



**University of Stuttgart**  
**IER** Institute for Energy Economics  
and Rational Energy Use

## Rolle und Verhalten dezentraler Akteure im sektor-integrierten Energiesystem

Christoph Schick

14. Februar 2019

IEWT 2019

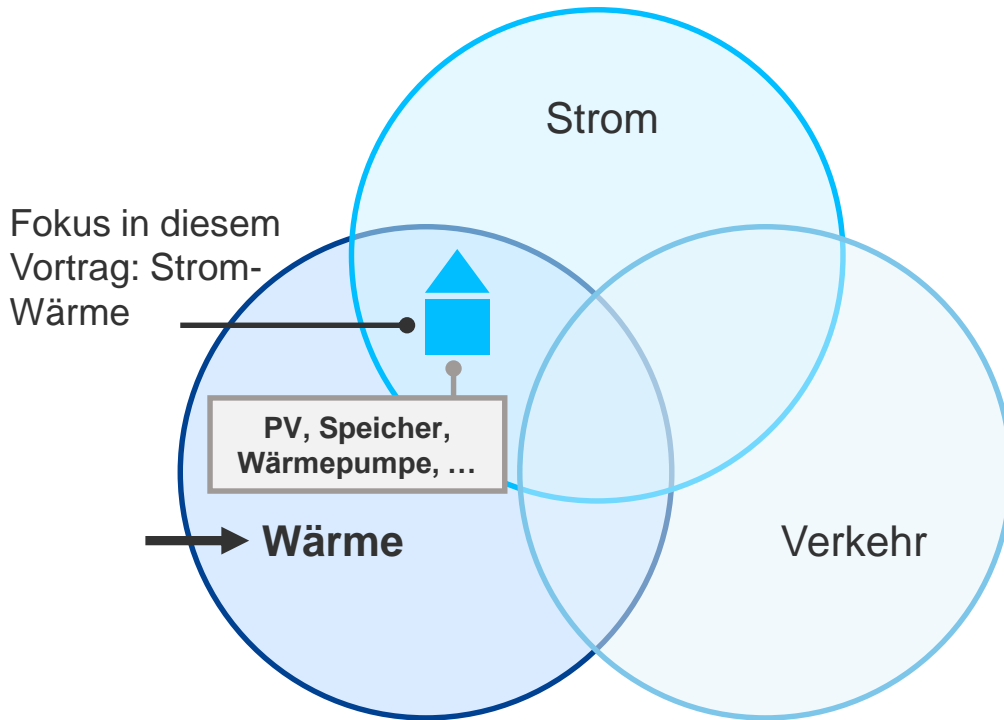
*„Freiheit, Gleichheit, Demokratie: Segen oder  
Chaos für Energiemärkte?“*

# Gliederung

- 1) **Einleitung & Motivation**
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse
- 4) Schlussfolgerungen

# Einleitung & Motivation – Forschungsrahmen

## Rolle von Prosumern im sektor-integriertem Energiesystem



- Die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr „verschmelzen“ zunehmend und eine tiefe Dekarbonisierung ist nur mit **sektorintegriertem Ansatz** zu erreichen.
- Der **Beitrag** von **Prosumern** zur Energieproduktion ist derzeit gering – aber Anzahl verbauter PV-Anlagen und Batteriespeicher sind stark wachsend.
- Eine Vielzahl an Prosumern im Energiesystem führt zu **Wechselwirkungen** zwischen Prosumern und Gesamtsystem.

## Einleitung & Motivation – Forschungsfrage (1/2)

Prosumer können sich durch Invest in dezentrale Erzeugung & Speicherung an Energiewende beteiligen

### Zielbild

- **Massiver Ausbau Erneuerbarer Energien** notwendig.
- Signifikanter EE-Ausbau setzt **Ausschöpfung vorhandener Potenziale** unter **Berücksichtigung von Restriktionen** (z.B. Akzeptanz, Flächenkonkurrenz etc.) voraus und benötigt **Finanzierung**.
- In diesem Sinne ist eine **Beteiligung von Prosumern** am EE-Ausbau, z.B. durch Ausnutzung von Dachflächenpotenzialen für PV, erstrebenswert.

### Voraussetzungen

- Zwei Voraussetzungen sind dabei gleichzeitig zu erfüllen
  - a) Es muss einen **individuellen Prosumer-Nutzen** (monetär/ nicht-monetär) geben.
  - b) Das individuelle Verhalten der Prosumer sollte im Sinne des Gesamtsystems sinnvoll – **systemverträglich/-dienlich** – sein.

... aber

## Einleitung & Motivation – Forschungsfrage (2/2)

Verzerreffekte können zu Abweichungen zwischen System- und Akteursperspektive führen

### Status- quo

- **Wechselwirkungen** unterschiedlicher Marktinstrumente (z.B. **EEG**, **Netzentgelte**) führen zu **Verzerrungen**, d.h. Summe der Einzeloptima der Prosumer  $\neq$  Gesamtsystemoptimum.
- These: Diese Effekte sind insbesondere in Systemen mit vielen und unterschiedlichen Akteuren relevant und **verstärken sich durch Sektorkopplung**.
- Ebenso resultieren daraus **Verteileffekte**, die möglicherweise die Akzeptanz der Energiewende selbst beeinflussen.

### Praktische Forschungs- frage

- „*Wie groß / **relevant** sind diese Effekte?*“
- **Daraus abgeleitet, übergreifend:** „*Welche Elemente könnten einen **stabilen Marktrahmen** kennzeichnen, der diesen **Ausgleich zwischen Systemoptimum und individuellen Interessen** herstellt?*“

# Gliederung

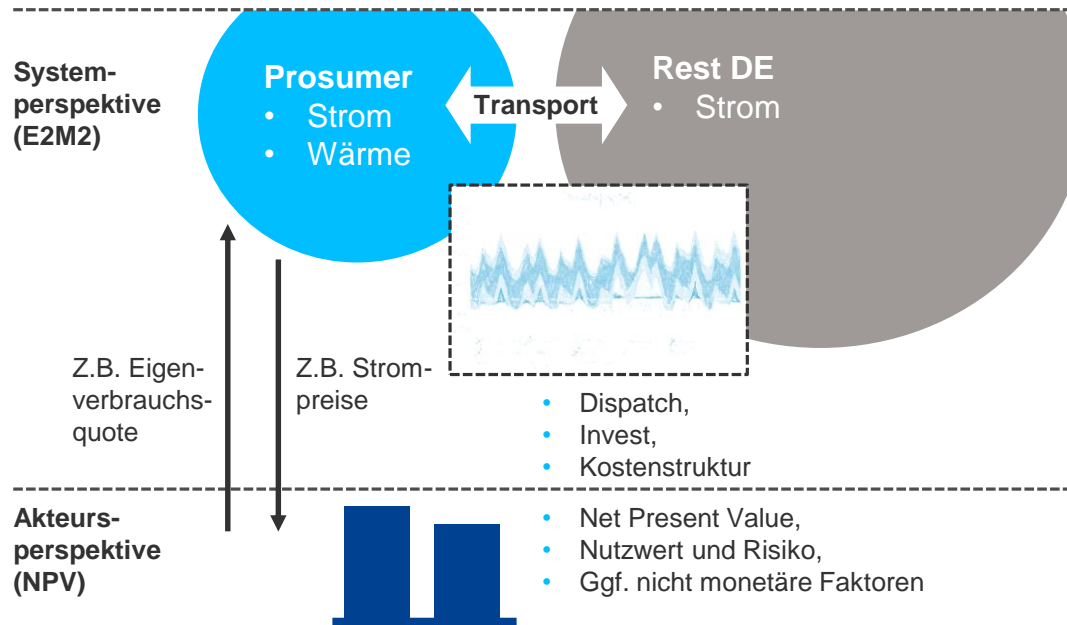
- 1) Einleitung & Motivation
- 2) **Methodik**
- 3) Ergebnisse
- 4) Schlussfolgerungen

# Methodik

## Kombinierte Betrachtung von Gesamtsystem und Einzelsystem

### Methodischer Ansatz Gesamtsystemmodellierung

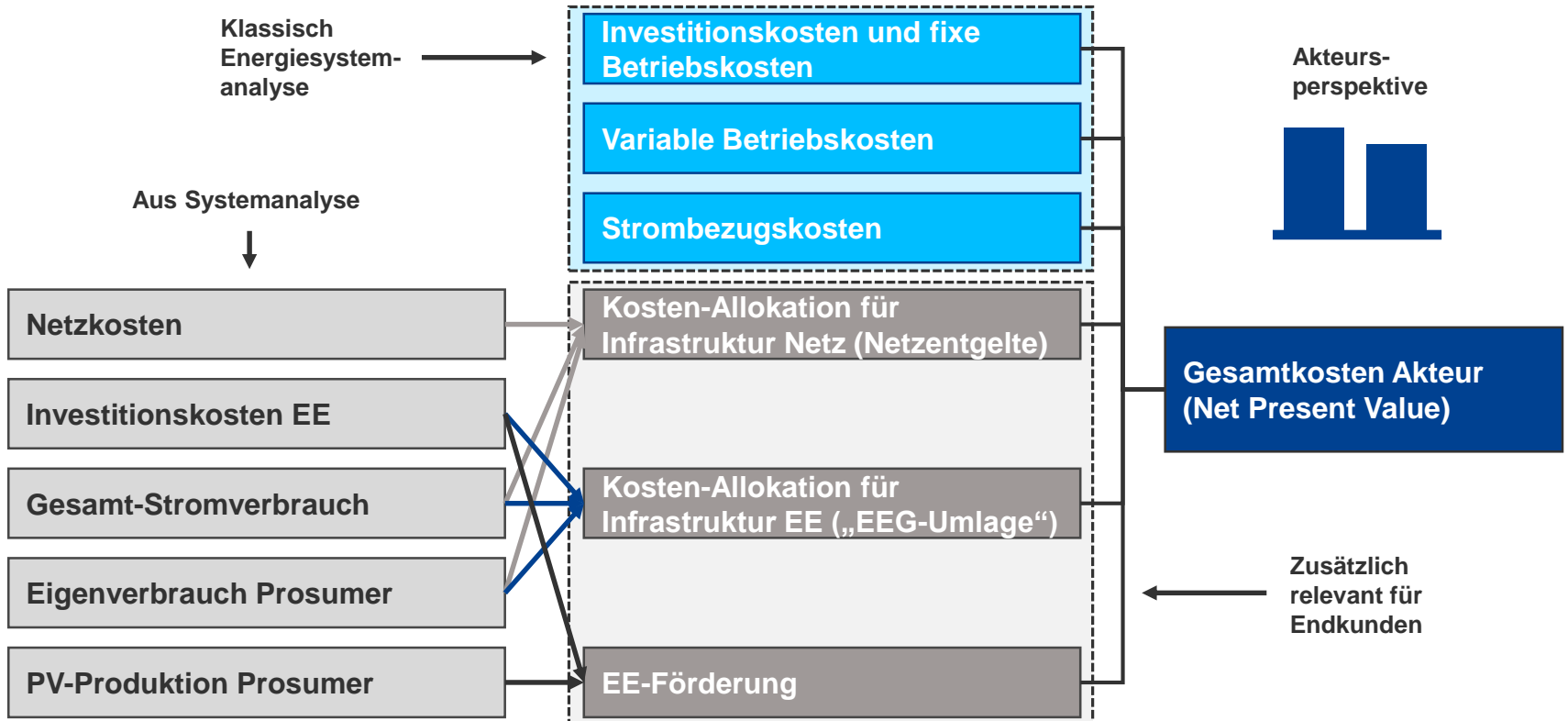
Illustrativ



- **Integrierte und geschlossene Betrachtung** von Gesamtsystem und Einzelsystem
- Aufbau Modell mit **zwei virtuellen Regionen**: „Prosumer-Region“ und „Deutschland Rest“
- **Dezentrale Investoptionen** inkl. Wärmeanwendungen in Prosumer-Region; „Deutschland Rest“ als Strommarkt zur Abbildung von Rückkopplungseffekten
- Akteursperspektive mit Berücksichtigung **endkundenrelevanter Preiskomponenten, abgeleitet aus Systemmodell**

# Methodik – Details zur Akteursperspektive

## Endkunden-relevante Kostenkomponenten inkl. Abgaben/Umlagen





# Gliederung

- 1) Einleitung & Motivation
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse**
- 4) Schlussfolgerungen

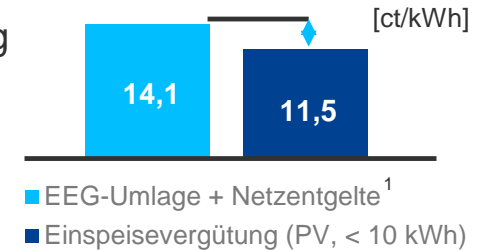
# Methodik – Analysen

	Kosten der Produktion	Kosten des Transports	Refinanzierung EE
Analyse 1 Invest und Betrieb von elektrischen Wärmepumpen	<ul style="list-style-type: none"><li>• PV + Wärmepumpe + th. Speicher</li><li>• Fokus: Strompreise und Wärmegestehungskosten</li><li>• Merit Order-Effekte</li><li>• EE-Integration</li></ul>		
Analyse 2 Betrieb von Batteriespeichern	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>PV + Speicher</b></li><li>• Fokus: Gesamtsystemkosten</li><li>• Merit Order-Effekte</li><li>• EE-Integration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vereinfachte Kostenabbildung</li><li>• Verteileffekte Netzentgelte</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verteileffekte EEG</li></ul>

# Betrieb von Batteriespeichern – Setting

## Status-quo: Verzerrungen durch Unterscheidung von Eigenverbrauch und Großhandel

- **Setting:** Prosumer mit PV und Batteriespeicher
- **Status-quo:**
  - Verzerrungen durch ungleiche Behandlung von Eigenverbrauch und Großhandel:  
Abgaben und Umlagen auf Strom > aktuelle PV-Einspeisevergütung
  - Anreiz, umlage-/abgabenbefreiten Eigenverbrauch zu maximieren, um externen Strombezug zu minimieren
- **Folge:**
  - Speicher auf Eigenverbrauchsmaximierung optimiert, dadurch nicht system-optimal eingesetzt
  - Betrieb: Nicht-optimale EE-Integration, Invest: Ggf. Redundanzen in aufgebauten Speicherkapazitäten
  - Gleichzeitig: Verteileffekte



1. EEG-Umlage 2018 i.H.v. 6,79 ct/kWh (Quelle: Bundesnetzagentur), Netzentgelte 2018 i.H.v. 7,27 ct/kWh (Quelle: BDEW 2018)

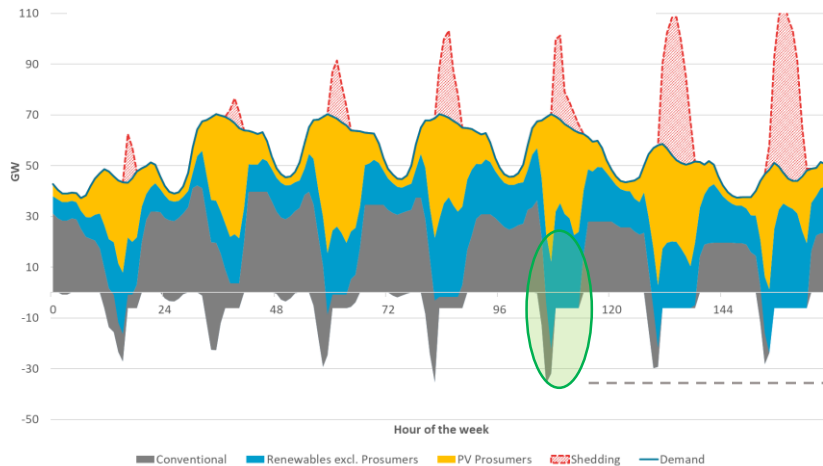
# Betrieb von Batteriespeichern – Speichereinsatz

Durch systemdienlichen Speichereinsatz können höhere EE-Anteile ins System integriert werden

## Fall A: Nicht-systemdienlicher Speichereinsatz

Bei 90% Prosumer-Durchdringung<sup>1</sup>

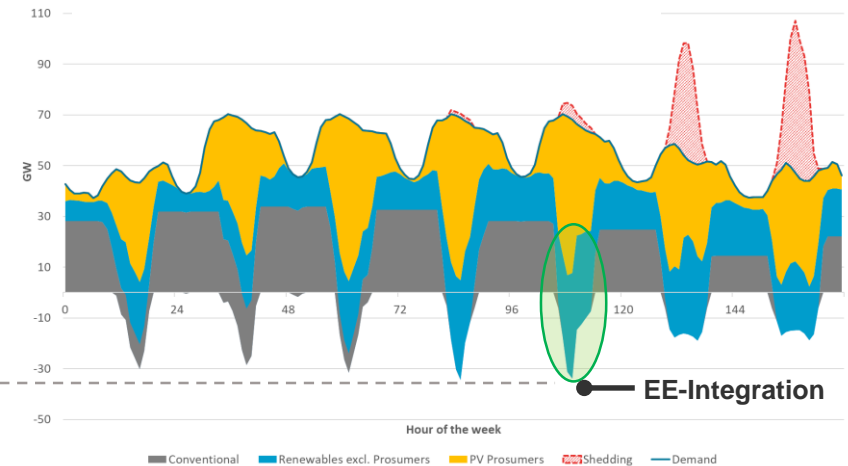
D.h. **maximaler** Eigenverbrauch



## Fall B: Systemdienlicher Speichereinsatz

Bei 90% Prosumer-Durchdringung<sup>1</sup>

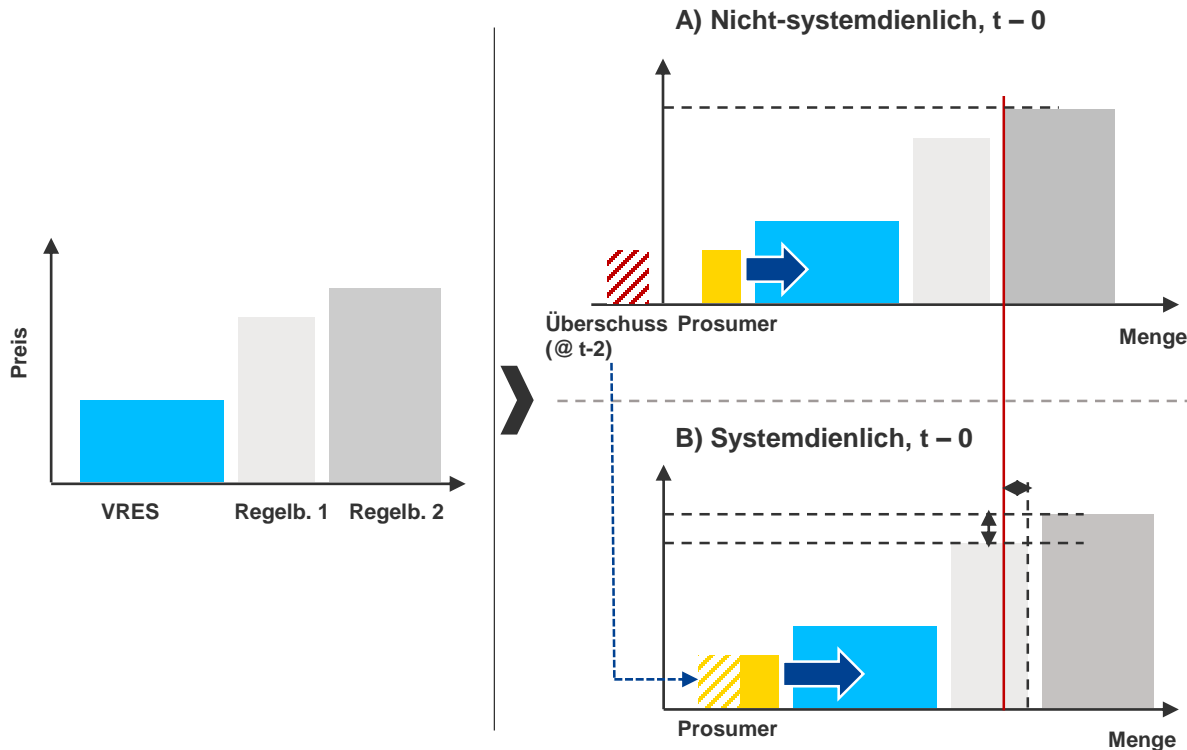
D.h. **geringerer** Eigenverbrauch



[1] Anteil Prosumer an 1- und 2-Familienhäusern; als Basis wurden 15,6 Mio. 1- und 2-Familienhäuser 2015 zugrunde gelegt (Quelle: statistisches Bundesamt) mit einem angenommenen Prosumer-Jahresstromverbrauch von 5.760 kWh p.a.

# Betrieb von Batteriespeichern – EE-Integration

Durch EE-Integration können Anteil konventioneller Erzeugung und damit Systemkosten reduziert werden



- **Maximierung Eigenverbrauch durch chronologisches Laden:**

- t - 3: Speicher voll
- t - 2: Überschüsse entstehen und können nicht genutzt werden
- t - 1: Eigenverbrauch von Speicher
- t - 0: Übriger (geringerer) Speicherinhalt wird ins System gegeben

- **Folge: Höhere Systemkosten und -Preise**

- **Gesamtsystem-optimaler Betrieb**

- t - 3: Speicher noch nicht voll
- t - 2: Weitere Einspeicherung, kein Shedding von Überschüssen
- t - 1: Netzbezug (Wind)
- t - 0: Höherer Speicherinhalt wird ins System gegeben

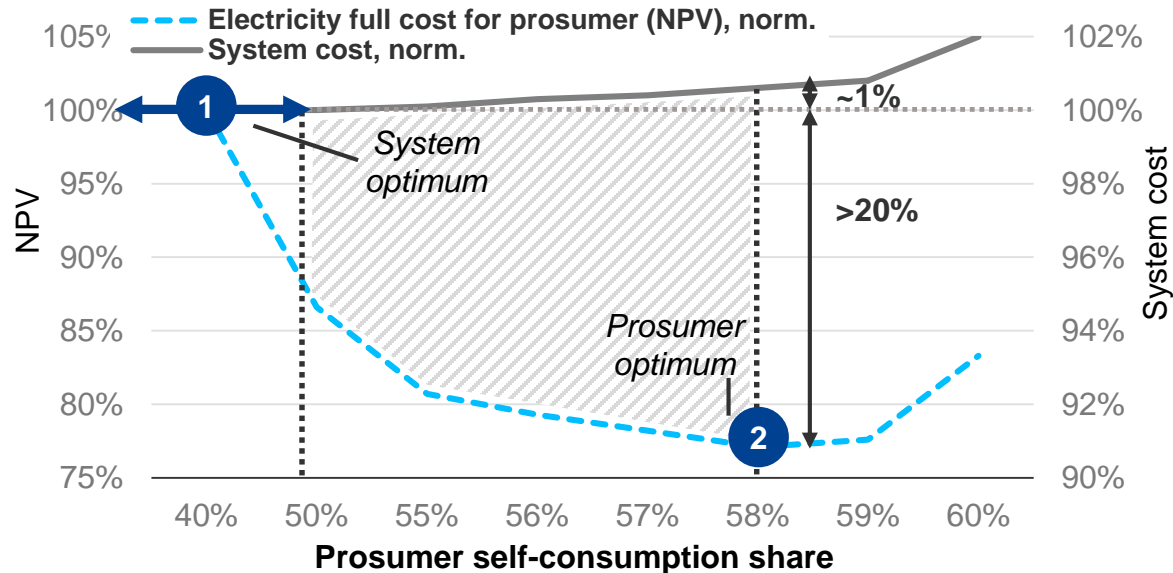
- **Folge: Niedrigere Systemkosten und -Preise**

# Betrieb von Batteriespeichern – Verzerreffekte

Verzerreffekte führen zu Abweichungen zwischen Prosumer- und Systemoptimum

## Systemkosten und Prosumer-Stromvollkosten

Normiert; als Funktion der Eigenverbrauchsquote, 85% EE-Anteil



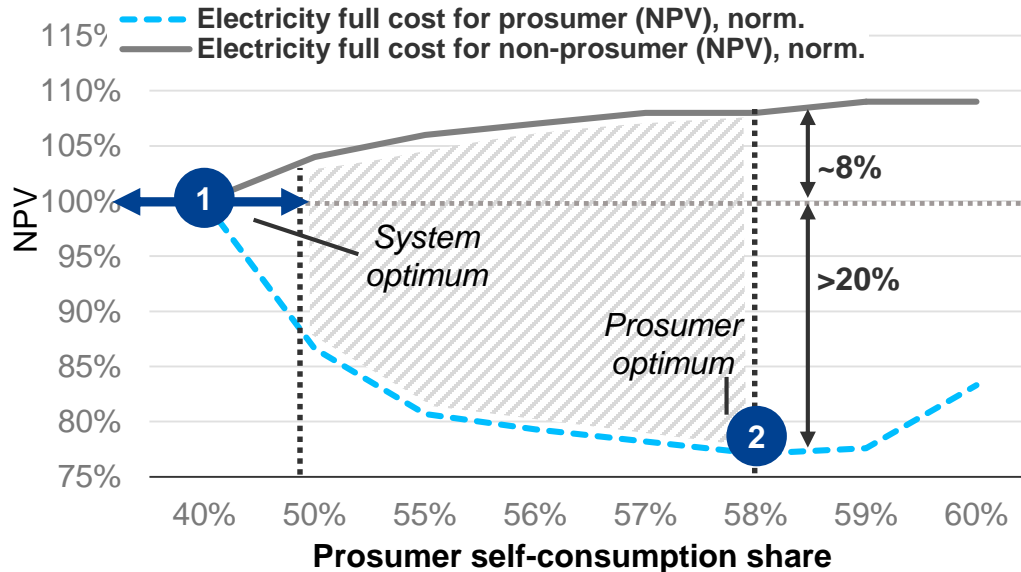
- Grauer Bereich: **Steigung** der **Systemkostenfunktion** mit **umgekehrten Vorzeichen** zur **Prosumer-Kostenfunktion**.
- Systemkosten-optimal sind Eigenverbrauchsquoten  $< 50\%$ .
- Prosumer streben höhere Quoten an zur Verringerung externen Strombezugs.
- Dies wirkt sich nachteilig auf System aus durch Verringerung **EE-Integration** und **Redundanzen** beim Aufbau von **Speicherkapazitäten**.

# Betrieb von Batteriespeichern – Verteilungseffekte

Resultierende Verteileffekte können insbesondere Nicht-Prosumer-Haushalte stärker belasten

## Prosumer- vs. Non-Prosumer-Stromvollkosten

Normiert; als Funktion der Eigenverbrauchsquote, 85% EE-Anteil



- Während Systemkosteneffekt mit 1% noch relativ moderat ist, sind **Verteilungseffekte deutlich größer.**
- Insbesondere **Nicht-Prosumer** müssen mit **deutlichen Kostenanstiegen** kompensieren, wenn Prosumer Eigenmaximierung anstreben.
- Effekt hängt insbesondere von Prosumer-Anteil ab und kann ggf. noch deutlich höher ausfallen.

# Gliederung

- 1) Einleitung & Motivation
- 2) Methodik
- 3) Ergebnisse
- 4) **Schlussfolgerungen**



# Schlussfolgerungen

- **Wechselwirkung unterschiedlicher Politik-Instrumente und Zielfunktionen** in echten Märkten führen zu einer **Abweichung vom System-Optimum**, wenn Akteure Eigenmaximierung betreiben.
- Diese Effekte sind insbesondere relevant in Systemen mit **vielen/ heterogenen Akteursgruppen** und in Hinblick auf **Sektorkopplung** (Komplexität der Wechselwirkungen erhöht sich).
- Um Effekte zu quantifizieren, ist ein **integrierter und geschlossener Ansatz** unter Berücksichtigung von **System- und Akteursperspektive** notwendig.
- Erste Ergebnisse zeigen, dass insbesondere resultierende **Verteileffekte relevant** sind im Hinblick auf die **Akzeptanz** der Energiewende.

# Nächste Schritte – geplante Veröffentlichung

Christoph Schick, Nikolai Klemp, and Kai Hufendiek: Role and impact of energy prosumers in a sector-integrated energy system with high renewable shares

## Role and impact of energy prosumers in a sector-integrated energy system with high renewable shares

Christoph Schick<sup>1\*</sup>, Nikolai Klemp<sup>1</sup>, and Kai Hufendiek<sup>1</sup>

*Abstract*—Interactions of different policy instruments in real markets can lead to a mismatch between stakeholders striving for individual benefits and attaining an overall system optimum. These distortion effects are of particular relevance for sector-integrated systems with high prosumer shares. We quantify these effects and show that they are relevant in view of the overall acceptance of the energy system transformation.

*Index Terms*—Distributed energies, prosumers, sector coupling, market framework

### I. INTRODUCTION

To achieve global climate goals, our energy system needs to be nearly completely decarbonized by 2050, encompassing not only the electricity sector, but all other sectors as well.

Besides increasing energy efficiency, decarbonization of the heat sector can be achieved either through direct use<sup>2</sup> of renewable energy sources (RES) or through electrification<sup>3</sup>. Decarbonization through

stakeholders and b) in sector-integrated systems that further increase the complexity of policy instrument interactions.

An example for such distortion effects are non-system optimal run modes of battery storages and heat pumps in combination with thermal storages in order to increase self-consumption and minimize purchase of allocation-loaded, and hence expensive, energy from the grid, as described by [3].

The goal of this study is to quantify these distortion effects for different policy instruments. To do so, an integrated assessment from both the system and stakeholder perspective is crucial. We quantify by how much the total system will be burdened if prosumers act to maximize their own profit and, vice versa, we quantify the individual disadvantages when prosumers act in a system-beneficial manner. At the same time, we analyze the impact on non-prosuming households resulting from distributional effects. Thus, our results are directly related to the question of how to make the energy system transformation not only technically possible, but acceptable and therefore realizable for the involved stakeholders.

Extended Abstract eingereicht für

*Call for Papers in the Special Section IEEE Transactions on Power Systems: “Towards a 100 % renewable energy system”*

# Quellen

## In diesem Vortrag verwendet

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2017). Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2016. Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte; ohne Strom
- Dena et. al. (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Unter Mitarbeit von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin
- BCG et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. V. Bundesverband der Deutschen Industrie.
- Ackermann, Thomas; Andersson, Göran; Söder, Lennart (2000): Distributed generation: a definition.
- Horenkamp, W., Hube, W. und Jäger, J. (2007). VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020. Frankfurt: Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2007
- Bauknecht, Dierk; Vogel, Moritz; Funcke, Simon (2015): Energiewende – Zentral oder dezentral?
- Matthes, Felix Chr.; Flachsbarth, Franziska; Vogel, Moritz; Cook, Vanessa (2018): Meta-Studie Dezentralität, Regionalisierung und Stromnetz.
- Bremdal, Bernt Arild (2011): Prosumer oriented business in the energy market. In IMPROSUME Publication Series #2.



**University of Stuttgart**  
**IER** Institute for Energy Economics  
and Rational Energy Use

# Thank you!

**Christoph Schick**

e-mail [Christoph.schick@ier.uni-stuttgart.de](mailto:Christoph.schick@ier.uni-stuttgart.de)

phone +49 (0) 711 685-87856

fax +49 (0) 711 685-87873

Universität Stuttgart  
Energienmärkte und Intelligente Systeme  
Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart

**Backup**

# Methodik – Details zur Gesamtsystemmodellierung

## Greenfield, 1 Jahr integral

### Gesamtsystemmodellierung mit E2M2

- Stündliche Auflösung, 1 Jahr integral (2050)
- Greenfield

### Elektrische Erzeugung:

- EE: PV, Run-of-River, Bio, Wind onshore, Wind offshore
- Konventionell: Erdgas-Turbine

### Wärme (nur Prosumer):

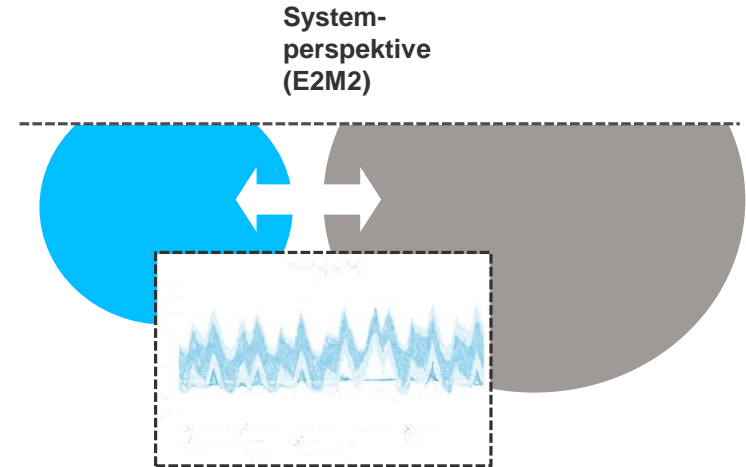
- Elektrische Wärmepumpe, Erdgas-Brennwertkessel (Referenztechnologie)

### Flexibilitäten:

- Pumpspeicher, Batterie, thermisch
- Netz (Transmission capacity)

### Restriktionen inkl. Prosumer-Abbildung:

- CO2-Cap oder Preise (Klimaziele)
- Virtuelle Übertragungskapazität (momentaner Autonomie-Grad der Prosumer)
- Eigenverbrauchsquote (Beschränkung des Jahres-Integral der Übertragungskapazitäten)

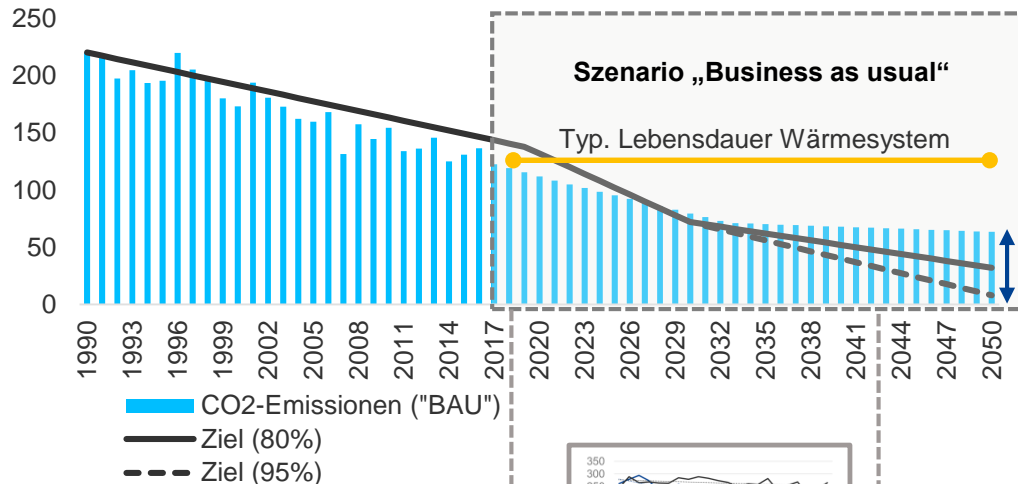


# Einleitung & Motivation – Status-quo Wärmewende

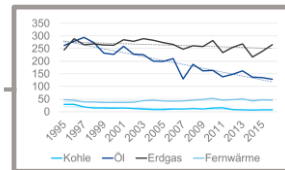
Erreichen der langfristigen Minderungsziele setzt weitgehende Substitution fossilen Erdgases im Wärmesektor voraus

## CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Wärme im Gebäudebereich in Deutschland

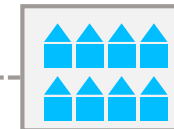
In Mio. t; Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen<sup>1</sup>



1. Datenquelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2017). Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2016. Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte; ohne Strom



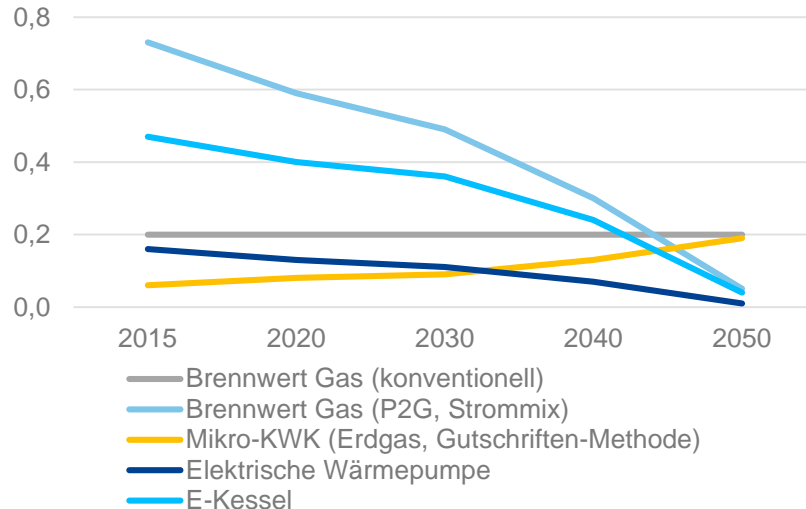
- Szenario „Business as usual: Ab 2030 Kohle und Öl substituiert, aber fossiles Erdgas weiter im System - 2050-CO<sub>2</sub>-Ziele mit aktuellen Anstrengungen nicht erreichbar.
- Erreichen der langfristigen Minderungsziele setzt weitgehende Substitution fossilen Erdgases voraus.
- Herausforderung: Lange Lebensdauern (Lock-in-Effekte!) und „Lokalität“ von Wärmesystemen, daher:
- **Verhalten und Investitionsentscheidung der Vielzahl dezentraler Akteure hoch relevant.**



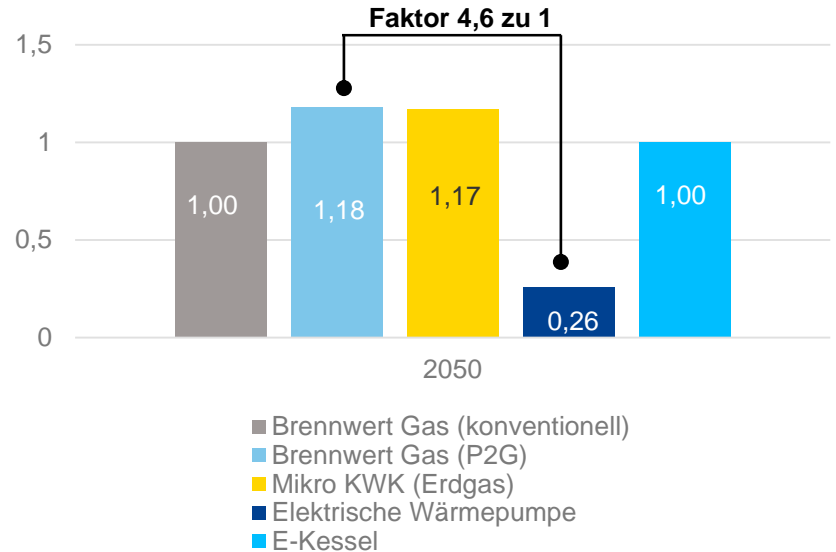
# Einleitung & Motivation – Rolle von Wärmepumpen?

Energieeffizienz und Umweltwirkung in einem dekarbonisierten Stromsystem machen el. Wärmepumpen zu hochattraktiven Lösungen im Wärmebereich

**Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren**  
Nach Technologie; in t/MWh



**Energieeffizienz unterschiedlicher Technologien 2050**  
1 / Wirkungsgrad; bezogen auf Primärenergiebedarf

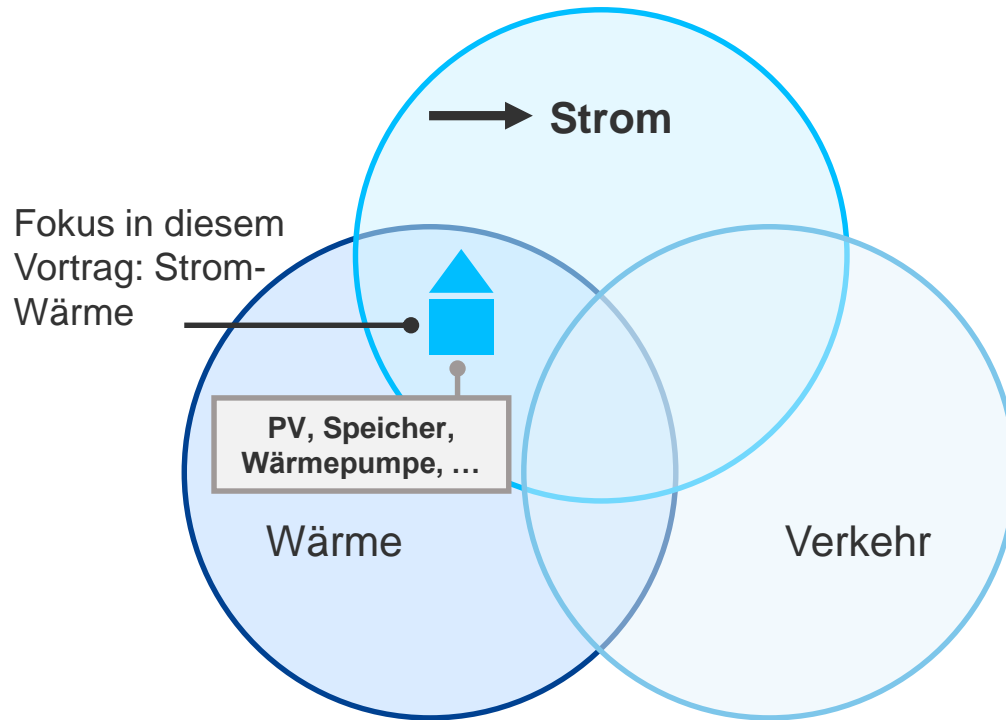


**Elektrische Wärmepumpen** stellen aus Energieeffizienzgründen hochattraktive dezentrale, sektorintegrierende Wärmeerzeugungstechnologie dar



# Einleitung & Motivation – Forschungsrahmen

## Rolle von Prosumern im sektor-integriertem Energiesystem



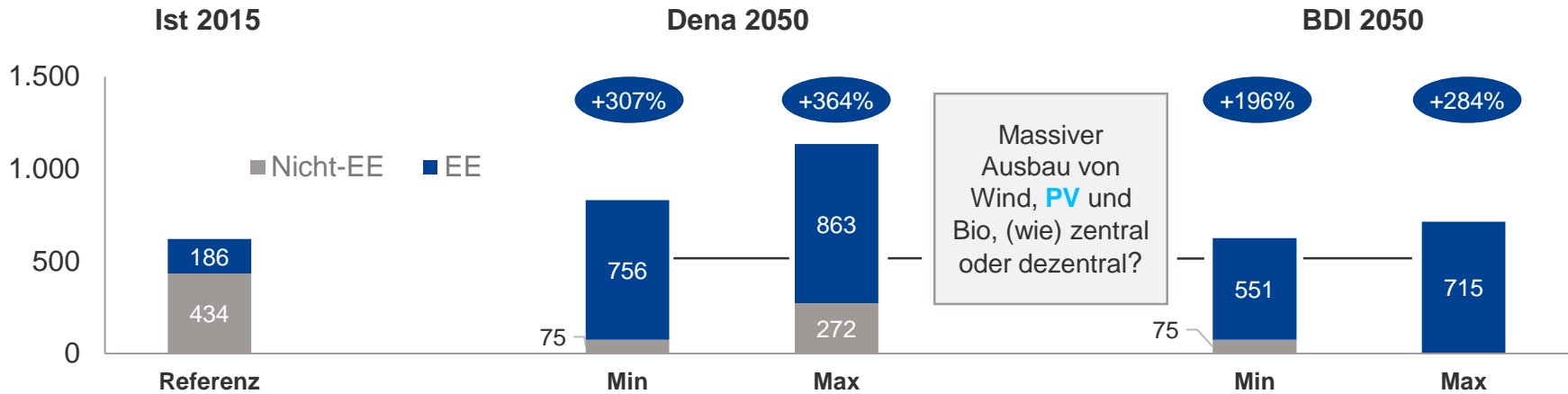
- Die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr „verschmelzen“ zunehmend und eine tiefe Dekarbonisierung ist nur mit **sektorintegriertem Ansatz** zu erreichen.
- Der **Beitrag** von **Prosumern** zur Energieproduktion ist derzeit gering – aber Anzahl verbauter PV-Anlagen und Batteriespeicher sind stark wachsend.
- Eine Vielzahl an Prosumern im Energiesystem führt zu **Wechselwirkungen** zwischen Prosumern und Gesamtsystem.

# Einleitung & Motivation – Entwicklung Stromsystem

Aktuelle Studien sehen bis 2050 sämtlich Notwendigkeit des massiven Ausbaus von Erneuerbaren Energien (EE)

## Nettostromerzeugung Deutschland

In TWh; 2015 vs. 2050; dena<sup>1</sup>- und BDI<sup>2</sup>-Leitstudien im Vergleich



**Erreichung der Klimaziele erfordert in allen Studien massiven Ausbau Erneuerbarer Energien**

1. Dena et al. (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Unter Mitarbeit von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin

2. BCG et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. V. Bundesverband der Deutschen Industrie.

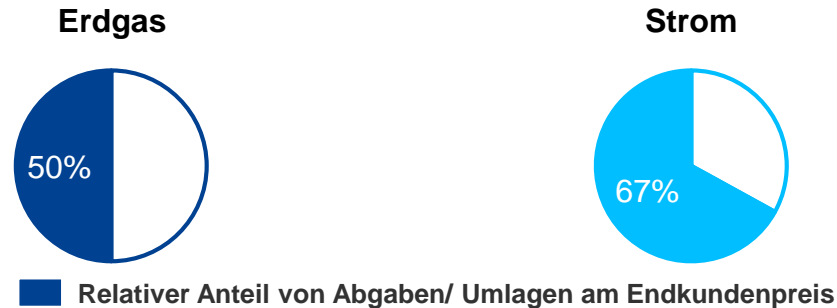
# Methodik – Analysen

	Kosten der Produktion	Kosten des Transports	Refinanzierung EE
Analyse 1 Invest und Betrieb von elektrischen Wärmepumpen	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>PV + Wärmepumpe + th. Speicher</b></li><li>• Fokus: Strompreise und Wärmegestehungskosten</li><li>• Merit Order-Effekte</li><li>• EE-Integration</li></ul>		
Analyse 2 Betrieb von Batteriespeichern	<ul style="list-style-type: none"><li>• PV + Speicher</li><li>• Fokus: Gesamtsystemkosten</li><li>• Merit Order-Effekte</li><li>• EE-Integration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vereinfachte Kostenabbildung</li><li>• Verteileffekte Netzentgelte</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verteileffekte EEG</li></ul>

# Invest und Betrieb von Wärmepumpen - Setting

Status-quo: Sektorale Verzerrungen durch Abgaben/ Umlagen

- **Setting:** Prosumer mit PV, Wärmepumpe und thermischer Flexibilität
- **Status-quo:** Verzerrungen durch ungleiche sektorale Behandlung von Strom und Wärme bei Abgaben und Umlagen



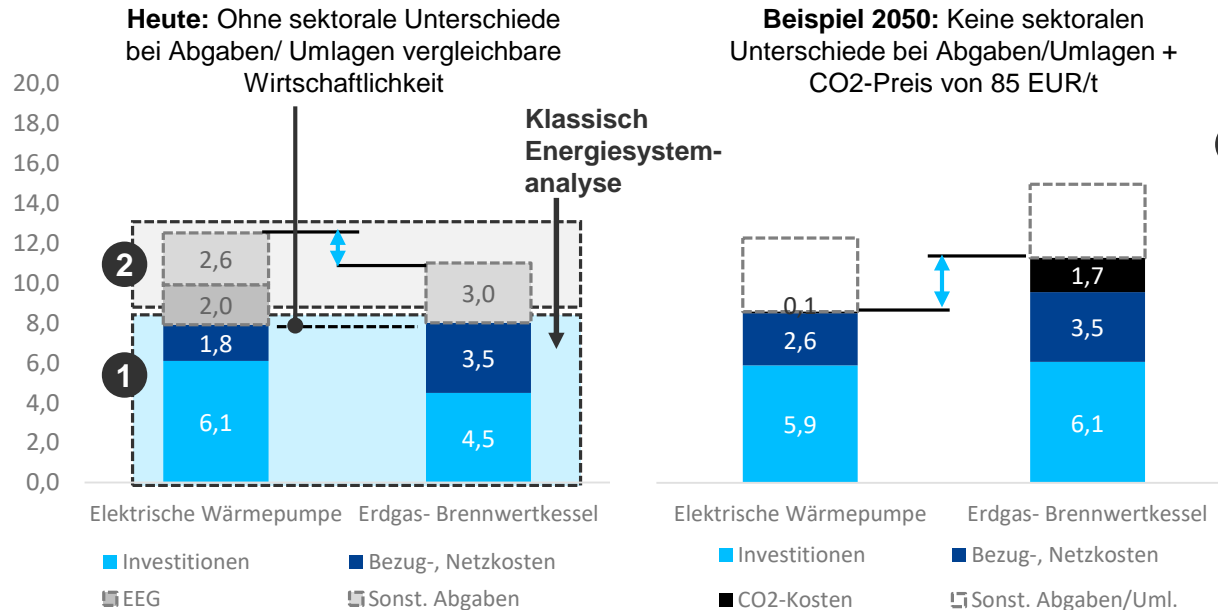
- **Folge:** Wärmepumpe in vielen Fällen nicht wirtschaftlich darstellbar, selbst wenn Teil der systemoptimalen Lösung, und damit „im realen Markt“ nicht/ nicht im vollen Maße als Flexibilitätsoption verfügbar

# Invest und Betrieb von Wärmepumpen - Verzerreffekte

Verzerreffekte durch Abgaben und Umlagen führen dazu, dass nicht-system-optimale Lösungen betriebswirtschaftlich bevorzugt werden

## Wärmegestehungskosten

In ct/kWh<sub>therm</sub>; heute<sup>1</sup> vs. 2050 mit CO<sub>2</sub>-Bepreisung (85 EUR/t); Neubau



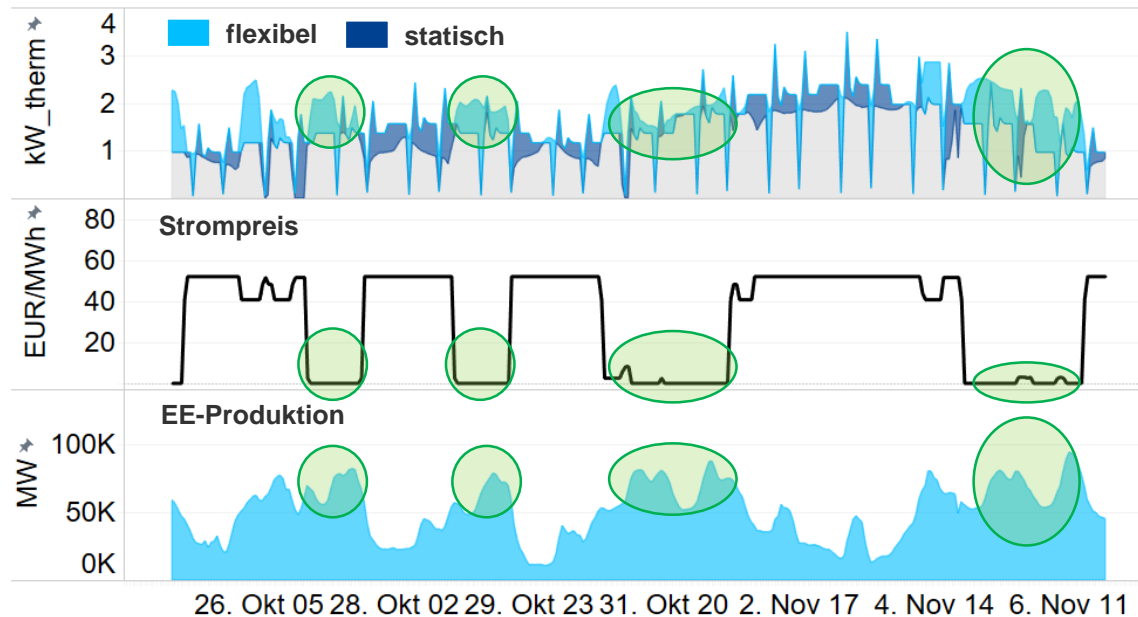
- 1 Klassische Systemanalyse sieht Lösungen, die im realen Markt in der Form nicht wirtschaftlich darstellbar ist.
- 2 Ursache: Verzerrungen, die sich aus Wechselwirkungen unterschiedlicher Politik-Instrumente (und Zielfunktionen) ergeben.
  - Folge:
    - a) Real fehlende Investitionen in „system-optimale“ Lösungen
    - b) Dadurch **real geringeres Flexibilitätspotenzial** verfügbar als aus Systemanalyse abgeleitet

# Invest und Betrieb von Wärmepumpen - Referenzlinie

Ohne Verzerreffekte kann gesamtes vorhandenes Flexibilitätspotenzial im Sinne des Systems eingesetzt werden

## Annuierte Investitions- und Betriebskosten (Wärmevollkosten)

Beispiel 2050; diskontiert; normiert



- Durch **Flexibilität der Wärmepumpen** in Kombination mit thermischen Speicher kann **Wärmepumpenbedarf verschoben** werden zu Zeiten von hoher EE-Produktion und entsprechend niedrigen Strompreisen.
- Dies optimiert die EE-Integration und führt zur **(gesamt-) kostenoptimalen Lösung**.
- Per Konstruktion handeln hier Akteure systemoptimal. Dadurch dient dieser Fall als **Referenzlinie zur Messung von Verzerrungen**.
- Ggü. statischen Wärmepumpenprofil können **annuierte Wärmevollkosten um 6% gesenkt** werden.