



Forschung für  
energieoptimierte  
Gebäude und Quartiere

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# WaveSave: Planung und Steuerung von dezentralen Energiesystemen in Gebäuden

2. Projektleitertreffen, Lüneburg Mai 2017 | Dr. Armin Wolf, FhI FOKUS

# SektorenKopplung @ Home

## Gebäude – „Nukleus“ der Sektorenkopplung?

Moderne Energiesysteme koppeln verschiedene Energiequellen und –senken

- **PV:** Licht → Strom
- **Solarthermie:** Licht → Wärme
- **Wärmepumpe („Kältepumpe“):**  
Strom (& Umgebungswärme) → Wärme (Kälte)
- **BHKW:**  
Primärenergie & (Strom) → Strom & Wärme
- **Batteriesysteme:**  
Strom → chemische Energie → Strom
- **Elektrofahrzeuge:** Strom → kinetische Energie



Quelle: Sonne Wind & Wärme, Ausgabe 03/2017

# WaveSave – ein „Berliner“-Verbundvorhaben

## Ziele

Unterstützung einer

- nachhaltigen,
- ressourcenschonenden und
- wirtschaftlichen

Nutzung von Energiesystemen zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung in Gebäuden

Einsatz moderner IKT-Möglichkeiten für eine **optimierende Projektierung & Betriebsführung** von Energiesystemen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**EnEff:Wärme**

Forschung für  
energieeffiziente Wärme- und Kältenetze

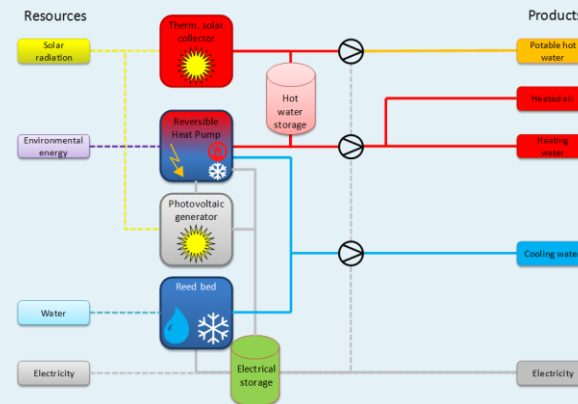
# Anwendungs- und geplantes Referenzszenario

## Rooftop-Gebäude der UdK Berlin mit 56 qm Nutzfläche

- Energiesystem mit Regelungseinheit
- **Photovoltaik**-Dach/-Fassaden (84 Module mit 9,66 kW<sub>peak</sub>)
- **Batteriespeicher** (LiFePO<sub>4</sub>) mit 3,84 kWh
- **Solarthermie**-Anlage (ca. 3 m<sup>2</sup>)
- **Warmwasser-/Kaltwasserspeicher** (235 Liter)
- reversible **Wärmepumpe** (max. Wärmeleistung 4,2 kW bei COP 3,3; max. Kälteleistung 4,5 kW bei COP 3,8)
- Fußbodenheizung / PCM-Kühldecken
- Verdunstungskühlung über Pflanzenbeete

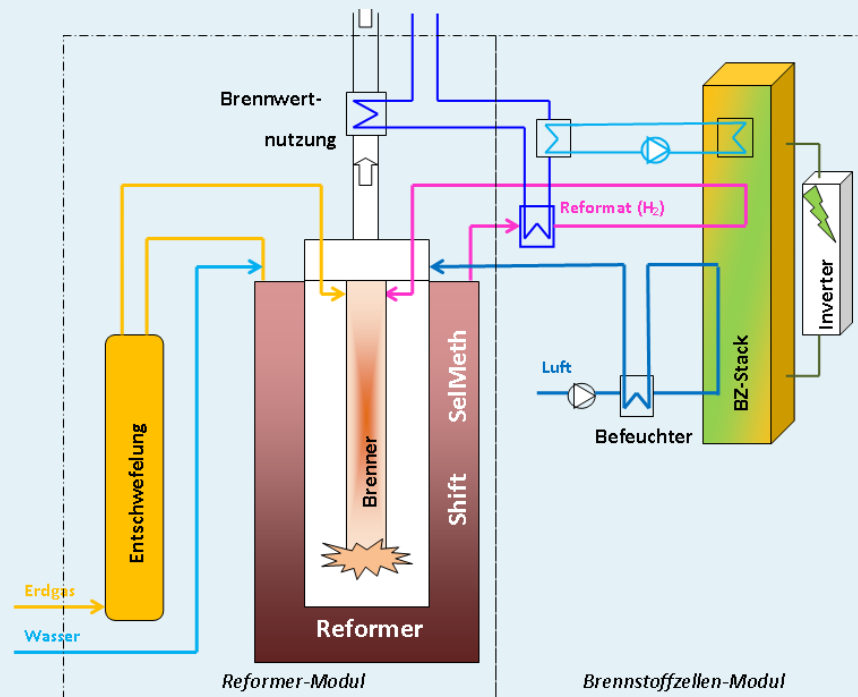


Rooftop-Gebäude und zugehöriges Energieversorgungssystem (Quelle: UdK Berlin)



# Weiteres Szenario mit Brennstoffzellen-BHKW

- geringere laufende Betriebskosten
- CO<sub>2</sub> – Einsparung von ca. 8 t/ a pro System
  - bezogen auf deutschen Strom-Mix, 6.000 Betriebsstunden;  $P_{\text{netz}} = 4 \text{ kW}$
- Umweltfreundliche KWK-Technologie mit besten Abgaswerten
  - weder Ruß noch Feinstaub
  - geringe Stickoxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen
- zukunftssichere Technologie
  - Erdgas, Bioerdgas, H<sub>2</sub>, LPG
- hoher Betriebskomfort
  - keine Geräuschbelästigung
  - keine Vibrationen



# Optimierende Projektierung

## Ziele und Vorgehensweise

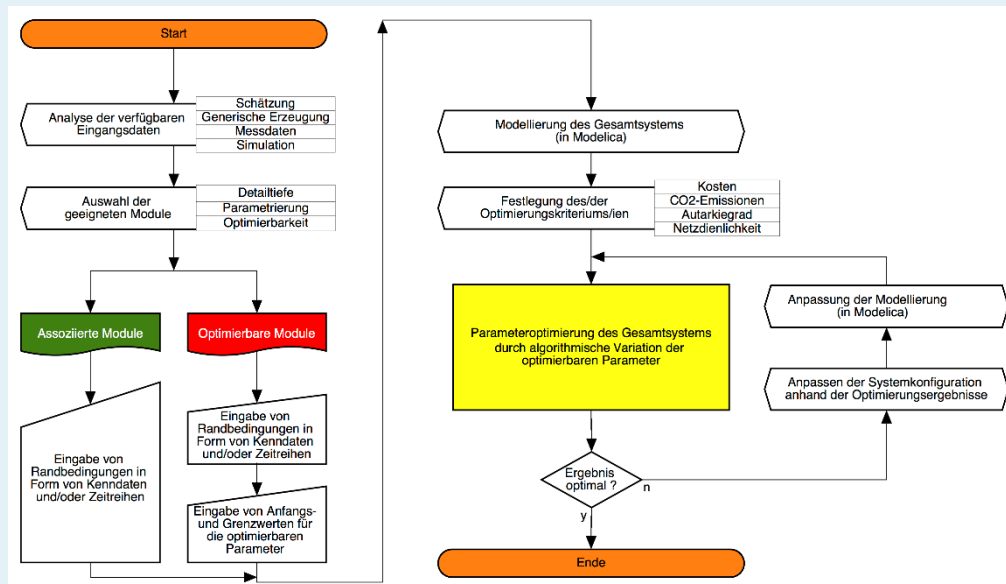
### Bewertung einer Anlagenkonfiguration

- hinsichtlich ihre „typischen“ Nutzung durch eine simulierte „Betriebsführung“
- Erzeugung von Nutzungs-/Bedarfsprofilen mit **Modelica**-Simulationen
- Transformation in ein Mixed-Integer-Programming (**MIP**) Modell

### Minimierung der Gesamtkosten

(Energiebedarf, Verschleiß, etc.)  
als Optimierungsziel

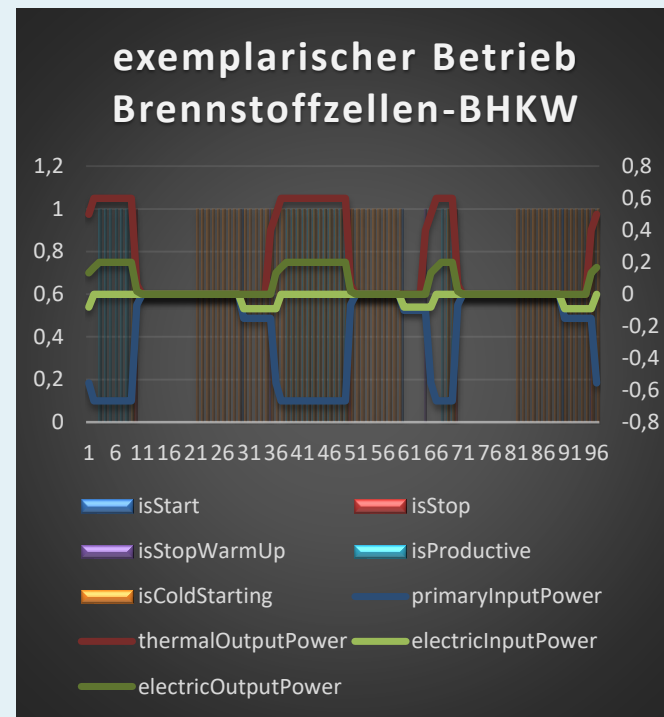
→ Grundlage der **Parameteroptimierung**



# Lineare Modellierung von Brennstoffzellen-BHKW

## Spezifika

- Dauer und Art der Aufwärmphase (Kalt-/Warmstart) sind abhängig von der Dauer der vorausgehenden Stillstandphase  
→ lineare Approximation einer asymptotisch verlaufenden Funktion
- „Leistungssprung“ beim Übergang von der Aufwärm- in die „Produktivphase“
- Mindest- und Maximaldauern sind zu berücksichtigen
- Kosten für Start, Stopp, Anfahren und Betrieb sind konfigurierbar
- Modulation und Gradient der Leistung in der Produktivphase sind konfigurierbar



## Beispiel einer Lastoptimierung - Wärmepumpenheizung

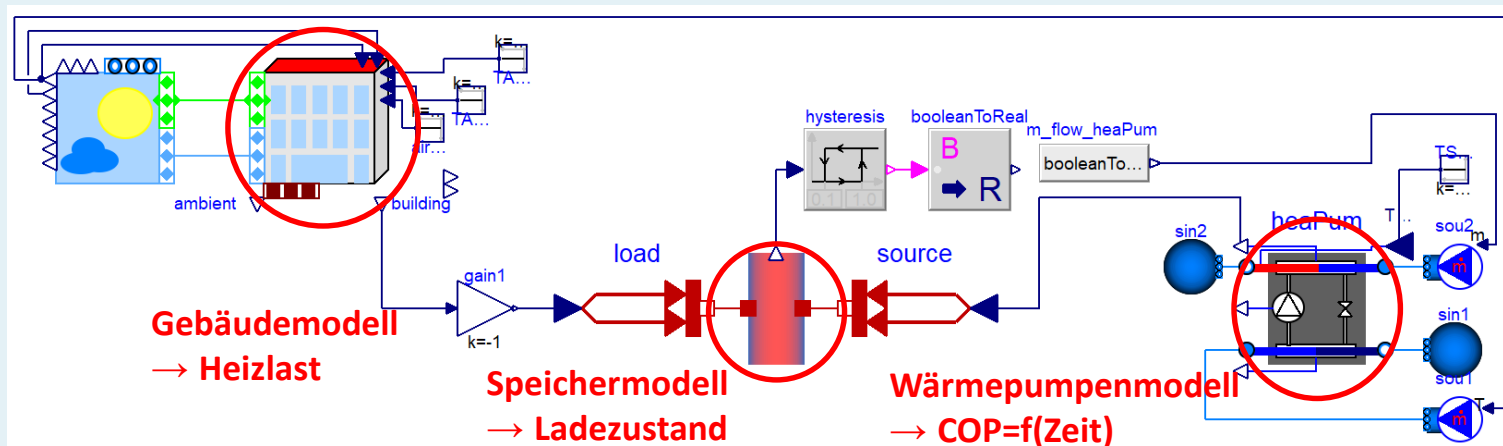
- Optimierung der Laufzeiten der Luft/Wasser-Wärmepumpe zur Wärmeversorgung eines Wohngebäudes
- Erzeugung von Wärme „auf Vorrat“ (thermischer Speicher) bei höheren Außenlufttemperaturen
- Nutzung der Wärme bei niedrigen Außenlufttemperaturen
- Vermeidung niedriger Wärmepumpen-COP



Wohngebäude nach EnEV-Standard 2014 mit 172 m<sup>2</sup> Nutzfläche (Standort Berlin)



# Modelica-Systemmodell der Wärmepumpenheizung



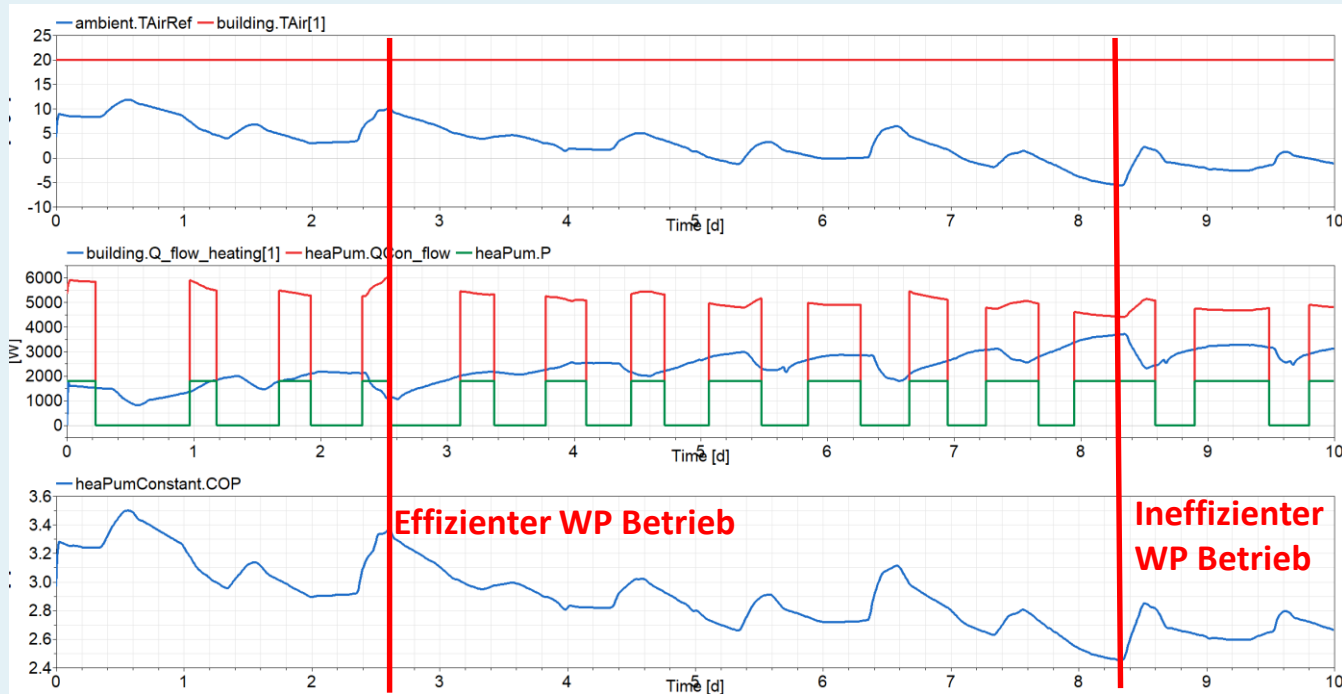
- Wärmepumpenmodell (Luft/Wasser):  
 $COP_{35/2} = 3,4$ ;  $P_{el} = 1800 \text{ W}$ ;  $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$ ,  $T_{\text{Rücklauf}} = 25 \text{ °C}$
- Idealer Warmwasserspeicher mit  $2 \text{ m}^3$  (Laden mit  $35 \text{ °C}$ ; Entladen mit  $25 \text{ °C}$ )  
 → nutzbare Ladekapazität  $Q = 21 \text{ kWh}$  (bei 90 Prozent Entladekapazität)

# Konventioneller Betrieb der Wärmepumpenheizung

Raumluft- und  
Aussenlufttemperatur

Wärmestrom WP  
Strombedarf WP  
Wärmebedarf Gebäude

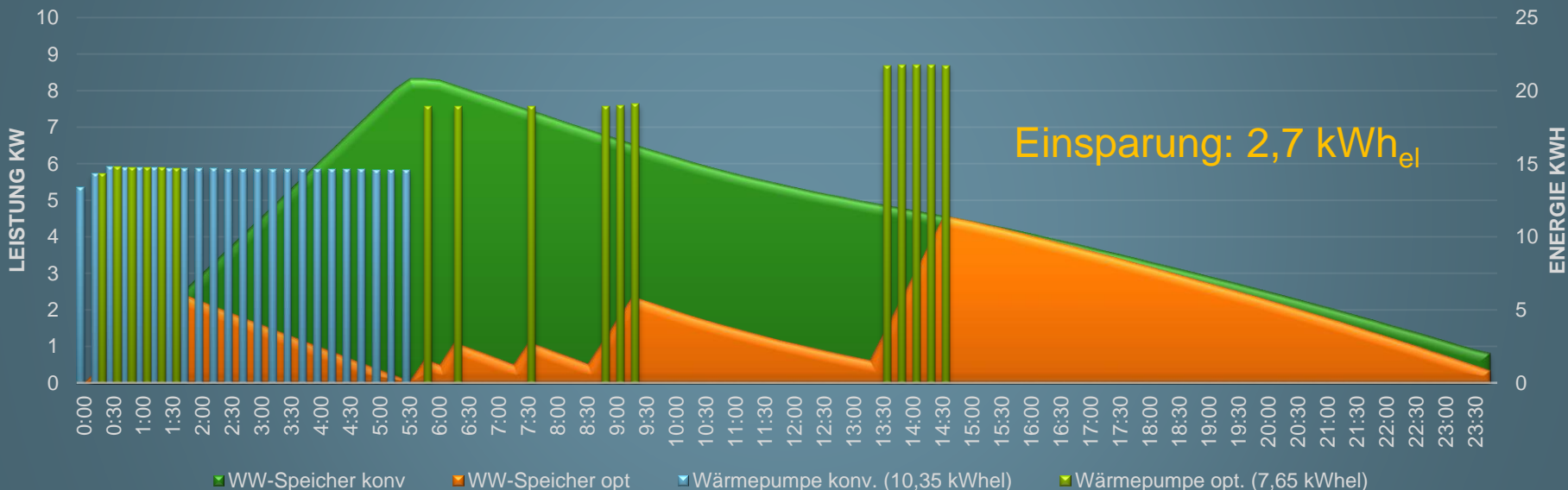
COP der WP



# Evaluierung der MIP-Optimierung auf Basis der Modelica-Simulation

## Basis der Optimierung: Prognose eines zeitvariablen COP (temperaturabhängig)

### Wärmepumpe - konventioneller vs. optimierter Betrieb



# Bewertung einer fiktiven Anlagenkonfiguration

## Wohngebäude (exemplarisch)

### Betrachtete Anlagenausstattung

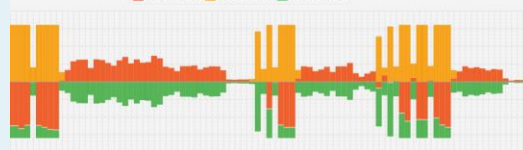
- PV-Anlage
- BHKW mit Spitzenlastkessel
- Batterie
- Wärmespeicher
- Netzanschluss mit variablen Preisen und Vergütungen
- Heiz- und Warmwasserbedarf
- Nutzung im Frühjahr → kein Kühlbedarf

holer FORUS Building Operation Scheduling Prototype

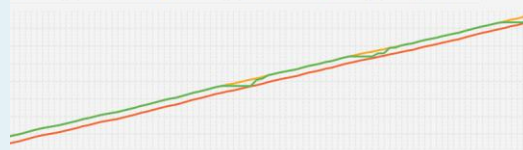
battery01 [kWh\_e] pv01 [kWh\_e] chp01 [kWh\_e] grid01 [kWh\_e] usage01 [kWh\_e]



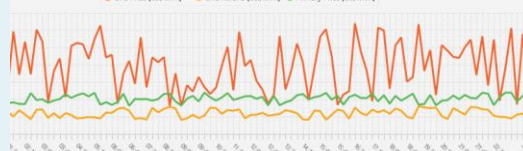
buffer01 [kWh\_th] chp01 [kWh\_th] usage01 [kWh\_th]



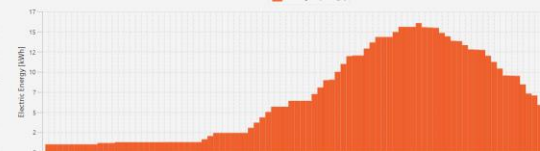
Min. Thermal Aggregated Request [kWh\_th] Max. Thermal Aggregated Request [kWh\_th] Thermal Aggregated Supply [kWh\_th]



Grid Price [€ct/kWh] Grid Refund [€ct/kWh] Primary Price [€ct/kWh]



battery01 [kWh\_e]



buffer01 [kWh\_th]



HotWater Supply [kWh\_th]

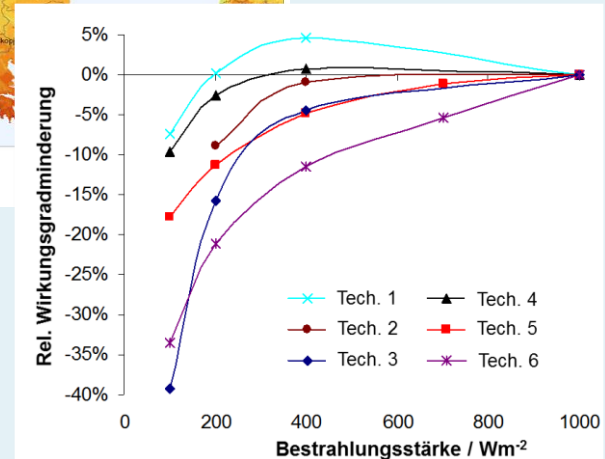
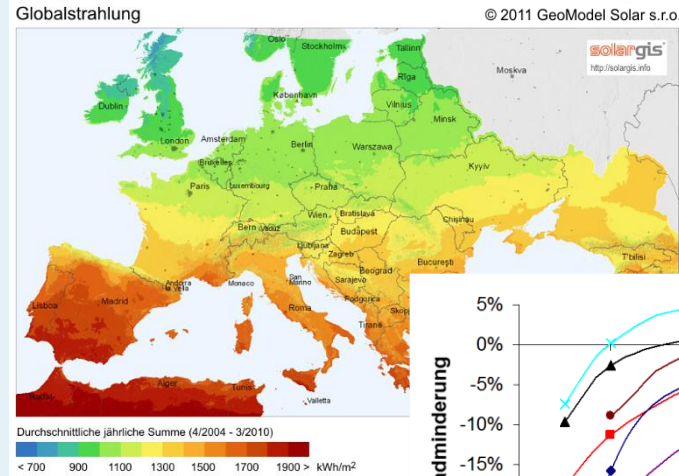


Total [€ct]



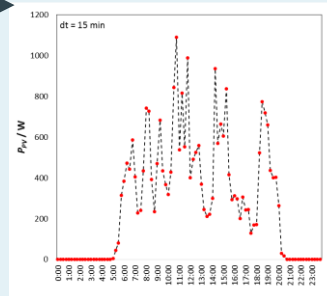
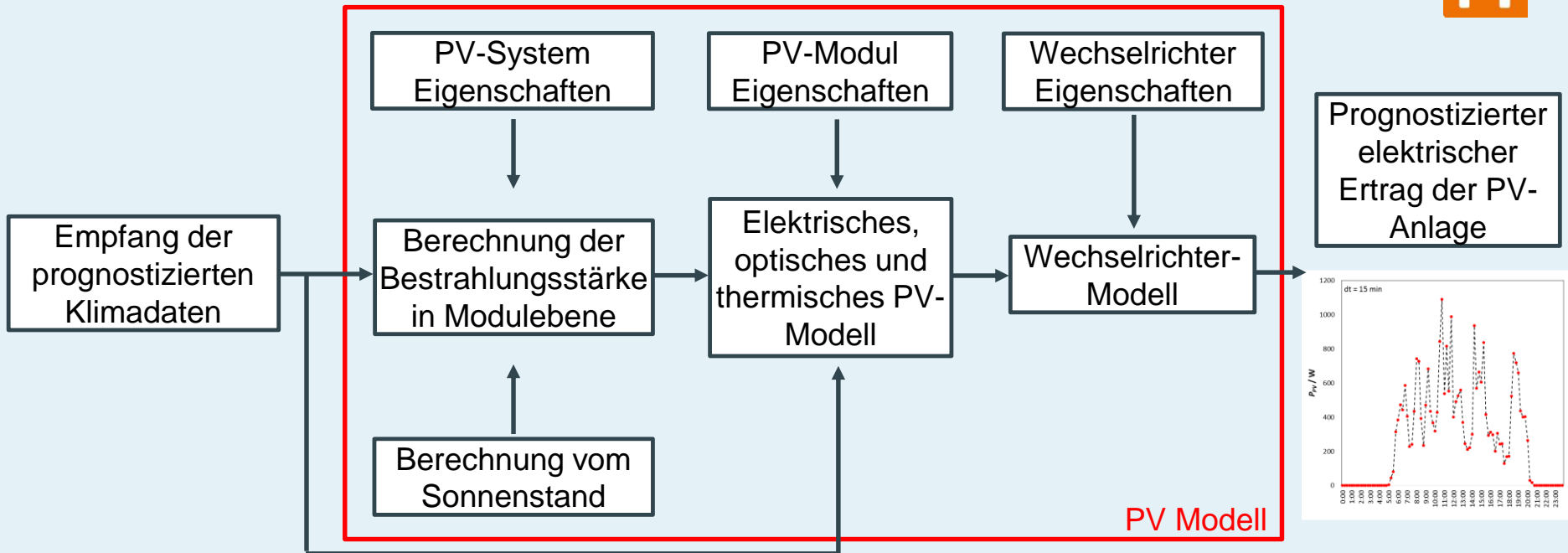
## Einflüsse auf die Leistungsprognose

- Lokale Bestrahlung (Level, Spektrum & Einfallswinkel) und Temperatur
- Kraftwerksspezifische Eigenschaften (Ausrichtung, Installationsart, Verschattung usw.)
- Jede PV-Technologie hat ihre besonderen Merkmale (Wirkungsgrad, Schräglicht, Schwachlicht, Degradation usw.)



## PV-Prognose – schematisch

## Leistungsprognose-Modell



# Aktuelle Arbeiten: IKT-Vernetzung bei der Betriebsführung

## Adaptive Betriebsführung

= Intelligentes „Verschneiden“ von Daten:

### Prognosen

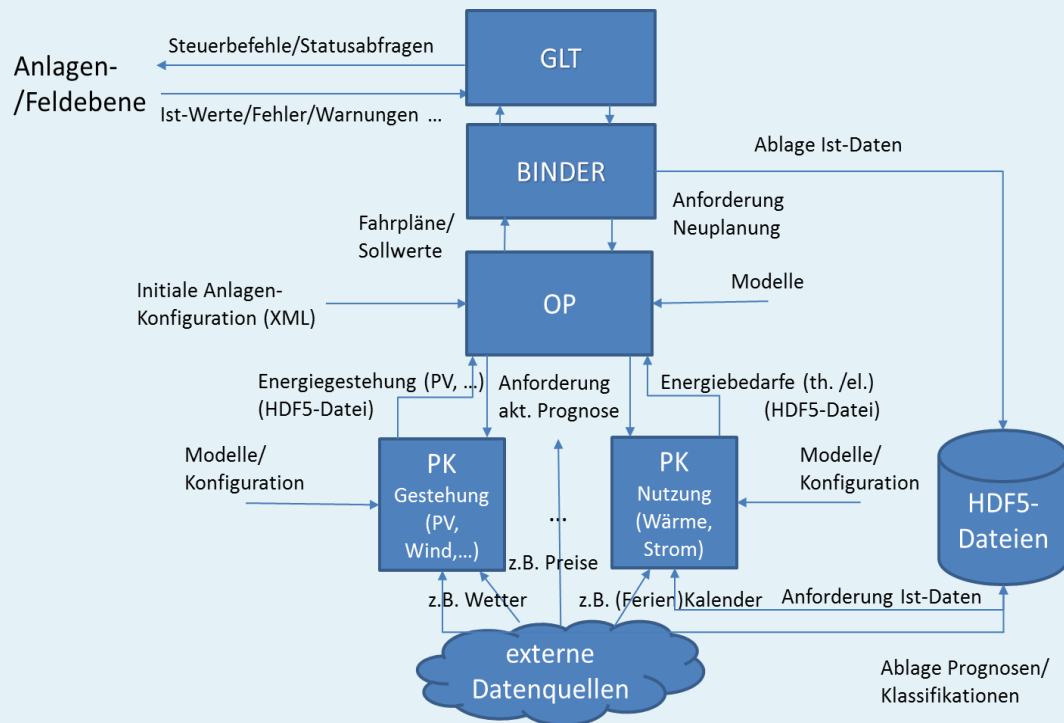
- PV-Gestehung
- Bedarfsprofile (Wärme, WW, ...)

### Statusinformationen

- Anlagen-Ist-Werte
- Preisdaten

### Gegebenheiten / Vorgaben

- Anlagenkonfigurationen
- Fahrpläne





Forschung für  
energieoptimierte  
Gebäude und Quartiere

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit