



Technische  
Universität  
Braunschweig

**elentia**  
Institut für Hochspannungstechnik  
und Elektrische Energieanlagen



# Physikalisches Kolloquium: Integration von dezentralen Stromerzeugungseinheiten in das elektrische Verteilnetz

Oldenburg, 16. Juli 2012  
Prof. Michael Kurrat

# Gliederung

- Einleitung
- Herausforderungen bei der Integration DEZ
- Lösungsmöglichkeiten
- Beispiel regelbarer Ortsnetztransformator
- Beispiel Verbundbetrieb
- Zusammenfassung

# Energiepolitische Rahmenbedingungen (1)

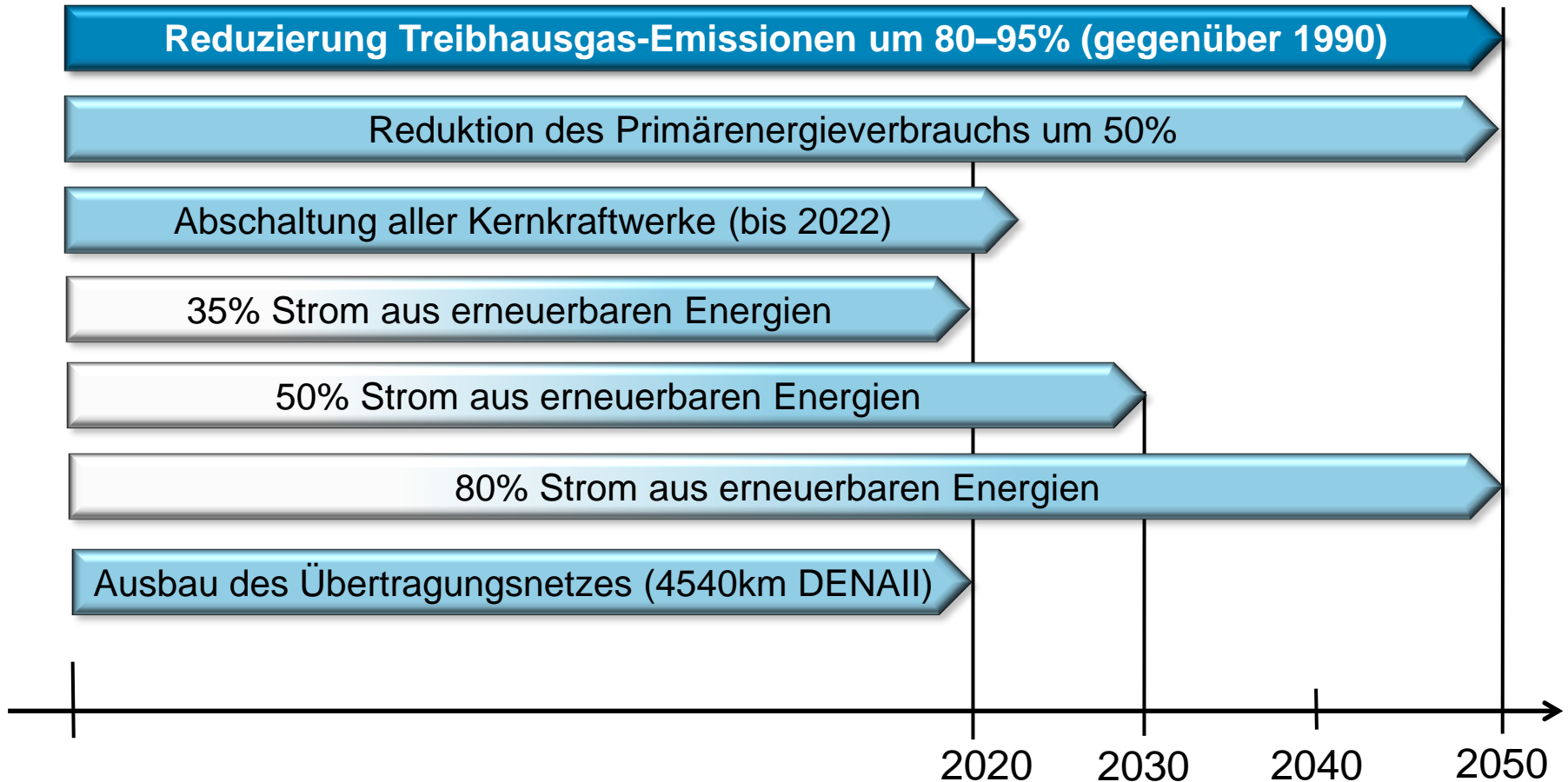
„Historische 20-20-20-20“-Beschlüsse **des Europäischen Rates** vom 8./9. März 2007 unter deutschem Vorsitz, um den Anstieg der globalen Ø-Temperatur auf **2°C** zu begrenzen:

Bis **2020**...

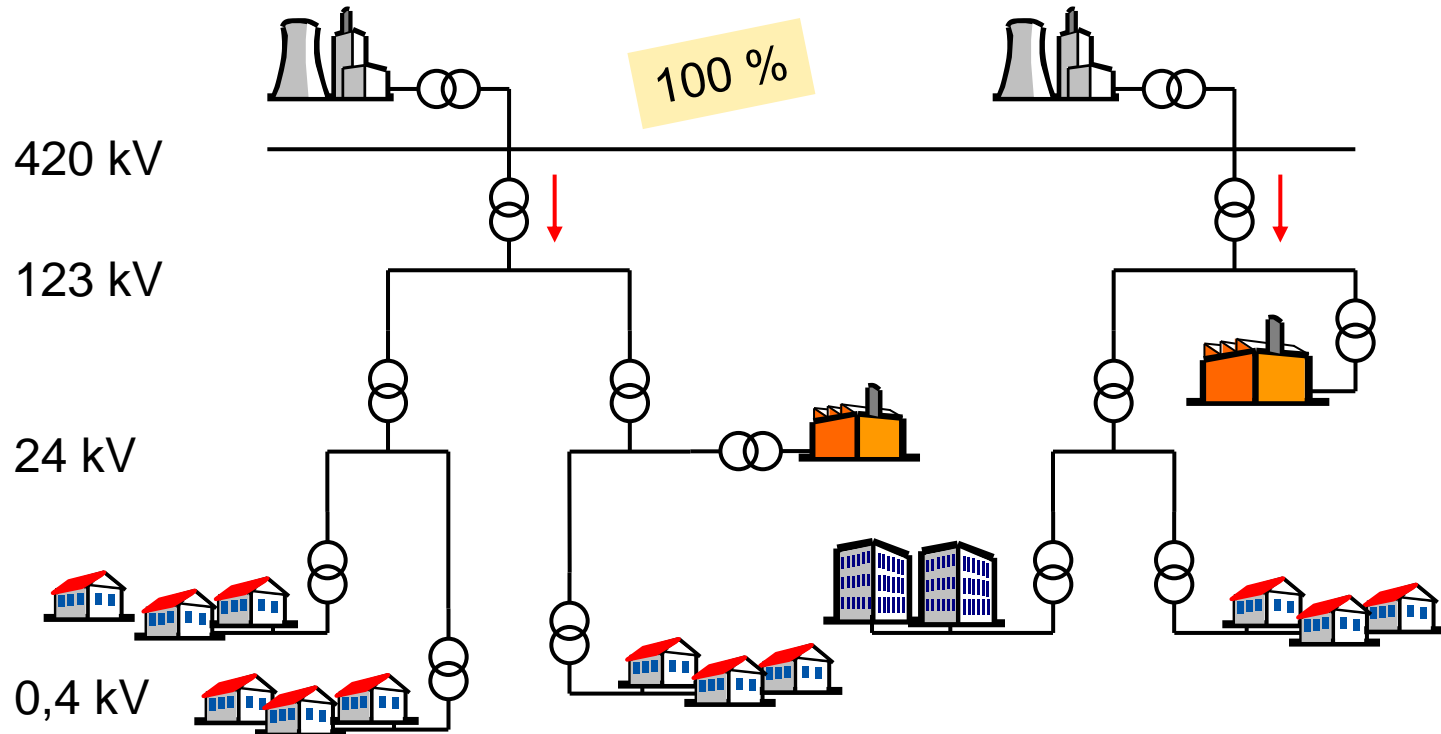
- **Treibhausgase** um mind. **20 %** gegenüber 1990 reduzieren
- **Energieeffizienz** um **20 %** steigern
- **Anteil der Erneuerbaren Energien** am Gesamt-Primärenergieverbrauch von **20 %**



# Ziele der Energiewende in Deutschland (Beschluss 30.6.2011)

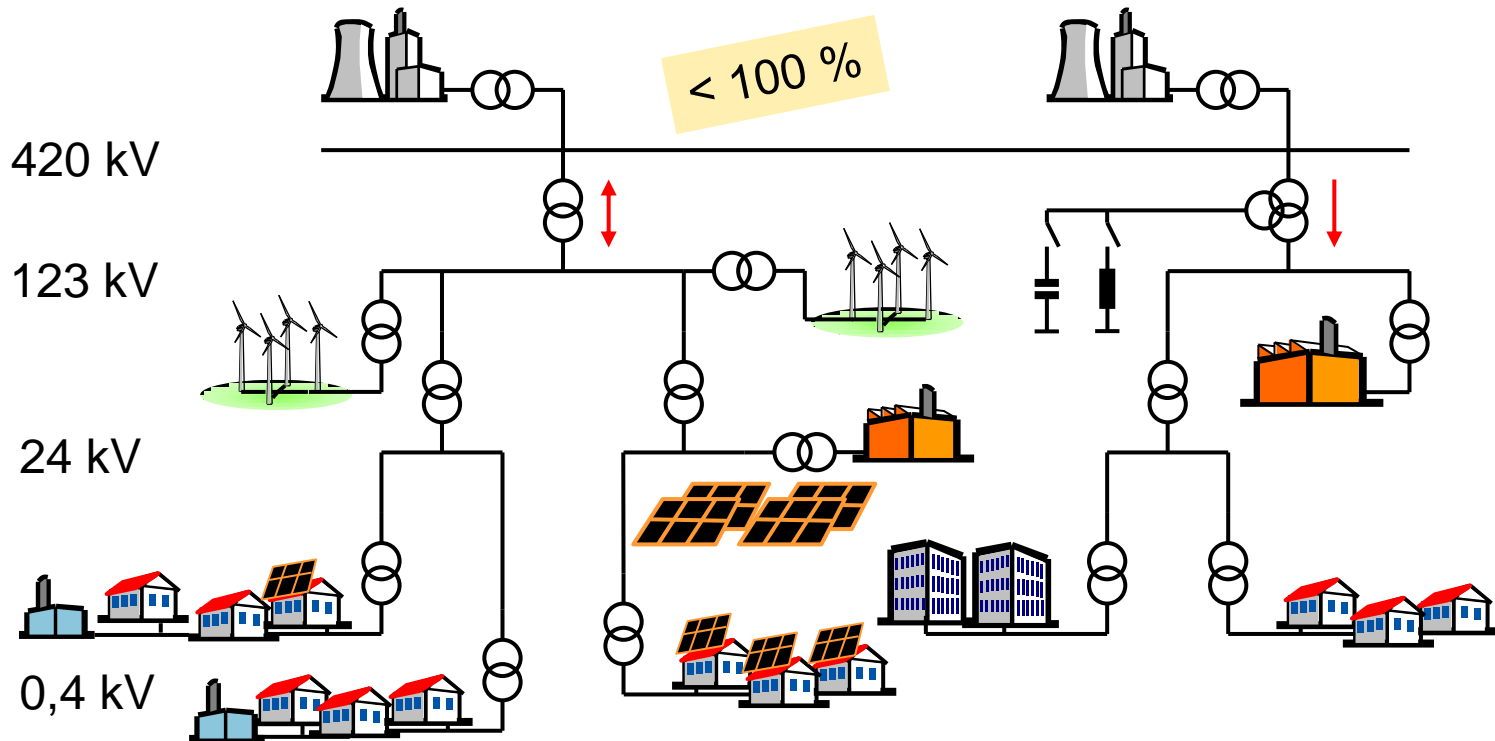


# Übertragungs- und Verteilungsnetz mit Kraftwerken



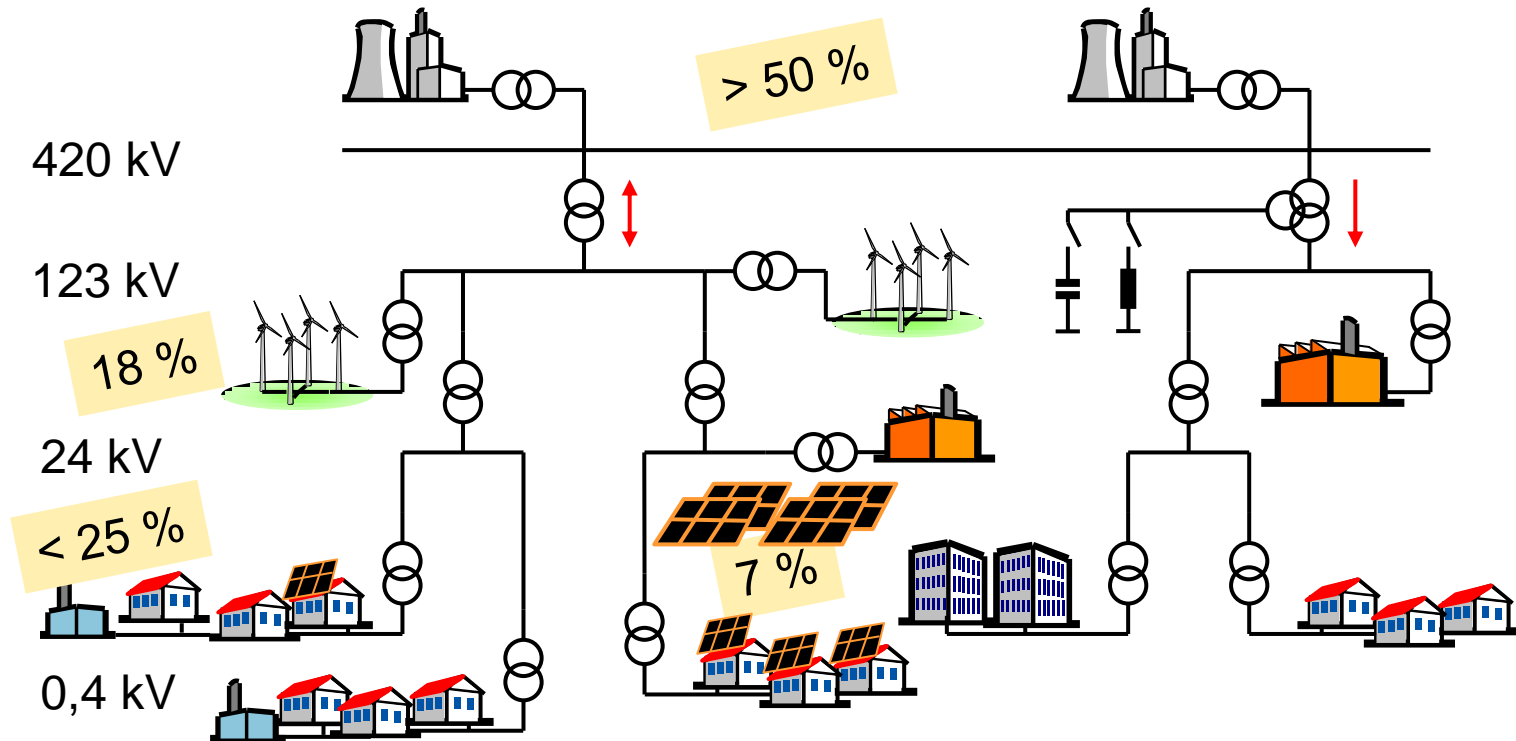
- Die Lastflussrichtung ist durch die Zentralkraftwerke definiert.
- Die Regelleistung wird von den Zentralkraftwerken geliefert.
- Die Blindleistung wird zum großen Teil durch die Generatoren bereitgestellt.
- Die Verteilungsnetze sind von Verbrauchern geprägt.

# Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ



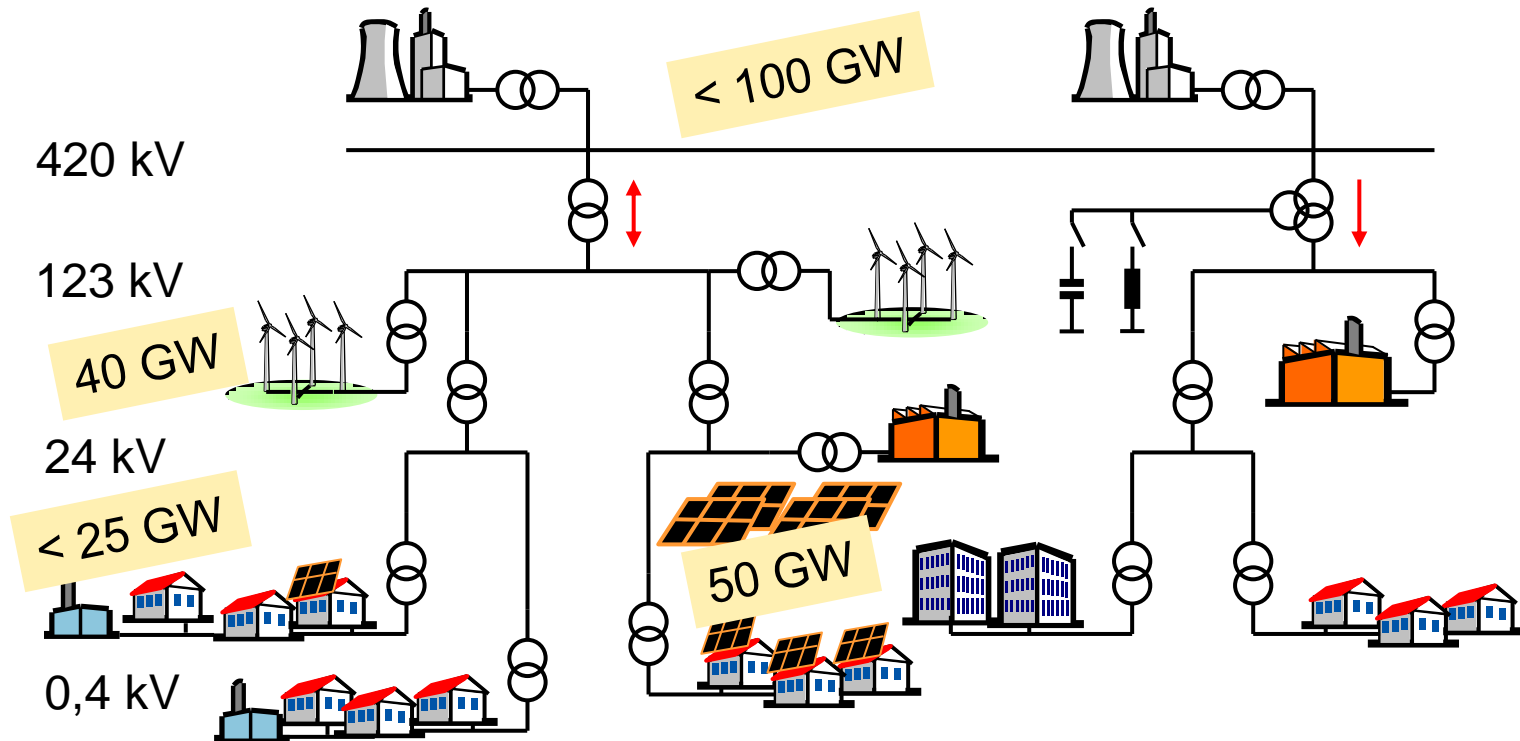
- Dezentrale Stromerzeuger DEZ verändern die Erzeugerstruktur.
- Die Blindleistung muss vom Netz bereitgestellt werden.
- Die Verteilungsnetze werden von Verbrauchern und Erzeugern geprägt

# Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ



- Die Biomasse, Wasserkraft, Photovoltaik und Windkraft tragen 2020 zu 35% zum Bruttostromverbrauch bei.
- KWK-Anlagen erbringen 2020 einen Anteil von 25 %
- Anteile zum Bruttostromverbrauch für 2020 aus Langfristszenarien BMU, 2010

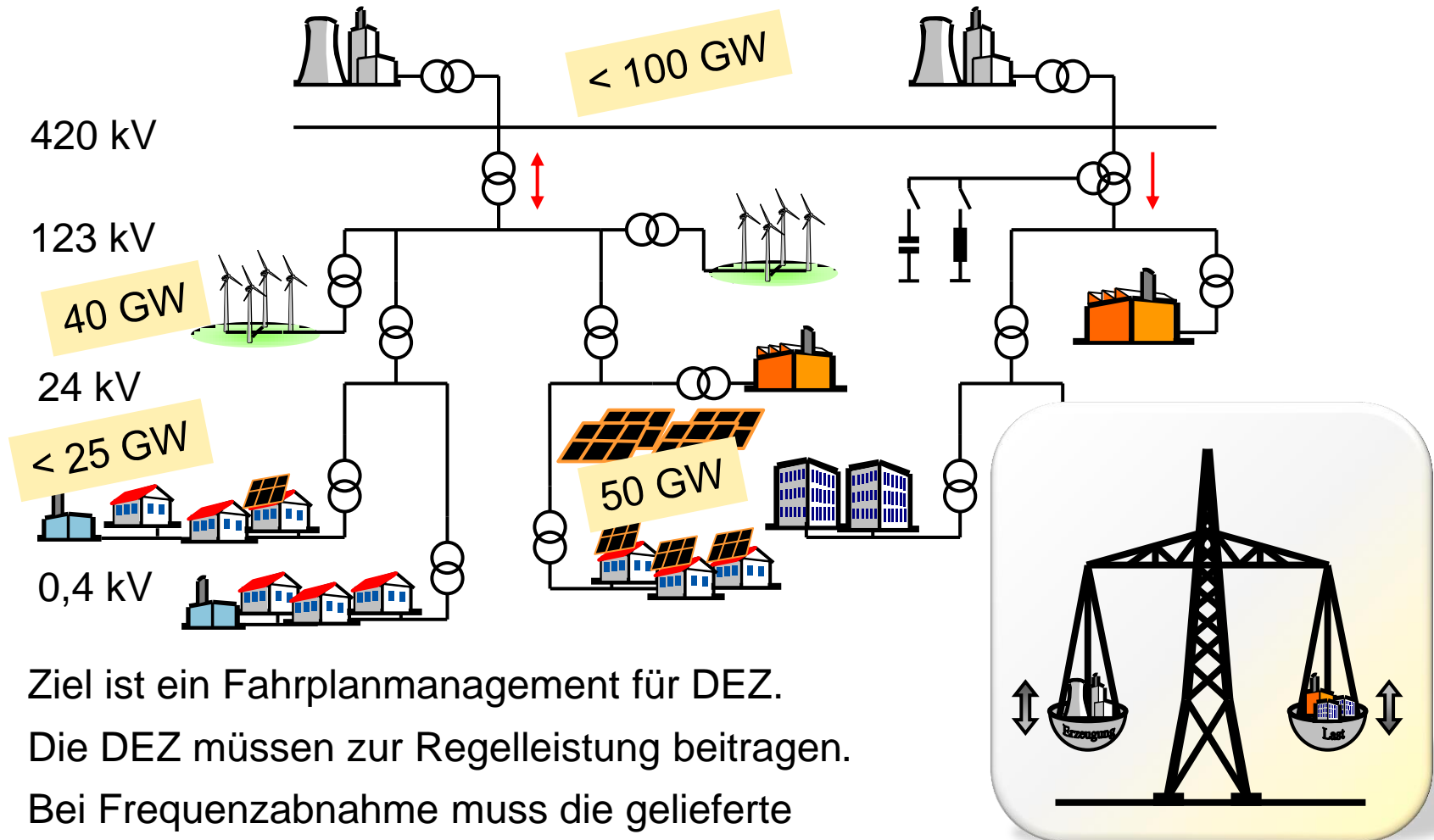
# Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ



- Die installierte Leistung steigt deutlich an.
- Photovoltaikzubau findet vor allem im Niederspannungsnetz statt.
- Leistungen für 2020 aus Langfristszenarien BMU, 2010



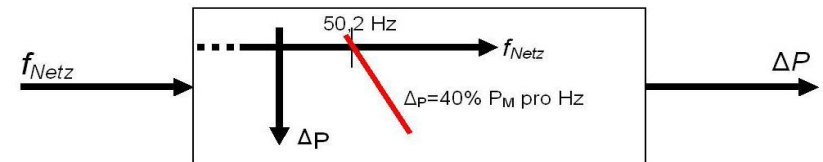
# Herausforderung 1 für das Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ



- Ziel ist ein Fahrplanmanagement für DEZ.
- Die DEZ müssen zur Regelleistung beitragen.
- Bei Frequenzabnahme muss die gelieferte Wirkleistung erhöht werden und umgekehrt.

# Ansatz für Regelleistung

- Die frequenzabhängige Wirkleistungs-Reduktion ist ein erster Schritt zur Beteiligung an Primärregelung.
- Über 300.000 Solaranlagen, die hart bei 50,2 Hz abschalten, müssen nachgerüstet werden.



$$\Delta P = 20 P_M \frac{50,2 \text{ Hz} - f_{\text{Netz}}}{50 \text{ Hz}} \quad \text{bei } 50,2 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} \leq 51,5 \text{ Hz}$$

$P_M$  Momentane verfügbare Leistung

$\Delta P$  Leistungsreduktion

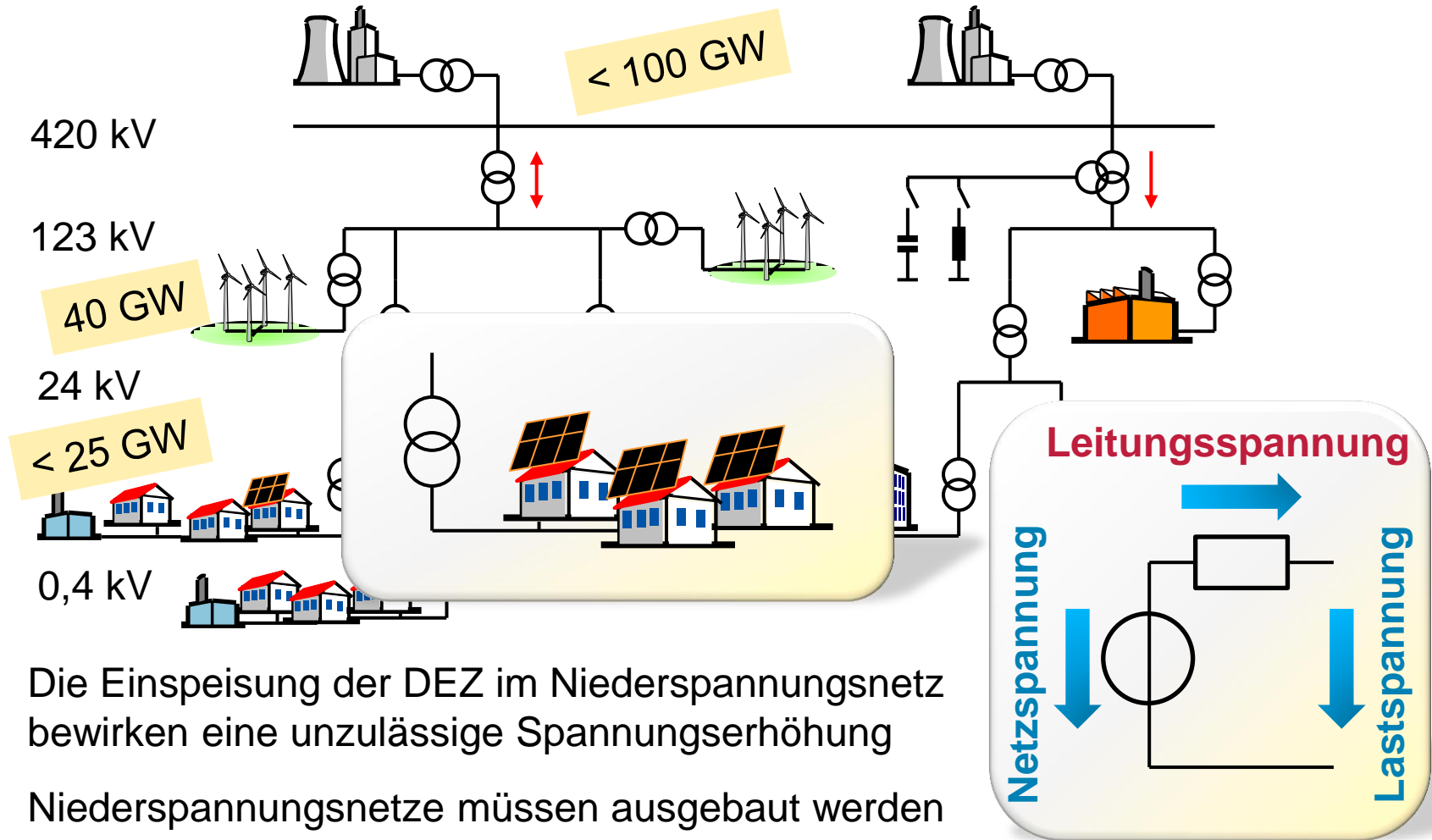
$f_{\text{Netz}}$  Netzfrequenz

Im Bereich  $47,5 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} \leq 50,2 \text{ Hz}$  keine Einschränkungen

Bei  $f_{\text{Netz}} \leq 47,5 \text{ Hz}$  und  $f_{\text{Netz}} \geq 51,2 \text{ Hz}$  Trennung vom Netz

Quelle: Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. BDEW, Entwurf Dezember 2007

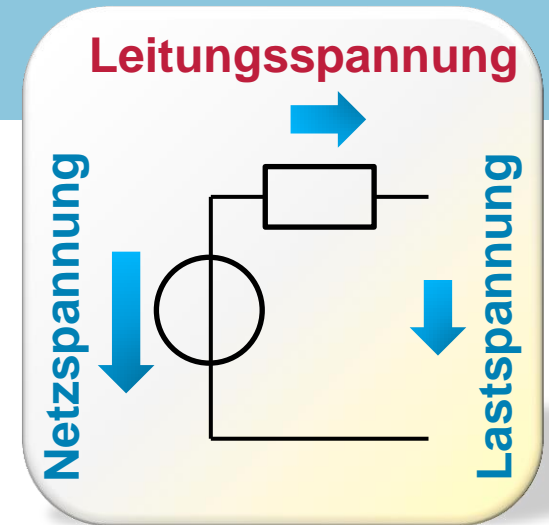
# Herausforderung 2 für das Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ



- Die Einspeisung der DEZ im Niederspannungsnetz bewirken eine unzulässige Spannungserhöhung
- Niederspannungsnetze müssen ausgebaut werden und verursachen Zusatzkosten.

# Herausforderung 2 für das Übertragungs- und Verteilungsnetz mit DEZ

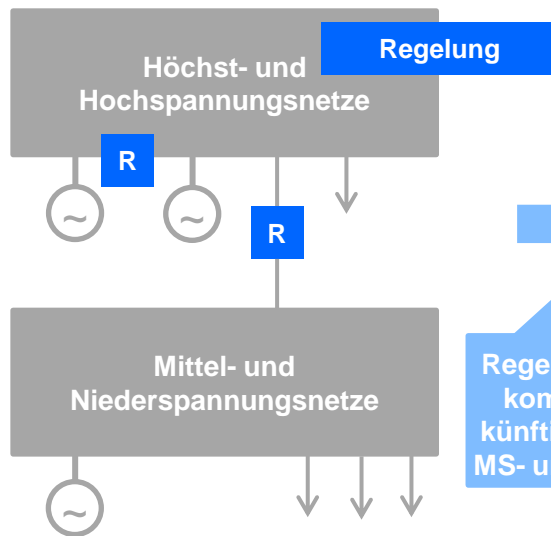
- Eine Last ruft einen Leistungs- und Stromfluss in Richtung der Last hervor.
- Der Leitungsstrom ist nach dem Ohmschen Gesetz mit einer Leitungsspannung verknüpft.
- Die Lastspannung ist kleiner als die Netzspannung.
- Grenzwert nach DIN EN 50160 beträgt -10% und beschränkt die Leistungsaufnahme der Last
- Eine Einspeisung durch DEZ verursacht einen Leistungs- und Stromfluss in Richtung des Netzes.
- Die DEZ-Spannung muss größer als die Netzspannung sein.
- Grenzwert nach DIN EN 50160 beträgt +10% und beschränkt die Leistungseinspeisung der DEZ



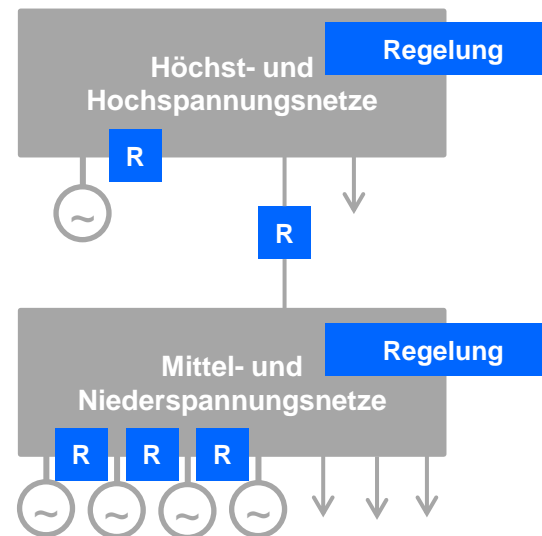
# Umbau der Netze / FNN TF Integration DEZ

- Spannungsregelung zukünftig im Niederspannungsnetz
- Kurzschlussleitung zukünftig im Verteilungsnetz
- Blindleistungsbereitstellung zukünftig im Verteilungsnetz

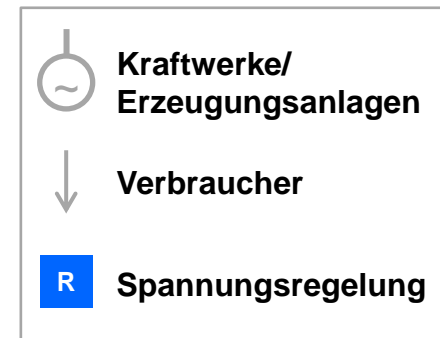
bisher



Lösungsansatz



Regelung deutlich komplexer und künftig Aufgabe in MS- und NS-Netzen

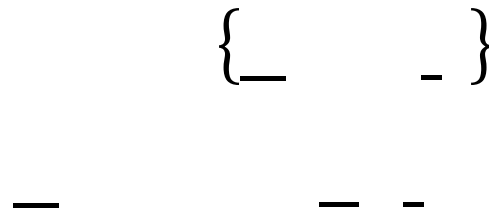


Quelle: Technische Herausforderungen beim Umbau der Netze - Lösungsansätze

FNN FORUM NETZTECHNIK/  
NETZBETRIEB IM VDE

# Abhilfe 1 für die statische Spannungshaltung

- Eine Einspeisung durch DEZ verursacht einen Leistungs- und Stromfluss in Richtung des Netzes.
- Die DEZ-Spannung muss größer als die Netzspannung sein.
- DEZ-Spannung und Leitungsstrom bestimmen die Einspeiseleistung  $P$ .
- Ein Netzausbau mit leistungstärkeren Leitungen verringert die Leitungsspannung und die Verluste.
- Der Grenzwert nach DIN EN 50160 wird eingehalten!





# BDEW Verteilnetzstudie

|           | Küste<br>sehr stark<br>windgeprägt | Nordost<br>windgeprägt | Mitte<br>gemischt<br>geprägt | Süd<br>PV-geprägt |
|-----------|------------------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|
| Fläche    | 1                                  | 2                      | 3                            | 4                 |
| Städtisch | 5                                  |                        |                              |                   |

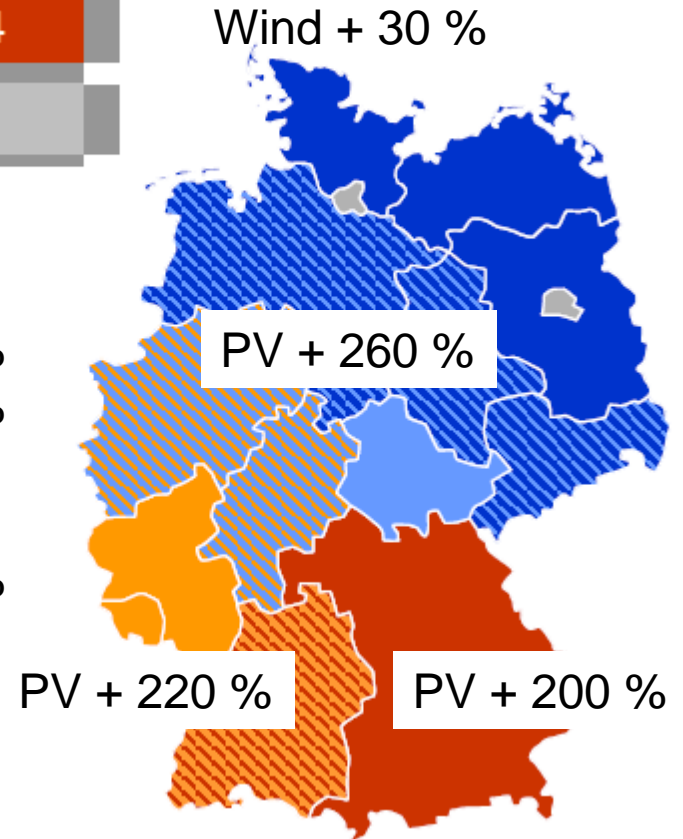
## Leitungslängen

|              |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| MS (140 tkm) | 16% | 3%  | 61% | 58% |
| NS (240 tkm) | 16% | 11% | 27% | 48% |

## Trafoleistung

|                |     |    |     |     |
|----------------|-----|----|-----|-----|
| MS/NS (33 GVA) | 15% | 5% | 37% | 43% |
|----------------|-----|----|-----|-----|

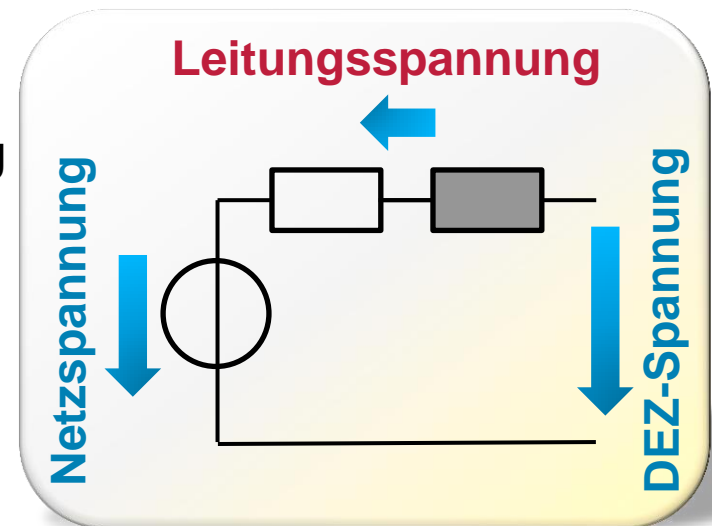
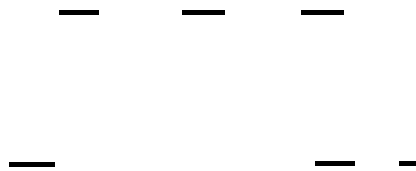
## Netzausbaubedarf nach BMU Leitszenario



Quelle: Nissen, RWE Deutschland

# Abhilfe 2 für die statische Spannungshaltung

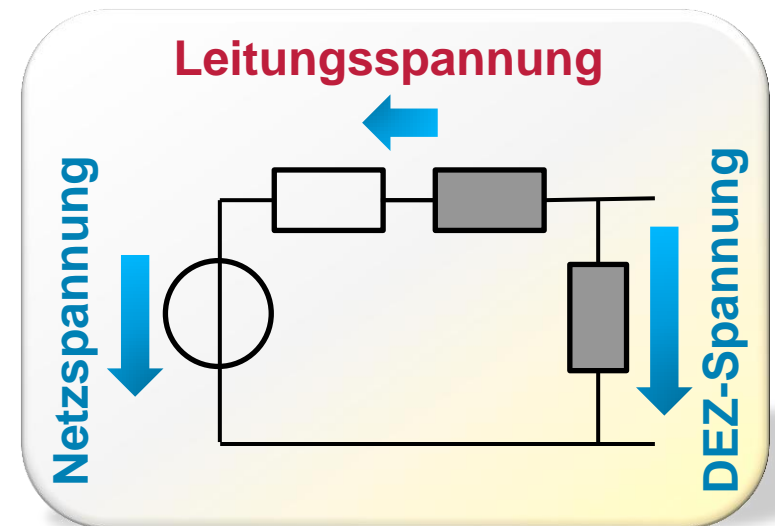
- Eine genauere Betrachtung der Leitung zeigt den Einfluss der Leitungsinduktivität.
- Die Leitungsinduktivität  $L$  macht sich als Zusatzimpedanz  $X_L$  bemerkbar.
- Die Leitungsinduktivität erhöht daher die Leitungsspannung.
- **WICHTIG:**  
Der Anteil der Leitungsspannung durch die Leitungsinduktivität ruft keine Verlustleistung hervor!





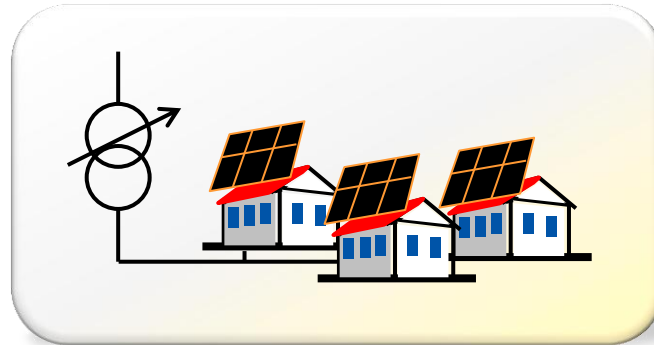
# Abhilfe 2 für die statische Spannungshaltung

- Eine zusätzliche induktive Last vergrößert den Laststrom.
- Der Laststrom kompensiert einen Teil des Erzeugerstromes.
- Die Leitungsspannung wird kleiner.
- Die DEZ-Spannung bleibt unterhalb des Grenzwertes.
- Der Netzausbau verzögert sich.
- **WICHTIG:**  
Der Laststrom durch die zusätzliche induktive Last erzeugt dort keine Verlustleistung!
- Anlagenwechselrichter können dieses Verhalten nachbilden!



# Abhilfe 3 für die statische Spannungshaltung

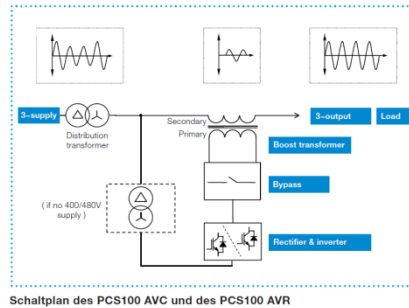
- Ein regelbarer Ortsnetztrafo passt die Netzspannung im Niederspannungsnetz an.
- Der Leistungsfluss in das Netz bedarf einer gegenüber der Netzspannung erhöhten DEZ-Spannung.



- Der regelbare Ortsnetztrafo reduziert die Netzspannung und die DEZ-Spannung bleibt unterhalb des Grenzwertes.

# Abhilfe 3 für die statische Spannungshaltung

Ist die Spannungshaltung auch mit Blindleistungsregelung nicht gewährleistet, kann ein regelbarer Ortsnetztransformator eingesetzt werden.



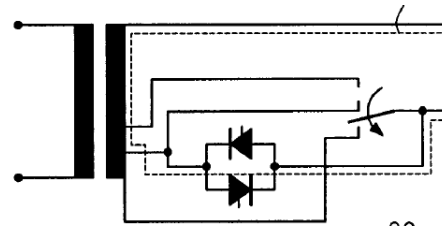
Schaltplan des PCS100 AVC und des PCS100 AVR



The PCS100 AVR low voltage solution

Quelle: ABB

- Widerstandsschnellschalter
- Reaktorschalter
- Hybridschalter
- Aktive Spannungsregelung



Quelle: Siemens

# e-home Energieprojekt 2020



WIR MACHEN ZUKUNFT!



**Projektlaufzeit: 2 + 1 Jahre**

**Ausstattung von bis zu 40 Haushalten mit:**

- Photovoltaikanlagen
- Klimaanlage
- Elektrofahrzeugen

**Untersuchungen:**

- Messkampagnen im Niederspannungsnetz
- Komponentenmessung
- Akzeptanzforschung

Ein Projekt von **e-on** | Avacon

In Partnerschaft mit:



# e-home Energieprojekt 2020 -rONT

## Fragestellungen

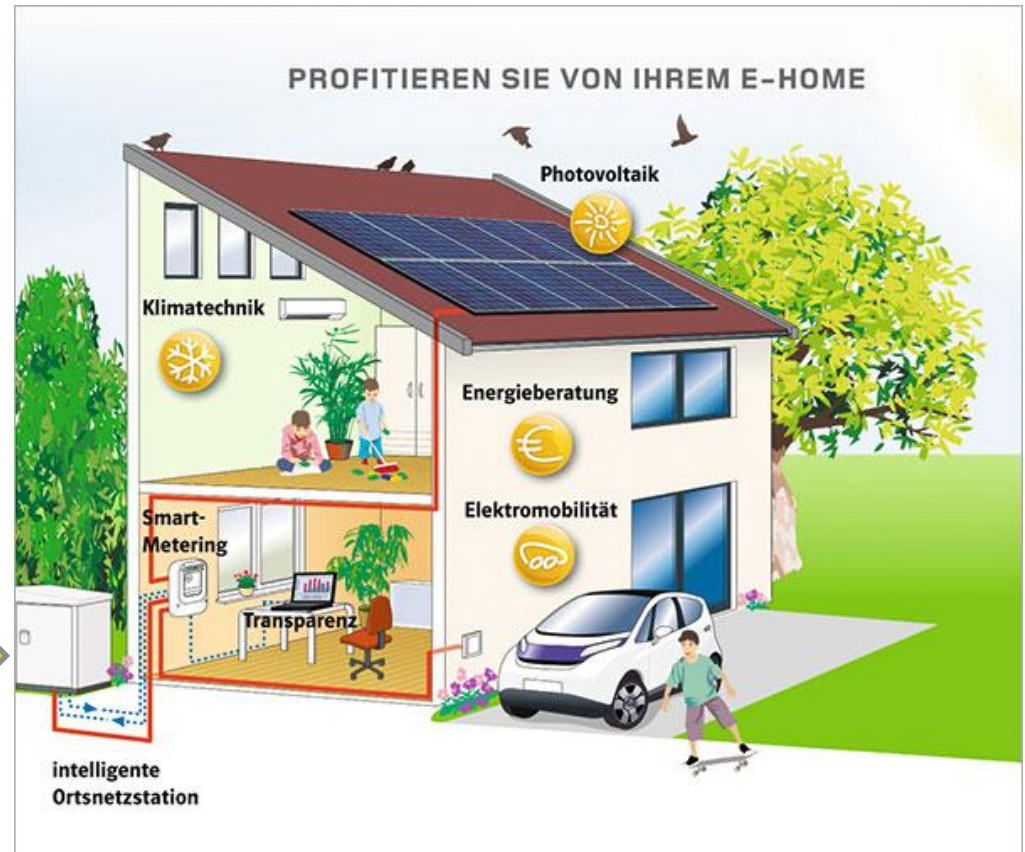
- Betrachtung der Auswirkungen von:
  - PV-Anlagen
  - Wärmepumpen
  - Klimaanlage
  - E-Autos auf die Netzbelastung
- Systembetrachtung der Komponenten

## Lösungsansatz:

Regelbaren Ortsnetztransformator (rONT)



Quelle: www.eon-avacon.com



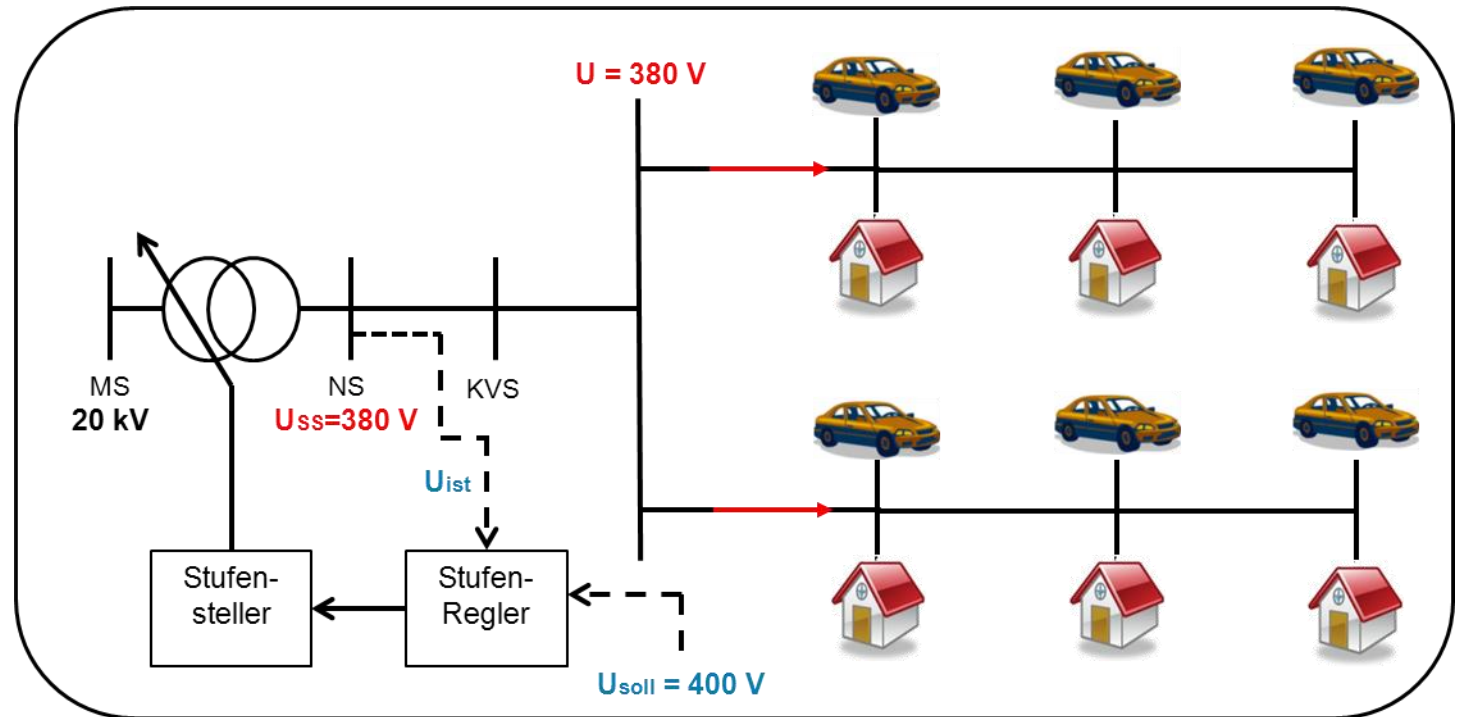
Quelle: www.ehomeprojekt.de

# e-home Energieprojekt 2020 -rONT



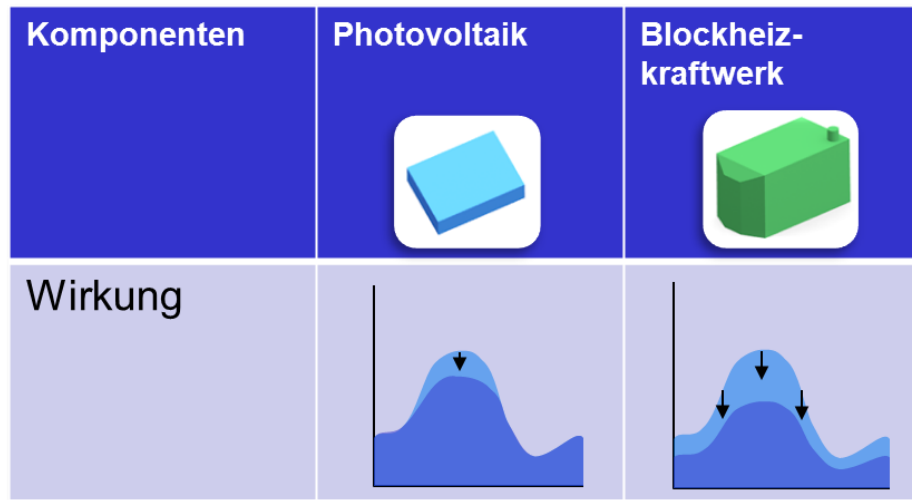
## Technische Daten:

- Scheinleistung: 400 kVA
- Nennspannung OS: 20 kV
- Nennspannung US: 0,4 kV
- OS-seitiger Lastregelschalter: 9 x 1,44%
- Schaltgruppe Dyn5:



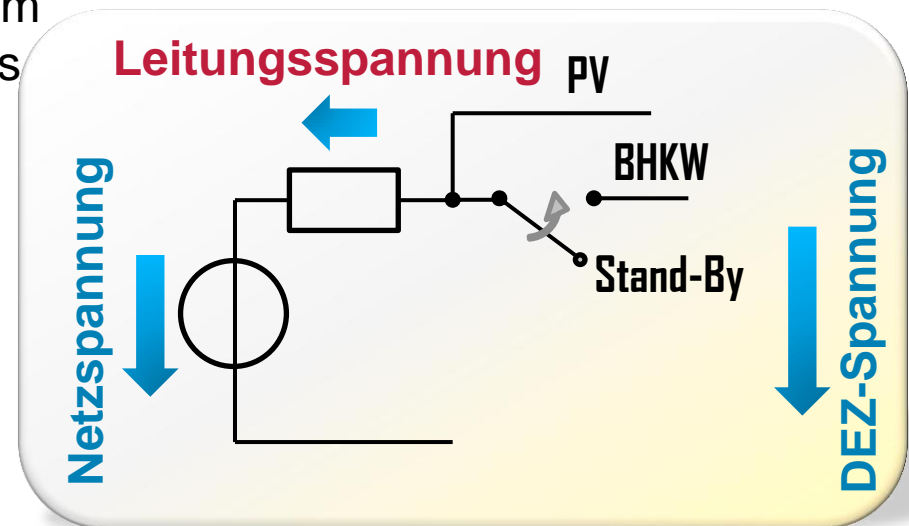
# Abhilfe 4 für die statische Spannungshaltung

- Betrachtung für Betrieb unterschiedlicher DEZ
- Das Fahrplanmanagement von virtuellen Kraftwerken trägt durch den Abgleich von Stromerzeugung und –verbrauch ebenfalls zur statischen Spannungshaltung bei.
- Direktes Ziel ist die Glättung eines Siedungslastgangs, d.h. Ausgleich der fluktuierenden DEZ durch Blockheizkraftwärme (BHKW)



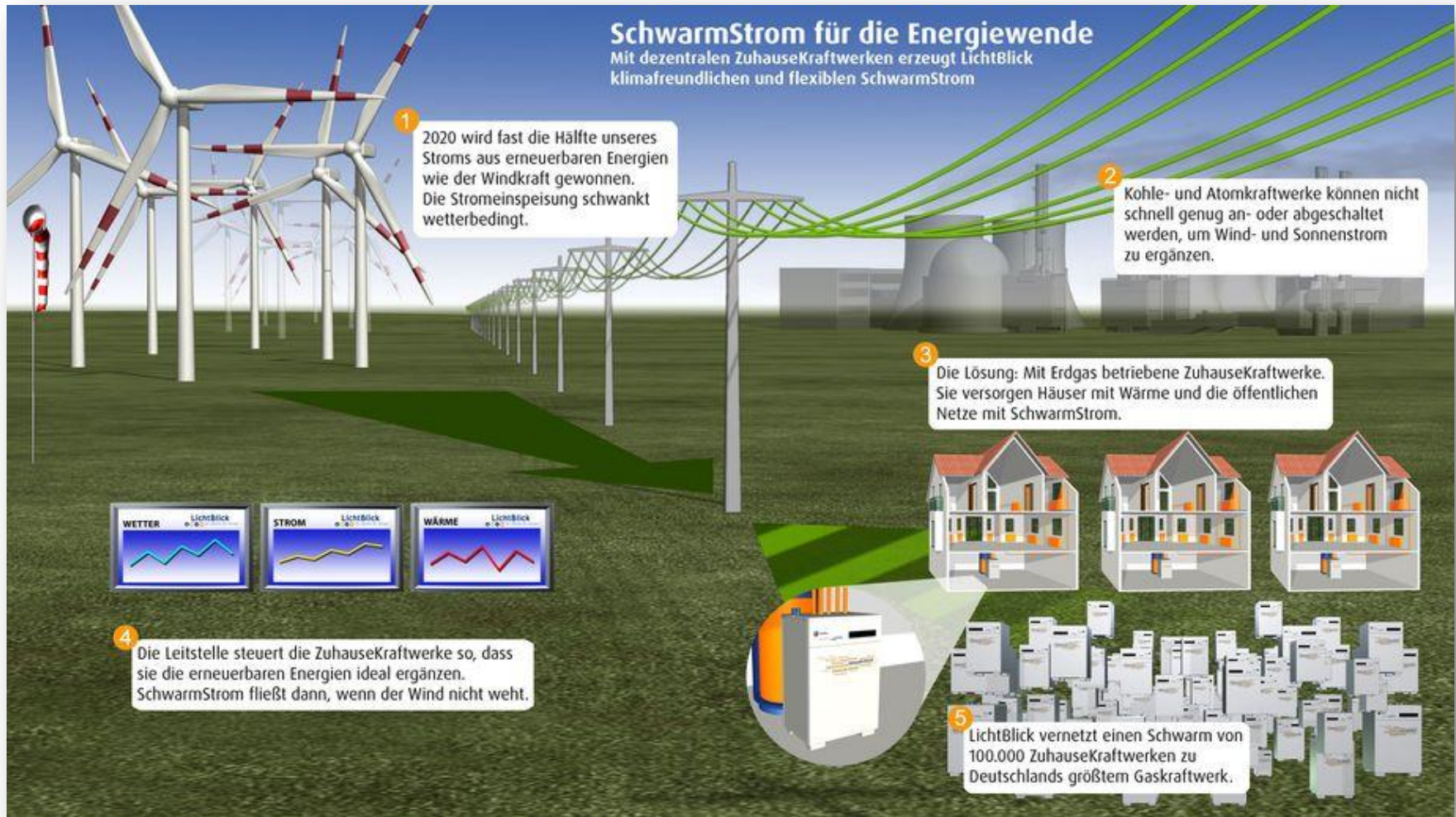
# Abhilfe 4 für die statische Spannungshaltung

- Der **netzorientierte Betrieb** berücksichtigt den Wärmebedarf und den elektrischen Bedarf von Gebäuden sowie die fluktuierende Stromerzeugung durch Photovoltaik (PV).
- Die Einspeisung von fluktuierenden und steuerbaren DEZ wird zeitlich entkoppelt.
- Der BHKW-Betrieb orientiert sich am Bedarf des Niederspannungsnetzes
- Dadurch wird der Leistungs- und Stromfluss in Richtung des Netzes eingeschränkt.
- Der Grenzwert nach DIN EN 50160 wird eingehalten!



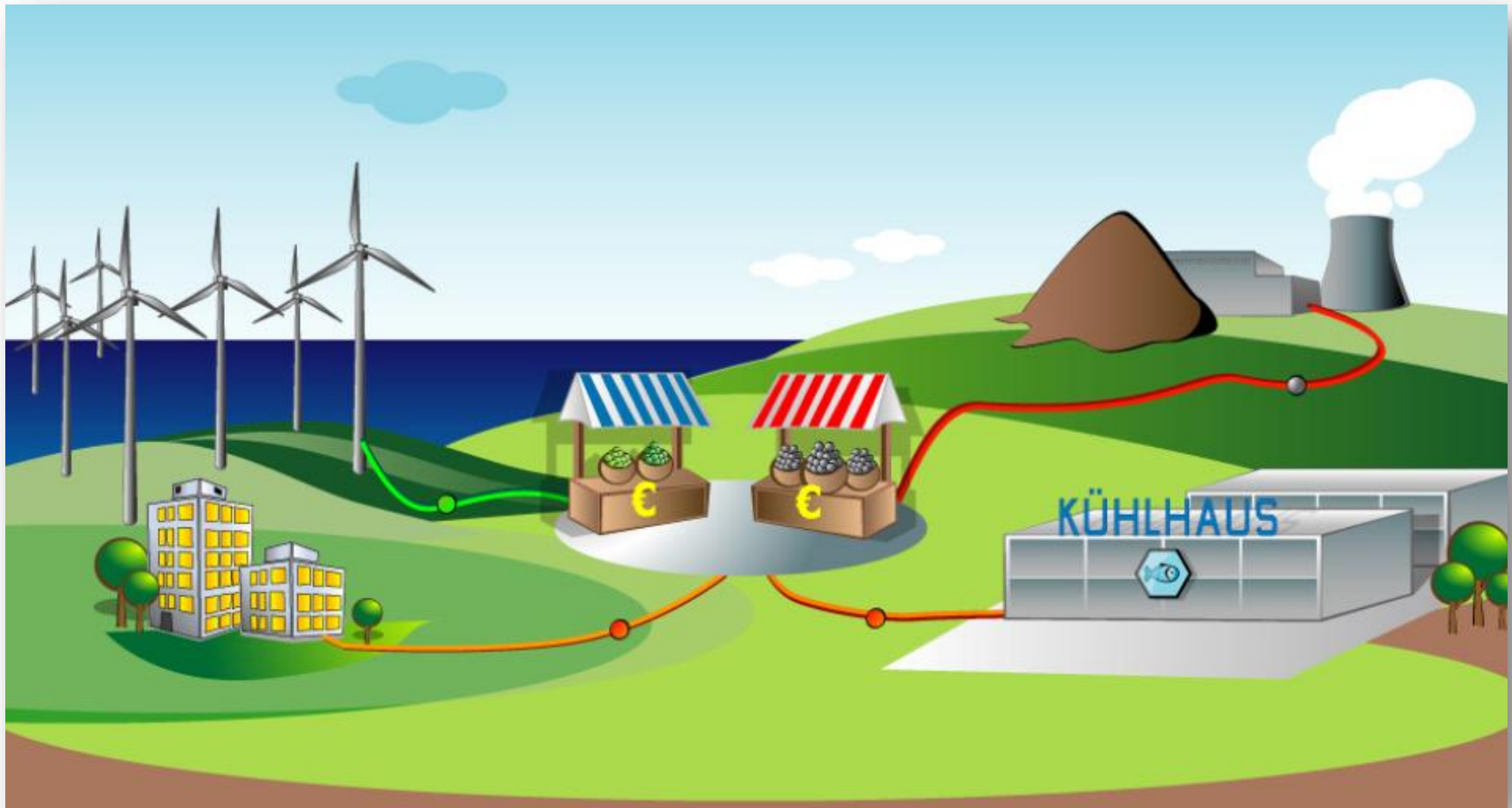


# Lichtblick – Schwarmstromkonzept



Quelle: Lichtblick AG

# Virtuelles Kraftwerk – eTelligence



# Verbundprojekt: Smart Nord

## Smart Nord

Forschungsverbund Smart Grid in Niedersachsen

### Cluster 1

Fahrplanbasierte  
Wirkleistungs-  
bereitstellung

### Cluster 2

Netzstützende  
Systemdienst-  
leistungen

### Cluster 3

Handel von  
Wirkleistung und  
Systemdienst-  
leistungen

### Cluster 4

Verteil- und  
Übertragungsnetz

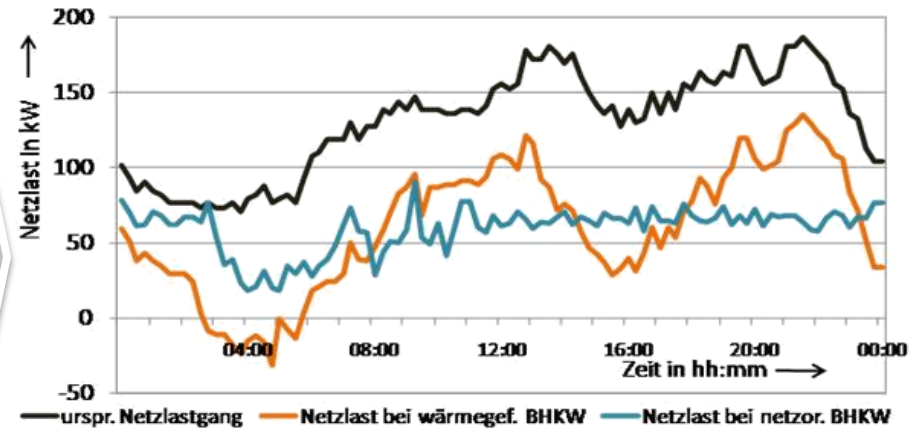
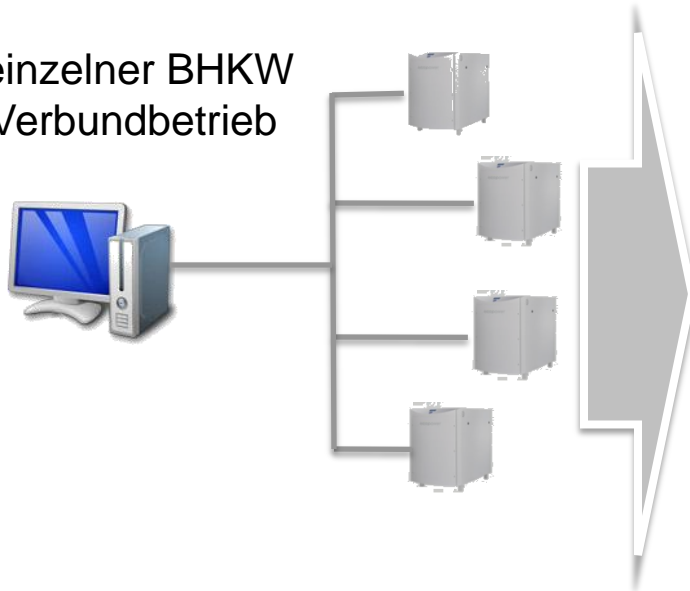


[www.offis.de](http://www.offis.de)

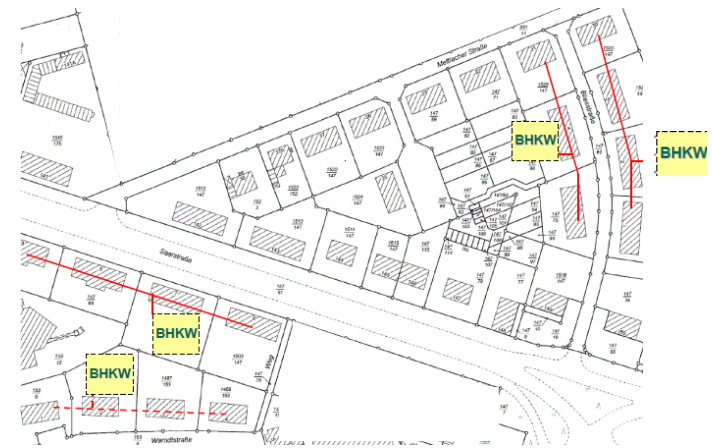
# Virtuelles Kraftwerk in Braunschweig

## Vernetzung einzelner Mini-BHKW via Internet mit aktuellem Feldtest in Braunschweig

Vernetzung einzelner BHKW zum BHKW-Verbundbetrieb

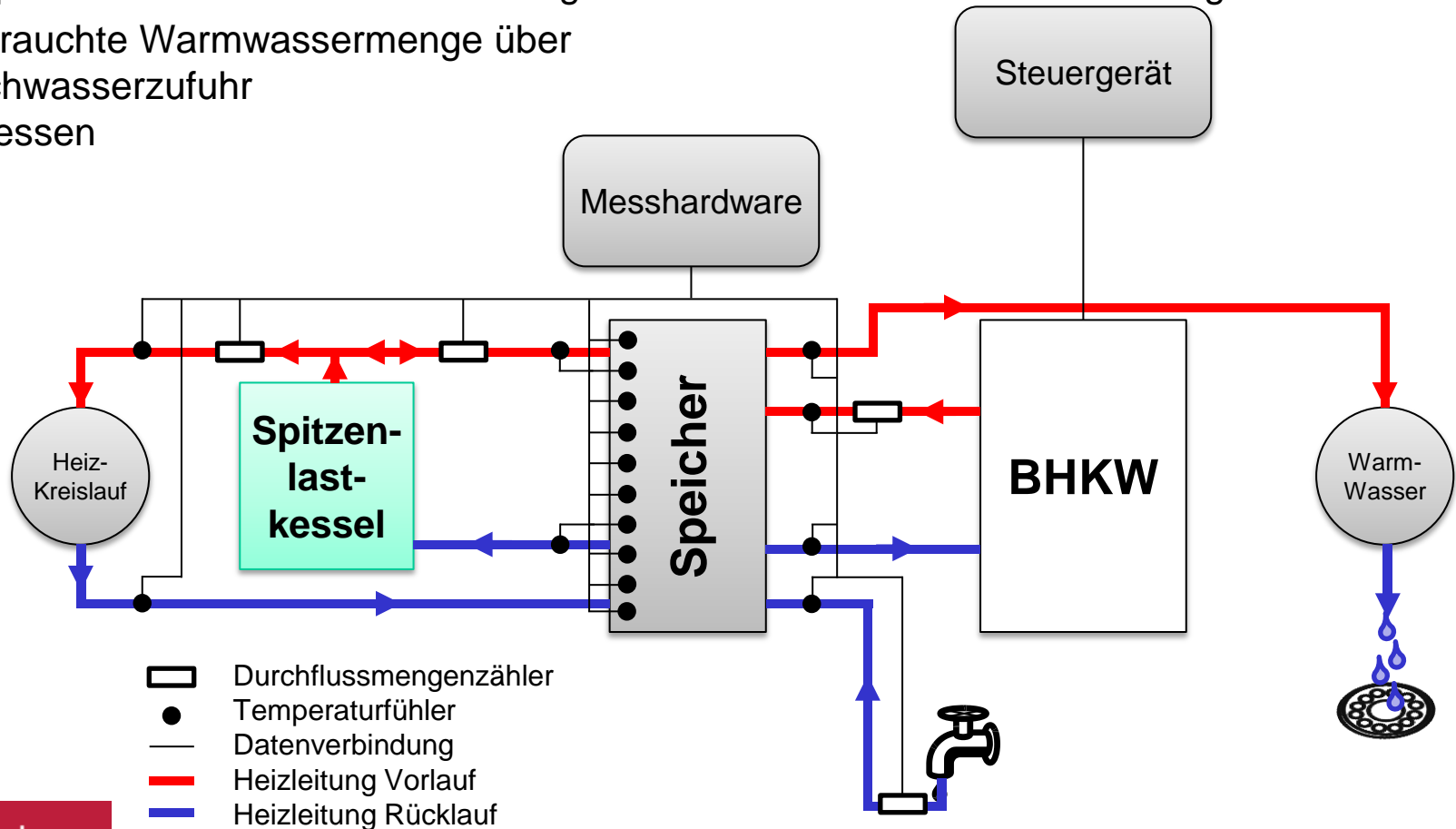


Ein Verbund von BHKW kann die Integration von dezentralen KWK-Anlagen vereinfachen und zusätzlich positive Effekte für den Netzbetreiber bereitstellen



# Feldtest - Anlagenkonzept Heizsystem

- Zentrales Element im Kreislauf ist der thermische Pufferspeicher
- Temperaturfühler und Durchflussmengenmesser sind an Messhardware angeschlossen
- Verbrauchte Warmwassermenge über Frischwasserzufuhr gemessen



# Feldtest - Beginn Einbau und Inbetriebnahme



Speicher



BHKW



Spitzenlastkessel

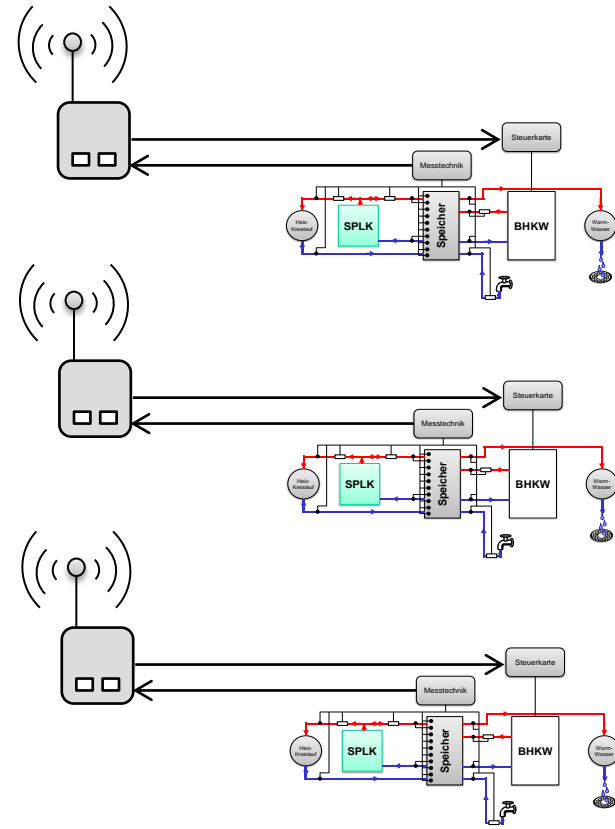


23.11.2010 und  
04.01.2011

eigene  
Aufnahmen

# Feldtest - Kommunikationskonzept

- Pro BHKW ein UMTS-Router mit sicherer VPN-Verbindung
- Feste IP-Adressen für die eindeutige Zuordnung im Verbund
- Messgeräte und Steuergerät per Ethernet mit Router verbunden
- Zentrales Fahrplanmanagement für Auswertung und Fahrplanerstellung



# FEN Feldtest (Januar – Dezember 2011)

- Zwei Mehrfamilienhäuser mit je einem Mini-BHKW ausgestattet
- Mini-BHKW: EcoPower e4.7 (4,7 kW / 12,5 kW )
- Thermischer Pufferspeicher (je 1.000 Liter)
- Bestehender Heizkessel bleibt erhalten → Spitzenlastkessel

Mess- und Steuersystem:

Zentrales Fahrplanmanagement inkl. Messwertauslesung

Messwerterfassung pro Gebäude:

18 Temperatursensoren  
4 Durchflussmengenmesser  
1 Messbox (Datenerfassung)  
1 Steuergerät für Mini-BHKW  
1 UMTS-Router

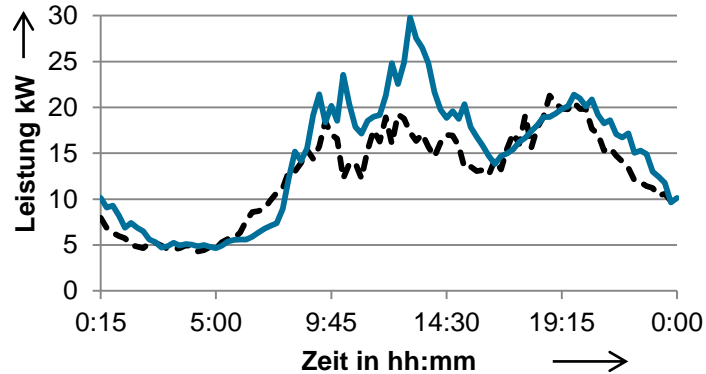
*tägliche Rohdaten:  
198.720 Messwerte pro Anlage!*



# Feldtest - Auswertung:

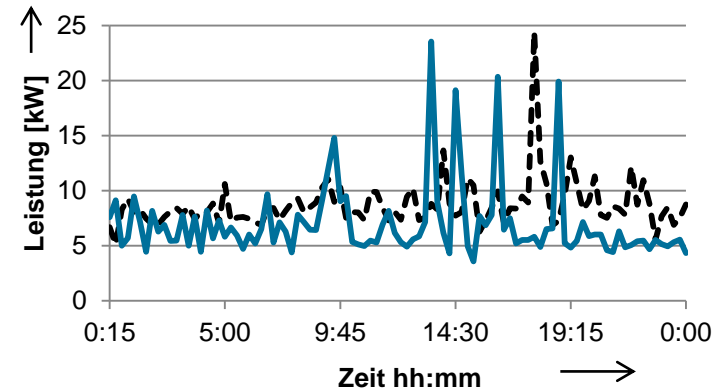
- Abweichung des realen Siedlungslastgang von der Prognose
- Abweichung des realen thermischen Lastgangs des Gebäudes von der Prognose

## Siedlungslastgang



--- Elektrischer Siedlungslastgang 02.02.2011  
— Elektrischer Siedlungslastgang 04.02.2011

## Thermischer Lastgang

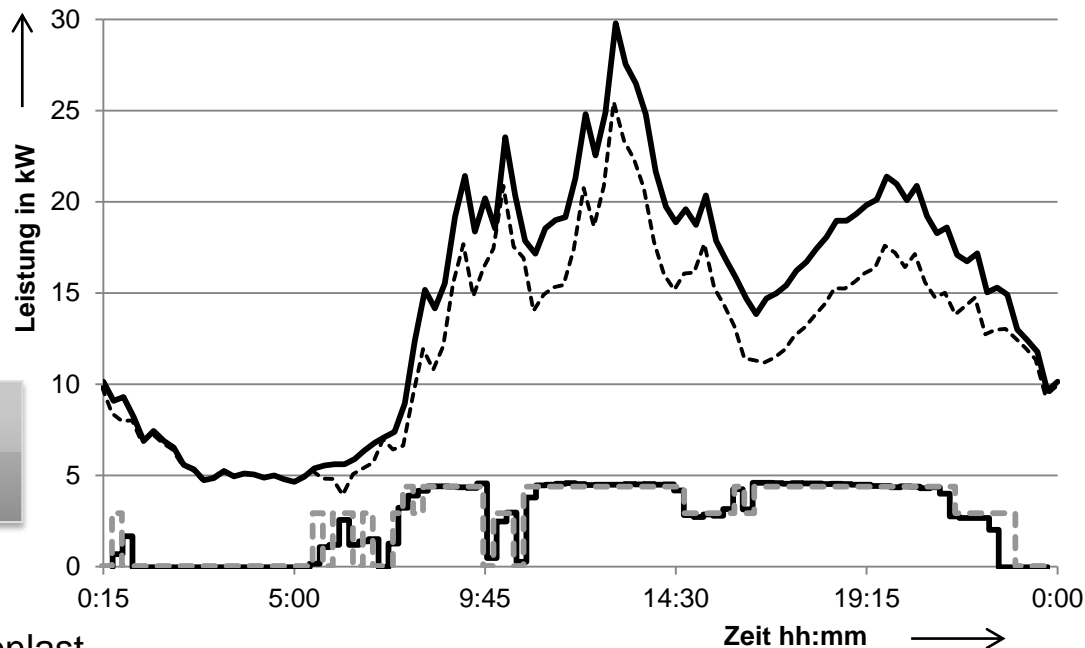


--- Thermischer Lastgang 02.02.2011  
— Thermischer Lastgang 04.02.2011

- Prognoseart der 2-Tages Lastfortschreibung ist insbesondere für den thermischen Lastverlauf nicht sehr genau

# Feldtest - Änderung des Siedungslastganges

- Aufgrund ungenauer Prognosen kann es zu Fahrplanabweichungen der BHKW kommen
- Jedoch: Trotz der Ungenauigkeiten kann der Fahrplan nahezu eingehalten werden. Ursache dafür ist der thermische Pufferspeicher



$\Delta P_d$  -11,22%

$\Delta S_d$  -8,47%

$\Delta P_d$ : Änderung Spitzenlast

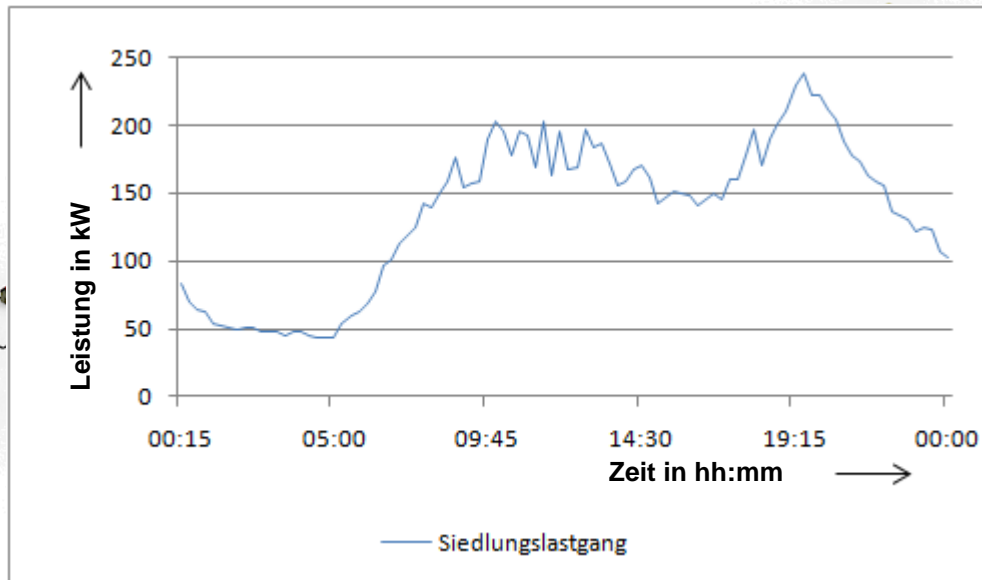
$\Delta S_d$ : Änderung Lastgangspreizung

— Fahrplan BHKW elektrisch real  
— Elektrischer Siedungslastgang 04.02.2011  
- - - Geglätteter Siedungslastgang 04.02.2011  
- - - Fahrplan BHKW (elektrisch)

# Niederspannungsnetzbezirk

## Kennzahlen

|               |                |
|---------------|----------------|
| Netzstruktur  | Siedlung in BS |
| Anzahl HA     | ca. 100        |
| Anzahl WE     | ca. 300        |
| Anzahl Trafos | 2 x 630 kVA    |



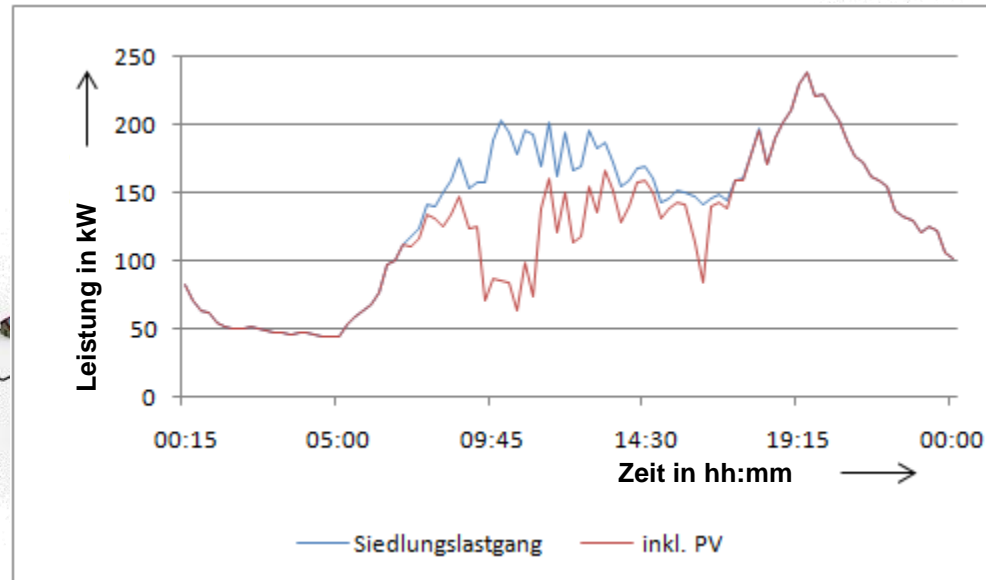
HA Hausanschluss

WE Wohneinheit

MFH Mehrfamilienhaus

RH Reihenhaus

# Berücksichtigung fluktuierender Energieumwandlung



## PV- Einspeisung

El. Leistung

7 kW

Durchdringung

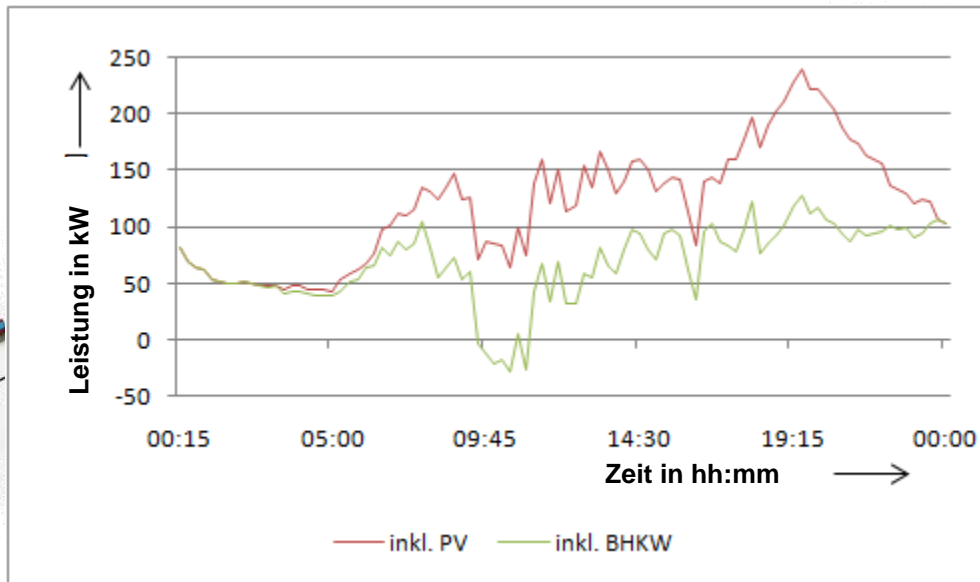
30% der HA



# Einbindung aktiv gesteuerter Mini BHKW

## Blockheizkraftwerk

|               |            |
|---------------|------------|
| Ei. Leistung  | 5 kW       |
| Durchdringung | 20% der HA |



# Auswirkungen des netzorientierten Betriebs Simulation eines Niederspannungsnetzbezirkes

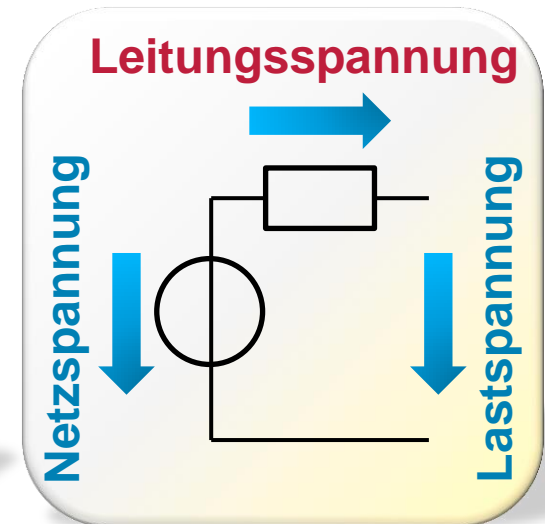
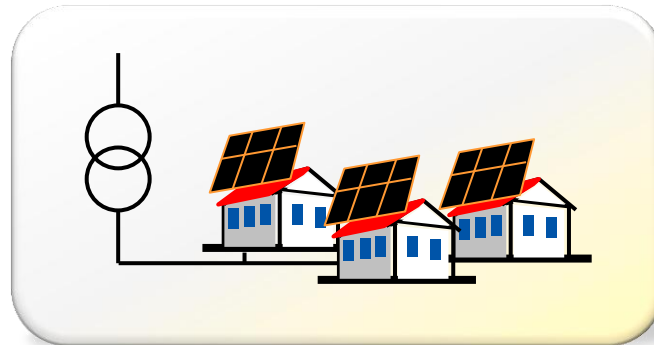
Effekte auf Siedlungslastgang (bezogen auf ein Jahr)

Anzahl der Häuser: 134  
Anzahl der Wohneinheiten: 288  
Anzahl der Mini-BHKW: 18

|                                | Wärmegeführt | Netzorientiert |
|--------------------------------|--------------|----------------|
| Spitzenlastveränderung         | - 16 %       | - 26 %         |
| Änderung der Lastgangspreizung | + 10 %       | + 2 %          |

# Zusammenfassung und Ausblick

- Der Umbau der Verteilungsnetze steht auf der Tagesordnung!
- Große Herausforderungen sind Bereitstellung von Regelleistung und Beteiligung an der Spannungshaltung im Niederspannungsnetz.
- Anlagentechnik und Netztechnik müssen ertüchtigt werden.
- In der Zukunft werden Speicher im Verteilnetz den Netzbetrieb unterstützen!





Technische  
Universität  
Braunschweig

**elentia**  
Institut für Hochspannungstechnik  
und Elektrische Energieanlagen



# Physikalisches Kolloquium: Integration von dezentralen Stromerzeugungseinheiten in das elektrische Verteilnetz

Oldenburg, 16. Juli 2012  
Prof. Michael Kurrat



# Hinzunahme vorgehaltener elektr. Speicherleistung

## Elektrische Speicher

BHKW

El. Leistung

5 kW  
(10kWh)

Durchdringung

30% der  
Anlagen

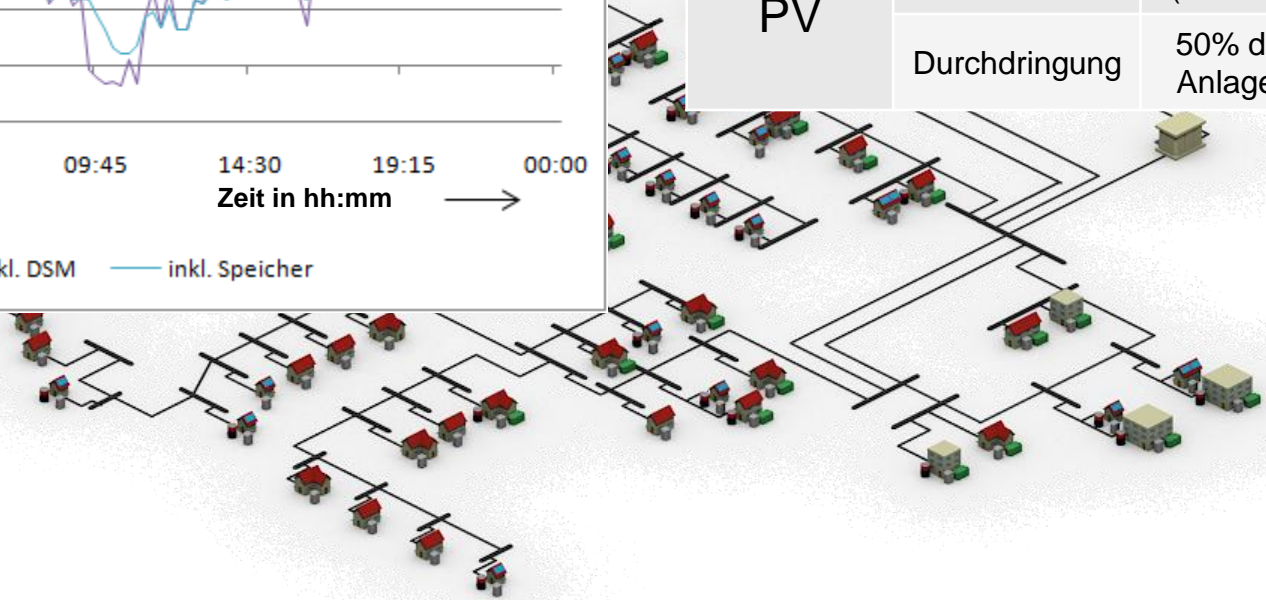
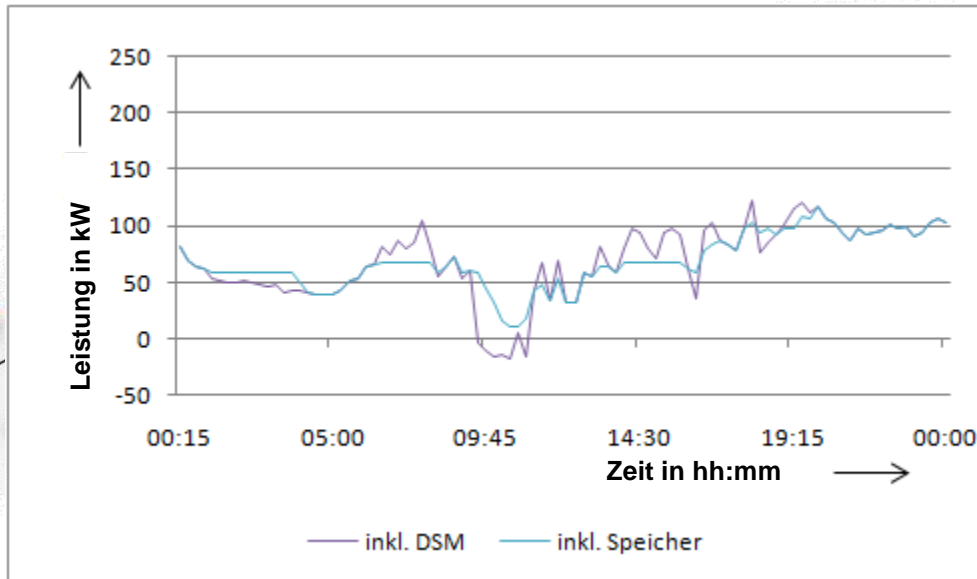
PV

El. Leistung

7 kW  
(14 kWh)

Durchdringung

50% der  
Anlagen



# Resultierender Siedlungslastgang

