



# Methoden zur Nutzung meteorologischer Vorhersageunsicherheiten für die Betriebsoptimierung eines solarthermischen Kraftwerks

Konstantin Bubolz, Marion Schroedter-Homscheidt, Tobias Hirsch



Wissen für Morgen



# Gliederung

1. Solarthermische Kraftwerke und Meteorologie
2. Betriebsoptimierung
3. Methoden zur Nutzung von Unsicherheiten
4. Optimiererentwicklung



# 1. Solarthermische Kraftwerke und Meteorologie



Solarthermisches Kraftwerk Gemasolar, Anlage von Torresol Energy, entwickelt von SENER ©SENER

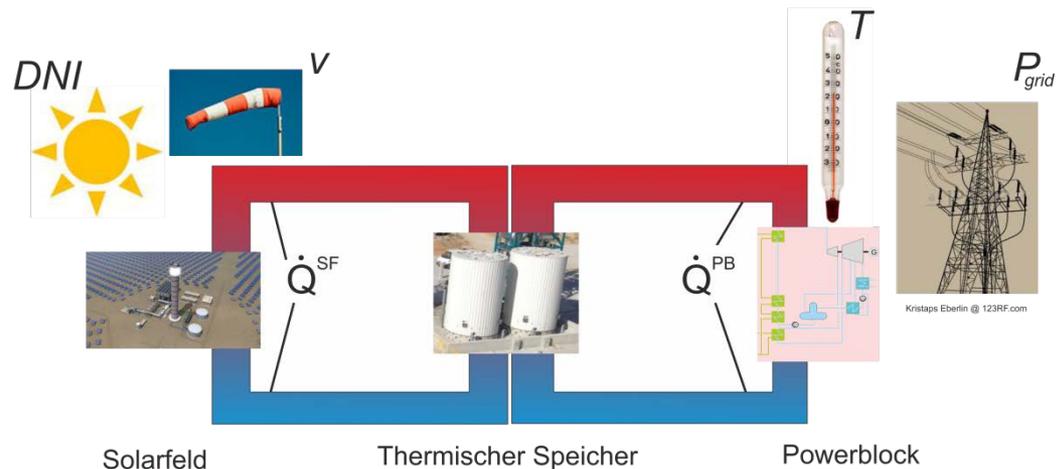
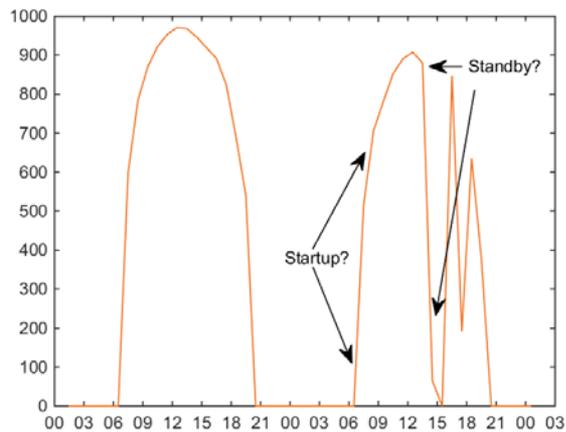


Andasol, Spanien. Foto von SolarMillenium AG, ©RheinEnergie AG



# 1. Solarthermische Kraftwerke und Meteorologie

- Subsysteme: Solarfeld, Thermischer Speicher, Powerblock
- *DNI*: Ressource, kritisch bei Einstrahlungsschwankungen
- *v*: Notabschaltung, Wärmeverluste
- *T*: Niedrige Temperatur = Effiziente Kühlung
- Maximal verfügbare Solarfeldleistung  $\dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)$
- Powerblockleistung  $P_{grid}(\dot{Q}^{PB}, \dot{Q}^{SF}, T)$

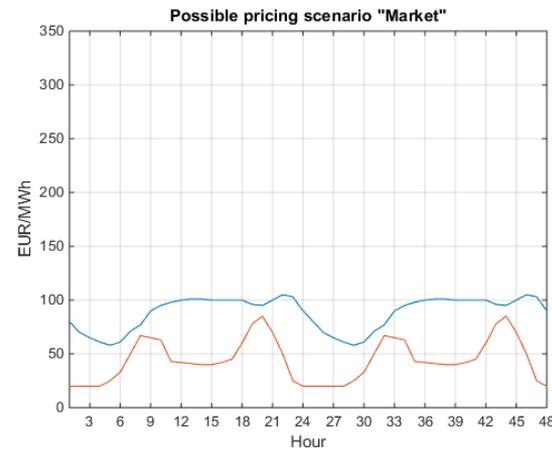
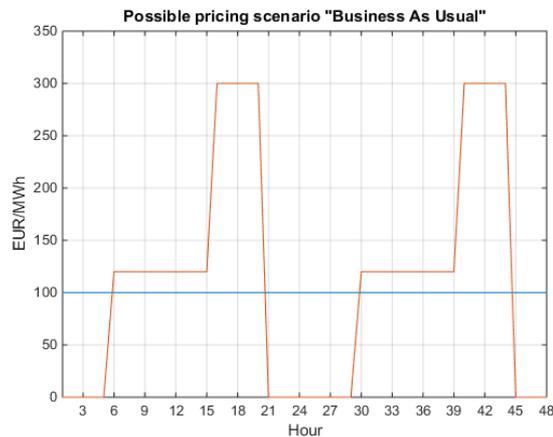
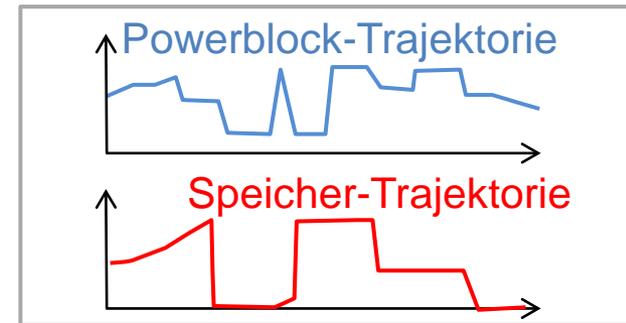


## 2. Betriebsoptimierung

- Zielfunktion/Gewinn:

$$f(\dot{Q}^{PB}, \dot{Q}^{SF}) = M \cdot P_{grid}(\dot{Q}^{PB}, \dot{Q}^{SF}, T) \cdot \Delta t, [M] = \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

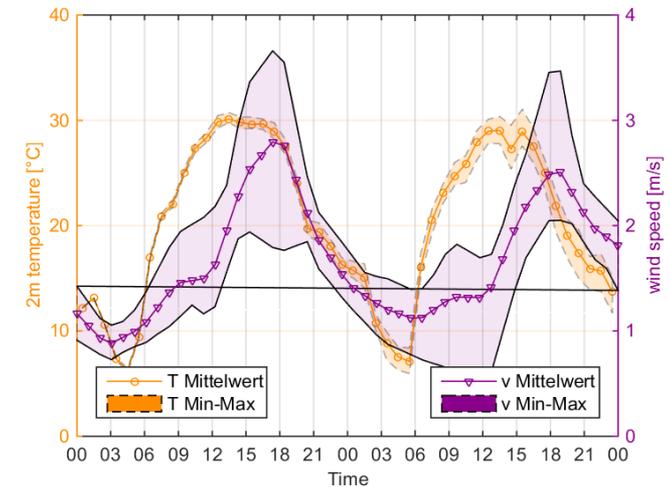
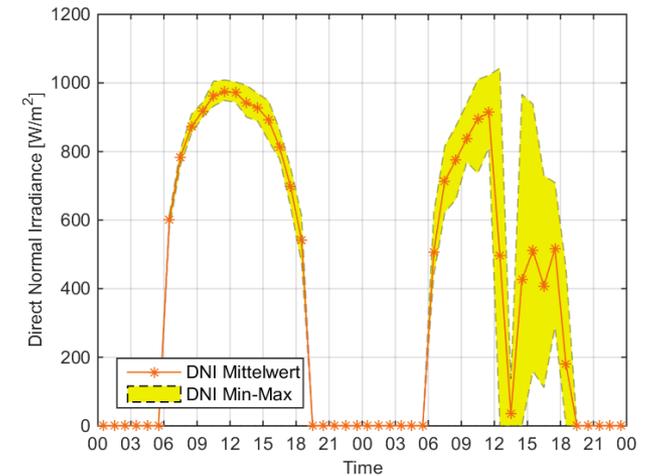
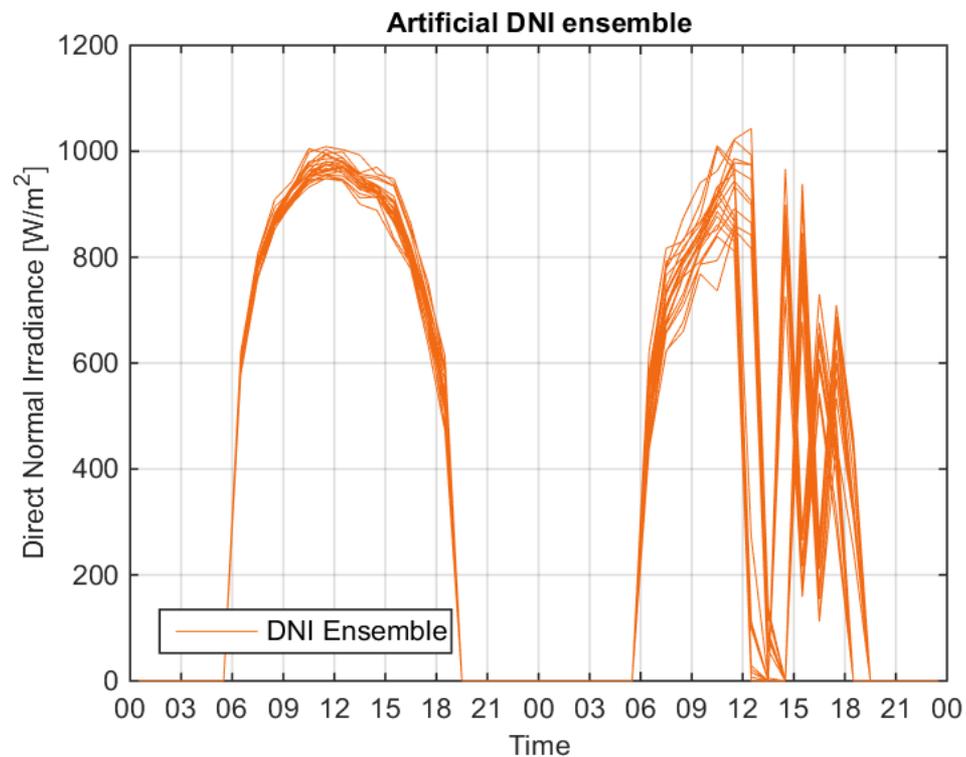
- Wähle  $\dot{Q}_k^{PB}$  ( $\dot{Q}_k^{SF}$ ) optimal für 48h Zeithorizont
- Restriktion(en):  $\dot{Q}^{SF} \leq \dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)$
- **Wie werden Vorhersageunsicherheiten in der Optimierung berücksichtigt?**



# 3. Methoden zur Nutzung von Unsicherheiten



- Ensemble-Vorhersagen (z.B.  $N = 20$ )

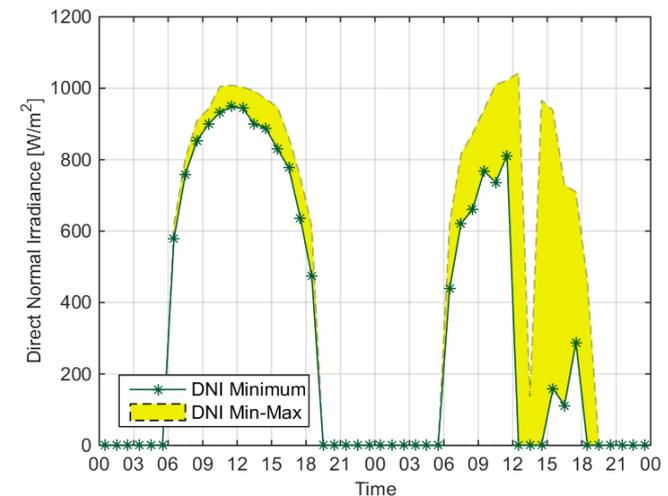
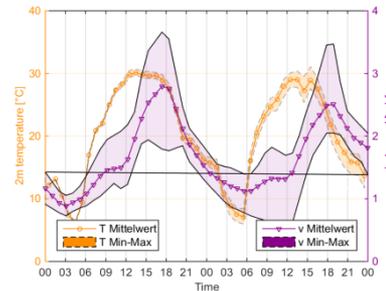
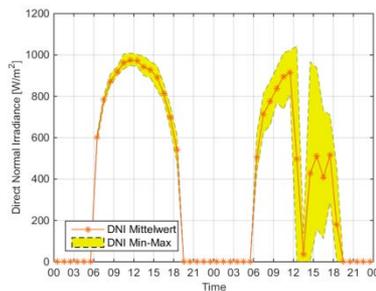


### 3. Methoden zur Nutzung von Unsicherheiten

- Ensemble-Vorhersagen (z.B.  $N = 20$ )
- Unsicherheiten: Ensemble  $i$  mit Wahrscheinlichkeit  $p_i = \frac{1}{20}$
- Planung der Solarfeldleistung soll unter Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zuverlässig sein:

$$\Pr\{\dot{Q}^{SF} \leq \dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)\} \geq p_{reliability}$$

( $p_{reliability} = 100\% \rightarrow$  DNI-Minimum)

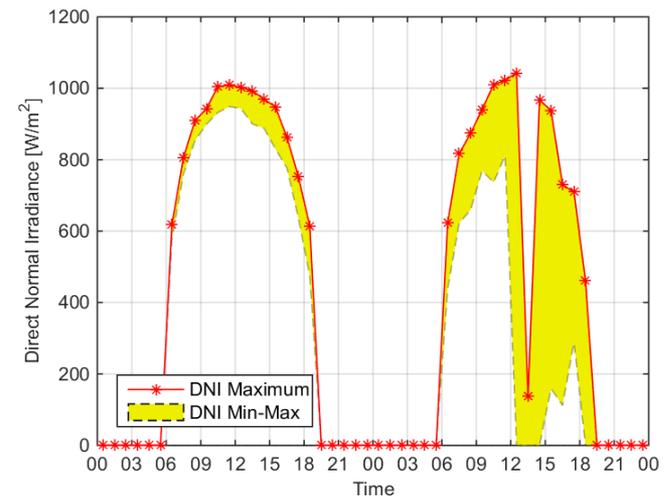
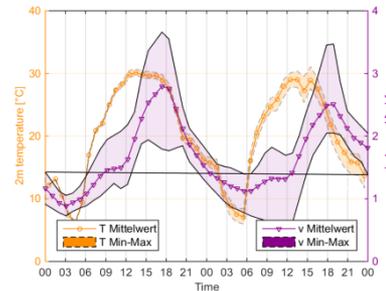
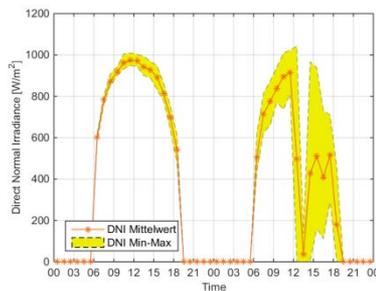


### 3. Methoden zur Nutzung von Unsicherheiten

- Ensemble-Vorhersagen (z.B.  $N = 20$ )
- Unsicherheiten: Ensemble  $i$  mit Wahrscheinlichkeit  $p_i = \frac{1}{20}$
- Planung der Solarfeldleistung soll unter Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zuverlässig sein:

$$\Pr\{\dot{Q}^{SF} \leq \dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)\} \geq p_{reliability}$$

( $p_{reliability} = 100\% \rightarrow$  DNI-Minimum,  $p_{reliability} = 0\% \rightarrow$  DNI-Maximum)



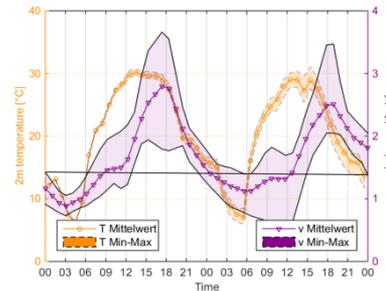
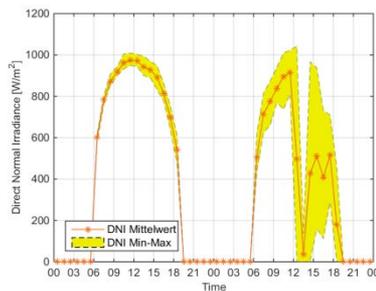
### 3. Methoden zur Nutzung von Unsicherheiten

- Ensemble-Vorhersagen (z.B.  $N = 20$ )
- Unsicherheiten: Ensemble  $i$  mit Wahrscheinlichkeit  $p_i = \frac{1}{20}$
- Planung der Solarfeldleistung soll unter Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zuverlässig sein:

$$\Pr\{\dot{Q}^{SF} \leq \dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)\} \geq p_{reliability}$$

- Powerblockleistung repräsentiert Erwartungswert:

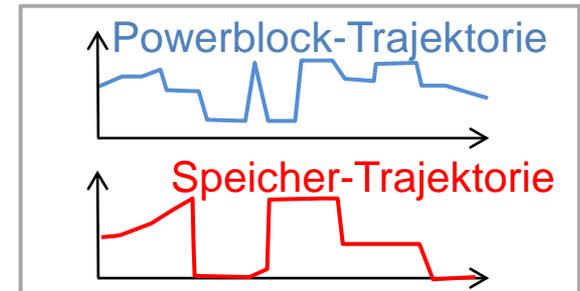
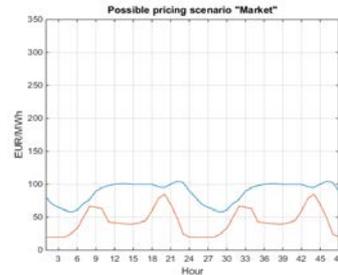
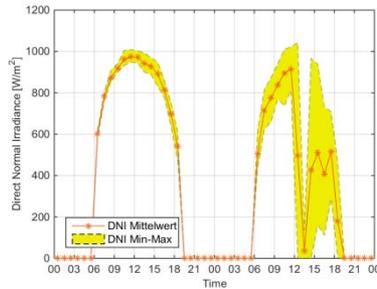
$$\hat{P}_{grid}(\dot{Q}^{PB}, \dot{Q}^{SF}, (T)_{i=1}^{20}) = \sum_{i=1}^{20} P_{grid}(\dot{Q}^{PB}, \dot{Q}^{SF}, T_i) \cdot p_i$$





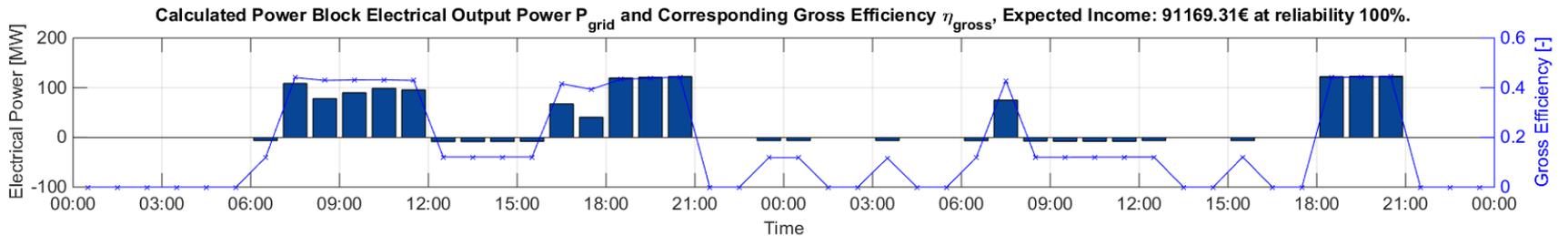
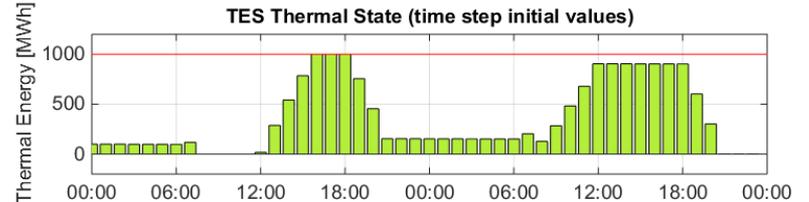
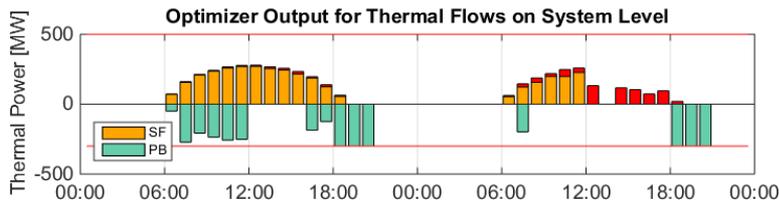
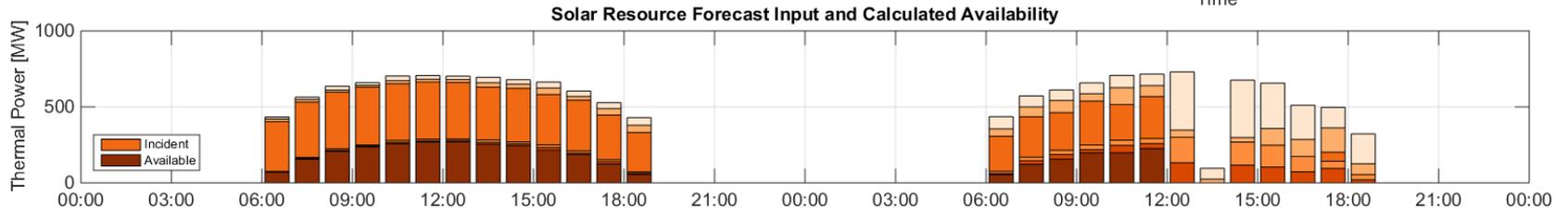
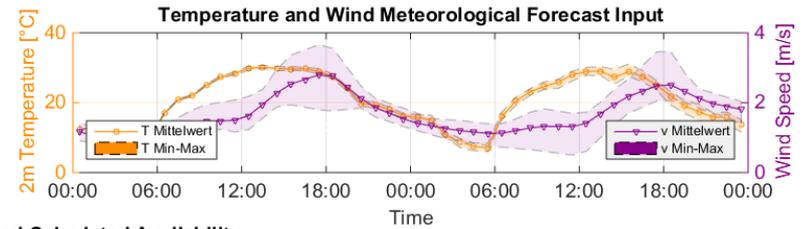
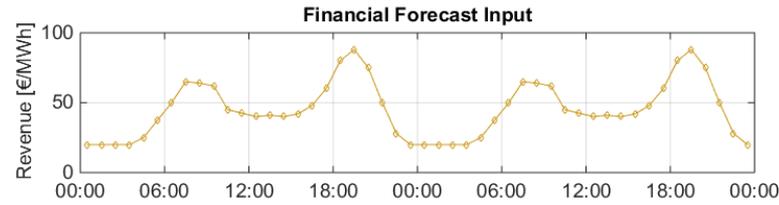
# 4. Optimiererentwicklung

- Brute-Force? Viele Trajektorien → Nicht effizient
- Wittmann et al. [4]: Deterministische Optimierung
- Erster Lösungsansatz: Stochastische Lineare Optimierung



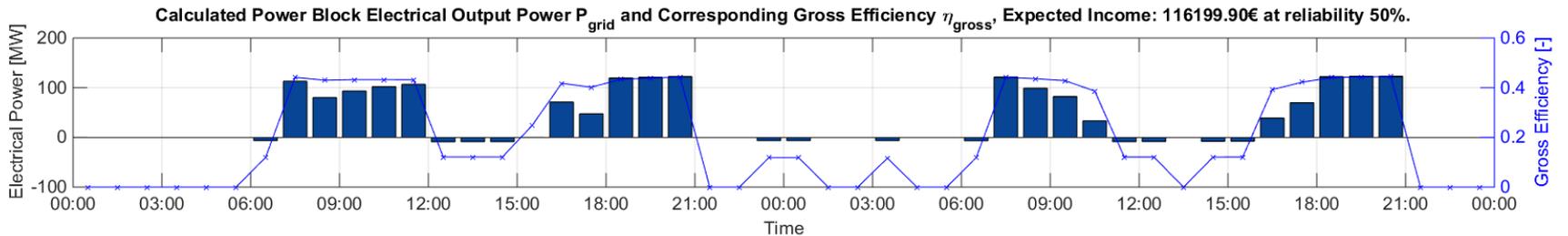
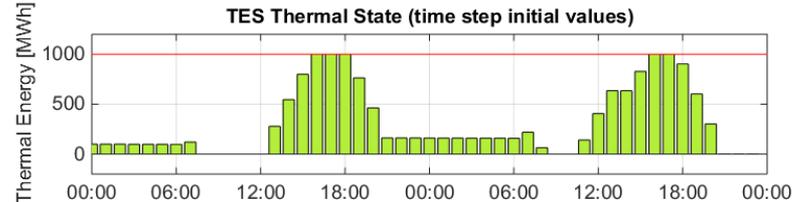
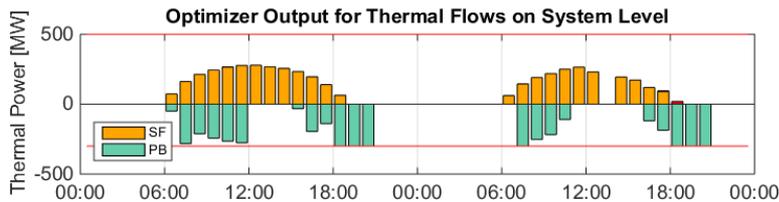
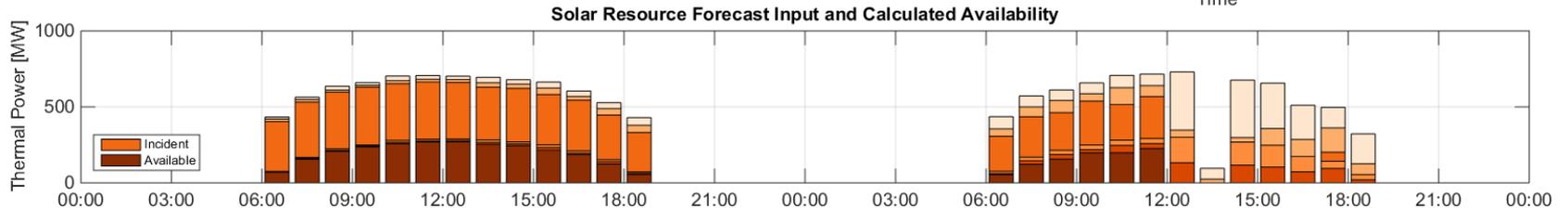
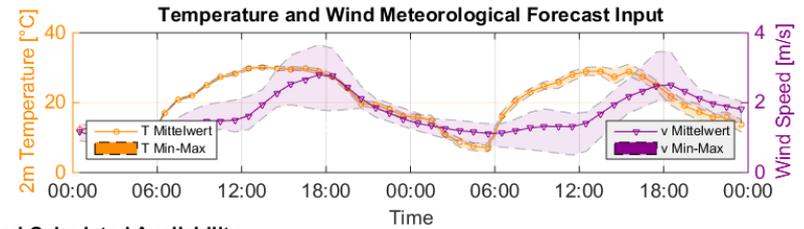
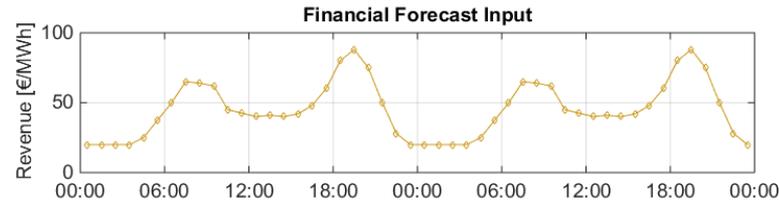


# 4. Optimiererentwicklung





# 4. Optimiererentwicklung





## Diskussion und Ausblick

- Verschiedene Umsetzungen von  $\Pr\{\dot{Q}^{SF} \leq \dot{Q}_{max}^{SF}(DNI, v)\} \geq p_{reliability}$  prüfen
- Zahl von Ensembles
- Wie differenziert sollten die meteorologischen Größen nach ihrem lokalen Einfluss betrachtet werden? (DNI-Summen über den Gesamtzeitraum sind wesentlich, hohe Windlasten nur zeitlich begrenzt, etc.)
- Vorhersagemodelle in Chile, Indien, Marokko, Südafrika, Saudi-Arabien und Spanien
- Weitere Anregungen?

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



Das Projekt PreFlexMS wird gefördert im Rahmen des Horizon 2020 Programms der Europäischen Union.





# Referenzen

- [1] Shapiro et al. (2009) "Lectures on Stochastic Programming – Modeling and Theory", *MPS/SIAM Series on Optimization* **9**, Philadelphia.
- [2] Vanderbei R. (2001) "Linear Programming: Foundations and Extensions", 2. Edition, Princeton.
- [3] Wittmann et al. (2008) „Case Studies on the Use of Solar Irradiance Forecast for Optimized Operation Strategies of Solar Thermal Power Plants”, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **1**.
- [4] Wittmann et al. (2011) "Methodology for Optimized Operation Strategies of Solar Thermal Power Plants with Integrated Heat Storage, *Solar Energy* **85** (4), 653-659.

