

Möglichkeiten der Erdwärmennutzung in Deutschland

– zur Stromerzeugung –

Christoph Clauser

*Institut für Applied Geophysics and Geothermal Energy
E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University*

Erdwärme niedriger Enthalpie

- ≡ *Binäre Anlagen*
 - = *ORC*
 - = *Kalina*
 - = *Status (in Deutschland)*
- ≡ *Vergleich mit anderen Technologien*
 - = *Kostenstruktur von Erdwärme-Dubletten*
 - = *Vergleich von Stromgestehungskosten*

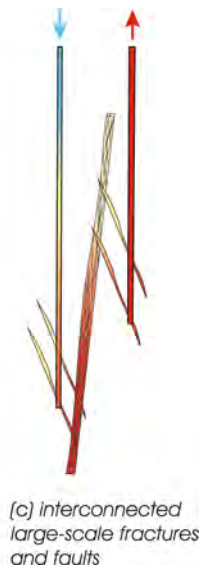
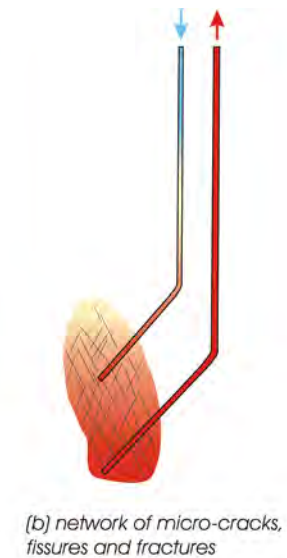
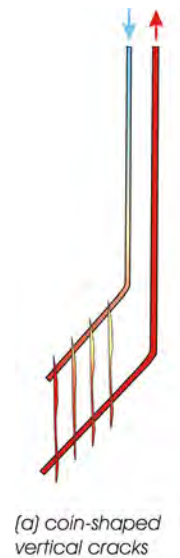
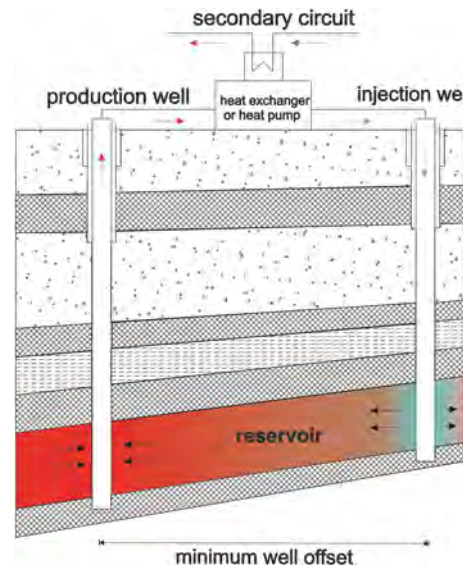
Erdwärme hoher Enthalpie – technisch angelegte Systeme (EGS, HDR)

- ≡ *Forschungs-Pilotanlage in Soultz-sous-Forêts;*
- ≡ *„kommerzielle“ Anlage in Landau*
- ≡ *Potenzial in Deutschland zur Stromerzeugung*



Geschlossene Systeme
Gebäudeheizung/kühlung
→ *Temperatur, Diffusivität*

Offene Systeme
Gebäudeheizung oder elektrischer Strom
→ *Temperatur, Fließrate*



Natürliche Reservoirs

Technisch angelegte Systeme

■ Trockendampf:

keine natürlichen Dampfvorkommen in Deutschland

■ Feuchtdampf (binäre Anlagen):

Zu wenige geeignete poröse Reservoirs; zusätzliche Nutzungskonflikte (KW, Grundwasser, CO₂-Speicherung)



■ Technisch angelegte geothermische Systeme (EGS, HDR):

Haupthindernisse für umfassende Verbreitung:

- ≡ Fehlende Daten zum lokalen Spannungsfeld
- ≡ Fehlende Software für prognostische Auslegungsrechnungen zur Konstruktion der erforderlichen Rissysteme
- ≡ Technologie zum Bohren reiner Erkundungsbohrungen derzeit zu teuer

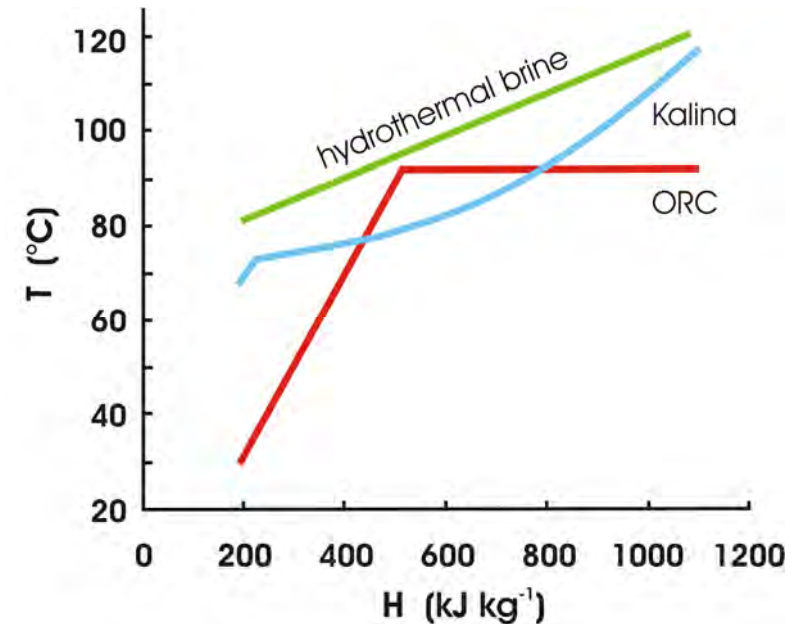
- ≡ getrennter geothermischer Primärkreislauf (heiße Solen) und Sekundärkreislauf mit bei niedriger Temperatur siedendem Arbeitsfluid.
→ erfordert pro kW h **400 kg Wasser** bei **85 °C – 150 °C** heißen Reservoiren.
- ≡ Abgekühlte Sole ohne Verdampfung reinjiziert: Minimierung von Ausfällungs-Problemen
- ≡ einsetzbar zur Erdwärme-Verstromung aus Niedrig-Enthalpie ($T > 85 \text{ °C}$) Heißwasser-Reservoiren
- ≡ Typische Blockgrößen: $1 \text{ MW}_e - 3 \text{ MW}_e$. Kostengünstigste und verlässlichste Methode zur Verstromung von Niedrig-Enthalpie-Erdwärme; große Vorkommen in erreichbaren Tiefen weltweit
- ≡ KWK-Anlagen: zur Verstromung der Abwärme aus Heißdampf-Anlagen

■ Organic Rankine Cycle (ORC)

- ≡ reine Arbeitsfluide, spezifische Verdampfungstemperaturen

■ Kalina-Kreislauf

- ≡ Verdampfung von Wasser-Ammoniak-Gemisch variabler Konzentration über entsprechenden Temperaturbereich
- ≡ dadurch verbesserter Wirkungsgrad durch des Kalina- gegenüber dem ORC-Kreislauf:
 - = Theoretische Vorhersage: $\geq 10\%$
 - = letzter Vergleich aufgrund simulierter identischer Bedingungen: $\sim 3\%$



- **Dezentrale Stromerzeugung,**

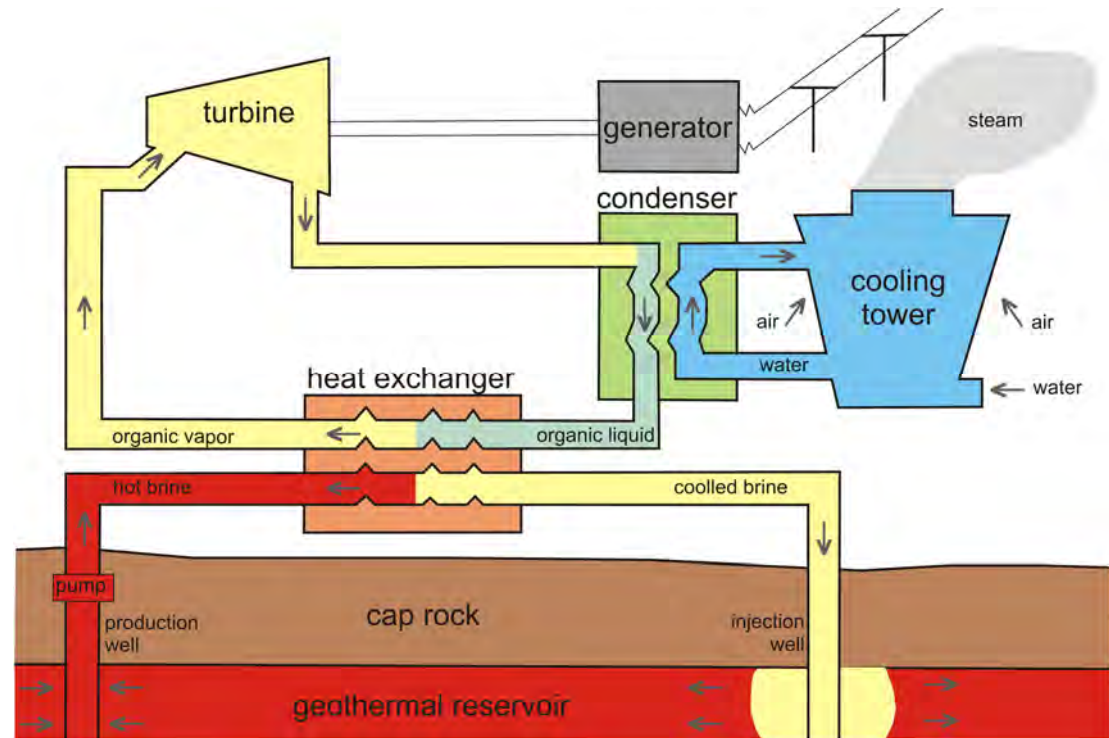
- ≡ Einheiten zwischen $0,1 \text{ MW}_e - 100 \text{ MW}_e$

- **Wirtschaftlich attraktiv**

- ≡ sowohl in abgelegenen bzw. weniger entwickelten Regionen als auch für Reservoirs niedriger Enthalpie in entwickelten Ländern mit finanziellen Anreizen zur CO_2 -armen Energie-Erzeugung (z. B. das deutsche EEG):

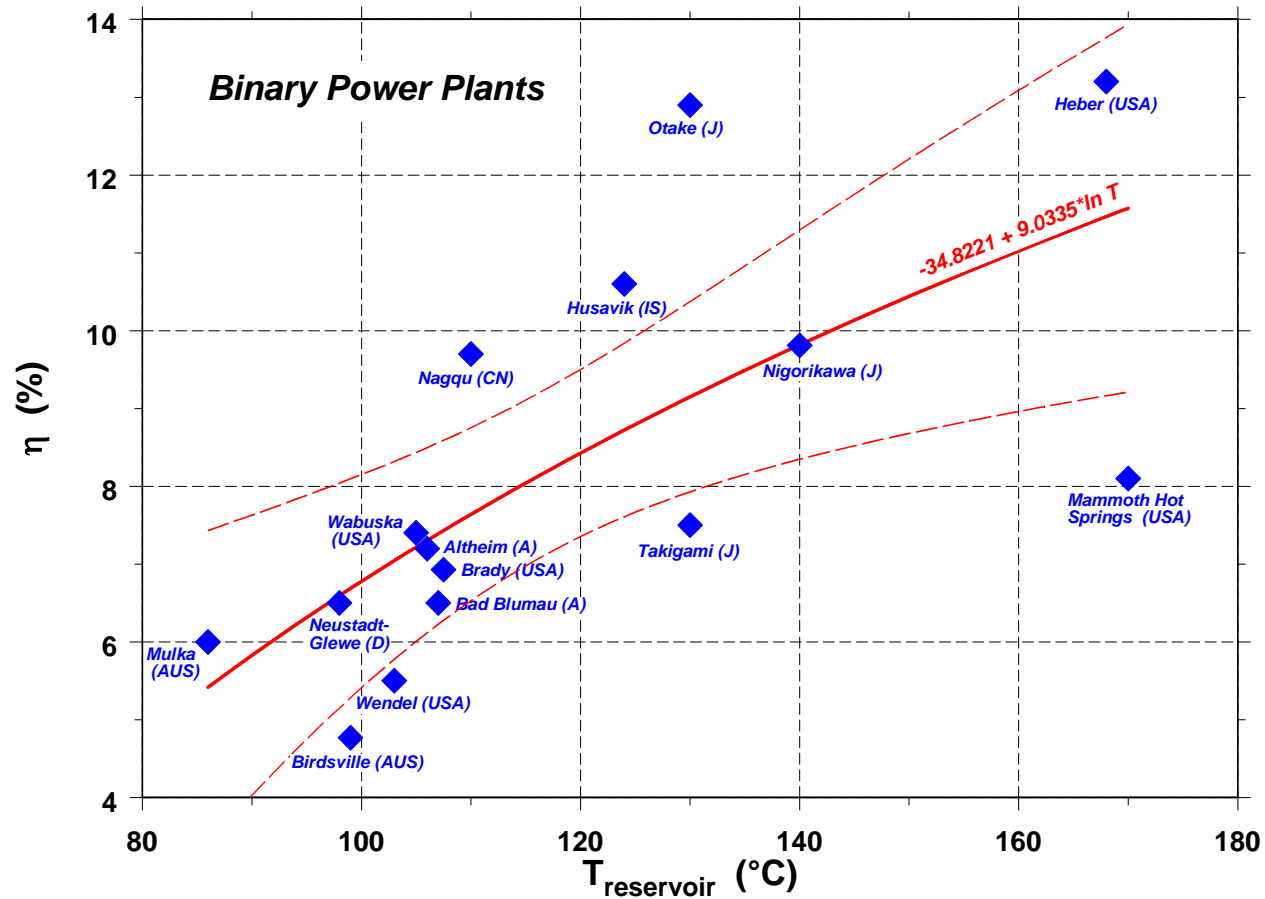
Einspeisevergütung für geothermischen Strom nach dem deutschen Erneuerbaren Energie- Gesetz (EEG)	
Installierte Leistung (MW)	Vergütung ($\text{€ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
0 – 10	0.160
> 10	0.105
vor 2015 am Netz	+ 0.040
mit Kraft-Wärmekopplung	+ 0.030
technisch angelegte („petrothermale“) Systeme	+ 0.040

Anlagen in Deutschland



Nutzung von Heißwasser-Reservoiren in Sedimentbecken

Wirkungsgrad binärer Anlagen



Thermischer Nettowirkungsgrad η als Funktion der Reservoirtemperatur unterschiedlicher binärer Kraftwerke (Husavik: Kalina, alle anderen: ORC). Rote Linie: Logarithmischer Trend aus nichtlinearer Regression; Gestrichelt: 95 % Vertrauensbereich, (A: Österreich, AUS: Australien, CN: VR China, D: Deutschland, IS: Island, J: Japan)

Kosten binärer Systeme

$$C_Y = C_W \left(\frac{X_Y}{X_W} \right)^\alpha \quad (V-1)$$

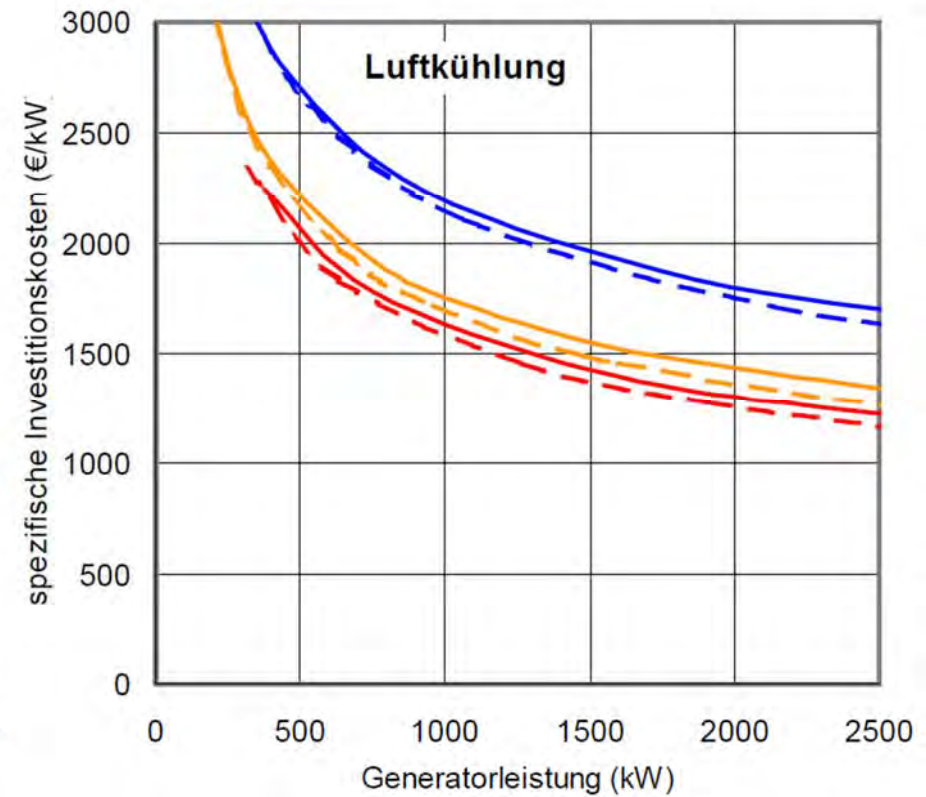
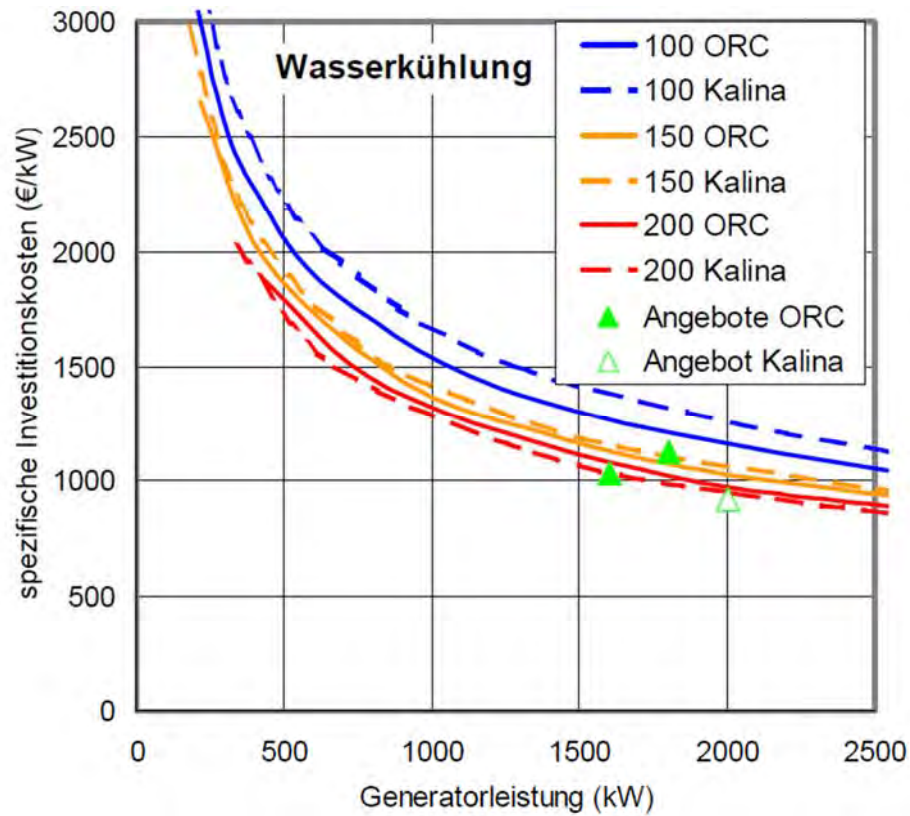
Tabelle V-4 enthält die für die verschiedenen Maschinen und Apparate verwendeten Bezugspunkte und Exponenten α sowie Angaben zu den jeweiligen Quellen.

Bauteil	Exponent α	Bezugspunkt X_W	Kosten am Bezugspunkt C_W	Quelle
Pumpen	0,37	10 kW	4.500 €	<i>Bejan et al. (1996), Kranz, (2003)</i>
Wärmeübertrager, Edelstahl	0,59	93 m ³	21.617 €	<i>Grauman und Willey (1998)</i>
Wärmeübertrager, Titan	0,59	93 m ³	3.0787 €	<i>Grauman und Willey (1998)</i>
Turbosatz	0,6	1 MW _{el}	340.000 €	<i>Kühnle (2003)</i>
Luftgekühlte Kondensatoren	0,89	957 kW _{th}	38.530 € ^{*)}	<i>Güntner (2004)</i>
Nasskühlturm	0,8	500 kW _{th}	15.000 €	<i>UMSICHT (2003)</i>

^{*)} enthält 30% Zuschlag für Zubehör

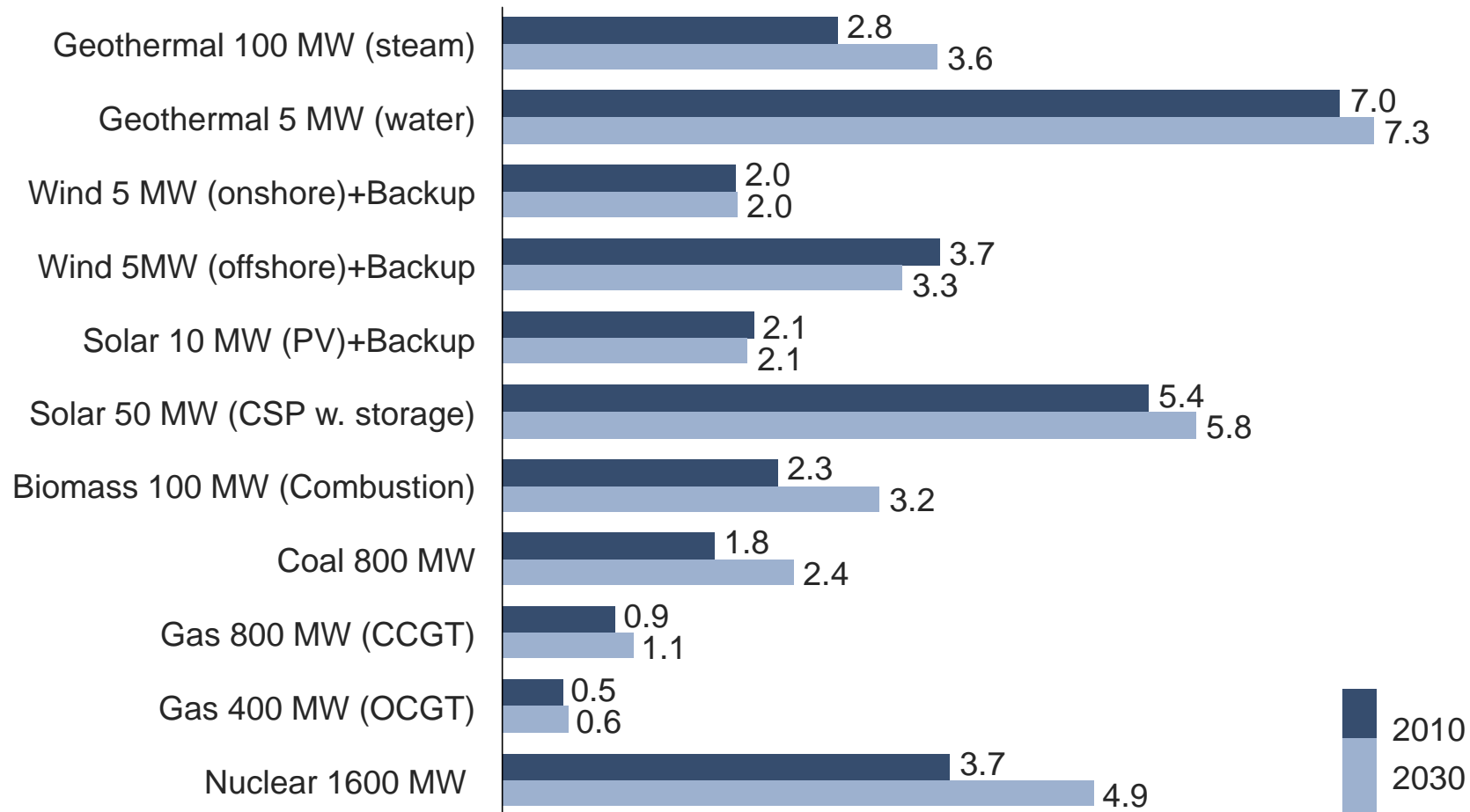
(Köhler 2005)

Kosten binärer Systeme



Variation der spezifischen Investitionskosten von ORC- bzw. Kalina-Anlagen mit der elektrischen Leistung (Köhler 2005)

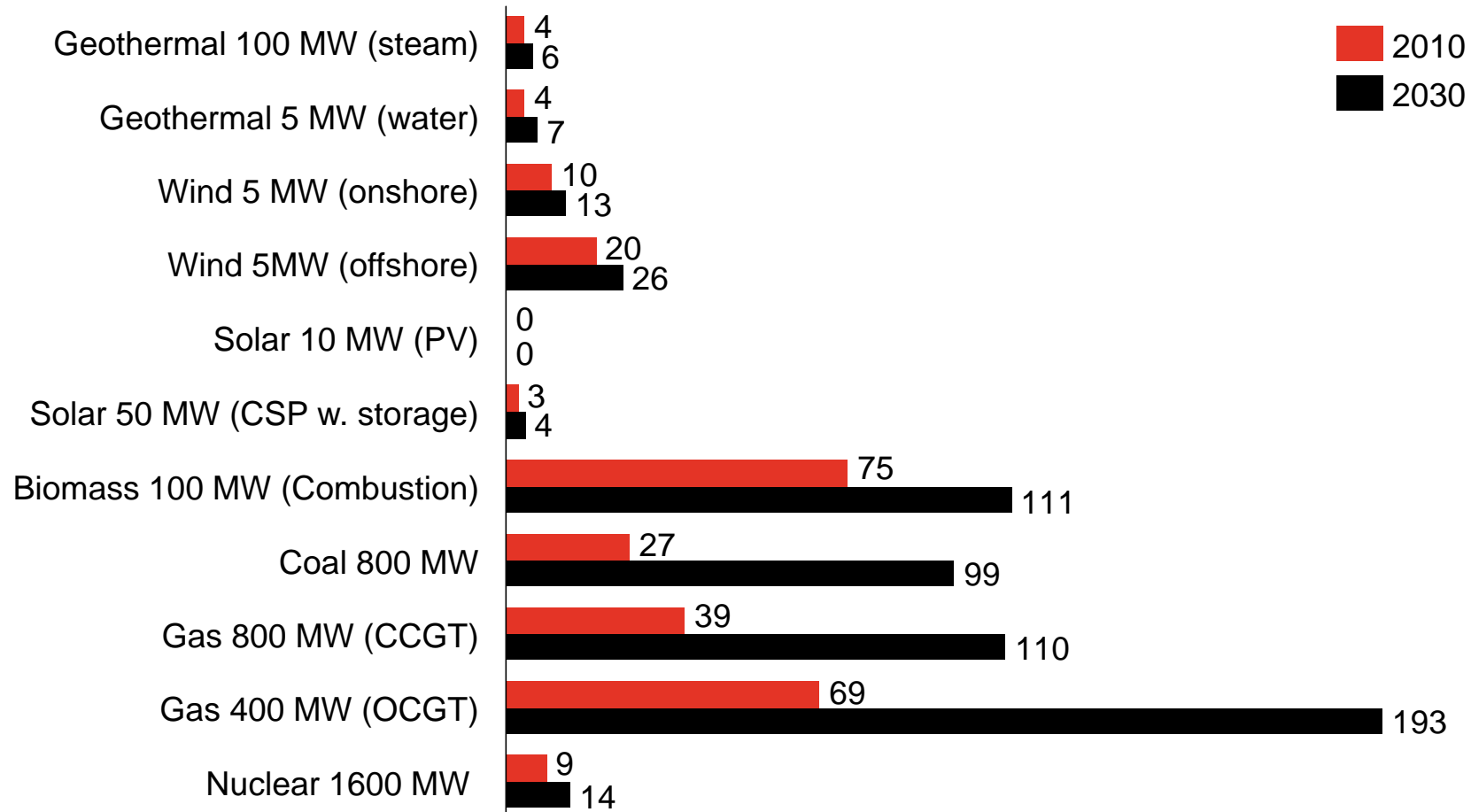
Kapitalaufwand (capex) in k€/kW_e



Data: Fraunhofer, EPRl and others; calculation: Dr. M. Ewert (E.ON)

Backup Wind und PV: OCGT; OCGT: open cycle gas turbine; CCGT: combined cycle gas turbine (dt: KWK)

Variable Kosten (opex) in €/ (MW h)_e

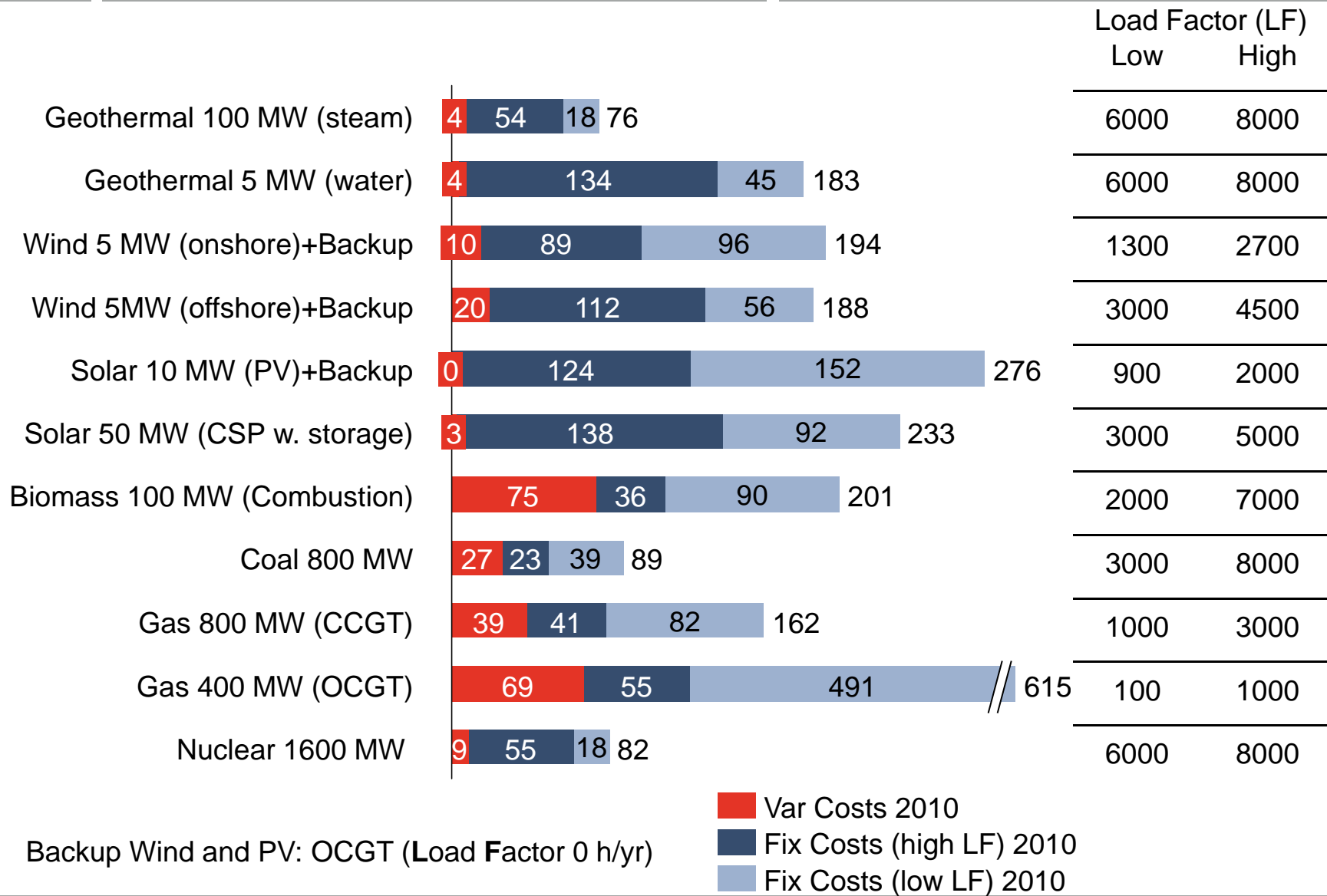


Data: Fraunhofer, EPRI and others; calculation: Dr. M. Ewert (E.ON)

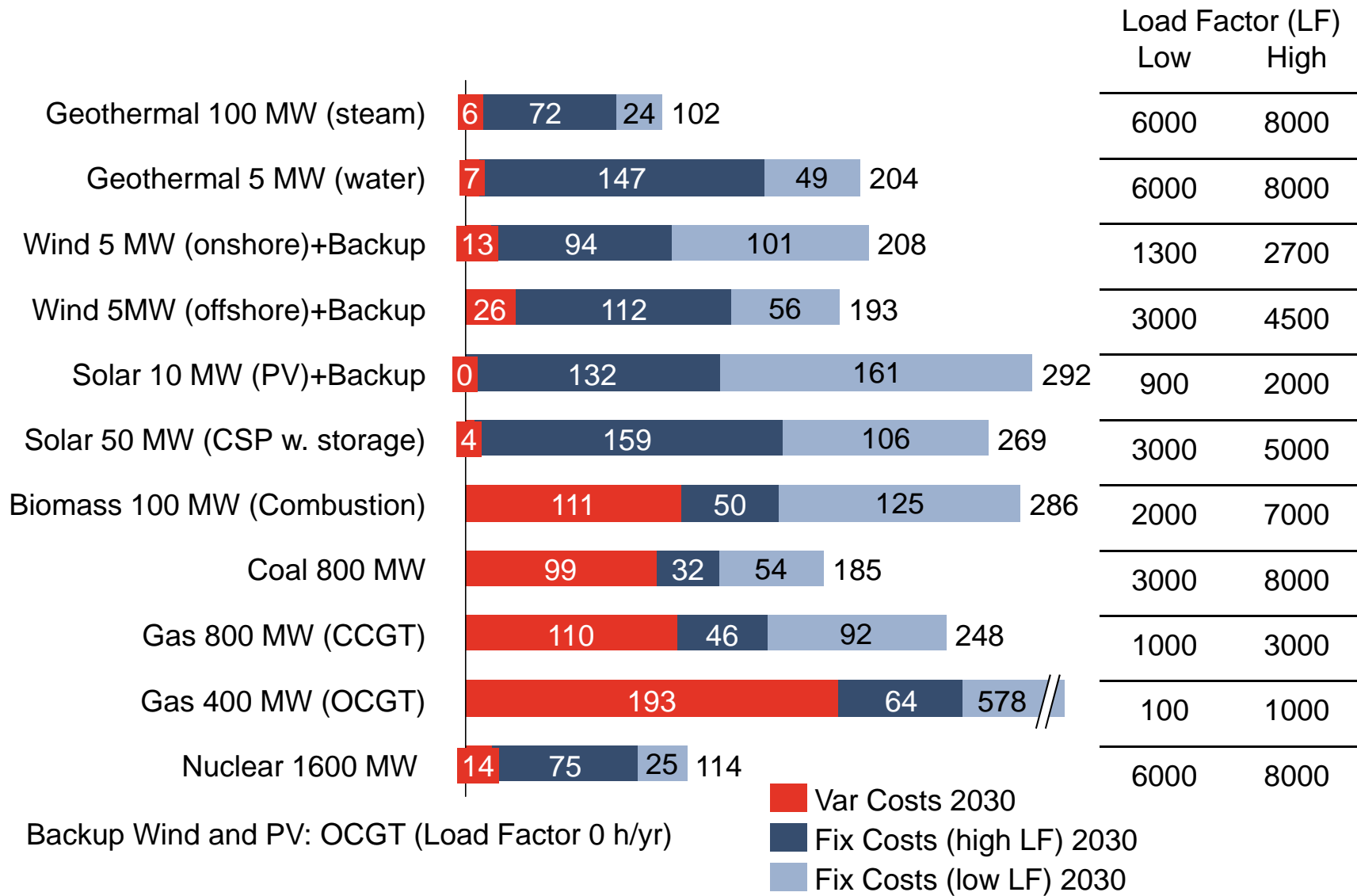
Backup Wind und PV: OCGT; OCGT: open cycle gas turbine; CCGT: combined cycle gas turbine (dt: KWK)

Stromgestehungskosten 2010 in €/(MW h)_e

Data: Fraunhofer, EPRI and others; calculation: Dr. M. Ewert (E.ON)



Stromgestehungskosten 2030 in €/ (MW h)_e



Data: Fraunhofer, EPRI and others; calculation: Dr. M. Ewert (E.ON)

■ Aktueller Stand

≡ Reservoirtypen

= Kristallin, Vulkanite

= andere geologische Bedingungen als in Sedimenten

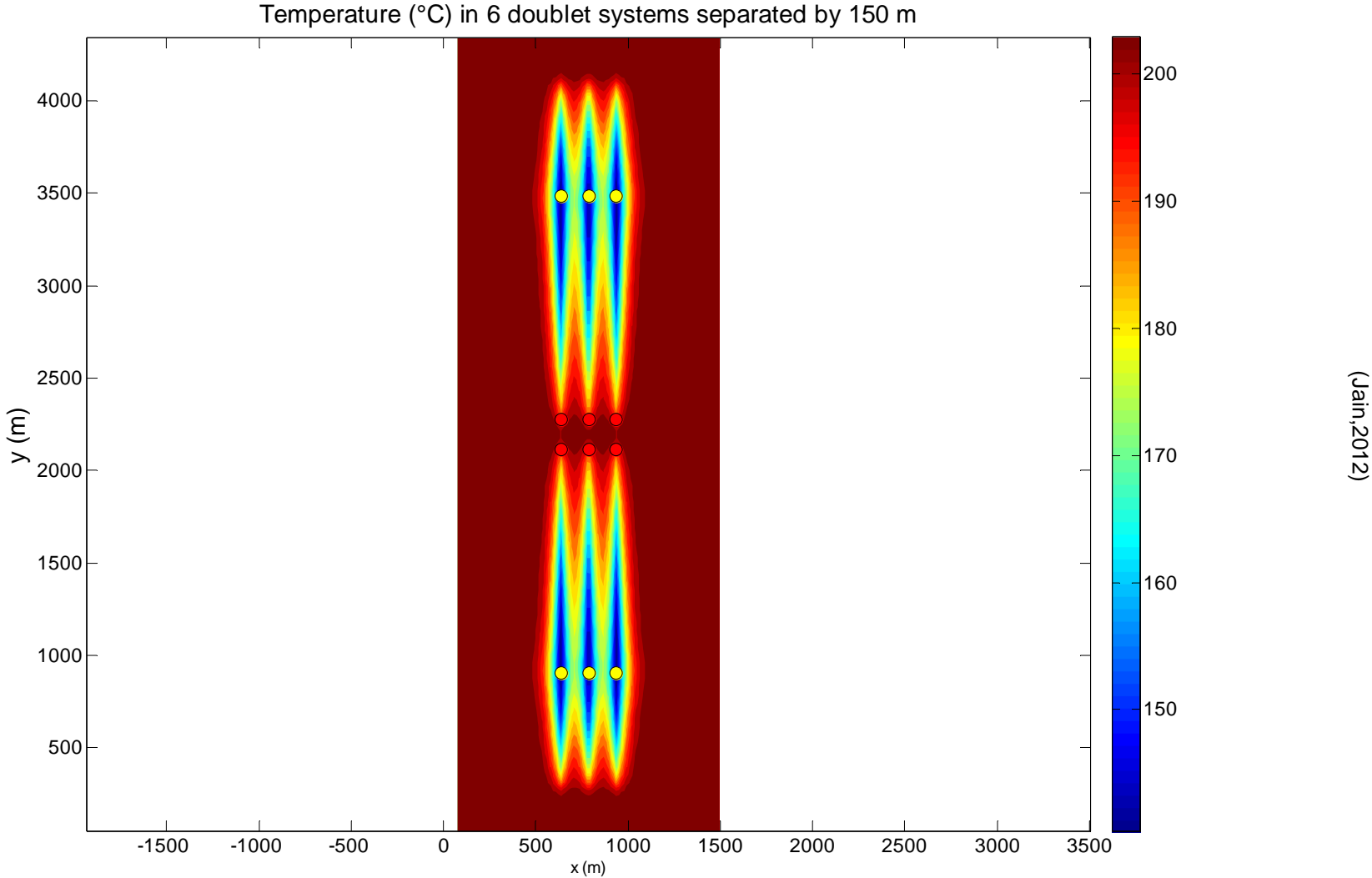
≡ Forschungsanlagen

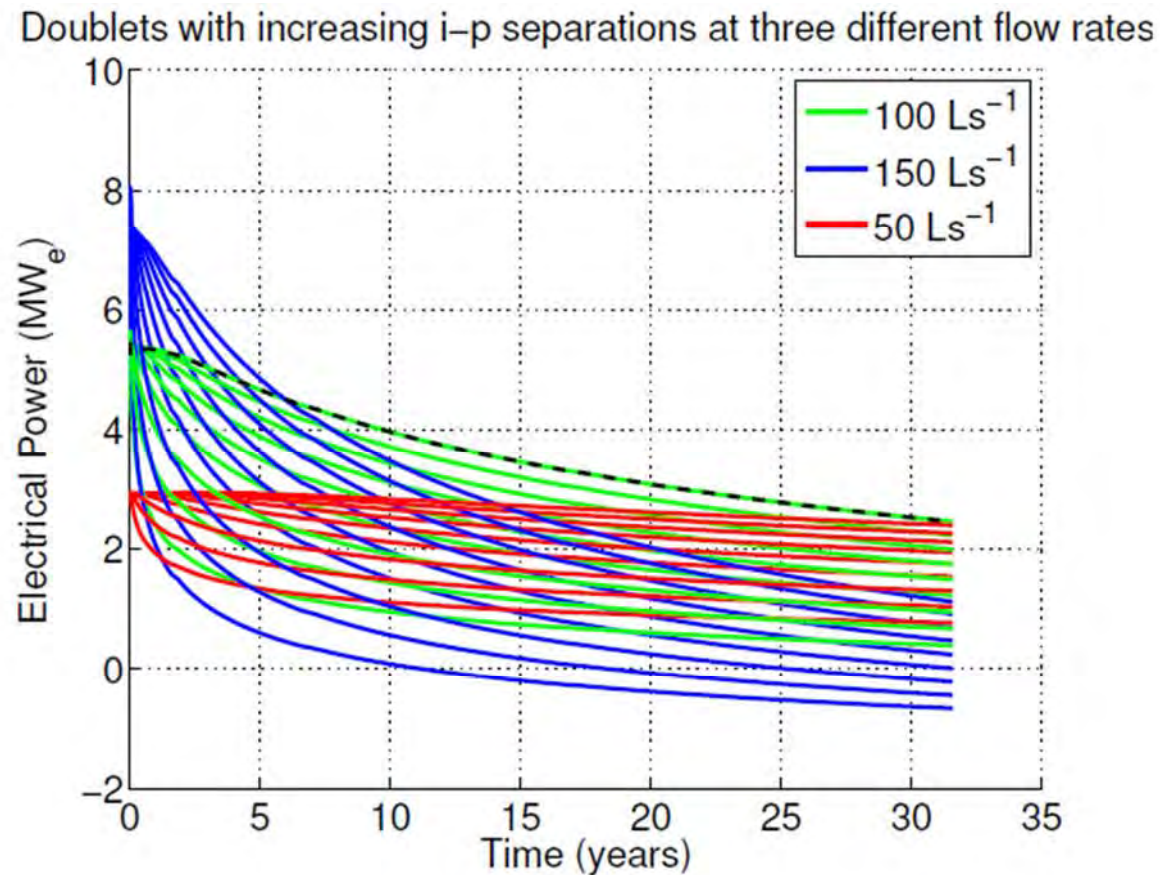
= Soultz-sous-Forêts:



= „kommerzielle“ Anlage in Landau:
kleine installierte thermische und
elektrische Leistungen, wärme-
geführter Anlagenbetrieb

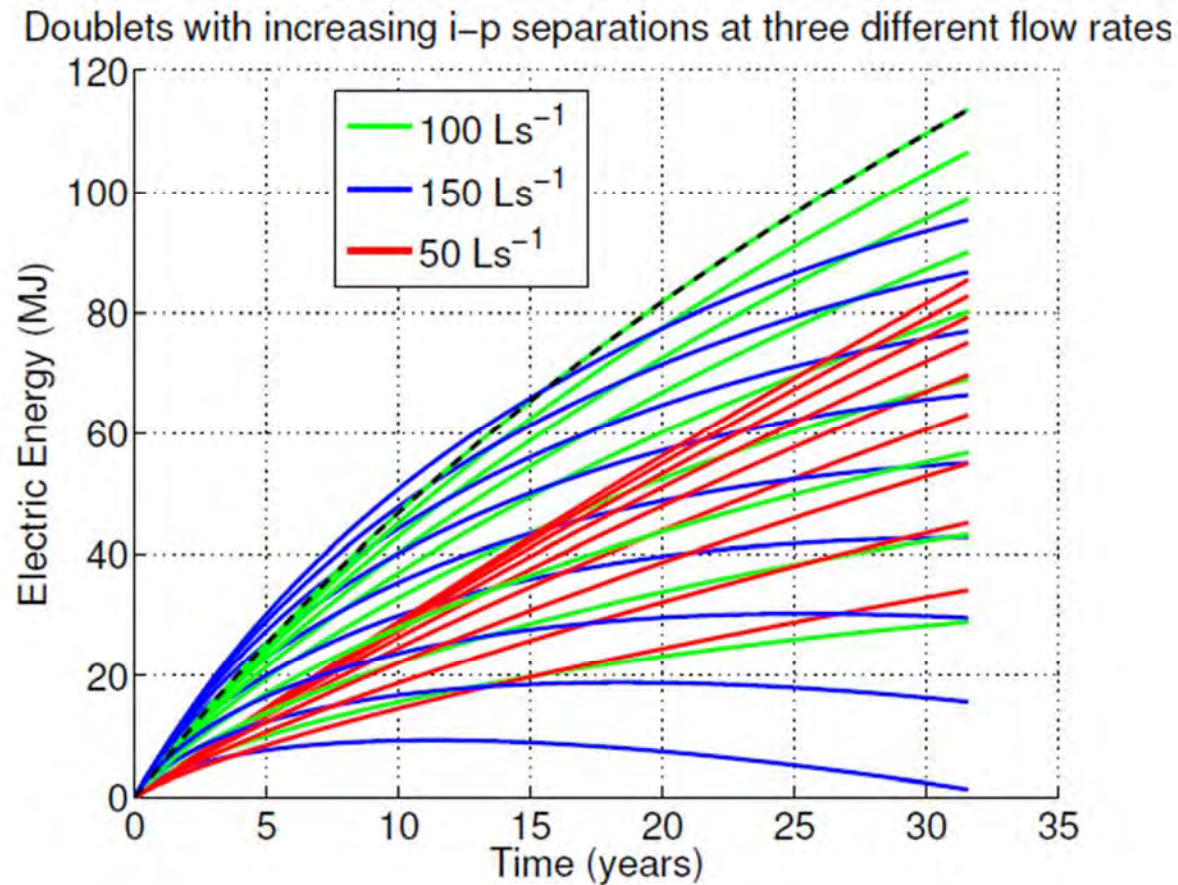






(Jain et al. 2013)

Figure 7: Electric power (MW_e) for doublets with increasing i-p separations from 400 m - 2000 m at flow rates of 50 Ls^{-1} , 100 Ls^{-1} and 150 Ls^{-1} . The dashed black line represents the optimized doublet design with the highest average electric power.



(Jain et al. 2013)

Figure 8: Electric energy (MJ) for doublets with increasing i-p separations from 400 m - 2000 m at flow rates of 50 L s⁻¹, 100 L s⁻¹ and 150 L s⁻¹. The dashed black line represents the optimized doublet design with the highest electricity production.

- Musteranlage: 6 umgekehrte Tripletten (18 Bohrungen) mit durchschnittlicher elektrischer Leistung von $35,3 \text{ MW}_e$
- In Deutschland verfügbare Fläche für EGS-Anlagen: $89\,000 \text{ km}^2$
- hinreichend für maximal 13 450 Anlagen
- bei voller Leistung: jährliche Gesamtenergie von $4\,155 \text{ TW h}$, mehr als das Sechsfache der deutschen Stromerzeugung im Jahr 2012

- Nutzung von Heißwasserreservoiren zur Stromerzeugung technisch möglich und an einigen Stellen realisiert
- Potenzial sehr begrenzt, daher nur von lokaler Bedeutung
- dagegen enormes Potenzial für geothermische Stromerzeugung in Deutschland mittels technisch angelegter Systeme
- Hebung erfordert jedoch Sprünge bei der technischen Realisierung der erforderlichen technisch angelegten Rissysteme