

# Eine zellulare Energieversorgung - Vision oder Fiktion?



Prof. P. Schegner; Dr.-Ing. J. Dickert;  
Dipl.-Ing. N. Erdmann; Dipl.-Ing. J. Werner  
SIMLA-Forum 2016



## Vision oder Fiktion?

Science fiction aus dem Jahre 1966:

*Star Trek, Raumschiff Enterprise*

## Vision oder Fiktion?



Computer mit der  
Stimme bedienen



Übersetzung in  
alle Sprachen



Drahtlose Kommunikation

17.11.2016

<http://www.geeksandbeats.com/2016/02/star-trek-technology-today/>

3

## Agenda

### **Eine zellulare Energieversorgung - Vision oder Fiktion?**

- 1. Einführung**
- 2. Konzept des Zellularen Ansatzes**
- 3. Veränderte Rahmenbedingungen**
- 4. Ergebnisse**

17.11.2016

4

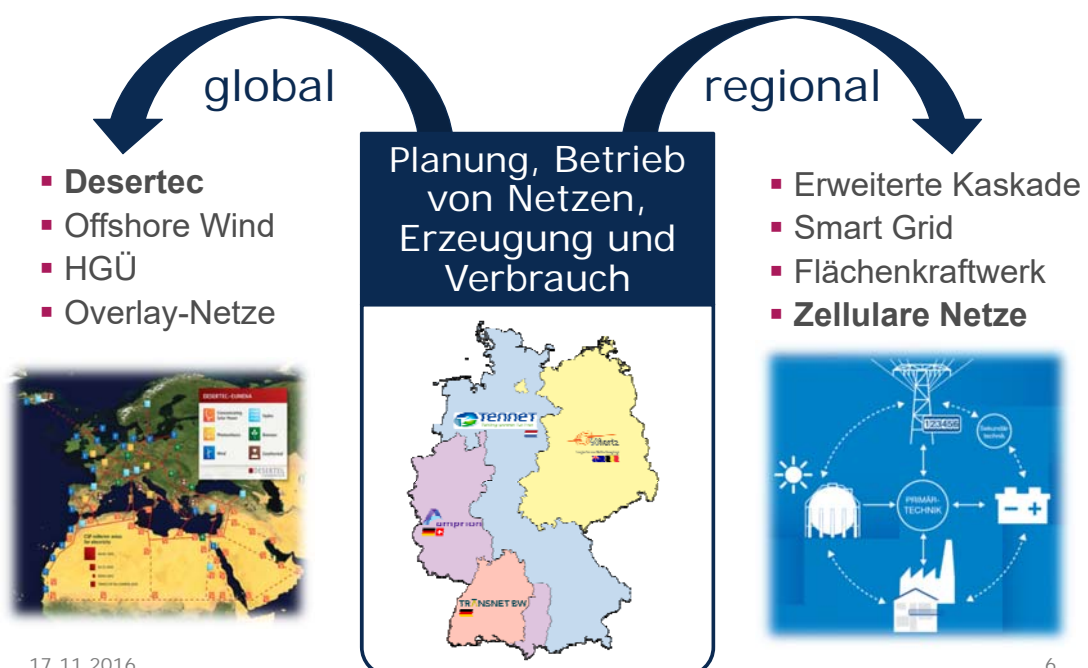
## Entwicklung der Energieversorgung



17.11.2016

5

## Zukunft der Energieversorgung

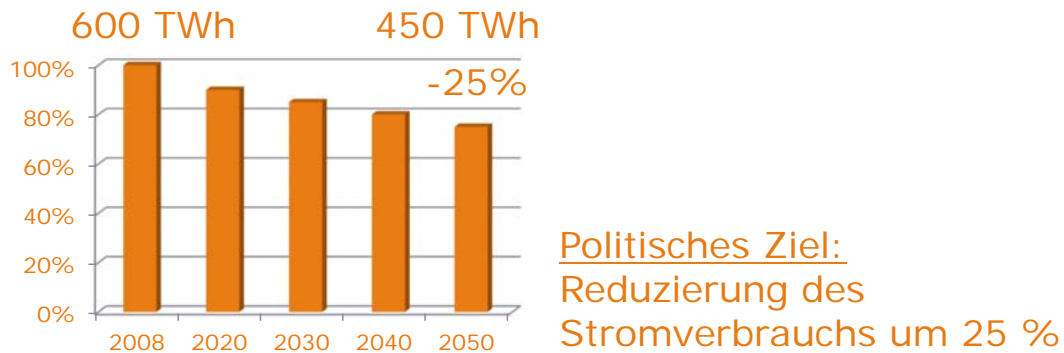


17.11.2016

6

## Thesen zur Energieversorgung 2050

### Stromverbrauch



- **These 1:** Es wird eine deutliche Erhöhung des Stromverbrauchs durch Elektromobilität, Wärmeversorgung und Klimatisierung geben!

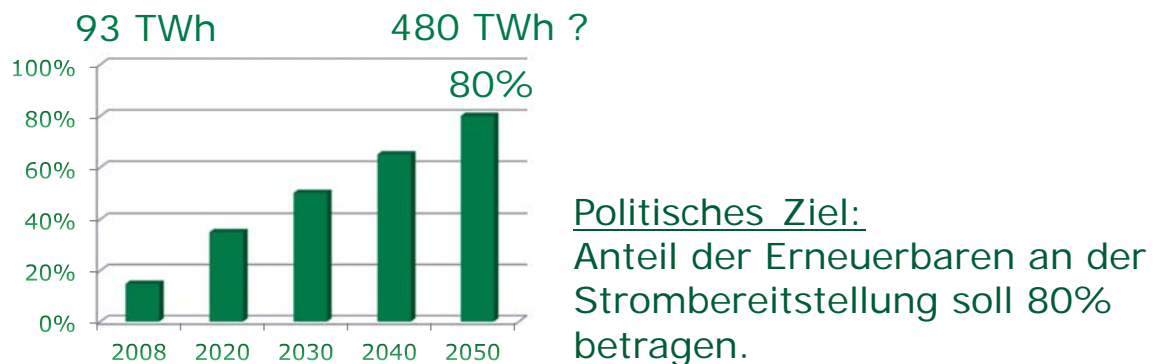
Quellen: BMWI, BMU

17.11.2016

7

## Thesen zur Energieversorgung 2050

### Erneuerbare Energien an der Strombereitstellung



- **These 2:** Zubau an Erneuerbaren im Stromsektor wird sich weiter erhöhen, da es wettbewerbsfähige Lösungen gibt.

Quellen: BMWI, BMU

17.11.2016

8

## Agenda

### Eine zellulare Energieversorgung - Vision oder Fiktion?

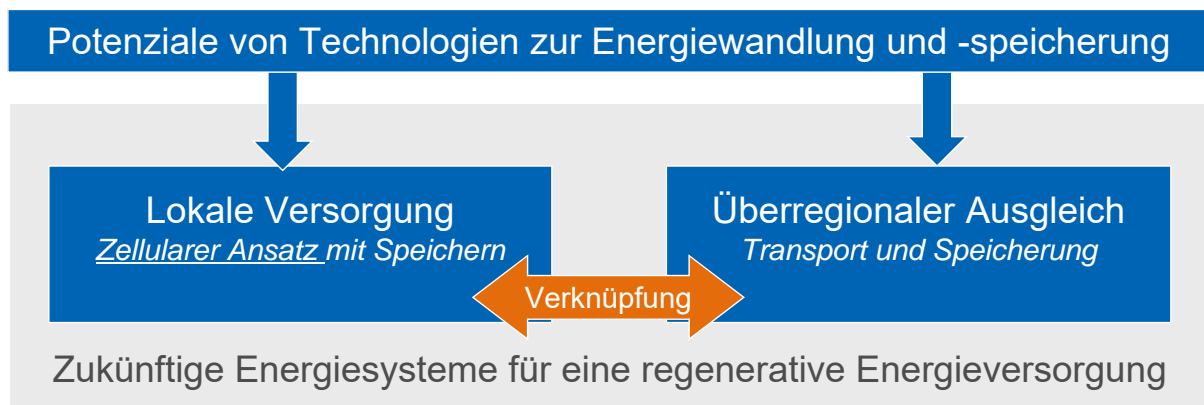
1. Einführung
2. Konzept des Zellularen Ansatzes
3. Veränderte Rahmenbedingungen
4. Ergebnisse

17.11.2016

9

## Gibt es andere Wege?

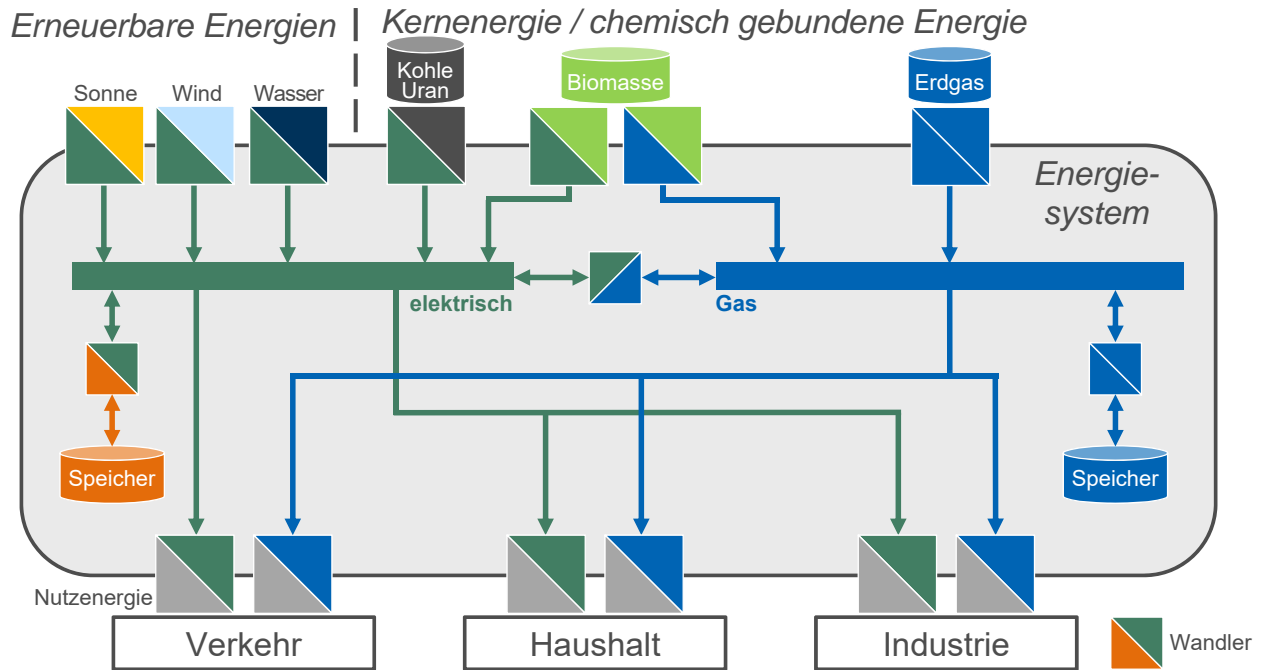
Wie sieht eine moderne Energieversorgung aus, wenn man unter Beachtung der neuen Anforderungen, aber auch unter Verwendung richtungsweisender Technologien die Struktur völlig neu konzipieren könnte?



17.11.2016

10

## Wandler und Speicher im Energiesystem



17.11.2016

11

## Technologiesteckbriefe

### Charakterisierung

|   |  |
|---|--|
| <b>Energie zuführende Wandler (Erzeugung)</b> | <p>Führen dem System Energie zu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezugsenergie: Erneuerbare Energien (Wind, Sonne), fossile Energie (Kohle, Erdgas)</li> <li>• Zielenergie: Elektrizität, Gas, Wärme</li> </ul> <p>z.B. Windkraftanlagen, PV-Anlagen, Großkraftwerke, BHKW</p> |
| <b>Energie konditionierende Wandler</b>       | <p>Führen Wandlung von einer in eine andere Energieform im System durch</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezugs- bzw. Zielenergie: Elektrizität, Gas</li> </ul> <p>z.B. Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Transformatoren</p>  |
| <b>Energie abführende Wandler (Lasten)</b>    | <p>Entnehmen dem System Energie</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezugsenergie: Elektrizität, Gas</li> <li>• Zielenergie: Nutzenergie - z.B. Licht, mechanische Energie, Wärme, Kälte</li> </ul> <p>z.B. Wärmepumpen, Motoren</p>  |
| <b>Energie-Speicher</b>                       | <p>Vorhaltung von Energie für Zeiten geringer regenerativer Erzeugung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezugs- bzw. Zielenergie: Elektrizität, Gas</li> </ul> <p>z.B.: Batterien, Pumpspeicherkraftwerke, Gasspeicher</p>  |

17.11.2016

12

## Technologiesteckbriefe

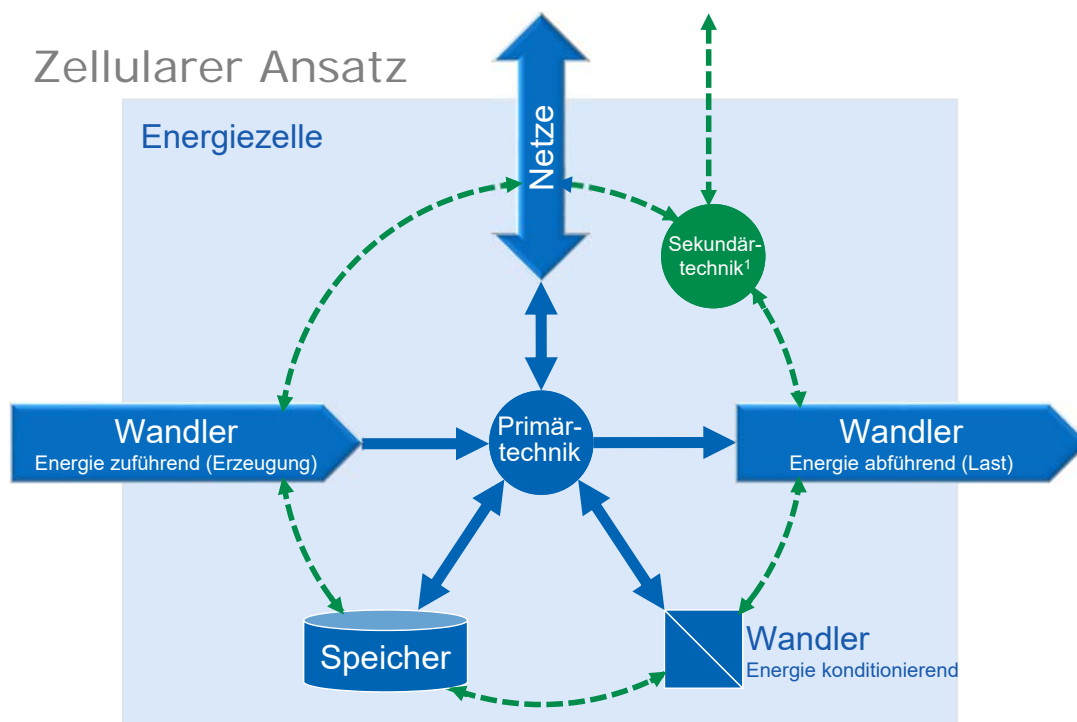
### Beispiele

| Klasse  | Energie zuführende Wandler                                  | Energie konditionierende Wandler                            | Energiespeicher   |
|---|---|---|---|
| <b>Typ</b>  | Photovoltaik-Anlage   | P2G: Elektrolyseur  | Lithium-Ionen-Batterie                                      |
| <b>Varianten</b>                                      | Mono-/ poly-kristallines Silizium<br>Dünnschichtzellen, ... |   | Lithium-Eisenphosphat,<br>Lithium-Titanat, ...              |
| <b>Bezugsenergie</b>                                  | Sonnenlicht   | Elektrizität  | Elektrizität  |
| <b>Zielenergie</b>                                    | Elektrizität  | Wasserstoff H <sub>2</sub>                                  | Elektrizität  |
| <b>Wirkungsgrad</b>                                   | 5% – 20%  | 75%   | Laden/Entladen: 97%,<br>Umrichter: 99%                      |
|   | Weiterentwicklung: 40%                                      | Ziel: >80%  | Gesamt: 92%   |
| <b>Leistungsklasse</b><br>(bei Speicher auch Energie) | 100 W – MW  | kW – MW   | 0,02 kW – 2 MW<br>0,01 kWh – 1 MWh<br>(beliebig skalierbar) |
| <b>Flexibilität des Anschlusses</b>                   | ele: Umrichter  | ele: gut<br>Gas: H <sub>2</sub> -Anteil<br>(lokal begrenzt) | AC, DC, U, f<br>(abh. vom Umrichter)                        |

17.11.2016

13

### Zellularer Ansatz



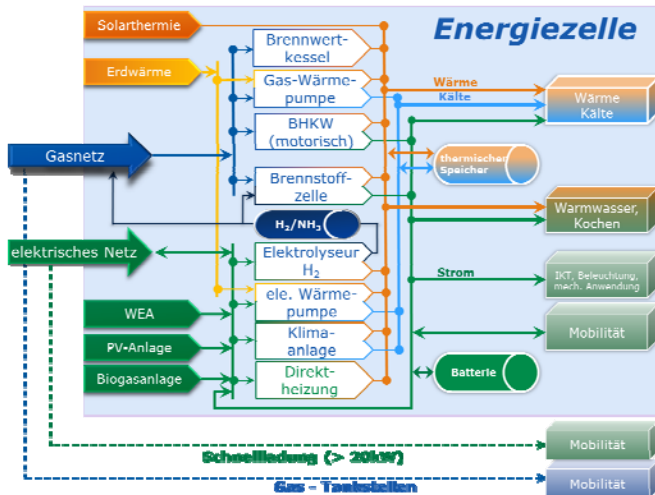
1. Ausgleich von Erzeugung und Last auf der *niedrigsten* möglichen Ebene
2. Beteiligung an Systemdienstleistungen
3. Neue Organisationsstruktur der Energieversorgung

17.11.2016

14

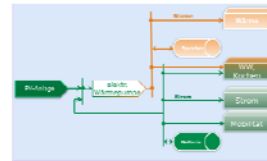
# Energiezellen

## Energiezellen Voll-Ausstattung

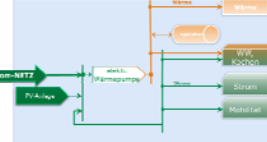


17.11.2016

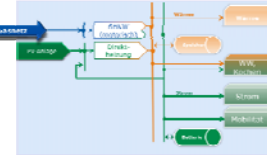
## Autarke EZ



## EZ mit elektr. Netzanschluss



## EZ mit Gasanschluss



15

# Energiezellen

## Typen von Energiezellen

### Haushalt

- Einfamilienhäuser
- Reihenhäuser
- Mehrfamilienhäuser
- Blockbebauung
- Hochhäuser

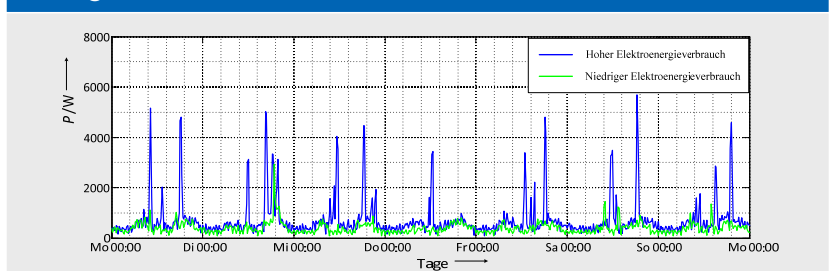
### Gewerbe-Handel-Dienstleistungen

- Gewerbeunternehmen
- Handel (z.B. Supermarkt)

### Industrie

- kleine Industriebetriebe
- Industriegebiet
- Industriepark

## Energetische Simulation für ein Jahr



17.11.2016

## Bilanzielle Betrachtungen

- individuelle Anforderungen verschiedener Industrien
- keine allgemeingültigen Aussagen möglich
- umfangreiches Portfolio an einsetzbaren Technologien

16

## Haushaltszelle

### Details zur Simulation

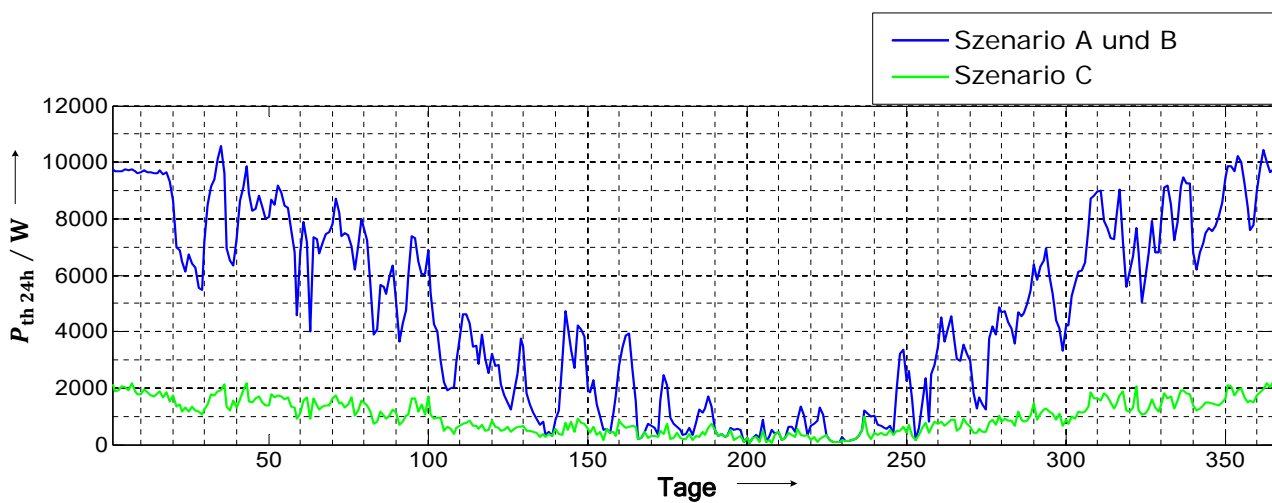
|                                 | Szenario A<br>Ausgangslage                     | Szenario B<br>Elektromobilität                 | Szenario C<br>Gebäudesanierung                 |
|---------------------------------|--|--|--|
| Mobilität                       | extern   | elektrisch, 50 km/d                            | elektrisch, 50 km/d                            |
| Gebäudetyp                      | WSVO 77  | WSVO 77  | KfW-Effizienzhaus 55                           |
| Wärmebedarf                     | $Q_{\text{Bed}} = 40,465 \text{ kWh/a}$        | $Q_{\text{Bed}} = 40,465 \text{ kWh/a}$        | $Q_{\text{Bed}} = 8,455 \text{ kWh/a}$         |
| Thermischer<br>Energiespeicher  | -  | $Q_{\text{Sp}} = 47 \dots 70 \text{ kWh}$      | $Q_{\text{Sp}} = 47 \dots 70 \text{ kWh}$      |
| PV-Anlage                       | $P_{\text{r peak}} = 3,8 \dots 5,1 \text{ kW}$ | $P_{\text{r peak}} = 5,1 \dots 6,3 \text{ kW}$ | $P_{\text{r peak}} = 5,1 \dots 6,3 \text{ kW}$ |
| Elektrischer<br>Energiespeicher | -  | $E_{\text{Sp}} = 45 \text{ kWh}$               | $E_{\text{Sp}} = 45 \text{ kWh}$               |

17.11.2016

17

## Haushaltszelle

### Thermischer Jahreslastgang für Gesamtwärmebedarf

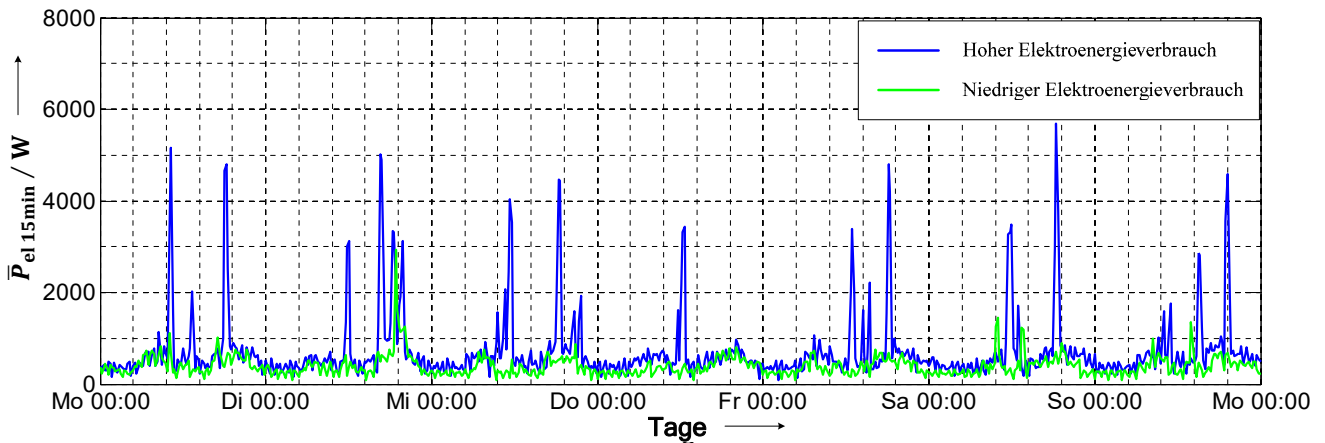


17.11.2016

18

## Haushaltszelle

### Elektrische Wochenlastgang



17.11.2016

19

## Haushaltszelle

### Wochenbetrachtung für EZ mit elektr. Netzanschluss

|                         |                                      | Szenario A<br>Ausgangslage |      | Szenario B<br>Elektromobilität |      | Szenario C<br>Gebäudesanierung |      |
|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
| Elektroenergieverbrauch |                                      | niedrig                    | hoch | niedrig                        | hoch | niedrig                        | hoch |
| Winter                  | Energiebezug Strom<br>in kWh/Woche   | 414                        | 461  | 467                            | 521  | 177                            | 230  |
|                         | Einspeisung Strom<br>in kWh/Woche    | 1                          | 1    | 1                              | 1    | 1                              | 1    |
|                         | Spitzenleistung Bezug<br>in kW       | 4,9                        | 7,9  | 7,6                            | 8,2  | 5,8                            | 7,9  |
|                         | Spitzenleistung Einspeisung<br>in kW | 1                          | 1    | 1,1                            | 0,9  | 1,1                            | 0,8  |
| Sommer                  | Energiebezug Strom<br>in kWh/Woche   | 23                         | 52   | 76                             | 105  | 75                             | 104  |
|                         | Einspeisung Strom<br>in kWh/Woche    | 268                        | 237  | 268                            | 237  | 271                            | 239  |
|                         | Spitzenleistung Bezug<br>in kW       | 0,8                        | 6,2  | 4,1                            | 6,2  | 4,1                            | 6,2  |
|                         | Spitzenleistung Einspeisung<br>in kW | 7,6                        | 7,4  | 7,9                            | 7,3  | 7,9                            | 7,2  |

17.11.2016

20

## Zellularer Ansatz: Ergebnisse

### Haushalt

- Autarkie möglich  
*nur bei Einfamilienhäusern und Reihenhäusern*
- elektr. Netzanschluss  
*Erhöhung der Anforderungen durch E-mobilität, EE-Anlagen, Wärmepumpen*
- Gasanschluss  
*Rückspeisefähigkeit & flexible Gaszusammensetzung*

### Gewerbe-Handel-Dienstleistungen

- Autarkie kaum möglich
- elektr. Netzanschluss  
*Erhöhung der Anforderungen durch E-mobilität, EE-Anlagen,*

### Industrie

- Autarkie nicht möglich
- Netzanschluss  
*benötigt immer eine externe Energiezufuhr*

Ergebnisse zeigen Erfordernisse für überregionalen Energieausgleich

17.11.2016

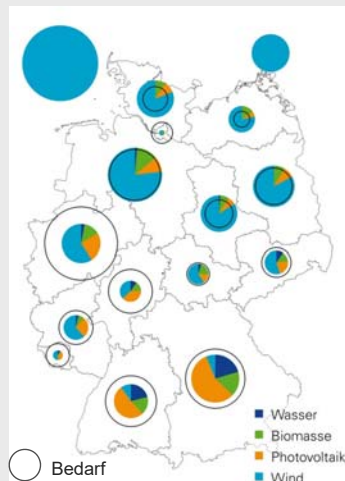
21

## Überregionaler Energieausgleich Methodik

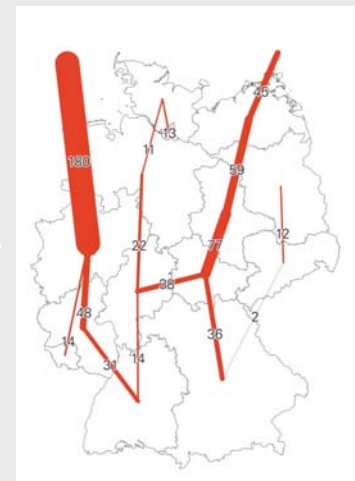
### Verbindungskorridore



### Energieausgleich



### Übertragungskorridore



17.11.2016

22

# Überregionaler Energieausgleich

## Annahmen

### Allgemeine Annahmen

- Betrachtungszeitraum: 1 Jahr – es wird nur die Energie bilanziert
- Betrachtungsbereich: Deutschland aufgeteilt in 16 Regionen
- 700 TWh/a elektrische Energie aus erneuerbaren Energieträgern
- Keine Aussagen zu Energieformen oder Energieübertragungssystemen bzw. Leistungsanforderungen

### Ansatz A

- Weiterschreibung des EE-Zubaus an PV-Anlagen und Onshore WEA
- Skalierung von PV und Onshore WEA anhand der Verteilung der Anlagen in 2011
- Massiver Zubau an Offshore WEA (225 TWh/a)
  - Nordsee: 40 GW
  - Ostsee: 10 GW

17.11.2016

### Ansatz B

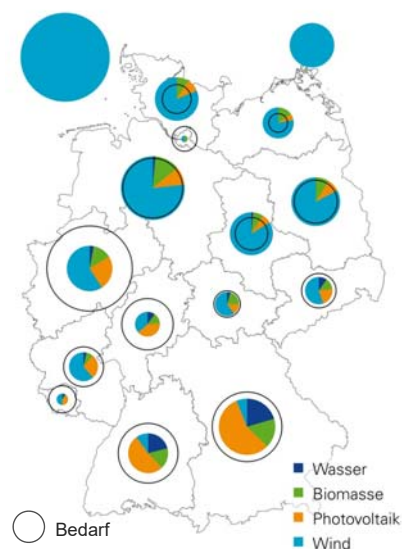
- Verbrauchernaher EE-Zubau an PV-Anlagen und Onshore WEA
- Zubau von PV-Anlagen und Onshore WEA anhand der potenziell nutzbaren Flächen
- Moderater Zubau an Offshore WEA (56 TWh/a)
  - Nordsee: 10 GW
  - Ostsee: 2,5 GW

23

# Überregionaler Energieausgleich

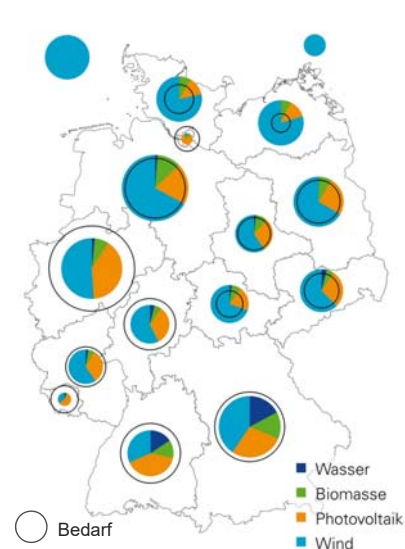
## Ergebnisse – Energieausgleich

### Ansatz A



17.11.2016

### Ansatz B



24

# Überregionaler Energieausgleich

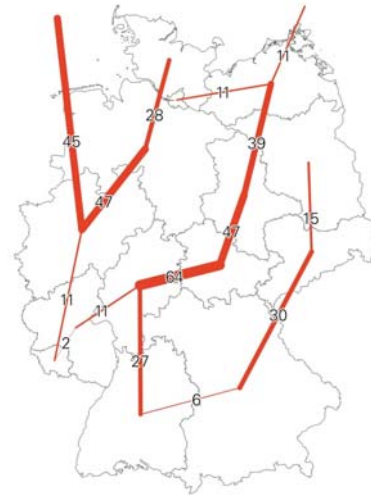
Ergebnisse – Übertragungskorridore (in TWh/a)

**Ansatz A**

**Ansatz B**



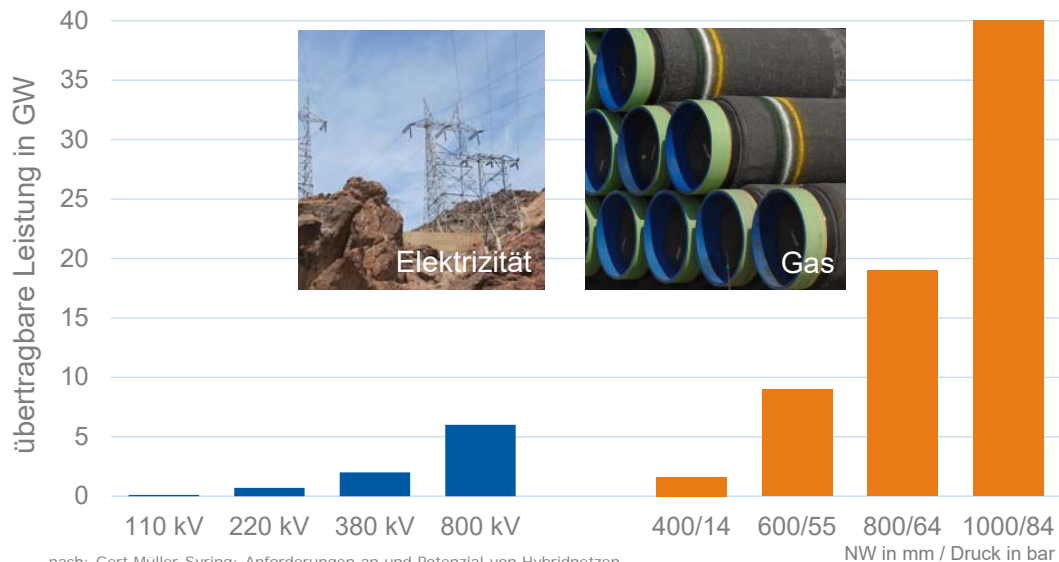
17.11.2016



25

# Überregionaler Energieausgleich

Vergleich der Übertragungsfähigkeit



nach: Gert Müller-Syring: Anforderungen an und Potenzial von Hybridnetzen  
Fachgespräch „IKT-basiertes Energie-Hybridnetz der Zukunft“; Berlin, 29. November 2011

17.11.2016

26

## Agenda

### Eine zellulare Energieversorgung - Vision oder Fiktion?

1. Einführung
2. Konzept des Zellularen Ansatzes
3. Veränderte Rahmenbedingungen
4. Ergebnisse

17.11.2016

27

#### Energiebereitstellung im Ansatz B für Bayern:

|                 |           |
|-----------------|-----------|
| ■ Wasserkraft:  | 7655 GWh  |
| ■ Biomasse:     | 6399 GWh  |
| ■ Photovoltaik: | 23865 GWh |
| ■ Windkraft:    | 58711 GWh |



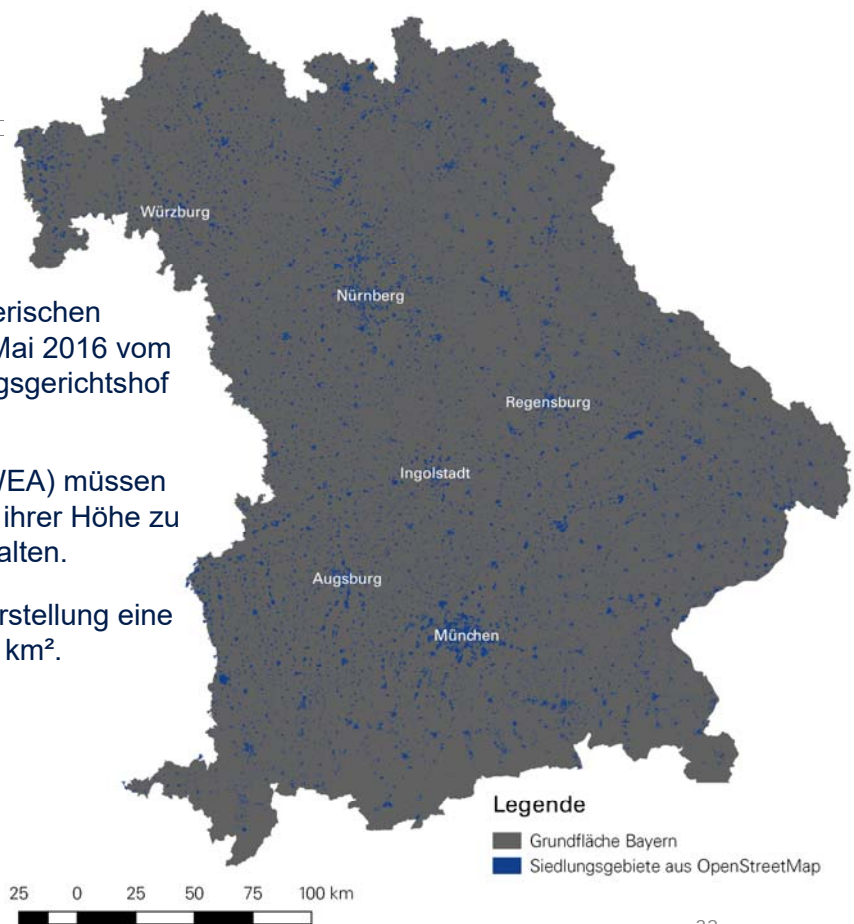
17.11.2016

31

10H-Regelung der Bayerischen Bauordnung wurde im Mai 2016 vom Bayerischen Verfassungsgerichtshof bestätigt.

Windenergieanlagen (WEA) müssen den 10-fachen Abstand ihrer Höhe zu Siedlungsgebieten einhalten.

Bayern hat in dieser Darstellung eine Grundfläche von 70415 km<sup>2</sup>.



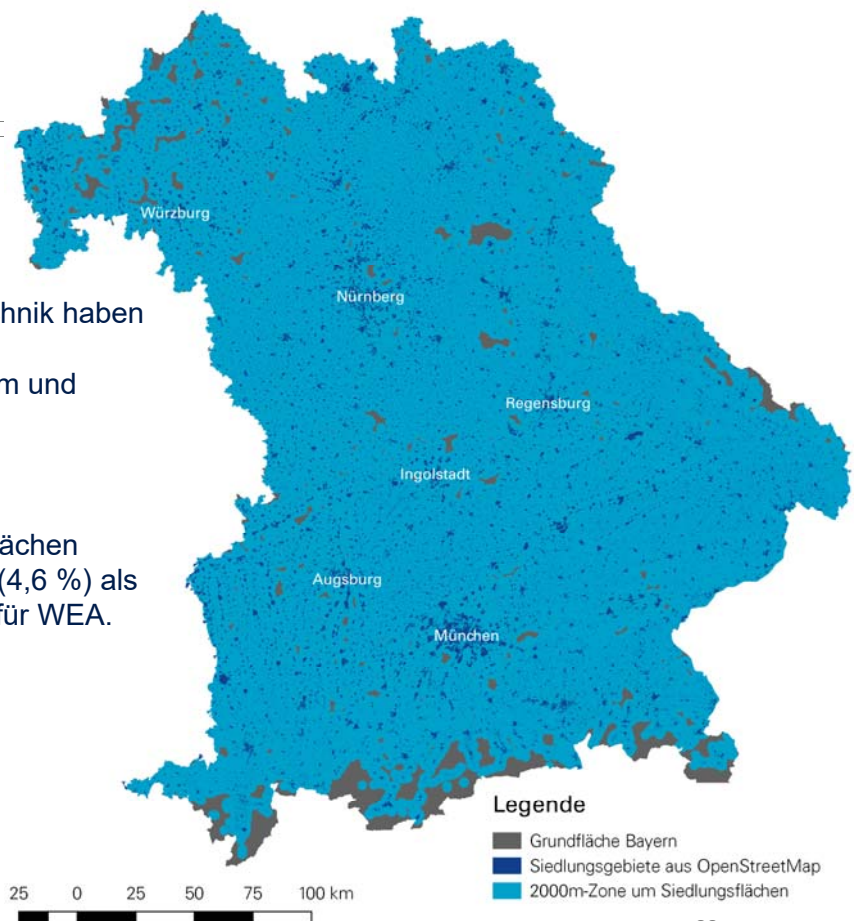
17.11.2016

32

WEA auf Stand der Technik haben Nabenhöhe von 130 m, Rotorblattlänge von 70 m und Leistung von 3 MW.

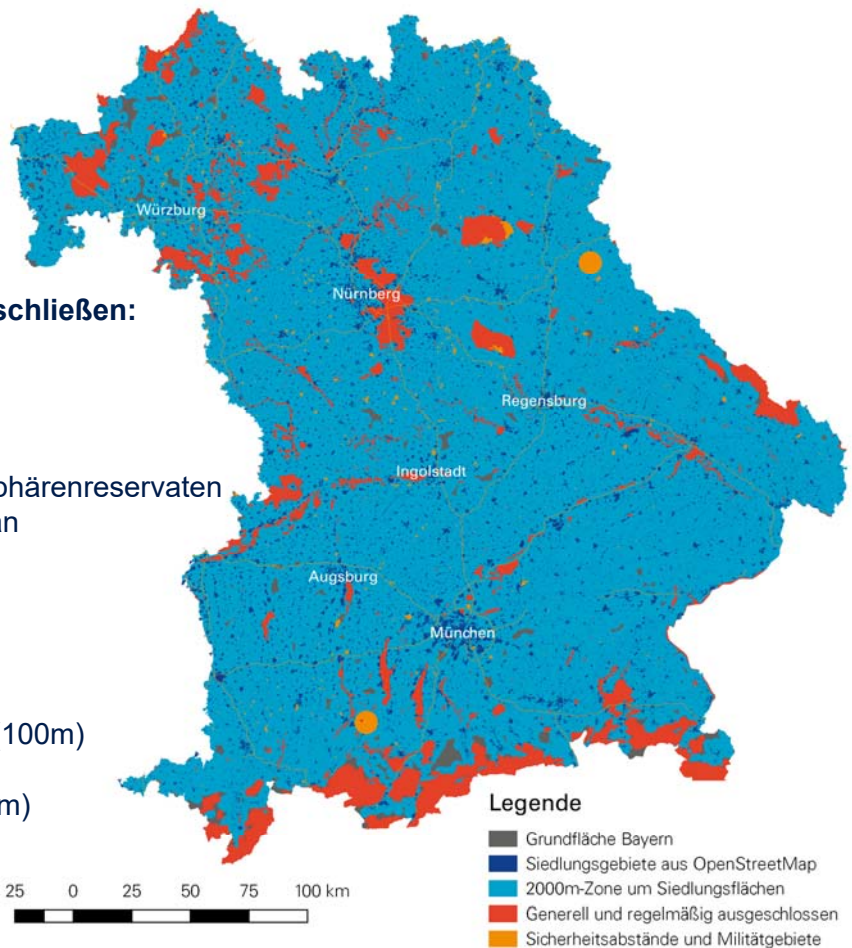
10H entspricht 2000 m

Nach Abzug der 10H-Flächen bleiben noch 3260 km<sup>2</sup> (4,6 %) als potenzielle Bauflächen für WEA.



17.11.2016

33



**Zusätzlich sind auszuschließen:**

generell

- Nationalparke
- Naturschutzgebiete
- Kernzonen von Biosphärenreservaten
- Zone C des Alpenplan

regelmäßig

- Vogelschutzgebiete

Sicherheitsabstände

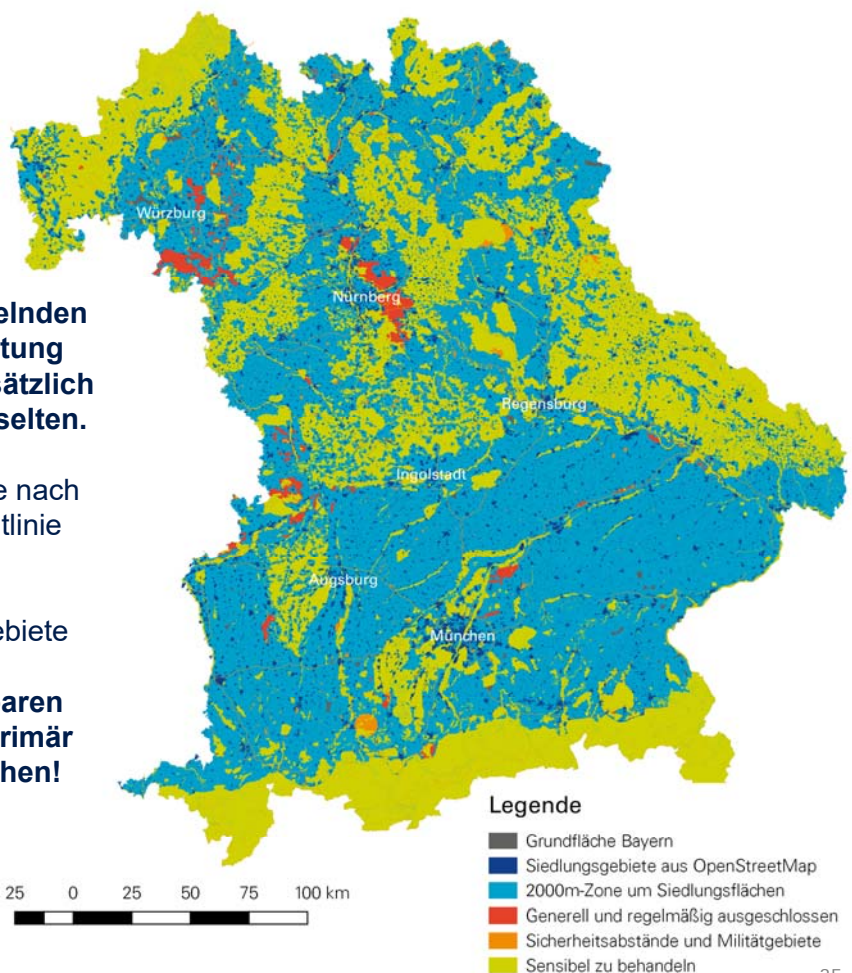
- Bundesautobahnen (100m)
- WEA (300m)
- Radaranlagen (5000m)

**Legende**

- Grundfläche Bayern
- Siedlungsgebiete aus OpenStreetMap
- 2000m-Zone um Siedlungsflächen
- Generell und regelmäßig ausgeschlossen
- Sicherheitsabstände und Militärgebiete

17.11.2016

34



**In sensibel zu behandelnden  
Gebieten ist die Errichtung  
von WEA nicht grundsätzlich  
ausgeschlossen aber selten.**

- Flora-Fauna-Habitate nach der Natura2000-Richtlinie
- Alle Bereiche der Biosphärenreservate
- Landschaftsschutzgebiete

**Die jetzt noch erkennbaren  
grauen Flächen sind primär  
für neue WEA vorzusehen!**

**Legende**

- Grundfläche Bayern
- Siedlungsgebiete aus OpenStreetMap
- 2000m-Zone um Siedlungsflächen
- Generell und regelmäßig ausgeschlossen
- Sicherheitsabstände und Militärgebiete
- Sensibel zu behandeln

17.11.2016

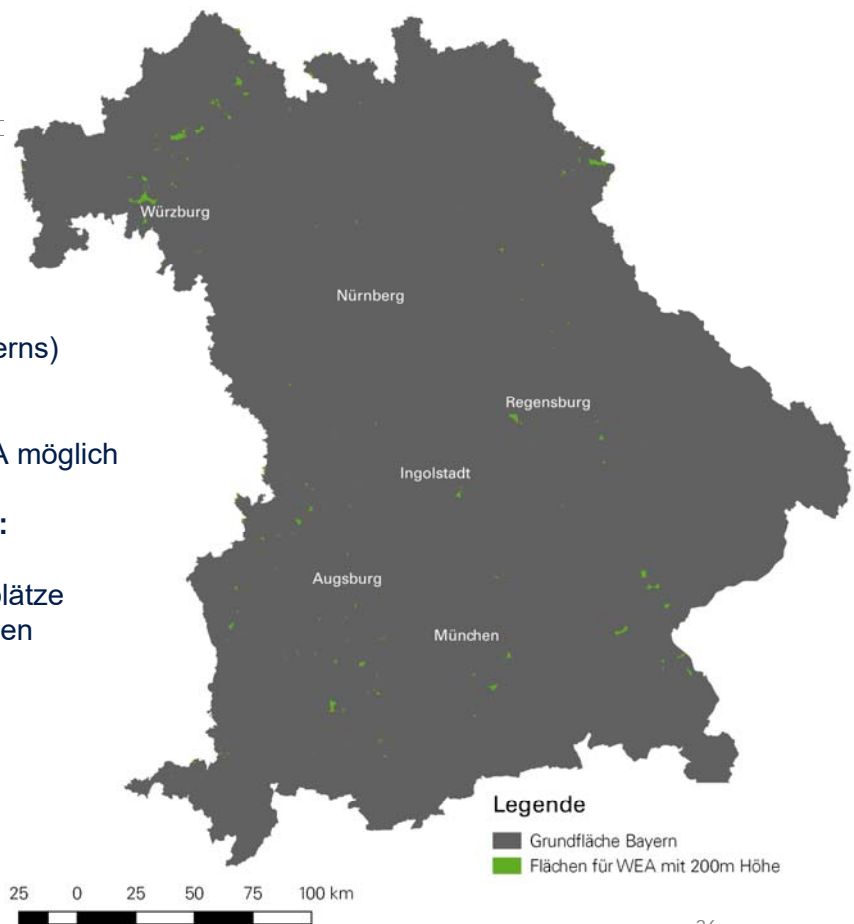
35

**Die Flächen für WEA:**

- 220 km<sup>2</sup> (0,3 % Bayerns)
- 241 Einzelflächen
- 50 % nur eine WEA
- theoretisch 850 WEA möglich

**aber unberücksichtigt:**

- Waldflächen
- Flughäfen und Flugplätze
- Richtfunkverbindungen
- Schienenverkehr
- Vogelzuggebiete
- Untergrund
- Windprognose



17.11.2016

36

## Folgen für die Energiebereitstellung

**Möglich Jahresenergiemenge mit 10H:**

$$(850 \text{ WEA} + 851 \text{ WEA}) \cdot 1500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 3 \frac{\text{MW}}{\text{WEA}} = 7655 \text{ GWh} < 58711 \text{ GWh}$$

**Durch technischen Fortschritt:**

$$(850 \text{ WEA} + 851 \text{ WEA}) \cdot 2000 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 5 \frac{\text{MW}}{\text{WEA}} = 17010 \text{ GWh} < 58711 \text{ GWh}$$

**Durch Reduzierung von 10H auf 5H:**

$$(16000 \text{ WEA} + 851 \text{ WEA}) \cdot 1500 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 3 \frac{\text{MW}}{\text{WEA}} = 75830 \text{ GWh} > 58711 \text{ GWh}$$

17.11.2016

37

## Agenda

### Eine zellulare Energieversorgung - Vision oder Fiktion?

1. Einführung
2. Konzept des Zellularen Ansatzes
3. Veränderte Rahmenbedingungen
4. Ergebnisse

17.11.2016

38

## Feldtesterprobung Regionales Virtuelles Kraftwerk

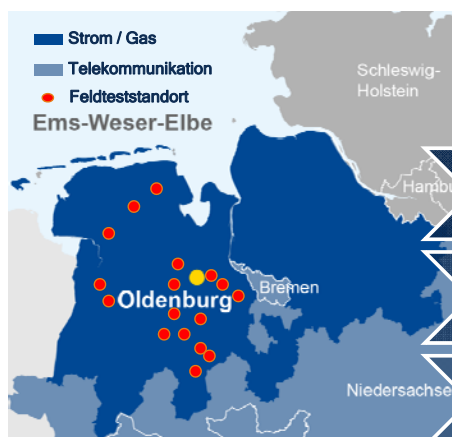
Projekt: „Regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mikro-KWK-Technologie – Schwerpunkte: Monitoring und Auswertung“  
 (FKZ: 03ET1280A)

Dauer: 12/2014 – 11/2017

Partner:  
 EWE AG



Gefördert durch:  
  
 aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages



**Regionales Energiecluster** mit steuerbaren Erzeugern ( $\mu$ KWK) und Verbrauchern (elektr. DH)

Prakt. Realisierung der Sektorkopplung  
**Strom <-> Wärme**

Erprobung verschiedener Anwendungsfälle unter Nutzung gebündelter, dezentraler **Flexibilitätpotentiale**

17.11.2016

39



## Feldtesterprobung Regionales Virtuelles Kraftwerk

### Anwendungsfälle:



17.11.2016

42

## Zellulare Energiesystems

### Merkmale und deren Erfüllung am Beispiel RVK

| Energetisch  | Betriebsweise   | Organisation   |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Energieträgerübergreifend</li> <li>✓ Anwendung neuer Energiewandlungstechnologien</li> <li>✓ Leistungsbereich von kW bis einige hundert MW</li> <li>✓ Begrenzte räumliche Ausdehnung</li> <li>○ Energetische Verknüpfung mit anderen Zellen</li> <li>○ Mehrere Zellen bilden übergeordnete Zelle</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Energiebilanzierung auf lokal niedrigstem Niveau</li> <li>✓ Hohe lokale informationstechnische Verknüpfung und Automatisierung</li> <li>✓ Erfüllt lokale und globale Restriktionen</li> <li>○ Selbstoptimierend</li> <li>✓ Aggregierter Informationsaustausch mit andern Zellen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Marktdesign und Rollenverteilung</li> <li>✓ „Befriedigung“ emotionaler Bedürfnisse</li> <li>✓ Erfüllung spezifischer technischer Anforderungen</li> <li>○ Stärkere finanzielle Eigenbeteiligung</li> <li>✓ Verknüpfung mit übergeordneten Marktplätzen</li> </ul> |

17.11.2016

43

---

## Zellularer Ansatz

### Eigenschaften

- Keine eindeutige Begriffsdefinition, unterschiedliche Bezeichnungen
  - Energie-Zelle
  - Energie-Wabe
- „Biologische Sicht“ auf das Energiesystem
  - „Vegetative Komponente“ der Energiezellen steuert die lebenswichtigen Funktionen  
→ Autonome Sicherung der Systemfunktion
  - „Somatische Komponente“ ermöglicht die bewusste Lenkung von Reaktionen  
→ Gezielte Beeinflussung und Steuerung
  - „Zentrale Komponente“ macht Vorgaben  
→ Übergeordnete Steuerstelle zwingend notwendig

17.11.2016

44

## Schlussfolgerungen

### Global oder regional?

- **Fazit 1:** Die Nutzung der Erneuerbaren kann zukünftig nicht mehr ertragsoptimiert, sondern muss systemdienlich erfolgen!
- **Fazit 2:** Der zellulare Ansatz ermöglicht die systemdienliche Integration von dezentraler Erzeugung und Verbrauch!
- **Fazit 3:** Der zellulare Ansatz bedingt einen überregionalen Energietransport und Informationsaustausch!

24.10.2016

45

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Prof. Dr.-Ing. P. Schegner  
TU Dresden – IEEH  
+49 352 463 34374

[peter.schegner@tu-dresden.de](mailto:peter.schegner@tu-dresden.de)

17.11.2016

46