



Technische
Universität
Braunschweig



Auswirkungen einer netzdienlichen Betriebsweise von Wärmepumpen auf ein PV-dominiertes Neubaugebiet

Stefanie Koch, Prof. Bernd Engel, P2H Goslar, 14. Juni 2016

Gliederung

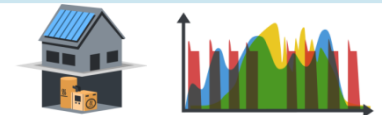
1 Motivation und Einführung



2 Szenarienbeschreibung und Annahmen



3 Ergebnisse zum netzdienlichen Wärmepumpenbetrieb



4 Zusammenfassung und Ausblick



Gliederung

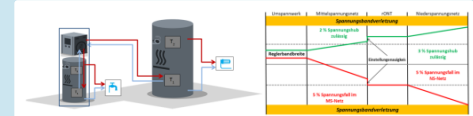
1

Motivation und Einführung



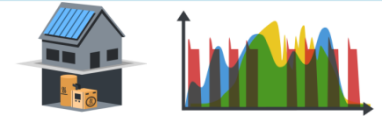
2

Szenarienbeschreibung und Annahmen



3

Ergebnisse zum netzdienlichen Wärmepumpenbetrieb



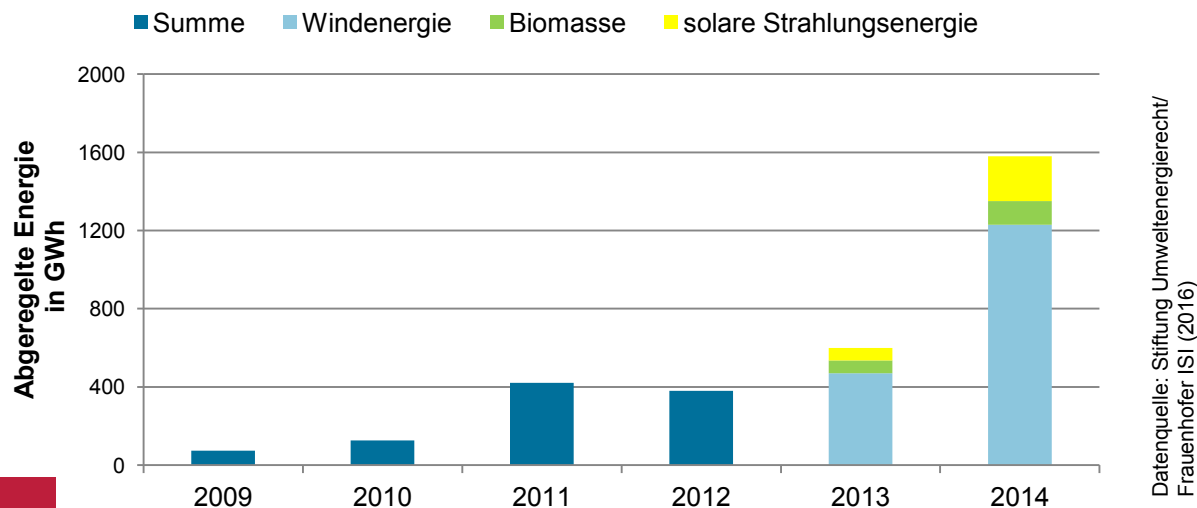
4

Zusammenfassung und Ausblick



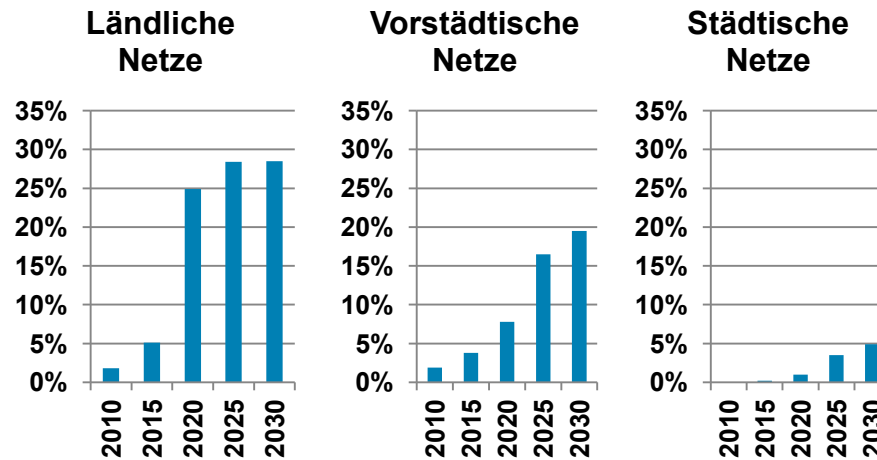
Der Wandel von Versorgungs- zu Einsammelnetzen

- Auf der historischen „Verbrauchsebene“ der **NS und MS** sind nun zu großen Teilen **PV-Anlagen** und auf **MS- und HS-Ebene** insbesondere **Windkraftanlagen** installiert.
- **Spannungsbandprobleme und Betriebsmittelüberlastungen** aufgrund von hoher zeitlich konzentrierter Einspeisung (v.a. PV und Wind) bei gleichzeitig wenig Last.
- **Zunehmender Netzausbaurückstand** durch Regulierung und Zubau bei EE.
- **Steigende Anzahl von EinsMan-Eingriffen** durch unzulässig hohe Spannungen und Betriebsmittelüberlastungen auf **MS- bis HÖS-Ebene**.



Zukünftige Herausforderungen für die Niederspannungsnetze

- Signifikanter Anstieg der Niederspannungsnetze mit Spannungsbandverletzungen



Datenquelle: Hinz, Ansgar: Der regelbare Ortsnetztransformator im Verteilnetz – Lösung aller Spannungsbandprobleme?. Aachen: FGE Kolloquium, 2012.

→ Zunehmende EinsMan-Eingriffe auch auf Niederspannungsebene?

- Verschärfung gesetzlicher Regelungen: hohe Gebäudeeffizienzwerte bei Neubauten
- Mittlerweile heizt jeder dritte Neubau mit einer Wärmepumpe und steigende Absatzprognosen

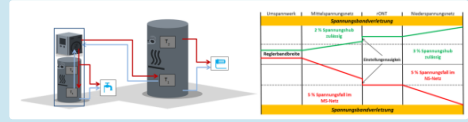
Kann ein netzdienlicher Wärmepumpenbetrieb zukünftig eine sinnvolle Alternative zur Abregelung von überschüssigem EE-Strom schaffen?

Gliederung

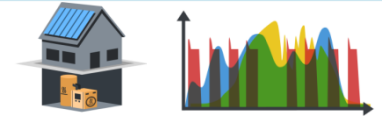
1 Motivation und Einführung



2 Szenarienbeschreibung und Annahmen



3 Ergebnisse zum netzdienlichen Wärmepumpenbetrieb



4 Zusammenfassung und Ausblick



Zugrundeliegendes Neubaugebiet im Jahr 2025



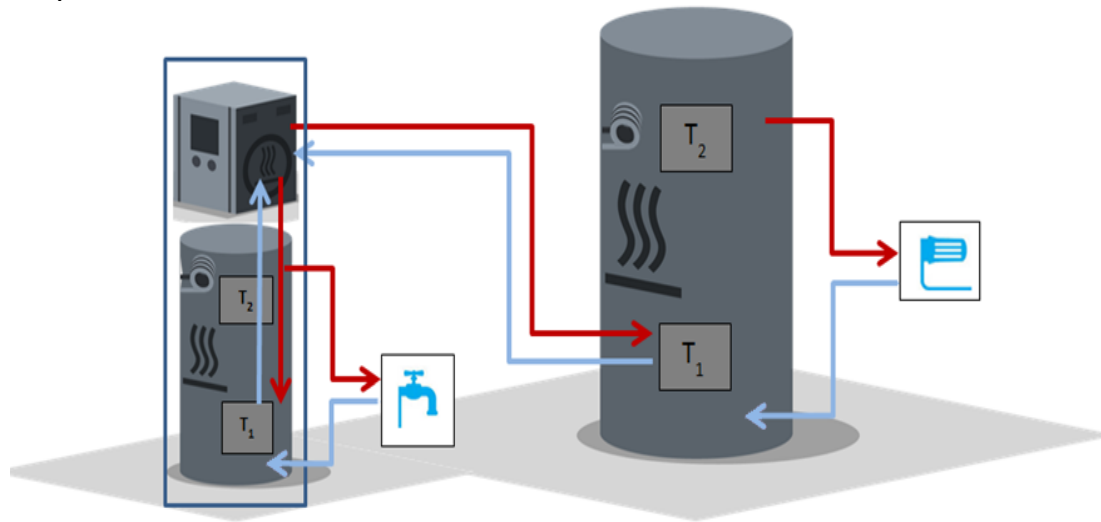
Betrachtungen für das Jahr 2025:

- In beiden Fällen werden **30 % der Haushalte** zufallsverteilt mit einer **PV-Anlage** ausgestattet (423 kWp).
- Im **ersten Szenario** wird in **45 % (98 kW)**, im **zweiten Szenario** in **60 % der Haushalte** (ca. 125 kW) zufallsverteilt eine **Wärmepumpe** angenommen.
- Zwei unterschiedlich große **Abluftwärmepumpen** mit einer **Verdichterleistung von 1,4 kW bzw. 2,8 kW** sind im Netz installiert.

Netzdienlicher Betrieb

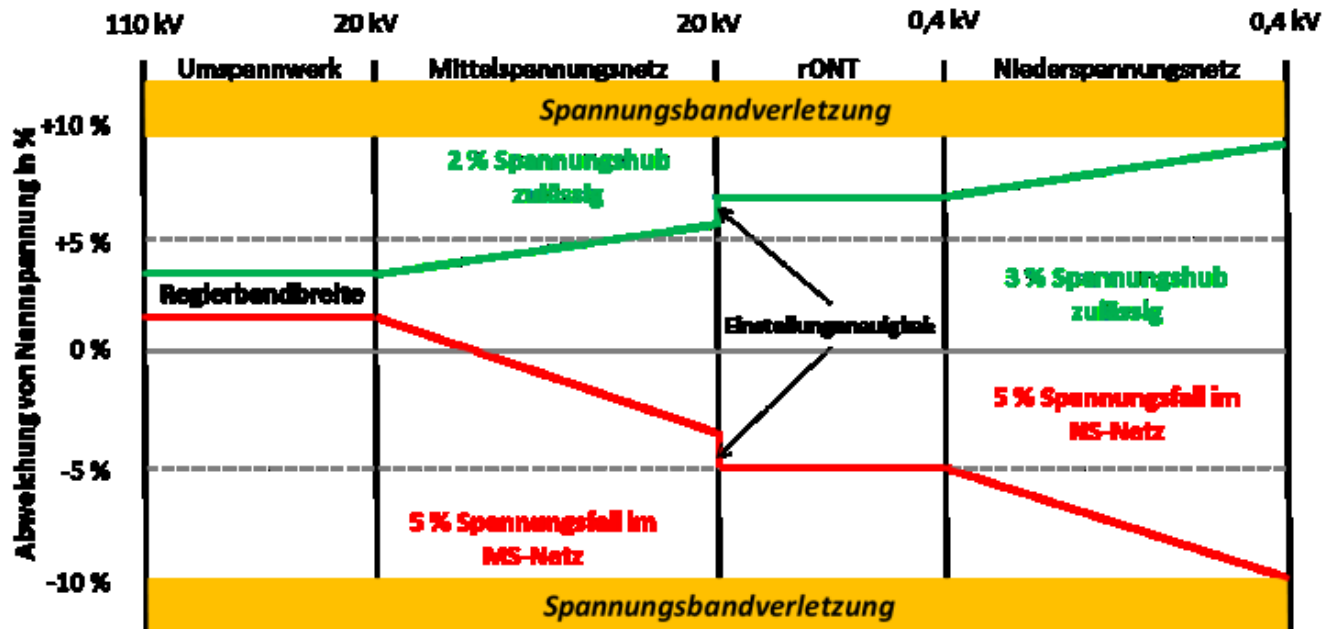
Spannungsgeführte Regelung (netzdienlich):

- Falls $U > U_{\max}$: WP wird eingeschaltet, bis Speichertemperaturen von 35°C (Heizen) bzw. 55°C (TWW) erreicht werden.
- Falls $U > U_{\max}$: Heizstab wird eingeschaltet, bis Speichertemperaturen von 70°C (TWW) erreicht werden.
- Falls $U < U_{\min}$: WP wird ausgeschaltet, bis Speichertemperaturen von 28°C (Heizen) bzw. < 45°C (TWW) erreicht werden.



Ausnutzung des Spannungsbandes im Verteilungsnetz

Ziel: Untersuchen der Auswirkungen von P2H auf ein Niederspannungsnetz über verschiedene Jahreszeiten



Quelle: Hinz, Ansgar: Der regelbare Ortsnetztransformator im Verteilnetz – Lösung aller Spannungsbandprobleme?, Aachen: FGE Kolloquium, 2012.

Annahme: MS-Netz als starres Netz mit angenommener Spannung von 107 % (ganzjährig) durch dort angesiedelte Wind- und PV-Parks

→ Der relevante Spannungsbereich im Niederspannungsnetz liegt zwischen 102 % - 110 %.

Gliederung

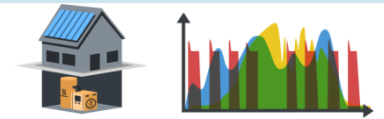
1 Motivation und Einführung



2 Szenarienbeschreibung und Annahmen



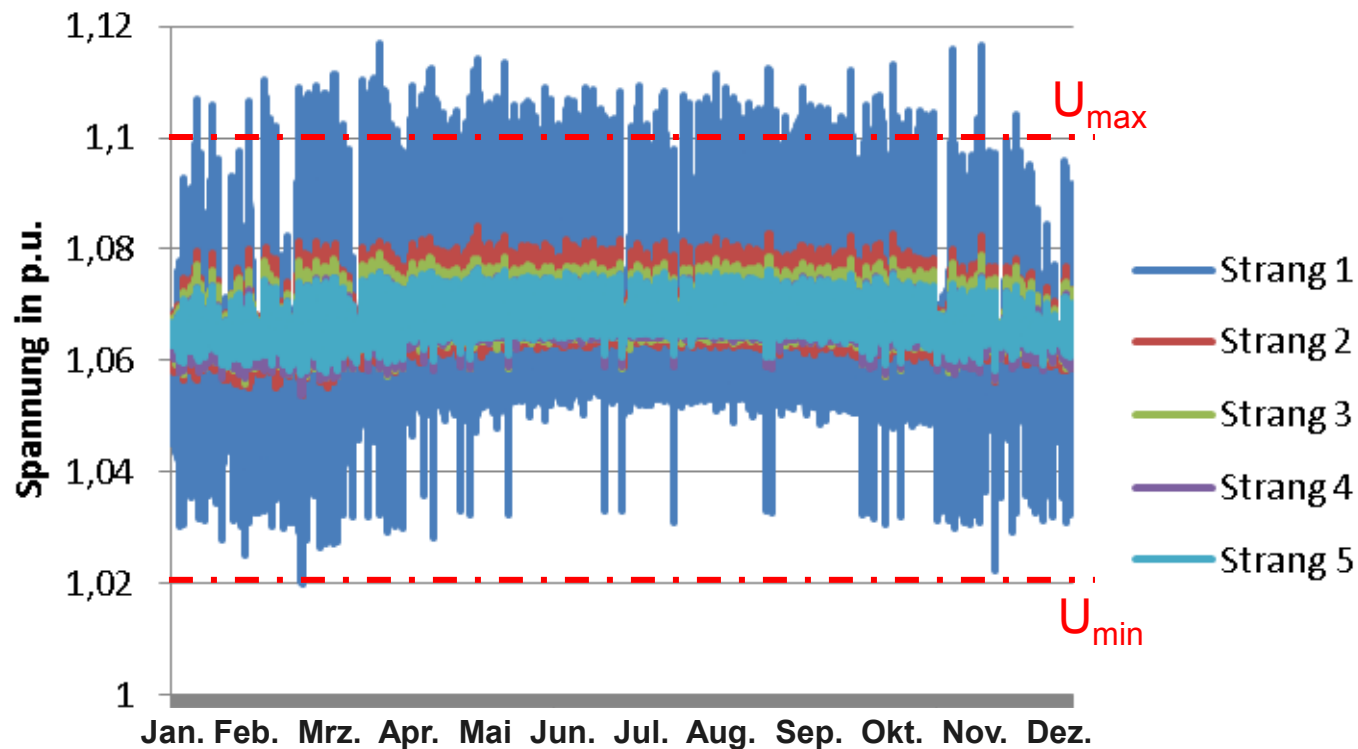
3 Ergebnisse zum netzdienlichen Wärmepumpenbetrieb



4 Zusammenfassung und Ausblick



Szenario 30 % PV 45 % WP: Wärmegeführter Betrieb

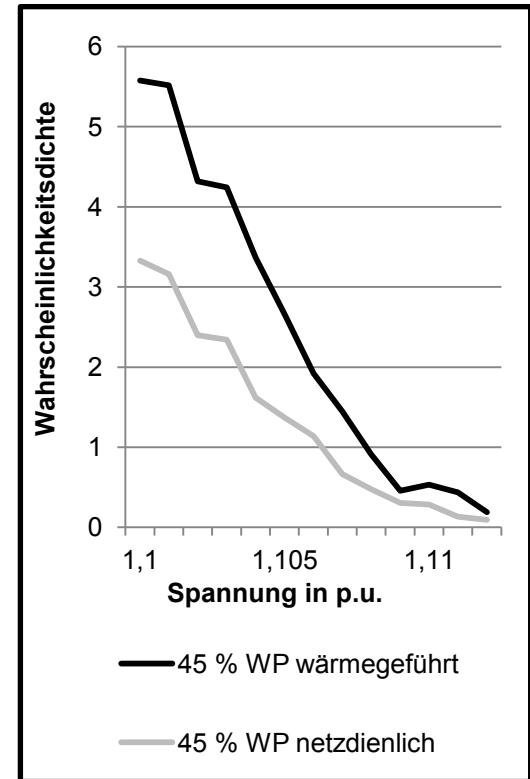
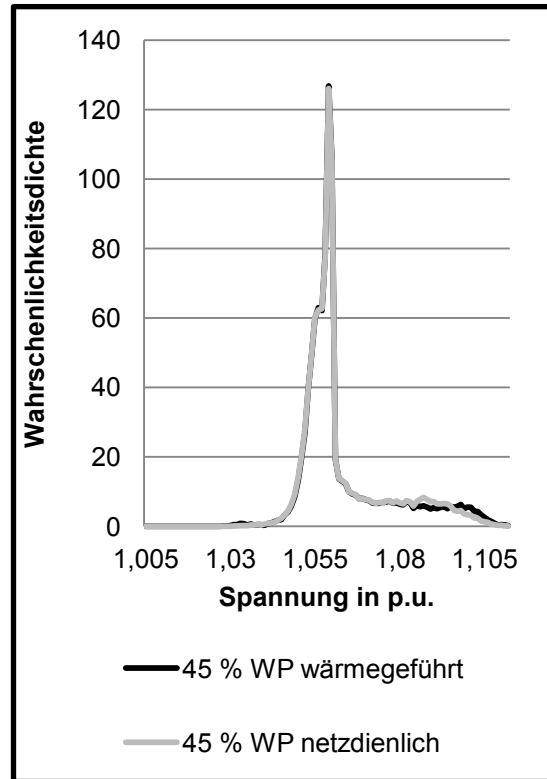
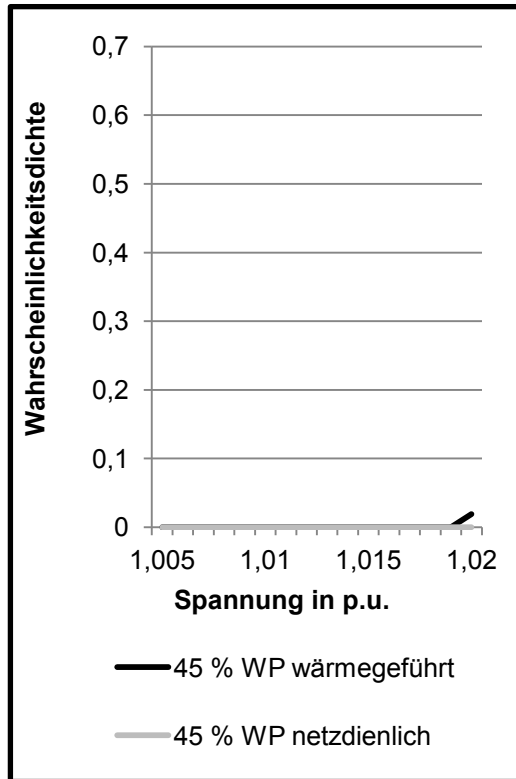


→ Weitere Untersuchungen konzentrieren sich auf Netzstrang 1

- Unzulässige Spannungsanhebungen vermehrt zwischen Frühjahr und Herbst durch PV.
- Spannungsminima vorwiegend durch Überlagerung von Haushaltsverbrauchern und hohe Wärmepumpenanzahl in kalten Monaten.

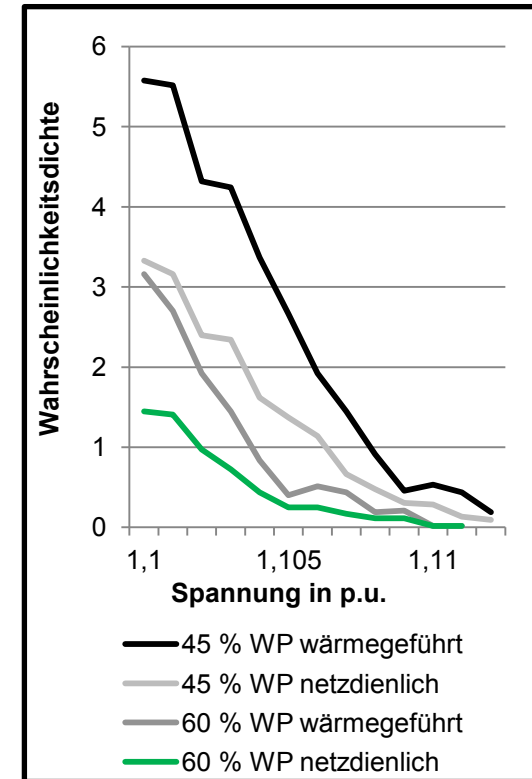
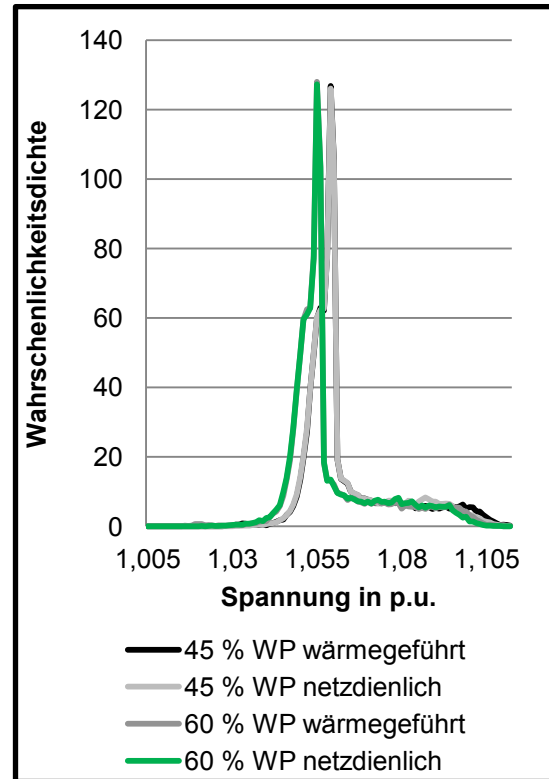
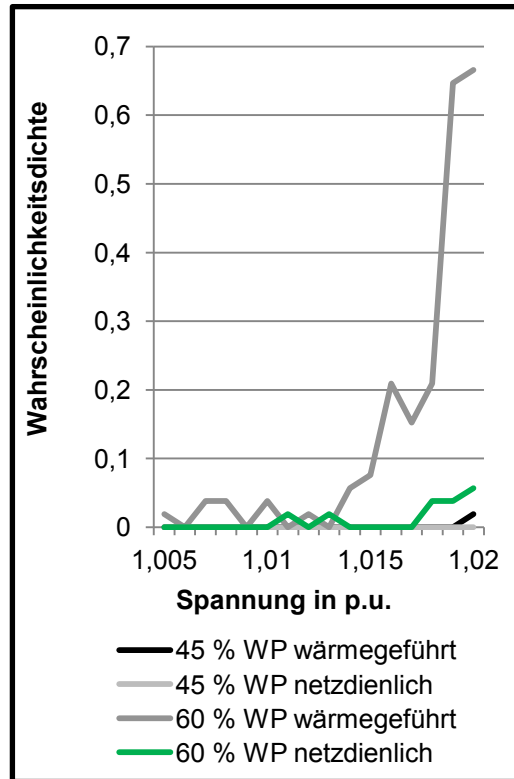
Spannungsniveau bei unterschiedlichen Betriebsweisen - I

Szenario 30 % PV 45 % WP



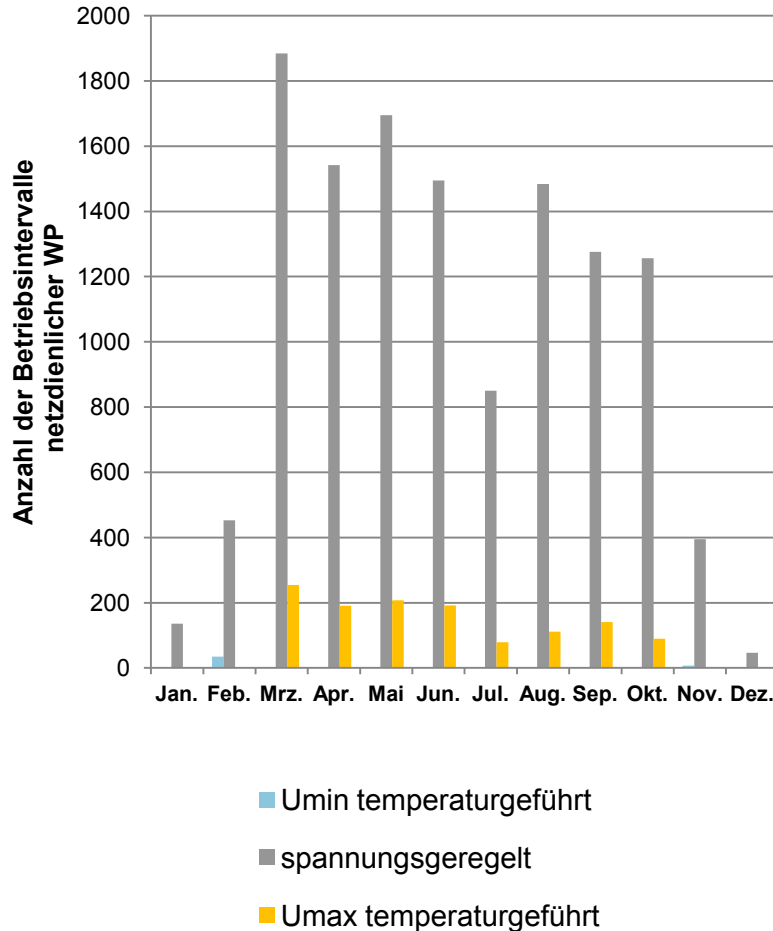
Spannungsniveau bei unterschiedlichen Betriebsweisen - II

Szenario 30 % PV 45 % WP versus Szenario 30 % PV 60 % WP



- Starke Begrenzung der Spannungsbandverletzungen an der unteren Grenze.
- Vermehrte Abnahme der Spannungsüberschreitungen durch zunehmende Anzahl installierter WP.

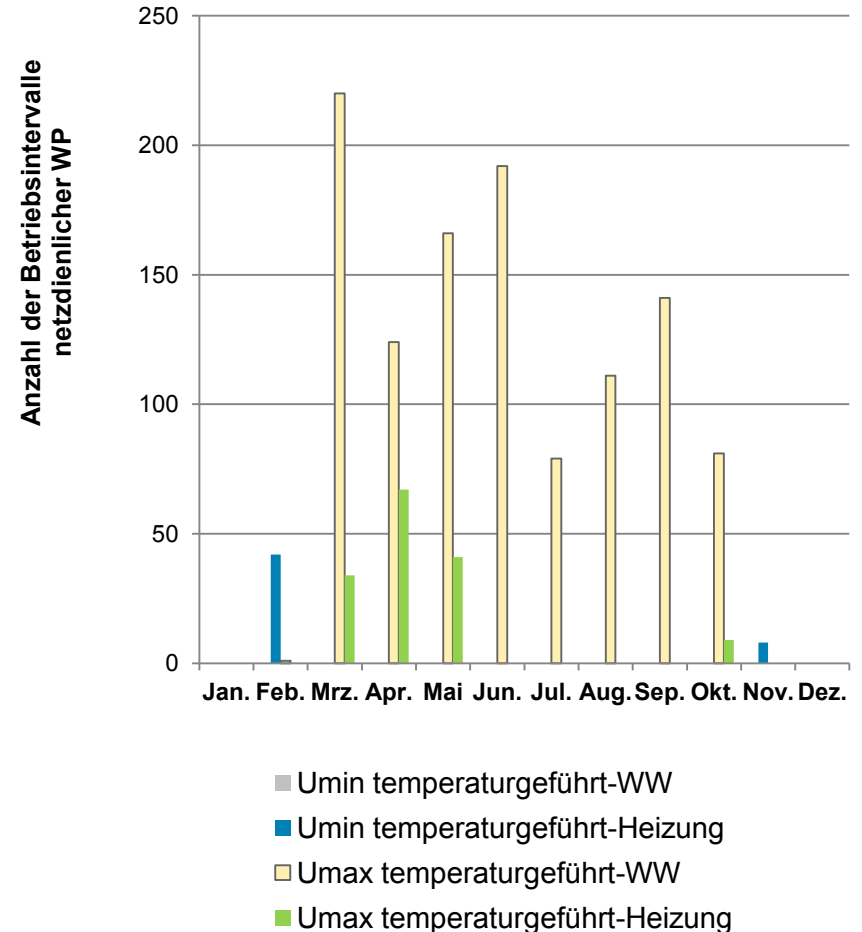
Netzdienlicher Betrieb und dessen Grenzen: 45 % WP



- Aufgrund von kritischen Spannungswerten erfolgt der **netzdienliche Betrieb** („spannungsgeregt“) zu **ca. 90 %**.
- In ca. 10 % der Fälle, in denen eine netzdienliche Anforderung besteht, wechseln die Wärmepumpen aufgrund einer Verletzung der thermischen Restriktionen in den wärmegeführten Modus.
- Effizienz des netzdienlichen Wärmepumpenbetriebs:
Bei $U < U_{\min}$ können zu **fast 100 %** und bei $U > U_{\max}$ zu **97 %** die **unzulässigen Abweichungen behoben** werden.

Netzdienlicher Betrieb und dessen Grenzen: 45 % WP

- **Unzulässig hohe Temperaturen** führen insbesondere **im Warmwasserspeicher** („ U_{\max} temperaturgeführt-WW“) **zwischen März und Oktober** zur Abschaltung der Wärmepumpen, obwohl Spannungswerte über 110 % vorliegen.
- Der Heizungsspeicher („ U_{\max} temperaturgeführt-Heizung“) spielt zwischen März und Mai bei der Speicherung von PV-Strom als limitierende Größe eine Rolle.



Vergleich: netzdienlicher versus temperaturgeführter Betrieb

45% WP, 30% PV	Netzdienlich	Temperaturgeführt	Prozentualer Vergleich
JAZ WW	1,88	1,97	-4,45 %
JAZ HZ	3,73	3,73	-
Energieverbrauch	3426 kWh	3309 kWh	3,54 %
Speicherverluste WW	555 kWh	516 kWh	7,52 %
Speicherverluste HZ	236 kWh	231 kWh	2,28 %

60% WP, 30% PV	Netzdienlich	Temperaturgeführt	Prozentualer Vergleich
JAZ WW	1,92	1,97	-2,16 %
JAZ Heizung	3,73	3,73	-
Energieverbrauch	3370 kWh	3309 kWh	1,82 %
Speicherverluste WW	537 kWh	516 kWh	4,09 %
Speicherverluste HZ	235 kWh	231 kWh	1,94 %

Auswirkungen netzdienlicher versus temperaturgeführter Betrieb

- Effizienzminderung der Wärmepumpe (→ Abnahme der JAZ WW) durch vermehrten Heizstabeinsatz
- Zunahme der Wärmeverluste, insbesondere durch höhere Speichertemperaturen im WW-Speicher



Erhöhung des Energieverbrauchs

Überschlägige Abschätzung der Wirtschaftlichkeit: Zweistromtarif für netzdienlichen und wärmegeführten Betrieb

Annahmen:

- Strompreis: $P_{\text{Strom}} = 0,28 \text{ €/kWh}$ (für $E_{T,\text{ges}}$ und E_T)
- Gesamtstromverbrauch beim temperaturogeführten Betrieb: $E_{T,\text{ges}} = 66.183 \text{ kWh}$
- Stromverbrauch beim netzdienlichen Betrieb: $E_{\text{nd}} = 6.964 \text{ kWh}$
- Stromverbrauch beim temperaturogeführten Betrieb: $E_T = 62.257 \text{ kWh}$
- Entschädigung für EE-Stromabregelung (Annahme):
 $P_{\text{EE-Abregelung}} = 11 \text{ Cent/kWh}$
- Abgeregelter PV-Strom: $E_{\text{EE-Abregelung}} = 7.924 \text{ kWh}$

Berechnung:

Damit **kein finanzieller Nachteil für Wärmepumpenbetreiber** entsteht, muss gelten:

$$P_{\text{Strom,nd}} \leq P_{\text{Strom}} * (E_{T,\text{ges}} - E_T) / E_{\text{nd}}$$

$$P_{\text{Strom,nd}} \leq 0,28 \text{ €/kWh} * (66.183 \text{ kWh} - 62.257 \text{ kWh}) / 6.964 \text{ kWh}$$

$$P_{\text{Strom,nd}} \leq \mathbf{0,1579 \text{ €/kWh}}$$

Damit **kein finanzieller Nachteil für den Netzbetreiber** entsteht, muss gelten:

$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq \frac{0,773 * P_{\text{Strom}} + (0,227 * E_{T,\text{ges}} * P_{\text{Strom}} - E_{\text{EE-Abregelung}} * P_{\text{EE-Abregelung}} - E_T * 0,227 * P_{\text{Strom}})}{E_{\text{nd}}}$$

$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq \frac{0,773 * 0,28 \text{ €/kWh} + (0,227 * 66.183 \text{ kWh} * 0,28 \text{ €/kWh} - 7.924 \text{ kWh} * 0,11 \text{ €/kWh} - 62.257 \text{ kWh} * 0,227 * 0,28 \text{ €/kWh})}{6.964 \text{ kWh}}$$

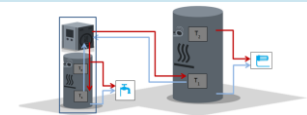
$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq \mathbf{0,1271 \text{ €/kWh}}$$

Gliederung

1 Motivation und Einführung



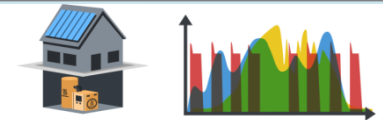
2 Modellbeschreibung



3 Szenarienbeschreibung und Annahmen



4 Ergebnisse zum netzdienlichen Wärmepumpenbetrieb



5 Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung und Ausblick

- Sofern **Wärmepumpen** über eine spannungsgeführte Regelung steuerbar sind, können sie **in Zeiten starker EE-Erzeugung zugeschaltet** werden, um so den dezentralen Verbrauch von Energie zu erhöhen.
 - **In Zeiten geringer dezentraler Erzeugung und starken Strombezugs** aus dem Netz sind sie in der Lage, den **lokalen Verbrauch durch Abschaltung zu verringern**.
- **Ganzjährig netzstützender Effekt für die elektrischen Verteilungsnetze ohne Komforteinbußen für die Wärmepumpenbetreiber**
- Durch die zentrale Regelungsstrategie werden nur jeweils die Wärmepumpen zu- bzw. abgeschaltet, die im betroffenen Netzengpassgebiet installiert sind.
- **Effektive Nutzung der Energie direkt am Ort ihres Entstehens und Minimierung der Netzverluste**
- **Finanzielle Anreizmodelle** und **regulatorischer Richtlinien zur Vorrangregelung für zuschaltbare Lasten gegenüber der Abregelung** durch EinsMan erforderlich.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Stefanie Koch

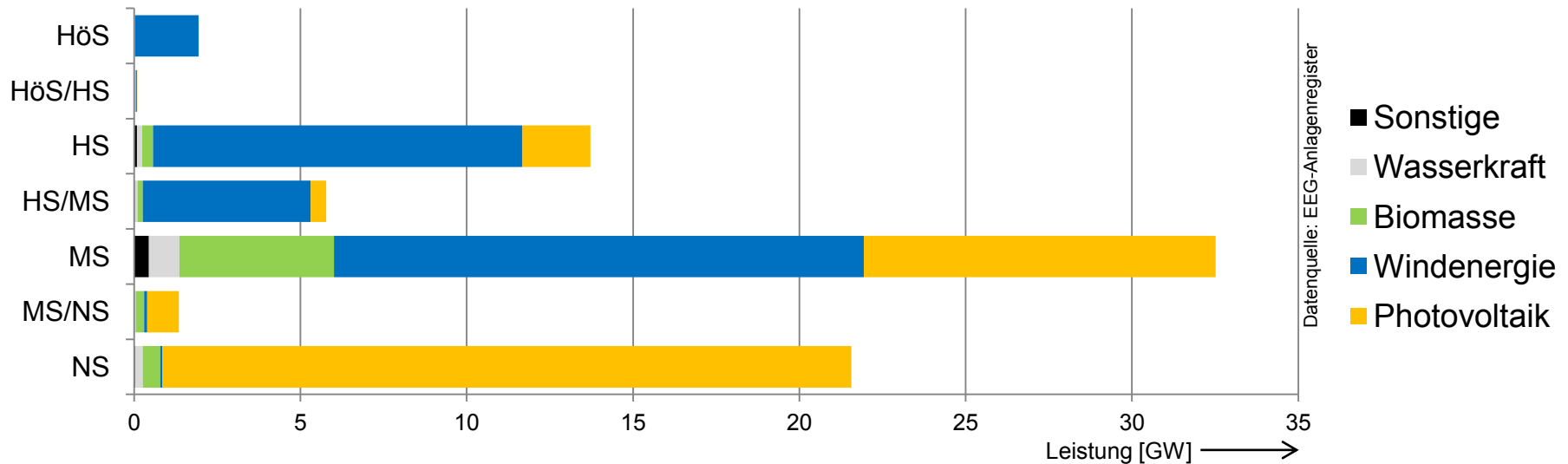
TU Braunschweig

Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia)

stefanie.koch@tu-braunschweig.de

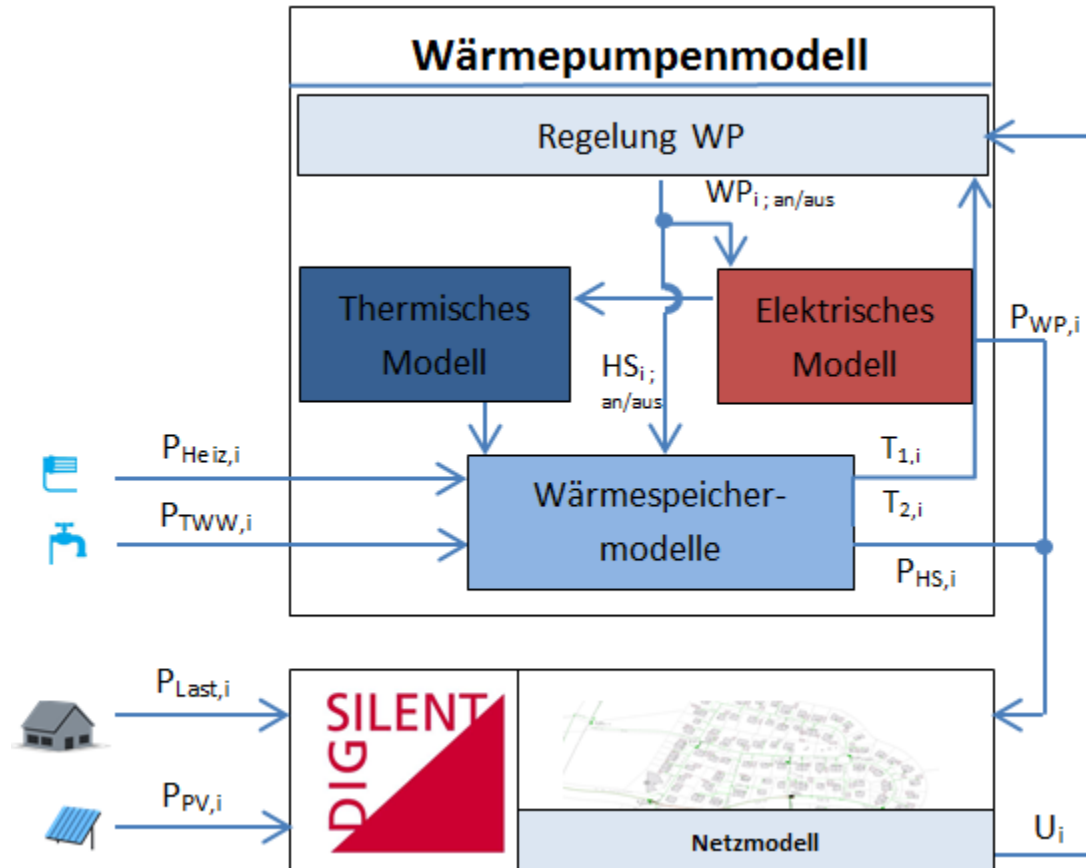
Tel. 0531 391 9727

Aktuelle Netzstruktur in Deutschland

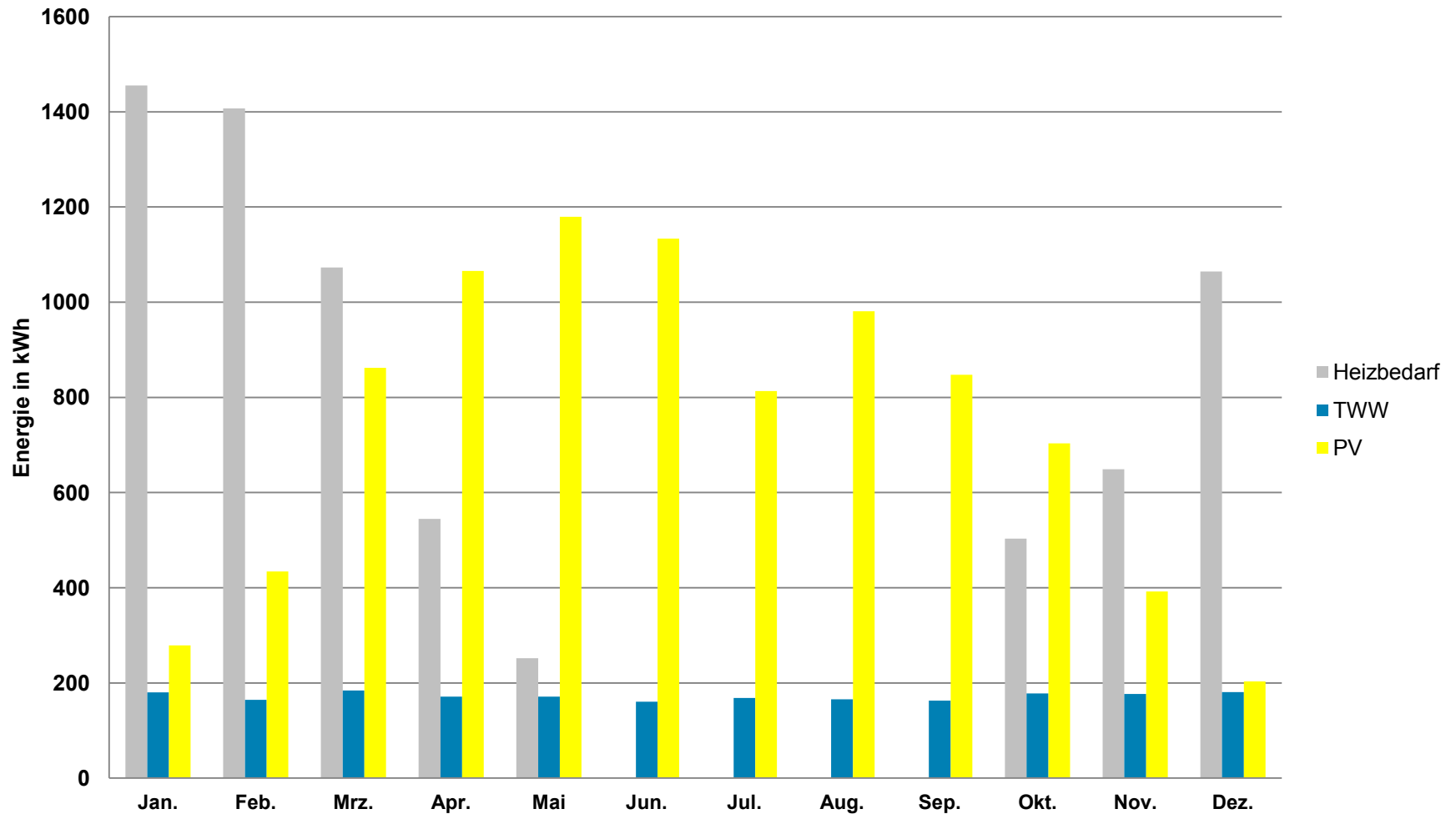


- Auf der historischen „Verbrauchsebene“ der NS und MS sind nun zu großen Teilen PV-Anlagen installiert.
 - Die installierte Leistung für PV liegt 2015 bei fast 40 GWp!
 - Einzelne Windkraftanlagen werden auf MS installiert, Windparks ab HS bis HöS.
- Der Wandel von Versorgungs- zu Einsammelnetzen
- Auswirkungen auf die Netze?

Allgemeine Modellbeschreibung



Energiebedarf/-erzeugung eines beispielhaft ausgewählten HH



Unterschiedliche Betriebsweisen

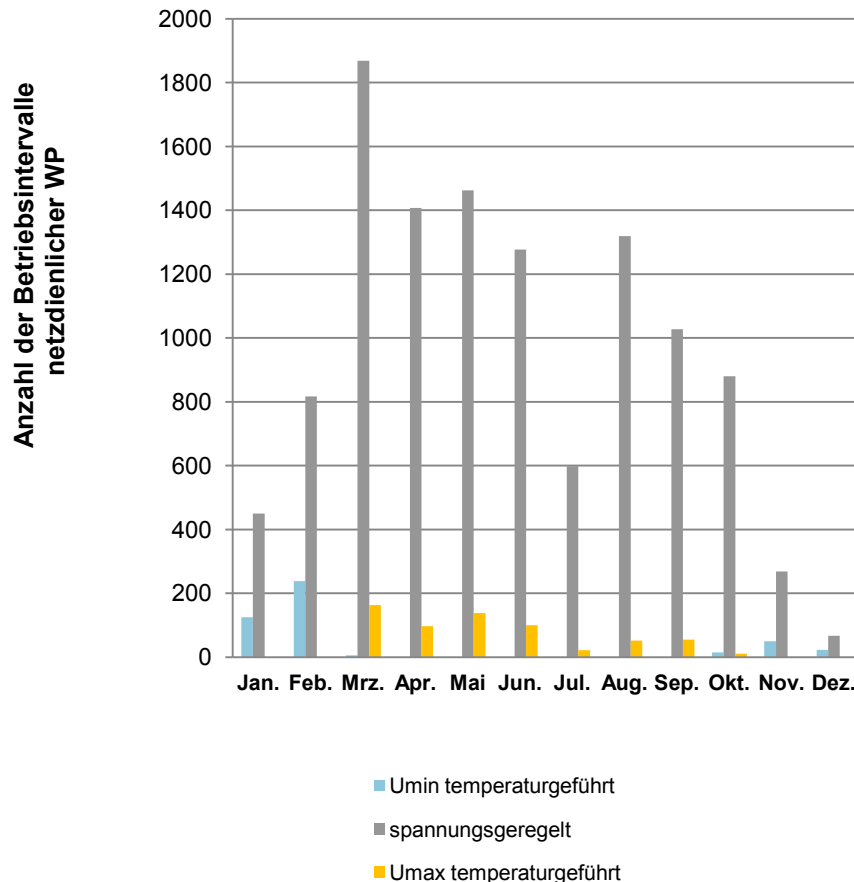
Temperaturgeführte Regelung (nicht-netzdienlich):

- WP wird eingeschaltet, wenn Speichertemperaturen:
< 30°C (Heizen) bzw. < 50°C (TWW)
- Heizstab wird eingeschaltet, wenn Speichertemperaturen:
< 28°C (Heizen) und $T_{\text{außen}} < 5 \text{ °C}$ bzw. < 45°C (TWW)
- WP wird ausgeschaltet, wenn Speichertemperaturen:
> 35°C (Heizen) bzw. > 55°C (TWW)
- Heizstab wird ausgeschaltet, wenn Speichertemperaturen:
> 32°C (Heizen) bzw. > 50°C (TWW)

Spannungsgeführte Regelung (netzdienlich):

- Falls $U > U_{\text{max}}$: WP wird eingeschaltet, bis Speichertemperaturen von 35°C (Heizen) bzw. 55°C (TWW) erreicht werden
- Falls $U > U_{\text{max}}$: Heizstab wird eingeschaltet, bis Speichertemperaturen von 70°C (TWW) erreicht werden
- Falls $U < U_{\text{min}}$: WP wird ausgeschaltet, bis Speichertemperaturen von 28°C (Heizen) bzw. < 45°C (TWW) erreicht werden

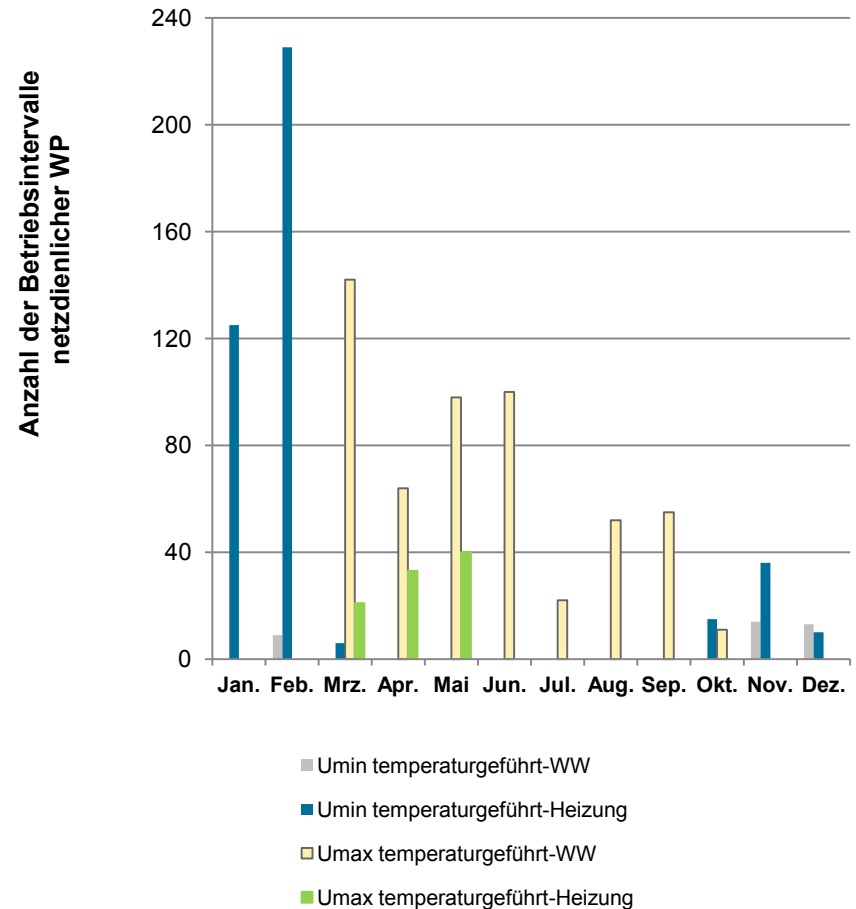
Netzdienlicher Betrieb und dessen Grenzen: 60 % WP



- Aufgrund von kritischen Spannungswerten erfolgt der **netzdienliche Betrieb** („spannungsgeregt“) zu **ca. 96 %**.
- In ca. 4 % der Fälle, in denen eine netzdienliche Anforderung besteht, wechseln die Wärmepumpen aufgrund einer Verletzung der thermischen Restriktionen in den wärmegeführten Modus.
 - **Vermehrter netzdienlicher Wärmepumpeneinsatz gegenüber 45 % WP- Szenario**
- Effizienz des netzdienlichen Wärmepumpenbetriebs: Bei $U < U_{min}$ und bei $U > U_{max}$ können zu **fast 100 % die unzulässigen Abweichungen behoben** werden.
 - **Höhere Effizienz gegenüber 45 % WP- Szenario**

Netzdienlicher Betrieb und dessen Grenzen: 60 % WP

- Die höhere Anzahl von Wärmepumpen führt vermehrt zu unteren Spannungsbandverletzungen.
- Trotz relativ großer Heizungspufferspeicher mit 600 l kommt es **im Januar und Februar vermehrt zu Temperaturunterschreitungen** im Heizungsspeicher („ U_{\min} temperaturgeführt-Heizung“) im netzdienlichen Betrieb.
- Positiver Effekt der höheren Anzahl von Wärmepumpen, die sich am spannungsstabilisierenden Betrieb beteiligen können:
→ **Anzahl der Betriebsintervalle mit temperaturgeführter Regelung trotz Verletzung des oberen Spannungsbandes nimmt um 18 % ab im Vergleich zum 45 % WP-Szenario.**



Überschlägige Abschätzung der Wirtschaftlichkeit: Einstromtarif für netzdienlichen Betrieb

Annahmen:

- Strompreis: $P_{\text{Strom}} = 0,28 \text{ €/kWh}$
- Anteil der Netznutzungsentgelte vom Strompreis : 22,7 %
- Gesamtstromverbrauch beim temperaturegeführter (T) Betrieb: $E_{T, \text{ges}} = 66.183 \text{ kWh}$
- Gesamtstromverbrauch beim netzdienlichen (nd) Betrieb: $E_{\text{nd, ges}} = 69.221 \text{ kWh}$
- Entschädigung für EE-Stromabregelung (Annahme):
 $P_{\text{EE-Abregelung}} = 0,11 \text{ €/kWh}$
- Abgeregelter PV-Strom: $E_{\text{EE-Abregelung}} = 7.924 \text{ kWh}$

Berechnung:

Damit **kein finanzieller Nachteil für Wärmepumpenbetreiber** entsteht, muss gelten:

$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \leq E_{T, \text{ges}} * P_{\text{Strom}} / E_{\text{nd, ges}}$$
$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \leq 66.183 \text{ kWh} * 0,28 \text{ €/kWh} / 69.221 \text{ kWh}$$
$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \leq \mathbf{0,2677 \text{ €/kWh}}$$

Damit **kein finanzieller Nachteil für den Netzbetreiber** entsteht, muss gelten:

$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq 0,773 * P_{\text{Strom}} + (0,227 * E_{T, \text{ges}} * P_{\text{Strom}} - E_{\text{EE-Abregelung}} * P_{\text{EE-Abregelung}}) / E_{\text{nd, ges}}$$
$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq 0,773 * 0,28 \text{ €/kWh} + (0,227 * 66.183 \text{ kWh} * 0,28 \text{ €/kWh} - 7.924 \text{ kWh} * 0,11 \text{ €/kWh}) / 69.221 \text{ kWh}$$
$$P_{\text{Strom, nd, ges}} \geq \mathbf{0,2646 \text{ €/kWh}}$$