

Solare Turmkraftwerke bei erhöhten Temperaturen

Stefano Giuliano
DLR - Institut für Solarforschung

17. Sonnenkolloquium, 05. Juni 2014 in Köln



Aktueller Stand bei kommerziellen Solarturm-Kraftwerken

Solarturm mit Direktverdampfung



- Relativ einfache Technologie
- Thermischer Speicher derzeit unwirtschaftlich
- Temperatur bis ~550°C (@PB)
- Wirkungsgrad ~42% (@PB)

Solarturm mit Flüssigsalz

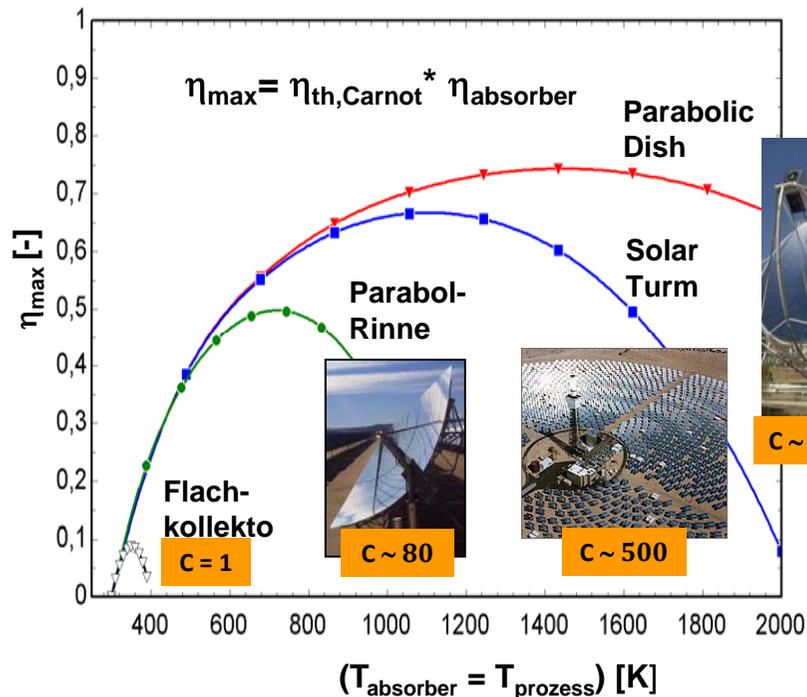


- Große Speicherkapazitäten möglich
- Grundlastfähige Solarkraftwerke durch zusätzliche fossile Hybridisierung bei geringen CO₂ Emissionen
- Temperatur bis ~550°C (@PB)
- Wirkungsgrad ~42% (@PB)



Optionen zur weiteren Kostenreduktion

- Kostenreduktion durch Up-scaling
- Kostenreduktion durch Massenproduktion → z.B. Heliostate
- Kostenreduktion durch Weiterentwicklung von Komponenten
- Kostenreduktion durch höhere Effizienz



Derzeit werden beim Solarturm 2 technologische Trends verfolgt:

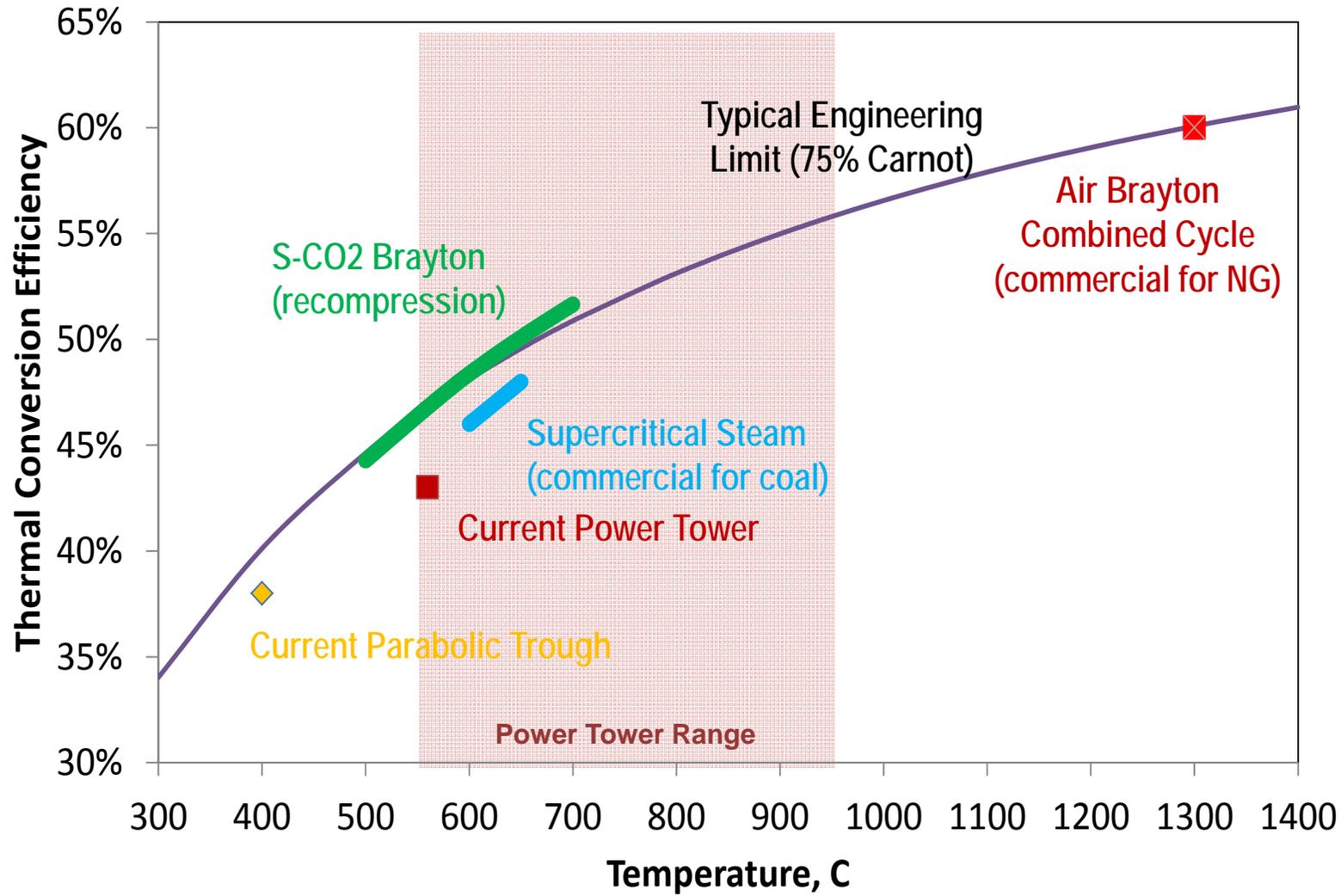
1. moderate Erhöhung der Prozesstemperaturen (Receiver Temperatur 600°C bis 700°C)
 - a. moderne Dampfprozesse (600°C/620°C)
 - b. überkritische CO₂ Prozesse (bis 700°C)
2. signifikante Erhöhung der Prozesstemperaturen (Receiver Temperatur > 900°C)
 - a. Gasturbinen-Prozesse

aber:

$$LCOE = \frac{\text{Kosten}}{\text{Ertrag}} [EUR / kWh]$$



Wärme­kraft­pro­zesse für CSP



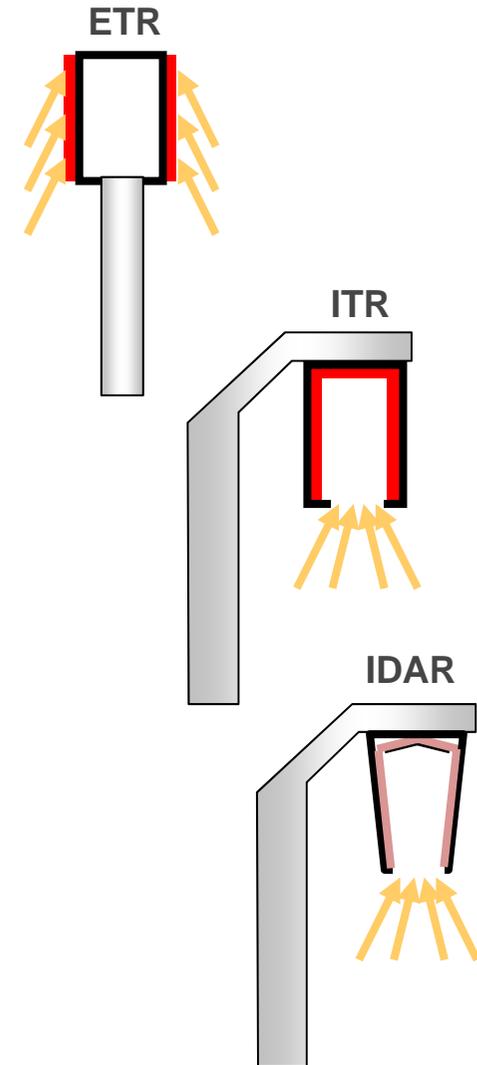
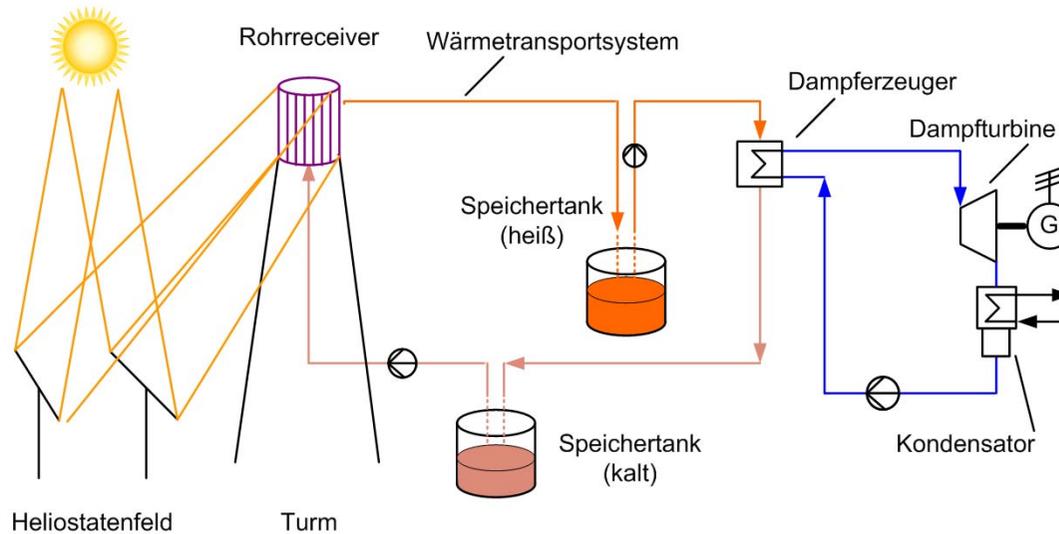
source : [Turchi 2013, NREL]



Solarturm mit Flüssigsalz für erhöhte Temperaturen

Variation der Dampfprozessparameter

- Referenz: 162 bar / 550°C / 550°C (subkritisch, TR_{out} = 565°C)
- Innovation 1: 250 bar / 550°C / 550°C (überkritisch, TR_{out} = 565°C)
- Innovation 2: 162 bar / 620°C / 620°C (subkritisch, TR_{out} = 635°C)
- Innovation 3: 250 bar / 620°C / 620°C (überkritisch, TR_{out} = 635°C)



Variation der Receiver-Technologie

- Referenz: externer zylindrischer Rohrreceiver (ETR)
- Innovation 1: interner zylindrischer Rohrreceiver (ITR)
- Innovation 2: interner zylindrischer Flüssigfilmreceiver (IDAR)

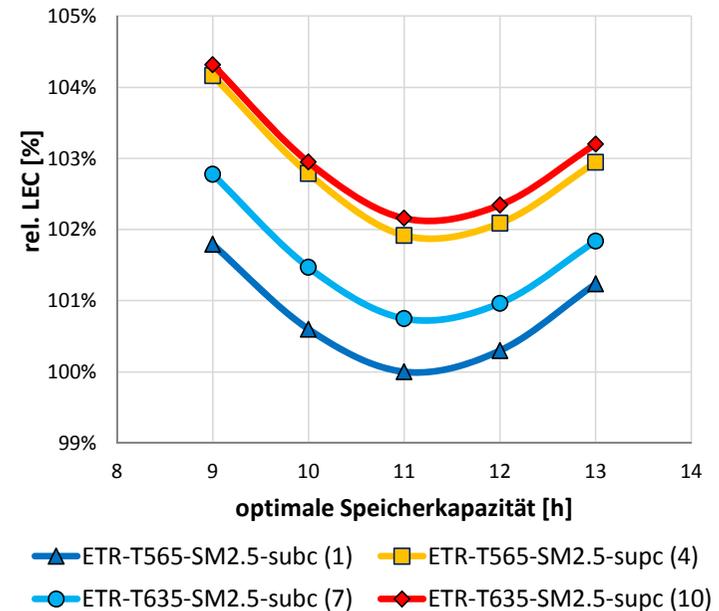


Solarturm mit Flüssigsalz für erhöhte Temperaturen

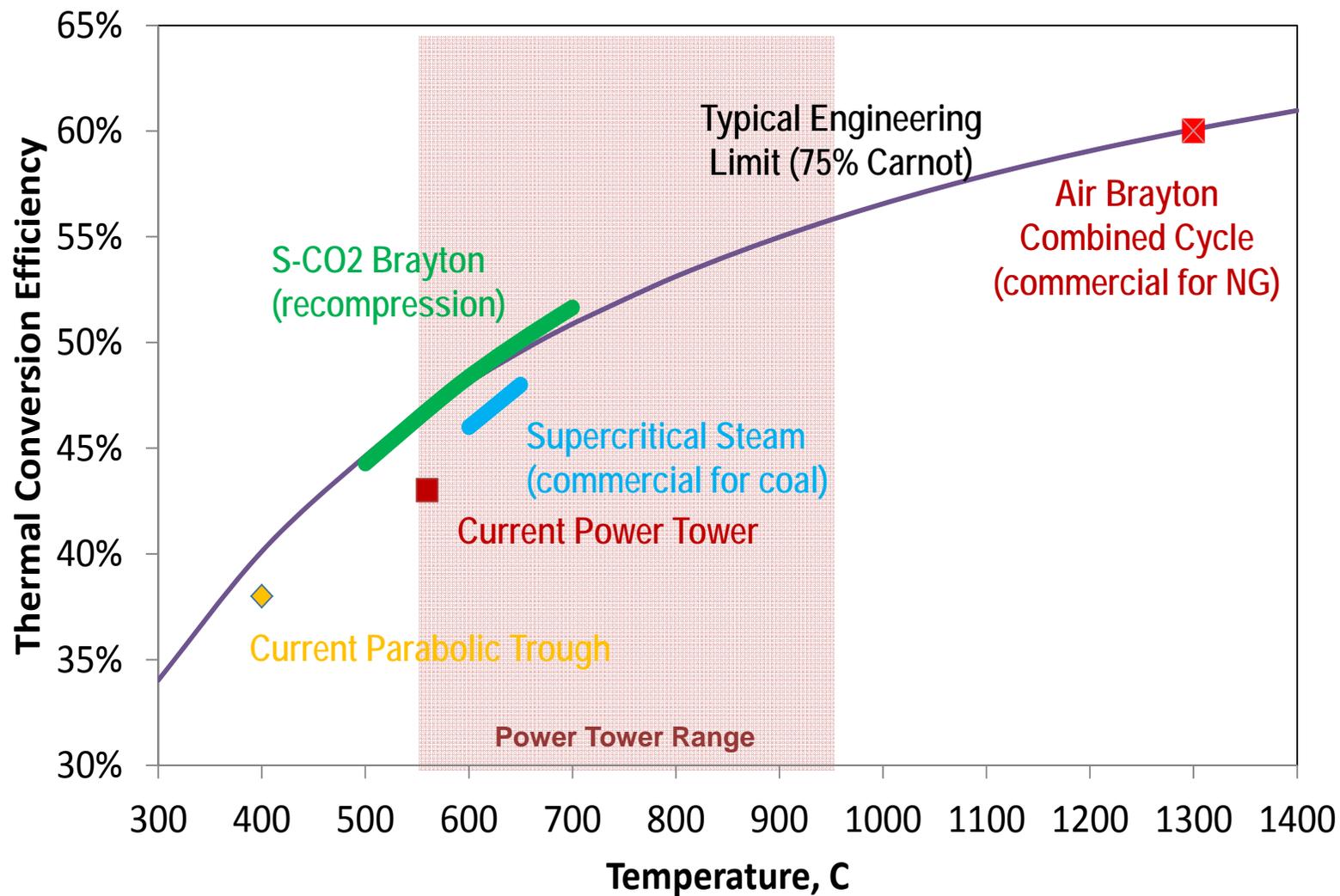
- Verwendung erhöhter Dampfparameter (620°C/ 250bar): $\eta_{\text{Gesamt, System}}$ bis zu 10% vs. Referenz (565°C/ 162bar)
- Höhere Investitionskosten (Beispiel Kosten PB/ HEX bis zu 30% höher)
- neue Receiverkonzepte: leicht reduzierte LCOE (~1% niedrigere LCOE für Cavity-“Dose“ sowie IDAR mit 565°C / 162 bar)

Schlussfolgerungen:

- Moderate Temperaturerhöhung verspricht derzeit mehr Kostenreduktionspotenzial ($\pm 600^\circ\text{C}$) (Weiterrevolution vom Stand der Technik)
- konventionelle Kraftwerkskomponenten (PB, vor allem Dampferzeuger) müssen intensiv weiterentwickelt werden (verbessertes Werkstoffkonzept, ...), damit die Verbesserung im Wirkungsgrad in verbesserten LCOE sichtbar werden.
- Hochtemperatureignung verfügbarer Salzschnmelzen fraglich, Werkstoffkombi anspruchsvoll
- verbesserte Receiverkonzepte sollten genauer betrachtet werden



Wärme­kraft­pro­zesse für CSP

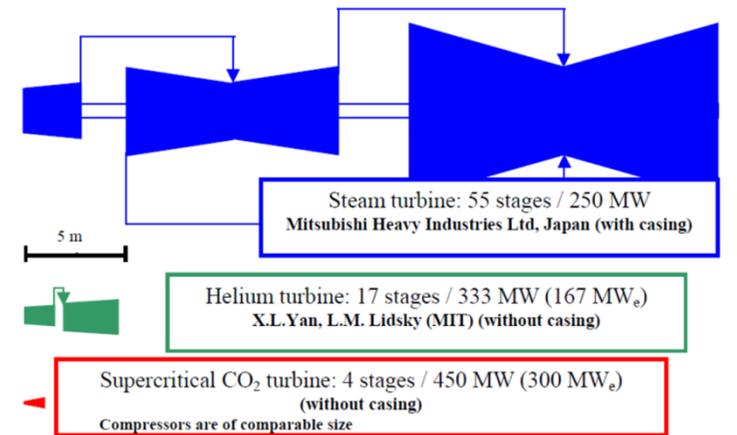


source : [Turchi 2013, NREL]

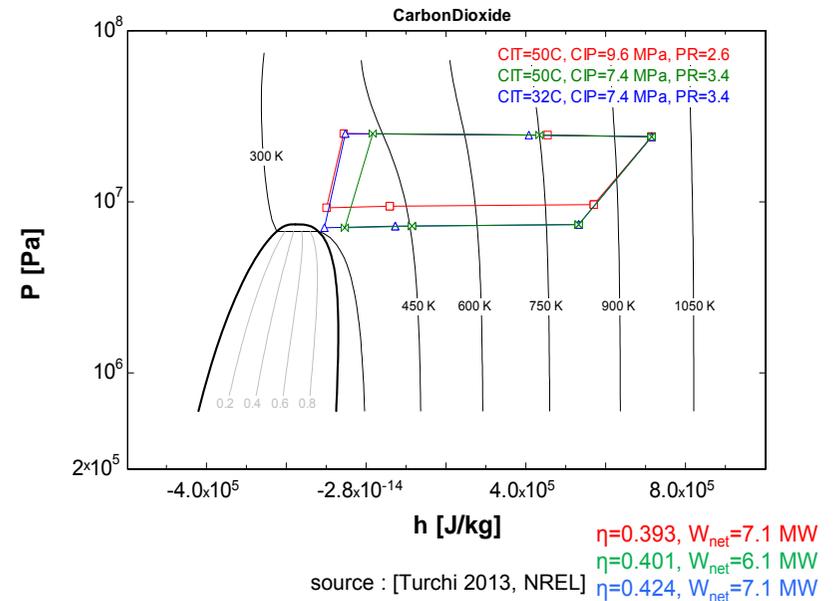


Vorteile von CO₂ Wärmekraftprozessen

- Hohe Effizienz (~50% bei 700°C)
- Einfaches Design
(z.B. Einwellenmaschine, extrem kompakte Turbomaschine, ~1/10 Ventile, etc.)
- Hohe Leistungsdichte
(~30x kleiner als Dampf, ~6x als Helium oder Luft)
- Einfache thermodynamische Prozesse möglich
(e.g. keine Zwischenkühlung oder Zwischenüberhitzung)
- Schnelle Anfahrzeit, keine komplizierten Prozeduren wie für Dampfprozesse
- Potential für geringere spezifische Kosten
- Turbineneinlasstemperatur eignet sich für eine Reihe von Wärmequellen (Nuklear z.B. Gen IV, Solar, Gas, Kohle, Syn-Gas, Geothermie).



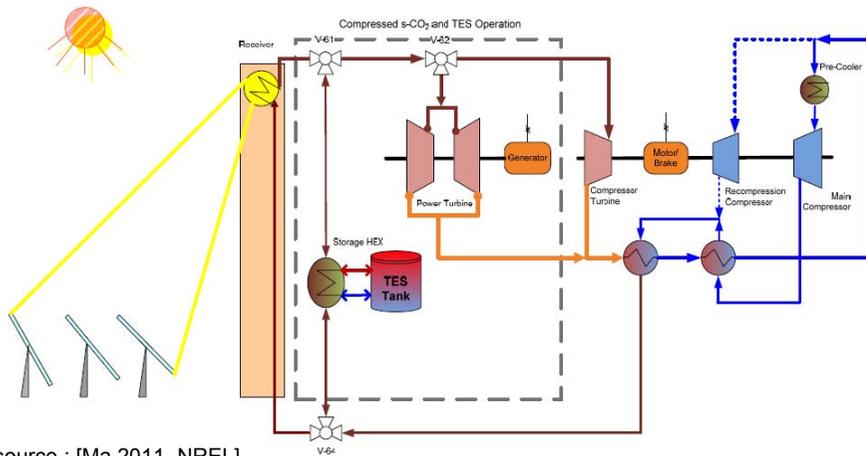
source: [Dostal 2004]



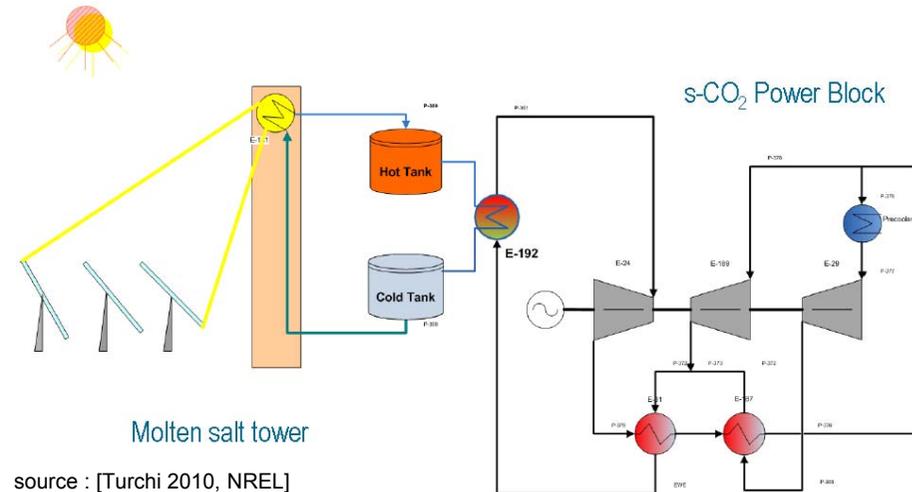
Überkritische CO₂ Wärmekraftprozesse für Solarturm

s-CO₂ für Kraftwerksblock und WTM

kritisch: hohe Drücke im Receiver



s-CO₂ für Kraftwerksblock

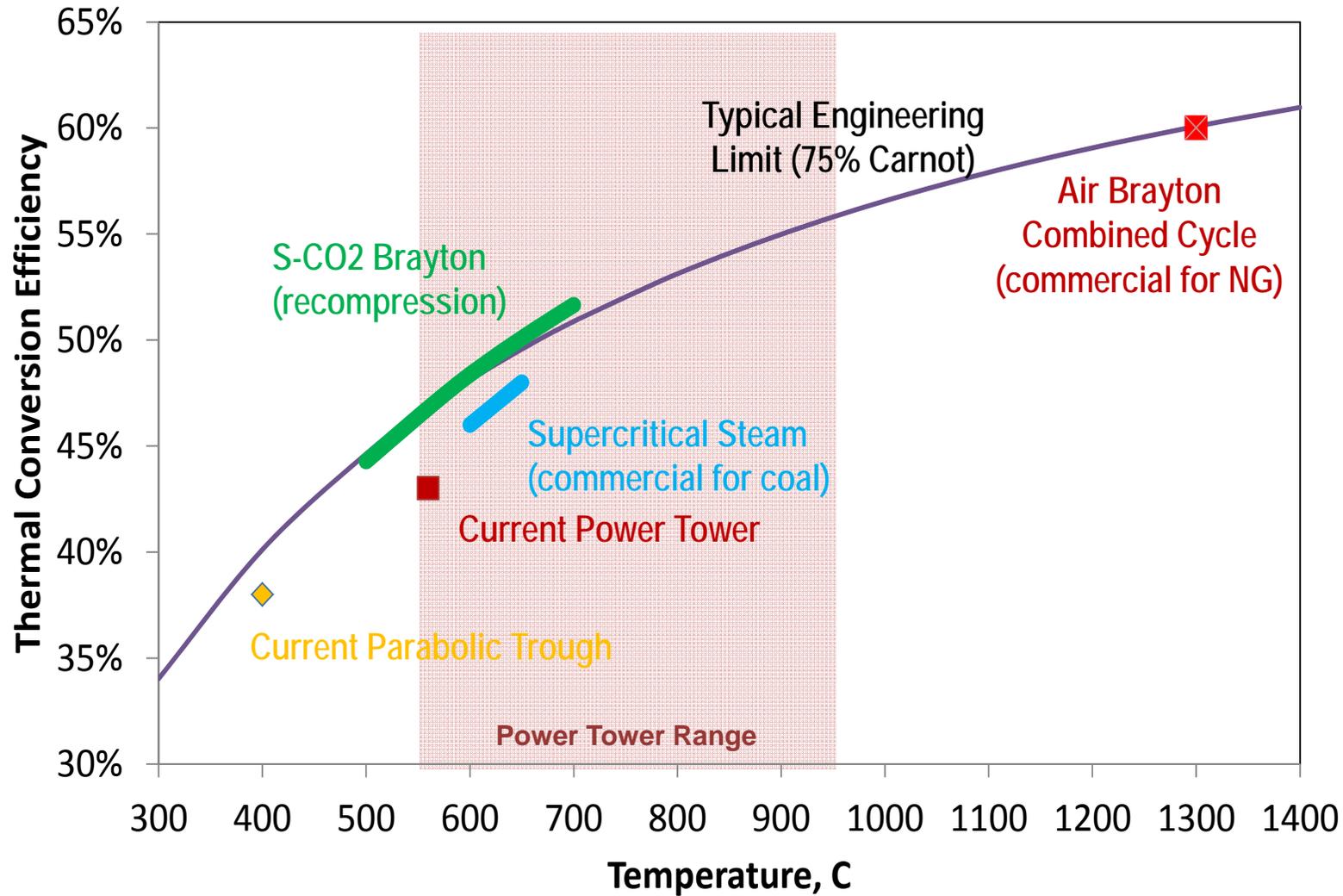


Aktueller Stand

- keine kommerziellen Systeme verfügbar
- Rückkühlung unter Wüstenbedingungen erfordert angepasste thermodynamische Prozesse
- Großes Entwicklungsprogramm in USA gestartet (SunShot Initiative)
- Kostensenkung (LCOE) von bis zu 12% erwartet
- Langfristige Entwicklung und Optimierung erforderlich



Wärme­kraft­pro­zesse für CSP



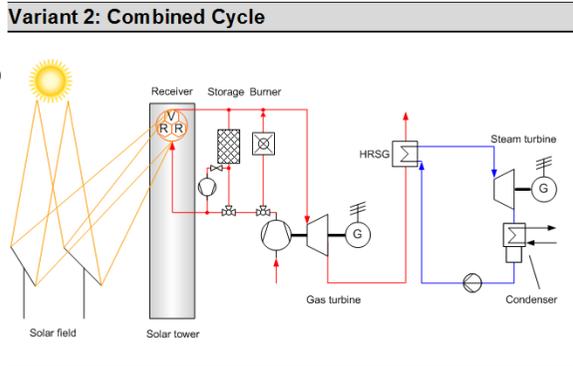
source : [Turchi 2013, NREL]



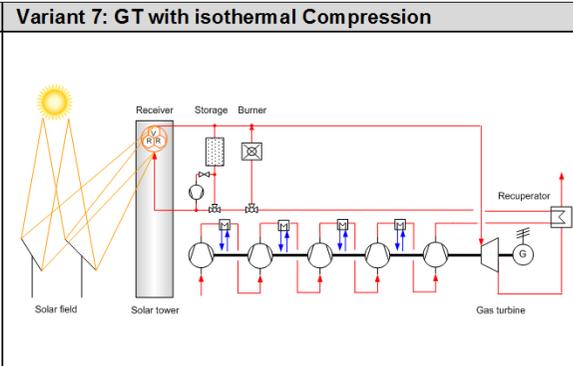
Solare Gasturbinen mit hohen Solaranteilen – HYGATE

Solare Gasturbine @ 950°C, ~50MW_{el}, Trockenkühlung, t_{amb} = 25°C, solar share bis 100% (@DP)

Combined Cycle
 $\eta_{PB, gross} = 43.7\%$
 (@SM1, DP)



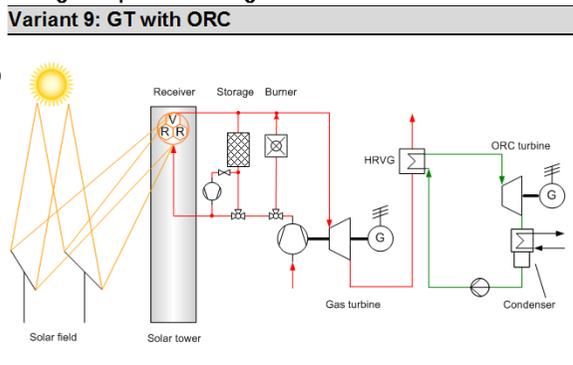
Configuration:
 1 x gas turbine
 1 x HRSG
 1 x steam turbine
 1 x high temperature storage



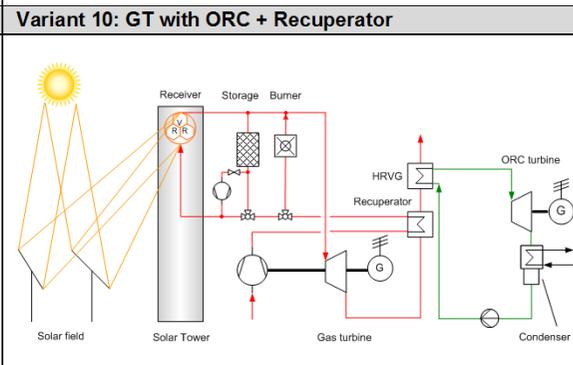
Configuration:
 1 x gas turbine with isothermal compression and recuperator
 1 x high temperature storage

GT with isotherm. Comp.
 $\eta_{PB, gross} = 45.7\%$
 (@SM1, DP)

GT with ORC
 $\eta_{PB, gross} = 47.5\%$
 (@SM1, DP)



Configuration:
 1 x gas turbine
 1 x ORC-HRSG
 1 x ORC turbine
 1 x high temperature storage



Configuration:
 1 x gas turbine and recuperator
 1 x ORC-HRSG
 1 x ORC turbine
 1 x high temperature storage

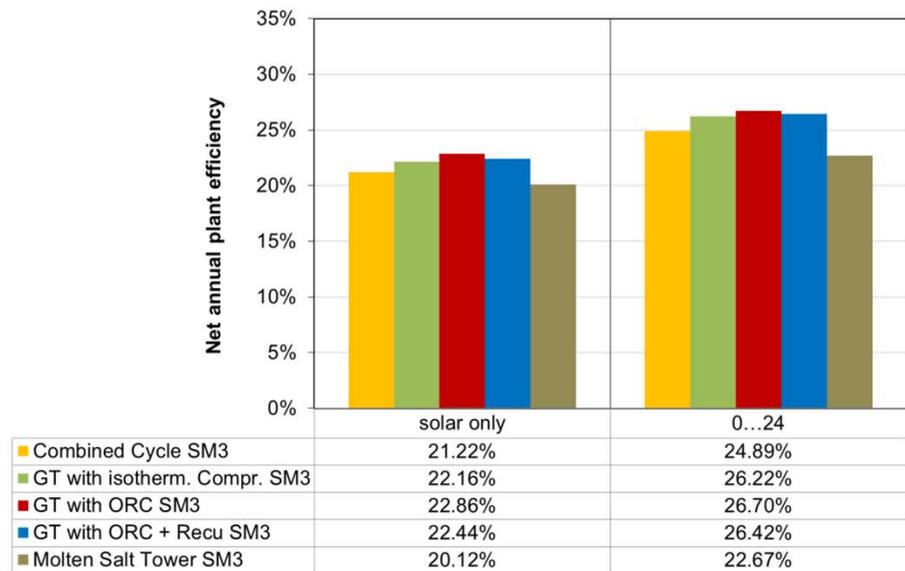
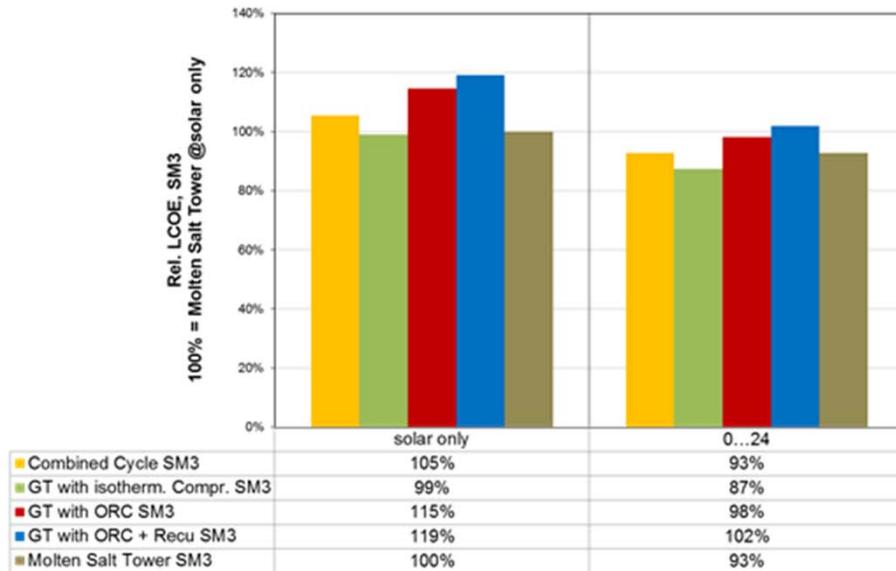
GT with ORC + Recu
 $\eta_{PB, gross} = 48.1\%$
 (@SM1, DP)



Solare Gasturbinen mit hohen Solaranteilen – HYGATE

LCOE @SM3 (hybrider Betrieb)

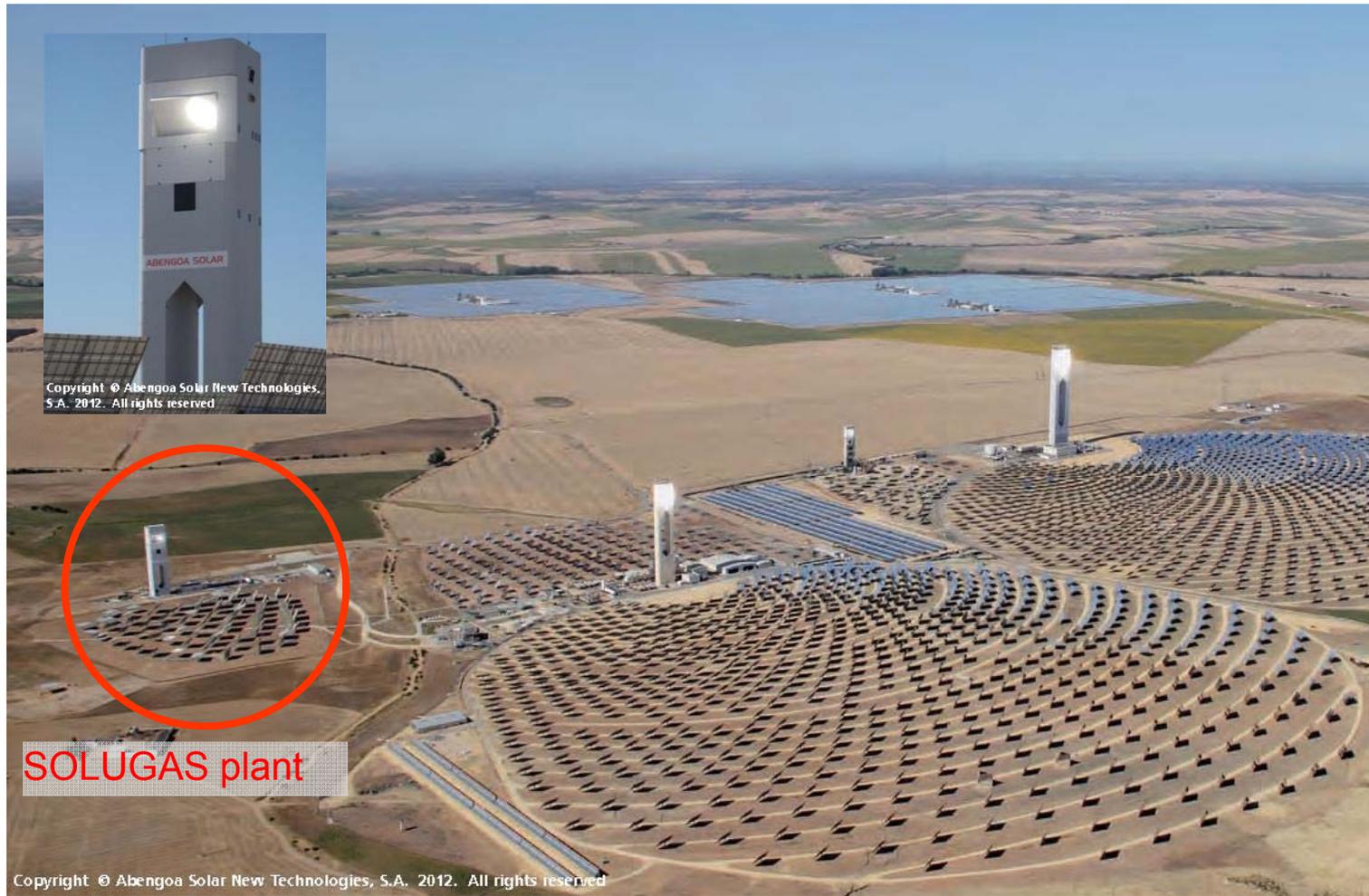
Net annual plant efficiency @SM3



- solare Gasturbinen mit hohem Solaranteil zeigen interessante Performance
- solare Gasturbinen mit isothermer Kompression:
 - größte Kostensenkungspotentiale bei geringen CO₂ Emissionen
 - reduzierte Anlagenkomplexität (keine WD-Kreislauf)
- im Vergleich zu aktuellen Solartürmen mit Flüssigsalz zeigen solare Gasturbinen höhere Anlagenwirkungsgrade und (teilweise) geringere LCOE



SOLUGAS Pilotanlage für solar-hybride Gasturbinen



ABENGOA SOLAR



Zusammenfassung

- Heutige Salzturmkraftwerke sind ideale Grundlastkraftwerke unter den Erneuerbaren und bieten umfängliche Optimierungspotentiale.
- Salzturmsysteme bei erhöhten Temperaturen
 - enorme Potentiale zur Effizienzverbesserung
 - für geringere LCOE müssen neue Herausforderungen (vor allem bzgl. Werkstoffen und Salzschnmelze) gelöst werden
 - neue, verbesserte Receiverkonzepte eröffnen weitere Potentiale
- Solartürme mit überkritischen CO₂-Prozessen
 - versprechen eine Reduzierung der LCOE
 - derzeit gibt es noch keine kommerziellen CO₂ Turbinen
 - die Technologie ist eine langfristige Entwicklung
- Solare Gasturbinen Prozesse
 - erlauben den Einsatz von hocheffizienten Gasturbinen-Prozessen (GuD oder innovative Konzepte)
 - derzeit GT bis zur 10 MW_{el}-Klasse verfügbar
 - umfängliche Optimierungspotentiale vorhanden
 - mit therm. Speichern ermöglichen diese Systeme zuverlässige und planbare Stromerzeugung mit geringen CO₂ Emissionen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt: stefano.giuliano@dlr.de



Dank:

- Solarturm mit Flüssigsalz für erhöhte Temperaturen: Csaba Singer (DLR), Reiner Buck (DLR)
- Überkritische CO₂ Prozesse: Craig Turchi (NREL)
- Solare Gasturbinen: HYGATE Projekt Team
Michael Puppe (DLR) Michael Krüger (DLR), Stefan Zunft (DLR), Reiner Buck (DLR), Andrea Jensch (DLR), Ralf Uhlig (DLR), Sven Boje (MAN), Karim Saidi (MAN), Uwe Gampe (TUD), Christian Felsmann (TUD), Manfred Freimark (VGB), Ulrich Langnickel (VGB)

