Regeneratives Kombikraftwerk Deutschland: Sicherer Strombetrieb mit 100 % Erneuerbaren Energien möglich?

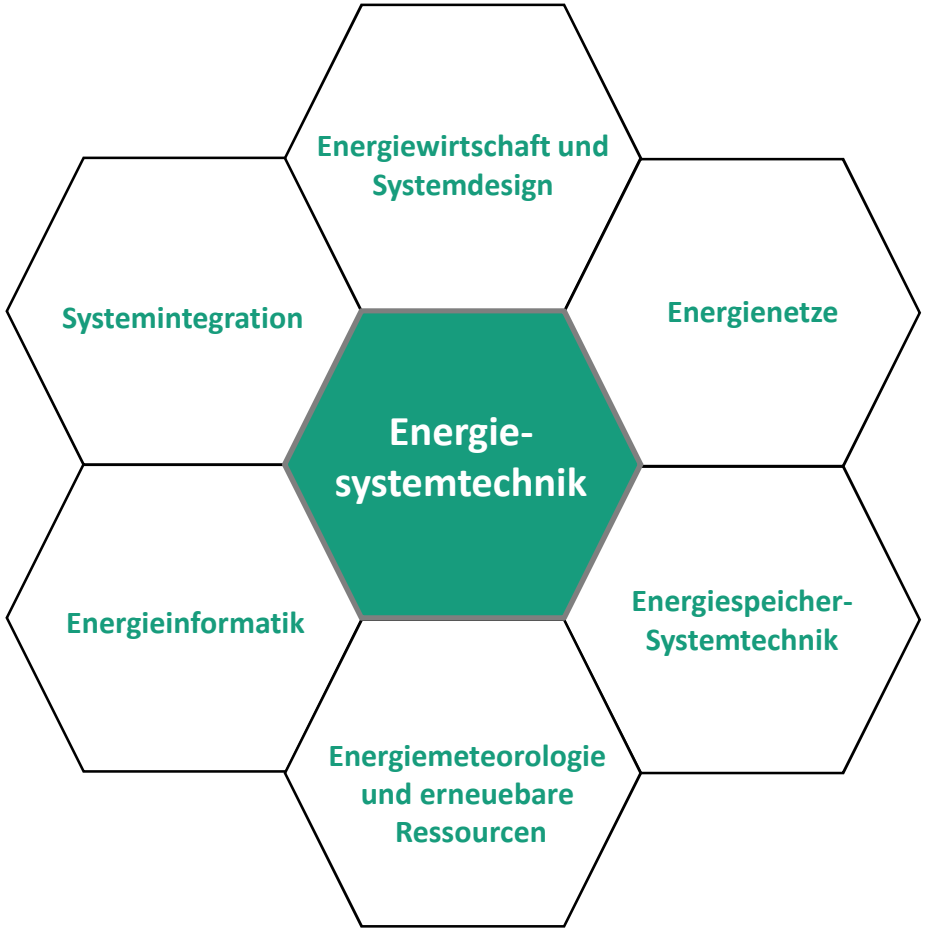
Planerforum

Dr. Kurt Rohrig
Fraunhofer IWES
Bad Pyrmont
4.11.2014

Kombikraftwerk 2

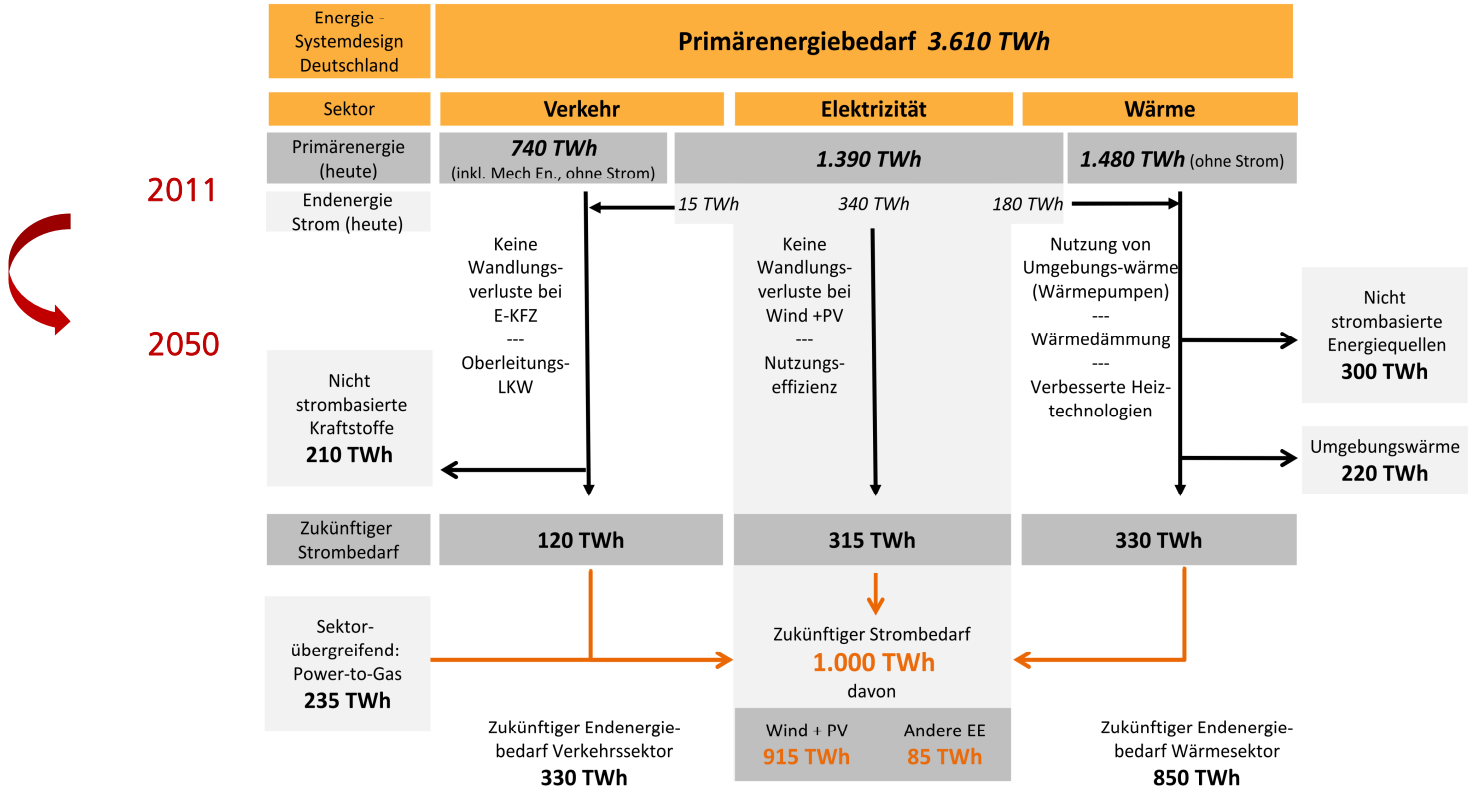
Fraunhofer IWES Kassel

Kernkompetenzen für die Energiesystemtechnik



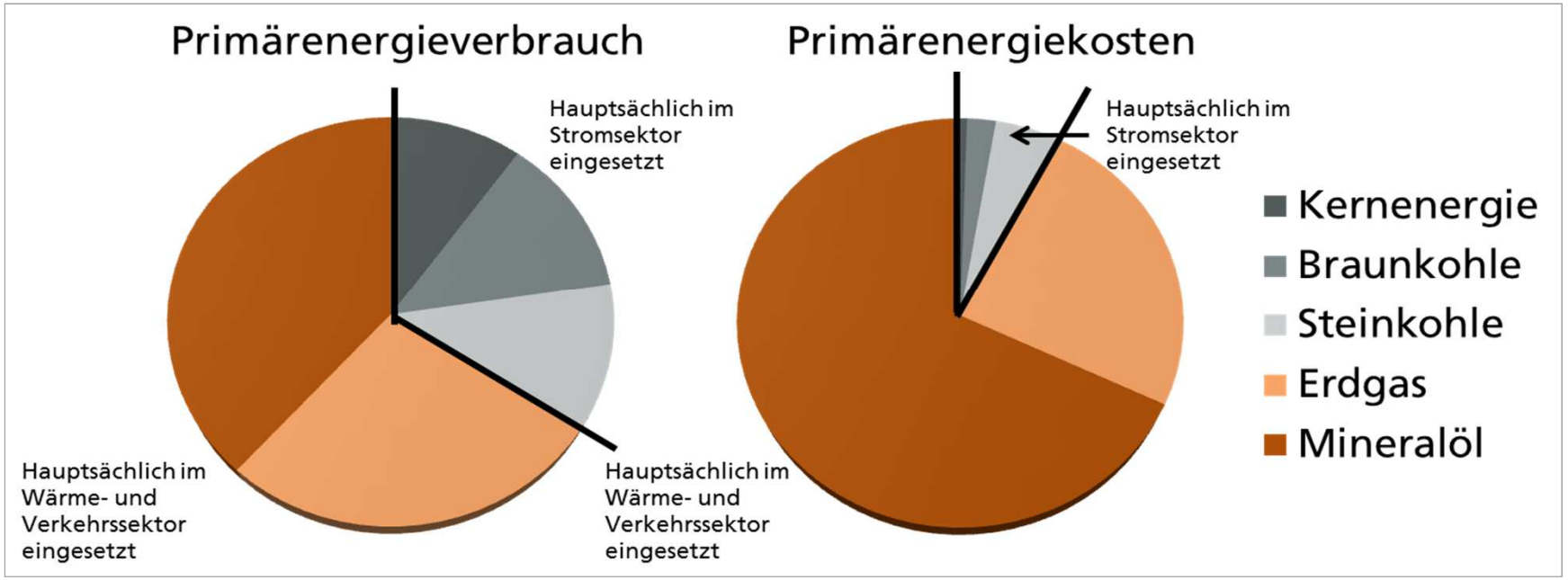
Value added services
Forecast information
Off-shore wind
Small hydro power
Solar power plant
Hydro power station
Biomass
Low emission power plant
Local control and communication center
HVDC link
Transformer
Microgrid
Wave energy
Residential CHP
Solar
Photovoltaic
Underground info and power transmission
H2 production and filling station
Demand side management
CHP
Micro storage of electricity
Thermal storage
SMES
Fuel cells
Compressed hydrogen storage

Substitution fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger
Reduzierung des Energieverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen



Primärenergie aufgeteilt nach Energieträgern

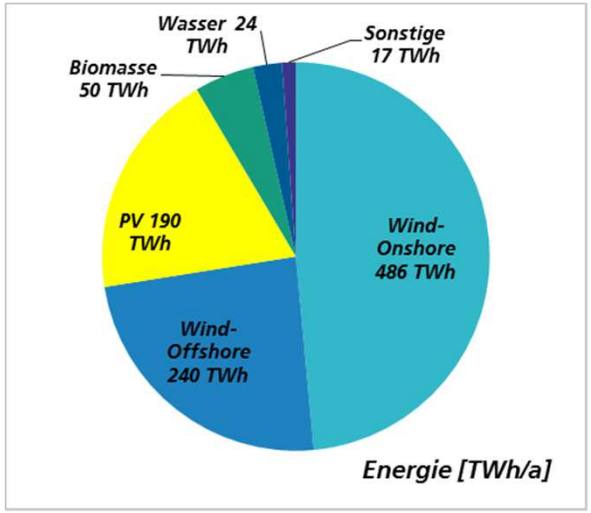
Kombikraftwerk 2

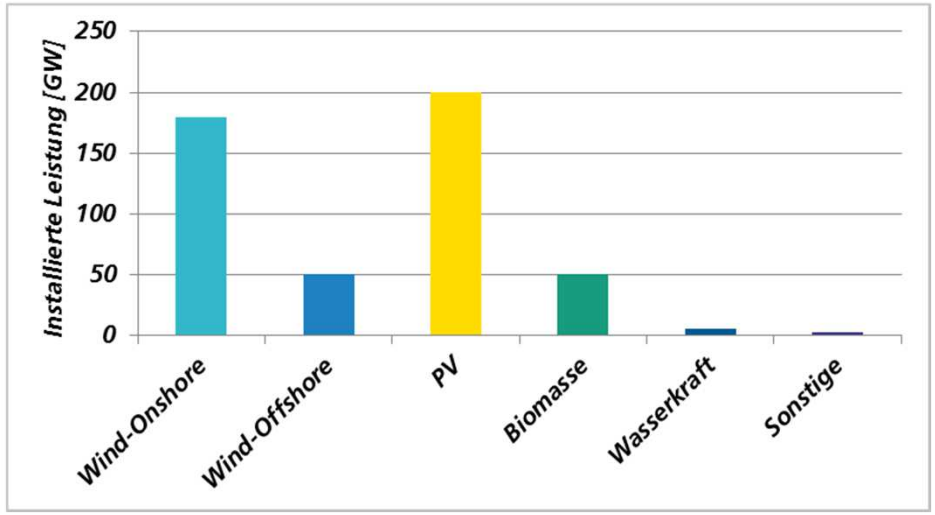


Stromerzeugung: Hoher Anteil für Primärenergie
→ aber Beschaffungskosten dafür sind relativ gering.

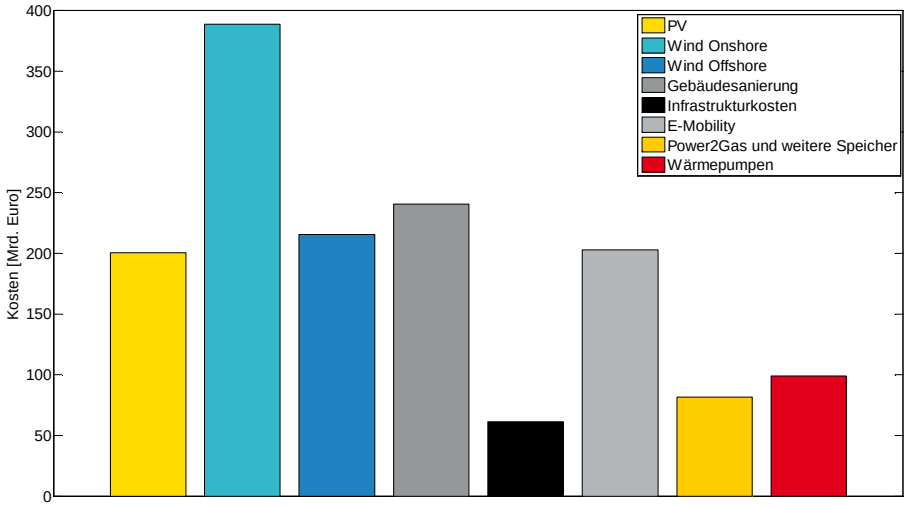
Öl und Gas: Teuer und schwer substituierbar
→ Werden vor allem im Verkehrs- und Wärmesektor eingesetzt.

Modellrechnung zur Finanzierbarkeit der Energiewende

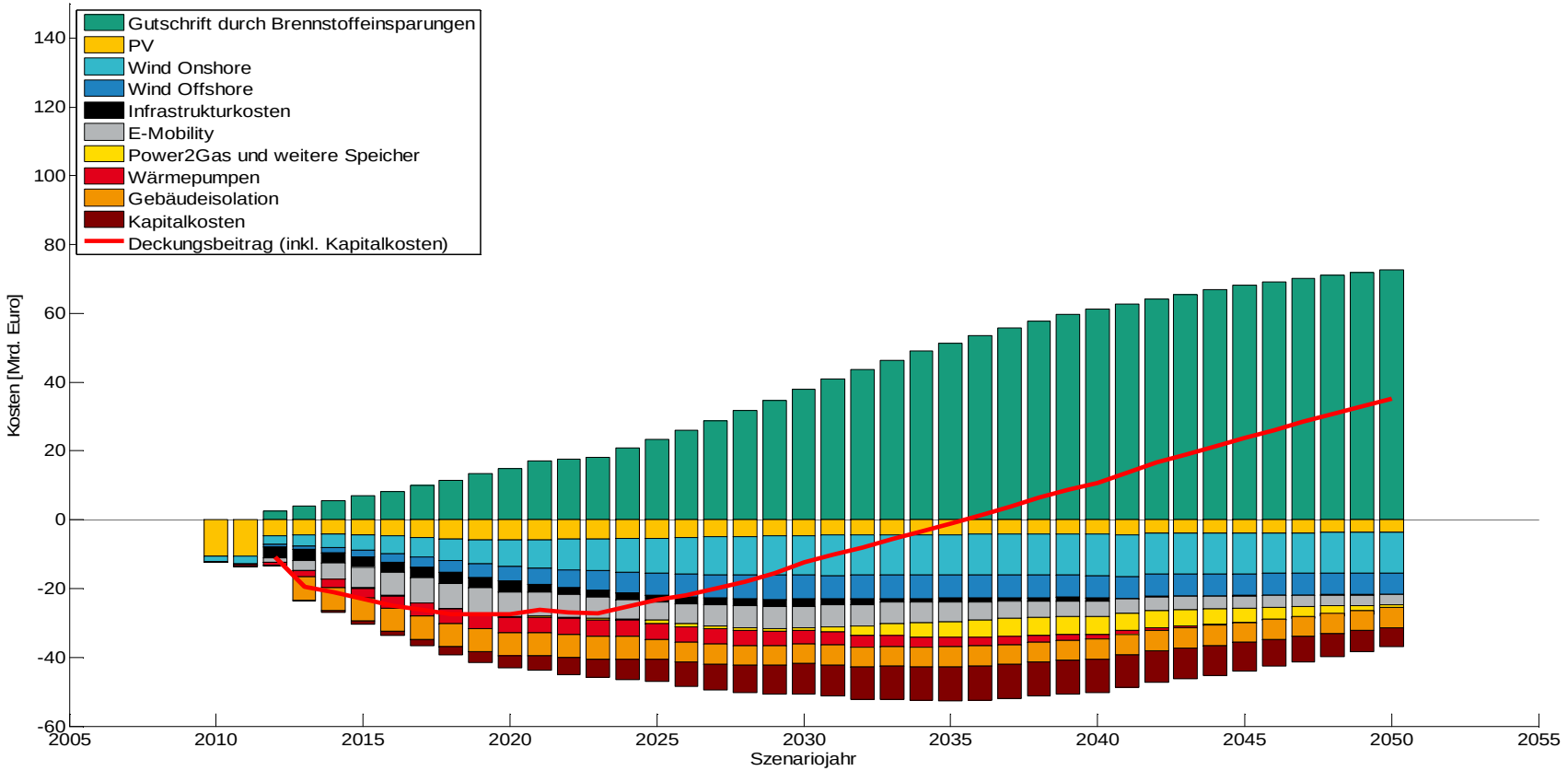




- Ableiten des EE-Strommixes
- Ableiten eines Mengengerüstes
- In Summe ergibt sich ein zusätzliches Investitionsvolumen von 1500 Mrd.€ gegenüber einem Referenzszenario Status Quo

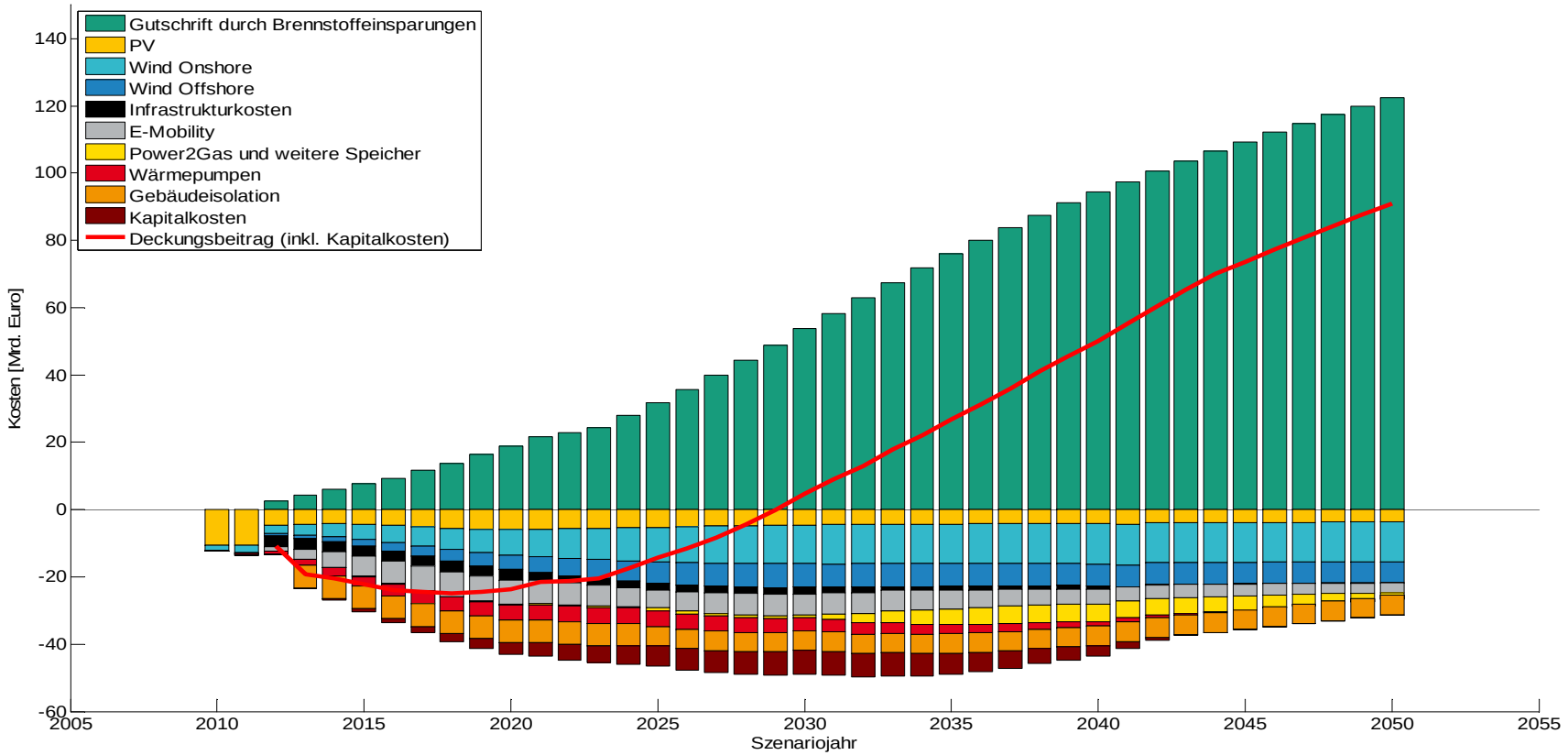


Modellrechnung – konstante Brennstoffkosten



- Als Untergrenze ergibt sich eine Verzinsung der gesamten Investitionen von **2,3% (inflationsbereinigt)**
- Geringes Risiko für Investitionsvorhaben

Modellrechnung – Brennstoffkosten Klimaschutzszenario



- Bei steigenden Kosten für Primärenergie stellt sich das Gesamtprojekt deutlich lukrativer dar (**6,7% inflationsbereinigt**)
- Absicherung der Volkswirtschaft gegen steigende Primärenergiepreise

Windenergie offshore, Meeresenergie

Kombikraftwerk 2

Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE Engineering GmbH · DWD · ENERCON Energie für die Welt · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

Windenergie onshore

Freiflächen Photovoltaikanlagen

Kombikraftwerk 2

29.1 Megawatt-Solarpark zwischen den deutschen Städten **Eisleben und Wimmelburg**

19.1 Megawatt-Solarpark bei Kassel

Gebäudeintegrierte Photovoltaik – Smart Home

Gebäudemanagement synchronisiert Erzeugung und Verbrauch

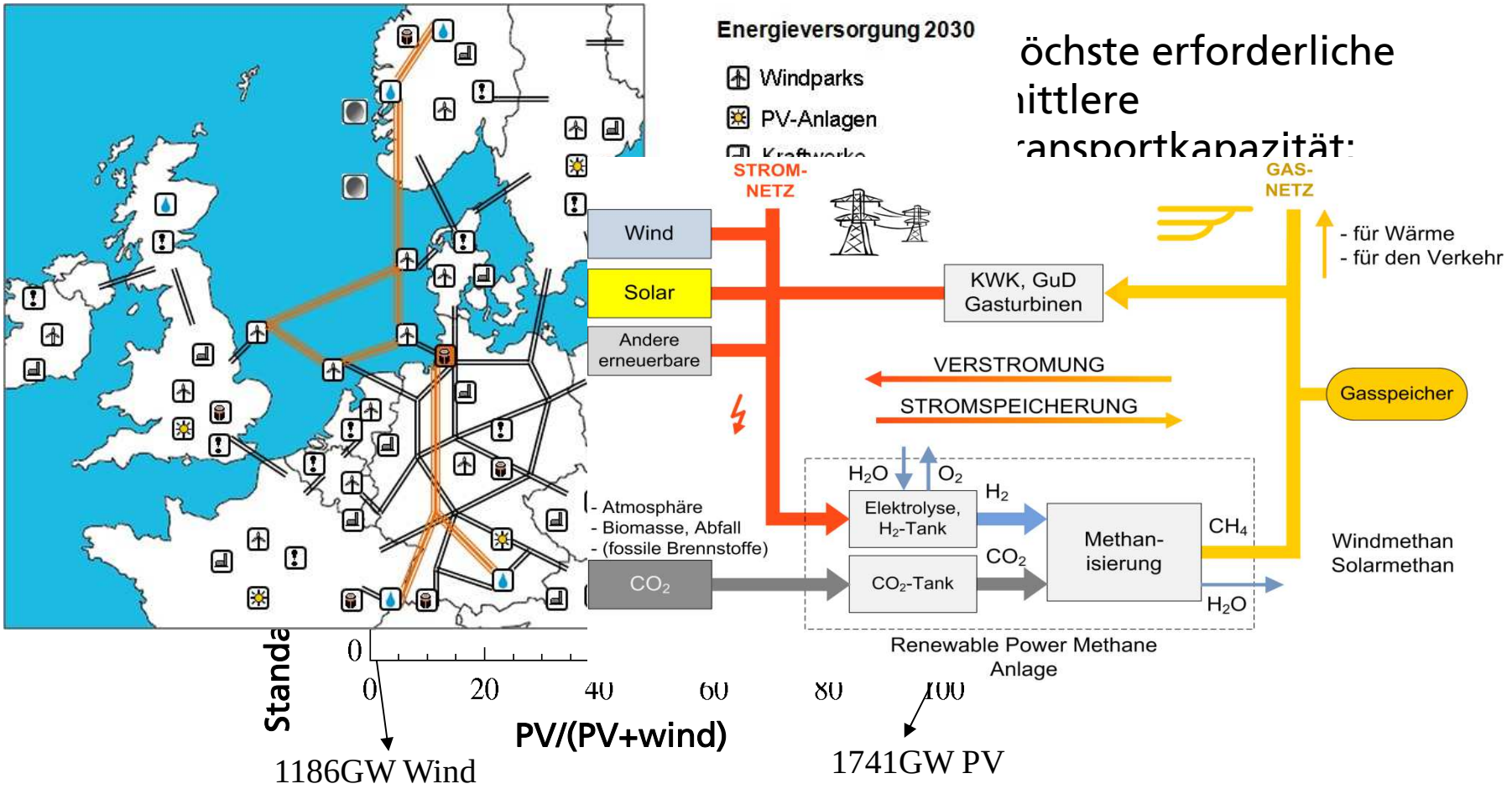
Megawatt-Batterien im Smart Grid und für Ausgleichsenergie

Kombikraftwerk 2

Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE Engineering GmbH · DWD · ENERCON Energie für die Welt · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

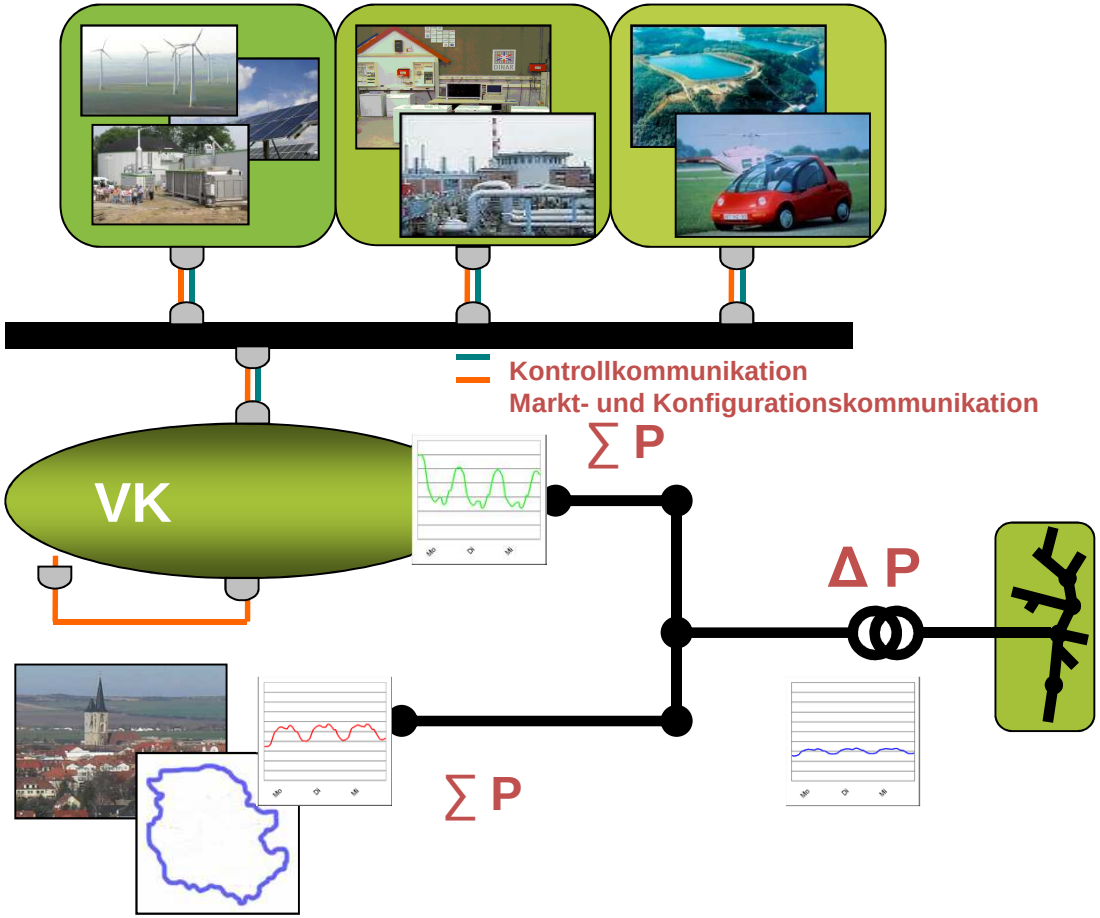
Energiemix, Transport- und Speicherbedarf

Kombikraftwerk 2



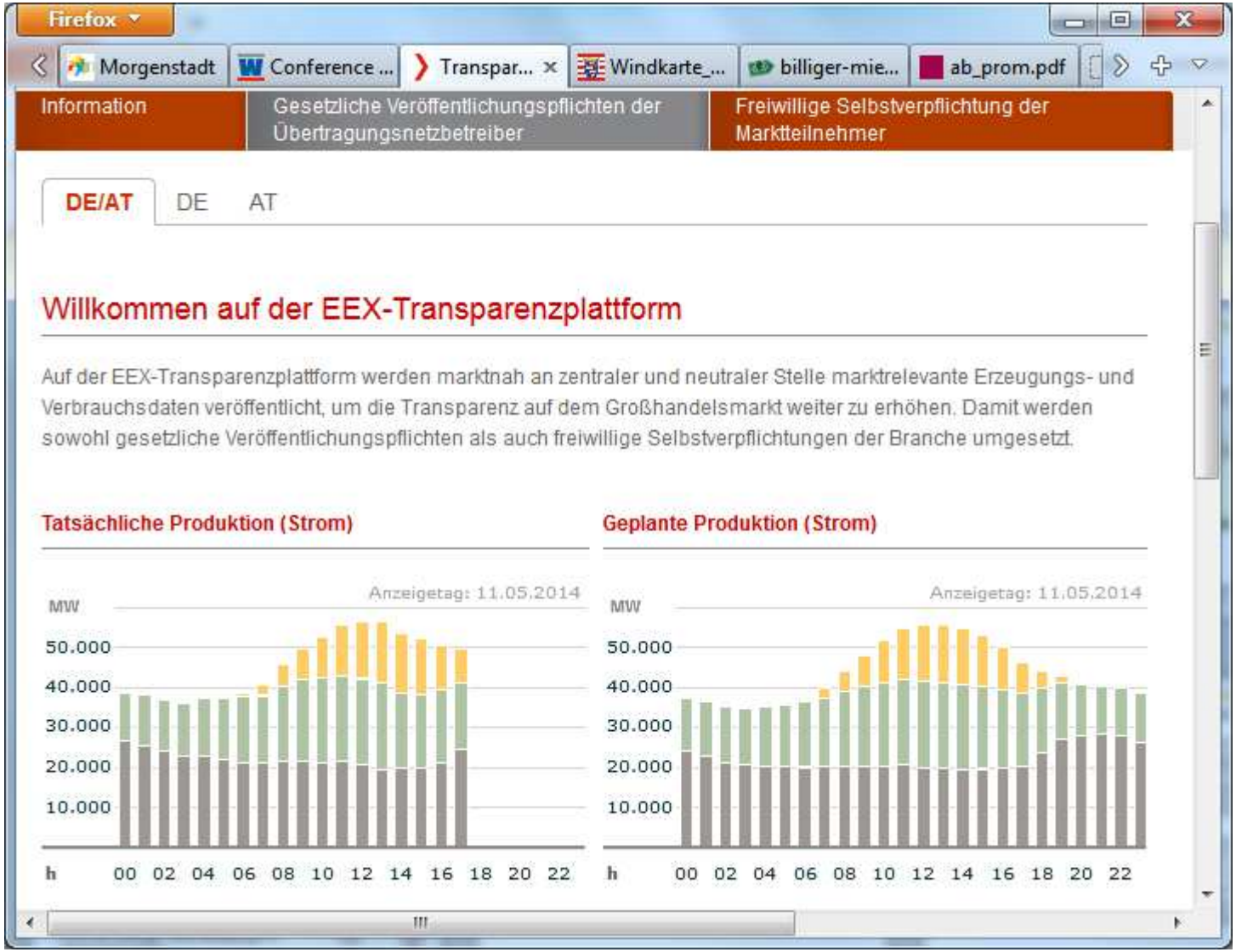
Verknüpfung und Steuerung mit Virtuellen Kraftwerken

Kombikraftwerk 2



Basis für regionale Energieversorgungsstrukturen

Kombikraftwerk 2

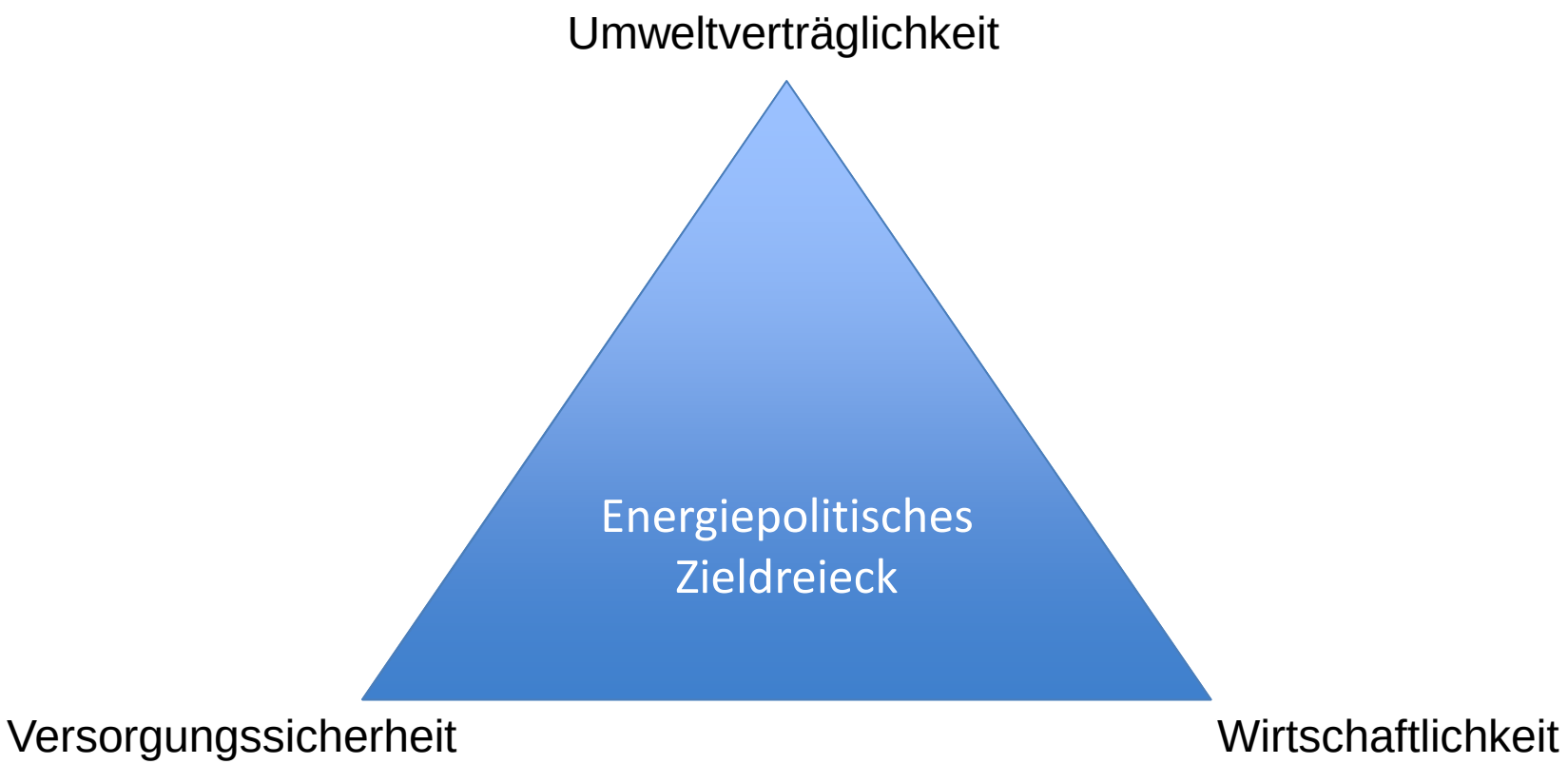


Gewährleistung der Systemstabilität bei weiterem Zuwachs der fluktuierenden EE

Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE · DWD · ENERCON ENERGIE FÜR DIE WELT · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

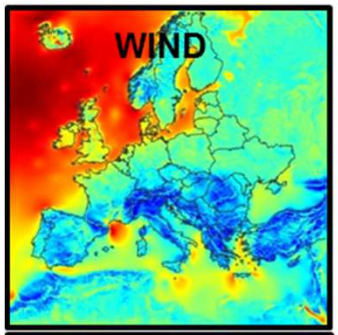
Kombikraftwerk 2

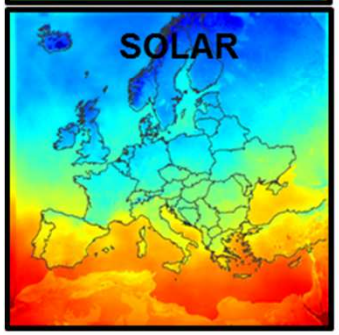
Wie weiter?

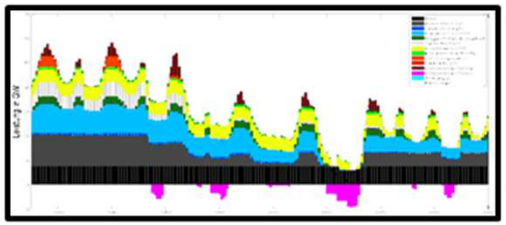


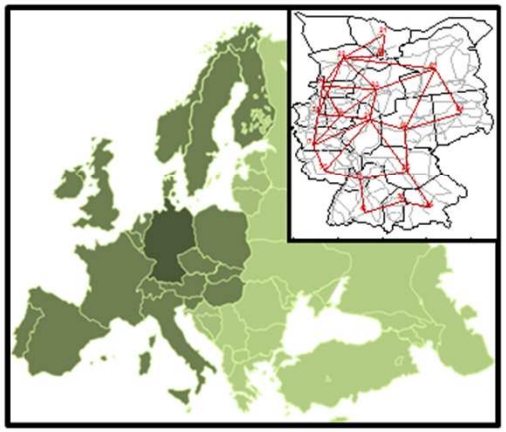
Simulationsmodell IWES.sim

Kombikraftwerk 2









vereinfachte Zubau-Optimierung für EU-Länder

detaillierte Zubau-Optimierung für DE-Regionen

Wärme öffentlich

Industrie PW < 100°C

Industrie PW 100°C – 500 °C

Industrie PW > 500 °C

Brenn-wert/Gas-WP + P2H

WP Luft/ Sole

KWK + WP

Solar ther mie

KWK + P2H

HW + P2H

Differenzierung Gebäudetypologie und Temp.-Niveau

GT, GuD

PSW, AA-CAES, Batterien

P2G

Wind Off./On

PV Freifl./ Dach

EE-Potenziale

Bestandsanlagen Speicherwasser u.a.

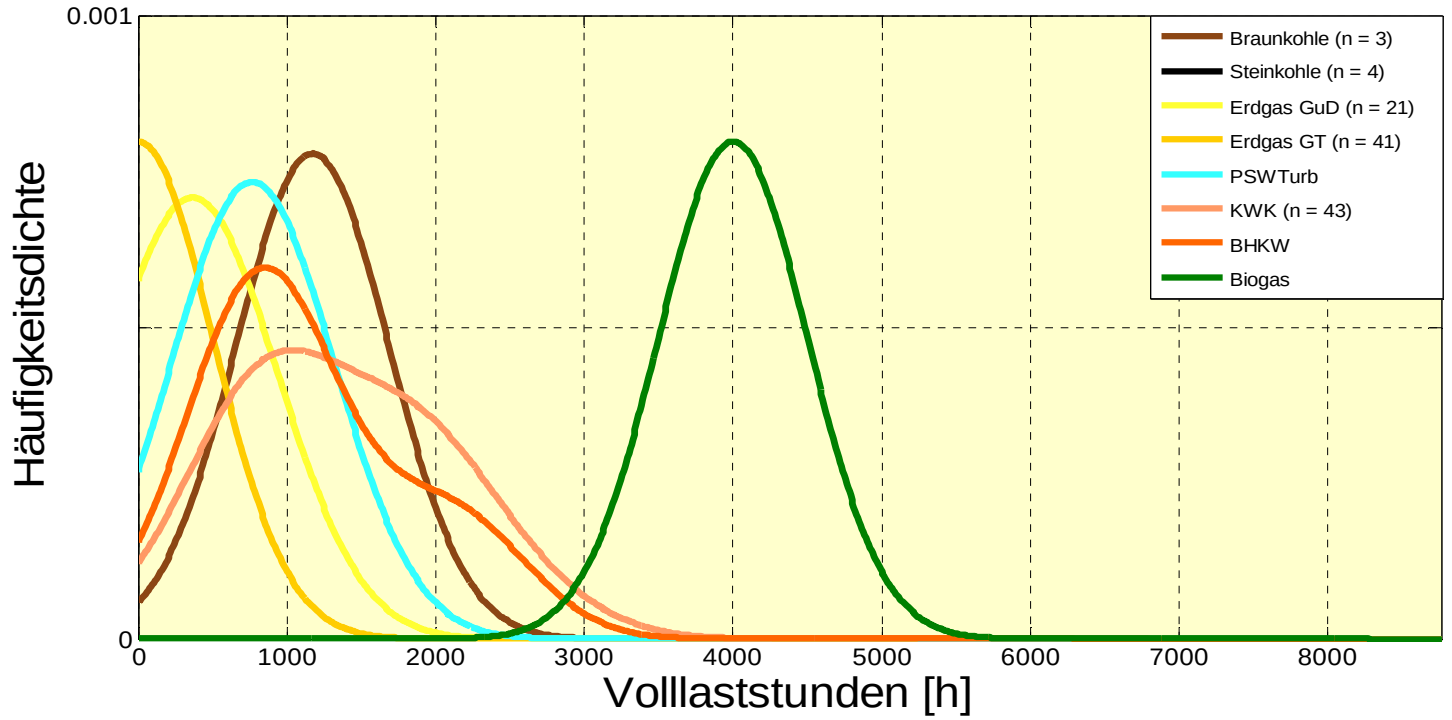
EU Kuppelleitungen (NTC) DE 18-Netzregionen (PTDF)

Biomasse - Flächenpotenziale und Konversionspfade

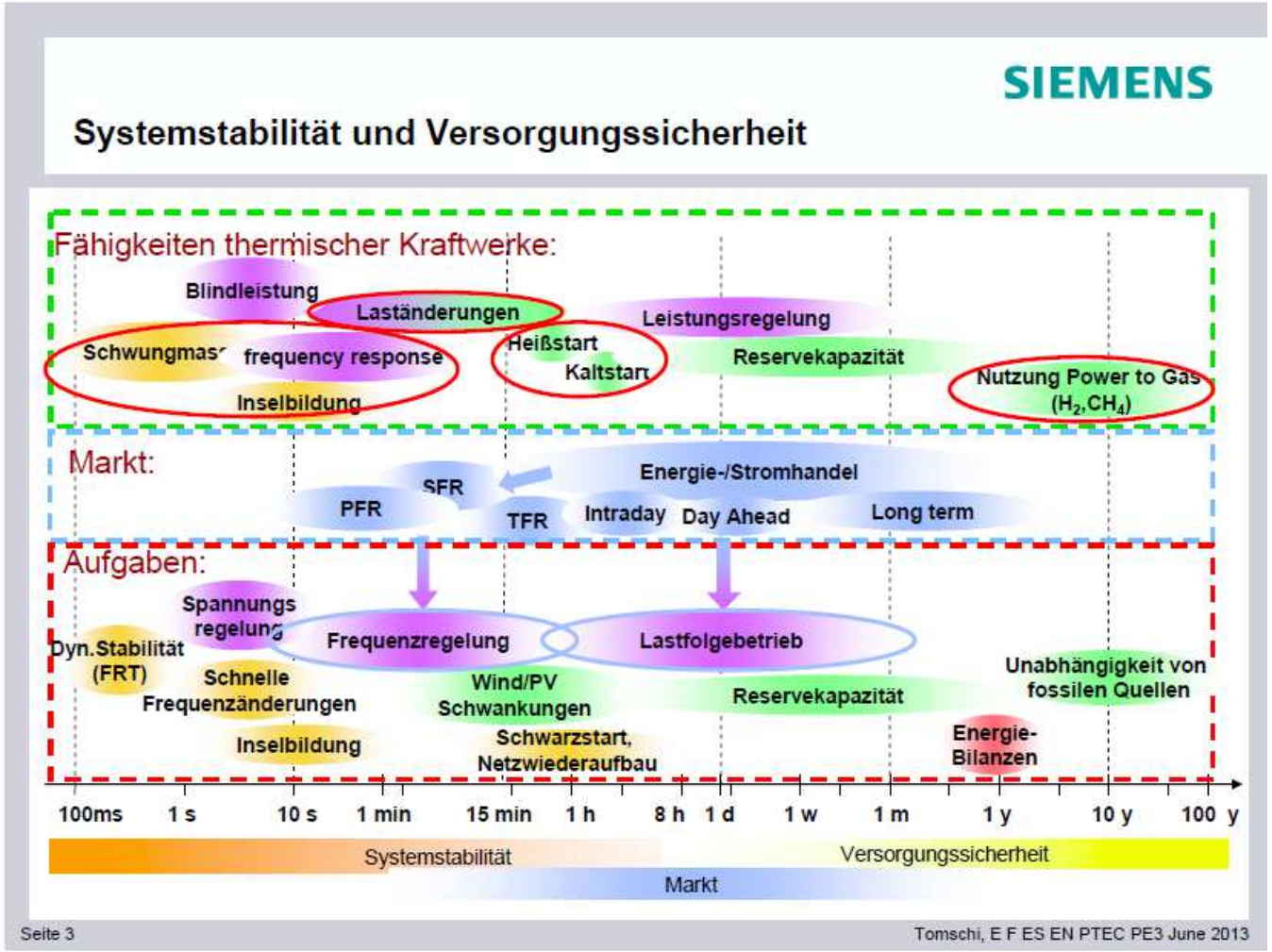
Verkehr - Bilanzierung und TCO-Modell

HPC-Cluster: 380 CPU Cores 2560 GB Memory

Entwicklung des Kraftwerkparks Deutschland



Quelle: BMU-Leitstudie 2011 (2020/2050)



Quelle: „Flexible thermische Kraftwerke für die Energiewende“, Dr. U. Tomschi, Siemens AG, ETG/GMA Fachtagung „Netzregelung und Systemführung, 11./12.Juni 2013, München

Stabilität des regenerativen Stromversorgungssystems

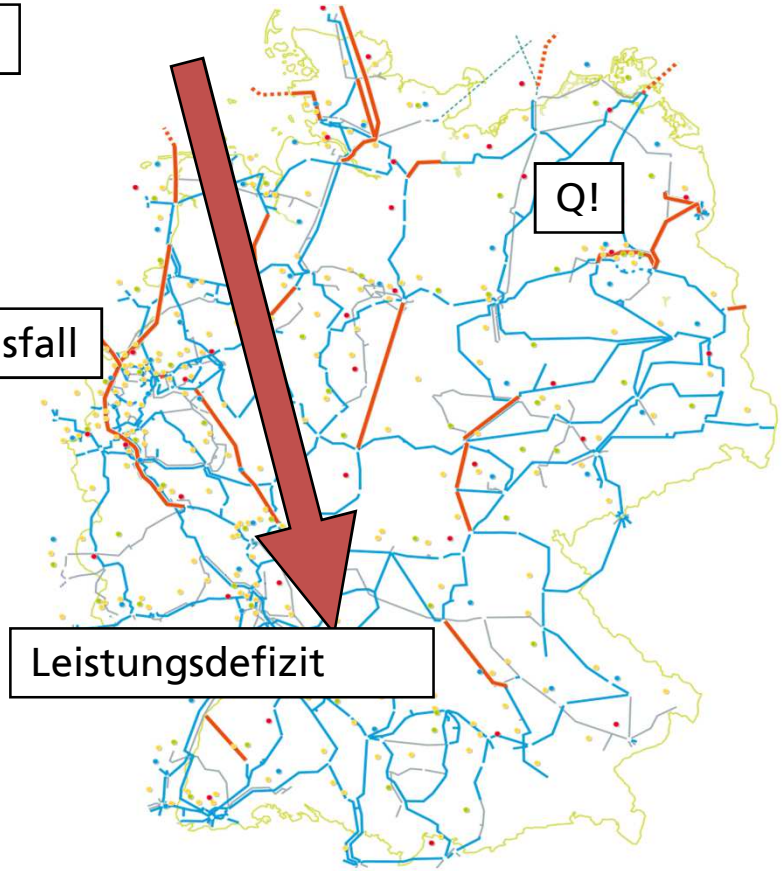
Kombikraftwerk 2

Überregionales Spannungsungleichgewicht

Leistungsüberschuss

AC-Lastflussberechnungen für die HöS
(für ein HöS-Netz
ohne konv. Kraftwerke
oder Blindleistungs-
kompensationsanlagen)

→Spannungsfall

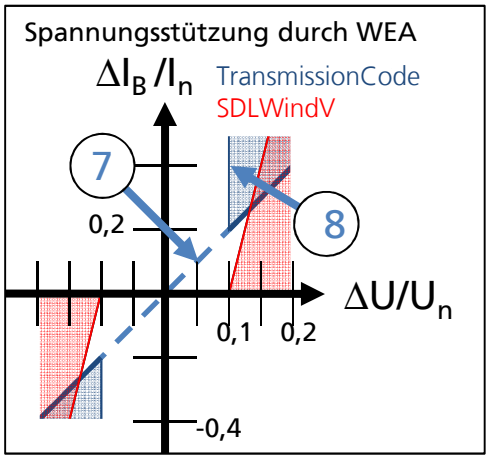


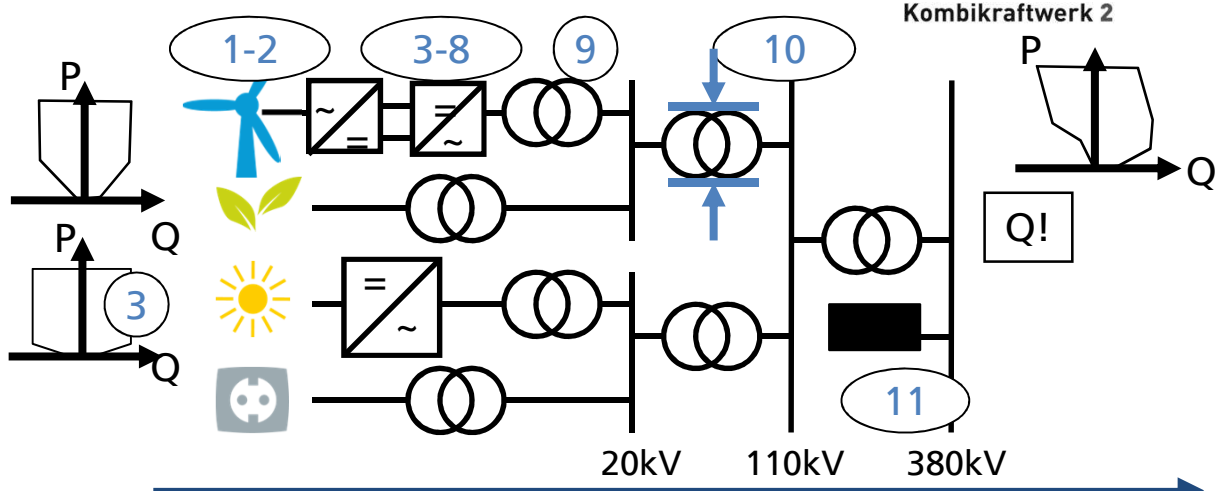
→Blindleistungsbedarf (Q!) an den HöS-Netzknoten zur Spannungshaltung

(Anstieg um bis zu 36000Mvar bereits in dena Netzstudie 2 für 2020)

Stabilität des regenerativen Stromversorgungssystems

Kombikraftwerk 2





Probleme: geringer Einfluss auf HöS & lokale Spannungshaltung

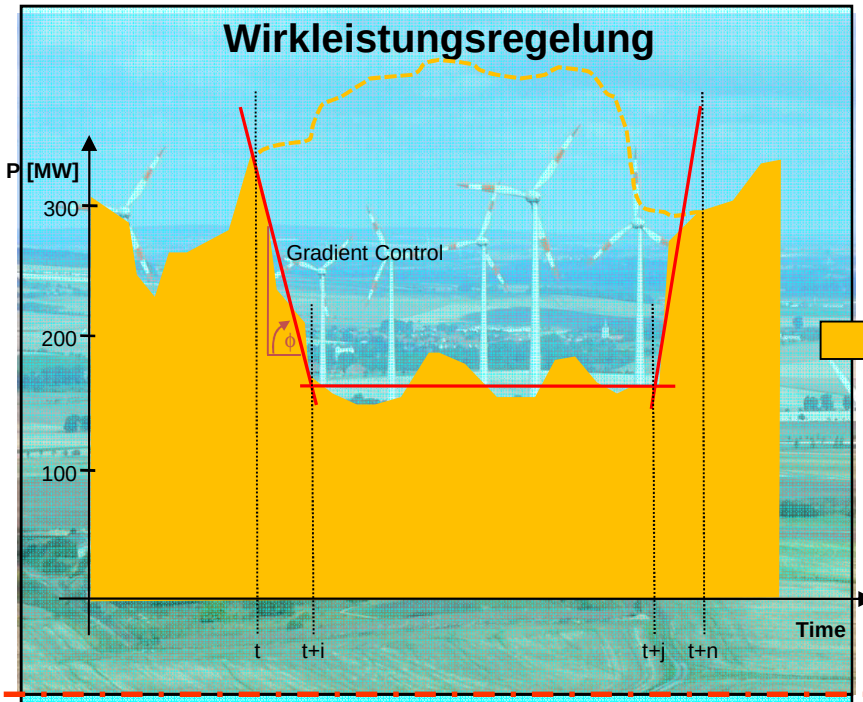
Nicht vollständige Erkennung der Spannungsänderung in der HöS

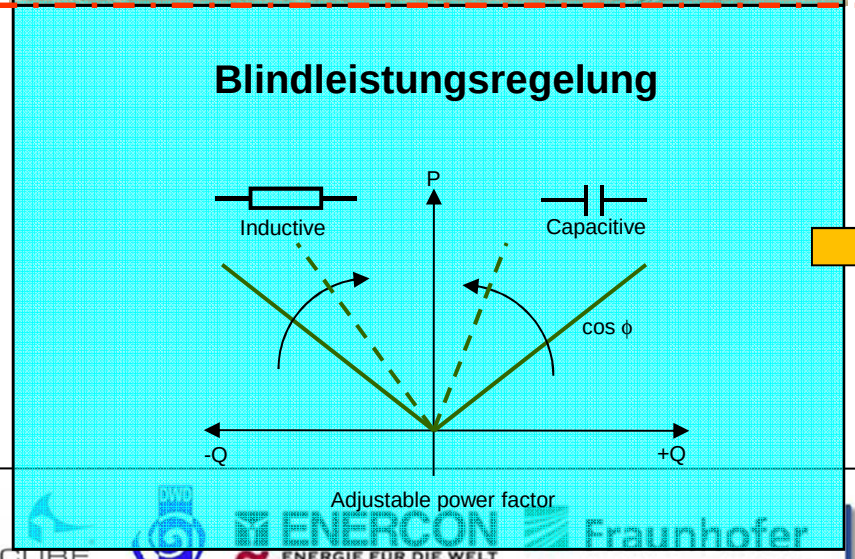
Methoden zur Erhöhung der Spannungshaltungsfähigkeit

1 Direkt angeschlossene Synchrongeneratoren
2 Piller-Prinzip
3 Variation der P/Q-Kennlinien
4 Größere Umrichter
5 Reduktion des Wirkstroms zugunsten des Blindstromes
6 Ausnutzung der STATCOM-Funktion
7 Kontinuierliche Spannungsstützung
8 Erhöhung des Verstärkungsfaktors am Spannungsregler
9 Sternpunkterdung der WEA-Blocktransformatoren
10 Variation der Spannungs-bänder
11 Errichtung von Blindleistungs-kompensationsanlagen

Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE · DWD · ENERCON ENERGIE FÜR DIE WELT · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

Aktiver Beitrag zur Systemsicherheit



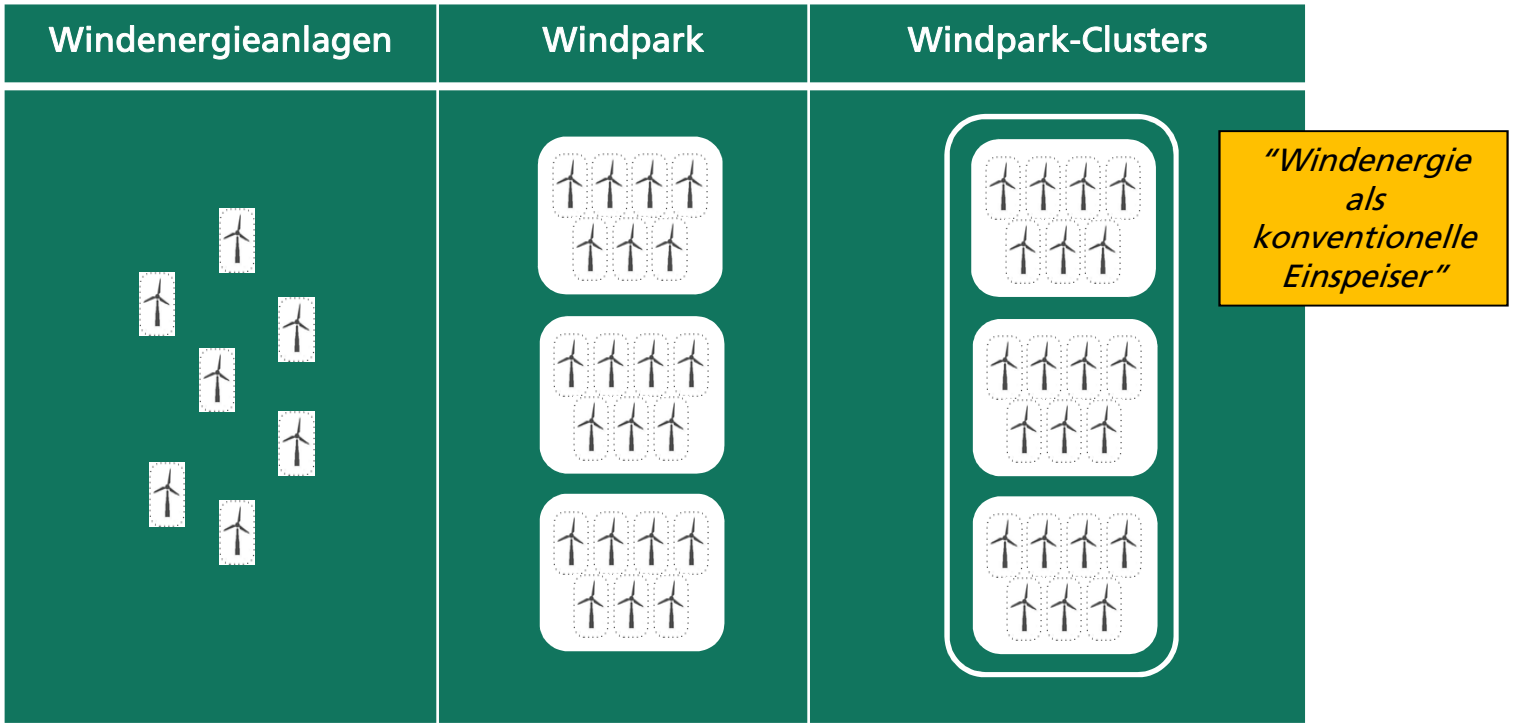


- Frequenzregelung
- Windleistungsreserve
- Engpassmanagement
- Leistungsbegrenzung
- Gradientenbegrenzung
- Blindleistungsprognose
- Blindleistungsregelung
- Spannungsregelung

Cluster-Architektur

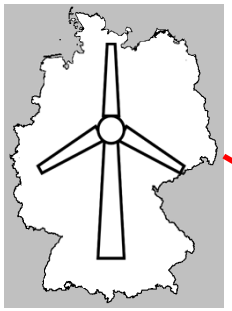
Kombikraftwerk 2

"Logische Aggregation von physikalisch existierenden Windparks die an einem Netzknoten verknüpft sind"

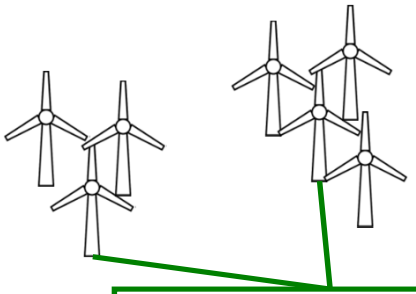


Ausgleichseffekt

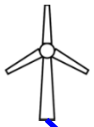
Kombikraftwerk 2



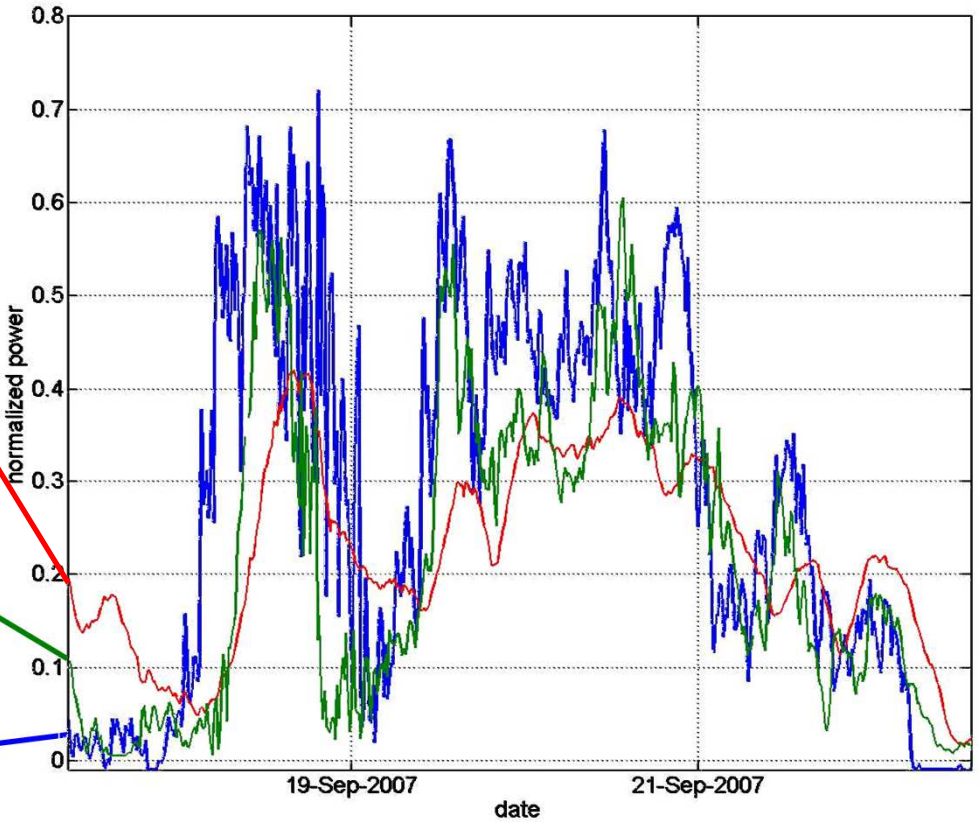
Windleistung in Deutschland



Windparkgruppe



Einzelne WEA

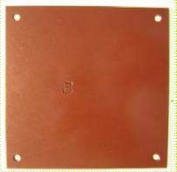


Virtual Power Plant (VPP) vs. Wind Farm Cluster (WFC)

Kombikraftwerk 2

Märkte
- Angebote
- Portfolio-Optimierung

VPP



“Kupferplatte”

WFC

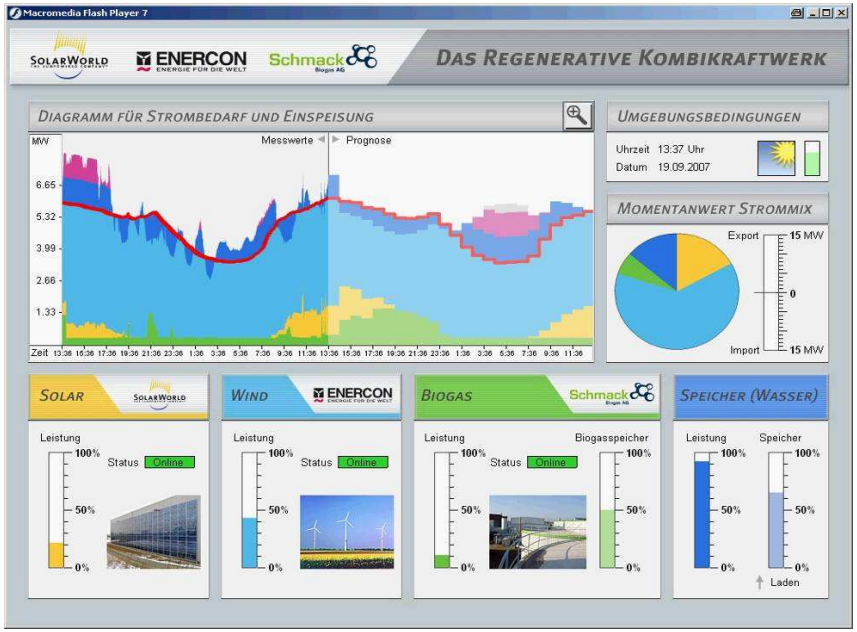
“Netz”

Netze
- Spannung
- Engpassmanagemer

Funktionalitäten
- Vorteil: “Ausgleichseffekt”
- Portfolio-Optimierung
- Frequenzregelung
  (Primär-, Sekundär- und Tertiär-Reserve)

Cluster: Serviceabhängige Definition

Rückblick „Kombikraftwerk1“



- **Demonstration:** Deckung von 1/10.000 des deutschen Stromverbrauchs zu jedem Zeitpunkt.
- **Ergebnis:** Der Stromverbrauch Deutschlands kann komplett und jederzeit durch die erneuerbaren Energien im Land gedeckt werden.
- **Offene Frage**: Ist eine 100% erneuerbare Stromversorgung auch technisch sicher/stabil?

Deutscher Klimaschutzpreis 2009

Das Folgeprojekt „Kombikraftwerk 2“

Kombikraftwerk 2

Gefördert durch:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- **Ziel:** Untersuchung der Stabilität einer 100% erneuerbaren Stromversorgung Deutschlands

  (nicht untersucht wurden die Energiesektoren Wärme und Verkehr sowie wirtschaftliche Fragestellungen)
- **Förderer:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- **Projektvolumen:** 3,053 Mio Euro
- **Fördersumme:** 1,810 Mio Euro
- **Laufzeit:** 3 Jahre
- **Projektende:** Dezember 2013
- **Bearbeiter:** 10 Projektpartner aus Wissenschaft, Industrie und Dienstleistungen
- **www.kombikraftwerk.de**

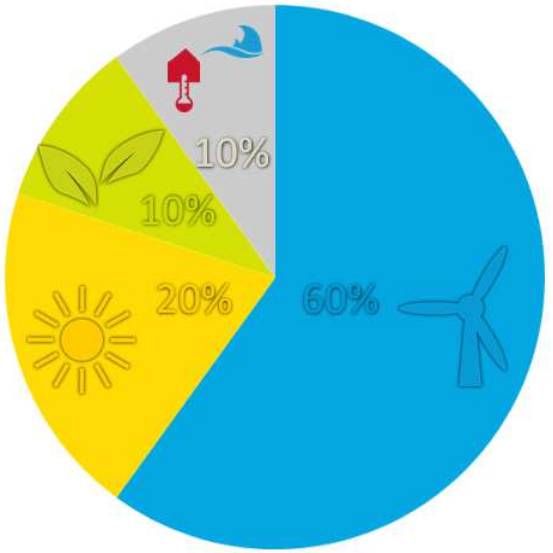
Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE Engineering GmbH · DWD · ENERCON Energie für die Welt · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

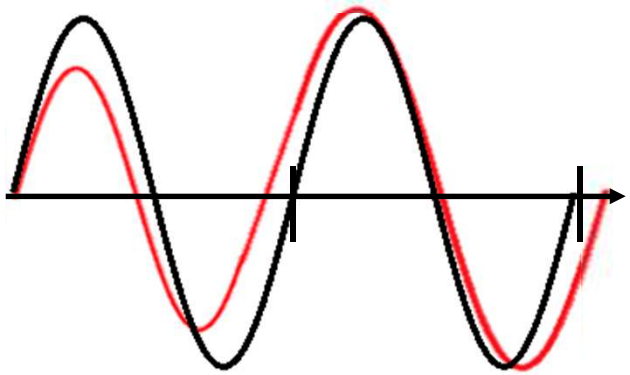
Kombikraftwerk 2

Simulation und Analyse der zukünftigen Stromerzeugung

<u>Entwicklung eines konsistenten, räumlich hochaufgelösten Szenarios</u>

- Ansatz eines Energiemixes
- Detaillierte Modellierung des zukünftigen Kraftwerksparks
- Bestimmung des Speicherbedarfs
- Bestimmung von Erzeugungsspitzen, Überschüssen und Defiziten
- Wo und wann treten Extremsituationen bezüglich Frequenz und Spannung im zukünftigen System auf?

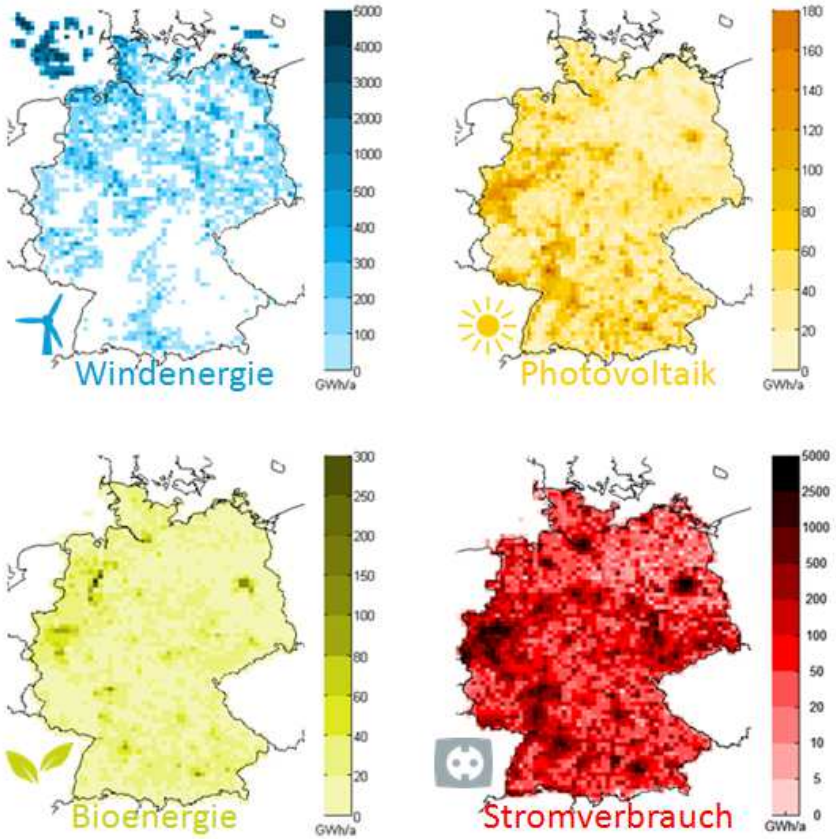




<u>Untersuchung des Systems hinsichtlich seiner Stabilität</u>

- Wie hoch ist der Bedarf an Regelleistung und Blindleistung im System?
- Können alle notwendigen Systemdienstleistungen im System erbracht werden?

Modellierung der räumlichen Verteilung

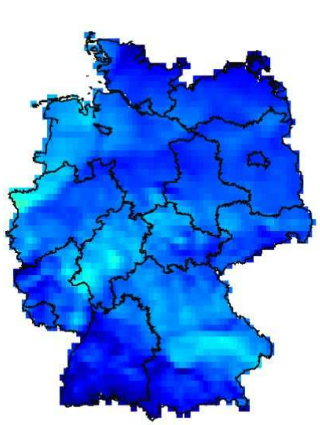


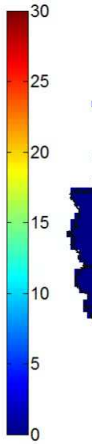
- Hohe Technologievielfalt:
  - ✓ 5 Windenergie-Anlagenklassen
  - ✓ 5 PV-Anlagenarten
  - ✓ 10 Bioenergieformen
  - ✓ Geothermie
  - ✓ Wasserkraft
  - ✓ Methankraftwerke
  - ✓ 4 Energiespeicherarten
  - ✓ 7 Stromverbrauchsbereiche
  - ✓ Im- und Exporte
- Berücksichtigung der Potenzialflächen, heutige Verteilung und Wetterbedingungen
- Einmalig hohe räumliche Auflösung (standortgenau oder 100m x 100m)

Zeitliches Verhalten des Stromversorgungssystems

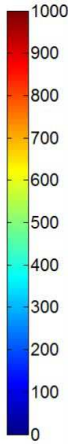
Kombikraftwerk 2

Windgeschwindigkeit [m/s]





Sonneneinstrahlung [W/m²]



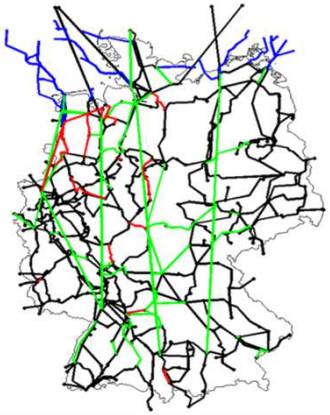
Übertragungsnetzmodell

Heutiges Netz

+ Offshore Anschluss

+ dena1 + NEP2012

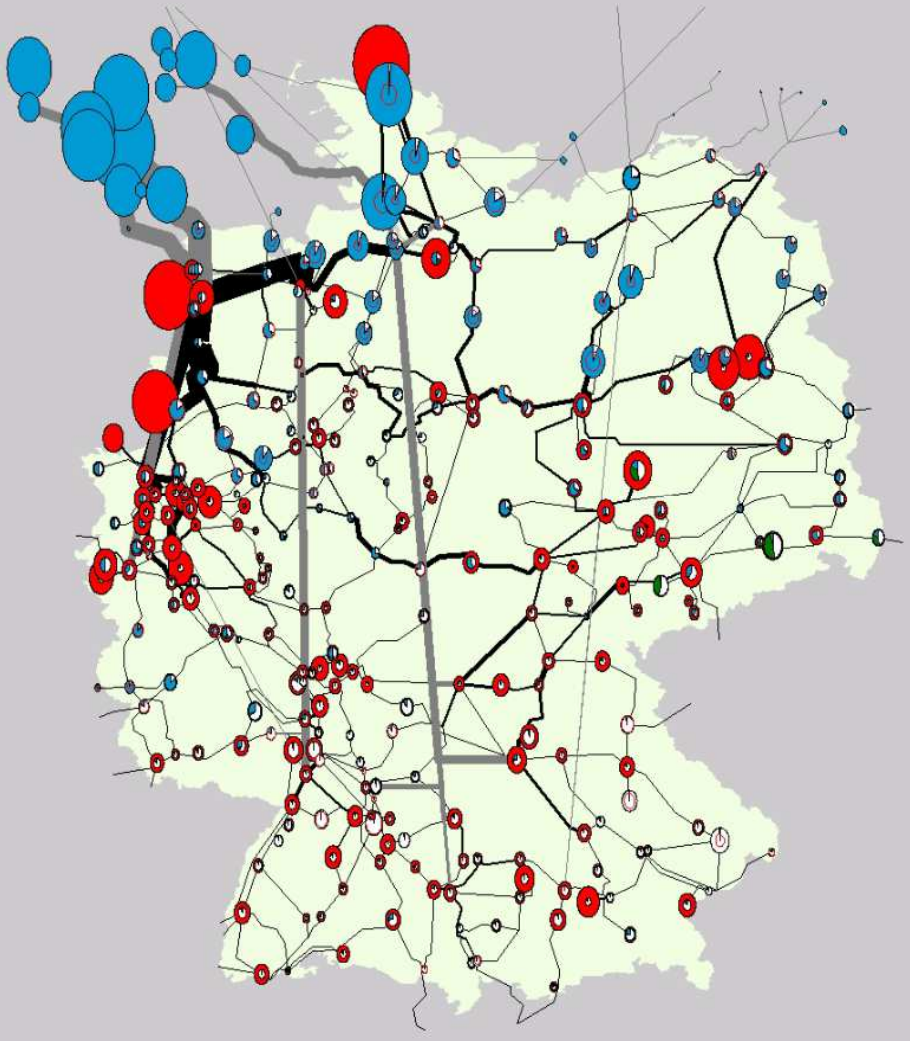
+ Eigener Zubau

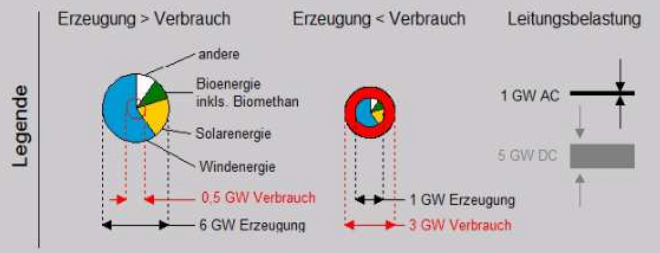


- Wetterabhängige Erzeuger
  - Hochaufgelöste historische Wettermodelldaten vom deutschen Wetterdienst (DWD)
  - Physikalische Modelle. Bspw. Anlagencharakteristiken, gegenseitige Abschattungseffekte (Wind), Ausrichtungen, Neigungswinkel (PV)
- Verbrauch
  - Historische Lastzeitreihen
  - Standardlastprofile
  - Lastmanagement-Strategien
- Ausgleichssystem (Bioenergie, Speicher, Methankraftwerke)
  - Bestimmung der Leistung und Lokalisierung durch kostenoptimierende Einsatz- und Auslegungsrechnung

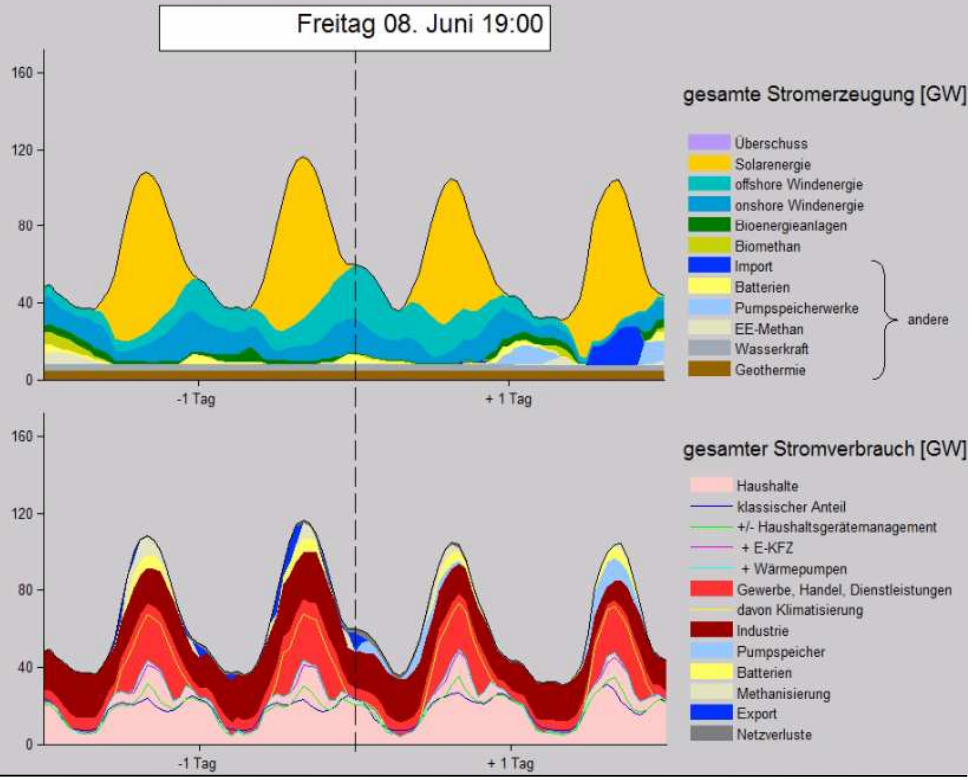
Kombikraftwerk 2

Stromerzeugung, -verbrauch und -transport bei 100% erneuerbaren Energien





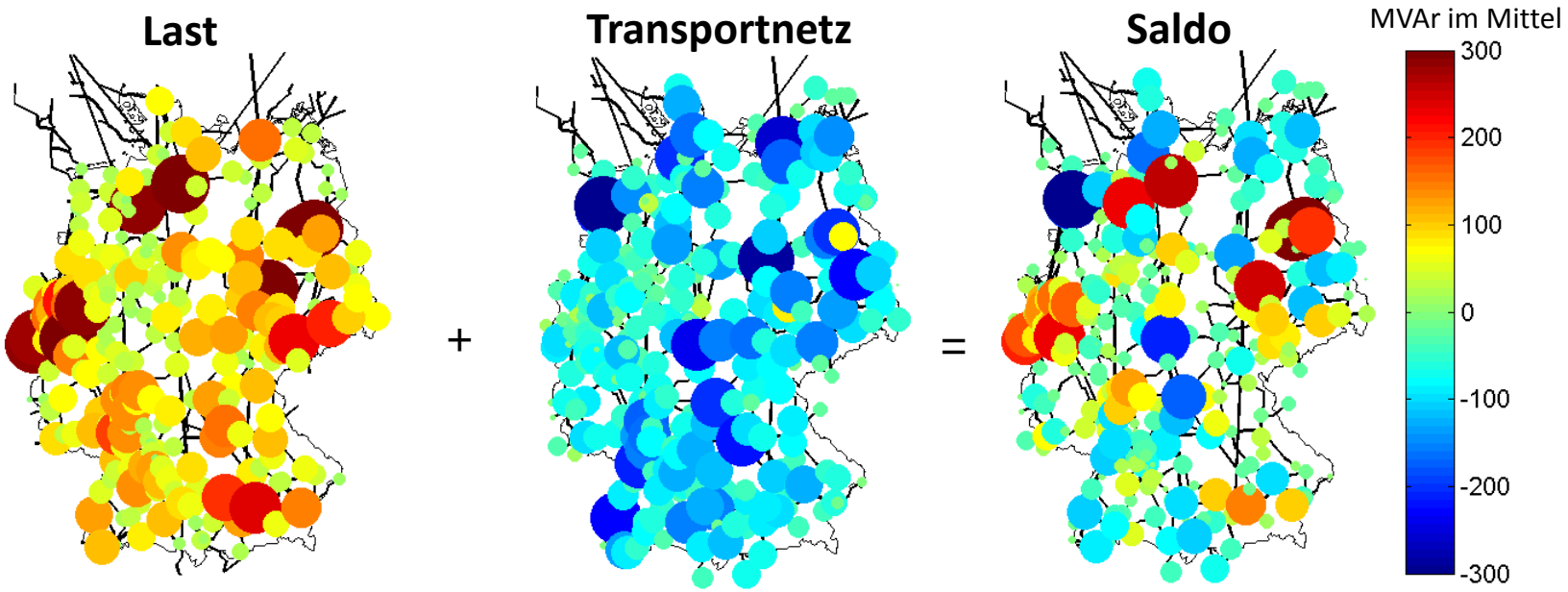
Kombikraftwerk 2



Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE Engineering GmbH · DWD · ENERCON Energie für die Welt · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

Kombikraftwerk 2

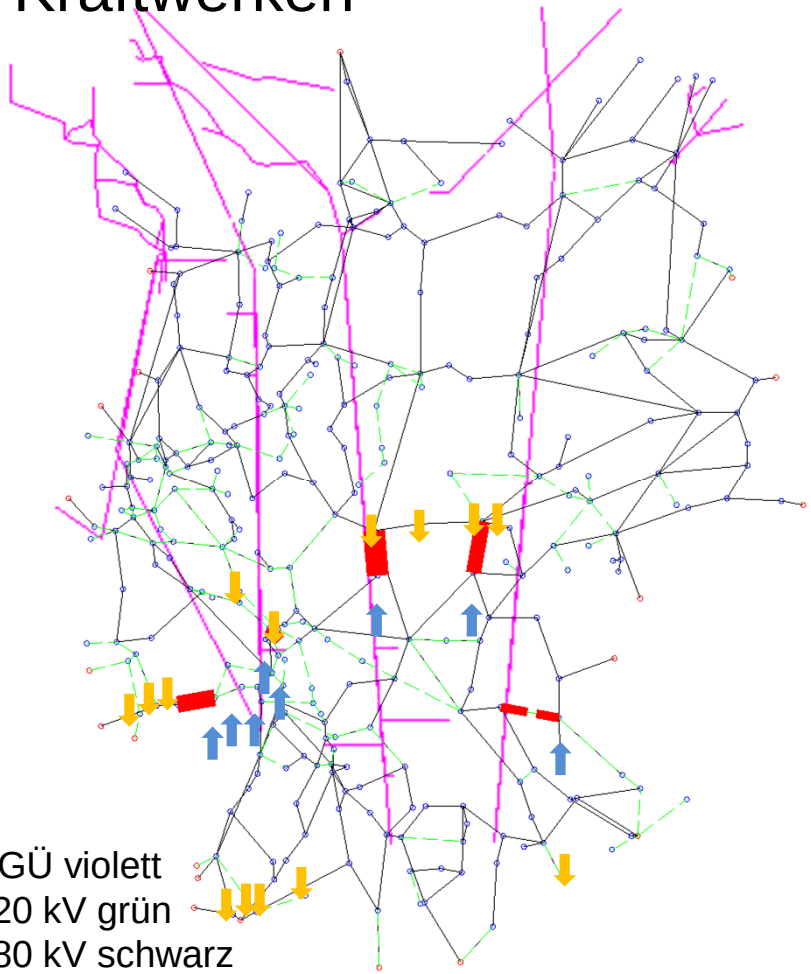
Resultierender Blindleistungsbedarf



- Ausgleichseffekte zwischen dem Blindleistungsbedarf der Last und des Transportnetzes
- Steigender Transport erhöht induktiven Blindleistungsbedarf des Transportnetzes – im Leerlauf benötigt das (ausgebaute) Netz kapazitive Blindleistung
- Da HGÜs den großen landesweiten Leistungstransport übernehmen, wird der induktive Blindleistungsbedarf gemindert.

Kombikraftwerk 2

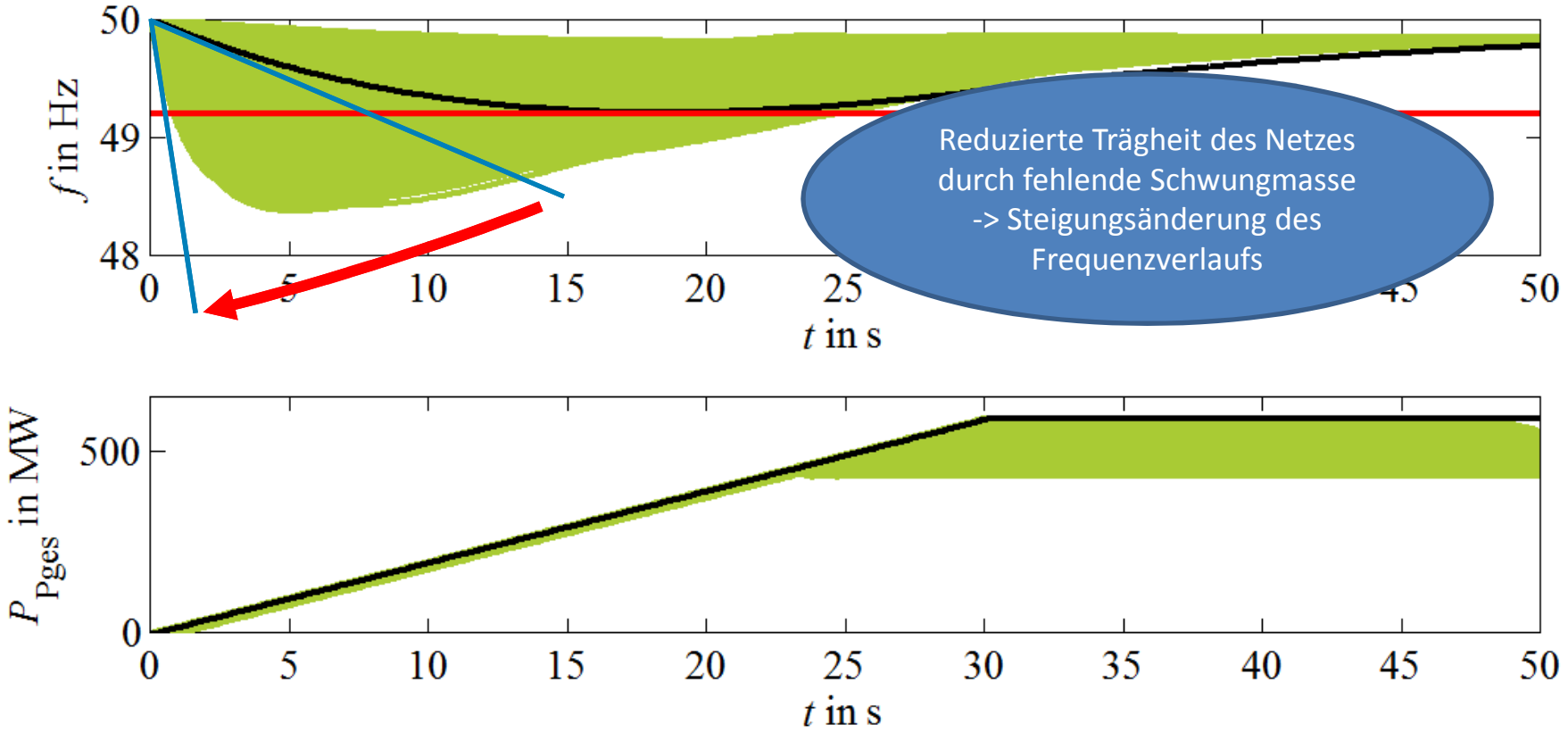
Beheben von multiplen (n-1)-Engpässen mit vielen kleinen Kraftwerken



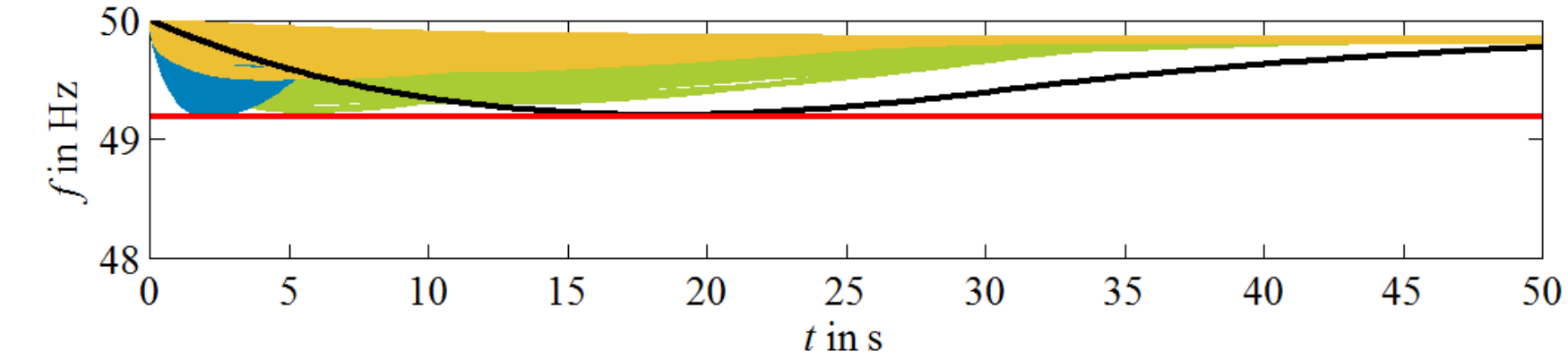
HGÜ violett
220 kV grün
380 kV schwarz

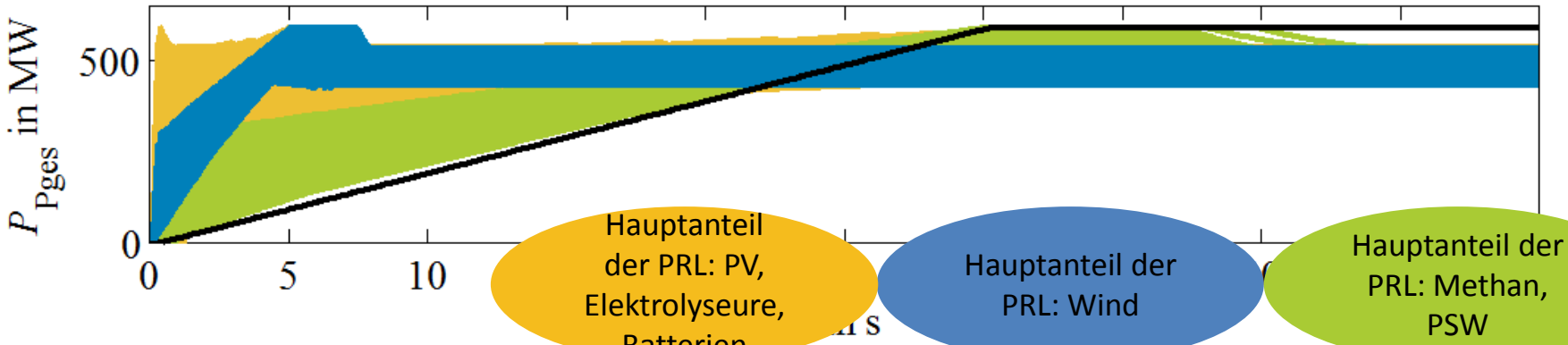
- 5 Engpässe auf 220- und 380-kV-Leitungen (rot)
- Redispatch mit Erzeugungsanlagen an 8 Knoten zum hochregeln ⬆ und an 14 Knoten zum runterregeln ⬇
- Redispatchleistung: 1,47 GW

Frequenzverlauf eines Jahres bei heutiger Regelleistungsbereitstellung



Stabilisierung des Frequenzverlaufs bei Störung





Hauptanteil der PRL: PV, Elektrolyseure, Batterien

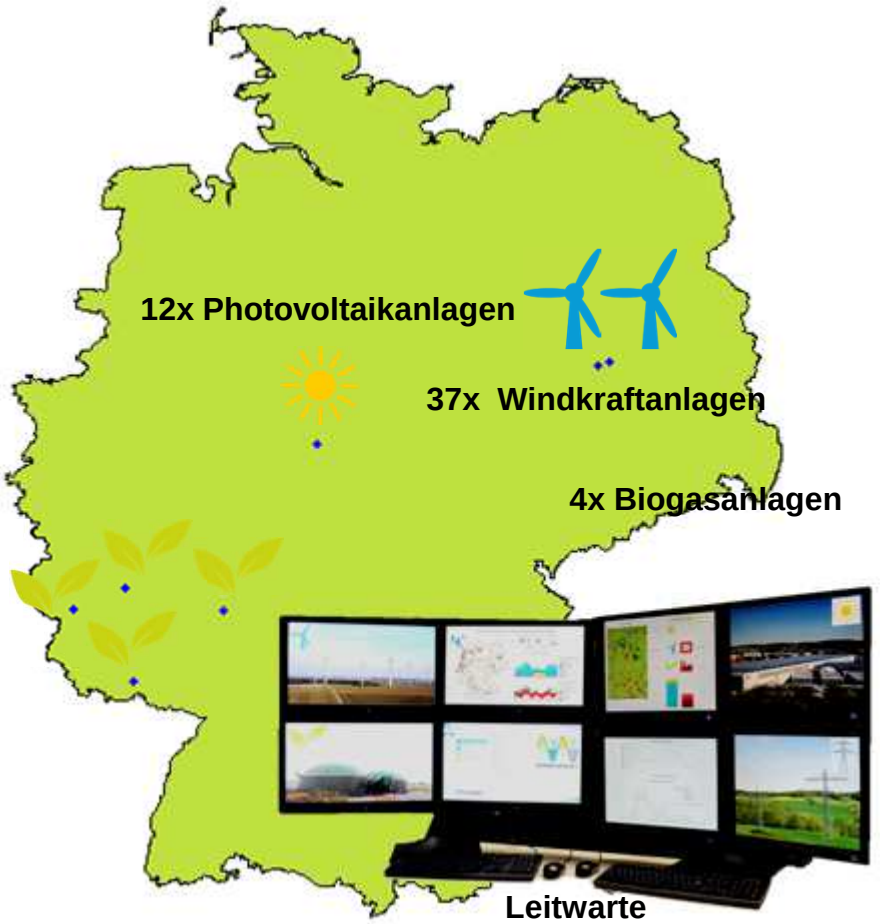
Hauptanteil der PRL: Wind

Hauptanteil der PRL: Methan, PSW

Kombikraftwerk 2

Regelleistungsdemonstration

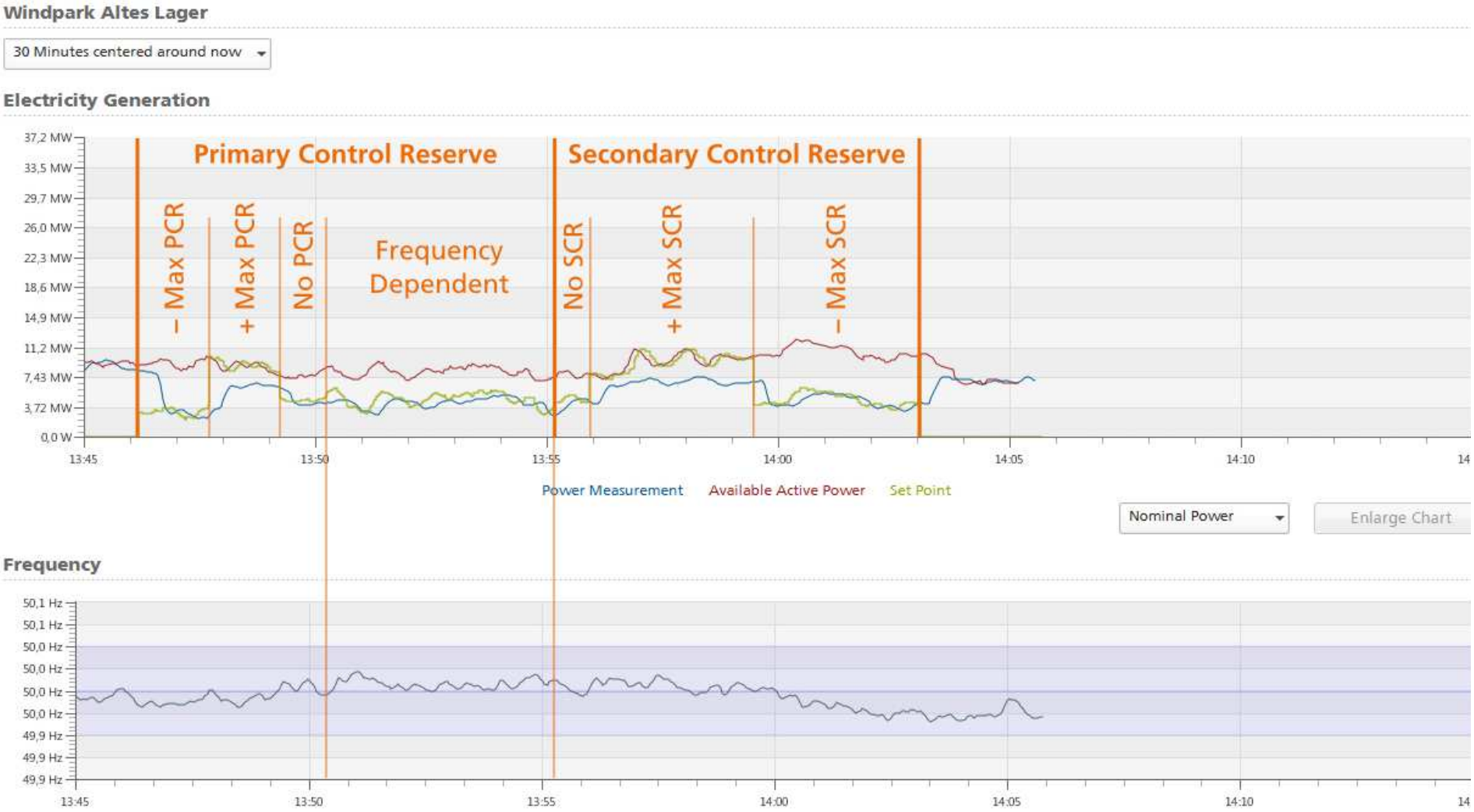
- Erstmalige Demonstration der Regelleistungsbereitstellung durch einen Verbund von Wind-, Solar- und Bioenergieanlagen
- Sekundengenaue, aktive & intelligente Leistungssteuerung eines großen Anlagenverbundes
- Neuartiges Regelungskonzept:
  - probabilistische Leistungsprognosen auf Grundlage von aktuellen Wetterprognosen
  - Bestimmung der möglichen Einspeisung für Solar- & Windenergieanlagen zur Durchführung und dem Nachweis der Regelleistungserbringung



Frequenzregelung - Regelleistungsbereitstelung

Kombikraftwerk 2

3



Zusammenfassung der Projektergebnisse

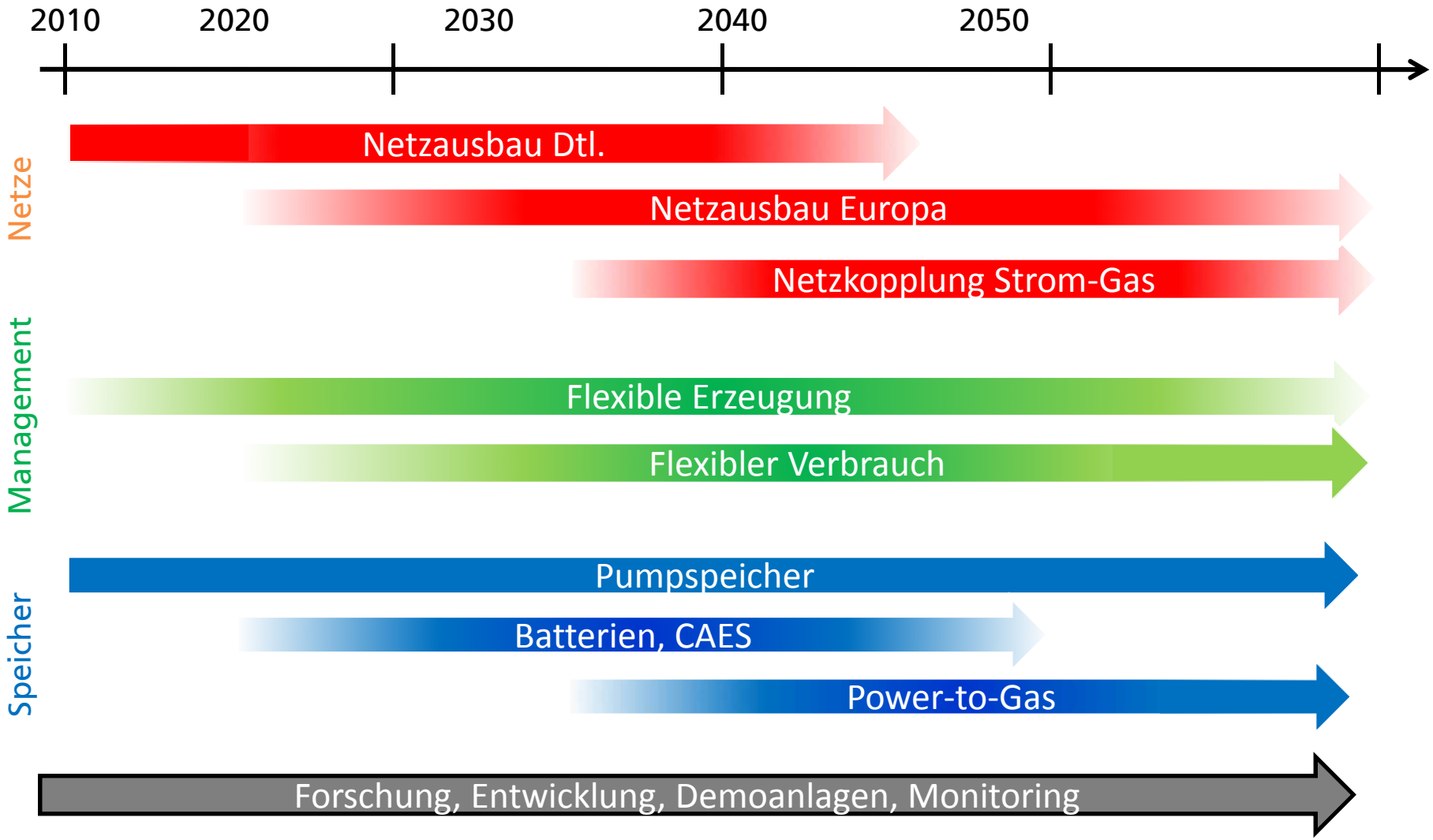
1. **Eine sichere und stabile Stromversorgung** Deutschlands aus 100% erneuerbaren Quellen ist in Zukunft technisch möglich, wenn erneuerbare **Erzeugung, Speicher und Backupkraftwerke mit erneuerbarem Gas** intelligent zusammenwirken
2. **Systemauslegung:**
   - 100% EE sind energetisch **nur durch den massiven Einsatz neuartiger Speichertechnologien** machbar (z.B. Elektrolyseur, Methanisierung, Batterien).
   - Wetterunabhängige Erzeuger (vor allem Methan-, Biomasse- und Wasserkraftwerke) müssen sicherheitshalber mit einer **Gesamtleistung in der Größenordnung der Maximallast** vorhanden sein. Die Methankraftwerke werden mit erneuerbarem und Bio-Methan befeuert.
   - Die **DC-Leitungen des NEP** wirken sich positiv auf Netzengpässe und Spannungshaltung aus.

Zusammenfassung der Projektergebnisse

3. **Frequenzstabilität:**
   - Der durchschnittliche **Regelleistungsbedarf steigt** bei neuartiger dynamischer Dimensionierung voraussichtlich **nicht an** und kann im 100%-EE-System immer problemlos gedeckt werden.
   - Der **Rückgang von rotierender Masse** durch den vermehrten Einsatz von Umrichteranlagen kann durch die **schnellere Bereitstellung von PRL** durch EE-Anlagen und Speicher kompensiert werden. Die dynamische Frequenzhaltung im Szenario ist immer möglich.
4. **Spannungshaltung:**
   - **Blindleistungsbedarf ist immer realistisch deckbar**, ggf. mit zusätzlichen Kompensationsanlagen in Verbrauchszentren.
   - **Dezentrale Erzeugungsanlagen** können zur **Kompensation** des induktiven Blindleistungsbedarfs der Lasten genutzt werden.
5. **Engpassmanagement:**
   - Die **flexiblen Erzeuger und Speicher** wurden derart **positioniert** und eingesetzt, dass die **Netzbelastungen** minimal bleiben. Dies begrenzt den Redispatch- und Netzausbaubedarf.
   - Multiple **(n-1)-Engpässe** können durch **optimierten Redispatch** mit verteilten, kleinen Anlagen **behoben** werden.

Roadmap Energiewende Systemtransformation Strom

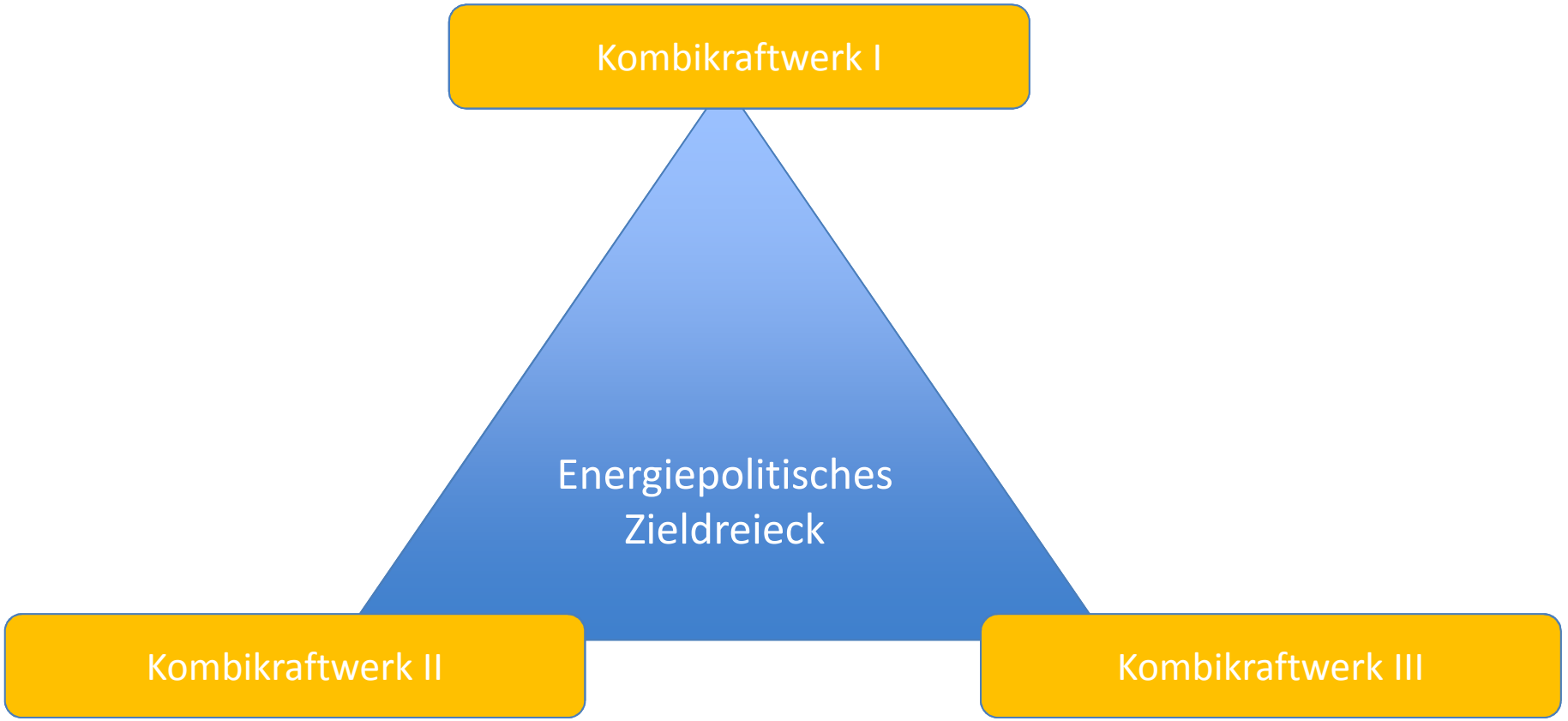
Kombikraftwerk 2



Quelle: IWES, 2011

Agentur für Erneuerbare Energien · CUBE · DWD · ENERCON Energie für die Welt · Fraunhofer IWES · IEH · ÖKOBIT Die Biogasexperten · SIEMENS · SMA · SolarWorld Mit uns wird Sonne Strom.

Wie weiter?


Kombikraftwerk I
Energiepolitisches Zieldreieck
Kombikraftwerk II
Kombikraftwerk III

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik in Kassel und Bremerhaven

advancing wind energy and energy system technology

Forschungsspektrum:

Windenergie von der Materialentwicklung bis zur Netzoptimierung

Energiesystemtechnik für die erneuerbaren Energien

Gründung: 1. 1. 2009 **Mitarbeiter:** ca. 500

Leitung: Prof. Dr. Andreas Reuter, Prof. Dr. Clemens Hoffmann

Dr. Kurt Rohrig

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Stellvertretender Institutsleiter

+49(0)561 7294-330

kurt.rohrig_at_iwes.fraunhofer.de

www.iwes.fraunhofer.de