



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FAKULTÄT
MASCHINENWESEN



Industrieworkshop ANKIP – Auswahlkriterien für die Abwärmenutzung

Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert
Hochschule Zittau/Görlitz, 16.10.2023



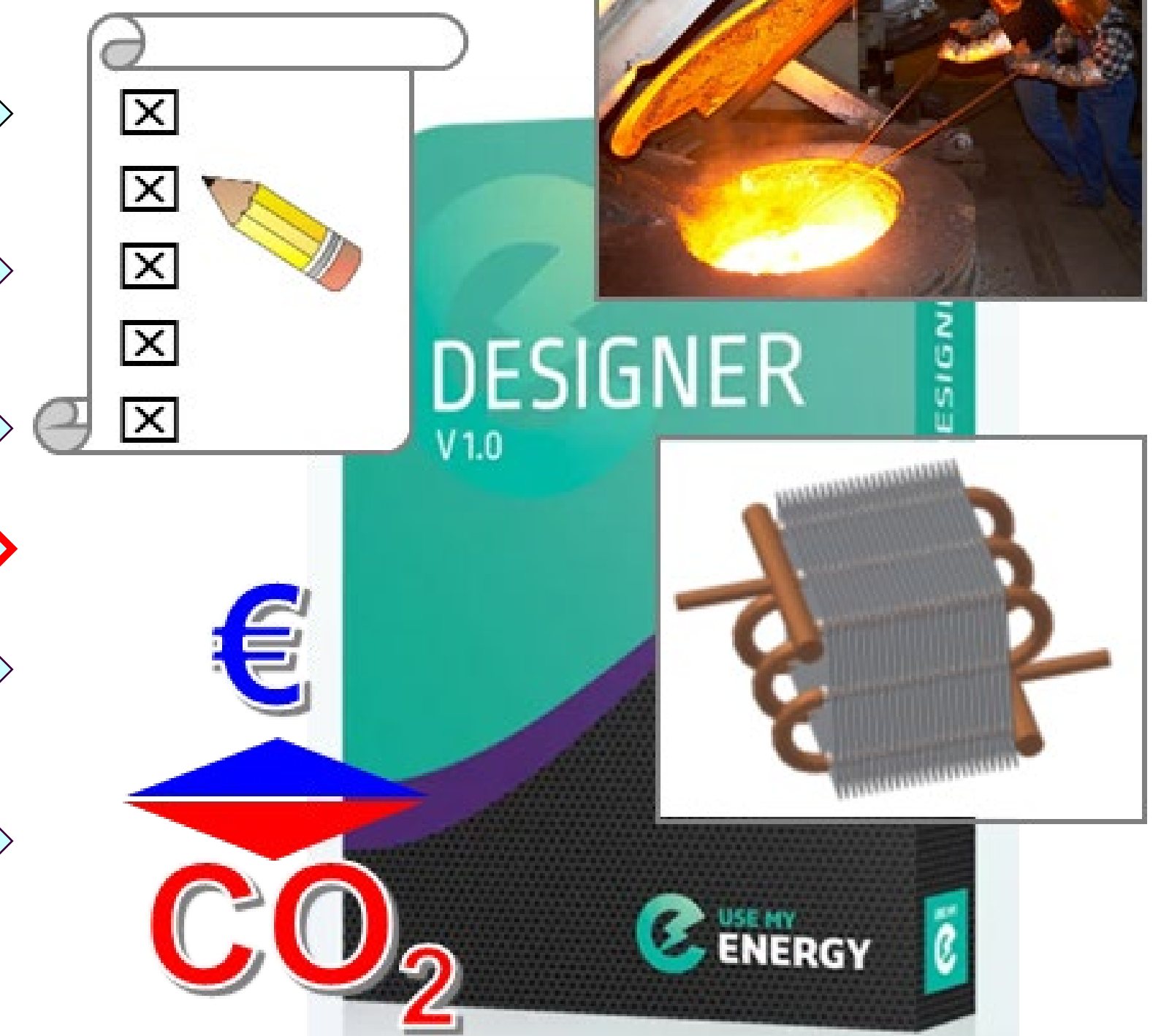
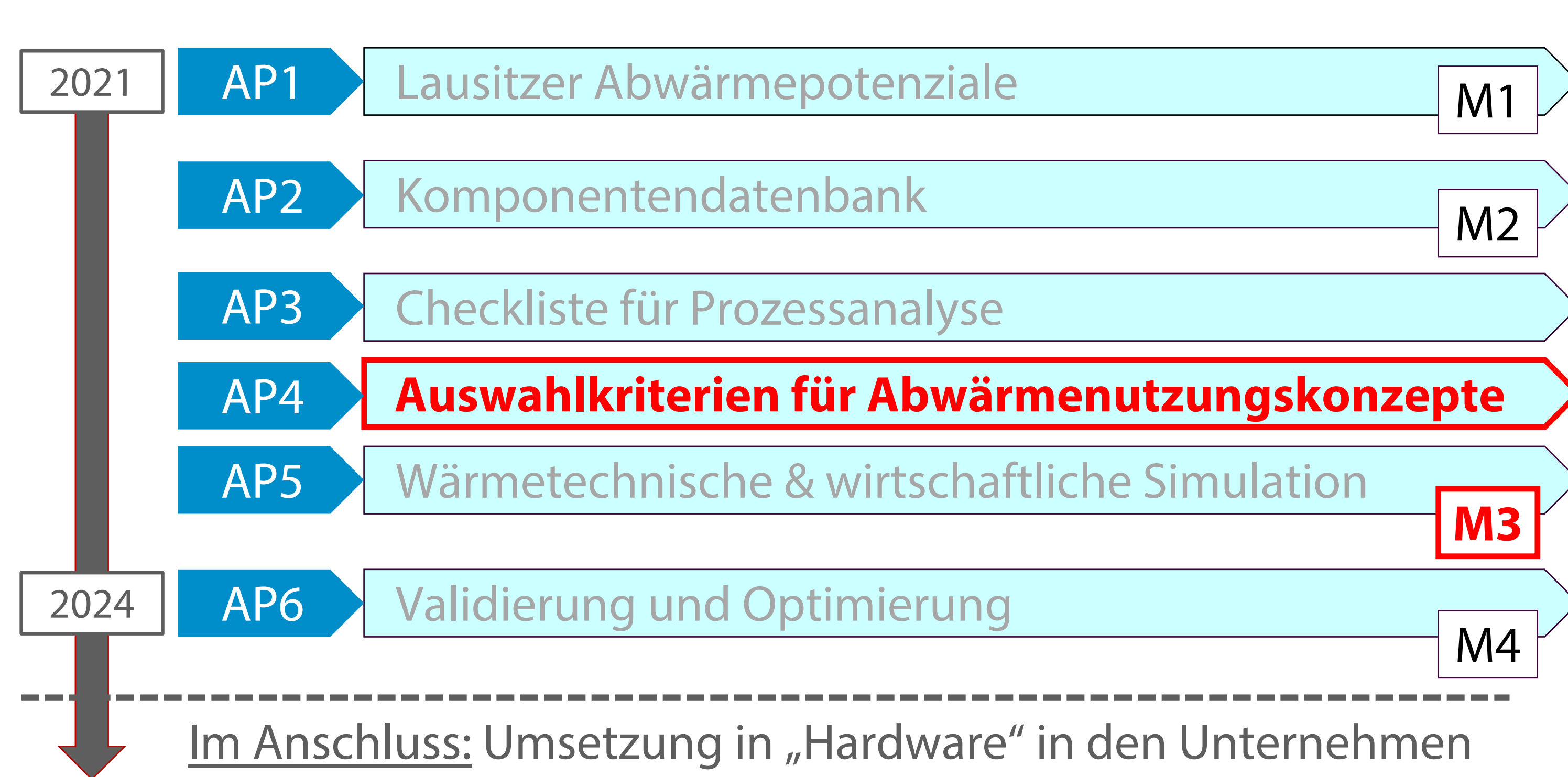
Inhaltsverzeichnis

1. Methodik
2. Systemkomponenten



Motivation

- Erarbeiten von **Kriterien** zur Auswahl geeigneter Abwärmenutzungskonzepte unter den Randbedingungen einer konkreten Anwendung



Methodik der Abwärmenutzung

- Von **oben nach unten**:
 - Technologischer Aufwand steigt
 - Kosten steigen
 - Effizienz der Abwärmenutzung sinkt
- **Priorisierung**:
 - Direkte, zeitgleiche Abwärmenutzung → Wärmeübertrager
 - Direkte, zeitversetzte Wärmenutzung → Wärmespeicher
 - Indirekte Nutzungsoptionen → Wärmepumpe, Kälteerzeugung, Verstromung
- Entscheidungsgrundlage = Ergebnisse der Systemanalyse



Bildquelle: www.rubel.rub.de



Bildquelle: SAENA

Sekundärmaßnahmen = Abwärmenutzung

Direkte Methoden

zeitgleich

- Wärmeübertrager

zeitversetzt

- Wärmespeicher

Indirekte Methoden

Anheben des Temperaturniveaus

- Wärmepumpen

Absenken des Temperaturniveaus

- Kältemaschinen

Umwandlung in Strom

- Wärmekraftmaschinen

Wärmeübertrager (Wärmetauscher)

Prinzip

- **Kontinuierliche Übertragung** von Abwärme eines Fluides (Kühlwasser, Rauchgas, Abluft) an ein anderes

Bedingung

- Wärmesenke muss Abwärme (-leistung) zeitgleich aufnehmen können bei passendem Temperaturniveau

Vorteil

- Einfache, kostengünstige und marktverfügbare Technologie → schnell umsetzbar

Nachteil

- Passende Wärmequelle (Temperatur, Leistung, zeitliche Verfügbarkeit) muss vorhanden sein

Effizienz

- Bei optimaler Auslegung der Wärmeübertrager und guter Wärmedämmung sehr hoch

Fazit

- Immer als erste Möglichkeit prüfen!



Bildquelle: www.heatsystems.de

Wärmeübertrager

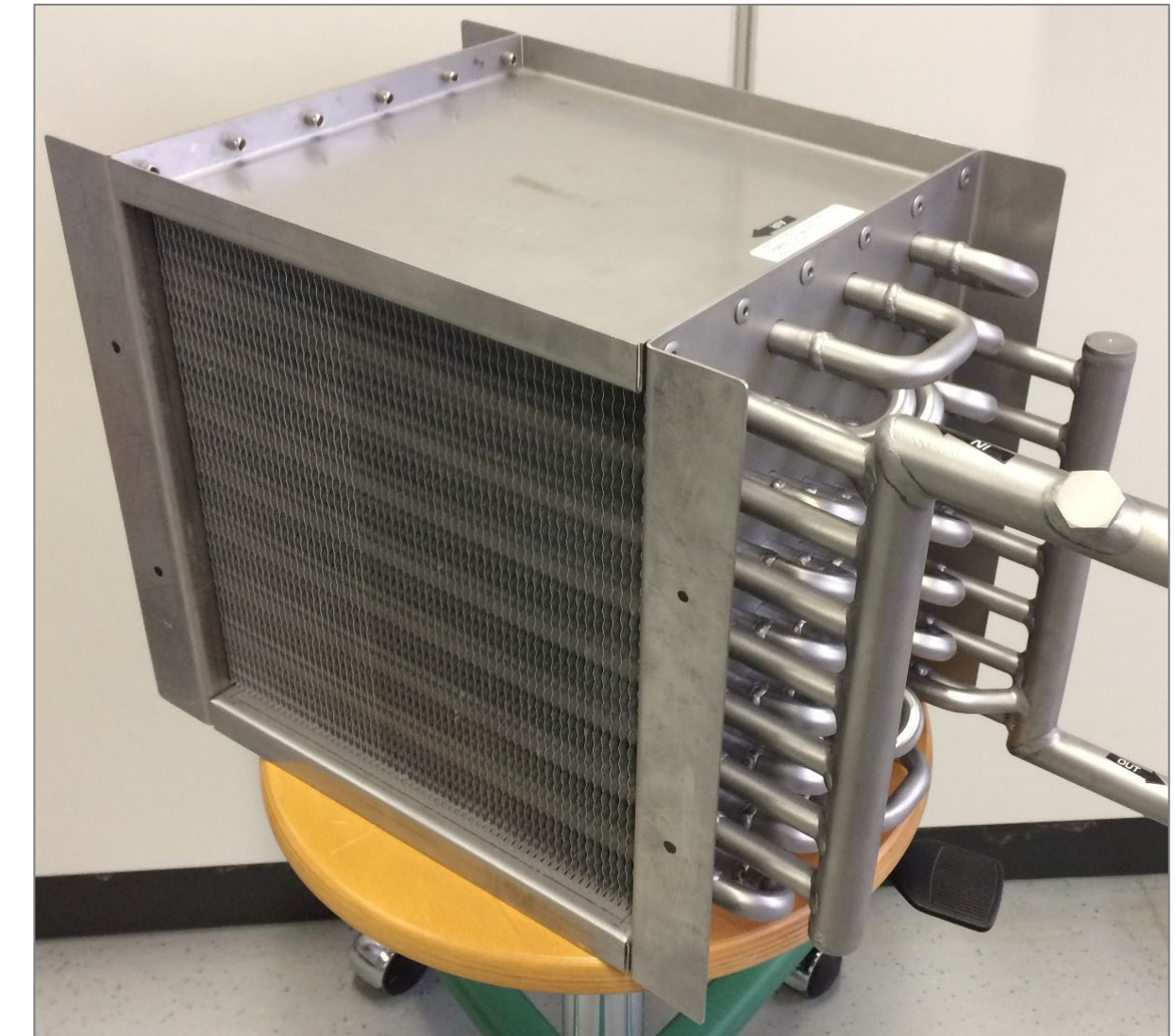
- Verschiedene Ausführungen von Wärmeübertragern abhängig von
 - Temperatur- und Druckniveau, Leistungsklasse
 - Art der Medien (Gase, Flüssigkeiten, mit/ohne Phasenwechsel)
 - Spezialanforderungen (z.B. korrosive Medien)
- Typische Bauformen
 - Platten-Wärmeübertrager
 - Rohrbündel-Wärmeübertrager
 - Lamellen-Rohrbündel-Wärmeübertrager
- Wärmetechnische Modellierung möglich mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad



Bildquelle: VWS GmbH



Bildquelle: www.poolsana.de



Bildquelle: www.lob-gmbh.de

Wärmespeicher

Prinzip

- Beladung eines Speichermediums mit Abwärme aus einem Fluid → zeitversetzte Abgabe der Nutzwärme

Bedingung

- Speicherkennzahlen (Wärmeinhalt, Temperatur, Leistung) müssen zur Anwendung passen

Vorteil

- **Zeitliche Entkopplung** von Abwärmeverfügbarkeit und Nutzwärmebedarf

Nachteil

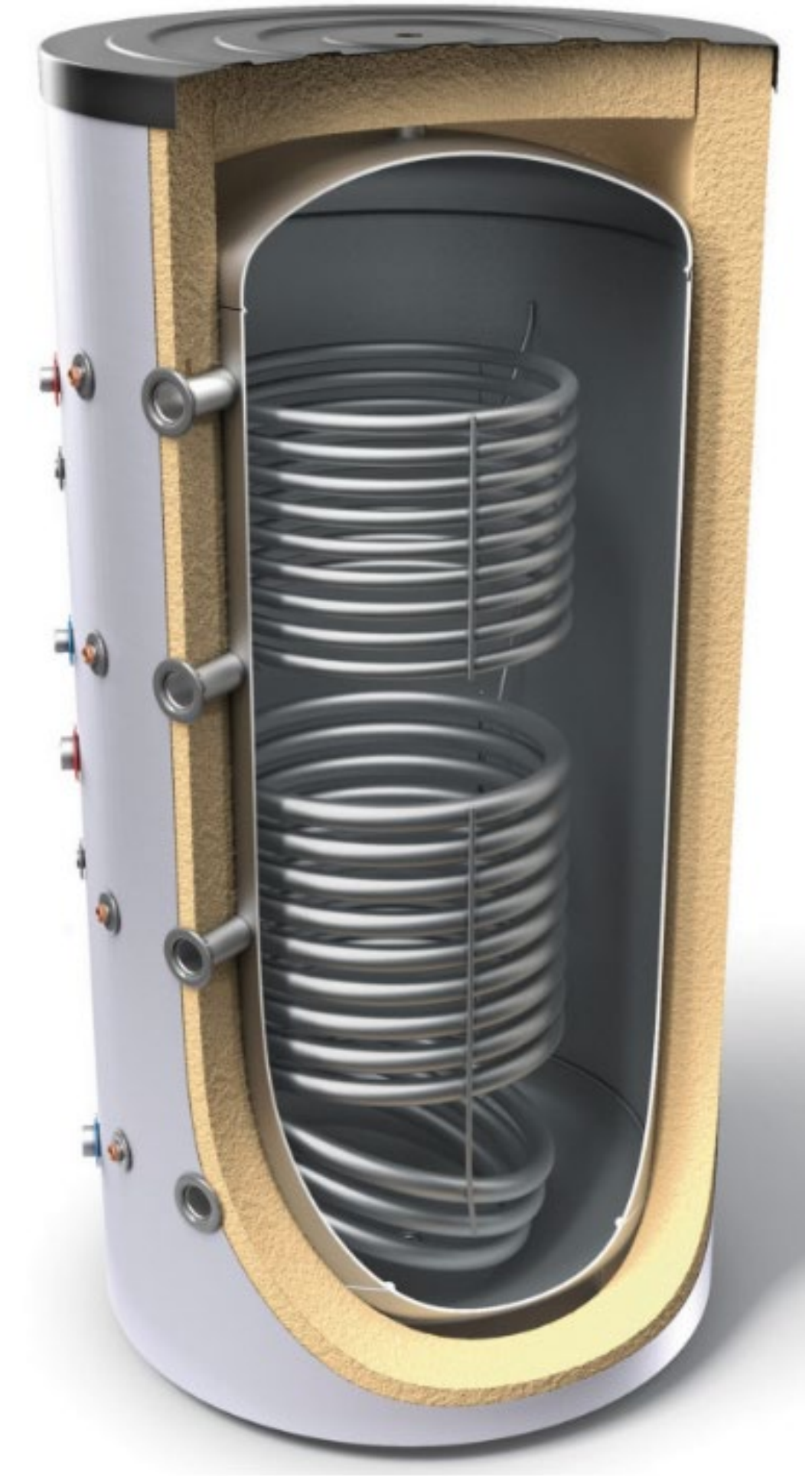
- Technologisch aufwändig bei höheren Temperaturen, für $T < 100 \text{ °C}$ gut marktverfügbar

Effizienz

- Bei optimaler Auslegung des Wärmespeichers und guter Wärmedämmung durchaus hoch

Fazit

- Wichtige Systemkomponente bei zyklischen thermischen Prozessen



Bildquelle: www.g2-energy-systems.de

Wärmespeicher

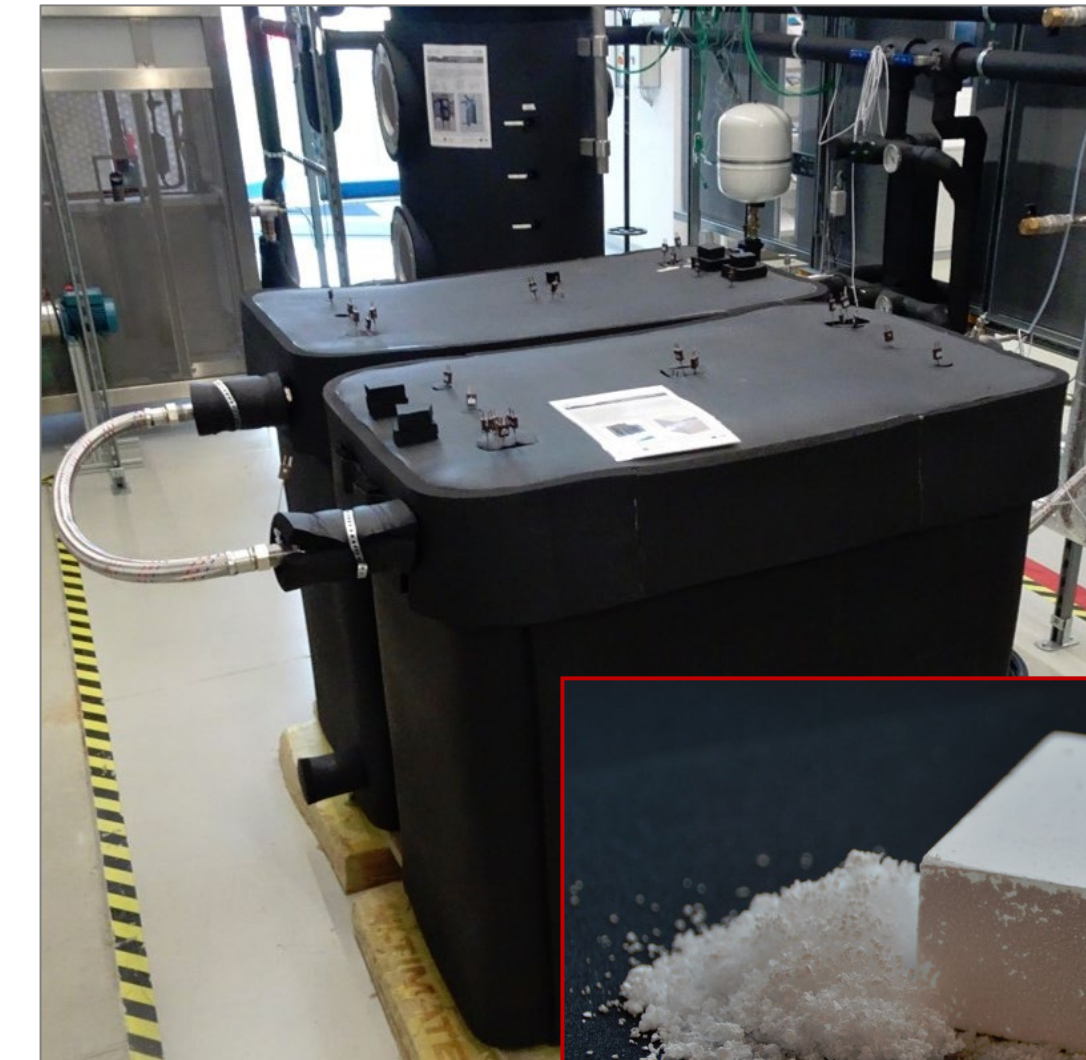
- Verschiedene Ausführungen von Wärmespeichern
 - Temperaturniveau (Ein-/Aus speichern)
 - Wärmeinhalt und Leistungsklasse
 - Aufstellraum, Transportwege, ...
- Marktverfügbare Wärmespeicher
 - Warmwasserspeicher
 - Thermoöl-Speicher (Zweistoff-Speicher)
 - Latentwärme- und Hybridspeicher
 - Dampf-/Ruths-Speicher
- Wärmetechnische Modellierung möglich mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad



3.800 m³ Warmwasser,
130 MWh, 35 m hoch

Bildquelle: www.ewbautzen.de

Direkte Methoden



Bildquelle: SAENA

Technologie aus
der Region

Mobile Wärmespeicher

- Überbrückung **örtlicher** Diskrepanzen zwischen Abwärmeverfügbarkeit und Nutzwärmebedarf (ohne Wärmenetz)
 - Z.B. industrielle Abwärme zur Beheizung von Gebäuden
- Hybrid-Speichermodule kombiniert in einem Container
 - Speichertemperaturen $< 100\text{ °C}$
 - Für Wärmeinhalte bis 1,5 MWh
 - Distanzen bis etwa 10 km wirtschaftlich darstellbar
- Enge Zusammenarbeit mit der Hochschule bei der Optimierung der Speichermodule



Bildquelle: Wikipedia



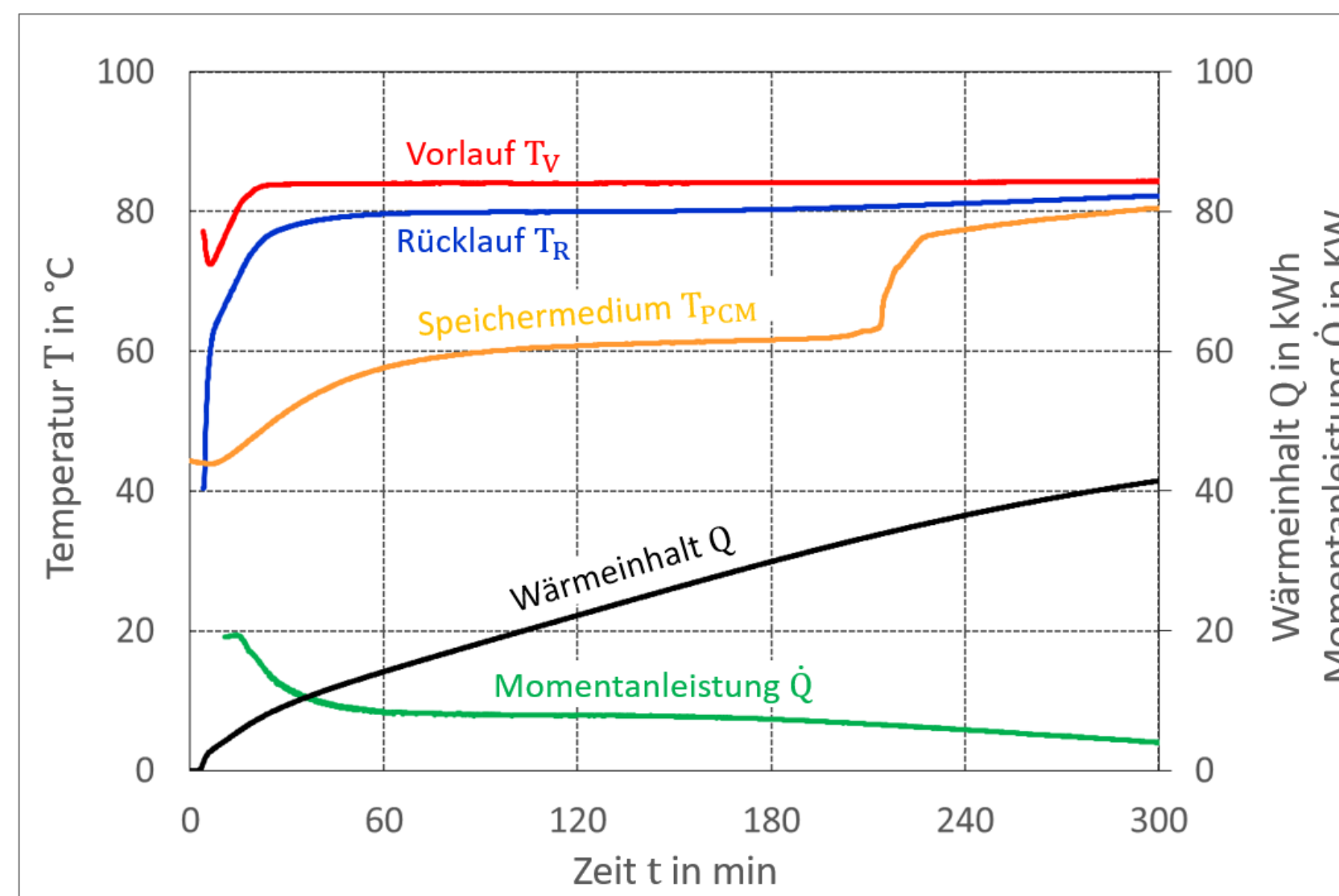
Bildquelle: PCM Energy

Wärmespeicher

- Stoffeigenschaften von Speichermedien → Messung, Modellierung ...
- Wärmespeicher für dezentrale Energiesysteme → Entwicklung, Optimierung und Normung
 - Latentwärmespeicher (Rohrbündel)
 - Hybridspeicher (Plattengeometrie) **PCM ENERGY**
 - Zweistoff-Wärmespeicher (Kombination Thermoöl und Feststoffschüttungen)



Bildquellen: www.peine-arolsen.de, www.naturstein-centrum-lpm.de



Typ:	Rohrbündel-LWS
Speichermedium:	ATP64
Arbeitstemperaturdifferenz:	45 °C bis 80 °C
Nutzbarer Wärmeinhalt:	42 kWh
Abmessungen B x T x H:	900 x 900 x 1440 mm ³
Nutzbare vol. Energiedichte:	36 kWh/m ³
Masse:	790 kg
Nutzbare grav. Energiedichte:	0,0532 kWh/kg

(Kompressions-) Wärmepumpen

Prinzip

- Anheben des **Temperaturniveaus** von Abwärme mit Hilfe elektrischer Energie

Vorteil

- Nutzung der Wärme auf höherem Temperaturniveau ist flexibler und effizienter
 - Anpassung des Temperaturniveaus an Senke
 - Möglichkeit der Einspeisung der Wärme in ein verfügbares Nahwärmenetz

Nachteil

- Technologisch sehr aufwändig → hohe Invest- und Betriebskosten (Strom)

Effizienz

- Elektrische Leistungsaufnahme x COP ergibt nutzbare Wärmeleistung

Fazit

- Wirtschaftlichkeit im Detail prüfen

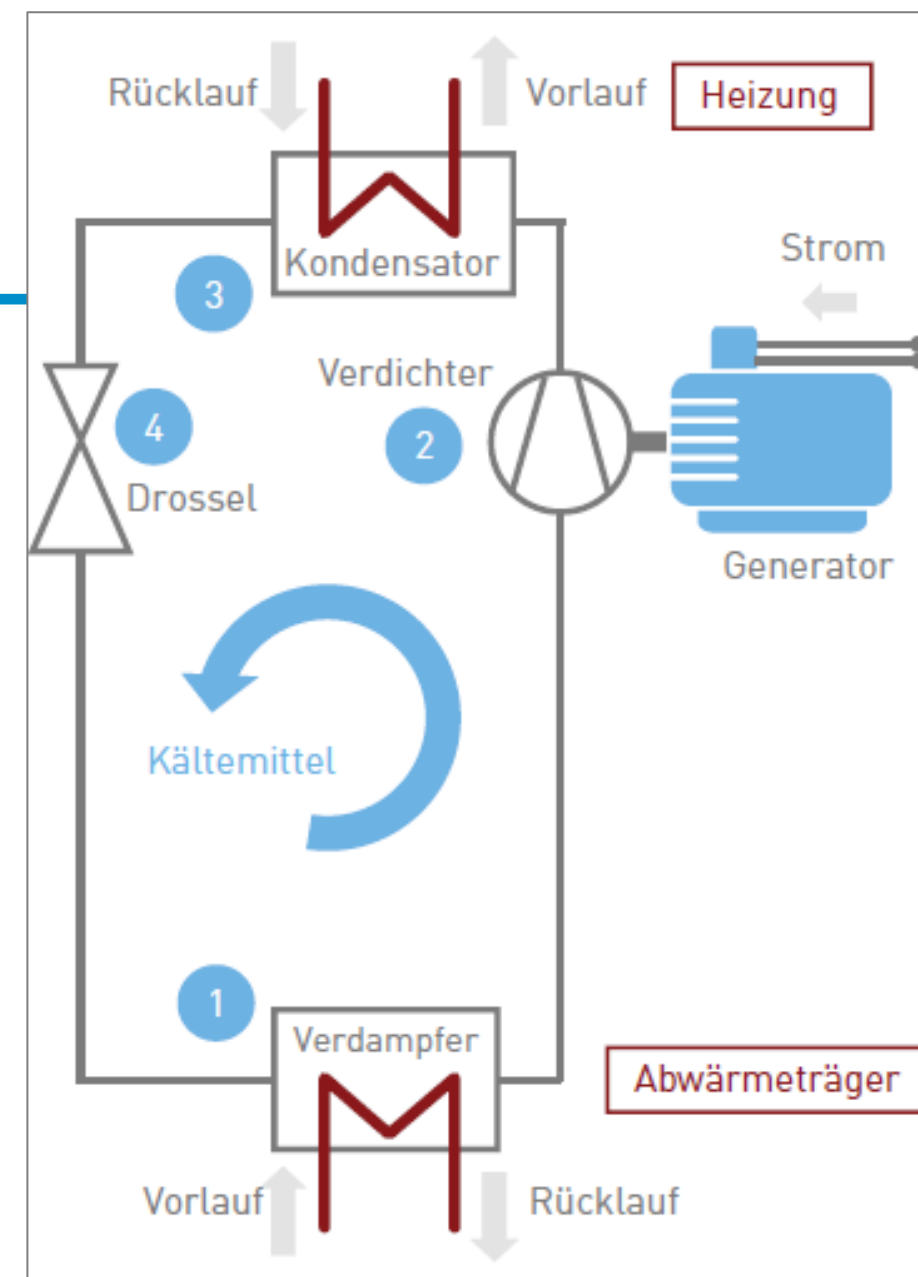


Bildquelle: www.energie-experten.org

(Kompressions-) Wärmepumpen

- Kältemittel verdampft bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur → Wärmezufuhr
- Kältemittel kondensiert bei hohem Druck und hoher Temperatur → Wärmeabgabe
- **Marktverfügbare** Wärmepumpen auch für hohe Temperaturen und Leistungsklassen
 - Masterarbeit A. Shadi (2023) – Recherche zu Wärmepumpen für industrielle Anwendungen
 - Investkosten relativ hoch
 - Verschiedene Szenarien der Wärmeeinspeisung
- Im Falle eines Low-Exergy-Nahwärmenetzes kann Abwärme direkt eingespeist werden

Bildquelle: SAENA



Indirekte Methoden



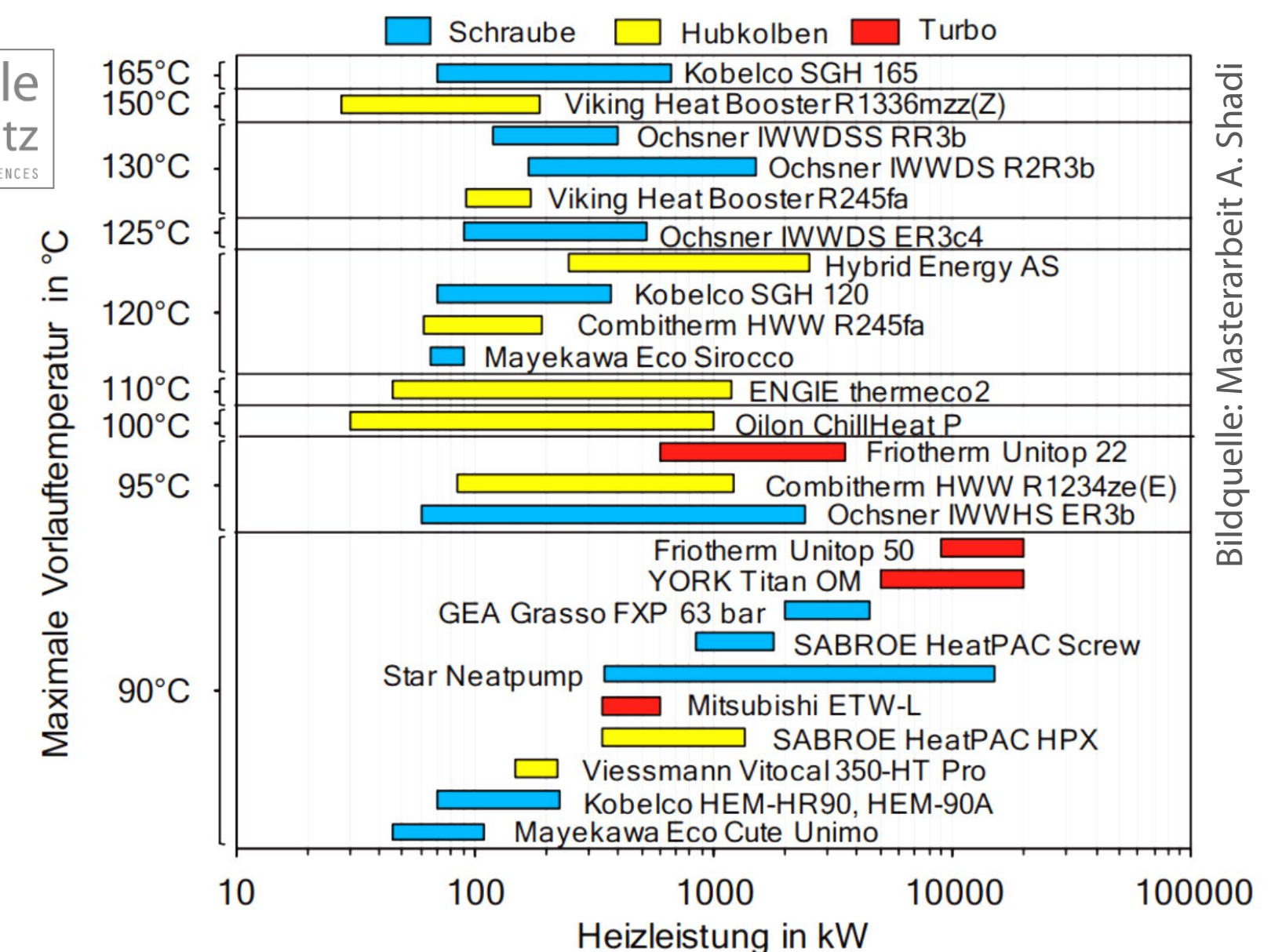
Bildquelle:
<https://prozesstechnik.industrie.de>

**Hochschule
Zittau/Görlitz**
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Masterarbeit

A. Shadi

Untersuchungen zum
Einsatz von Wärmepumpen
für die Einspeisung von
Niedertemperatur-
Prozessabwärme in
Wärmenetze



Bildquelle: Masterarbeit A. Shadi

(Absorptions-) Kältemaschinen

Prinzip

- Erzeugung von **Klima- oder Prozesskälte** aus Abwärme

Bedingung

- Verfügbarkeit eines (flüssigen) Abwärmeträgers mit Temperaturen $> 80 \dots 120 \text{ °C}$

Vorteil

- Substituierung des Elektroenergiebedarfes für die Kälteerzeugung durch Abwärme

Nachteil

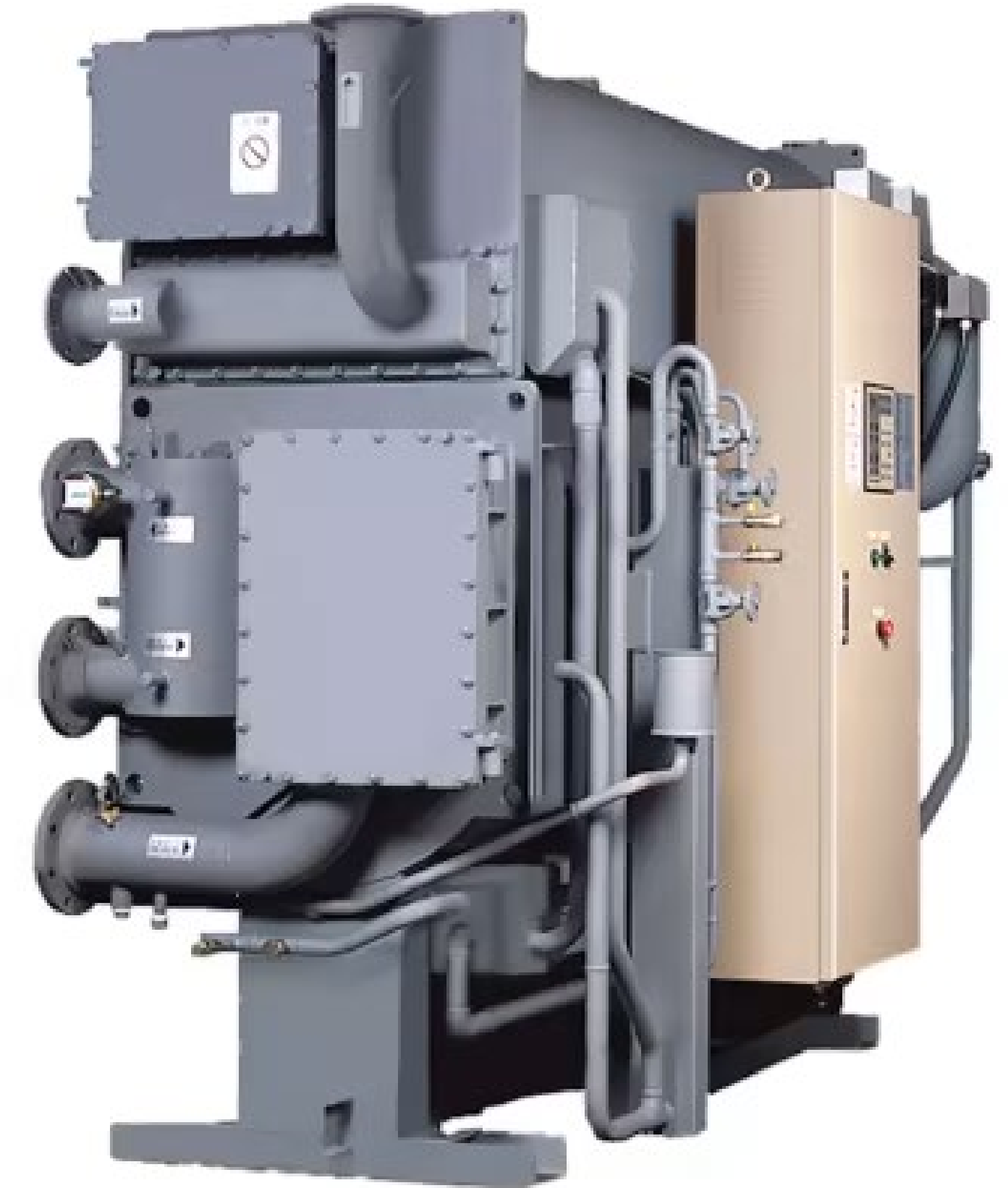
- Technologisch aufwändig → sehr hohe Investkosten

Effizienz

- Kälteleistung geringer als benötigte Abwärmeleistung

Fazit

- Wirtschaftlichkeit im Detail prüfen

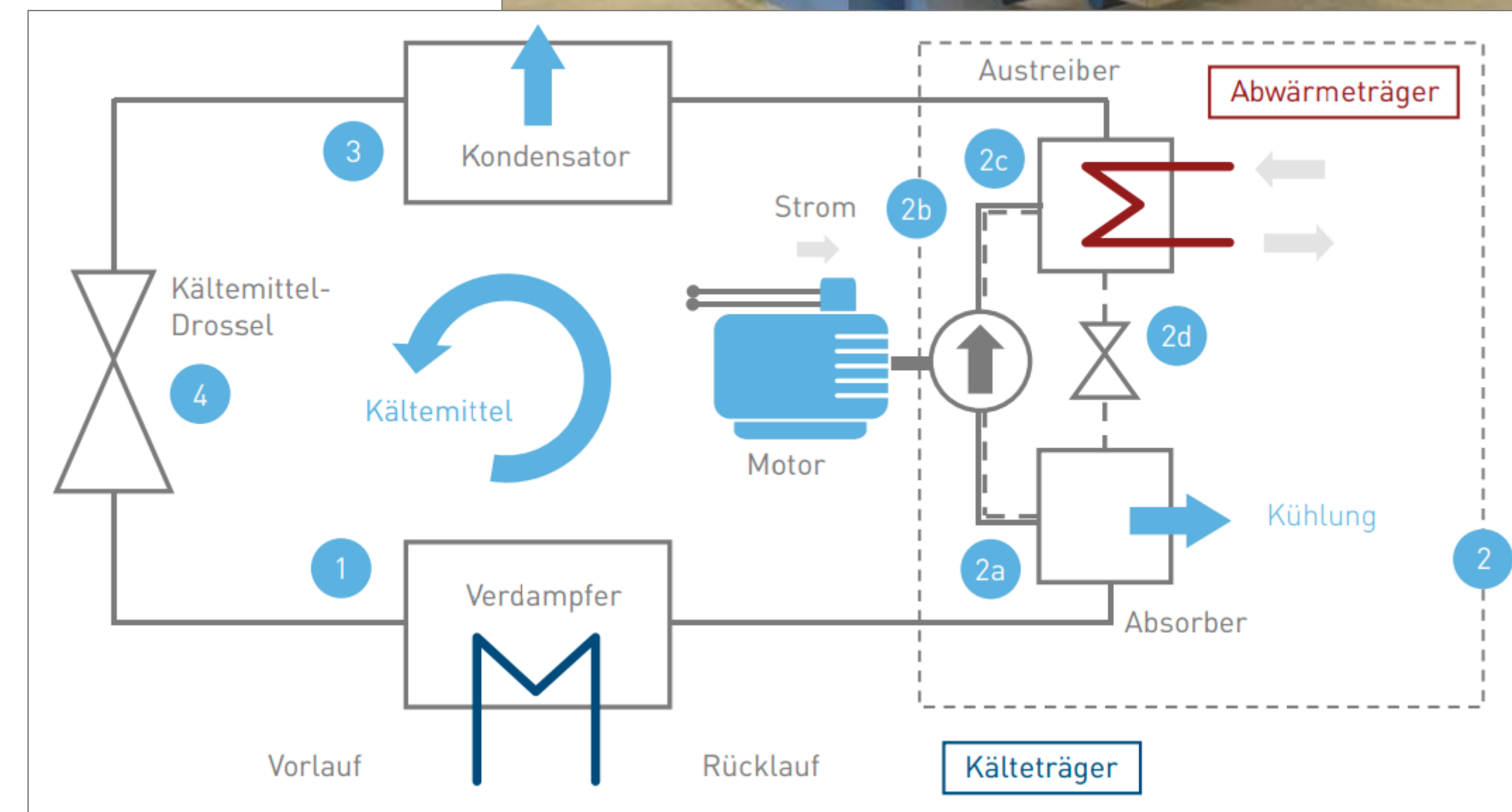


Bildquelle: www.carrier.com

(Absorptions-) Kältemaschinen

- Funktionsweise prinzipiell wie Kompressions-Wärmepumpe
- „kaltes Ende“ (Verdampfer) erzeugt **Kälte** auf gewünschtem Temperaturniveau
- „warmes Ende“ Kondensator gibt Wärme an Umgebung ab (oder Heizwärme)
- Thermischer Verdichter arbeitet mit Wärme (minimaler Strombedarf für Pumpenmotor)
 - Zweistoffgemisch Kältemittel/Lösungsmittel
- Absorptions-Kältemaschinen sind in verschiedenen Leistungsklassen marktverfügbar

Bildquelle: www.haustec.de



Bildquelle: SAENA

ORC-Prozesse

Prinzip

- Erzeugung von Elektroenergie aus Abwärme mit Hilfe eines Dampfkraftprozesses

Bedingung

- Verfügbarkeit eines Abwärmeträgers mit Temperaturen $> 150 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$

Vorteil

- Elektroenergie kann selbst genutzt oder ins Netz eingespeist werden

Nachteil

- Technologisch aufwändig \rightarrow sehr hohe Investkosten

Effizienz

- Abwärme-Ausnutzungsgrad bezogen auf die Stromerzeugung ist sehr gering ($\leq 15 \%$)

Fazit

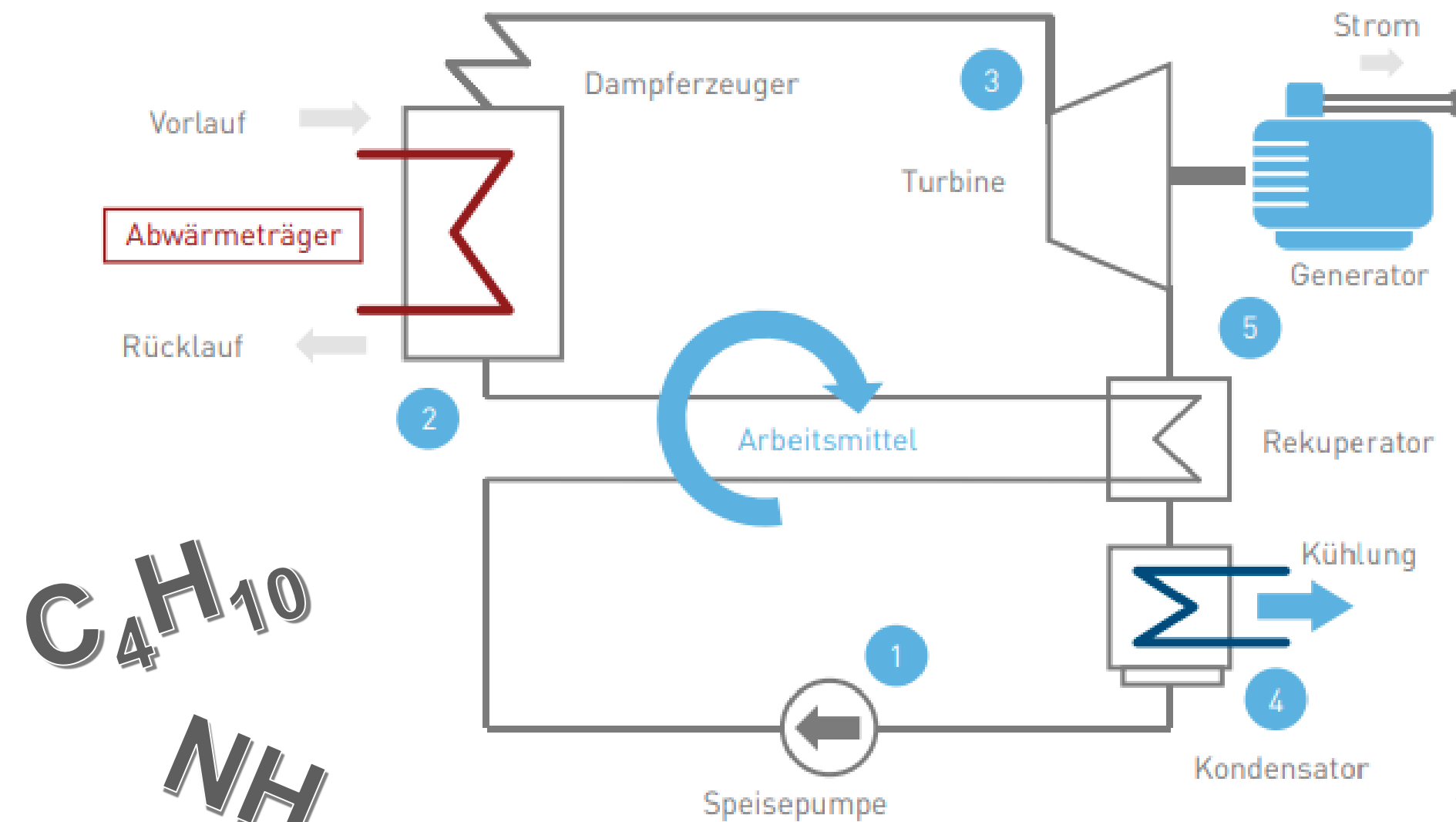
- Wirtschaftlichkeit im Detail prüfen



Bildquelle: www.bionic-world.de

ORC-Prozesse

- Verdampfung eines organischen Arbeitsmittels (ORC) unter hohem Druck mit Abwärme
 - Abwärme-Temperaturen $< 300\text{ °C}$
 - bei Temperaturen $> 300\text{ °C}$ klassische Industriedampfturbine mit Wasser als Arbeitsmittel
- Expansion des Arbeitsmittels in der Turbine erzeugt über Generator **Elektroenergie**
- Verstromung von Abwärme erst bei höheren Leistungen wirtschaftlich \rightarrow Marktverfügbarkeit von ORC-Anlagen im kW-/MW-Bereich
- Optional auch Planung und Errichtung durch Spezialfirmen, z.B. isotech Gebäudetechnik



Bildquelle:
SAENA

C_4H_{10}
 NH_3
 $R134a$
 C_5H_{12}

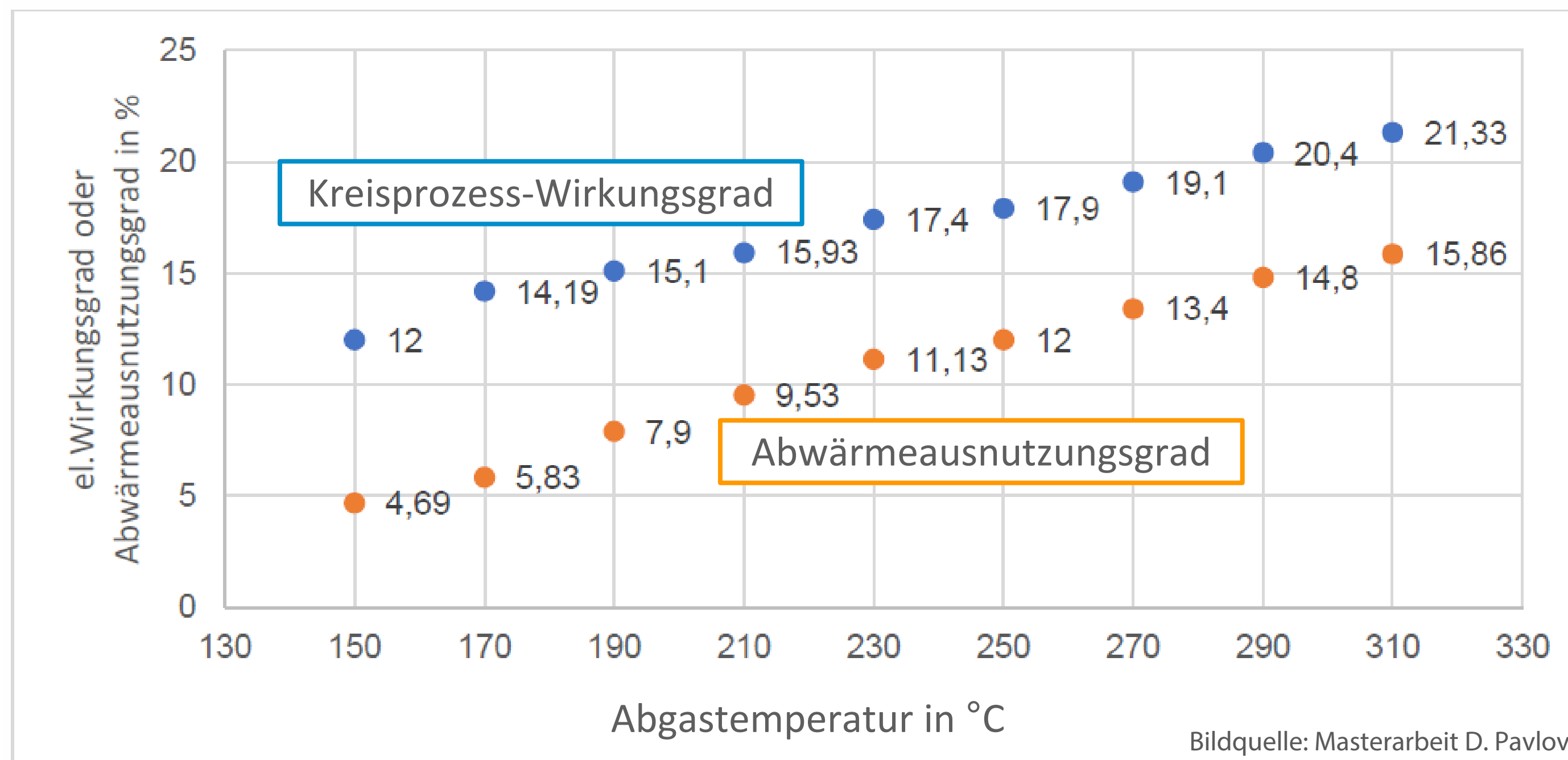
isotech
GEBÄUDETECHNIK

Bildquelle: www.energieexperten.org



Studentische Arbeiten zum Thema Effizienz der Abwärmeverstromung

- Wirkungsgrade des ORC-Prozesses und Abwärmeausnutzungsgrade als Funktion der Abgastemperatur (Abwärmequelle)
 - Arbeitsmittel Pentan (bis 250 °C) und Hexan (ab 270 °C)



Masterarbeit

D. Pavlov

Bewertung der Effizienz von Nutzungskonzepten für industrielle Abwärme mit Hilfe des Programmsystems EBSILON

$$\eta_{\text{ORC}} = \frac{|\dot{W}_{\text{el}}|}{\dot{Q}_{\text{zu}}}$$

$$\eta_Q = \frac{|\dot{W}_{\text{el}}|}{\Delta \dot{H}_{\text{Abgas}}}$$

Bachelorarbeit

O. Globig

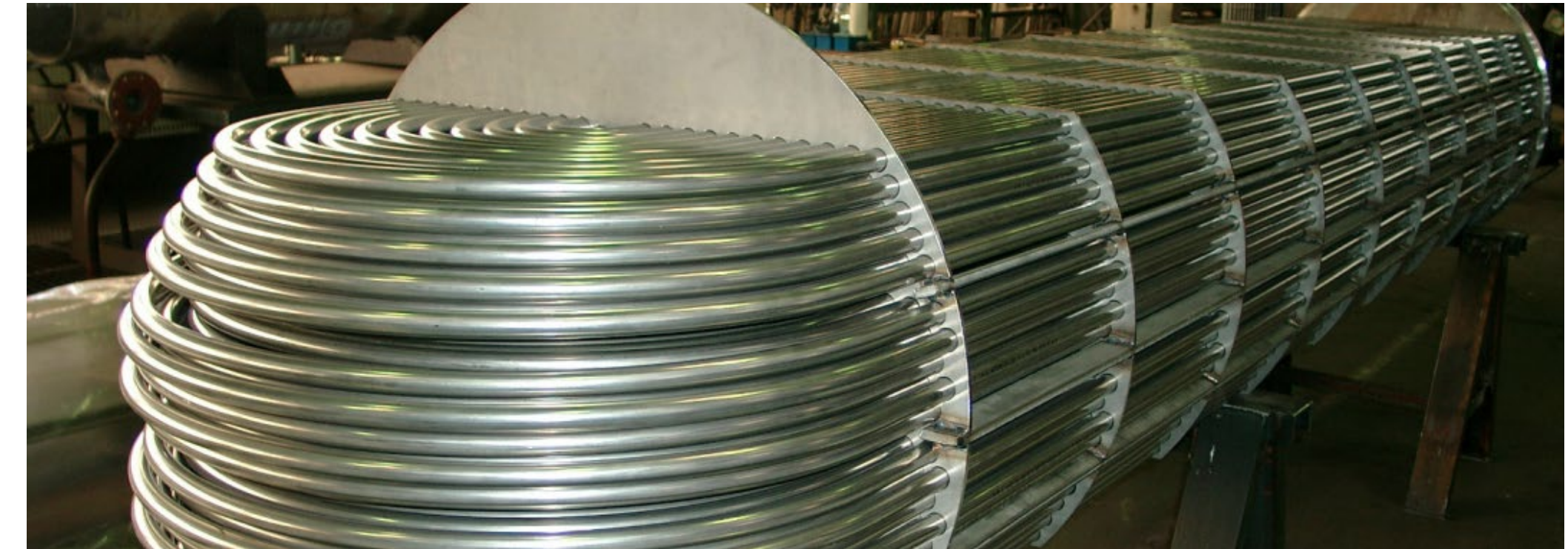
Entwicklung von Vorzugslösungen für ORC-Kreisläufe zur Abwärmeverstromung



Technologien der Abwärmenutzung

- Broschüre der Sächsischen Energieagentur SAENA
- substantiell überarbeitet 2015/16 durch Arbeitsgruppe Meinert am Fraunhofer IFAM Dresden
- erschienen 12/2016
- Download unter ...
- einige Druckexemplare zum Mitnehmen verfügbar

https://www.saena.de/download/broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf



Kriterien für die Bewertung von Abwärmepotenzial

Temperatur

Energiemenge / Leistung

Je höher die Abwärmeleistung ...

Kontinuität

Je kontinuierlicher der Abwärmestrom anfällt /je weniger die Leistung schwankt ...

Volllaststunden

Je höher seine Verfügbarkeit über das Jahr ...

in der Regel gilt:

... desto mehr Nutzungsmöglichkeiten kommen infrage.

... desto wirtschaftlicher lässt sich die Abwärme technisch nutzen.



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert
Fachgebiet Technische Thermodynamik
j.meinert@hszg.de
Tel. 03583/612-4849



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FAKULTÄT
MASCHINENWESEN