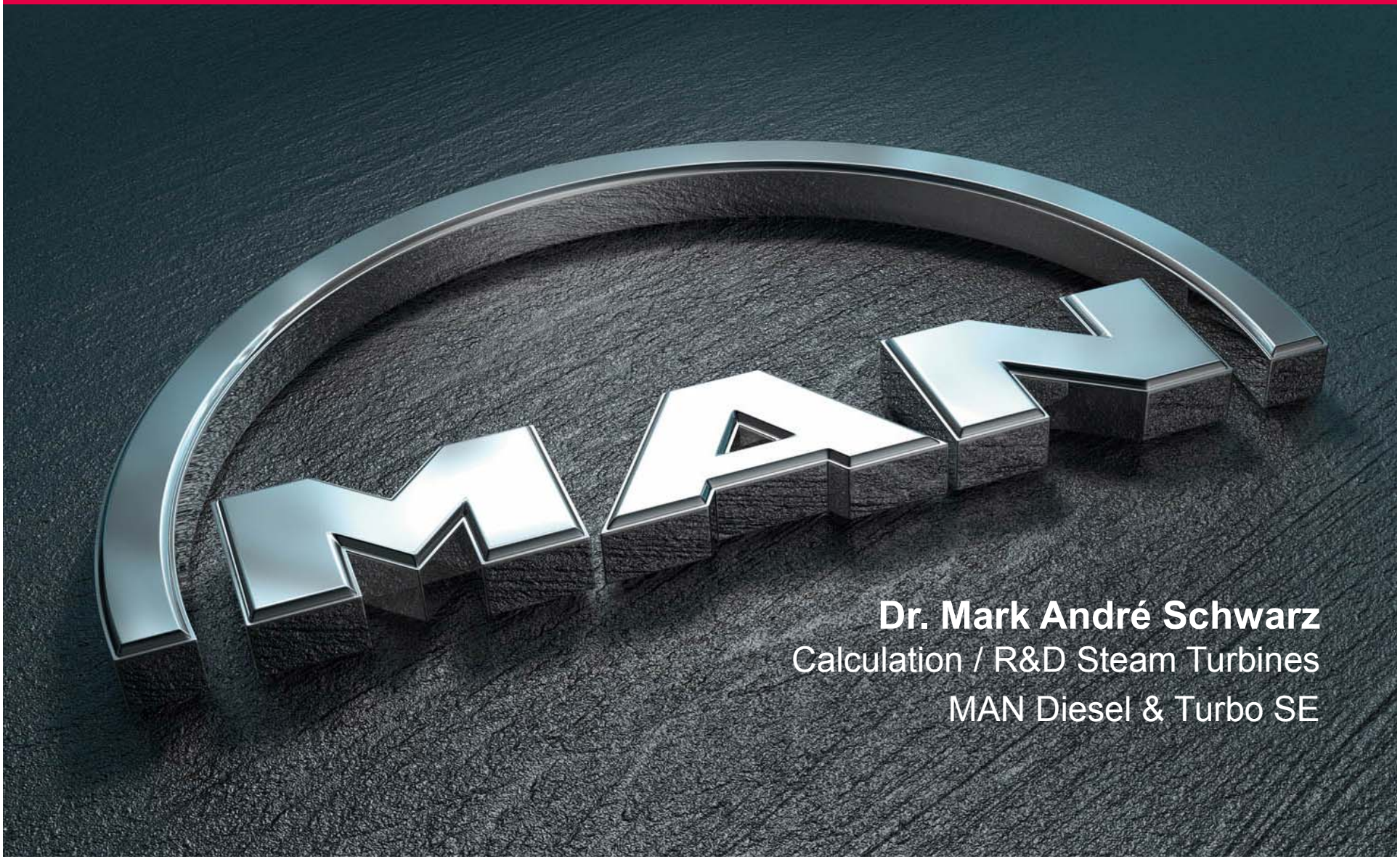
18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb

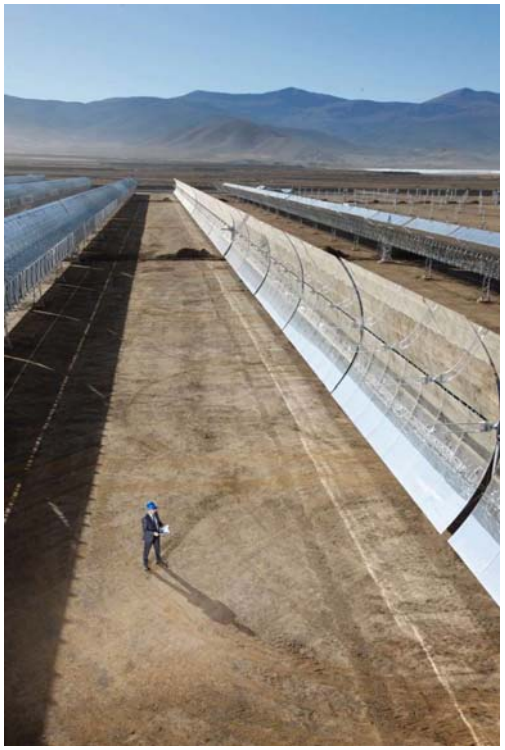
Köln, 19.05.2015



Dr. Mark André Schwarz
Calculation / R&D Steam Turbines
MAN Diesel & Turbo SE

18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Agenda

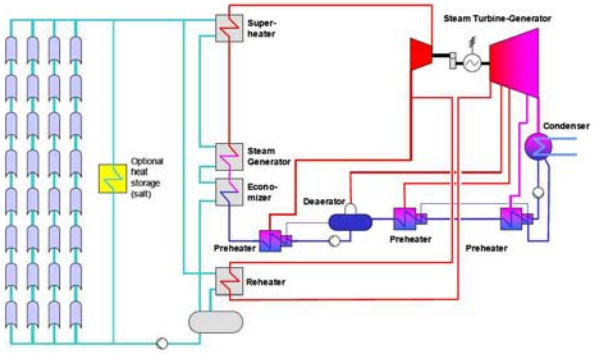
- Einleitung
- Solarkraftwerksprozesse
- Ausgeführte Anlagen / Maschinenstränge
- Flexibler Betrieb
- Ausblick
- Zusammenfassung



18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Einleitung

Green Technology:

CSP-Kraftwerk mit High Performance Dampfturbine bis 160 MW



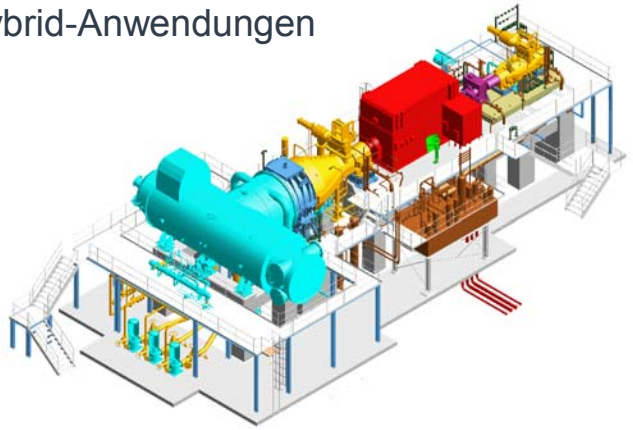
Anforderungen an die Dampfturbine:

- Extrem langer Betriebs- und Lebenszyklus bis zu 30 Jahre
- Flexibler Betrieb:
  - Täglicher Start mit kurzen Startzeiten
  - 11.000 Starts über gesamten Lebenszyklus
- Höchste Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit
- Höchste Wirkungsgrade für Turbine und Solarkraftwerksprozess

18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Solarkraftwerksprozesse

Typische thermodynamische Prozessparameter:

Prozesse:	Parabolrinne, Direktverdampfung, Turm- und Hybrid-Anwendungen - mit Zwischenüberhitzung - ohne Zwischenüberhitzung
Frischdampf :	~ 100 bar/ 390°C bis 540°C
ZÜ-Dampf:	20 bis 25 bar/ 390°C bis 540°C
Leistungsbereich:	10 bis 160 MW



Wirkungsgrad-Benchmark:

Optimierte Beschaufelung:

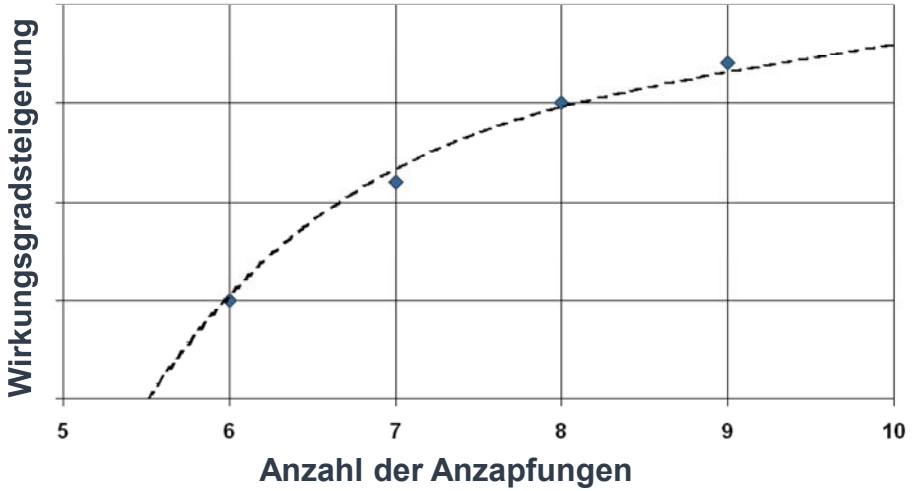
- Hocheffiziente Reaktionsbeschaufelung
- Vielstufiger Beschaufelungskanal

Optimierter Prozess:

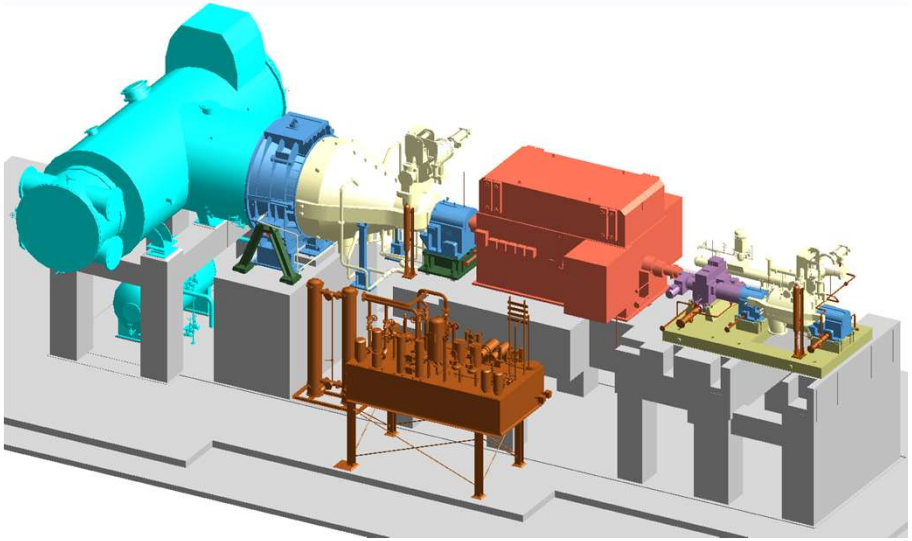
- Flexibler Beschaufelungskanal mit bis zu 10 Anzapfungen zur Maximierung der Vorwärmeranzahl

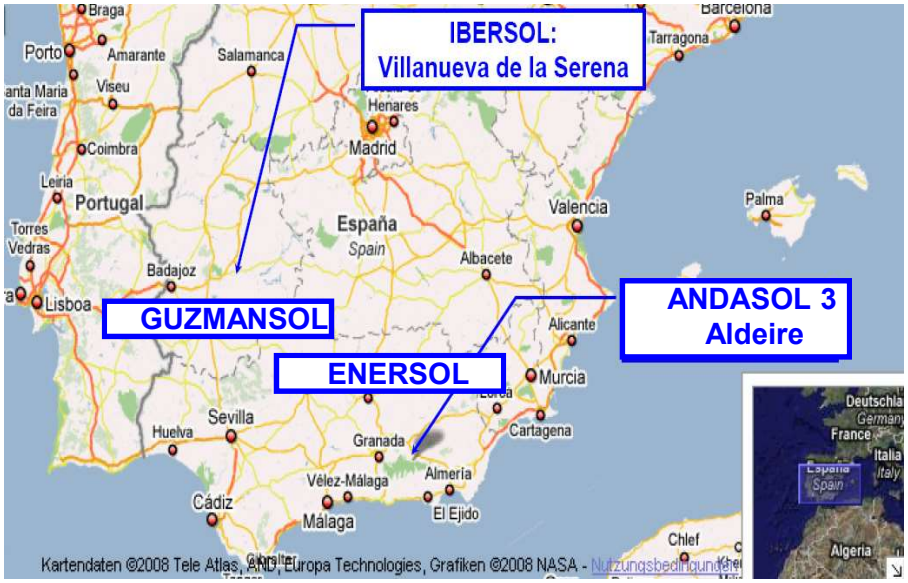
➡ **Kreislaufwirkungsgrad über 40%**

Kraftwerkskreislaufoptimierung



18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Ausgeführte Anlagen: Reheat-Turbine ANDASOL

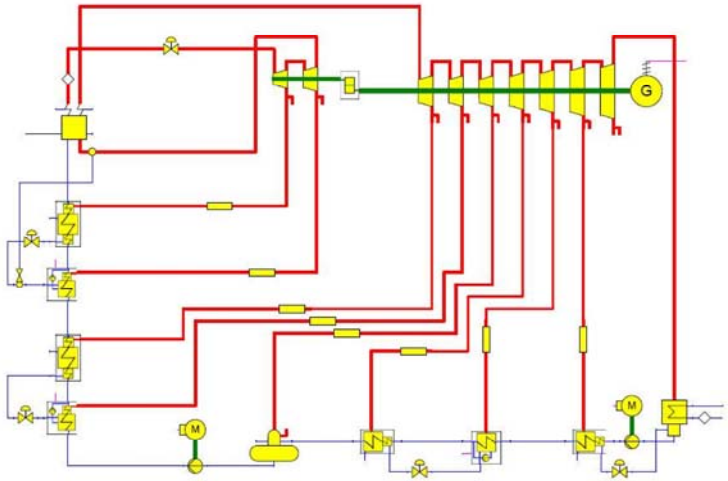




Dampfturbinendaten:

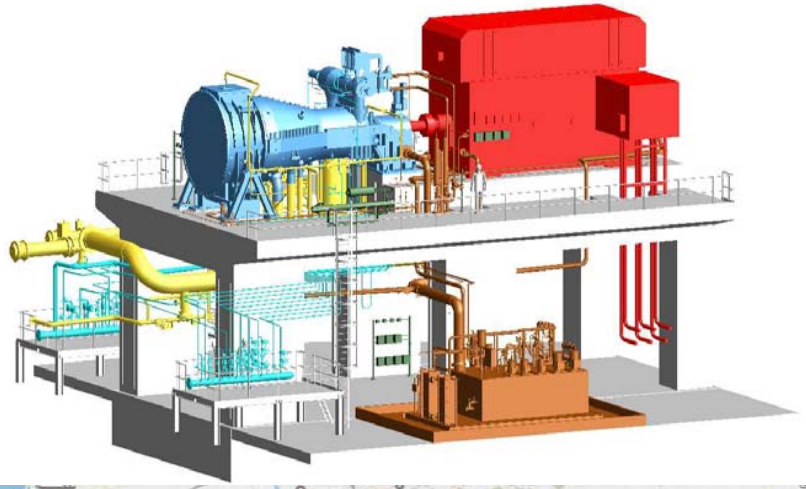
Frischdampf:	103 bar/ 383°C
ZÜ-Dampf:	19,5 bar/ 383°C
Gegendruck:	42 mbar
Drehzahl:	7.500 / 3.000 rpm
Gewicht:	~ 50 / 150 t
Leistung:	50 MW

Kraftwerkskreislauf mit 8 Anzapfungen:



Kreislaufwirkungsgrad > 41%

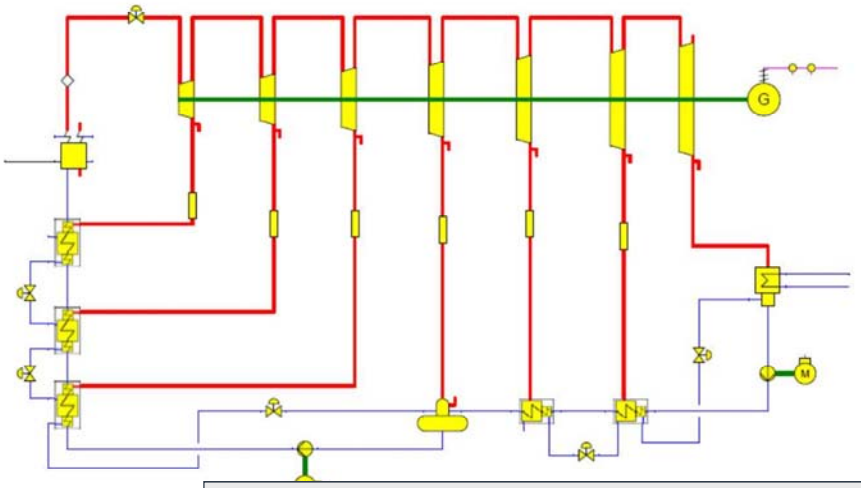
18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Ausgeführte Anlagen: Non-Reheat-Turbine SHAMS



Dampfturbinendaten:

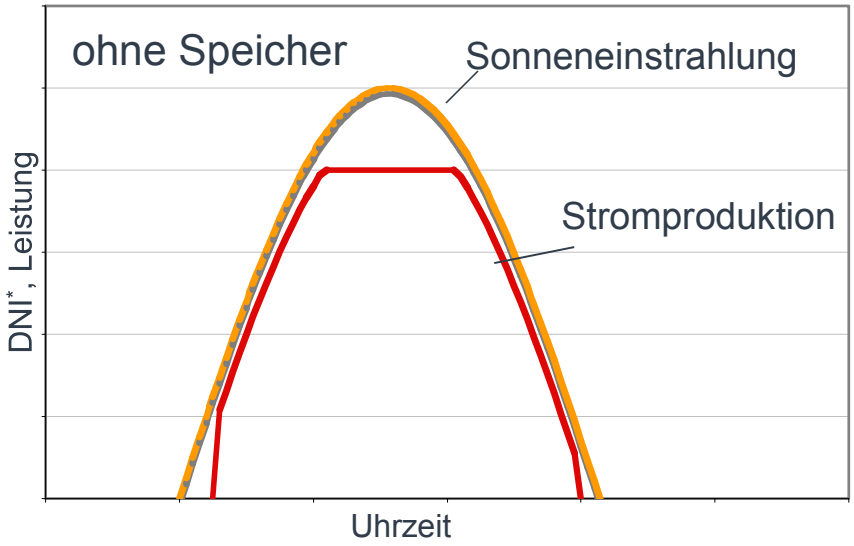
Frischdampfdruck:	100 bar/ 540°C
Abdampfdruck:	130 mbar
Drehzahl:	3.000 rpm
Gewicht:	~ 195 t
Leistung:	125 MW

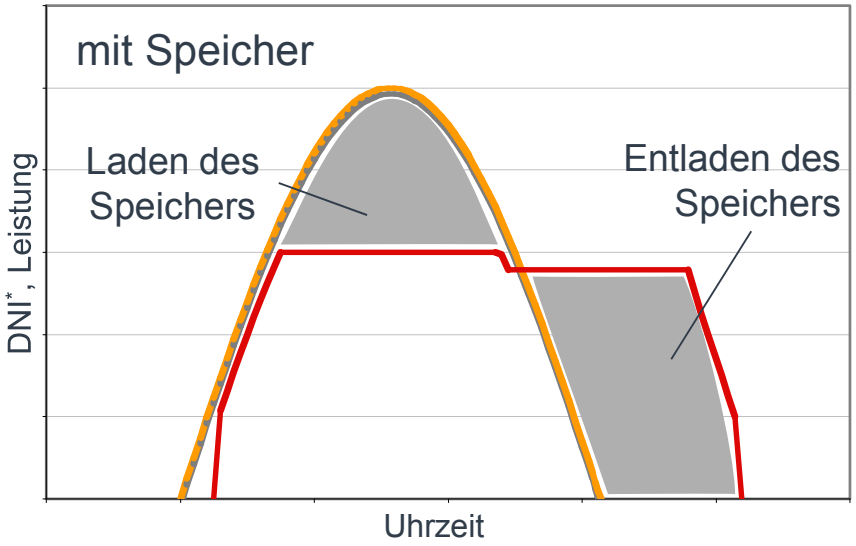
Kraftwerkskreislauf mit 6 Anzapfungen:



Kreislaufwirkungsgrad > 40%

Leistungsabgabe eines Solarkraftwerks mit Parabolrinne:





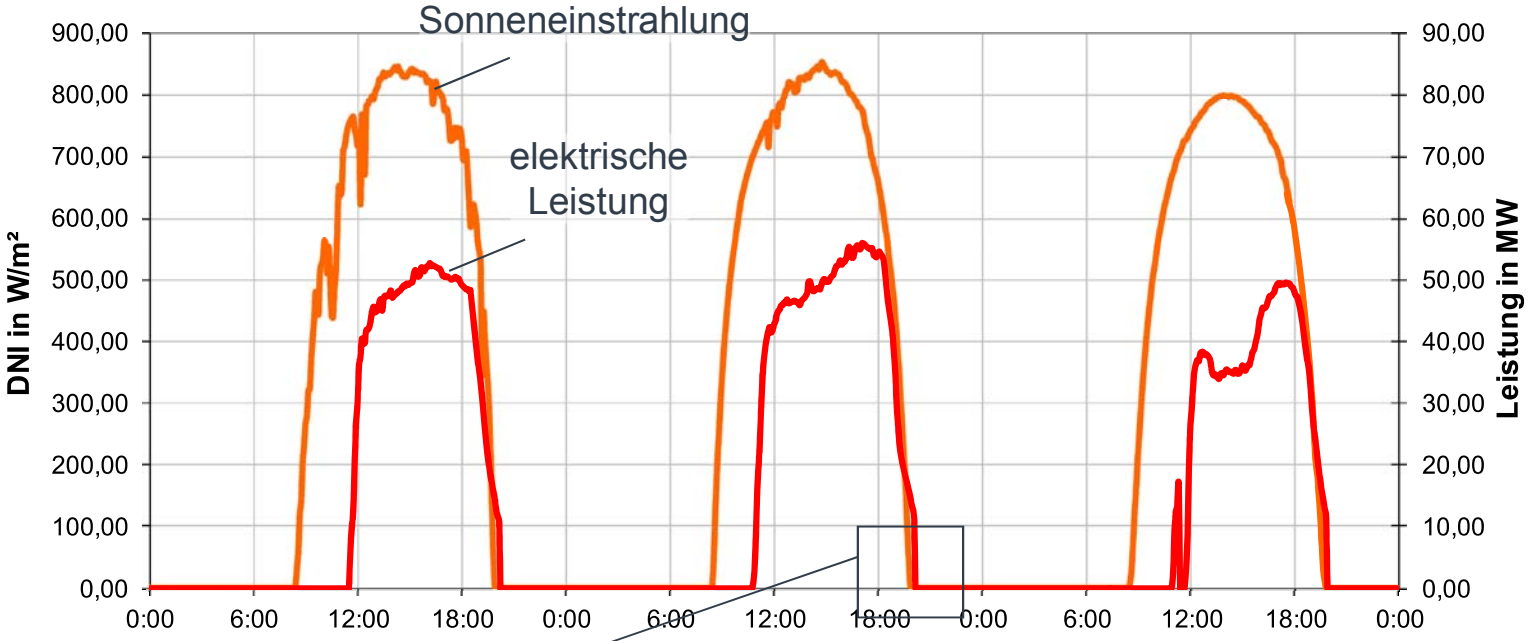
Vor- / Nachteile eines thermischen Speichers

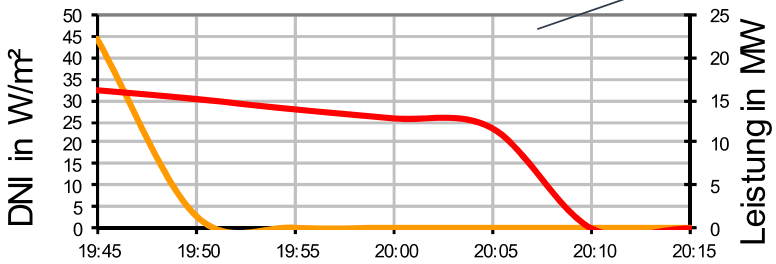
+ längere Stromproduktion
+ Stromerzeugung auch zu Zeiten hohen Strombedarfs möglich
- höhere Investitionskosten durch
  - Speicher + Speichermedium
  - Wärmetauscher Öl - Salz
  - größeres Solarfeld

Thermischer Speicher AndaSol3

*) DNI: dircet normal irradiance (Direkt-Normalstrahlung)

Reale Leistungsabgabe eines Solarkraftwerks mit Parabolrinne im Herbst :

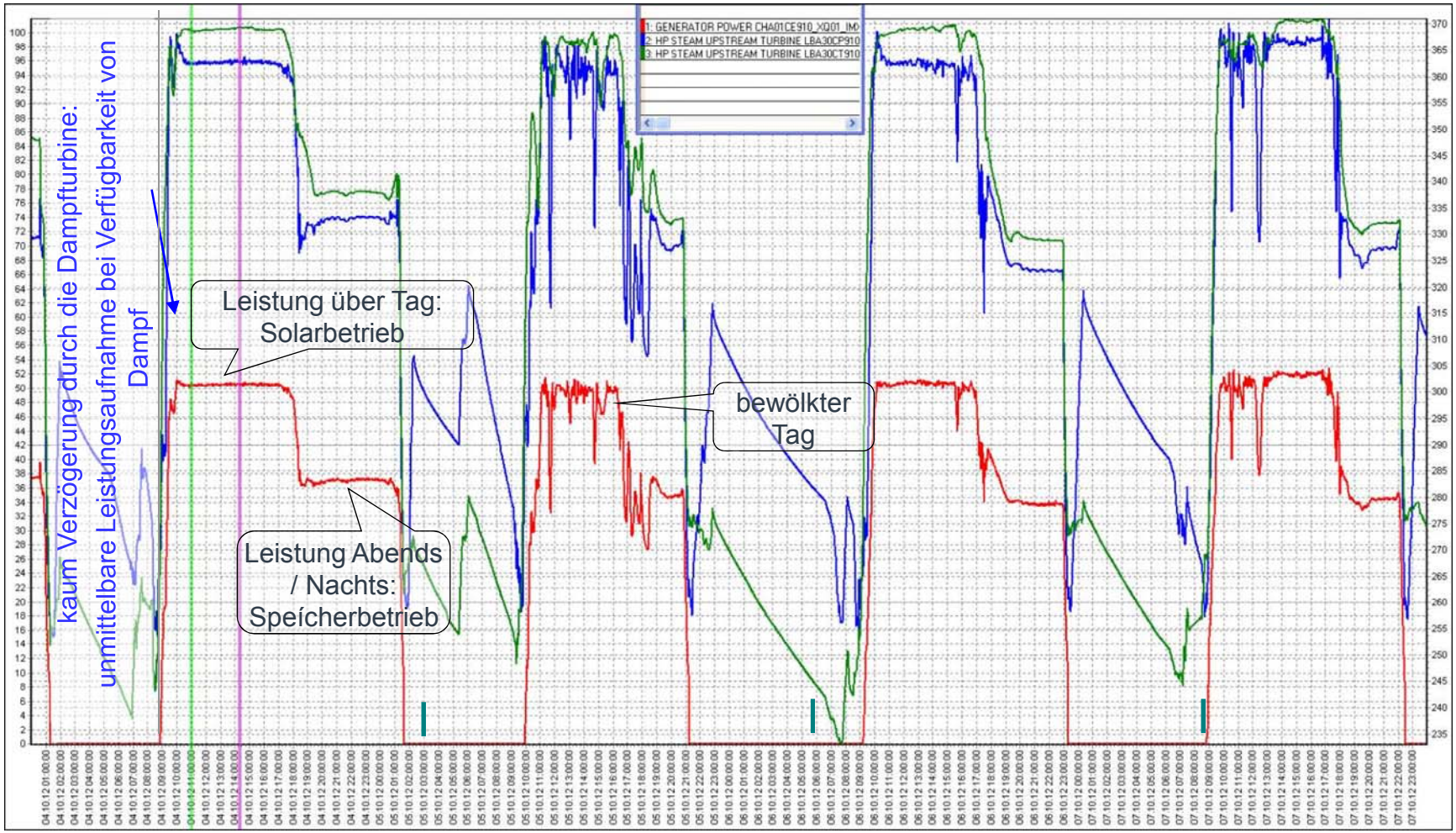




Nach Sonnenuntergang wird die im HTF gespeicherte thermische Energie noch für ca. 20 min. genutzt!

Reale Leistungsabgabe eines Solarkraftwerks mit Parabolrinne:

Frischdampfdruck Frischdampftemperatur elektr. Leistung



Design-Ziele:

- Täglicher Start der Dampfturbine über 30 Jahre
- Kurze Startzeiten

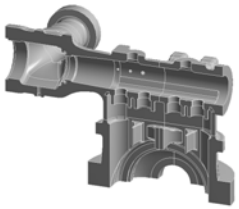
Das bedeutet:

- Die höchsten Belastungen der Turbine treten während der Startphase auf.
- Extrem kurze Startzeiten führen zu extrem großen Temperaturgradienten und damit verbundenen Materialbelastungen für die Komponenten (Thermo-Stress).

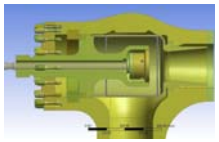
➡ Die Bewertung der hochbelasteten Dampfturbinenkomponenten macht aufwändige FEM-Analysen erforderlich.

Hochbelastete Dampfturbinenkomponenten:

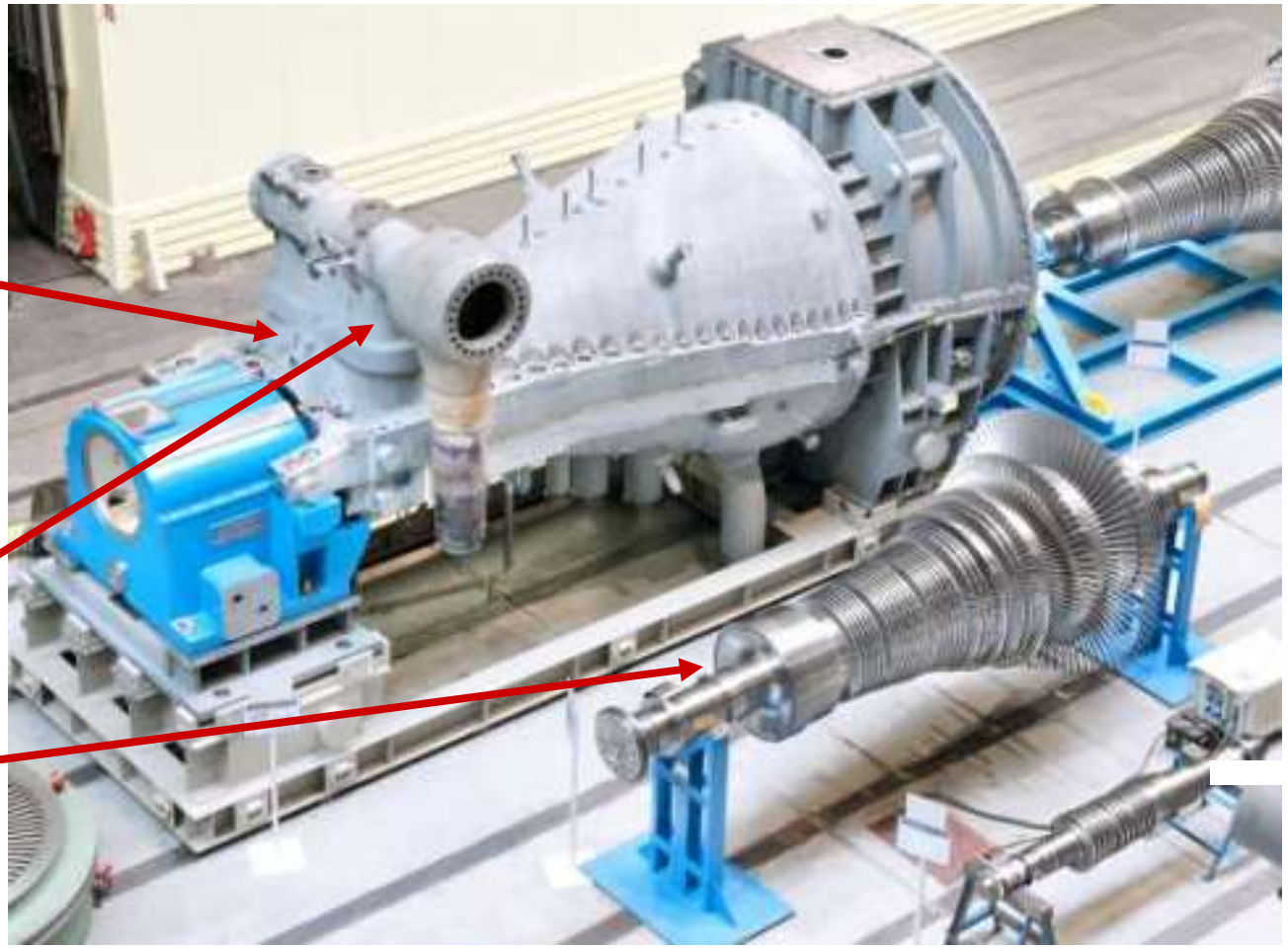
Einströmgehäuse



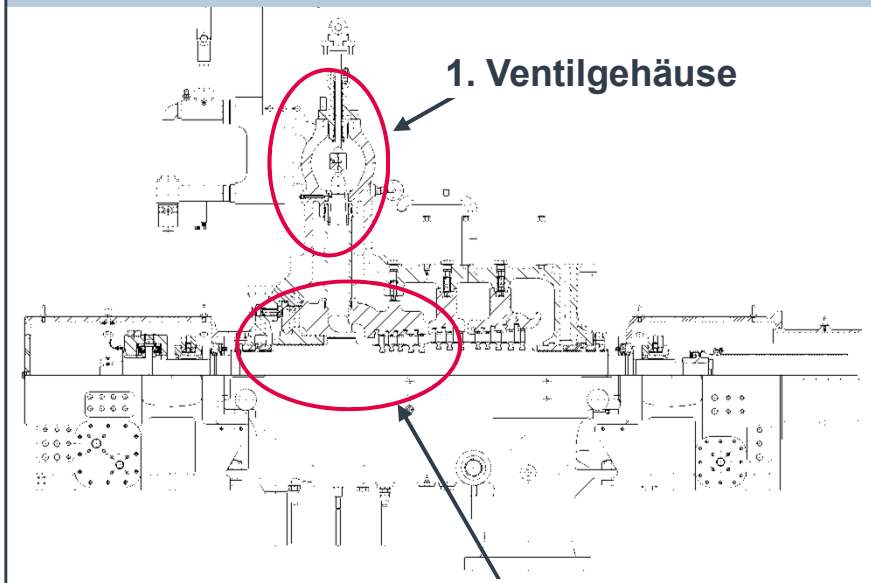
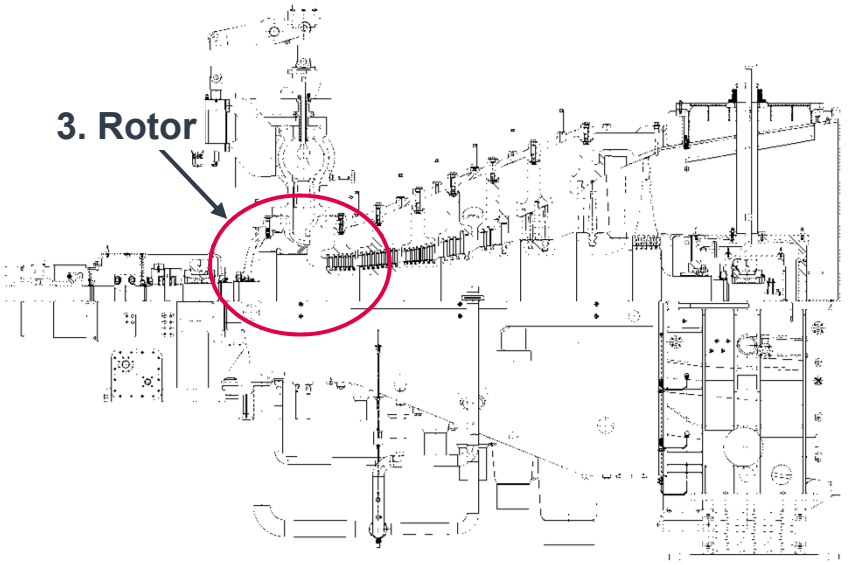
Ventile



Rotor



18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Flexibler Betrieb

HD-Turbine	ND-Turbine
	

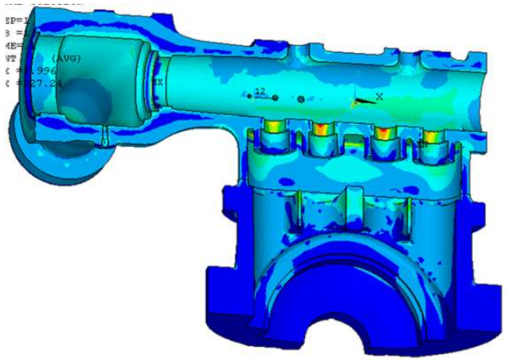
Für täglichen Start-up sind die “heißen” Turbinenbereiche zu bewerten:

1. Ventilgehäuse
2. Innengehäuse
3. Einströmbereiche und Rotor

18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Flexibler Betrieb

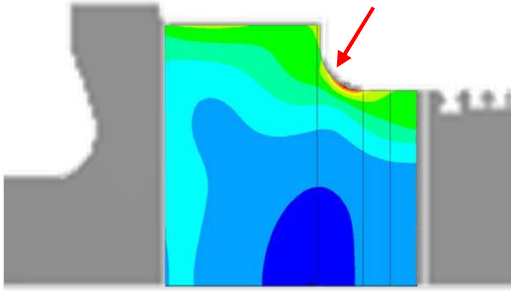
Transiente FEM-Analysen der Hauptkomponenten:

Ventilgehäuse



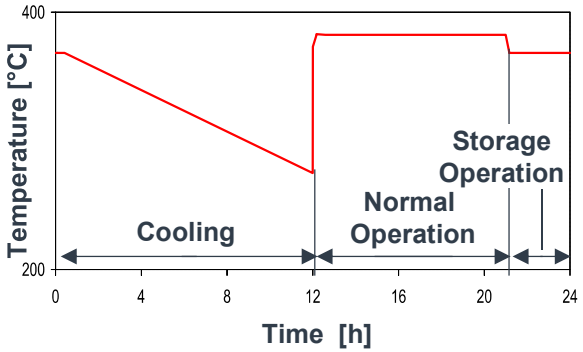
Innengehäuse

Rotor

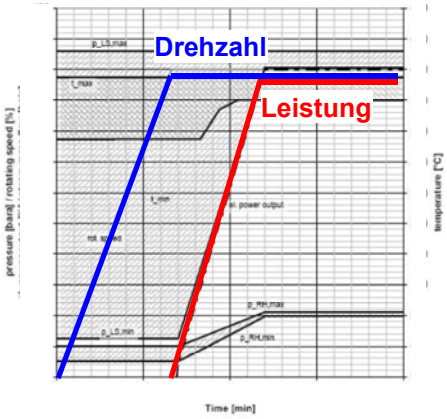


Flexibler Betrieb & Schnellstart:

Tägliche Betriebskurve



Heißstartkurve



Schnellstartfähigkeit

Täglicher Start über 30 Jahre

- 11.000 Zyklen

Heißstart nach 8 Stunden Stillstand ohne Leistungsbegrenzung

- Nach 12 min. auf Vollast

Transiente FEM-Berechungen des Rotors:

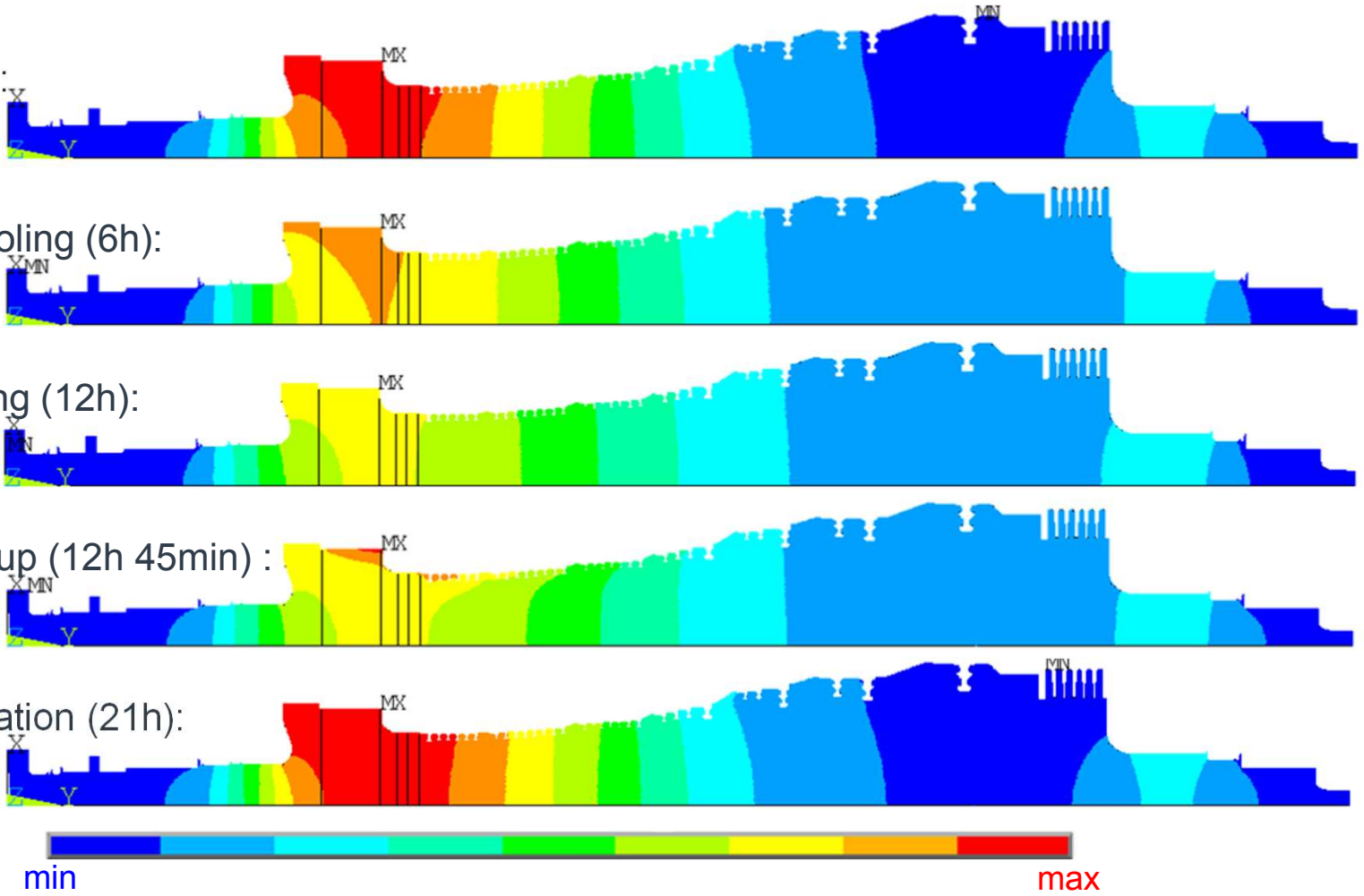
Storage (0h):

Middle of cooling (6h):

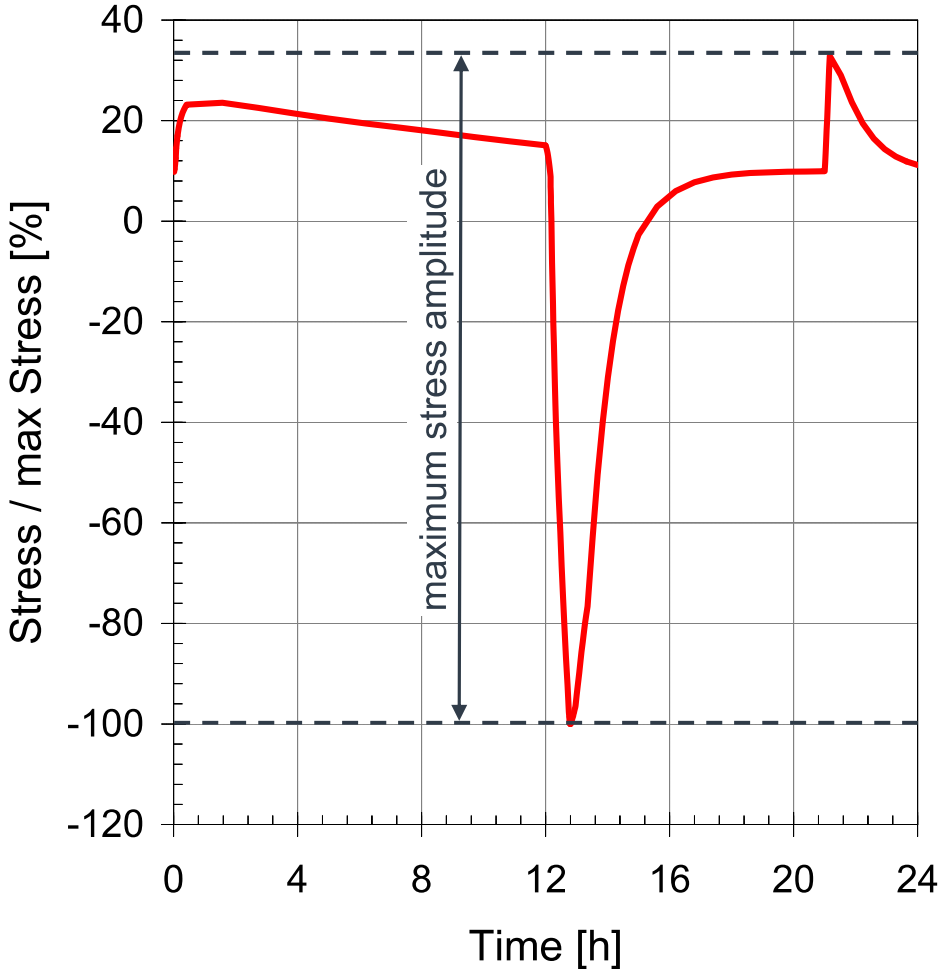
End of cooling (12h):

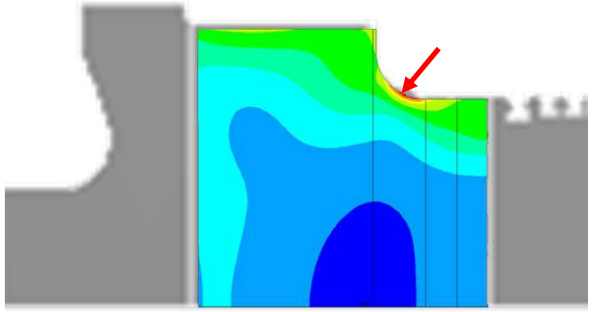
End of start up (12h 45min) :

Steady operation (21h):



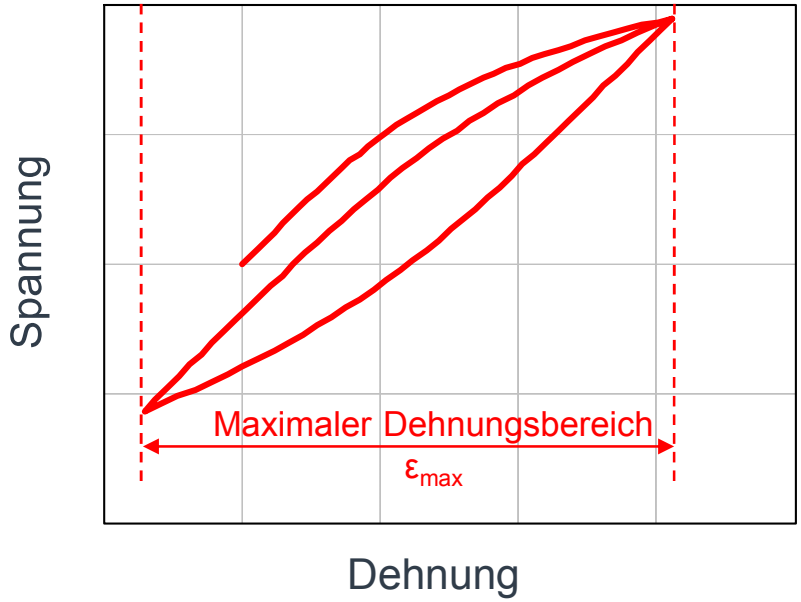
Transiente Stress-Amplitude an ausgewählten Punkten des Rotors:

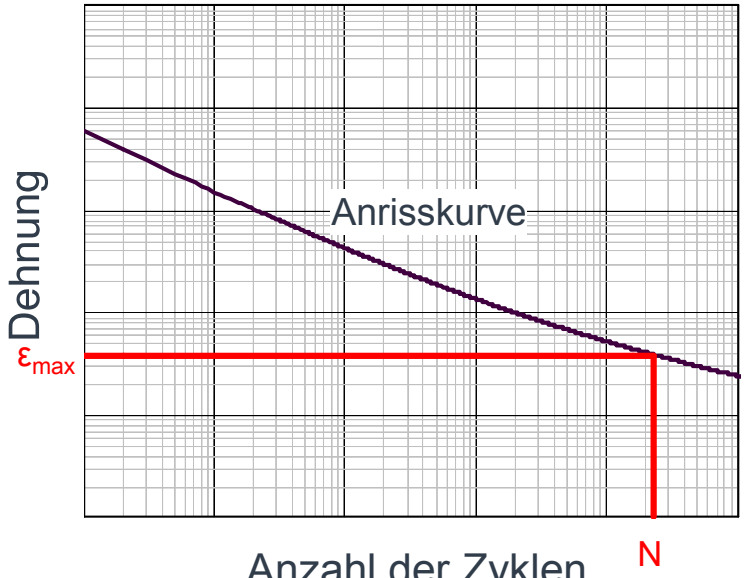




- Die kritische Stress-Amplitude wird täglich durchfahren.
- Im Rahmen der Analyse werden die am höchsten belasteten Punkte der jeweiligen Komponente ermittelt und bewertet.

LCF-Analyse und Bestimmung der Zyklenanzahl:

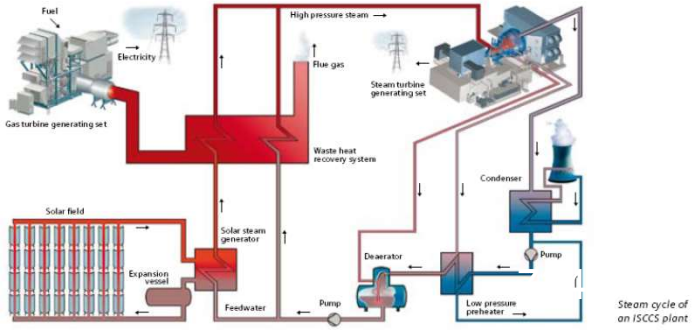




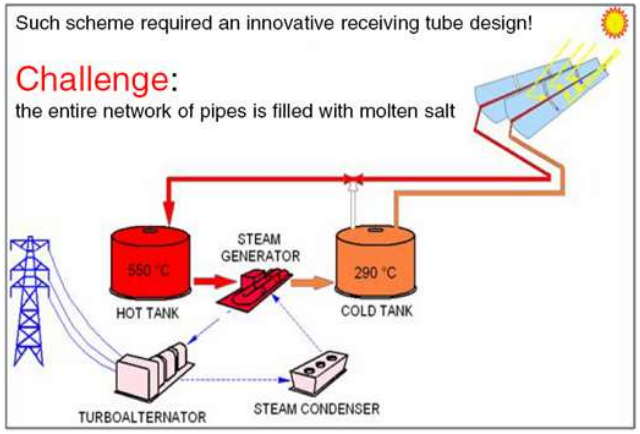
- Aus der elastischen Spannungsschwingbreite lässt sich mit Hilfe der Neuber-Hyperbel die Dehnungsschwingbreite ermitteln.
- Die maximal zulässige Zyklenzahl berechnet sich aus der Dehnungsschwing-breite und der Anrisskurve.
- Die maximal zulässige Zyklenzahl gibt die Anzahl der möglichen Starts vor.

18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Ausblick

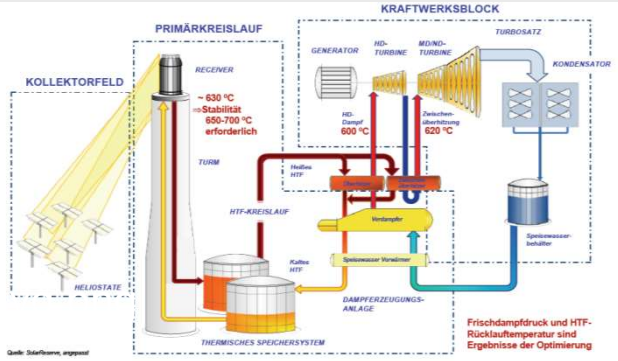
Hybrid-Prozess (Solar & Gasturbine):
540°C - 565°C ZÜ-Prozess



Parabolirinne & Direktverdampfung:
540°C - 565°C ZÜ- / Nicht-ZÜ-Prozess



Turmkonzept (Salzschmelze):
565°C – 600°C / 620°C ZÜ-Prozess



Anforderungen an die Dampfturbinentechnolgie

- Thermische Stabilität aller Komponenten bis zu 600°C / 620°C
- Neue Kühlkonzepte für alle hochtemperatur-belasteten Turbinenkomponenten
- Besondere Materialkonzepte
- Optimierte Start-up und erweiterte Lebenszykluskonzepte

18. Kölner Sonnenkolloquium
Anforderungen an Solardampfturbinen für flexiblen Betrieb
Zusammenfassung

- MAN Diesel & Turbo hat insgesamt 6 Dampfturbinen von 10 MW bis zu 125 MW mit den zugehörigen Wasser-Dampf-Kreisläufen entwickelt, hergestellt und erfolgreich in Betrieb genommen.
- Die Turbinenfahrweise wurde durch Speicherbetrieb optimiert:
  Durch Ausdehnung des Turbinenbetriebs über den Sonnenuntergang hinaus, wurden Stillstandzeiten und Auskühlen der Maschine minimiert.
  Auf diese Weise wurden lebensdauerschonende Heißstarts bei Sonnenaufgang ermöglicht.
- Durch das Lastkollektiv von ca. 11.000 täglichen Schnellstarts über 30 Betriebsjahre bei höchster Verfügbarkeit werden besondere Anforderungen an das Turbinendesign gestellt. Alle Komponenten wurden hierauf ausgelegt.
- Künftige Anforderungen an die Dampfturbinen für Solaranwendungen gehen in Richtung höherer Prozesstemperaturen von oberhalb 565°C. Entsprechende Entwicklungsvorhaben für diese Hochtemperaturanwendungen in Kombination mit Schnell- und Vielstartfähigkeit auch mit externen Forschungspartnern sind in der Planung bzw. laufen bereits.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Do you have any more questions?

Dr. Mark André Schwarz
mark.andre.schwarz@man.eu

Dr. Thomas Polklas
thomas.polklas@man.eu

Disclaimer

All data provided in this document is non-binding.

This data serves informational purposes only and is especially not guaranteed in any way. Depending on the subsequent specific individual projects, the relevant data may be subject to changes and will be assessed and determined individually for each project. This will depend on the particular characteristics of each individual project, especially specific site and operational conditions.