

# Strom und Wasserstoff aus der Solarenergie der Wüste

Eckhard Lüpfer, Dr.-Ing.  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, e.V.  
Institut für Solarforschung

TH Köln, Gummersbach  
Umweltringvorlesung  
Sommersemester 2022  
8. Juni 2022



Wissen für Morgen

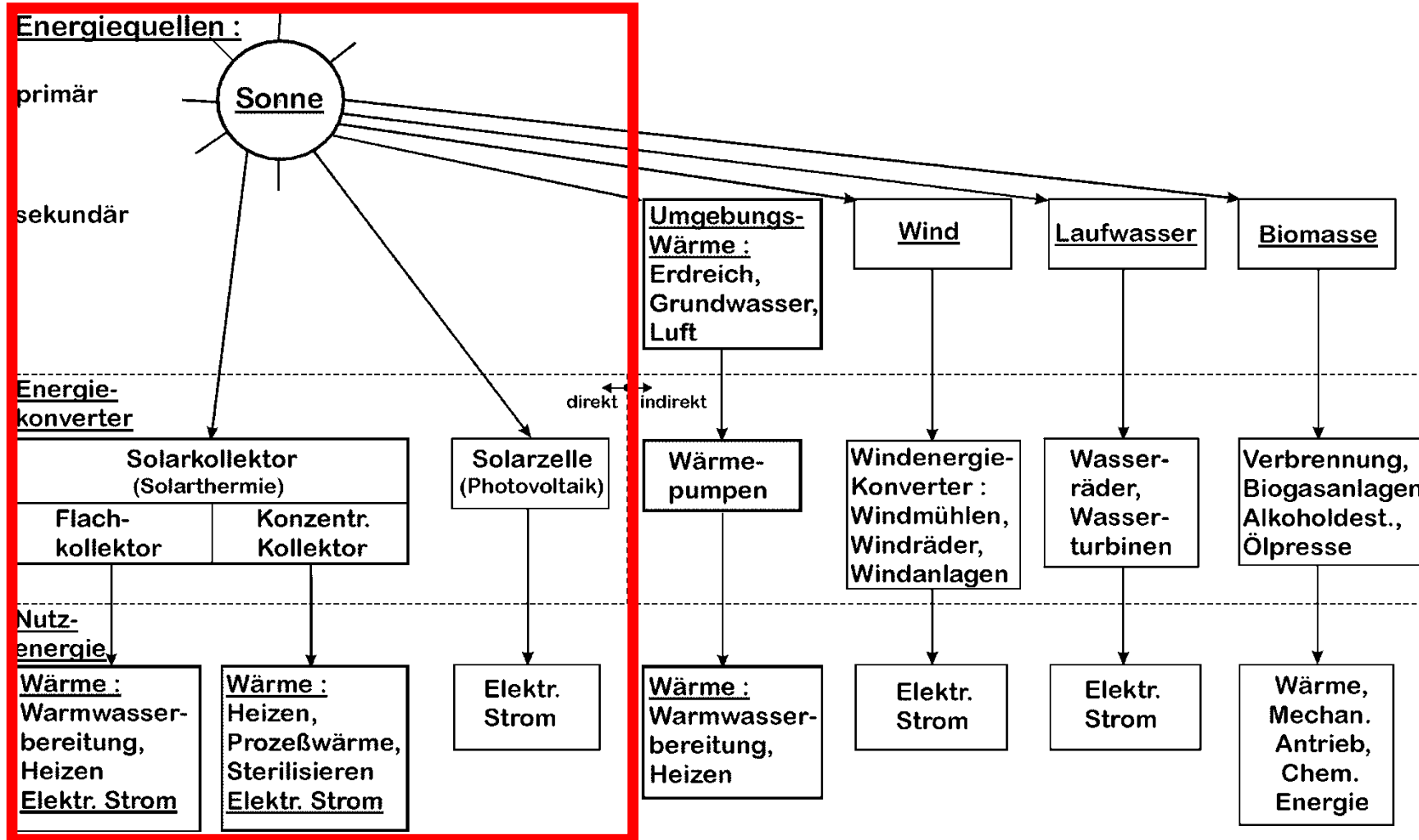


# Eckhard Lüpfer

- Studium RWTH Aachen, Maschinenbau und Physik
- Diplom Maschinenbau Energietechnik Kraftwerkstechnik Verfahrenstechnik 1992
- Promotion Maschinenbau Technische Thermodynamik 1996
- DLR Köln, Solare Energietechnik, seit 1992
- Plataforma Solar de Almería 1997-2005
- DLR Köln, Institut für Solarforschung
- CSP Services GmbH und weitere Unternehmensgründungen

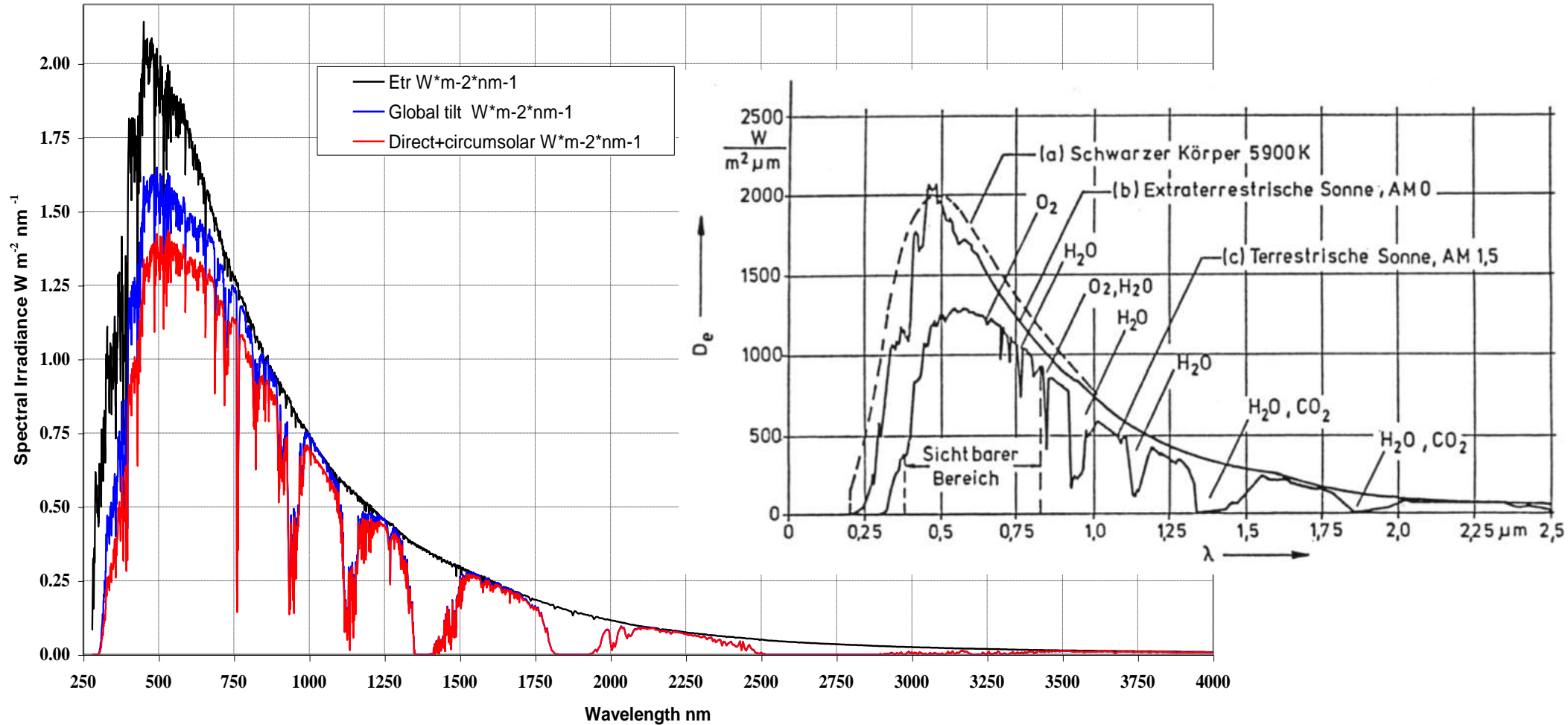


# Sonne als Energiequelle



[Krug 2002]

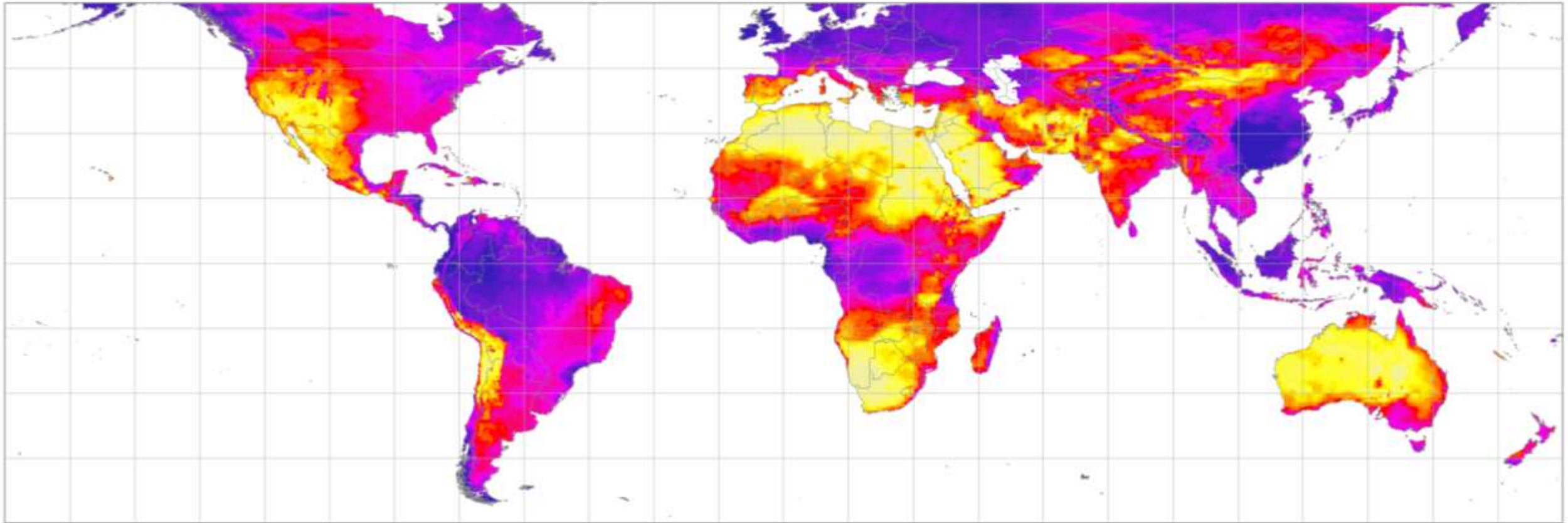
# Das Sonnenspektrum - ASTM G173 (direct)





# Resource: Solare Einstrahlung

## Direct Normal Irradiation (DNI)

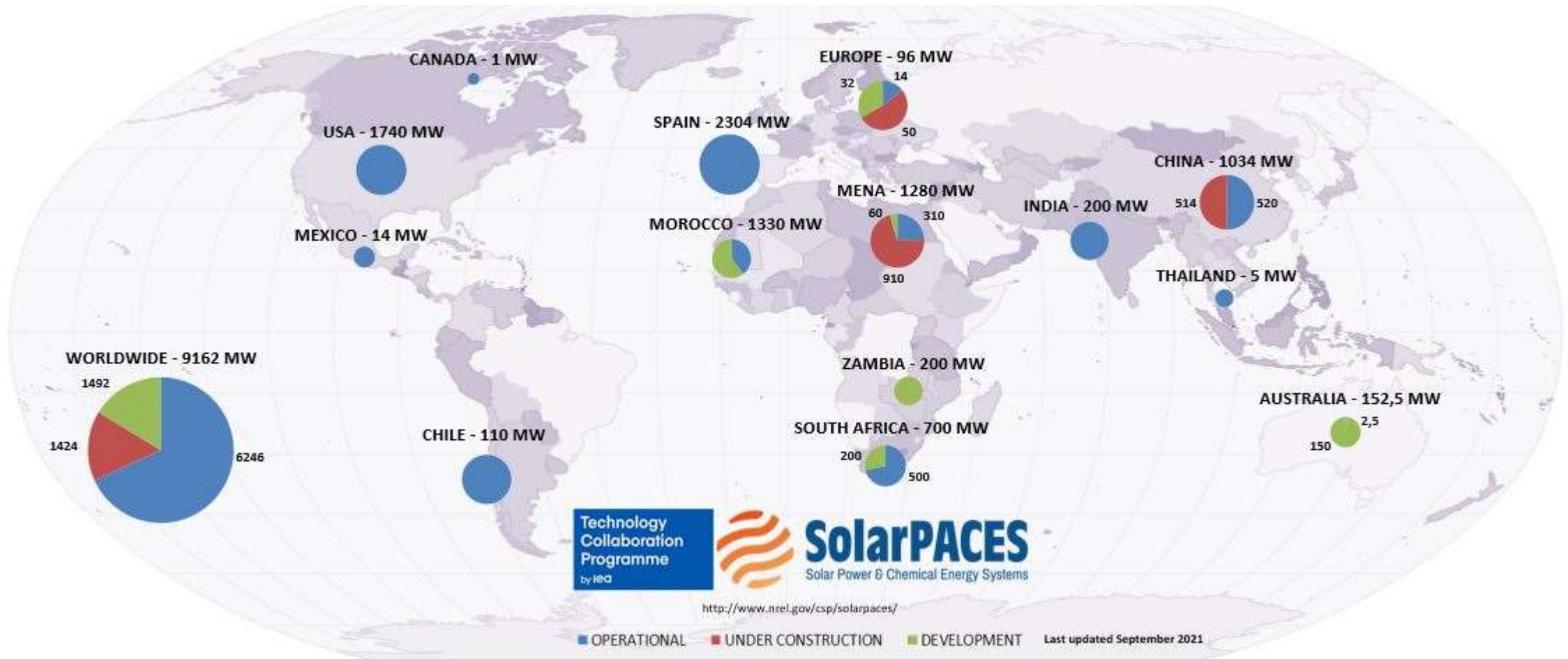


17.0 (www.meteonorm.com); uncertainty 15%  
5; grid cell size: 0.25°

September 2012 



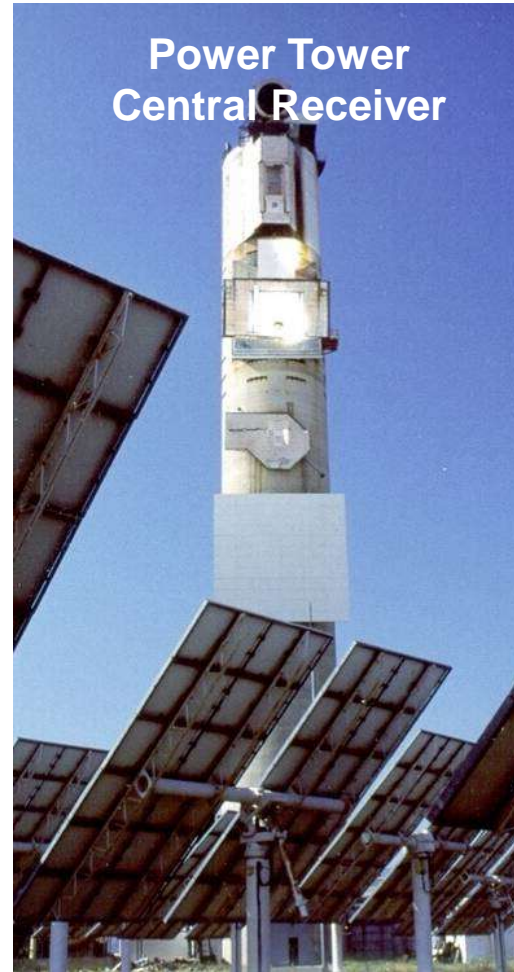
# Solarkraftwerke weltweit



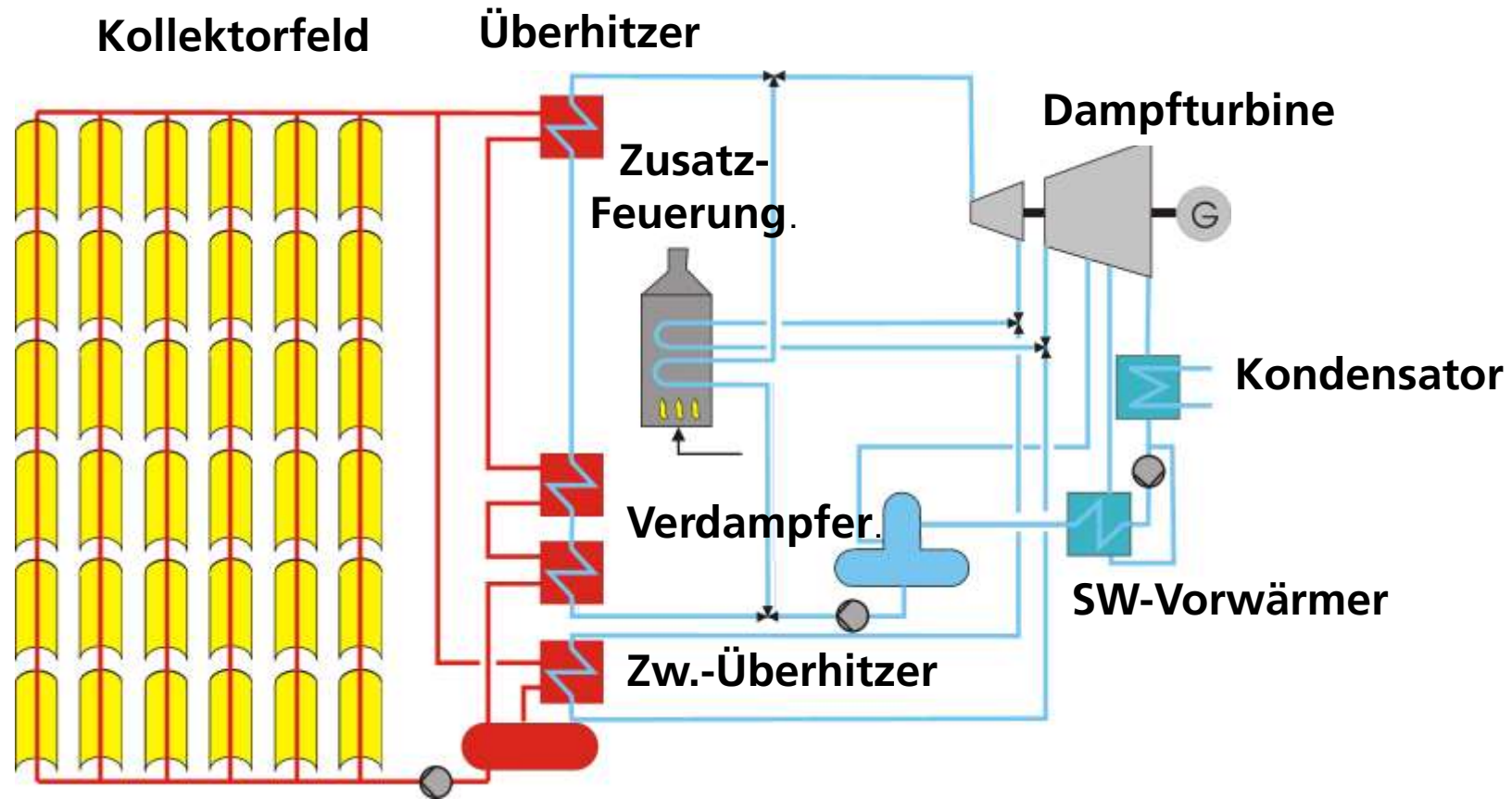
<https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>



# Concentrating Solar Power Technology Options



# Schema Parabolrinnenkraftwerk

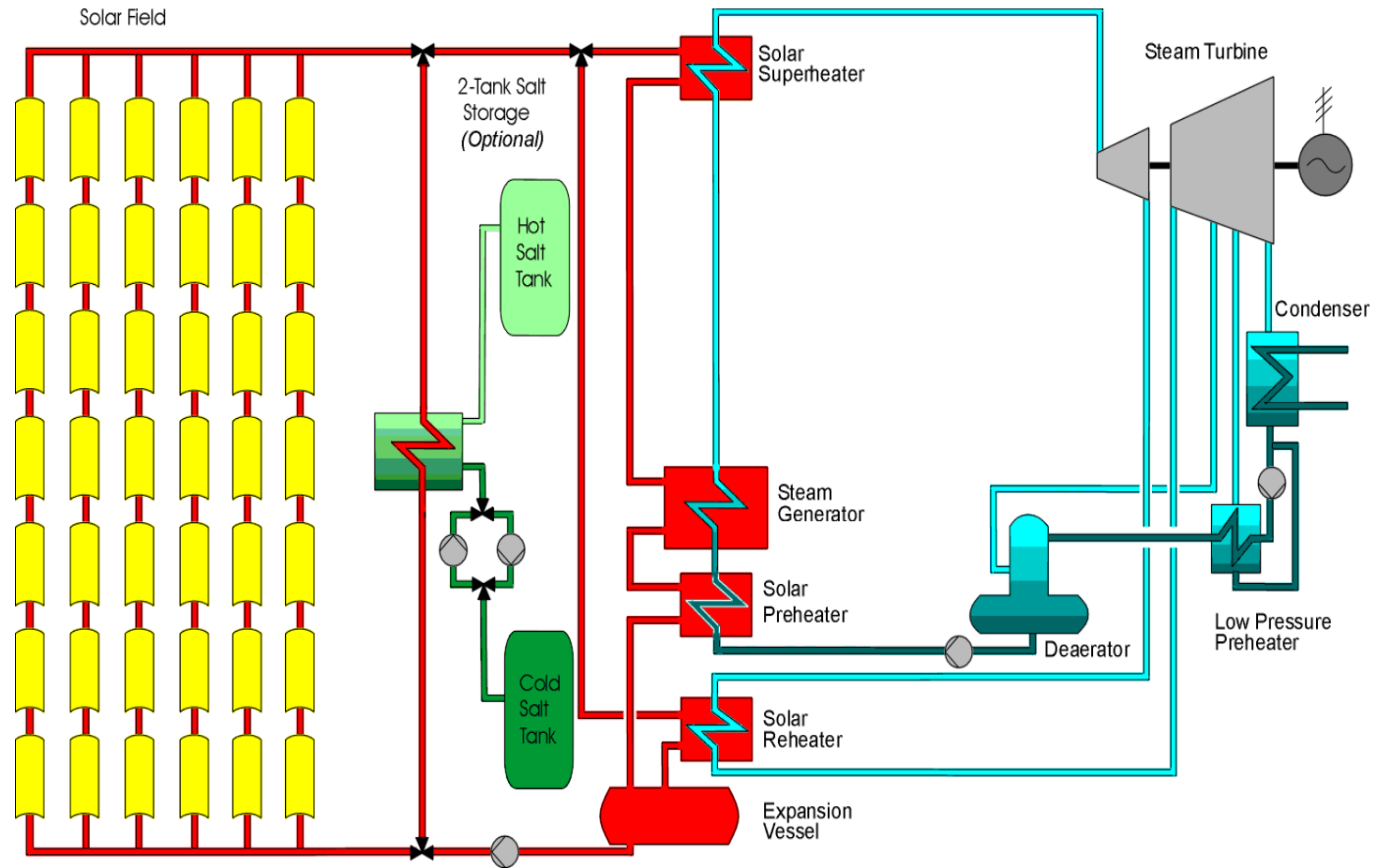


**Solar betriebenes Dampfkraftwerk (SEGS-Typ)**





# Parabolrinnenkraftwerk Schema Andasol



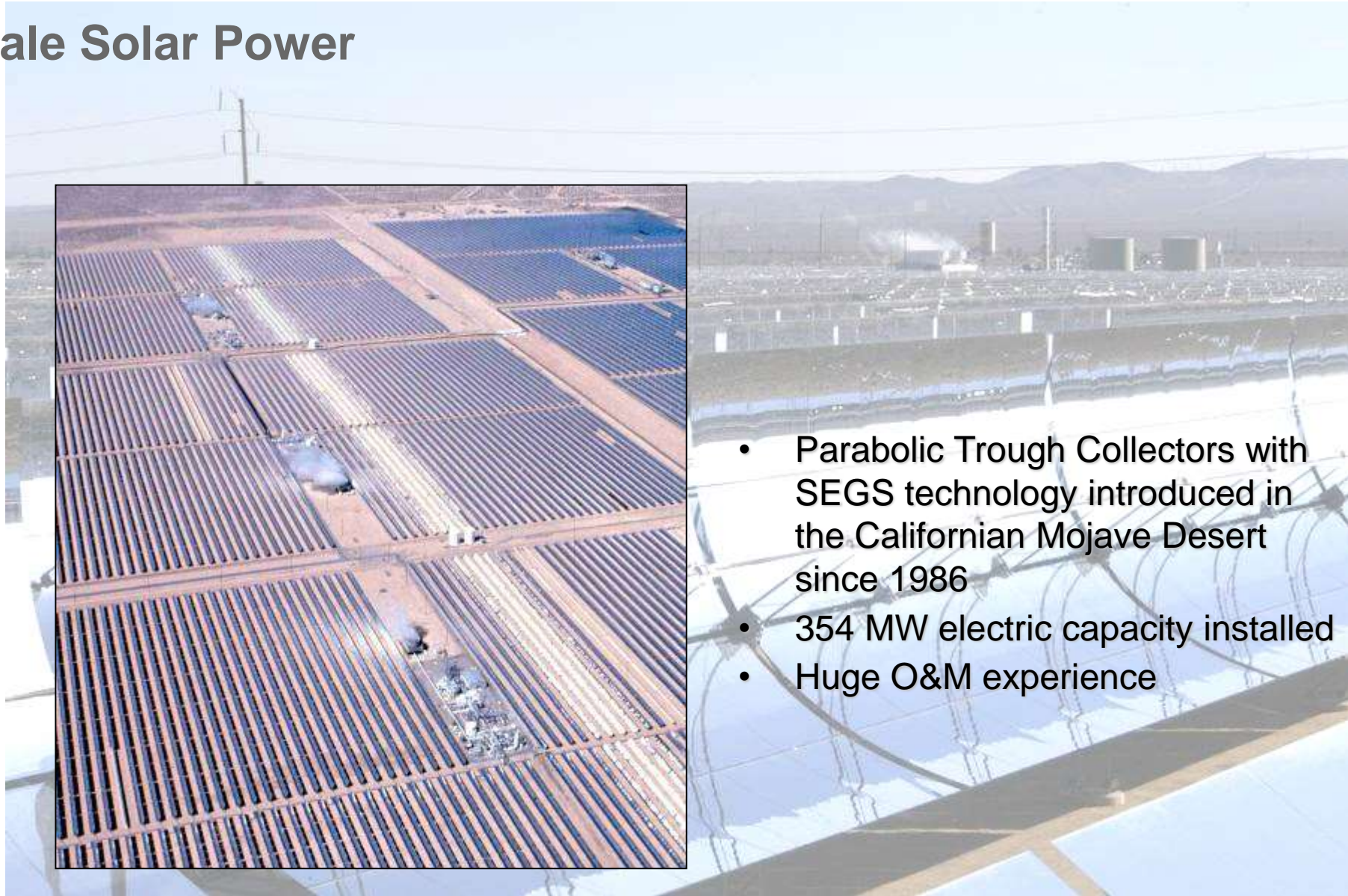


# EuroTrough at Plataforma Solar de Almería





# Large Scale Solar Power



- Parabolic Trough Collectors with SEGS technology introduced in the Californian Mojave Desert since 1986
- 354 MW electric capacity installed
- Huge O&M experience

# Concentrating Solar Power with Parabolic Troughs and Linear Fresnel Fields



## in Solar Thermal Power Plants

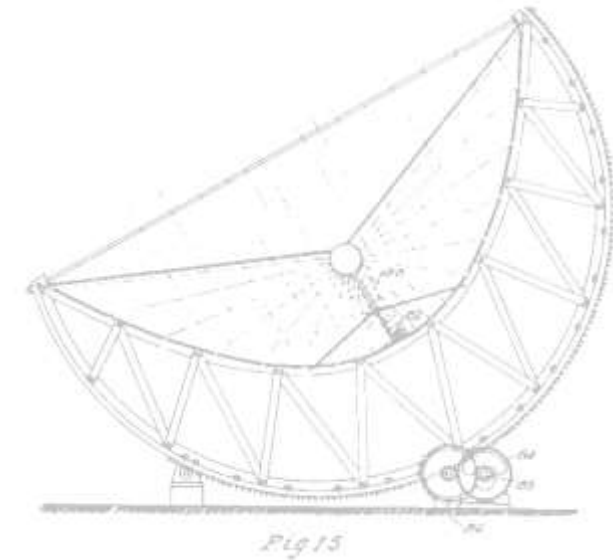
- Solar heat for Rankine cycles
- saturated / overheated steam
- solar only and hybrid
- Solar-to-electric peak efficiency up to around  $\approx 26\%$
- also process heat applications
- performance modeling is state of the art





# Geschichte des Parabolrinnenkollektors

- Patent von Wilhelm Meier und Adolf Remshardt im Jahr 1907
- Erstes Kraftwerk in Ägypten 1912
  - Satttdampf mit  $100^{\circ}\text{C}$  und 1 bar mit  $1200\text{m}^2$
  - Dampfmotor mit 45kW für eine Wasserpumpe (380l/s)





# Solar Radiation

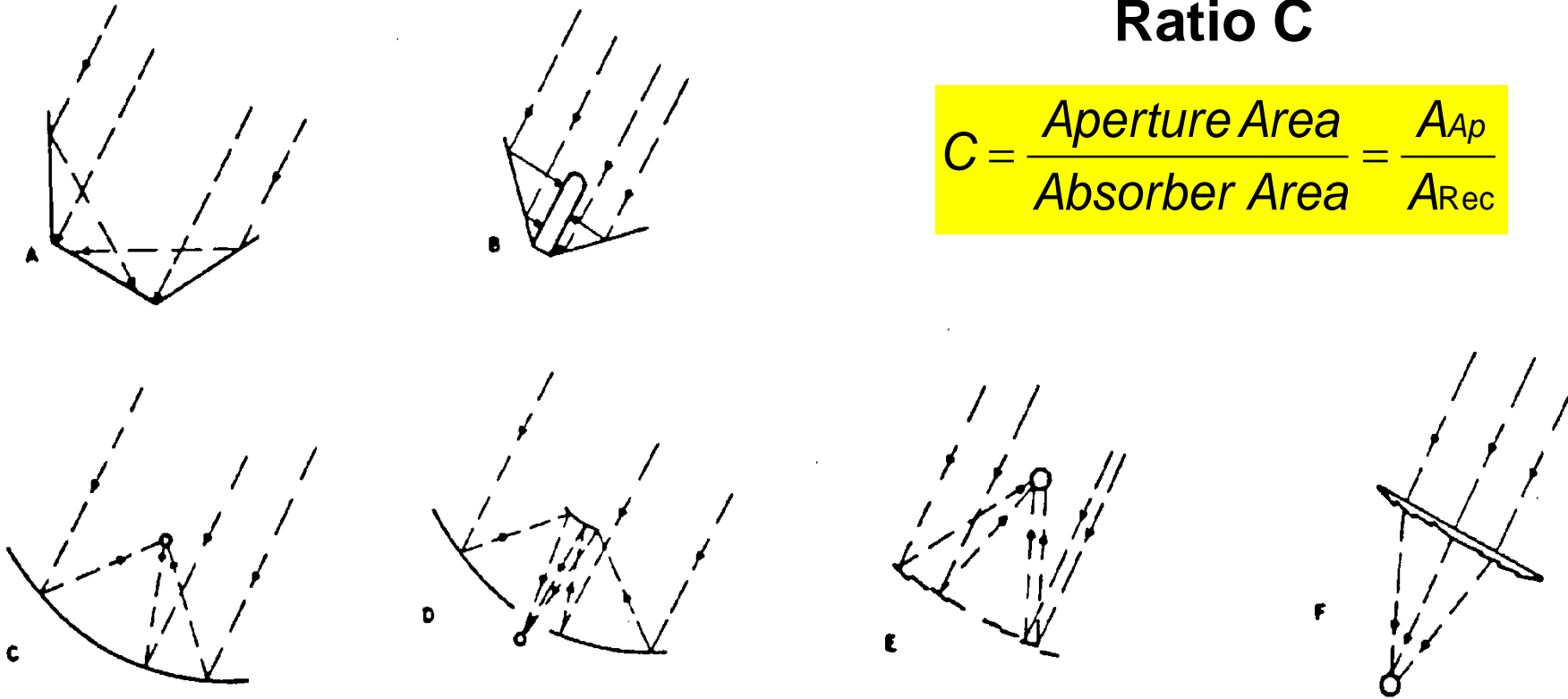
- Distance Sun – Earth:  $150 \cdot 10^6$  km
- Sun diameter:  $1.4 \cdot 10^6$  km
- Apparent size of the sun: 9.3 mrad
- Irradiance extraterrestrial:  $1367 \text{ W/m}^2$
- Attenuation due to atmospheric absorption and scattering
- Irradiance on earth  $\approx 1000 \text{ W/m}^2$
- Air Mass = AM (multiples of atmosphere thickness)  
e.g. Spectrum for AM 1.5 (ISO 9050)



# Concentrators for Solar Radiation

## Geometric Concentration Ratio C

$$C = \frac{\text{Aperture Area}}{\text{Absorber Area}} = \frac{A_{Ap}}{A_{Rec}}$$



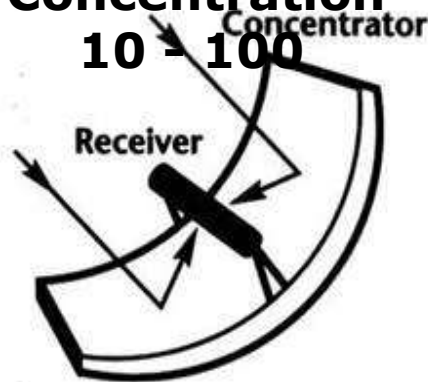
# Concentration of Solar Radiation in point focusing or linear focusing systems

**Left:**

**Linear focus  
(2D-Conc.)**

**Single-axis  
Tracking**

**Concentration  
10 - 100**



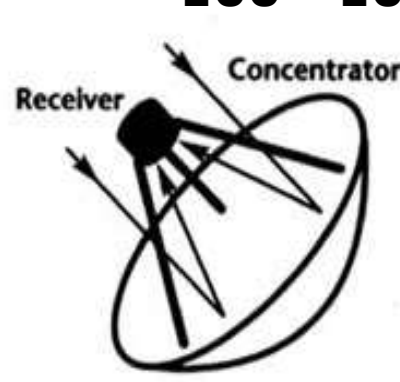
Parabolic Trough

**Center und right:**

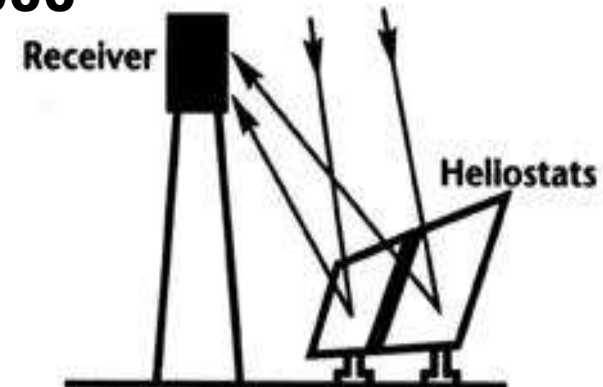
**Point focus, one central receiver  
(3D-Conc.)**

**Two-axis Tracking**

**Concentration  
100 - 10.000**



Paraboloidal „Dish“



Solar Tower





# Maximum (theoretical) Concentration

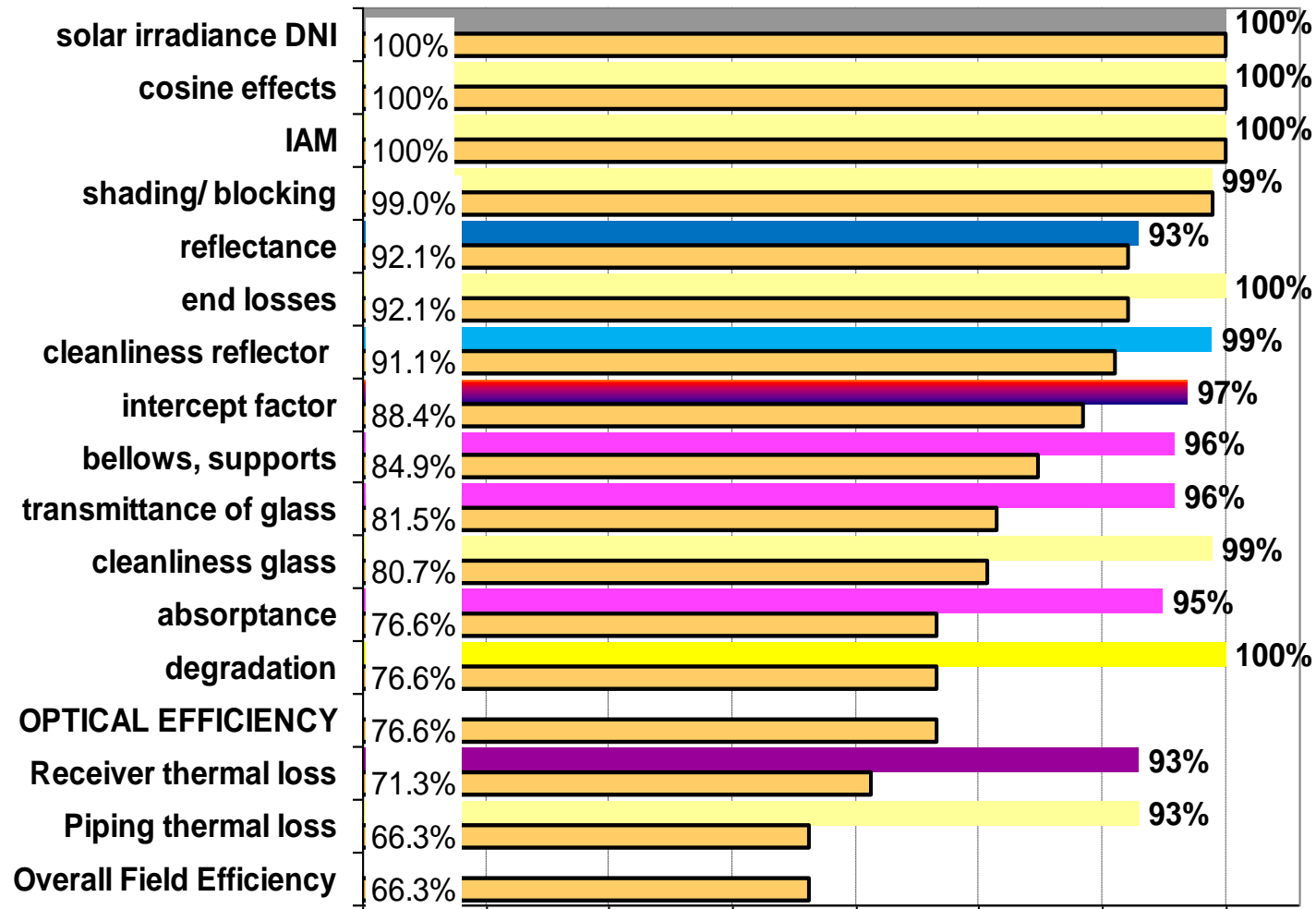
- Due to the "size" of the sun "disk"
- Sun angle  $\alpha_D = 32' = 0,00931 \text{ rad}$  ("half degree")

$$\Rightarrow k_{\text{max1-axis}} = \frac{2}{\alpha_D} \frac{n_2}{n_1} = \frac{2}{0,00931} \frac{n_2}{n_1} = 213 \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow k_{\text{max2-axis}} = \frac{4}{\alpha_D^2} \frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{0,00931^2} \frac{n_2}{n_1} = 46.100 \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

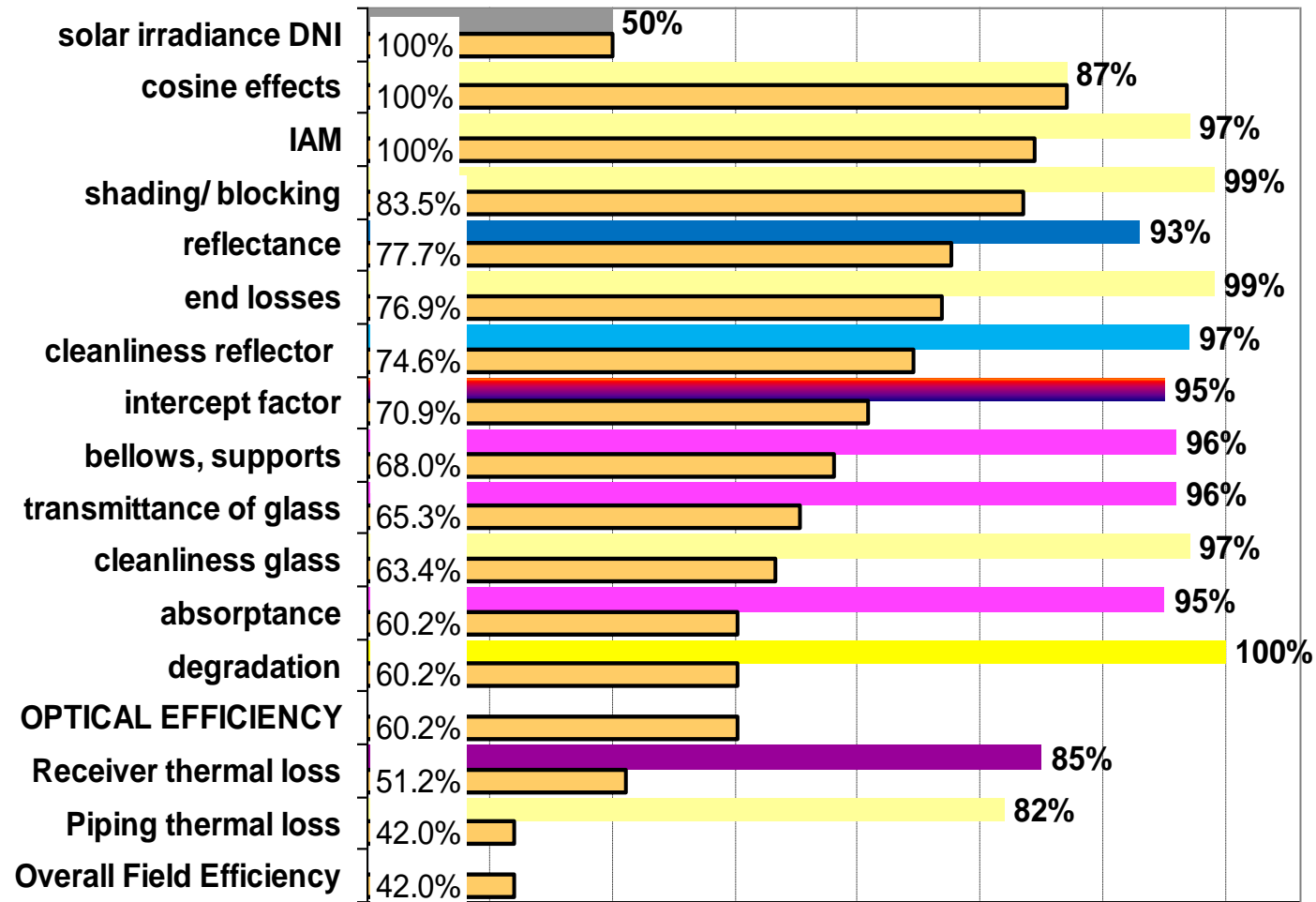


# Parabolic Trough Collector Efficiency – peak Example



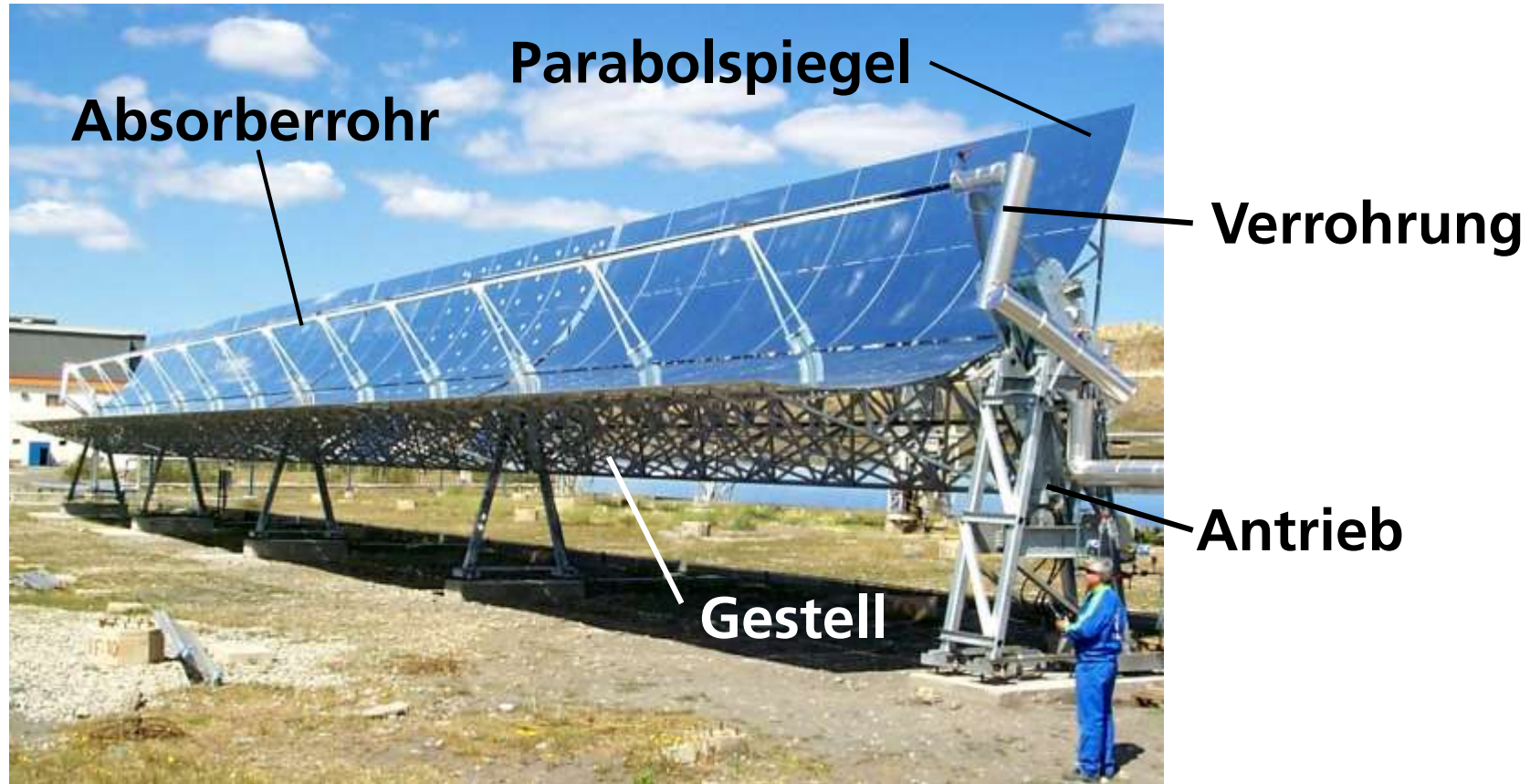
# Parabolic Trough Collector Efficiency – annual average

## Example





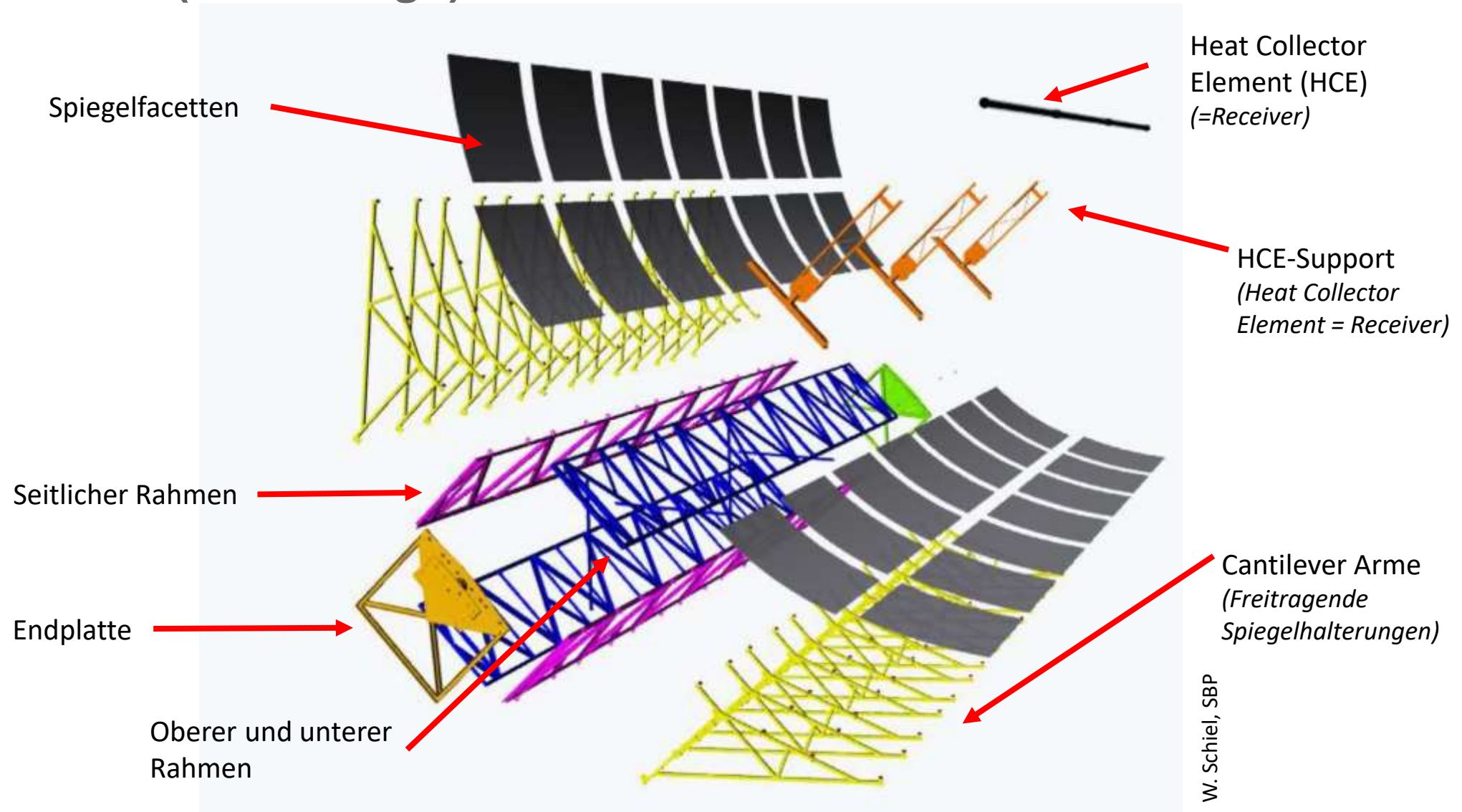
# Einzelkomponenten Kollektor



**Eurotrough-Kollektor**



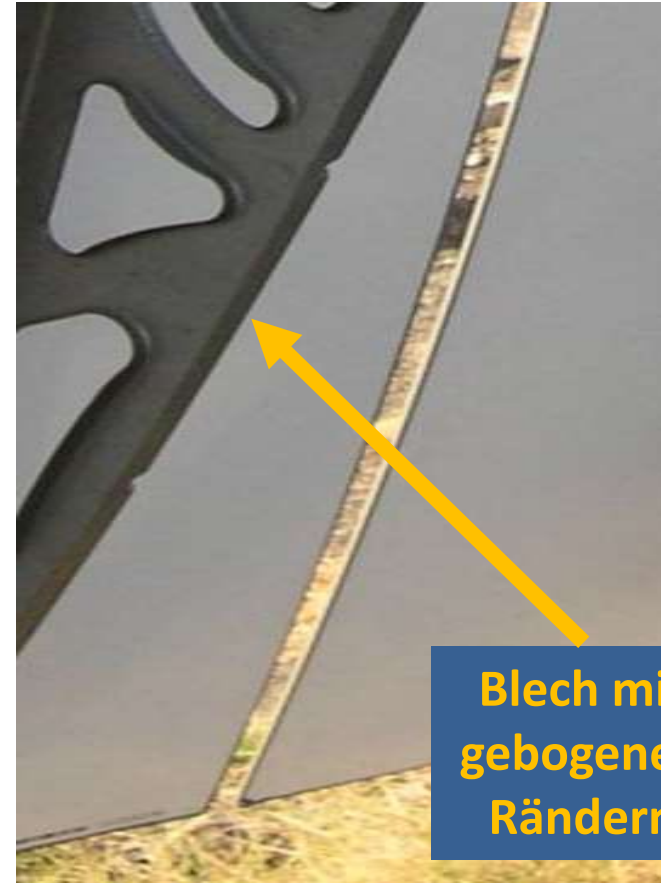
# Stahlstruktur (EuroTrough)



# Cantilever Arme



**Geschweißte Arme:  
robust / teuer**



**Blech mit  
gebogenen  
Rändern**

**Gestanzte Arme:  
günstiger, weniger stabil**

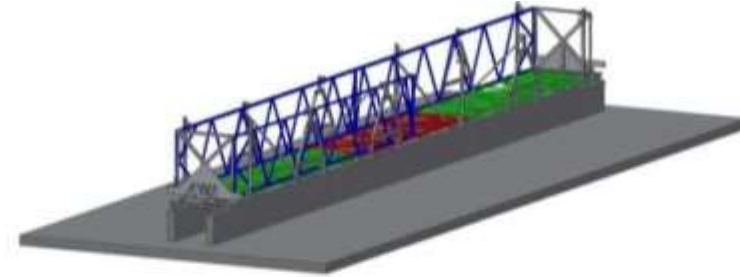




# Montagegestelle (Jigs)

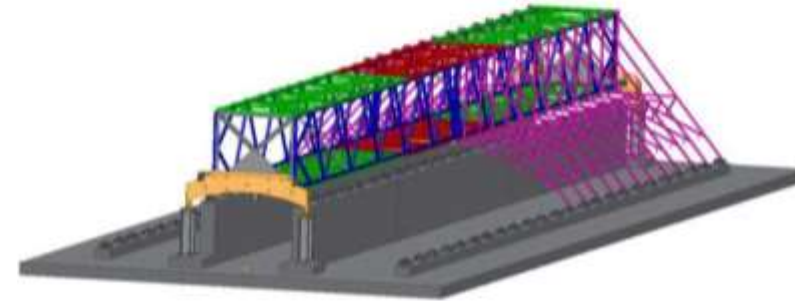
## Box-Jig

- Zusammenbau des Rahmens, der Endplatten, und der HCE-Support Füße zur Torsionsbox



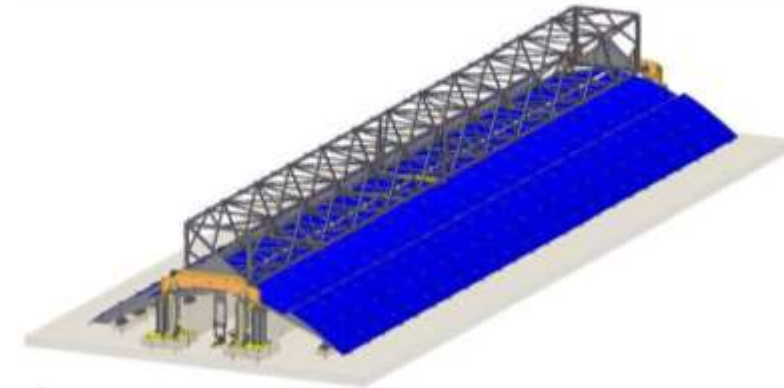
## SCE-Jig

- Befestigung der **Cantilever Arme** an der Box



## Spiegel-Jig

- Verklebung/Verschraubung der **Spiegel** möglichst spannungsfrei an der Stahlstruktur
- HCE-Supports werden an der Box befestigt



W.Schiel, SBP





# Montage EuroTrough

- Jig Toleranz 0,25 mm
- Struktur Toleranz 0,5 mm



# Andasol 1 Armjig



W.Schiel, SBP





# Box-Jig



W.Schiel, SBP





# Haupt SCE-Jig



W.Schiel, SBP





## QM-Station (Spiegelaufhängung)



W.Schiel, SBP



# Transport ins Feld



W.Schiel, SBP





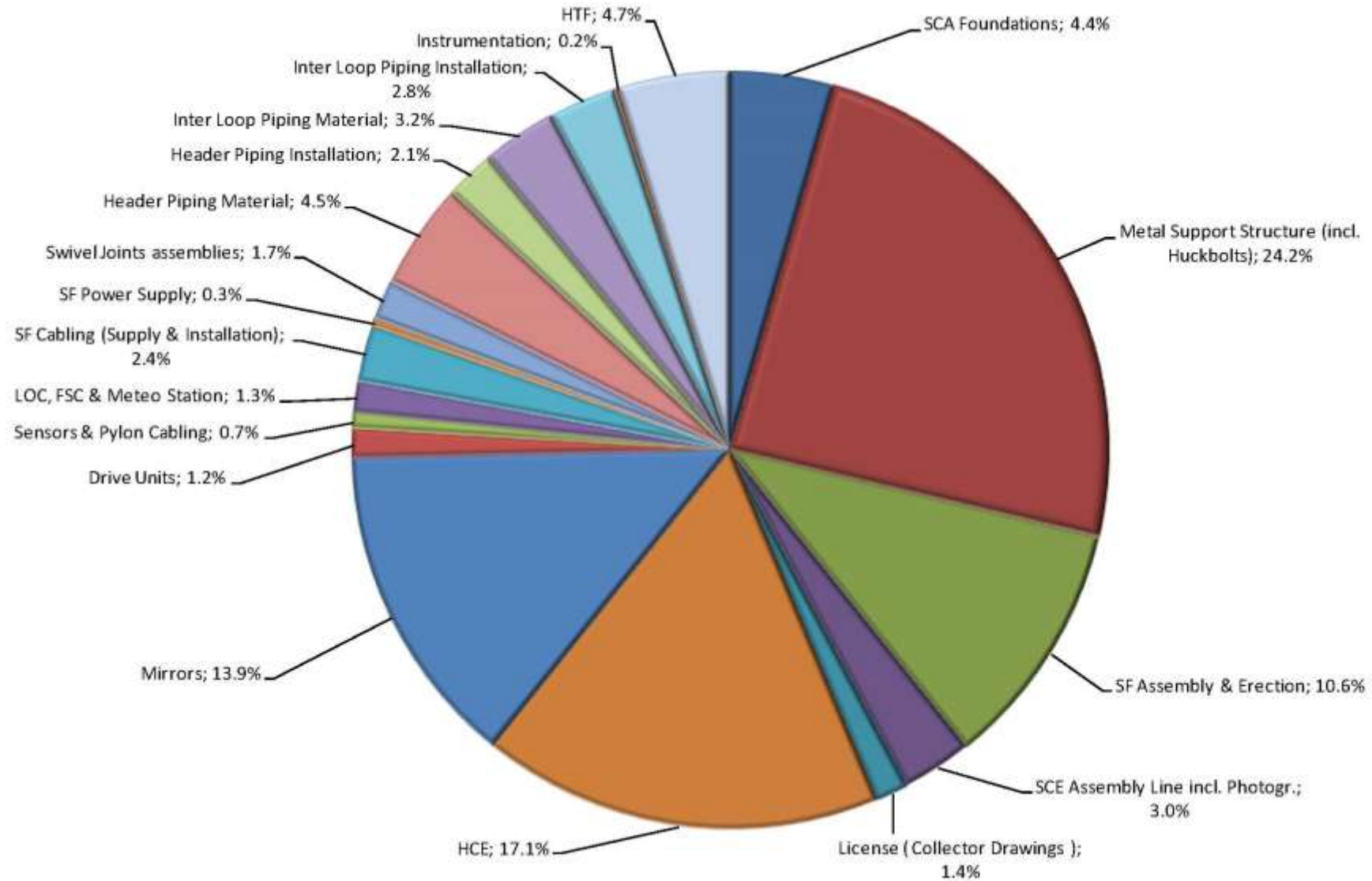
# Kollektor-Module Feldmontage



W.Schiel, SBP



# Kostenstruktur Solarfeld



W.Schiel, SBP





# Montage HelioTrough



W.Schiel, SBP



# Transport HelioTrough



W.Schiel, SBP



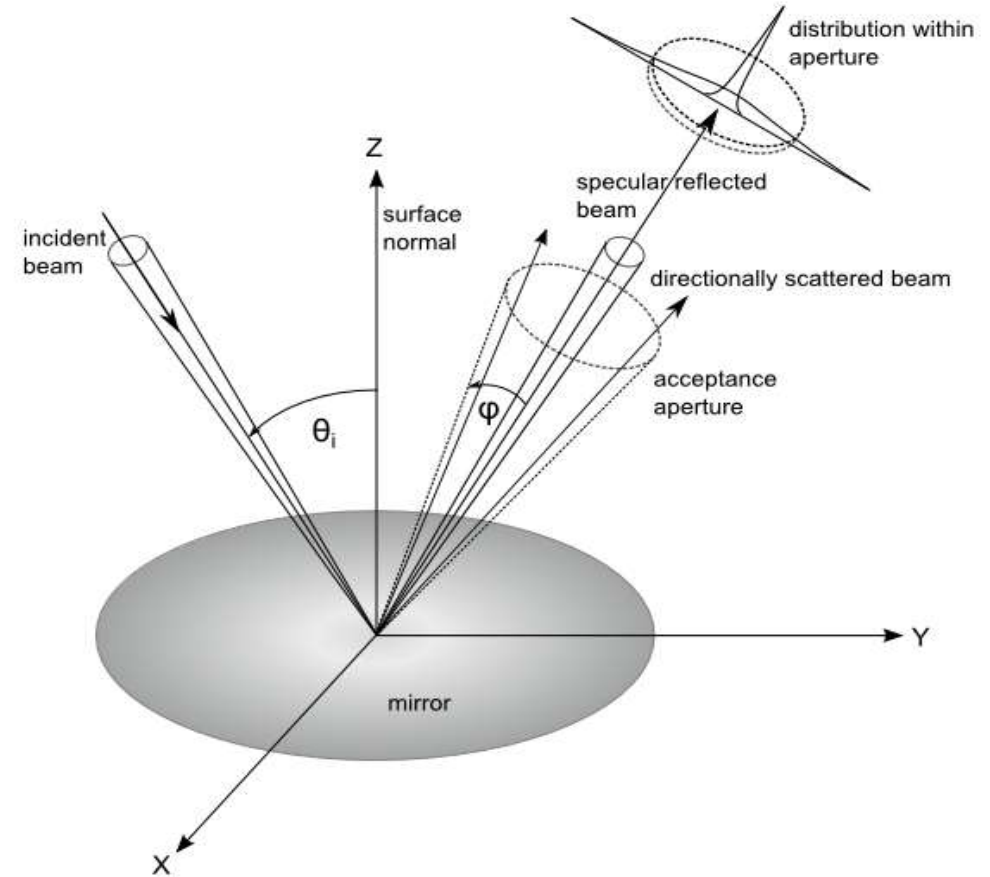
# Spiegel konzentrieren die Sonnenstrahlen





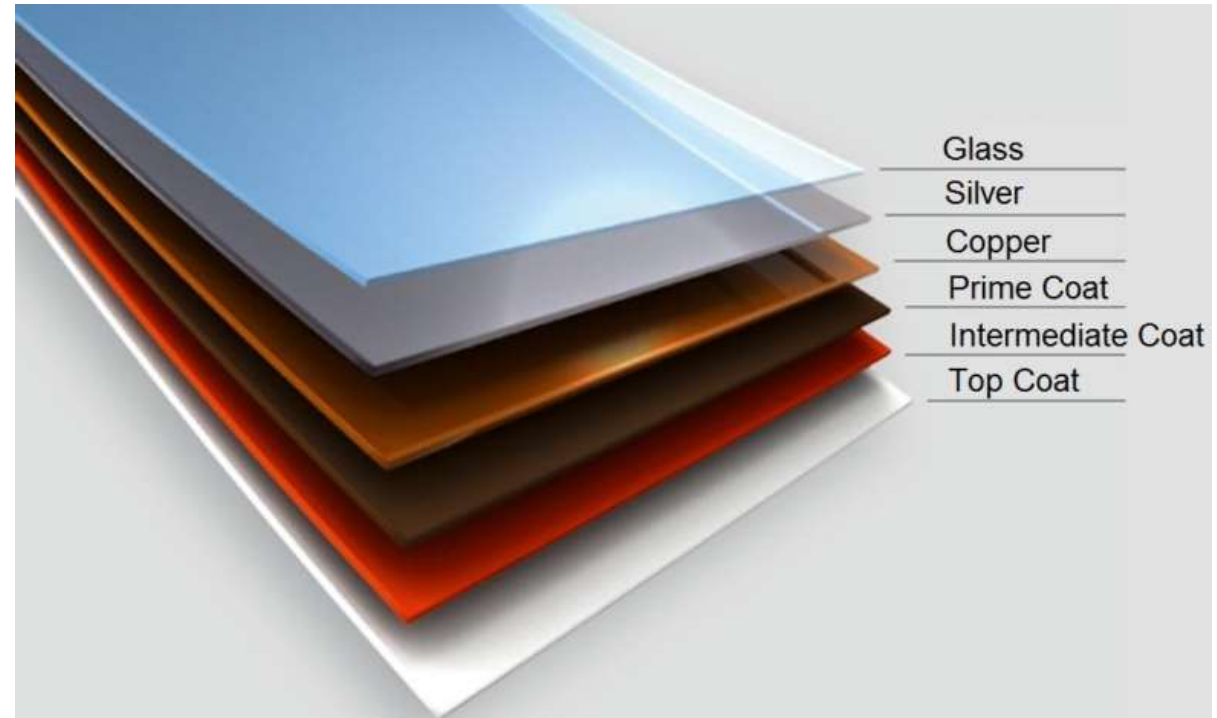
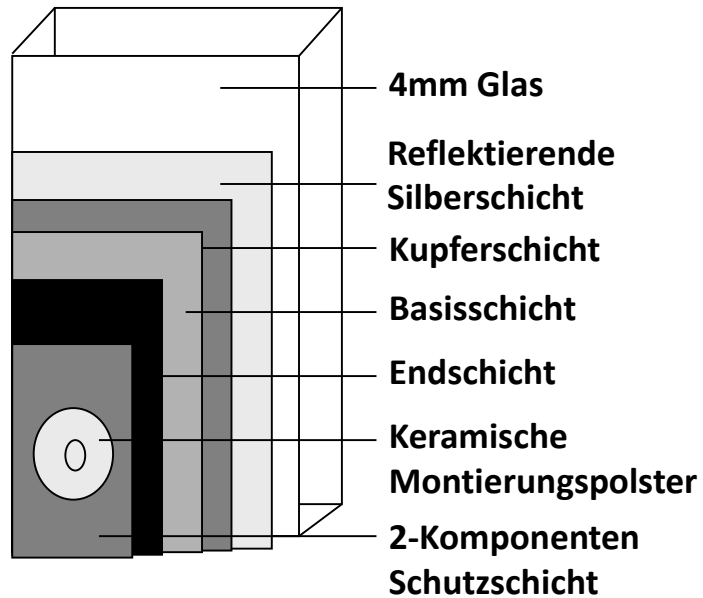
# Gerichtete Reflexion an Spiegeln

- Eisenfrei, hoher Transmissionsgrad
- Gesamt-Reflexionsgrad = 0,93 - 0,94
- Toleranz zu idealer Parabelform: 1 mm



# Aufbau der Glas-Spiegel

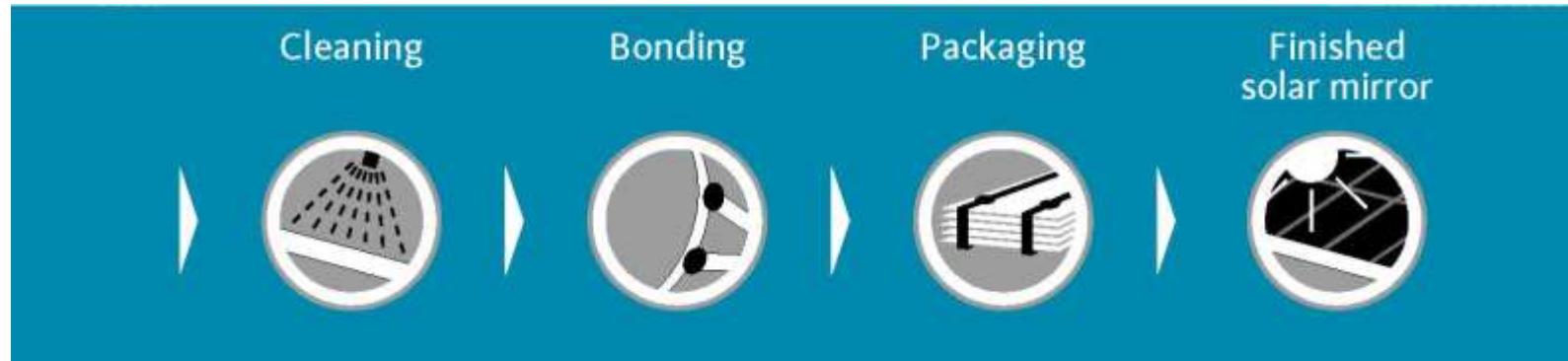
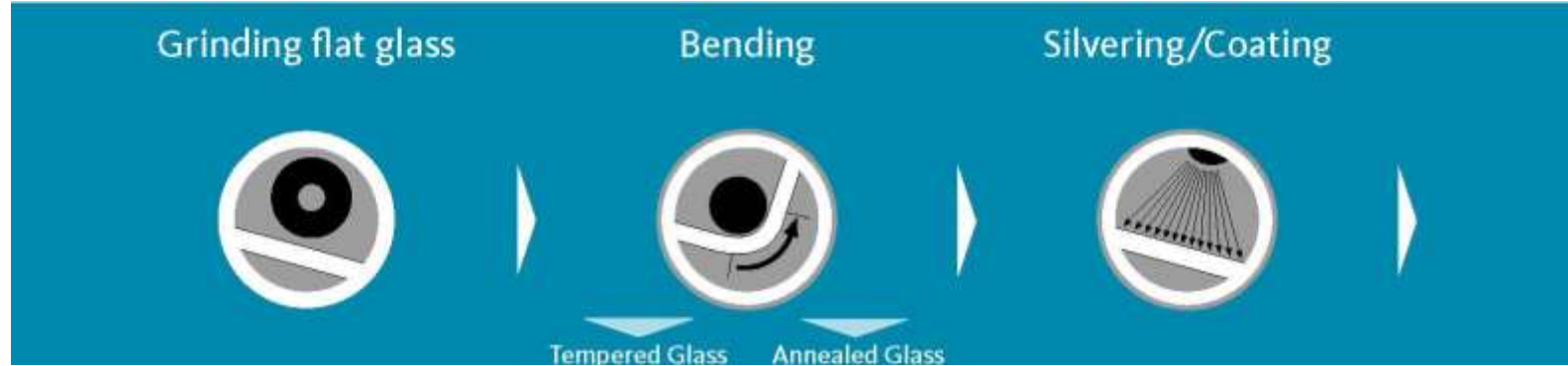
## Aufbau Spiegel



Flabeg



# Herstellung Solarspiegel

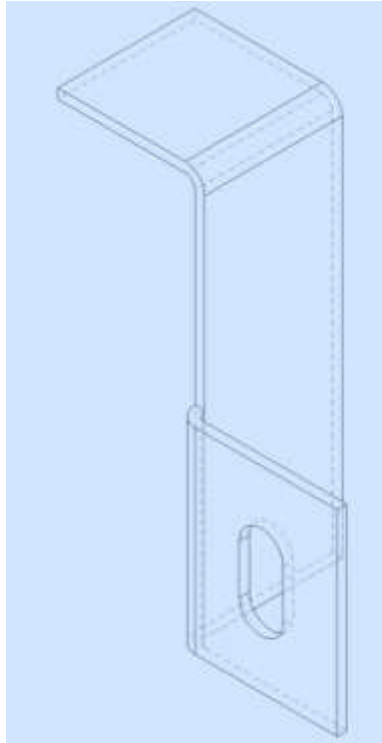


Flabeg

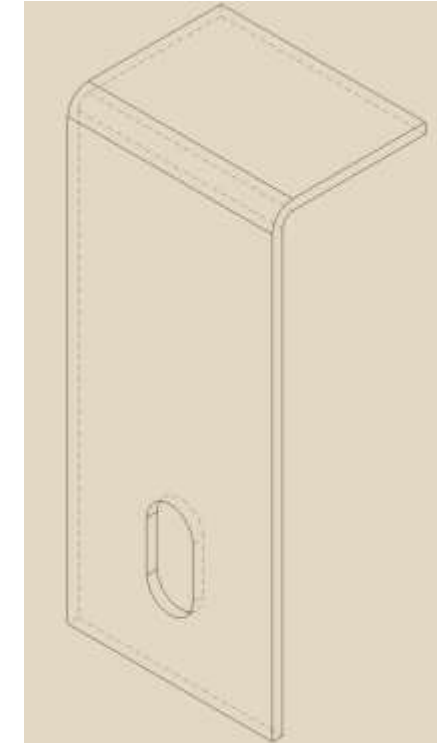
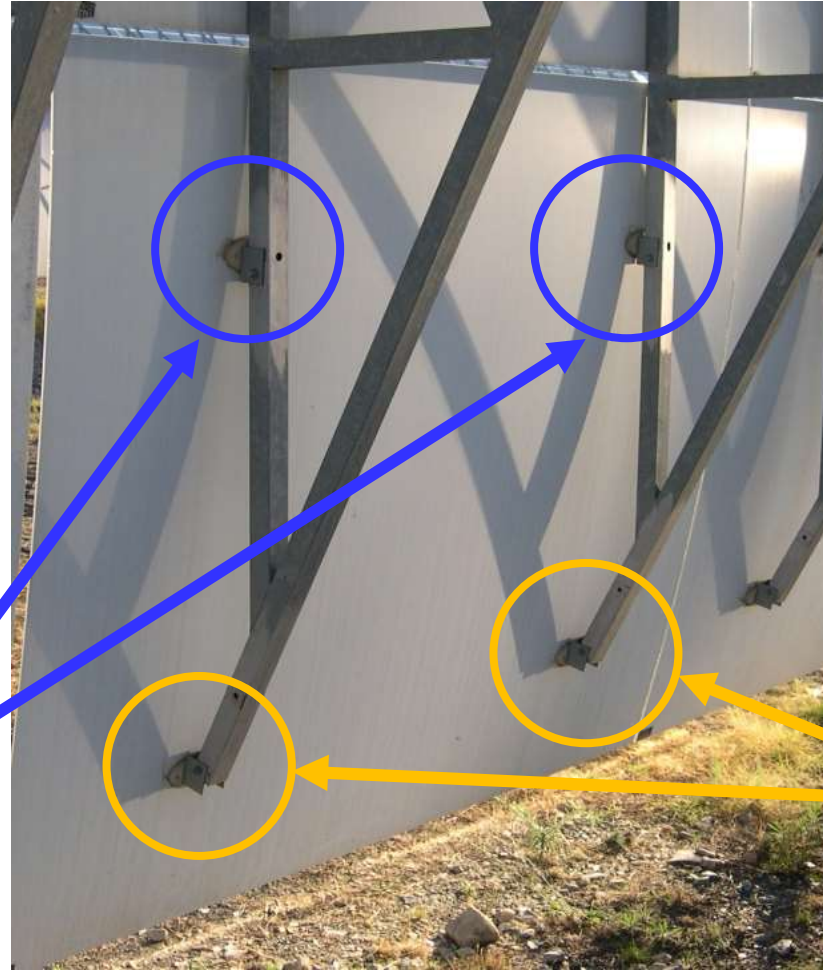




# Spiegelaufhängung (EuroTrough)



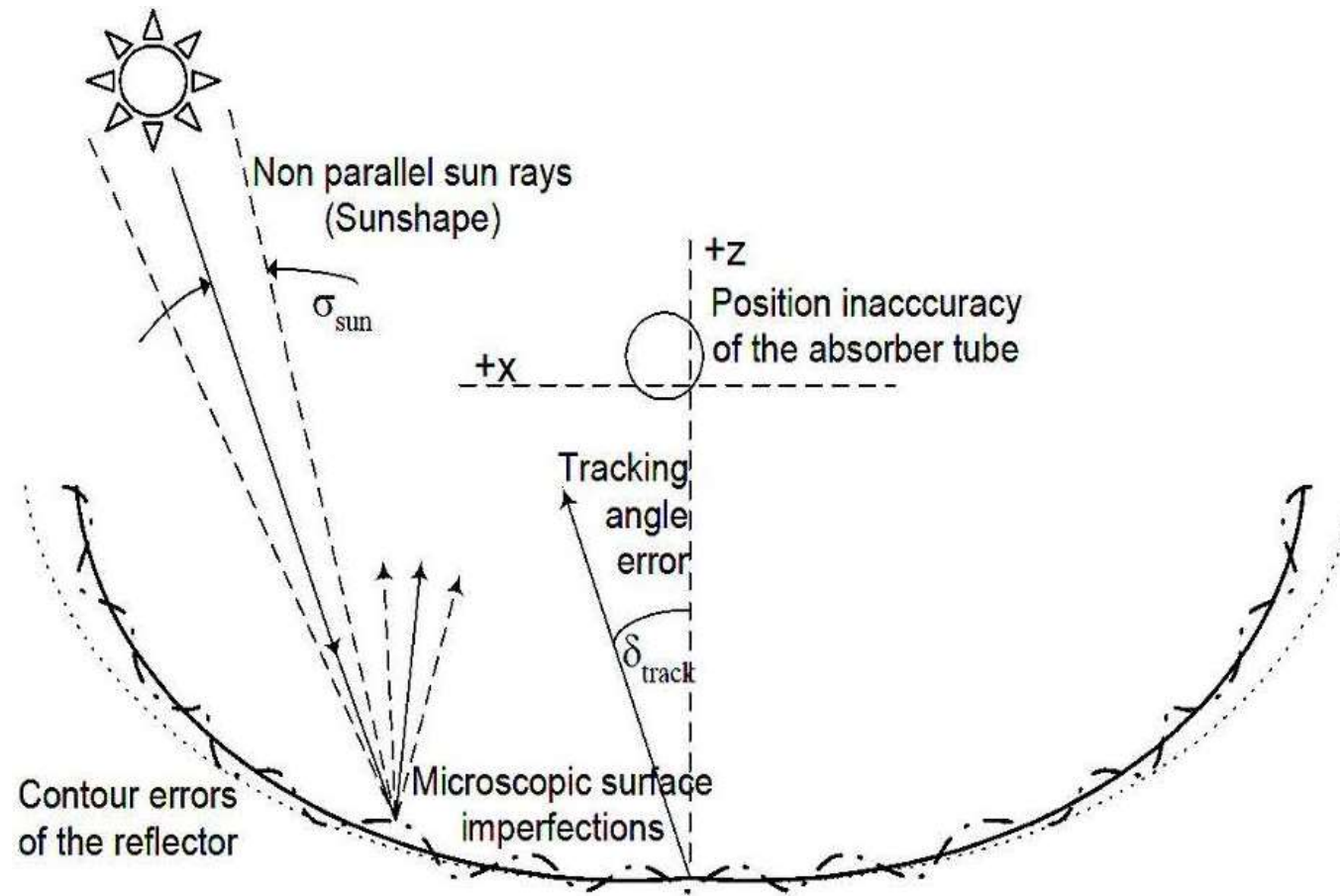
Z-Klammern



L-Klammern



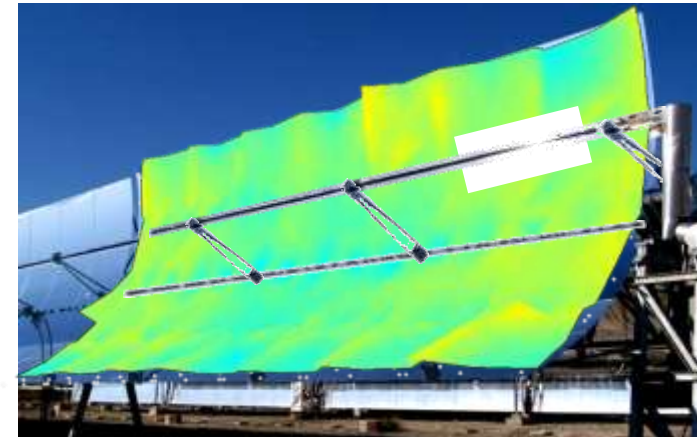
# Optische Verlustmechanismen



- Abweichung von idealer Parabel in x, y, z und Slope Deviation als Schlüsselkriterien
- +1 % in optischer Performance equivalent zu +700 000 € pro Jahr (Andasol 50 MW, Spanien)

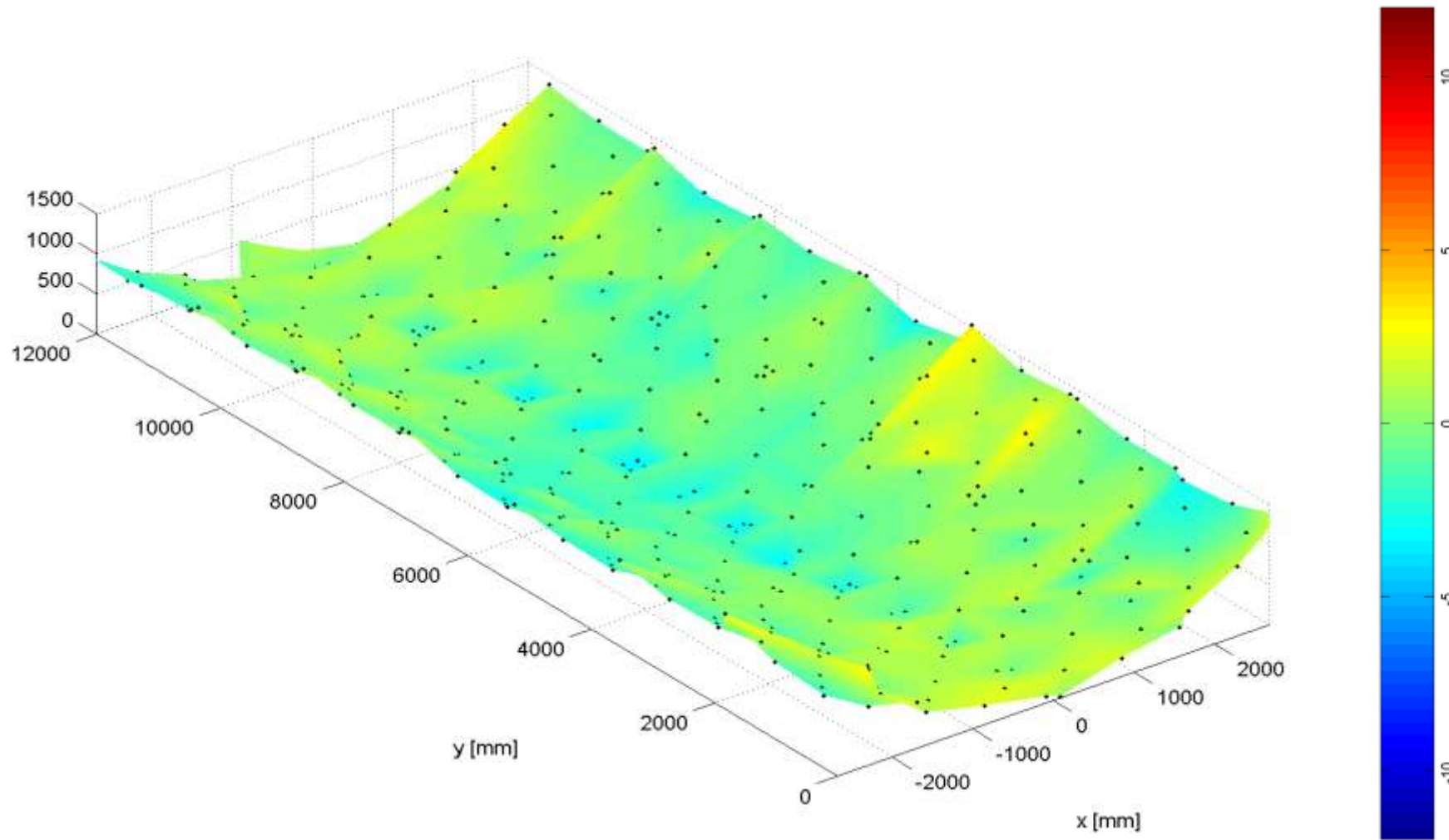


# Fotogrammetrie am Kollektor





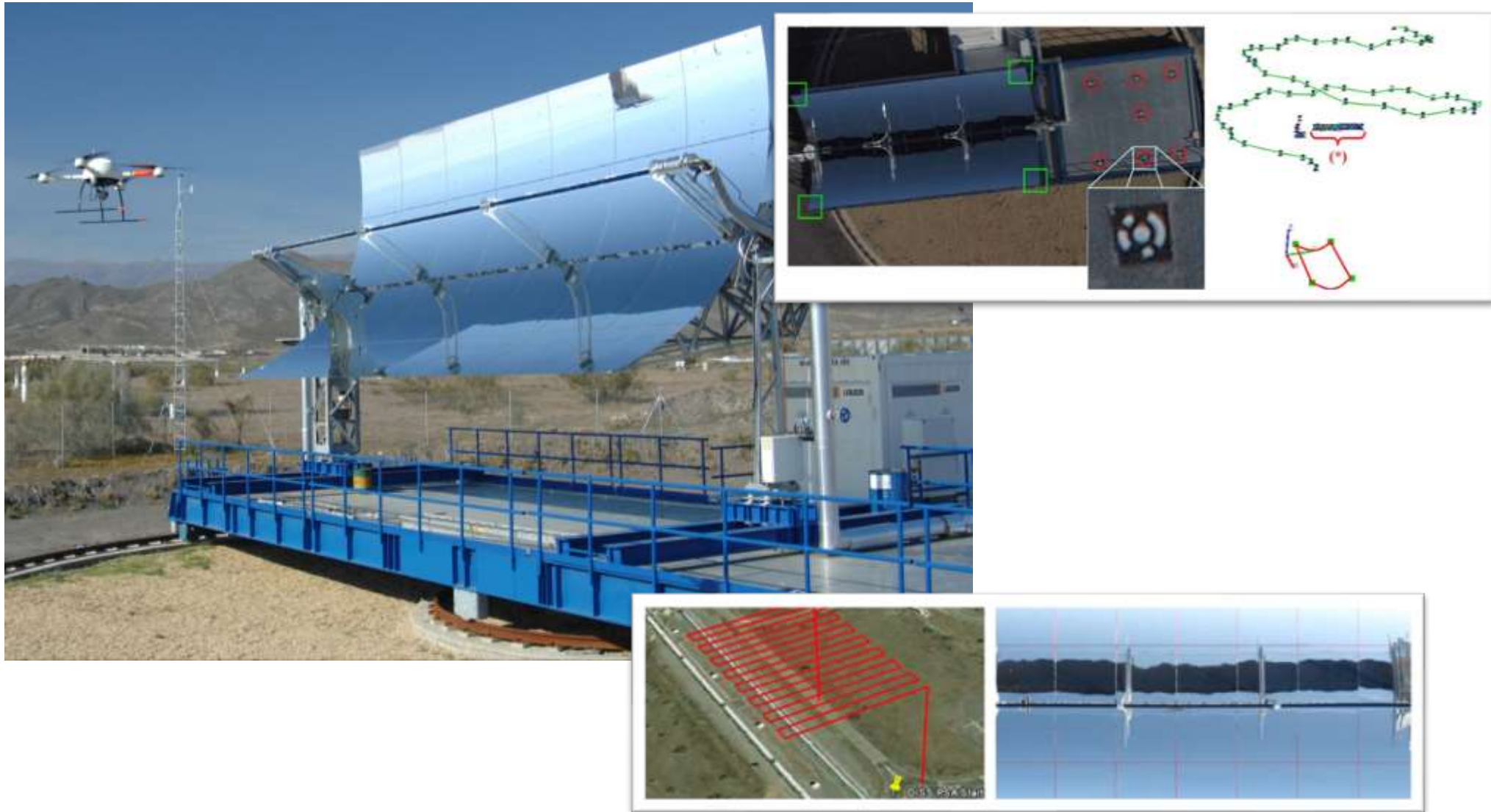
# Kollektorqualifizierung mit Spiegeln



# TARMES Absorber Tube Reflection



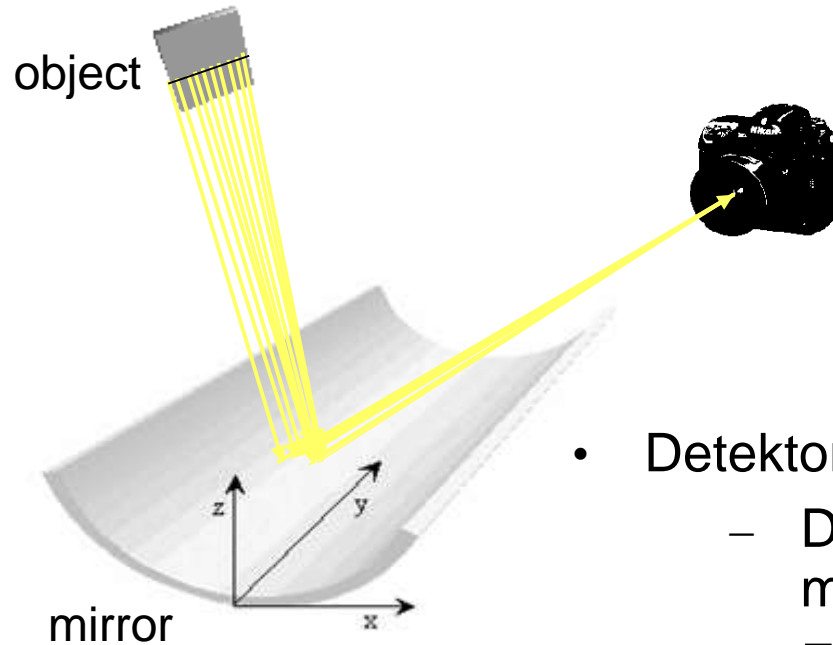
# QFly





# QDec Deflektometrie

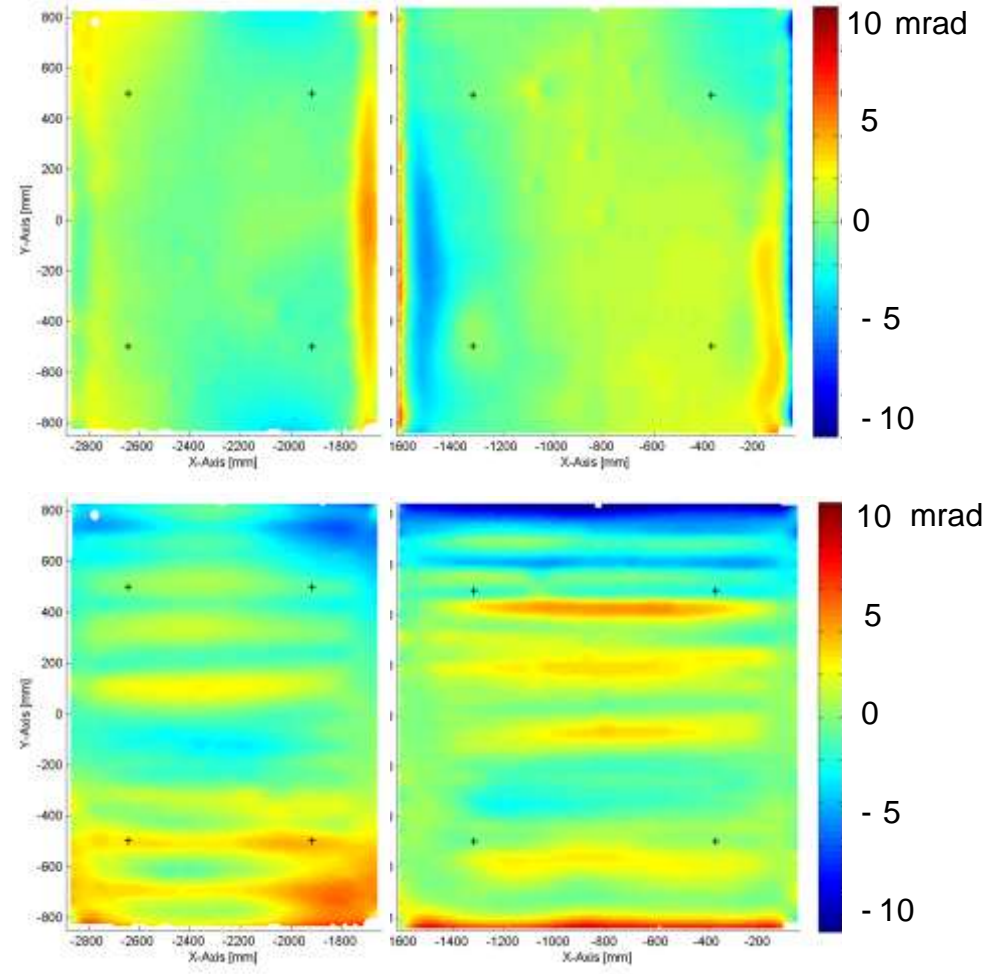
- Bilderkennung eines Zielobjekts im Reflektor
- Messung der Koordinaten vieler Punkten zugleich  
→ Sinusoidale Linienmuster statt Punkte für höhere Geschwindigkeit



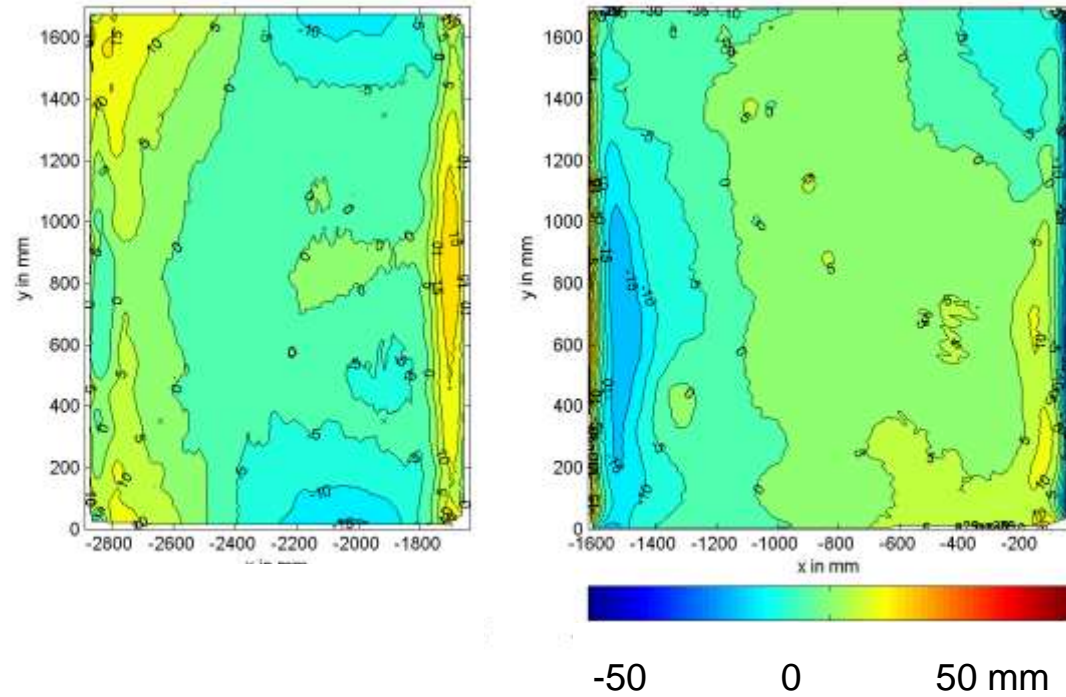
- Detektor:
  - Digitalkamera (DSLR, Industrielkameras) mit hoher Auflösung
  - Fotos als Auswertematerial



# Slope Deviation RP3



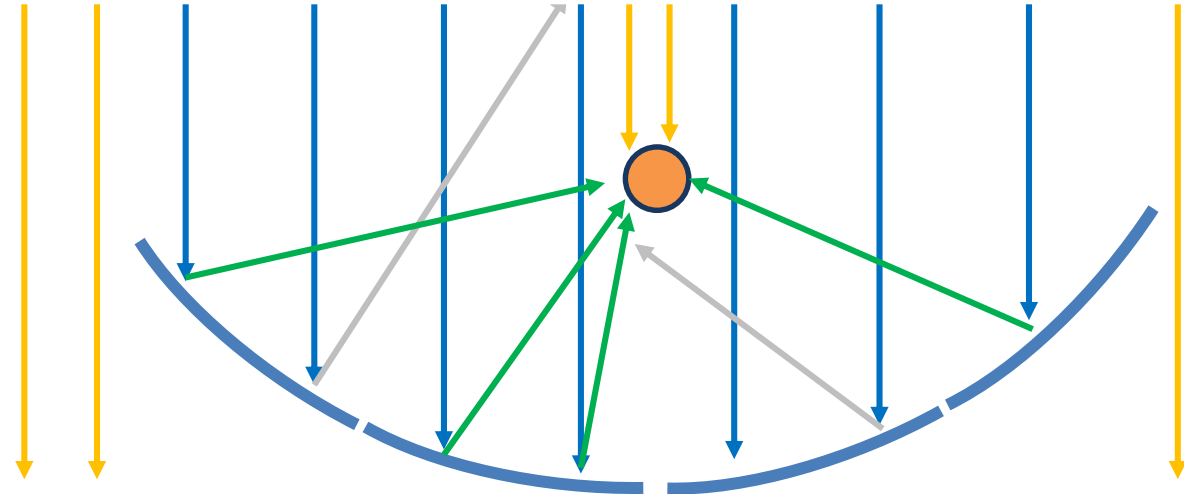
# Focus Deviation RP3 (berechnet)





# Intercept-Faktor

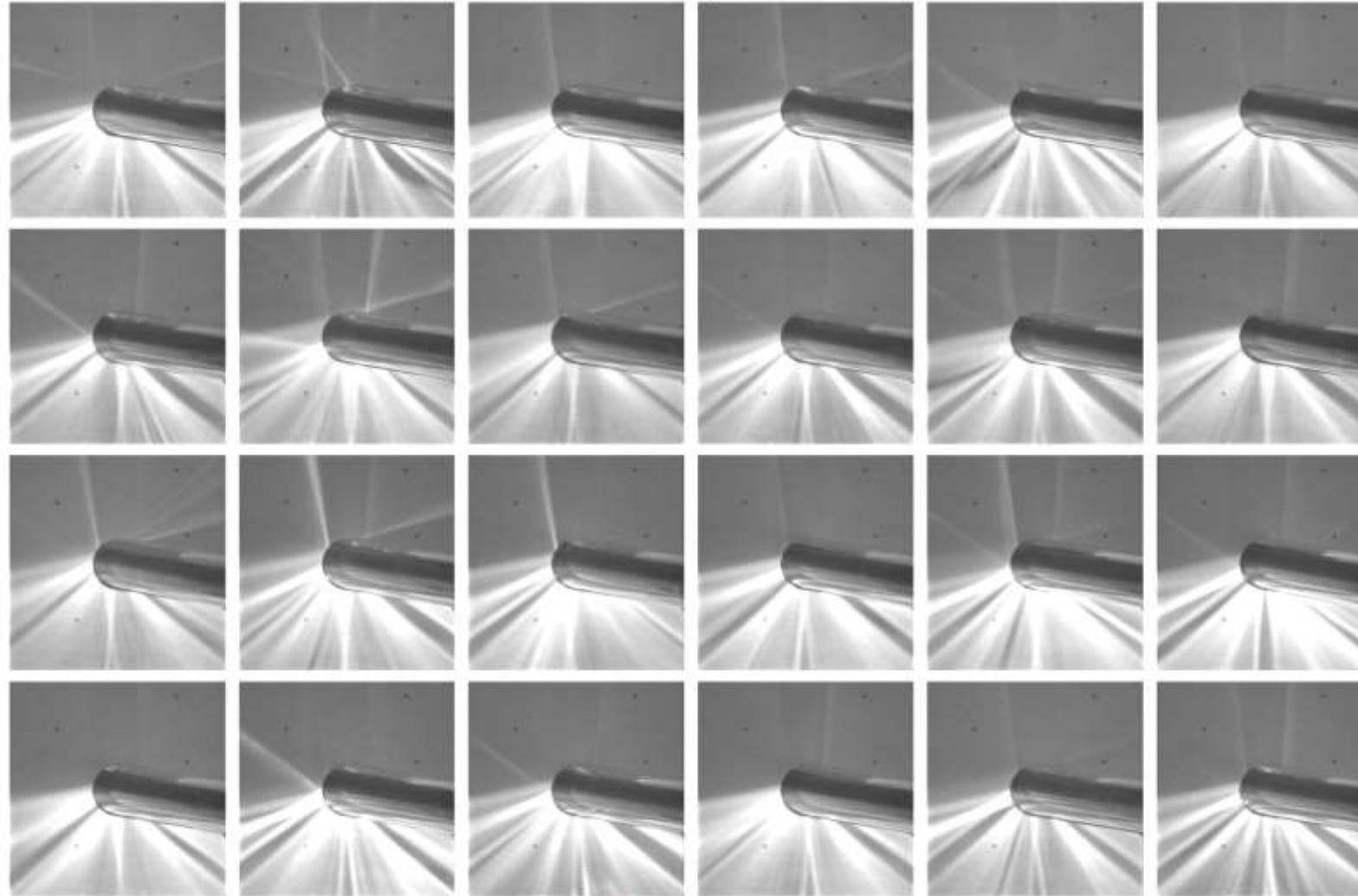
Verhältnis der vom Reflektor reflektierten und auf den Absorber treffenden Strahlen zur insgesamt vom Reflektor reflektierten Strahlen



$$\text{Interceptfaktor } \gamma = \frac{\text{Reflektierte \& Absorbierte Strahlung}}{\text{Gesamtreflektierte Strahlung}}$$



# Intercept-Messung Eurotrough



Reihenfolge von Nord nach Süd



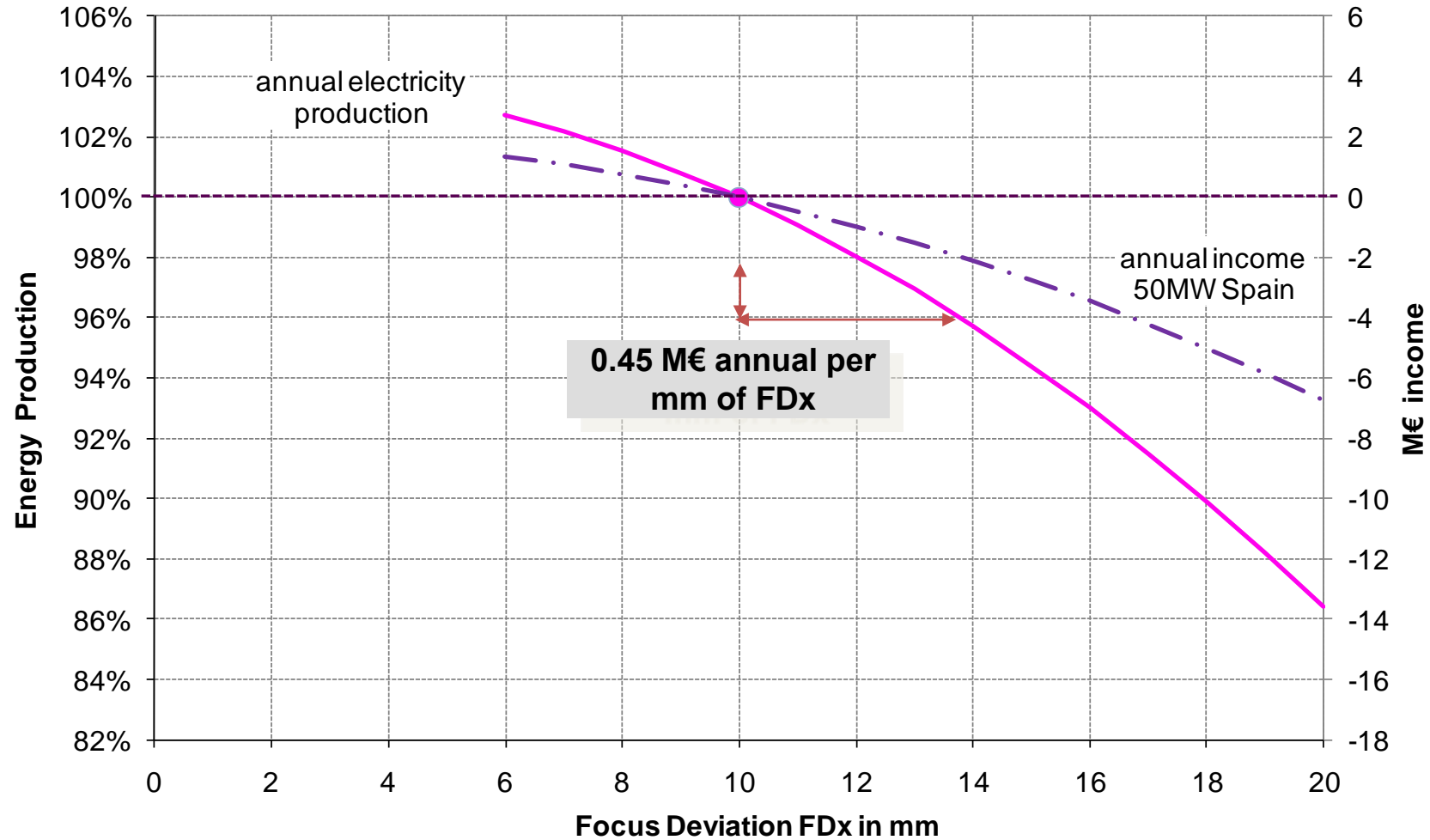
# Anforderungen Solarspiegel

- Solargewichteter Reflexionsgrad:  
88-96%  
Glasspiegel: 94-95%
- Formgenauigkeit (SD):  
2-3 mrad  
Glasspiegel: FDx 8-10 mm, 7 mm (10% von Absorber Durchmesser)
- Haltbarkeit:  
25 Jahre in Kalifornien ohne Degradation





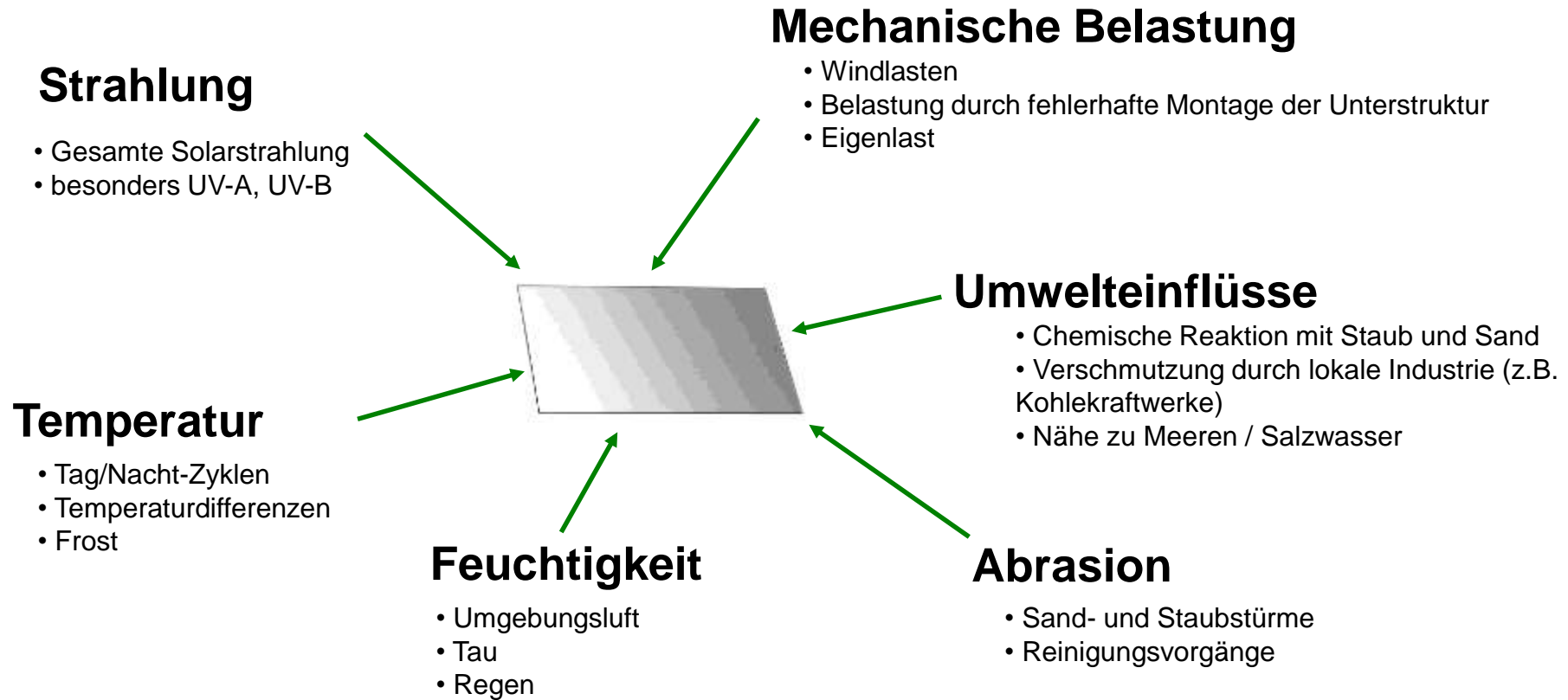
# Einfluss Spiegelqualität auf Erträge



# Maintenance: Spiegel

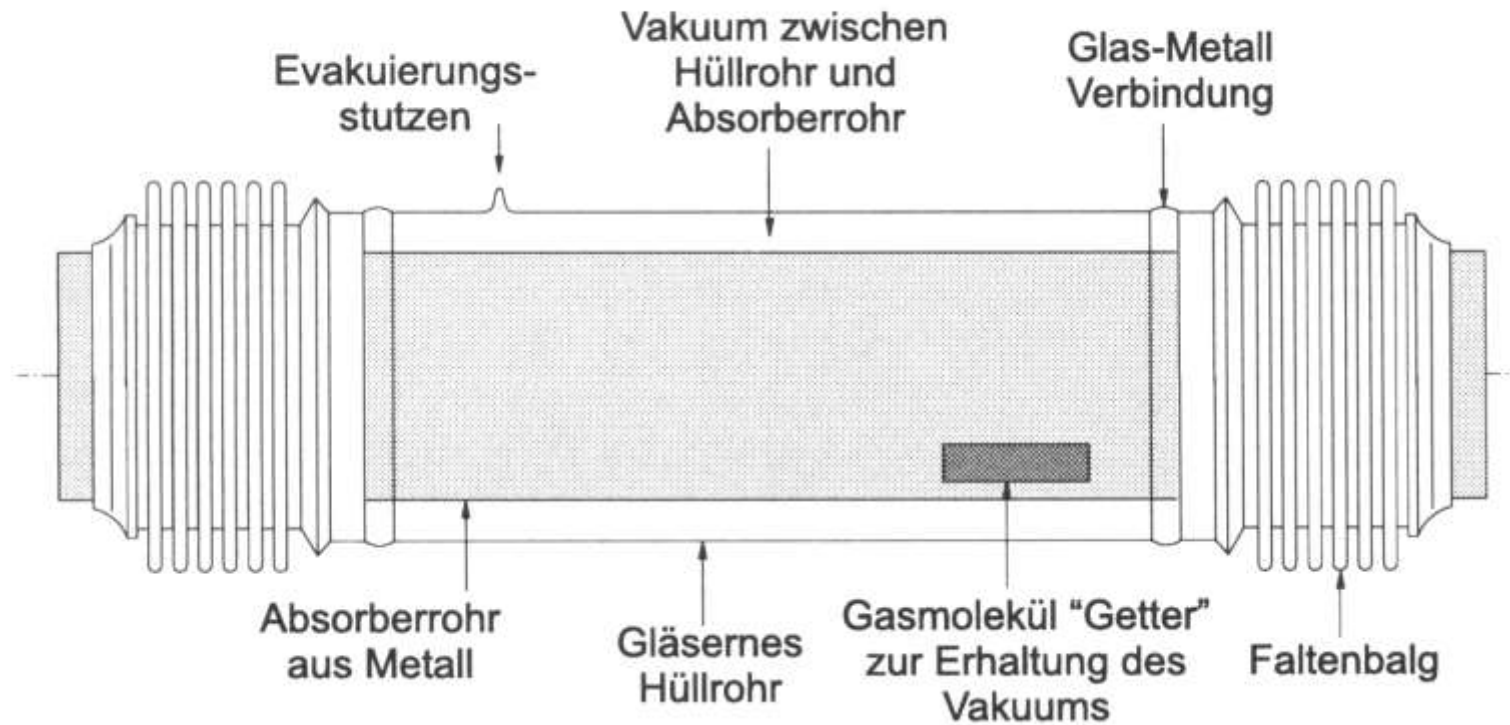


# Einflüsse auf Spiegel





# Schema eines Receivers für Parabolrinnen-Kollektoren



## Verschiedene Receiver-Bauarten



### SCHOTT PTR®70 Gen3

- Innenliegenden Faltenbalg für hohe effektive Absorberlänge: 96,7%
- Edelgaskapsel für nachträgliche Flutung des Vakuums
- Betriebstemperaturen bis zu 450°C

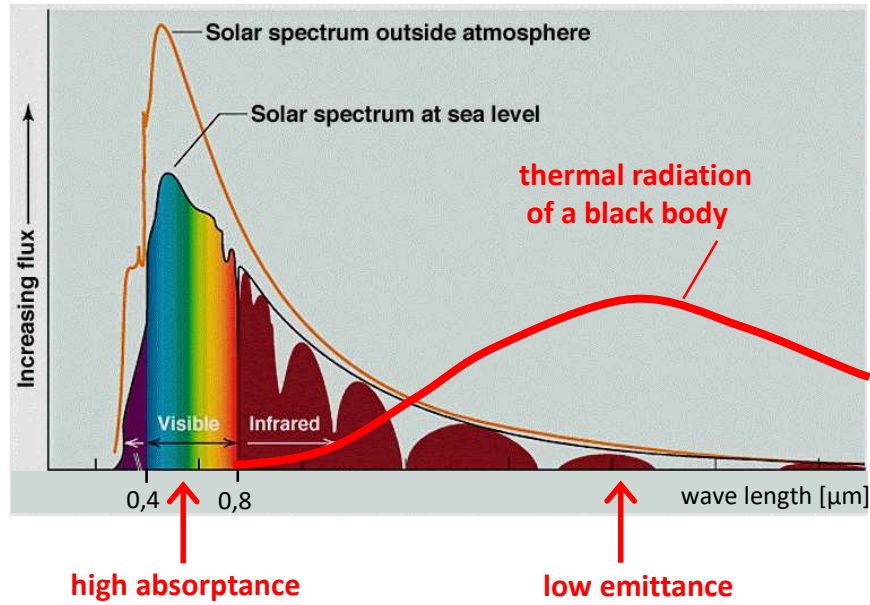


### Siemens UVAC 6G

- Außenliegender Faltenbalg
- Gettermaterial

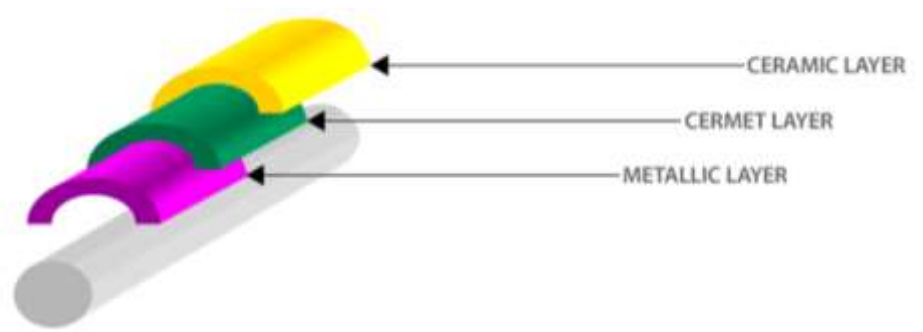


# Selektive Beschichtung



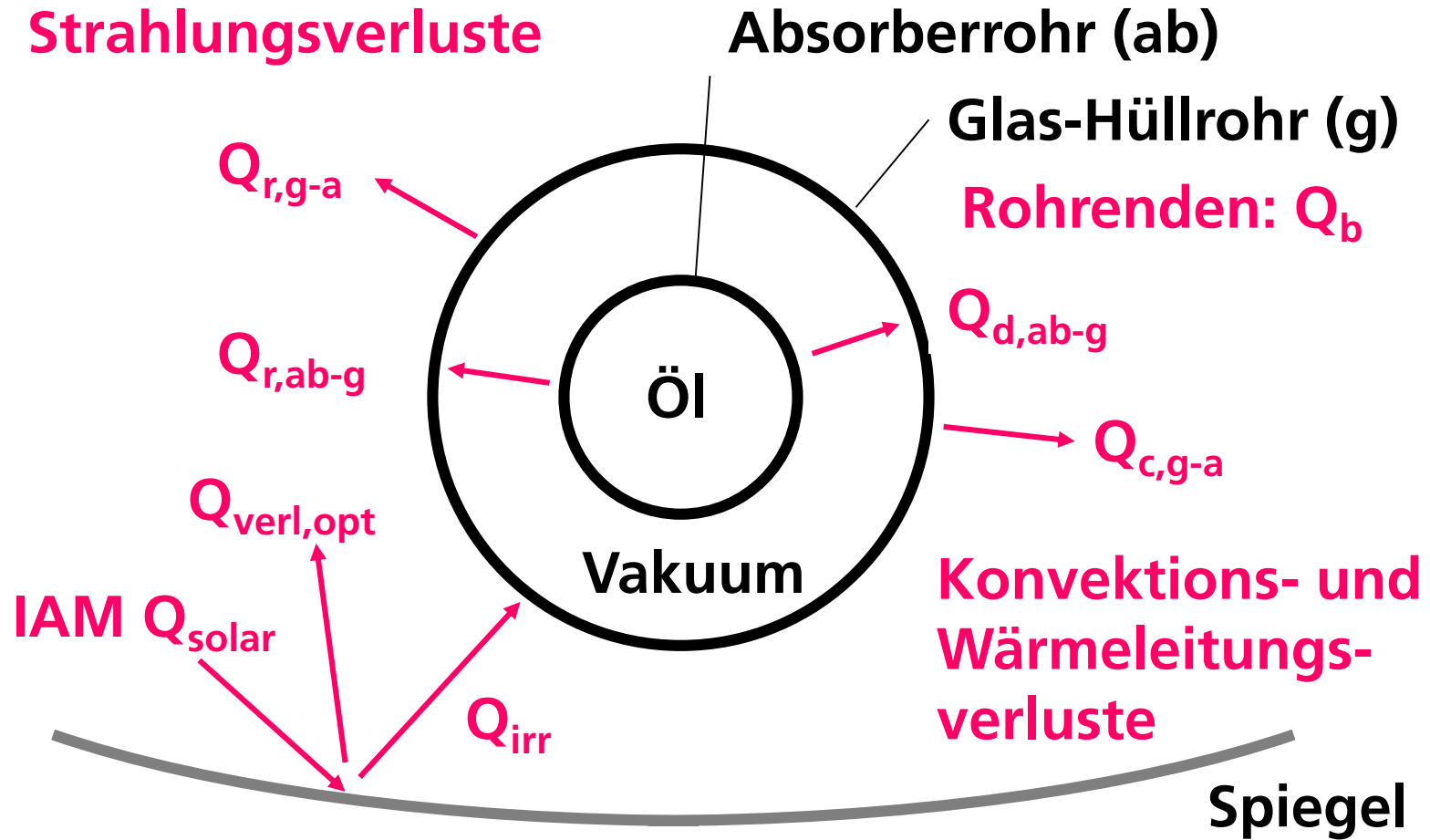
Typische optische Eigenschaften der Absorberoberfläche

- Absorptionskoeffizient bei 350°C = 0,95
- Emissionskoeffizient bei 350°C = 0,10
- Transmissionskoeffizient = 0,96

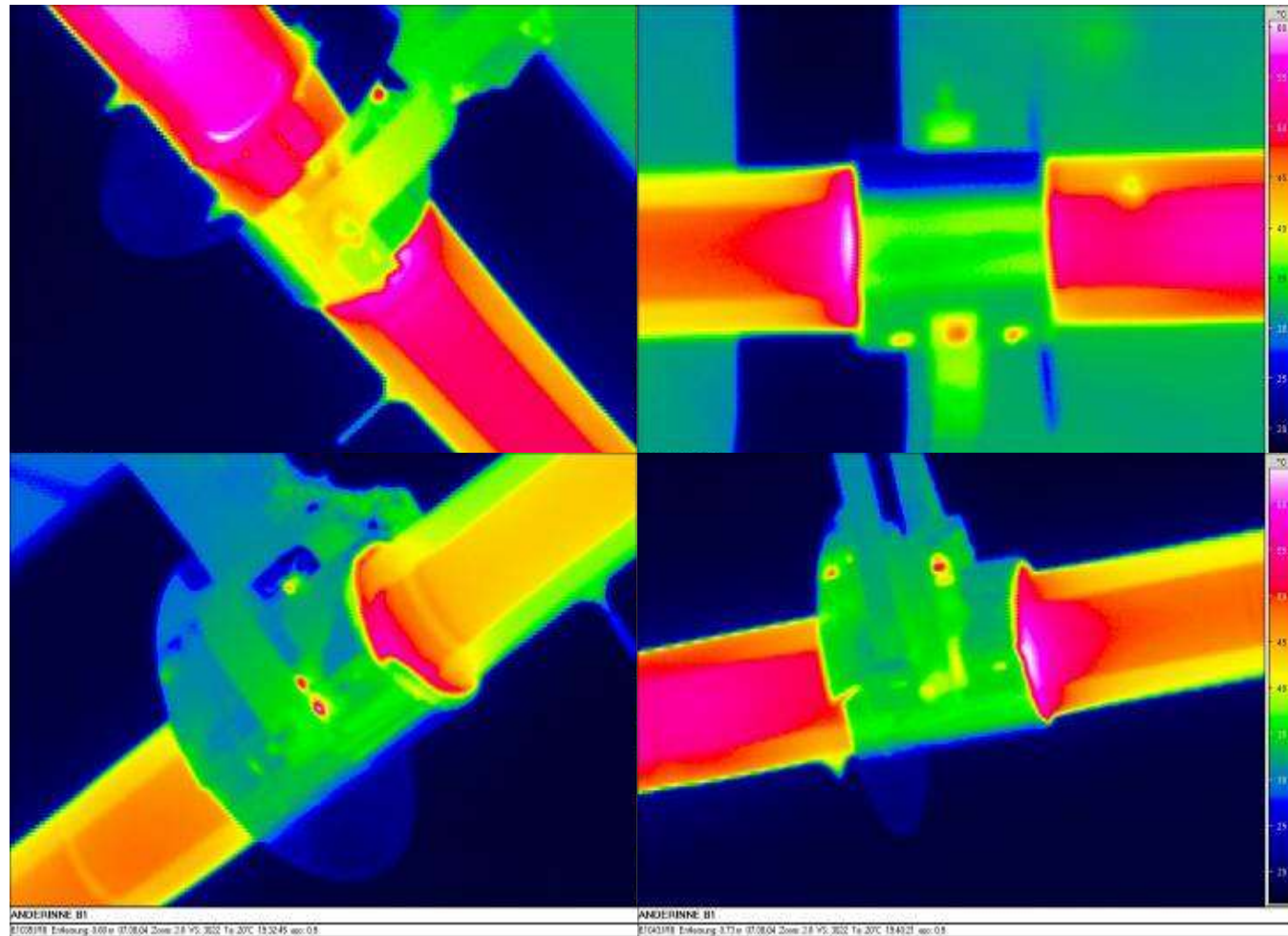




# Thermische Verluste am Receiver



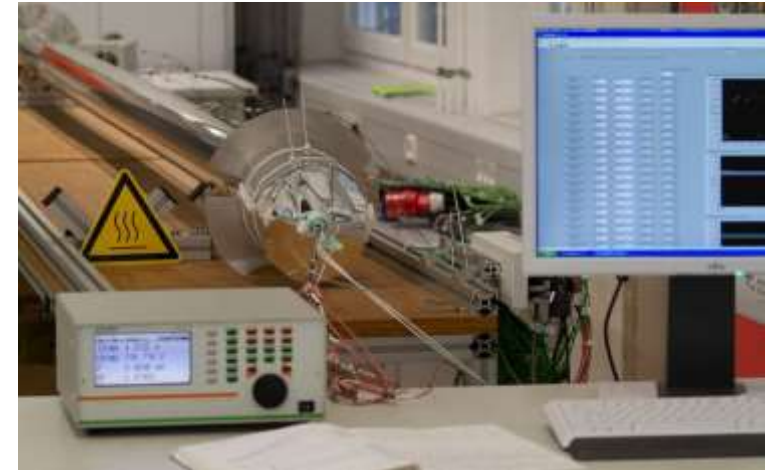
# Thermische Verluste an den Halterungen



## Qualifizierung: Thermischer Wirkungsgrad

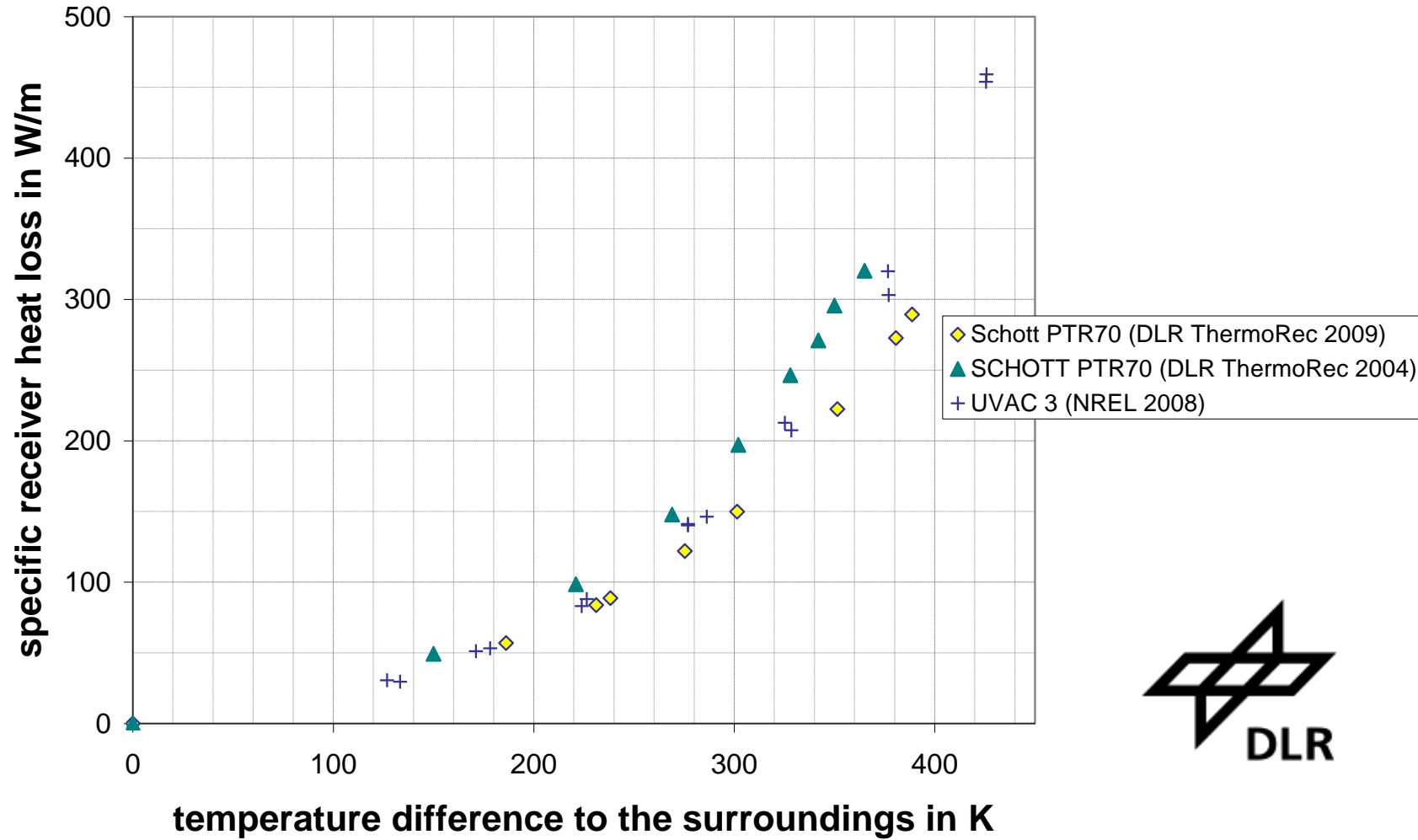
Thermorec: Thermal Loss Measurement Test Bench – QUARZ Center (DLR)

- Heizkapsel im Absorber wird auf bestimmte Temp. elektrisch geheizt
- Kalorimetrische Energiebilanz
  - Rein: Elektrische Leistung
  - Raus: Bekannte Endverluste (ca. 4%)
  - Raus: Verlust durch Abstrahlung
- Mit anderen Worten: Wie viel el. Leistung wird benötigt, um eine gewisse Temperatur zu halten
- Messunsicherheit:  $\Delta T \sim \pm 5 \text{ K}$ ;  $\Delta P/I < 1\%$





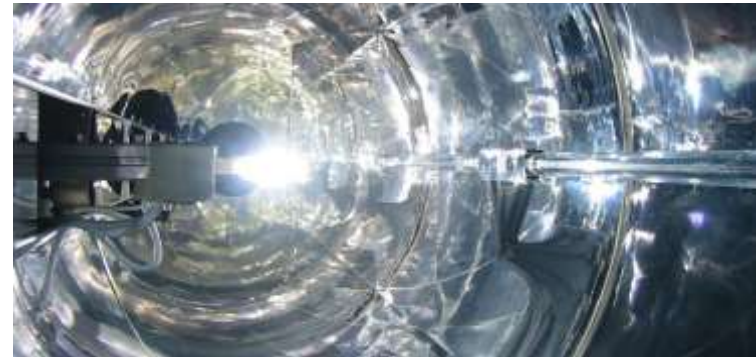
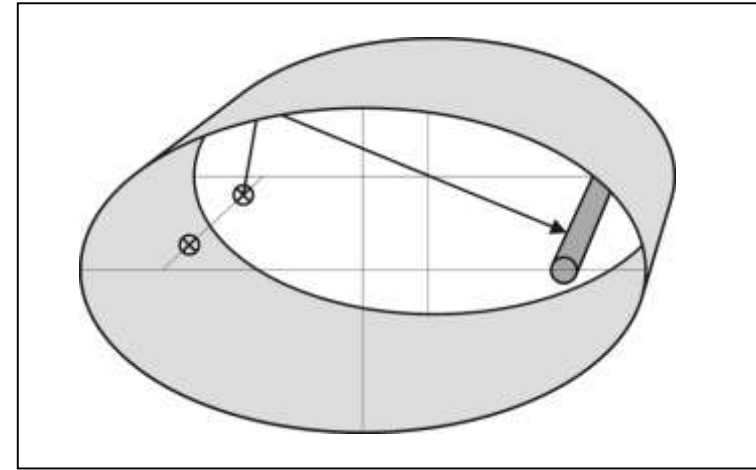
# Qualifizierung: Thermischer Wirkungsgrad



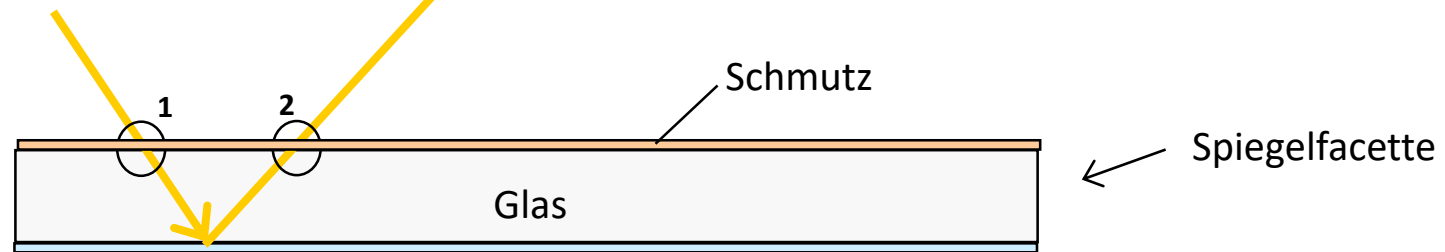
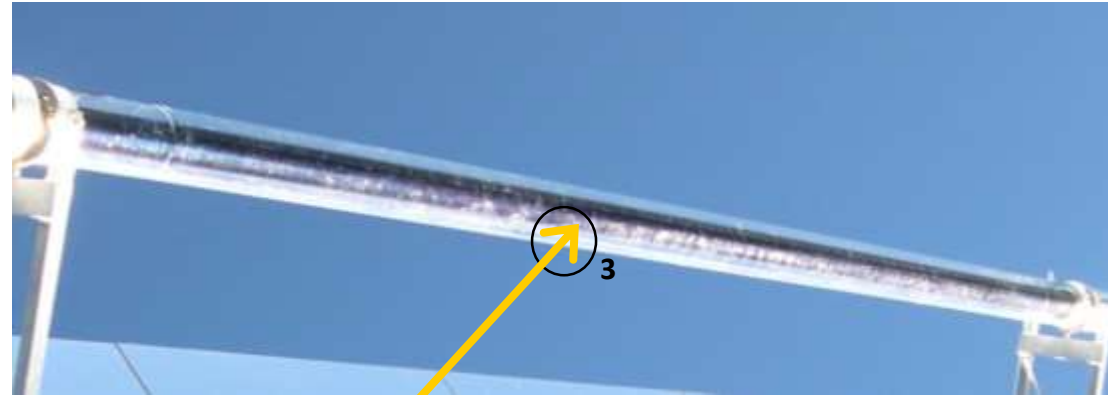
# Qualifizierung: Optischer Wirkungsgrad

ElliRec: Elliptical Solar Simulator Receiver Test Bench – QUARZ Center (DLR)

- Elliptischer Messraum: Jeder Strahl der Lampen trifft auf den Receiver
- Wasser durchströmt den Receiver
- Temperaturdifferenz wird gemessen
- Das Ergebnis der Messung ist die Abweichung zum Referenzreceiver



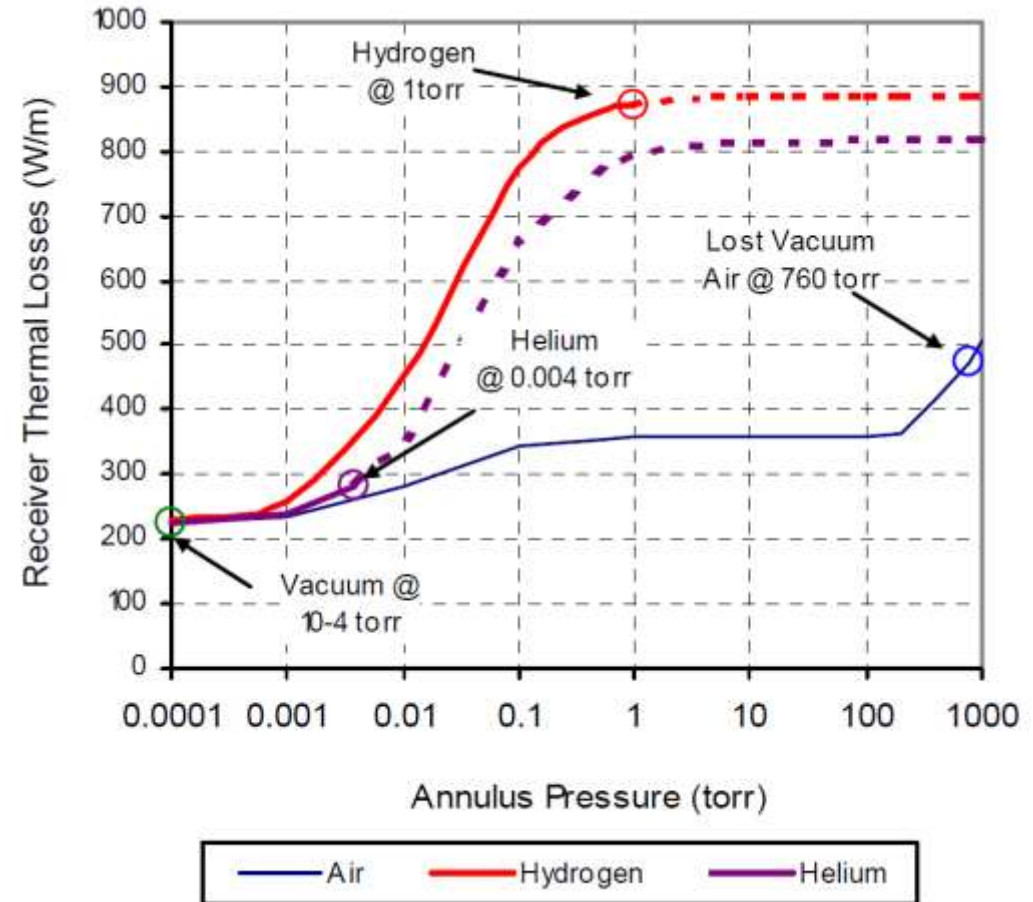
# Verschmutzung des Receivers



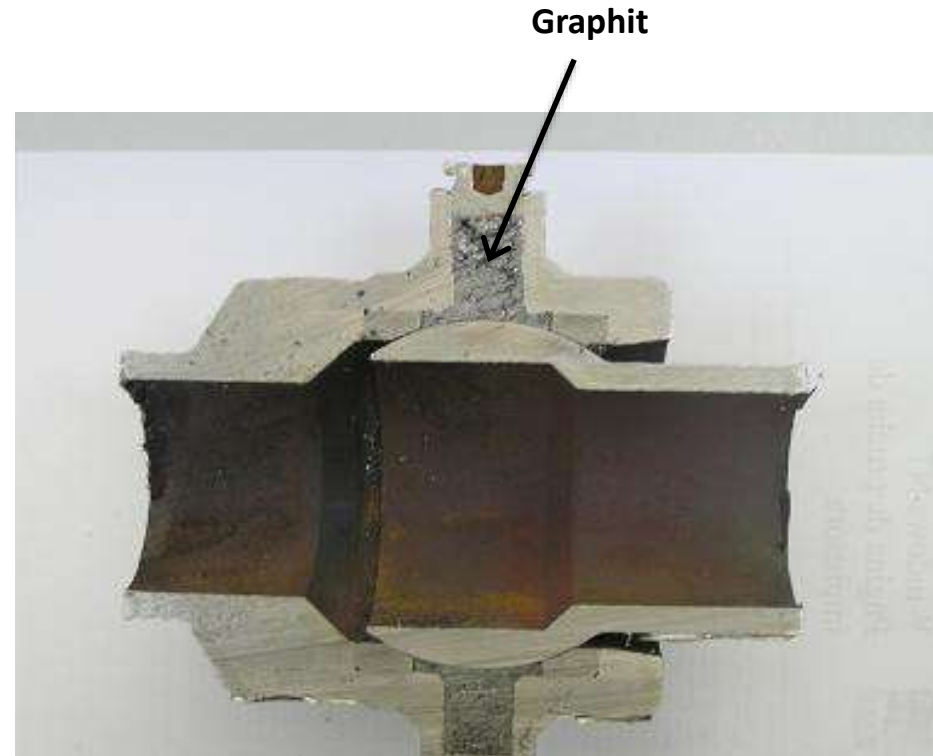


# Degradation des Receivers: Vakuum

- Problem 1: Diffusion von Wasserstoff
- Problem 2: Verlust des Vakuums z.B. am Faltenbalg



# Gelenke I: Kugelgelenke



## Gelenke II: Flexible Schläuche



Drehgelenk





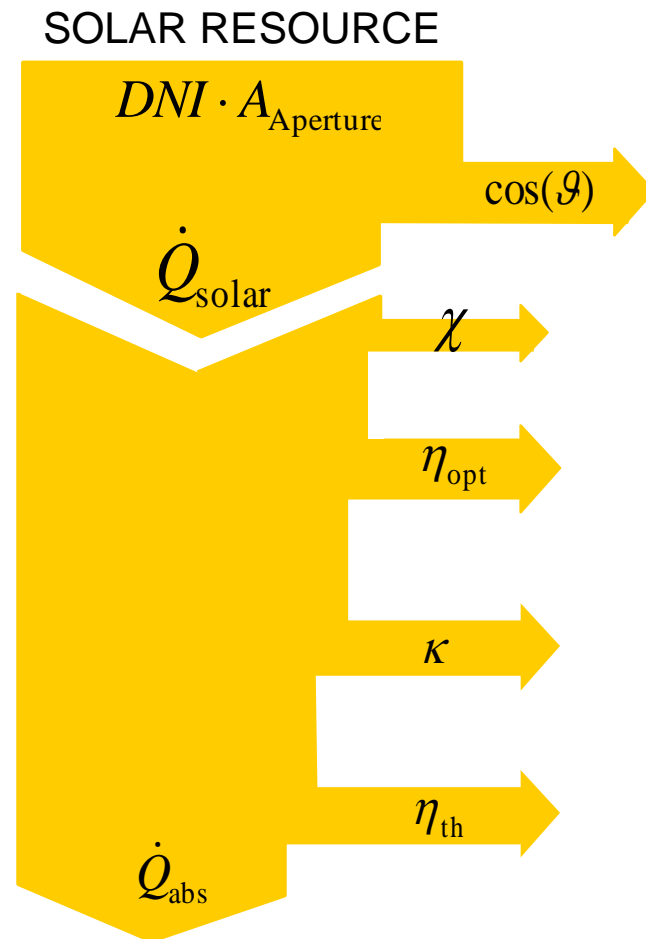
# Übersicht und Vergleich der Wärmeträger-Fluide (Heat Transfer Fluid - HTF)

HTF	Max. Temperatur	Gefrierpunkt	Vol. Wärmekapazität in kWh/m <sup>3</sup> K	Gefahrstoff	Kosten
Mineral. Öl	300°C	-5°C	0,55	Xi	Gering
Synth. Öl	400°C	12°C	0,57	Xi, N	Hoch
Silikon Öl	420°C	-40°C	0,53	-	Hoch
HTSalt	450°C	149°C	0,75	T, N, O	Mittel
Solar Salt	550°C	238°C	0,8	Xn, O	Niedrig
Natrium	850°C	98°C	0,3	F, C	Mittel
Wasserdampf	-	0°C	1,1/0,0086	-	Sehr niedrig

F: Brennbar, T: Giftig, Xn: Gesundheitsschädlich, Xi: Reizend, F: Brennbar, C: Ätzend, N: Umweltgefährlich



# Wirkungsgrad von Parabolrinnen-Kollektoren



$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\dot{Q}_{\text{abs}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \eta_{\text{opt}} \cdot \chi \cdot \kappa \cdot \eta_{\text{th}}$$

Kosinusverlust durch einachsige Nachführung

Sauberkeitsfaktor → Verluste durch verschmutzte Spiegel u. Hüllrohr

Optischer Wirkungsgrad → optische Verluste bei senkrechter Einstrahlung

Incident Angle Modifier → zusätzliche optische Verluste durch schräge Einstrahlung

Thermischer Wirkungsgrad → thermische Verluste durch hohe Betriebstemperatur

# Kollektorprüfmethode

- Enthalpieänderung des Wärmeträgermediums

$$\dot{Q}_{coll} = \dot{m}_{HTF} \cdot \int_{T_{in}}^{T_{out}} c_p(T) dT$$

- Einfallende Solarstrahlung

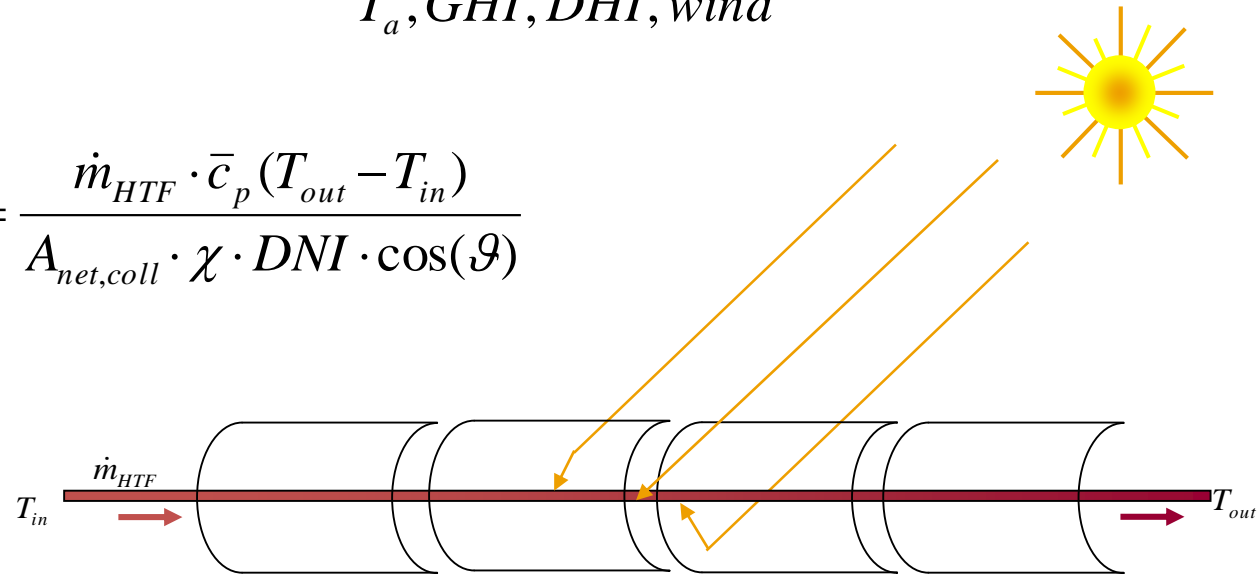
$$\dot{Q}_{solar} = A_{net,coll} \cdot DNI \cdot \cos \vartheta$$

- Umgebungsbedingungen

$$T_a, GHI, DHI, wind$$

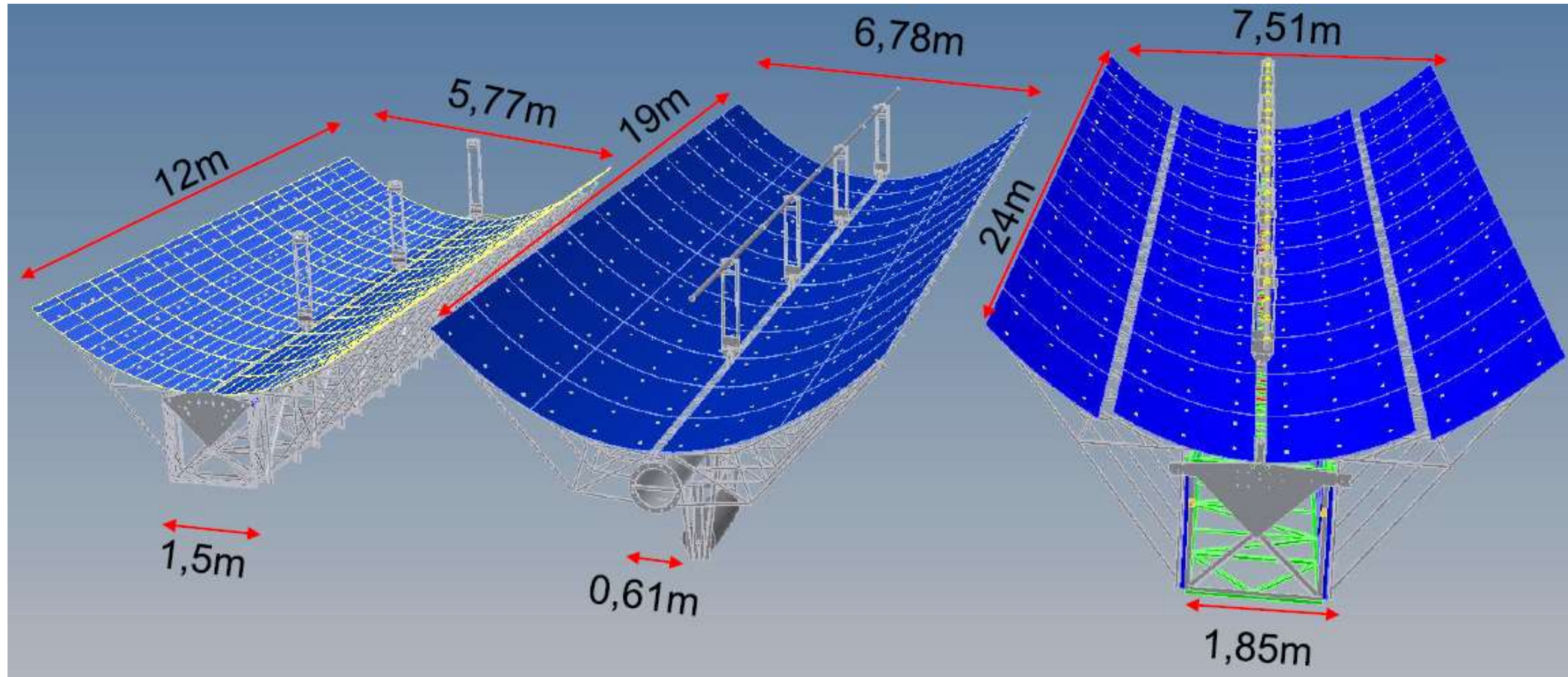
$$\rightarrow \eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{coll}}{\dot{Q}_{solar} \cdot \chi} = \frac{\dot{m}_{HTF} \cdot \bar{c}_p (T_{out} - T_{in})}{A_{net,coll} \cdot \chi \cdot DNI \cdot \cos(\vartheta)}$$

$\chi$ : Sauberkeitsfaktor des Reflektors





# Kollektortypen



Kollektor:	Eurotrough	HelioTrough	UltimateTrough
Kollektorlänge:	150m	190m	242m
Aperturfläche:	865m <sup>2</sup>	1288m <sup>2</sup>	1802m <sup>2</sup>

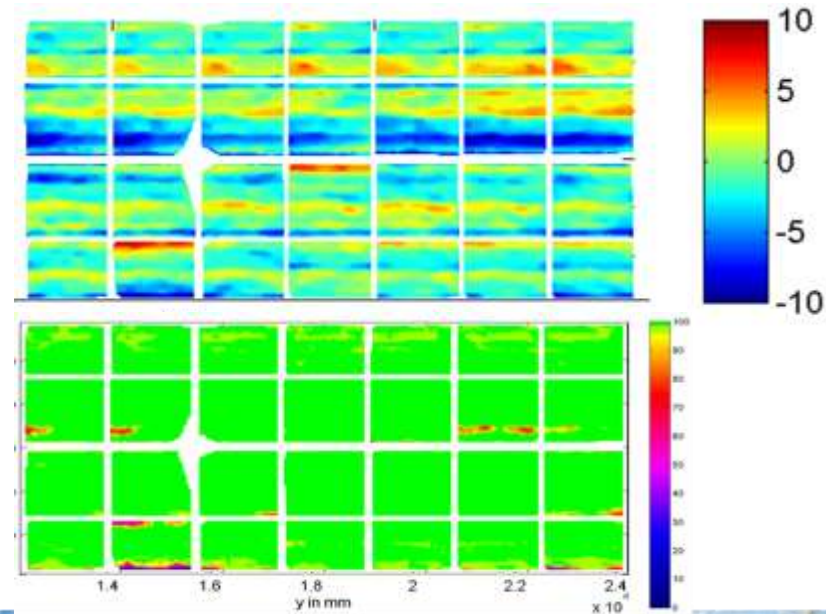


# Trough Modules Shape Measurement in Field with Deflectometry



Slope Deviation in mrad

Local Intercept Factor in %





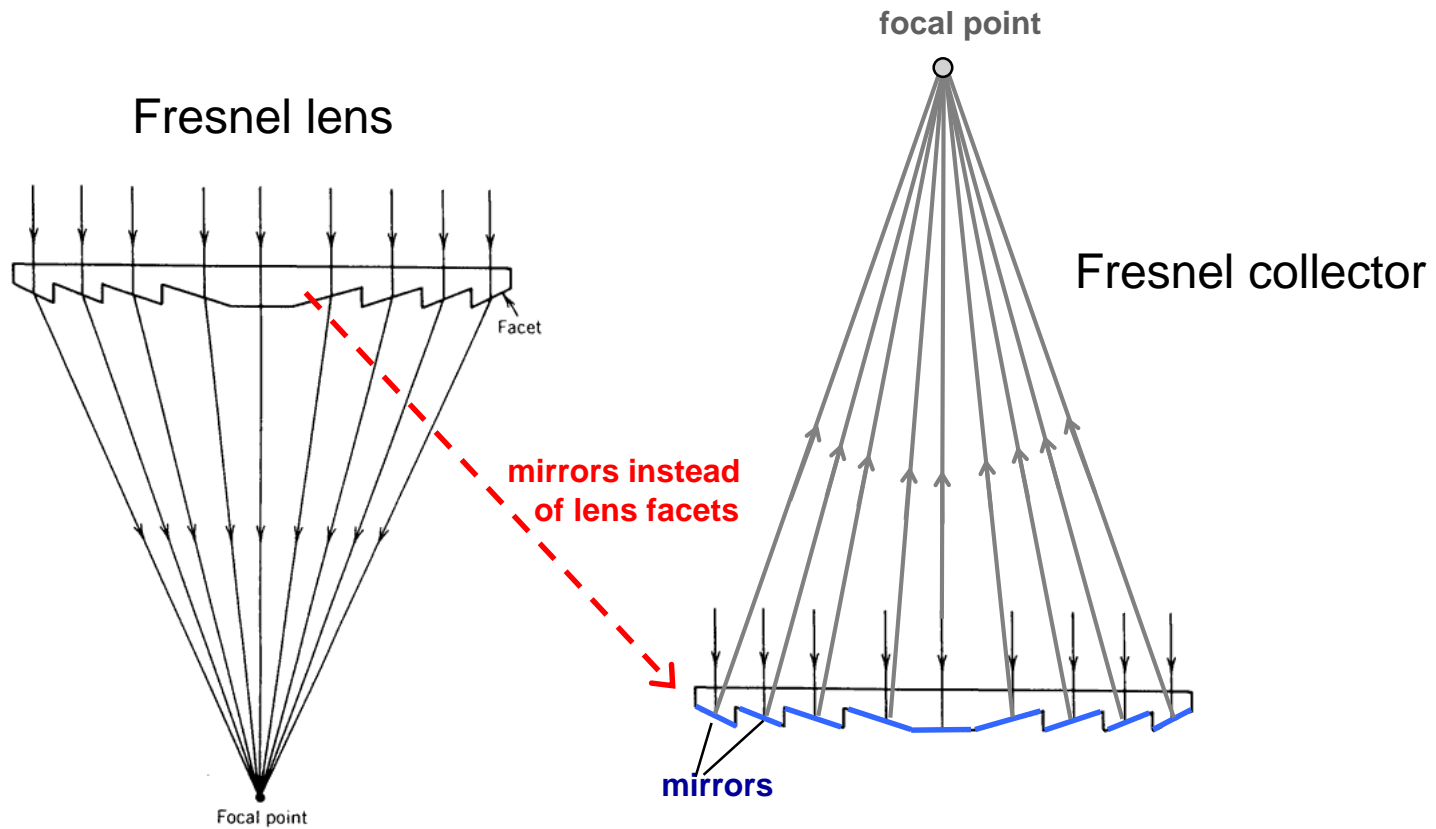
## Andasol 1 - 3 (2010)



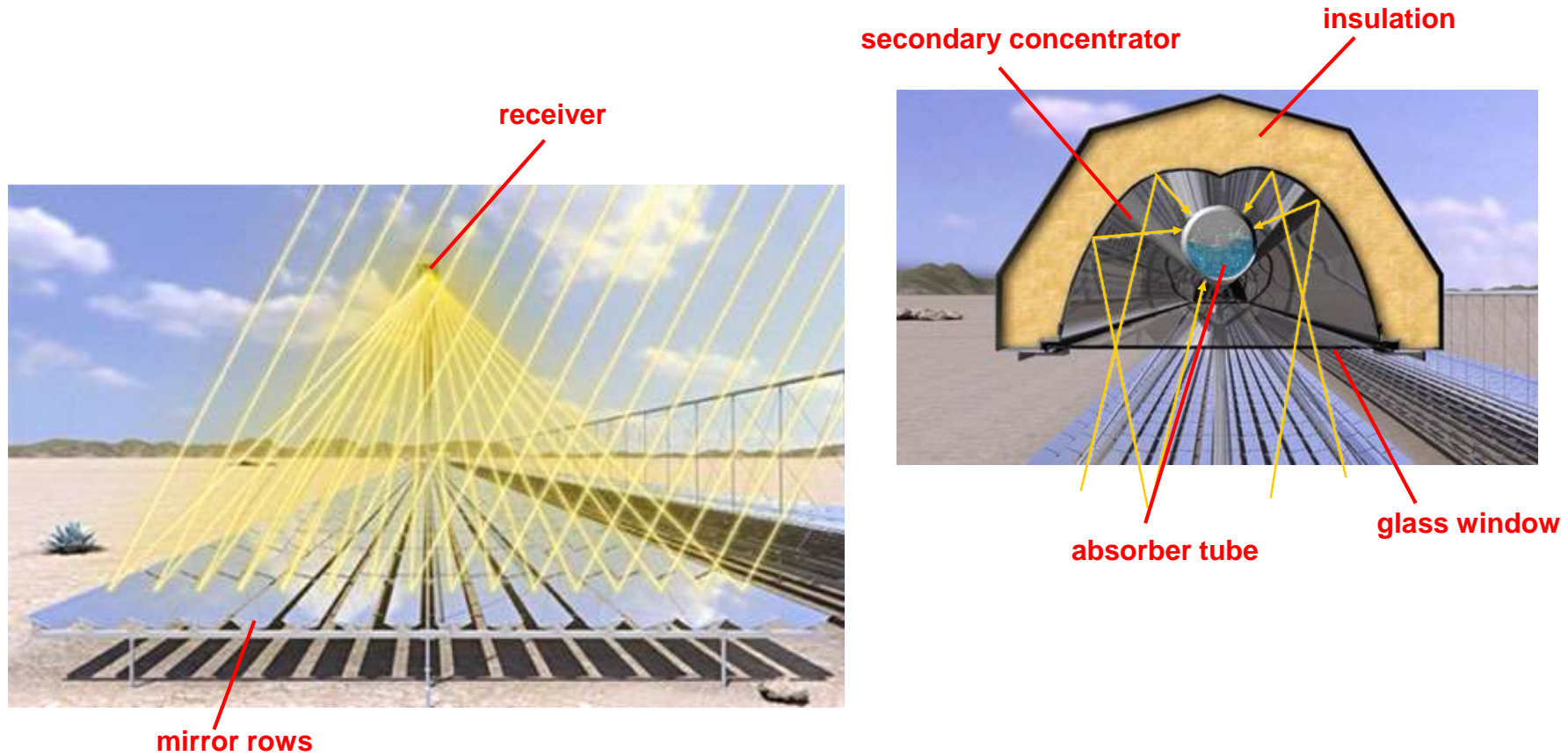


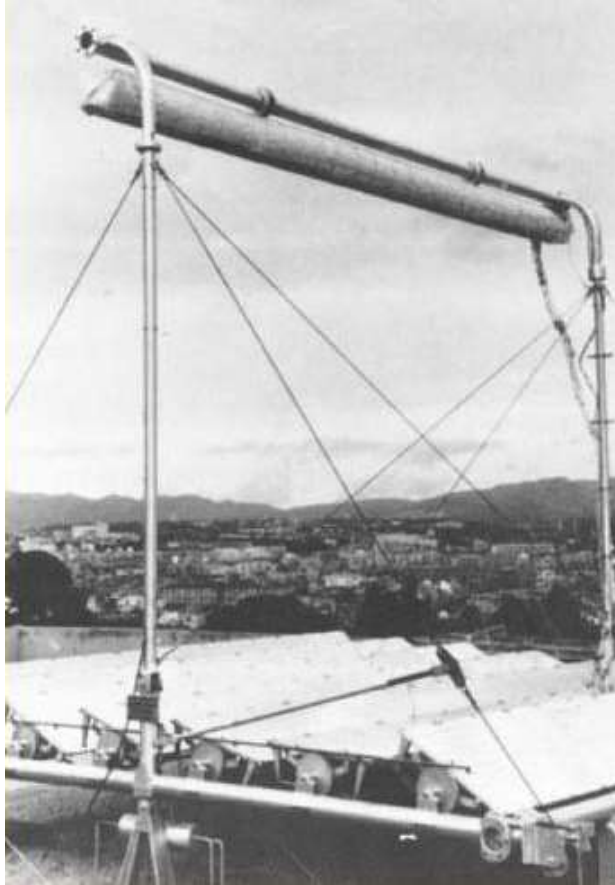
# What is a Fresnel collector?

## How does a Fresnel collector work?



# Fresnel collector working scheme





**CLFR- Collector, 1964 Marseille**



**AUSRA- Collector**



**PSE- Collector**







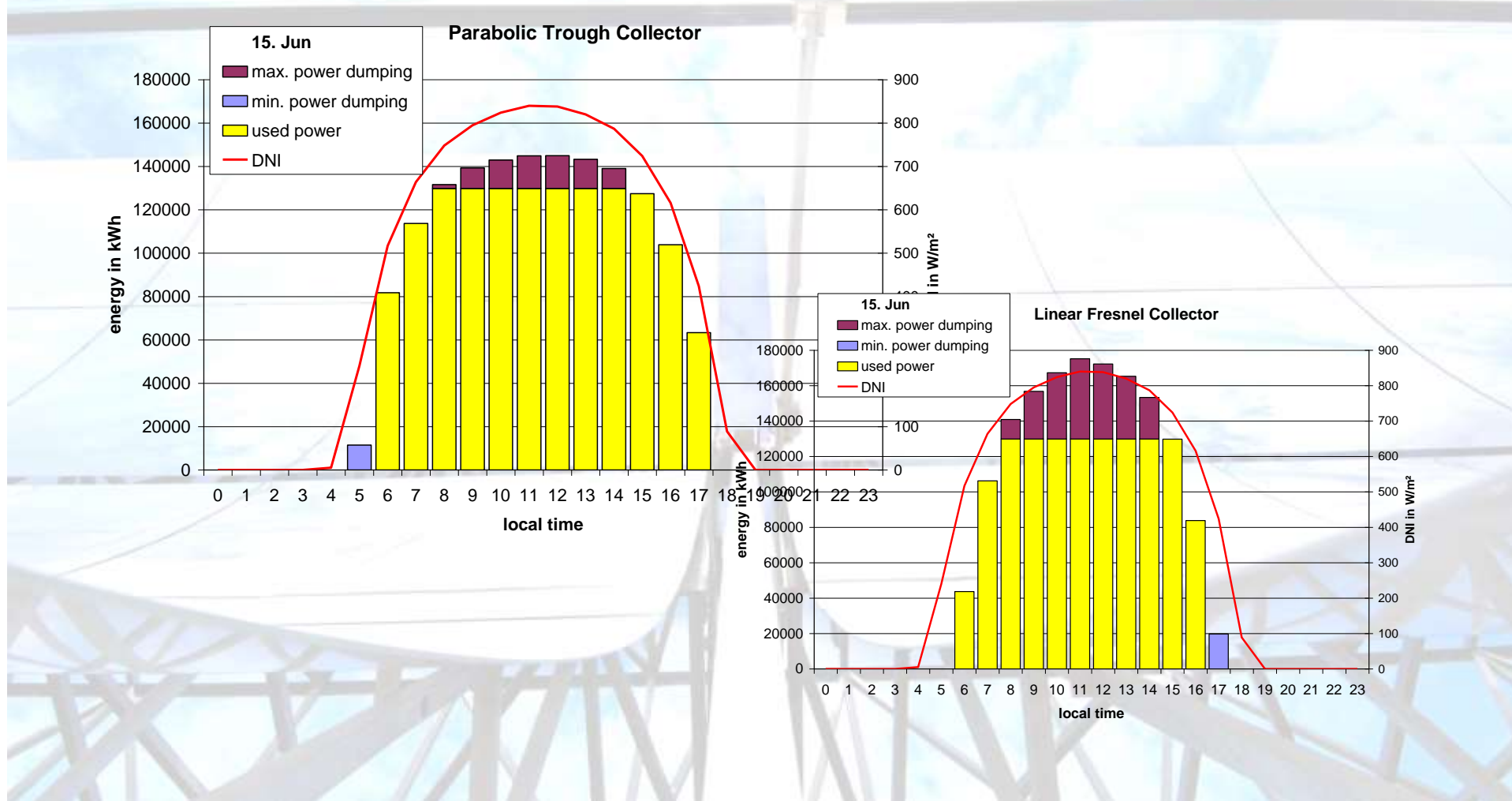
**NOVATEC Collector**



**SPG Collector**



# Why more dumping losses?



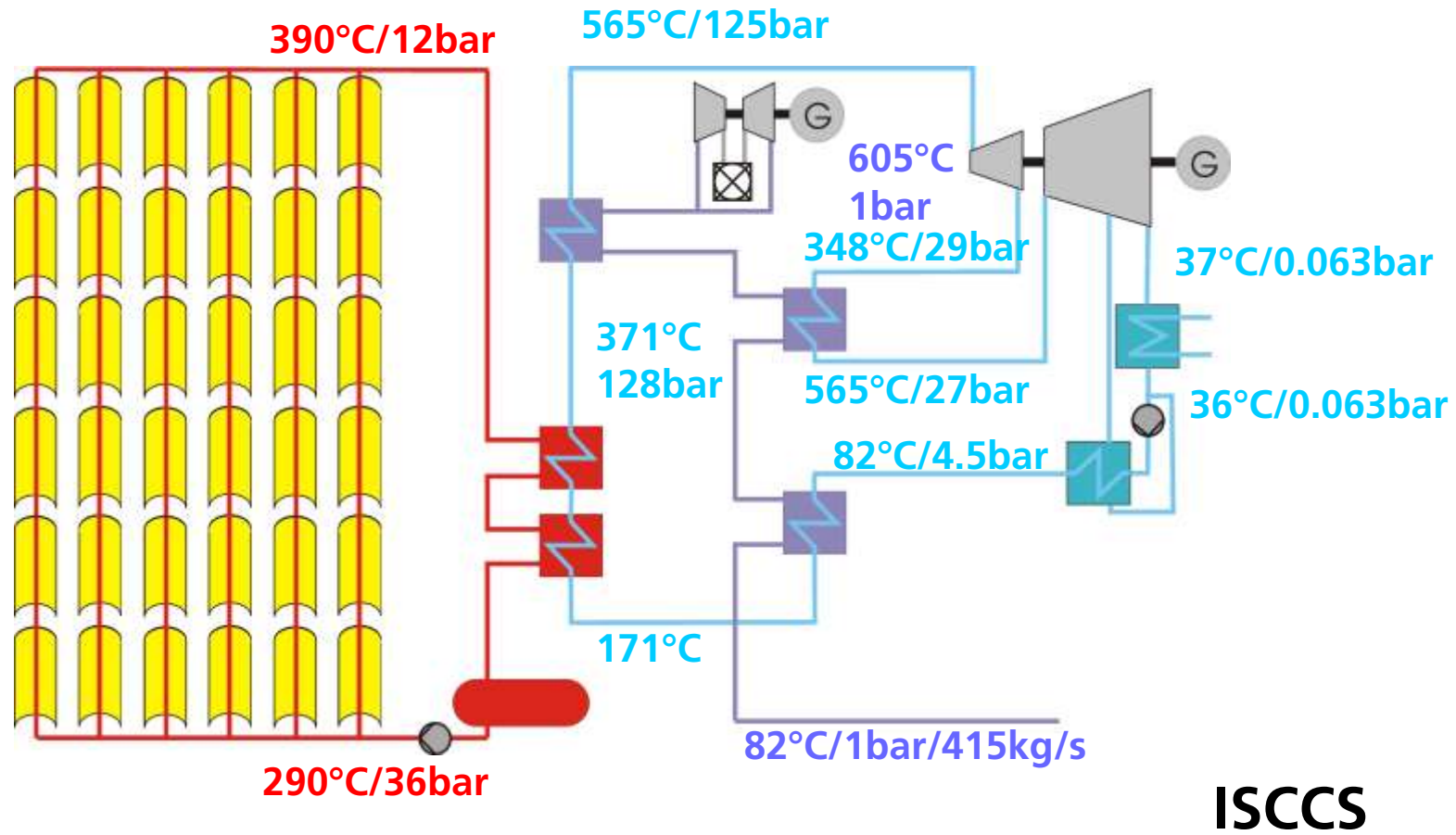


# Novatec 30 MW Linear-Fresnel CSP plant, Murcia Spain, PE-2

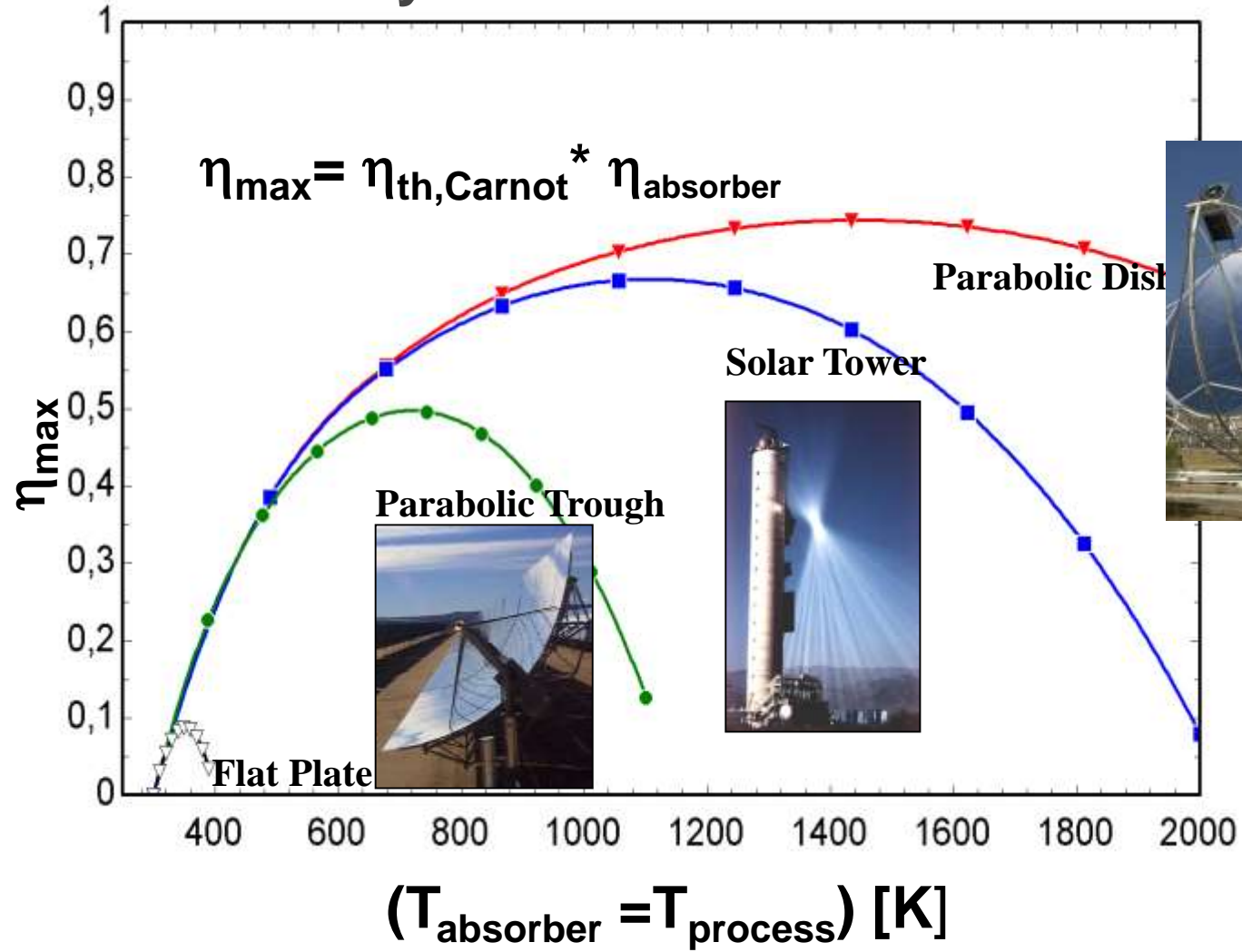




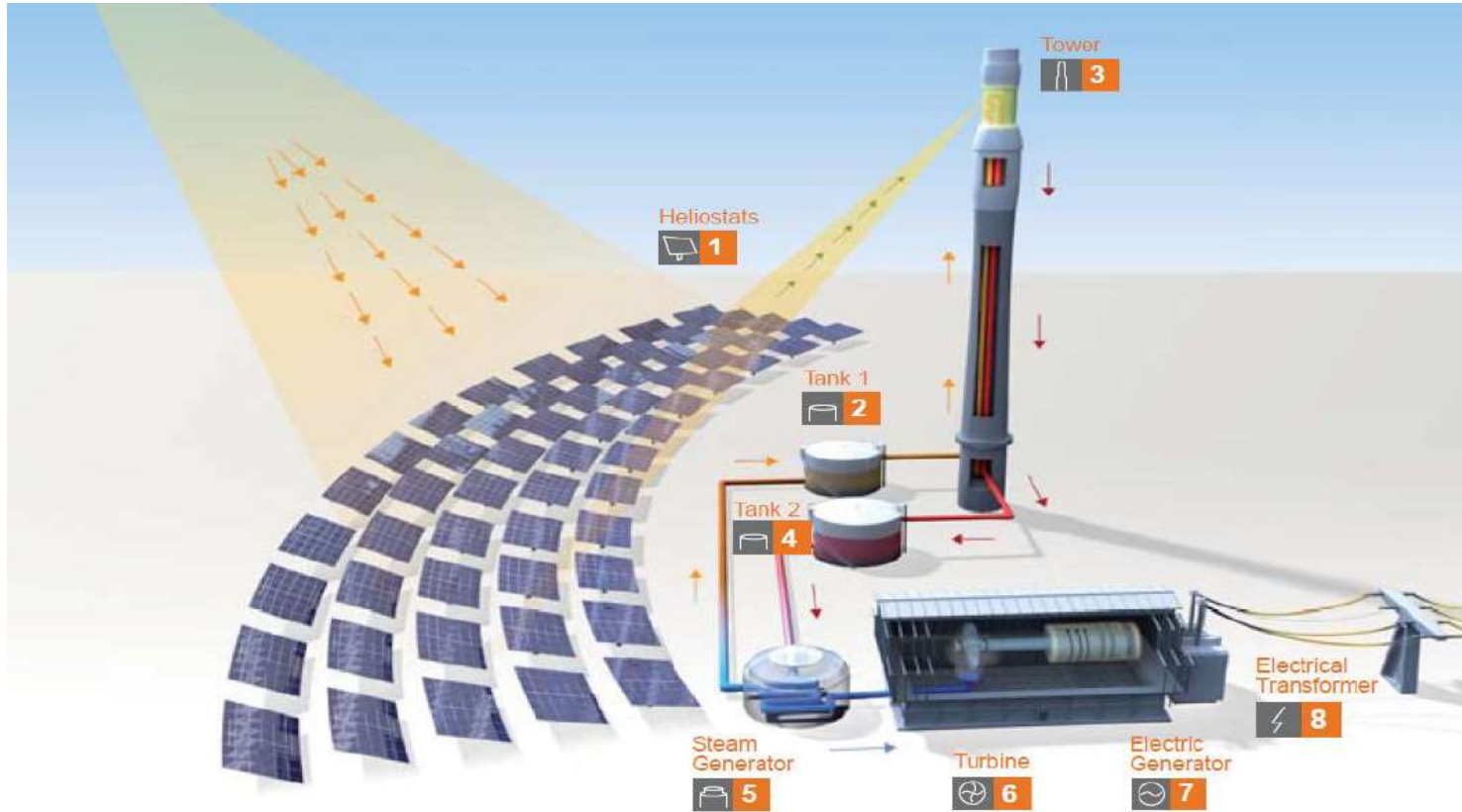
# Integrated Solar Combined Cycle (ISCCS)



# Efficiency Potential of CSP Systems



# Solar Tower System with molten salt





## Direktdampf-Receiver (Ivanpah, NV, USA, 120 MWe)





# Solarturm mit Luft-Receiver, Solarturm Jülich

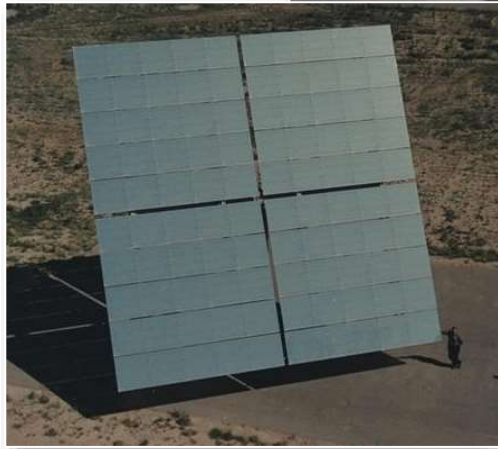
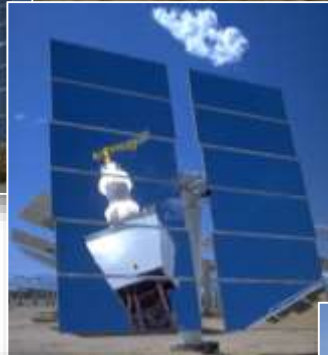


Solar Tower Research Facility in Jülich,  
Germany, 1,5 MWe



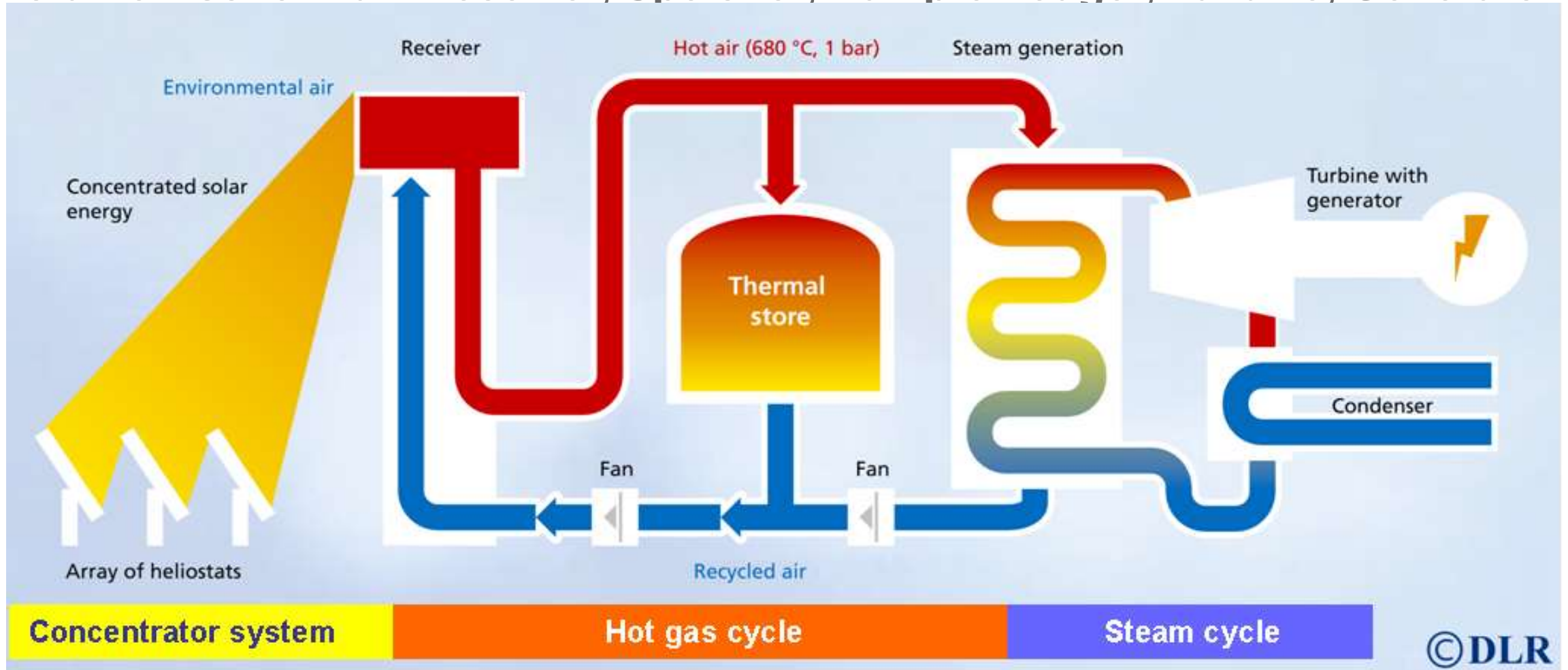


# Heliostate





# Schaltbild Solarturm Jülich volumetrischer Luft-Receiver, Speicher, Dampferzeuger, Turbine, Generator



## Air Receiver

### a) Open Volumetric Receiver – Example: Solar Tower Jülich (STJ)

- The figure shows a cut through three absorber modules
- The incident solar flux heats the absorber modules
- A mix of ambient and recirculated cooling air is sucked through the absorber structure and is heated on its passage through it

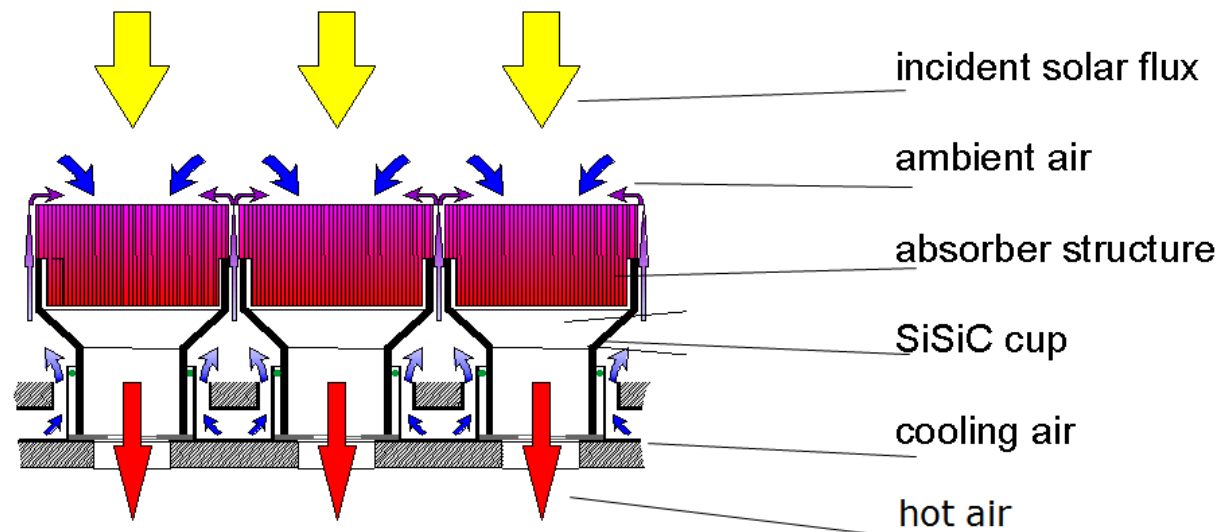
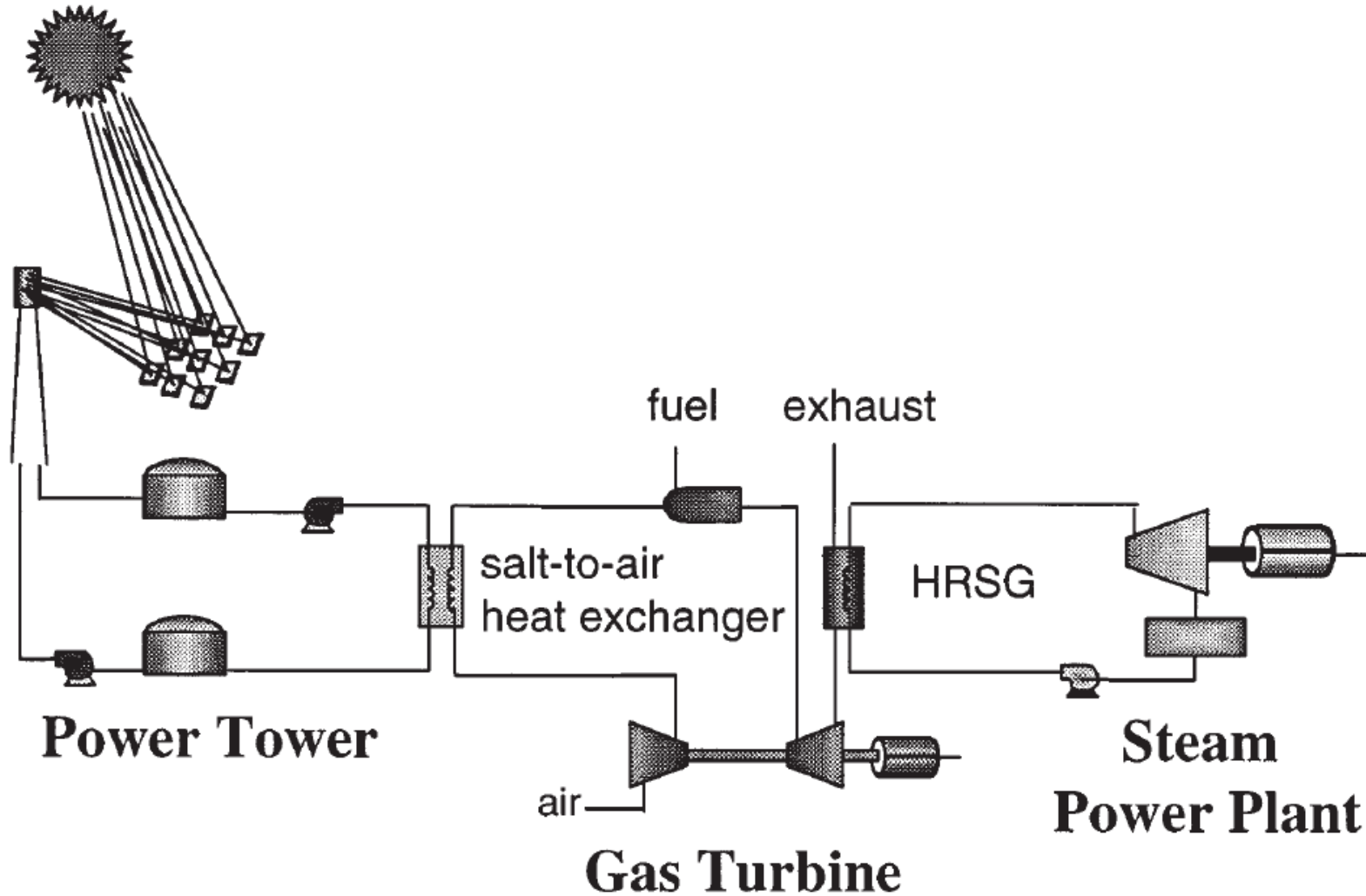


Fig.: Cut through three absorber modules

# Solarturm mit Salzschnmelze

Rohr-Receiver, Tanks, Wärmetauscher, Dampferzeuger, Turbine, Generator





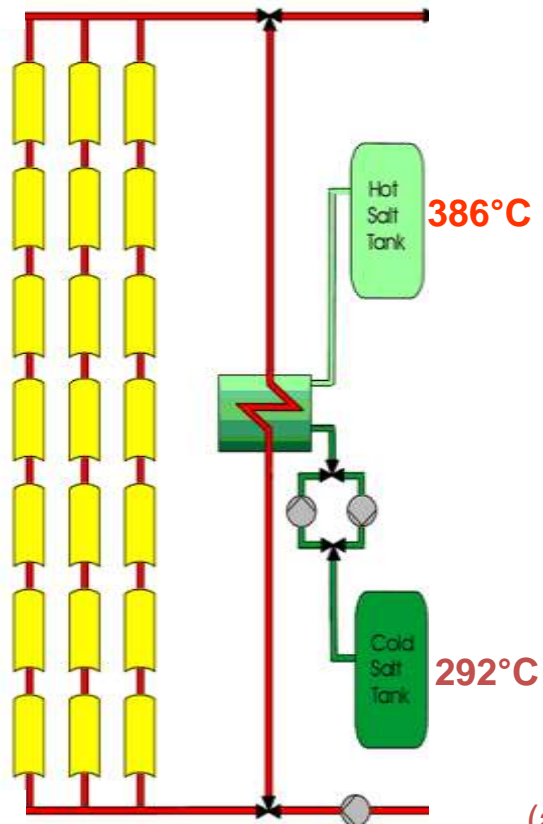
# Thermischer Speicher im Solarkraftwerk

- commercially available and most widely-used technology
- based on nitrate salts
- application predominantly in parabolic trough power plants
- most widely-used storage technology
- application example: used by recently constructed parabolic trough plants Andasol I, II, III (Spain)



Fig.: Aerial views of Andasol I

## molten salt storage (60% NaNO<sub>3</sub> + 40% KNO<sub>3</sub>, melting point =222°C)

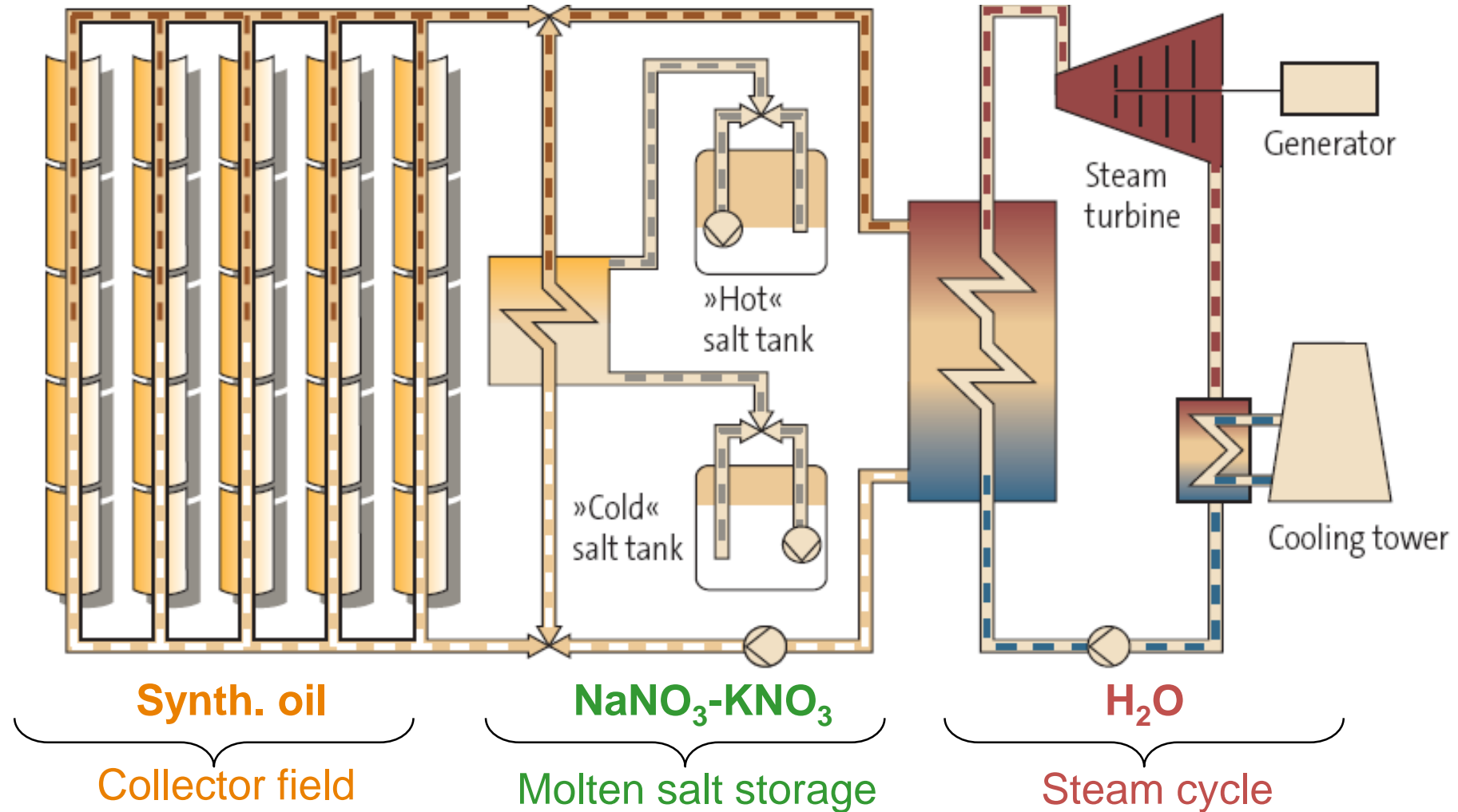


(about 30.000 tons of molten salt for 8 hours of 50MW<sub>el</sub> production)





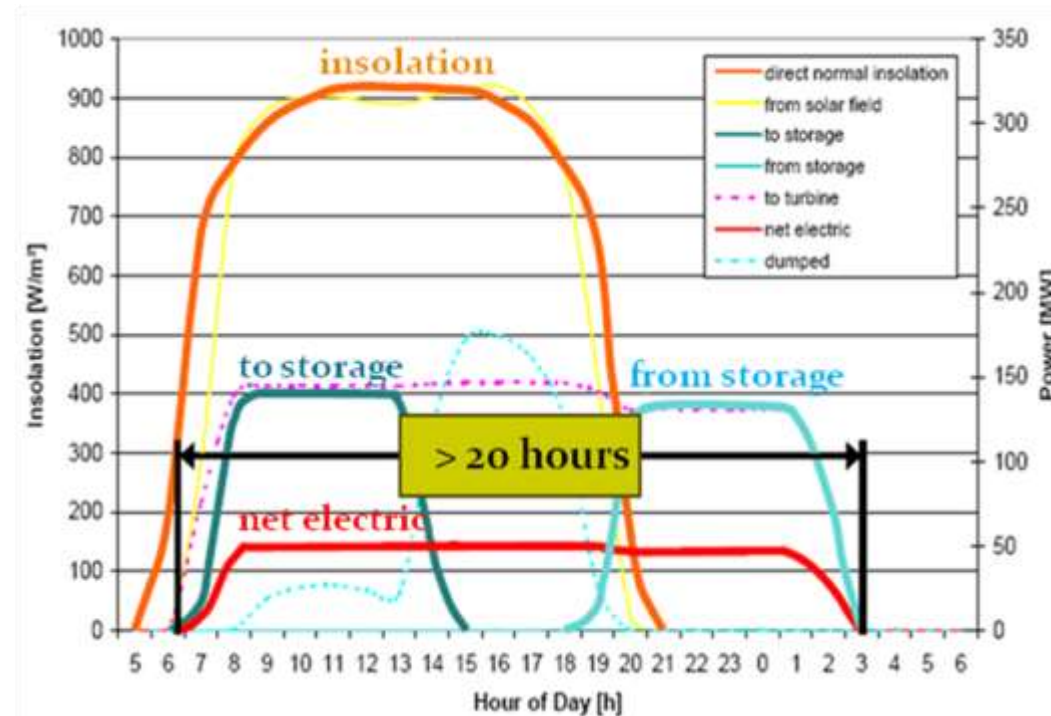
## Schematic of Andasol I parabolic trough power plant





## Charging and discharging

- The power plant control system ensures that the salt never falls below a temperature of 292°C, if necessary by means of electrical heating, to prevent the salt from solidifying
- Solidification would take place at approximately 220°C



Typical summer day plant performance of Andasol I

# Tonopah-Kraftwerk (Nevada, USA) Salzspeicher, Salz-Receiver, Heliostatfeld



## weitere thermische Speichertypen für CSP

- Salzschnmelze als direkter Speicher (ca. 565°C für Nitrat)
  - Zwei-Tank-Systeme (kalt / heiß)
  - Schichtenspeicher
- Sand, Granulat, Partikel, Schotter (kaum Temperaturbegrenzung)
  - als Füllmaterial
  - über Direktkontakt (z.B. Luft als Wärmeträgermedium)
- Partikelsysteme
- Flüssigsysteme: leichte Handhabung, aber Probleme von Einfrieren und Überhitzen
- Feststoffsysteme mit Wärmeabgabe an anderes Fluid: kaum Temperaturgrenzen
  - Festbett
  - fluidisiert
- Thermochemische Systeme: hohe Energiedichte, lange Speicherdauer möglich





# Solare Verfahrenstechnik

- konzentrierte Sonnenstrahlung erzeugt
  - hohe Temperaturen – bis über 1600°C
  - hohe Strahlungsflussdichte – bis über 2 MW/m<sup>2</sup>
  - hohe Photonendichte
- Hohe Temperatur
  - Schmelzen von Filterstäuben
  - Verbrennen von Abfallstoffen
  - Wasser-Entsalzung
  - Recycling usw.
- Stoffumwandlungen bei hohen Temperaturen
  - Kalkbrennen (Zementherstellung)
  - Wasserspaltung (Wasserstoff)
  - (thermo-)chemische Energiespeicherung (z.B. Schwefel, Kraftstoffe, Syn-Fuels / E-Fuels)
  - ...
- Fotochemie
  - Feinchemikalien, Duftstoffe



# Video-Links

- <https://www.youtube.com/watch?v=-Xoxo-natwM>
- <https://vimeo.com/713796480/989e17ed9c>
- <https://youtu.be/K2A4OhnRmJ4>
- <https://www.youtube.com/user/DLRde> “Wärmespeicher” “Solarreceiver” “Enermena” “Hiflex”
- <https://www.youtube.com/channel/UCvmln3AxofQ5zXYKIYzAcYg> (DLR Solarforschung)



# Links

- [www.dlr.de/sf](http://www.dlr.de/sf) (Solarforschung)
- [www.dlr.de/sf](http://www.dlr.de/sf) ->Downloads
- [www.dlr.de/ff](http://www.dlr.de/ff) (Future Fuels)
- [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)
- [www.estelasolar.org](http://www.estelasolar.org)
- [www.helioscsp.com](http://www.helioscsp.com)
- [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA\\_Tech\\_Innovation\\_Indicators\\_2022\\_.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Tech_Innovation_Indicators_2022_.pdf)
- Broschüre CSP 2020  
[https://www.dlr.de/sf/PortalData/73/Resources/dokumente/publikationen\\_medien/dlr\\_und\\_sf/Studie-Solarthermische-Kraftwerke\\_DLR\\_2021-03.pdf](https://www.dlr.de/sf/PortalData/73/Resources/dokumente/publikationen_medien/dlr_und_sf/Studie-Solarthermische-Kraftwerke_DLR_2021-03.pdf)
- <https://www.linkedin.com/showcase/dlr-solarforschung/>
- <https://www.linkedin.com/showcase/dlr-future-fuels/>





# Kontakt



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

Institut für Solarforschung  
Linder Höhe  
51147 Köln

Eckhard Lüpfer, Dr.-Ing., Projektleiter  
02203 601-4714  
eckhard.luepfert@dlr.de  
<http://www.dlr.de/sf>

