LASTÄNDERUNGEN BEI DAMPFERZEUGENDEN WÄRMEPUMPENSYSTEMEN

Effizienz- und Kostenaspekte bei kombinierten Open- & Closed-Loop-Wärmepumpensystemen zur Dampfbereitstellung

F. Hubmann, J. Riedl, B. Windholz

EFFIZIENTE PROZESSE DURCH ABWÄRMENUTZUNG

29 539 TWh
für die Industrie
weltweit (2012)

14 474 TWh =
49% Nutzung

15 065 TWh = 51% Verluste

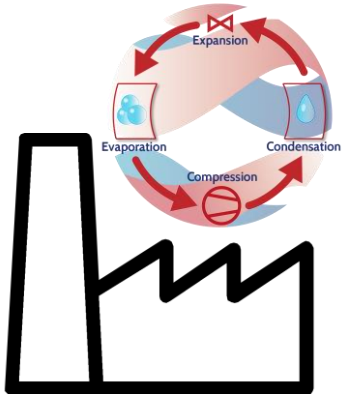
ca. 60% = Abwärme in Abwasser und Abgas

ca. 40% = Strahlung, Reibung, Widerstand, etc.

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

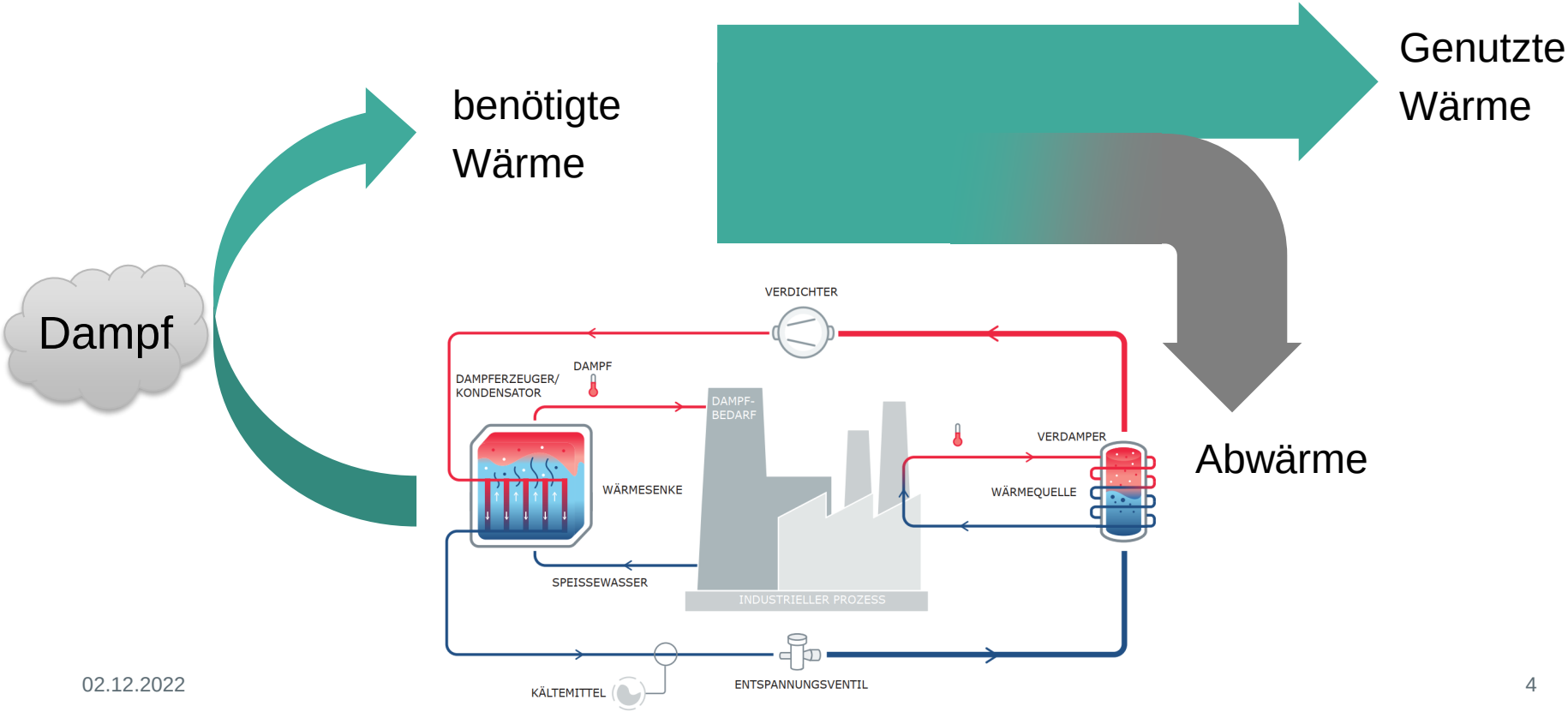
DAMPFBEDARF IN DER INDUSTRIE

- Dampf ist einer der wichtigsten Energieträger in der Industrie
  - Reaktant
  - Guter Wärmeübergang
  - Hohe Energiedichte
- Prozesswärme 100-200ºC stellt etwa 21% des Gesamtwärmebedarfs [1] → erreichbar durch Wärmepumpen
  - Beispiel: ND Dampf (bis 5 bara) in Papier oder Chemieindustrie stellt etwa 30% des Wärmebedarfs [2] → erreichbar durch dampferzeugende Wärmepumpen



[1] Heat roadmap Europe – 2018 executive summary; Heatroadmap.eu - Brochure Heating and Cooling
[2] Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2016

NUTZUNG DES ABWÄRMEPOTENTIALS



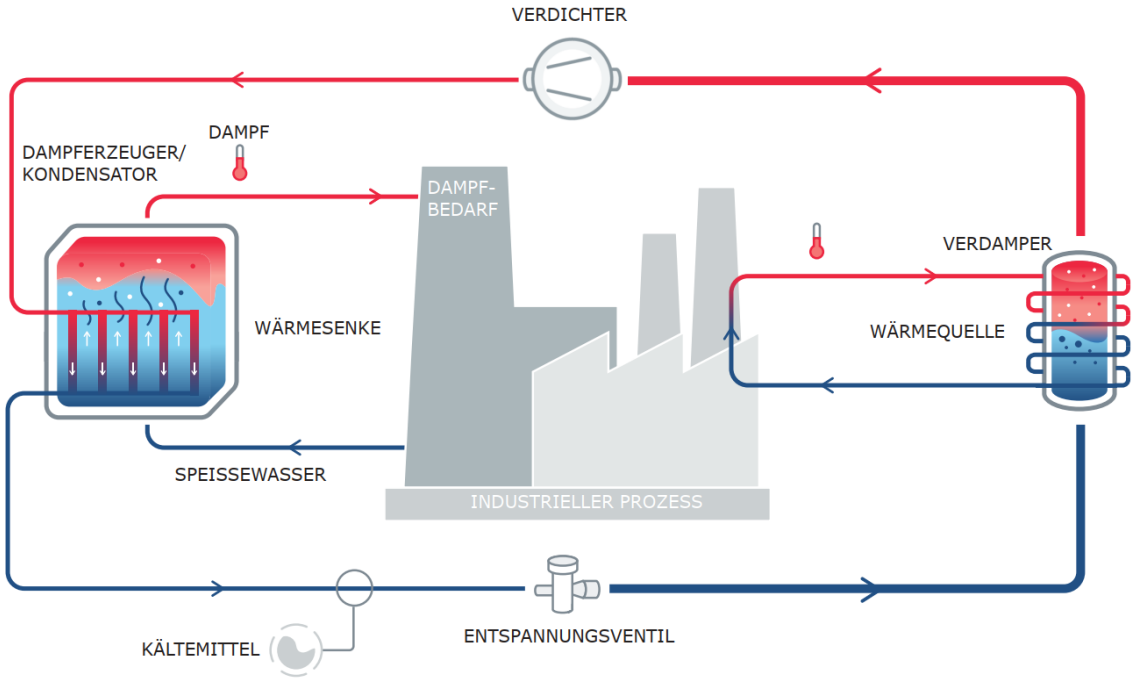
DAMPFERZEUGENDE WÄRMEPUMPEN - VARIANTEN

- Wärmepumpe zur Dampferzeugung auf Zieldruck (siehe Folie 6)
  - Kondensator als Shell-and-Plate Wärmetauscher ausgeführt
  - Wasser-Wasser Wärmepumpe mit Verdampfung durch Flash Tank
- Offene Wärmepumpensysteme – Brüdenverdichtung (Mechanical Vapor Recompression – MVR)
  - Radialverdichter (RV) MVR
  - Kolbenverdichter (KV) MVR
  - Andere Technologien hier nicht berücksichtigt (z.B. Roots, Schraube)
- Kombination aus beidem (siehe Folie 7)
  - Dampferzeugende Wärmepumpe auf Zwischendruck
  - Nachgeschalteter Dampfverdichter auf Zieldruck

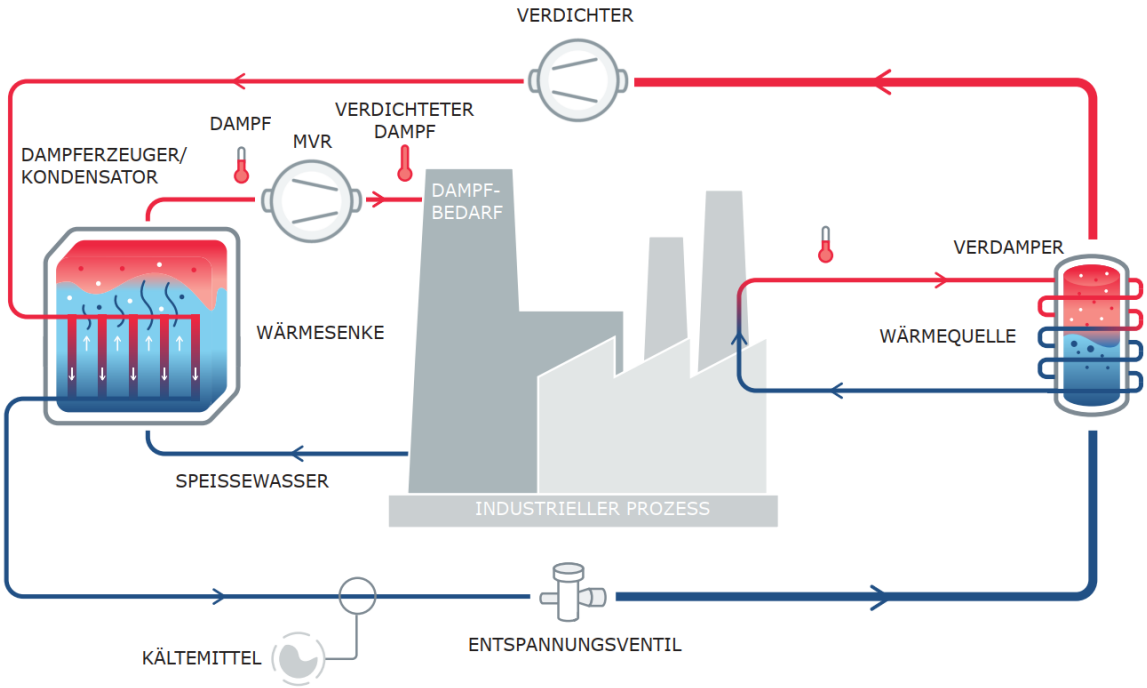
ASPEKTE MVR

- Zusätzliche Komponente bewirkt höhere Investitionskosten
- Erprobte Technologie für Sattdampftemp. über 200ºC
  - Dampferzeugende Wärmepumpen erreichen derzeit weniger als 200ºC
- Höhere Effizienzen wurden in vorhergehenden Arbeiten gezeigt (siehe Folien 9 und 10)

DAMPFERZEUGENDE WÄRMEPUMPE AUF ZIELDRUCK

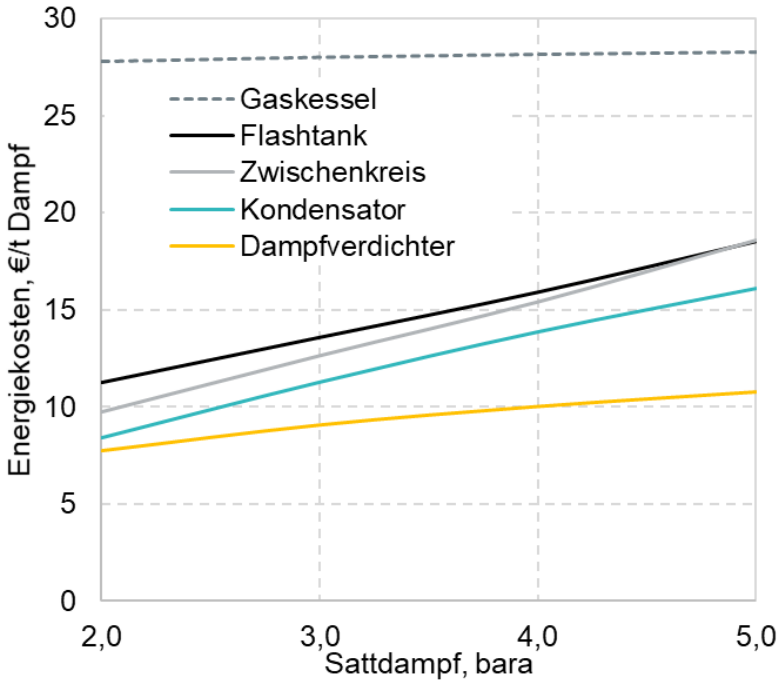


DAMPFERZEUGENDE WÄRMEPUMPE AUF ZWISCHENDRUCK MIT MVR



VORHERGEHENDE ARBEITEN

- Analyse von verschiedenen Arten zur Dampferzeugung mit Wärmepumpensystemen
- Unter anderem auch dampferzeugende Wärmepumpe mit anschließendem MVR (Dampfverdichter)
- Gaspreis = 38 €/MWh
- Strompreis = 54 €/MWh



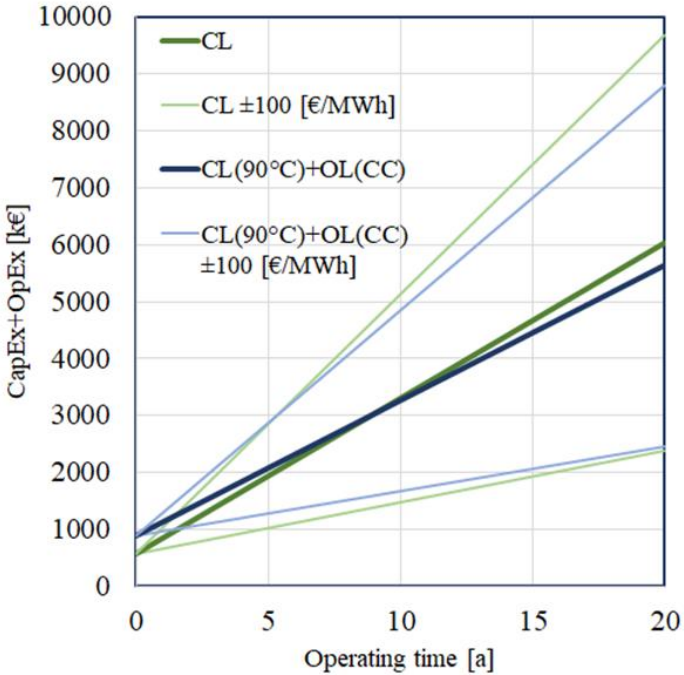
Wilk, V., Helminger, F., Dusek, S., Lauermann, M., Fleckl, T., Dampferzeugung aus Abwärme mit Wärmepumpe, Tagungsband - Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019, Ulm, 2019

VORHERGEHENDE ARBEITEN

- Vergleich:
  - dampferzeugende Wärmepumpe auf Zieldruck (CL)
  - Wärmepumpe auf Zwischendruck (90ºC) und anschließendem RV MVR (CL 90ºC+ OL(CC))
- Strompreis = 150 ±100 €/MWh
- Betriebszeit: 5000 h/a

CL = closed loop

OL = open loop (MVR)



Helminger F., Riedl J., Steurer A., Steam from waste heat
3rd HTHP Symposium in: „*3rd High-Temperature Heat Pump Symposium 2022: Book of Presentations*“, Copenhagen, 2022

VORHERGEHENDE ARBEITEN

- Aussagekraft
  - Kombination Wärmepumpe + MVR kann effizient und kostengünstig im Betrieb sein

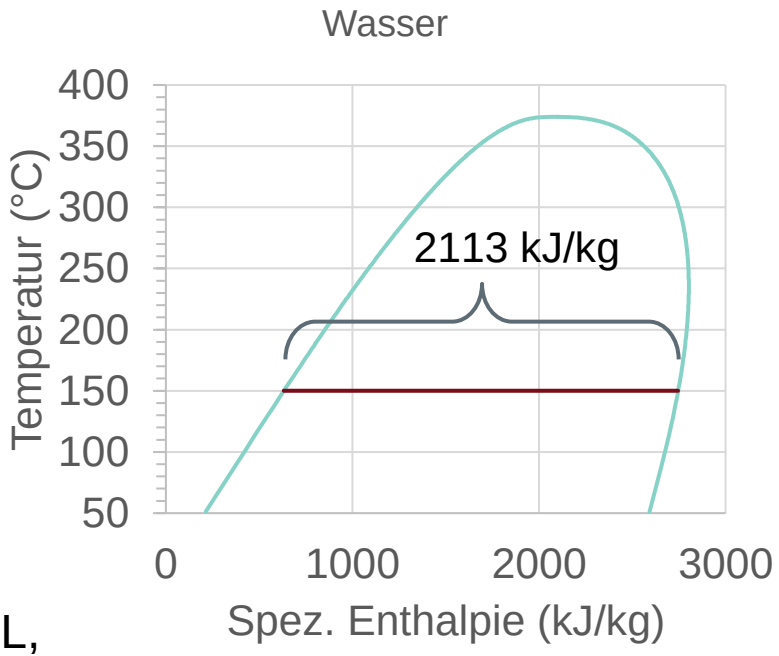
- Offene Fragen (Ziel dieser Arbeit)
  - Unter welchen Betriebsbedingungen?
  - Wie verhalten sich die Systeme unter Teillast?
    - dampferz. WP auf Zieldruck vs.
    - dampferz. WP auf Zwischendruck mit MVR

VERGLEICH KOMBINIERTE WÄRMEPUMPEN UND MVR SYSTEME

- Drei verschiedene Konfigurationen aus dampferzeugenden Wärmepumpen und MVR
  - 90ºC Dampf aus WP → 150ºC mit MVR – (Konfiguration WP 90ºC)
  - 120ºC Dampf aus WP → 150ºC mit MVR – (Konfiguration WP 120ºC)
  - 150ºC Dampf direkt aus WP – (Konfiguration WP 150ºC)
- Vergleich der gesamten Kosten (CapEx + OpEx)
  - Über Laufzeit von 20 Jahren
  - Unter gleichen Randbedingungen (z.B. Quellen- und Senkeneintrittstemp., Dampfmassenstrom)

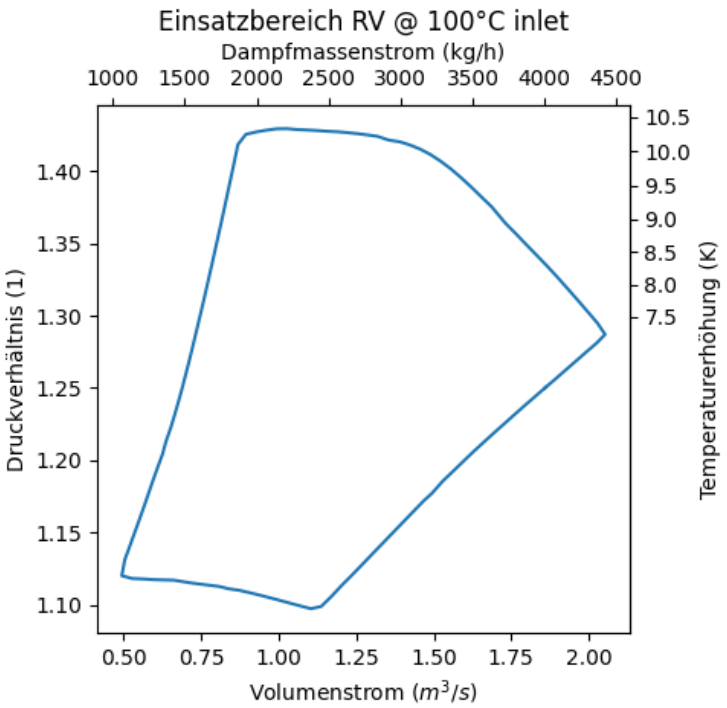
RAHMENPARAMETER

- Wärmepumpen Eingangsgrößen
  - Quelle Eintritt: 70ºC
  - Senke Eintritt: 85ºC
- Ausgangsgrößen für alle Konfigurationen
  - Sattdampf mit 150ºC (4,7bara)
  - Wärmeleistung Dampf: 2 MW_th (Wärmenutzung nur im Phasenwechsel)
  - Fixierter Austrittsmassenstrom für alle verglichenen Konfigurationen: 3,4t/h
- Teillastverhalten (TL)
  - Temperaturen bleiben gleich
  - Massenstrom reduziert (100% TL, 80% TL, 60% TL, 40% TL berücksichtigt)



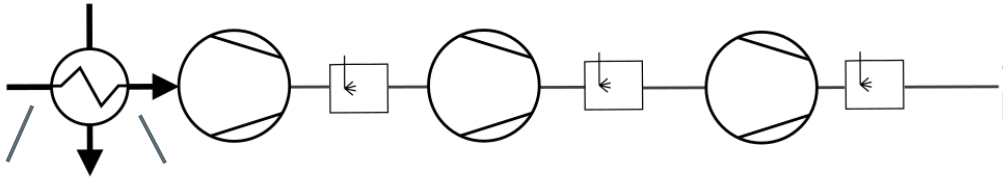
ANNAHMEN ZU TEILLASTVERHALTEN VON WÄRMEPUMPEN UND MVR

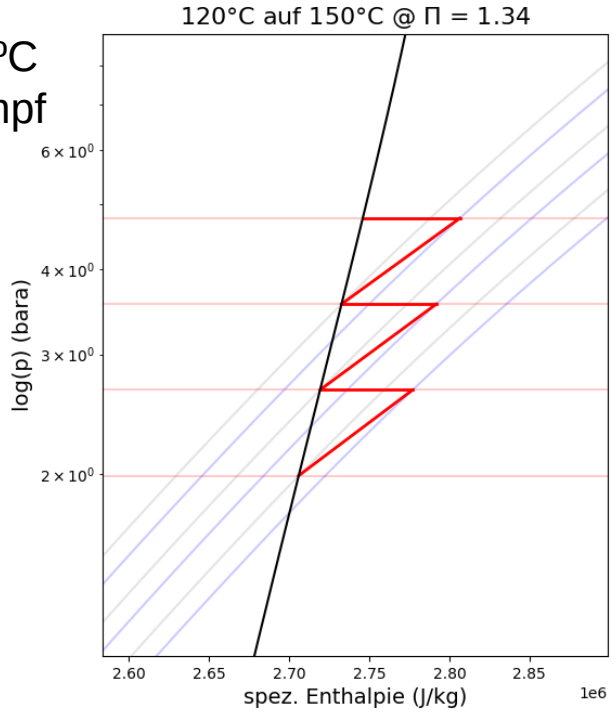
- Wärmepumpen Teillastverhalten
  - Konstanter Carnot Gütegrad
    - Überschätzt Leistung tendentiell
- Kolbenverdichter (KV) MVR
  - 30-100% Teillast → gleiche Effizienzen (Herstellerangaben)
- Radialverdichter (RV) MVR
  - Einsatzbereich je Impeller beschränkt
  - Effizienzen höher bei optimalen Volumenstrom (in der Mitte des Einsatzbereiches)



Exemplarischer Einsatzbereich eines Radialverdichter MVRs (Herstellerangaben)

RADIALVERDICHTER MVR KASKADE

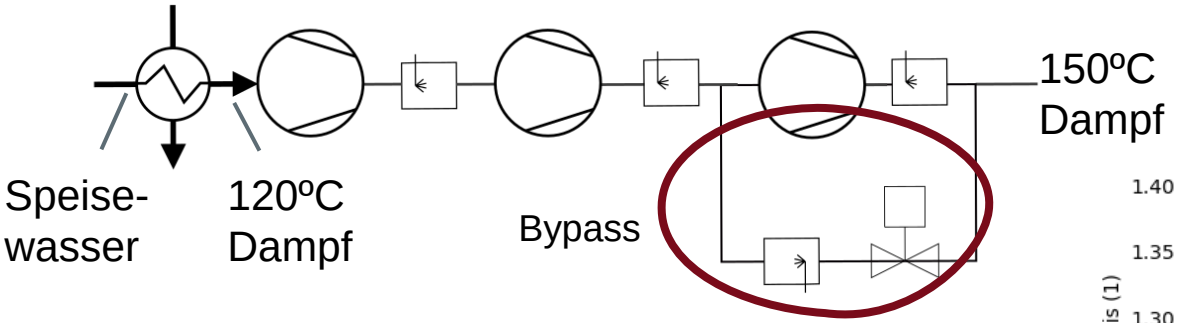


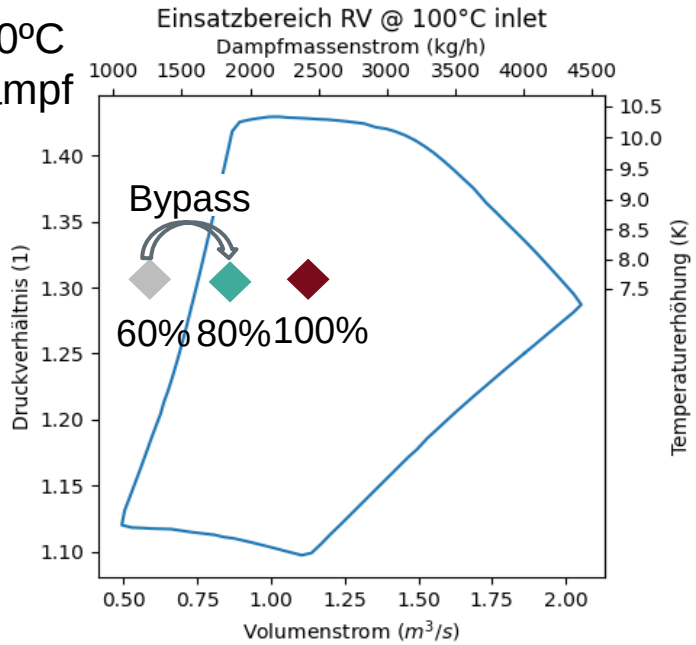


Mehrstufige Verdichtung von 120ºC auf 150ºC im log(p)-h Diagramm von Wasser

- Typischer Temperaturhub pro Stufe ~10K
  - Mehrstufige Ausführung für höhere Hübe
- Überhitzung nach Verdichtung
  - Abkühlung auf Sattdampf durch Wassereinspritzung
    - Erhöht Massenstrom
- Dampfmassenstrom nach letzter Stufe unverändert: 3,4t/h
  - Gewählt um Vergleich zu ermöglichen

RADIALVERDICHTER TEILLASTBETRIEB





- Bypass gewährleistet nötigen min. Massenstrom
  - z.B. 60% Austrittsmassenstrom – dank Bypass strömt jedoch 80% durch Verdichter
- Isenthalpe Entspannung am Ventil → Energieverlust (Alternative: Turbine)
  - Austritt überhitzt → zusätzliche Wassereinspritzung sorgt für Sattdampf am Verdichtereintritt (Vereinfachung für Berechnung)

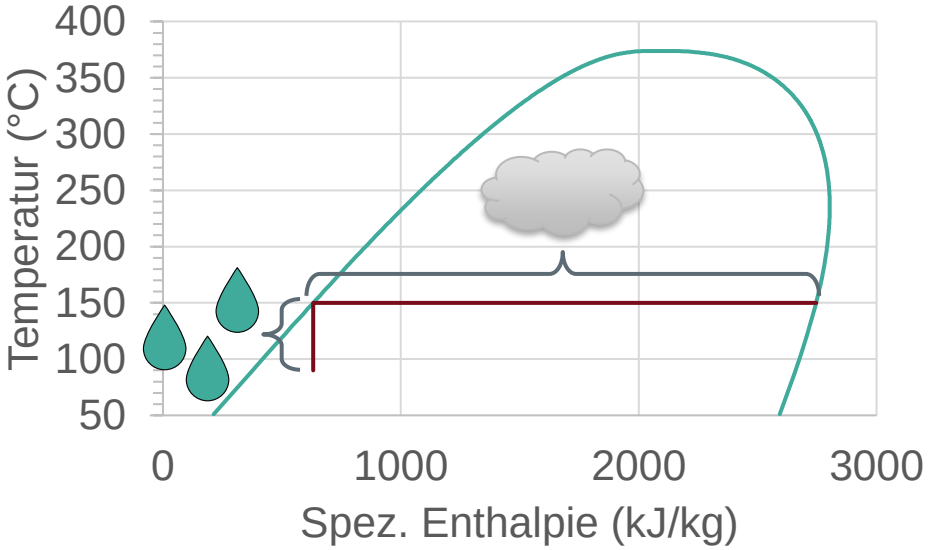
Beispiel: 100% und 80% als mögliche Teillast eines Radialverdichters; 60% Teillast außerhalb des Einsatzbereichs

PREISMODELLE

- Vollständige Systeme sollen verglichen werden
  - Verrohrung zwischen einzelnen Verdichterstufen berücksichtigt
  - Installationskosten der Gesamtanlage für Vergleich nicht relevant
- Wärmepumpenpreise
  - Investitionskosten (ohne Installationskosten) angelehnt an Preise aus IEA Annex 58 Part 1
  - Variation der Preise in Sensitivitätsanalyse
- MVR Preise
  - Aus Herstellerangeboten → in dieser Berechnung konstant
  - Installationskosten für MVR:
    - Vorgeschaltete Wärmepumpe ohne Installationskosten
    - 40% Aufschlag (statisch) für Radialverdichter MVR
    - Kolbenverdichter MVR wegen einstufiger Ausführung ohne Aufschlag

TEILLAST (TL) COP VERGLEICH

	COP 100%TL	COP 100%TL	COP 80% TL	COP 60%TL	COP 40%TL
WP 90°C + RV MVR	133%	3,36	3,23	2,86	2,33
WP 120°C + RV MVR	115%	2,90	2,83	2,70	2,55
WP 120°C + KV MVR	111%	2,80	2,80	2,81	2,97
WP 150°C	100%	2,50	2,50	2,50	2,50



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

SENSITIVITÄTSANALYSE

- Fixierte Größen
  - CapEx MVR (inkl. Aufschlag)
  - Elektrische Effizienz MVR
- Variierte Größen
  - Elektrizitätskosten
  - Betriebszeit
  - Teillastzeiten
  - COPs
  - Wärmepumpenkosten

TOOL

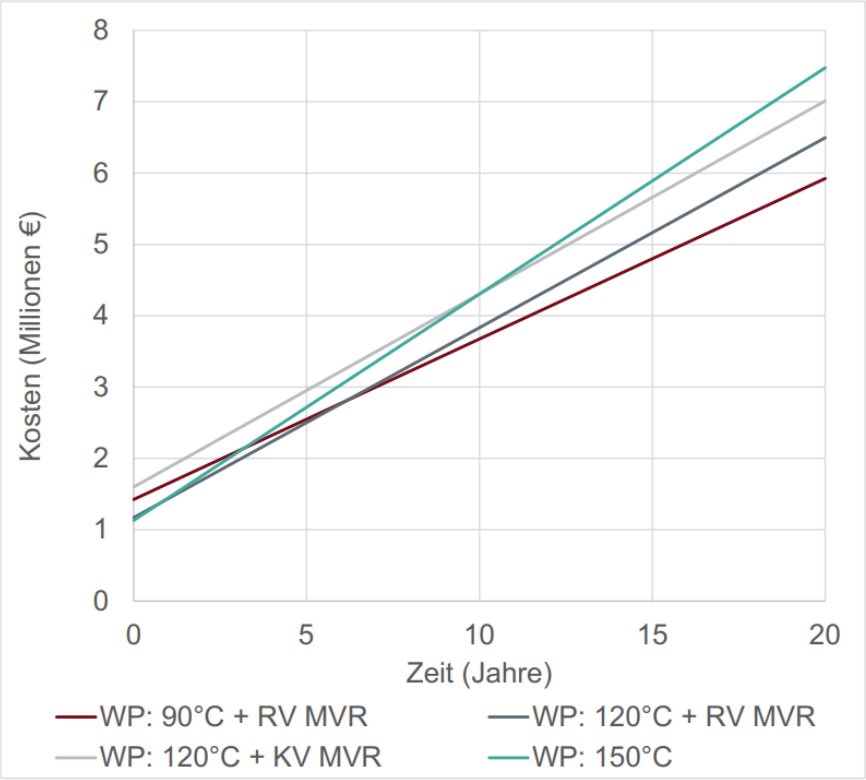
Wärmepumpen COPs	
COP WP 90°C	6,5
COP WP 120°C	3,2
COP WP 150°C	2,2

Investitionskosten Wärmepumpen	
Kostenfaktor	1
CAPEX WP 90°C (€/kW_th)	275
CAPEX WP 120°C (€/kW_th)	350
CAPEX WP 150 (€/kW_th)	500
CAPEX Elektroboiler (€/kW_th)	100

Elektrizität	
Stromkosten (€/MWh_el)	100
Elektrische Effizienz MVR	90%

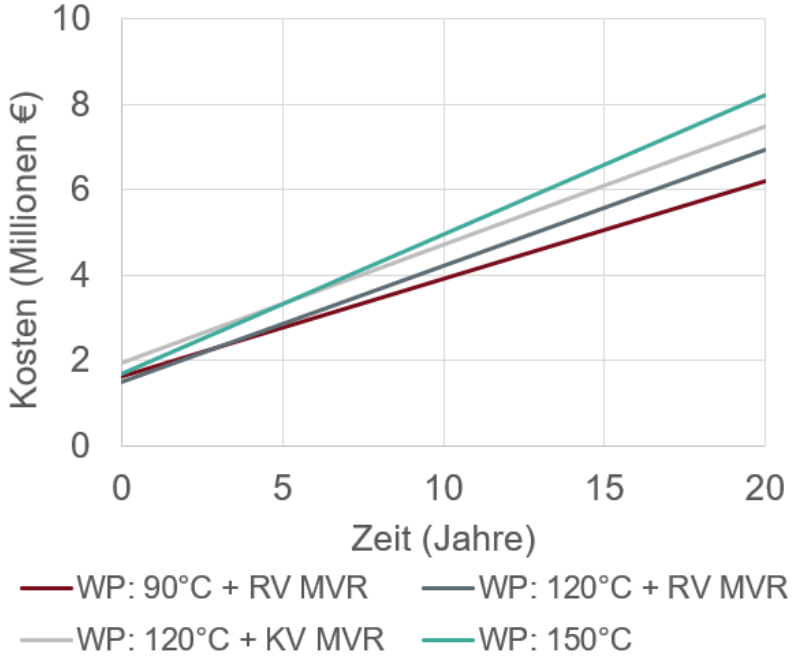
RV - MVR Installation	
Kostenfaktor	1,4

Betriebszustände	
Betriebsstunden (h/a)	3500
Anteil 80%-Teillast	10%
Anteil 60%-Teillast	10%
Anteil 40%-Teillast	10%

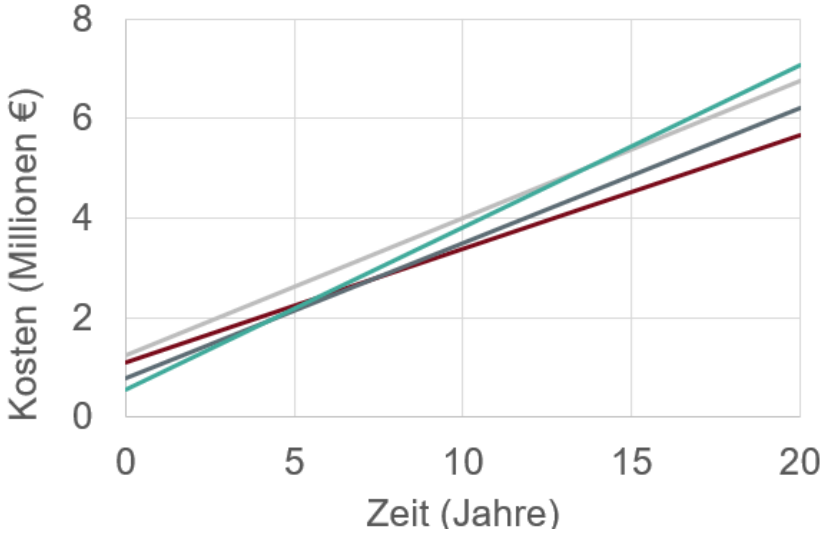


VARIATION WÄRMEPUMPEN CAPEX

	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
CapEx (€/kW_th)	412,5	525	750



	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
CapEx (€/kW_th)	137,5	175	250



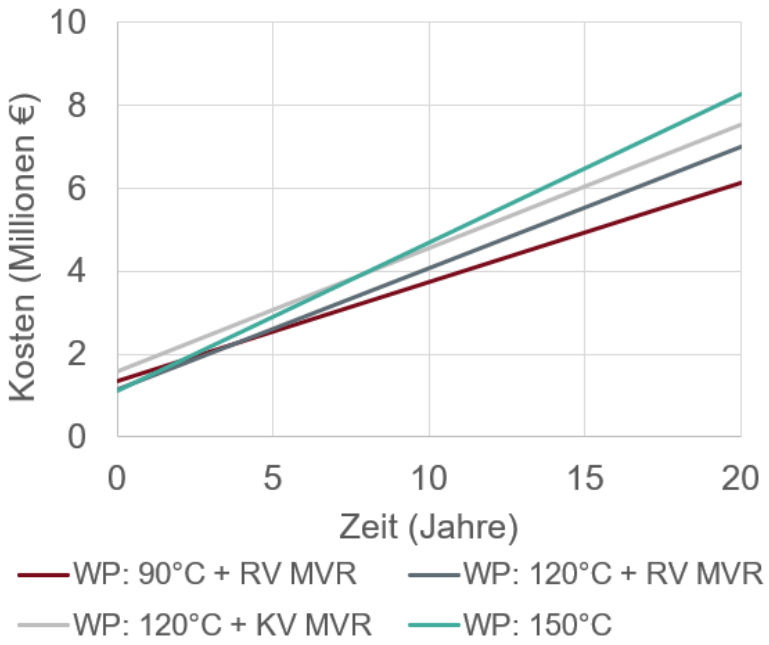
	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	6,5	3,2	2,2

Laufzeit (h/a)	3500		
Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit	10%	10%	10%

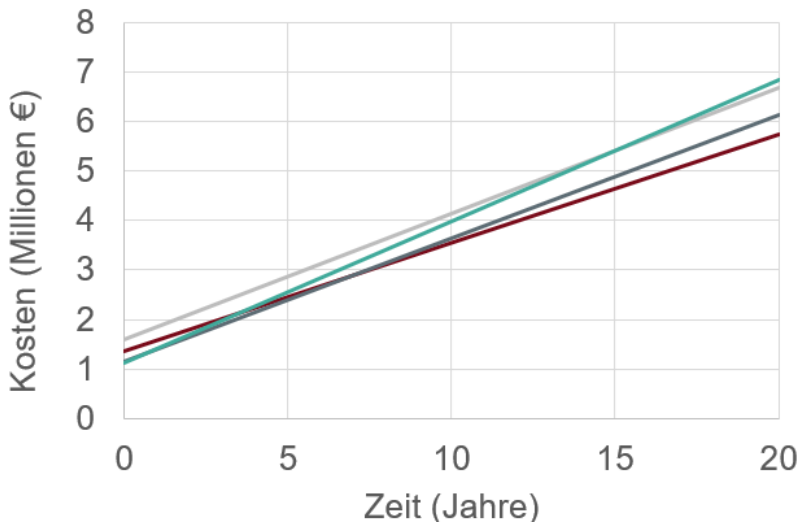
Elektrizitätskosten (€/MWh)	100

VARIATION WÄRMEPUMPEN COP

	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	5,8	2,9	2



	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	7,3	3,6	2,5



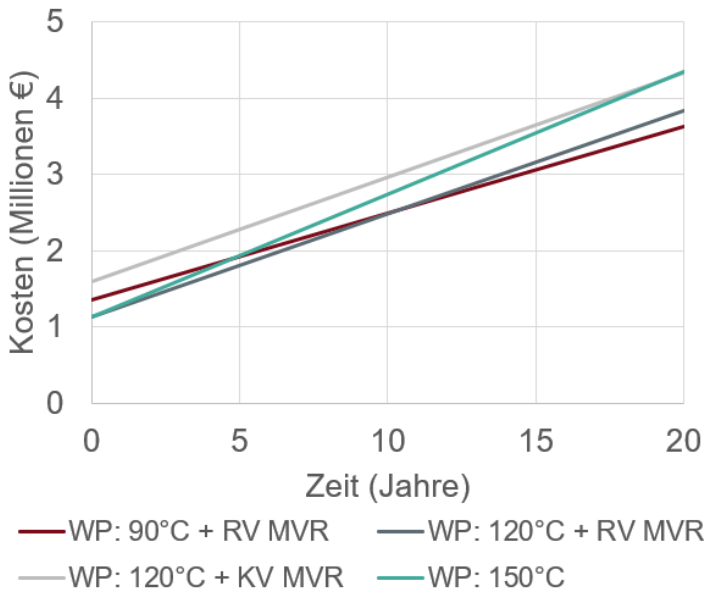
	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
CapEx (€/kW_th)	275	350	500

Laufzeit (h/a)	3500		
Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit (%/a)	10%	10%	10%

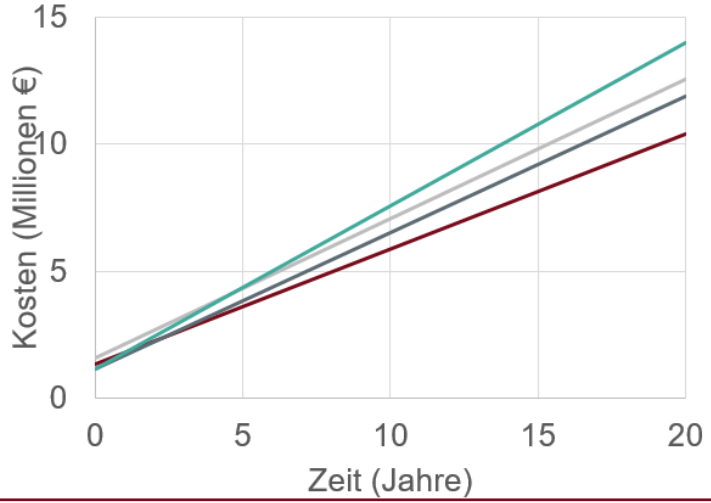
Elektrizitätskosten (€/MWh)	100

VARIATION ELEKTRIZITÄTSKOSTEN

50 €/MWh



200 €/MWh

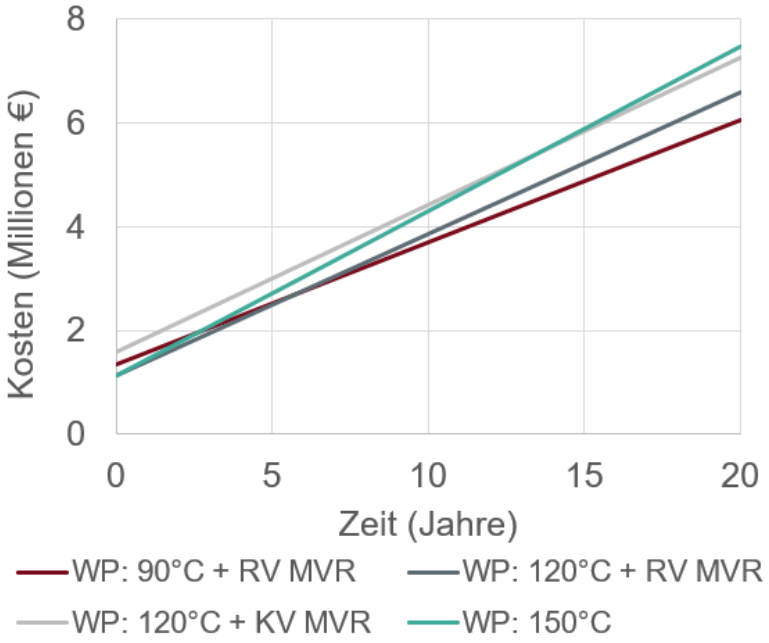


	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	6,5	3,2	2,2
CapEx (€/kW_th)	275	350	500

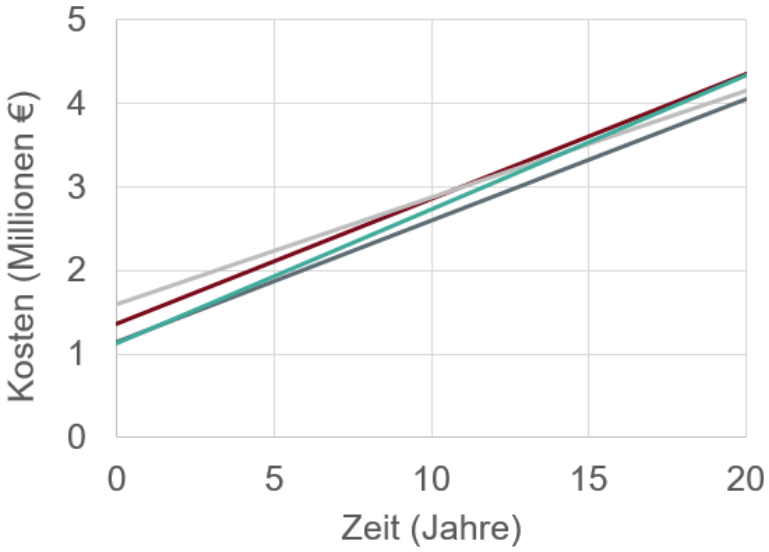
Laufzeit (h/a)	3500		
Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit (%/a)	10%	10%	10%

VARIATION TEILLAST

Kein Teillastbetrieb



Ständig 40% Teillast

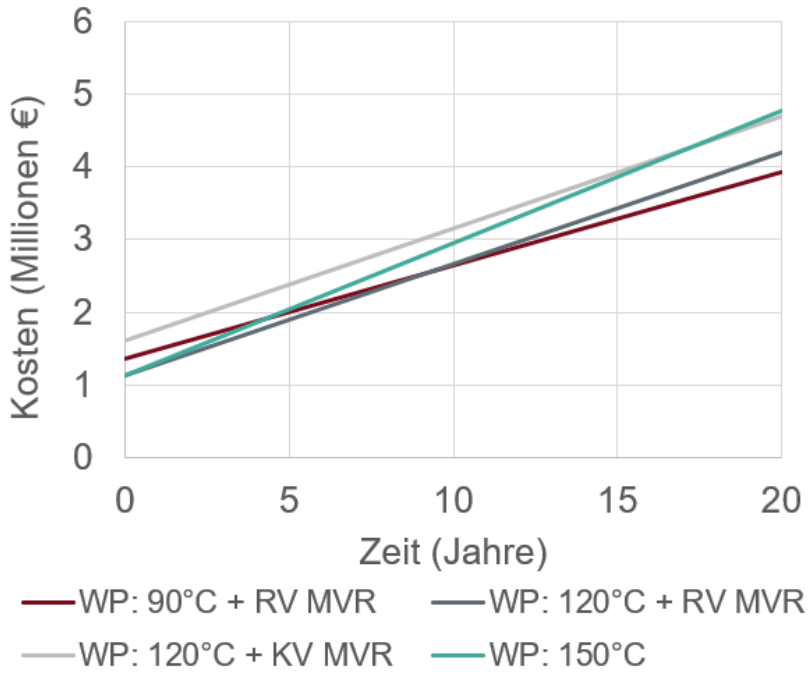


	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	6,5	3,2	2,2
CapEx (€/kW_th)	275	350	500

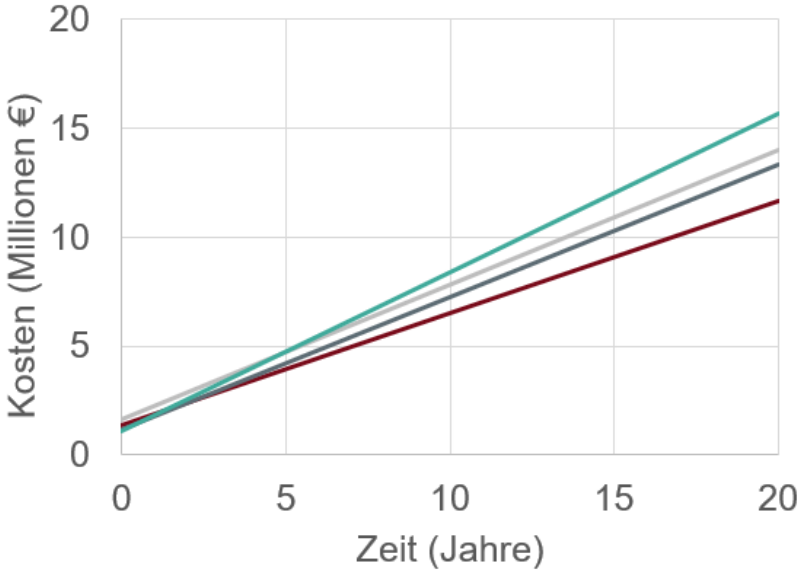
Laufzeit (h/a)	3500
Elektrizitätskosten (€/MWh)	100

VARIATION BETRIEBSZEIT

Betriebszeit 2000 h/a



Betriebszeit 8000 h/a

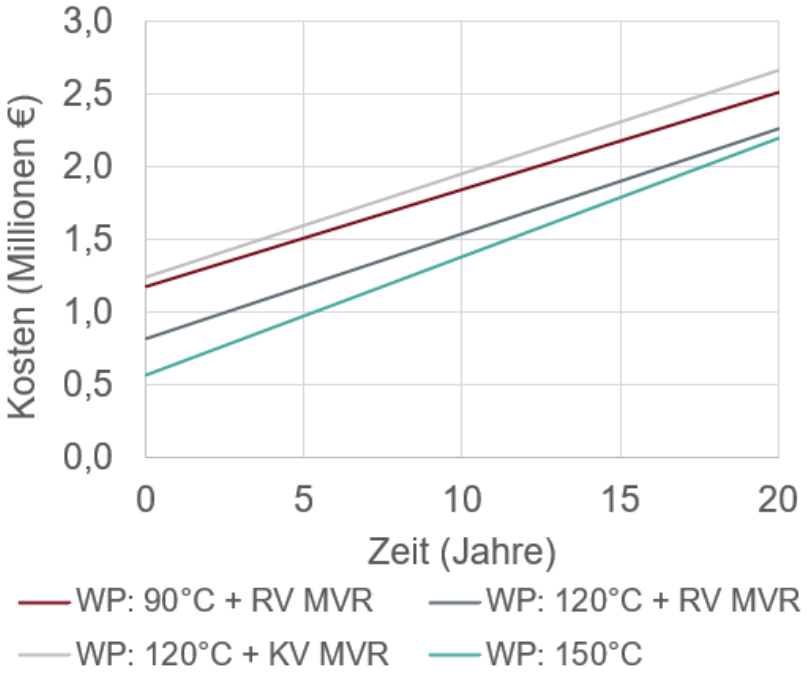


	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	6,5	3,2	2,2
CapEx (€/kW_th)	275	350	500

Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit (%/a)	10%	10%	10%

Elektrizitätskosten (€/MWh)	100

BESONDERS GÜNSTIGER FALL FÜR 150°C WÄRMEPUMPE



- Effiziente Wärmepumpen
- Niedrige Wärmepumpenkosten
- Niedrige Elektrizitätskosten
- Wenig Betriebsstunden
- Hoher Teillastanteil

gleichzeitig

	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	7,3	3,6	2,5
CapEx (€/kWth)	137,5	175	250

Laufzeit (h/a)	2500		
Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit (%/a)	10%	10%	40%

Elektrizitätskosten (€/MWh)	50

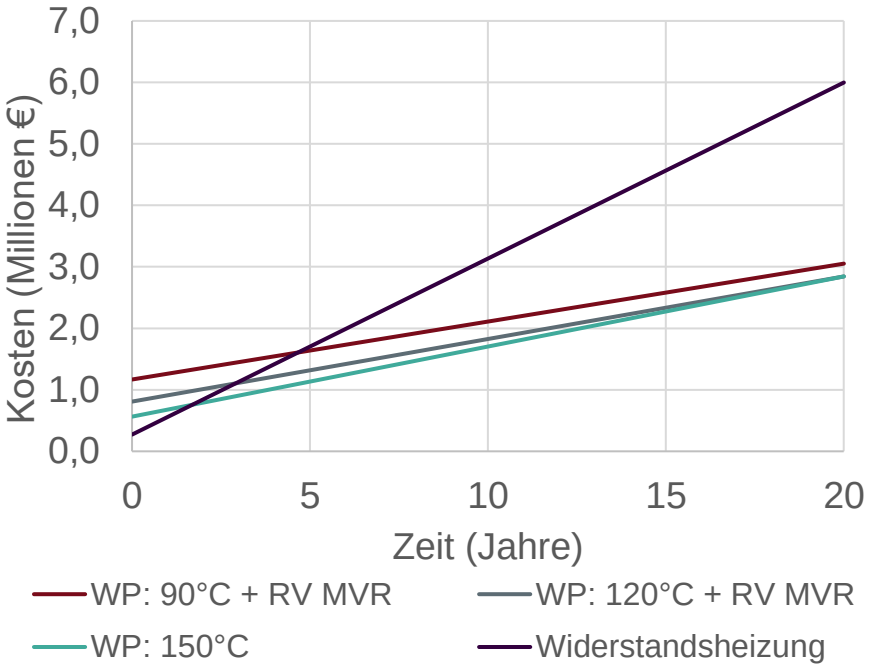
DAMPFERZEUGUNG MIT ELEKTRISCHER WIDERSTANDSHEIZUNG

- Besonders niedrige CAPEX
- Trotzdem erst bei Elektrizitätskosten <25 €/MWh vorteilhaft

	WP 90°C	WP 120°C	WP 150°C
COP	6,5	3,2	2,2
CapEx (€/kW_th)	275	350	500

Laufzeit (h/a)	3500		
Teillast	80%	60%	40%
Laufzeit (%/a)	10%	10%	10%

Elektrizitätskosten (€/MWh)	100



WÄRMEPUMPE VS. MVR

- MVR vorteilhaft:
  - Hohe Elektrizitätskosten
  - Wenig Teillast
  - Viele Betriebsstunden
  - 90ºC WP Konfiguration mit RV-MVR am effizientesten bei hoher Nutzung und wenig Teillast
  - KV-MVR nur bei höheren Teillastzeiten günstiger

- 150°C Dampf direkt mit Wärmepumpe vorteilhaft:
  - Günstige Wärmepumpen
  - Hohe Teillastzeiten
  - Niedrige Elektrizitätskosten
  - Hohe WP COPs

} gleichzeitig

AUSBLICK

- 90ºC WP Konfiguration – Dampferzeugung unterhalb Atmosphärendrucks
  - Höhere Anforderungen an Abdichtung
  - Entlüftung des Systems aufwendiger
  - Mehraufwand soll in zukünftiger Analyse berücksichtigt werden
- Wartungsaufwand Kolbenverdichter MVR
  - Geschätzt höher als bei Radialverdichtern und Wärmepumpen
  - Wartungsaufwand soll in zukünftiger Analyse berücksichtigt werden
- Zinszahlungen bei Investitionskosten
  - Relevant für Investmententscheidungen von Industriebetrieben
  - Preismodell sollte um diesen Aspekt erweitert werden

AUSBLICK

- Energieverluste bei Entspannung am Bypass
  - Im Modell wurde isenthalpe Entspannung angenommen → maximale Energieverluste
  - Rückgewinnung z.B. durch Turbine
  - Parallele kleinere Verdichter mit partieller Abschaltung
    - Nur bei höheren thermischen Leistungen möglich (hier gewählte Konfigurationen am unteren Leistungslimit von RV-MVR)
- Teillastverhalten Wärmepumpen
  - Für diese Berechnung ohne Abschläge angenommen
  - Verhalten sollte in zukünftigen Analysen genauer abgebildet werden (Vorteil für MVR)

AIT @ DEUTSCHE KÄLTE- UND KLIMATAGUNG

AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

BAMBOO

Sophie Knöttner

IV.09
Flexibilität durch Wärmepumpenintegration
Do, 17.11., 18:00, AA IV

Bernd Windholz

IV.11
Marktpotentialabschätzung dampferzeugender Hochtemperatur-Wärmepumpen bis 150° C
Fr, 18.11., 9:00, AA IV

Felix Hubmann

IV.12
Laständerungen bei dampferzeugenden Wärmepumpensystemen
Fr, 18.11., 9:30, AA IV

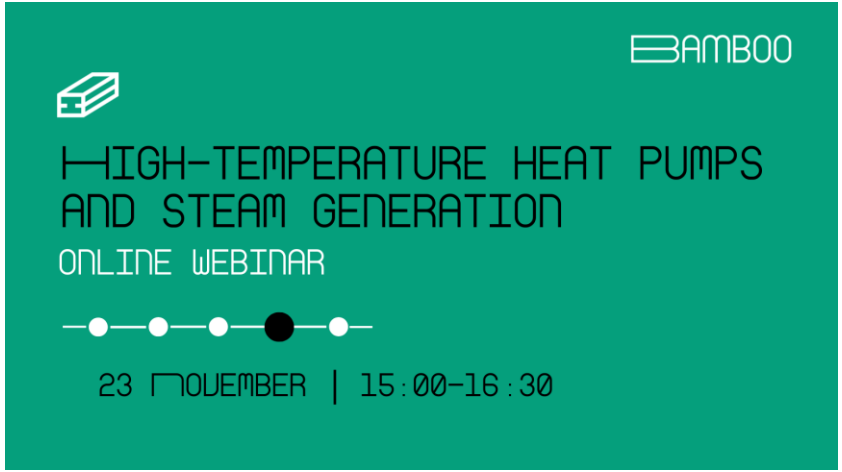
Johannes Riedl

II.1.17
Messergebnisse einer dampferzeugenden Wärmepumpe mit Flash tank
Fr, 18.11., 13:30, AA II.1

Dieses Projekt wurde durch die Europäische Union im Forschungs- und Innovationsprogramm “Horizon 2020” (Grant Agreement Nr. 820771) finanziert.

THANK YOU!

Felix Hubmann, 18.11.2022



Webinar: High-temperature heat pumps and steam generation - YouTube

Felix Hubmann
Sustainable Thermal Energy Systems
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 2 | 1210 Vienna | Austria
felix.hubmann@ait.ac.at

The project has received funding from the European Union's Horizon 2020 programme for energy efficiency and innovation action under grant agreement No. 820771.