

# Solar goes Digital – Wie Solarwärme selbstlernende Algorithmen nutzt

Webinar, 2022.05.11

Viktor Unterberger



# Agenda

- Einleitung BEST
- Motivation und Status Solarthermie
- Vorstellung Projekt Ship2Fair
- Algorithmus
- Anwendungsbeispiele

# BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH



- **(COMET-)Kompetenzzentrum für Bioenergie und nachhaltige Technologien**
- **~100 Angestellte**
- **3 Standorte & 1 Forschungsstätte**
  - Graz (Hauptsitz), Wien, Wieselburg, Tulln
- **Eigentümer**





## Area 5.3 – Automation and Control

- Ursprung in modellbasierter Regelung von Biomassefeuerungen (seit April 2005)
- Sitz in Graz (Inffeldgasse 21b, technische Universität)





## Kompetenzen

- **Mathematische Modellierung**
- **Numerische Simulation**
- **Methoden zur Onlineschätzung nicht messbarer Größen**
- **Modellbasierte Regelung von Komponenten, Technologien/Anlagen und Systemen**
- **Übergeordnete Strategien für Betriebsoptimierung**

## Tätigkeitsfelder

- **Thermochemische Biomassekonversion**
  - Verbrennung und Vergasung
  - Festbett- und Wirbelschichtreaktoren
- **Biotechnologische Biomassekonversion**
- **Wärmetechnik**
  - **Solarthermie (und Langzeitspeicher)**
  - Wärmepumpen
  - Wärmenetze (generell hydraulische Wärmeverteilungssysteme)
  - Fernheizwerke
  - SIL/HIL Entwicklungsumgebungen für Wärmeerzeuger
- **Großtechnische Produktionsprozesse**



# Motivation und Status Solarthermie





**Der Wunsch nach Energieunabhängigkeit in der EU ist drastisch gestiegen ...**





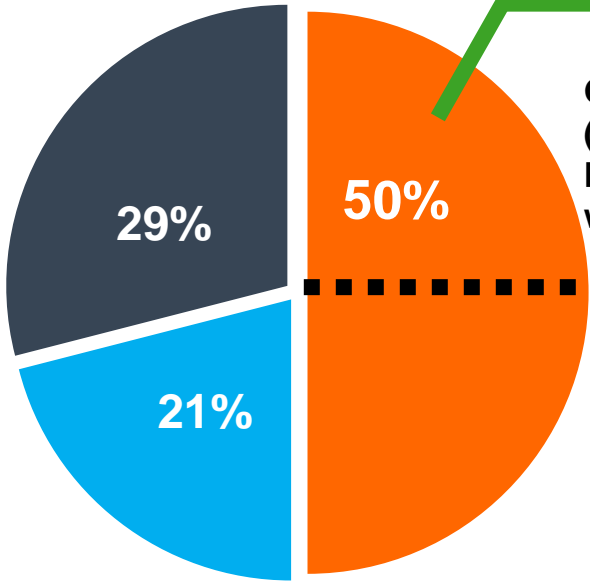
**Die Klimakrise ist kein Randthema mehr und sichtbar  
in Überflutungen, Waldbränden ...**





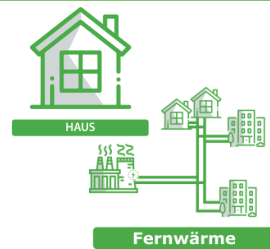
# Globaler Endenergieverbrauch ...

*#heatishalf*



■ Heat ■ Electricity ■ Transport

Gebäude  
(Heizung +  
Brauch-  
wasser)



Industrielle  
Prozesse

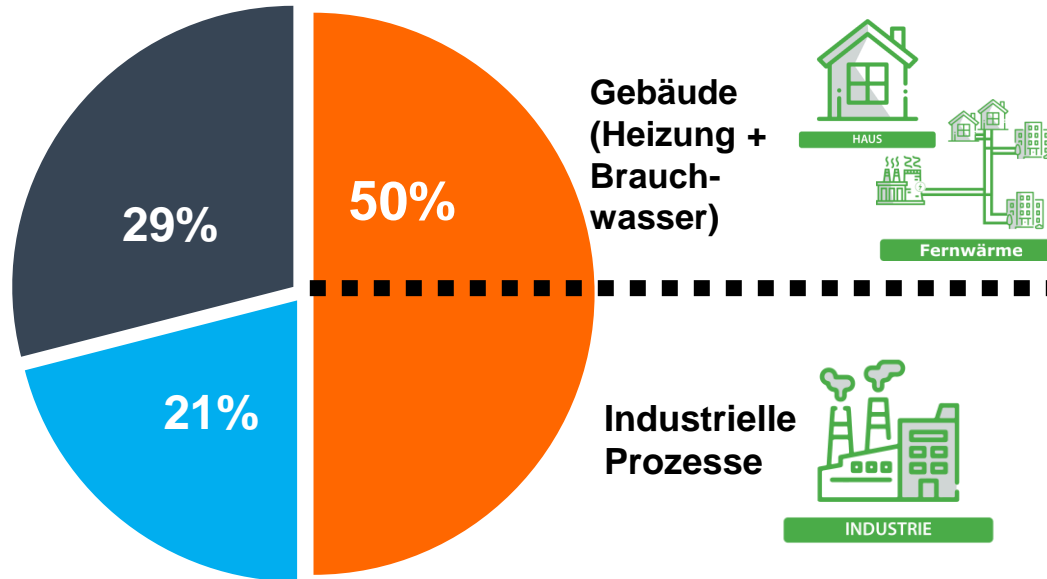


~40% der globalen  
CO<sub>2</sub> Emissionen



# Globaler Endenergieverbrauch ...

*#heatishalf*



■ Heat ■ Electricity ■ Transport

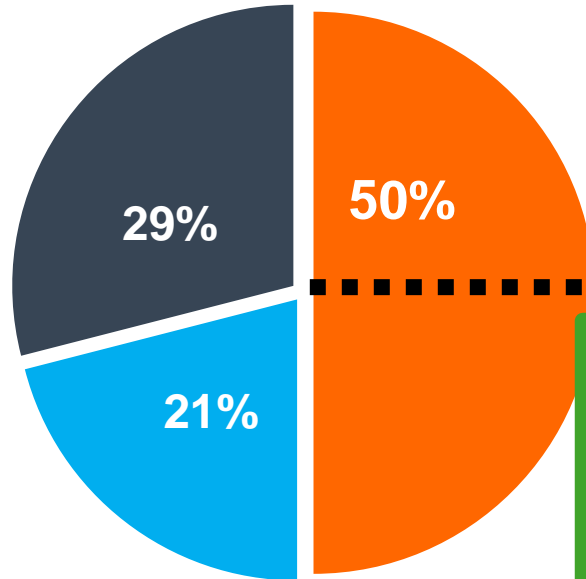
Solarthermische Anlagen eine **wertvolle Alternative**, um

1. **unabhängiger** von fossilen Brennstoffen zu werden und
2. den **Anteil der erneuerbaren Energien zu erhöhen**



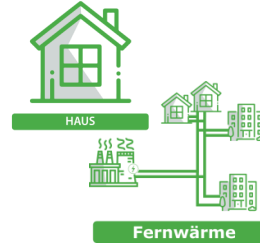
# Globaler Endenergieverbrauch ...

**#heatishalf**



■ Heat ■ Electricity ■ Transport

Gebäude  
(Heizung +  
Brauch-  
wasser)



Industrielle  
Prozesse



Verteilung Solar-  
kapazität [1]

**88%**  
~350 TWh

Potential bis  
2030 ([2], [3])

**+200  
TWh**

**12%**  
~50 TWh

**+200  
TWh**

**SHIP2FAIR**





# Projekt Ship2Fair

# SHIP2FAIR



<http://ship2fair-h2020.eu>

- **Projektdauer: 2018 – 2023 / 15 Partner**
- **ZIEL: Förderung und Vereinfachung der Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse (SHIP) des Agrar- und Lebensmittelsektor, durch Verbesserung von Planung, Regelung sowie energetischer und wirtschaftlicher Analyse.**
- Zu diesem Zweck werden eine **Reihe von Tools und Methoden** entwickelt welche an **4 Industriestandorten** (Italien, Spanien, Frankreich, Portugal) umgesetzt werden sollen.



INDUSTRIAL SOLAR  
renewables enable

SOLID  
Sustainable Energy

TVP SOLAR

BEST  
Sustainable Technology

c22

edf

LINKS  
Energy Solutions

RI4R

cooperativas  
agro-alimentarias  
EDAPAs

LARNAUDIE  
LABORATOIRE

MARTINI

RAR  
RESEARCH & INNOVATION

RODEGAS  
RODA  
RASA ALTA

EUREC  
The Association of European  
Research Centres

# SHIP2FAIR – Control Tool



- Entwicklung eines „Control Tool“ entwickelt, welches die **Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse optimiert** von untergeordneten Regelungsaspekten bis hin zum optimalen Zusammenspiel aller vorhandenen Energieerzeuger.
- Dieses **Tool hat einen modularen Aufbau** wodurch es **flexibel auf eine Vielzahl von Systemen** angewendet werden kann, **je nach Anwendung** und **Automatisierungsgrad**. Das Tool besteht aus einem **Framework aus 5 Modulen**:



**Selbstlernender Algorithmus zur Vorhersage des Solarertrages**





# **Selbstlernender Algorithmus zur Vorhersage des Solarertrages**



# Motivation für Algorithmus

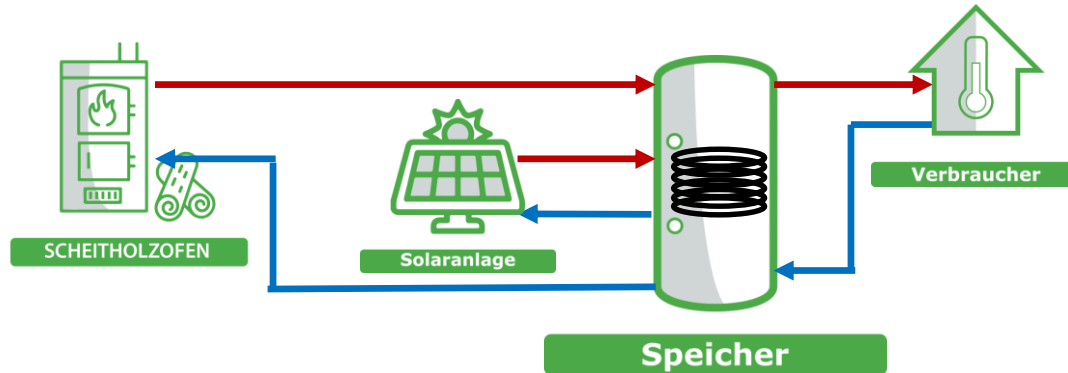
Friedrich2 2 7. Oktober 2021, 13:04:04 0  3

Ich verstehe nicht, was es da zu rechnen und zu prognostizieren gibt.  
Was an Wärme kommt, das nutzt man eben Und um eine Überhitzung zu vermeiden, gibt es Thermostate.

Was nutzt es mir, wenn ich schon vorher weiß, dass es zuwenig Sonnenwärme geben wird? Oder mehr als ich brauchen werde?

[Quelle: Die Wärme der Sonne optimal anzapfen - Forschung Spezial - derStandard.at › Wissenschaft](#) (abgerufen am 10.05.2022)

„Was an Wärme daherkommt nutzt man eben ...“



#### ▪ Ablauf

- 08:00 Uhr: Warmwasserspeicher wird leer
- 08:15 Uhr: Biomassekessel startet und heizt Warmwasserspeicher auf (z.B.: auf 30% oder 50%)
- 08:30 Uhr: Solarertrag wäre verfügbar gewesen
- 08:45 Uhr: Wärmebedarf wäre notwendig gewesen

#### ▪ Ergebnis bei Berücksichtigung von Vorhersage

- Start des Scheitholzessels wäre vermeidbar gewesen (= Brennstoffkostensparnis)
- Solarertrag hätte maximiert werden können → Betrieb bei besserem Wirkungsgrad



## „Um Überhitzung zu vermeiden, gibt es Thermostate ...“



- **Beispielsystem** Industrieanlage in Betrieb Mo. – Fr. Bestehend aus Warmwasserspeicher, Solaranlage, Abnehmer, Kühlturm
- **Ablauf**
  - Sa.: Sonniger Tag → Warmwasserspeicher wird voll geladen
  - So.: Sonniger Tag → Warmwasserspeicher bereits voll geladen zum Schutz der vor Überhitzung, wird Wärme über Kühlturm abgeleitet (= hoher Stromverbrauch)
- **Ergebnis bei Berücksichtigung von Vorhersage**
  - Speicher hätte Sa. Nacht „günstig“ an die Umgebung entladen werden → **Einsatz Kühlturm wäre vermeidbar gewesen** (=hohe Stromkostensparnis)
  - Bei genauer Prognose → **können Investitionskosten für Kühlturm entfallen**
  - Bei anderen Konfigurationen könnte **auch der Speicher „umgeladen“** werden oder am **Sa. Prozess gestartet/Reinigung durchgeführt** werden um alles zu nutzen



## Motivation - Zusammenfassung

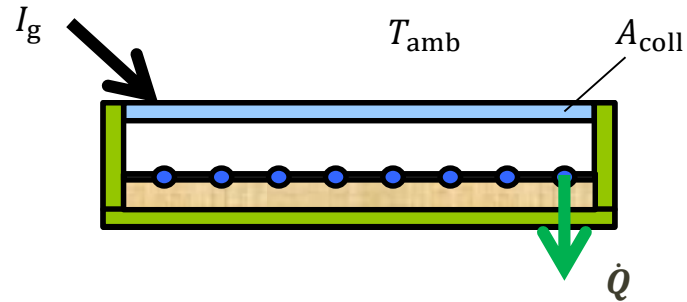
### Zusammenfassung:

Das Wissen des **zukünftigen Solarertrages** kann gemeinsam mit **weiteren Informationen** (z.B. das Wissen über den zukünftigen Wärmebedarf) genutzt werden um Systeme mit Solaranlagen **optimal zu betreiben** und ihr **Potential voll auszuschöpfen**  
(→ maximaler Solarertrag, minimaler Brennstoffeinsatz)



# Erster Ansatz – basierend auf Kollektormodell

- Statische Energiebilanz des Kollektors

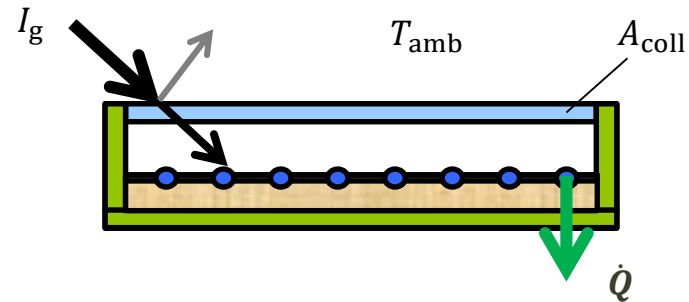






# Erster Ansatz – basierend auf Kollektormodell

- Statische Energiebilanz des Kollektors

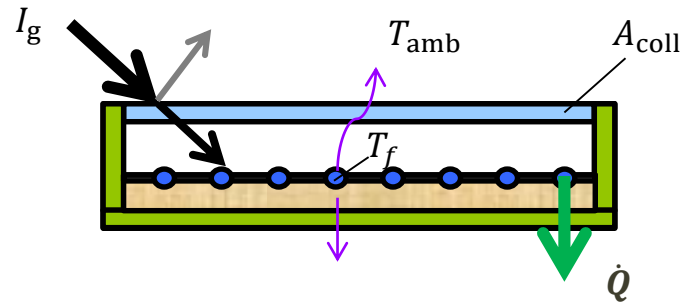


$$\dot{Q}(t) = \underbrace{c_0 A_{\text{coll}} I_g(t)}_{\substack{\text{W\u00e4rme abzgl.} \\ \text{opt. Verluste}}} -$$



# Erster Ansatz – basierend auf Kollektormodell

- Statische Energiebilanz des Kollektors

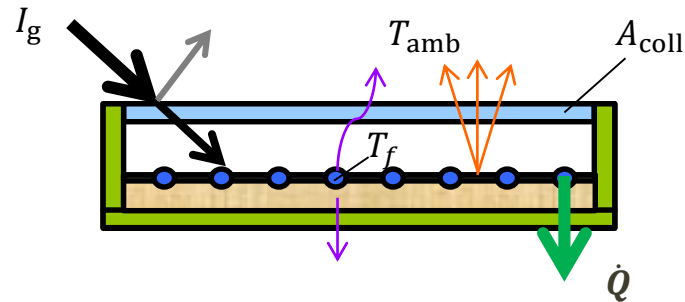


$$\dot{Q}(t) = \underbrace{c_0 A_{\text{coll}} I_g(t)}_{\substack{\text{Wärme abzgl.} \\ \text{opt. Verluste}}} - \underbrace{c_1 A_{\text{coll}} (\bar{T}_{\text{fl}}(t) - T_{\text{amb}}(t))}_{\substack{\text{Wärmeverluste} \\ \text{durch Leitung/Konvektion}}}$$



# Erster Ansatz – basierend auf Kollektormodell

- Statische Energiebilanz des Kollektors

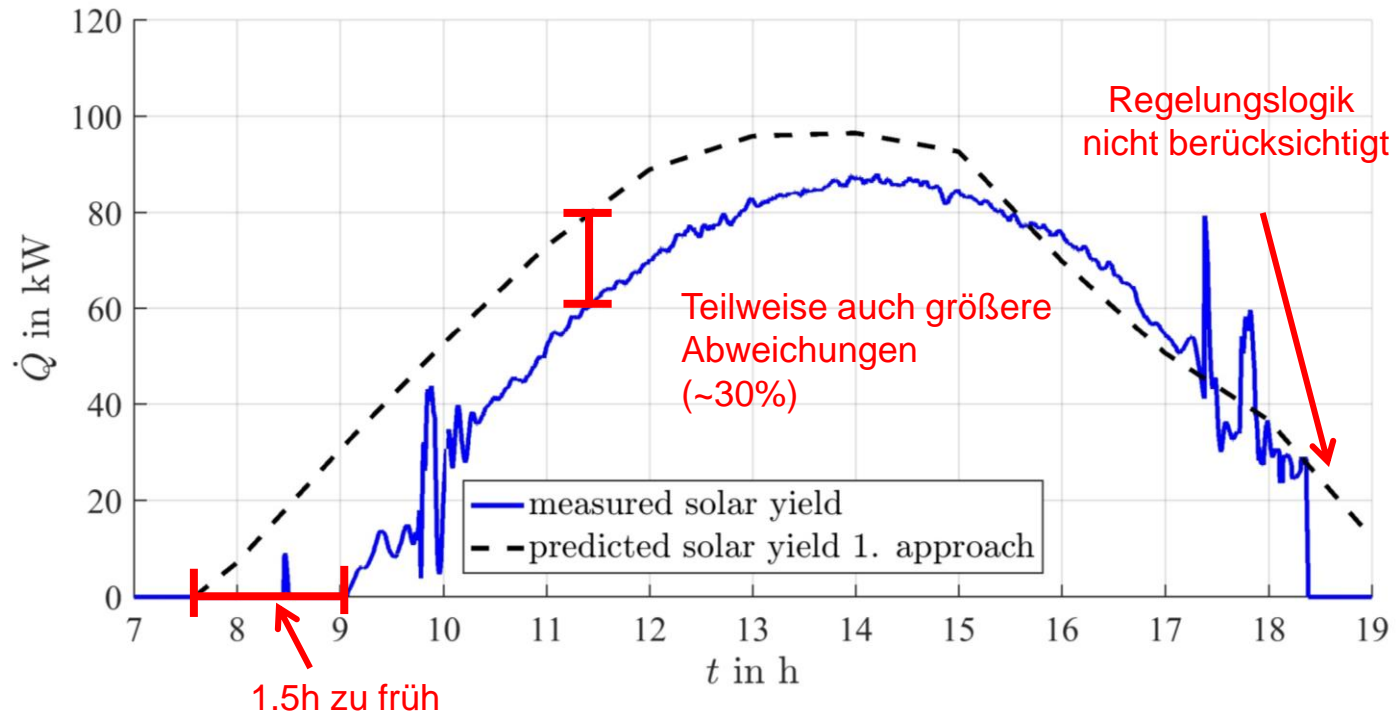


$$\dot{Q}(t) = \underbrace{c_0 A_{\text{coll}} I_g(t)}_{\substack{\text{W\u00e4rme abzgl.} \\ \text{opt. Verluste}}} - \underbrace{c_1 A_{\text{coll}} (\bar{T}_{fl}(t) - T_{\text{amb}}(t))}_{\substack{\text{W\u00e4rmeverluste} \\ \text{durch Leitung/Konvektion}}} - \underbrace{c_2 A_{\text{coll}} (\bar{T}_{fl}(t) - T_{\text{amb}}(t))^2}_{\substack{\text{W\u00e4rmeverluste durch} \\ \text{Strahlung}}}$$

- Gleichung wird f\u00fcr den genormten Kollektortest f\u00fcr alle Arten von Flachkollektoren verwendet
- Parameter  $c_0$ ,  $c_1$  und  $c_2$  sind im Datenblatt angegeben ( $= \eta_0, k_1, k_2$ )



# Erster Ansatz – Vorhersage des Solarertrages mit Datenblattparameter





# Idee des Algorithmus (1)

- Kombination der Parameter

$$\dot{Q}(t) = \underbrace{c_0 A_{coll} I_g(t)}_{= \alpha} - \underbrace{c_1 A_{coll} (\bar{T}_{fl}(t) - T_{amb}(t))}_{= \beta} \Delta T(t) - \underbrace{c_2 A_{coll} (\bar{T}_{fl}(t) - T_{amb}(t))^2}_{= \gamma} \Delta T^2(t)$$

- Annahme einer konstanten mittleren Fluidtemperatur  
 $\bar{T}_{fl} = \text{const} \rightarrow (\bar{T}_{fl} - T_{amb}(t)) \rightarrow \Delta T(t)$

$$\dot{Q}(t) = \alpha I_g(t) - \beta \Delta T(t) - \gamma \Delta T(t)^2$$







# Idee des Algorithmus (2)

- **Laufende Neuparametrierung**
  - Diskretisierung des Tages in unterschiedliche Parametersätze, z.B. ein Parametersatz für alle 15 Minuten des Tages (= 96 Parametersätze)
    - $\alpha, \beta, \gamma \rightarrow \alpha[n], \beta[n], \gamma[n]$  with  $n = 1 \dots 96$
  - Annahme einer Periodizität von 24h
  - Laufende, automatische Neuparametrierung der Parameter basierend auf Messdaten der vergangenen Tage
- **Vorhersage des Solarertrages  $\dot{Q}_{pred}$** 
  - Verwendung von Wettervorhersagen für die Solarstrahlung  $I_{g,pred}(t)$  und Außentemperatur  $T_{amb,pred}(t)$  von einem **Wetterdienst (meteoblue)**
  - $\dot{Q}_{pred}[n] = \alpha[n] I_{g,pred}[n] - \beta[n] \Delta T_{pred}[n] - \gamma[n] \Delta T_{pred}[n]^2$
- **Korrektur der Vorhersage**

Verwendung des aktuellen Fehlers zwischen Vorhersage und Messung um die Vorhersage der nahen Zukunft anzupassen



# Ablauf der Schritte

Abrufen der Messdaten  
vergangener Tage  
Wärmeleistung, Solarstrahlung, ...

Schritt 0

Schritt 1

Schritt 2

Schritt 3



Wetter  
-vorhersagen

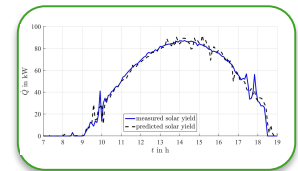
Aktueller Messwert  
Solarertrag  
 $\dot{Q}_{meas}[n]$

Auto. Bestimmung  
der Parameter  
( $\alpha[n]$ ,  $\beta[n]$ ,  $\gamma[n]$ )

Vorhersage des  
Solarertrages  
 $\dot{Q}_{pred}[n]$

Korrektur der  
Vorhersage  
 $\dot{Q}_{pred,korr}[n]$

Updates der  
Messdaten

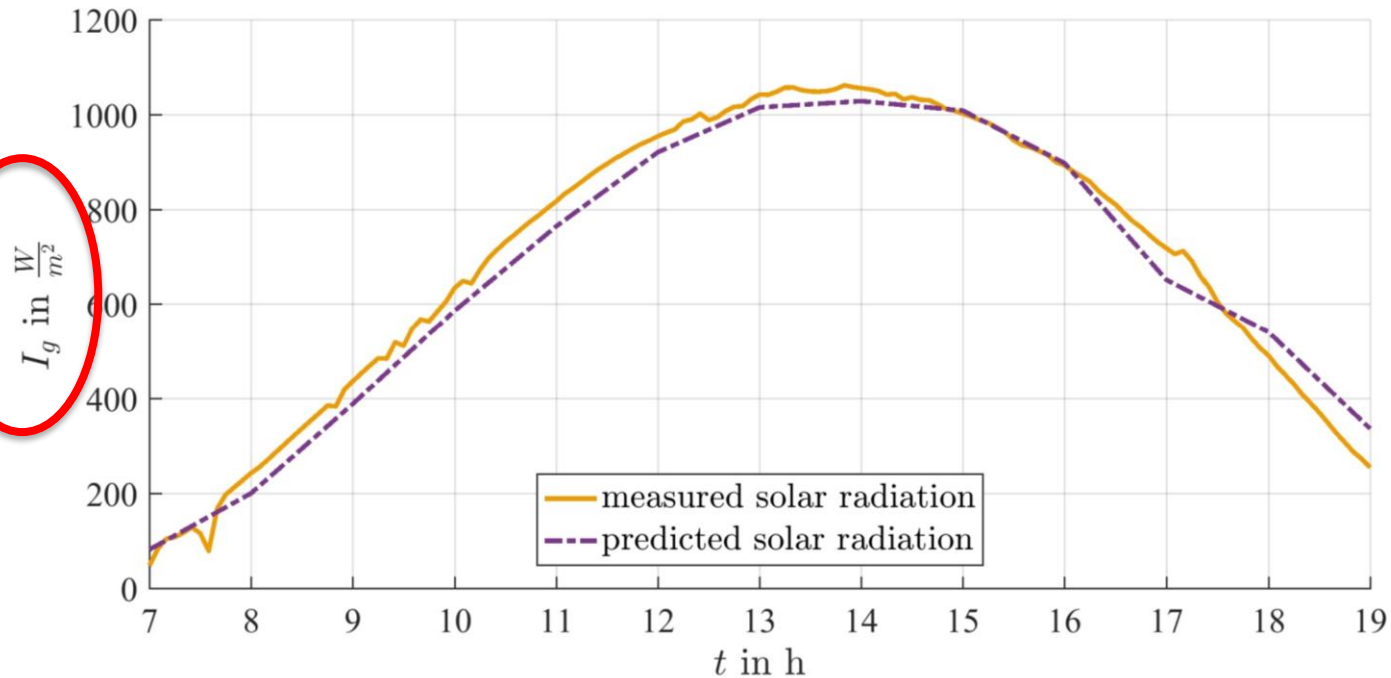




## Experimentelle Validierung

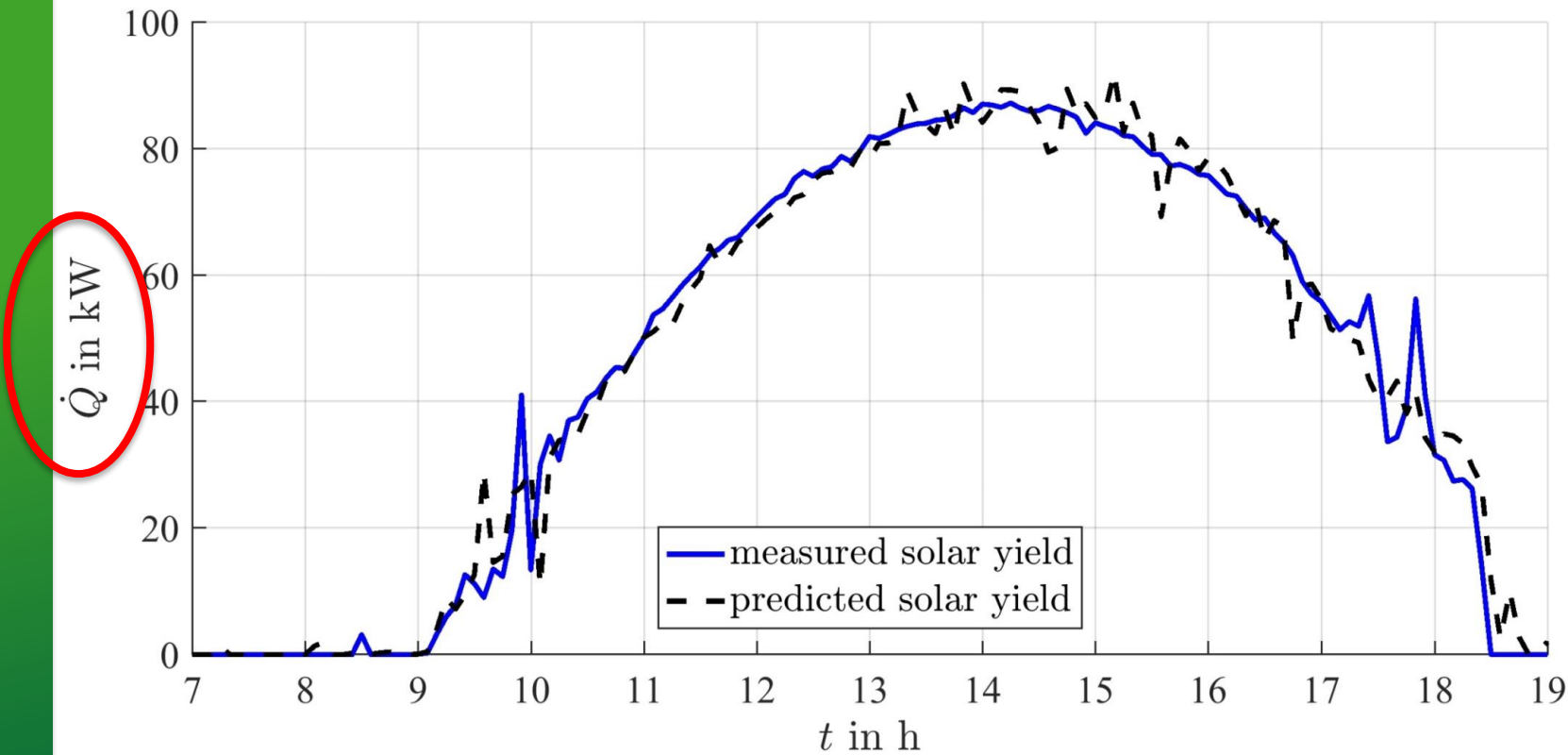
- Untersuchung eines Kollektorteilfeldes (150 m<sup>2</sup>)
- Für 2 verschiedene Tage
  1. „*Sonniger Sommertag*“
  2. „*Wolkiger Sommertag*“
- Vorhersagen für Globalstrahlung und Außentemperatur von Wetterdienstanbieter (<https://www.meteoblue.com>)

# 1. Tag – „Sonniger Sommertag“ | Solarstrahlung



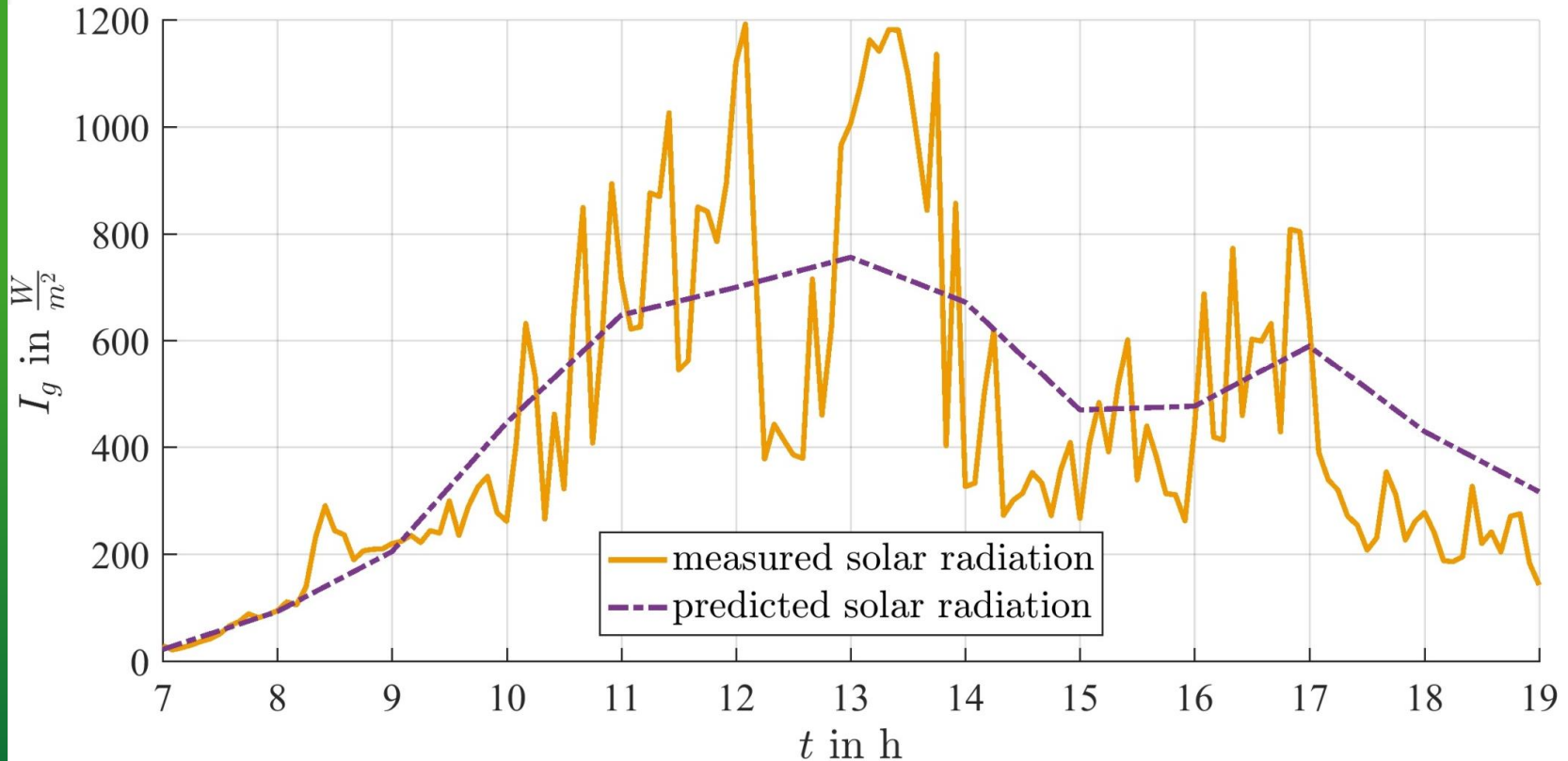


# 1. Tag – „Sonniger Sommertag“ | SolarERTRAG



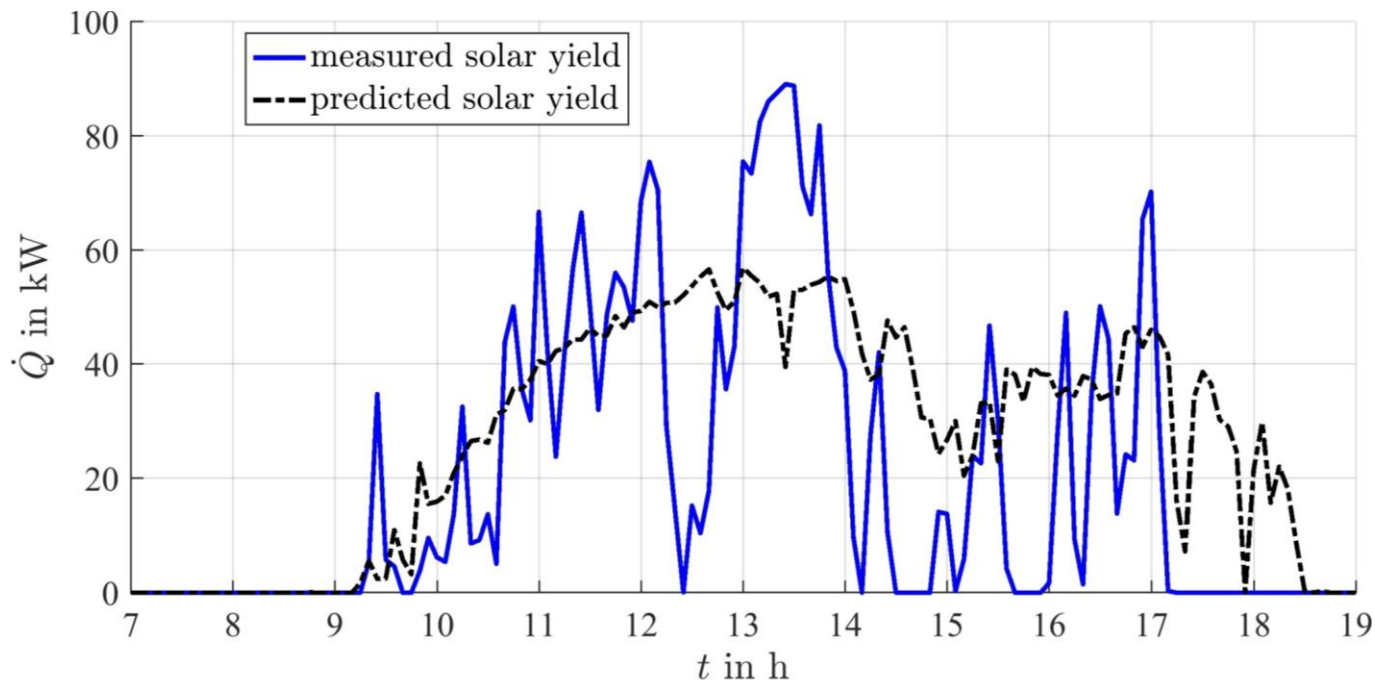


## 2. Tag – „Wolkiger Sommertag“ | Solarstrahlung

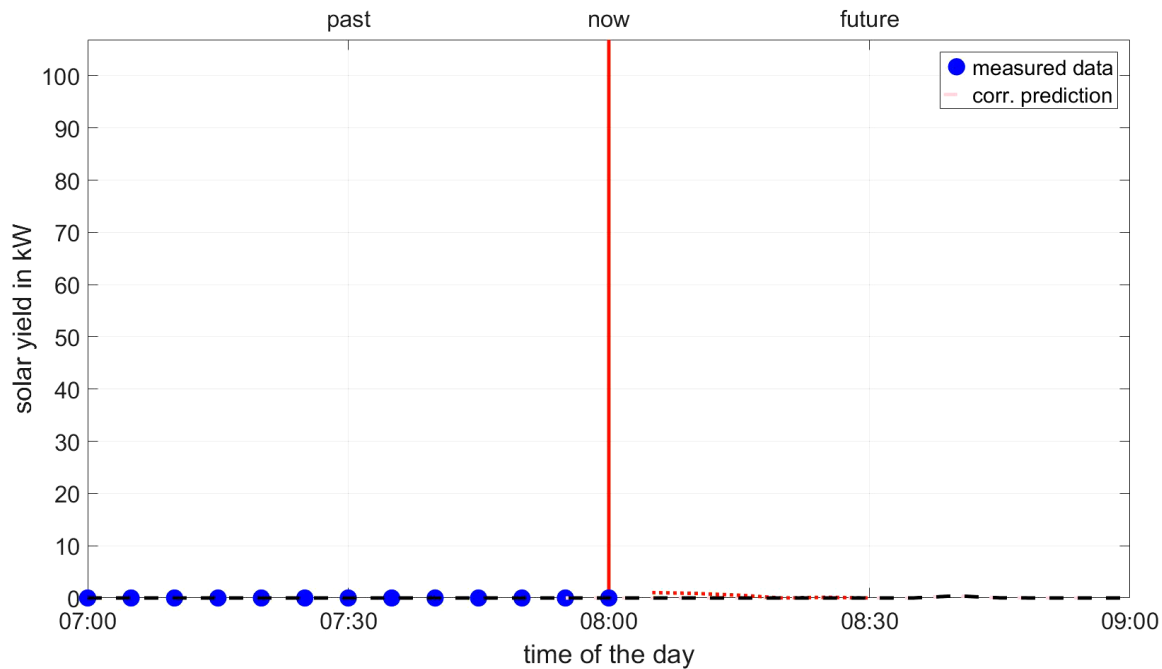




## 2. Tag – „*Wolkiger Sommertag*“ | SolarERTRAG

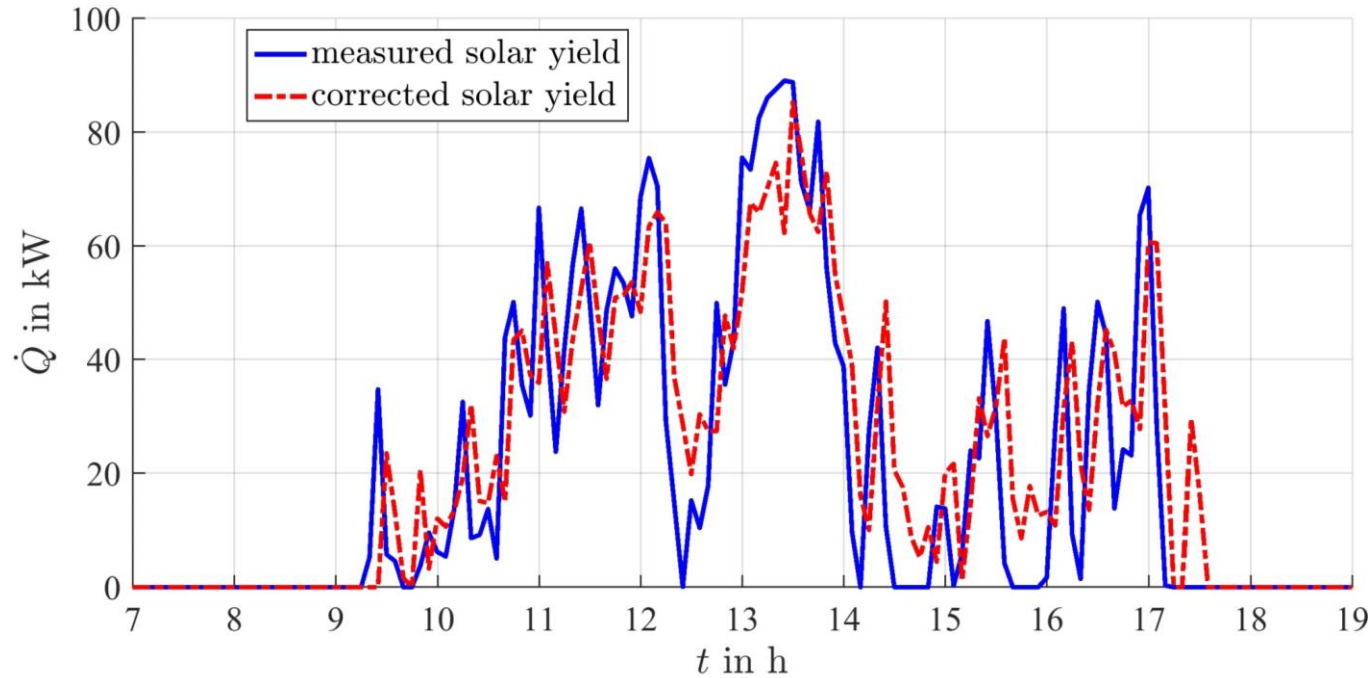


## 2. Tag – „Wolkiger Sommertag“ | SolarERTRAG Korr.





## 2. Tag – „*Wolkiger Sommertag*“ | SolarERTRAG Korr.





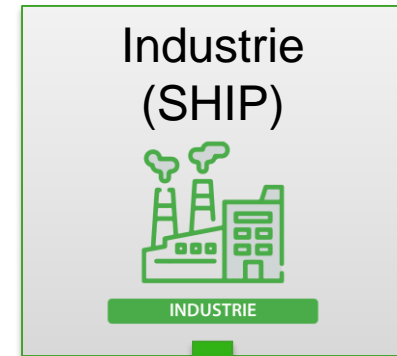
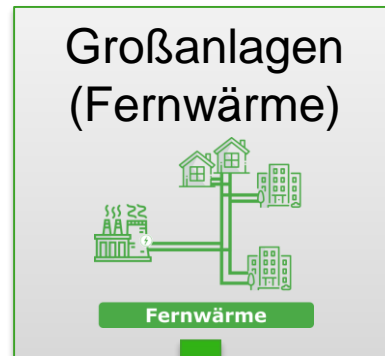
# Zusammenfassung und Vorteile

- Adaptive Methode zur Vorhersage des Solarertrags von solarthermischen Anlagen:
  - Kontinuierliche Parametrisierung mit vergangenen Messdaten
  - Vorhersage des Solarertrags für den/die nächsten Tag(e) mit Wettervorhersagedaten
  - Korrektur der Vorhersage auf Basis des tatsächlichen Vorhersagefehlers
- Kontinuierliche Anpassung der Parameter anhand neuer Messdaten  
→ **Adaptiv / selbstlernend / Plug & Play**
- Algorithmus basiert auf linearer Regression und kann leicht auf einer handelsüblichen Steuerung (SPS) implementiert werden  
→ **Mathematisch einfach / keine Lizenzkosten / keine spezielle Software notwendig**
- Basiert auf statischer Energiebilanz, gültig für eine Vielzahl von Kollektoren  
→ **weitläufig anwendbar**

**Verwendbar für Betriebsführungsstrategie von solarthermischen Systemen um den Profit und den Solarertrag zu maximieren**  
→ **Langzeit Evaluierung ca. 2 x mal so genau wie die Datenblattangaben, mittlere Abweichung von 5 %**



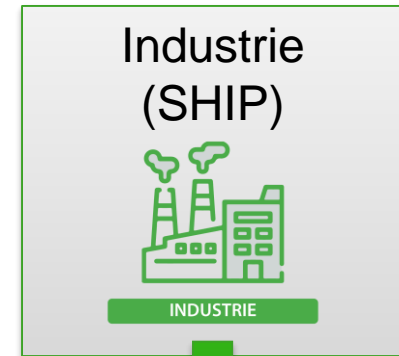
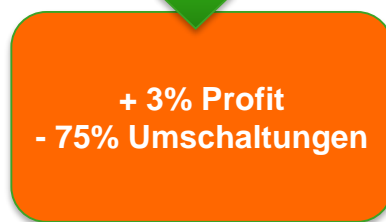
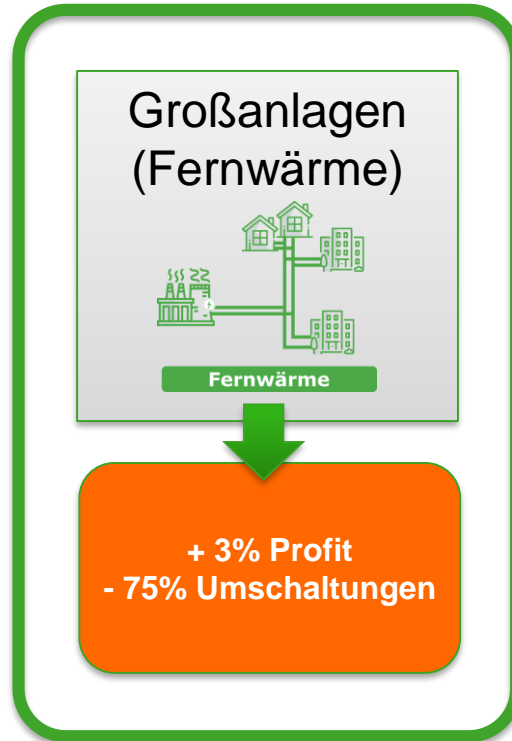
# Überblick Anwendungsbeispiele





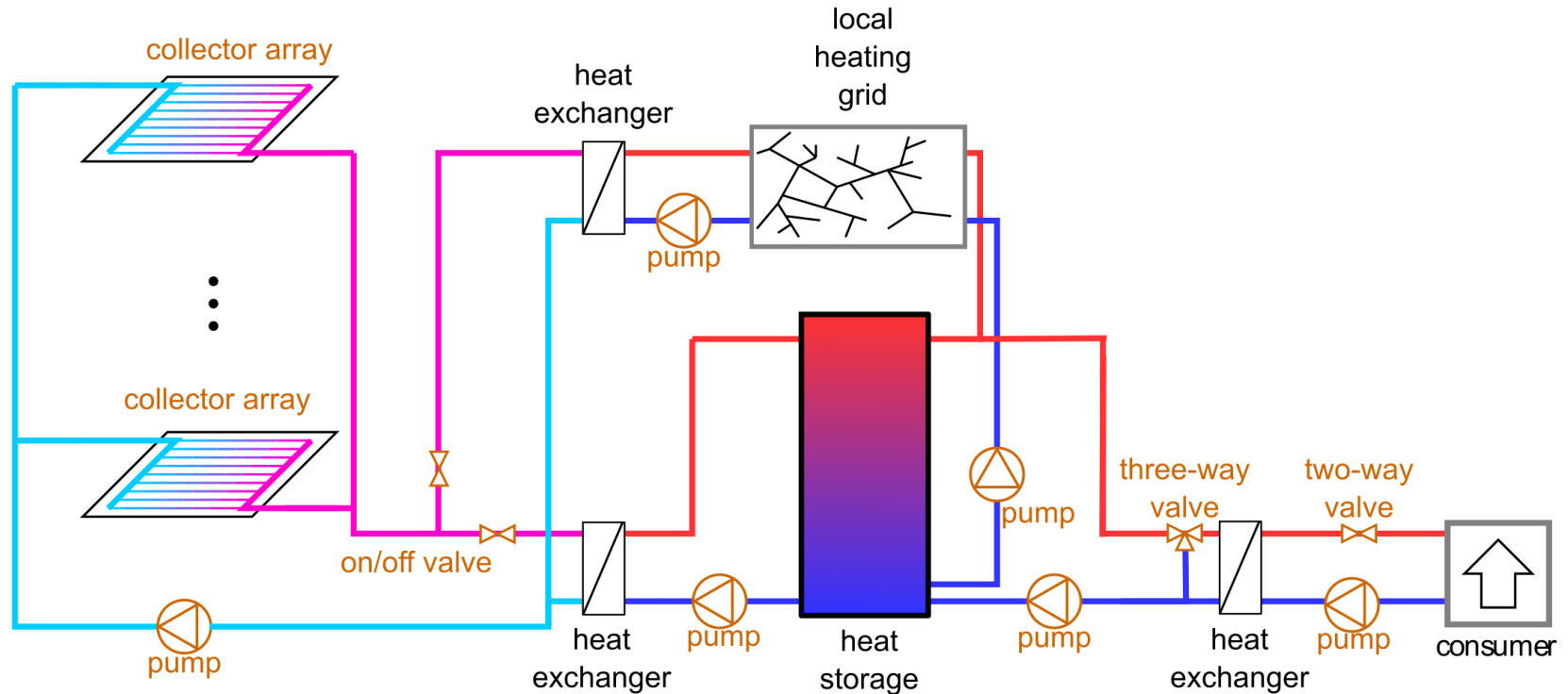


# Überblick Anwendungsbeispiele



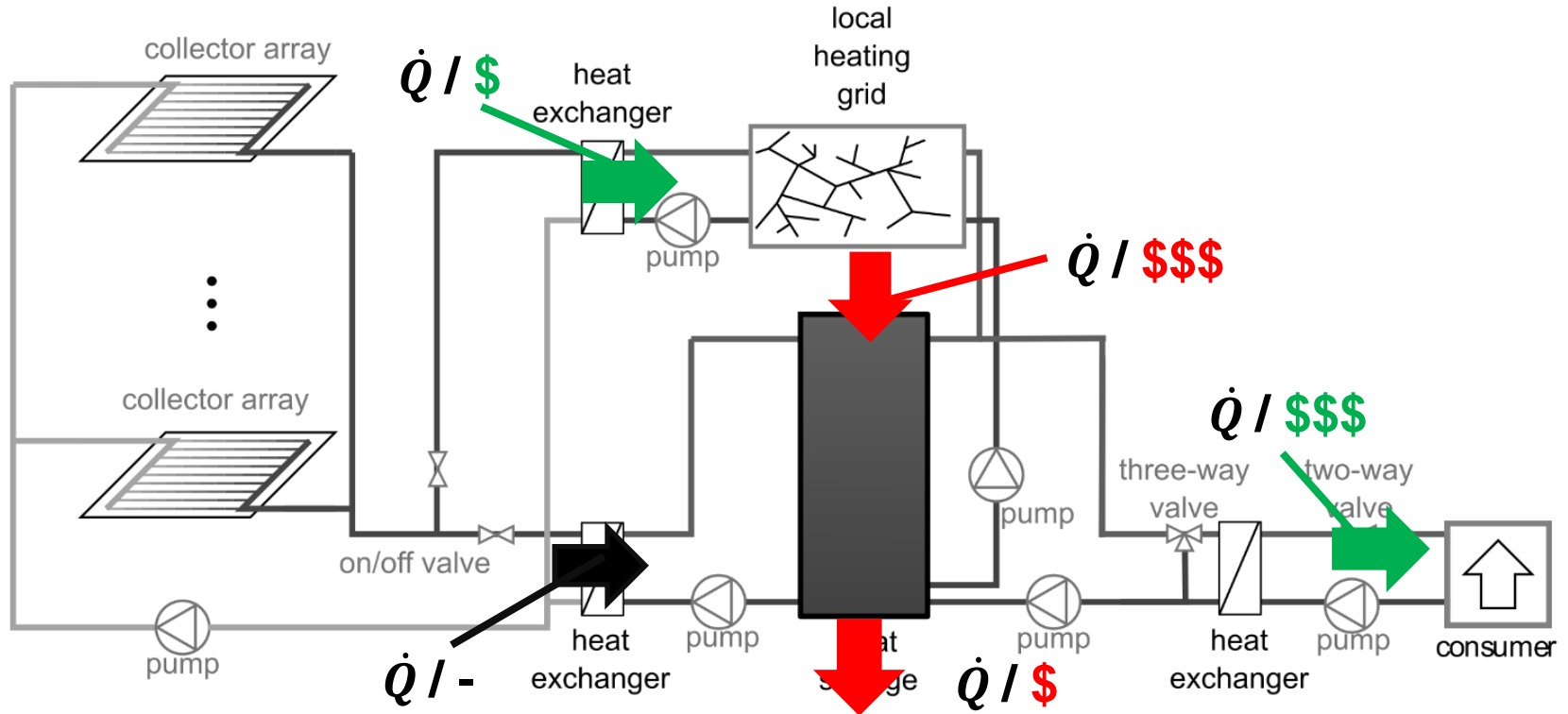


# Aufbau Solaranlage für Fernwärmeeinspeisung

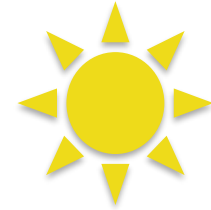




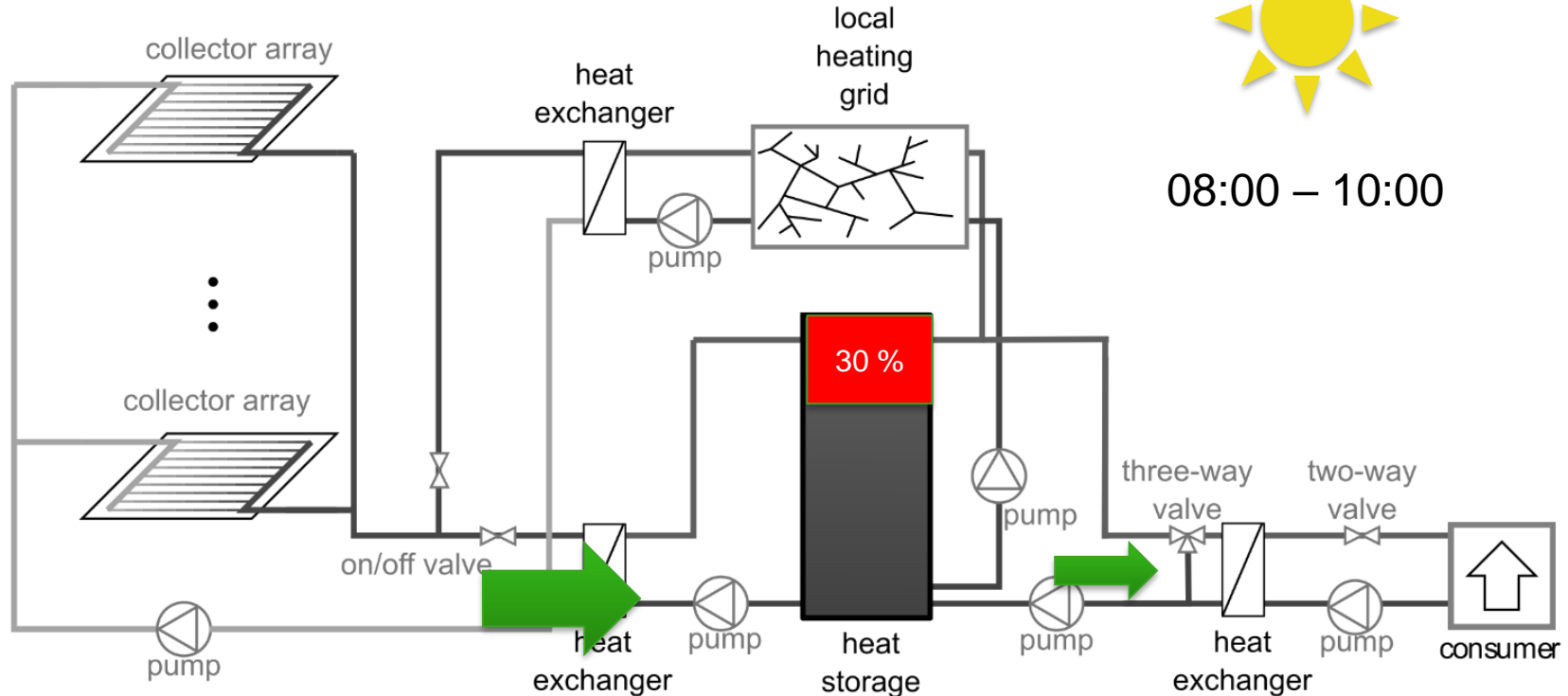
# Herausforderungen an die Regelung



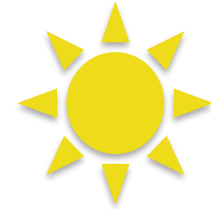
# Probleme konventioneller Regelung – Bsp. Tag in der Übergangszeit



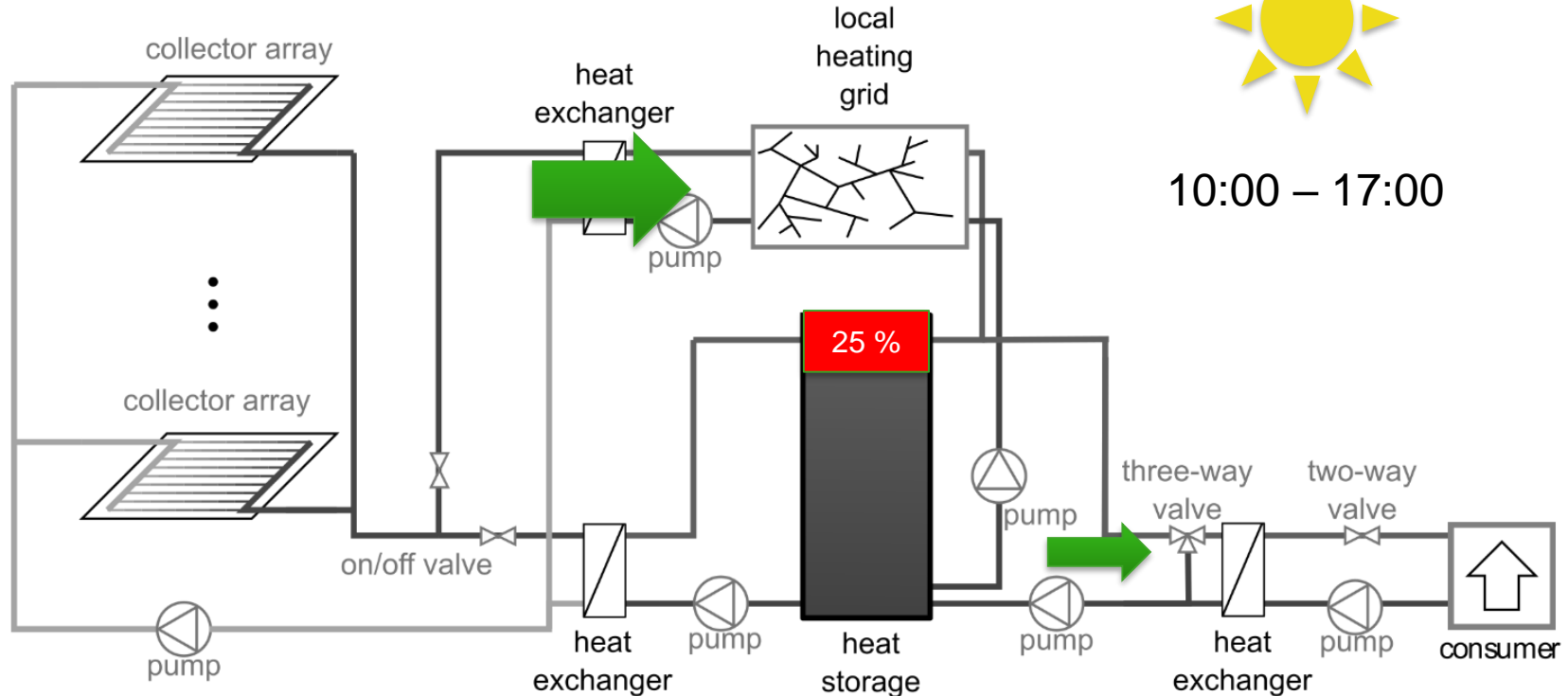
08:00 – 10:00



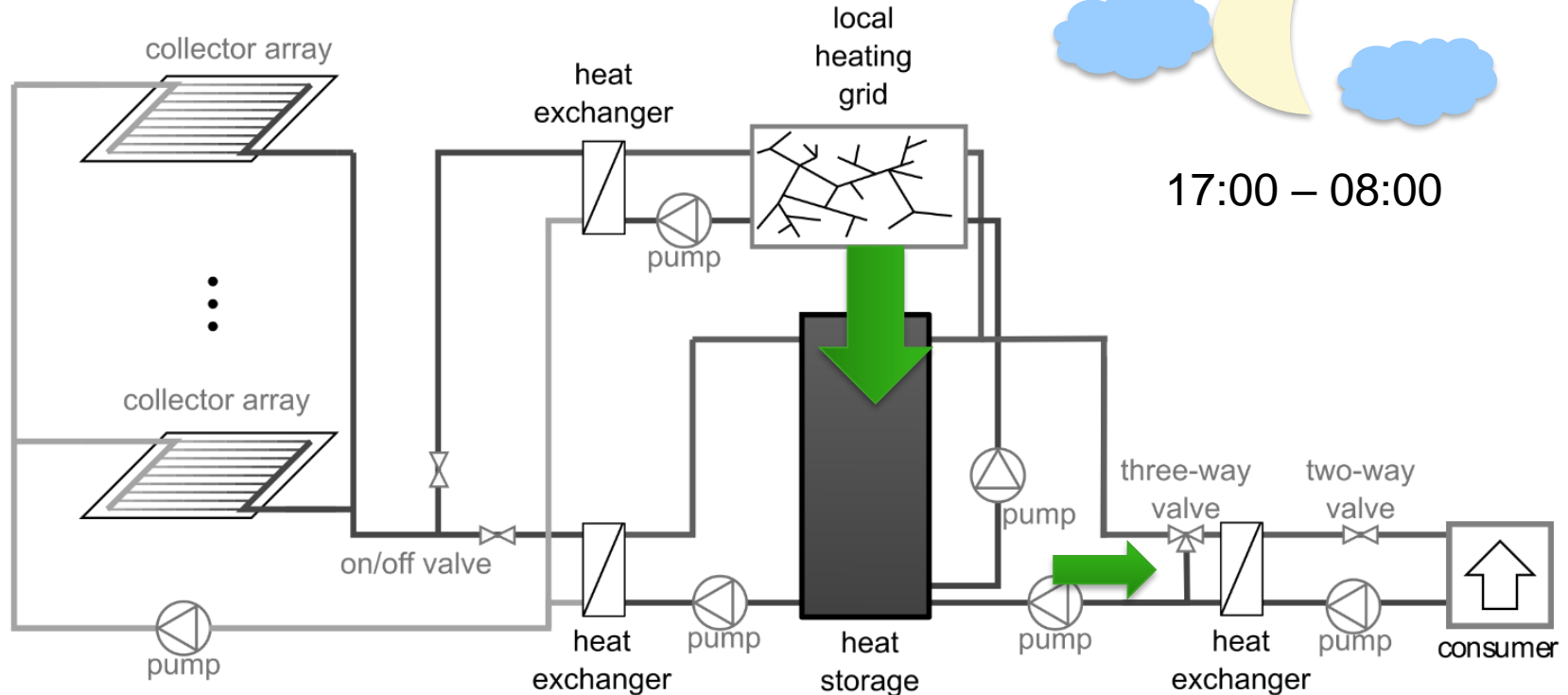
# Probleme konventioneller Regelung – Bsp. Tag in der Übergangszeit



10:00 – 17:00

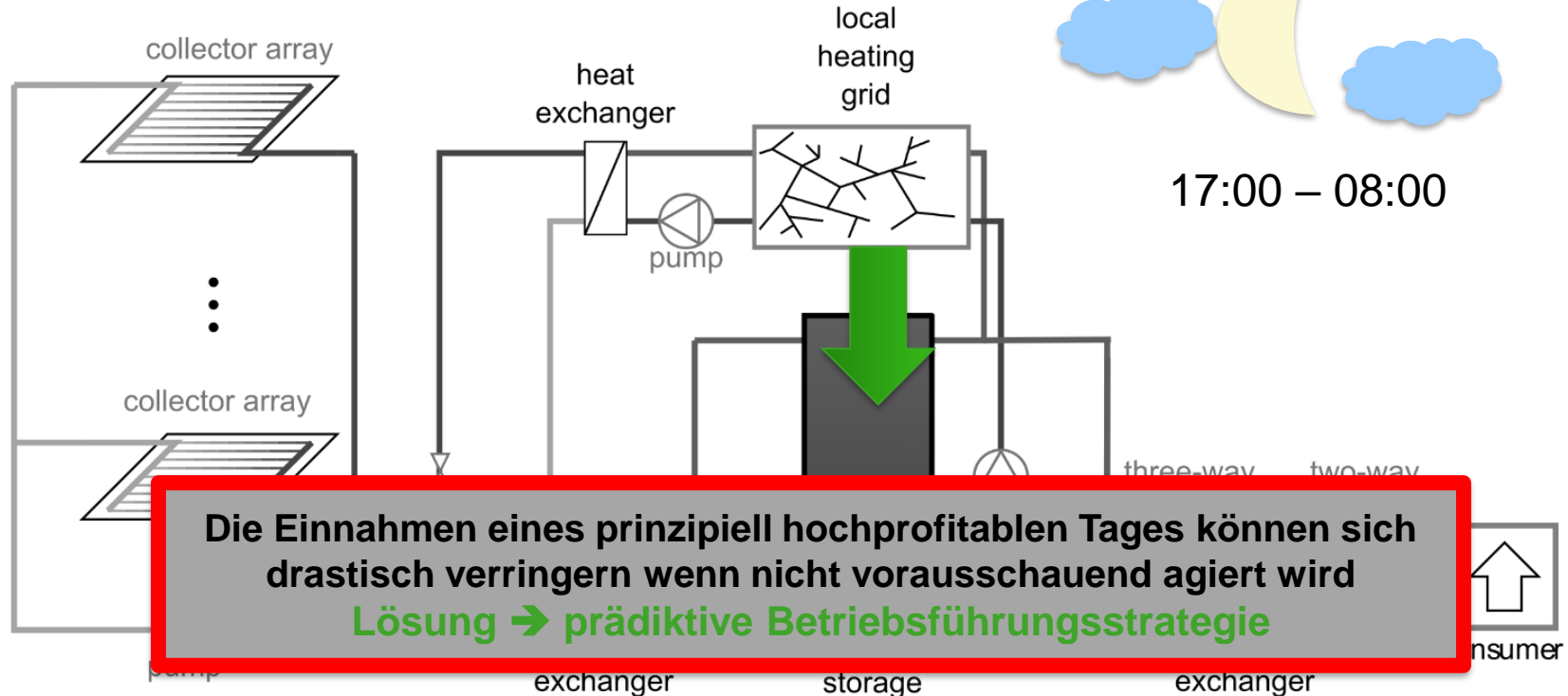


# Probleme konventioneller Regelung – Bsp. Tag in der Übergangszeit

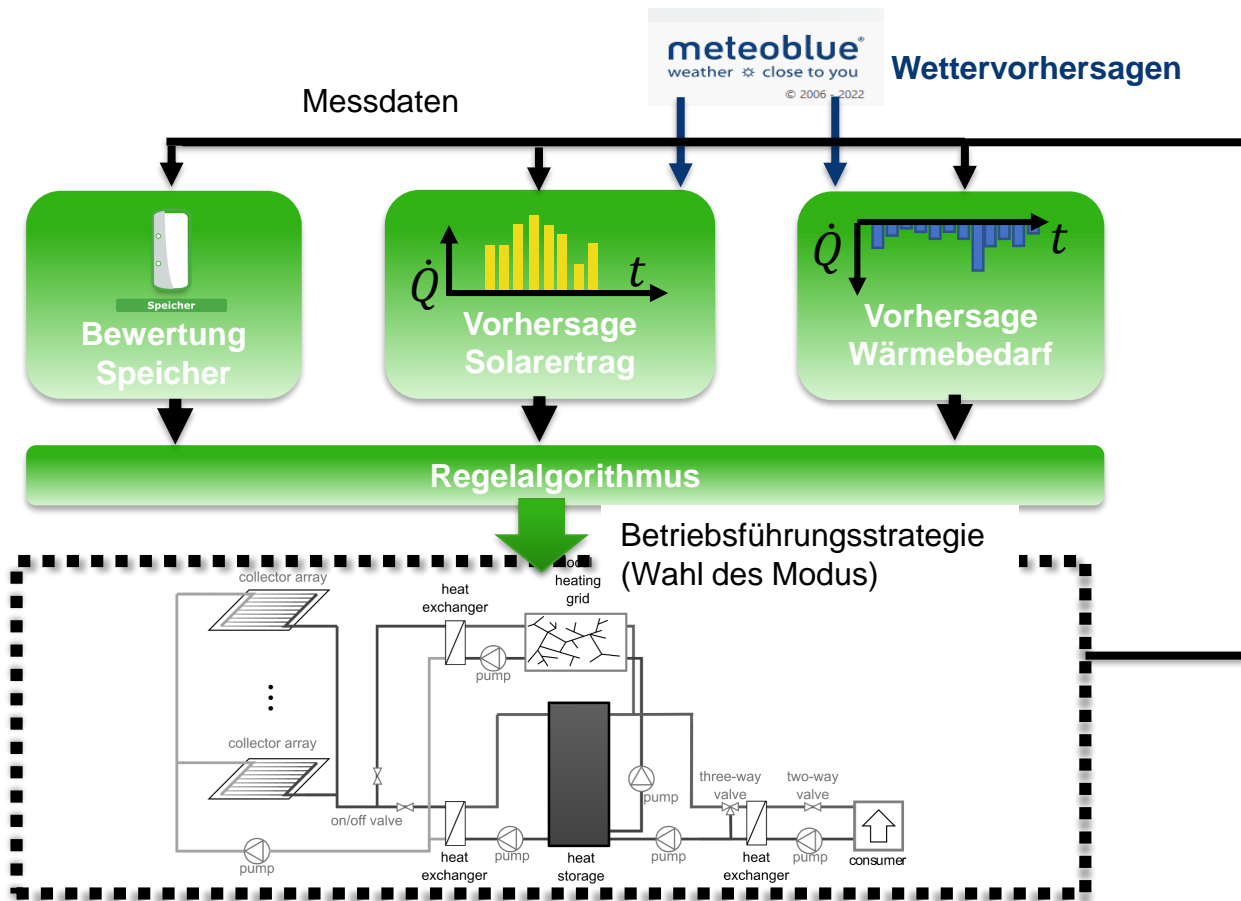




# Probleme konventioneller Regelung – Bsp. Tag in der Übergangszeit



# prädiktive Betriebsführungsstrategie





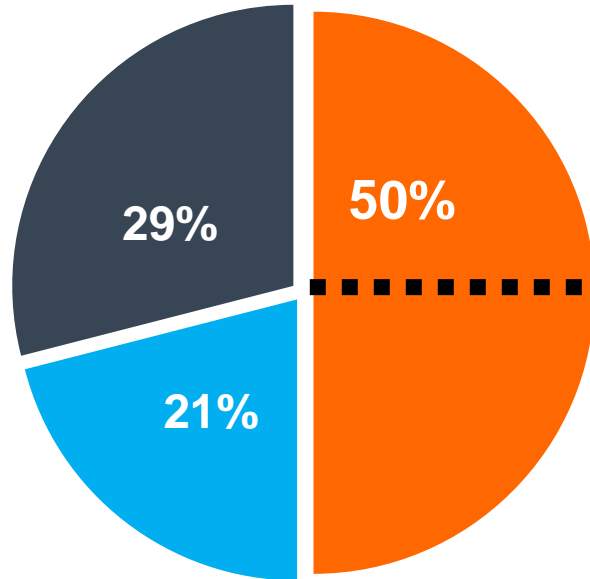
# Vorteil prädiktiver Betriebsführungsstrategien

- Durch Wissen über **zukünftigen Solarertrages** und über **zukünftigen Wärmebedarf** kann die Anlage so betreiben werden, dass
  - (wenn möglich) die **lokalen Verbraucher zuerst versorgt** werden  
→ garantiert maximalen Ertrag
  - die **Modi-Umschaltung auf ein Minimum reduziert** werden  
→ minimale Störungen
  - der **Speicher immer nur soweit wie notwendig beladen** wird  
→ minimale Speicherverluste
  - der Algorithmus sich **automatisch anpasst** (z.B. an saisonale Veränderungen)  
→ keine Eingriffe/Anpassungen durch Betreiber notwendig
- Prädiktive Regelungen können dabei Regelbasiert (Zustandsautomat) oder Optimierungsbasiert (MPC) sein
- Kann einfach nachgerüstet werden ist „nur“ Software, keine zusätzliche Hardware oder Sensorik notwendig



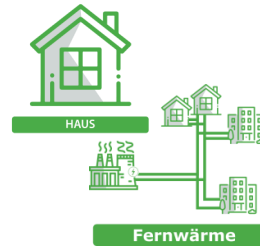
# Globaler Endenergieverbrauch ...

**#heatishalf**



■ Heat ■ Electricity ■ Transport

Gebäude  
(Heizung +  
Brauch-  
wasser)



Industrielle  
Prozesse



Verteilung Solar-  
kapazität [1]

**88%**  
~350 TWh

**12%**  
~50 TWh

Potential bis  
2030 ([2], [3])

**+200  
TWh**

**+200  
TWh**

**Algorithmus kann Beitrag  
leisten um Potential  
auszuschöpfen**

# Solar goes Digital – Wie Solarwärme selbstlernende Algorithmen nutzt

Viktor Unterberger  
BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH  
Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, AUSTRIA  
[viktor.unterberger@best-research.eu](mailto:viktor.unterberger@best-research.eu)

Vollständige Beschreibung des Algorithmus (**frei verfügbar**)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003779?via%3Dihub>



## References

- [1] ...  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920305092?via%3Dihub>
- [2] ... Christian Holter, Patrick Reiter, “*Potentials of Solar Heating in Europe*”, *ISEC Conference 2022*
- [3] ... Joakim Byström, Solar Heat Europe, “*IEA SHC Task68 – Subtask D*”, *IEA SHC Workshop*