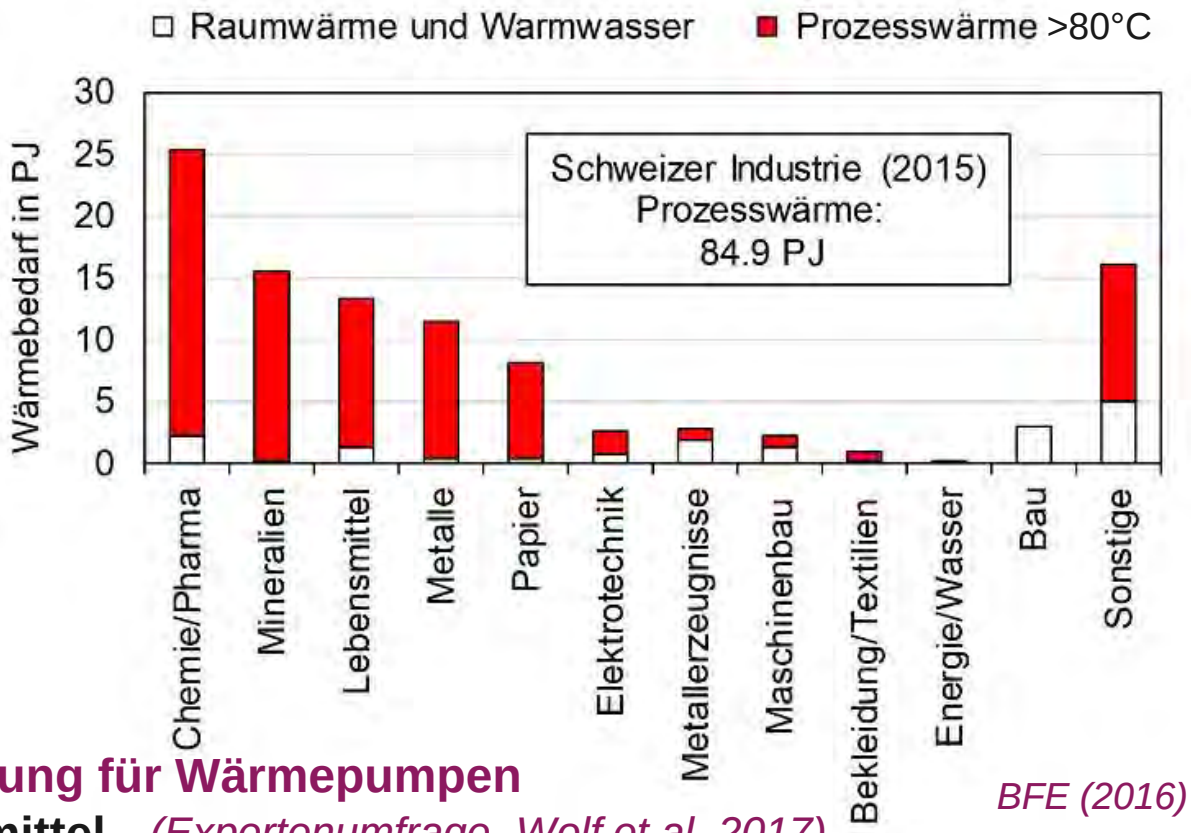
cordin.arpagaus@ost.ch

Industrieller Energieverbrauch in der Schweiz – Wärmebedarf nach Industriezweigen und Temperaturbereichen



84.9 PJ (24.4 TWh) 6.6 fache Energiemenge aller 30 KVAs (3.7 TWh) der CH

Prozesswärme (54.4%)



BFE (2016)

Zum Vergleich Deutschland 2015:
40% der Energie für die Wärmeerzeugung war Prozesswärme
BMWi (2016)

Steigende Bedeutung für Wärmepumpen

Prio 1: Nahrungsmittel *(Expertenumfrage, Wolf et al. 2017)*
Prio 2: Chemie/Pharma, Papier, Maschinenbau & Textil
Prio 3: Metallerzeugnisse, Metalle, Mineralien

cordin.arpagaus@ost.ch

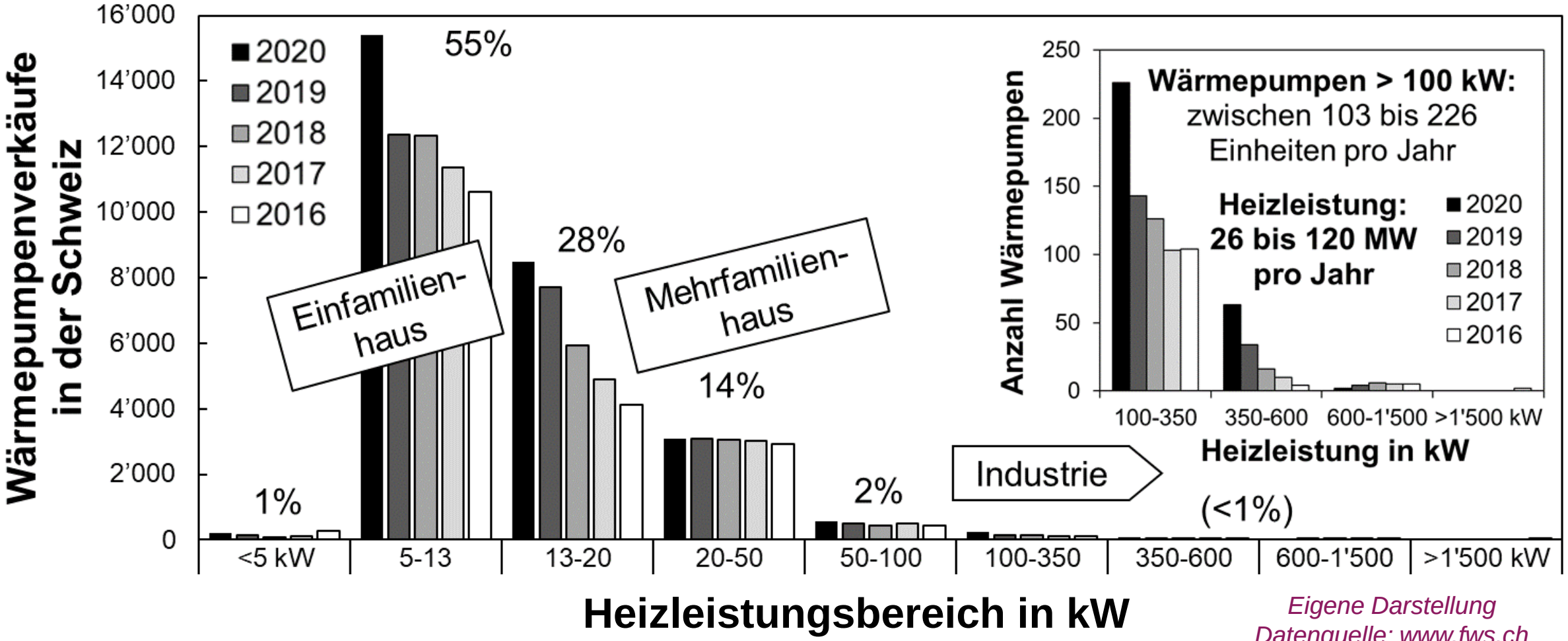
Energetische Bedeutung von Wärmepumpen in der Industrie

	Energieverbrauch	Datenquelle
Industrie	43‘333 GWh	BFE (2015: 156 PJ, 1 PJ = 278 GWh)
Prozesswärme	23‘573 GWh	54.4% (BFE)
Prozesswärme und Dampf unter 150°C	7’072 GWh	30% (Schätzung auf EU Daten)
Einsparungspotential	2’829 GWh	40% (Basierend auf Berechnungen SCCER EIP)

ca. 6.5% des industriellen Energiebedarfs kann reduziert werden

cordin.arpagaus@ost.ch

Verkaufsstatistik von Wärmepumpen in der Schweiz

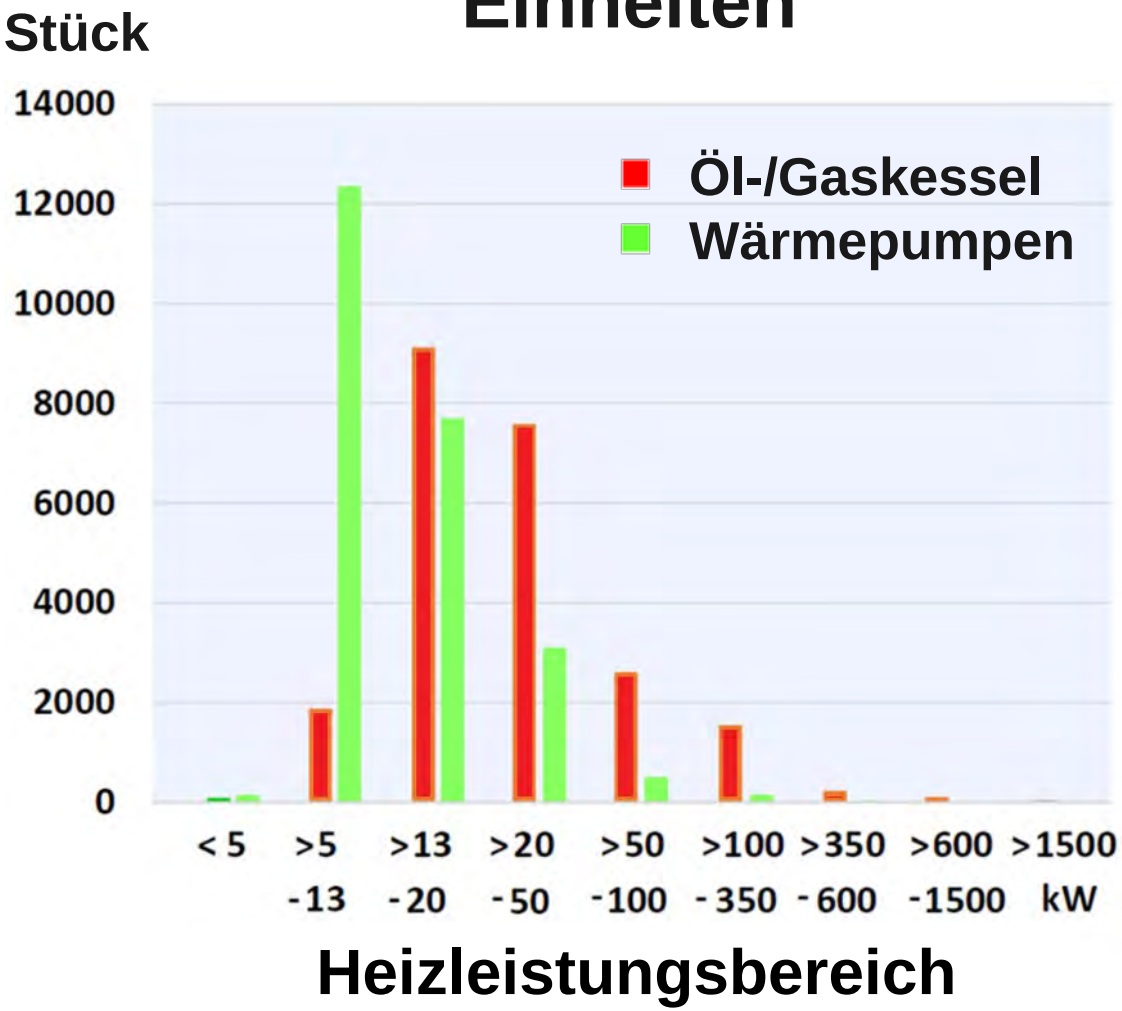


Eigene Darstellung
Datenquelle: www.fws.ch

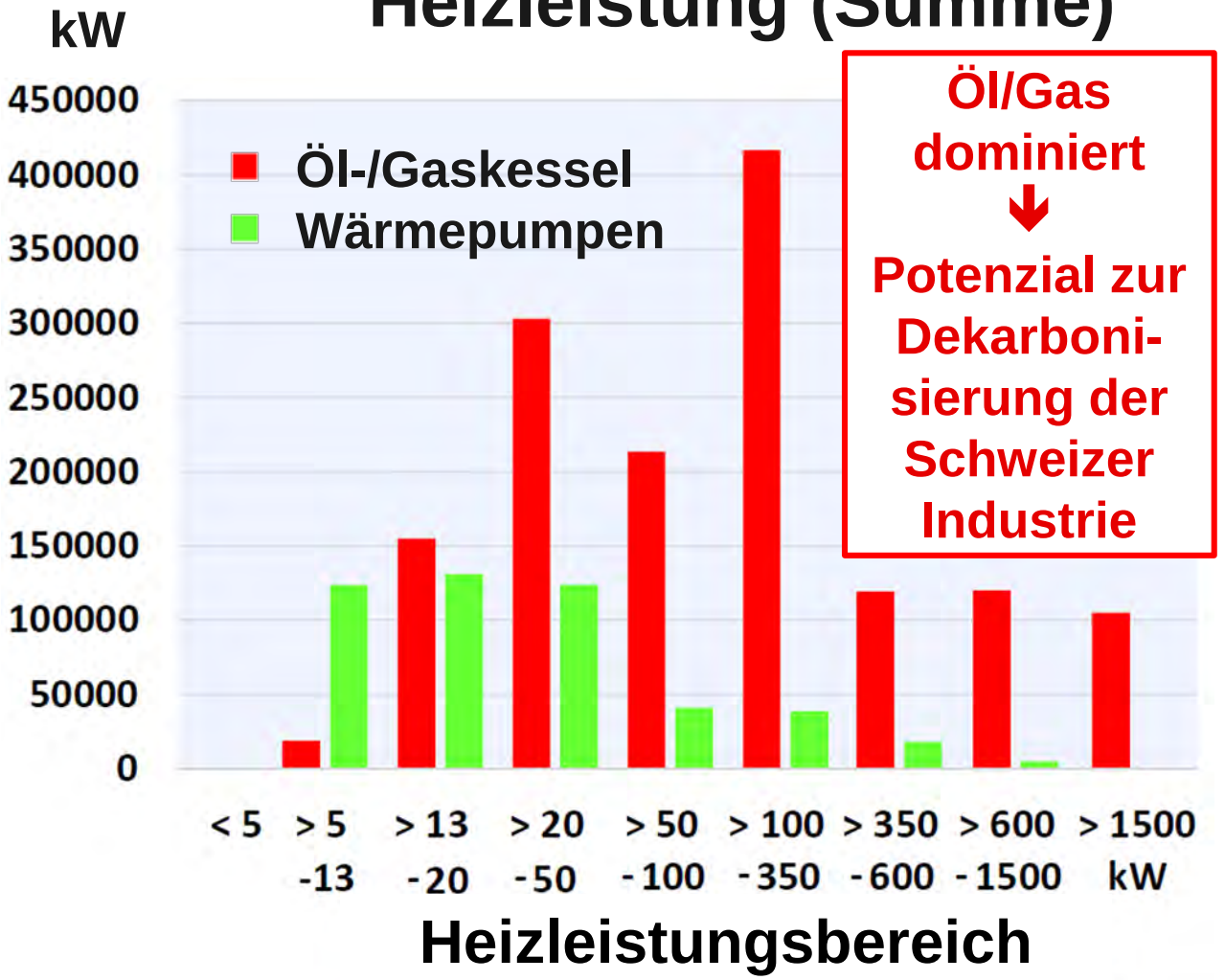
cordin.arpagaus@ost.ch

Vergleich von Wärmepumpen und Öl-/Gasheizkesseln (2019)

Einheiten



Heizleistung (Summe)

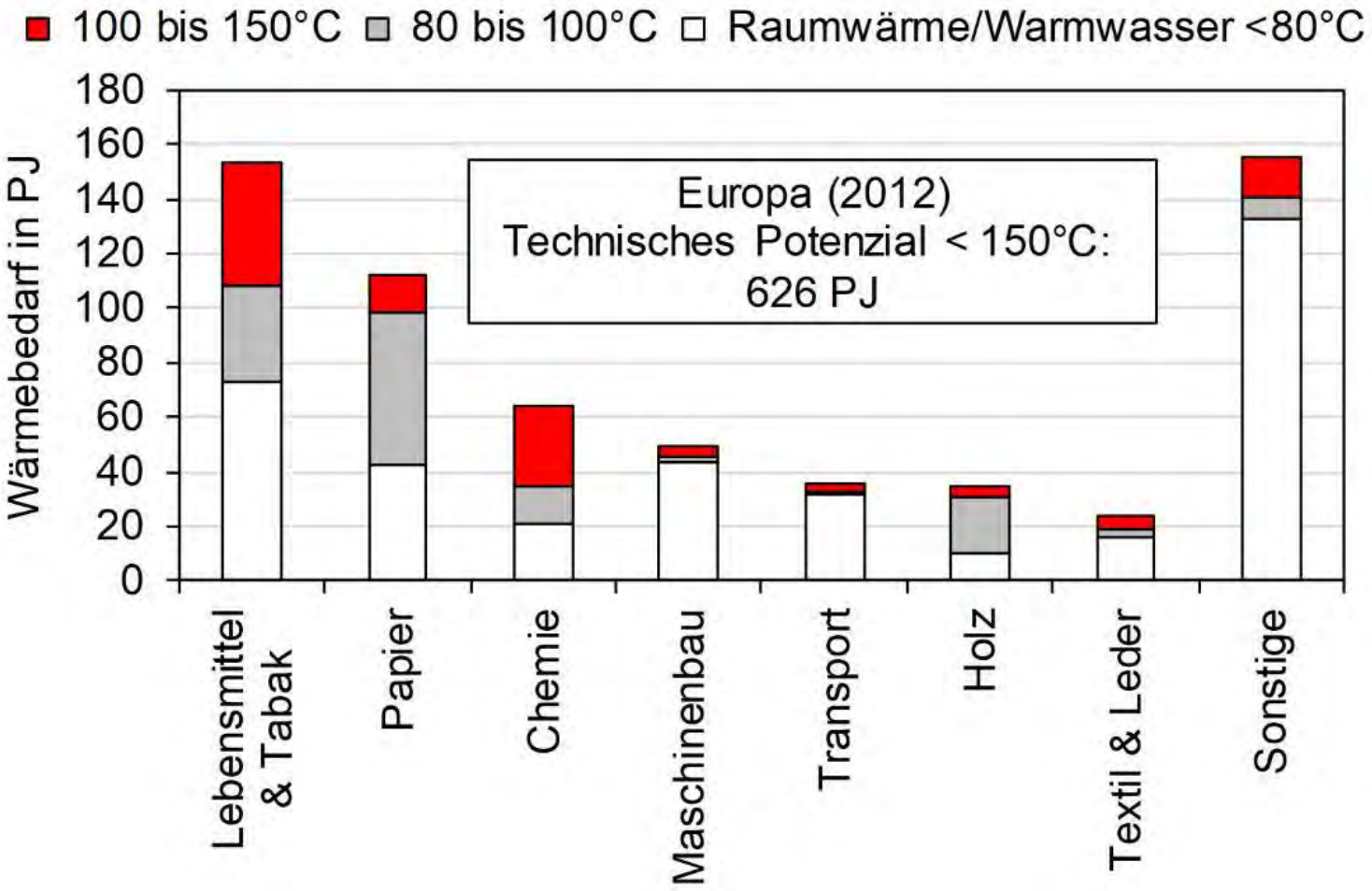


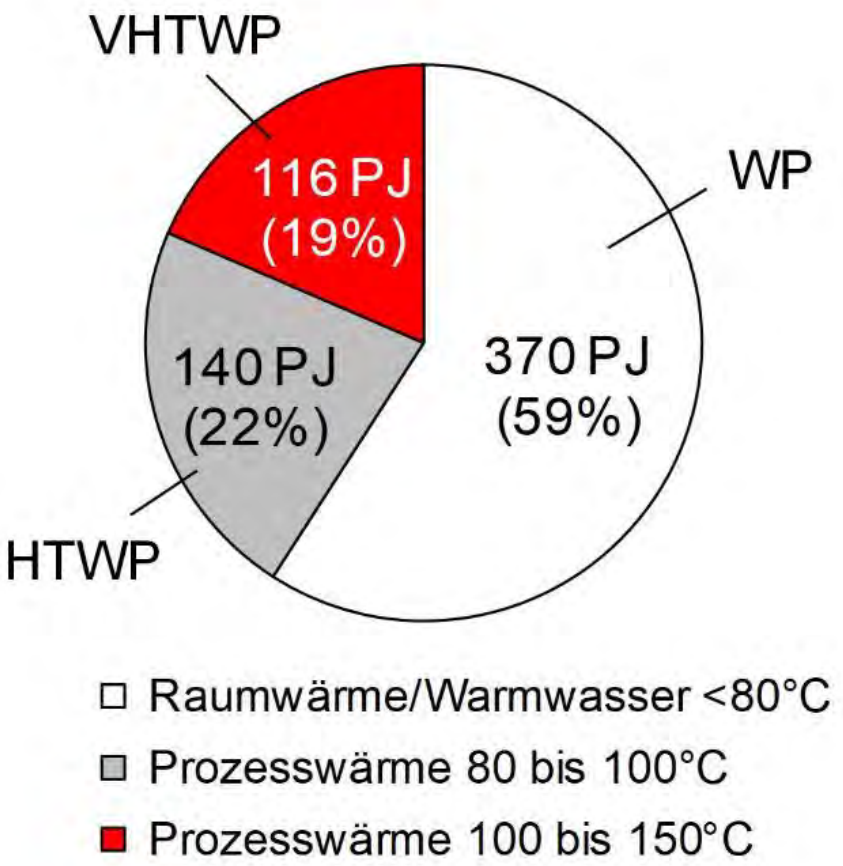
Öl/Gas dominiert
↓
Potenzial zur Dekarbonisierung der Schweizer Industrie

Eigene Darstellung
Datenquelle: www.fws.ch

cordin.arpagaus@ost.ch

Potential für Hochtemperatur-Wärmepumpen in Europa





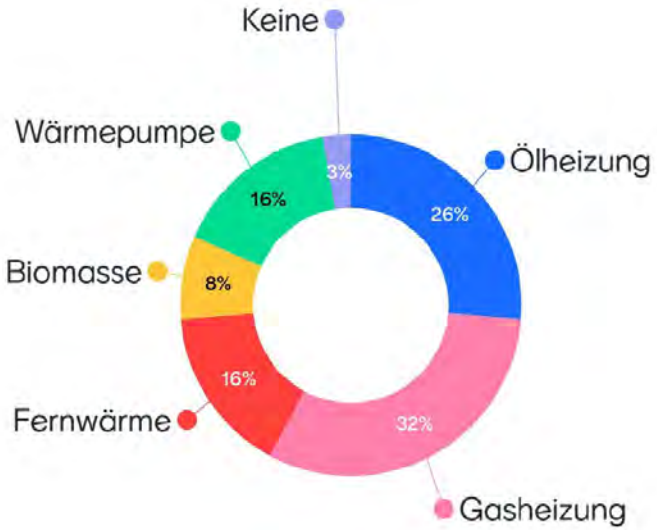
Basierend auf Eurostat-Daten von 33 EU-Mitgliedsländern aus dem Jahre 2012, Nellissen und Wolf (2015)

cordin.arpagaus@ost.ch

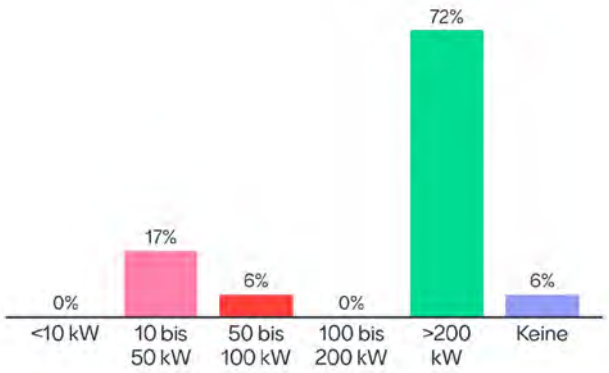
Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

Umfrage bei Techniker Fachgruppe

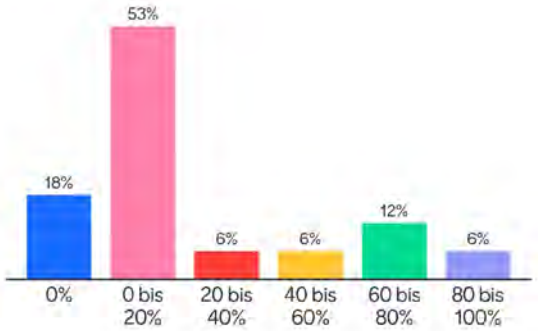
Heizsystem



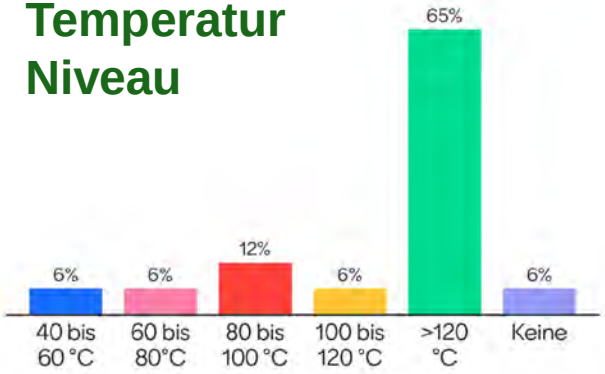
Benötigte Heizleistung



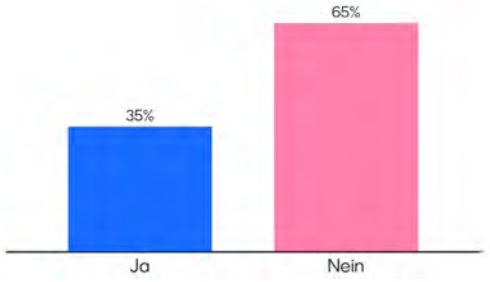
Erneuerbarer Anteil



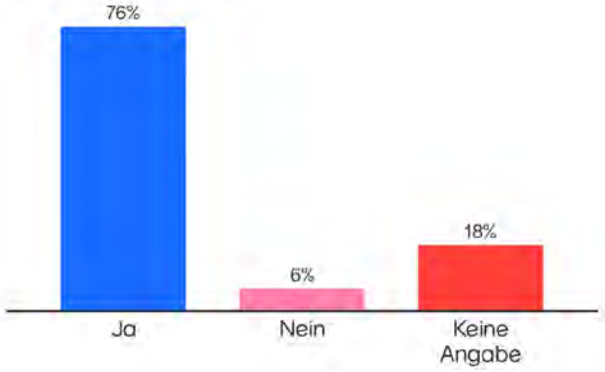
Höchstes erforderliches Temperatur Niveau



Wärmepumpe im Betrieb?



Potential für Wärme-pumpe im Betrieb?



18

Quelle:
Energie Zukunft Schweiz AG,
13. April 2021

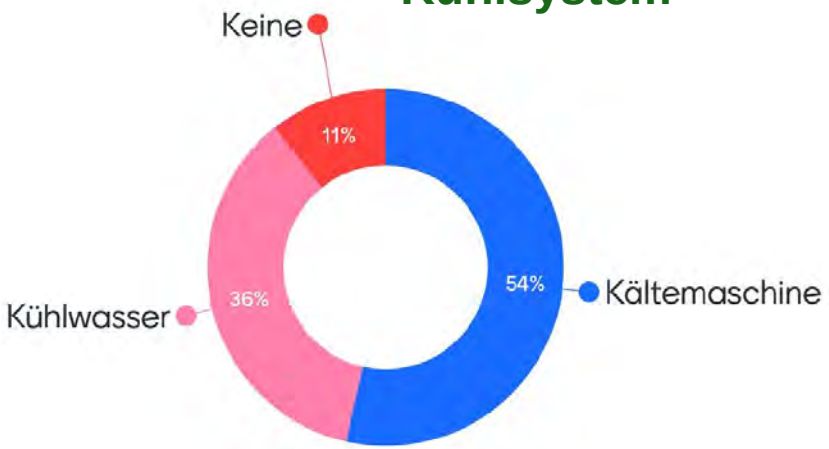
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

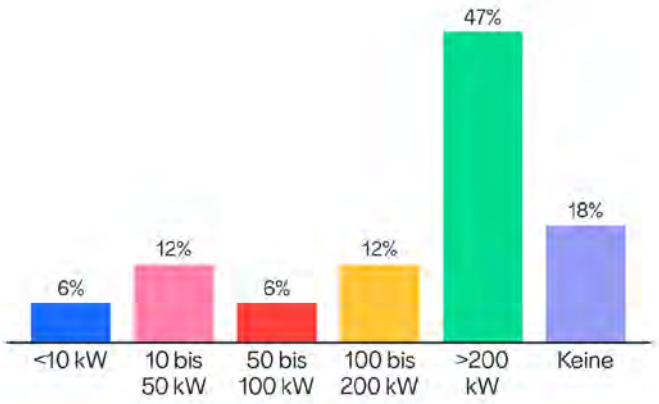
Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

Umfrage bei Techniker Fachgruppe

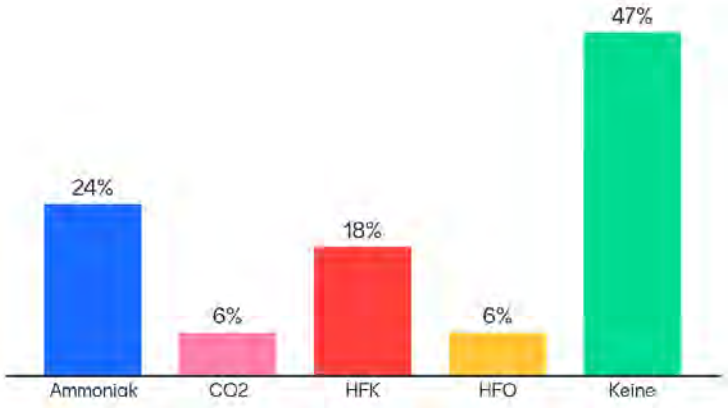
Kühlsystem



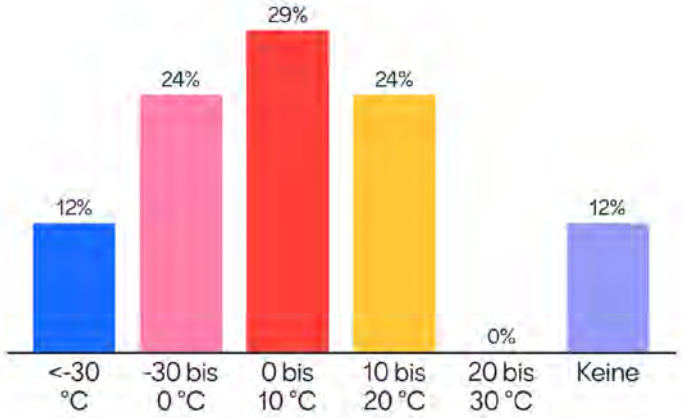
Benötigte Kühlleistung



Kältemittel welches in der Wärmepumpe verwendet wird



Tiefstes erforderliches Temperatur Niveau



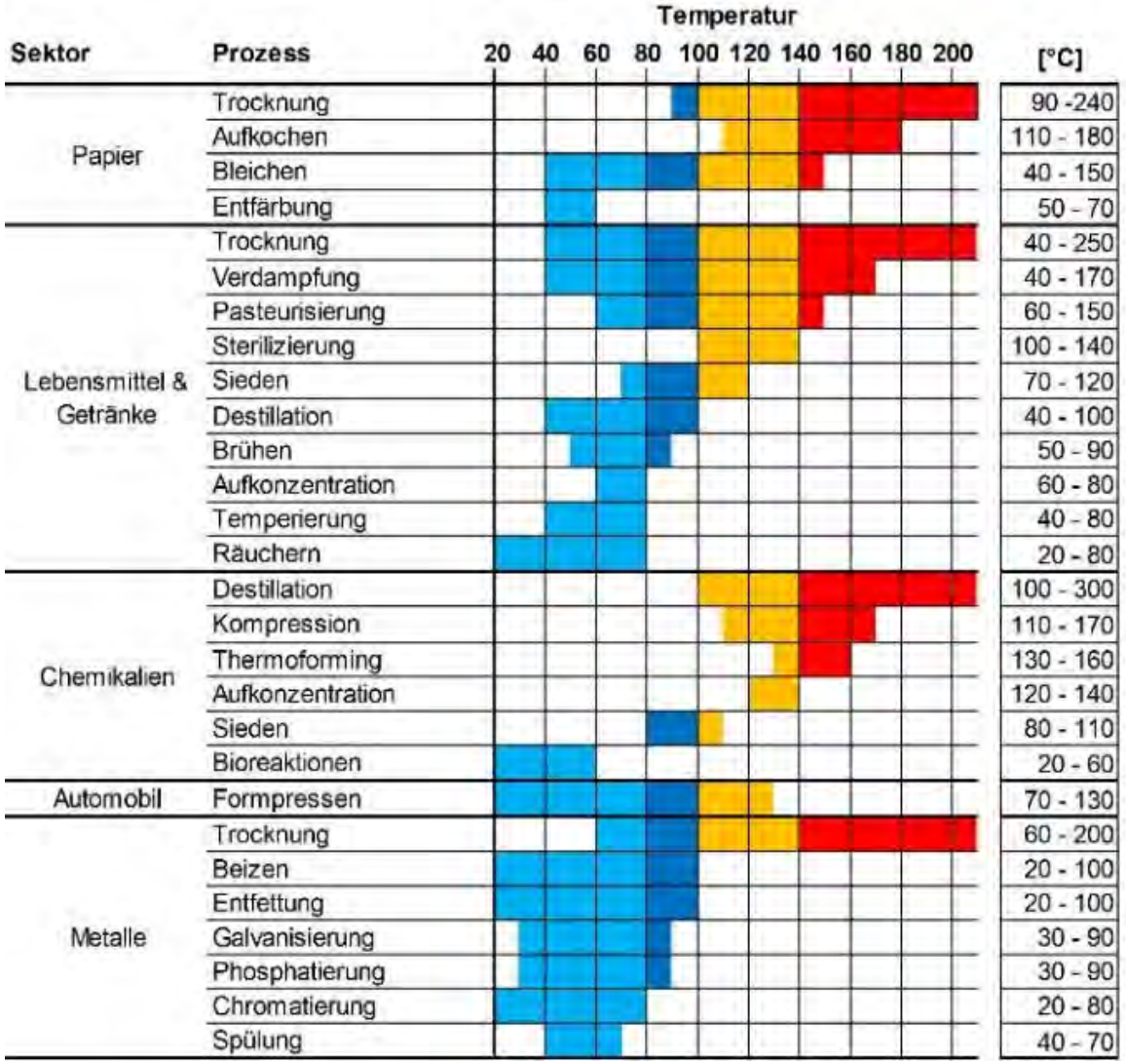
Quelle:
Energie Zukunft Schweiz AG,
13. April 2021

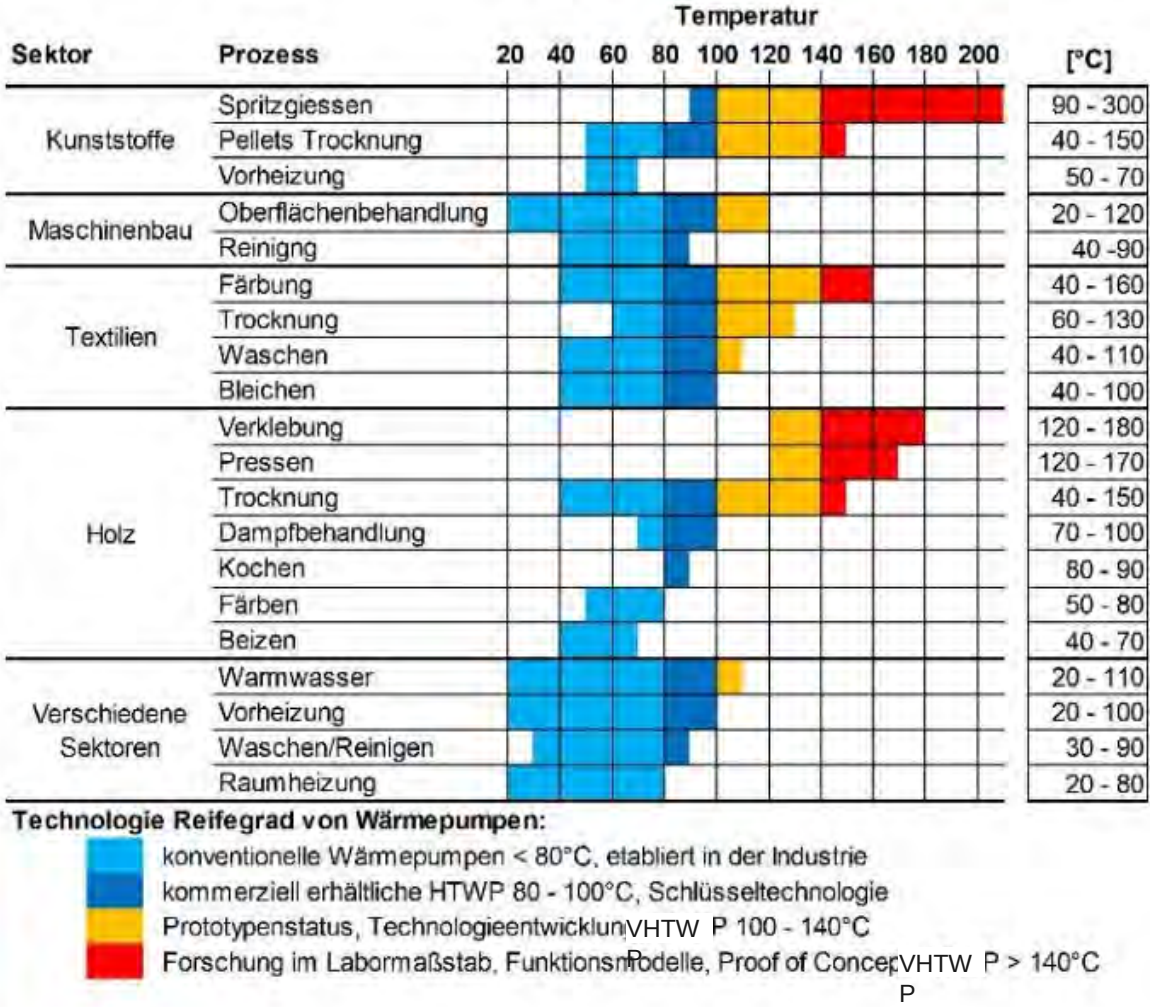
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Potentiale für Prozesswärme durch Wärmepumpen

Temperaturniveaus und Technologie Reifegrad von Wärmepumpen





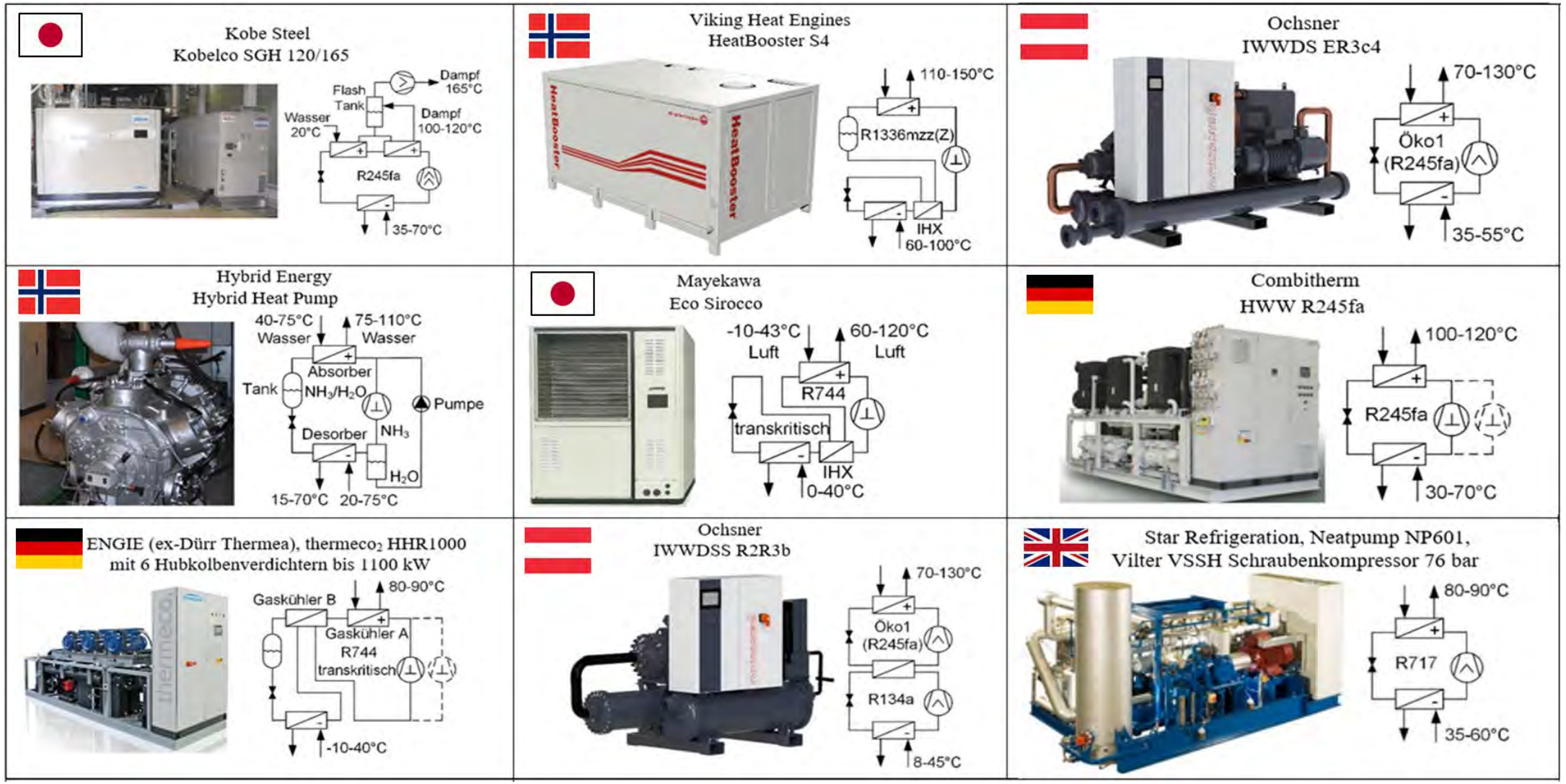
cordin.arpagaus@ost.ch

Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

cordin.arpagaus@ost.ch

Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

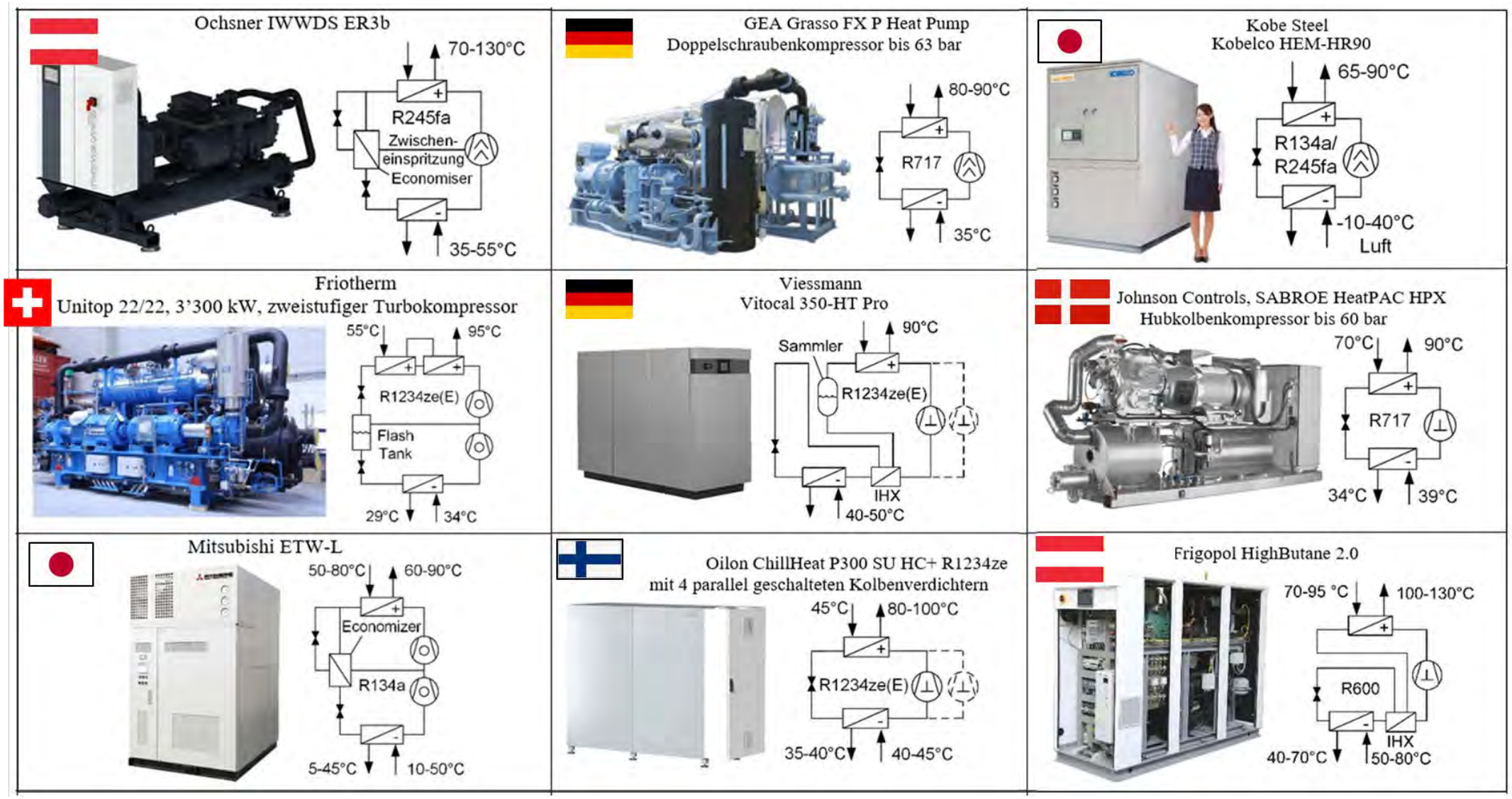
Auswahl an industriellen HTWP mit Keisläufen



cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Auswahl an industriellen HTWP mit Keisläufen

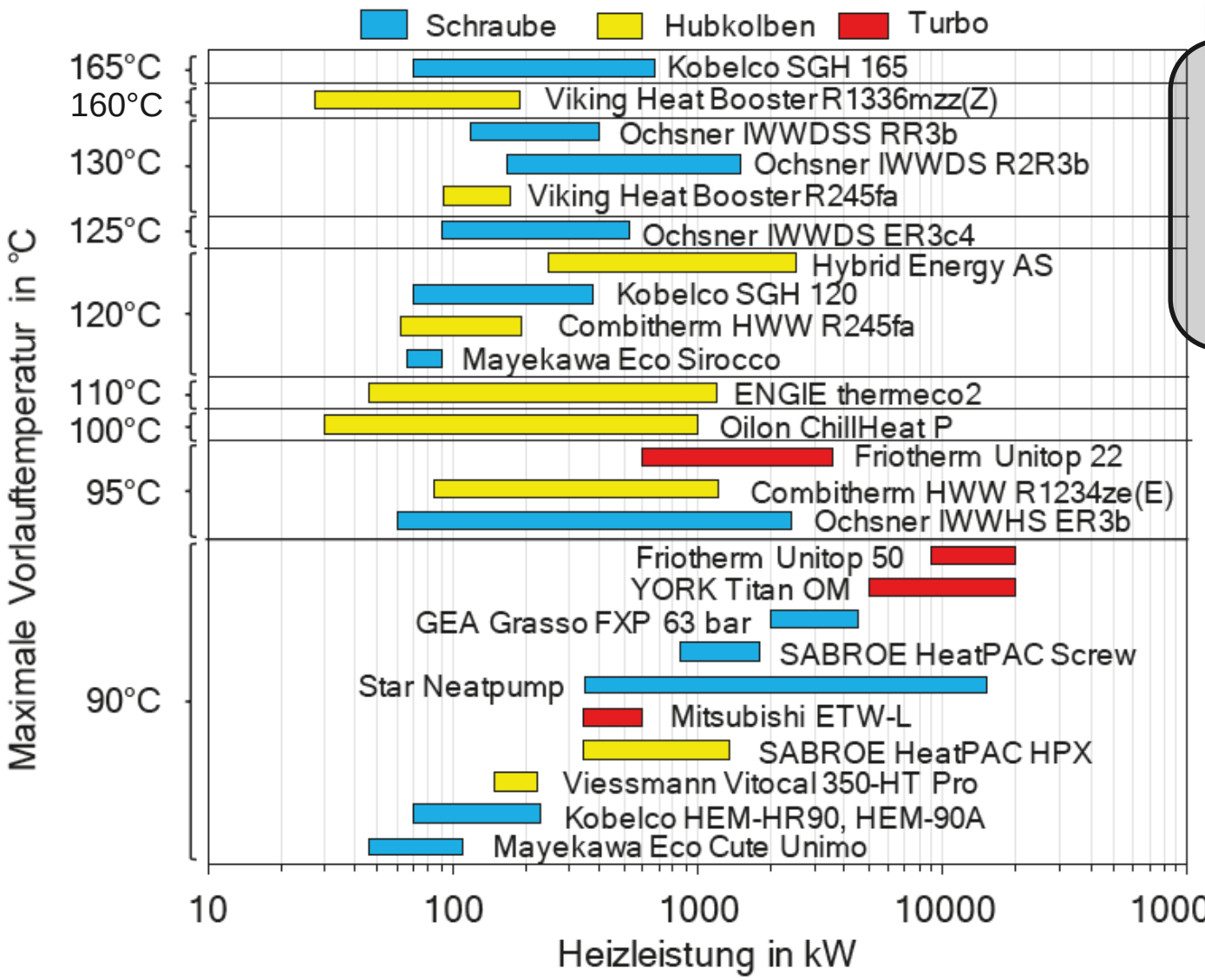


cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Marktübersicht über Hochtemperatur Wärmepumpen

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)

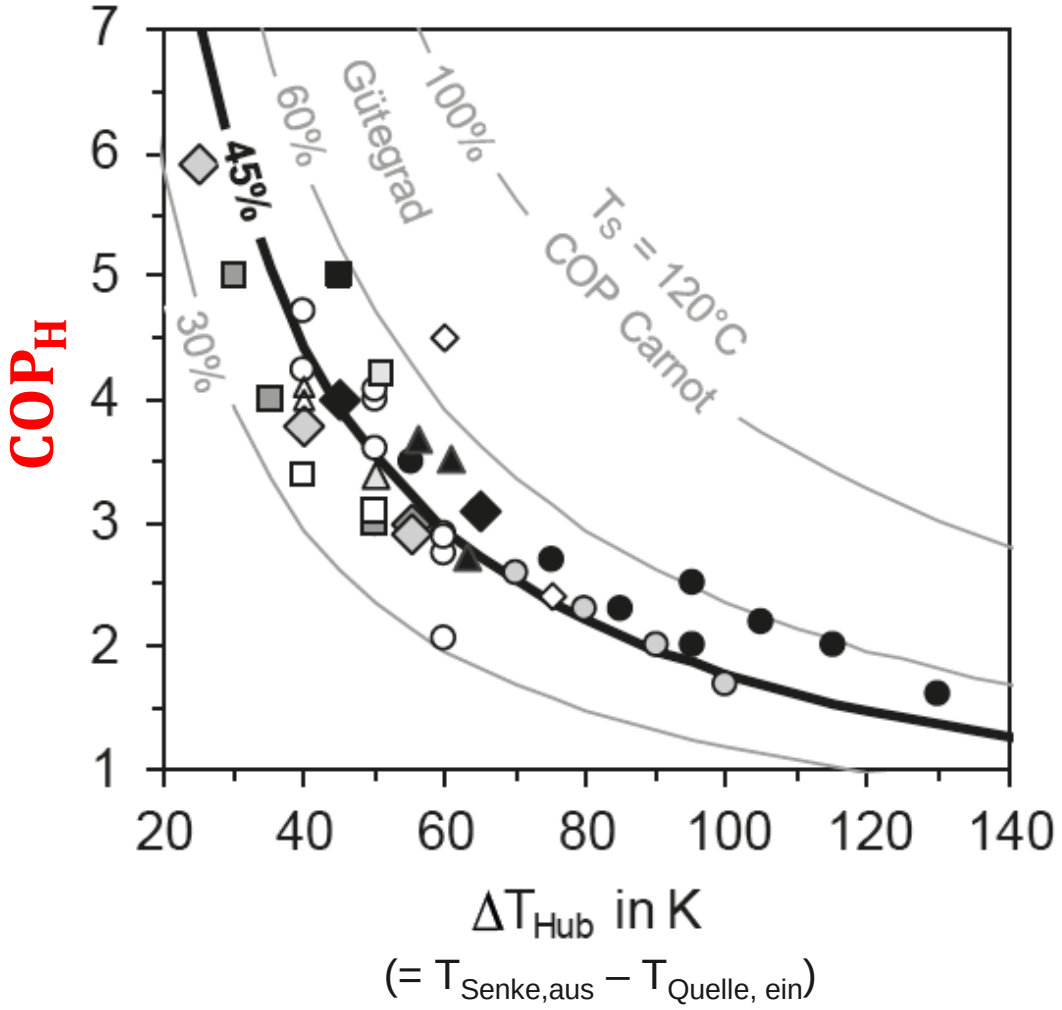
Kobelco SGH 120/165
(Steam Grow Heat Pump)

HeatBooster S4
(Viking Heat
Engines AS)

OCHSNER
ENERGIE TECHNIK

cordin.arpagaus@ost.ch
OST

Effizienz (Leistungszahl COP) und Gütegrad



- ● Kobelco SGH 120/165
- ○ Kobelco HEM-HR90
- ○ Viking HeatBooster S4 R1336mzz(Z)
- ◆ Ochsner IWWDSS R2R3b
- ◆ Ochsner IWWDS ER3b
- ◇ Ochsner IWWDS ER3c4
- ◇ Hybrid Heat Pump
- ▲ Friotherm Unitop 22/22
- △ Combitherm
- ■ GEA Grasso FX P
- ■ Star Refrigeration Neatpump
- □ SABROE HeatPAC HPX
- □ Viessmann Vitocal 350-HT Pro
- △ Mitsubishi ETW-L

Faustregel:
COP von etwa 4.0 bei 50 K Temperaturhub

Fit-Kurve (45% Gütegrad):
$COP_H = 68.455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0.76}$, $R^2=0.78$

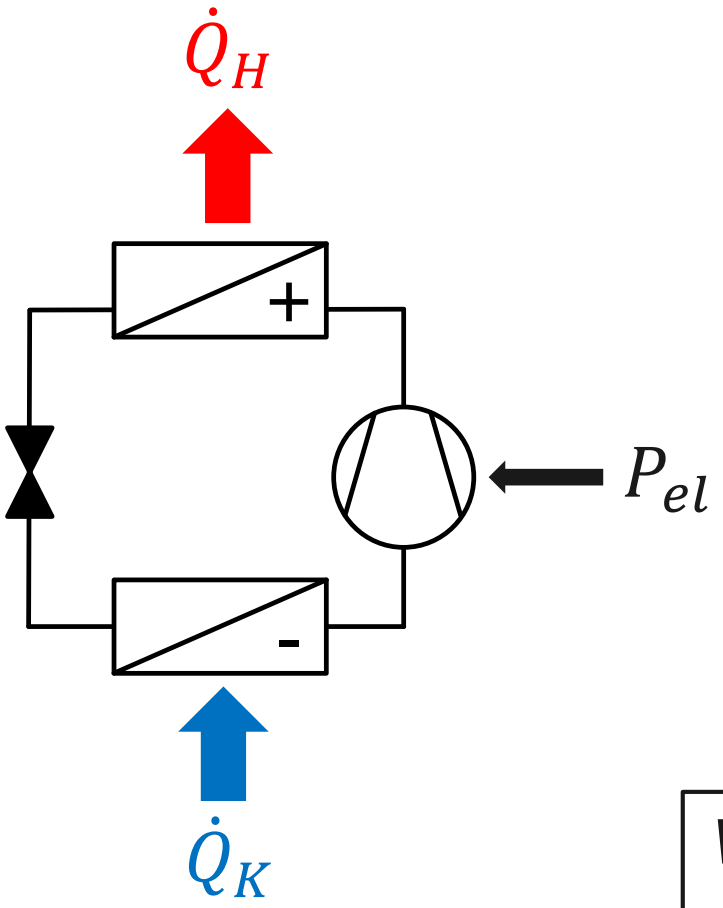
Gütegrad = COP_H/COP_{Carnot}

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

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

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

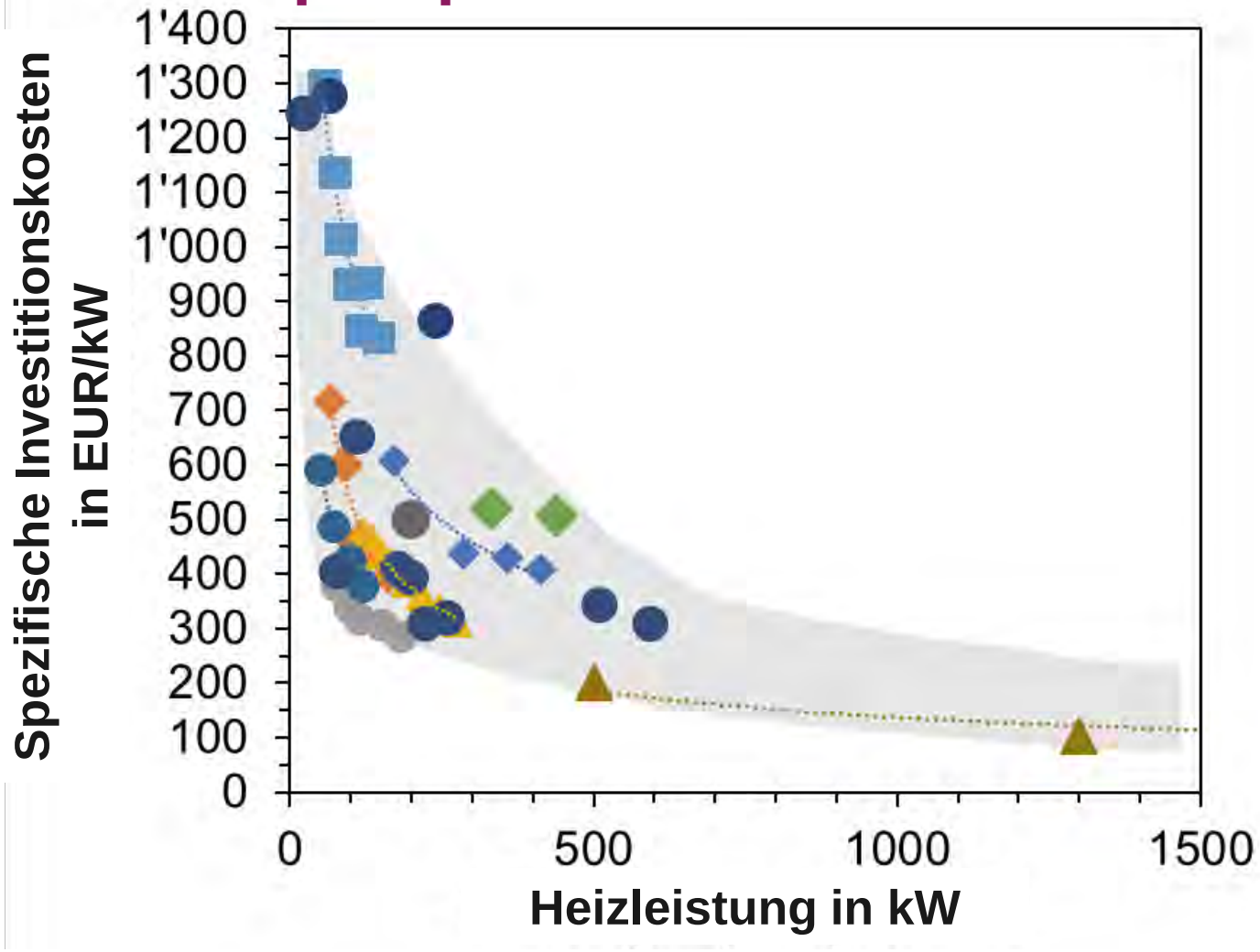
(H: Heizen und K: Kühlen)

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 (inkl. Installation) für Industriewärmepumpen in Funktion der Heizleistung

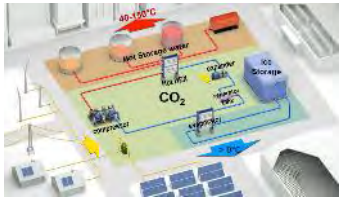
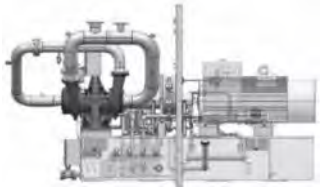
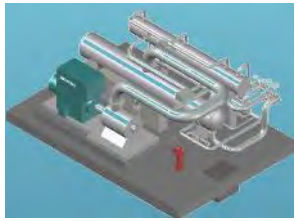


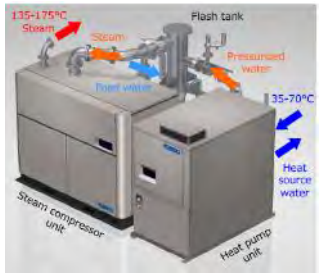
Eigene Darstellung
Abschätzung basierend auf Preisinformationen von Wärmepumpen-Herstellern in Europa

cordin.arpagaus@ost.ch

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

Firma	Turboden (IT)	MAN Energy (CH)	Mitsubishi MHPS (DE)	Siemens (DE)	Ochsner (AT)	Kobelco (JP)
Produkt	LHP30 LHP150	ETES	D-GWP	Large-scale	IWWDSS R2R3b IWWHS ER3b TWIN	SGH 120/165
Kältemittel	R601 + R718 (n-Pentan + Wasser)	R744 (CO_2)	R600a + R718 (Iso-Butan + Wasser)	HFOs	Öko (R245fa) R1233zd(E) (HFOs)	R245fa + R718
Heizleistung	**2.7 MW 14.4 MW**	**5 to 100 MW**	**4.3 MW**	**4 to 35 MW**	**bis 750 kW TWIN 2.4 MW**	**bis 624 kW Kaskade 2.5 MW**
Max. Temp.	115 °C	150 °C	174 °C	150 °C	130 °C	165 °C

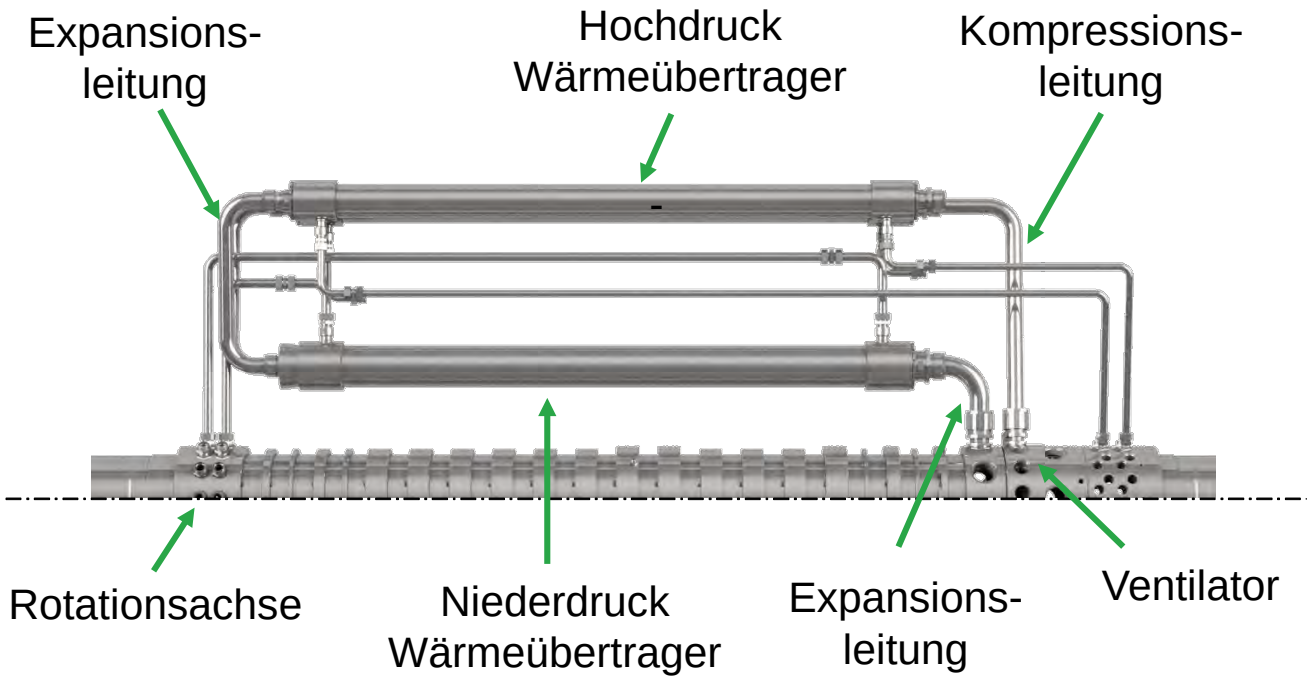






cordin.arpagaus@ost.ch

Rotationswärmepumpe von ecop Technologies GmbH (AT)

- bis 150 °C, flexible Temperaturbereiche
- (-20 °C bis +150 °C), 700 kW Heizleistung
- Hoher COP, hohe Spreizungen
- Edelgas als Kältemittel, Joule-Prozess



cordin.arpagaus@ost.ch

Strom- und Gaspreise für Industrieabnehmer im Vergleich

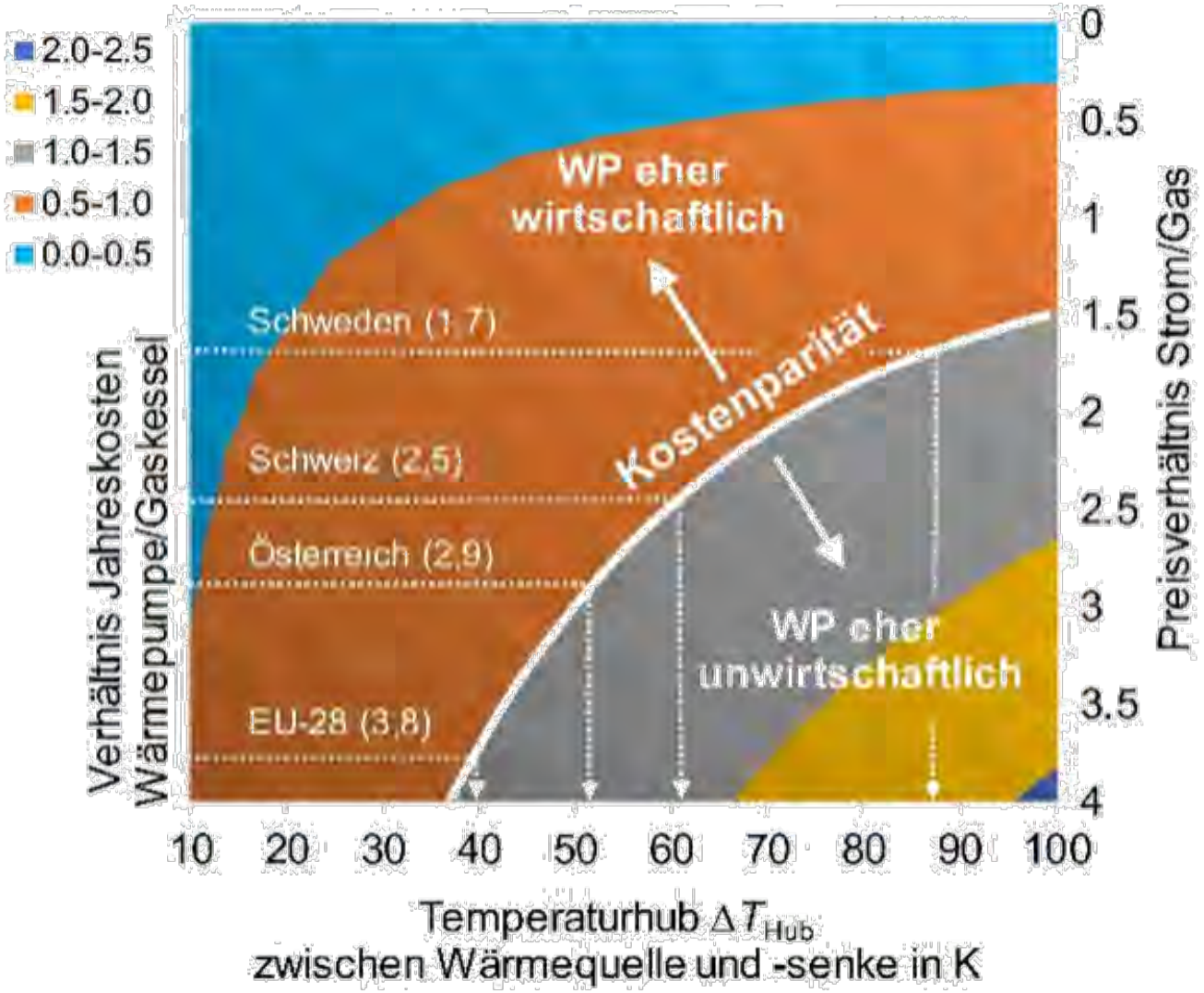
2016	Strompreis in EUR/kWh	Gaspreis in EUR/kWh	Preisverhältnis Strom/Gas	Indikator
EU-28	0,114	0,0301	3,8	↗
Schweden	0,0656	0,0384	1,7	↗
Frankreich	0,0893	0,0378	2,4	→
Österreich	0,1004	0,0341	2,9	↗
Deutschland	0,1492	0,0332	4,5	↗
Italien	0,1556	0,0273	5,7	↗
Schweiz	0,164*	0,0660**	2,5	↗

Arpagaus (2019)

Tabelle 5-5 Strom- und Gaspreise für Industrieabnehmer im Jahr 2016 im Vergleich (Datenquellen: Eurostat, www.ec.europa.eu/eurostat, Online-Datencodes: nrg_pc_203 und nrg_pc_205, Gasverbrauch: Band I3, Stromverbrauch: Band IC, *Schweizer Strompreis [245]: Verbraucherprofil C5, Jahresverbrauch 500 MWh, Leistung 150 kW, eigene Trafostation, in CHF/kWh, **Schweizer Gaspreis [246]: Verbraucherprofil Typ VI, Jahresverbrauch 500 MWh, Kesselleistung 350 kW, ca. 1'500 Benutzungsstunden, abschaltbar)

cordin.arpagaus@ost.ch

Wirtschaftlichkeitsabschätzung einer Wärmepumpen-Integration im Vergleich zu einem Gaskessel



Annahmen:	Wärmepumpe	Gaskessel
Investition:	420 EUR/kW	60 Euro/kW
Kapitalzins:	5%	5%
Nutzungsdauer:	15 Jahre	15 Jahre
Annuität:	40.5 EUR/kW	5.8 EUR/kW
Wartungskosten:	2.5%	3% (Investition)
	15 EUR/kW	4,2 EUR/kW
Gütegrad (η_{WP}):[1]	45%	
Nutzungsgrad (η_{GK}):		80%
Betriebsstunden:[2]	3'504 h/a	3'504 h/Jahr
Gaspreis:[3]		0,0301 Euro/kWh

[1] $COP_H = \eta_{WP} T_S / \Delta T_{Hub}$; $T_S = 393{,}15$ (120°C)
[2] 40% x 365 Tage x 24 h = 3'504 h
[3] Eurostat, EU-28, 2016

Arpagaus (2019)

cordin.arpagaus@ost.ch

VDI 4646 Richtlinie: Anwendungen von Großwärmepumpen

Mögliches Erscheinungsdatum
2022-09

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

Anwendungsbeispiele von Industriewärmepumpen

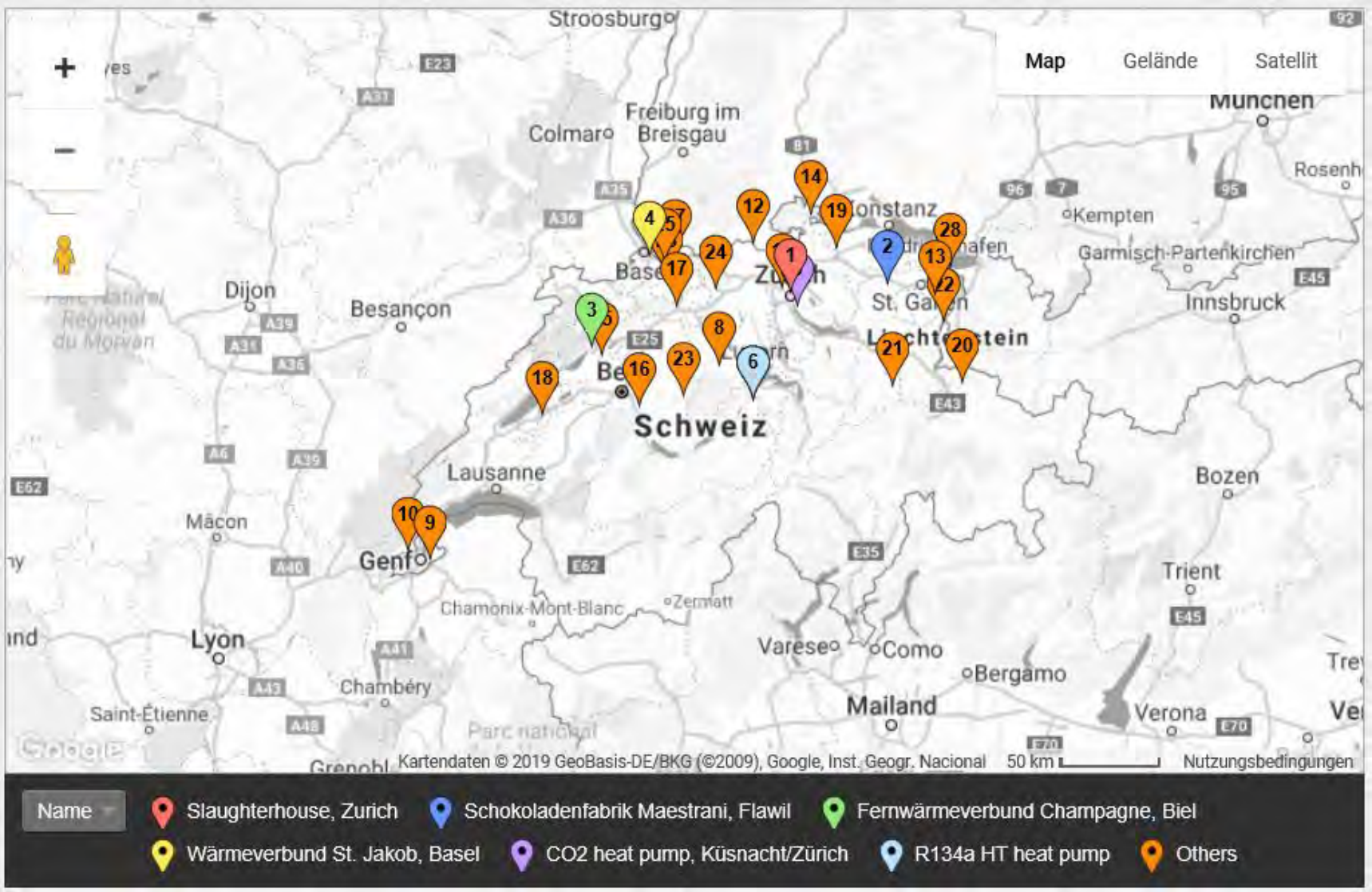
cordin.arpagaus@ost.ch

Wärmepumpen in der Schweiz

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Standorte der Fallbeispiele



Datenquellen:

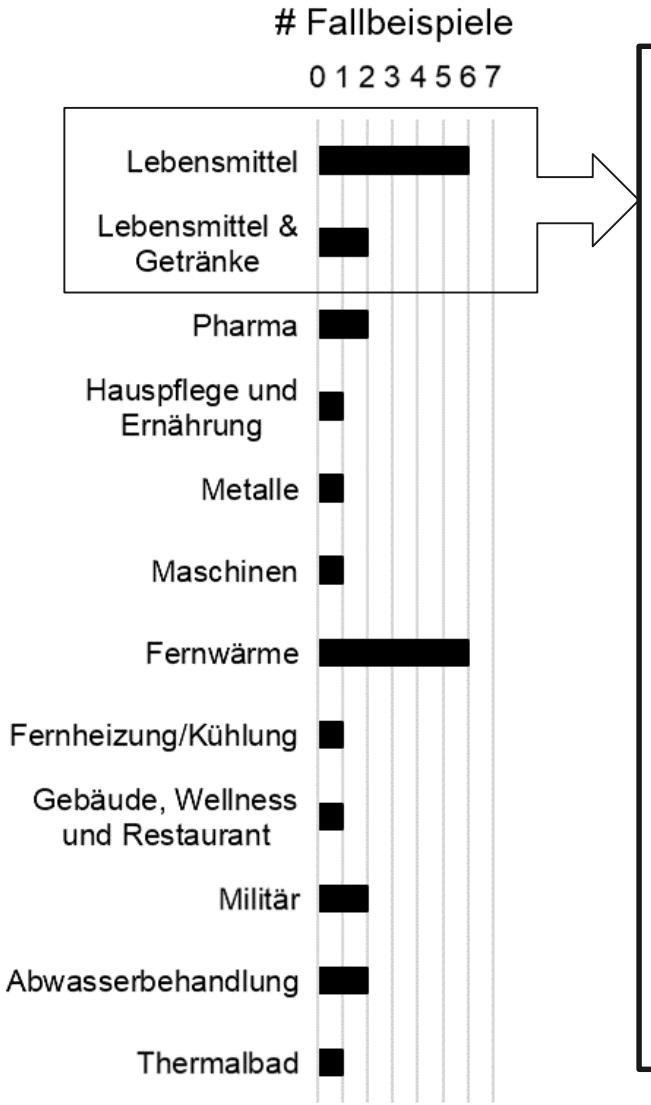
- Internet
- Hersteller
- Planer
- Kontakte

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 nach Industriezweig / Anwendung



Fallbeispiel aus der Lebensmittelindustrie:

- **Käserei** (Prozesswärme aus Abwärme von Rechenzentrum)
- **Schokoladenfabrik** (Heiz- und Kühlprozesse)
- **Gemüseproduzent** (Heizung von Gewächshäusern, Kühlung von Lagerhallen)
- **Frische Convenience-Produkte** (Warmwasser aus der Abwärme der Kältemaschinen)
- **Essig** (Gärung, Pasteurisierung)
- **Fleischerzeuger** (heißes Wasser für Reinigungsprozesse)
- **Getränkehersteller** (Reinigung von Flaschen und Weintanks)
- **Biskuithersteller** (Warmwasser aus Abwärmenutzung)

cordin.arpagaus@ost.ch

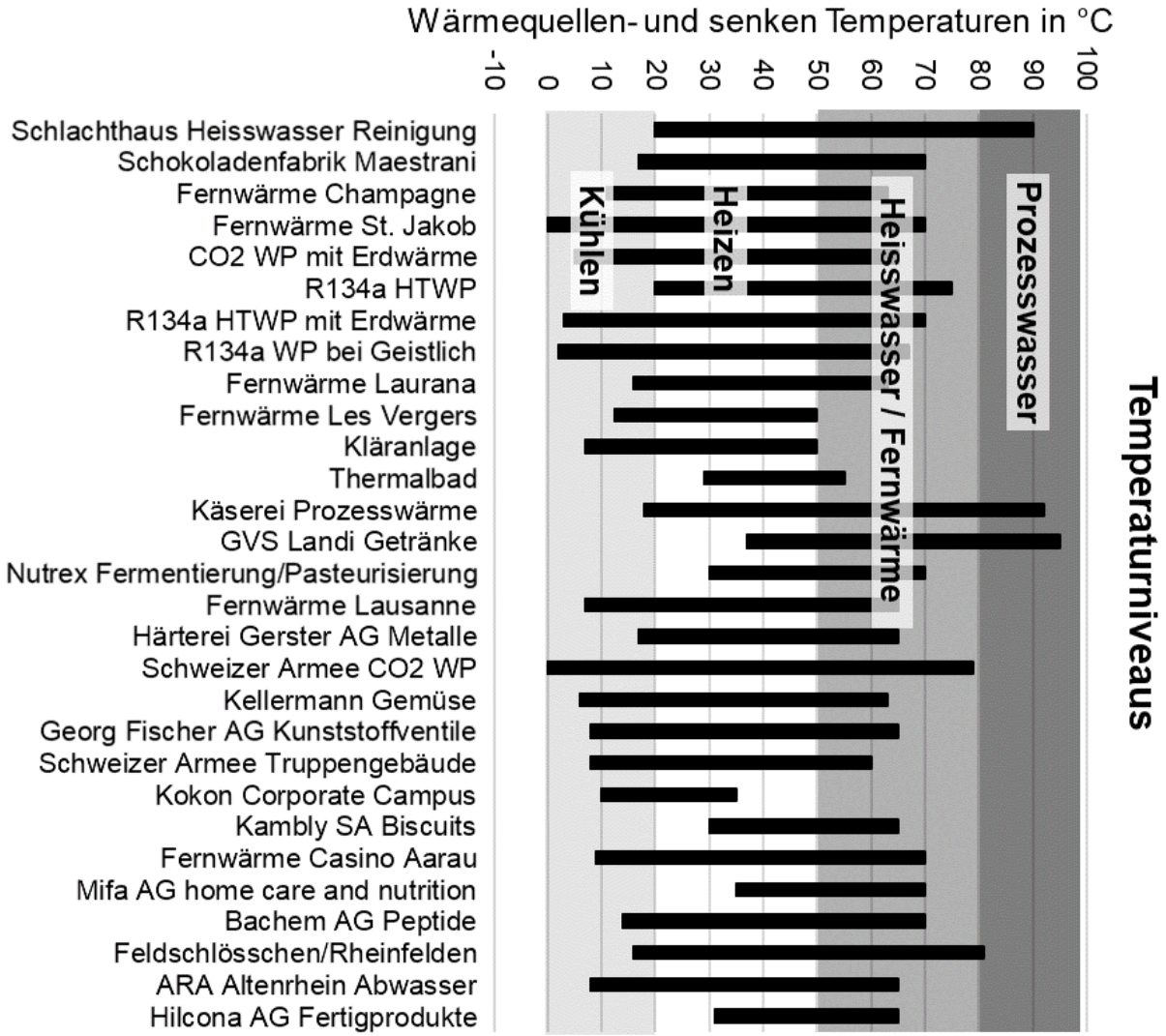
Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz

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	20	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

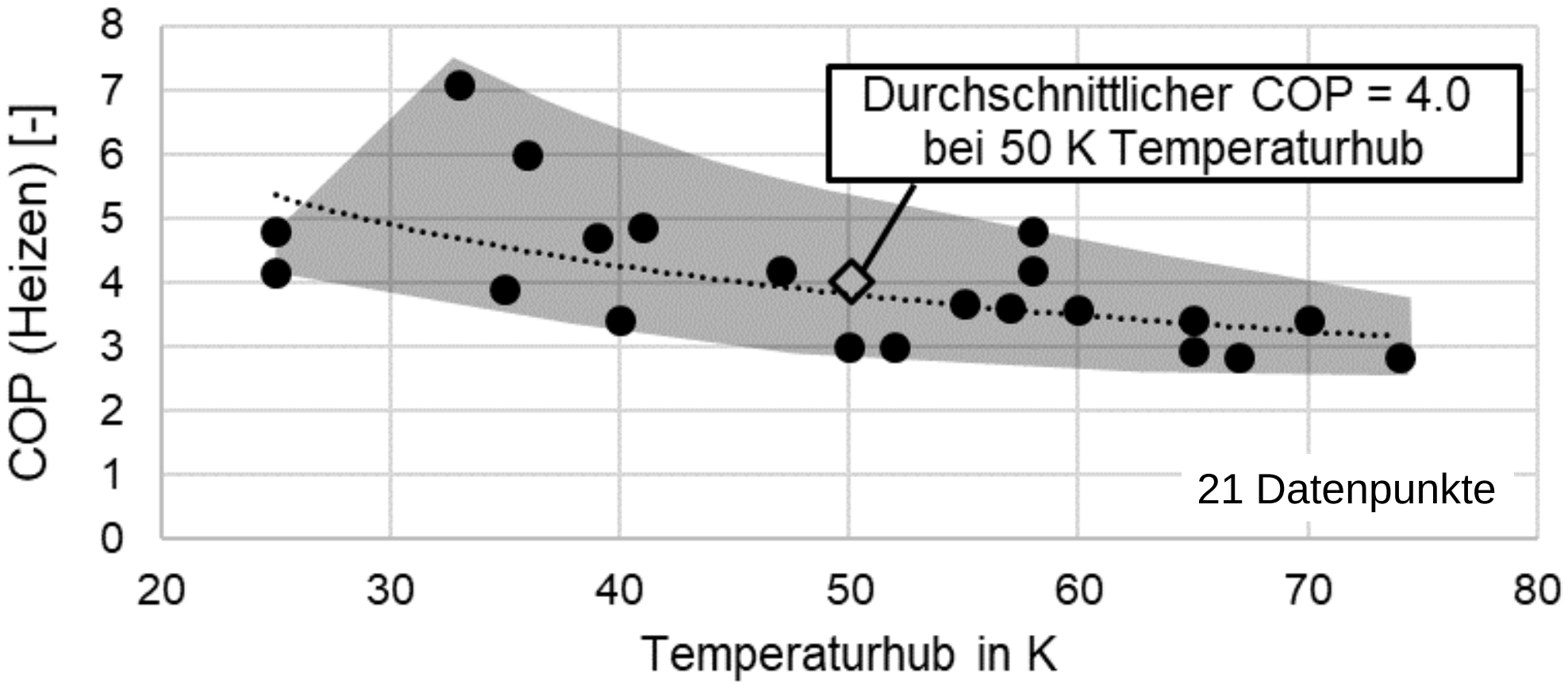
Temperaturniveaus der Wärmequellen und -senken



- **Höchste Vorlauftemperaturen knapp über 90 °C**: Käserei, Schlachthof, Getränke
- **Temperaturspreizungen** an der **Wärmequelle 6 ± 5 K** und **Wärmesenke 20 ± 14 K**
- Um das Prozesswärmepotenzial der Industrie zu nutzen, ist eine **zunehmende Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen notwendig** (siehe Review-Paper und Buch Arpagaus 2018)

cordin.arpagaus@ost.ch

Wärmepumpeneffizienz (COP Heizen) vs. Temperaturhub



(von Wärmequelle Eintritt zu Wärmesenke Austritt)

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 Energieeinsprungen und Reduktion der CO_2-Emissionen**

cordin.arpagaus@ost.ch

Kältemittel, Kompressoren, WP-Hersteller, Jahr der Installation

Kältemittel	
R134a	12
R717	7
R1234ze	5
R744	3
R245fa	1
R410A	1

Kompressoren	
Kolben	19
Schraube	7
Turbo	2
Scroll	1

Wärmepumpenhersteller			
Carrier		Mayekawa	1
CTA	4	MTA	1
Enex	1	Ochsner	2
ENGIE	4	Scheco	2
Friotherm	2	SCM Frigo	
GEA	2	Sulzer	1
JohnsonControls	4	Thermea	1
Kibernetik	1	Viessmann	1

Jahr der Installation	
1985	1
2007	1
2008	1
2009	1
2010	1
2011	1
2012	3
2013	3
2014	4
2015	1
2016	3
2017	4
2018	3
2019	1

- Klassische Anwendung: NH_3 (R717) Kältemaschinen
- (Noch) wenige mit HFO-Kältemittel

cordin.arpagaus@ost.ch

Käserei im Gais Appenzell

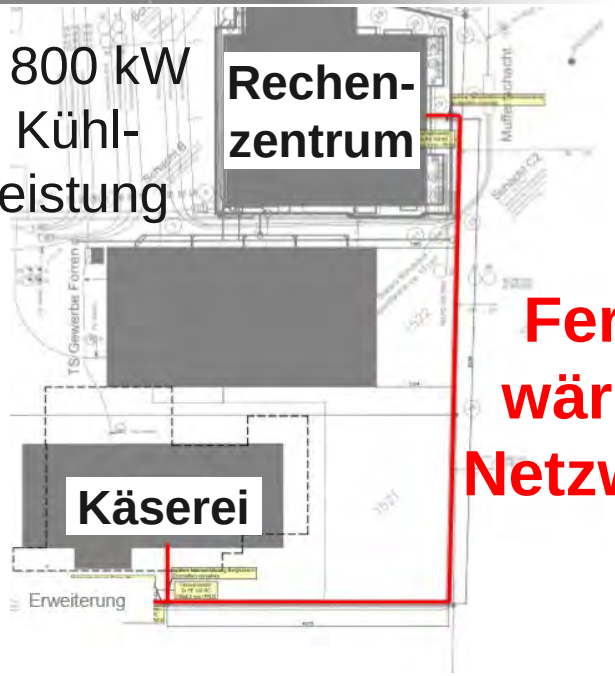
Heat Pumping Technologies MAGAZINE

VOL.37 NO 2/2019

Rechenzentrum

Abwärme von Serverräumen 16 bis 20 °C

~ 800 kW Kühl-leistung



Käserei

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

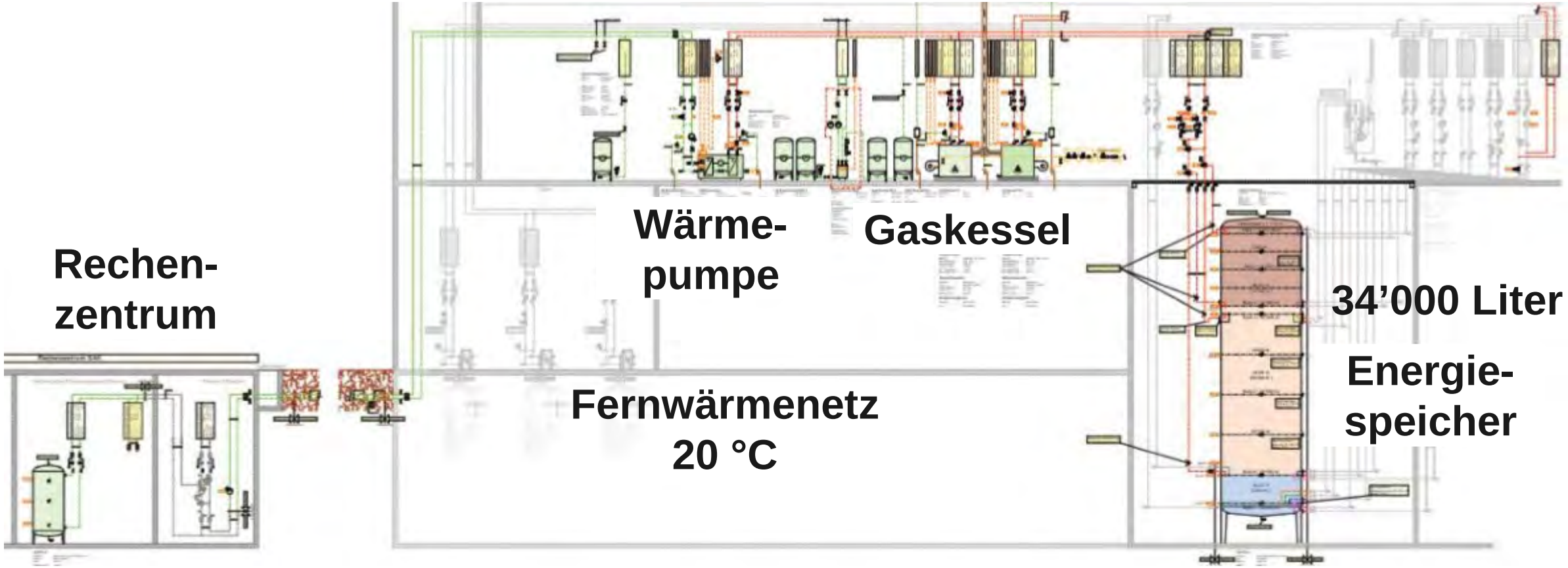
Temperaturniveaus:

- 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

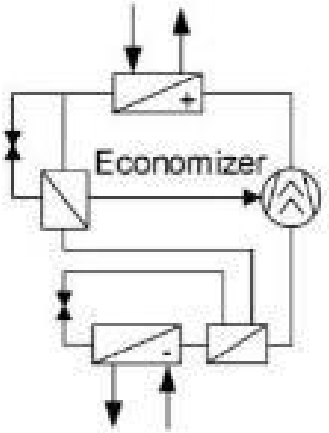


cordin.arpagaus@ost.ch

OST

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

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)

OCHSNER
ENERGIE TECHNIK

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

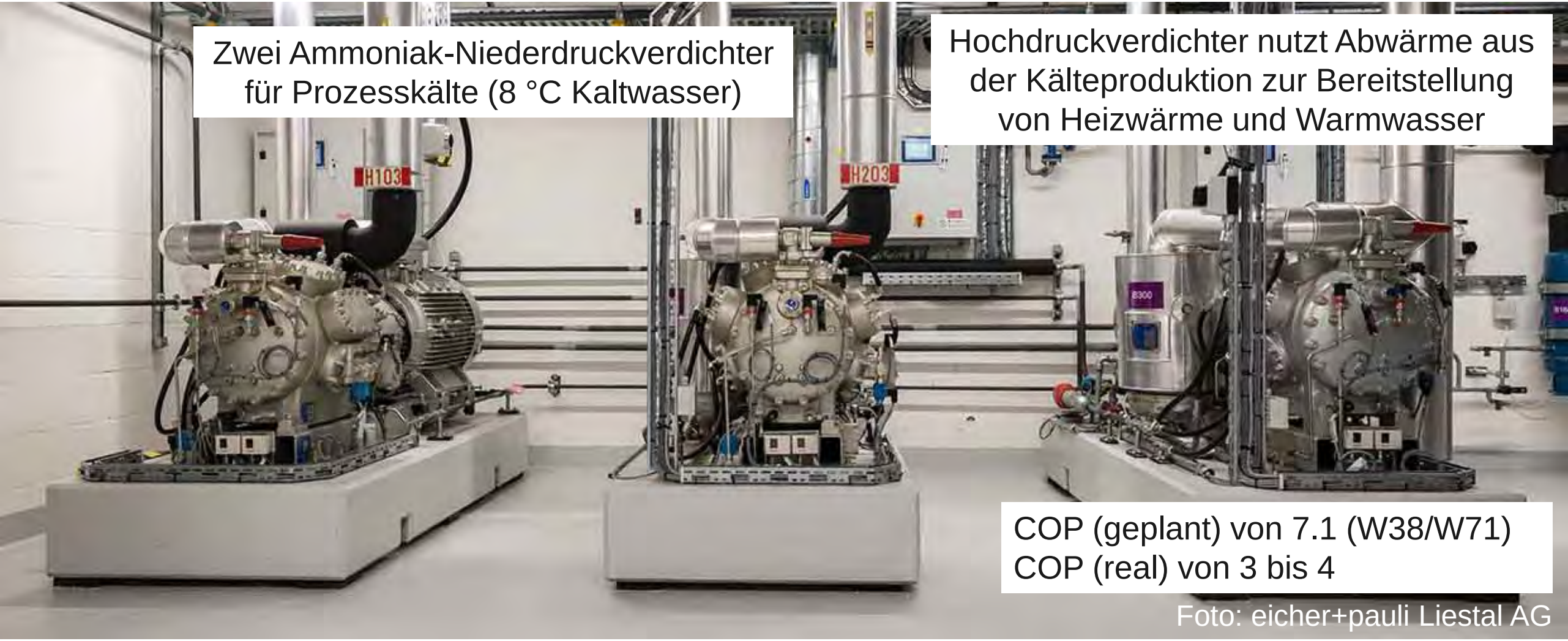
Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz

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

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

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

cordin.arpagaus@ost.ch

Zusammenfassung

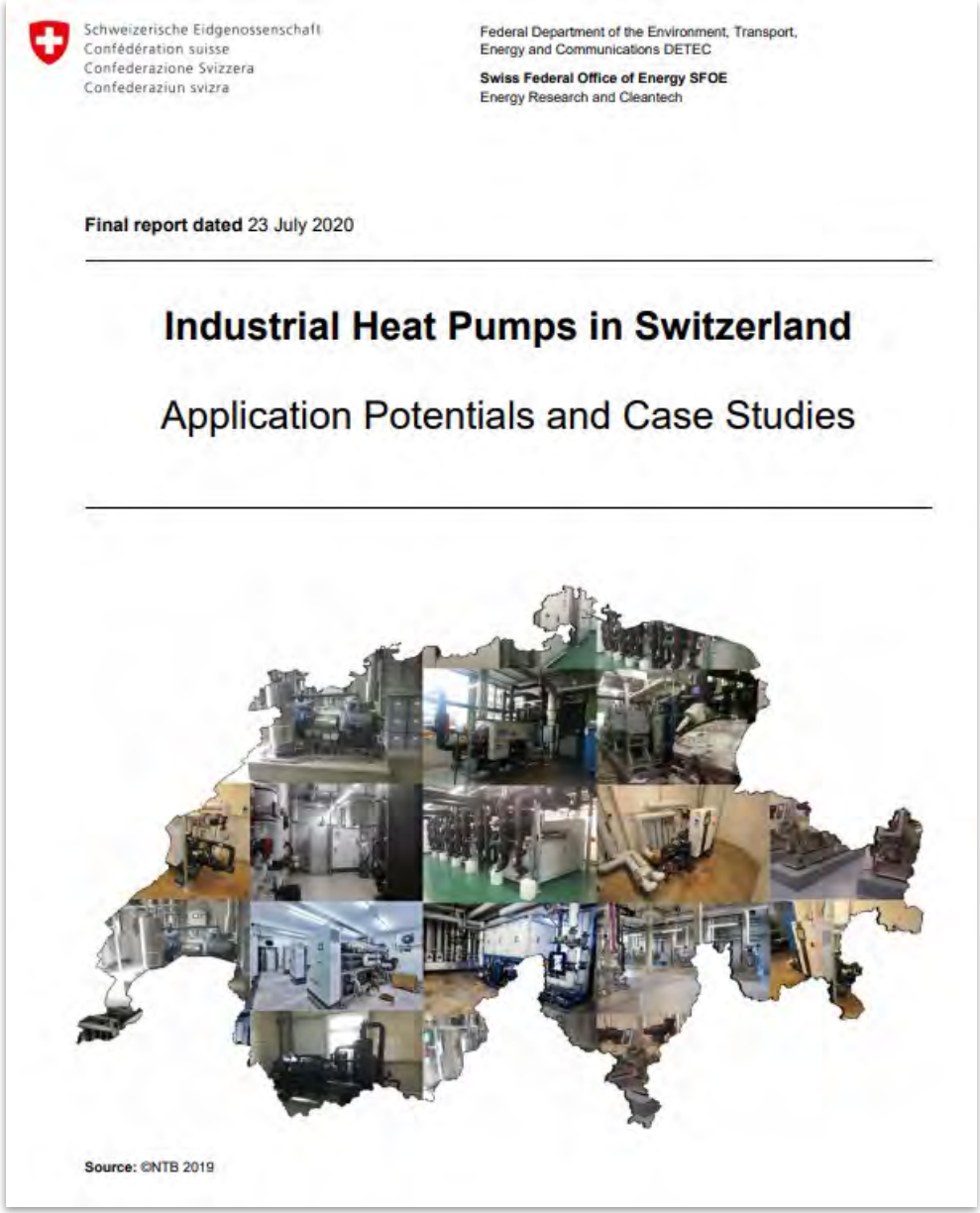
- 25 Fallbeispiele überwiegend aus der Lebensmittelindustrie (Heißwasser, Luft, Prozesswärme, Kühlung)
- Durchschnittlicher COP etwa 4,0 bei 50 K Temperaturhub
- Höchste Vorlauftemperatur etwas über 90 °C
- Signifikante Energieeinsparungen (20 % bis 80 %) und CO_2-Reduktionseffekte (30 % bis 90 %) durch den Ersatz von Gas- und Ölkesseln durch elektrisch betriebene Wärmepumpen
- Mögliche Multiplikationseffekte von ähnlichen Wärmepumpenanlagen
- Rahmen von Bewertungskriterien für die Datenerhebung: maximale Vorlauftemperatur, Heizleistung, Kältemitteltyp, Energieeinsparung, Reduzierung CO_2-Emissionen, erfolgreiche Integration, etc.

cordin.arpagaus@ost.ch

Fallbeispiele von industriellen Wärmepumpen in der Schweiz

Schlussbericht

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications DETEC

Swiss Federal Office of Energy SFOE
Energy Research and Cleantech

Final report dated 23 July 2020

Industrial Heat Pumps in Switzerland

Application Potentials and Case Studies

Source: ©NTB 2019

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Innosuisse – Swiss Innovation Agency

SCCER
EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES

www.sccer-eip.ch

cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Zur Info

Förderprogramm: Wärmepumpen für Prozesswärme

Mehr Informationen über eine klimaneutrale Produktion:
Link zur Broschüre: «Auf dem Weg zur klimaneutralen Produktion»

Link zu den Förderkriterien

energieschweiz

cordin.arpagaus@ost.ch

Lebensmittel- und Getränkeindustrie

- Heißwasser und Dampf zur **Sterilisation von Lebensmitteln und Getränken**
- Prozeßwärme zur **Konzentration und Pasteurisierung von Milch und Säften**
- Heißwasser und Dampf zum **Waschen und Sterilisieren von Flaschen und Weintanks bei Abfüllprozessen**
- Dampf und Warmwasser für die **Reinigung von Schlachthöfen**
- Prozesswärme für **Pasteurisierung und Warmwasser in Käsefabriken**

cordin.arpagaus@ost.ch

Trocknungsprozesse (Lufterwärmung)

- **Ziegeltrocknung**: Luftvorwärmung auf 120 °C mittels feuchter Abluft (70 °C, 50% r.F.)
- **Holztrocknung**: Lufterwärmung auf 120 bis 150 °C mit feuchter Abluft
- **Trocknung von Tierfutter**: Niederdruck-Dampf für Kammertrockner
- **Sprühtrocknung**: Luftvorwärmung für Milchpulverherstellung
- **Stärketrocknung**: Luftvorwärmung zur Dampferzeugung 160 °C
- **Papiertrocknung**: Niederdruck-Dampf 130 °C mittels Kühlwasser (60 °C) oder feuchter Abluft (76 °C, 56 % r.F.) als Wärmequelle

cordin.arpagaus@ost.ch

Anwendungsbeispiele

- **Nah- und Fernwärmenetze**: Heisswassererzeugung bis 120 °C

- **Krankenhäuser**: Dampf 125 °C für Autoklaven, Sterilisation und Wäschetrocknung

- **PET-Flaschenindustrie**: Prozesswärme zwischen 100 und 150 °C für das Spritzgießen von Kunststoff-Vorformlingen

- **Zuckerindustrie:** Prozesswärme zwischen 80 und 150 °C für die Verarbeitung von Zuckerrüben, Dampferzeugung bei 138 °C für die Produktion von 90 °C Speisewasser

cordin.arpagaus@ost.ch

Anwendungsbeispiele

- **Brauereien:** Prozesswärme von rund 100 °C für den Brauprozess (z.B. Maischen, Läutern, Würzekochen)
- **Milchverarbeitung:** Milchpasteurisierung (HT 100 bis 120 °C), Sterilisation (115 bis 135 °C) und Ultrahocherhitzung (135 bis 150 °C) Sprühtrocknung von Milchpulver (Vorwärmen der Trocknungsluft auf 120 bis 150 °C)
- **Chemische Industrie:** Dampf 120 °C zur Alkohol-Destillation unter Nutzung der Abwärme des Kühlturms oder der Kondensationswärme der Destillationskolonne (65 °C)
- **Wellness-Sauna-Anwendungen:** CO_2-Wärmepumpen für verschiedene Temperaturniveaus bis zu 120 °C

cordin.arpagaus@ost.ch

Potenzielle Anwendungen

HEISSWASSER

HEISSLUFT

DAMPF

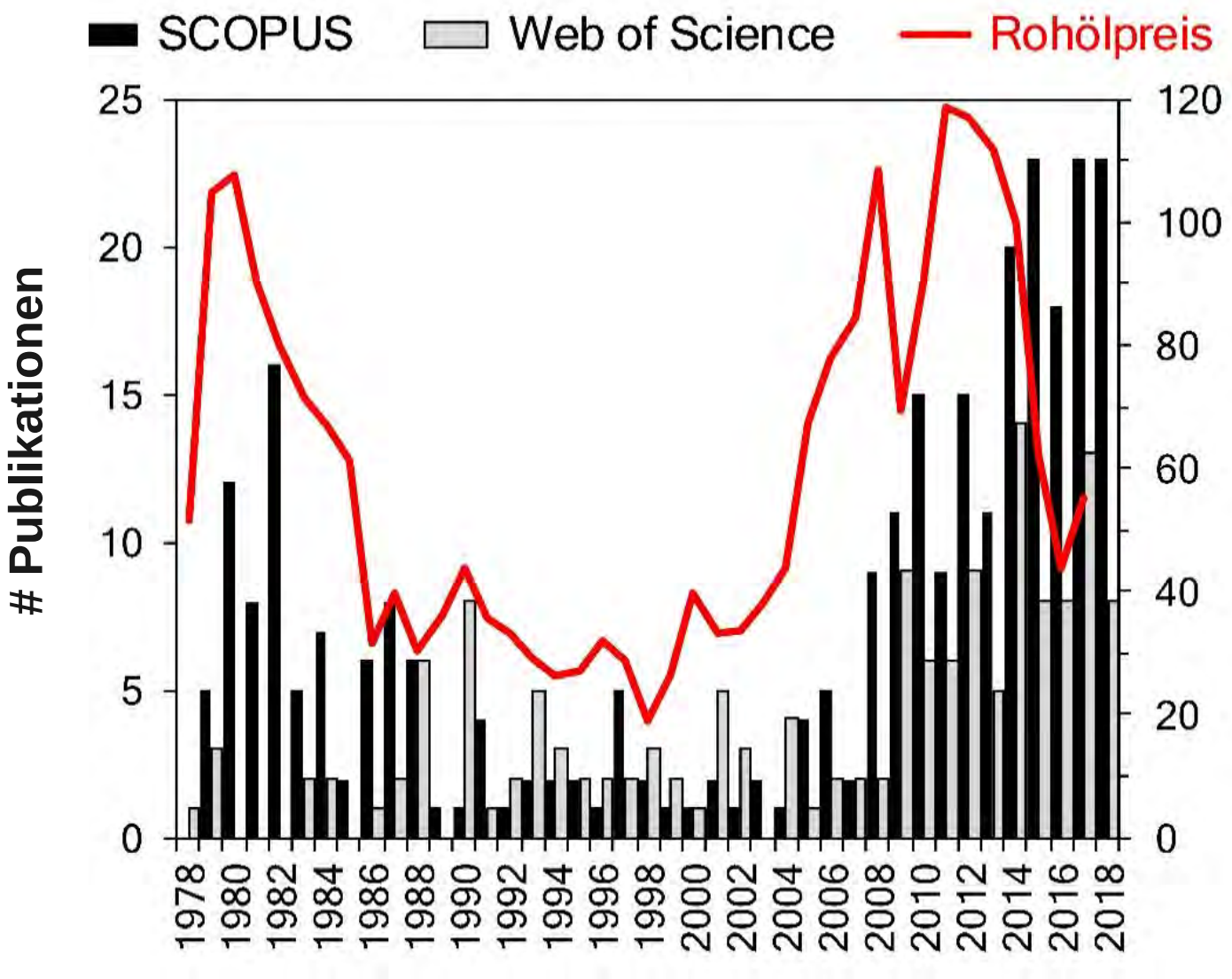
- **Warmwassererzeugung für Wasch- und Reinigungsprozesse** (Lebensmittel, Fleisch, Produktwäsche) **in Kombination mit der Kälteerzeugung**
- **Heißlufterzeugung und Luftvorwärmung für Trocknungsprozesse** (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung) durch Abwärmenutzung
- **Prozessdampferzeugung (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 Entwicklungen im Bereich Hochtemperatur-Wärmepumpen

cordin.arpagaus@ost.ch

Anzahl Publikationen mit Suchbegriff “high temperature heat pump”



Rohölpreis in US-Dollar pro Fass

(Quelle: BP Statistical Review of World Energy, June 2018)

cordin.arpagaus@ost.ch

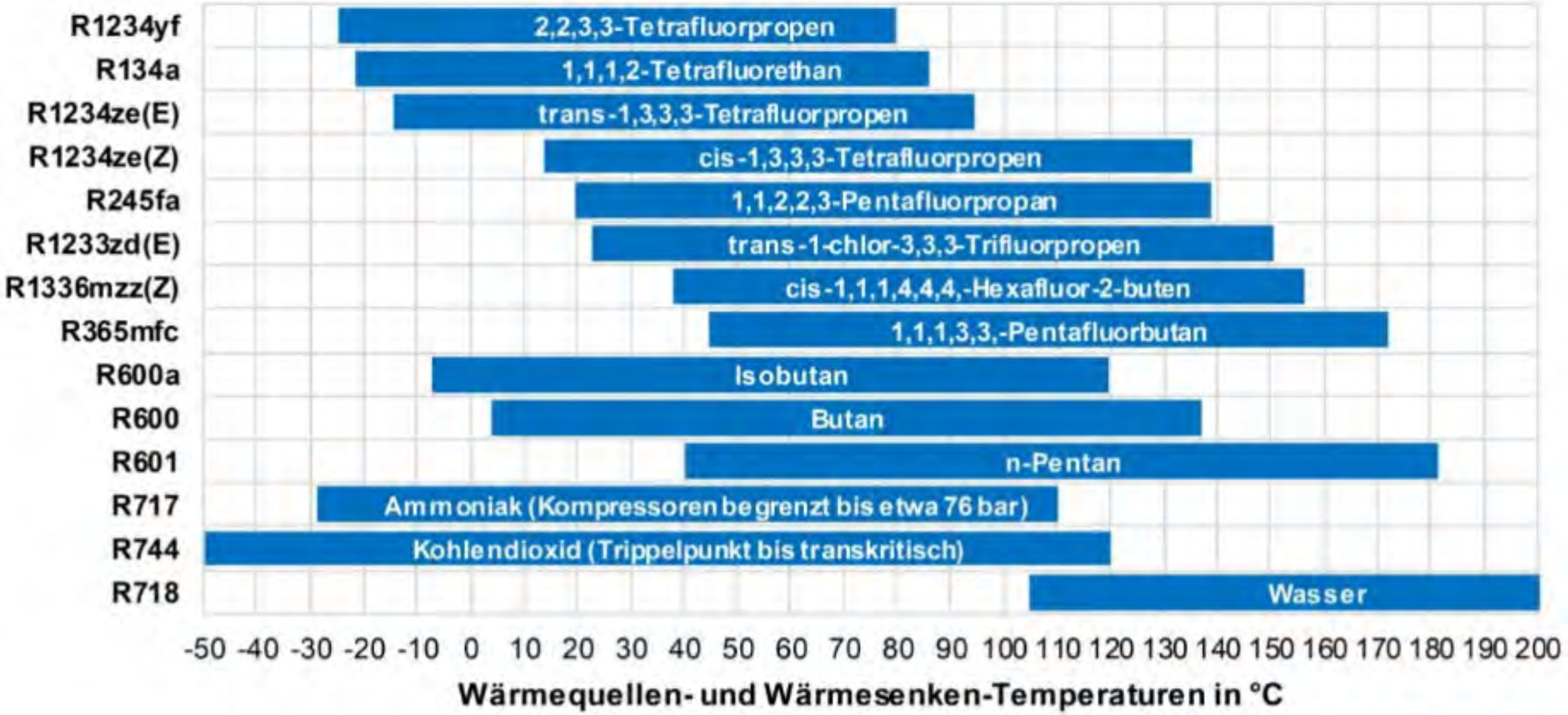
OST

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), CO2 oder H2O
- 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

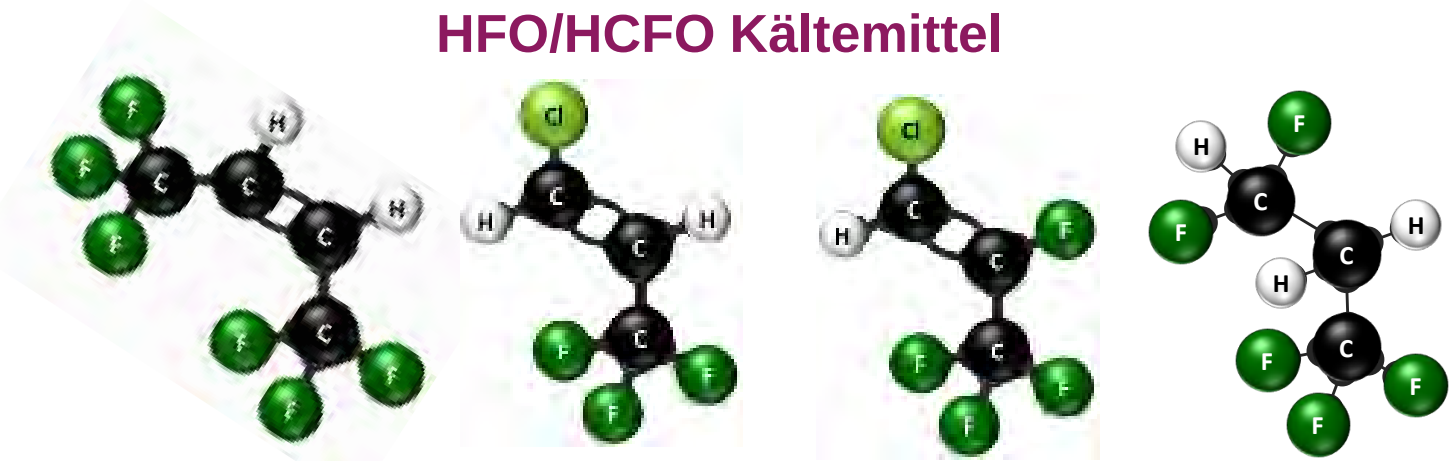


cordin.arpagaus@ost.ch

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

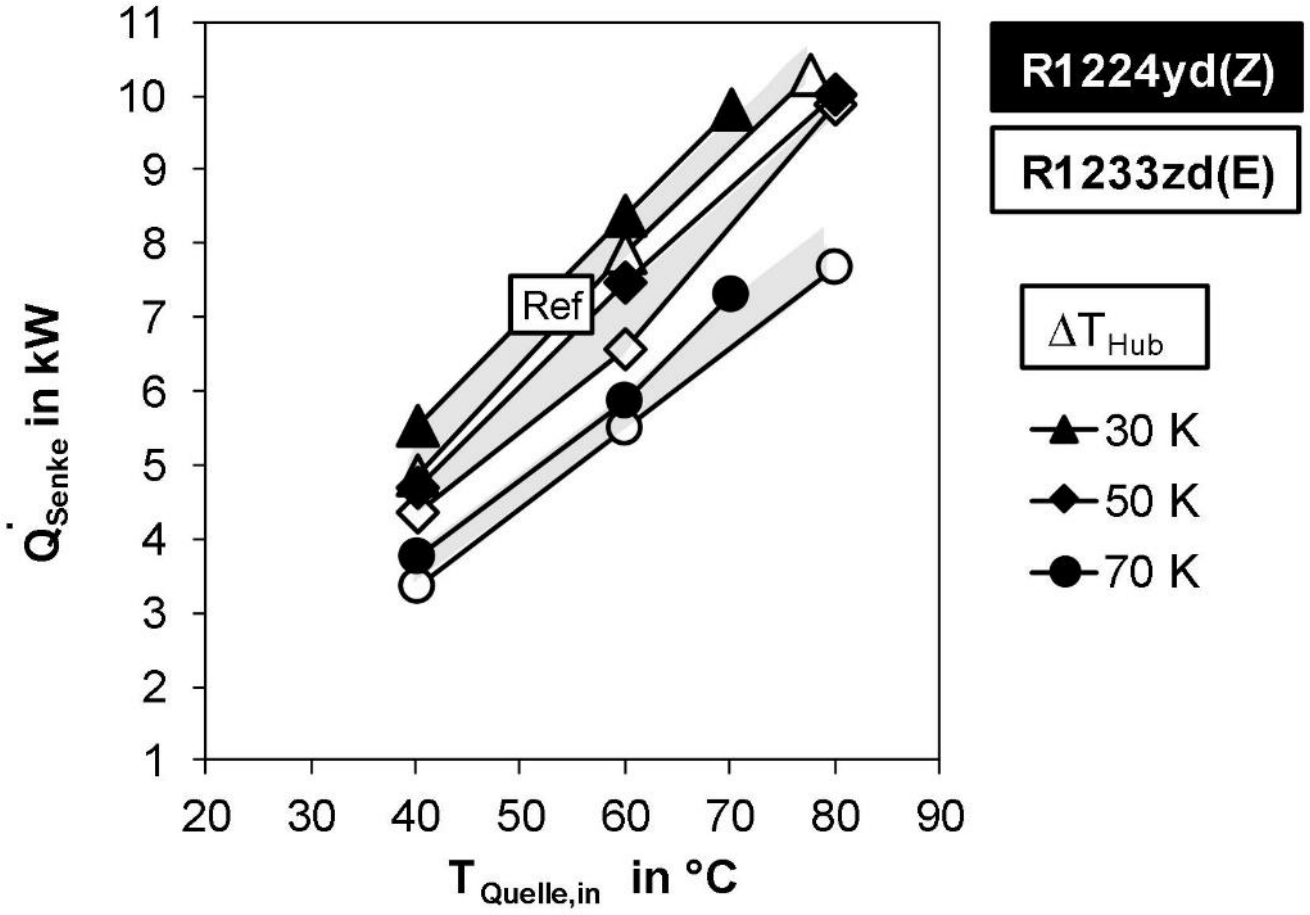
cordin.arpagaus@ost.ch

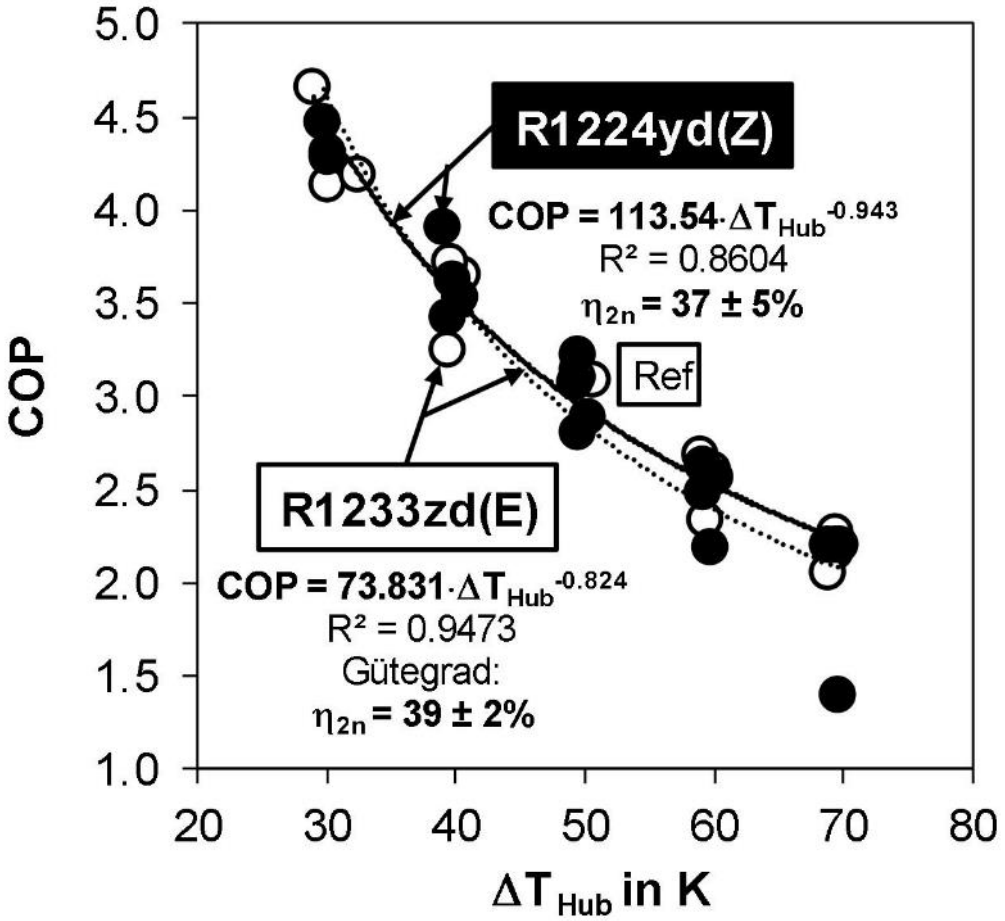
Aktuelle Entwicklungen im Bereich Hochtemperatur-Wärmepumpen

$T_{Senke,aus}$
70 bis 150°C

$T_{Quelle,ein}$
40 bis 80°C

- **Parameterstudien mit HCFO R1224yd(Z) und R1233zd(E)**
- **Effizienz (COP) und Heizleistung**

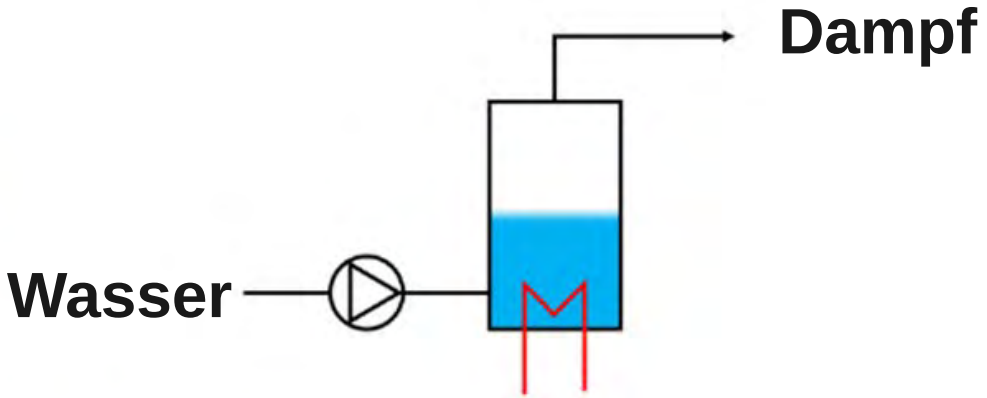




Arpagaus et al. (2019): DKV Tagung 2019, Ulm

cordin.arpagaus@ost.ch

Dampferzeugung – Stand heute



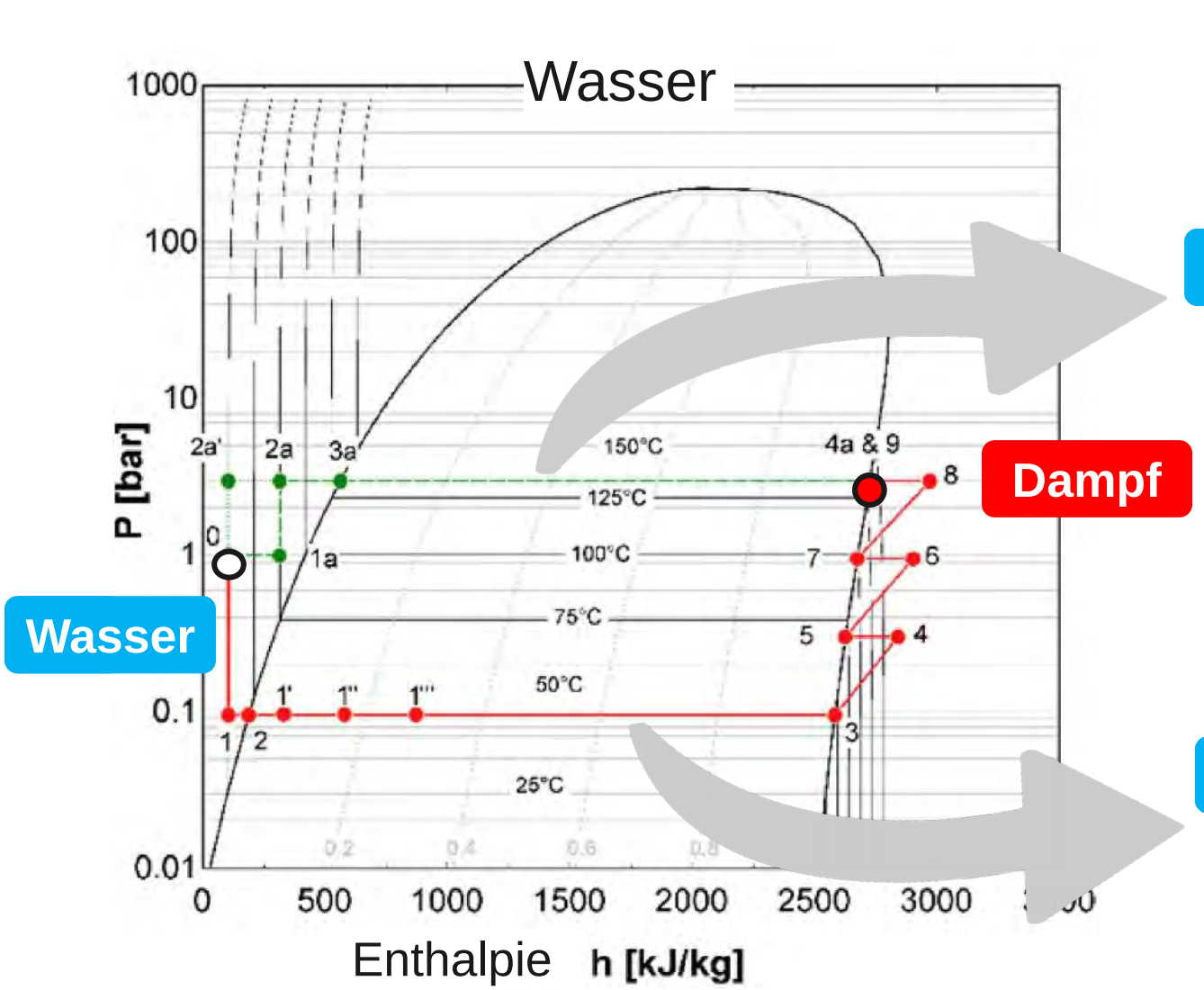
- Gasboiler (<95%)
- Elektrisch (<90%)

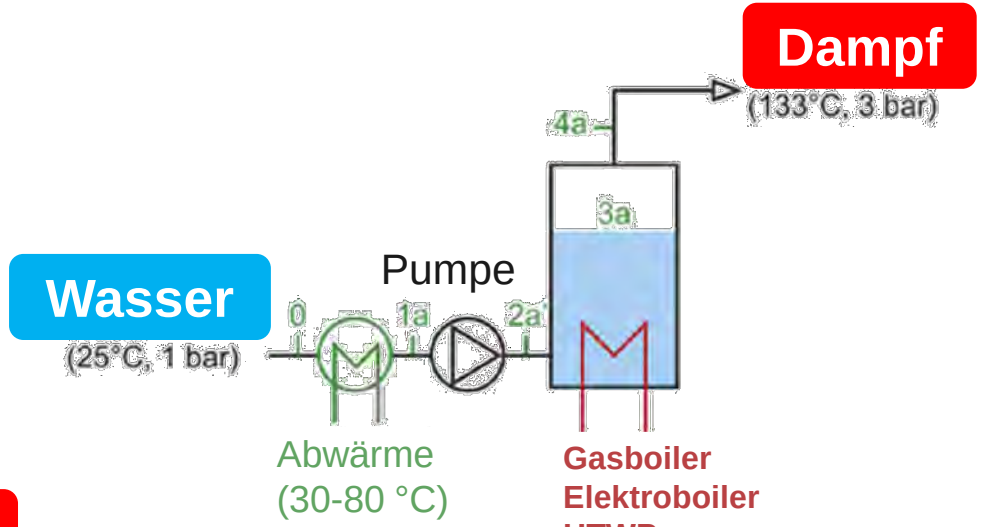
Stand heute

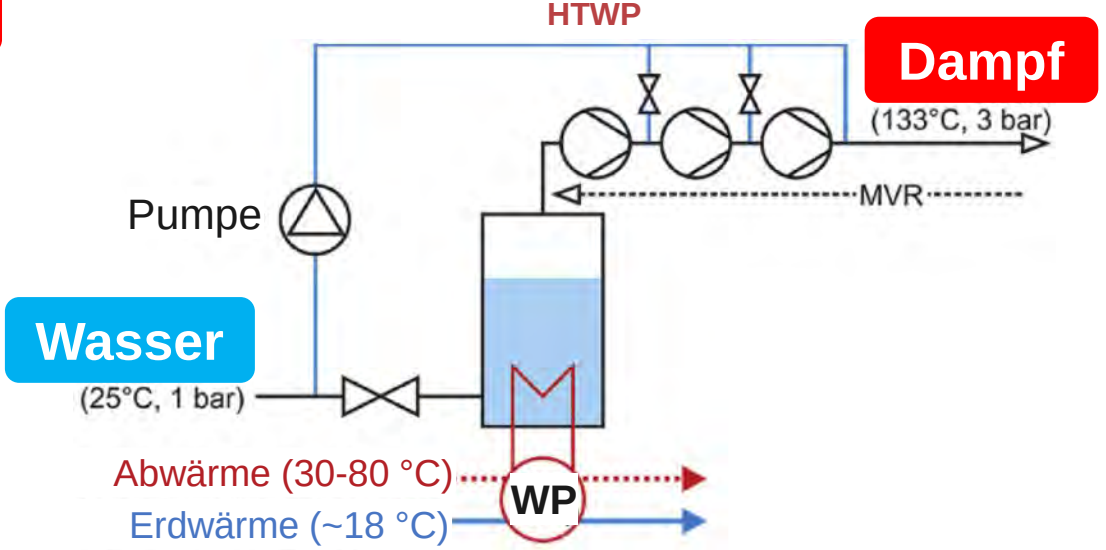
700 – 1’800 kg/h
(bis zu 1.3 MW el.)

cordin.arpagaus@ost.ch

Offener Zyklus mit mechanischer Dampfrekompression



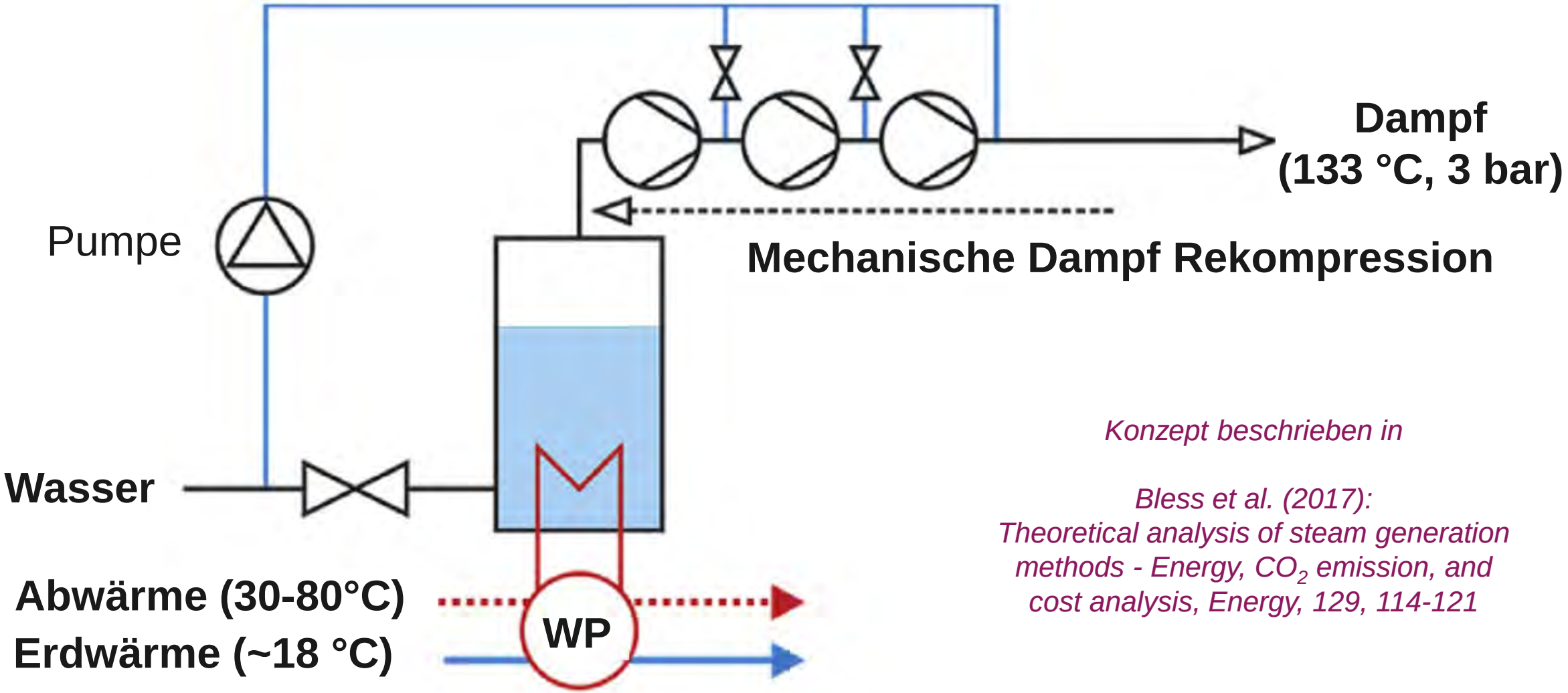




cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Neue Lösungsansätze zur Dampferzeugung aus Abwärme + HTWP



Konzept beschrieben in

Bless et al. (2017):
Theoretical analysis of steam generation methods - Energy, CO_2 emission, and cost analysis, Energy, 129, 114-121

cordin.arpagaus@ost.ch

Vergleich mit herkömmlicher Dampferzeugung

Energy consumption, CO2 emission, and operating cost per kg of steam							
		without waste heat			with waste heat (55°C)		
	Steam generation method	kJ	CO_2 [g]	OC [¢]	kJ	CO_2 [g]	OC [¢]
Direct heating	Natural gas-fired (US)	2758	139	1.8	2648	133	1.8
	Natural gas-fired (CH)			5.1			4.9
	Electrical heating (US)	2620	375	7.4	2516	360	7.1
	Electrical heating (CH)		27	12.0		26	11.5
	High temperature HP (US)	1849	265	5.2	1137	163	3.2
	High temperature HP (CH)		19	8.5		12	5.2
Vapour compression	HP using HX cooling (US)	1180	169	3.3	836	120	2.4
	HP using HX cooling (CH)		12	5.4		9	3.8
	HP using WI cooling (US)	1106	158	3.1	755	108	2.1
	HP using WI cooling (CH)		11	5.1		8	3.5
	Waste heat evap. with HX (US)	-	-	-	772	111	2.2
	Waste heat evap. with HX (CH)			-		8	3.5
	Waste heat evap. with WI (US)	-	-	-	661	95	1.9
	Waste heat evap. with WI (CH)			-		7	3.0

CO_2 Einsparung:
3.8 bis 20 x
bei gleichzeitiger
Energieeinsparung
und
Kostenreduktion

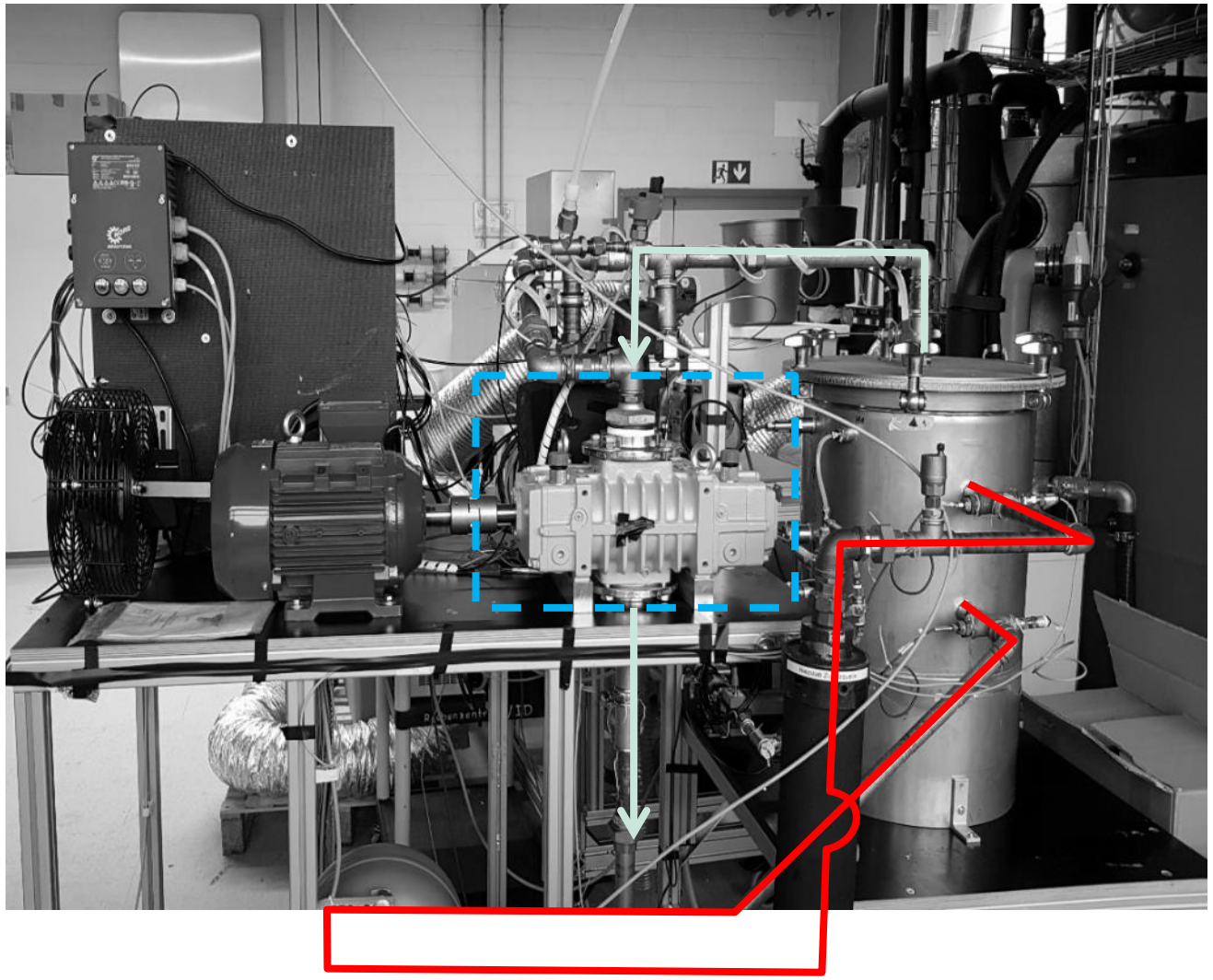
Producer	CO_2 [g/kWh]
Natural gas (2009)	181.2
Electricity (CH) (2009)	36.9
Electricity (U.S.) (2012)	515.5

Fuel	Cost	Cost [¢/MJ]
Natural gas (U.S.)	6.82 $/Mcf	0.668
Natural gas (CH)	0.067 CHF/kWh	1.86
Electricity (U.S.)	10.13 ¢/kWh	2.81
Electricity (CH)	0.164 CHF/kWh	4.59

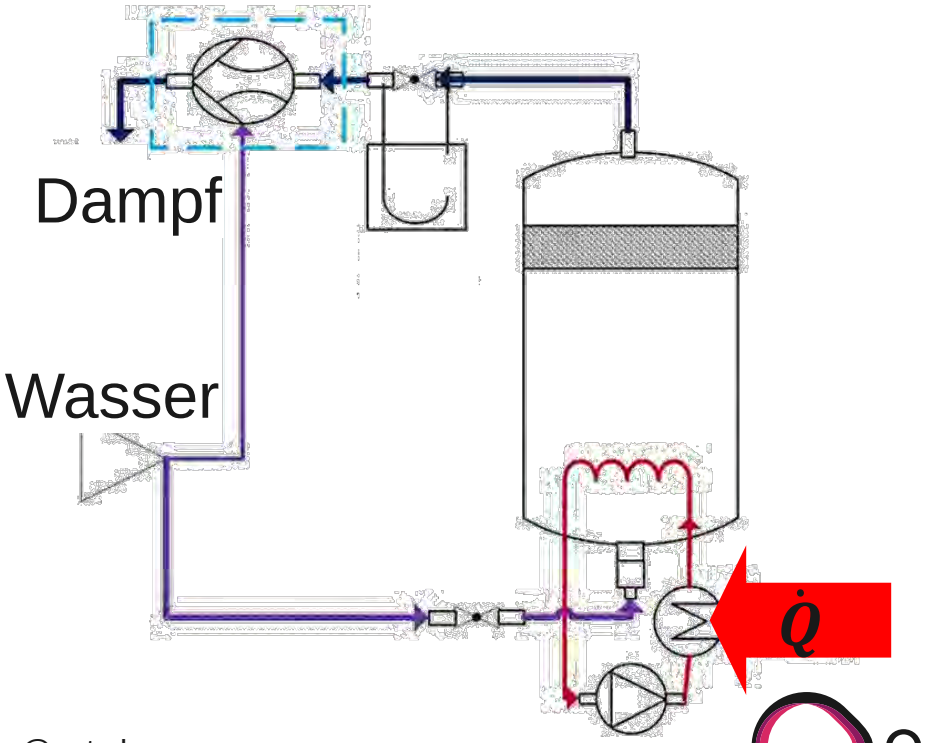
Bless et al. (2017)

cordin.arpagaus@ost.ch

Prototyp zur Dampferzeugung aus Abwärme im Labor OST



- Wärmepumpe mit offenem Wasserkreislauf
- 34,2 kg/h Dampf bei 115°C
- Proof-of-Concept



cordin.arpagaus@ost.ch

Energy Savings and CO_2 Emissions Reduction

STEAM

Energy consumption, CO2 emission, and operating cost per kilo of steam							
		without waste heat			with waste heat (55°C)		
	Steam generation method	kJ	CO_2 [g]	OC [¢]	kJ	CO_2 [g]	OC [¢]
direct heating	Natural gas-fired (US)	2758	139	1.8	2648	133	1.8
	Natural gas-fired (CH)			5.1			4.9
	Electrical heating (US)	2620	375	7.4	2516	360	7.1
	Electrical heating (CH)		27	12.0		26	11.5
	High temperature HP (US)	1849	265	5.2	1137	163	3.2
	High temp. HP (CH)		19	8.5		12	5.2
vapour compression	HP using HX cooling (US)	1180	169	3.3	836	120	2.4
	HP using HX cooling (CH)		12	5.4		9	3.8
	HP using WI cooling (US)	1106	158	3.1	755	108	2.1
	HP using WI cooling (CH)		11	5.1		8	3.5
	Waste heat evap. with HX (US)	-	-	-	772	111	2.2
	Waste heat evap. with HX (CH)			-		8	3.5
	Waste heat evap. with WI (US)	-	-	-	661	95	1.9
	Waste heat evap. with WI (CH)			-		7	3.0

CO_2 emissions factor **20** x

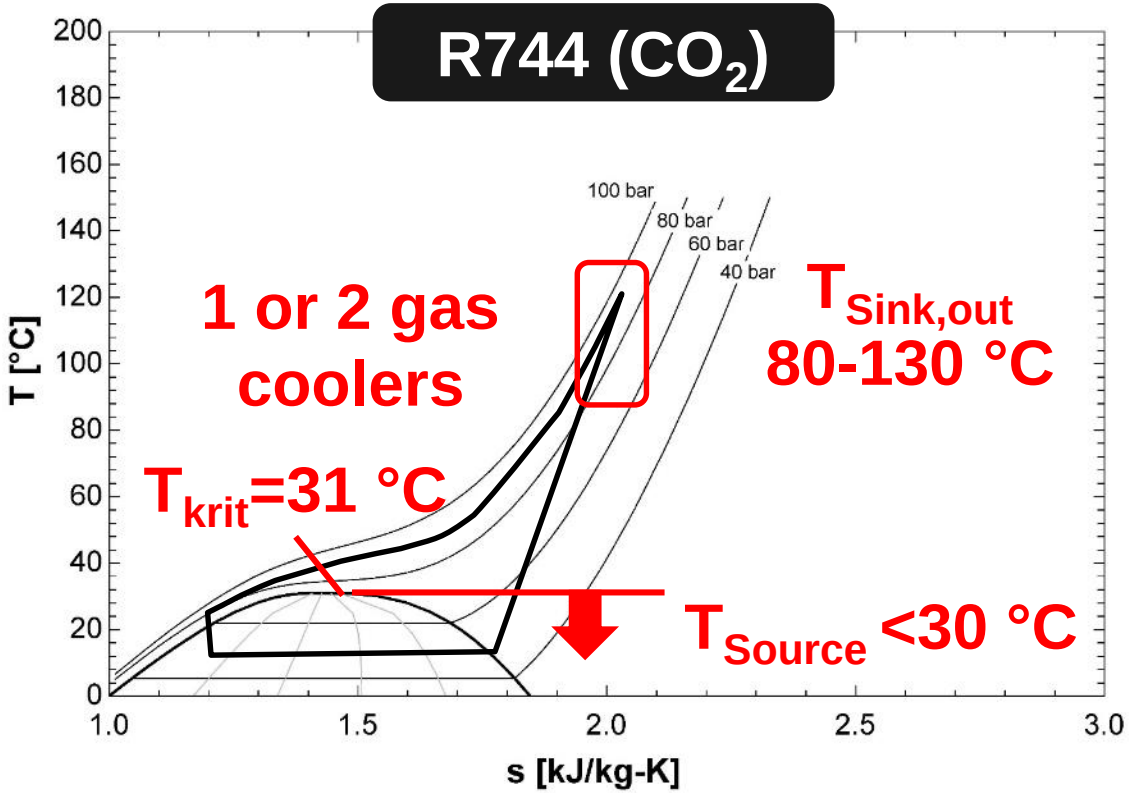
Energy consumption factor **4** x

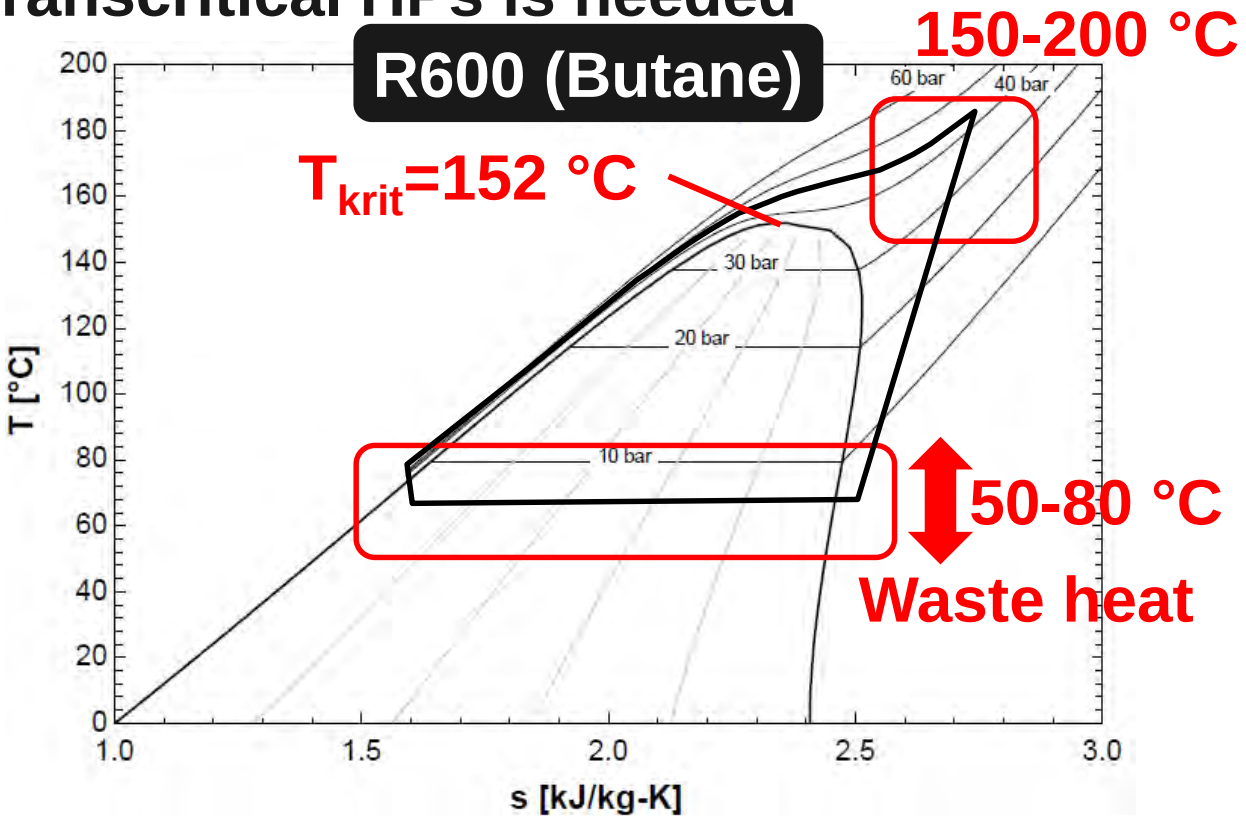
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Transcritical CO_2 vs. Butane cycles

Further research on transcritical HPs is needed





Suitable for simultaneous cooling (<30 °C) and heating (e.g. water or air from 20 to 90 °C)

Suitable for heat sources like waste heat (e.g. flue gas 50 to 80 °C) and producing hot air of 150 to 200 °C

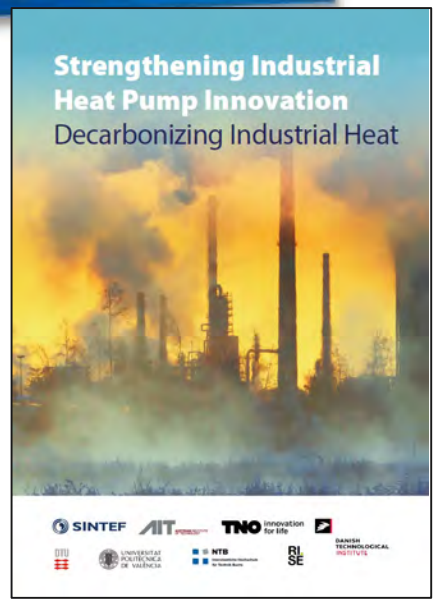
cordin.arpagaus@ost.ch

OST

Zusammenfassung

- **Anwendungspotential für industrielle Wärmepumpen ist gross:** Heißwasser, Heißluft, und Prozeßdampf
- **Zahlreiche Kompressionswärmepumpen** von verschiedenen Herstellern am Markt erhältlich: Vorlauftemperaturen > 90°C (einige > 120 °C, bis max. 165 °C), Rotationswärmepumpe, HTWP im Großmaßstab (MW Leistungsbereich)
- **COP (Effizienz, Leistungszahl) von etwa 4.0 bei 50 K Temperaturhub**, 45% Gütegrad, Heiz- und Kühlanwendung → $COP_{H+K} = 2 \times COP_H - 1$
- **Verschiedene Kreisläufe**: meist 1-stufig, Optimierungen mit IHX und Economizer mit Zwischeneinspritzung in den Kompressor, Parallelschaltung von Kompressoren, Kaskade (R134a/R245fa), Kompressoren: Schrauben, 2-stufige Turbos, Hubkolben (parallel)
- **Wärmepumpen Integration ist von Fall zu Fall stark unterschiedlich:** meist mit Speicher und oft bivalent (z.B. WP für Grundlast, Gaskessel für Spitzenabdeckung und Redundanz)
- **Weltweit hohe Forschungsaktivität:** Vorlauftemperaturen > 100 °C, hauptsächlich DE, AT, CH, FR, NO, NL, JP, KR, und CN
- **Kältemittelentwicklung HFOs oder natürliche:** Trend zu natürlichen Kältemitteln R600 (Butan), R601 (Pentan), R744 (CO_2), R718 (H_2O), R717 (NH_3) und synthetischen HFOs / HCFOs mit niedrigem GWP, wie R1233zd(E), R1336mzz(Z), R1224yd(Z)

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

Danksagung

Ein Grossteil der Ergebnisse ist Teil des

Swiss Competence Center for Energy Research SCCER EIP

der Schweizer Innovationsagentur Innosuisse.

Dank an Innosuisse für die Unterstützung.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Innosuisse – Swiss Innovation Agency

SCCER EIP
EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES

cordin.arpagaus@ost.ch

OST
Ostschweizer
Fachhochschule

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

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