



# Werkstoffe für Hochtemperaturreceiver

**R. Uhlig**

**Solar Research**

**German Aerospace Center (DLR)**

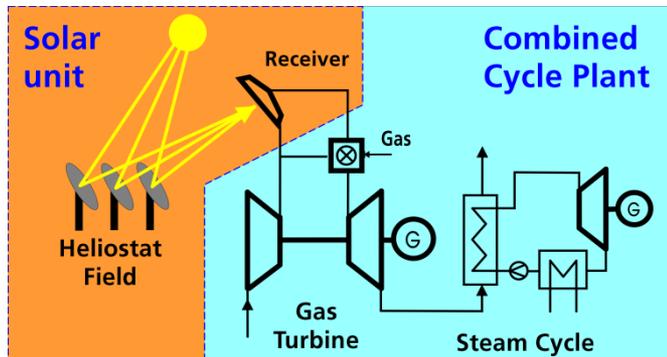
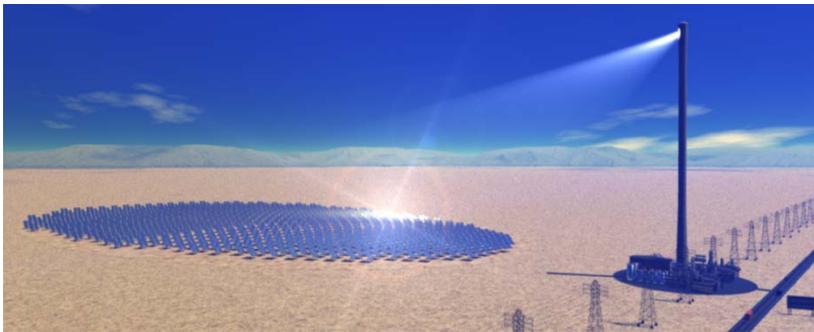


DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

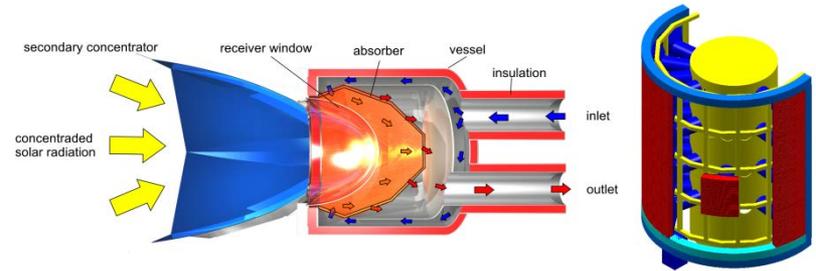
# Solarturmkraftwerke

- Punktfokussierend durch zwei- achsig der Sonne nachgeführte Spiegelsysteme (Heliostate).
- Wandlung der Strahlung in einem „Punkt“ (Receiver).
- Dadurch hohe Temperaturen möglich → hoher Gesamtwirkungsgrad → niedrige Kosten.
- Wandlung der Solarenergie auf hohem Temperaturniveau (Gasturbine).
- Kopplung mit Dampfprozess (GuD) für hohe Umwandlungswirkungsgrade.

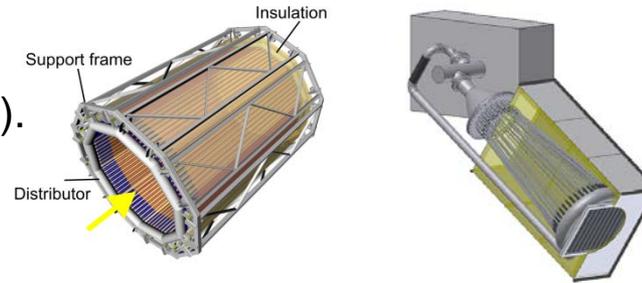


# Receiverkonzepte

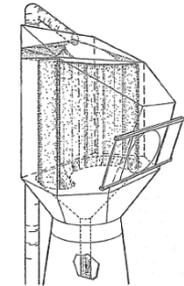
➤ Volumetrisch für Luft (geschlossen/offen).



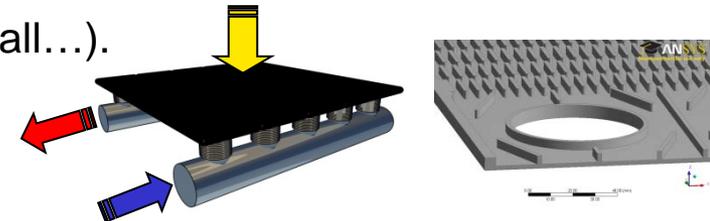
➤ Rohrreceiver (Luft, Salz, Metall...).



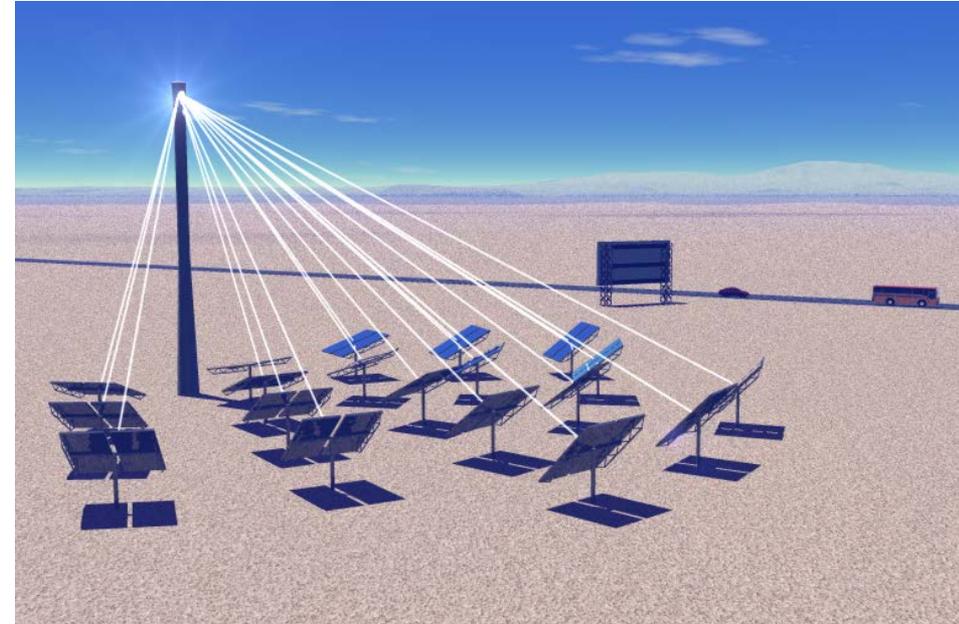
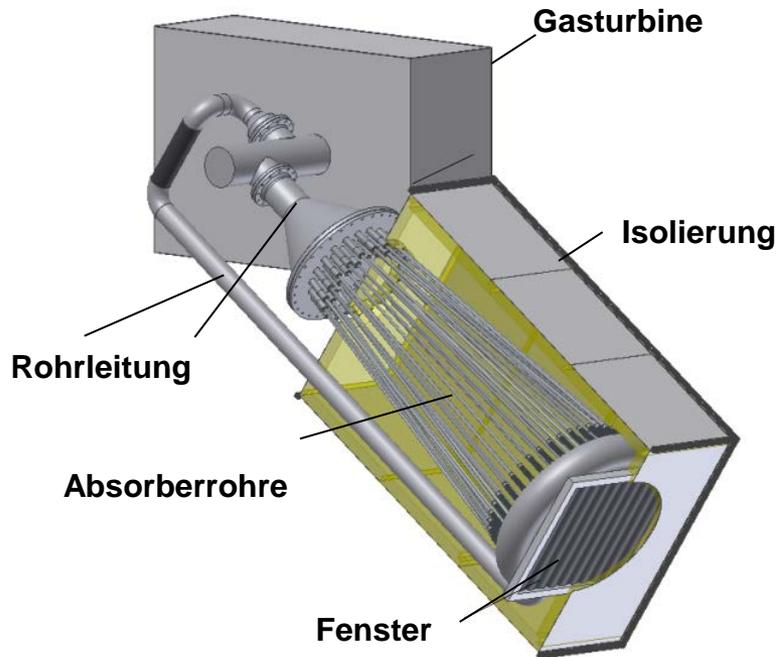
➤ Direkt absorbierende Receiver (keramische Partikel, Sand, Salz...).



➤ Platten Receiver (keramisch/metallisch) (Luft, Salz, Metall...).



# Rohrreceiver für solare Mikroturbinensysteme



- Vorwärmung Luft: 0.8 kg/s Luft ( $4.5 \text{ bar}_{\text{Abs.}}$ )  $600^\circ\text{C} \rightarrow 800^\circ\text{C}$ .
- Isolierung: Keramische und mineralische Faserwerkstoffe
- Absorberrohre: Nickelbasislegierung
- Fenster: Quarzglas
- Rohrleitung: Hitzebeständiger austenitischer Stahl

# Transparente Receiverabdeckung (Fenster)

## ➤ Aufgaben:

- Transmission der Solarstrahlung.
- Verringerung der Verluste durch Konvektion.

## ➤ Material: Quarzglas („fast“ reines $\text{SiO}_2$ )

### ➤ Vorteile:

- Geringe Absorption der Solarstrahlung.
- Geringe thermische Dehnung (→ geringe thermische Spannungen).
- Hohe Einsatztemperatur (800°C-1000°C).

### ➤ Nachteile:

#### ➤ Sprödes Bruchverhalten:

- Zug- und Biegespannungen sind kritisch.
- Keine Schadenstoleranz (wie duktile Werkstoffe).
- Bruch erfolgt ohne Vorankündigung (Risse wachsen mit Schallgeschwindigkeit).

#### ➤ Bauteilgrößen und Formen begrenzt (durch Fertigung).

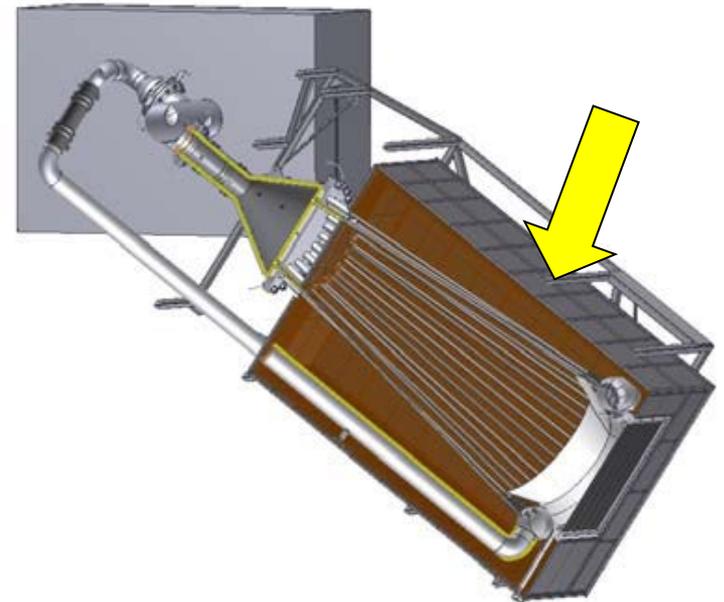
#### ➤ Relativ kostenintensiv (Rohstoff, Herstellung).

#### ➤ Hohe Temperaturen und Verschmutzung führen zur Entglasung.



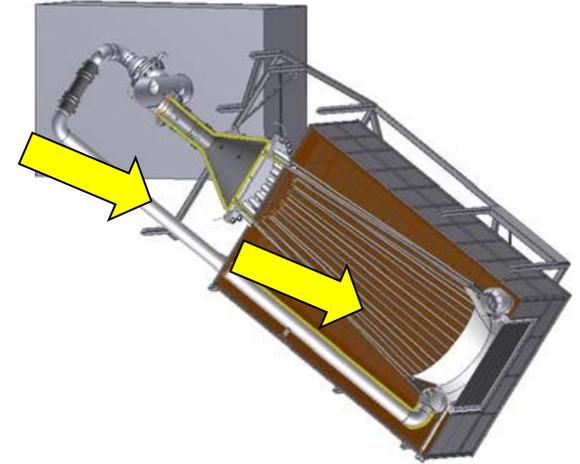
# Isolierung(Cavity)

- Aufgaben:
  - Abdichtung gegen Umgebung (Konvektion).
  - Blockieren der Solarstrahlung.
  - Verringerung der Verluste durch Wärmeleitung.
- Material: Modulare Dämmkassetten mit mehrschichtigem Dämmungsaufbau:
  - Keramische Fasern.
  - Mineralische Fasern.
  - Blechmantel.
- Herausforderungen:
  - Hohe Materialtemperaturen.
  - Wechselbelastung.
  - Atmosphärische Einflüsse (Korrosion).
  - Funktionssicherheit (Abdichtung).

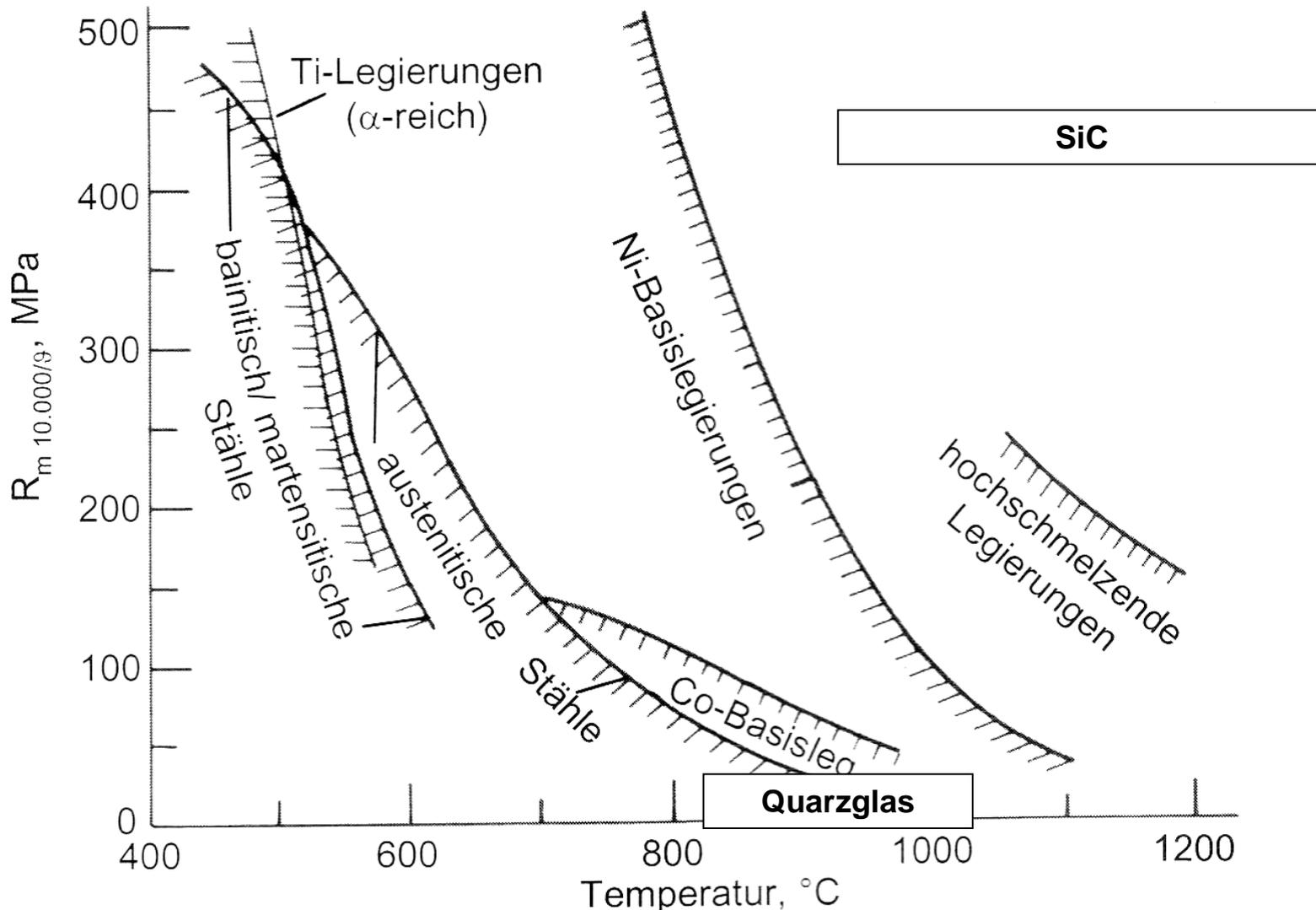


# Absorberrohre und Rohrleitungen

- Aufgaben:
  - Führen des Fluides.
  - Abdichtung gegen Umgebung (Innendruck).
  - Absorbieren der Solarstrahlung (Absorberrohre).
- Material:
  - Absorberrohre: Nickelbasislegierungen
  - Rohrleitungen: Je nach Temperatur hochwarmfeste und hitzebeständige Stähle oder Nickelbasislegierungen
- Herausforderungen:
  - Hohe Materialtemperaturen
  - Belastungen aus Innendruck inhomogenen Temperaturen
  - Wechselbelastung
  - Atmosphärische Einflüsse (Korrosion)



# Festigkeitseigenschaften verschiedener Werkstoffe



[Quelle: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Ralf Bürgel]



## Keramische Werkstoffe (z.B. SiC)

### ➤ Vorteile:

- Hohe Einsatztemperaturen möglich (1300°C).
- Hohe Wärmeleitfähigkeit (2-10 mal höher als Stahl).
- Geringe Wärmedehnung (5 mal kleiner als Stahl).
- ➔ Geringe Thermospannungen.

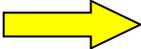
### ➤ Nachteile:

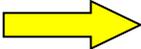
- Sprödes Bruchverhalten:
  - Zug- und Biegespannungen sind kritisch.
  - Keine Schadenstoleranz (wie duktile Werkstoffe).
  - Bruch erfolgt ohne Vorankündigung (Risse wachsen mit Schallgeschwindigkeit).
- Bauteilgrößen und Formen begrenzt (durch Fertigung).
- Relativ kostenintensiv (Rohstoff, Herstellung).

➔ **Hauptproblem: Anbindung an metallische Komponenten!**

# Metallischer Werkstoffe

- Metallische Werkstoffe besitzen für technische Anwendung eine Reihe von positiven Eigenschaften:
  - Plastisch Verformbar (Herstellung, Weiterverarbeitung, Schadenstoleranz).
  - Hohe Festigkeit und Zähigkeit.
  - In weitem Temperaturbereich einsetzbar.
  - Eigenschaften durch Legierungssysteme in weiten Bereichen einstellbar.
  - Grundwerkstoffe der Eisen-Kohlenstofflegierung kostengünstig.
  - Recyclbar.
- Bei niedrigen Temperaturen ist die Auslegung von Komponenten durch eine Vielzahl von Rechenvorschriften und Versuchsdaten sowohl für statische als auch für zyklische Belastungen Stand der Technik.
- Korrosionsprobleme können durch Legierungen und/oder Schutzschichten vermieden werden.

 **Gilt dies auch für höhere Temperaturen?**

 **Was sind überhaupt höhere und niedrigere Temperaturen?**

# Temperaturabhängige Eigenschaften metallischer Werkstoffe

Bei einer Temperatur von ca.  $0.4 T_S$  vollzieht sich ein fließender  
➔ Übergang von zeitunabhängiger zu zeitabhängiger Verformung und Festigkeit. ( $T_S$  = Schmelzpunkt).

Temperaturen  $< ca. 0.4 T_S$

Festigkeitskennwerte sind zeitunabhängig (Streckgrenze, Zugfestigkeit).

Plastische Verformung findet nur oberhalb einer Mindestspannung (=Fließgrenze) statt.

Der Verformungsbetrag bei konstanter Spannung stellt sich praktisch spontan und zeitunabhängig ein.

Weitere Verformung ist nur bei Spannungssteigerung möglich.

Temperaturen  $> ca. 0.4 T_S$

Festigkeitskennwerte sind zeitabhängig (Zeitdehngrenze, Zeitstandfestigkeit).

Kriechverformung ist bei allen Spannungen möglich.

Der Verformungsbetrag stellt sich zeitabhängig ein.

Bei konstanter Spannung findet stetige Verformung statt.

# Hochtemperaturfestigkeit von Metallen: Kriechen

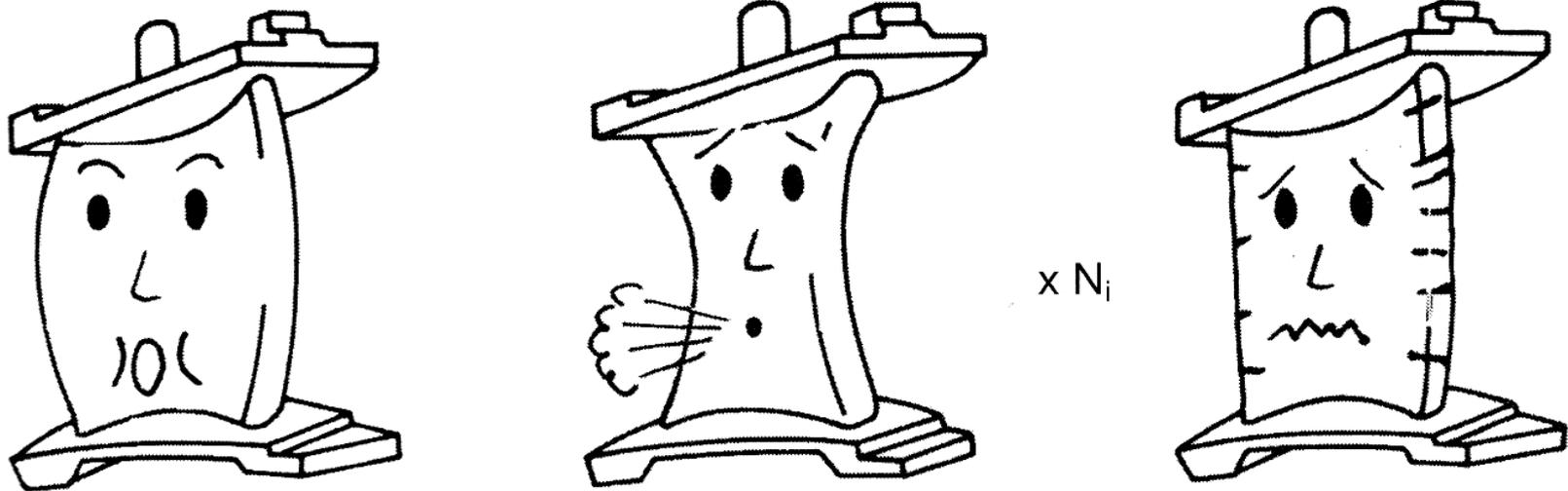
→ Bei einer Temperatur von ca.  $0.4 T_S$  bewirkt eine Spannung im Werkstoff das Klettern von Stufenversetzungen. Die daraus resultierende zeitabhängige plastische Verformung wird **Kriechen** genannt.

- Kriechen findet immer bei Spannungen  $> 0$  statt!
- Kriechen führt immer (auch bei sehr kleinen Spannungen) zum Bruch des Werkstoffes!
- Kriechgeschwindigkeiten liegen üblicherweise im Bereich von  $10^{-6}$  bis  $10^{-10} \text{ s}^{-1}$ .
- $2.8 \cdot 10^{-10} \text{ S}^{-1}$  bedeutet eine Dehnung 1% in 10.000h.
- Lebensdauer bei hochtemperaturbeanspruchten Bauteilen max. ca.  $10^5 \text{ h}$  (ca. 11.4 Jahre).
- Es wird zwischen Versetzungskriechen, Korngrenzengleiten und Diffusionskriechen unterschieden.
- Es wird zwischen Spannungs- und Lastkonstanz unterschieden.

# Hochtemperaturfestigkeit: Ermüdung

Unter zyklischer Beanspruchung versteht man zeitlich veränderliche Spannungen oder Temperaturen.

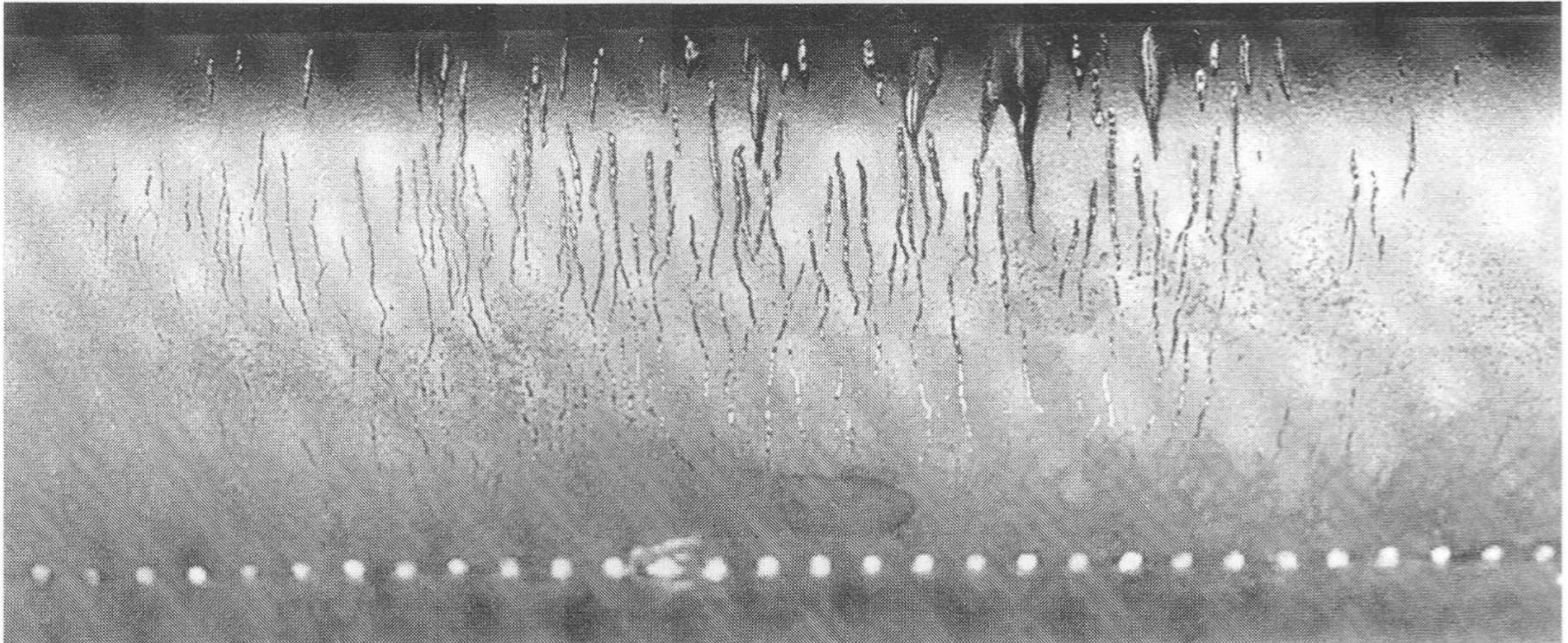
Durch das An- und Abfahren und wechselnde Betriebszustände sind hochtemperaturbelastete Bauteile zyklischen Beanspruchungen ausgesetzt.



[Quelle: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Ralf Bürgel]

# Hochtemperaturfestigkeit: Ermüdung

Thermoermüdungsrisse an der Eintrittskante einer Gasturbinenschaufel



[Quelle: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Ralf Bürgel]



# Hochtemperaturkorrosion

→ Unter Hochtemperaturkorrosion versteht man alle Formen der Reaktion eines Werkstoffes mit seiner Umgebungsatmosphäre bei höheren Temperaturen.

Hochtemperaturkorrosion (HTK)			
Oxidation	Aufkohlung	Aufstickung	Aufschwefelung
Äußere Oxidation; Oxidschichtbildung Innere Oxidation.	Innere Karbidbildung.	Innere Nitritbildung  Seltener Nitrit- deckschichtbildung	Äußere Sulfidierung; Sulfid- deckschichtbildung  Innere Sulfidbildung

Deckschicht = Korrosionsprodukt welches weitgehend die metallische Oberfläche schützt. (Z.B.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

→ Worin liegt das Problem der Korrosion?

- Materialverlust (geringere tragende Querschnitte).
- Innere Zerrüttung des Werkstoffes.
- Unerwünschte „Wärmedämmschichten“ durch Deckschichten.
- Abtrag von Deckschichten (Beeinflussung der nachfolgenden Komponenten z.B. Verstopfung von Rohren usw.)

# Hochtemperaturfestigkeit: Lebensdauerabschätzung

- Bei kurzzeitiger Belastung und/oder „moderaten“ Temperaturen:
  - Warmstreckgrenze.
- Bei längeren Belastungen und höheren Temperaturen:
  - Kriechkurven („Zeitstandfestigkeit“).
- Zeitstandfestigkeit bei veränderlichen Beanspruchungen:
  - Statische lineare Schädigungsakkumulation n. Robinson.
- Der kombinierten Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung muss in vielen Fällen Rechnung getragen werden.
  - Kombination der linearen Schädigungsakkumulationsregeln nach Robinson für das Kriechen und nach Palmgren-Miner für die Ermüdung. (ASME N-47)

$D_i$  = Schädigungsanteil im Intervall „i“

$t_i$  = Zeitintervall „i“

$t_{mi}$  = Beanspruchungsdauer bis zum Bruch (für  $\sigma$  und  $T$  im Intervall „i“)

Wenn  $D_i = 1 \rightarrow$  Bruch

$$D_t = D_{tZ} + D_{tE} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{t_i}{t_{mj}} N_i + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{N_i}{N_{Bi}}$$



**In der Praxis treten relativ starke Abweichungen zum berechneten  $D$  auf. → Auslegung mit großem Sicherheitsaufschlag ( $D < 0.4$ )!**



# Auslegung der Receiver Komponenten

- Fragestellung:
  - Welche Temperaturen sind in den Bauteilen zu erwarten?
  - Welche Werkstoffe sollen eingesetzt werden?
  - Wie müssen die Bauteile dimensioniert werden?
  - Wie wird die Lebensdauer eingeschätzt?
  
- Lösungsansatz:
  - Simulation der Temperaturen mit FEM/CFD Modellen.
  - Materialuntersuchungen.
  - Test von Prototypen.

# Auslegung der Receiver Komponenten

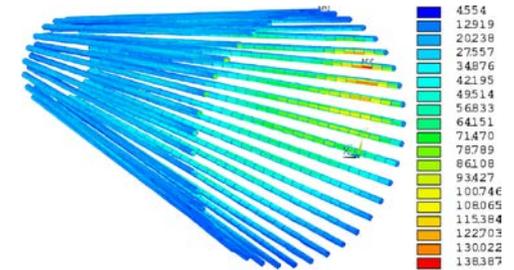
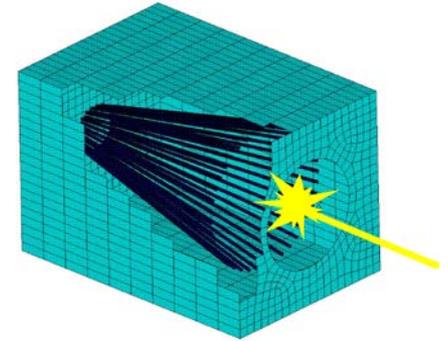
## Thermisches Receiver Modell:

Simulation der solaren Flussdichte durch Raytracing:

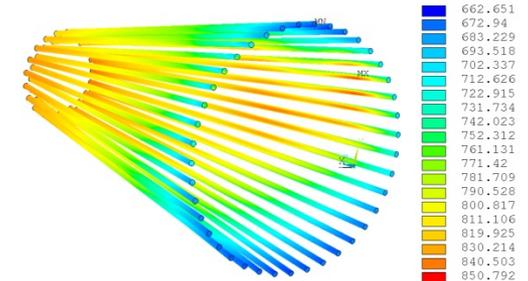
- Direkte Absorption.
- Grauer diffuser und farbig gerichteter (solarer) Strahlungsaustausch.
- **Ergebnis:**
  - **Flussdichteverteilung im Receiver.**
  - **Optische Verluste.**

Thermische Randbedingungen:

- Wärmetransport in Arbeitsmedium.
- Infraroter Strahlungsaustausch (grau, diffus)
- Verluste durch Konvektion und Wärmeleitung.
- **Ergebnis:**
  - **Temperaturverteilung der Komponenten**
  - **Thermische Verluste**



Absorbierte Solarstrahlung

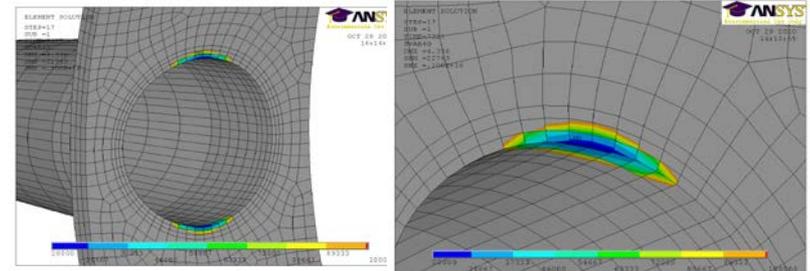


Materialtemperaturen

## Beispiel: Anbindung von Absorberrohren an Sammler

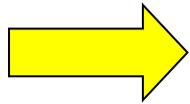
- Kritisch: Abkühlung des Receivers bei Wolkendurchgang:
  - Absorberrohre kühlen schneller ab als der Sammler.
  - Daraus resultieren hohe Spannungen.
  - Maximale Spannungen liegen über der Fließgrenze!

- Visko-elastisch-plastisches Modell:
- 20'000 Zyklen bis zum Bruch!

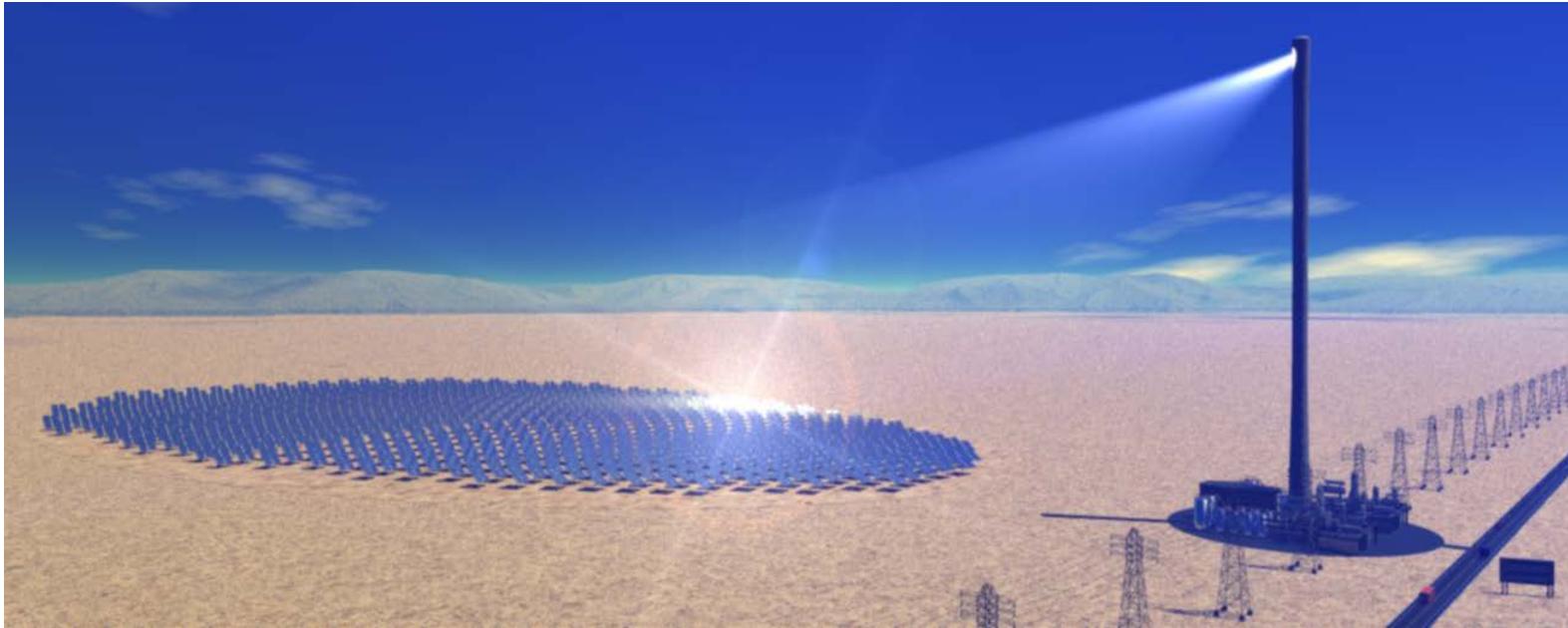


# Zusammenfassung

- Punktfokussierende Systeme erlauben hohe Umwandlungstemperaturen:
  - hoher Gesamtwirkungsgrad → niedrige Kosten.
- Verschiedene Receiverkonzepte in der Entwicklung.
- Hohe Temperaturen stellen große Herausforderungen an die verwendeten Werkstoffe.
- Keramische Werkstoffe sind vielversprechend aber auch problematisch (Kosten, Anbindung an metallische Komponenten, begrenzte Baugrößen...)
- Metallische Werkstoffe nur begrenzt bei hohen Temperaturen einsetzbar. (Kriechen, Ermüdung, Korrosion...)
- Neben der Kenntnis der Werkstoffeigenschaften müssen die Belastungen der Komponenten bekannt sein (Temperaturen, Spannungen).
- Das DLR entwickelt in zahlreichen Projekten Komponenten für Hochtemperaturreceiver:
  - ✓ Durch Simulation.
  - ✓ Materialuntersuchungen.
  - ✓ Prototypentests.



**Thanks for your attention!!**



This work was co-funded by the EC and by the German Ministry for Environment, Nature Protection and Nuclear Safety (BMU)



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft