

## Technische Möglichkeiten der Flexibilisierung

**Klaus Görner** - Universität Duisburg-Essen, LUAT  
 Prof. Dr.-Ing. Rhein Ruhr Power e.V.  
 Netzwerk Kraftwerkstechnik der EnergieAgentur.NRW  
 Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.  
 VDI - Fachgesellschaft Energie und Umwelt VDI-GEU.

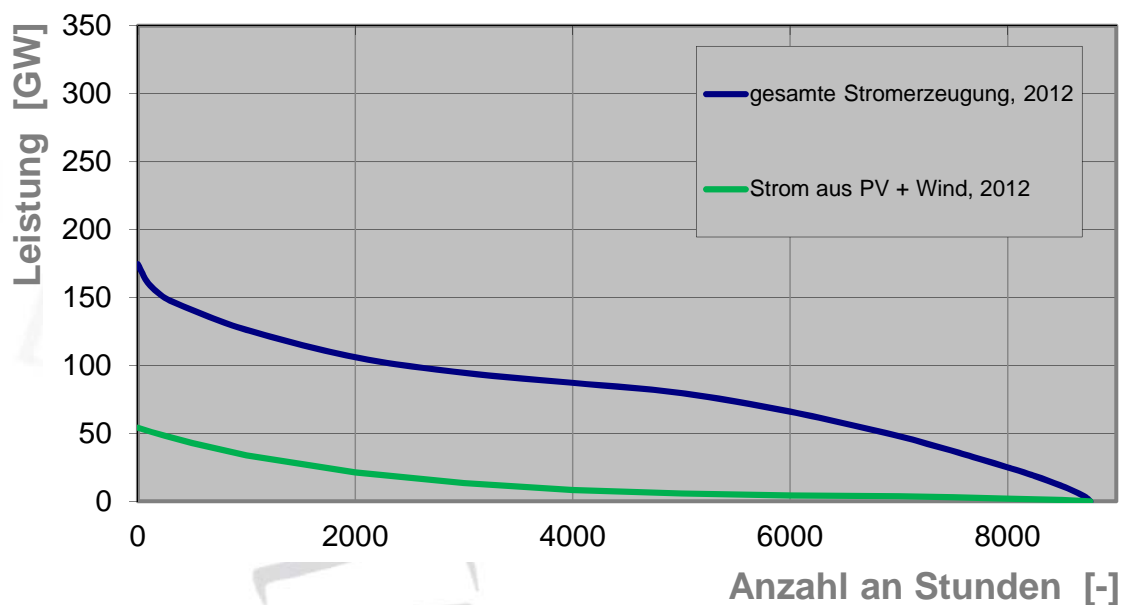
**BMWi** - AG Flexibilität der Plattform Strommarkt

19. August 2014 | BMWi, Berlin

[www.rhein-ruhr-power.net](http://www.rhein-ruhr-power.net)

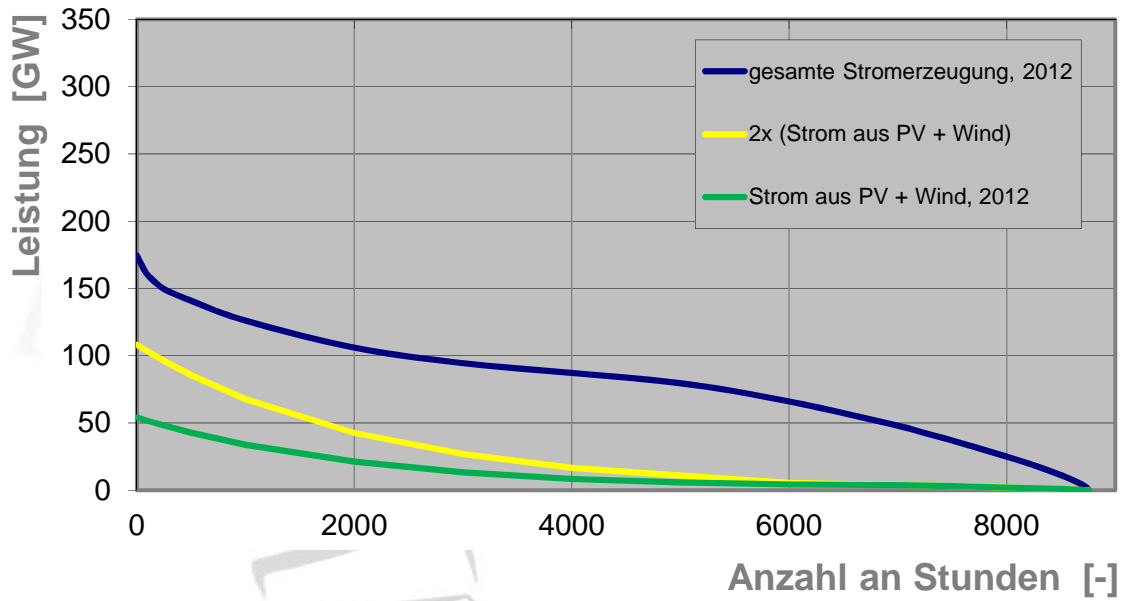
### Stromerzeugungsportfolio

Jahresdauerlinien (gesamt, PV+Wind) für 2012



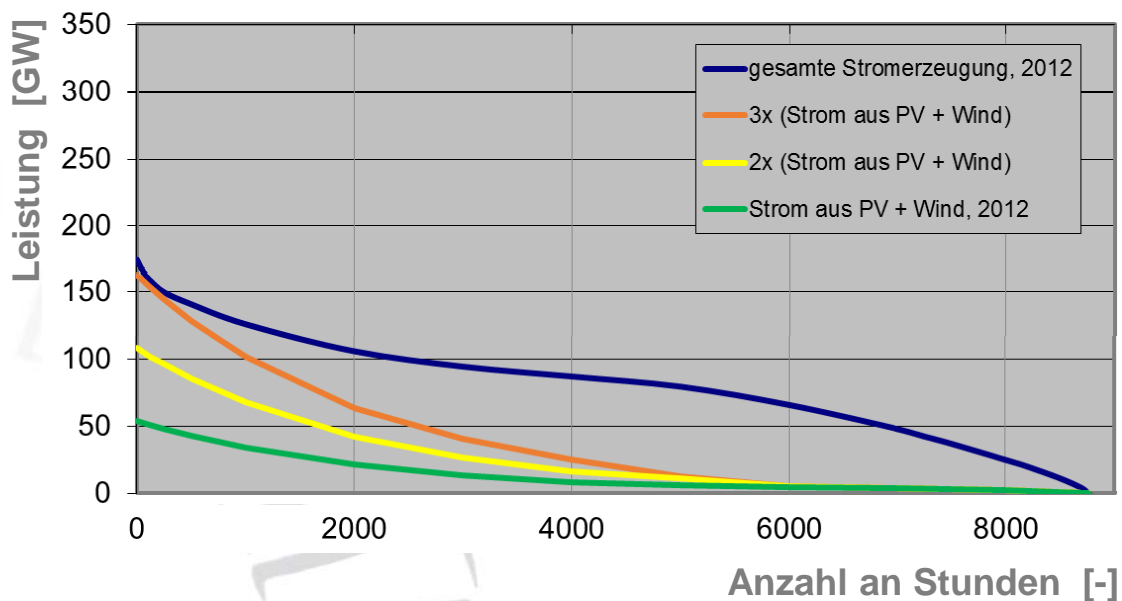
# Stromerzeugungsportfolio

Jahresdauerlinien (gesamt, PV+Wind und hypothet. Kapazitätsausbau)



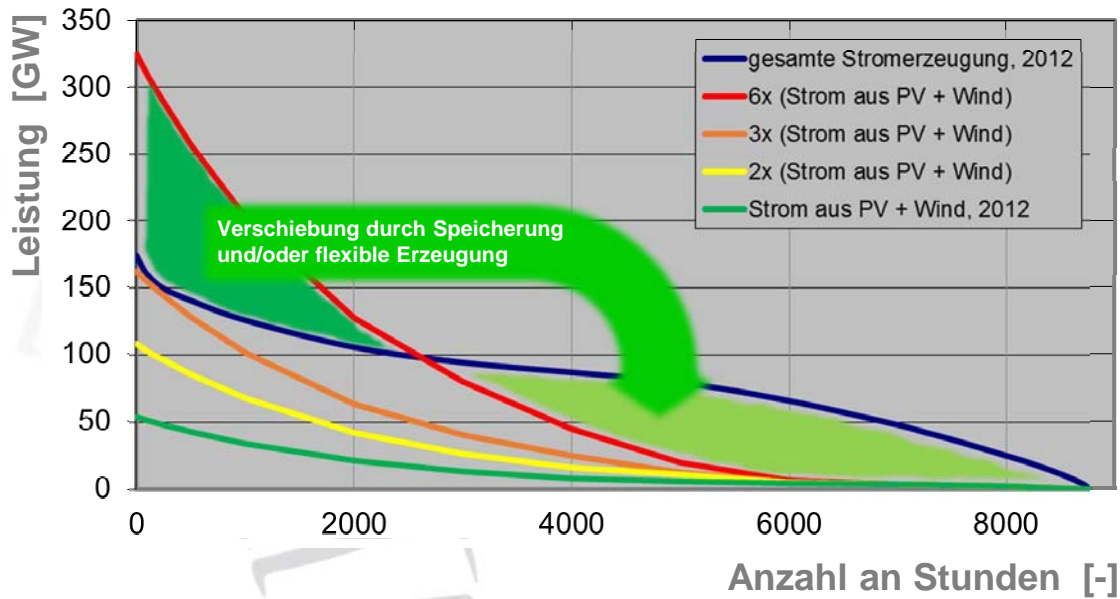
# Stromerzeugungsportfolio

Jahresdauerlinien (gesamt, PV+Wind und hypothet. Kapazitätsausbau)



# Stromerzeugungsportfolio

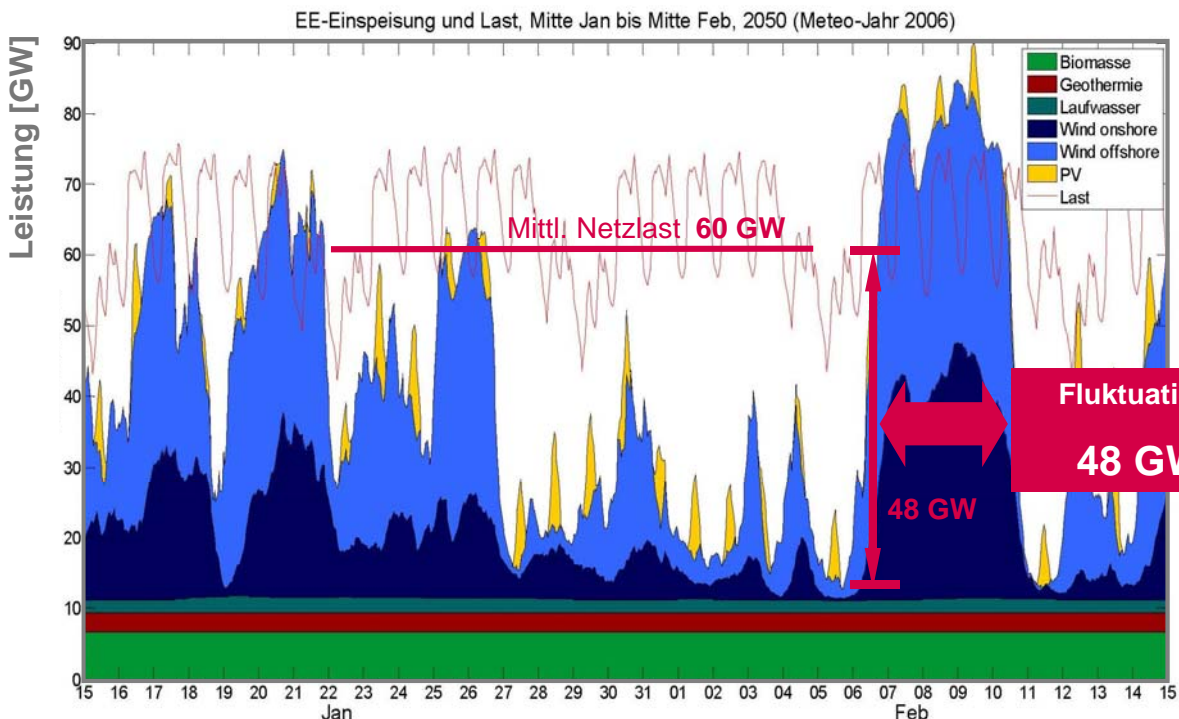
Jahresdauerlinien (gesamt, PV+Wind und hypothet. Kapazitätsausbau)



# Stromerzeugungsportfolio

Fluktuierende Strom-Einspeisung aus Erneuerbaren Energien

BMU-Leitszenarien: Basis-Szenario 2050 mit 85 % Erneuerbaren



Quelle: BMU-Leit-Szenarien 2010

# Stabilitätsanforderungen an das Stromnetz

Ausregelung von Last (Bedarf) und Einspeisung (Erzeugung)



Kohle



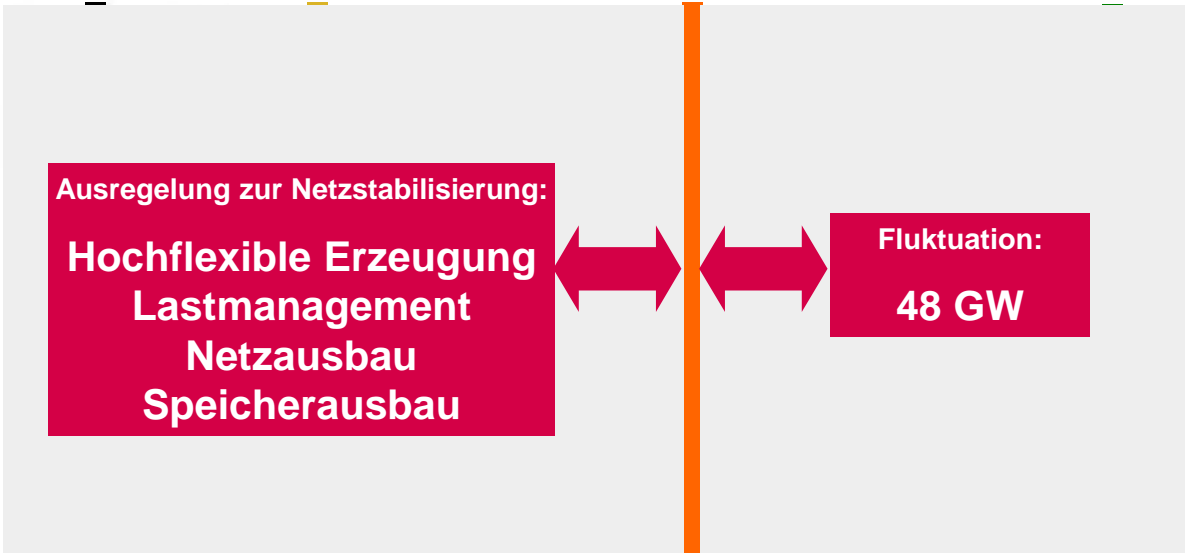
Gasnetz



Stromnetz

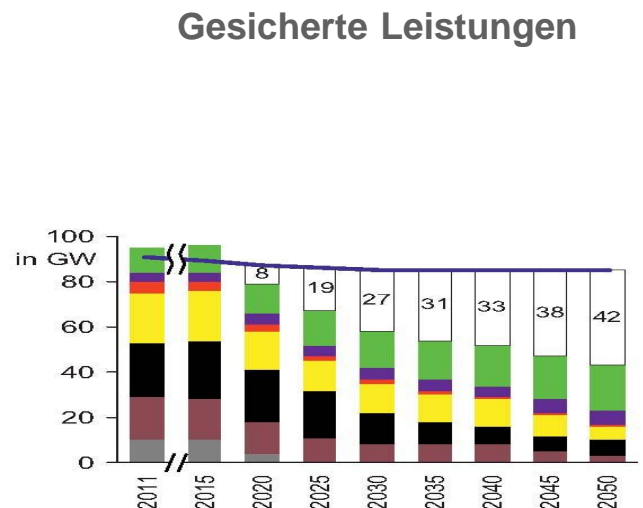
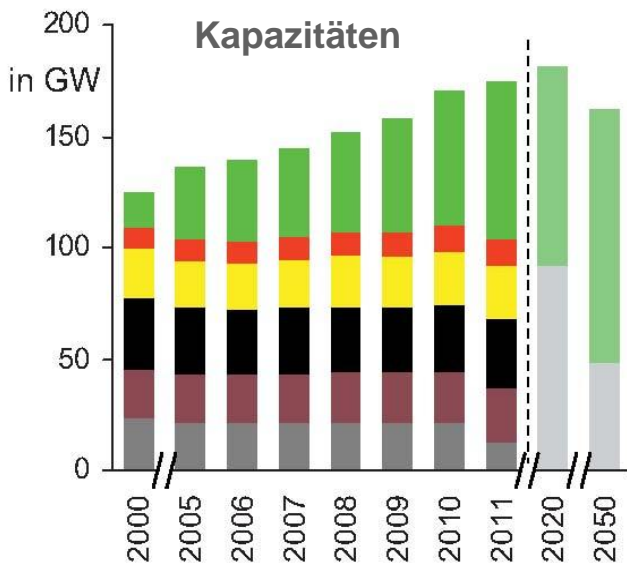


Erneuerbare



# Erzeugungskapazität vs. gesicherte Kapazität

Entwicklung bis 2050 mit Jahreshöchstlast



- erneuerbare Energien
- Mineralöl u. Sonstige
- Erdgas
- Steinkohle
- Braunkohle
- Kernenergie
- therm. Kraftw.

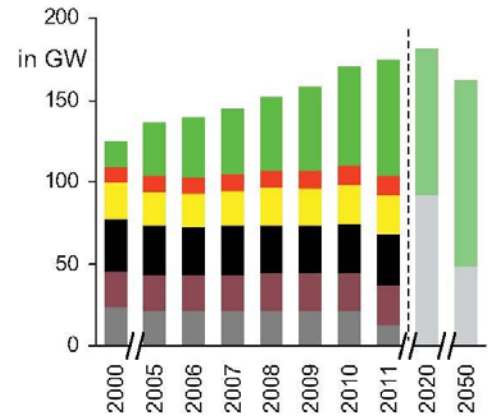
- Jahreshöchstlast inkl. 10% Sicherheit
- fehlende gesicherte Leistung
- erneuerbare Energien
- Speicher
- Erdöl
- Erdgas
- Steinkohle
- Braunkohle
- Kernkraft

Quelle: VDI Statusreport 2013 "Fossil befeuerte Kraftwerke in Deutschland"

# Flexibilitätsanforderungen

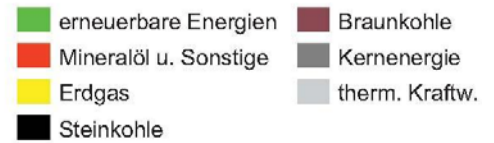
## Definitionen der verschiedenen Regelleistungen

| Regelleistung              | Vollständiger Abruf nach ... | Abrufdauer je Störung               | Umfang in Deutschland                       |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|
| Primär-                    | 30 s                         | $0 < t < 15 \text{ min}$            | ca. $\pm 600 \text{ MW}$                    |
| Sekundär-                  | 5 min                        | $30 \text{ s} < t < 60 \text{ min}$ | ca. $\pm 2.200 \text{ MW}$                  |
| Minutenreserve- (Tertiär-) | 15 min                       | 1 h (1/4 h Raster)                  | ca. $-2.400 \text{ MW} / +1.700 \text{ MW}$ |



Bei einer installierten Erzeugungskapazität von ca. 100.000 MW entspricht dies:

| Regelleistung              | Anteil an install. Kap. |
|----------------------------|-------------------------|
| Primär-                    | $\pm 0,6 \%$            |
| Sekundär-                  | $\pm 2,2 \%$            |
| Minutenreserve- (Tertiär-) | $-2,4 / +1,7 \%$        |



Quelle: VDI Statusreport 2013 "Fossil befeuerte Kraftwerke in Deutschland"

# Regelpotenziale verschiedener Technologien

## Potenziale in der Erzeugung, dem Netzmanagement und der Speicherung

| Regel-anforderung         | Zeit-Skala  | Erzeugung                                | Last           | Speicher   |
|---------------------------|-------------|--|----------------|--|
| Saisonal (Wochen)         | nach Bedarf | Zentrales Kraftwerk (Kohle, Gas)         |                |  |
| Tagesgang (Stunden, Tage) | nach 1 h    | Zentrales Kraftwerk (Kohle, Gas)         | Lastmanagement | Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Chemische Speicher (H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , ...) |
| Tertiär-regelung          | nach 15 min | Windenergie                              |                |  |
| Sekundär-regelung         | nach 30 sek | Photovoltaik, Solarthermisches Kraftwerk | Lastmanagement | Schwungrad, Batterien, Pumpspeicher, Druckluftspeicher                                       |
| Primär-regelung           | sofort      | Photovoltaik, Solarthermisches Kraftwerk |                | Batterien, Chemische Speicher (H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , ...)                       |

Quelle: Mod. nach Basiszahlen von Sterner, Fhg IWES, 2010

Typ. Werte für KKW, SK-KW, GuD-KW und GT (offen)

|   | Definition    | Kern-Kraftwerk <sup>1)</sup>             | DKW <sup>2)</sup><br>Steinkohle<br>(Neuanlage)           | GuD<br>F-Klasse   | GuD<br>H-Klasse                     |
|---|---------------|--|--|---|-------------------------------------|
| Mittlere Laständerungen im Lastfolgebetrieb | [%/min @ %PN] | ~10 @ 80-100<br>5 @ 50-100<br>2 @ 20-100 | 3-6 @ 40-100   | 4-8 @ 40-100 <sup>3)</sup>  | 4-9 @ 40-100 <sup>3)</sup>          |
| Netzfrequenz-Regelung (primär)              | [%/min @ %PN] | 60 @ 60-100                              | >60 @ 40-100   | 180 @ 50-100  | 180 @ 50-100                        |
| Minimallast                                 | [% PN]        | 20-30                                    | 20-25<br>Umwälzbetrieb<br>(25) 35-40<br>Durchlaufbetrieb | 30-50 Einblockanlage <sup>3)4)</sup><br>15-25 Mehrblockanlage <sup>3)4)</sup><br>(2 GTs + 1 DT) |                                     |
| Lastabwurf auf Eigenbedarf/<br>Inselbetrieb | ohne Ausfall  | Ja, bei Umleitbetrieb                    | Ja, bei Umleitbetrieb                                    | Ja, auf Gasturbinenbetrieb  |                                     |
| Wirkungsgrad:                               |               |  |  |   |                                     |
| @ 100% Last                                 | [% LHV]       | 36-38 (EPR)                              | 45-47  | 58-59   | >60-61                              |
| @ 50% Last                                  | [% LHV]       | 33-35 (EPR)                              | 42-44  | 52-55 (Einblock)<br><60 (Mehrblock)   | 54-57 (Einblock)<br>>60 (Mehrblock) |

PN Nennlast LHV Heizwert EPR Europ. Pressurized Reactor

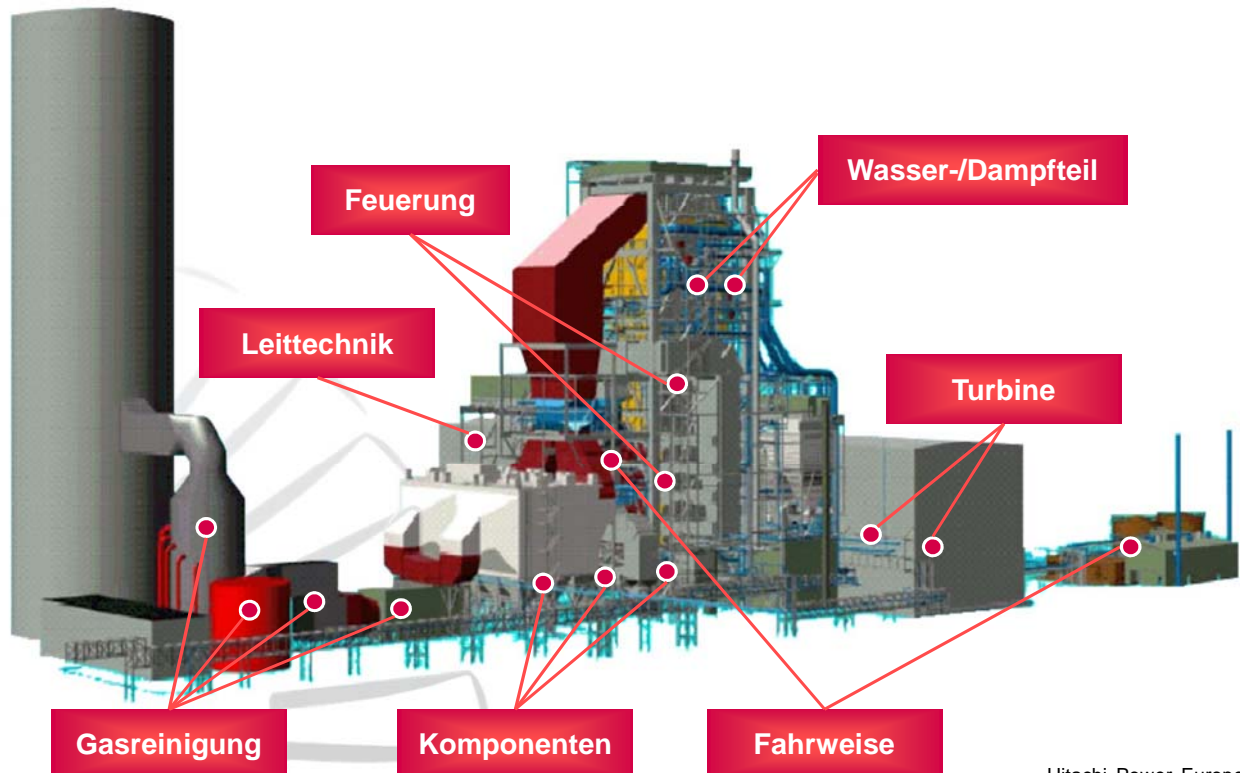
Quelle: VDI Statusreport 2013 "Fossil befeuerte Kraftwerke in Deutschland"

## Anforderungen an das Kraftwerk der Zukunft

Die Anforderungen an Flexibilität, Teillastverhalten und Emissionen für Kohlekraftwerke

| Eigenschaftsanforderungen        | aktuell                             | Ziel  |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Erweiterung des Teillastbereichs | > 35 %<br>mit Gas-/Öl-Stützfeuerung | < 15 %<br>ohne teure Brennstoffe                  |
| Erhöhung des Lasttransienten     | ~ 5 %/min<br>bezogen auf Volllast   | ~ 10 %/min<br>bezogen auf Volllast                |
| Startvorgänge (kalt/warm/heiß)   | eventuell täglich                   | möglichst<br>Last <15 - 100 %                     |
| Anlagenwirkungsgrad              | optimiert auf<br><b>Volllast</b>    | vorrangig optimiert auf<br><b>Teillastbetrieb</b> |
| Emissionen                       | optimiert auf<br><b>Volllast</b>    | vorrangig optimiert auf<br><b>Teillastbetrieb</b> |

Quelle: Hitachi Power Europe, 2011



Hitachi Power Europe GmbH

# Ansatzpunkte für die Flexibilisierung

## Zukünftige Anforderungen (beispielhaft)

### ■ Gesamtanlage

- Reduzierung der Höhe des Gesamtanlage (Kesselgebäude, Kühlturm)
- Vermeidung der Schwadenbildung (Verschattung)
- Reduzierung der Schallemissionen
- Flexibilisierung des Anlagenbetriebs
- Energieeffizienter Betrieb (vornehmlich im Teillastbereich)
- Emissionsminderung (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, ...)

### ■ Feuerungssystem

- Erweitertes Brennstoffband
- Ersatz von teuren Zünd-/Stützbrennstoffen durch Regelbrennstoffe
- Reduzierung der Luftmengen für eine nahstöchiometrische Verbrennung und der Kühlluftmengen

### ■ Dampferzeuger

- Reduzierung des Feuerraumvolumens (Baugröße)
- Reduzierung der Dampferzeugerhöhe
- Schnelle Lastwechsel
- Hohe Wirkungsgrade (Vollast und Teillast)

### ■ Rauchgasreinigung

- Energieoptimierter Betrieb
- Schnelle Lastwechsel

### ■ Komponenten

- Optimierte Abstimmung des Wasser-/Dampfkreislaufs auf die Dampfturbine

# Ansatzpunkte für eine Min-Last-Absenkung

## Maßnahmen zur Erreichung verringertes Mindestlasten (beispielhaft)

### ■ Feuerungssystem

- Verbesserte Abstimmung des Systems Kohlemühle - Brenner
- Absperrbare Sekundärluftquerschnitte im Brenner
- Verbesserung der Feuerraumsensorik
  - Stabilisierung des Verbrennungsprozesses
  - aktives Verbrennungsluftmanagement
  - aktive Feuerraumüberwachung

### ■ Dampferzeuger

- Bypass von Vorwärmern

### ■ Rauchgasreinigung

- Ebenenregelung bei Sprühwäschern
  - Reduzierung des Energiebedarfs
- Feldregelung bei Elektroabscheidern
  - Reduzierung des Energiebedarfs
- Stützung des kalten Endes für SNCR-Betrieb
  - Einhaltung des Temperaturfensters

### ■ Kessel - Turbine

- Bessere Abstimmung des Wasser-/Dampfkreislaufs auf die Dampfturbine
  - Reduzierung der Drosselverluste

# Ansatzpunkte für eine Teil-Last-Verbesserung

## Maßnahmen zur Wirkungsgrad- und Flexibilitätssteigerung (beispielhaft)

### ■ Feuerungssystem

- Indirekte Feuerung, Trockenbraunkohleeinsatz, optimierte Brenner
  - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
- Verbessertes Verbrennungsluftmanagement (laufzahlgeregelte Gebläse zur Brennerregelung)
  - Verbesserung des Teillastverhaltens

### ■ Dampferzeuger

- Reduzierung der Wandstärke von dickwandigen Bauteilen (Verteiler/Sammler) durch Erhöhung der absoluten Anzahl, Erhöhung der Linien, höherwertige Werkstoffe
  - Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
- Optimierung der Vorwärmstrecke (z.B. Einsatz von Gasturbinen zur Speisewasservorwärmung)
  - Wirkungsgradsteigerung, Leistungssteigerung
- Optimierung von Komponenten (hydraulisches System, Pumpen, Ventile, ...)
  - Verbesserung des Teillastverhaltens, Wirkungsgradsteigerung
- Reduzierung des Eigenbedarfs durch supraleitende Komponenten
  - Wirkungsgradsteigerung

### ■ Komponenten

- Dampfturbine
- Ventile (Androsselung der FD-Stellventile)
- Sensorik (Optimierung der Lebensdauerüberwachung)
- Integration von Wärmespeichern (Heißwasser) ins Kraftwerk

### ■ Rauchgasreinigung

- Frequenzregelung von Pumpen und Gebläsen



## Projekt

# Partner-Dampfkraftwerk PDKW

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektkoordination  
Projektpartner  
Laufzeit  
Projektvolumen

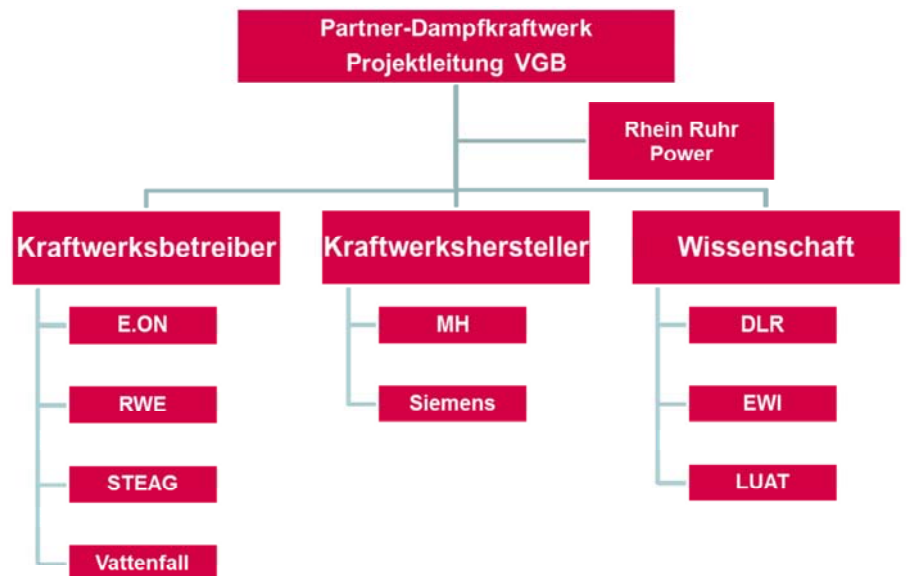
VGB PowerTech e.V.  
11  
01.09.2013 – 28.02.2015  
1,44 Mio €

## PDKW - Partner-Dampfkraftwerk



### Partner und Projektorganigramm

- VGB PowerTech e.V., Essen
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart
- Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln, Köln
- E.ON New Build & Technology, Gelsenkirchen
- Mitsubishi Hitachi Energy Systems Europe, Duisburg
- LUAT der Universität Duisburg-Essen, Essen
- Rhein Ruhr Power, Düsseldorf
- RWE Power, Essen
- Siemens AG Energy Sector, Mülheim/Ruhr
- STEAG Energy Services, Essen
- Vattenfall Europe Generation, Cottbus

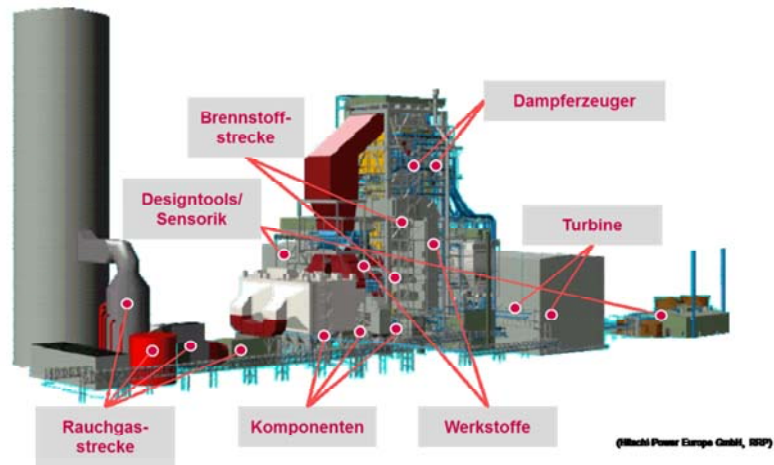


# Ziele des Verbundvorhabens

## Ziel des Gesamtvorhabens

Aufzeigen von Maßnahmen, mit deren Hilfe bestehende fossile Kraftwerke die Schwankungen der erneuerbaren Stromerzeugung ausregeln können:

- Verbesserung des An- und Abfahrverhaltens
- Reduzierung der Mindestlast
- Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
- Anpassung der Dampfparameter
- Optimierung des Dampferzeugers
- Optimierung der Dampfturbine
- Integration von thermischen Speichern in den KW-Prozess

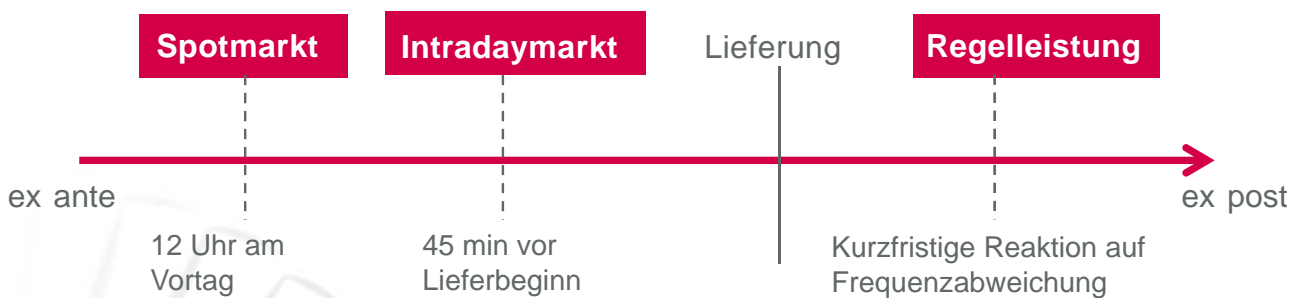


➔ Stabilisierung der Netze, Versorgungssicherheit, Maximierung des Einsatzes der Erneuerbaren Energien

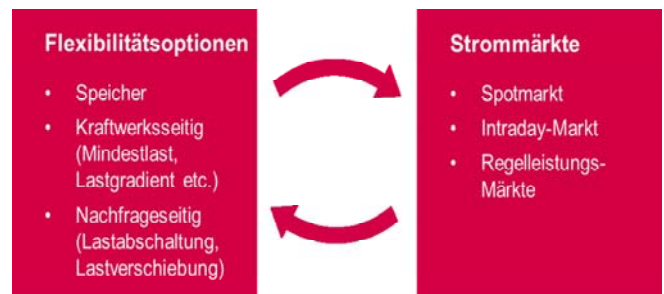
# AP 3 – Anforderungen an den KW-Park der Zukunft

Energiewirtschaftliches Institut der Universität zu Köln

## Relevante Märkte: Spot-, Intraday- und Regelleistungsmarkt

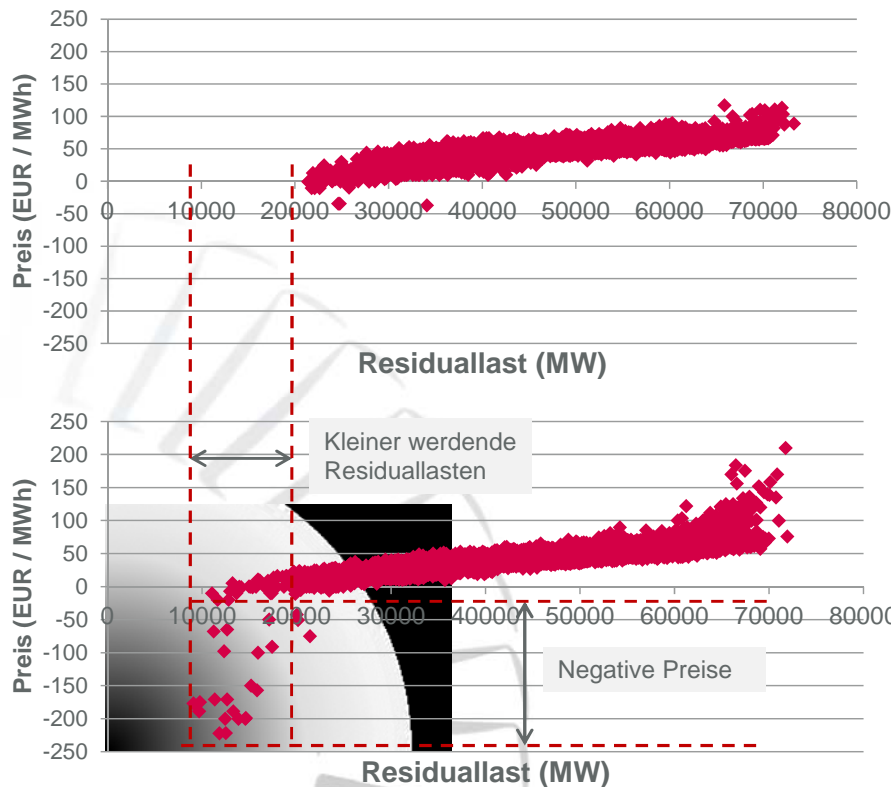


- Flexibilitätsanforderungen, die einen Tag vor der Lieferung bekannt sind, werden im **Spotpreis** eingepreist
- Kurzfristige Flexibilitätsanforderungen (z. B. Abweichungen von der EE-Prognose) werden im **Intraday-Handel** eingepreist
- Spontane Flexibilitätsanforderungen (z. B. Kraftwerksausfall) können durch **Regelleistung** gedeckt werden



Quelle: ewi, 2014

## Wechselwirkungen zwischen Strommärkten und Flexibilitätsoptionen



### Jahr 2011

- Keine Residuallasten unter 20 GW
- Vereinzelt negative Preise

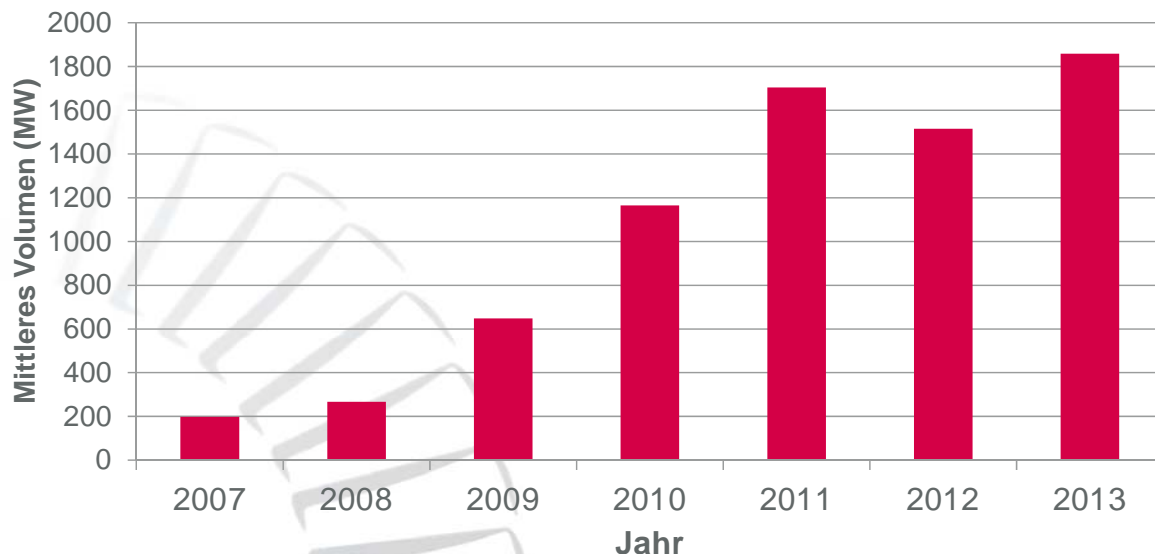
### Jahr 2012

- Residuallasten bis 9 GW
- Deutlich mehr und stärker negative Preise

Quelle: ewi, 2014

## Entwicklung der Mengen auf dem Intraday-Markt

- Mittlere gehandelte Menge auf Intraday-Markt sind in der Vergangenheit gestiegen
- Seit Dezember 2011: Viertelstunden handelbar (Flexibilisierung)



Volumen des Intraday-Markts nimmt zu

Quelle: ewi, 2014

## Redispatch-Maßnahmen

Im Zeitraum vom 01.04.2013 – 17.12.2013\*:

- Anweisungen **positiver Redispatch**: 1624
- Anweisungen **negativer Redispatch**: 855

|                        | Durchschnitt | Max    |
|------------------------|--------------|--------|
| Dauer [hh:mm]          | 03:55        | 24:00  |
| Maximale Leistung [MW] | 304          | 4.478  |
| Gesamte Arbeit [MWh]   | 1.097        | 35.237 |

Insgesamt **141 Kraftwerke** wurden **durchschnittlich 17 mal angewiesen**.

- Schwarze Pumpe: 239 Anweisungen an 72 Tagen
- Voerde: 13 Anweisungen an 4 Tagen: → s.u.

| Voerde                 | Durchschnitt | Insgesamt |
|------------------------|--------------|-----------|
| Dauer [hh:mm]          | 01:50        | 24:00     |
| Maximale Leistung [MW] | 273          | 695       |
| Gesamte Arbeit [MWh]   | 703          | 9.138     |

\*) Gesamte Datenverfügbarkeit zum Zeitpunkt der durchgeführten Analyse.

Quelle: ewi, 2014

## Zusammenfassung

### Flexibilisierung des Kraftwerksbetriebs aus technischer Sicht

- Technische Modifikationen an den Anlagen notwendig und/oder
- höherer Lebensdauerverbrauch der Anlagen.
- Technische Möglichkeiten sind gegeben und können umgesetzt werden.

### Flexibilisierung des Kraftwerksbetriebs aus ökonomischer Sicht

- Wirtschaftlicher Betrieb heute nicht mehr gegeben, daher
- Investitionsbereitschaft sehr gering bis nicht gegeben.

### Flexibilisierung des Kraftwerksbetriebs aus ökologischer Sicht

- Warmhaltebetrieb und extreme Teillasten nicht förderlich bezüglich der Emissionen.
- Gasreinigungsstrecken müssten ebenfalls flexibilisiert werden.

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt:

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner**  
Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik  
und Anlagentechnik (LUAT)  
Universität Duisburg-Essen  
Leimkugelstraße 10  
45141 Essen  
E-Mail: klaus.goerner@uni-due.de