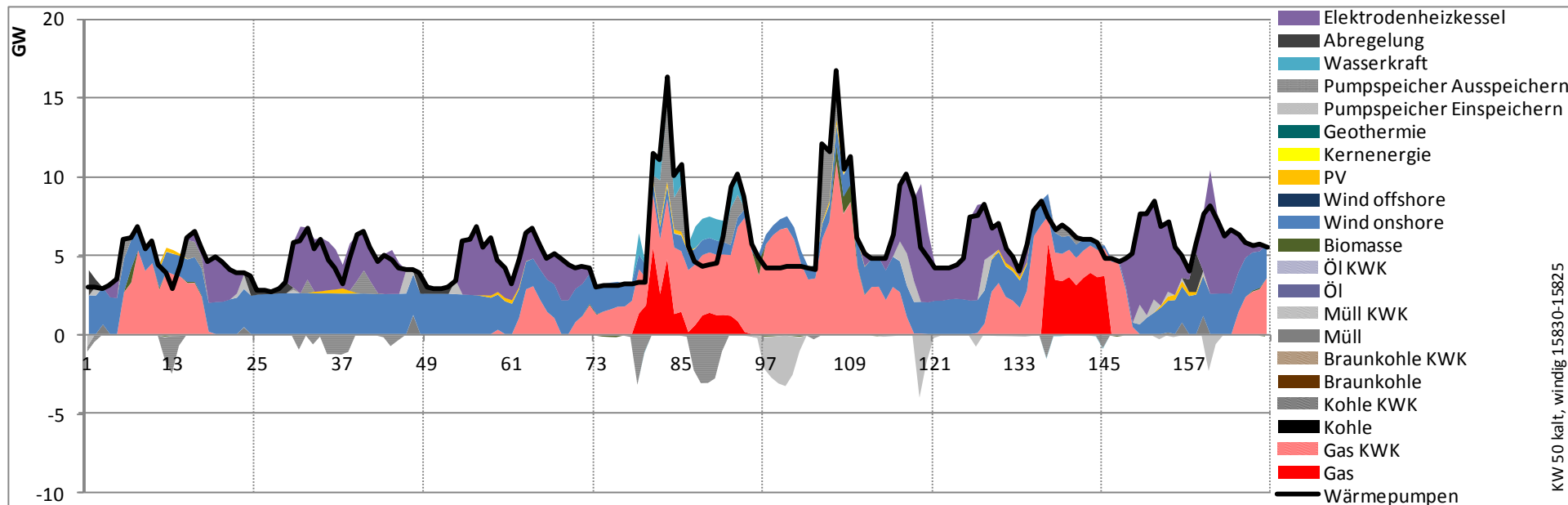


# Analyse des potentiellen Beitrags von Power-to-Heat zur Dekarbonisierung und Flexibilisierung des deutschen Energiesystems

Dialogplattform Power to Heat

Goslar, 14.06.2016

Gerda Schubert, Tobias Boßmann, Julia Michaelis,  
Michael Haendel, Martin Wietschel

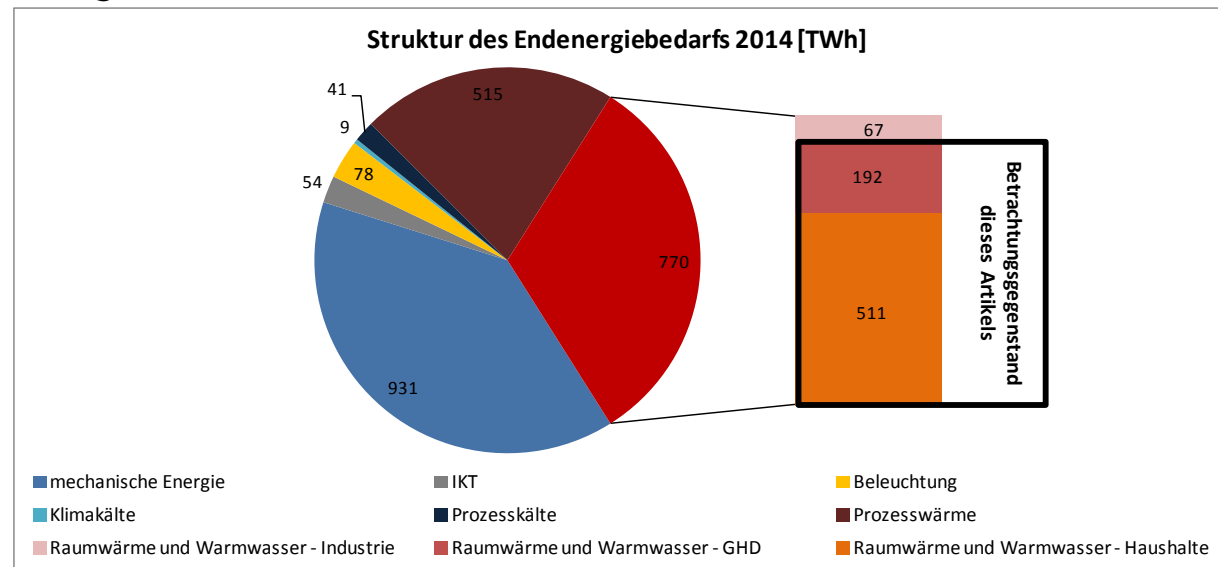


KW 50 kalt, windig\_15830-15825

# Einleitung

## Motivation

- Transformation des Energiesystems mit dem Ziel der nahezu vollständigen Dekarbonisierung des Stromsektors
  - Reduktion des Energieverbrauchs
  - substantieller Ausbau der erneuerbaren Energien (EE)
- Sektorkopplungsoptionen (SKO) führen in Zukunft auch in anderen Sektoren zu erheblichen Emissionsminderungen
- Flexible SKO können zur Deckung des verstärkten Flexibilitätsbedarfs des Stromsektors beitragen
- Elektrifizierung des Wärmesektors (Power-to-Heat) ist eine bedeutende SKO



---

# Einleitung

## Gliederung

---

---

- ✓ Motivation
- Definition Sektorkopplungsoptionen
- Definition Power-to-Heat
- Methode: Ermittlung von Primärenergieeinsatz und CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Betrachtete Szenarien
- Ergebnisse
- Fazit

# Definition stromseitige Sektorkopplungsoptionen (SKO)

- SKOs sind Anwendungen, die den Stromsektor mit anderen Nachfragesektoren verbinden
- innovativ, Prozess- oder Produktinnovationen
- Ziele:
  1. Beitrag zur Transformation des Energiesystems durch Substitution fossiler Brennstoffe durch „grünen Strom“
  2. Bereitstellung zusätzlicher Flexibilität zur besseren Integration fluktuierender EE ins System

		Anwendungssektoren		
		Haushalte GHD	Verkehr	Industrie
Stromumwandlung	Power-to-Heat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Wärmepumpe</b></li> <li>• <b>Elektrowärme</b> (Elektrokessel)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrische Schmelzöfen (u.a. Stahl, NE-Metalle, Glas)*</li> <li>• Wärmepumpe (u.a. Nahrungsmittel, Textilindustrie)</li> <li>• Elektrowärme* (u.a. Nahrungsmittel, Chemie, Zellstoffherstellung, Textilindustrie)</li> </ul>
	Power-to-Liquid		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbrennungsmotor</li> <li>• Brennstoffzelle</li> </ul>	
	Power-to-Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brennstoffzelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brennstoffzelle</li> <li>• Verbrennungsmotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyse (u.a. Wasserstoff)</li> <li>• Brennstoffzelle</li> </ul>
	Power-to-Move <sup>1</sup>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrofahrzeuge (Batterie)</li> <li>• Oberleitungs-LKWs</li> <li>• Leitungsgebundene Elektrifizierung*: Bahn, Busse</li> </ul>	
	Direkt			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrifizierung Betriebsmittel Gasnetz</li> <li>• Plasmaverfahren (u.a. Acetylen)</li> </ul>

\* Über bestehende Anwendungen hinausgehende Substitution von fossil basierten Verfahren/Antriebssystemen

<sup>1</sup> Direkte Umwandlung von Strom in kinetische Energie / Fortbewegung

---

# Definition Power-to-Heat

## strombasierte Wärmeanwendungen

---

- Anwendungen, bei denen Strom für die Bereitstellung von Wärme genutzt wird
  - Raum- sowie
  - Prozesswärme (incl. Warmwasser)
- Typische innovative Anwendungen
  - dezentrale Wärmepumpen
  - Großwärmepumpen in Fernwärme und Industriewärmenetzen
  - Elektro- und Elektrodenkessel
- Power-to-Heat-Technologien unterscheiden sich in Anlagenkonfigurationen und Betriebsweisen
  - Bi- oder multivalenter Betrieb
  - Monovalenter Betrieb, rein strombasierten Einsatz

---

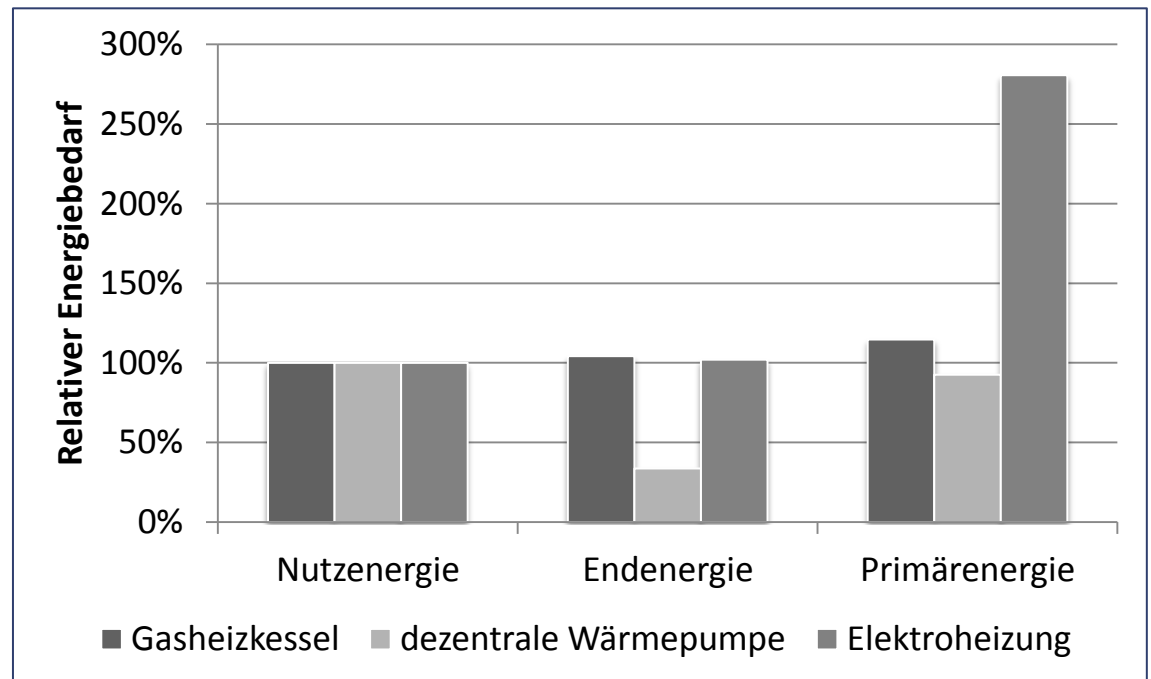
# Definition Power-to-Heat Anlagenkonfiguration/Betriebsweise

---

- Bi- oder multivalenter Betrieb
  - Strom kommt als komplementärer Ersatzenergieträger zum Einsatz, welcher gelegentlich den konventionellen Energieträger substituiert
  - Infrastruktur für die Verwendung von mind. zwei Energieträgern ist vorhanden (z.B. Gasbrennwertkessel in Verbindung mit Elektroheizstab)
  - Stromnachfrage sehr flexibel steuerbar
- Monovalenter Betrieb
  - Rein strombasierten Betrieb
  - Energiedienstleistung wird ausschließlich mittels Strom bereitgestellt (z.B. Ersatz von Gasbrennwertkessel durch Wärmepumpe)
  - Flexibilität der Stromnachfrage von Verfügbarkeit, Größe und Steuerung des Wärmespeichers abhängig

# Methode (1) – Ermittlung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieeinsatz

- Bestimmung von **Primär-, End- und Nutzenergie** im Vergleich zur Referenztechnologie
- Nutzenergie zu Endenergie über **Wirkungsgrad**
  - Gasheizkessel 96%,
  - Elektroheizstab 98%
  - Wärmepumpe 315%
- Endenergie zu Primärenergie über **Bereitstellungskette/ Primärenergiefaktor**
  - Gas (1,1)
  - Strom (2,8)



---

# Methode (2) – Ermittlung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieeinsatz

---

1. Bestimmung des spezifischen Primärenergieeinsatzes und der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die **Referenztechnologien**
2. Modellbasierte Analyse des **stündlichen Einsatzes** der Power-to-Heat-Technologien basierend auf stündlichen Spotmarkt-Strompreisen
3. Analyse des **Primärenergieeinsatz**, die bei der Stromerzeugung anfallen,
  - a) basierend auf dem durchschnittlichen Primärenergiebedarf der gesamten Stromerzeugung einer Stunde (*Durchschnittswerte*)
  - b) Basierend auf dem Primärenergieeinsatz des preissetzenden Kraftwerks (*Grenzwerte*)
4. Analyse der **CO<sub>2</sub>-Emissionen**, die bei der Stromerzeugung anfallen,
  - a) basierend auf durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten Stromerzeugung einer Stunde (*Durchschnittswerte*)
  - b) Basierend auf den CO<sub>2</sub>-Emissionen des preissetzenden Kraftwerks (*Grenzwerte*)
5. Abschätzung der **Gesamteinsparungen**



---

# Methode (3) – Ermittlung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieeinsatz

---

- Unterscheidung zwischen bedarfs- und preisgesteuerter Fahrweise
  - **Bedarfsgesteuerte Fahrweise:** stündlicher Einsatz anhand temperaturabhängiger Standardlastprofile
  - **Preisgesteuerte Fahrweise:** Optimierung des stündlichen Lastverlaufs mit dem Ziel der *Minimierung der Strombezugskosten* unter Berücksichtigung eines Korridors möglicher Lastverschiebungen
- Dezentralen Wärmepumpen: bedarfsgesteuerte Fahrweise, zusätzliche Analyse des preisgesteuerten Betriebs
- Bivalente Technologien in Fernwärmenetzen nur preisgesteuert

# Szenarien übergeordneter Szenariorahmen

- Basierend auf der Studie „**Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht**“  
Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS)
  - Beinhaltet energie- und klimapolitischen Maßnahmen, die bis zum Oktober 2012 ergriffen wurden
  - Aktuelle Treibhausgasminderungsziele der Bundesregierung werden nicht erreicht
- Berücksichtigung von *Elektrofahrzeugen* und *Wärmepumpen*, keine Berücksichtigung von **Power-to-Heat-Optionen in Fernwärmenetzen**

	2014	2030	2050
<b>Eingangsdaten</b>			
Nettostromverbrauch (zzgl. Netzverluste)	547	559	621
Erdgaspreis [€ <sub>2014</sub> /MWh <sub>th</sub> ]	24	36	53
Steinkohlepreis [€ <sub>2014</sub> /MWh <sub>th</sub> ]	9	13	17
CO <sub>2</sub> -Preis [€ <sub>2014</sub> /MWh <sub>th</sub> ]	6	32	53
<b>Simulationsergebnisse</b>			
EE-Anteil an Stromerzeugung	26 %	54 %	57 %
Durchschnittl. Spotmarktpreis [€ <sub>2014</sub> /MWh <sub>el</sub> ]	33	57	97
Durchschnittl. CO <sub>2</sub> -Emissionen [g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>el</sub> ]	569	392	309

# Szenarien

## Technologieszenarien Power-to-Heat

---

- Optimistische Abschätzungen zur Marktpenetration von Power-to-Heat-Technologien, Fokus auf
  - dezentralen Wärmepumpen
  - Elektroheizstäbe in Fernwärmenetzen
  - Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen

	2030	2050
<b>Gesamter Raumwärme- und Warmwasserbedarf</b> HH und GHD	564 TWh	325 TWh
Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs durch <b>dezentrale Wärmepumpen</b>	53 TWh	150 TWh
Deckung des Wärmebedarfs in <b>Fernwärmenetzen</b> durch <b>E-Heizer</b>	5 TWh	17 TWh
Deckung des Wärmebedarfs in <b>Fernwärmenetzen</b> durch <b>Großwärmepumpen</b>	75 TWh	117 TWh

# Ergebnisse

## Minderung Primärenergieeinsatz

	Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren GHD und Haushalte im <b>Referenzfall</b>	<b>Teilweise bereits im AMS-Szenario erzielte</b> Minderung durch den Einsatz dezentraler Wärmepumpen	<b>zusätzliche Minderung durch</b> Elektroheizstäbe in Wärmenetzen	<b>zusätzliche Minderung durch</b> Großwärmepumpen in Wärmenetzen
<b>2030</b>				
<b>Primärenergieeinsatz</b> bei aussch. Verwendung der Referenztechnologien	<b>546 TWh</b>	Gas- und Ölheizung: 58,3 TWh (11%)	Gasheizkessel: 6,0 TWh (1%)	Gasheizkessel: 86,1 TWh (16%)
Minderung (Durchschnittswerte)		38,4 TWh (-66%)	5,7 TWh (-95%)	60,1 TWh (-70%)
Minderung (Grenzwerte)		22,5 TWh (-39%)	1,7 TWh (-28%)	36,1 TWh (-42%)
<b>2050</b>				
<b>Primärenergieeinsatz</b> bei aussch. Verwendung der Referenztechnologien	<b>325 TWh</b>	Gas- und Ölheizung: 165,4 TWh (51%)	Gasheizkessel: 19,6 TWh (6%)	Gasheizkessel: 134,3 TWh (41%)
Minderung (Durchschnittswerte)		116,0 TWh (-70%)	19,6 TWh (-100%)	100,9 TWh (-75%)
Minderung (Grenzwerte)		64,3 TWh (-39%)	18,9 TWh (-96%)	62,9 TWh (-47%)

- Der Primärenergieeinsatz kann durch Power-to-Heat deutlich verringert werden
- Flexibilität führt zu hohen relativen Einsparungen

# Ergebnisse

## Minderung CO<sub>2</sub>-Emissionen

	Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren GHD und Haushalte im <b>Referenzfall</b>	<b>Teilweise bereits im AMS-Szenario erzielte</b> Minderung durch den Einsatz dezentraler Wärmepumpen	<b>zusätzliche Minderung durch</b> Elektroheizstäbe in Wärmenetzen	<b>zusätzliche Minderung durch</b> Großwärmepumpen in Wärmenetzen
<b>2030</b>				
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß</b> bei aussch. Verwendung der Referenztechnologien	<b>280 Mio t CO<sub>2</sub></b>	Gas- und Ölheizung: 11,1 Mio t CO <sub>2</sub> (4%)	Gasheizkessel: 1,1 Mio t CO <sub>2</sub> (0,4%)	Gasheizkessel: 15,8 Mio t CO <sub>2</sub> (6%)
Minderung (Durchschnittswerte)		4,5 Mio t CO <sub>2</sub> (-41%)	1,1 Mio t CO <sub>2</sub> (-100%)	6,9 Mio t CO <sub>2</sub> (-44%)
Minderung (Grenzwerte)		1,5 Mio t CO <sub>2</sub> (-14%)	0,2 Mio t CO <sub>2</sub> (-18%)	1,6 Mio t CO <sub>2</sub> (-10%)
<b>2050</b>				
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß</b> bei aussch. Verwendung der Referenztechnologien	<b>145 Mio t CO<sub>2</sub></b>	Gas- und Ölheizung: 31,6 Mio t CO <sub>2</sub> (22%)	Gasheizkessel: 3,6 Mio t CO <sub>2</sub> (2%)	Gasheizkessel: 24,6 Mio t CO <sub>2</sub> (17%)
Minderung (Durchschnittswerte)		16,4 Mio t CO <sub>2</sub> (-52%)	3,6 Mio t CO <sub>2</sub> (-100%)	14,1 Mio t CO <sub>2</sub> (-57%)
Minderung (Grenzwerte)		7,9 Mio t CO <sub>2</sub> (-25%)	3,6 Mio t CO <sub>2</sub> (-100%)	7,5 Mio t CO <sub>2</sub> (-30%)

- Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können verringert werden
- Der Anteil Erneuerbarer Energien am Strommarkt hat einen großen Einfluss

---

# Ergebnisse

## Flexibilisierung dezentrale Wärmepumpen

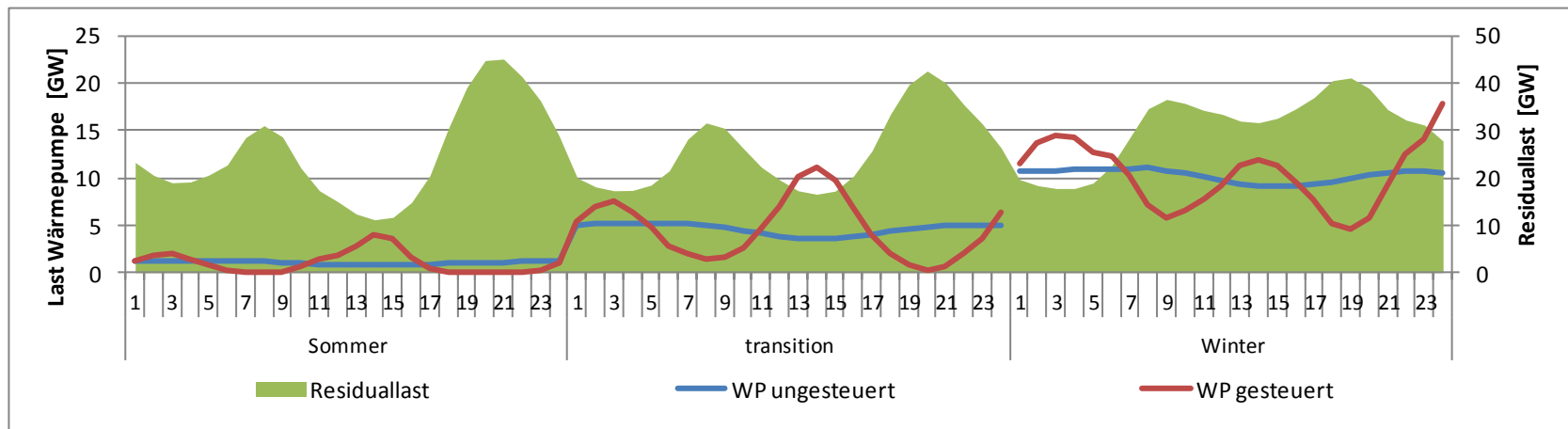
---

- Analyse des potentiellen Beitrags von dezentralen Wärmepumpen
  - zur *Glättung der Residuallast*,
  - zur Verminderung der Abregelung von EE-Strom und
  - zur *Reduktion der Spitzenlast*
- Bedarfsgesteuert: Stromnachfrage abhängig von Wärmenachfrage
- Preisgesteuert:
  - Sommer: Lastverlagerung zur Nutzung der PV-Stromerzeugung
  - Winter: Lastverlagerung in die Nachtstunden mit geringer Stromnachfrage
- Zuschaltbare Leistung aus Wärmepumpen:
  - 2030: bis zu 9 GW
  - 2050: bis zu 26 GW
  - → Reduzierung der Abregelung überschüssiger EE-Strommengen um 12-13% (2030: 1,2 TWh, 2050: 3,4 TWh)

# Ergebnisse

## Flexibilisierung dezentrale Wärmepumpen

- Die **größten Lastverlagerungspotentiale** von Wärmepumpen ergeben sich in den **Übergangsjahreszeiten** (Frühling und Herbst)
  - da im Winter die hohe Wärmenachfrage einen kontinuierlichen Betrieb der Wärmepumpe erfordert und
  - im Sommer nur Warmwasser benötigt und die Stromnachfrage der Wärmepumpe gering ist



- Verringerung der Residuallastspitze um bis zu 4% in 2050

# Fazit

---

---

- Power-to-Heat-Technologien können langfristig **zur Minderung des Primärenergiebedarfs** beitragen, Wärmepumpen tragen aufgrund der zusätzlichen Nutzung von Umweltwärme, Elektroheizkessel aufgrund ihrer Flexibilität zum Klimaschutz bei
- Dezentrale Wärmepumpen reduzieren die CO<sub>2</sub>-Emissionen im untersuchten AMS-Szenario um 5% bis 11% bis zum Jahr 2050, SKOs in Fernwärmenetzen reduzieren die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2% bis 10% führen
- Ein **hoher EE-Anteil an der Stromerzeugung ist Voraussetzung** für die Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarf (und u.U. zusätzliche EE-Erzeugung)
- Wärmepumpen können die **Abregelung von EE am Strommarkt reduzieren**, die Flexibilität ist jedoch zeitlich begrenzt
- Die direkte Umwandlung von Strom in Wärme (**Direktheizungen, Elektrokessel**) ist aus Effizienz- und Kostengründen nur **als bivalente Zusatzheizung** sinnvoll, ihr Einsatz kann einen wesentlichen Beitrag **zur Flexibilisierung der Stromnachfrage** leisten
- Rückkopplungseffekte der zusätzlichen Stromnachfragemengen auf den Kraftwerkseinsatz und Kraftwerkszubau müssen untersucht werden



# Quellen

---

---

- BMWi (2016): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung. Online verfügbar unter <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls>.
- Boßmann, T. (2015): The contribution of electricity consumers to peak shaving and the integration of renewable energy sources by means of demand response. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.
- Michaelis, J.; Helms, H.; Noeren, D.; Dallmer-Zerbe, K.; Gnann, T.; Haendel, M.; Reinhard, C.; Marwitz, S. (2015): [Energie und Umwelt - Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg](#). Abschlussbericht. Freiburg/Brsg.: Fraunhofer ISE
- Repenning, J., Matthes, F., Blanck, R., Emele, L., Döring, U., Förster, H., Haller, M., Harthan, R., Henneberg, K., Herrmann, K., Jörß, W., Kasten, P., Ludig, S., Loreck, C., Scheffler, M., Schumacher, K., Eichhammer, W., Braungardt, S., Elsland, R., Fleiter, T., Hartwig, J., Kockat, J., Pfluger, B., Schade, W., Schlomann, B., Senfuss, F., Athmann, U., und Ziesing, H.-J. (2015). Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht. Berlin.
- [Wietschel, Martin](#); [Haendel, Michael](#); [Schubert, Gerda](#); [Köppel, Wolfgang](#); Degünther, Charlotte (2015). Kurz- und mittelfristige Sektorkopplungspotentiale. Kurzstudie
- Im Rahmen der Studie Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen; UFOPLAN 2014 – FZK 3714 41 107 2. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.