

# Entscheidungsunterstützung beim Lastmanagement von Haushaltskunden und dezentralen Erzeugungsanlagen

Workshop der GOR-Arbeitsgruppen „Entscheidungstheorie und -praxis“ und  
„OR im Umweltschutz“

Goslar, 1. März 2012

Lutz Hillemacher, Patrick Jochem, Wolf Fichtner

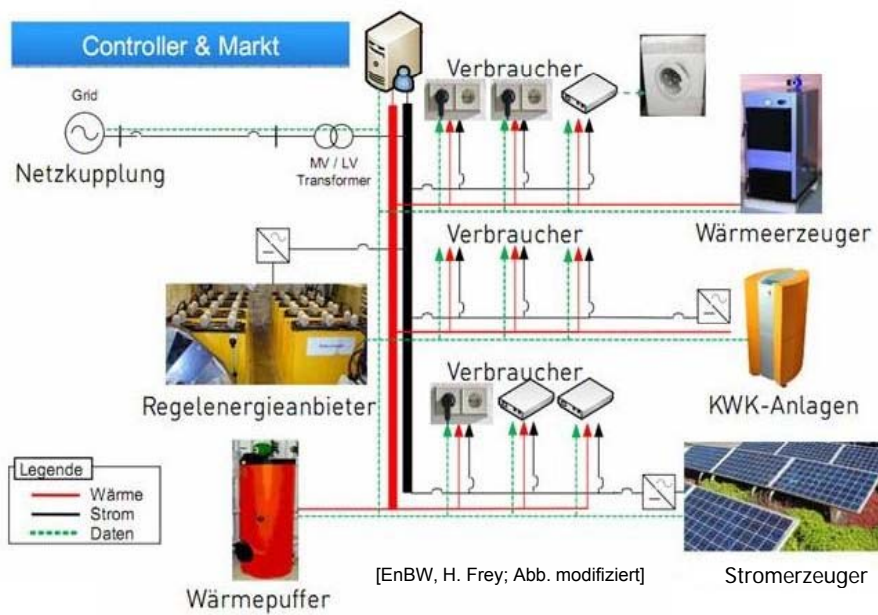
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft



[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

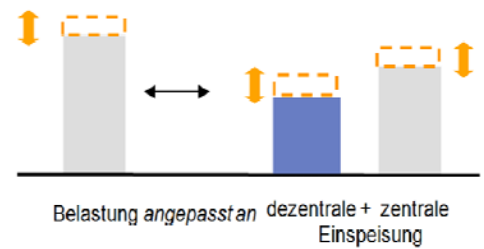
## Agenda

1. Kurzüberblick über das Projekt MeRegio
2. Ermittlung der Preiselastizitäten im Rahmen des MeRegio-Feldtests
3. Beschreibung des Modells zur Festlegung der Preis- und Effizienzsignale
4. Erste Ergebnisse des Feldtests hinsichtlich der Preiselastizitäten
5. Zusammenfassung und Ausblick

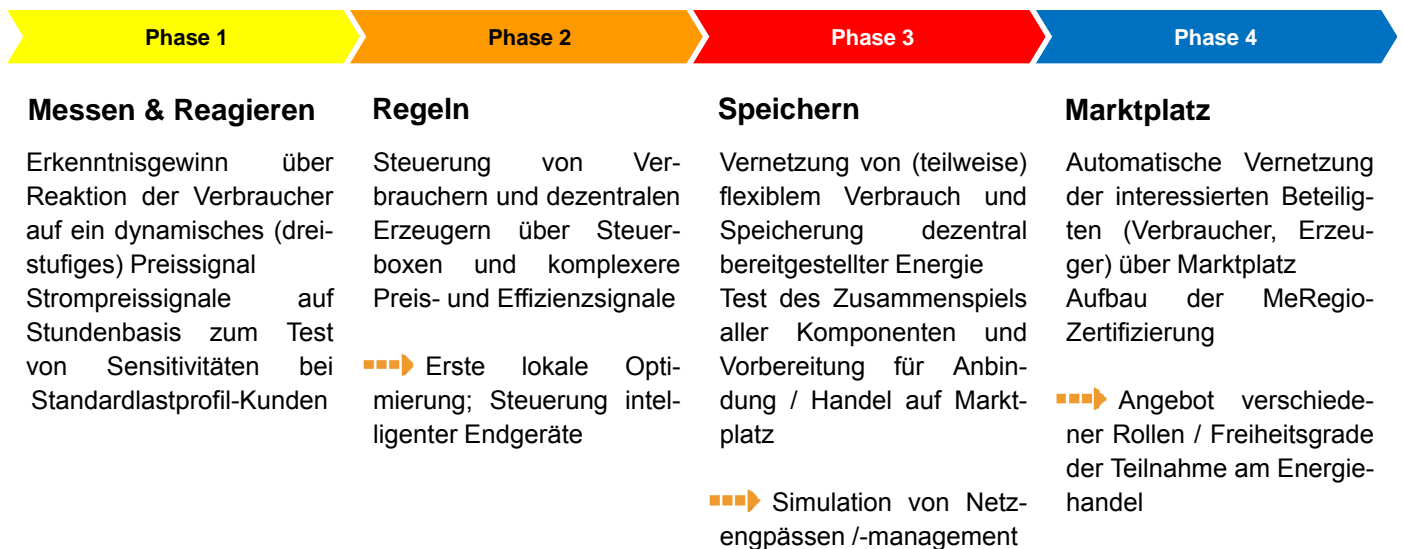


**Vernetzung von Verbrauchern sowie zentraler und dezentraler Erzeugung**

Leistungsausgleich durch Tarifieren mit Einbindung aller Teilnehmer



## Projektphasen MeRegio



100 Testkunden  
100 Referenzkunden

850 Testkunden  
350 Referenzkunden

Ziel: 1000  
Testkunden

## Dreistufiges Preissignal

- Stufe 1 (15,81 ct/kWh)
- Stufe 2 (19,31 ct/kWh)
- Stufe 3 (22,31 ct/kWh)

## 4 Zeitzonen

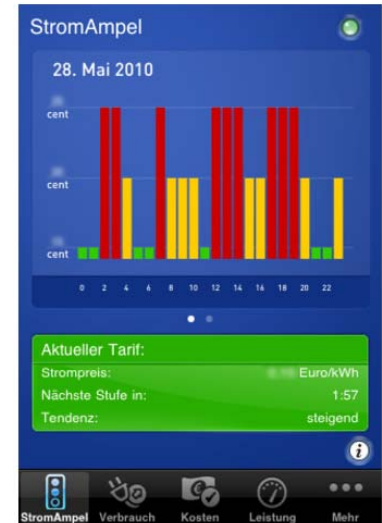
- Zone A (6-9 Uhr)
- Zone B (9-18 Uhr)
- Zone C (18-22 Uhr)
- Zone D (22-6 Uhr)

## Vertriebsregeln der EnBW

In jeder Zeitzone muss jede Tarifstufe in einer vorbestimmten Anzahl auftreten



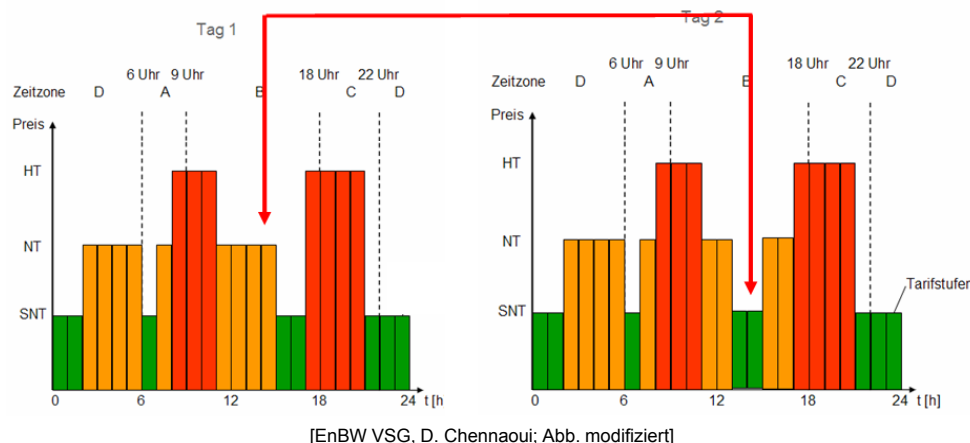
Die zeitliche Verteilung der Tarifstufen muss so gewählt werden, dass eine möglichst eindeutige Zuordnung der beobachteten Verbraucherreaktionen zu einem Tarifwechsel erfolgen kann  
→ Einplanung mehrerer ähnlicher Preissignalverläufe und Variation nur in weit auseinanderliegenden Zeitsegmenten, um die Richtung einer evtl. Lastverschiebung bestimmen zu können



# Bestimmung der Preiselastizitäten

## Berechnung der Preiselastizitäten anhand der Messwerte

Berechnung zwischen gleichen Zeitsegmenten vergleichbarer (Wochen-)Tage



- Fehler durch grundsätzliche Lastzu- bzw. -abnahme im Tagesverlauf können vermieden werden
- Verschiedene Lasten zwischen den Tagen auf Grund externer Einflüsse (z.B. Witterung) können die Ergebnisse verfälschen



Abgleich mit Lastdaten einer mit der Gruppe der MeRegio-Versuchsteilnehmer vergleichbaren Referenzgruppe

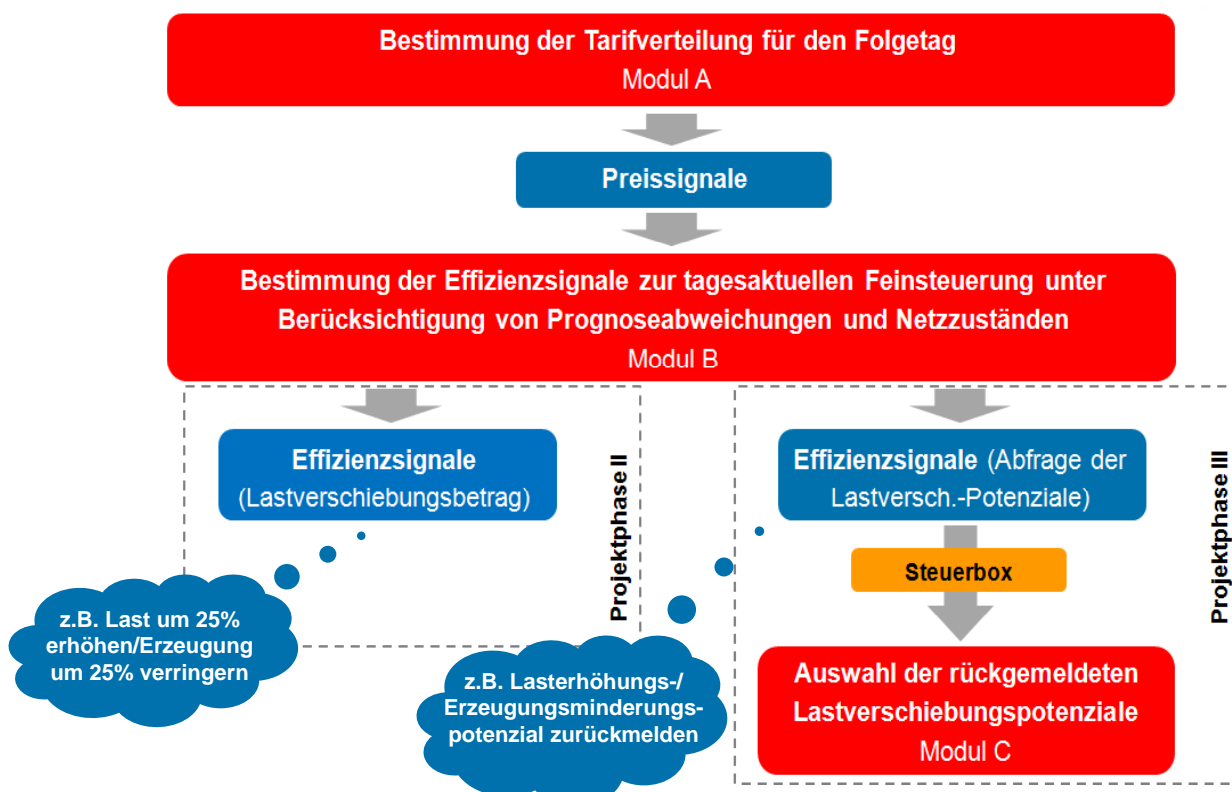
**Bestimmung der Preis-  
und Effizienzsignale**

**Dynamische Anpassung der Preis-  
und Effizienzsignale auf Grundlage  
tatsächlicher Messwerte und  
Prognoseabweichungen**

**Optimierung der Signalfestlegung  
je nach Kundenklasse unter  
Wirtschaftlichkeits- und CO<sub>2</sub>-  
Vermeidungsaspekten**

**Überprüfung  
ausgewählter  
Arbeitshypothesen**

## Aufbau der Modellfamilie zur Generierung der Preis- und Effizienzsignale



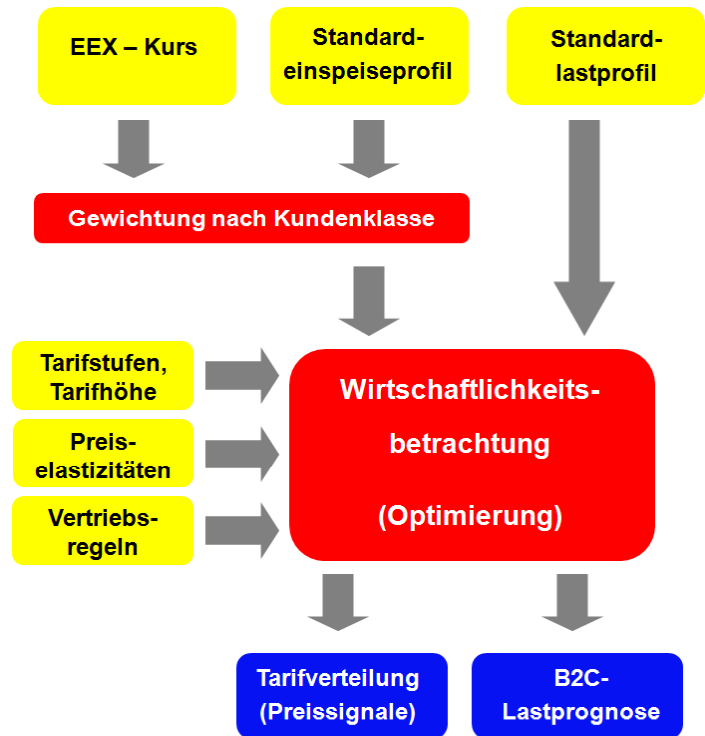


## Modellcharakteristik

- Detaillierte Abbildung der Eingangsparameter (Standardlast- und Standardeinspeiseprofil, EEX-Kurs, Preis- und Effizienzelastizitäten, Vertriebsregeln, Kundenklasse preis- und/oder CO<sub>2</sub>-optimiert etc.)
- Erstellung einer B2C-Lastprognose unter Berücksichtigung der Preiselastizitäten
- Festlegung der Tarifverteilung (Preissignale) für den Folgetag

## Analyseoptionen

- Optimierung unter Wirtschaftlichkeits- und/oder Umweltaspekten (nach Kundenklasse) → Signalverteilung orientiert sich an den Strombeschaffungskosten oder an der Verfügbarkeit von dezentraler Einspeisung



## Modell zur Optimierung der zeitlichen Verteilung der Preissignale – Aufbau

### Modellstruktur

- Modelliert in GAMS (General Algebraic Modeling System)
- Mixed-integer linear programming (MILP-Modell)



### Modellaufbau

- Ca. 1400 Variablen, davon ca. 600 ganzzahlig
- Ca. 2500 Gleichungen
- Rechenzeit ca. 4 Sekunden

## Zielfunktion

$$\min_{\Delta L_{h,TW}} ZF = \sum_h \sum_{TW} \Delta L_{h,TW} \left( \underbrace{KKL \cdot EEX_h}_{\text{Optimierung unter Wirtschaftlichkeitsaspekten in Abhängigkeit von der Kundenklasse}} - \underbrace{(1 - KKL) \cdot \frac{SEP_h}{SLP_h} \cdot EEV + \Delta p_{h,TW}}_{\text{Optimierung nach Verfügbarkeit dezentraler Erzeugung in Abhängigkeit von der Kundenklasse}} \right)$$

Optimierung unter Wirtschaftlichkeitsaspekten in Abhängigkeit von der Kundenklasse

Optimierung nach Verfügbarkeit dezentraler Erzeugung in Abhängigkeit von der Kundenklasse

|                        |   |
|------------------------|---|
| EEV:                   | Einspeisevergütung gemäß EEG  |
| EEX <sub>h</sub> :     | EEX-Preis in Zeitsegment h  |
| h:                     | Indexmenge der Zeitintervalle   |
| KKL:                   | Kundenklasse (1: <i>preisoptimiert</i> ; 0: <i>CO<sub>2</sub>-optimiert</i> ) |
| SLP <sub>h</sub> :     | Standardlast im Zeitsegment h   |
| SEP <sub>h</sub> :     | Dezentrale Einspeisung in Zeitsegment h                                       |
| TW:                    | Indexmenge der Tarifwechsel (-möglichkeiten)                                  |
| Δ p <sub>h, TW</sub> : | Preisänderung bei Tarifwechsel TW in h  |
| Δ L <sub>h, TW</sub> : | Laständerung bei Tarifwechsel TW in h   |

# Modell zur Optimierung der zeitlichen Verteilung der Preissignale – Nebenbedingungen

## (ausgewählte) Nebenbedingungen

Lastverschiebungspotenzial in Abhängigkeit von der Preiselastizität und dem Tarifwechsel

$$\Delta L_{pot_{h,TW}} = SLP_h \cdot PE_{h,TW} \quad \forall h, TW$$

Beschränkung auf einen Tarif(wechsel) je Zeiteinheit h

$$\Delta L_{h,TW} = \Delta L_{pot_{h,TW}} \cdot u_{h,TW} \quad \forall h, TW$$

$$\sum_{TW} u_{h,TW} \leq 1 \quad \forall h$$

$$T_{h,AT} = \sum_{TW} u_{h,TW} \cdot TWM_{AT,TW} \quad \forall h, AT$$

Abbildung der Vertriebsregeln (Festlegung der Anzahl der Tarifstufen in der jeweiligen Zeitzone)

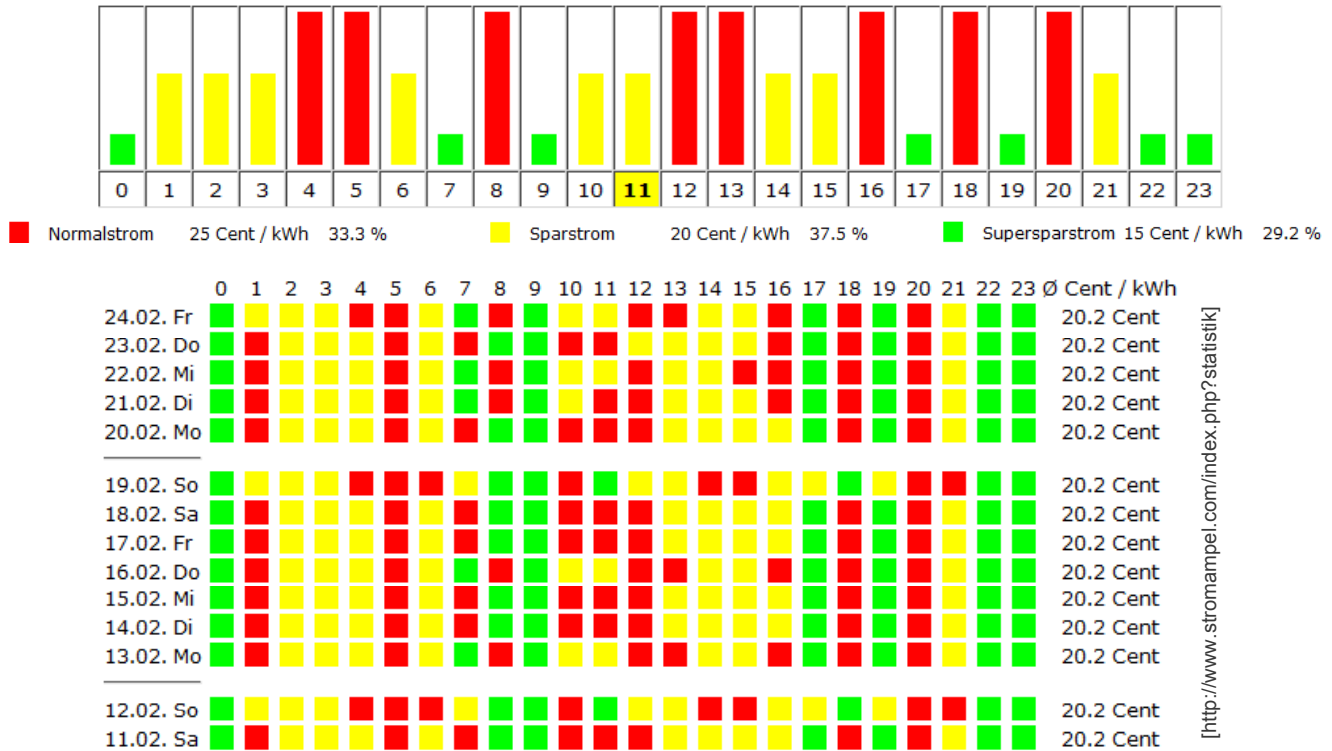
$$\sum_{ZZ_q} T_{ZZ_q,AT} = v_{ZZ_q,AT} \quad \forall q, AT$$

|                              |  |
|------------------------------|--|
| AT                           | Indexmenge des Tarifstufen                                       |
| Δ L <sub>h, TW</sub> :       | (tatsächliche) Laständerung bei Tarifwechsel TW in Zeitsegment h |
| Δ L <sub>pot_{h, TW}</sub> : | Laständerungspotential bei Tarifwechsel TW in Zeitsegment h      |
| m:                           | Lastkonstante (Schwellenwert)                                    |
| PE <sub>h, TW</sub> :        | relative Laständerung bei Tarifwechsel TW in Zeitsegment h       |
| q:                           | Indexmenge der Zeitzonen   |
| SLP <sub>h</sub> :           | Standardlast im Zeitsegment h                                    |
| T <sub>h, AT</sub> :         | Binärvariable der möglichen Tarifstufen in Zeitsegment h         |
| T <sub>ZZq,AT</sub> :        | Binärvariable der möglichen Tarifstufen in Zeitzone q            |
| TWM <sub>AT, TW</sub> :      | Tarifwechselmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Ausgangstarif      |
| u <sub>h, TW</sub> :         | Binärvariable  |
| v <sub>ZZq,AT</sub> :        | Häufigkeit der Tarifstufe AT in der Zeitzone ZZ <sub>q</sub>     |
| ZZ <sub>q</sub> :            | Zeitzone q (Menge von Zeitintervallen h)                         |



Die Bedarfsdeckung ist wahlweise durch Bilanzgleichungen oder durch die Abbildung der Vertriebsregeln sichergestellt

24.02.2012



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

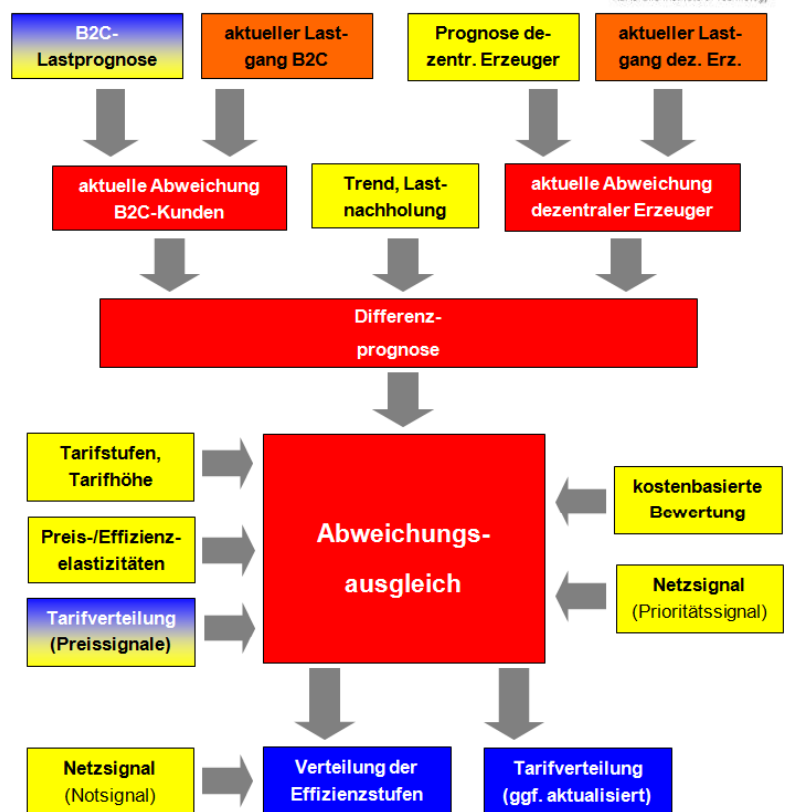
12

GOR-Workshop Goslar, 1. März 2012  
Lutz Hillemacher | Patrick Jochem | Wolf Fichtner

## Bestimmung der Effizienzsignale (Projektphase II)

### Signalgenierung (intra-day)

- Ermittlung der Soll-Ist-Abweichungen der B2C-Lastprognose sowie der Prognose der dezentralen Erzeuger an Messwerte
- Erstellung einer aktualisierten Prognose für die folgenden 24 Stunden
- Stündliche Festlegung (und Anpassung) der zeitlichen Verteilung der (relativen) Effizienzsignale auf Grundlage der Preis- und Effizienzelastizitäten
- Ggf. Anpassung der Preissignale (soweit zeitlich möglich)
- Berücksichtigung von Aspekten der Netzfürung
- Kombinierte oder getrennte Betrachtung von Erzeuger- und Verbraucherseite sowie Berücksichtigung unterschiedlicher Kundenklassen



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

13

GOR-Workshop Goslar, 1. März 2012  
Lutz Hillemacher | Patrick Jochem | Wolf Fichtner

**Zielfunktion** 
$$\min ZF = \sum_g DP_g + \sum_{SW} \Delta L_{g, SW}$$

## (ausgewählte) Nebenbedingungen

Lastverschiebungspotenzial in Abhängigkeit von der Signalsensitivität des entspr. Signalwechsels

$$\Delta L_{pot_{g, SW}} = SK \cdot LP_g \cdot LK_{SW} \cdot SE_{g, SW} \cdot u_{g, SW} \cdot BW_{g, SW} \quad \forall g, SW$$

Zulässigkeit des Signalwechsels im entsprechenden Zeitintervall

$$\Delta L_{g, SW} = \Delta L_{pot_{g, SW}} \cdot u_{g, SW} \quad \forall g, SW$$

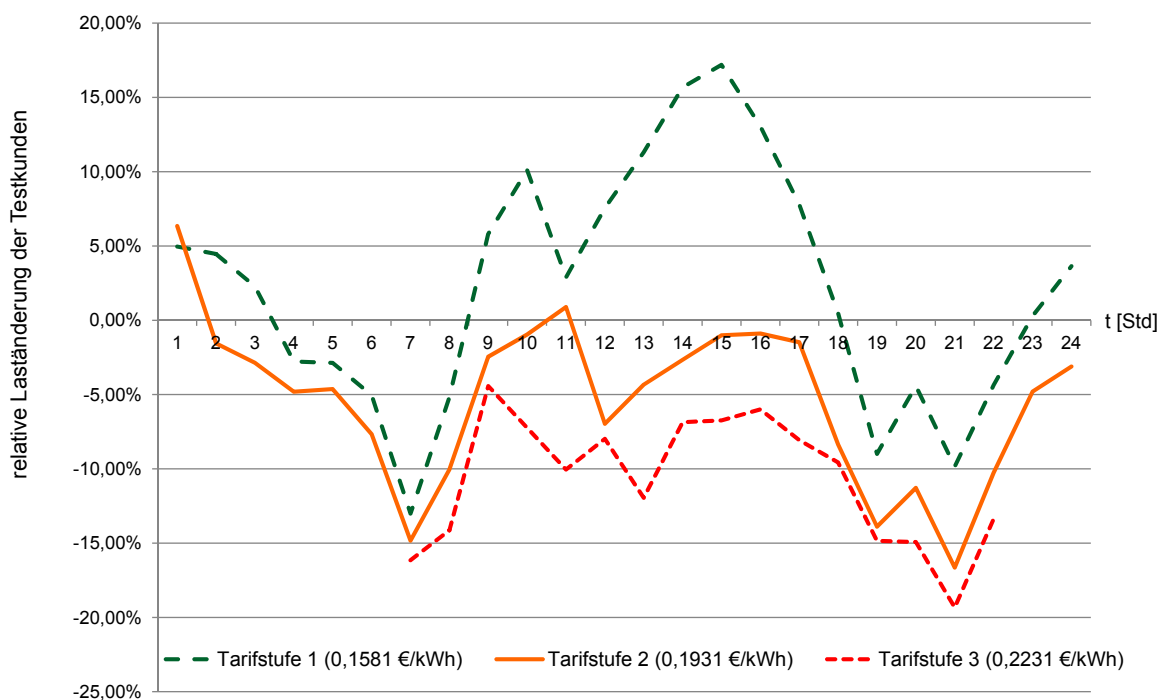
$$\sum_{SW} u_{g, SW} = 1 \quad \forall g$$

...

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $BW_{g, SW}$ :             | Signalwechselfähigkeiten in Zeitsegm. g in Abh. v. Ausgangssignal   |
| $DP_g$ :                   | Prognose der Lastdifferenz in Zeitsegment g   |
| $g$ :                      | Index der Zeitintervalle  |
| $LK_{SW}$ :                | Lastkoeffizient in Abhängigkeit von SW ( <i>gibt an, um wie viel Prozent die Last durch den Signalwechsel verändert werden soll</i> ) |
| $LP_g$ :                   | Lastprognose in Abhängigkeit von SW   |
| $n$ :                      | Lastkonstante (Schwellenwert)   |
| $SE_{g, SW}$ :             | relative Laständerung bei Signalwechsel SW in Zeitsegment g   |
| $SK$ :                     | Simulationskonstante  |
| $u_{g, SW}$ :              | Binärvariable   |
| $\Delta L_{g, SW}$ :       | Laständerung bei (Effizienz-) Signalwechsel SW in Zeitsegment g   |
| $\Delta L_{pot_{g, SW}}$ : | Laständerungspotenzial bei Signalwechsel SW in Zeitsegment g  |

## Phase I – erste Ergebnisse

Relative Laständerung der MeRegio-Testkunden im Vergleich zur Referenzgruppe



Datengrundlage: Messungen werktags außer samstags Nov 2009 – Feb 2010



## Zusammenfassung

- Grundsätzliche Verbraucherreaktionen auf Preissignale beobachtbar
- Reaktionsverhalten ist abhängig
  - vom Tarifwechsel,
  - vom Tagtyp sowie
  - von der Tageszeit

## Weitere Schritte

- Kontinuierliche Überprüfung der gemessenen Sensitivitäten in Bezug auf Preis- und Effizienzsignale
- Detaillierte Analyse der Verbraucherreaktionen
- Weiterentwicklung des Optimierungsmodells
  - Verbesserung der modellgestützten Prognose der Verbraucherreaktionen auf Änderungen der Preis- und Effizienzsignale

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

## Kontakt:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft  
Lutz Hillemacher  
Hertzstraße 16 | D – 76187 Karlsruhe  
<http://www.iip.kit.edu>  
Mail: [Hillemacher@kit.edu](mailto:Hillemacher@kit.edu)  
Tel.: +49 721 608 44409