

TechTalk „Modellierung von gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung“

Review zu Power-to-Heat- Modellen und eigene Aktivitäten mit dem Open- Source-Modell DIETER

Andreas Bloeß, Wolf-Peter Schill und Alexander Zerrahn

Berlin, 4. Mai 2017

1. Unser Hintergrund
2. Review zu Power-to-Heat-Modellen
3. Erweiterung des Open-Source-Modells DIETER
4. Erste Teil-Anwendung: Flexibilität von Speicherheizungen

Einige Erfahrung in der Strommarktmodellierung

→ Derzeit Erweiterungen unserer Modelle in Hinblick auf Sektorenkopplung
(work in progress)

- Elektromobilität
- Power-to-X bzw. Wasserstoff
- Power-to-Heat

Projektkontext

- EU-Horizon-2020-Projekt RealValue (SETS)
- Kopernikus-Projekt P2X (Konkurrenz um „Überschussstrom“)
- Im Rahmen von Andreas' Dissertation

Review zu Power-to-Heat-Modellen

Ziel: Übersicht zu Ansätzen in der peer-referierten Literatur

- Wie wird P2H für Raumwärme in Stromsektormodellen implementiert?
- Welche Befunde gibt es zu Kosten, EE-Integration, Preisen, ...?

Wir haben...

- führende techno-ökonomische Journals (*Applied Energy, Energy Economics, ...*)
- systematisch durchsucht und 123 Artikel gefunden

Betrachtete Technologien

- Elektroheizer, Wärmepumpen, hybride Systeme, SETS, Wärmespeicher
- Objektnah und objektfern
- Kein Fokus auf KWK

Wir sind offen für Eure Vorschläge

- Wir schicken gerne einen Draft herum
- Kennt Ihr weitere wichtige peer-referierte Paper (...von Euch selber)?
- Kennt ihr weitere interessante Modellformulierungen (...von Euch selber)?

Paper	Geogr. scope	Time horizon	RES shares	Centralized heat		Decentralized heat				Other power system features	
				Resistive/heat pumps/CHP	Heat storage	Resistive/hybrid/SETS	Heat pumps/mCHP	Heat storage	Other sectors		
Arteconi et al 2016	[13]	Belgium (stylized)	2030	30%	-/-/-	-	✓/-/-	AS/-	passive, DHW	-	household behavior
Bach et al 2016	[1]	Copen-hagen	2013, 2015	n/s	-/-/?	-	-/-/-	-/-	-	-	-
Barton et al 2013	[29]	UK	2010-2050	n/s	-/-/-	-	✓/-/✓	generic/✓	generic	PHEV, EV	-
Bauermann et al 2014	[20]	Germany	2010-2050	n/s	-/-/✓	-	-/-/-	generic/-	-	-	-
Blarke 2012	[2]	West Denmark	2003-2010 (scenarios)	20%	?/GS/✓	generic	-/-/-	-/-	-	(cooling)	-
Böttger et al 2014	[21]	Germany	2015 - 2030	n/s	✓/-/-	-	-/-/-	-/-	-	-	Control power
Böttger et al 2015	[22]	Germany	2012, 2025	n/s	✓/-/✓	-	-/-/-	-/-	-	-	Control power
Chen et al 2014	[34]	Beijing	2009-2020	0, 20, 40%	-/-/(✓)	-	✓/-/✓	AS/-	passive, ETS	-	-
Connolly et al 2016	[35]	EU-28	2050	up to 100%	✓/generic/✓	generic	✓/-/-	generic/generic	generic	mobility, cooling	-
Cooper et al 2016	[30]	UK	2020s, 2030s, 2050s	14, 25, 38%	-/-/-	-	-/-/-	AC/-	passive, DHW	-	-
Dodds 2014	[31]	UK	2010-2050	n/s	-/-/✓	-	✓/-/✓	GS/✓	-	-	-
Ehrlich et al 2015	[23]	Germany	2020	n/s	-/-/-	-	-/✓/-	-/-	generic	-	-
Fehrenbach et al 2014	[24]	Germany	2010-2050	endog.	-/-/✓	-	-/-/-	generic/✓	generic	-	-
Georges et al 2017	[14]	Belgium	2016	n/s	-/-/-	-	(✓)/-/-	AC/-	passive, DHW	-	-
Hedegaard et al 2012	[3]	Denmark	2020	50%	(✓)/(✓)/✓	-	-/-/-	?/-	passive, TES	(EV)	-
Hedegaard, Balyk 2013	[4]	Denmark	2030	60%	✓/generic/✓	generic	✓/-/-	generic/-	passive, DHW	-	-
Hedegaard, Münster 2013	[4]	Denmark	2030	50-60%	✓/generic/✓	generic	✓/-/-	generic/-	passive, DHW	-	-

Continued on next page

Geographischer Fokus

- Häufig Westeuropa (Dänemark, Belgien, Deutschland), teilweise regional

Zeitlicher Fokus

- Häufig lange Frist: 2030, 2050
- Mit hohen Anteilen EE: 40%, 60%, mehr

Technologischer Fokus

- Breite Variation bei den Artikeln
- Häufig stilisierte Modellierung von Technologien
- In den meisten Modellen objektnahe Wärmeversorgung

Sektoraler Fokus

- Wenige Studien zusätzlich mit Mobilitätssektor
- Wenige Studien mit Regelenergie und expliziter Abbildung der Anreize von Haushalten

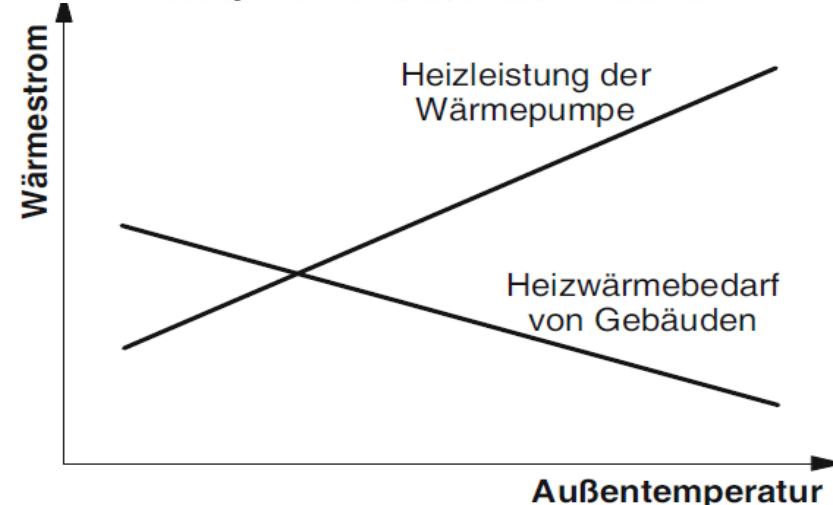
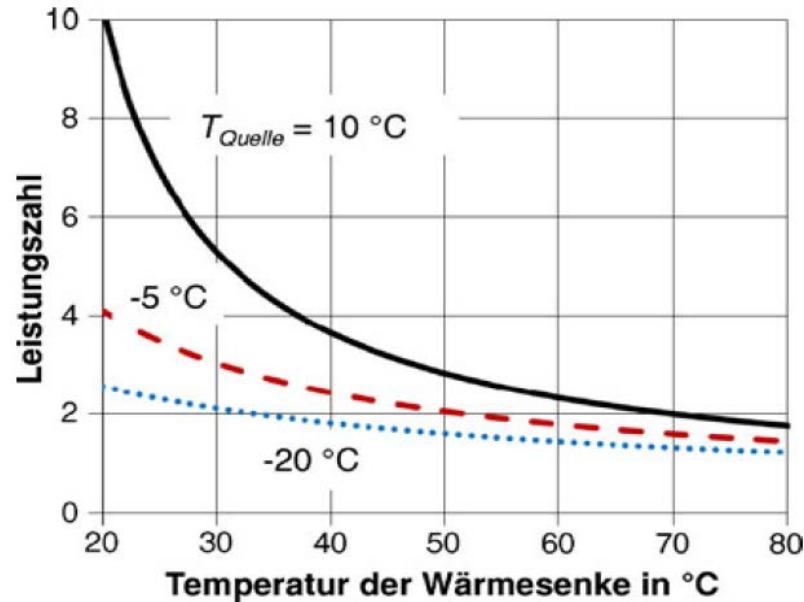
Grundlegend

- Quantitativer Zusammenhang von Wärme-Output und Strom-Input

$$P_t^{input} = \frac{\dot{Q}_t^{output}}{COP_{average}} \quad \forall t$$

Häufiger Ansatz: fixer COP

- Typische Werte: 3-4,5
- Eine grundlegende Problematik wird vernachlässigt!



Quelle: Kaltschmitt et al. 2014

Quelle: Kaltschmitt et al. 2014

Detaillierter: Temperaturabhängiger COP

$$COP_t^{real} = \eta \cdot COP_t^{carnot} = \eta \cdot \frac{T_t^{sink}}{T_t^{sink} - T_t^{source}} \quad \forall t$$

- η kann sich verändern durch technischen Fortschritt
- typische Werte für η : 0,24-0,45 (Kaltschmitt 2014)

$$P_t^{input} = \frac{\dot{Q}_t^{output}}{COP_t^{real}} = \frac{\dot{Q}_t^{output}}{\eta \cdot \frac{T_t^{sink}}{T_t^{sink} - T_t^{source}}} \quad \forall t$$

- Fixer COP ggf. vertretbar bei Erdwärme-WP, weniger bei Umgebungsluft-WP
- Nach wie vor: Vereinfachung zur Vermeidung von Nicht-Linearität (Verhelst et al. 2012)

$$\text{Ein Standardansatz: } S_{t+1} = (1 - l^{stationary}) \cdot S_t + \dot{Q}_t^C - l^{dynamic} \cdot \dot{Q}_t^D \quad \forall t$$

$$S_t \leq S^{max} \quad \forall t$$

$$S^{max} = c_p \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot C \quad \forall t$$

$$\dot{Q}_t^C \leq \dot{Q}^{C,max} \quad \forall t$$

$$\dot{Q}_t^D \leq \dot{Q}^{D,max} \quad \forall t$$

- Unterschiede je nach Speichertyp
- Anwendung auf passiven Gebäudemassenspeicher (Hedegaard et al. 2012):

$$\dot{Q}_t^C \leq U \cdot \Delta T_{passive} \cdot \left(1 - \frac{S_{t-1}}{S^{max}}\right) \cdot A$$

$$\dot{Q}_t^D \leq U \cdot \Delta T_{passive} \cdot \frac{S_{t-1}}{S^{max}} \cdot A$$

Alternative Ansätze

- Temperaturfenster für Raum-/Gebäudetemperatur

Nebenbedingung in der Minimierung der Systemkosten

- Vektor T der Temperaturen von Luft, Wänden, ... in Periode j

$$\forall s, j : \quad T_{s,j+1}^{\text{SH}} = A \cdot T_{s,j}^{\text{SH}} + B \cdot U_{s,j}^{\text{SH}}$$

- wird vom Zustand der Wärme in j-1 beeinflusst (Matrix A)
- und vom Wärme-Input U aus verschiedenen Technologien (Matrix B)

→ Integration von dynamischem Gebäudemodell in Stromsektormodell

Effekte auf Systemkosten, CO₂-Emissionen, Integration variabler EE

- Substitution fossiler Brennstoffe
- Bessere Nutzung gegebener EE-Assets, geringeres Curtailment
- Geringerer Bedarf an Peak-Technologien
- Geringerer Bedarf an anderen Flexibilitätsoptionen im Stromsystem
- It depends...
 - Mehr Nachfrage vs mehr Flexibilität
 - ...

Befunde in den Modellanwendungen

- Wärmepumpen häufig bevorzugte Technologie → Flexibilität
- Passive Wärmespeicherung in Gebäudesubstanz von Interesse
- Kopplung mit Wärmesektor effizienter (Kosten, Emissionen, Flexibilität) als mit anderen Sektoren

Befunde zur Modell-Formulierung

- Kein „Standard-Modell“ für einzelne Technologien
- Level des technischen Details variiert mit Fokus der Anwendung

DIETER und P2H

Wer ist DIETER?

- Lineare Kostenminimierung
 - Stündliche Auflösung
 - Diverse Flexibilitätsoptionen (Speicher, DSM, Elektrofahrzeuge)
 - Stilisierte Berücksichtigung von Regelleistung
 - Alle Kapazitäten potenziell endogen
- Ursprünglich Greenfield, lose kalibriert für D
- Einige laufende Erweiterungen:
 - Berücksichtigung der Nachbarstaaten
 - Dynamisierung und Optimierung unter Unsicherheit
 - Windkraft basierend auf Wetterdaten
- Implementiert in GAMS

DIETER ist open-source:
www.diw.de/dieter


[Über uns](#)
[Publikationen & Veranstaltungen](#)
[Forschung & Beratung](#)
[Themen & Nachrichten](#)
[Presse](#)

DIETER
[Forschung & Beratung](#) > [Nachhaltigkeit](#) > [Energie, Verkehr, Umwelt](#) > [Modelle](#) >

A Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables "DIETER"

The Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables (DIETER) has been developed in the research project [StoRES](#) to study the role of power storage and other flexibility options in a greenfield setting with high shares of renewables. The model determines cost-minimizing combinations of power generation, demand-side management, and storage capacities and their respective dispatch. DIETER thus captures multiple system values of power storage related to arbitrage, firm capacity, and reserves.

DIETER is an open source model which may be freely used and modified by anyone. The code is licensed under the MIT License. Input data is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International Public License. To view a copy of these licenses, visit <http://opensource.org/licenses/MIT> and <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>. Whenever you use this model, please refer to <http://www.diw.de/dieter>. We are happy to receive your feedback.

The model is implemented in the General Algebraic Modeling System (GAMS). Running the model thus requires a GAMS system, an LP solver, and respective licenses. We use the commercial solver CPLEX, but other LP solvers work, as well.

Below you find an overview of available DIETER versions and respective academic papers that include descriptions and documentations. The ZIP files include the GAMS code, an Excel file with all necessary input parameters, and partly also a short documentation of model equations and changes compared to earlier versions.

Makroökonomie und Finanzmärkte

Nachhaltigkeit

Energie, Verkehr, Umwelt

Die Abteilung

Nachrichten

Publikationen

Vorträge

Veranstaltungen

Forschungsprojekte

Forschungskooperationen

Modelle

Service

Team

Klimapolitik

Industrieökonomie

Öffentliche Finanzen und Lebenslagen

Vorstandsbereich

Forschungsgruppen

SOEP-Service

Ihr Ansprechpartner

→ Dr. Wolf-Peter Schill



Tel.: +49 30 89789-675
Fax: +49 30 89789-113

Nachricht schreiben

[→ Visitenkarte](#)

→ Dr. Alexander Zerrahn



Tel.: +49 30 89789-453
Fax: +49 30 89789-200

Nachricht schreiben

[→ Visitenkarte](#)

DSM-Formulierung

- *Energy* (2015),
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.037>

On the representation of demand-side management in power system models
 Alexander Zerrahn, Wolf-Peter Schill*
 DIW Berlin, Mohrenstraße 58, 10117 Berlin, Germany

ARTICLE INFO
 Article history:
 Received 20 September 2014
 Received in revised form
 26 February 2015
 Accepted 13 March 2015
 Available online 10 April 2015

KEYWORDS:
 Demand side management
 Economic modeling
 Load shifting
 Energy modeling

ABSTRACT
 DSM (demand-side management) models should incorporate power system constraints in building on a model form. Additional constraints that are important for the real world applicability of models could readily be in

Discussion Papers

A Greenfield Model to Evaluate Long-Run Power Storage Requirements for High Shares of Renewables

Alexander Zerrahn and Wolf-Peter Schill

Langfristiger Stromspeicherbedarf

- DIW DP 1457, 2 Artikel forthcoming in
Renew. Sust. Energ. Rev.

Regelleistung und V2G durch Elektrofahrzeuge

- *Zeitschrift für Energiewirtschaft* (2016),
<https://dx.doi.org/10.1007/s12398-016-0174-7>

Prosumage von Solarenergie

- *Economics of Energy & Environmental Policy* (2017),
<https://doi.org/10.5547/2160-5890.6.1.wsch>

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Zusammenfassung Sowohl beim Ausbau erneuerbarer Energien als auch im Bereich der Elektromobilität hat sich die Bundesregierung ambitionierte Ziele gesetzt. Im Kontext der Energiewende soll der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung weiter deutlich steigen. Dies erfordert tendenziell eine erhöhte Vorhaltung kann es dagegen zu nennenswerten Arbitragaktivitäten am Großhandelsmarkt, zu einer noch höheren Regelleistungsbereitstellung und zu wesentlich größeren Systemkostenersparnissen kommen.

JEL-Classification Q40 - Q42

Prosumage of solar electricity: pros, cons, and the system perspective

Erweiterung des bisherigen DIETER-Frameworks

- Zusätzliche Randbedingungen
- Weiterhin lineare Formulierung
- Exogene Kapazitäten einzelner Wärmetechnologien
- Raumwärmemodellierung zunächst nur für D

Keine eigene dynamische Gebäudesimulation

- Kooperation mit RWTH Aachen
- Exogene Inputparameter: stündlicher Wärmebedarf verschiedener Gebäudetypen

Simulations of hourly heating demand in kWh per m² by RWTH

- Model TEASER (Dymola / Modelica) at E.ON Energy Research Center

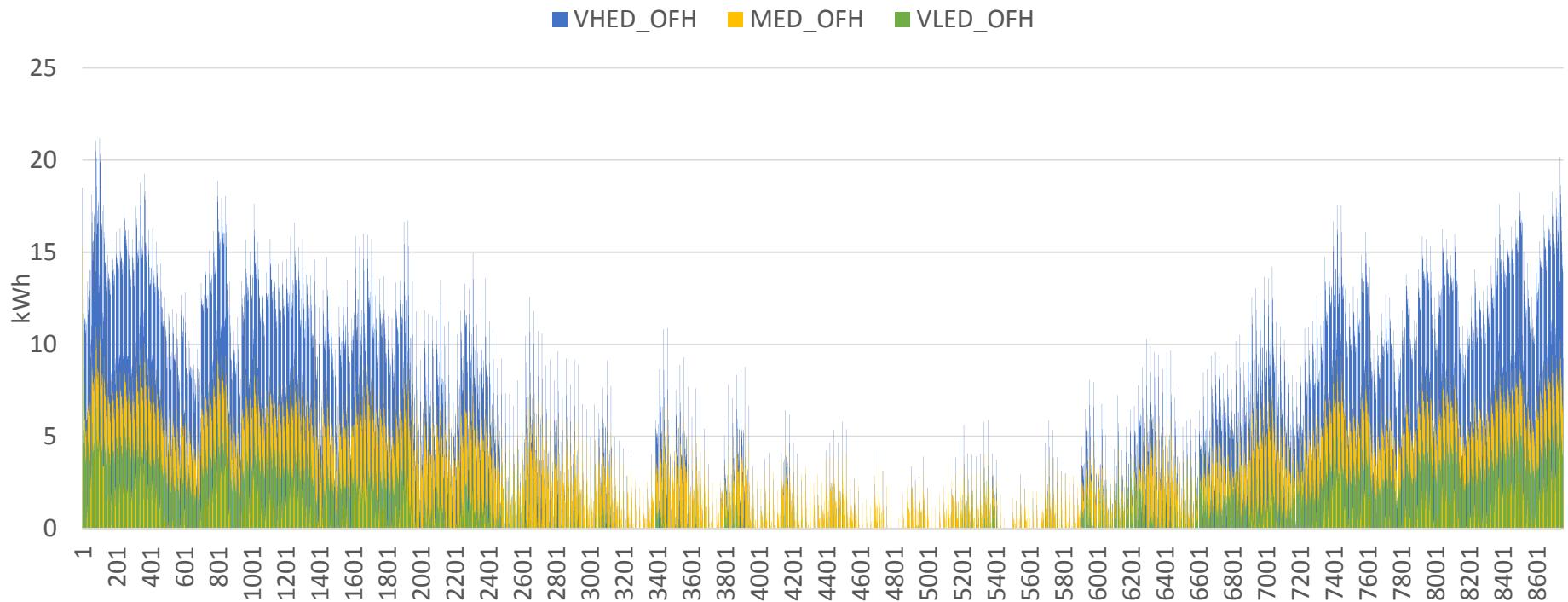
12 building archetypes, based on EU project TABULA

- 2 sizes: one/two family homes vs. multi-family homes
- 6 energy efficiency classes
- In future scenarios, buildings move to better efficiency classes

Further assumptions

- Set temperatures: 18° C night-time, 22° C day-time
- Test reference year approach
- Flexible assumptions on inner loads (people, appliances, lighting)
- Occupancy pattern following Swiss norm

Separate calculation of hot water demand with DHWcalc (University Kassel)



Multiple technologies in the space heating sector

- Some technologies provide heat,
- others store heat,
- and some do both (e.g. SETS).

Combinatorial issues of technologies and buildings

- Combinations of different technologies in a single flat
 - E.g. gas boilers / heat pumps combined with electric heaters
- Common technology for several houses / blocks
- Common / separate technologies (and storage) for hot water

Interactions with the power sector also via CHP

Sets and indices	Description	Examples
$bu \in BU$	Building types	One- and two-family houses, multiple family houses of different ages
$ch \in CH$	Combinations of heating (and storage) technologies	Gas boiler with hybrid electric heating
$bo \in BO$	Heating technologies feeding into a boiler (water-based heating)	Burner fueled by gas, oil, biomass; heat pumps; hybrid electric; (always with hot water storage)
$hp \in HP(BO)$	Subset of heat pumps	Ground-sourced, air-sourced
$h \in H$	Hours	

Exogenous
technology
choice (0;1)

Direct
electric
heating

Output of hot
water storage
(boiler)

Output of
SETS

Passive
thermal
storage
output

$$\theta_{bu,ch}^{dir} H_{bu,ch,h}^{dir} + \theta_{bu,ch}^{bo_out} H_{bu,ch,h}^{bo_out} + \theta_{bu,ch}^{sets} H_{bu,ch,h}^{sets_out} + \theta_{bu,ch}^{pts} H_{bu,ch,h}^{pts_out} = d_{bu,ch,h}^{heat} + \theta_{bu,ch}^{pts} H_{bu,ch,h}^{pts_in}$$

Heat energy balance

Enters electricity
energy balance

$$H_{bu,ch,h}^{bo_out} \leq \bar{h}_{bu,ch}^{bo_out}$$

Input to hot
water storage
(boiler)

Capacity restriction

$\forall bu, ch, h$

$$H_{bu,ch,h}^{bo_lev} = H_{bu,ch,h-1}^{bo_lev} \eta^{bo} + \sum_{bo} \theta_{bu,ch,bo}^{bo} H_{bu,ch,bo,h}^{bo_in} - H_{bu,ch,h}^{bo_out}$$

Boiler dynamics equation

$$H_{bu,ch,hp,h}^{bo_in} = P_{bu,ch,hp,h}^{hp} \eta^{hp} \frac{T^{sink}}{T^{sink} - T_h^{source}}$$

Heat pump restriction

$\forall bu, ch, hp, h$

$$H_{bu,ch,h}^{sets_lev} = H_{bu,ch,h-1}^{sets_lev} \eta^{sets} + H_{bu,ch,h}^{sets_in} - H_{bu,ch,h}^{sets_out}$$

SETS dynamics equation

$\forall bu, ch, h$

Work in progress: equations for passive heat storage

Technologies

- So far, only decentral heating technologies covered
- Relevant combinations of heating technologies?
- Modelling of hot water supply

Storage

- Parametrization of hot water storage
- Larger-scale heat storage (for blocks / districts?)
- Stylized concept of „losses“ (or efficiency)
- Very stylized concept of passive thermal storage useful?

...and:

- Differentiation between high- and low-temperature heating systems (radiators / floor heating)?
- Reserve provision: negative and positive
- Computational burden?

Flexibilität von Speicherheizungen

Preliminary analysis focusing on SETS

- Value of SETS flexibility – today and under increasing RES shares
- How does this depend on the mode of charging?

Simplified model approach

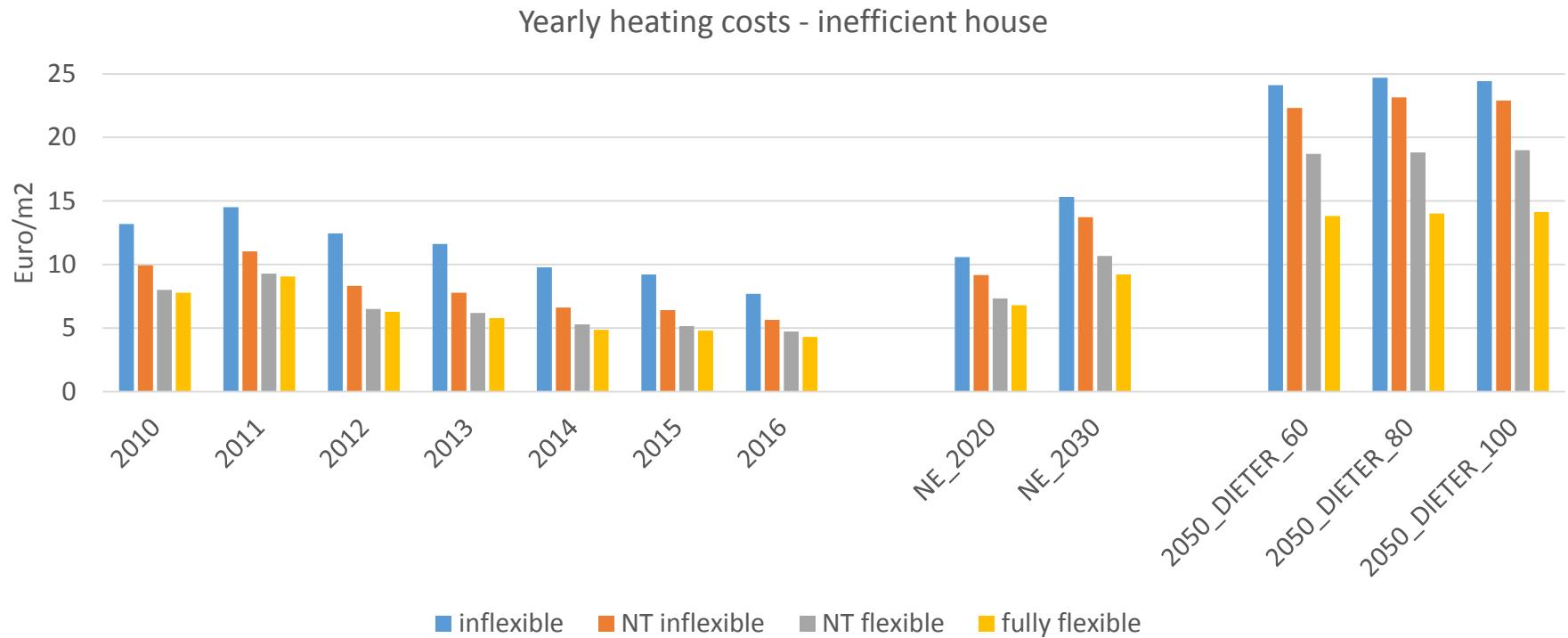
- Atomistic SETS, preliminary parametrization, no impact on overall dispatch
- Fully deterministic, no variable costs, only wholesale, no losses (to do)

Input data

- Heating demand differentiated for 12 housing types (RWTH)
- Prices:
 - Historic hourly day ahead prices for 2010-2016
 - Simulated future hourly prices for 2020 & 2030 (*Nature Energy* paper)
 - Simulated future hourly prices for 60 / 80 / 100 % RES (*RSER* paper)
 - To do: scenarios with „rivaling“ electric vehicles

Four modes of storage operation

- Hypothetic benchmark: inflexible electric heater
- Inflexible night-time charging starting with full power rating at 22:00, up to 06:00
- Flexible night-time charging (22:00-06:00)
- Full flexibility (00:00-24:00)



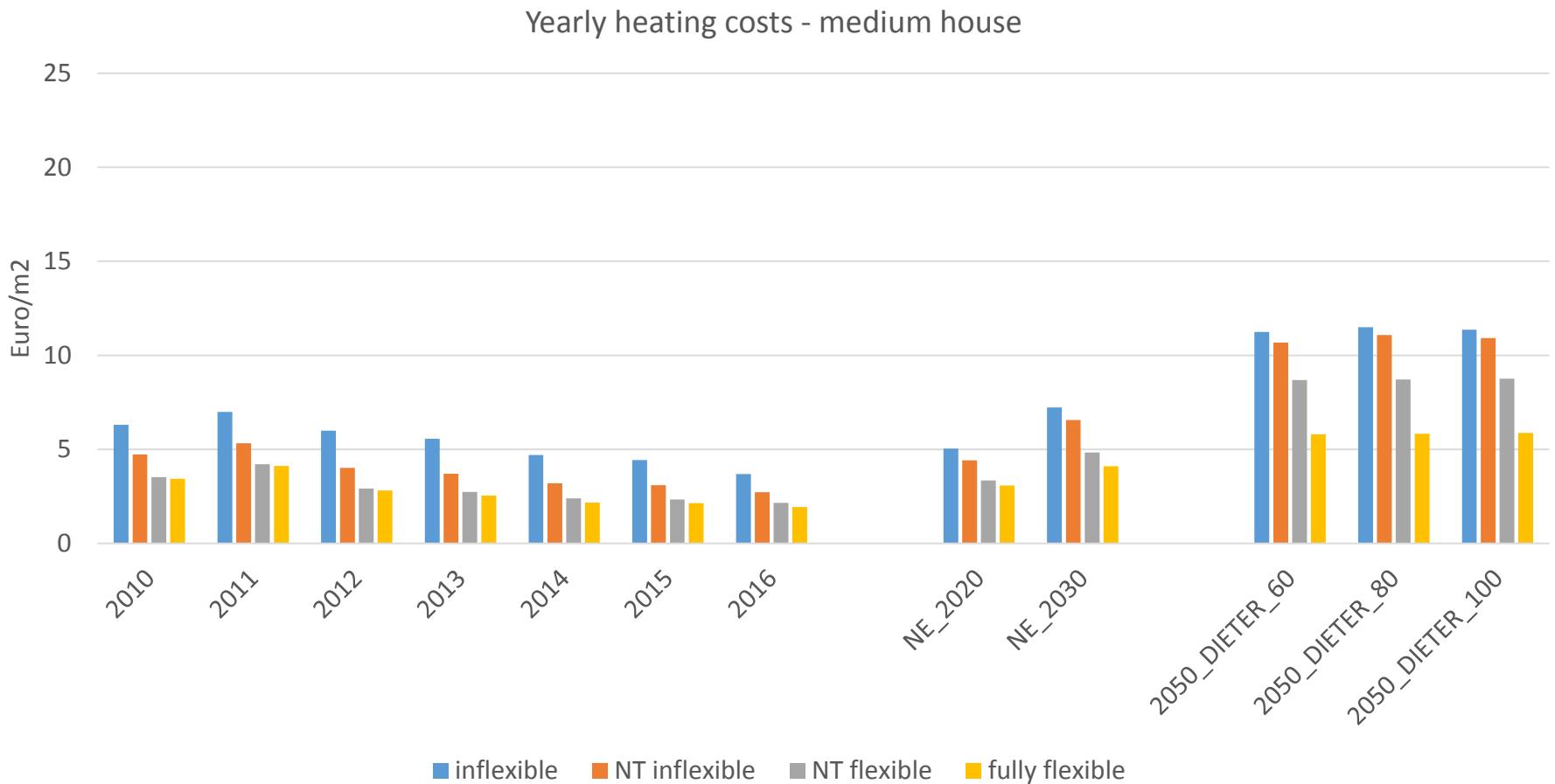
Historic prices:

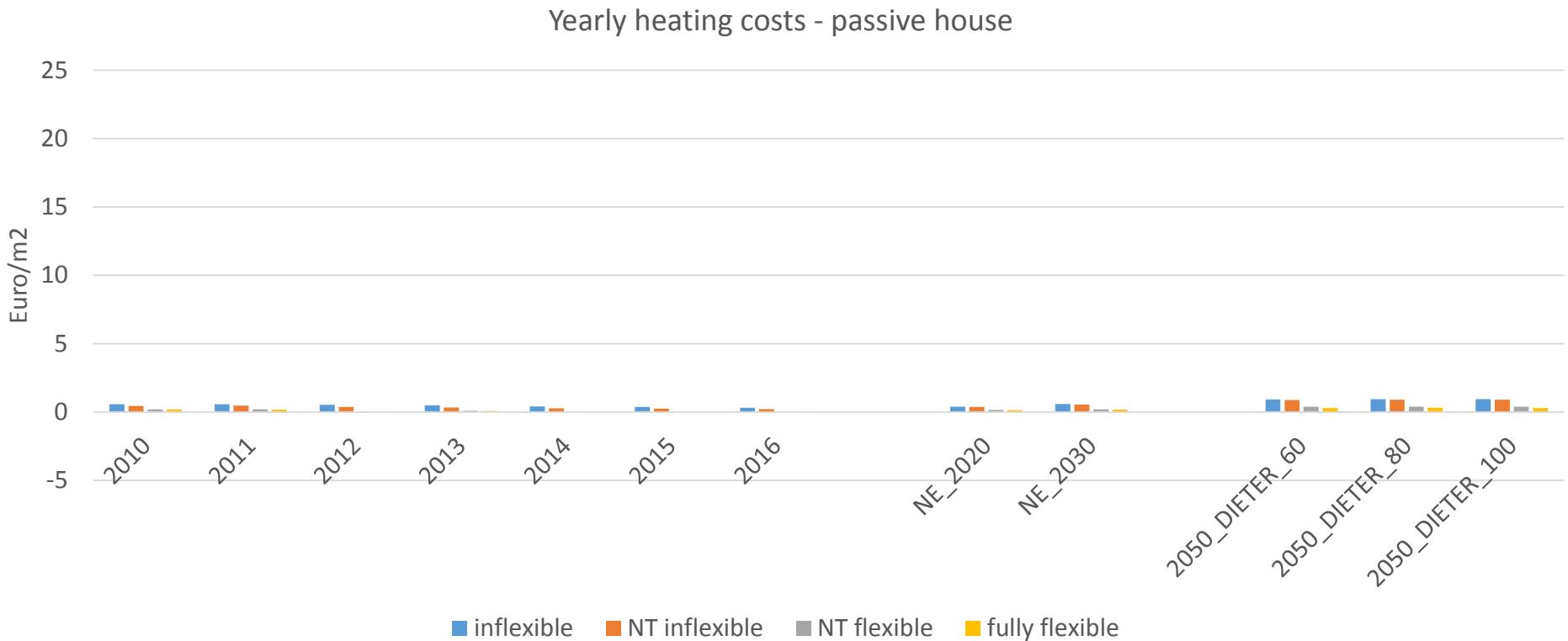
- Cost decrease driven by wholesale prices
- Difference to flexible NT charging negligible

Future scenarios:

- Higher wholesale prices
- NT less viable

Similar results, yet lower level



In case of energy-efficient houses, differences hardly matter

Central findings

- Flexible storage heaters more valuable with increasing shares of variable renewables
- Flexible (and not time-constrained) charging becomes more important
- ITC infrastructure would have to be paid by flexibility revenues
 - Appears possible for houses with high heating demand
 - But not for passive houses

Limitations

- SETS parametrization and losses
- Are inflexible electric heaters a reasonable benchmark?
- Potential additional value of flexibility not considered here:
 - Provision of balancing reserves (frequency control)
 - Provision of other ancillary services
 - Benefits with respect to other time-differentiated retail price components
 - Increasing self-consumption (in case of PV or CHP prosumers)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



**DIW Berlin — Deutsches Institut
für Wirtschaftsforschung e.V.**
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin
www.diw.de

Redaktion
Alexander, Andreas und Wolf

Literatur

- K. Hedegaard, B. Mathiesen, H. Lund, P. Heiselberg, Wind power integration using individual heat pumps – Analysis of different heat storage options, Energy 47 (1) (2012) 284–293. doi:10.1016/j.energy.2012.09.030.
- Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A.; Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; 5. Auflage; Springer Vieweg; 2014
- D. Patteeuw, K. Bruninx, E. Delarue, L. Helsen, W. D'haeseleer, Short-term demand response of flexible electric heating systems: an integrated model. TME Working Paper EN2014-28. URL:
https://www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/wpen2014-28.pdf
- W.-P. Schill, M. Niemeyer, J. Diekmann, Bereitstellung von Regelleistung durch Elektrofahrzeuge: Modellrechnungen für Deutschland im Jahr 2035, Zeitschrift für Energiewirtschaft 40(2) (2016) 73 – 87.
<https://dx.doi.org/10.1007/s12398-016-0174-7>
- W.-P. Schill, A. Zerrahn, F. Kunz, Prosumage of solar electricity: pros, cons, and the system perspective, Economics of Energy & Environmental Policy 6(1) (2017) <https://doi.org/10.5547/2160-5890.6.1.wsch>
- Verhelst, C.; Logist, F.; van Impe, J.; Helsen, L.; Study of the optimal control problem formulation for modulating air-to-water heat pumps connected to a residential floor heating system; Energy and Buildings 45; p. 43-53; 2012
- A. Zerrahn, W.-P. Schill. A greenfield model to evaluate long-run power storage requirements for high shares of renewables. DIW Discussion Paper 1457 (2015). URL:
https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.498475.de/dp1457.pdf
- A. Zerrahn, W.-P. Schill, On the representation of demand-side management in power system models, Energy 84 (2015) 840-845. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.037>
- W.-P. Schill, M. Pahle, C. Gambardella, Start-up costs of thermal power plants in markets with increasing shares of variable renewable generation. Nature Energy, 2, 17050(2017). <https://www.nature.com/articles/nenergy201750>