

# Techno-ökonomische Perspektive – Systeminnovationen am Beispiel des Strom-Wärme-Systems

Evelyn Sperber, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Dr. Peter Viebahn, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

**FVEE-Jahrestagung 2013**

**Freiburg, 24. Oktober 2013**



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH



**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association

## Flexibilisierungsoptionen durch Kopplung von Strom- und Wärmemarkt

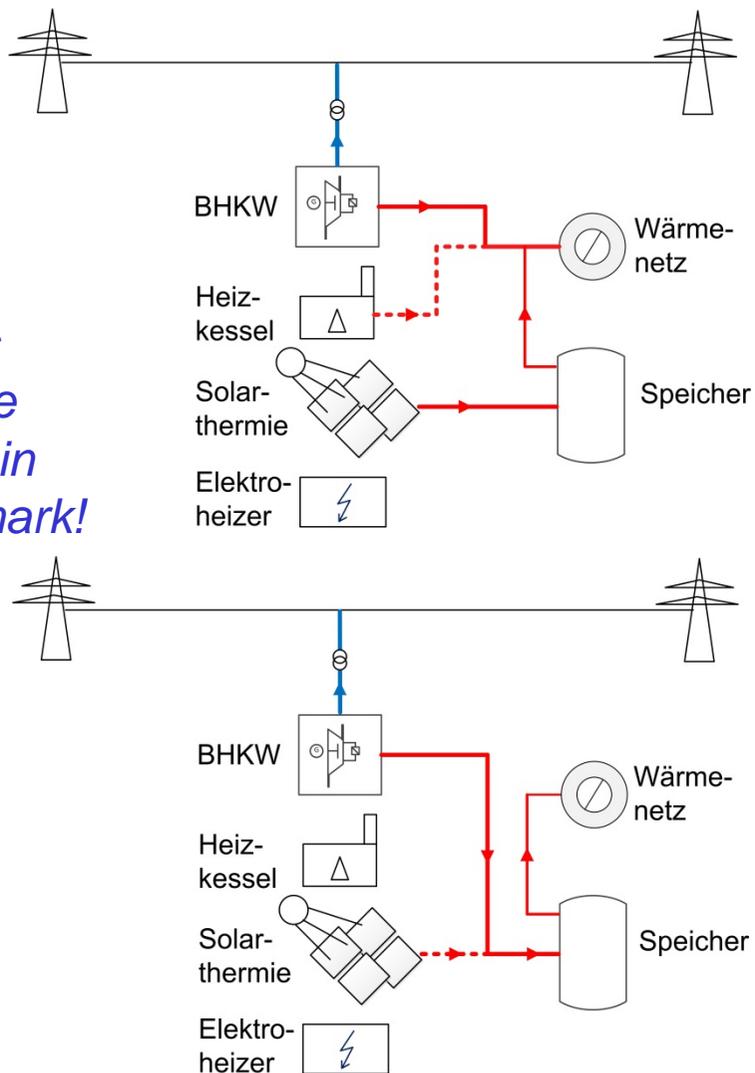
- Fluktuierende Einspeisungen aus PV und Windkraftanlagen werden den Strommarkt der Zukunft prägen
  - Bedarf an flexiblen Einheiten zum Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage steigt
- Große Flexibilisierungspotentiale im Wärmemarkt
  - Großer Anteil am Energieverbrauch
  - Wärme lässt sich vergleichsweise kostengünstig speichern
- Technologien, die Strom- und Wärmemarkt verbinden, sind grundsätzlich KWK-Systeme, Wärmepumpen und Elektroheizungen
  - Betrieb abhängig vom Dargebot an erneuerbarer Stromerzeugung
- Wärmespeicher werden benötigt, da die Flexibilisierung nur möglich ist, wenn die Produktion von der Wärmenutzung entkoppelt werden kann
- Besonders effiziente Kopplung von Strom- und Wärmemarkt im Bereich der Wärmenetze

## Fernwärmesysteme mit Kopplung an die Preissignale des Strommarktes

- KWK sollte – anders als heute gewohnt – zukünftig stromgeführt betrieben werden, um flexibel auf das Dargebot von Wind- und PV-Strom reagieren zu können (Verlagerung in Zeiten hoher Strompreise)
- In Phasen niedriger Börsenstrompreise kein wirtschaftlicher Betrieb der KWK möglich – auch trotz vorhandenem Wärmebedarf
  - Wärme wird in diesen Phasen durch Heizkessel produziert (sofern Speicher leer)
  - Freiraum für alternative Technologien, die Wärme in diesen Phasen klimafreundlicher und kostengünstiger bereitstellen können
    - Wärmepumpen, Elektroheizer („Power to heat“)
    - Dänemark: Boom Solarer Nah- und Fernwärme
- Derartige Systeme sind in Dänemark bereits Praxis, in Deutschland jedoch Neuland → technologische Innovation
- Diese technologischen Innovationen müssen jedoch mit sozialen Innovationen gekoppelt werden, um sie optimal umsetzen zu können

## Einsatz der Wärmeerzeuger bei hohen Strompreisen

*Bereits  
tägliche  
Praxis in  
Dänemark!*



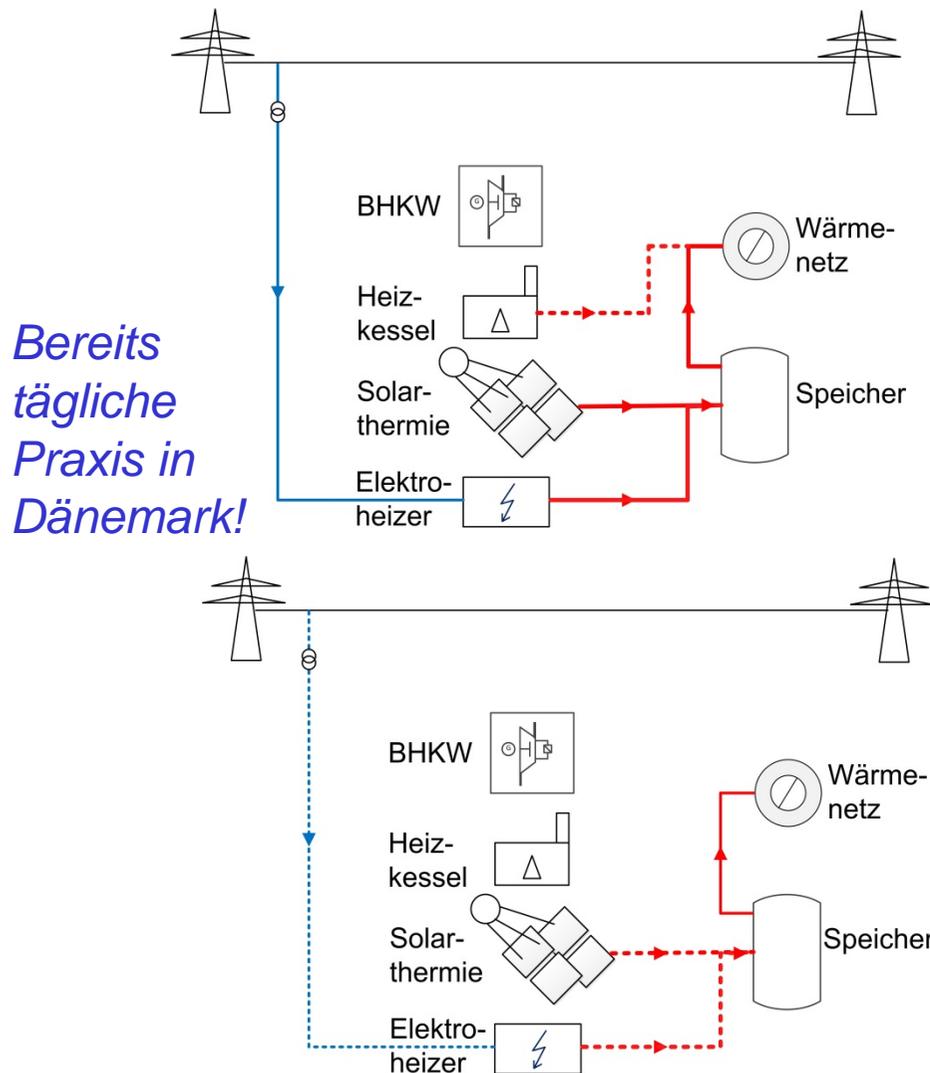
### Hoher Wärmebedarf:

- BHKW speist ins Netz
- Speicher wird entladen
- Spitzenkessel heizt ggf. nach

### Geringer Wärmebedarf:

- Überschüssige KWK-Wärme füllt Speicher
- Bei sehr hohen Strompreisen und bereits hohem Speicherfüllstand muss zuerst solare Einspeisung zurückfahren

## Einsatz der Wärmeerzeuger bei niedrigen Strompreisen



### Hoher Wärmebedarf:

- BHKW aus
- Elektroheizer an („power to heat“)
- Speicher wird entladen
- Spitzenkessel heizt ggf. nach

### Geringer Wärmebedarf:

- BHKW aus
- Einsatz von Elektroheizer und Solarthermie in Abhängigkeit vom Speicherladezustand

## Techno-ökonomische Analyse flexibler, strommarktorientierter Fernwärmesysteme

- TRNSYS®-Simulationen zur Analyse des technischen Zusammenspiels der flexiblen Wärmeerzeuger (fiktives Fernwärmesystem basierend auf Erdgas-BHKW)
- Analyse zunächst für aktuelle energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen (Spotmarktpreisverlauf 2012, heutiges Erdgaspreisniveau)
- Heizstab wird zunächst nicht berücksichtigt (hohe Beaufschlagung mit Steuern, Abgaben etc. → spotmarktorientierter Betrieb heute unwirtschaftlich)



## Kennwerte des untersuchten Fernwärmenetzes

<b>Fernwärmenetz</b>	<p>Netzeinspeisung: 12.700 MWh/a                  Jahreshöchstlast: 5 MW                  Netzauslegungsbedingungen: 95/60°C</p>
<b>Erdgas-BHKW</b>	<p>Elektrische Leistung: 1,4 MW                  Thermische Leistung: 1,5 MW                  Gesamtwirkungsgrad: 85 %</p>
<b>Erdgas-Spitzenlastkessel</b>	<p>Thermische Leistung: 5 MW                  Wirkungsgrad: 90 %</p>
<b>Solar-Flachkollektor</b>	<p>Kollektorfläche: 4.000 m<sup>2</sup>  <math>\eta_0=0,82</math> <math>\alpha_1=2,43</math> W/(m<sup>2</sup>K) <math>\alpha_2=0,012</math> W/(m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)                  Aufstellwinkel 40°, Azimut 0°                  Volumenstrom im Solarnetz: 15 l/(m<sup>2</sup>h)</p>
<b>Thermischer Speicher</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromgeführter Betrieb: <math>V_{\text{Speicher}} = 1.500 \text{ m}^3</math>                      (entsprechend 12 h Jahreshöchstlast)</li> <li>• Wärmegeführter Betrieb: <math>V_{\text{Speicher}} = 30 \text{ m}^3</math></li> </ul>

## Vorgehensweise

- TRNSYS®-Simulationen
  - Meteorologische Daten: Standort Würzburg, 2012
- Intelligentes Speichermanagement bei stromgeführter Fahrweise: KWK-Anlage kommt nur in den „teuersten Stunden“ zum Einsatz
  - 24 Stunden „perfect foresight“ der Börsenpreise, des Wärmebedarfes und des solarthermischen Potentials
- Modellerte Erzeugungsvarianten:
  1. Referenz: Wärmegeführte KWK mit Spitzenlastkessel (SLK)
  2. Stromgeführte KWK mit großem Speicher und SLK
  3. Wie 2., zusätzlich mit solarthermischer Unterstützung  
(in allen Fällen gleiche Anlagengrößen von KWK und SLK)

## Ökonomische Randparameter im Modell

- Bewertungskriterium für den Wirtschaftlichkeitsvergleich:

$$\text{Spez. Systemwärmekosten} = \frac{\sum_{\text{Erzeuger } i}^n \text{Jahresvollkosten}_i}{\sum_{\text{Erzeuger } i}^n \text{Jahreswärmeerzeugung}_i}$$

- Kosten des Wärmenetzes bleiben unberücksichtigt

- Jahresvollkosten des BHKWs:

- + annuisierte Investition  
(4 %, 20 a)
- + Brennstoffkosten
- + Einsatznebenkosten
- Stromerlöse an der Börse
- Zuschlag nach KWKG
- Vermiedene NNE

	Spez. Investition	Fixe Betriebskosten	Variable Betriebskosten
<b>BHKW</b>	850 €/kW <sub>el</sub>	2 % /a	10 €/MWh <sub>el</sub>
<b>Spitzenlastkessel</b>	75 €/kW <sub>th</sub>	2 % /a	0,13 €/MWh <sub>th</sub>
<b>Solarkollektorfeld</b>	220 €/m <sup>2</sup>	-	1 €/MWh <sub>th</sub>
<b>Speicher</b>	200 €/m <sup>3</sup>	-	-

- Erdgaspreis frei BHKW 2012: 35 €/MWh<sub>Hi</sub> (ohne Erdgassteuer)

## Simulationsergebnisse unter heutigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (2012)

	<i>Referenz: wärmegeführte KWK + SLK</i>	<b>Stromgeführte KWK+SLK</b>	<b>Stromgeführte KWK+SLK+ Solar</b>
<b>Deckungsanteile</b>			
<b>KWK</b>	74 %	71 %	61 %
<b>SLK</b>	26 %	29 %	24 %
<b>Solar</b>	0%	0%	15 %
<b>Spez. Systemwärmekosten (ohne Wärmenetz)</b>	40,2 €/MWh	<b>40,0 €/MWh</b>	41,3 €/MWh

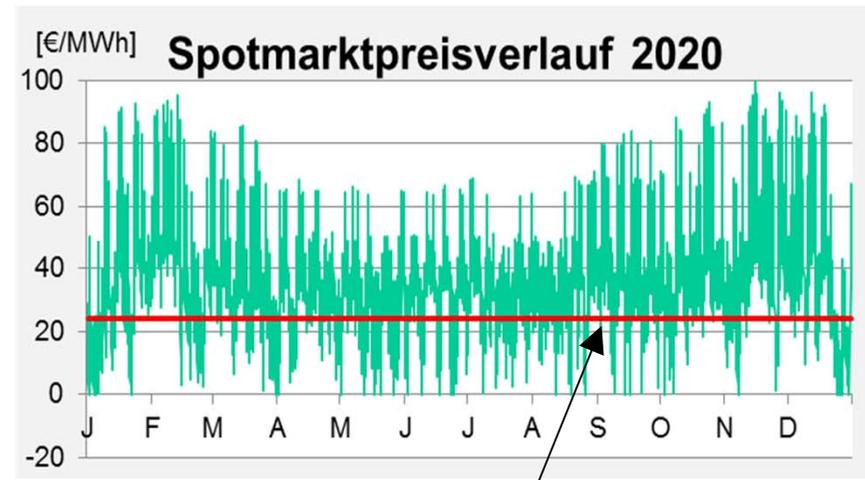
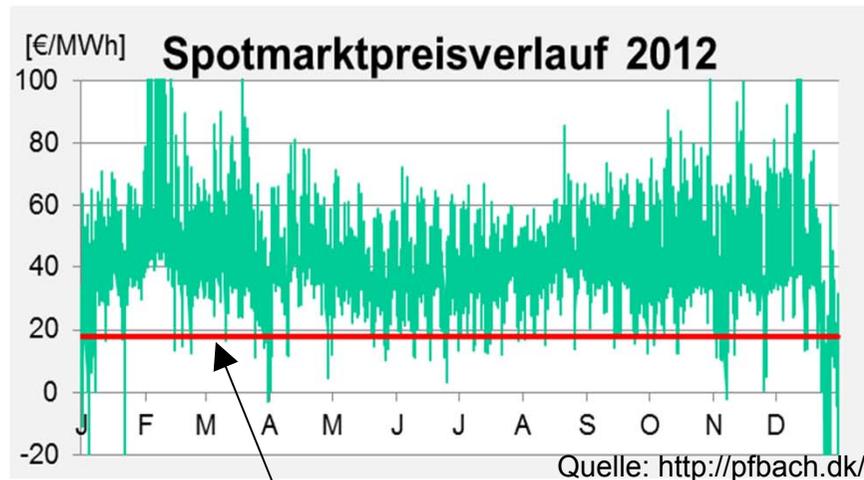
*Vergütung nach üblichem Preis*

*Vergütung nach aktuellem Spotmarktpreis*

- Stromgeführte Fahrweise (heute schon) kostengünstiger als wärmegeführte Fahrweise – trotz Investition in großen Speicher
- Solarthermie kann bei stromgeführtem Betrieb Wärme aus SLK verdrängen
  - Ist aber unter heutigen Rahmenbedingungen (noch) nicht wirtschaftlich

## Mittelfristige Perspektive bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommarkt

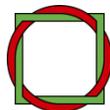
- Konventionelle Kraftwerke und damit auch erdgasbasierte KWK-Anlagen werden zunehmend nicht zur Deckung der Stromnachfrage benötigt
- Vermehrt Phasen niedriger Börsenstrompreise



*Oberhalb roter Linie ist KWK-Wärme günstiger als SLK-Wärme*

# Modellierung flexibler Fernwärmesysteme für den Szenarienhorizont 2020

- Änderungen gegenüber des für 2012 betrachteten Systems:
  - Simulierter Spotmarktpreisverlauf 2020
    - Basierend auf Korrelation zwischen Spotmarktpreisen und Residuallast 2012
    - Modellierung der Residuallast 2020 anhand installierter EE-Leistungen nach BMU-Leitstudie 2011
  - Erdgaspreis frei BHKW 2020: 40 €/MWh<sub>Hi</sub> (ohne Erdgassteuer)
  - Einbeziehung der Erzeugungsoption „Power to heat“ (Heizstab)
- Alle anderen Bedingungen wie für 2012
- Modellierte Einsatzfälle:
  1. Referenz: Wärmegeführte KWK mit SLK
  2. Stromgeführte KWK mit großem Speicher und SLK
  3. Wie 2., zusätzlich mit Heizstab
  4. Wie 2., zusätzlich mit solarthermischer Unterstützung
  5. Wie 2., zusätzlich mit Heizstab und solarthermischer Unterstützung



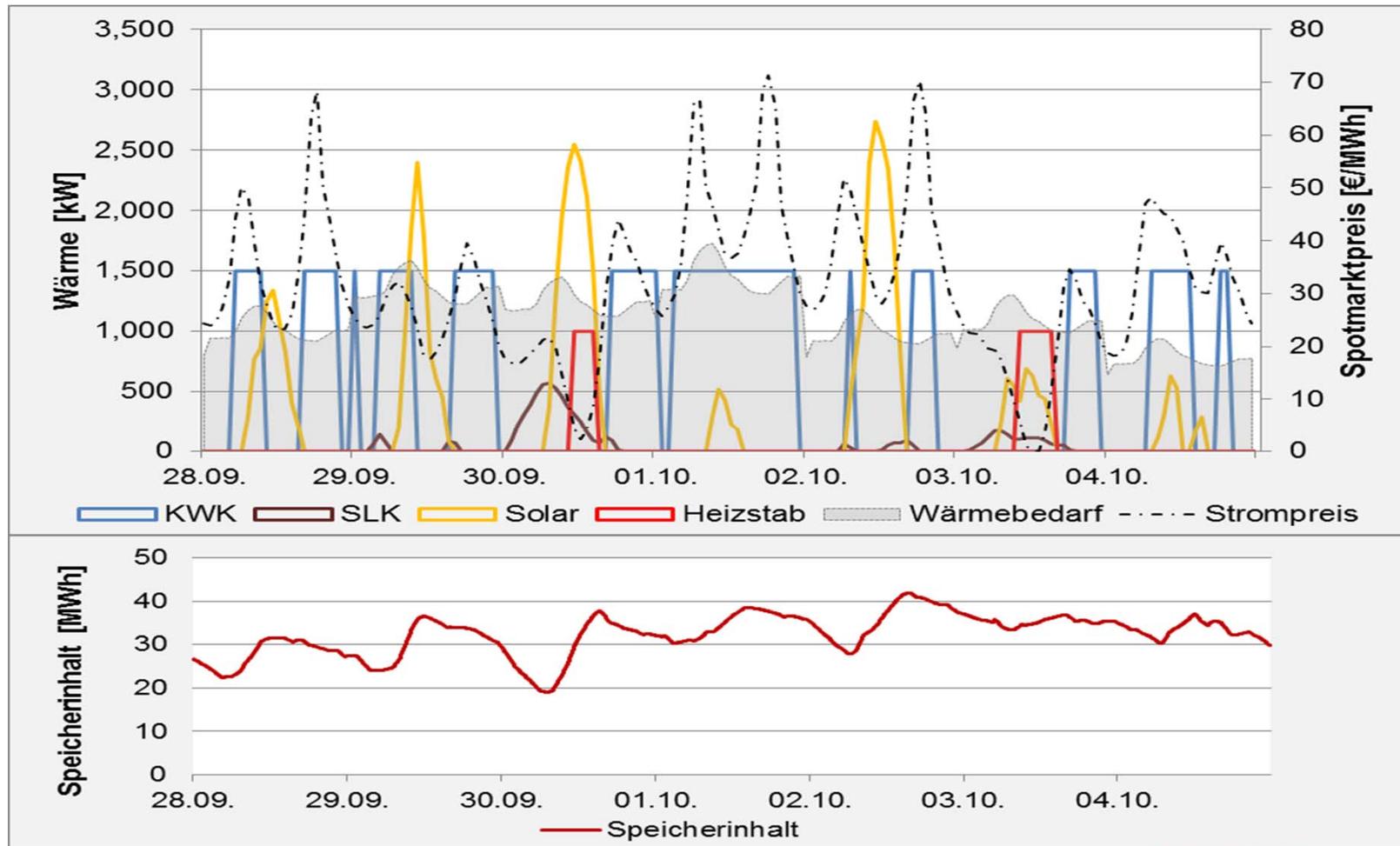
# Simulationsergebnisse für den Szenarienhorizont 2020

*Investition Heizstab: 120 €/kW<sub>el</sub> (Quelle: SW Lemgo)*

	Referenz: wärmegef. KWK + SLK	Stromgef. KWK+SLK	Stromgef. KWK+SLK+ Heizstab	Stromgef. KWK+SLK+ Solar	Stromgef. KWK+SLK+ Solar+Heizst.
<b>Deckungsanteile</b>					
<b>KWK</b>	74 %	61 %	61 %	53 %	53 %
<b>SLK</b>	26 %	39 %	34 %	31 %	28 %
<b>Solar</b>	0 %	0 %	0 %	16 %	15 %
<b>Heizstab</b>	0 %	0 %	5 %	0 %	4 %
<b>Spez. Systemwärmekosten (ohne Wärmenetz, real)</b>	57,6 €/MWh	52,8 €/MWh	53,2 €/MWh	<b>51,4 €/MWh</b>	52,2 €/MWh

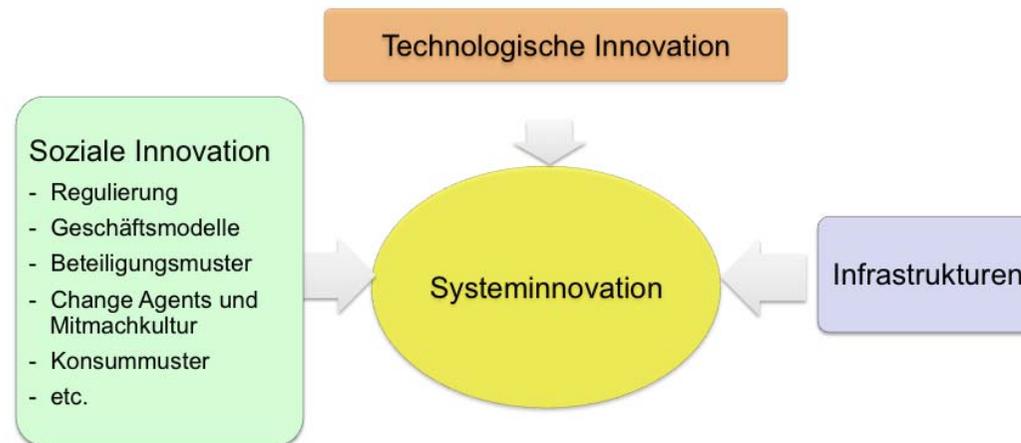
- Strommarktorientierter KWK-Betrieb selbst aus betriebswirtschaftlicher Sichtweise sinnvoll, Speicher amortisiert sich rasch
  - Verdrängung klimaschädlicher Wärme aus SLK durch Einbeziehung zusätzlicher Wärmeerzeuger möglich
  - Solarthermische Unterstützung bewirkt Kostensenkung
  - Kostenunterschiede bei den strommarktorientierten Systemen sind gering
- Ausstattung mit flexiblen Erzeugern sinnvoll!

## Strommarktorientierter Betrieb der Wärmeerzeuger während einer Herbstwoche 2020



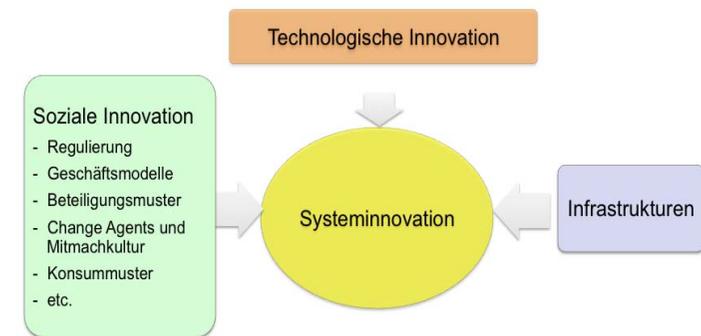
## Einbettung von technologischen Innovationen in Systeminnovationen nötig

- Isolierte technologische Innovationen sind nicht ausreichend, da
  - sie häufig zu ökologischen und sozio-ökonomischen *Problemverschiebungen* führen und
  - indirekte und direkte *Rebound-Effekte* auf Grund von Produktivitätssteigerungen zur Folge haben.
- *Systeminnovationen* – d.h. Verbindung von technischen Maßnahmen mit sozialen Innovationen – können einen Lösungsbeitrag leisten
- Systeminnovationen sind heute jedoch nicht per se etabliert und akzeptiert und müssen gezielt gefördert werden



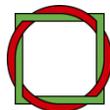
## Strom-Wärme-System zu Systeminnovation weiterentwickeln

- *Technologische Aspekte:*  
Kombination von KWK-System (stromgeführt, großer Speicher, Spitzenlastkessel) mit Heizstab und Solarthermie
- *Soziale Aspekte:*
  - Neue Geschäftsmodelle (Handel am Spotmarkt, Teilnahme am Regelenergiemarkt, Smart Markets z.B. regionales Lastmanagement)
  - Beteiligungsmuster (Partizipation der verschiedensten Akteure)
  - Change Agents und Mitmachkultur (Vorreiterrolle, best-practice-Projekte, wie Strom-Wärme-Kopplung greifbar/sichtbar machen?)
  - Neue Konsummuster und Normen (KWK als clean energy etablieren; regionale Wertschöpfung statt Gasimport; Abwägungen zwischen Sicherheit/Preisen/Ökologie/Autonomie)
- *Infrastrukturelle Aspekte:* Ausbau der Fernwärmenetze, Errichtung von Fernwärmespeichern, „smart grids“ für Strom und Wärme



## Erfahrungen generieren aus good practice und Realexperimenten

- Erfahrungen aus *bestehenden Beispielen* intelligenter Kopplung von Technologien und sozialen Innovationen konsequent aufarbeiten
- *Realexperimente* im Sinne „ökologische[r] Gestaltungsprozesse in der Wissensgesellschaft“ (Groß et al. 2005) durchführen, um die Potenziale, (Wechsel-)Wirkungen und Anforderungen für sozio-technische Wandelprozesse zu analysieren und für nachhaltige Systeminnovationen fruchtbar zu machen
  - Beispiel Dänemark als „Realexperiment“ auswerten
  - Beispiele in Deutschland generieren, begleiten und auswerten
- Dies erfordert eine Integration unterschiedlichster Wissensbestände aus Naturwissenschaften und Technik, aber auch aus Sozial- und Kulturwissenschaften sowie der alltäglichen Praxis in Energieerzeugung und -nachfrage („*Transdisziplinarität*“)



## Fazit

- Zum Ausgleich der Fluktuationen von EE im Strommarkt sollte KWK mit Hilfe von Speichern und elektrisch betriebenen Wärmeerzeugern flexibilisiert werden
- Der betriebswirtschaftlich optimierte Einsatz zusätzlicher Wärmeerzeuger im System – insb. Solarthermie – kann zunehmend teure und klimaschädliche Wärme aus Spitzenlastkesseln verdrängen  
→ EE im Strommarkt schaffen Platz für EE im Wärmemarkt!
- Wirtschaftlichkeit dieser alternativen Systeme steigt
  - mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien und damit sinkenden Börsenstrompreisen
  - mit steigenden Erdgaspreisen
- Zusatzerlöse am Regenergiemarkt erzielbar
- Dänemark dient als Vorbild – insbesondere bei der erforderlichen Infrastruktur
- Entwicklung sozialer Innovationen und Realexperimente zur optimalen Umsetzung der technischen Innovationen empfohlen

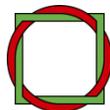
## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Evelyn Sperber  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
[Evelyn.Sperber@dlr.de](mailto:Evelyn.Sperber@dlr.de)

Dr. Peter Viebahn  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
[peter.viebahn@wupperinst.org](mailto:peter.viebahn@wupperinst.org)



Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH



**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association