

# CO<sub>2</sub> reduzieren mit Power-to-Heat:

Woher weiß ich wann?

Prof. Dr. Florian Steinke,

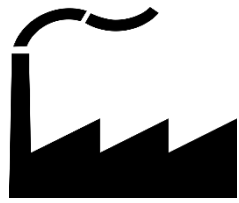
Christopher Ripp



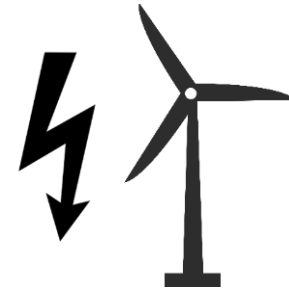
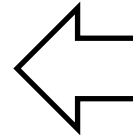
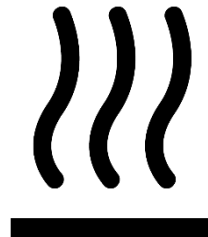
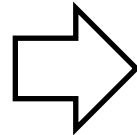
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**EINS**

ENERGY INFORMATION NETWORKS AND SYSTEMS



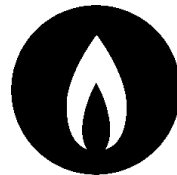
Gas, 60%



333 g/kWh

0 g/kWh

COP: 3 111 g/kWh



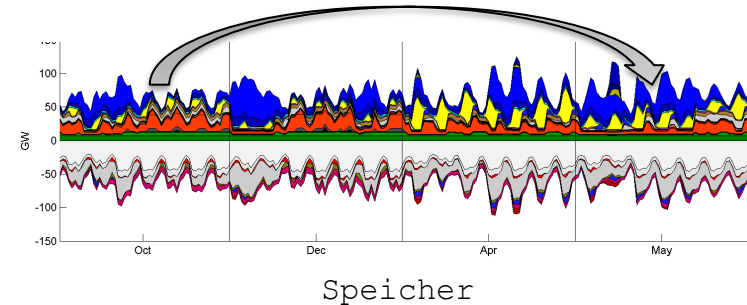
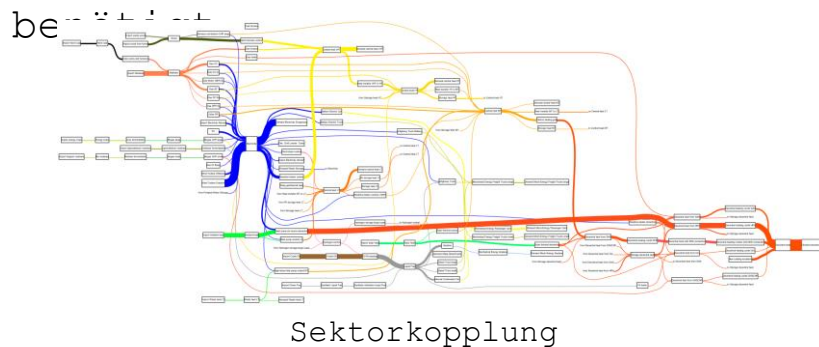
200 g/kWh

# Fluktuierende EE, Sektorkopplung und Speicher → Zeitabhängige CO<sub>2</sub> Intensitäten

Heute: CO<sub>2</sub> Intensitäten als Jahresdurchschnitt

- EnEV 2017 Primärenergiefaktor Strom 1,8
- EU Direktive: spez. CO<sub>2</sub> Emissionen auf Stromrechnung

Morgen: **Zeitabhängige CO<sub>2</sub> Intensitäten** für lokale Entscheidungen



- **Fluktuationen:** zeitvariabler Energiemix
- **Speicher:** können erneuerbar oder fossil geladen werden
- **Multimodal:** führt zu Zirkelbedingungen („War das Gas, aus dem der

# Berechnung zeitabhängiger CO<sub>2</sub> Intensitäten mit zwei Ansätzen möglich



## Klassische Analyse

- CO<sub>2</sub> Bilanzierung mittels jährlicher Energieflüsse, keine Zirkelanalysen, Vernachlässigung von Speichern

## As-Is Analyse

- CO<sub>2</sub> Bilanzierung für jeden Energiefluss des **aktuellen Systems zu jedem Zeitpunkt** (inklusive Zirkelauflösung und Speichertracking)
- Vorteil: intuitiv, (eher) leicht zu erheben
- Nachteil: Relevanz für lokale Entscheidungen?

## What-If Analyse

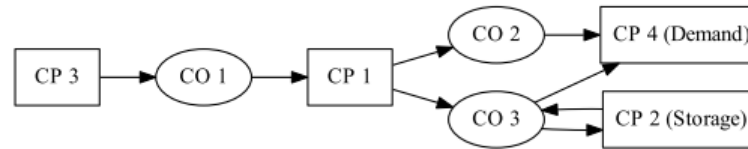
- **Grenz-CO<sub>2</sub>-Emissionen**: Analyse der systemweiten Langzeit - CO<sub>2</sub> Emissionen bei differentieller **Änderung des Nutzerverhaltens** zu einem Zeitpunkt
- Vorteil: lokal entscheidungsrelevant
- Nachteil: Wie die Änderung des Systems vorhersagen? →

Digital Twin

# Methodik: As-Is Analyse

(Ripp & Steinke, EEM / arXiv.org, June 2018)

- Modell:  $co$  = commodity / Energieform,  $cp$  = Conversions Prozess



- Energieflüsse  $E$  (in kW) sind bekannt,  $CO_2$  Flüsse  $M$  (in  $t_{CO_2E}$ ) werden berechne<sup>+</sup>

$$I(co, t) = \frac{\sum_{cp} M_{out}(cp, co, t)}{\sum_{cp} E_{out}(cp, co, t)}$$

$$I_{stor}(cp, t) = \frac{M_{stor}(cp, t)}{SL(cp, t)}$$

$t$  Zeit  
 $E_{in}$  Aufgenommene Energie  
 $E_{out}$  Abgegebene Energie  
 $SL$  Speicher Level

- Annahme: Alle Energieformen werden gleichwertig betrachtet

$$M_{in}(cp, t) = \sum_{co} E_{in}(co, cp, t) I(co, t),$$

$$M_{out}(cp, co, t) = M_{in}(cp, t) \frac{E_{out}(cp, co, t)}{\sum_{co'} E_{out}(cp, co', t)}$$

$$M_{out}(cp, co, t) = I_{stor}(cp, t-1) E_{out}(cp, co, t) / \eta_{stor}(cp)$$

$$M_{stor}(cp, t) = M_{stor}(cp, t-1) + M_{in}(cp, t) - \sum_{co} M_{out}(cp, co, t), .$$

➤ Großes lineares Gleichungssystem lösen

# Methodik: Grenz-CO<sub>2</sub>-Emissionen

## ( *What-If* )

(Ripp & Steinke, arXiv.org)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

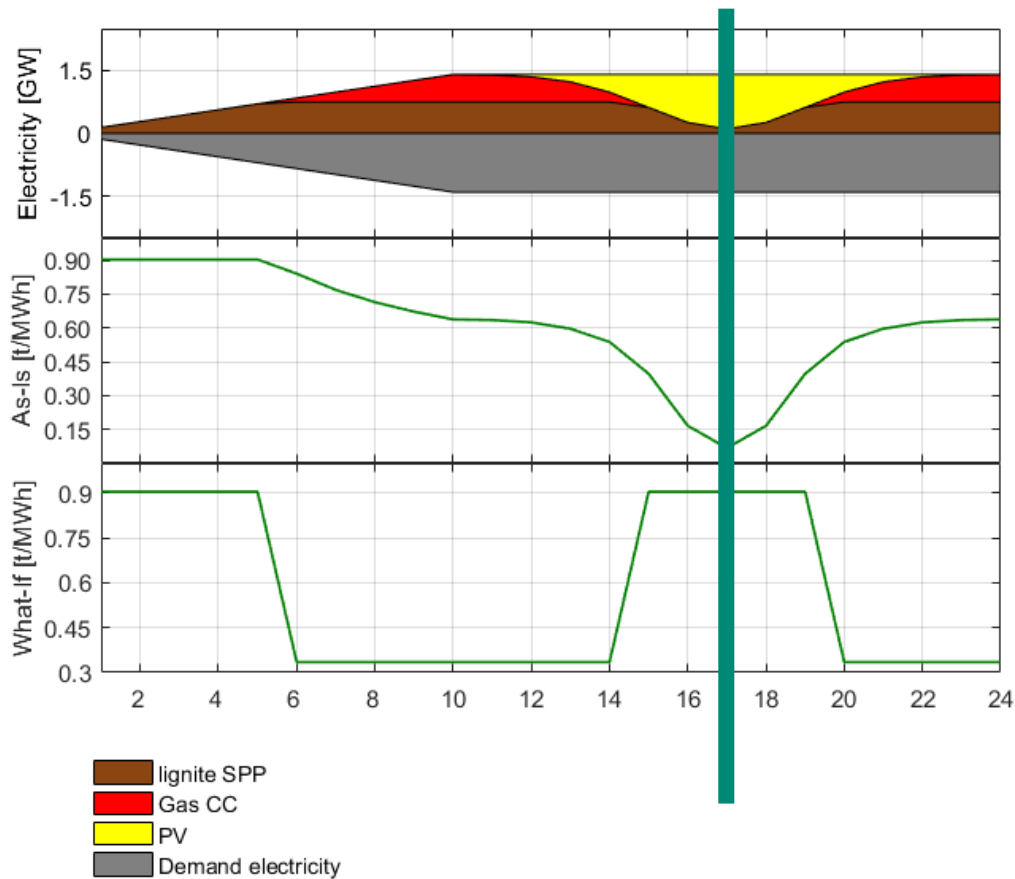
- Annahme: Digital Twin des Energiesystems existiert
  - Reales Verhalten kann durch das optimale Verhalten im Modell abgebildet werden (z.B. mit Bottom-up Fundamentalmodell)
  - Typisch: Optimierungsmodelle LP/MILP

- Berechne Änderung der gesamten CO<sub>2</sub> Emissionen bzgl. Nachfrageänderung zu Zeitpunkt t

$$\frac{\partial CO_2}{\partial D_{co,t}}$$

- Weg 1: Numerisches Differenzieren durch neu Berechnungen
  - für jeden Zeitschritt und jede Energieform ein  $CO_2(D_{co,t,0}) = CO_2(D_{co,t,0} + \Delta D_{co,t})$
- Weg 2 (für LP Modelle): Ausnutzung der KKT Bedingungen (siehe arXiv)
  - Alle Intensitäten können effizient aus einer Optimierung abgeleitet werden!

# Beispiel 1: Unimodal ohne Speicher



- Stromerzeugung nach Merit-Order

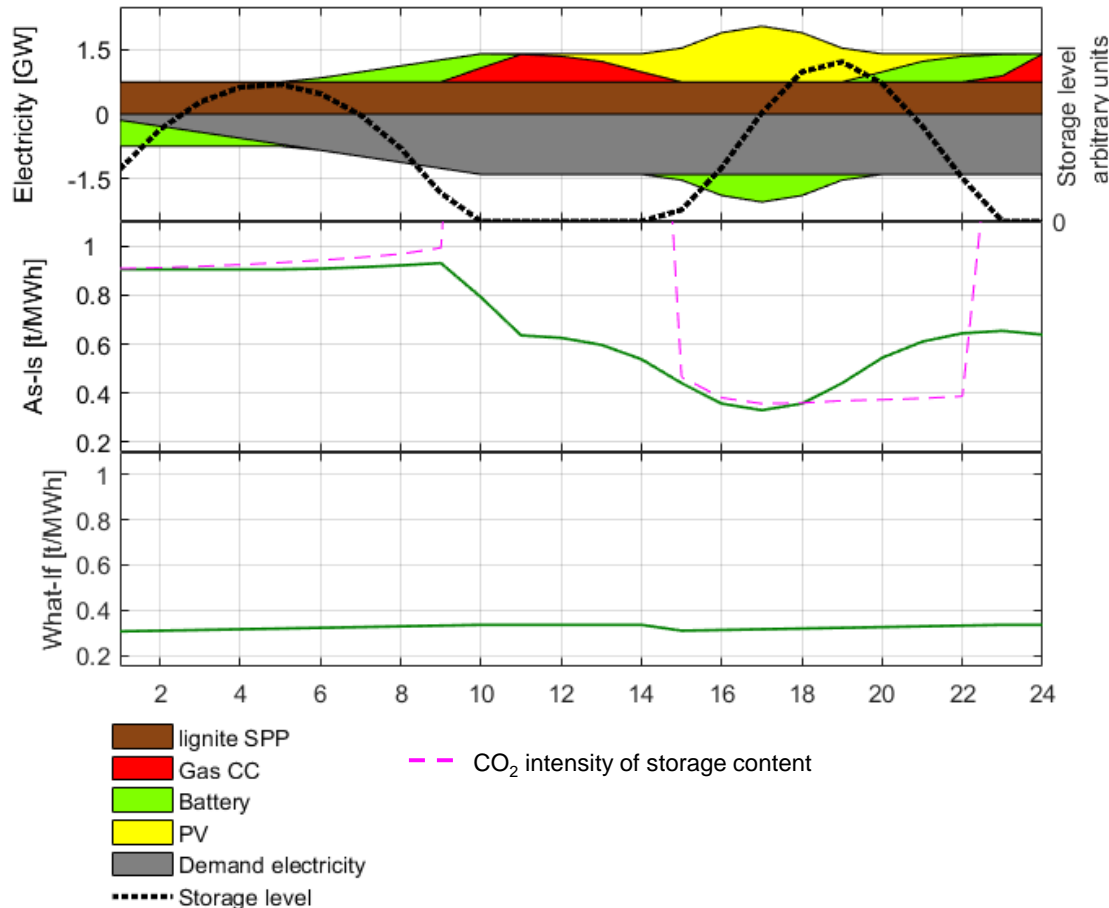
- Gemischte CO<sub>2</sub> Intensitäten

- CO<sub>2</sub> Intensität der Grenzerzeugung

Ist Power-2-heat hier sinnvoll? →

- Wird schon gemacht → ja
- Neu? → nein

# Beispiel 2: Unimodal mit Speicher

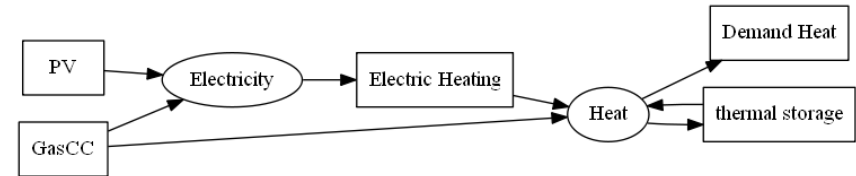
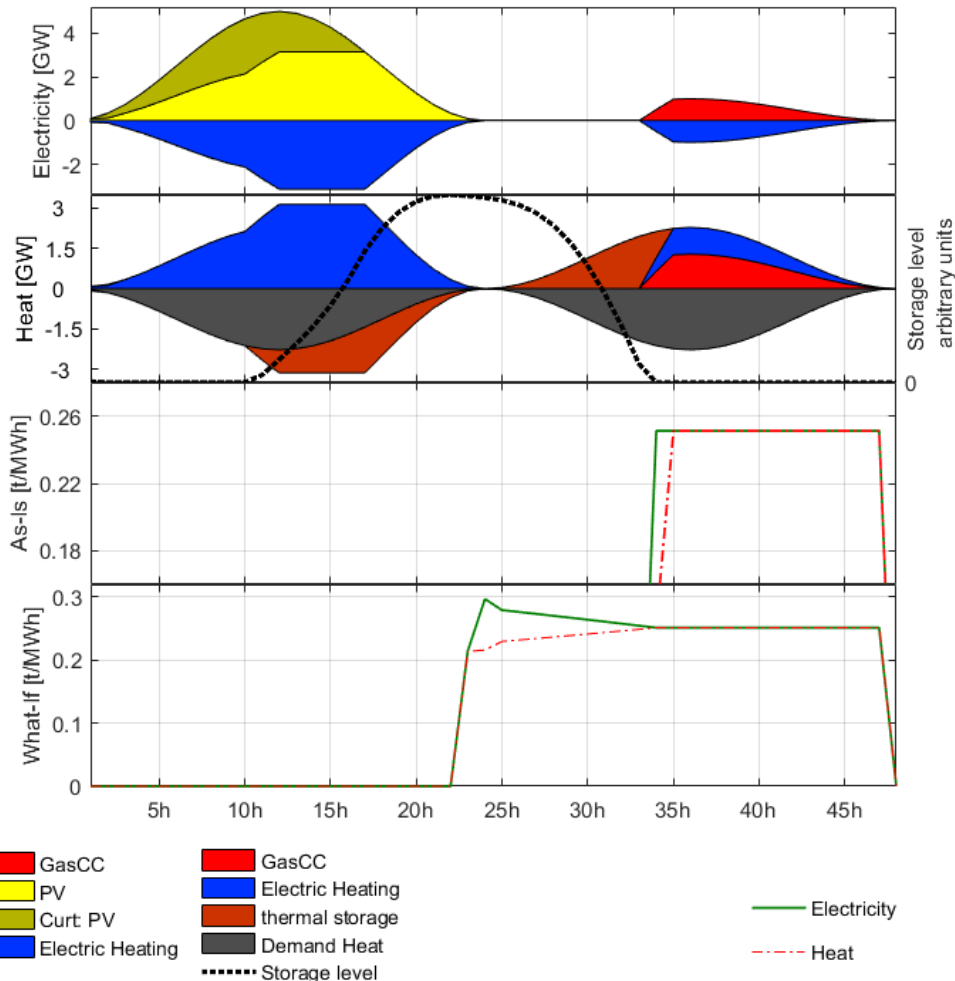


- Speichereinsatz um
  - Mehr Nutzung billige Grundlast
  - EE zum ersetzen teurer Spitzenlast
- CO<sub>2</sub> Intensität des Speicherinhalts abhängig von Vorgeschichte
- Speicher erhöhen CO<sub>2</sub> Emissionen des Systems und vergleichmäßigen

Ist Power-2-heat hier sinnvoll?

- Ersparnisse neuer Anlagen immer im Bereich „Strom aus gutem Gaskraftwerk“ (Annahme 1%/h)

# Beispiel 3: Multimodal mit Speicher



- CO<sub>2</sub> Intensität bei EE-Überschuss = 0
- Auch bei CO<sub>2</sub> neutralem Speicher: vorgezogene Nutzung bedeutet später mehr

Gas ist mehr Power-2-heat hier  
 → unnvoll?

Nur zu manchen Zeiten



# Nur genau Analysen erlauben wirkliche CO<sub>2</sub> Einsparungen

- CO<sub>2</sub> Intensitäten sollten in Zukunft zeitabhängig sein, Speicher und multimodale Interaktionen berücksichtigen
- Drängendes Problem für
  - lokale Investitionsentscheidungen, z.B. CO<sub>2</sub> arme Regionen/Städte/Universitäten
  - richtig lenkende Besteuerung / Abgaben auf CO<sub>2</sub>
- Ansätze As-Is und What-If liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse
  - Welcher Ansatz ist relevanter für lokale Änderungen? What-If Modell
  - Welcher Ansatz besser vermittelbar? As-Is Modell
  - Welcher Ansatz setzt sich durch? Was sind jeweils die Konsequenzen?