

HOCHTEMPERATUR-WÄRMEPUMPEN FÜR DIE INDUSTRIE

Ersatz für Erdöl und Erdgas?

Thomas Fleckl, Veronika Wilk, Sabrina Dusek, Michael Lauermann, Anton Beck, Gerwin
Drexler-Schmid

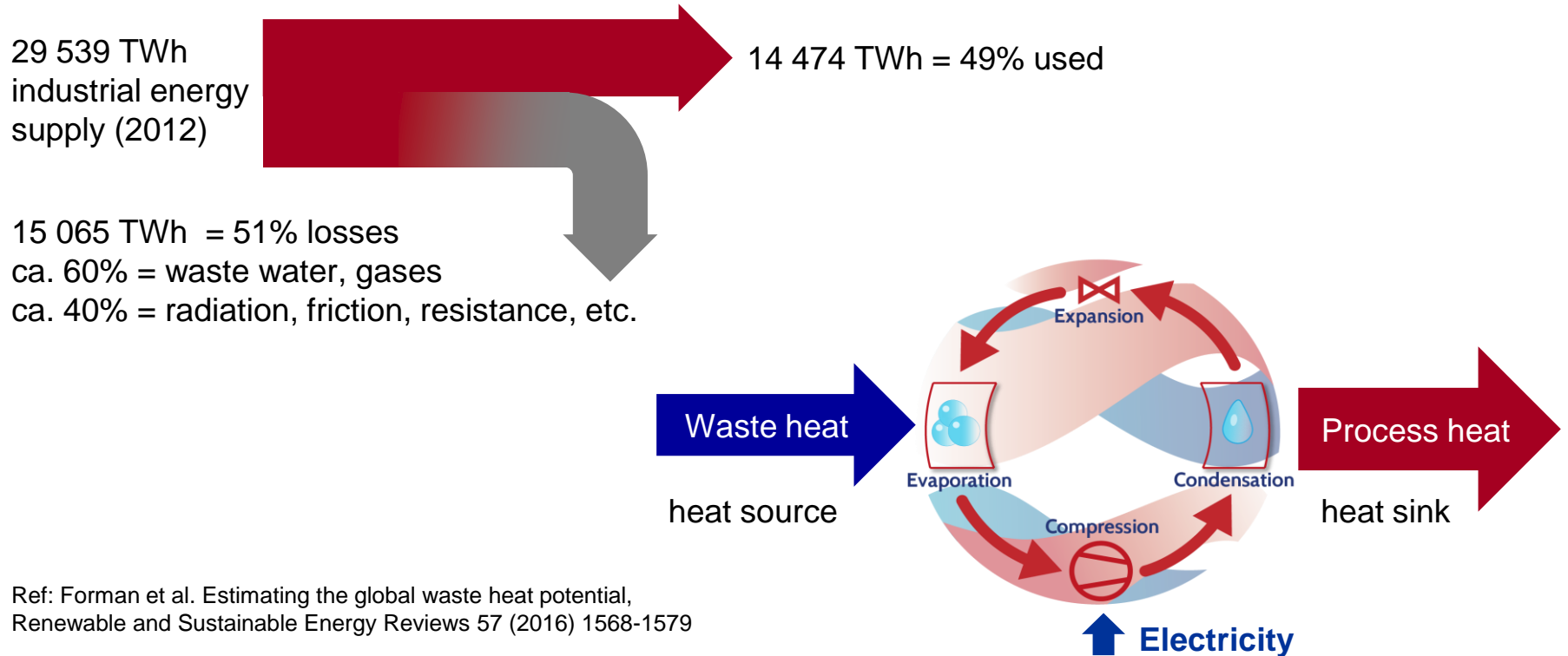


ÜBERSICHT

- Potential von Industriewärmepumpen
- Technologieentwicklung Hochtemperaturwärmepumpen (>100°C Nutzungstemperatur)
 - Stand der Technik, Vergleich unterschiedlicher relevanter Kreisprozesse
- Prozessbewertung und -optimierung
 - Pinchanalyse
 - Methode zur optimalen Integration von Wärmepumpen in dynamischen Prozessen
- Prozessintegration von Wärmepumpen
 - Industrielle Trocknung
 - Dampferzeugung
- Best Practice Beispiele aus Österreich

POTENTIAL VON INDUSTRIEWÄRMEPUMPEN

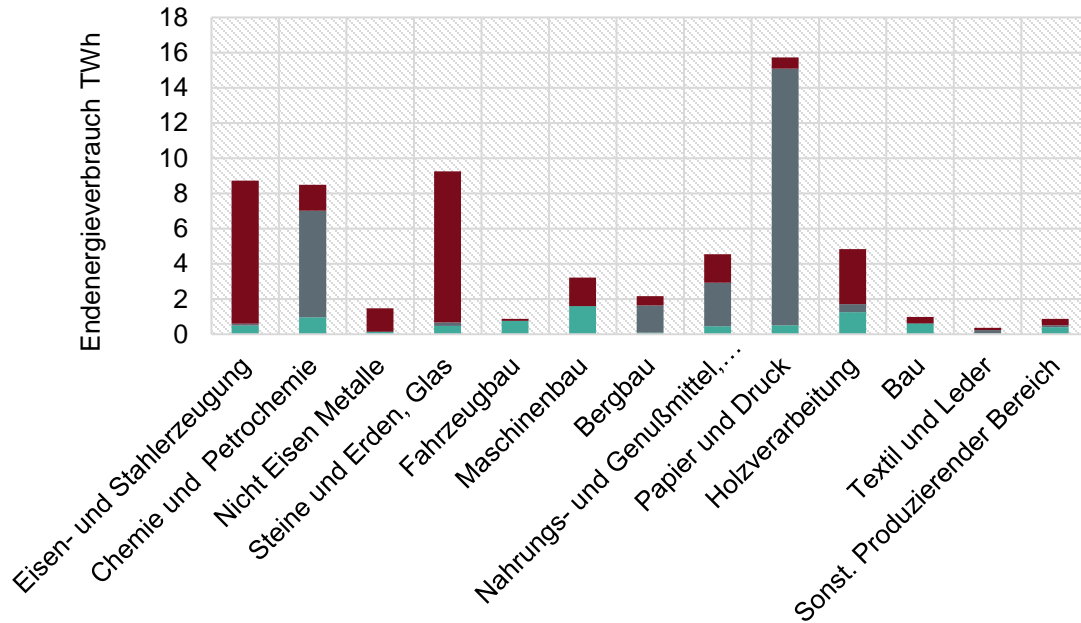
EFFICIENT PROCESSES WITH HEAT PUMPS



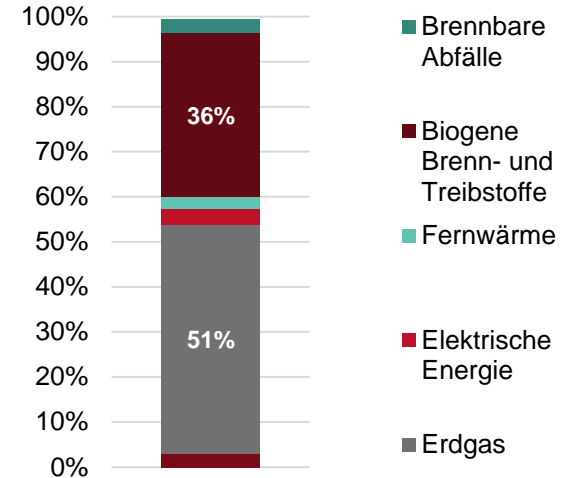
Ref: Forman et al. Estimating the global waste heat potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 1568-1579

DEKARBONISIERUNG DER INDUSTRIE

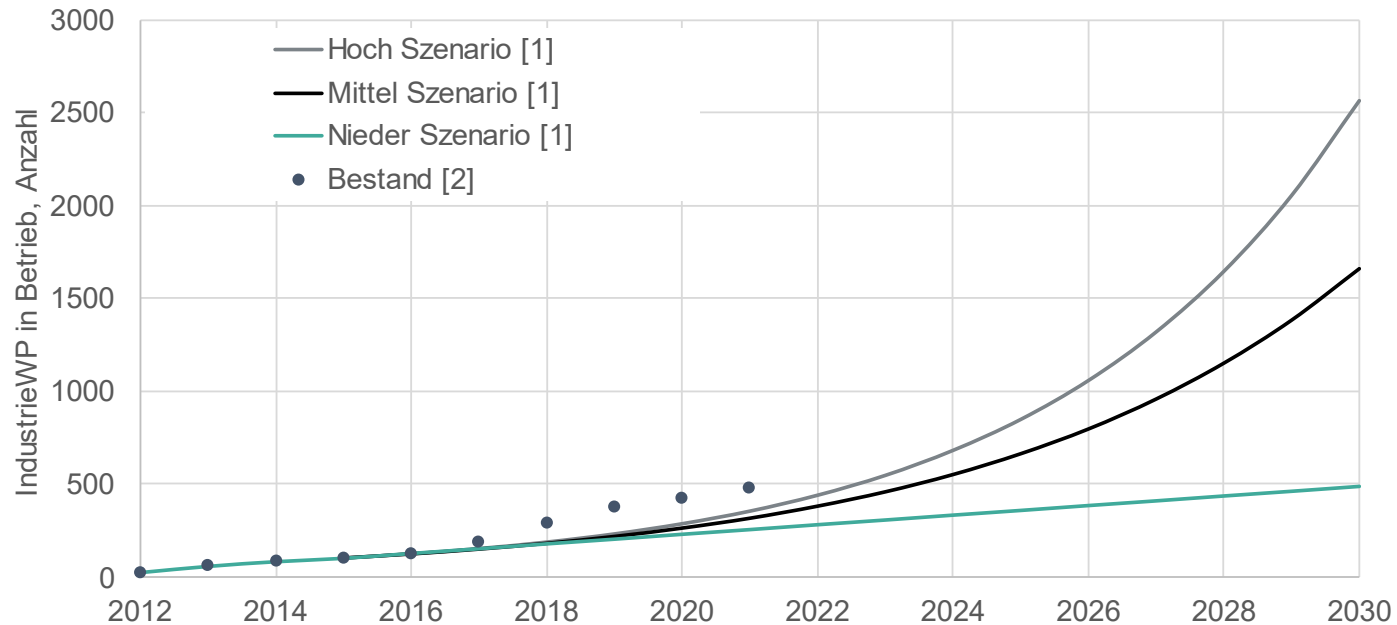
■ Raumtemperatur und Warmwasser ■ Prozesswärme <200 °C ■ Prozesswärme >200 °C



Prozesswärme < 200°C



INDUSTRIEWÄRMEPUMPEN: BESTAND UND SZENARIEN BIS 2030



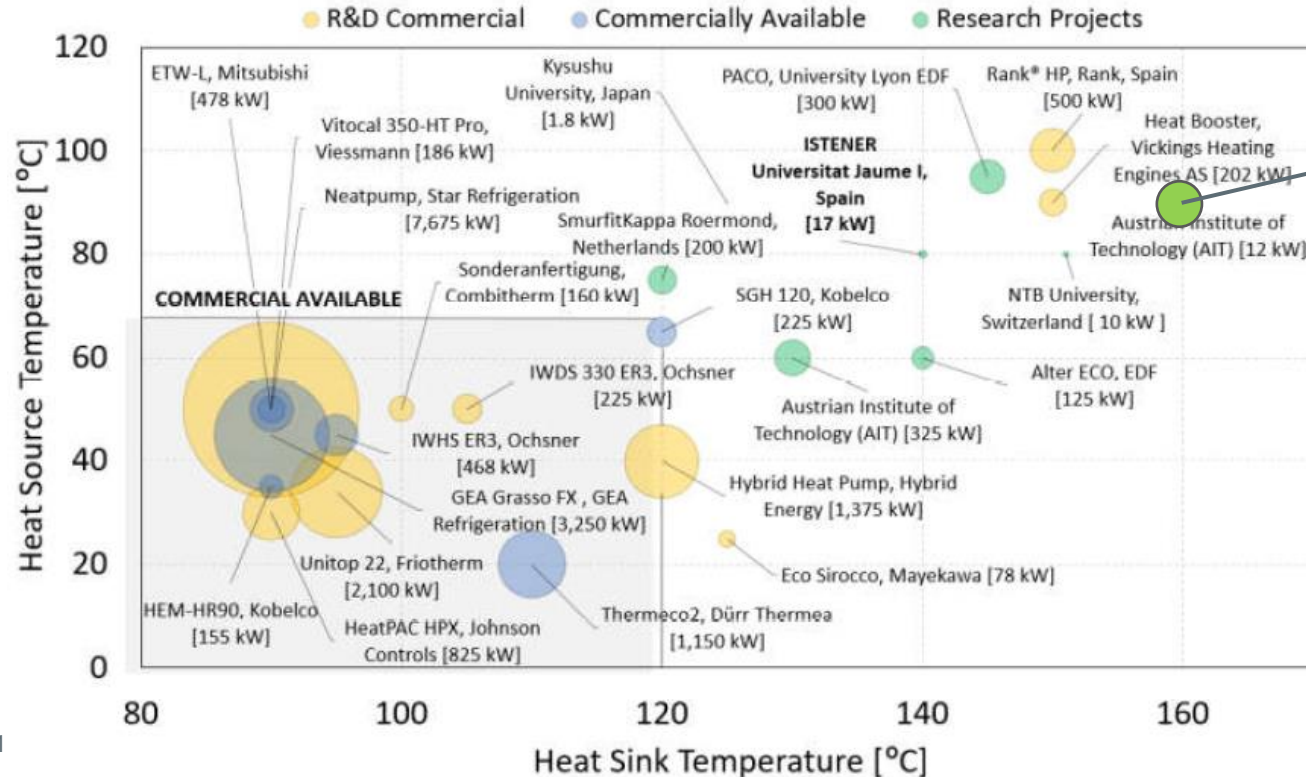
[1] Hartl et al. Österreichische Technologie- und Umsetzungsroadmap für Wärmepumpen, Berichte aus Energie- und Umweltforschung Nr. 8/2016, im Auftrag des BMVIT, Juni 2016

[2] Biermayr et al. Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2021, Berichte aus Energie- und Umweltforschung Nr. 21b/2022, im Auftrag des BMK, Mai 2022

HOCHTEMPERATURWÄRMEPUMPEN

Technologieentwicklung

INDUSTRIEWÄRMEPUMPEN: STATUS QUO



C. Mateu-Royo et al. State-of-the-art of high-temperature heat pumps for low-grade waste heat recovery, XI National and II International Engineering Thermodynamics Congress, Paper Number: 30494, 2019

Overview of development of supplier technologies

The following table gives an overview of the development level of different technologies for HTHPs.

| Supplier | Compressor type | Working fluid | Capacity | T _{max supply} | TRL |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|-----|
| Fuji Electric | Reciprocating | R-245fa | 0.03 MW | 120 °C | 9 |
| Emerson | Scroll and EVI Scroll | R-245fa, R410a, R-718 | 0.03 MW | 120 °C | 6 |
| Mayekawa | Reciprocating | R-744 | 0.1 MW | 120 °C | 8-9 |
| Skala Fabrik | Reciprocating | R-290, R-600 | 0.3 MW | 115 °C | 7 |
| Kobelco Comp. | Piston | R-245fa/R-134a, R-718 | 0.37-0.40 MW | 175 °C | 9 |
| Mitsubishi HI | Twin-screw | R-134a | 0.6 MW | 130 °C | 6-7 |
| ecop | Two-stage centrifugal | ecop fluid 1 | 0.7 MW | 150 °C | 7 |
| Mayekawa | Centrifugal | R-600 | 0.75 MW | 120 °C | 5 |
| Mayekawa | Piston | R-601 | 1.0 MW | 145 °C | 8 |
| GEA | Screw | R-744 | 0.1-1.2 MW | 130 °C | 8 |
| Emerson | Semi-hermetic piston | R-744 | 0.2-0.3 MW | 120 °C | 6-7 |

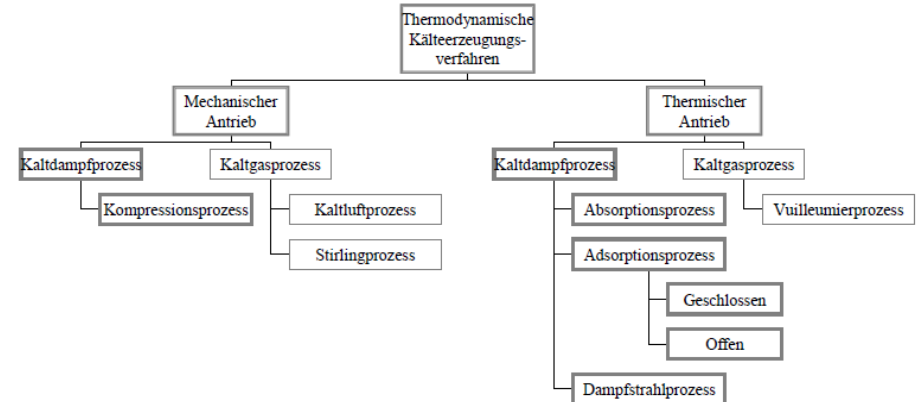
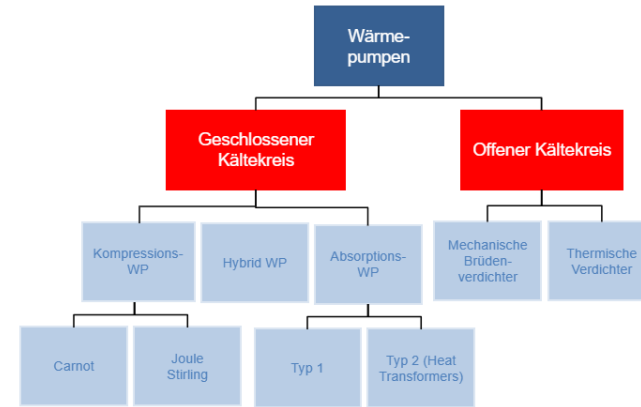
Overview of demonstration cases

The following table gives an overview of performed demonstrations of different technologies for HTHPs.

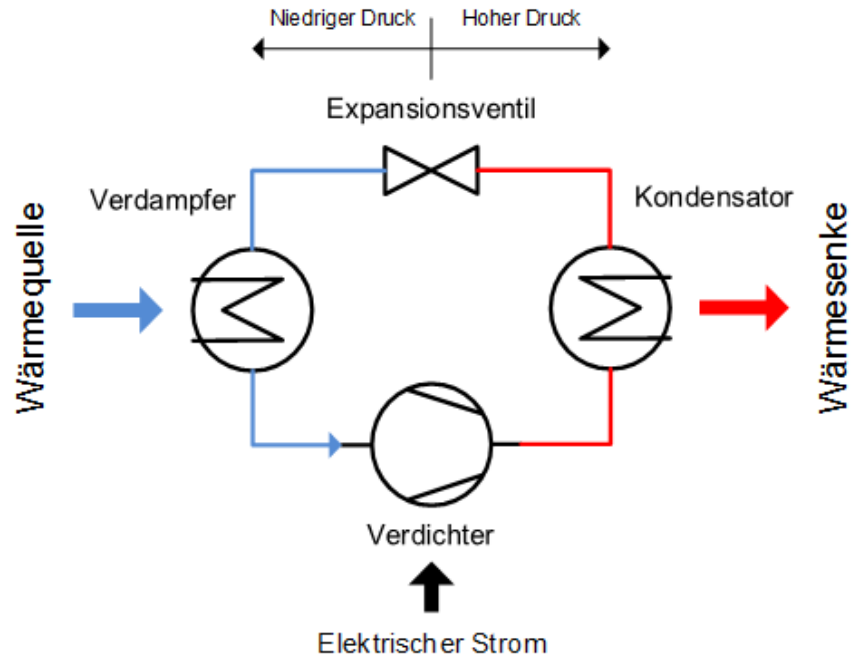
| Supplier | Industry / Process | Source in → out | Sink in → out | Refrigerant | Compressor | Capacity | COP |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|----------------------------|-------------------|----------|-------|
| Mayekawa* | Electronic / Coil drying | 30 °C → 25 °C | 20 °C → 120 °C | R-744 | Piston | 0.1 MW | n. a. |
| AMT/AIT | Minerals / Brick drying | 88 °C → 84 °C | 96 °C → 121 °C | R-1336mzz(Z) | Piston (8 compr.) | 0.3 MW | 4.0 |
| SkaleUP | Dairy / Process water | 20 °C → 12 °C | 95 °C → 115 °C | LT-C: R-290 HT-C: R-600 | Piston | 0.3 MW | 6.5 |
| n. a.* | Beverage / Alcoholic distillation | 78 °C → 75 °C | n. a. → 140 °C | n. a. | n. a. | 0.4 MW | n. a. |
| AMT/AIT | Food / Starch drying | 76 °C → 72 °C | 96 °C → 138 °C | R-1336mzz(Z) | Screw | 0.4 MW | 4.0 |
| Rotrex, Epcon | Sewage / Sludge drying | n. a. → 100 °C | n. a. → 146 °C | R-718 | Turbo (2 stages) | 0.5 MW | n. a. |
| MHI | Electronic / Coil drying | 55 °C → 50 °C | 70 °C → 130 °C | R-134a | Centrifugal | 0.6 MW | n. a. |

TECHNOLOGIEPFADE

- Unterschiedliche Darstellungsformen
 - Ausführung
 - Geschlossen/offen
 - Antriebsform
 - Mechanisch
 - Thermisch
 - Alternative Verfahren
- Vielfalt von Technologiepfaden
- Nähere Betrachtungen für Hochtemperaturanwendungen (Nutzungstemperatur $>100^{\circ}\text{C}$)
 - Kompressions-WP
 - Carnot-Kreislauf
 - Joule-Kreislauf
 - Absorptions-WP



KOMPRESSIONS-WÄRMEPUMPE / KÄLTEMASCHINE

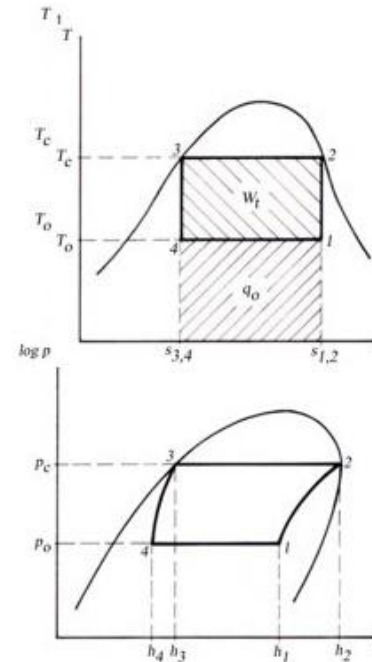


LINKSDREHENDER CARNOTPROZESS

- Zustandsänderungen
- 1 → 2 isentrope Verdichtung
- 2 → 3 isotherme Verflüssigung
- 3 → 4 isentrope Expansion
- 4 → 1 isotherme Verdampfung
- Niedrigster Arbeitsaufwand
- Idealer Vergleichsprozess
- Effizienz = Nutzen / Aufwand
 - Wärmepumpen

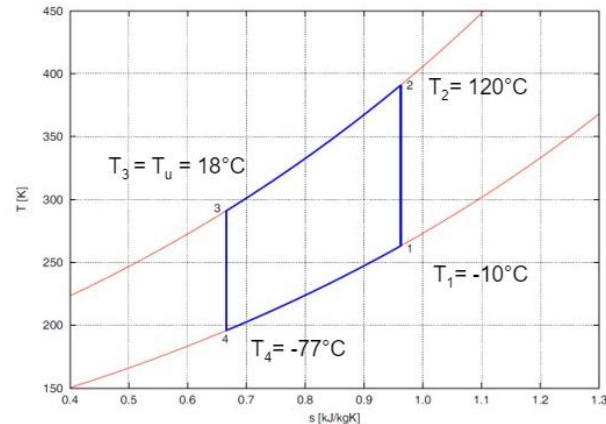
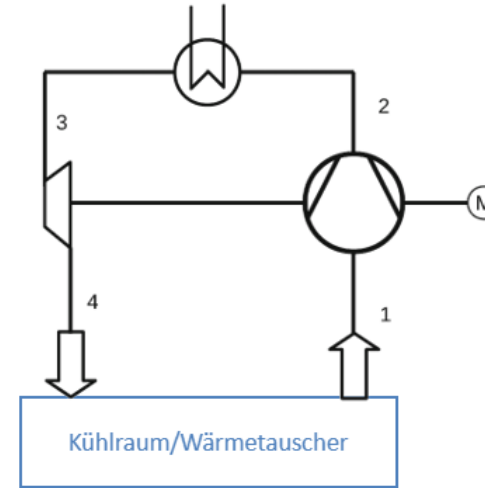
$$COP_{Carnot} = \frac{Q_{Heiz}}{P_{el}} = \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

$$JAZ_{Heiz} = \int \frac{\dot{Q}_{Heiz}}{P_{el}} = \frac{E_{Heiz}}{E_{el}}$$



JOULE PROZESS

- Kaltgasprozess
- keine Phasenwechsel
- Gas als Arbeitsmedium:
 - Luft
 - Edelgase

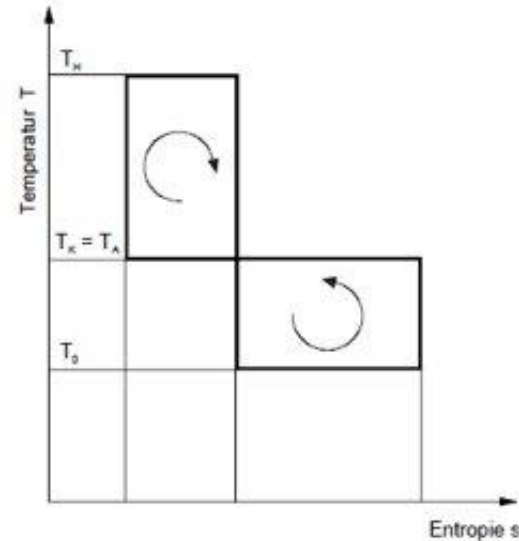


- 1-2: adiabate, reversible Verdichtung
 2-3: isobare Wärmeabgabe
 3-4: adiabate, reversible Expansion
 4-1: isobare Wärmeaufnahme

SORPTIVE KREISPROZESSE

- Kälteerzeugung zwischen drei Temperaturen (Sorptionskältemaschine)
- Wärmeverhältnis Carnot-Prozess
- Kombination Wirkungsgrad Wärmekraftmaschine (rechtsläufig) mit Leistungszahl Kältemaschine (linksläufig)

$$\zeta_c = \frac{(T_H - T_K)}{T_H} \cdot \frac{T_0}{(T_K - T_0)} = \eta_c \cdot \varepsilon_c \quad [-]$$



T-s-Diagramm eines Carnot-Prozesses zwischen drei Temperaturen

VERGLEICH DER KREISPROZESSE (I)

- Anwendung bestimmt den bevorzugten Thermodynamischen Kreisprozess
 - Einbindung ins Gesamtsystem (inkl. Wirtschaftlichkeit) berücksichtigen (siehe Prozesseinbindungen)
 - Temperaturspreizungen der Wärmequelle und der Wärmesenke
 - Hohe Temperaturspreizungen für Joule-Prozess besser
 - Die meisten Anlagen basieren auf dem Carnot-Prozess (nicht nur bei der Hochtemperatur-WP), Vorteile auch beim Wärmeübergang des Kaltdampfprozesses an die Sekundärseite
- Kältemittel
 - Vorteile bei Joule- und Sorptionsprozess in Bezug auf GWP
 - Für Hochtemperaturanwendungen verfügbar

VERGLEICH DER KREISPROZESSE (II)

- Verdichter (Carnot/Joule):
 - Temperaturbeständige Materialien
 - Schmierung
 - Anforderung an den Verdichter → Motorkühlung!
- Sorptive Kreisprozesse
 - Benötigen kostengünstige Wärmequelle auf möglichst hohem Temperaturniveau zum Antrieb
 - Geringere Leistungszahlen als Carnot
 - Höherer Rückkühlbedarf, wenn „mittleres Temperaturniveau“ nicht genutzt werden kann (bei Kälteanwendungen)
 - Keine bewegten Teile, aber Korrosionsthemen bei höheren Temperaturen
- Generell gilt:
 - Wärmequellen mit hohen Temperaturen erwünscht
 - Geringerer Lift → höhere Effizienz
 - Bei hohen Lifts entsprechende Kältekreisconfigurationen (z.B. Verwendung von Ejektoren)

PROZESSBEWERTUNG UND OPTIMIERUNG

POTENTIALE FÜR WÄRMEPUMPEN

Fallstudien in Industriebetrieben

Wärmequellen:

- Abwasser: 20 – 40°C, teilweise verunreinigt
- Abluft: 60 – 80°C, hoher Feuchtegehalt, verunreinigt
- Abwärme aus Kälteanlagen: ca. 30°C
- Abwärme aus Prozesskühlung (Kühlwasser): ca. 50°C

Wärmebedarf:

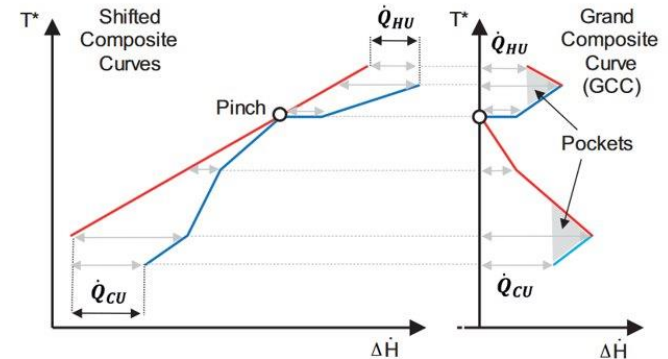
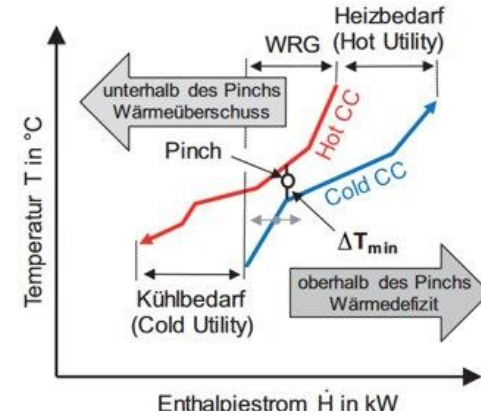
- Prozesswasser: 50 – 80°C
- Fernwärme 80-140°C
- Dampf: 105 – 210°C
- Luftvorwärmung, Speisewasservorwärmung

Leistungsbedarf:

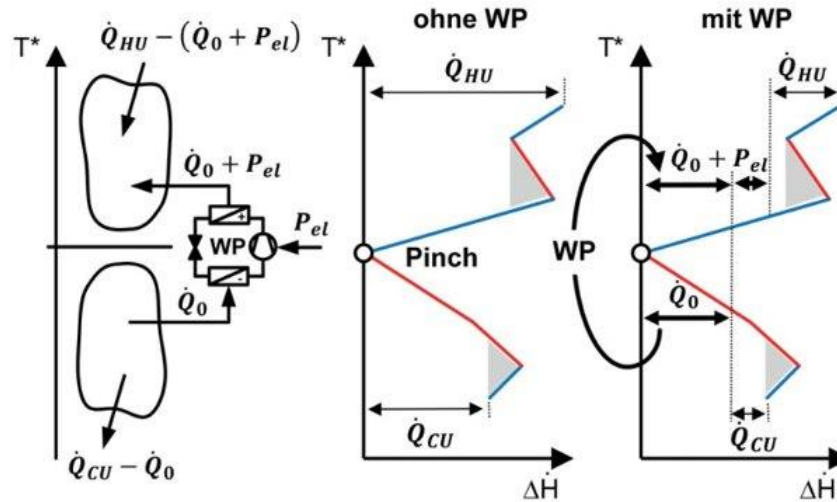
- bis in den MW Bereich
- Es gibt zwei „Herstellerbereiche“ für unterschiedliche Leistungsgrößen,
 - >5-10 MWth: Groß- und Sonderanlagenbau, Einzelfertigungen, hat sich von der Prozessgasverdichtung her entwickelt
 - < 5 MWth: Anlagenbau, näher einem „Massenmarkt“, hat sich von der Kältetechnik her entwickelt

PINCHANALYSE

- Integration von Wärmepumpen in komplexen industriellen Prozessen mit einer Vielzahl an warmen und kalten Strömen
- Kategorisieren der zu erwärmenden und abzukühlenden Prozessströme in Verbundkurven → Cold Composite Curve und Hot Composite Curve, folgt Pinch Point
- Erstellen der „Shifted Composite Curves“ durch vertikales Verschieben und daraus folgen die „Grand Composite Curves“, die je Temperaturstufe die benötigte Nettowärme darstellen
- Bereiche der „Pockets“ benötigen keine externe Heizung oder Kühlung
- Wärmepumpenintegration muss über den Pinchpoint erfolgen



WÄRMEPUMPENINTEGRATION

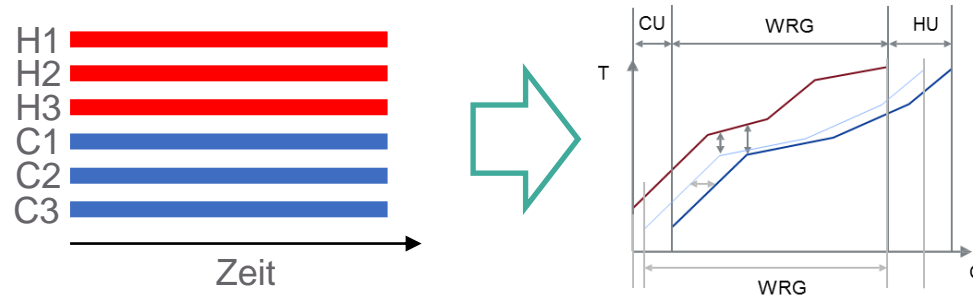


PINCHANALYSE

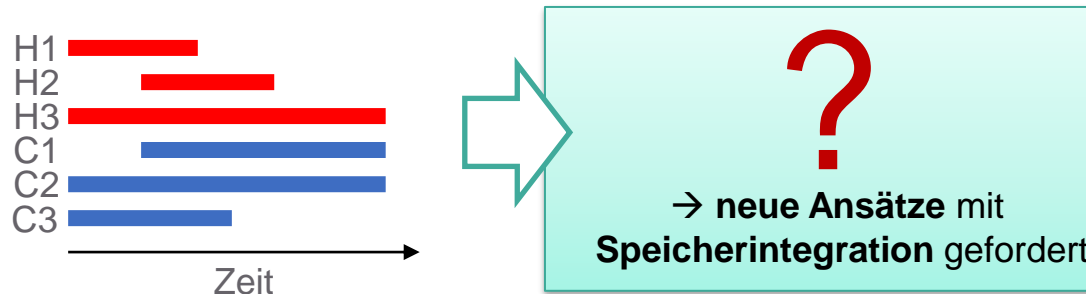
- Anmerkungen
 - Gute Datenlage notwendig
 - Für größere Unternehmen interessant, da Analyse zeit- und kostenaufwendig ist.
 - Örtliche Systemgrenzen sind zu definieren
 - Keine zeitliche Auflösung, d.h. ist eine Momentaufnahme
 - Keine Aussage über Kosten (u.a. für Leitungsbau örtlich getrennter Wärmeströme, verunreinigte Medien)

IDENTIFIKATION VON WÄRMETAUSCHERNETZEN

- **Kontinuierliche Prozesse:** Bekannter Ansatz **Pinch-Design-Method**

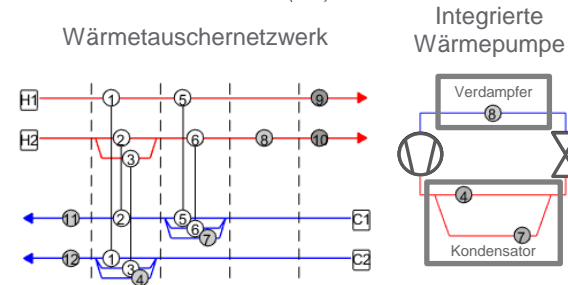
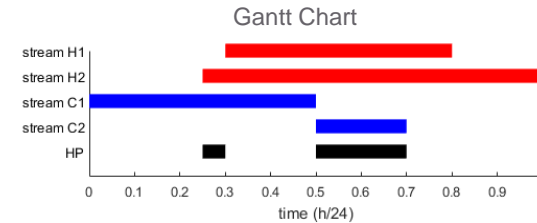
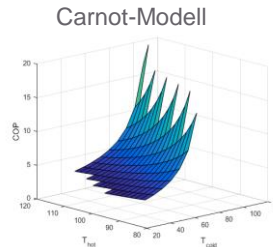


- **Nicht-kontinuierliche Prozesse** (z.B. Brauereien, Molkereien, etc.):

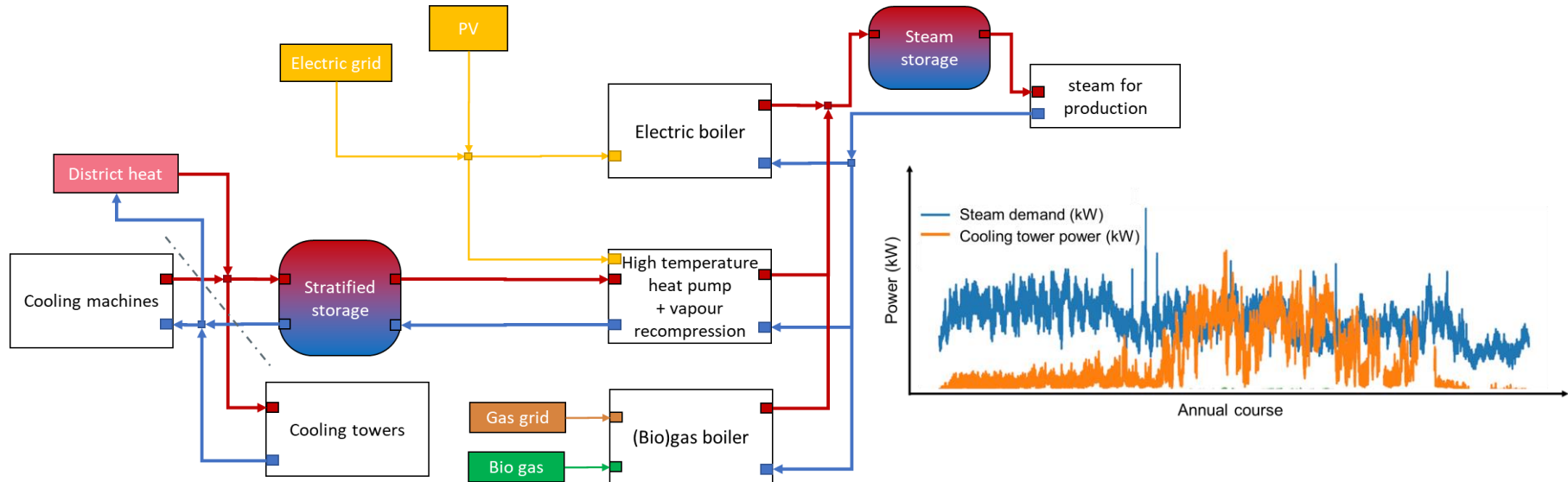


WÄRMEPUMPENINTEGRATION MATHEMATICAL PROGRAMMING

- Mathematical Programming ermöglicht
 - kostenoptimierte Wärmepumpenintegration
 - in diskontinuierliche Prozesse
 - Retrofit- und Greenfieldintegration
 - Berücksichtigung von Einschränkungen durch Rahmenbedingungen (z.B. maximale elektrische Anschlussleistung des Standortes)
- Kostenfaktoren für Wärmepumpe
 - Wärmeübertrager (Kondensator, Verdampfer)
 - Maximalleistung
 - Energiekosten
- Wärmepumpenmodelle
 - Carnot-Modell
 - Kennlinien-basierte Modelle

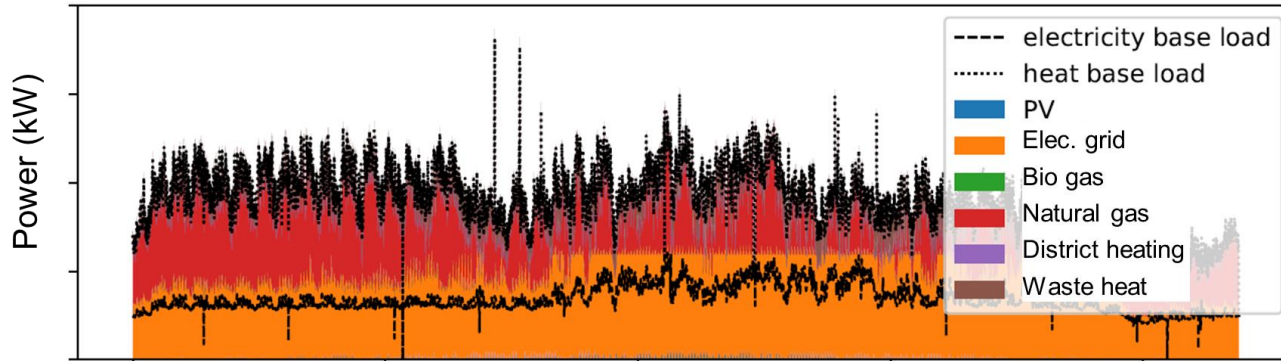


BEISPIELPROZESS: DAMPFERZEUGUNG MIT WÄRMEPUMPEN UND SPEICHERINTEGRATION

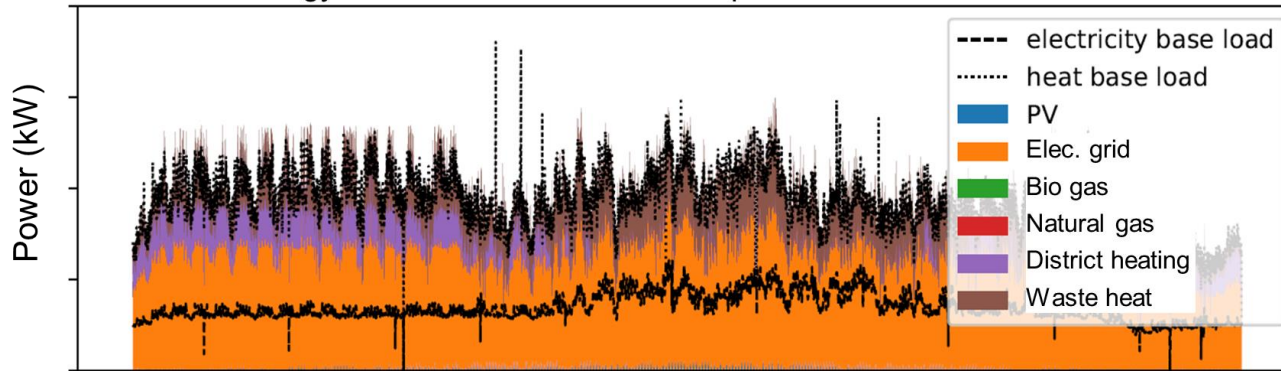


ERGEBNISSE

Energy carrier mix for 42 % cost optimised decarbination

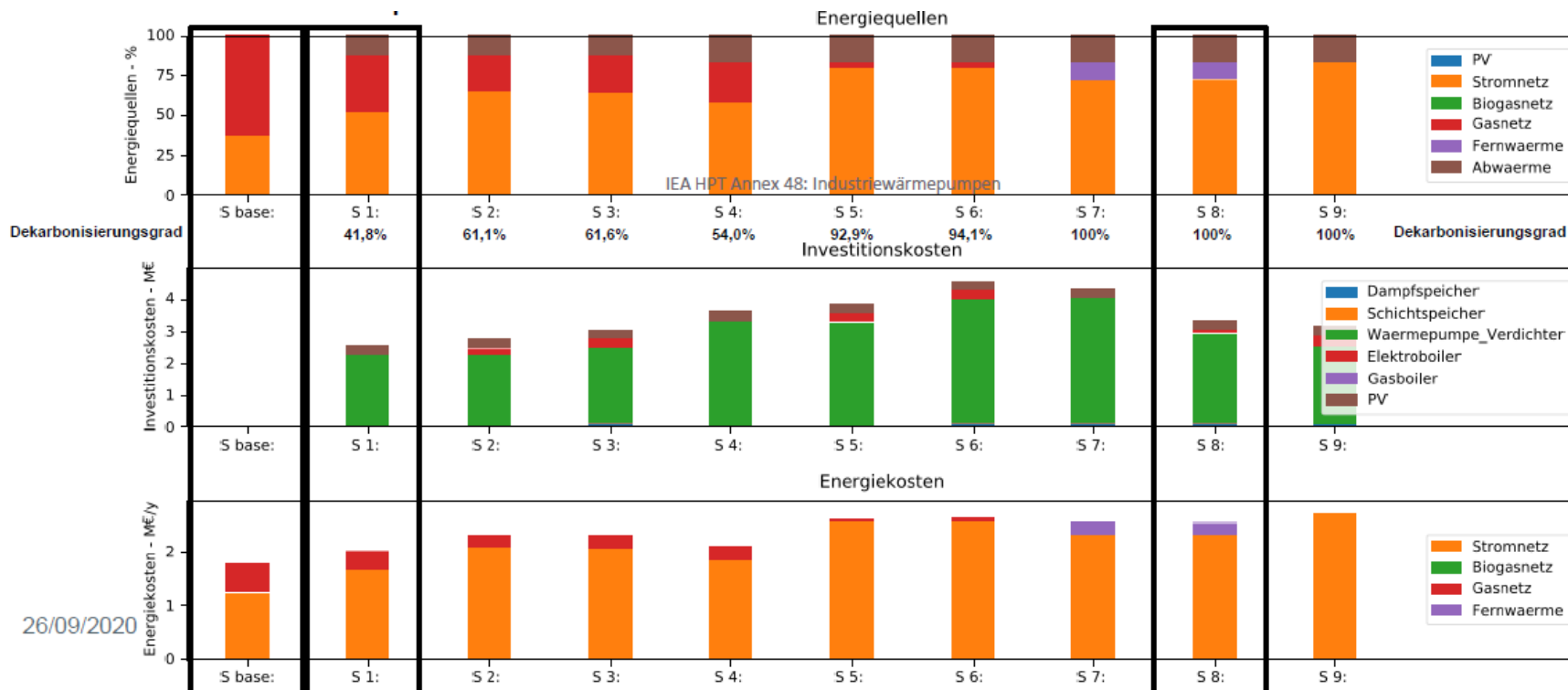


Energy carrier mix for 100 % cost optimised decarbination



Annual course

ENERGIEMIX, INVESTKOSTEN UND ENERGIEKOSTEN, DEKARBONISIERUNGSGRAD



PROZESSINTEGRATION VON WÄRMEPUMPEN

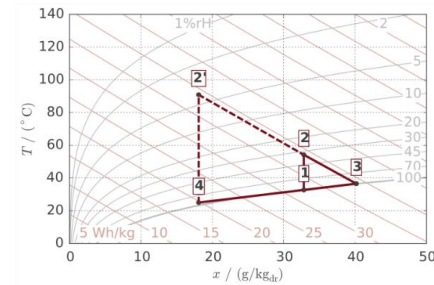
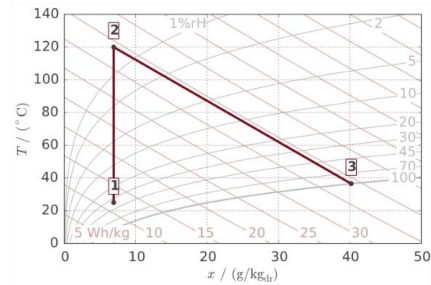
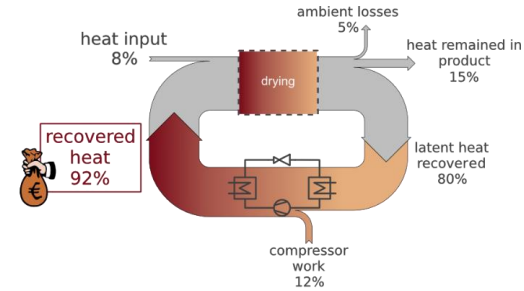
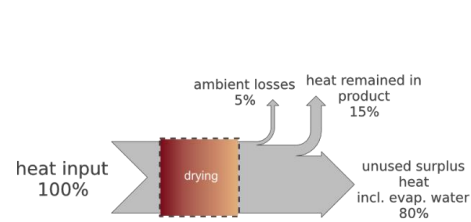


PROZESSINTEGRATION

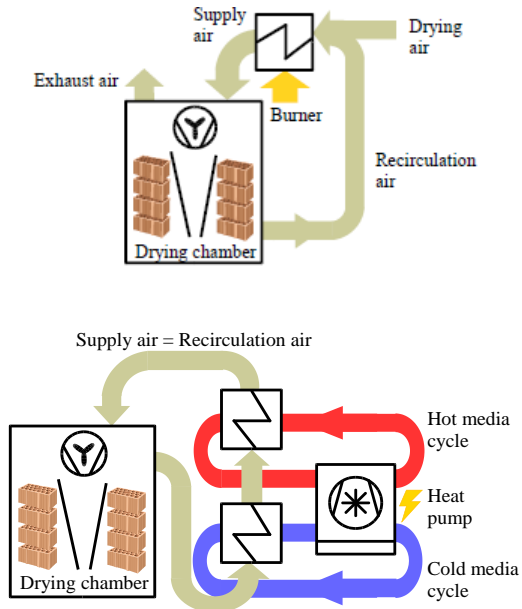
- Zusammenspiel der Prozessbewertung und des Technolgiegedesigns
- Methoden:
 - Prozessebene (siehe voriges Kapitel)
 - Technologieebene
 - Dynamische Simulationsmethoden für komplexere Systeme (Kältekreisconfiguration, Teillastverhalten, Hydraulik, Regelung etc.)
 - Design- und Betriebsoptimierung verschränken sich zunehmender
- Beispiele der Prozessintegration mit hohem Potential in industriellen Anwendungen
 - Trocknungsanwendungen
 - Wärmepumpe kann bis zu 90% Energieeinsparungen am Prozess erzielen
 - Dampferzeugung

BEISPIELE PROZESSINTEGRATION

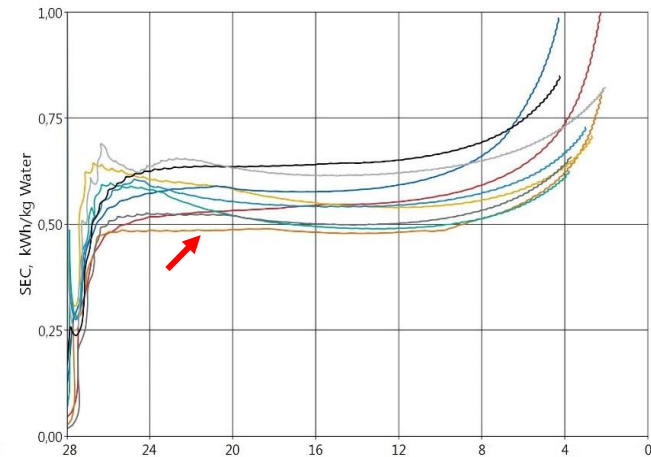
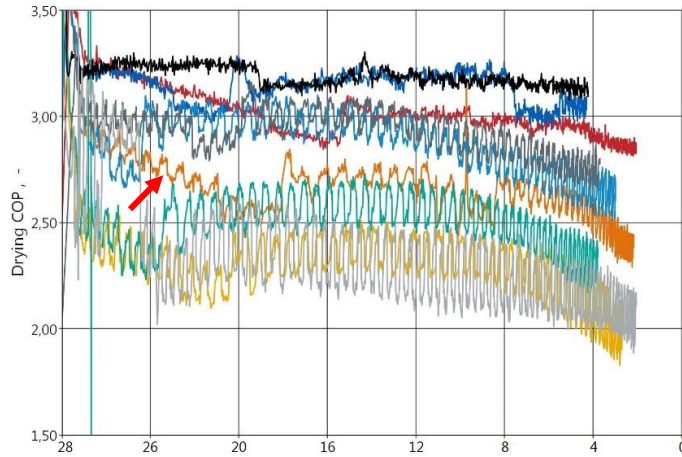
Industrielle Trocknung



BEISPIEL: ZIEGELTROCKNUNG



COP VS. TROCKNUNGSWIRKUNGSGRAD



PROZESSINTEGRATION VON WÄRMEPUMPEN

- Die Integration von Wärmepumpen kann eine Rückwirkung auf den Prozess verursachen → Einfluss auf die Gesamtoptimierung und die wirtschaftliche Darstellung der WP- Integration
- Optimierung des Gesamtsystems (z.B. SEC (specific energy consumption) bei Trocknung) ist nicht automatisch beim höchsten COP der Wärmepumpe erreicht.
 - Betriebsweise der Ventilatoren (=Wärmeübergang auf Ziegeloberfläche+ Druckverluste) hat einen Einfluss
 - Neue Anforderungen an den Prozess durch die Integration von Wärmepumpen (Dichtheit der Trockenkammer, verschiebt Taupunkt)
- Modelle können sowohl für eine Gesamtoptimierung als auch für eine Optimalsteuerung (bei Produktänderungen) herangezogen werden (sowohl im Design als auch im Echtzeitbetrieb, Entscheidungsfindung für Anlagenfahrer)



WP (geschlossener Kreis)

WP (offener Kreis)

Ziegelrocknung

Stärketrocknung

Bioschlammrocknung



Wienerberger AG
Uttendorf (AT)

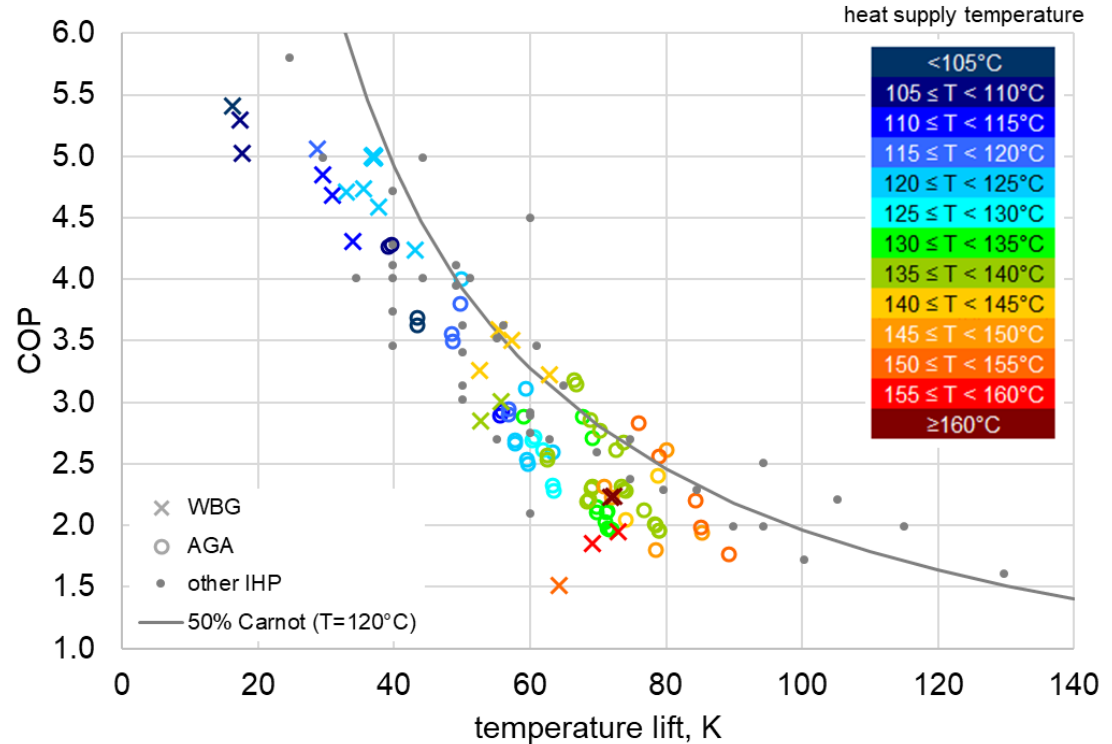
AGRANA Stärke GmbH
Pischelsdorf (AT)

Scanship A/S
Drammen (NO)

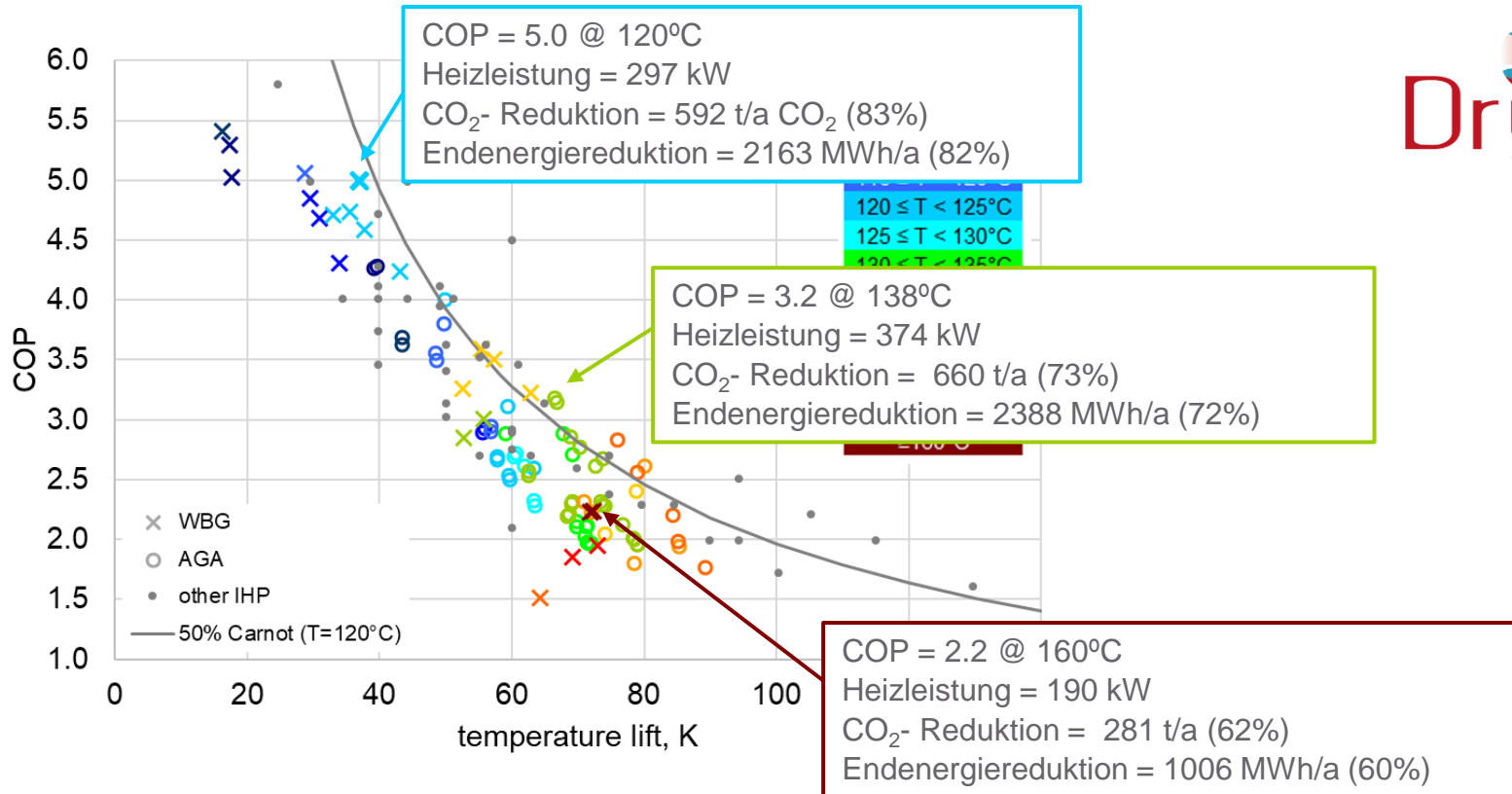
DRYFICIENCY



- Betriebsstunden:
WBG: 4020 h
AGA: 4006 h
- Jeder Betriebspunkt repräsentiert
> 10 Stunden stationären Betrieb
- other IHP from: Arpagaus et al.
High temperature heat pumps:
Market overview, state of the art,
research status, refrigerants, and
application potentials, Energy
(152), p.985-1010, 2018.

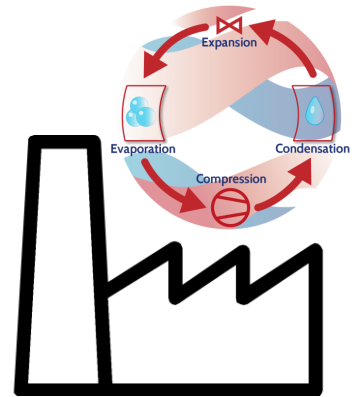


DRYFICIENCY

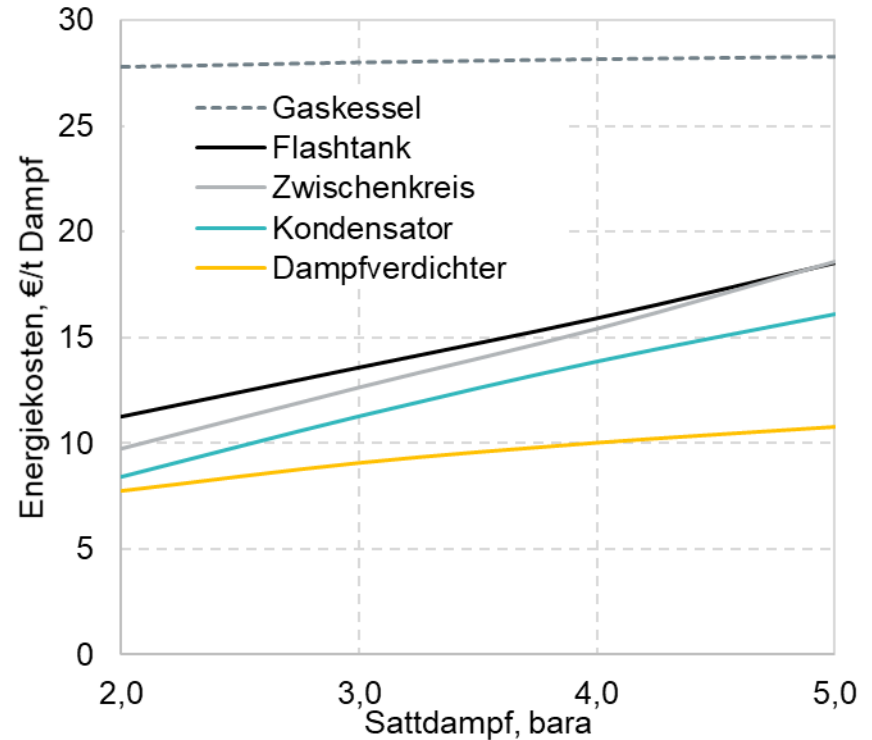
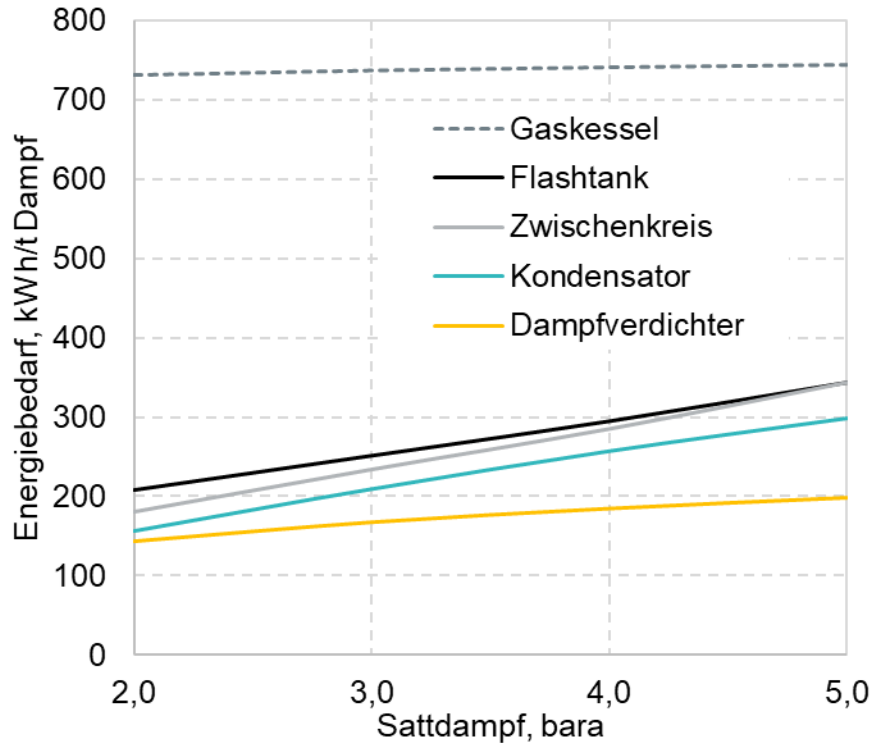


DAMPFERZEUGUNG MIT WÄRMEPUMPEN

- Dampf ist einer der wichtigsten Energieträger in der Industrie
- Dampf wird sowohl zur Wärmeübertragung eingesetzt, als auch als Reaktionsmittel
- Nutzung von Abwärme zur Erhöhung der Energieeffizienz
- Integration in bestehende Dampfnetze → großes Multiplikationspotential



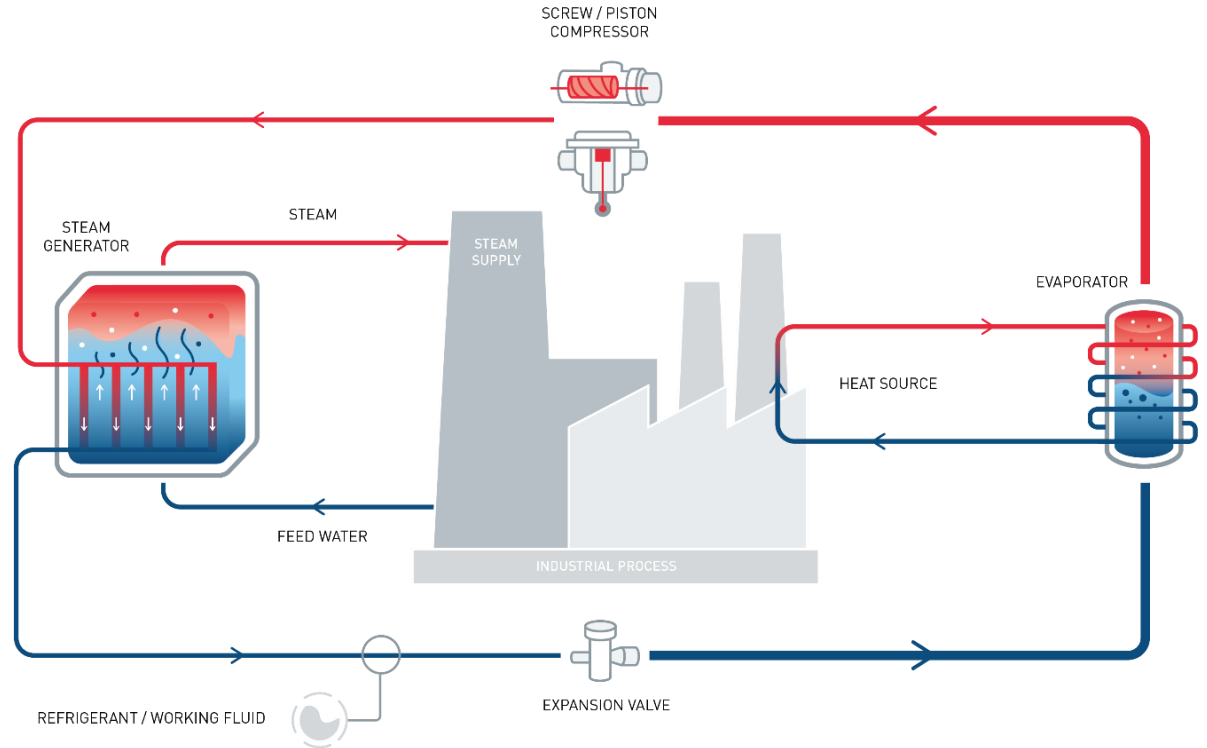
TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE



DAMPFERZEUGUNG MIT WÄRMEPUMPE

www.bambooproject.eu

BAMBOO



<https://www.nefi.at/leap/>

- Integration einer dampferzeugenden Wärmepumpe bei Lenzing AG und Austrotherm GmbH
- Effiziente Technologie zur Abwärmenutzung
- Reduktion der CO₂-Emissionen um bis zu 66%
- Zukunftssichere Prozesswärmeversorgung mit Energiekostenreduktion
- Konzept für full scale Wärmepumpensysteme
- Verbreitung von industriellen Wärmepumpen und Entwicklung neuer Geschäftsmodelle



© Lenzing AG
 Photographer: F. Neumayr



© Austrotherm GmbH

Das Projekt LEAP (880756) ist eines im Zuge der NEFI Vorzeigeregion vom Klima- und Energiefonds geförderteres Projekt.

ANWENDUNGSBEISPIELE

Food, metal, plastics, power plants...



LEBENSMITTELINDUSTRIE

Molkerei

- Berglandmilch eGen / Tirol Milch Wörgl
- Gemeinschaftsprojekt mit den Stadtwerken Wörgl
- Installiert von Frigopol im Jahr 2015

- 3 Wärmepumpen mit einer gesamten
 - Kälteleistung: 3,2 MW
 - Heizleistung: 4,2 MW

- Wärmequelle: Rauchgaskondensation und Kältemaschinen, bis zu 45°C
- Wärmesenke: 78°C, für Fernwärme



Photo: Frigopol Hochtemperatur-Wärmepumpen, <http://www.frigopol.com/wp-content/uploads/54b8ce0cdfdd6.pdf>

Further details: A. Baumhake, Frigopol Kälteanlagen GmbH, www.frigopol.com

LEBENSMITTELINDUSTRIE

Brauerei

- Puntigamer
- C&P Immobilien AG
- KELAG Energie&Wärme GmbH

2 Wärmepumpen mit einer Gesamtheizleistung von 1220 kW (Frigopol, installiert in 2018)

- Wärmequelle: Ammoniak-Kältemaschine, 14-25°C
- Wärmesenke: 46 und 75°C, Wohngebiet (Brauquartier Puntigam)



Photo: <https://www.puntigamer.at/brauereifuehrung/#lg=1&slide=6>, 30.05.2018

Koglbauer, Zanker, District heating by heat recovery from the brewing process of the brewery Puntigam, ISEC 2018, Graz, p118-124.

KUNSTSTOFFINDUSTRIE

Spritzguß

- Bergs Kunststofftechnik GmbH
- Ochsner Energietechnik GmbH

1 Wärmepumpe mit einer
Gesamtheizleistung von 110 kW (2010)

- Wärmequelle: Prozessabwärme
(Kühlwasser), 10-20°C
- Wärmesenke: 60°C,
Heizungsanwendungen



KRAFTWERK

Wien Energie

Kraftwerk Simmering (installierte Leistung von 1,2 GWel / 1 GWth)

Inbetriebnahme Ende 2018

2 Wärmepumpen mit einer Gesamtheizleistung von 27-39 MW

- Wärmequelle: Kühlkreislauf der Kraftwerke, auch Flusswasser möglich, 6-27°C
- Wärmesenke: Fernwärme, bis zu 95°C



Stahl- und Walzwerk

- Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH
- Energie Graz GmbH & Co KG

2 Wärmepumpen (Friotherm) mit einer Gesamtheizleistung von 11 MW, R1234ze

- Wärmequelle:
Walzwasserwirtschaftskreis (Kühlwasser für die Walzstraße), 29°C
- Wärmenutzung: Fernwärme mit bis zu 95°C Vorlauftemperatur



Biomasseheizkraftwerk Klagenfurt-Ost

- Bioenergie Kärnten
- SOLID
- Riegler & Zechmeister

Absorptionswärmepumpe mit H₂O/LiBr mit bis zu 20 MW Heizleistung (EBARA, seit 2017)

- Wärmequelle: Rauchgaskondensation, 45/35°C
- Wärmenutzung: 60/70°C
- Antriebstemperatur: 130/120°C



Photo: <https://www.solid.at/de/referenzen/absorptionswaermepumpe>
Link: www.bioenergie-kaernten.at

Further information: M. Jeilter, Riegler & Zechmeister GmbH,
M. Schuber, S.O.L.I.D, Gesellschaft für Solarinstallation und Design GmbH

Fleisch- und Wurstverarbeitung

- F. Krainer
- AMT Kältetechnik GmbH

CO₂ Wärmepumpe seit 2018,
Kühlleistung 600 kW, Heizleistung 800 kW

- Wärmequelle: Sole zur Kühlung von Produkten und Rohstoffen, -6°C
- Wärmenutzung: Warmwasser für Reinigung, 60°C

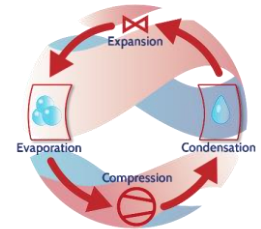


SCHLUSSFOLGERUNGEN ANWENDUNGSBEISPIELE

- rund 70 Beispiele für Industrierärmepumpen in Österreich
- Lebensmittelindustrie
 - gleichzeitiges Heizen und Kühlen
 - einige 10 – 100 kW Heizleistung, zumeist interne Wärmenutzung (Heizung)
- Kraftwerke, die Fernwärme liefern
 - Rauchgaskondensation
 - Absorptions- und Kompressionswärmepumpen
- Industriebetriebe, die Fernwärme liefern
 - meist im MW Bereich, Vorlauftemperaturen von 60 - 95°C
- Effizienzsteigerung der Prozesse und Vermeidung von CO₂ Emissionen

SCHLUSSFOLGERUNGEN GENERELL

- Zunehmendes Interesse der Industrie an industriellen Wärmepumpen
 - Industrie erwartet hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bzw.
 - kurze Amortisationszeiten
 - Alternativen zu Erdgas
- Lösungen der technologischen Herausforderungen für Hochtemperaturanwendungen notwendig:
 - geeignete Kältemittel,
 - Wärmequellen mit hohen Temperaturen,
 - temperaturbeständige Materialien und Komponenten
- Industrielle Wärmepumpen
 - ermöglichen wirtschaftliche und ökologische Vorteile bzw.
 - erhöhen die Effizienz vor Ort und tragen zur Dekarbonisierung bei.
 - Am Markt verfügbare Technologie für bestimmte Temperaturbereiche
 - Demonstrationsprojekte für neue Entwicklungen



THANK YOU!

Dr. Thomas Fleckl

Sustainable Thermal Energy Systems
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 2 | 1210 Vienna | Austria
Thomas.fleckl@ait.ac.at