

Prozesswärme mit CST und Hochtemperatur-Wärmepumpen

Wie kann die Kombination der Technologien zu einer vollständigen Dekarbonisierung industrieller Wärmeversorgung bis 300°C beitragen?

Beiträge von:

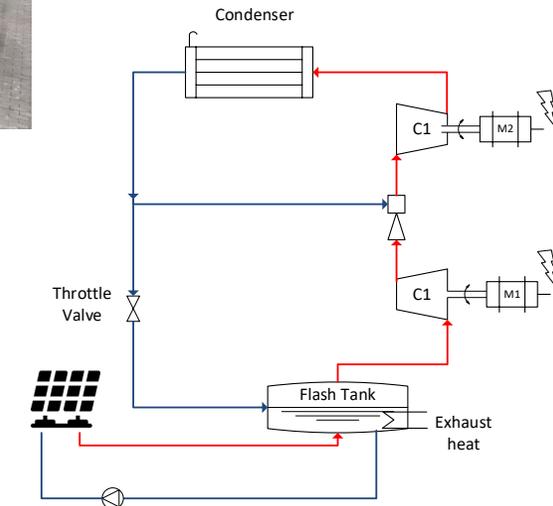
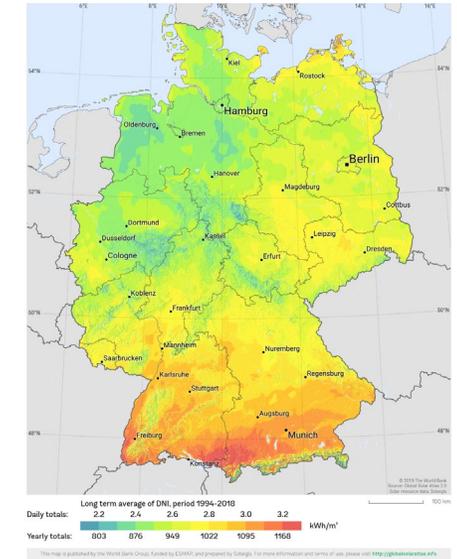
Dr. Panos Stathopoulos, Dirk Krüger - DLR

Dr. Peter Nitz - Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Robert Stieglitz - KIT

Inhalte

- Was können CST für die industrielle Wärmewende leisten und welche Hürden erfahren diese Systeme
- Was können HTWP für die industrielle Wärmewende leisten?
- Wie sieht der aktuelle HTWP Markt aus? Wo wird noch F&E benötigt?
- Können kaskadierte Systeme aus CST und HTWP einen Beitrag leisten und wo?

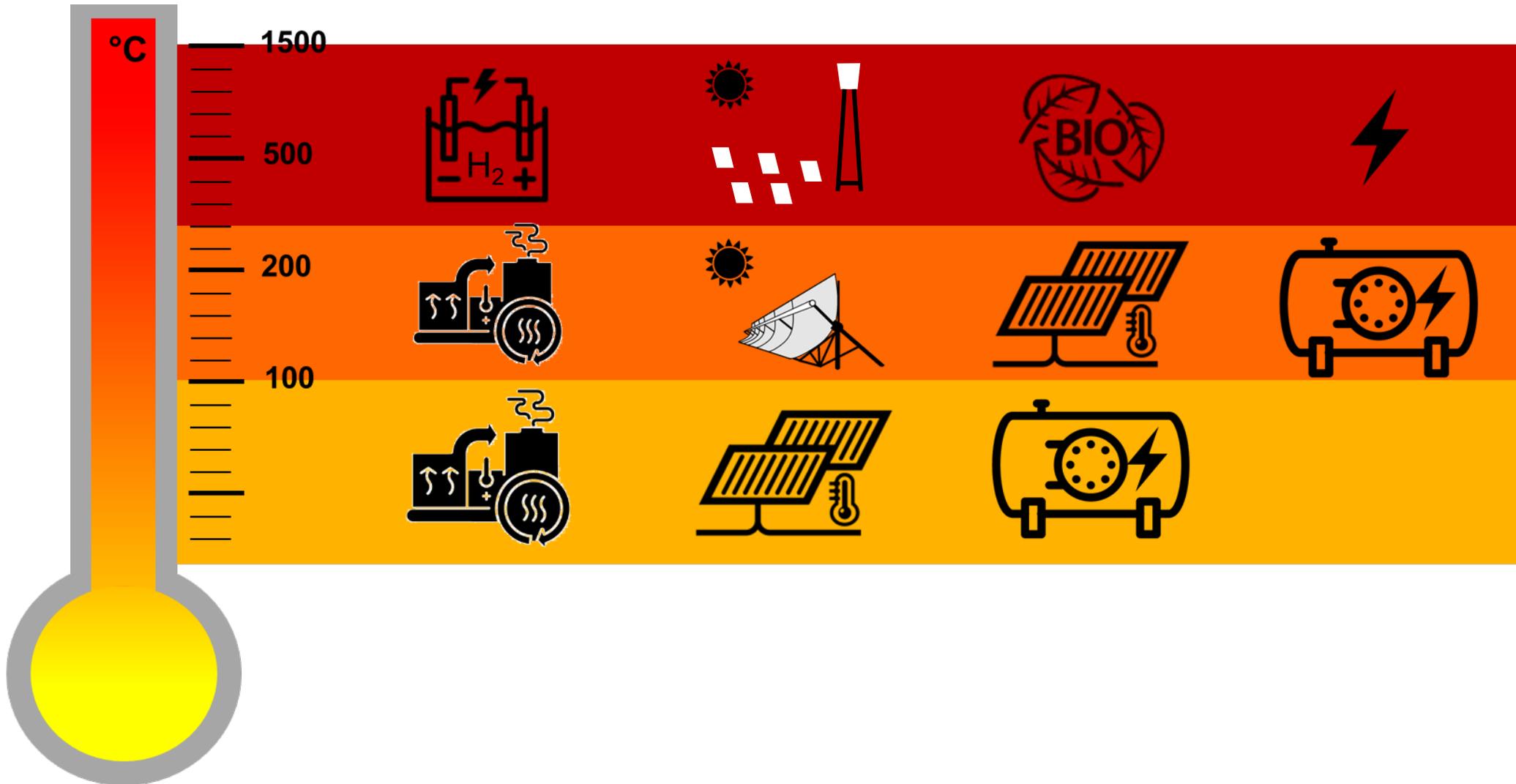


Industrielle Prozesswärme



- Wärmebedarf in DE ca 510 TWh/a
- Häufig im Hochtemperaturbereich kombiniert mit stofflicher Nutzung der Wärmequelle
- Abwärme ist sehr wichtig und nicht wirklich dokumentiert

Wie können potentielle Lösungen aussehen



Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

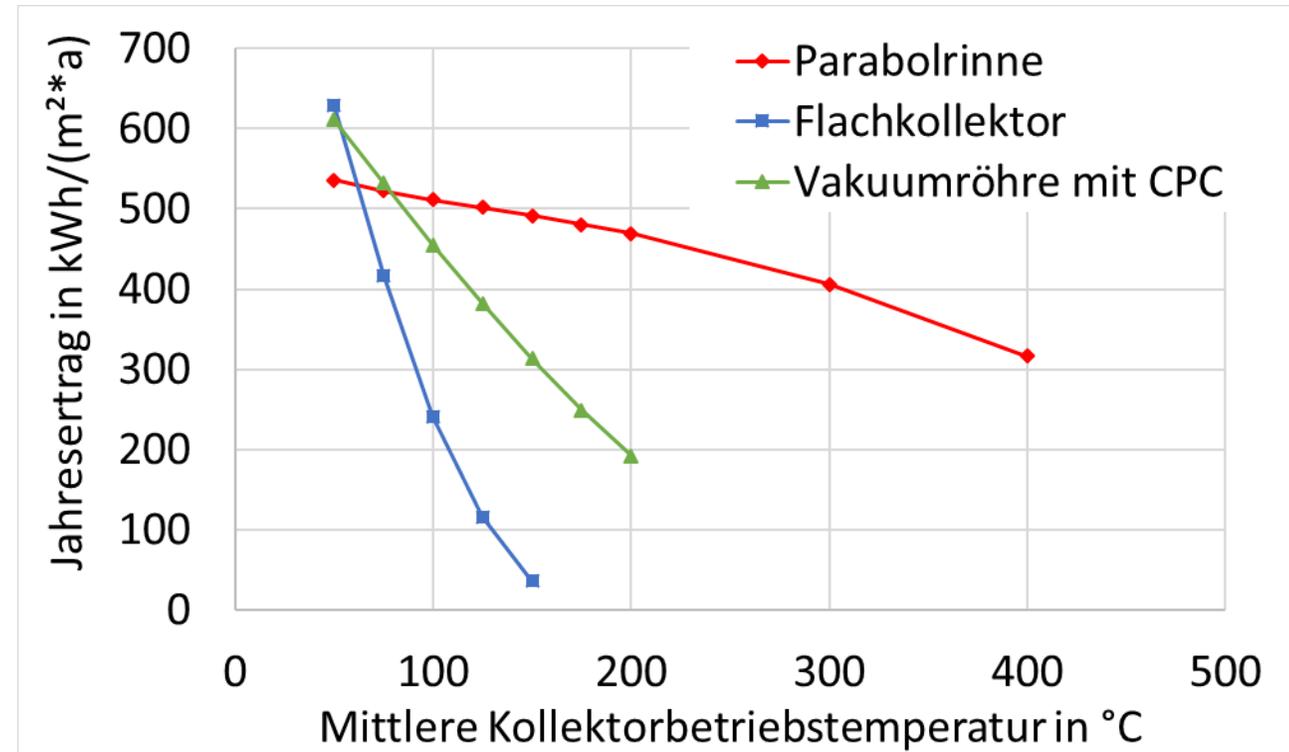
Vergleich der Jahreserträge verschiedener Kollektortypen

Randbedingungen:

- Verluste in Rohrleitungen und Wärmekapazitäten enthalten
- Gegenseitige Abschattung und 2% Verschmutzung für Rinnen berücksichtigt

=> Break-even @ 50...80 °C

=> Parabolrinnen auch attraktiv für Temperaturen über 100 °C



Berechnete Jahreserträge für den Standort Potsdam

Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

Betriebserfahrung aus 1100 m² Kollektorfeld in einem Chemiebetrieb bei Antwerpen

- Spezifischer Kollektor-Ertrag 422 kWh/(m²*a)
- Kollektormitteltemperatur 245°C
- Sattdampf 165°C am Austritt Primärkreis

Jahresertrag	468	MWh _{th}
Bruttoapertur	1108	m ²
Spezifischer Ertrag	422	kWh/m ²
DNI	917	kWh/m ²
Jahreswirkungsgrad	46	%

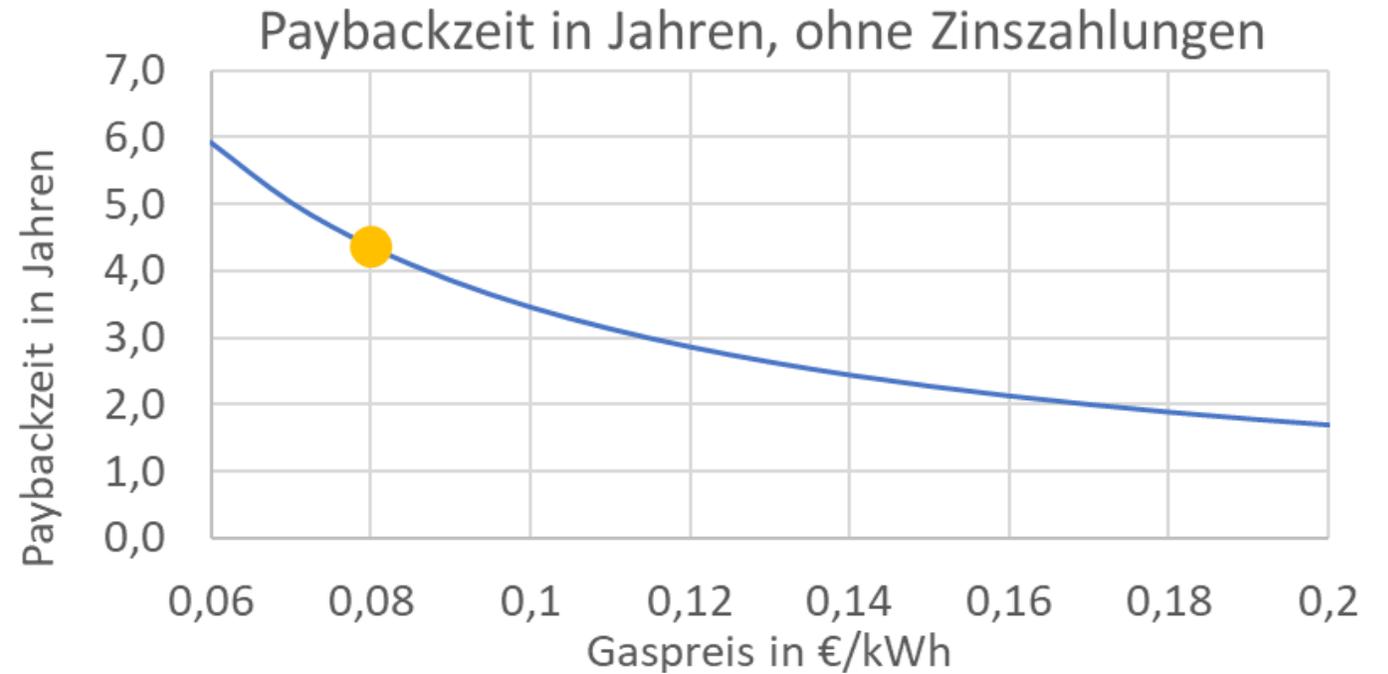
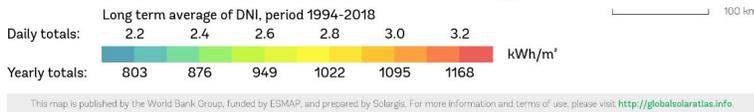
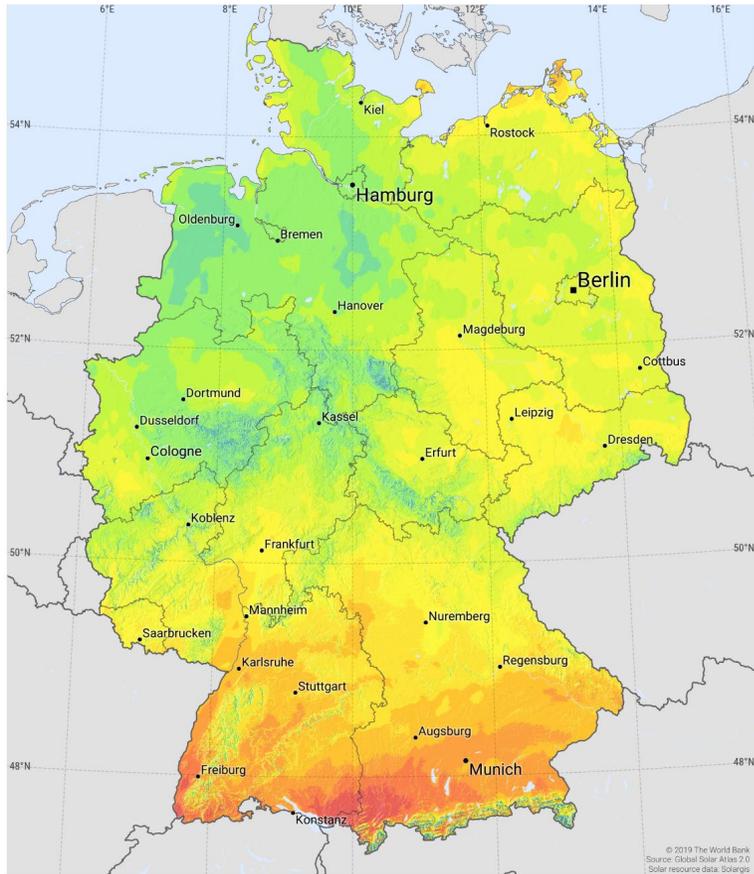
Gemessener Ertrag im Primärkreislauf für die Zeit
vom 01.08.2020 bis 31.07.2021



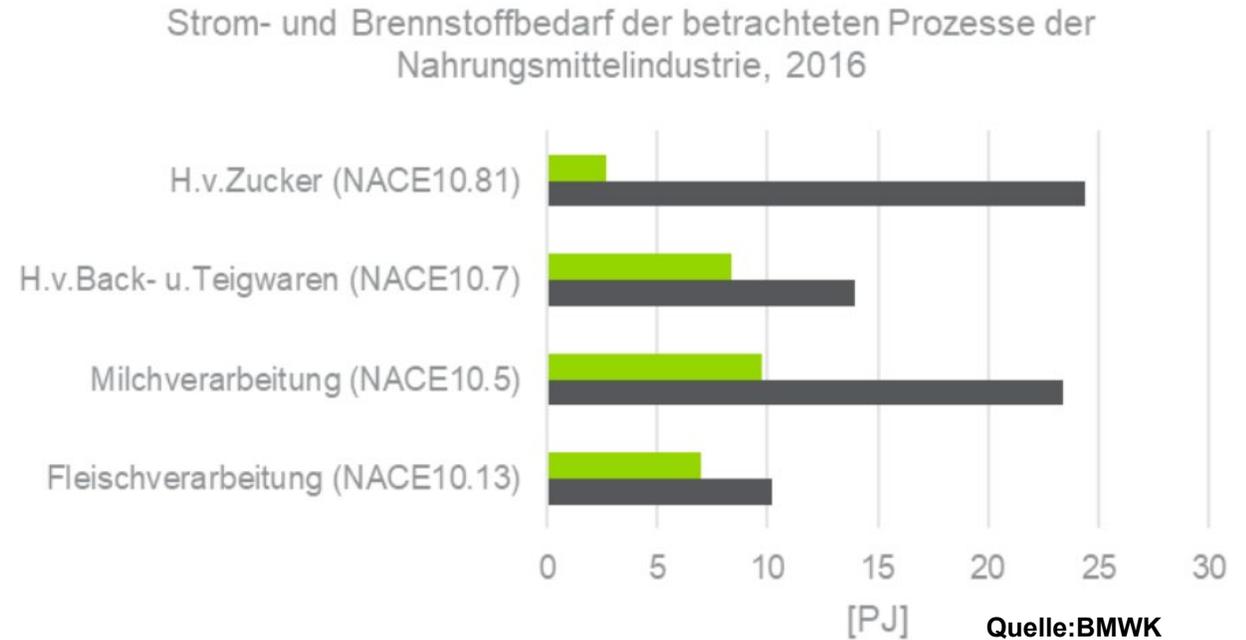
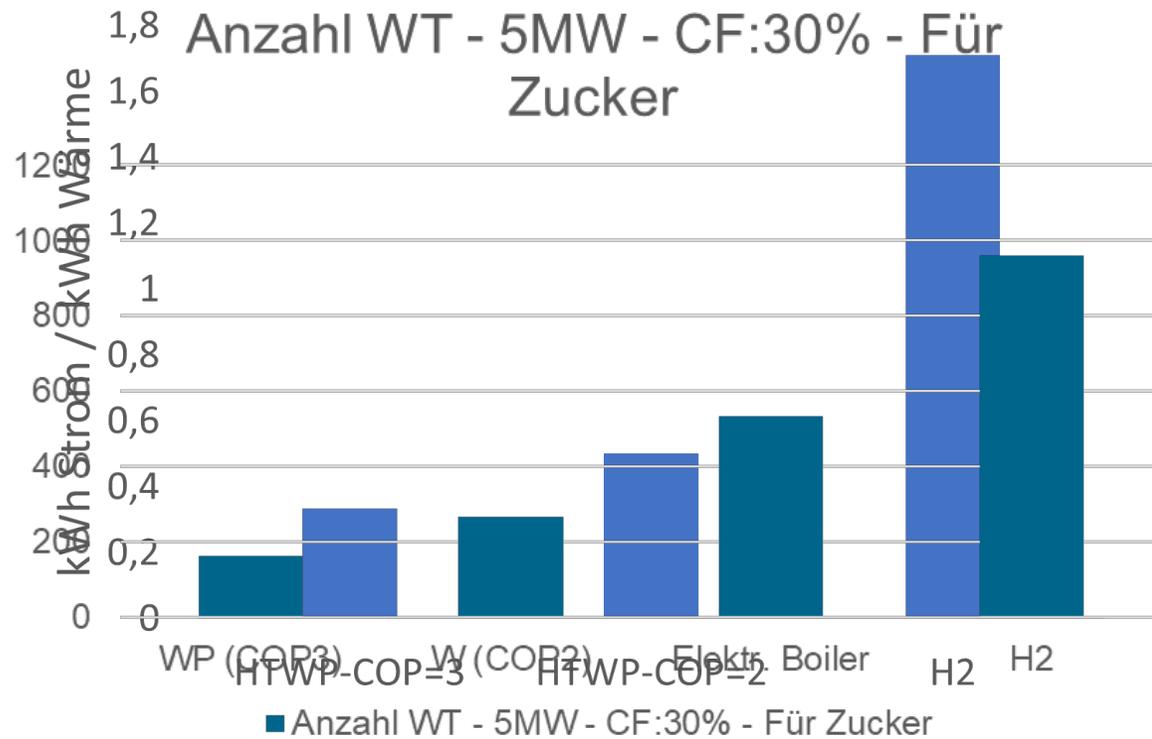
Parabolrinnenfeld
Foto: Solarlite CSP Technology GmbH

Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

Einfache Berechnung der Paybackzeit ohne Zinsen für Prozesswärme



Hochtemperaturwärmepumpen – Warum

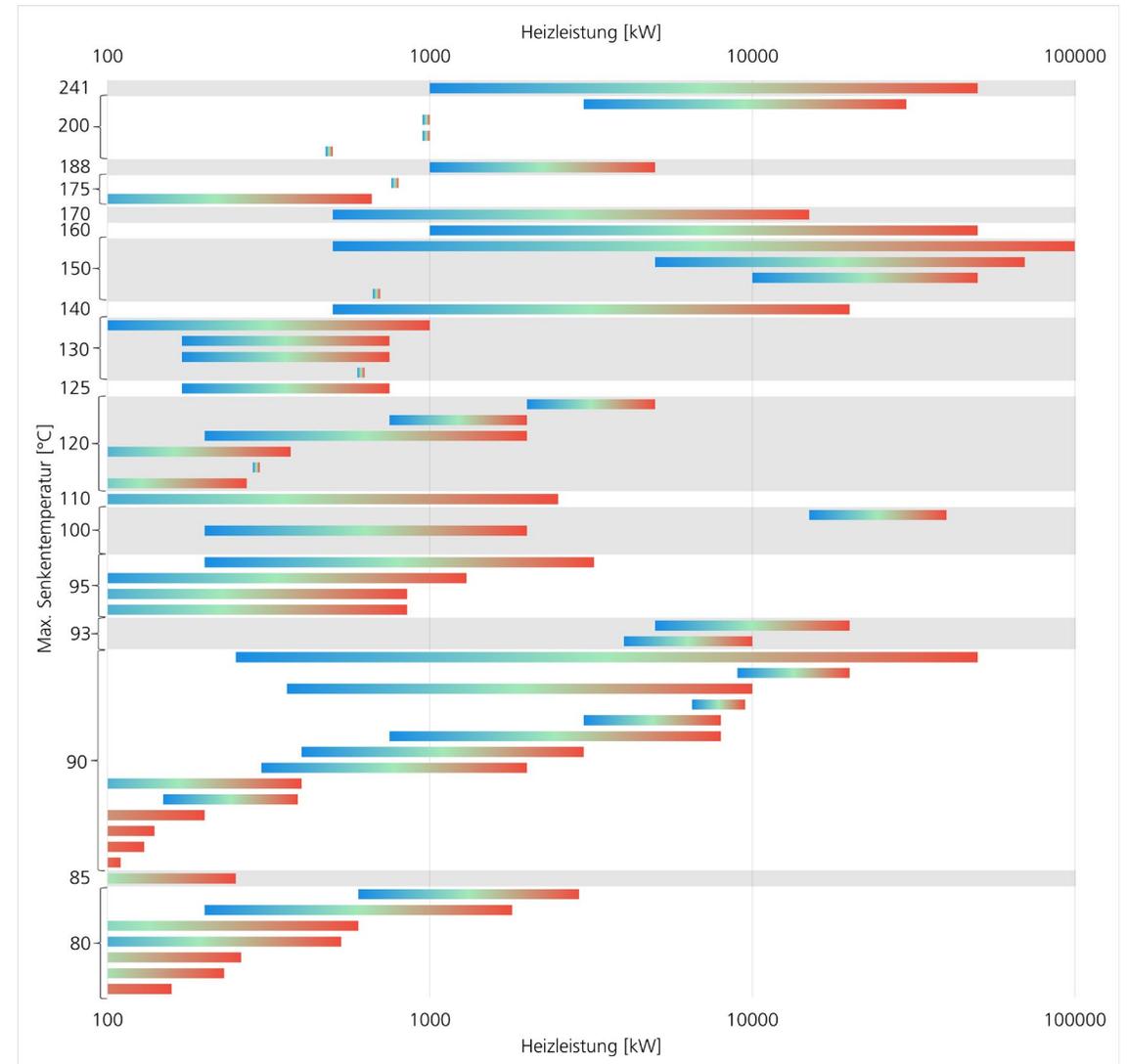


- **Maximale Einsparung von Primärenergie**
- **Dekarbonisierung der Industrie schon gesetzt**
- **Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nicht gefährden**

Technologie- und Marktübersicht HTWP für die Industrie

HT-Wärmepumpen bis ca. 240°C, ab TRL 7

- Über den gesamten Temperaturbereich bis ca. 140°C und Leistungsbereich bis zu 100 MW sind Anlagen verfügbar
- Darüber hinaus bis 240°C nur bedingt verfügbar
- Ab 130°C und Zielanwendung Dampfnetze: Kombinationen mit Dampf-Nachverdichtung (MVR) ermöglicht ggf. eine weitere Erhöhung der Temperatur



Hochtemperaturwärmepumpen – Work @ DLR

Reverse Brayton HTWP für Trocknungsprozesse mit Gase

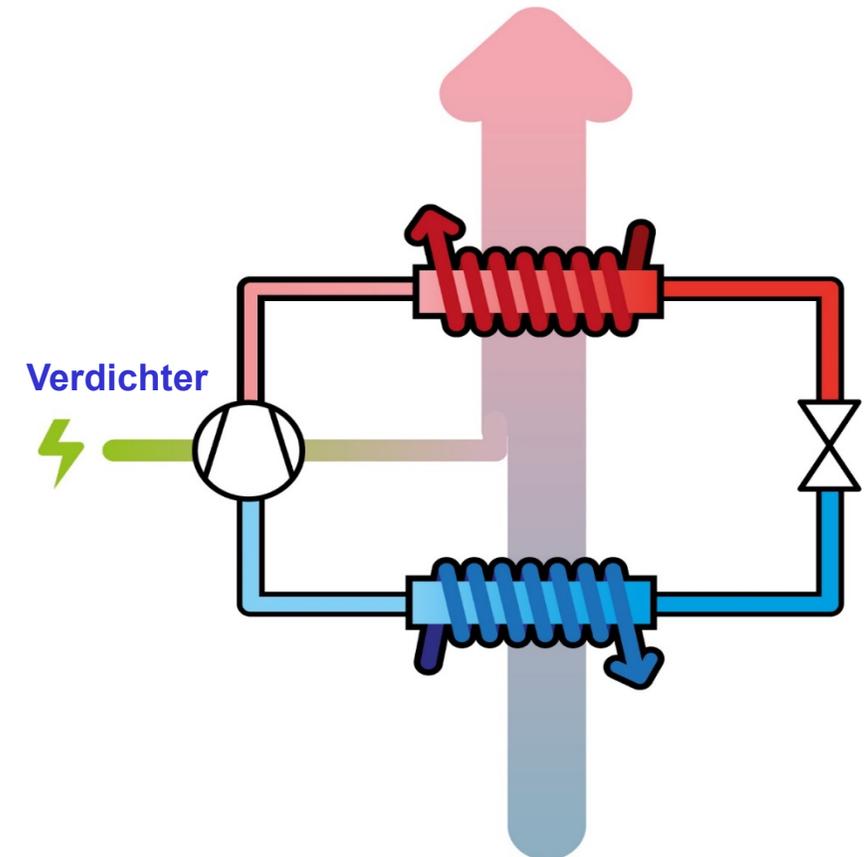
Entwicklungsziele:

- Wärmeleistung: 100 kW ~ 15 MW
- Wärmesenke - T : 150 - 400 °C
- Wärmequelle - T : 60- 100°C
- Arbeitsmedien : Luft

Erste Pilotanlage in Cottbus - 200kW_{th} , $T_{\text{senk.}}: 330^\circ\text{C}$



Prozesswärme: $150^\circ\text{C} - 330^\circ\text{C}$



Abwärme: $50-100^\circ\text{C}$

Own representation, based on TNO report Robert de Boer et al.

Hochtemperaturwärmepumpen – Work @ DLR

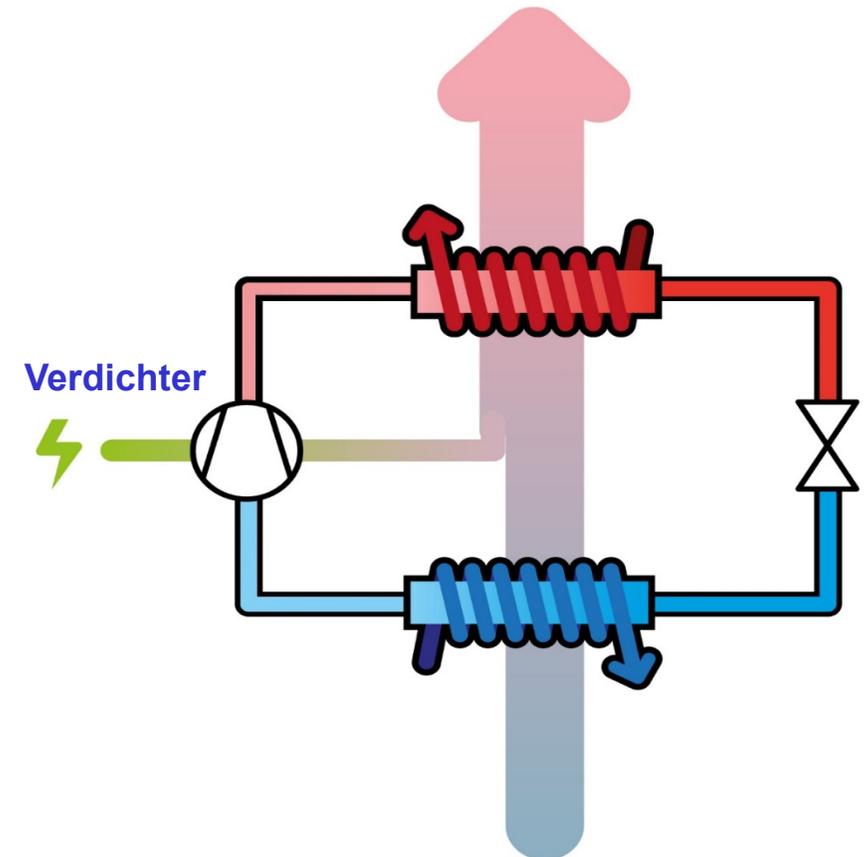
Reverse Rankine HTWP für Dampferzeugung

Entwicklungsziele :

- Wärmeleistung : 200 kW ~ 15 MW
- Wärmesenke - T: 150 - 250 °C
- Wärmequelle - T : >90°C
- Arbeitsmedium: Wasser

Erste Pilotanlage in Cottbus - 650kW_{th} , $T_{\text{sink}}: 200^\circ\text{C}$

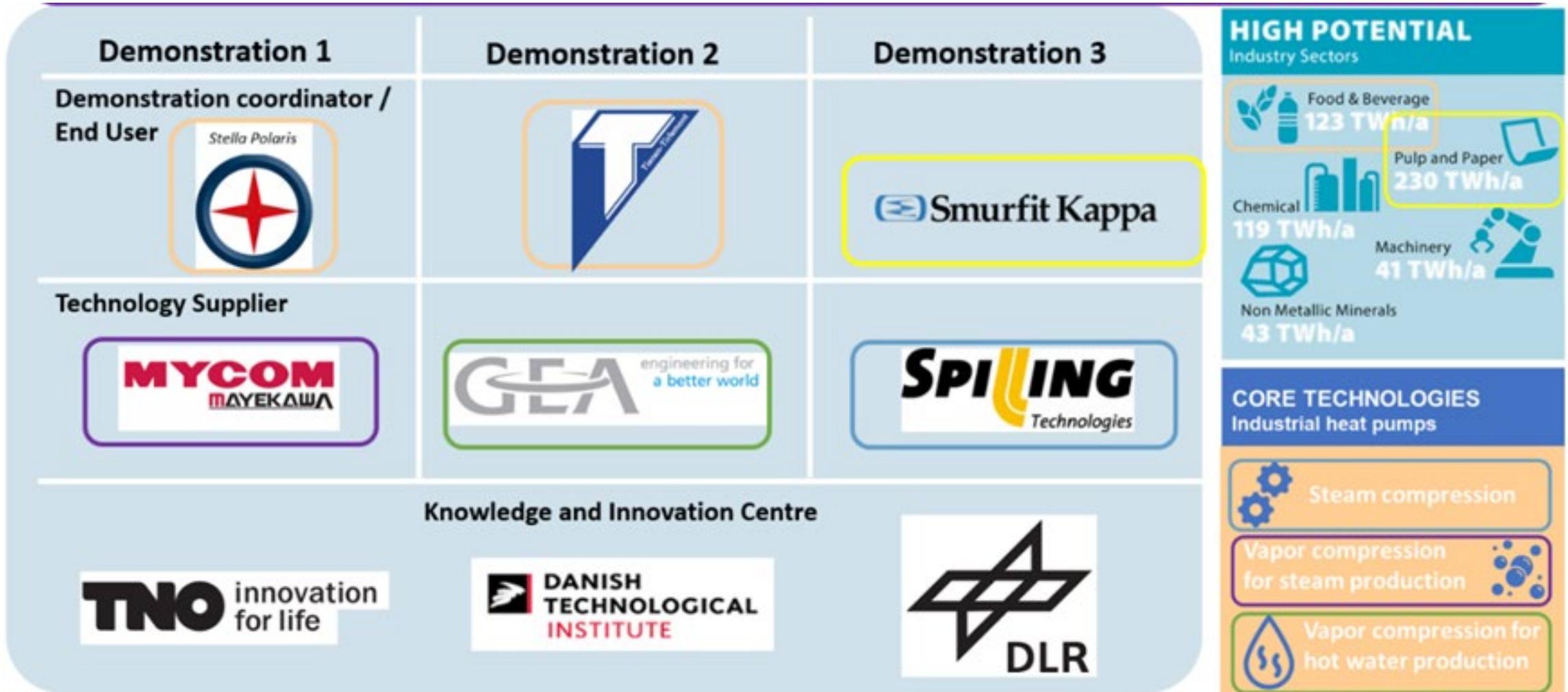
Prozesswärme : 150°C - 250°C



Abwärme: >90 °C

Own representation, based on TNO report Robert de Boer et al.

SPIRIT Projekt – Horizon Europe



Technologie- und Marktübersicht HT-WP für die Industrie

Aktuelle Hemmnisse und Forschungsfragen – HT-WP bis ca. 240°C

Technisch

- Verdichtungssystem für die benötigten Druck und Temperaturen
- Dampferzeugung noch herausfordernd

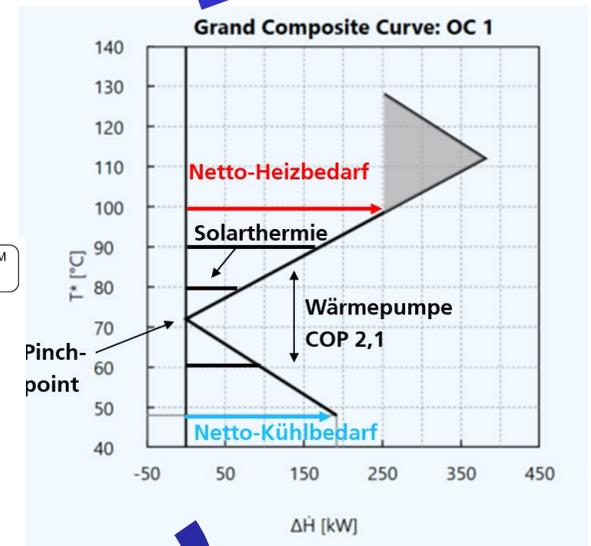
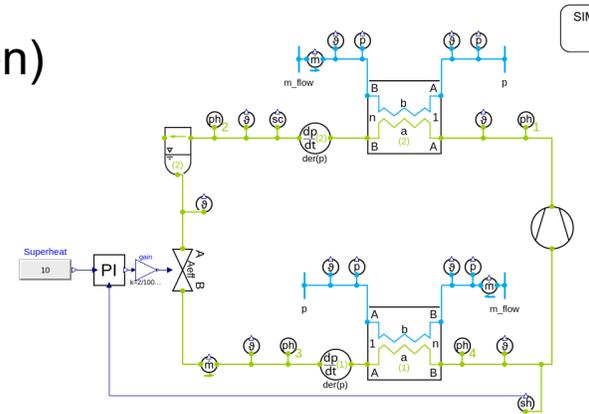
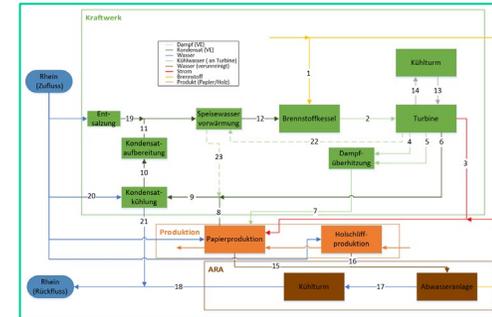
Ökonomisch

- Verhältnis Gaspreis zu Strompreis
- Höhere Investitionskosten im Vergleich zu Alternativen

Integration

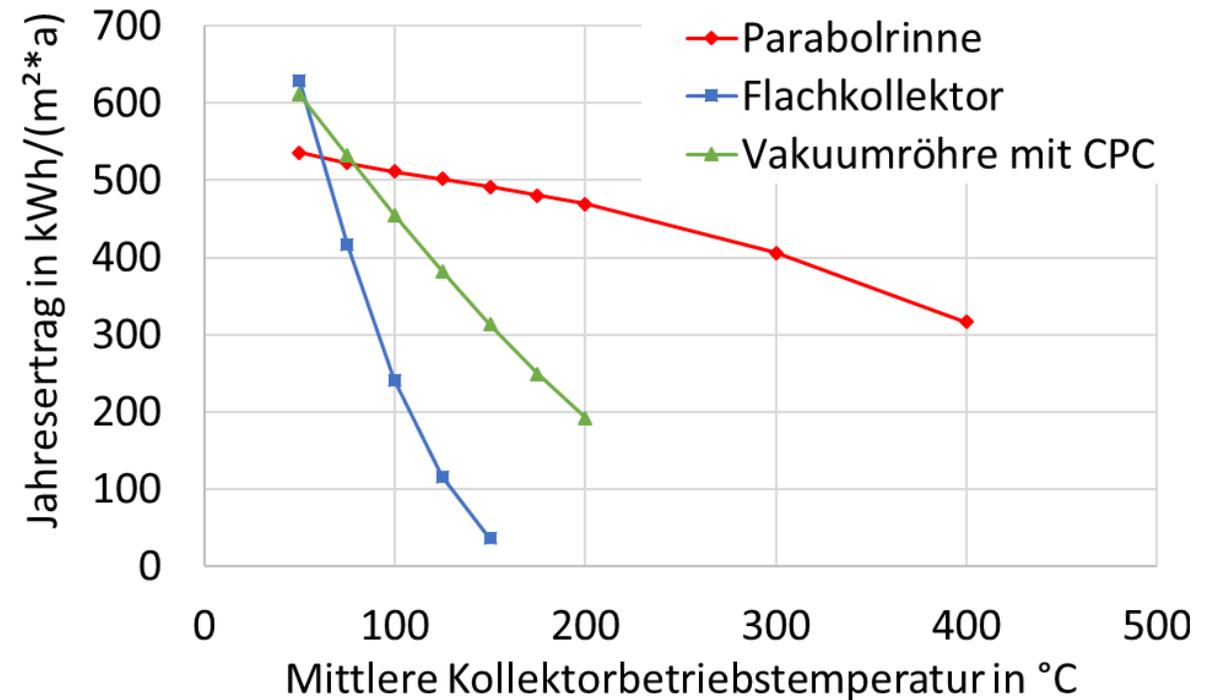
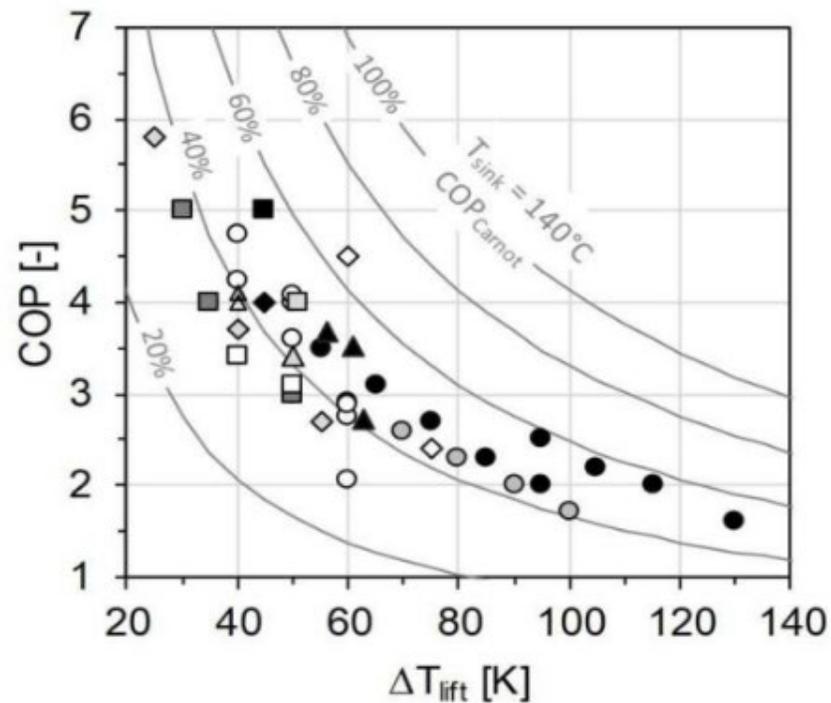
- Genaue Prozessanalyse (inkl. Erschließung von Quellen) erforderlich, um den geeigneten Integrationspunkt zu identifizieren (bspw. Pinch-Analyse)

No.	Wärmeform	Medium	Messwert (Bar)	Temperatur (°C)	Druck (bar)	Leistung (MW)	Kommentar
1	Brennstoff	Feinstoff	-	-	-	165	Brennstoff extern = Schornstein
2	Kesseldampf	Dampf	180 = 180 km	320	95	165	
3	Strom	-	-	-	-	40-45	Fasst diese Leistung zu den anderen über?
4	Dampferneimie 1	Dampf	-	230	10		
5	Dampferneimie 2	Dampf	-	160	3,5		
6	Kondensat	Wasser	-	80-90	atm		ist die Temperatur richtig?
7	Prozessdampf	Dampf	90-120 pro Prozessströme	165	3,5		Wenden die Dampfströme vermischen?
8	Kondensat (Papier)	Wasser	25% Verlust	80-90	atm		ist die Temperatur richtig?
9	Kondensat (gesamt)	Wasser	-	-	atm		ist dies die Mischung aus 6 & 8 (8,2)? über überbr. & d. l. l. gestrichelt.
10	Kondensat (gekühlt)	Wasser	-	70	atm		
11	Kondensat (aufbereitet)	Wasser	-	70	atm		
12	Speisewasser	Wasser	-	130	atm		
13	Turbinenkühlwasser 1	Wasser	7500 m³/h	27	atm	75	Wannem? Kondensiert außer Turbine angeschlossen? Hierher? Kühlwasser außer Turbine angeschlossen?
14	Turbinenkühlwasser 2	Wasser	7500 m³/h	34	atm	s.o.	
15	Kühlwasser 1	Wasser	-	40	atm		
16	Kühlwasser 2	Wasser	-	60-80	atm		
17	Kühlwasser	Wasser	15.000 m³/h	40	atm	10	
18	Kühlwasser	Wasser	15.000 m³/h	30	atm	9,6	
19	Prozesswasser 1	Wasser	40 km	2-28	atm		Kannst das Wasser direkt aus dem Prozess? Wasser/Beheizk/Erstszubstanz?

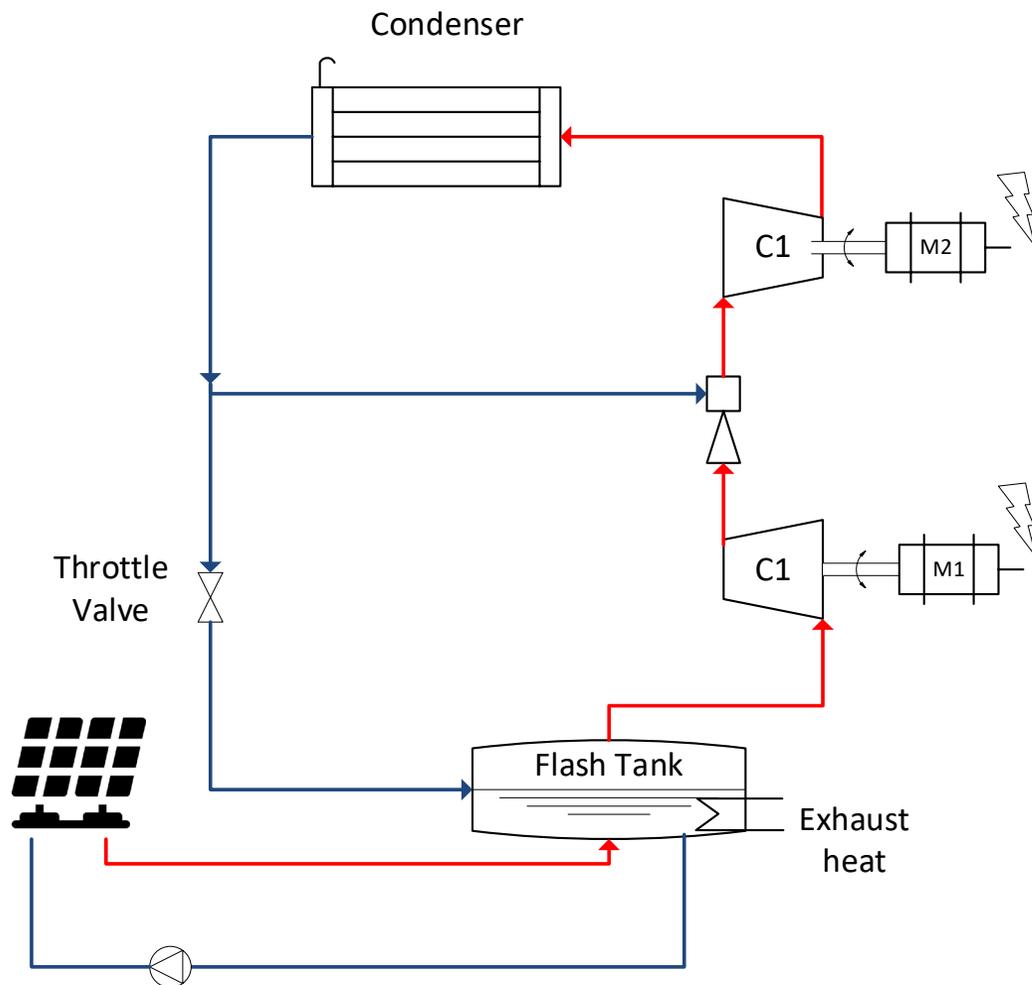


Die Herausforderungen bzw. die Aufgabe der Kombination CST und HTWP

- Abwärme ist häufig in Temperaturen unter 100°C
- Wärme wird häufig bei Temperaturen über 150°C benötigt
- Die Leistungszahl der HTWP sinkt mit steigendem Temperaturhub
- Die Effizienz der CST, und generell von Solarthermie sinkt mit steigender Liefertemperatur



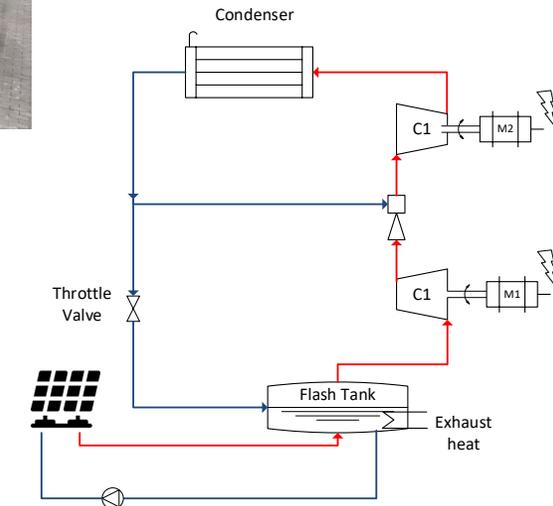
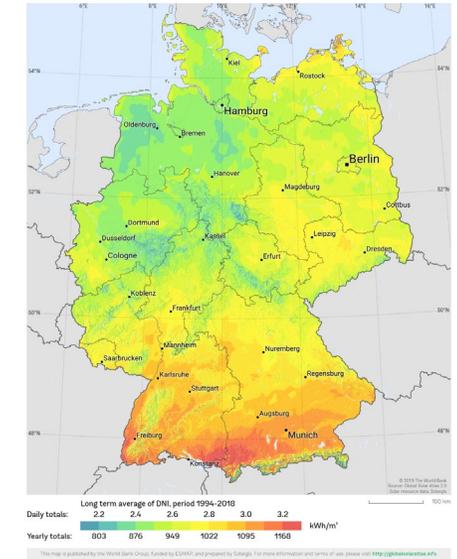
Die Möglichkeiten



- Solange CST die benötigte Temperatur liefern kann – nur CST
 - Wenn die Sonneneinstrahlung nicht reicht, liefert CST Wärme bei einer Zwischentemperatur: T_z
 - Wärme wird bei dieser Temperatur gespeichert
 - Die HTWP hebt die Wärme aus dem Speicher auf die benötigte Temperatur.
-
- Aufwertung von Abwärme durch CST
 - Erweiterung des Kapazitätsfaktors von CST durch geeigneten Auslegung von CST und Zwischenspeicher
 - Optimierung der Leistungszahl des gesamten Systems

Schlussbemerkungen

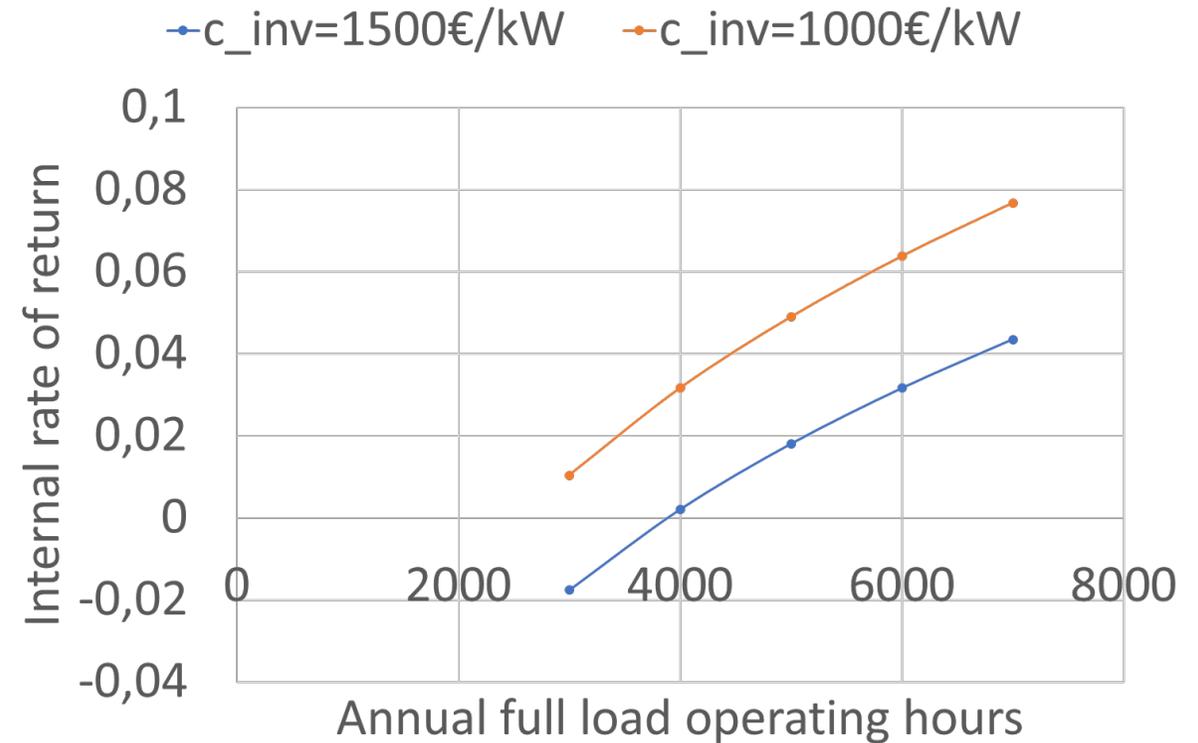
- Solare Wärme und CST sind in der Lage auch in DE, Prozesswärme wirtschaftlich zu liefern
- HTWP bis 200°C werden in den nächsten 5-6 Jahren in den Markt eingeführt
- Erste HTWP Demonstratoren sind in Planung
- Die Kombination von CST und HTWP kann zur vollständigen und sehr effizienten Dekarbonisierung führen, auch in Standorten mit wenig Abwärme



Es folgen optionale Folien

Hochtemperaturwärmepumpen – Warum

- Wärmepumpe hat eine Leistungszahl von 2,5
- Industrieller Strom kostet 100 €/MWh
- Erdgas kostet 30 €/MWh
- CO₂ Preis steigt um 10€/tonne jedes Jahr und ist bei 200€/tonne gedeckelt
- CO₂ Preis hat keinen Einfluss auf dem Strompreis für industriellen Kunden

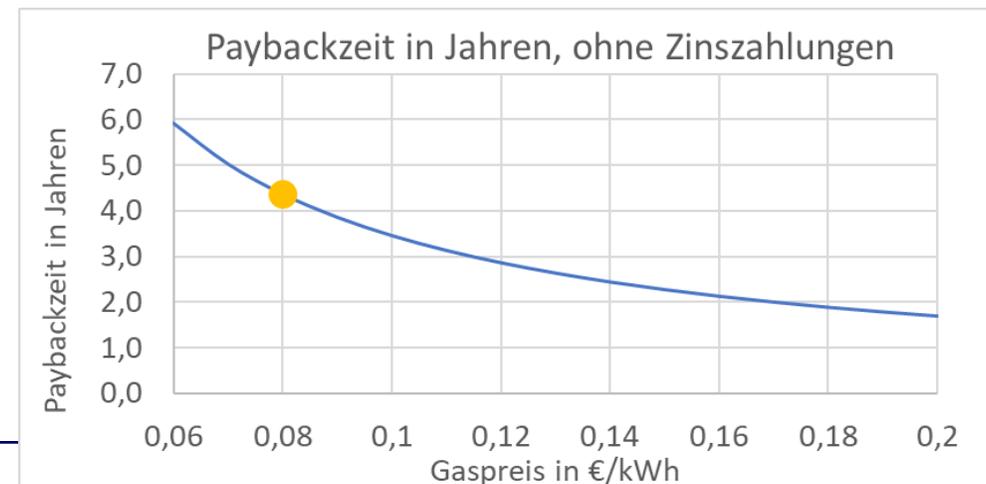


Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

Einfache Berechnung der Paybackzeit ohne Zinsen für Prozesswärme

Größe Solarfeld ab	10.000 m ²	Entspricht 5 MW nominal, 7 MW peak
Turnkey Invest	3.700.000 €	Angaben Kollektorhersteller, Einbeziehung jüngste Kostensteigerungen
Förderquote Bafa	55%	je nach Größe Betrieb 45% (Große Industrie über KMU) oder 55% (KMU)
Invest nach Förderung	1.665.000 €	
Jahresenergieertrag spez.	450 kWh/m ² *a	Deutsches Klima für 180°C Nutzertemperatur/220°C Betriebstemperatur
Jahresenergieertrag	4.500.000 kWh/a	
Gaskosten	0,08 €/kWh	Angabe E.ON durchschnittlich für die nächsten 4 Jahre
Wirkungsgrad Kessel	90%	
Reduktion Gaskosten jährlich	400.000 €/a	
Betriebskosten	18.500 €/a	0,5% des Capex/Turnkey Invest
Paybackzeit	4,4 Jahre	
Nach Ende Paybackzeit jährliche Einsparung	381.500 €/a	bis Ende Lebensdauer Kollektor mind. 20 Jahre

Paybackzeit ähnlich für Fernwärme

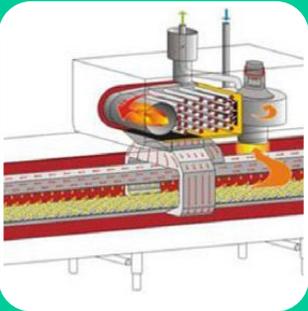


Hochtemperaturwärmepumpen – Wofür



Dampferzeugung

- Dampfnetze
- Dampftrocknung
- Dampf als Arbeitsmedium für Prozesse



Trocknung – Heiße Gase

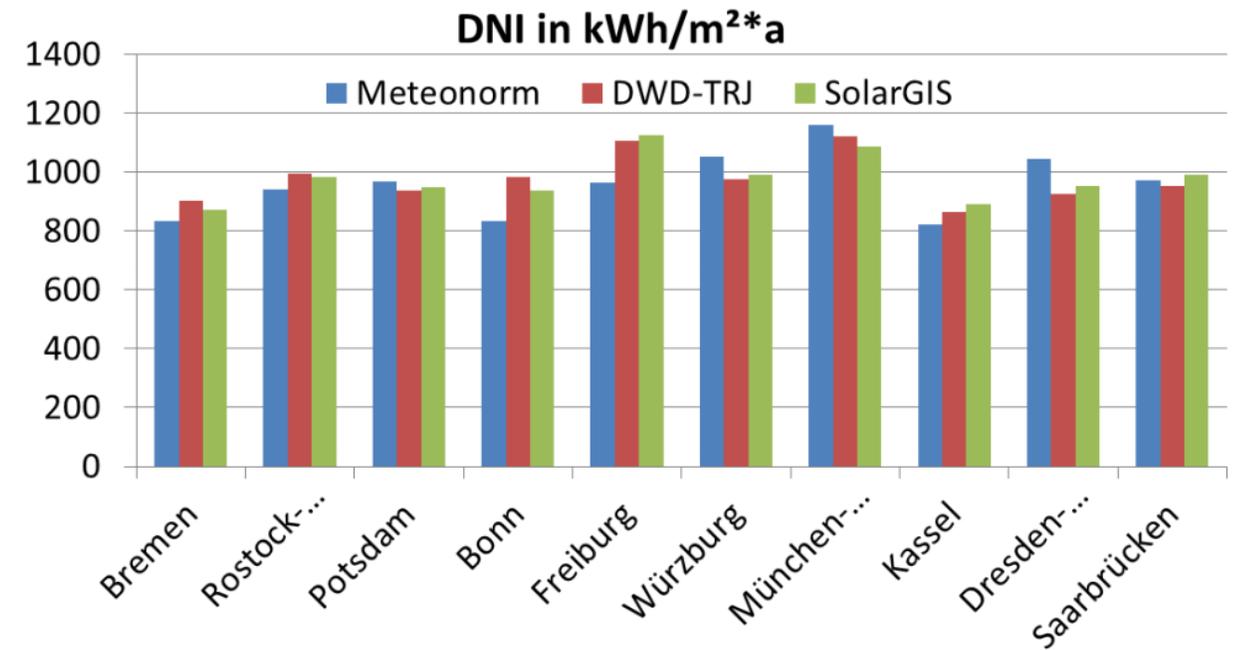
- Tunnelöfen
- Sprühtrockner

Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

Direktnormalstrahlung (DNI) verschiedener Standorte in Deutschland

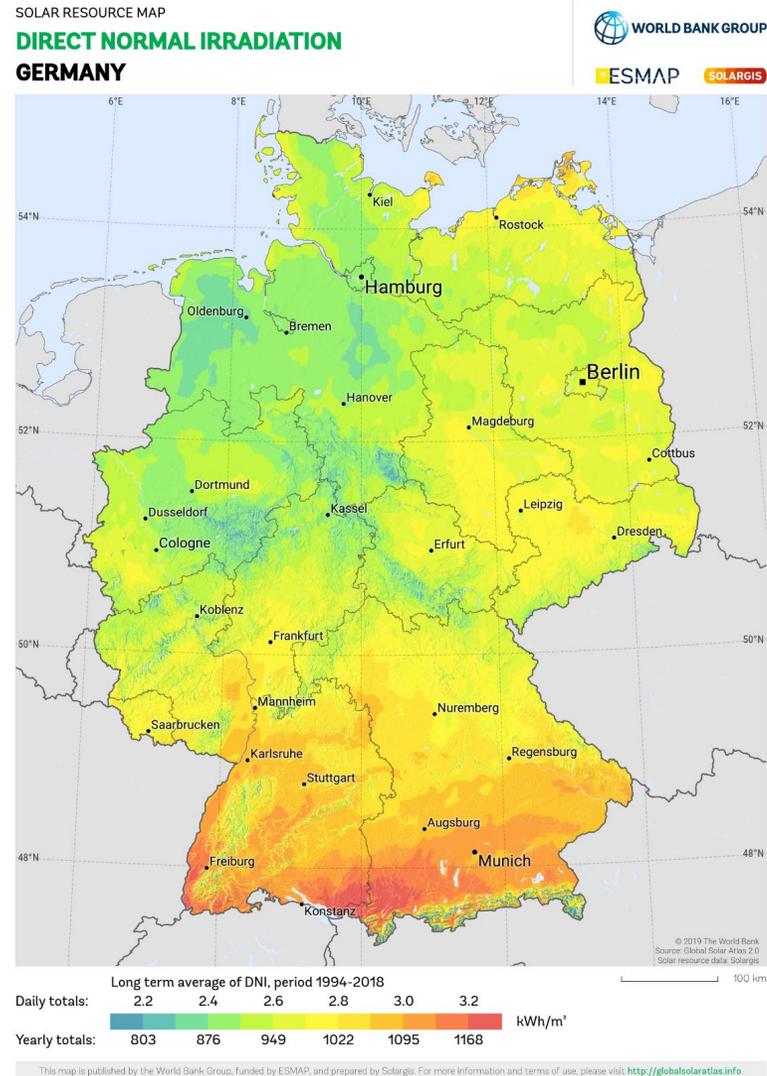
	Meteonorm 75°C			DWD-TRY 75°C		
	Parabolrinne	Flachkollektor	Vakuurröhre mit CPC	Parabolrinne	Flachkollektor	Vakuurröhre mit CPC
Bremen	490	375	499	469	365	487
Rostock	549	415	540	537	406	519
Potsdam	523	416	532	499	398	513
Bonn	491	404	526	518	429	542
Freiburg	565	455	571	607	483	591
Würzburg	607	455	571	524	435	553
München	633	480	605	612	497	607
Kassel	408	334	460	461	363	476
Dresden	567	432	548	480	390	512
Saarbrücken	607	451	565	517	418	532
Mittelwert	544	422	542	522	418	533

Mit greenius berechnete spezifische Jahreserträge bei 75° C mittlerer Betriebstemperatur



Jahressummen der Direktnormalstrahlung für verschiedene Standorte aus Quellen Deutscher Wetterdienst (DWD), Meteonorm und SolarGIS Stand 2019

Karte der Direktnormalstrahlung (Solargis)



HyPStA – Hybrid Heat Pumping and Storage

Heat lab for water based temperature level 6-200°C

Technical scale assembly in two high cube containers in set-up stage
Unit to convert, transfer and store heat in the range of 6°C...200°C

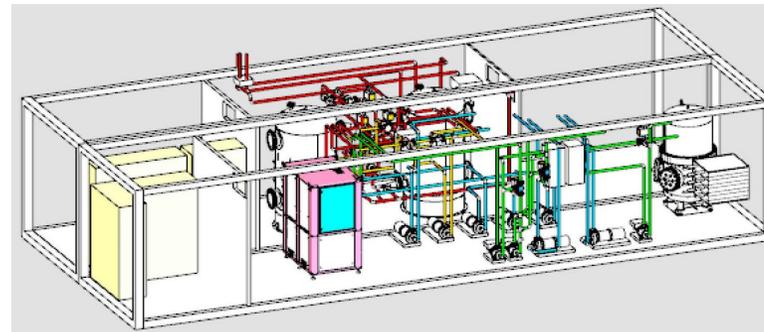
- ▶ Thermodynamic optimization of adsorption processes
- ▶ Coupled with a transcritical heat pump to a hybrid system
- ▶ Process integration of a stratified thermal water storage system (2x 2.5m³, 200°C, 20 bar)

Platform for scientific tasks and applied research

Hub for teaching and scientific exchange

Applications:

- ▶ Supply heat and cold for industry
- ▶ Scale: 100-120 kW_{th}
- ▶ Geothermal energy



Concentrating solar power CSP

Sodium as heat transfer medium for CSP plants

Next-generation CSP plants demand for high efficiency

- ▶ High concentration, high power density of 4 MW/m² and higher
- ▶ Liquid metals show excellent heat conductivity
- ▶ Liquid Sodium with promising properties (98°C-890°C)

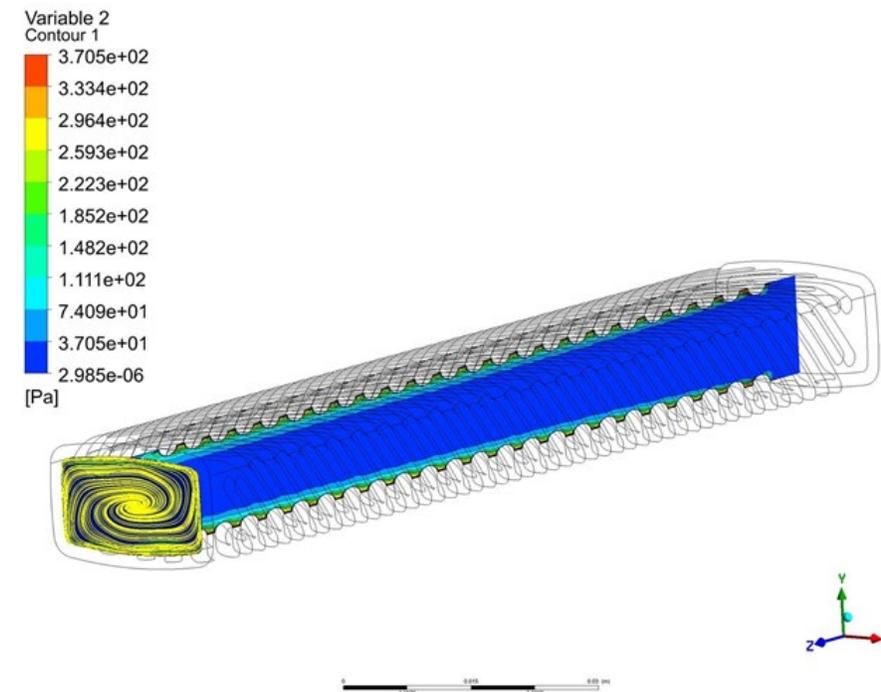
3D printing of high-temperature resistant metals (inconel) for monolithic receivers

Installations to enhance heat transfer:

- ▶ Rotational structures to enhance heat exchange
- ▶ Maximal temperature can be lowered by 50 K
- ▶ Reduce of mechanical stress
- ▶ GE Arcam A2X Electron Beam Melting (EBM) machine at KIT



3D printed inconel component / EBM during manufacturing



Eignung von Parabolrinnenkollektoren für das deutsche Klima

Geringe Direktstrahlung? Einstrahlung auf verschieden ausgerichtete Flächen

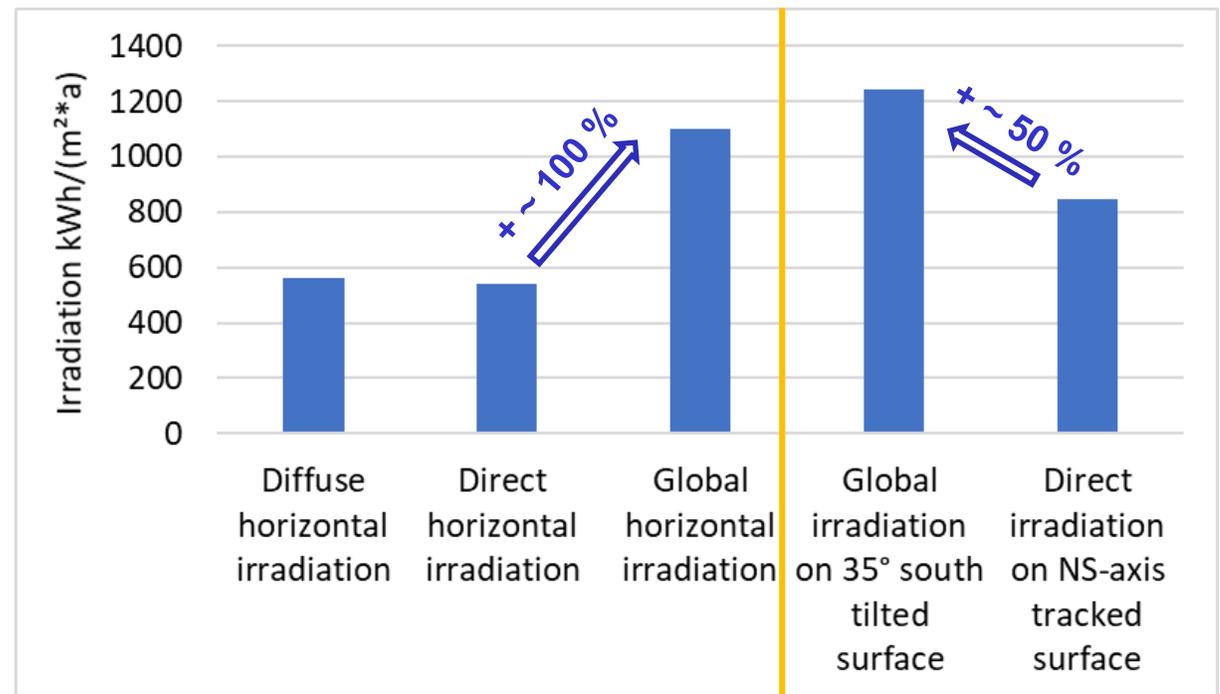
Würzburg: Typische Wetterdaten für Mitteleuropa

Bezogen auf die horizontale Fläche ist die Globalstrahlung ~100% höher als die Direktstrahlung

Die nutzbare Einstrahlung auf die Kollektorebene ist bei stationären Kollektoren gegenüber der nachgeführten Parabolrinne lediglich ~50% höher

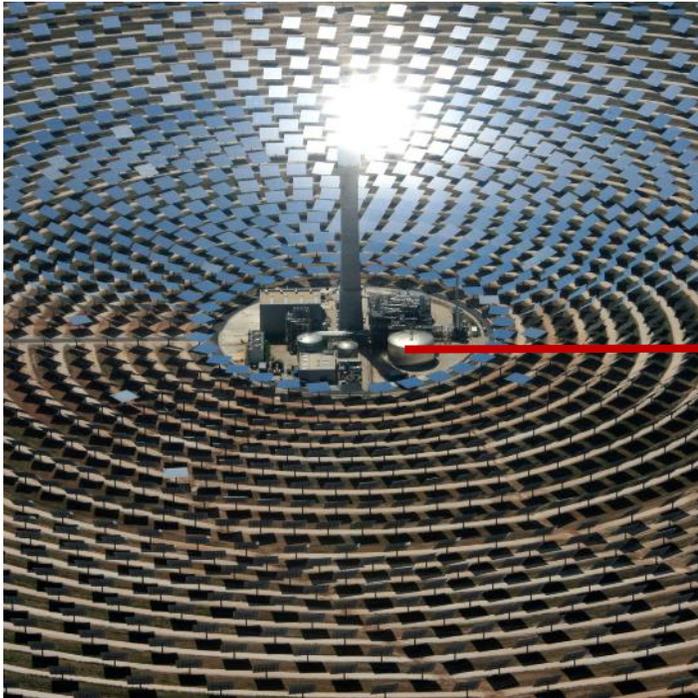
=> Unterschied geringer als auf den ersten Blick

Wetterdaten Würzburg	kWh/(m ² *a)
Diffusstrahlung horizontal	562
Direktstrahlung horizontal	540
Globalstrahlung horizontal	1102
Globalstrahlung auf eine 35° nach Süden geneigte Fläche	1244
Direktstrahlung auf eine nachgeführte Fläche mit Nord-Südachse	848



Jahressummen der Einstrahlung für den Standort Würzburg

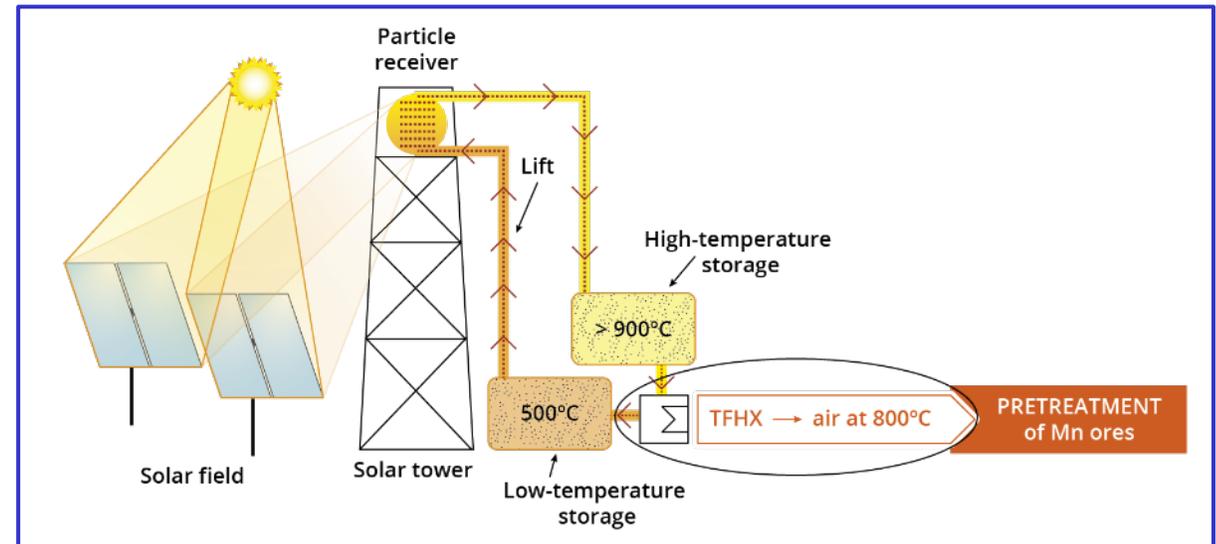
Solare Wärmeerzeugung jenseits der 400 °C



Stromerzeugung mittels konzentrierender Solartechnik ist Stand der Technik und weltweit installiert

Direkte Nutzung der Wärme für Industrieprozesse:

Wärmetransportmedium	Wärmespeichermedium	Temperaturen bis
Flüssigsalz	Flüssigsalz	580 °C
Luft	Festkörper	>1000 °C
Partikel / Luft	Partikel	>1000 °C



Beispiel EU-Projekt PreMa:
Thermische Vorbehandlung von Mangan-Erzen bei 800 °C