

Modellierung von Power-to-Heat
zur Bestimmung der Auswirkungen auf die
Strommarktintegration fluktuierender Erneuerbarer Energien

Strommarkttreffen Tech-Talk, 04. Mai 2017, Berlin

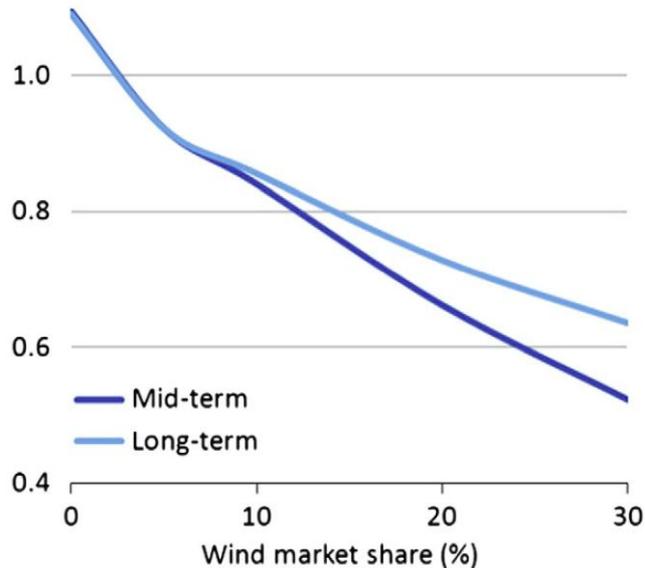
Oliver Ruhnau, RWTH Aachen
Betreut von Lion Hirth und Aaron Praktiknjo

oliver.ruhnau@rwth-aachen.de

Herausforderung

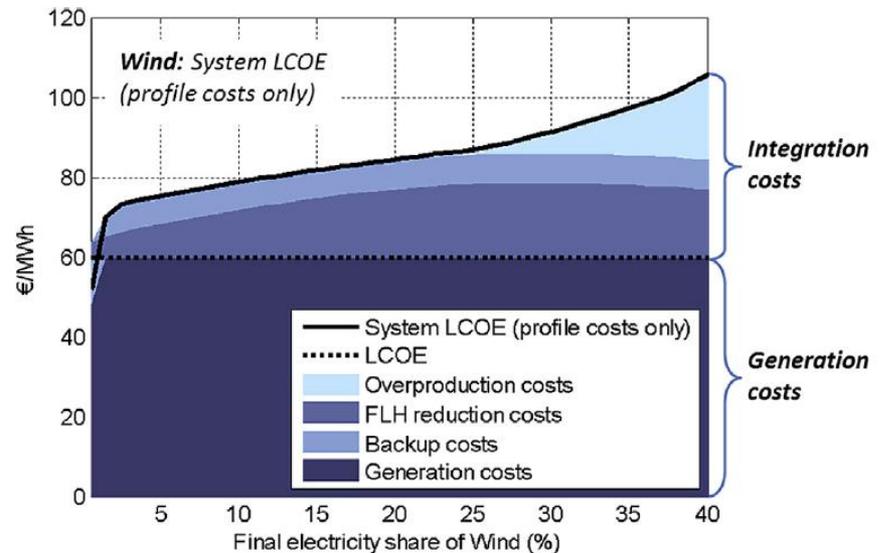
Integration fluktuierender Erneuerbarer Energiequellen (FEE)

Marktwert



Hirth 2013

Integrationskosten



Ueckerdt et al. 2013

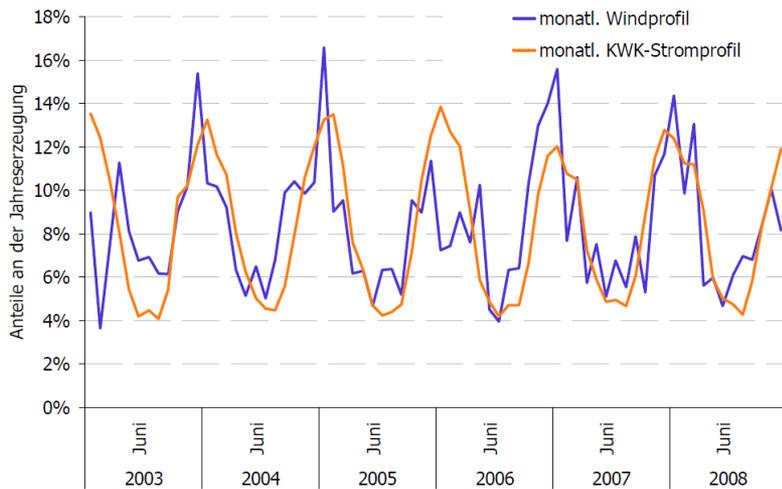
Mit steigendem Marktanteil der Stromerzeugung aus FEE

- Sinkt ihr Marktwert (z.B. Hirth 2013)
- Steigen ihre marginalen Integrationskosten (z.B. Ueckerdt et al. 2013)

Auswirkungen auf diese Herausforderung

Power-to-Heat (PtH) und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

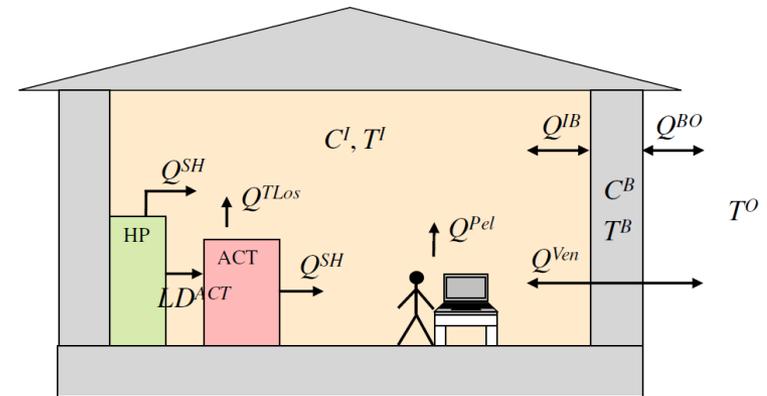
Zeitgleichheit



Erdmann & Dittmar 2010

Flexibilität

- Warmwassertank
- Gebäudesubstanz



Hedegaard & Balyk 2013

Forschungsfrage: Wie wirken sich PtH und KWK auf die FEE-Integration aus?

- Ausbau von PtH am Beispiel von Gebäudewärmepumpen
- Flexibilisierung von PtH am Beispiel von Gebäudewärmepumpen
- Flexibilisierung von KWK

Gliederung

1. Strommarktmodell EMMA
2. Zusätzlicher Stromverbrauch von wärmegeführten Gebäudewärmepumpen
3. Zusätzlicher Stromverbrauch von stromgeführten Gebäudewärmepumpen
4. Zusammenfassung und Diskussion

Kurzvorstellung

Strommarktmodell EMMA

Lineares partielles Gleichgewichtsmodell

- Zielfunktion: Gesamtkosten der Stromerzeugung
- Entscheidungsvariablen: Erzeugung und Investitionen
- Regionen: Deutschland, Frankreich, Polen, Belgien, Niederlande
- Zeit: Ein Jahr in stündlicher Auflösung
- Betrachtungshorizont bei dieser Arbeit: Langfristiges Gleichgewicht

- Bis jetzt: Historischer und inelastischer Stromverbrauch

EMMA wurde von Lion Hirth entwickelt und ist open-source unter der „Creative Commons BY-SA“-Lizenz: <http://neon-energie.de/emma/>

Gliederung

1. Strommarktmodell EMMA
2. Zusätzlicher Stromverbrauch von wärmegeführten Gebäudewärmepumpen
3. Zusätzlicher Stromverbrauch von stromgeführten Gebäudewärmepumpen
4. Zusammenfassung und Diskussion

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Modellgleichungen

Strombilanz $\delta_{t,r} + d_{t,r}^b \leq \sum_i g_{t,r,i} - \sum_{rr} x_{t,r,rr} + \eta \cdot s_{t,r}^o - s_{t,r}^i \quad \forall t,r$

Wärmebilanz $\beta_{t,r} = \varepsilon_{t,r} \cdot d_{t,r}^b \quad \forall t,r$

Variablen

- $g_{t,r,i}$: Stromerzeugung
- $x_{t,r,i}$: Stromflüsse zwischen Regionen
- $s_{t,r}^i$: Stromspeicherbeladung
- $s_{t,r}^o$: Stromspeicherentladung
- $d_{t,r}^b$: Stromverbrauch der Wärmepumpen

Parameter

- $\delta_{t,r}$: Historischer Stromverbrauch
- $\beta_{t,r}$: Gebäudewärmebedarf
- $\varepsilon_{t,r}$: Arbeitszahl der Wärmepumpen

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Modellierungsansätze Gebäudewärmebedarfszeitreihen

Wetter

Außentemperatur,
Solarstrahlung...

Nutzerverhalten

Innentemperatur,
Nachtabsenkung...

Thermodynamik

Wärmebedarf

Raumwärme,
Warmwasser

Fundamentale Ansätze

Nabe et al. 2011 (ecofys): TRNSYS
Hedegaard und Balyk 2013: Eigener Ansatz
Palzer 2016 (Fh ISE): DIN EN 13790

(+) Wettereinflüsse

(+) Veränderungen des Gebäudebestands

(-) Annahmen zum (stochastischen)
Nutzerverhalten notwendig

Statistische Ansätze

Fehrenbach et al. 2014 (KIT): VDI 2655
Heilek 2015 (TUM): **SLP Gas nach BGW**
Pellinger et al. 2016 (fFe): SLP Strom der VNB

(+) Wettereinflüsse

(+) Nutzerverhalten

(-) Begrenzt auf derzeitigen
Gebäudebestand

SLP: Standardlastprofil, VNB: Verteilnetzbetreiber

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Berechnung der Gebäudewärmebedarfszeitreihen

Annahme: *Gebäudewärmebedarf ~ Gasverbrauch nach BGW 2006*

Spatiale Zeitreihen
 $0,75 \times 0,75^\circ$

Außentemperatur
ERA-Interim-Datensatz

Geometrisches Mittel des aktuellen Tags und 3 Vortage
(thermische Trägheit)

Anzusetzende Temperatur

Sigmoidaler Zusammenhang

Spatiale Zeitreihen
 $0,75 \times 0,75^\circ$

- Differenziert nach Gebäudetypen (EFH, MFH, GHD)
- Differenziert nach Raumwärme und Warmwasser (*to do*)

Tageswärmebedarf

Temperaturabhängige Tagesprofile

Stündlicher Wärmebedarf

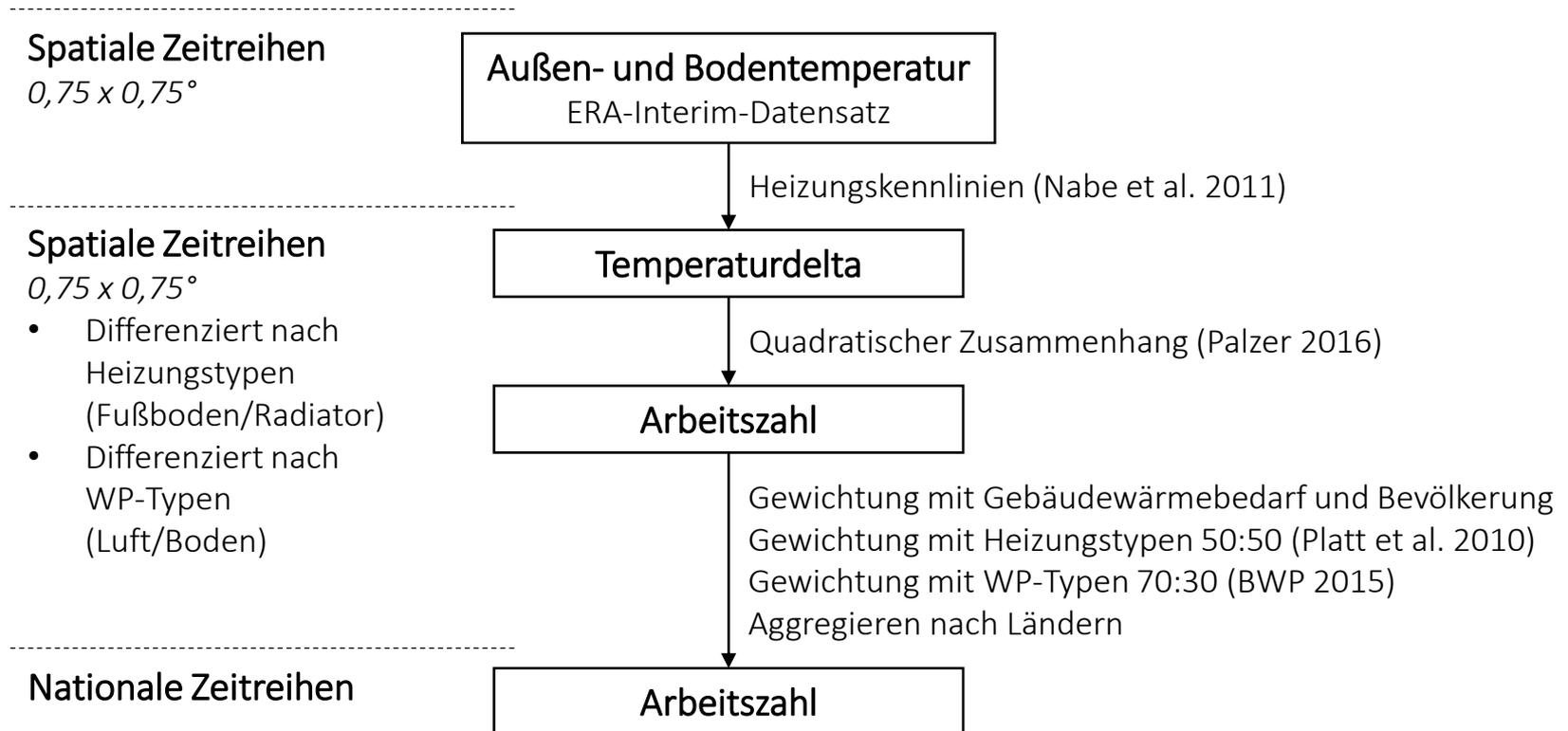
Gewichten mit Bevölkerung (EUROSTAT)
Gewichten mit Gebäudetypen (EU Building Database)
Aggregieren nach Ländern

Nationale Zeitreihen

Stündlicher Wärmebedarf

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Arbeitszahlzeitreihen



Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

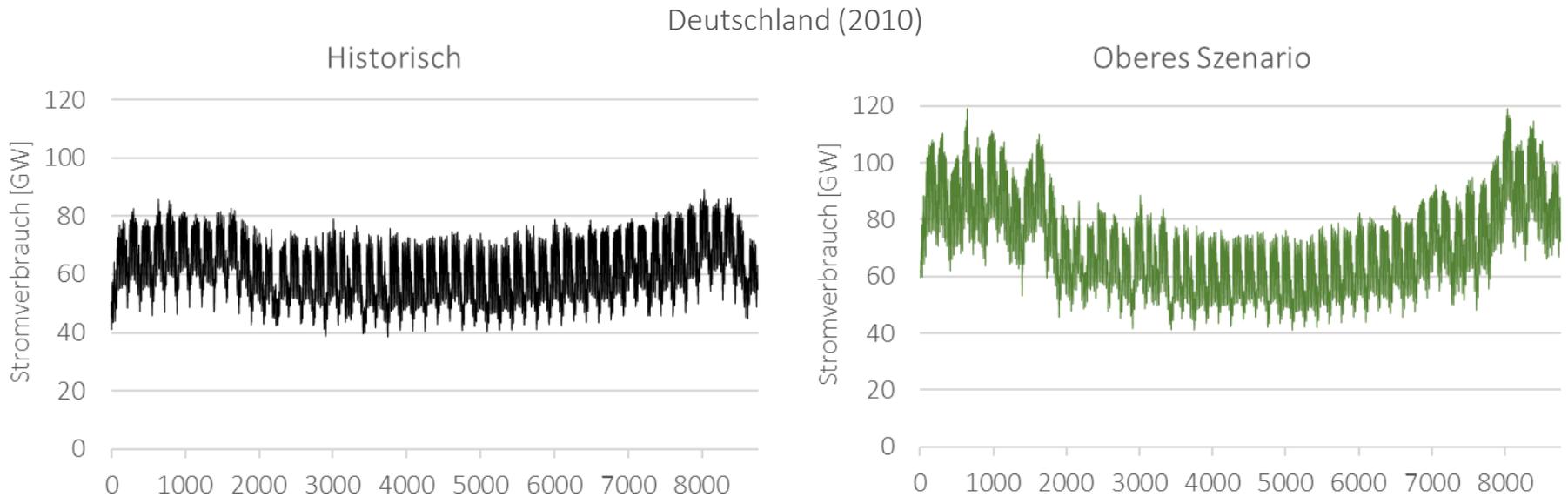
Skalierung der Gebäudewärmebedarfszeitreihen

Zusätzlicher Stromverbrauch durch
Gebäudewärmepumpen [TWh]

Land	Mittleres Szenario	Oberes Szenario	Literatur
Deutschland	45	90	Vgl. Einführung
Frankreich	0	0	Teske et al. 2012 négaWatt 2017
Polen	10	20	Teske et al. 2013 Bukowski et al. 2013
Niederlande	9	17	Proportional zu Deutschland + Polen
Belgien	7	13	Proportional zu Deutschland + Polen
SUMME	71	142	
<i>Zunahme des Netto- stromverbrauchs</i>	<i>+5%</i>	<i>+10%</i>	

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Vorläufige Ergebnisse: Resultierender Stromverbrauch



Eigene Abbildungen

Im Winter nehmen Niveau und Volatilität des Stromverbrauchs deutlich zu

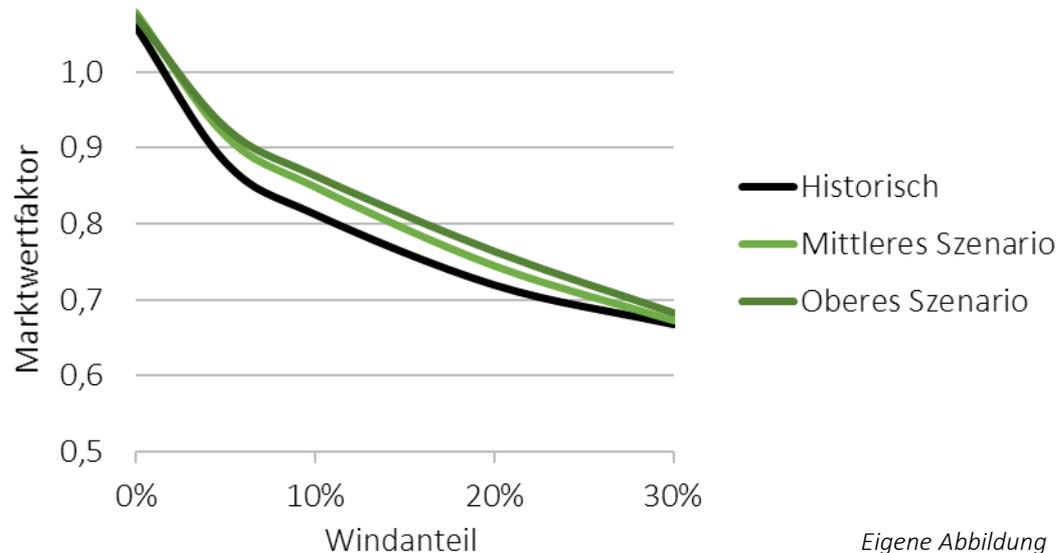
- Im Sommer kaum Unterschiede

Die Ergebnisse sind stark sensitiv bzgl. des Wetterjahres

- Peak-WP-Leistung im oberen Szenario: 40 GWp (2010) – 58 GW (2012)

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen

Vorläufige Ergebnisse: Marktwert von Windkraft



Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen erhöhen den Marktwertfaktor von Windkraft

- Dieser Effekt ist bei 5-20% Windanteil deutlich stärker als bei 0% und 30%
- Dieser Effekt nimmt mit der Marktdurchdringung von Gebäudewärmepumpen ab

ABER: Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen haben eigene „Integrationskosten“

- Die spezifischen Stromerzeugungskosten steigen in den untersuchten Szenarien (in der Grafik nicht erkennbar)

Gliederung

1. Strommarktmodell EMMA
2. Zusätzlicher Stromverbrauch von wärmegeführten Gebäudewärmepumpen
3. **Zusätzlicher Stromverbrauch von stromgeführten Gebäudewärmepumpen**
4. Zusammenfassung und Diskussion

Stromgeführte Gebäudewärmepumpen

Modellgleichungen

Wärmebilanz $\beta_{t,r} = \varepsilon_{t,r} \cdot d_{t,r}^b - s_{t,r}^{b,i} + \eta^b \cdot s_{t,r}^{b,o}$ $\forall t, r$
 $d_{t,r}^b \leq \hat{d}_r^b$ $\forall t, r$

Wärmespeicher $v_{t,r}^b = \eta^{b,t} \cdot v_{t-1,r}^b + s_{t,r}^{b,i} - s_{t,r}^{b,o}$ $\forall t, r$
 $v_{t,r}^b \leq \hat{v}_r^b$ $\forall t, r$

Variablen $d_{t,r}^b$: Stromverbrauch der Wärmepumpen
 $s_{t,r}^{b,i}$: Beladung der Wärmespeicher
 $s_{t,r}^{b,o}$: Entladung der Wärmespeicher
 $v_{t,r}^b$: Füllstand der Wärmespeicher

Parameter $\beta_{t,r}$: Gebäudewärmebedarf
 $\varepsilon_{t,r}$: Arbeitszahl der Wärmepumpen
 η^b : Zyklusnutzungsgrad der Wärmespeicher
 $\eta^{b,t}$: Stündl. Ruhennutzungsgrad der Wärmespeicher
 \hat{d}_r^b : Max. Stromverbrauch der Wärmepumpen
 \hat{v}_r^b : Max. Füllstand der Wärmespeicher

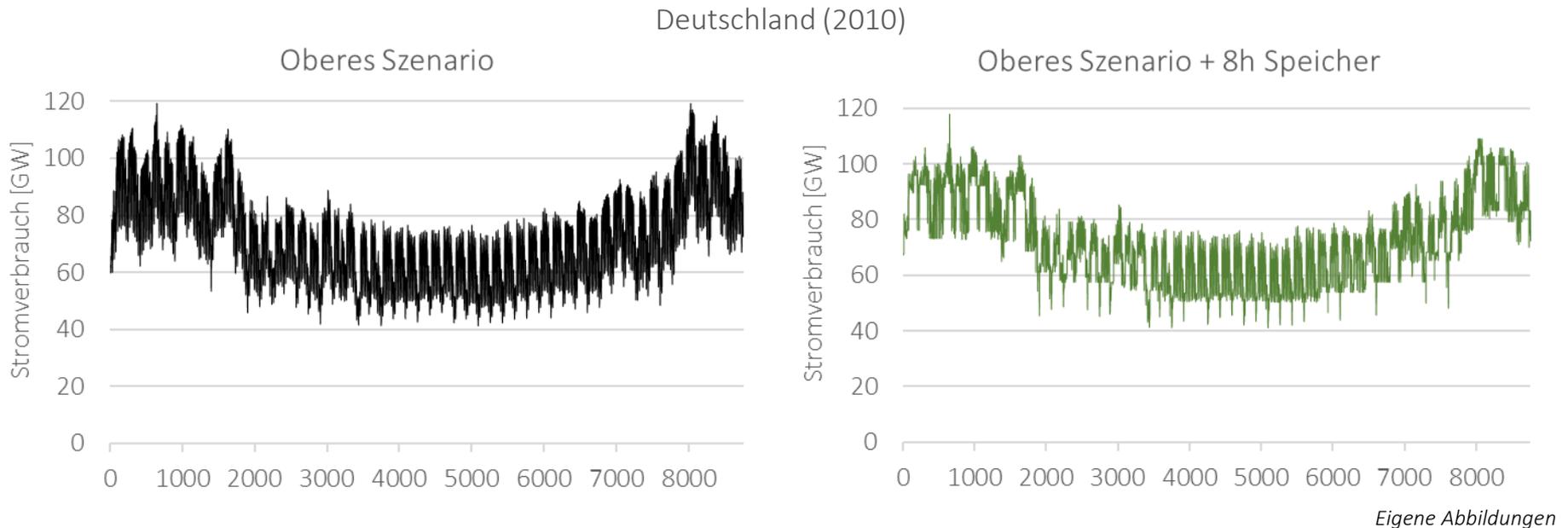
Stromgeführte Gebäudewärmepumpen

Parametrisierung

Parameter	Wert	Literatur
η^b Zyklusnutzungsgrad der Wärmespeicher	95 %	Heilek 2015
$\eta^{b,t}$ Stündl. Ruhenutzungsgrad der Wärmespeicher	98,9 %	Heilek 2015
\hat{d}_r^b Max. Stromverbrauch der Wärmepumpen	$\max_t(\beta_{t,r} / \varepsilon_{t,r})$	Vgl. Nabe et al. 2011
\hat{v}_r^b Max. Füllstand der Wärmespeicher	$4h \cdot \hat{d}_r^b$	Heilek 2015
	$8h \cdot \hat{d}_r^b$	Eigene Annahme

Stromgeführte Gebäudewärmepumpen

Vorläufige Ergebnisse: Resultierender Stromverbrauch

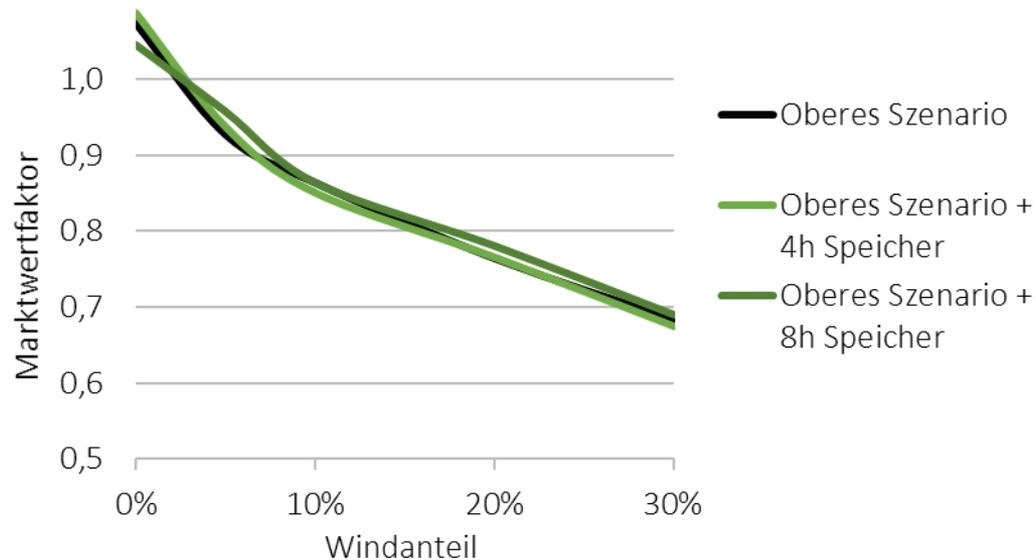


Der Wechsel zur stromgeführten Betriebsweise von Gebäudewärmepumpen reduziert die Volatilität des Stromverbrauchs

- Lastspitze ist jedoch nahezu unverändert

Stromgeführte Gebäudewärmepumpen

Vorläufige Ergebnisse: Marktwert von Windkraft



Der Wechsel zur stromgeführten Betriebsweise von Gebäudewärmepumpen hat kaum Auswirkungen auf den Marktwertfaktor von Windkraft

ABER: Stromgeführte Gebäudewärmepumpen haben geringere „Integrationskosten“

- Die spezifischen Stromerzeugungskosten des Gesamtsystems sinken in den untersuchten Szenarien (in der Grafik nicht erkennbar)

Gliederung

1. Strommarktmodell EMMA
2. Zusätzlicher Stromverbrauch von wärmegeführten Gebäudewärmepumpen
3. Zusätzlicher Stromverbrauch von stromgeführten Gebäudewärmepumpen
4. Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassung

Methode

- Ergänzung des Strommarktmodells EMMA um Wärmebilanz und Wärmespeicher
- Spatiale Zeitreihen für Gebäudewärmebedarf (mittels Gas-Standardlastprofile) und für Wärmepumpenarbeitszahlen
- Nationale Aggregation mittels GIS-Daten zur Bevölkerung, EU-Daten zum Gebäudewärmebedarf und weiteren technischen Annahmen

Vorläufige Ergebnisse

- Zus. Stromverbrauch von Gebäudewärmepumpen hilft bei der Integration von Windkraft
- Zus. Stromverbrauch von Gebäudewärmepumpen bringt neue Herausforderungen (Volatilität) mit sich, die durch Speicher abgemildert werden können

Diskussion

Realitätsabgleich

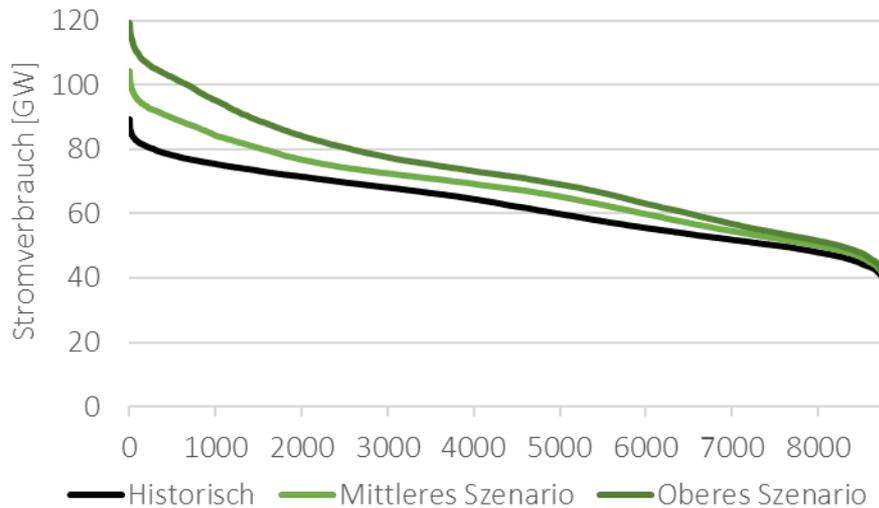
- Wechsel von Widerstandsheizungen zu Wärmepumpen
- Veränderungen des Gebäudebestands
- Installation von Hybridwärmepumpen
- Suboptimale Warmwasserbereitstellung
- Speicher in Gebäudesubstanz
- Wärmepumpenstromtarife mit Anreizen zum systemfreundlichen Betrieb

Anhang

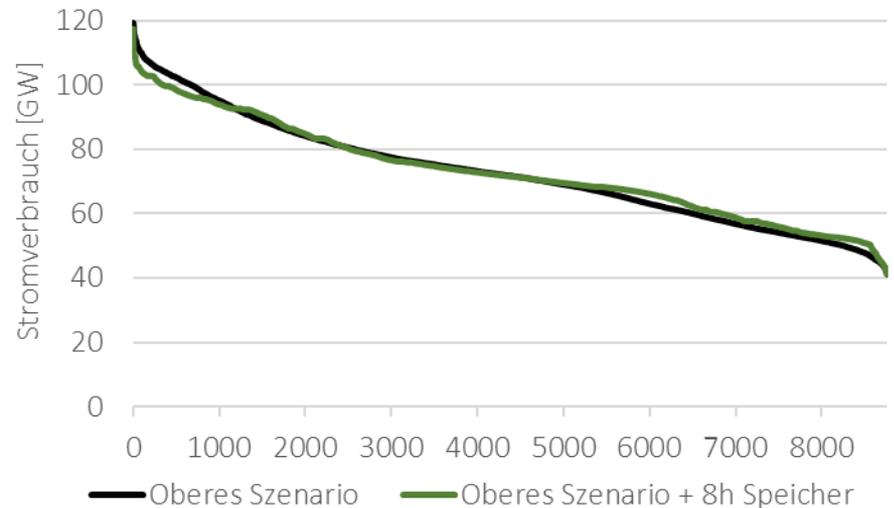
Jahresdauerlinien

Deutschland (2010)

Wärmegeführte Gebäudewärmepumpen



Stromgeführte Gebäudewärmepumpen



Eigene Abbildungen

Literatur

BGW (2006). Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nicht-leistungsgemessener Kunden. Praxisinformation P 2006/8, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW), Berlin und Brüssel.

Bukowski, M. (Ed.) (2013). 2050.pl the journey to the low-emission future. Warsaw institute for Economic Studies and Institute for Sustainable Development, Warsaw. Online: http://polskabezco2.pl/files/pliki/raport_low-emission_poland_2050.pdf

BWP (2016). BWP-Branchenstudie 2015. Bundesverband Wärmepumpe e.V., Berlin. Online: http://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/2016-04-08_Branchenprognose_2015_web.pdf

Erdmann, G., & Dittmar, L. (2010). Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland. Fachgebiet Energiesysteme, TU Berlin, März 2010. Online: https://www.ensys.tu-berlin.de/fileadmin/fg8/Downloads/Sonstiges/2010_KWK_Studie_Langversion_FGEnsys_TUBerlin.pdf

Fehrenbach, D., Merkel, E., McKenna, R., Karl, U., & Fichtner, W. (2014). [On the economic potential for electric load management in the German residential heating sector - An optimising energy system model approach](#). *Energy*, 71, 263-276.

Hedegaard, K., & Balyk, O. (2013). [Energy system investment model incorporating heat pumps with thermal storage in buildings and buffer tanks](#). *Energy*, 63, 256-265.

Literatur

Heilek, C. (2015). Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem. Dissertation, TU München. Online: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1230817>

Hirth, L. (2013). [The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price](#). *Energy Economics*, 38, 218-236.

Nabe, C., Hasche, B., Offermann, M., Papaefthymiou, G., ... (2011). Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration erneuerbarer Energien. Ecofys und Prognos im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Online: http://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2011_potenziale_der_waermepumpe.pdf

négaWatt 2017. Scénario négaWatt 2017-2050 – Dossier de synthèse. Association négaWatt. Online: <https://negawatt.org/spip.php?action=telecharger&arg=325>

Palzer, A. (2016). Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor. Karlsruher Institut für Technologie. PhD thesis. Online: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-408742-11.pdf

Pellinger, C., Schmid, T., Regett, A., Gruber, A., ... (2016). Merit Order der Energiespeicherung – Teil 2: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München. Online: https://www.ffe.de/images/stories/Themen/414_MOS/20160728_MOS_Speichertechnologien.pdf

Literatur

Platt, M., Exner, S., & Bracke, R. (2010). Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes – Bestandsaufnahme und Trends. Geothermiezentrum Bochum, März 2010.
http://www.geothermie-zentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Projekte/WP-Studie/Abschlussbericht_WP-Marktstudie_Mar2010.pdf

Teske, S., Muth, J., Cormier, C., Sawyer, S., ... (2012). Energy [r]evolution – A sustainable France energy outlook. Greenpeace International.

Teske, S., Rahlwes, R.H., Ogniewska, A., Sawyer, S., ... (2013). Energy [r]evolution – A sustainable Poland energy outlook. Greenpeace International. Online:
https://www.greenpeace.de/files/publications/20131025_poland_energy_outlook.pdf

Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., & Edenhofer, O. (2013). [System LCOE: What are the costs of variable renewables?](#). *Energy*, 63, 61-75.

Daten

ERA-Interim, Reanalyse-Daten vom Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW). Online: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>

EU Building Database. Online: <http://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-database>

EUROSTAT, GISCO Population / Demography, GEOSTAT. Online: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat>