



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

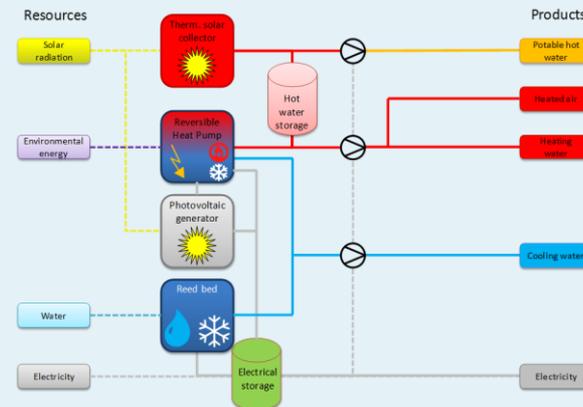
Anwendungs- und geplantes Referenzszenario

Rooftop-Gebäude der UdK Berlin mit 56 qm Nutzfläche

- Energiesystem mit Regelungseinheit
- **Photovoltaik**-Dach/-Fassaden (84 Module mit 9,66 kW_{peak})
- **Batteriespeicher** (LiFePO₄) mit 3,84 kWh
- **Solarthermie**-Anlage (ca. 3 m²)
- **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

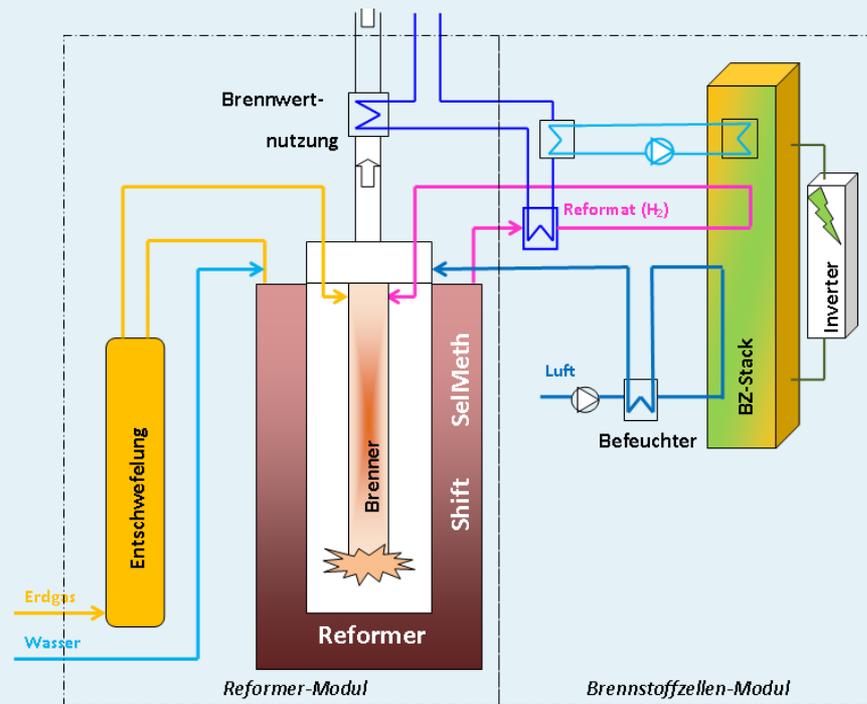


Rooftop-Gebäude und zugehöriges Energieversorgungssystem (Quelle: UdK Berlin)



Weiteres Szenario mit Brennstoffzellen-BHKW

- geringere laufende Betriebskosten
- CO₂ – 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, H₂, LPG
- hoher Betriebskomfort
 - keine Geräuschbelästigung
 - keine Vibrationen



Optimierende Projektierung

Ziele und Vorgehensweise

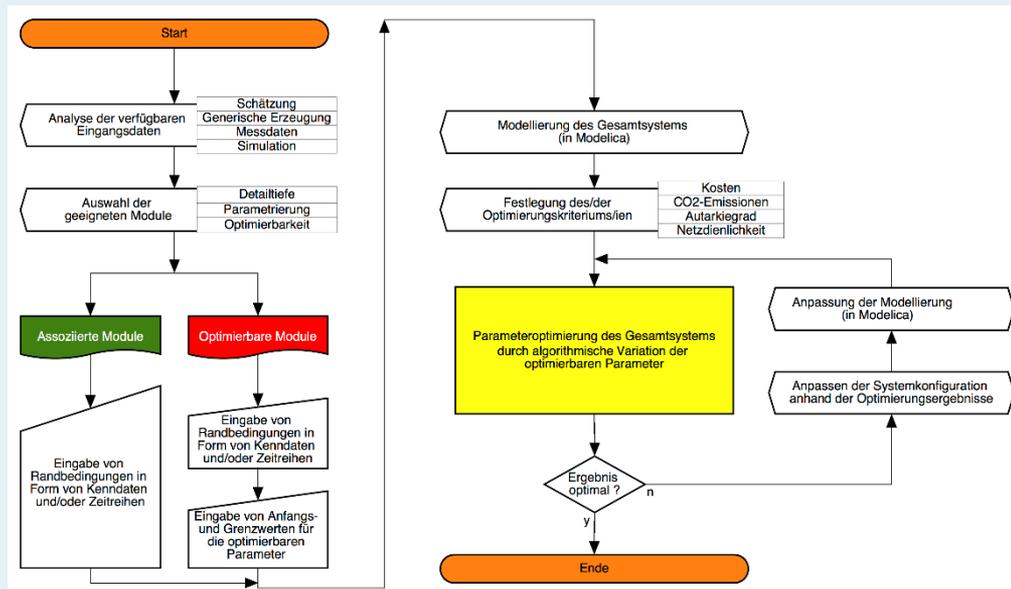
Bewertung einer Anlagenkonfiguration

- 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

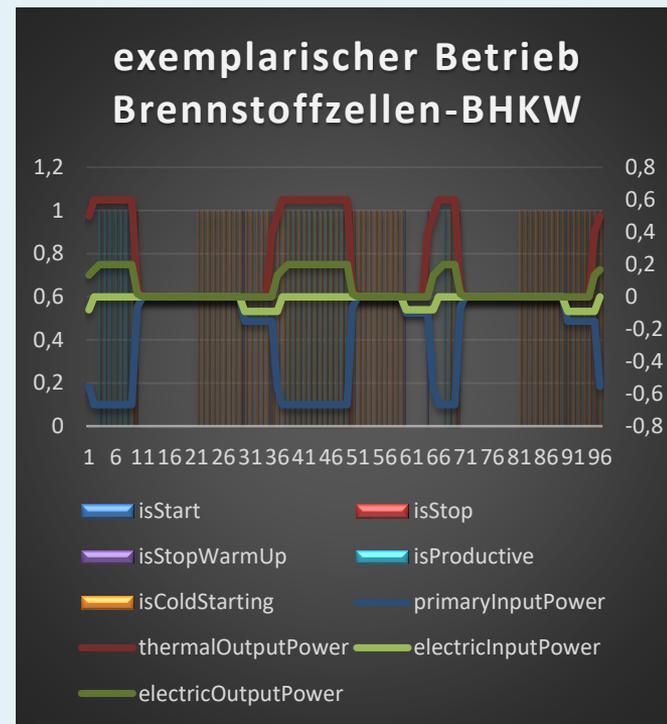
→ Grundlage der **Parameteroptimierung**



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



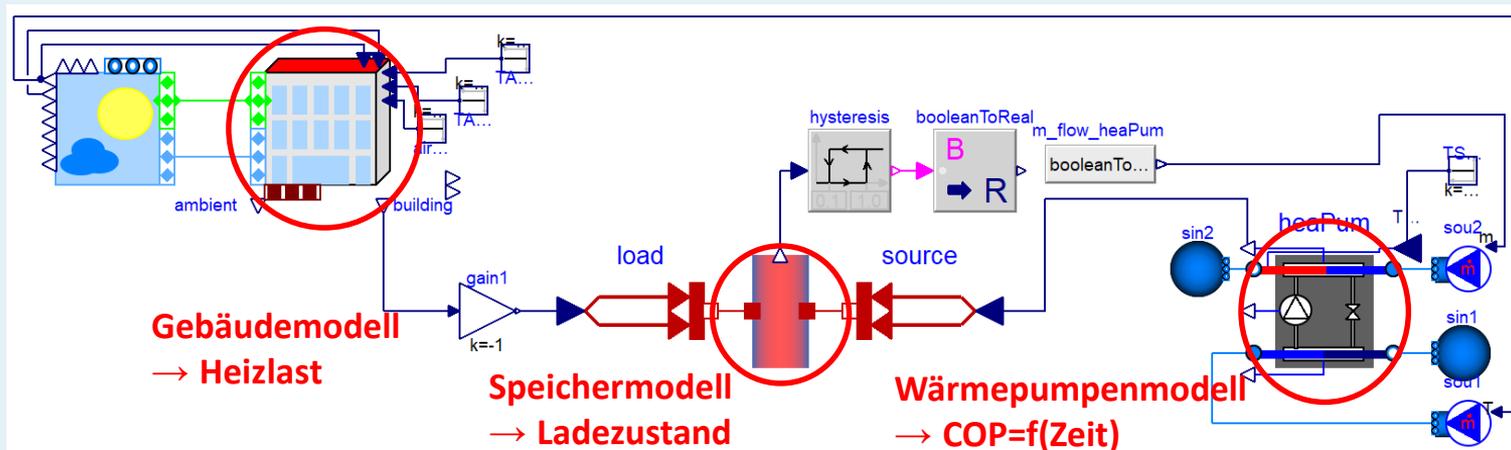
Beispiel einer Lastoptimierung - Wärmepumpenheizung

- 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 m² Nutzfläche (Standort Berlin)

Modelica-Systemmodell der Wärmepumpenheizung



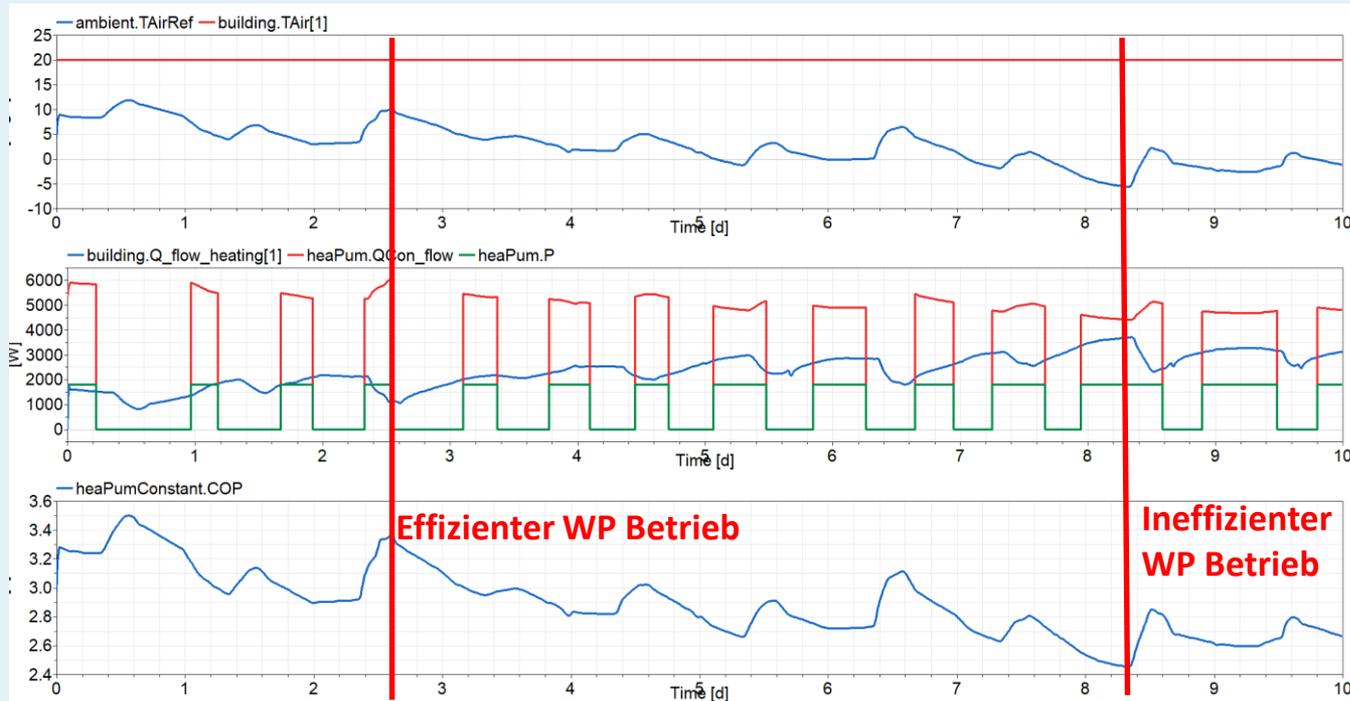
- Wärmepumpenmodell (Luft/Wasser):
 $COP_{35/2} = 3,4$; $P_{el} = 1800 \text{ W}$; $T_{\text{Vorlauf}} = 35 \text{ °C}$, $T_{\text{Rücklauf}} = 25 \text{ °C}$
- Idealer Warmwasserspeicher mit 2 m^3 (Laden mit 35 °C ; Entladen mit 25 °C)
 → nutzbare Ladekapazität $Q = 21 \text{ kWh}$ (bei 90 Prozent Entladekapazität)

Konventioneller Betrieb der Wärmepumpenheizung

Raumluft- und
Aussenlufttemperatur

Wärmestrom WP
Strombedarf WP
Wärmebedarf Gebäude

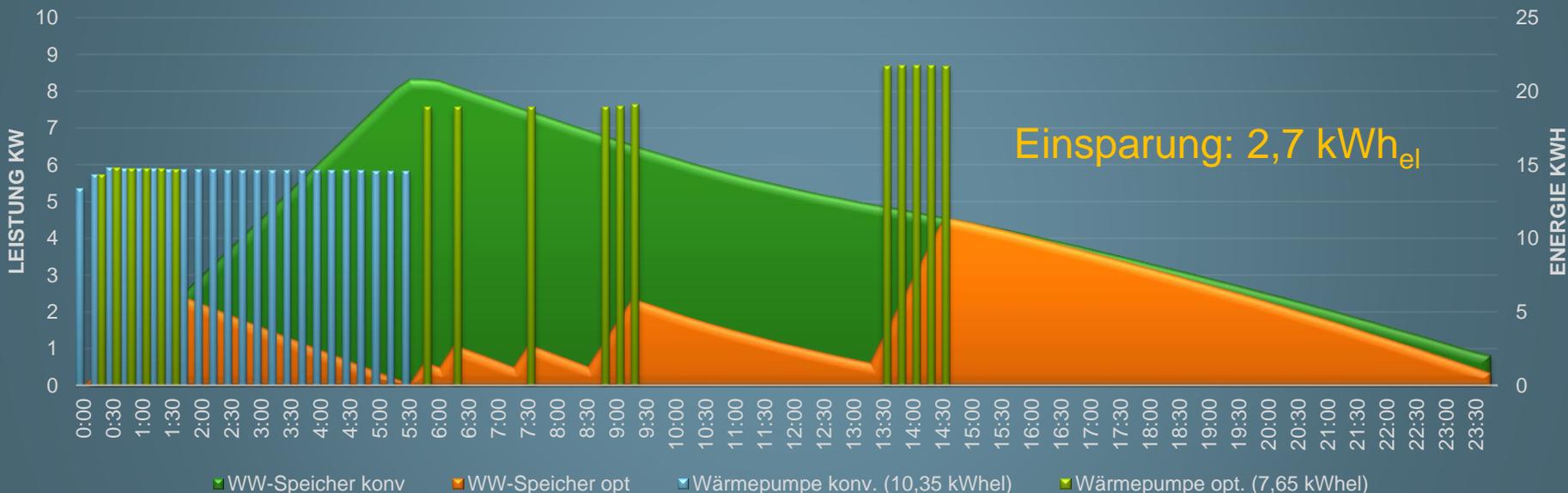
COP der WP



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

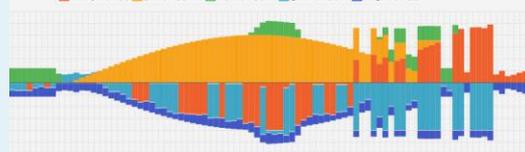
Wohngebäude (exemplarisch)

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

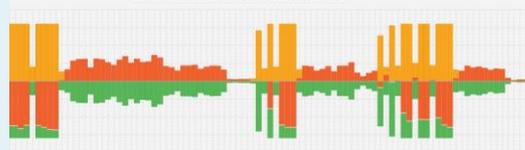
battery01 [kWh_e] pv01 [kW_e] chp01 [kW_e] grid01 [kW_e] usage01 [kW_e]



battery01 [kWh_e]



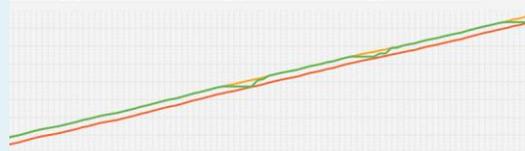
buffer01 [kWh_th] chp01 [kW_th] usage01 [kW_th]



buffer01 [kWh_th]



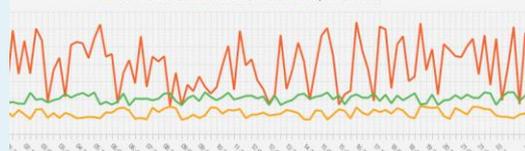
Min. Thermal Aggregated Request [kWh_th] Max. Thermal Aggregated Request [kWh_th] Thermal Aggregated Supply [kWh_th]



HotWater Supply [kWh_th]



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

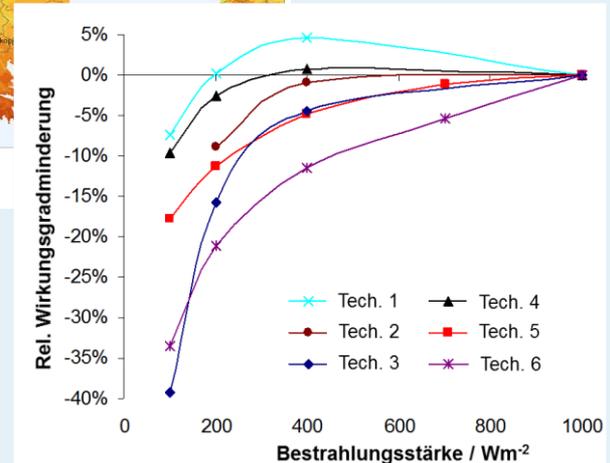
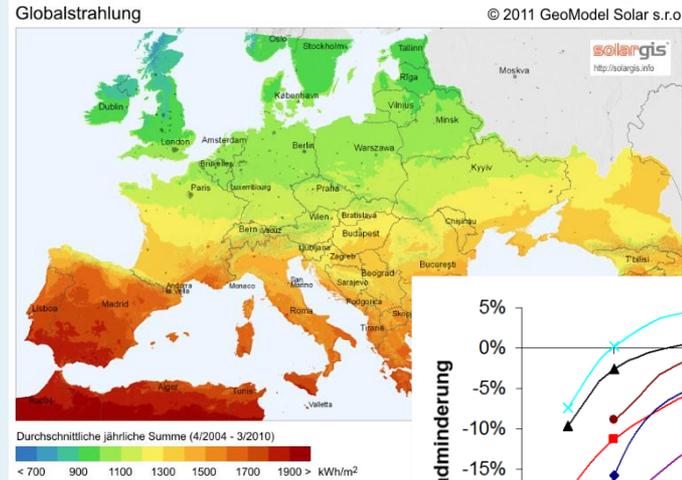


Total [€ct]



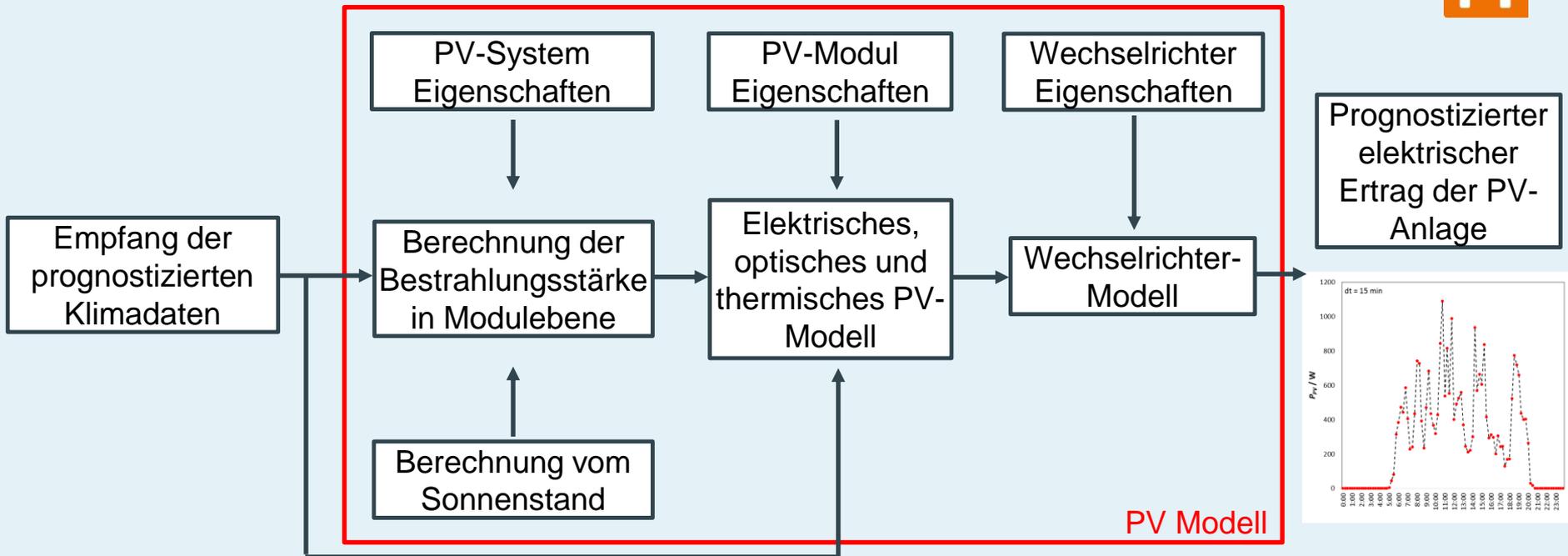
Einflüsse auf die Leistungsprognose

- 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

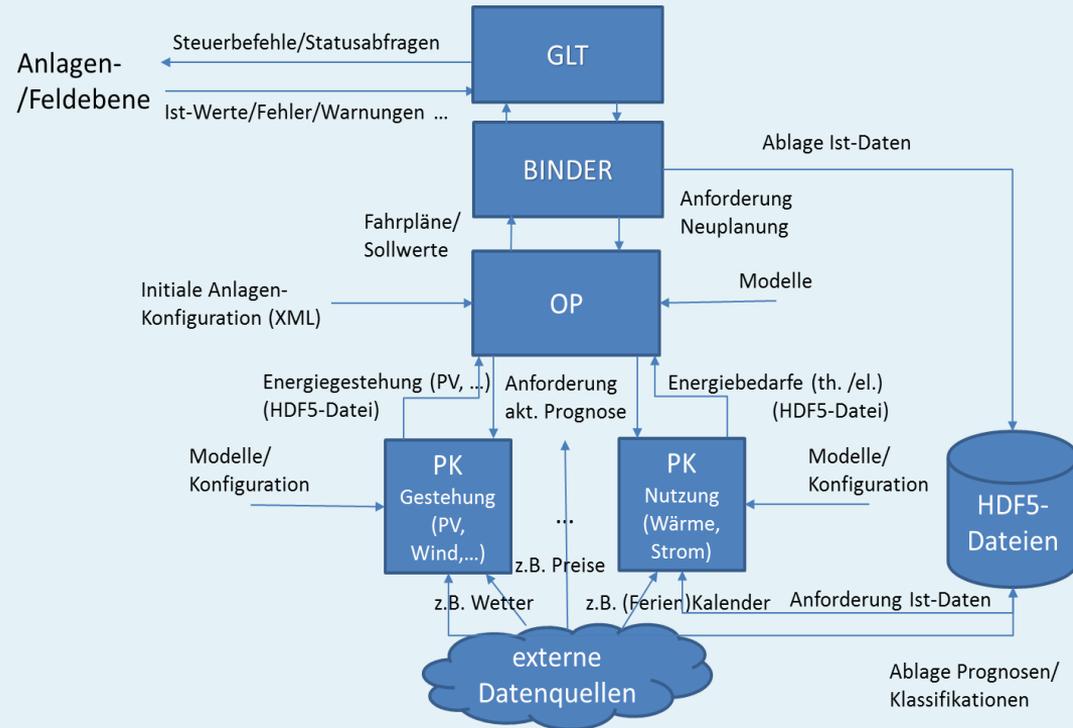
- PV-Gestehung
- Bedarfsprofile (Wärme, WW, ...)

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