



# KWK, PtH und Wärmespeicher

Armin Kraft

Berlin, 11.04.2016

EEB ENERKO  
Energiewirtschaftliche  
Beratung GmbH

**ENERKO**  
changing energy

# Standorte und Gesellschaften

Aachen • Aldenhoven • Berlin • Düsseldorf



*changing energy*

- **EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH**

**Aldenhoven bei Aachen / Berlin**

Studien und Gutachten, Regulierung, Marktanalysen, Technische Planung sowie Klimaschutz- und Energiekonzepte

- **ESW ENERKO Wirtschaftsberatung GmbH Rechtsanwälte Achterwinter**

**Düsseldorf**

Jahresabschlussprüfung, Steuerberatung und Testierungen sowie Rechtsberatung für Versorgungswirtschaft und Industrie

- **EES ENERKO Energy Solutions GmbH**

**Aachen**

Netzmanagement, Bilanzkreisabwicklung, Vertriebscontrolling und Prozessoptimierung

- **ENERKO Informatik GmbH**

**Aachen**

Entwicklung von datenbankorientierten Informationssystemen im Bereich der Energiewirtschaft

# EER ENERKO: Beratungsschwerpunkte

Standorte Aldenhoven bei Aachen und Berlin • 40 Mitarbeiter



*changing energy*

## Konzepte und Gutachten

- Unternehmensentwicklung
- Klimaschutzkonzepte
- Kraftwerks- und KWK-Analysen
- Fernwärmekonzepte
- Primärenergiefaktoren und Hocheffizienznachweise
- Energiemanagement

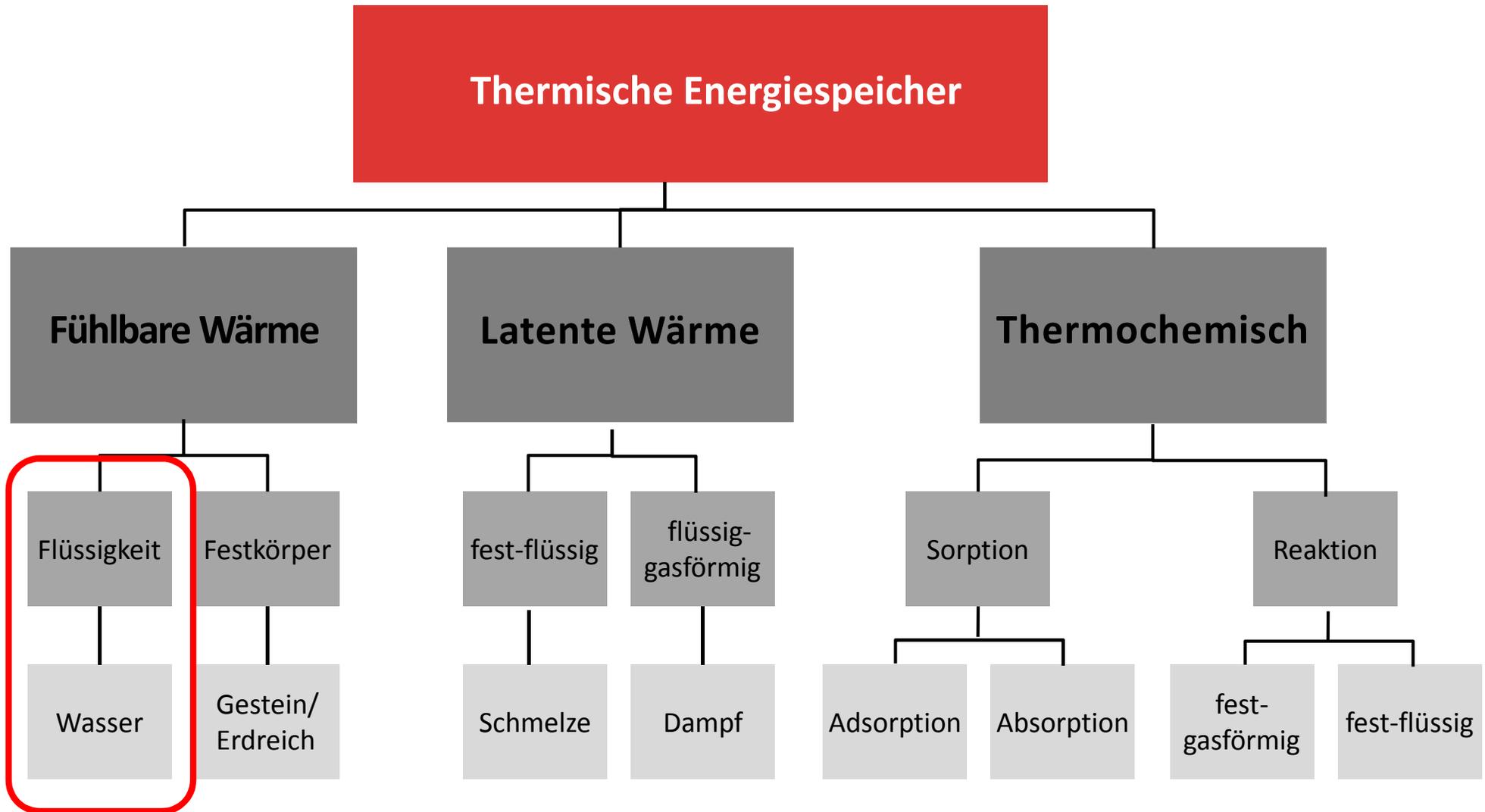
## Energie- wirtschaftliche Beratung

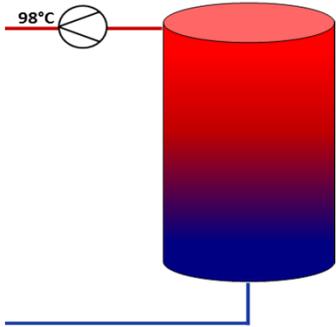
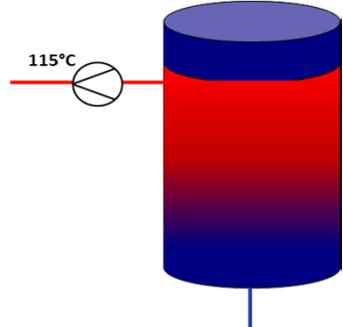
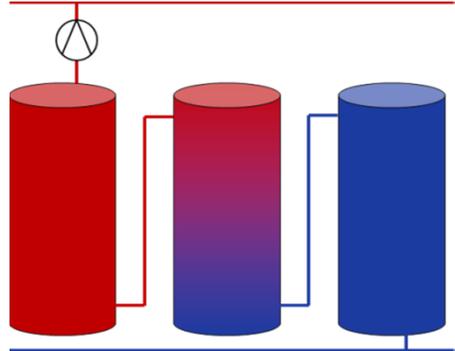
- Unternehmensbewertung
- Netzbewertung und -kauf
- Netznutzungsentgelte
- Strom- und Gasbeschaffung
- Emissionshandel
- Betriebswirtschaftliche Begleitung

## Technische Planung

- Heizkraftwerke und BHKW
- Netze Strom, Gas, Fernwärme
- Industrielle Medienversorgung
- Speicher für Fernwärme und Gas
- Regenerative Stromerzeugung

- **Sektorkopplung vorwärts (Wärme => Strom):** KWK und Wärmespeicher
  - Überblick Wärmespeicher und Typisierung
  - Einsatzmöglichkeiten und Chancen am Strommarkt
  - Fallbeispiel: Großwärmespeicher SW Kiel
  
- **Sektorkopplung rückwärts (Strom => Wärme):** Überschussstrom und Power-to-Heat
  - Power-to-Heat: Neue Perspektiven für den Wärmemarkt
  - Potenzial Windwärme und Nutzungskonkurrenz



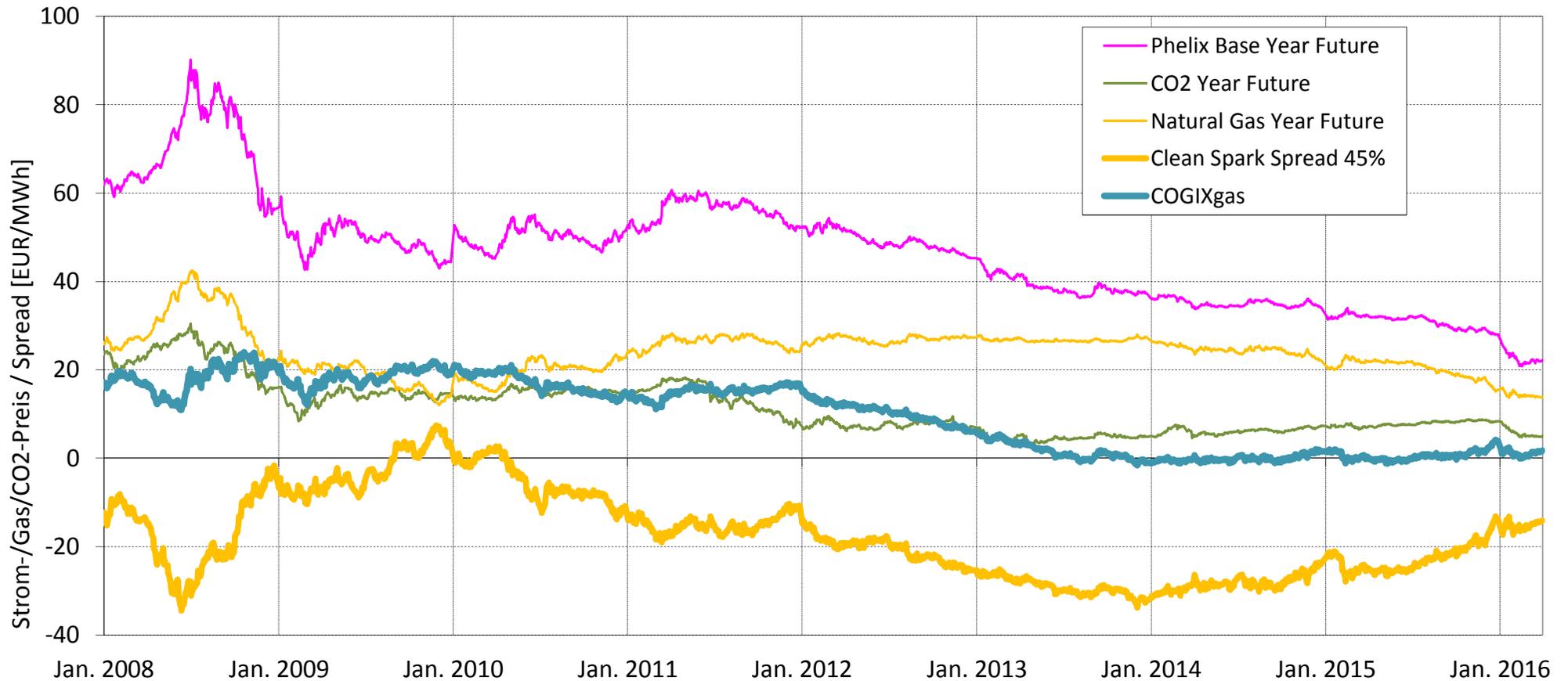
	Drucklose (atmosphärische) Speicher		Druckspeicher
	1 Zonen speicher	2 Zonen Speicher	
<b>Prinzip</b>			
<b>Volumen</b>	Bis rd. 60.000 m <sup>3</sup>	Bis rd. 60.000 m <sup>3</sup>	Modular, Einzelbehälter bis 150 m <sup>3</sup>
<b>Max. Temperatur</b>	98°C	bis 115°C (abhängig vom Wasserpolster)	Bis ca. 140 °C
<b>Spez. Kapazität (bei 60° Rücklauftemperatur)</b>	44 kWh/m <sup>3</sup>	Bis 64 kWh/m <sup>3</sup>	Bis ca. 90 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Kosten (ca.)</b>	300-500 EUR/m <sup>3</sup>	400-700 EUR/m <sup>3</sup>	800-1.200 EUR/m <sup>3</sup>

- **Wärmespeicher werden eingesetzt um**

- Angebot und Bedarf auszugleichen und den Bedarfslastgang vom Strommarkt zeitlich zu entkoppeln
- Leistungsspitzen abzudecken
- KWK Anteile zu erhöhen
- Kurzfristig Reserve bereitzustellen

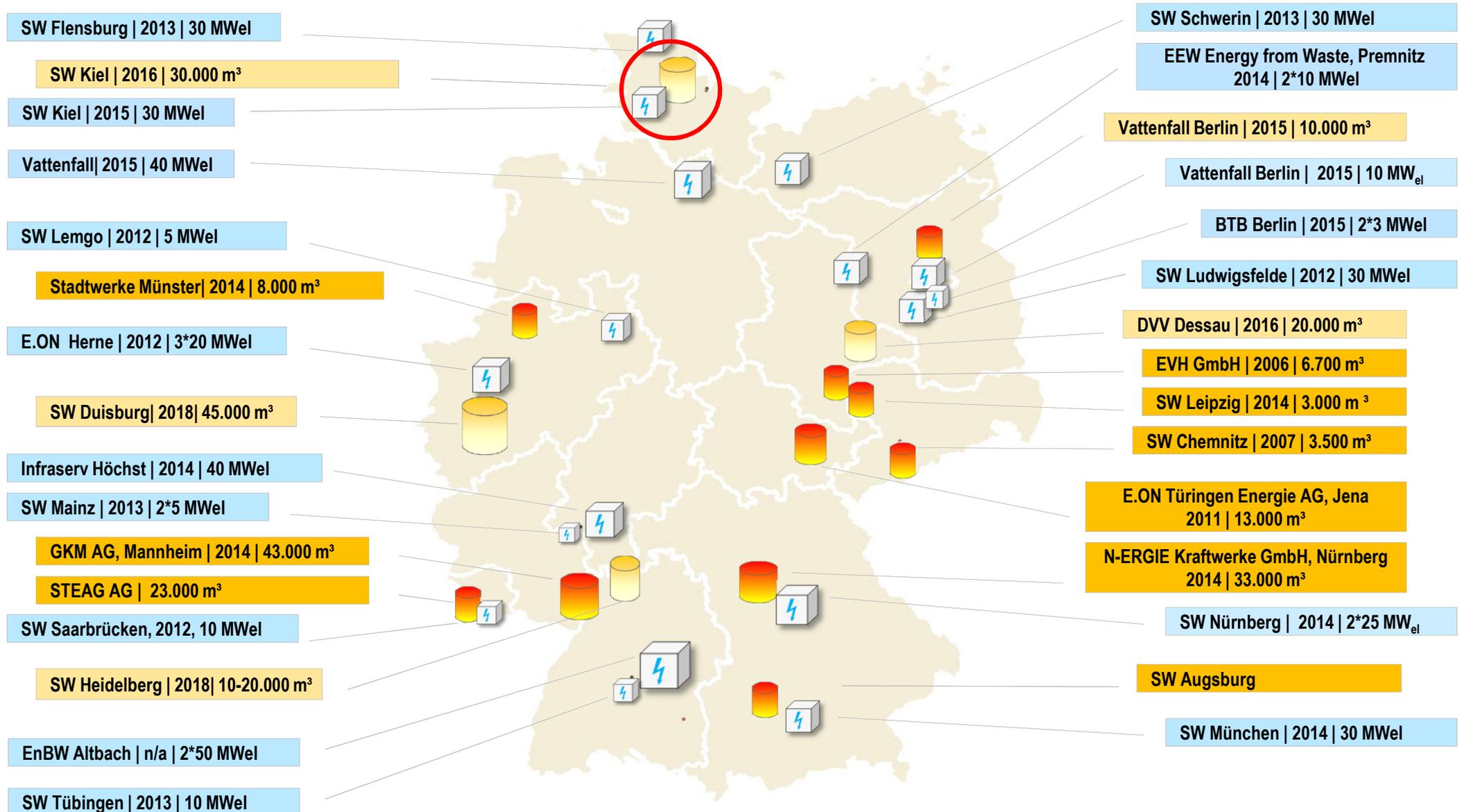
- **Unterscheidung nach**

- Kurzzeitspeicher (Stunden bis Tage)
- Langzeitspeicherung (einige Tage bis Wochen)
- Saisonalspeicher (mehrere Monate)



- Gas- und Strompreise nähern sich immer mehr an
- Der Spread sinkt selbst bei hocheffizienten Kraftwerken – seit Mitte 2014 leichte gaspreisbedingte Erholung
- Der KWK-Index COGIX ist seit 2012 rückläufig und entwickelt sich seit 2014 seitwärts

# Überblick Wärmespeicher- und PtH-Projekte in Deutschland



# Flexibilisierung KWK-Kraftwerke durch Speicher und E-Kessel



- Durch niedrige Spreads sind die meisten Kraftwerke nicht mehr dauerhaft „im Geld“
- KWK-Anlagen ohne Wärmespeicher müssen Stunden mit geringen Strompreisen „überfahren“ – oder Heizwerke einsetzen
- KWK-Anlagen mit Wärmespeicher suchen sich die besten Stunden je Tag zur Wärmeproduktion aus (Cherry picking)
- Flexible KWK-Anlagen mit Wärmespeicher produzieren feste Fahrpläne (Day Ahead) und haben Möglichkeiten der Intraday Optimierung
- Wärme lässt sich (über einen Tag) quasi verlustfrei speichern => aber technisch anspruchsvoll
- KWK-Anlagen können die Produktion automatisch der Strom-Nachfrage anpassen, Begrenzung über den Wärmebedarf
- Wärmespeicher sind günstig im Vergleich zu Stromspeichern
  - Investition (Förderung durch KWK-G) / Betriebskosten / Umwandlungsverluste
- Je höher die Stromkennzahl, desto größer der wirtschaftliche Hebel für den Speichereinsatz
- Speicher und E-Kessel ergänzen sich gut
- Je schlechter der Strommarkt wird, desto höher wird das Optimierungspotenzial durch (Wärme-)Speicher !!

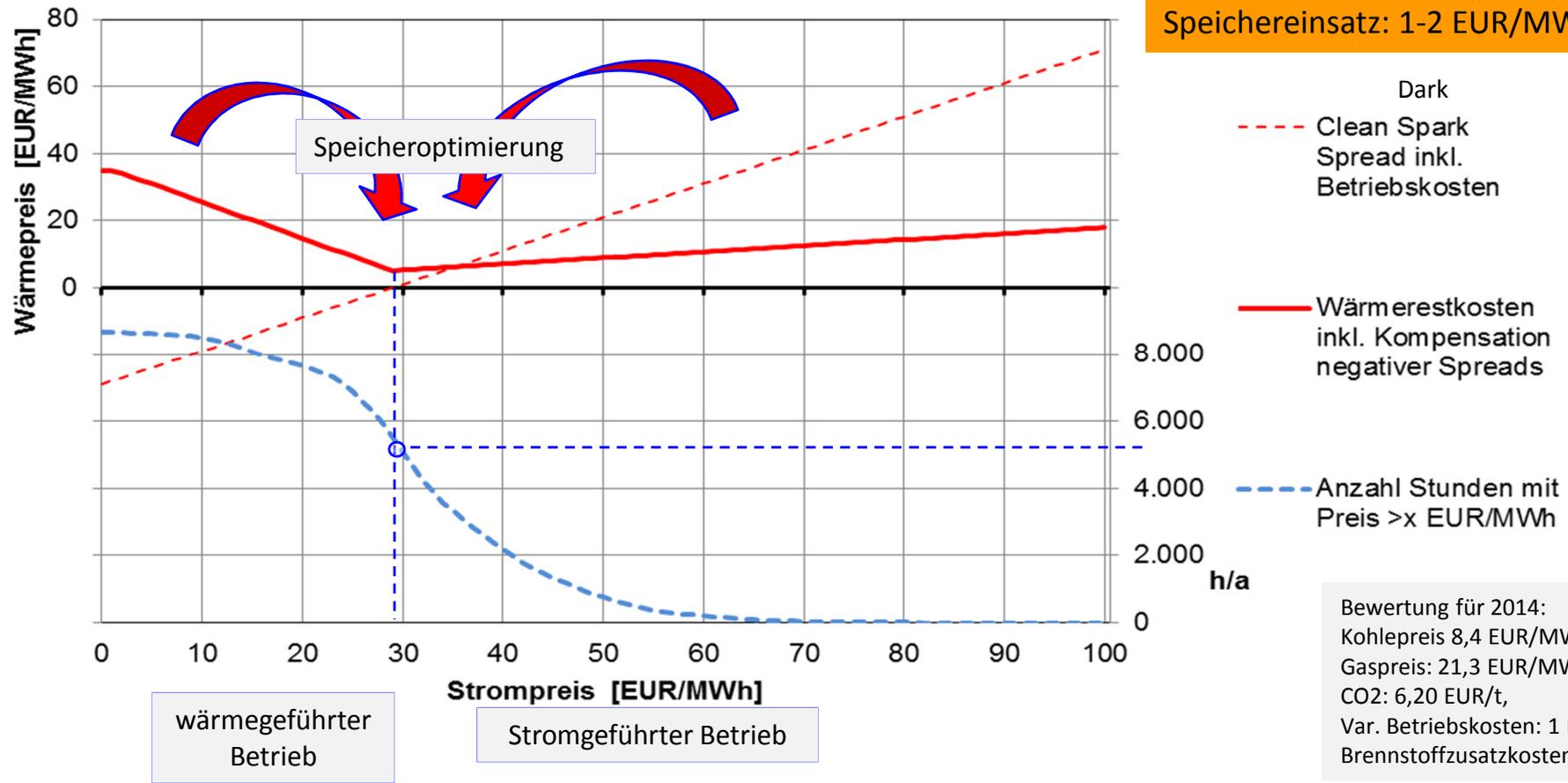


Speicherneubau am GKM Mannheim

# Wärmerestkosten KWK-Kraftwerke: Beispiel Steinkohle-KW (45%)

- KW im Geld: Bei positivem Clean Dark Spread (CDS) sind die variablen Kosten der Fernwärmeauskopplung durch die Stromeinbuße bestimmt (Vollastbetrieb)
- KW nicht im Geld: Bei negativem CDS sind zusätzlich negative Deckungsbeiträge in die Fernwärmekosten einzupreisen, da der Block im Bereich der stromseitigen Minlast gefahren werden muss

Verbesserung Strompreis durch Speichereinsatz: 1-2 EUR/MWh



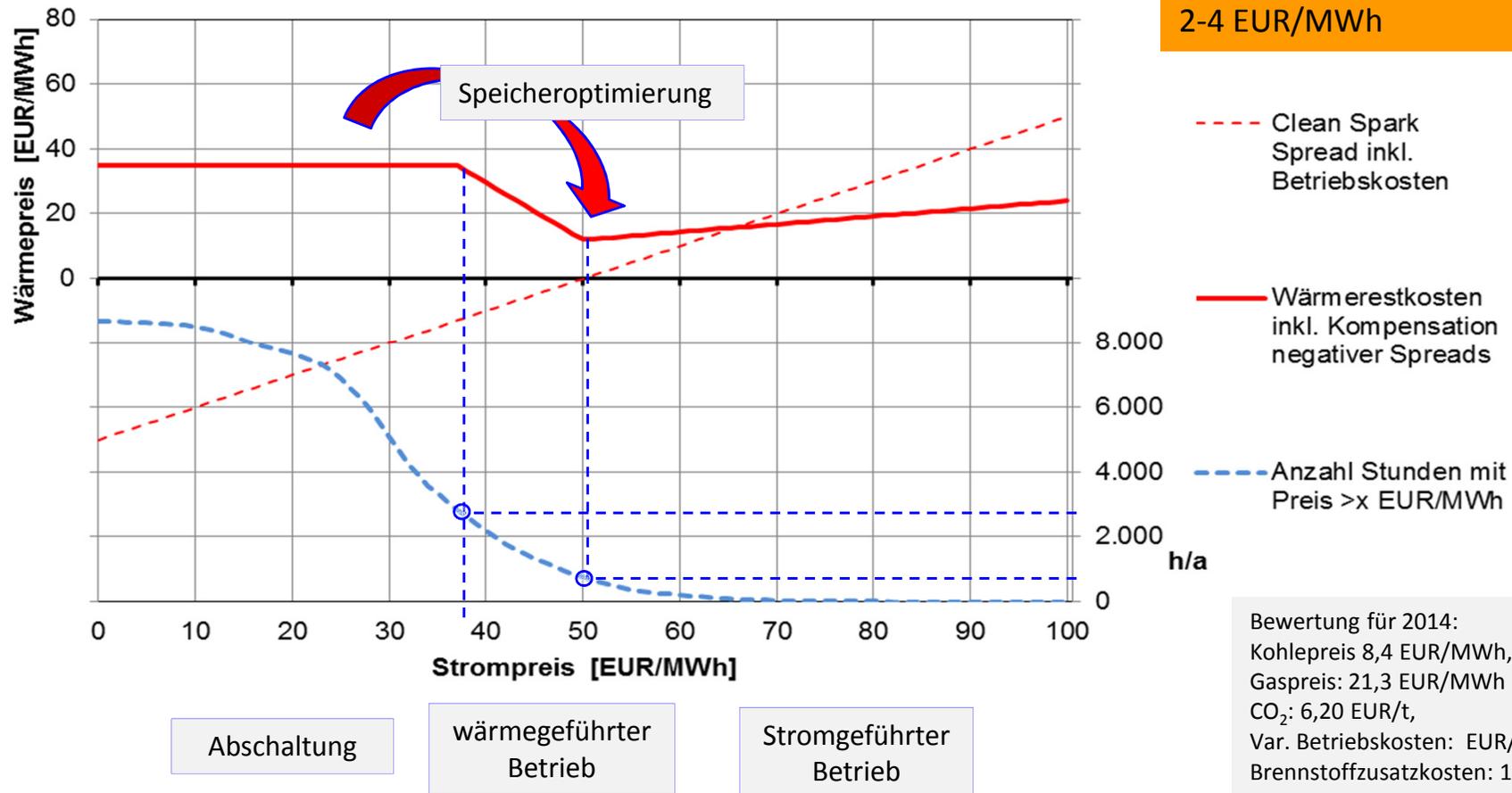
Bewertung für 2014:  
 Kohlepreis 8,4 EUR/MWh,  
 Gaspreis: 21,3 EUR/MWh  
 CO2: 6,20 EUR/t,  
 Var. Betriebskosten: 1 EUR/MWh<sub>el</sub>  
 Brennstoffzusatzkosten: 2 EUR/MWh

# Wärmerestkosten KWK-Kraftwerke: GuD-KW

## (56%, ohne KWK-G)

- KW im Geld: Bei positivem Clean Spark Spread (CSS) sind die variablen Kosten der Fernwärmeauskopplung durch die Stromeinbuße bestimmt (Vollastbetrieb) => kommt kaum vor !
- KW nicht im Geld: Bei negativem CSS sind zusätzlich negative Deckungsbeiträge in die Fernwärmekosten einzupreisen, da der Block im Bereich der stromseitigen Minlast gefahren wird - bei hinreichend niedrigen Preisen Abschaltung !

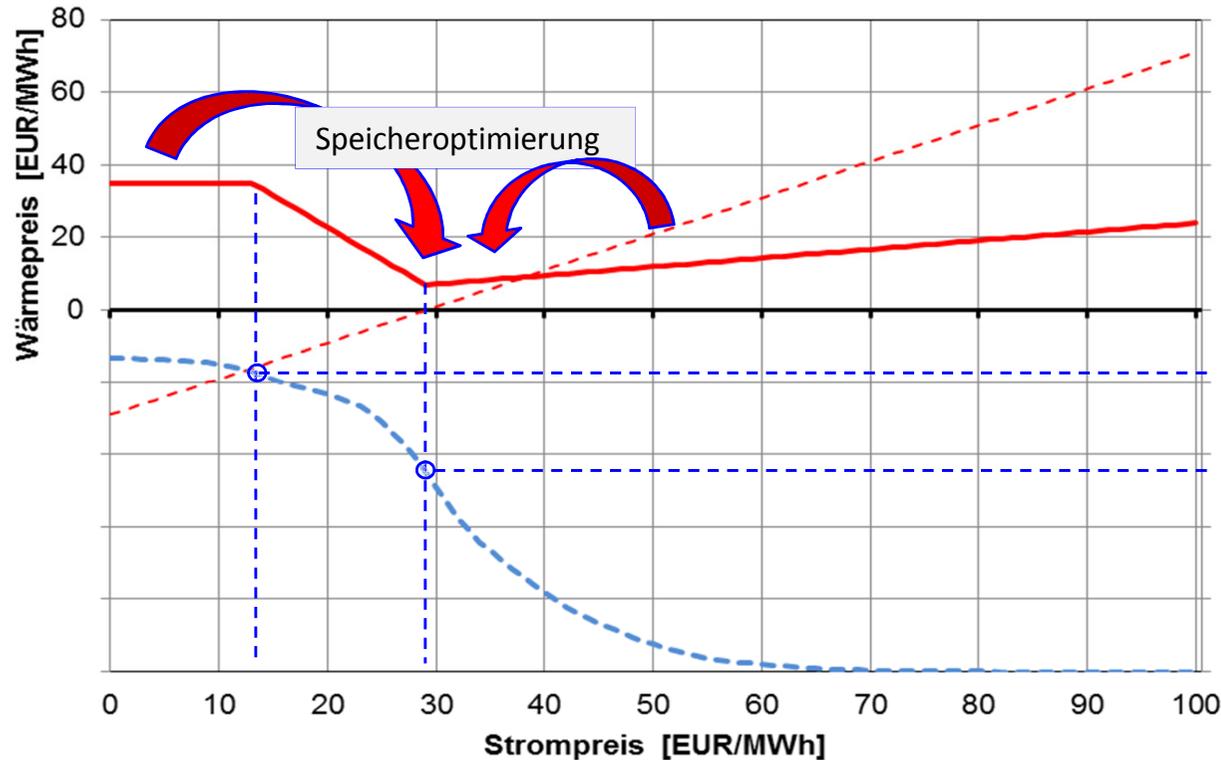
Verbesserung Strompreis:  
2-4 EUR/MWh



Bewertung für 2014:  
 Kohlepreis 8,4 EUR/MWh,  
 Gaspreis: 21,3 EUR/MWh  
 CO<sub>2</sub>: 6,20 EUR/t,  
 Var. Betriebskosten: EUR/MWh<sub>el</sub>  
 Brennstoffzusatzkosten: 1,5 EUR/MWh

# Wärmerestkosten KWK-Kraftwerke: Beispiel GuD-KW (mit KWK-G)

- KW im Geld: Bei positivem Clean Spark Spread (CSS) sind die variablen Kosten der Fernwärmeauskopplung durch die Stromeinbuße bestimmt (Vollastbetrieb)
- KW nicht im Geld: Bei negativem CSS sind zusätzlich negative Deckungsbeiträge in die Fernwärmekosten einzupreisen, da der Block im Bereich der stromseitigen Minlast gefahren werden muss => bei hinreichend niedrigen Preisen Abschaltung !



Verbesserung Strompreis:  
2-4 EUR/MWh

- - - Clean Spark Spread inkl. Betriebskosten
- Wärmerestkosten inkl. Kompensation negativer Spreads
- - - Anzahl Stunden mit Preis >x EUR/MWh

Bewertung für 2014:  
Kohlepreis 8,4 EUR/MWh,  
Gaspreis: 21,3 EUR/MWh  
CO<sub>2</sub>: 6,20 EUR/t,  
Var. Betriebskosten: 3 EUR/MWh<sub>el</sub>  
Brennstoffzusatzkosten: 1,5 EUR/MWh

Abschaltung

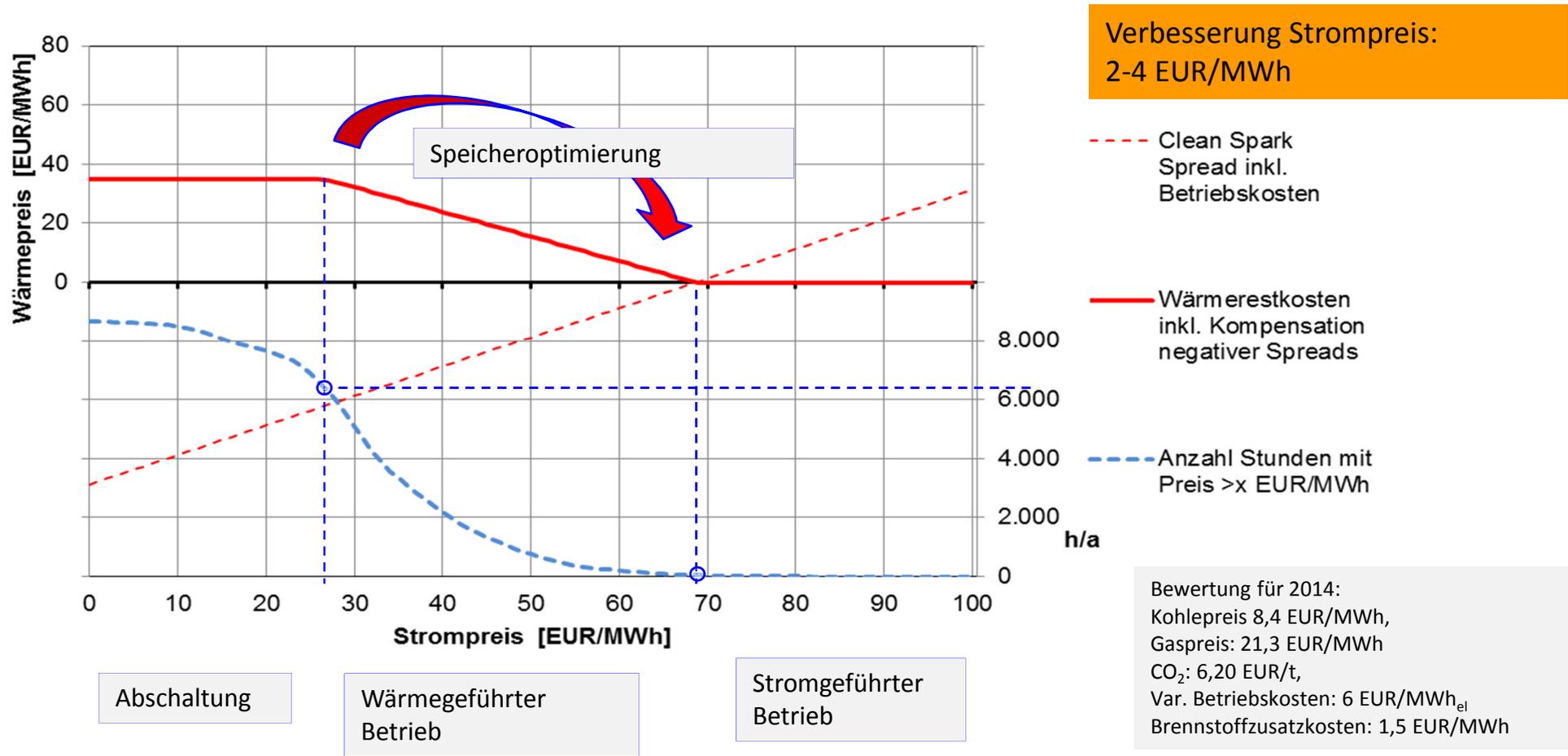
wärmegeführter  
Betrieb

Stromgeführter  
Betrieb

# Wärmerestkosten KWK-Kraftwerke: Motor-BHKW

## (42%, ohne KWK-G)

- KW im Geld: Bei positivem Clean Spark Spread (CSS) sind die variablen Kosten der Fernwärmeauskopplung 0 (keine Stromeinbuße) => kommt kaum vor
- KW nicht im Geld: Bei negativem CSS sind zusätzlich negative Deckungsbeiträge in die Fernwärmekosten einzupreisen

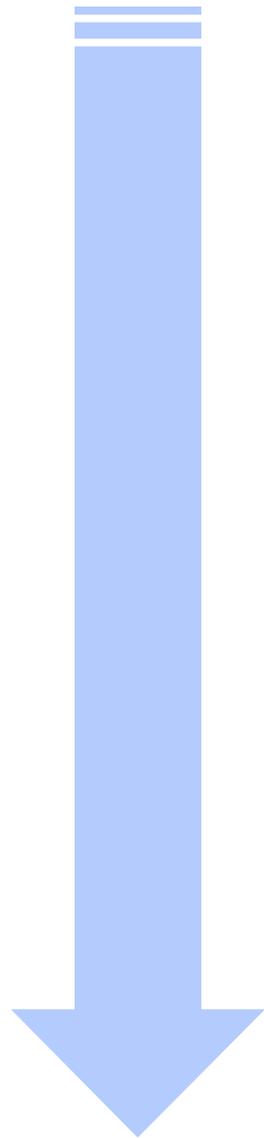


# Praxisbeispiel\*: Wärmespeicher und KWK-Erzeugung in Kiel

- Ausgangssituation:
  - Die Stadtwerke Kiel betreiben zusammen mit E.ON ein kohlegefeuertes Heizkraftwerk (320 MW) in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Kieler Förde
  - inzwischen werden 1/3 aller Gebäude in Kiel mit Fernwärme beheizt – und die Stadtwerke Kiel wollen diesen Anteil weiter steigern.
  - Das GKK ist das „Arbeitspferd“ der Fernwärme-Versorgung Kiel
  - Das Heizkraftwerk wurde in 1970 errichtet, nach 45 Jahren Betrieb ist bald das Ende Lebensdauer erreicht
  - Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit haben sich in den letzten Jahren deutlich verschlechtert

\*) mit freundlicher Genehmigung der Stadtwerke Kiel





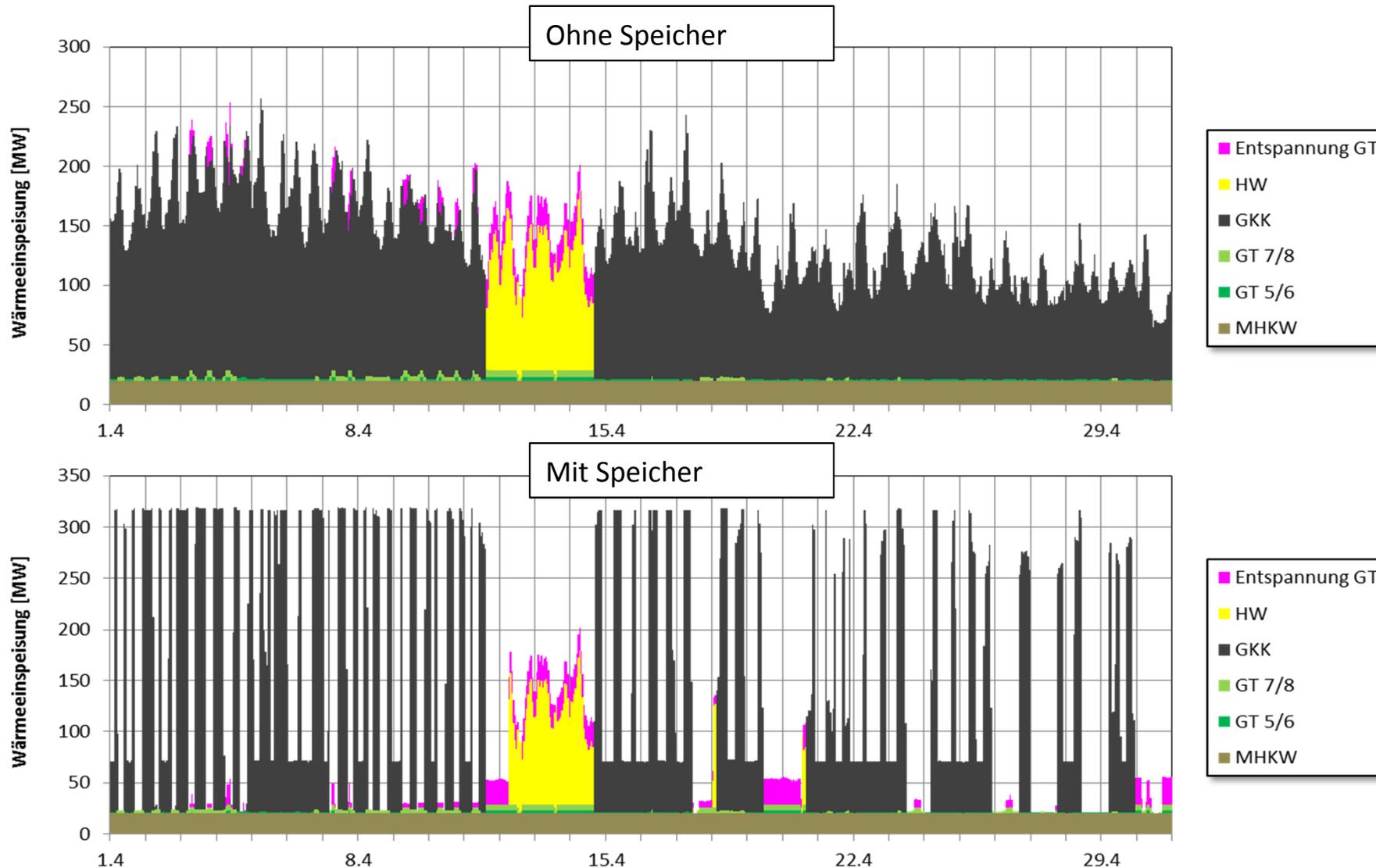
- 2000-2006:** Beginn der Voruntersuchungen GKK Nachfolge (Kohlebasis)
- 2007** **Plan A:** Start der Planung mit Fokus Großes Steinkohlekraftwerk (800-1100 MW)
- 2008** Bewertung Kohleblock (groß/klein) und gasbasierte Alternativen
- 2008/2009** Widerstand gegen Steinkohle, Bürgerproteste, verschlechterte Wirtschaftlichkeit => Projektstopp Kohleblock
- 2009** **Plan B:** Untersuchung GuD (400 MW –Klasse)
- 2010** **Plan C:** Fernwärmeschiene nach Neumünster und (Mit-)Nutzung der dort vorhandenen Kapazitäten
- 2011** **Plan D:** Untersuchung an Wärmebedarf angepasster Gas KWK (Motoren / Turbinen, max 200 MW) mit Wärmespeicher
- 2013** Grundsätzlicher Beschluss zur Umsetzung des Motoren-Konzeptes, Beginn der vorbereitenden Arbeiten (Grundstück, Baufeldfreimachung, Gasanbindung)
- 2014** Bauentscheidung 30.000 m<sup>3</sup> Speicher und Elektrokessel, Bauentscheidung Großmotoren-KW ist noch offen
- 2015** IBN PtH Anlage, Beginn Wärmespeicherbau

	Stromgeführter Einsatz	Wärmegeführter Einsatz
<p>Betrieb mit <b>Kohlekraftwerk</b> GKK (alt, bis 2018)</p> <p><b>Bis 2018</b></p> <p>=&gt; Variables Strom/Wärmeverhältnis Prinzip der Entnahmekondensation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>Verringerung der Wärmeauskopplung</u> und Erhöhung der Stromproduktion in Zeiten <u>hoher Strompreise</u> =&gt; Entladung</li> <li>▪ Speicherladung in Zeiten mittlerer Strompreise</li> <li>▪ Vermeidung von Minlastbetrieb (z.B. Nachtschaltung)</li> <li>▪ Neg. Regelleistung durch E-Kessel/Speicher-Kombination</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dämpfung thermischer Lastspitzen im Netz</li> <li>▪ Durch Zwei- Zonen Speicherkonzept auch bei Netztemperaturen &gt;100 °C einsetzbar ohne Nachheizung</li> <li>▪ Zusätzliche schnelle Reserveleistung in Verbindung mit E-Kessel,</li> </ul>
<p>Betrieb mit modularem <b>Motoren-Kraftwerk</b> (neu, geplant ab 2019)</p> <p><b>Ab 2019</b></p> <p>=&gt; Festes Strom/Wärmeverhältnis, Prinzip der Gegendruck-Turbine</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>Erhöhung der Wärmeauskopplung</u> und Erhöhung der Stromproduktion in Zeiten <u>hoher Strompreise</u> =&gt; Ladung</li> <li>▪ Abschaltung in Zeiten negativer spreads =&gt; Entladung</li> <li>▪ Neg. Regelleistung durch E-Kessel/Speicher-Kombination</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dämpfung thermischer Lastspitzen im Netz</li> <li>▪ Durch Zwei- Zonen Speicherkonzept auch bei Netztemperaturen &gt;100 °C einsetzbar</li> <li>▪ Zusätzliche schnelle Reserveleistung in Verbindung mit E-Kessel,</li> </ul>

# Wärmeerzeugung mit und ohne Speicher

## (Beispielmonat) – Parallelbetrieb mit Kohlekraftwerk (GKK)

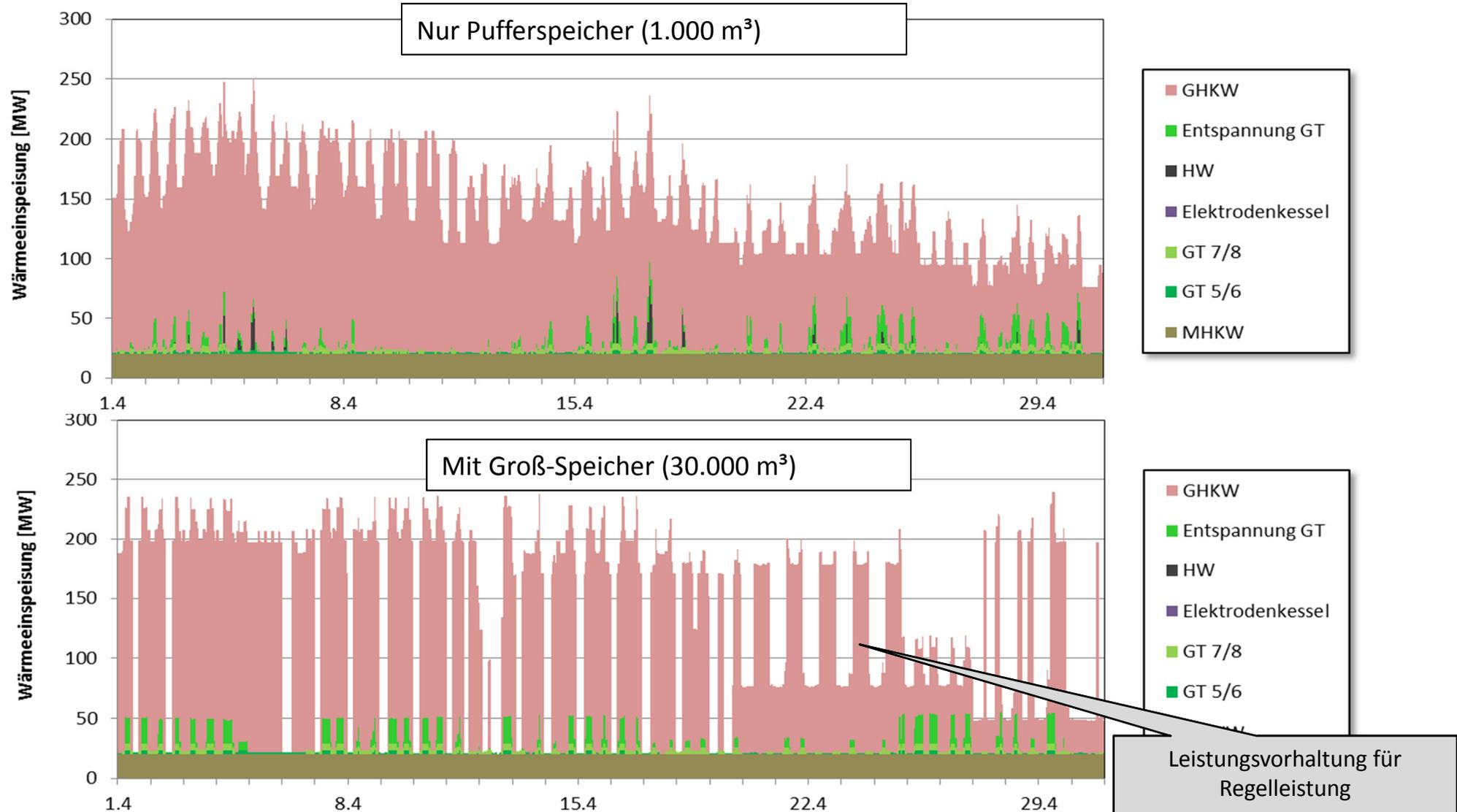
Modellsimulation ENERKO Einsatzplanungsmodell



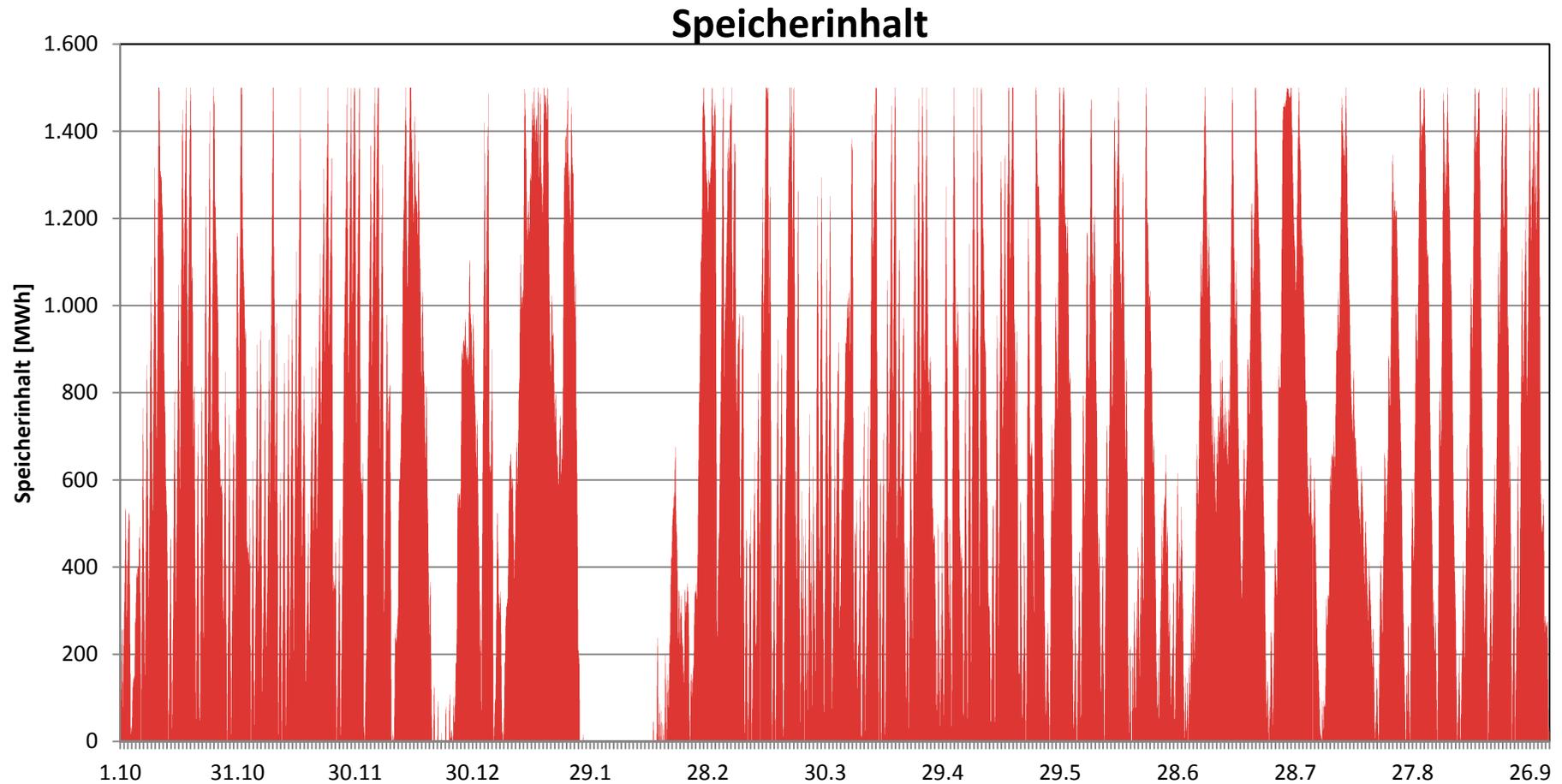
# Wärmeerzeugung mit und ohne Speicher

## (Beispielmonat) – Parallelbetrieb mit flexiblem Gaskraftwerk

Modellsimulation ENERKO Einsatzplanungsmodell

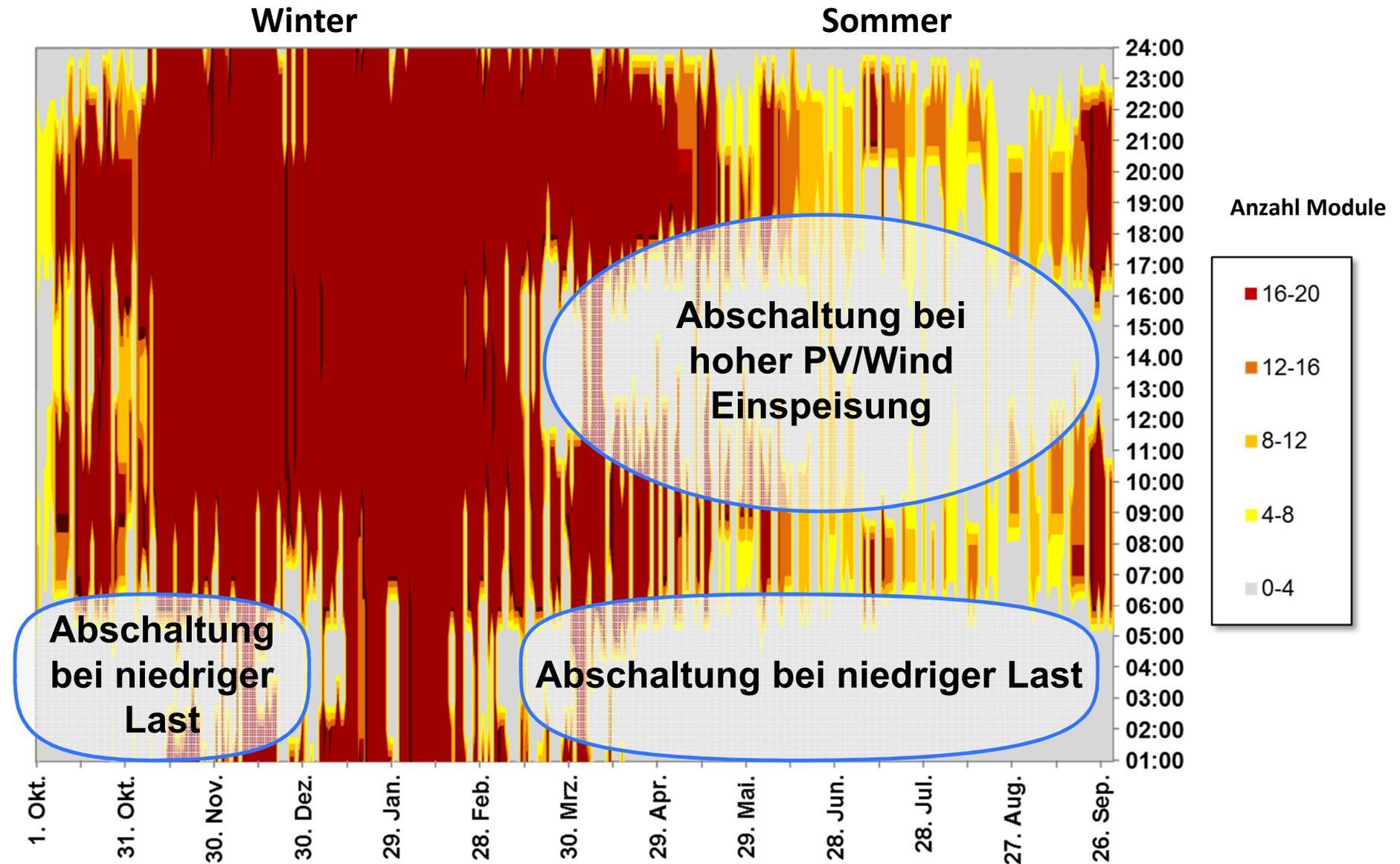


# Speicherladezustand – Parallelbetrieb mit flexiblem Gaskraftwerk



- Der Speicher wird ganzjährig eingesetzt außer bei Maximallast: rd. 100 Ladezyklen

# Kraftwerkseinsatz GHKW: eine ideale Ergänzung erneuerbarer Erzeugung !



# Stand des Projektes: Baufeld Anfang 2016



Quelle: SW Kiel





Quelle: SW Kiel

- **Sektorkopplung vorwärts (Wärme => Strom):** KWK und Wärmespeicher
  - Überblick Wärmespeicher und Typisierung
  - Einsatzmöglichkeiten und Chancen am Strommarkt
  - Fallbeispiel: Großwärmespeicher SW Kiel
- **Sektorkopplung rückwärts (Strom => Wärme):** Überschussstrom und Power-to-Heat
  - Windwärme: Neue Perspektiven für den Wärmemarkt
  - Potenzial Windwärme und Nutzungskonkurrenz

## Grundsätzliches

- These: zunehmende Mengen an „Überschussstrom“ durch weiteren EE Ausbau => Stromverwendung in anderen Sektoren
- (mindestens) 4 Varianten für die Variable „x“ werden diskutiert:
  - Power to Power: Diverse Technologien, z.Z. nur in PsP KW möglich => Potenzial begrenzt
  - Power to Heat: Nutzung als Windwärme => thermische Speicher als „Quasi“-Stromspeicher
  - Power to Mobility: regenerative Ladung von Elektrofahrzeugen
  - Power to Chemicals: Elektrochemische Umwandlung (Wasserstoff, Methan, Produktionsprozesse)
- Aber: Über welche Mengen reden wir eigentlich ? Und wann fallen Sie an ?
  - Spotmarkt 2014: 64 Stunden mit negativen Preisen oder 0
  - Spotmarkt 2015: 129 Stunden mit negativen Preisen oder 0

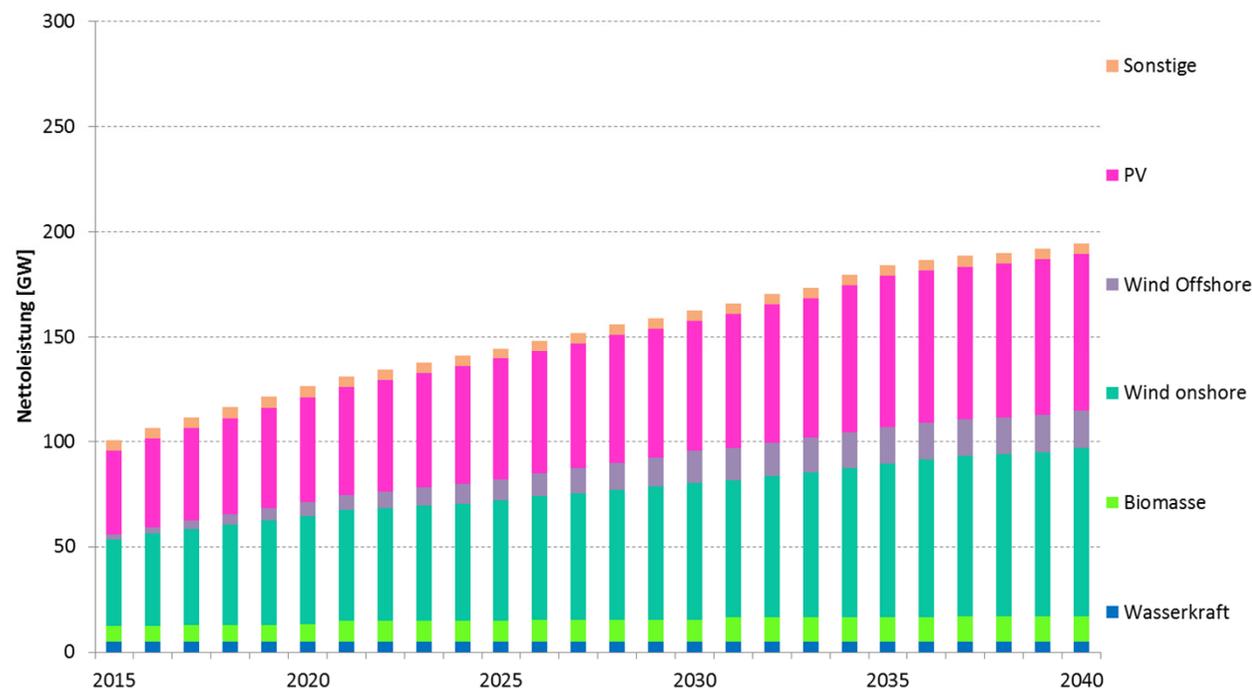
## Beispielrechnung – Rahmenbedingungen

### ● Vorgehensweise

- Ermittlung des Überschussstroms mit Hilfe des ENERKO-Strommarktmodells
- Auswertung des Überschussstroms in Abhängigkeit des Preises (von -10... 10 EUR/MWh)
- Auswertung Mengen, CO<sub>2</sub>-Bilanz und Zeitgleichheit mit Bedarf

### ● Randbedingungen

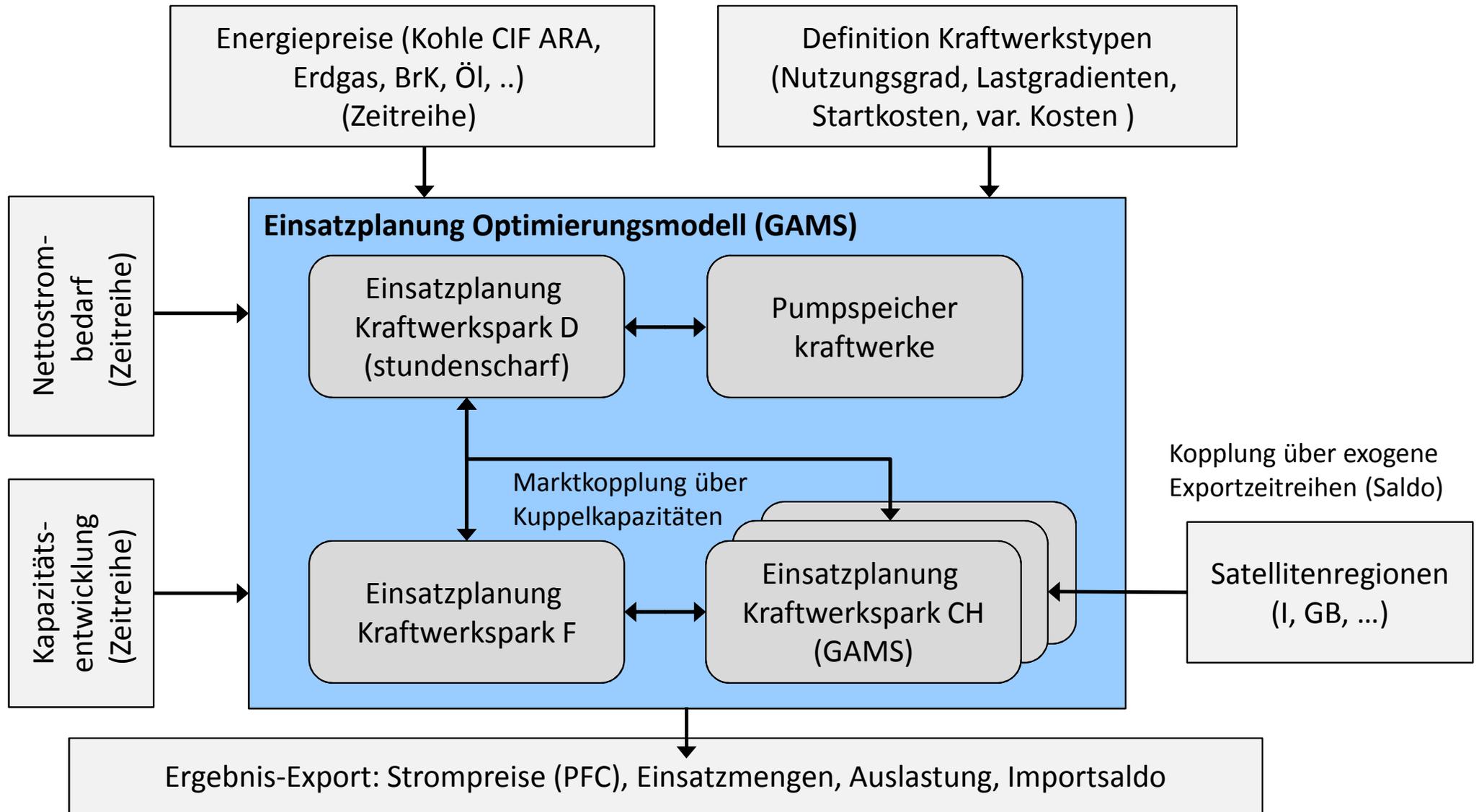
- Ökoszenario (insb. weiterer Ausbau Wind, PV auf 150 GW bis 2026)
- Weltmarktpreise aus WEO 2015



# Modellstruktur

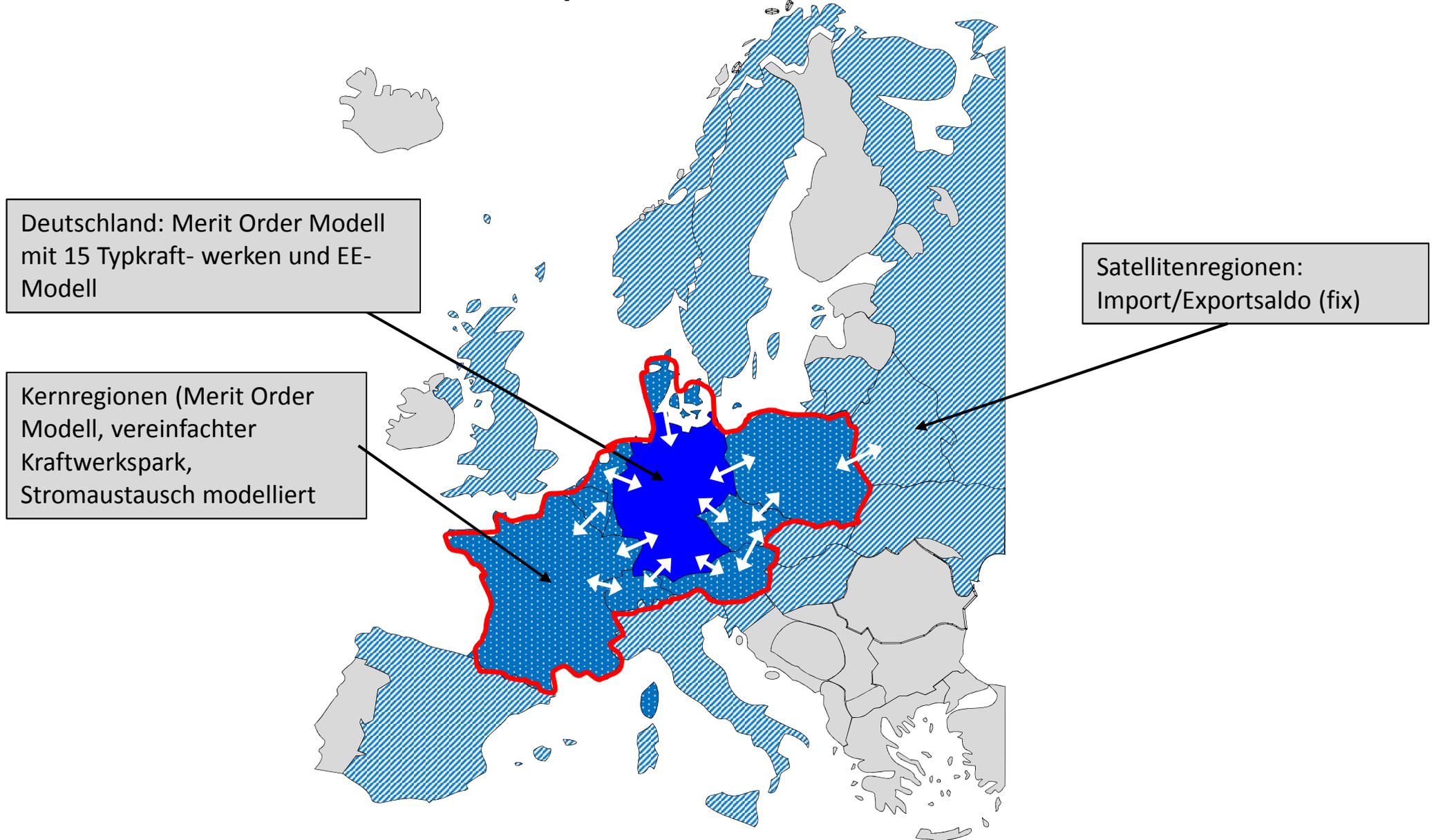


## ENERKO-Strommarktmodell: Fundamentalmodell des europäischen Strommarktes



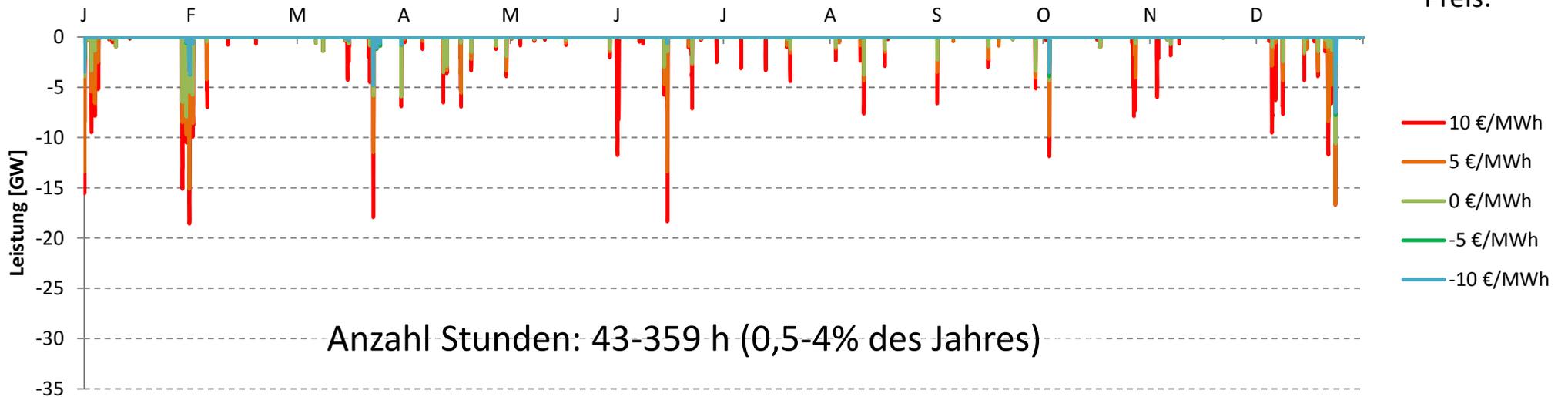
# Regionenmodell

Das Modell bildet den zentraleuropäischen Strommarkt ab

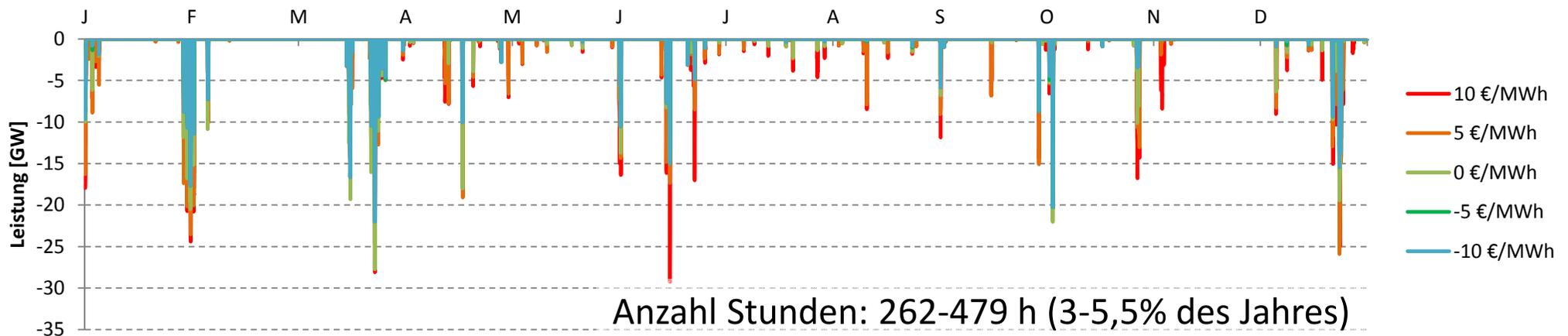


## Entwicklung „Überschussstrom“ 2020-2030

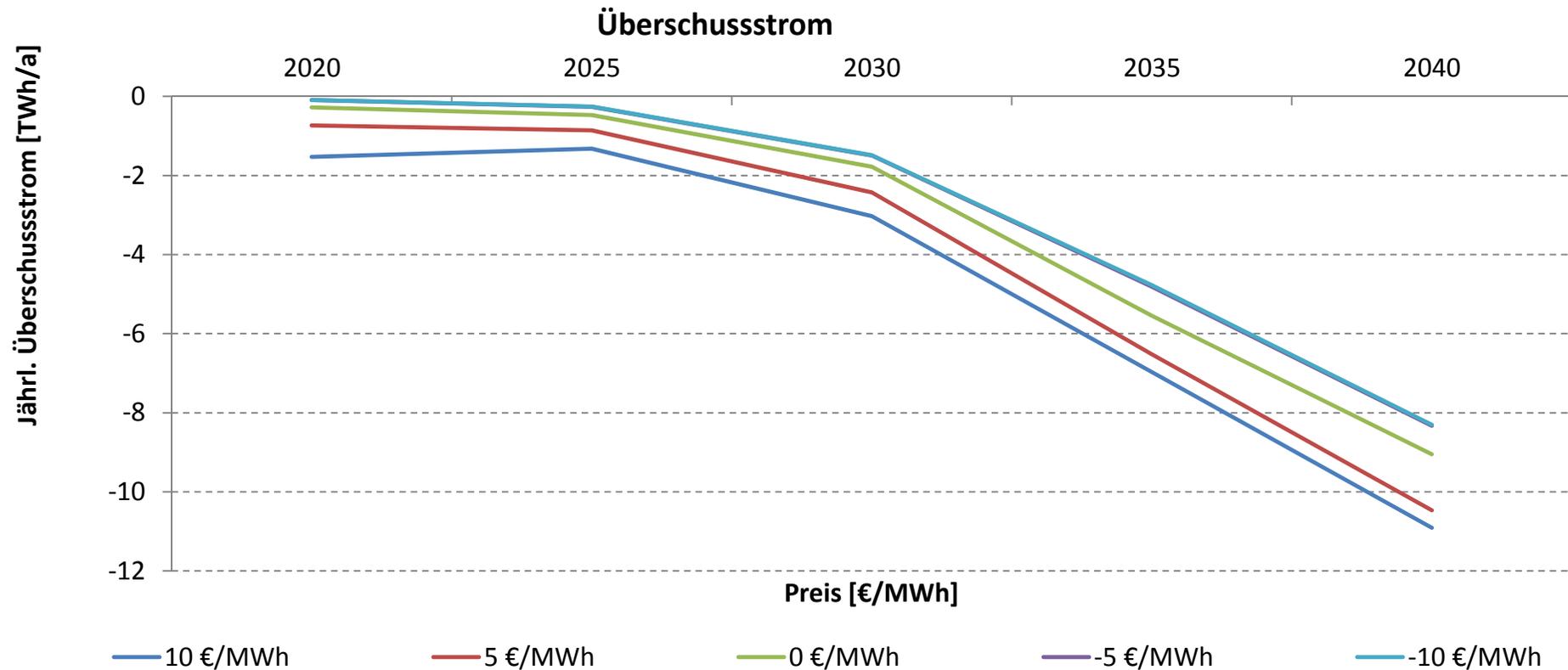
### Überschussstrom 2020



### Überschussstrom 2030



## Menge Überschussstrom in Abhängigkeit des anlegbaren Preises



- Die verfügbare Menge Überschussstrom ist bis 2025 noch überschaubar und steigt dann erst an – in Abhängigkeit des anlegbaren Preises dafür
- Überschussstrom fällt nur zeitweise an – aber über das ganze Jahr verteilt: Nutzung im PtH Markt erfordert großzügige (Mehr-tages-)Wärmespeicher

# Überschussstrom als PtH oder PtM ?

		Preisgrenze [€/MWh]				
		-10	-5	0	5	10
<b>Jährlicher Überschussstrom [TWh/a]</b>	2020	0,09	0,09	0,28	0,74	1,53
	2025	0,26	0,26	0,47	0,86	1,32
	2030	1,49	1,49	1,78	2,43	3,03
	2035	4,77	4,81	5,55	6,52	6,97
	2040	8,30	8,33	9,05	10,47	10,91

	<b>Bedarf PtH Wärmemarkt: 770 TWh</b>	
	direkt	Wärmepumpe
Bei 1% Marktanteil	7,7	2,2
Bei 5% Marktanteil	38	11
Bei 20% Marktanteil	154	44

	<b>Bedarf PtM Antriebsenergie PKW gesamt: 160 TWh</b>
	Bei 1% Anteil (rd. 0,5 Mio. PKW)
Bei 5% Anteil (2,5 Mio. PKW)	8
Bei 20% Anteil (10 Mio. PKW)	32

- für 20% PtH und PtM Marktanteil wären weitere 80 GWh EE-Strom nötig:  
Kapazitätsverdopplung bzw. 60 weitere Offshore-Windparks (je 400 MW)

- **Sektorkopplung vorwärts (Wärme => Strom):** KWK und Wärmespeicher
  - Z.Z. werden Wärmespeicher kommerziell nur als Heißwasserspeicher realisiert
  - Trend zur Zwei-Zonentechnik (Nürnberg, Kiel)
  - Wärmespeicher erlauben eine deutlich flexiblere Fahrweise von KWK Anlagen und sind daher auch als „Quasi-“Stromspeicher wirksam – zu deutlich geringeren Investitionskosten als „echte“ Stromspeicher (PsP, Batterien)
- **Sektorkopplung rückwärts (Strom => Wärme):** Überschussstrom und Power-to-Heat
  - Es gibt viele Ideen für den Überschussstrom aus Wind + PV
  - Die zur Verfügung stehenden Mengen reichen allerdings bis 2030 nur für eine geringe Marktdurchdringung im PtH und PtM Markt aus
  - Auch diese moderate Nutzung wird z.Z. durch das aktuelle Strommarktdesign erschwert/verhindert (z.B. pauschalierte NNE, EEG Umlage auch auf Überschussstrom)
  - Überschussstrom steht nur zeitweise auf Stundenebene an – dann aber im Bereich 5,10 oder mehr GW => auch hier sind Wärmespeicher gefragt