

---

# Auswirkungen des EE-Ausbaus auf konventionelle Kraftwerke

## Neues Speicherkonzept – 100% EE-Vollversorgung

Dr. Michael Sterner, Yves-Marie Saint-Drenan, Norman Gerhardt,  
Amany von Oehsen, Dr. Kurt Rohrig, Prof. Dr. Jürgen Schmid (IWES)

---



BAG Energie  
Düsseldorf,  
20.04.2010

© Fraunhofer IWES 2010

 **Fraunhofer**  
IWES

## Inhalt

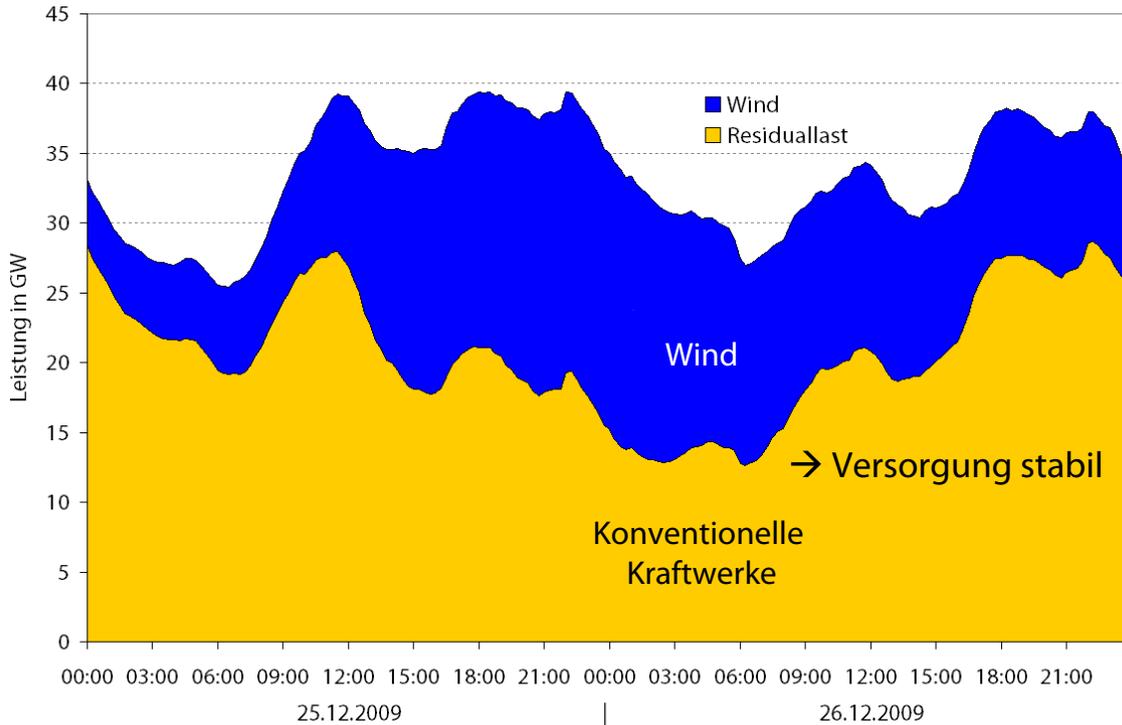
- 1) Herausforderungen im Übergang zu 100% EE:  
Ergebnisse verschiedener Modellläufe mit unterschiedlichen Szenarien
- 2) Erneuerbarer Strom zu erneuerbarem Methan:  
Ein Lösungsansatz zur Integration erneuerbarer Energien
- 3) Die Rolle der Bioenergie in Industrieländern
- 4) 100% EE Versorgungsstrukturen
- 5) Fazit

---

© Fraunhofer IWES 2010

 **Fraunhofer**  
IWES

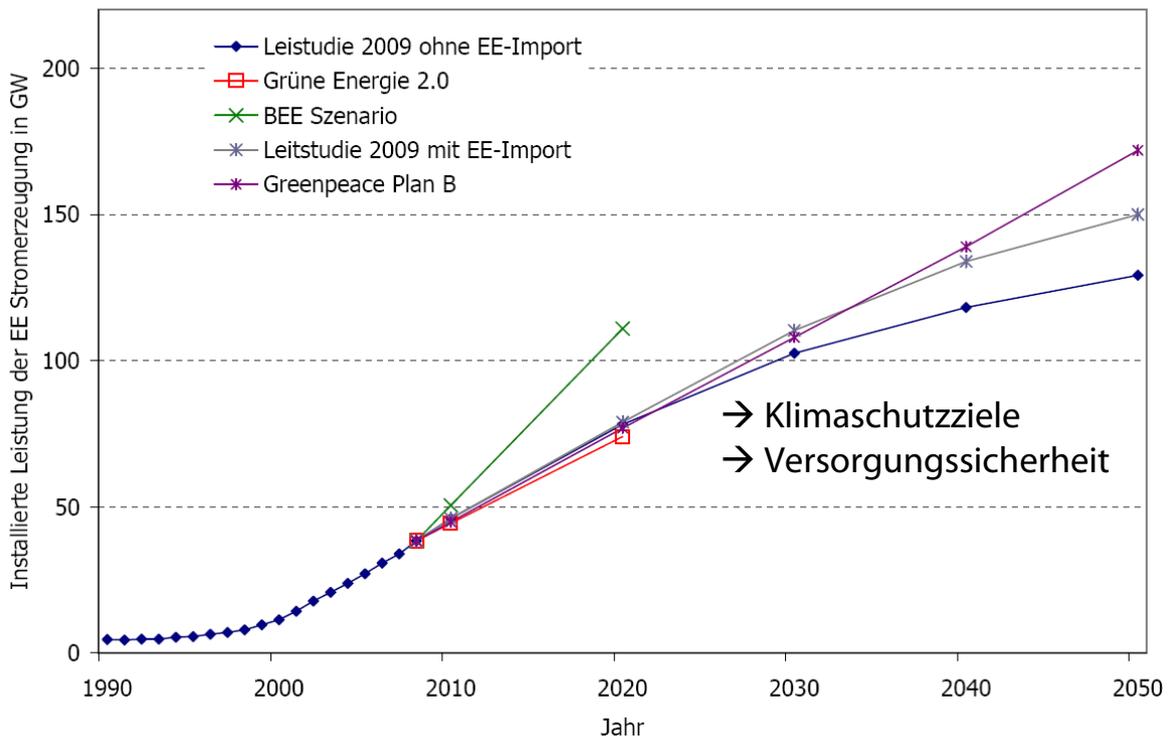
# Die Situation heute – Einspeisung Weihnachten 2009



© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

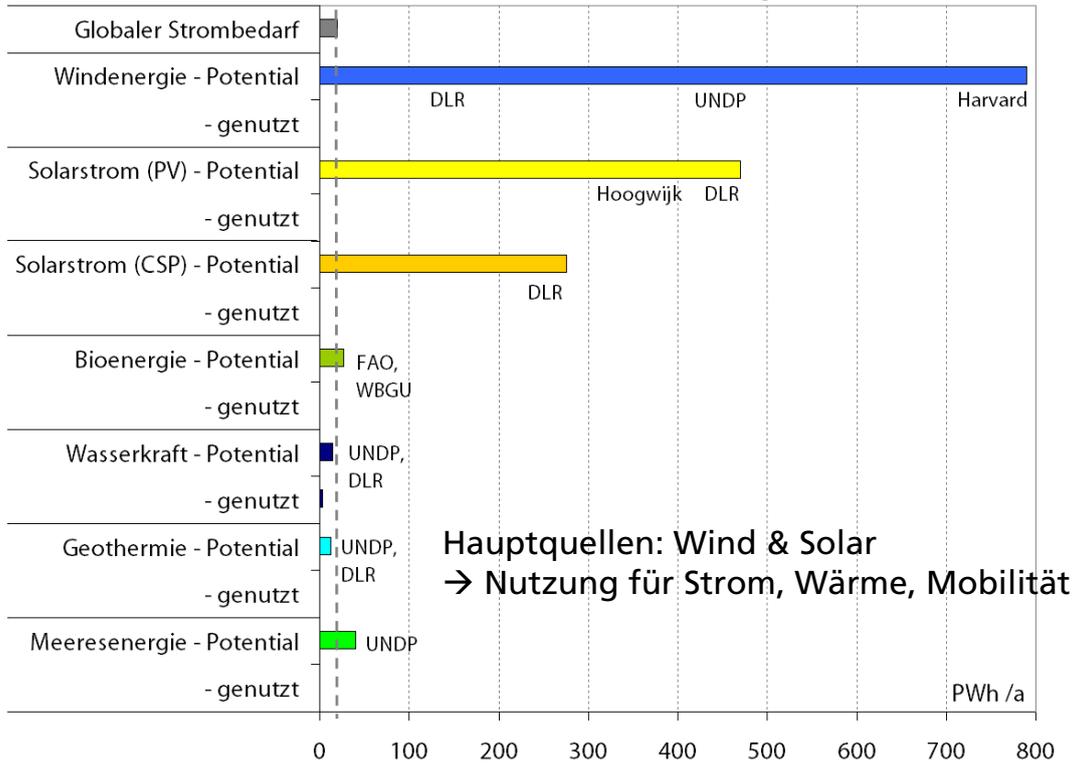
# Die Situation in Zukunft? - Szenarienvergleich



© Fraunhofer IWES 2010

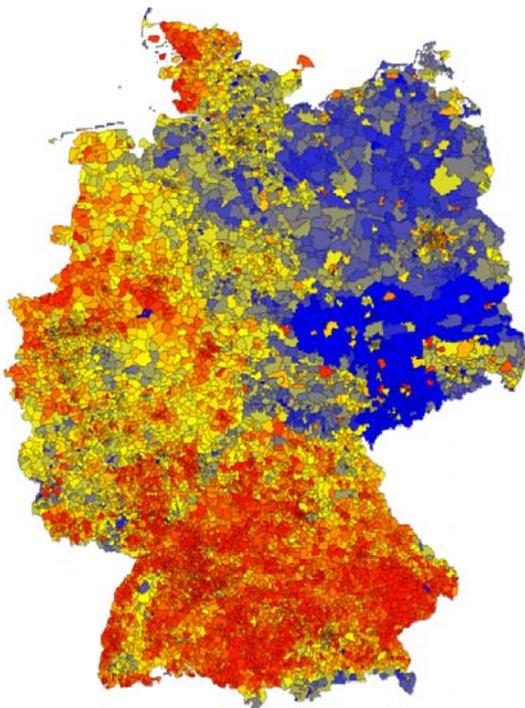
Fraunhofer  
IWES

# Das technische Potential erneuerbarer Energien weltweit



© Fraunhofer IWES 2010

## Dynamische Modellierung - Regionale Verteilung - Beispiel PV

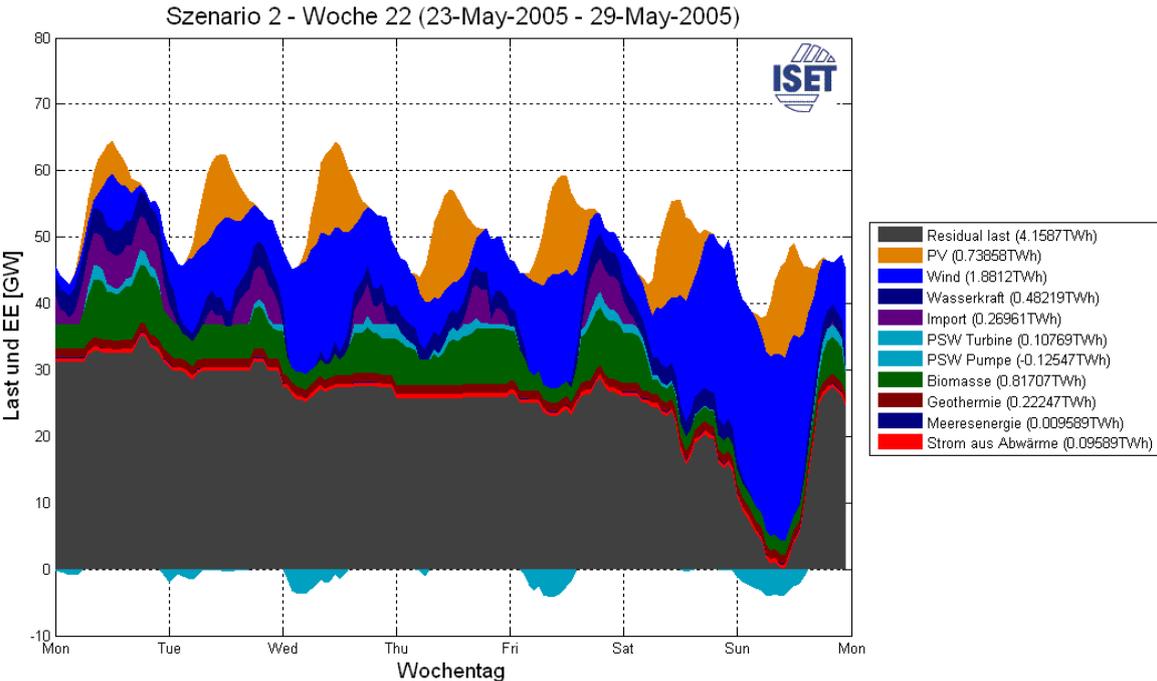


Räumliche Verteilung der installierten PV-Leistung in Deutschland in kWp/km²

Starke Abhängigkeit vom Wetter  
 → Untersuchungszeitraum über mehrerer Jahre erforderlich

© Fraunhofer IWES 2010

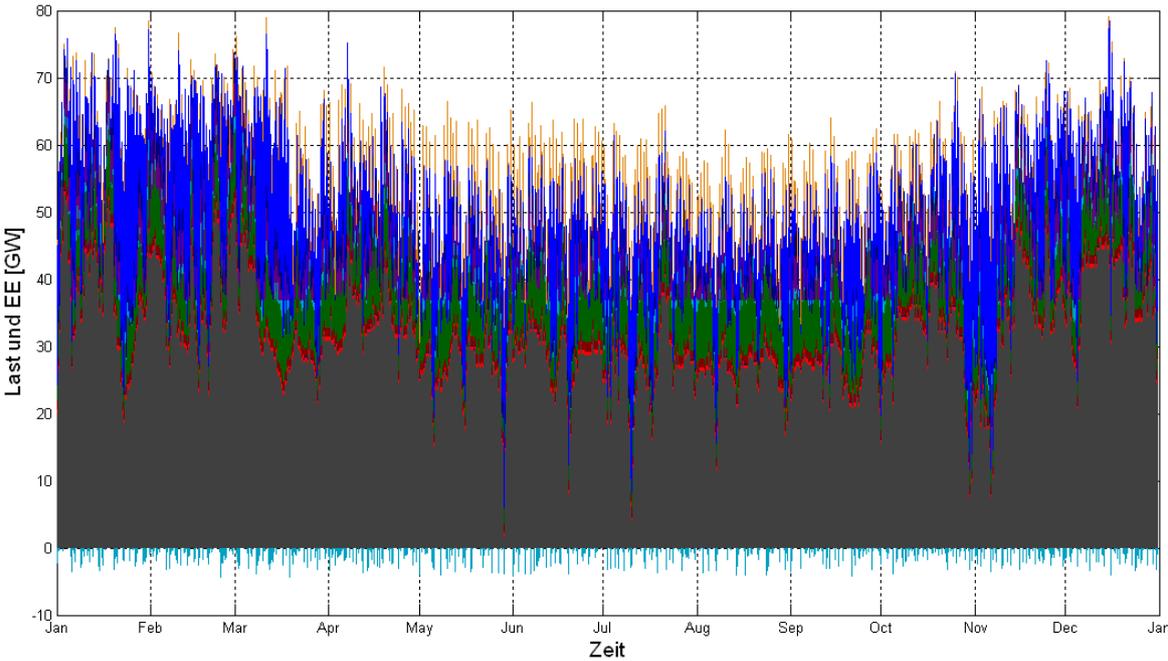
# Einspeisung nach Energie 2.0 – 2020 – Eine Woche - stündlich



© Fraunhofer IWES 2010



# Einspeisung nach Energie 2.0 – 2020 – Ein gesamtes Jahr – std.



© Fraunhofer IWES 2010



# Untersuchungshorizont BEE-Studie

## ■ Was wurde untersucht?

- EE-Einspeisung des BEE-Szenarios für 2020 auf Basis des Wetterjahres 2007
- Fluktuationen in der Stromversorgung
- 2 Ausgleichsoptionen: Transport & Speicher
- Lastprofil (Residuale Last), welches vom konventionellen Kraftwerkspark zu decken ist

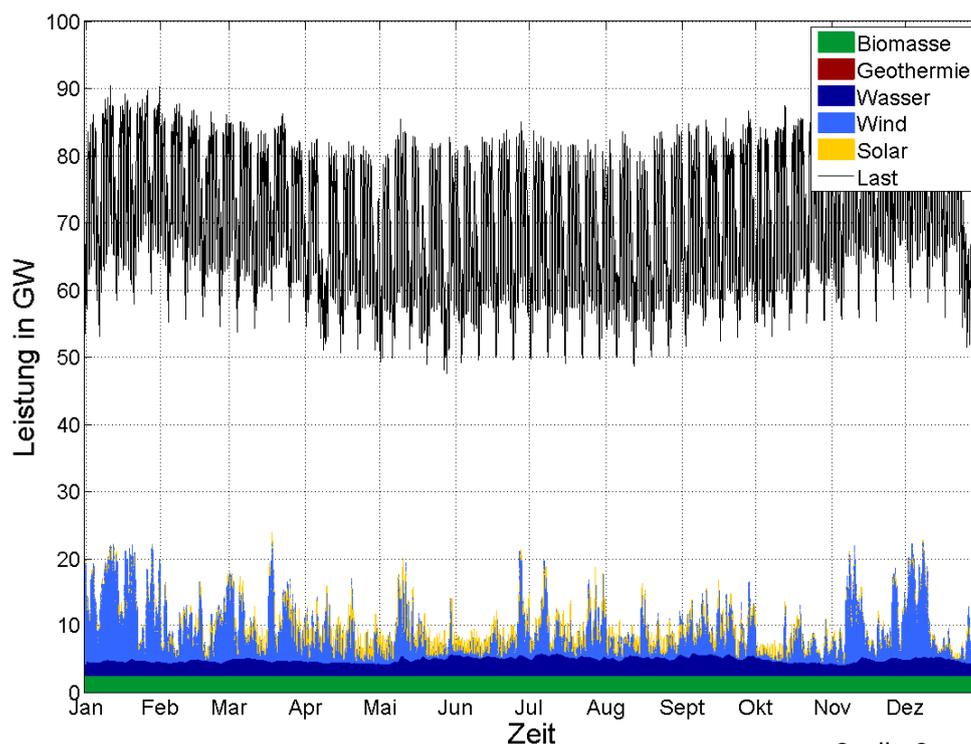
## ■ Was wurde nicht untersucht?

- Kraftwerkseinsatzplanung der konventionellen Kraftwerke
- Netzaspekte: Netzausbau – Netzengpässe
- Technische Versorgungssicherheit: gesicherte Leistung – Regelleistung
- Bewertung des BEE-Szenarios für 2020

© Fraunhofer IWES 2010

 **Fraunhofer**  
IWES

## Simulation von 2007: 15% EE - ein Jahr – stündliche Auflösung

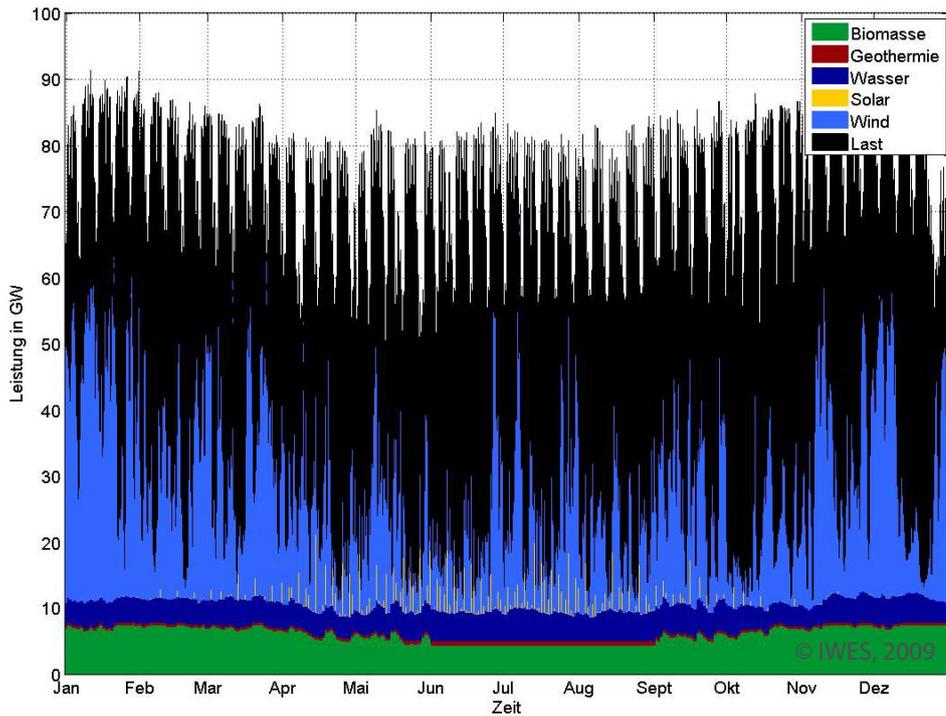


Quelle: Sterner et al., 2010

© Fraunhofer IWES 2010

 **Fraunhofer**  
IWES

## BEE-Szenario 2020: 47% EE - ein Jahr – stündliche Auflösung

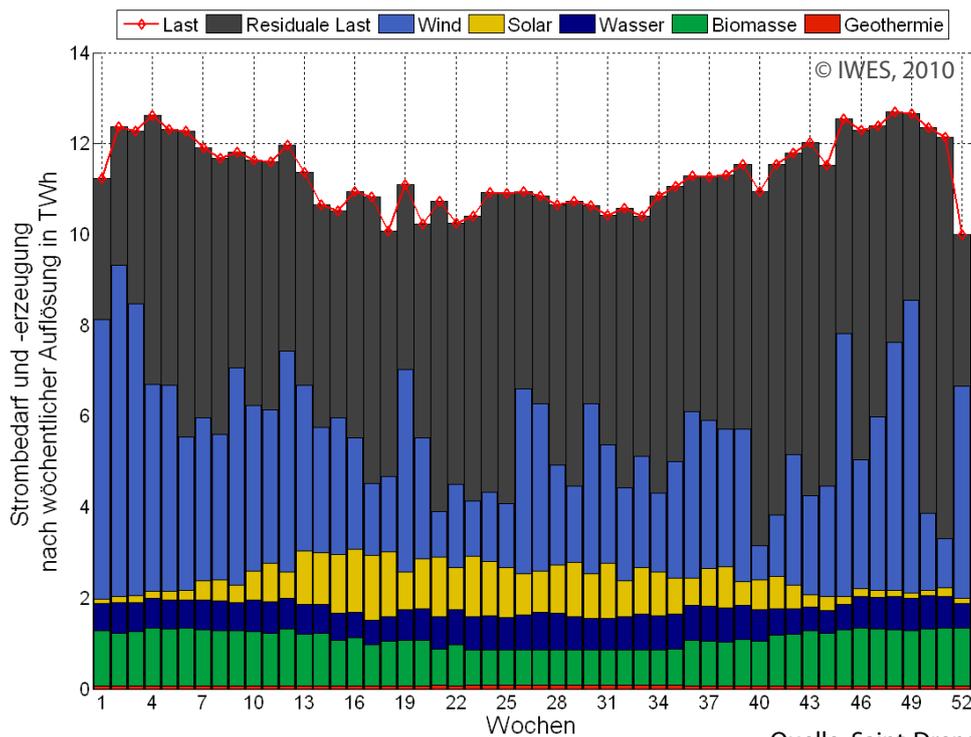


Quelle: Saint-Drenan et al., 2009

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## BEE-Szenario 2020: 47% EE - ein Jahr – wöchentliche Auflösung

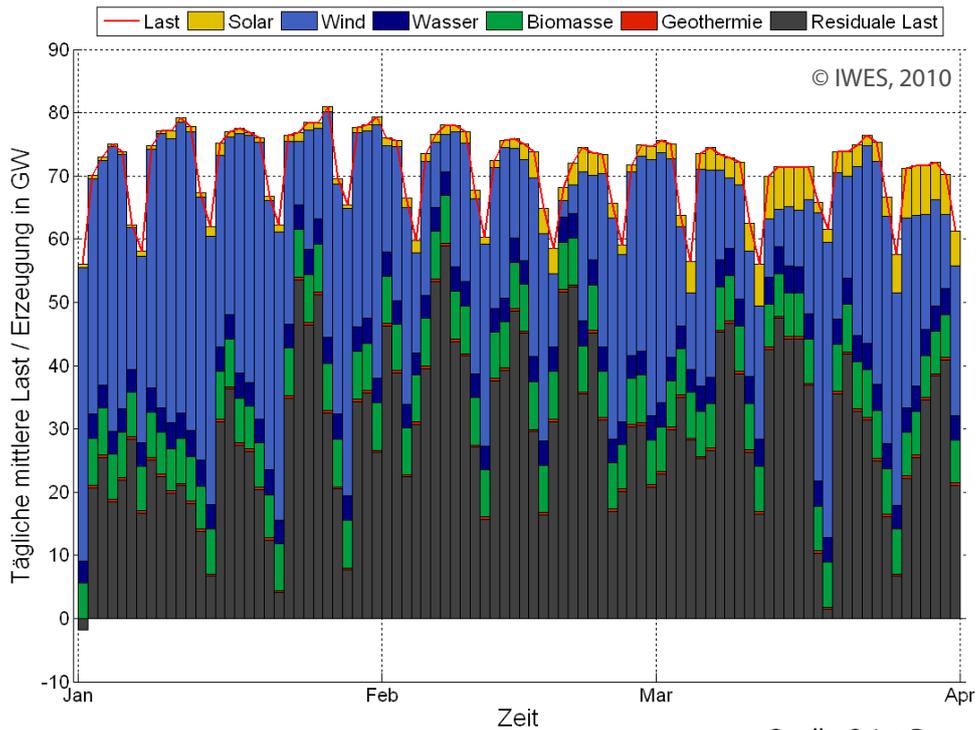


Quelle: Saint-Drenan et al., 2009

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

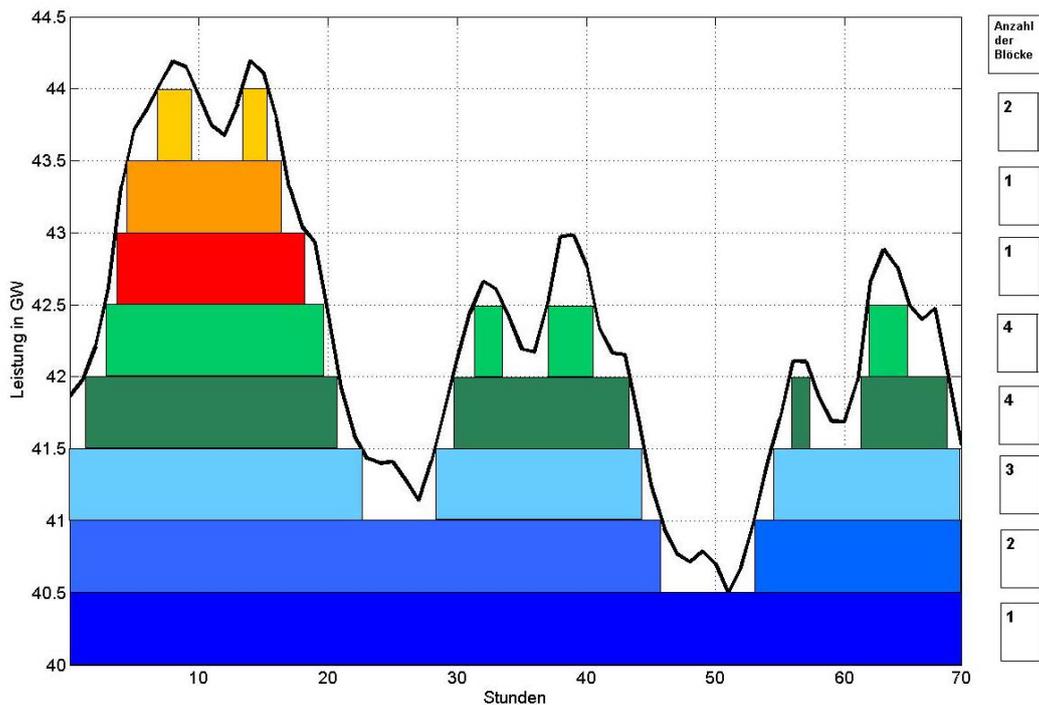
# BEE-Szenario 2020: 47% EE - ein Quartal – tägliche Auflösung



© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

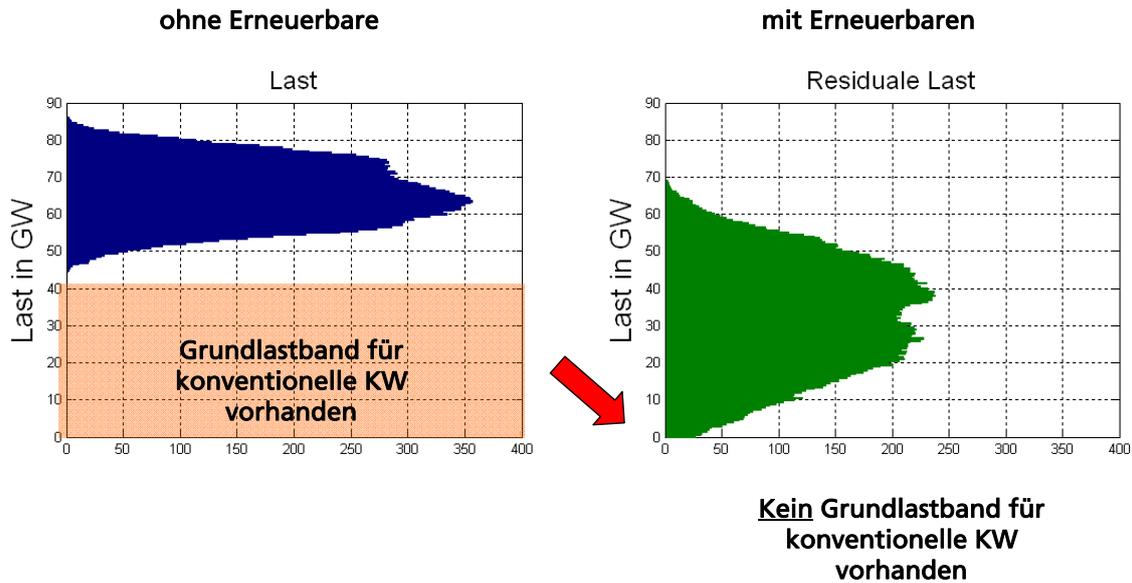
## 47% EE - Häufigkeit der An- und Abfahrvorgänge - Beispiel



© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## Anzahl der notwendigen "Abregelungen" in 500 MW Blöcken Häufigkeit der An- und Abschaltungen im jeweiligen Leistungsbereich



Quelle: Saint-Drenan et al., 2009

## Ergebnisse zur fluktuierenden EE-Einspeisung von 47% (BEE)

- EE-Einspeisung immer vorhanden (15% - 110% Lastdeckung)
  - Gute Korrelation auf jährlicher Basis, starke Flukt. auf wöchentl. Basis
  - Dauerbetrieb von konventionellen Kraftwerken nimmt ab
    - „klassischer Grundlastbereich“ löst sich auf - Überkapazitäten
    - höherer Mittel- und Spitzenlastbedarf – Unterkapazitäten
  - Konventionelle Kraftwerke müssen flexibler werden
    - häufiger Teillastbetrieb
    - häufige An- und Abfahrvorgänge notwendig
    - Wirtschaftlichkeit unsicher
- Neubau nur, wenn Flexibilität nachgewiesen werden kann
- Bestehende Kraftwerke reichen aus! (mit Retrofit + etwas Gas-KW)

# Konsequenzen für konventionelle Kraftwerke

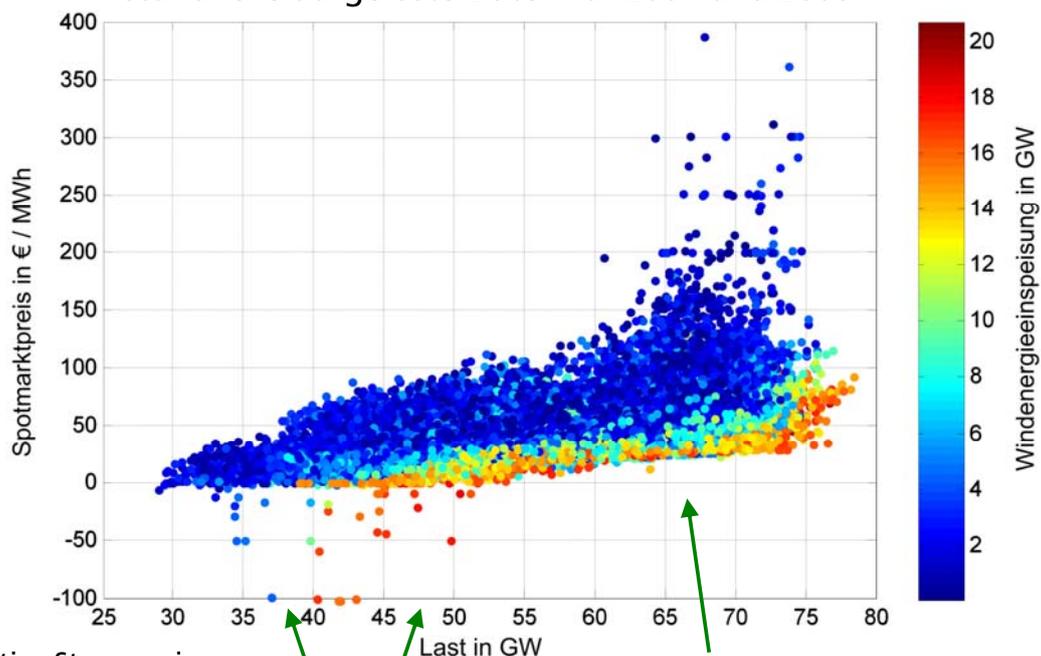
- Lastfolgebetrieb wird zum Normalbetrieb
- Alle KW müssen zur Systemstabilität (Regelenergie) beitragen
- Retrofit → bestehende fossile Kraftwerke flexibler machen
- Technische Regelbarkeit (0-100%) und EE-Integrationsfähigkeit von Kernkraftwerken ist noch zu verifizieren → Demo
- Neue Betreibermodelle aufgrund absehbar geringer Betriebsstunden erforderlich (z.B. Kapazitätsmarkt: Leistungspreis für das Vorhalten einer gewissen Leistung)
- (RWE, 2009): „Nur flexible Kohle- und Gas-Kraftwerke sind den veränderten Marktanforderungen gewachsen“

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## Korrelation Wind & Last & EEX – deutliche Zusammenhänge

stündliche aufgelöste Daten für 2007 und 2008



Negative Strompreise  
zu Schwachlastzeiten bei wenig / viel Wind

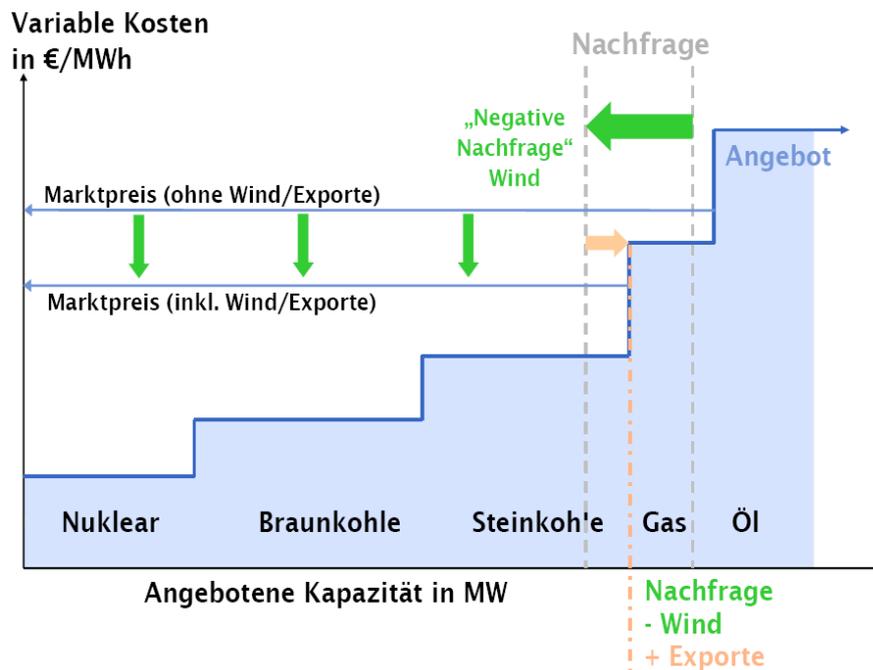
Wind senkt den Spotmarktpreis

Quelle: IWES - work in progress, 2010

© Fraunhofer IWES 2010

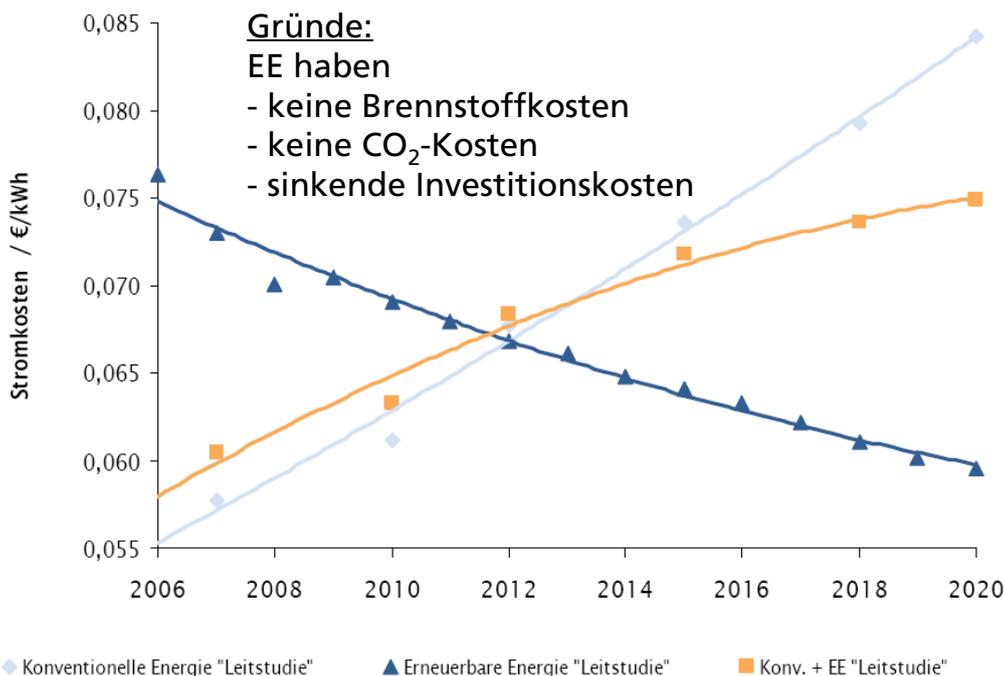
Fraunhofer  
IWES

# Auswirkungen von EE auf die Merit-Order



Quelle: RWE, LBBW Research., 2010

# EE haben einen Strompreis-dämpfenden Effekt

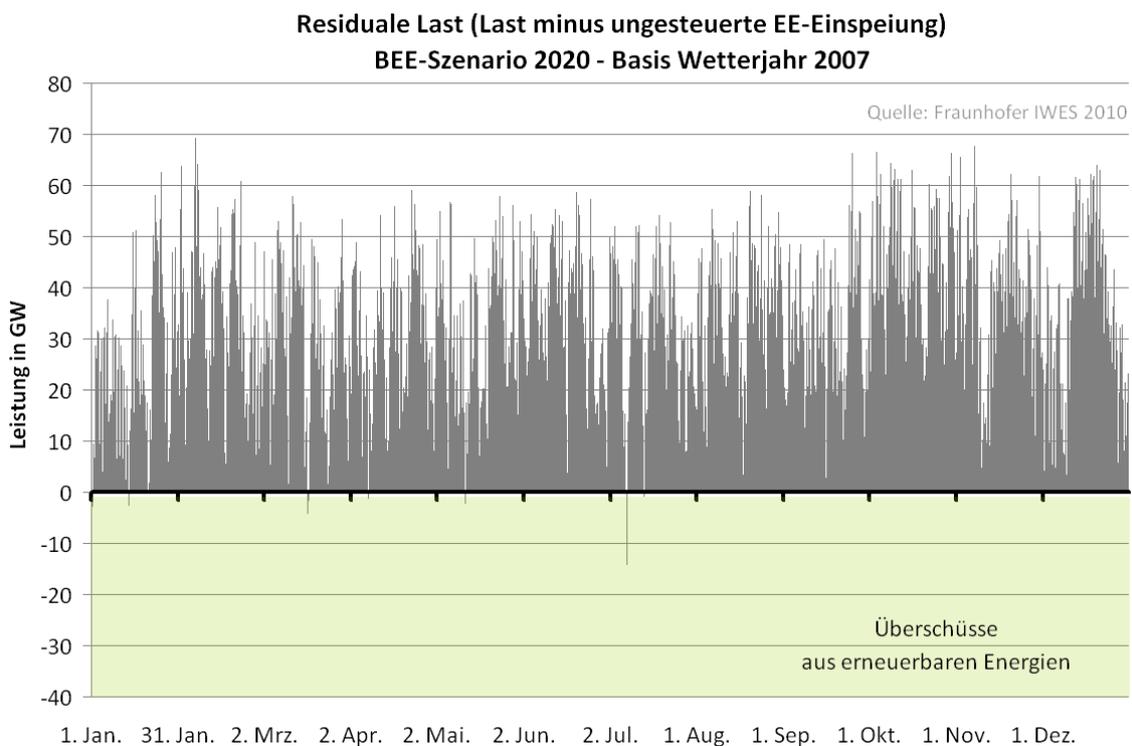


Quelle: LBBW Research., 2010

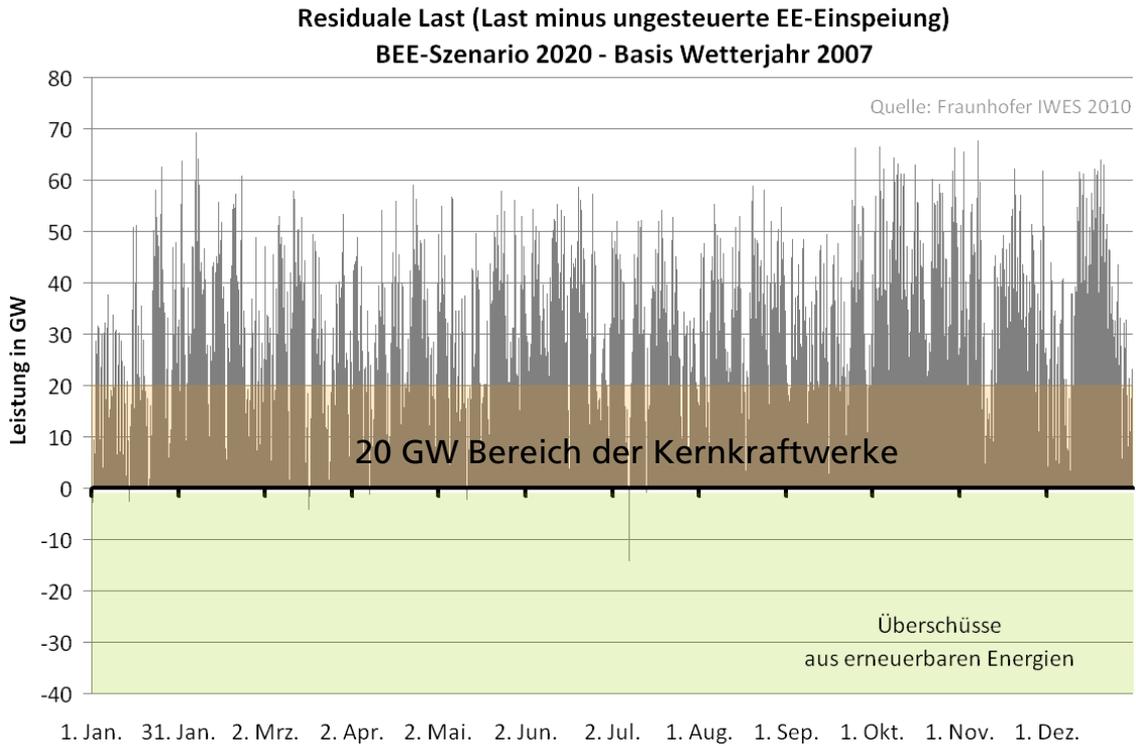
# Generelle Tendenzen

- Erneuerbare Energien reduzieren den Grundlastbedarf drastisch
- Anforderungen an den konventionellen Kraftwerkspark
  - Technologische Herausforderungen
    - hohe Flexibilität, hohe Robustheit
    - hohe Regelbarkeit, dafür entscheidend:  
(1) Mindest-Stillstandzeiten, (2) Anfahrtdauer, (3) Mindest-Betriebszeiten
  - Wirtschaftlichkeit unsicher
    - geringere Auslastung
    - nur Back-up für gesicherte Leistung für wenige Stunden
- Potentieller Systemkonflikt
  - technisch: (1) Abregelung von konvention. vs. erneuerbare Energien  
(2) Ausbau von allen Erzeugungsarten (Überkapazitäten)
  - wirtschaftlich: z.B. viel Wind → geringere Großhandelspreise (EEX)  
→ geringere Einnahmen mit Grundlast-KW

## BEE-Szenario: Residuale Last für 2020 – EE-Anteil: 47%



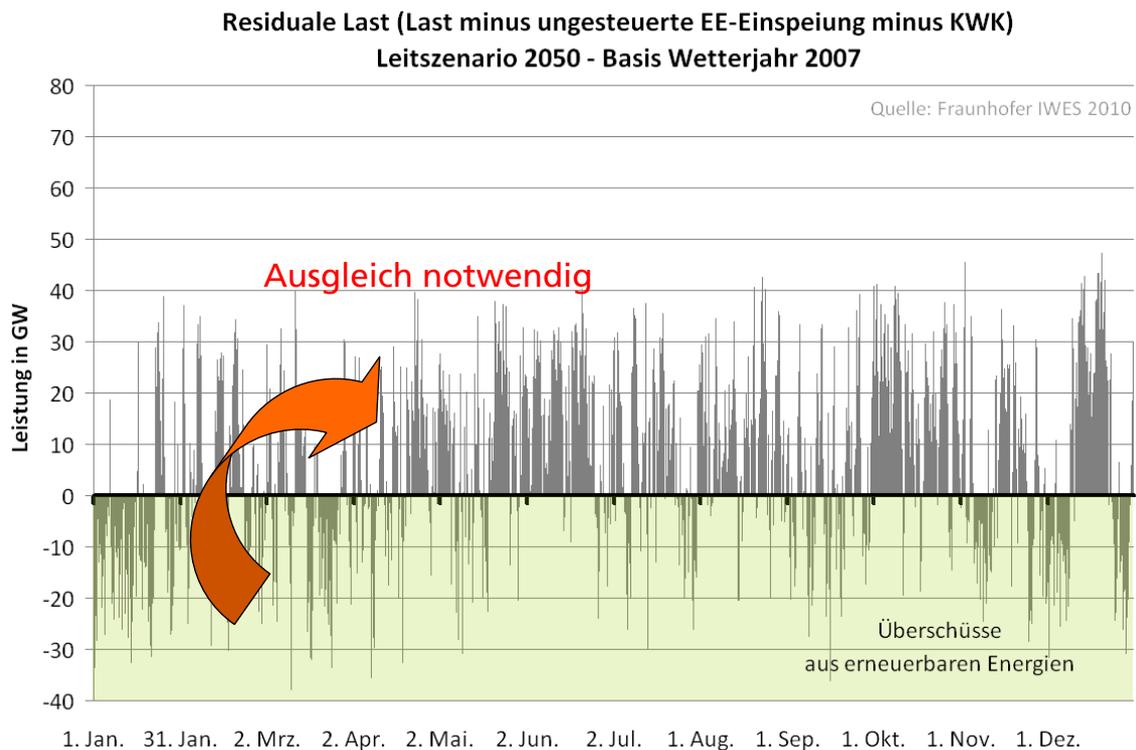
# BEE-Szenario: Residuale Last für 2020 – EE-Anteil: 47%



© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

# BMU Leitstudie: Residuale Last für 2050 – EE-Anteil: 78%



© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

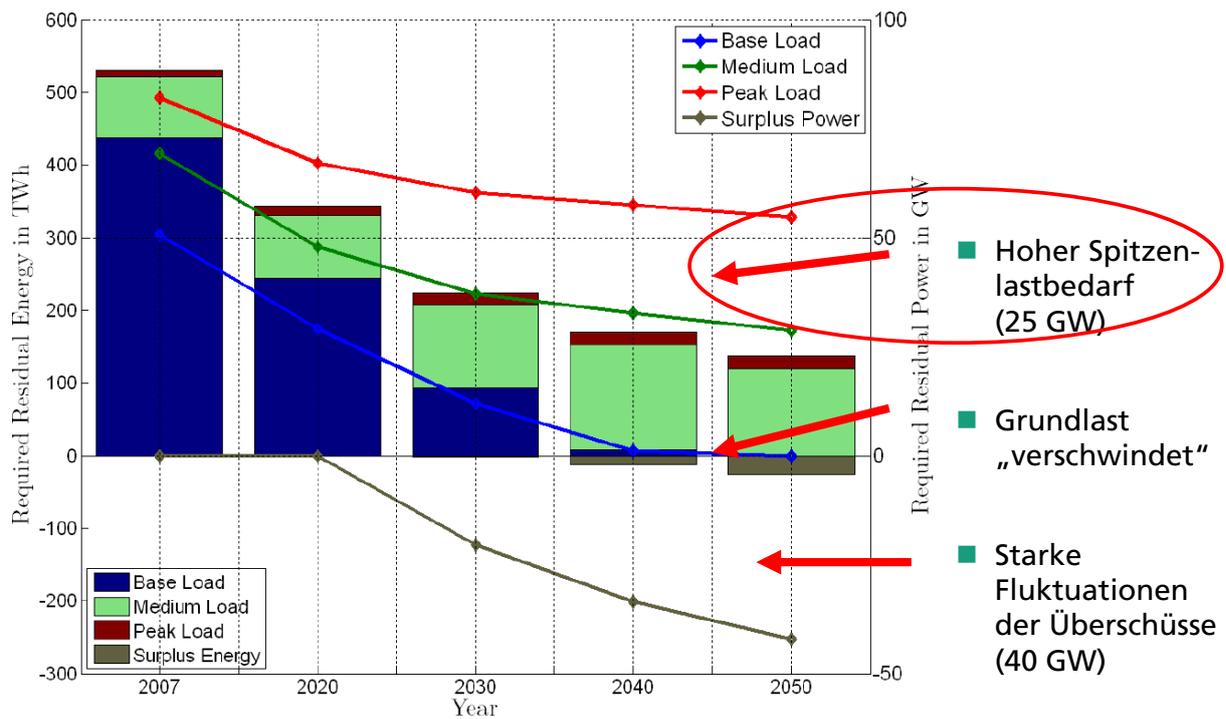
## Ausgleichsmaßnahmen in 100% EE-Stromversorgung EE übernehmen Systemdienstleistungen (1)

- **Transport**
  - Netzausbau
  - Europäisches Supergrid für Strom und Gas
- **Speicher**
  - Kurzzeit (Tage): Pumpspeicher, Druckluft, Batterien
  - Langzeit (Saisonal): Pumpspeicher in Norwegen, Wind / Solarstrom im Erdgasnetz als EE-Methan
- **Energiemanagement**
  - Erzeugung: Kombikraftwerk mit EE-Prognosen, Gas-KW mit EE-Methan
  - Verbrauch: Gesteuerter Verbrauch (E-KFZ, Wärmepumpen, Smart Grids)

## Ausgleichsmaßnahmen in 100% EE-Stromversorgung EE übernehmen Systemdienstleistungen (2)

- **Ausgleichsmaßnahmen**
  - Transport
  - Speicher
  - Energiemanagement
- **Technische Stabilität durch alle 3 Maßnahmen gegeben**
  - dafür notwendig:
  - Anpassung der Teilnahmebedingungen für EE am Regelenergiemarkt (d.h. Verkürzung der Ausschreibungszeiträume auf 1 Tag)
  - Hohe Kapazität an Gas-KW mit EE-Methan am Höchst- und Hochspannungsnetz bzw. Pumpspeicherwerken
  - Ökonomisches Optimum zwischen Ausgleichsmaßnahmen und EE-Abregelung
  - Kapazitätsmarkt für konventionelle (Gas)-Kraftwerke im Übergang und Endausbau: Leistungspreis für Leistungsvorhaltung plus Arbeitspreis – ähnlich zum Regelleistungsmarkt
- **Damit wird eine regenerative Vollversorgung technisch möglich**

## Benötigter Bedarf an konv. Leistung und Energie in der Leitstudie



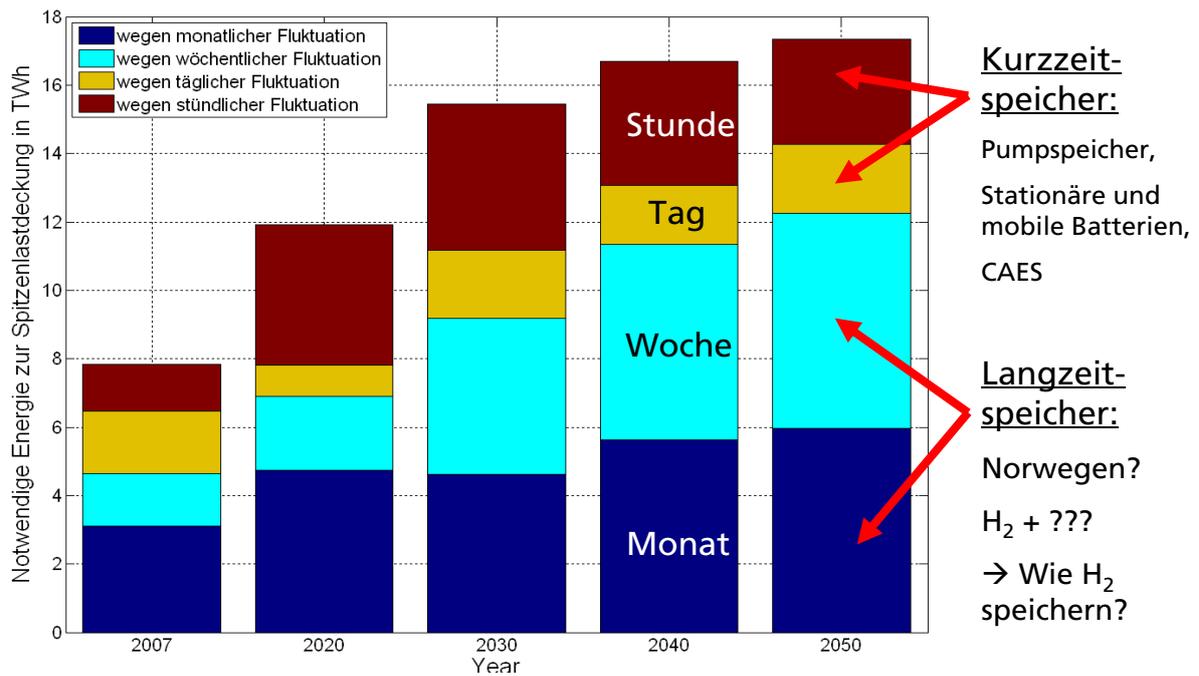
Herausforderung: Überschüsse mit Spitzenbedarf übereinbringen

Quelle: Sterner et al., 2010

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## Verteilung der benötigten Spitzenlastenergie in TWh



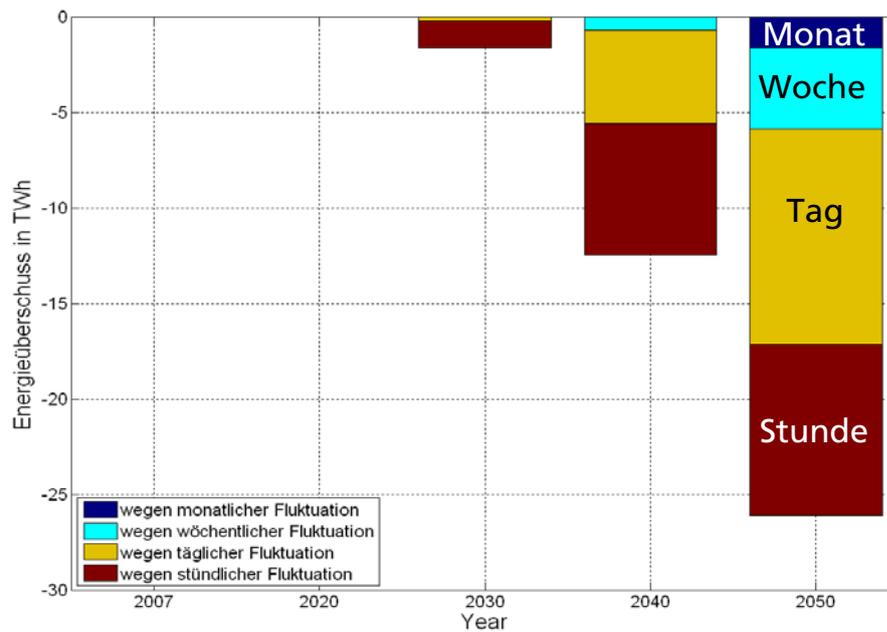
Größte Herausforderung: Ausgleich von Langzeitfluktuationen

Quelle: Sterner et al., 2010

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

# Verteilung der Energieüberschüsse in TWh



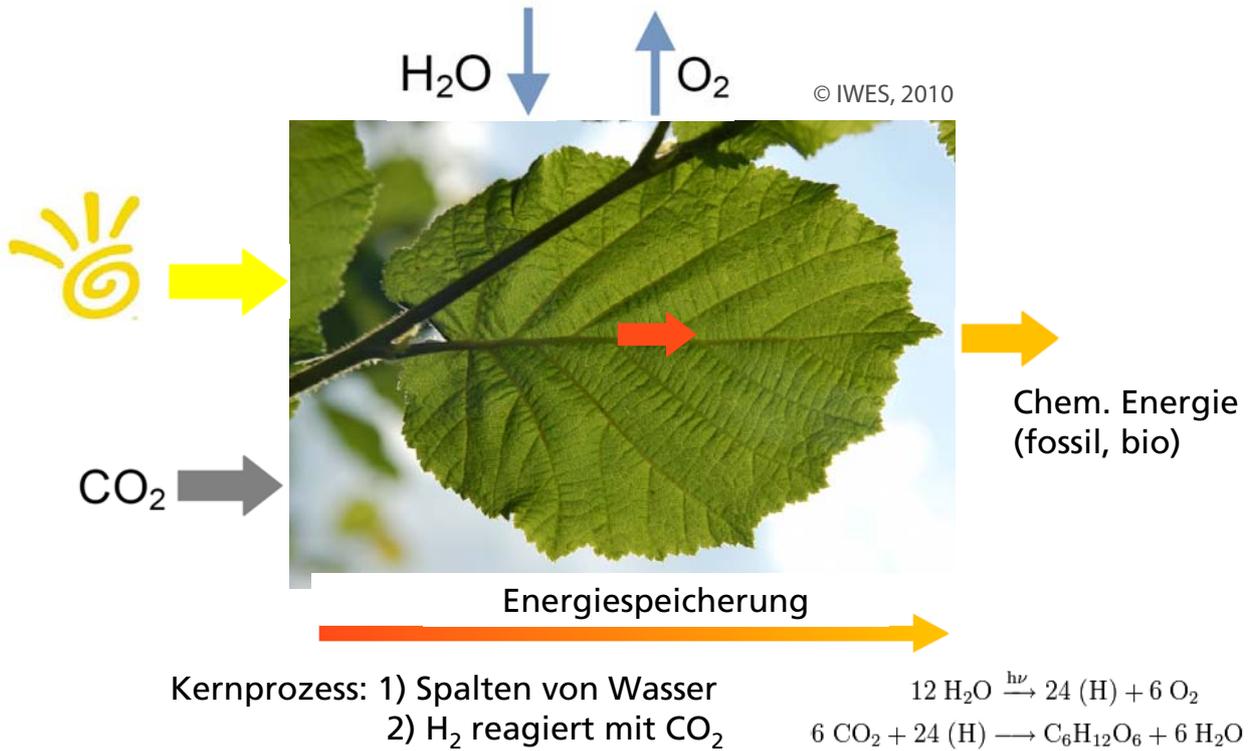
**Beste Kombination: Tägliche Einspeicherung / wöchentl., monatl. Ausspeicherung**  
→ geringe Speicherkosten erforderlich!

Quelle: Sterner et al., 2010

## Inhalt

- 1) Herausforderungen im Übergang zu 100% EE:  
Ergebnisse verschiedener Modellläufe mit unterschiedlichen Szenarien
- 2) Erneuerbarer Strom zu erneuerbarem Methan:  
Ein Lösungsansatz zur Integration erneuerbarer Energien  
über den Ausgleich durch Kopplung von Strom- und Gasnetz
- 3) Die Rolle der Bioenergie in Industrieländern
- 4) 100% EE Versorgungsstrukturen
- 5) Fazit

# Wie speichert die Natur Energie über lange Zeiträume?

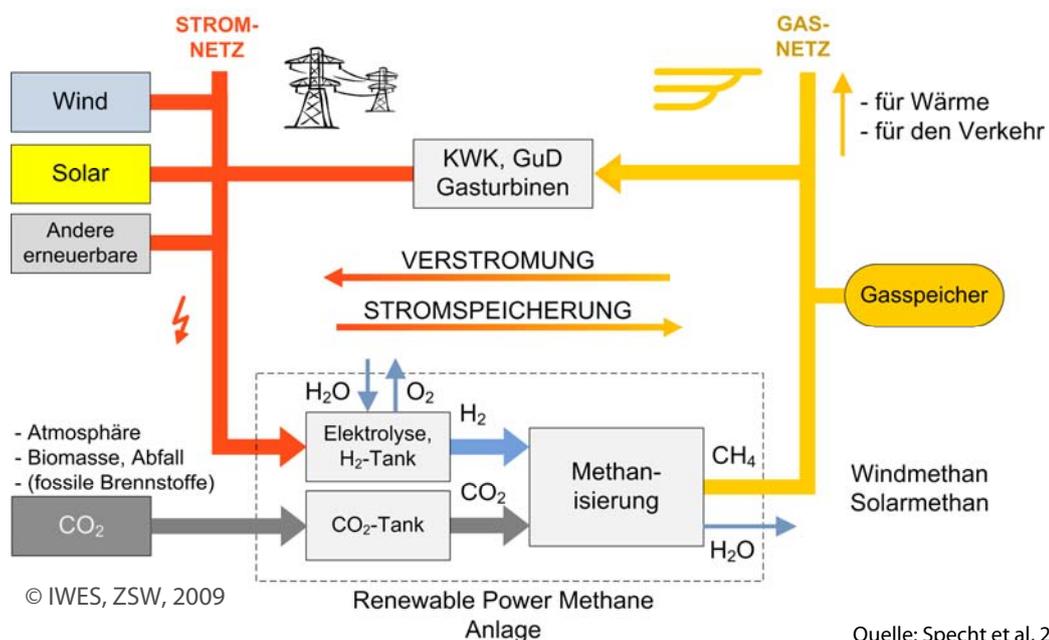


© Fraunhofer IWES 2010



# Renewable Power (to) Methane – erneuerbares Methan

## Stromspeicherung durch Kopplung von Strom- und Gasnetz

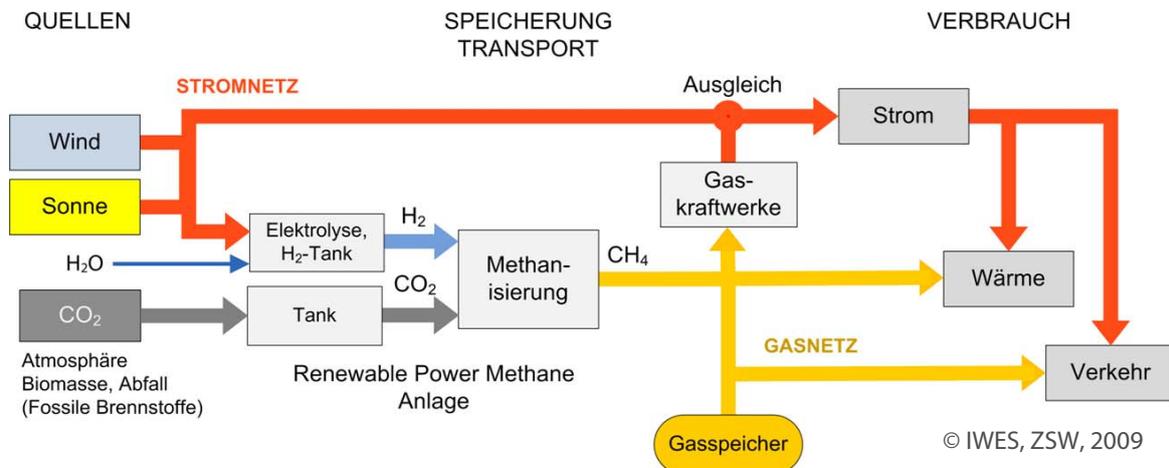


Quelle: Specht et al, 2009  
Sternler, 2009

© Fraunhofer IWES 2010



# Renewable Power (to) Methane – erneuerbares Methan Energievektor für Wind und Solar in den Verkehrssektor



Quelle: Specht et al, 2009  
Sternier, 2009

© Fraunhofer IWES 2010



## Renewable Power (to) Methane – erneuerbares Methan Erste Pilotanlage am ZSW in Stuttgart



Quellen: Solar-fuel, 2009,  
Specht, Waldstein, Sternier et al., 2009

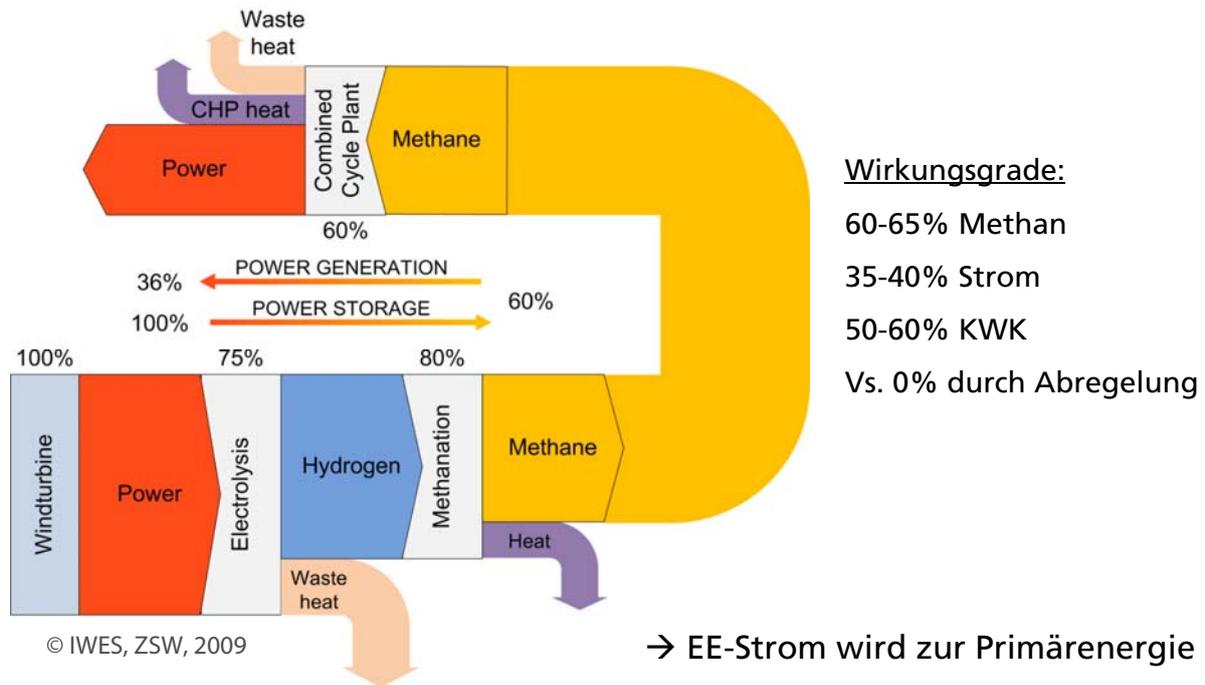
CO<sub>2</sub> Absorptionsleistung = 1,5 ha Mais / a

© Fraunhofer IWES 2010



# Renewable power (to) methane / erneuerbares Methan

## Wirkungsgrade, Kapazitäten, Kosten (1)



Quelle: Sterner, 2009; Specht et al, 2010

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

# Renewable power (to) methane / erneuerbares Methan

## Wirkungsgrade, Kapazitäten, Kosten (2)

- Deutscher Stromverbrauch: ca. 600 TWh<sub>el</sub> - exemplarisch bei 70 GW<sub>el</sub>
- Deutsche Speicherkapazitäten
  - Pumpspeicher, Batterien: ca. 0,07 TWh<sub>el</sub> – Reichweite: wenige Stunden
  - E-mobility: max. 45 Mio. Autos @ 10 kWh<sub>el</sub> → 0,45 TWh<sub>el</sub> – Reichweite: 6 Stunden
  - Gasnetz: 200 TWh<sub>th</sub> ~ ca. 100 TWh<sub>el</sub> – Reichweite: 60 Tage bzw. 2 Monate
- Übertragungskapazitäten der Leitungen
  - Stromnetz: einstellige GW<sub>el</sub>
  - Gasnetz: zweistellige GW<sub>th</sub> → eine Größenordnung mehr
- Kosten
  - Invest (Kompressor, Elektrolyser, Methanisierung, etc.) – ca. 1000-2000 EUR / kW<sub>el</sub>
  - Stromeinkauf für 2-4 EURcent / kWh<sub>el</sub> für 8 EURcent / kWh<sub>th</sub> Methan (abhängig von Betriebs- und Regelkonzept)

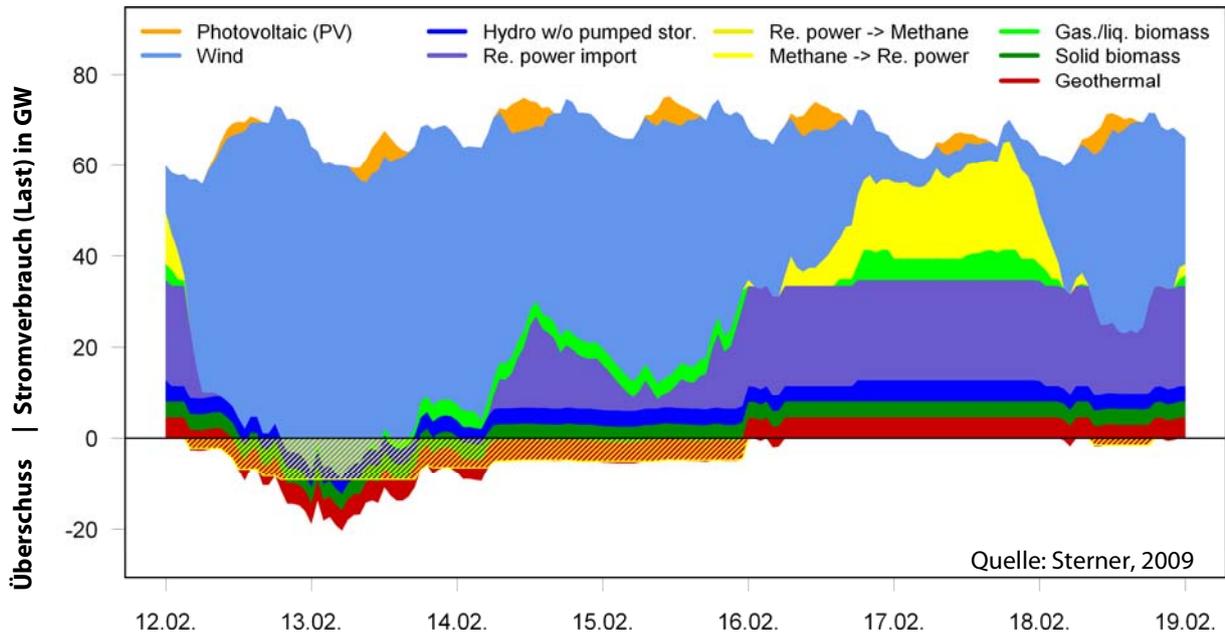
Quelle: Sterner, 2009; Specht et al, 2010

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

# Simulation einer regenerativen Vollversorgung – Strom

## Szenario BMU Leitstudie 2008 für 2050 x 1.2 für Deutschland

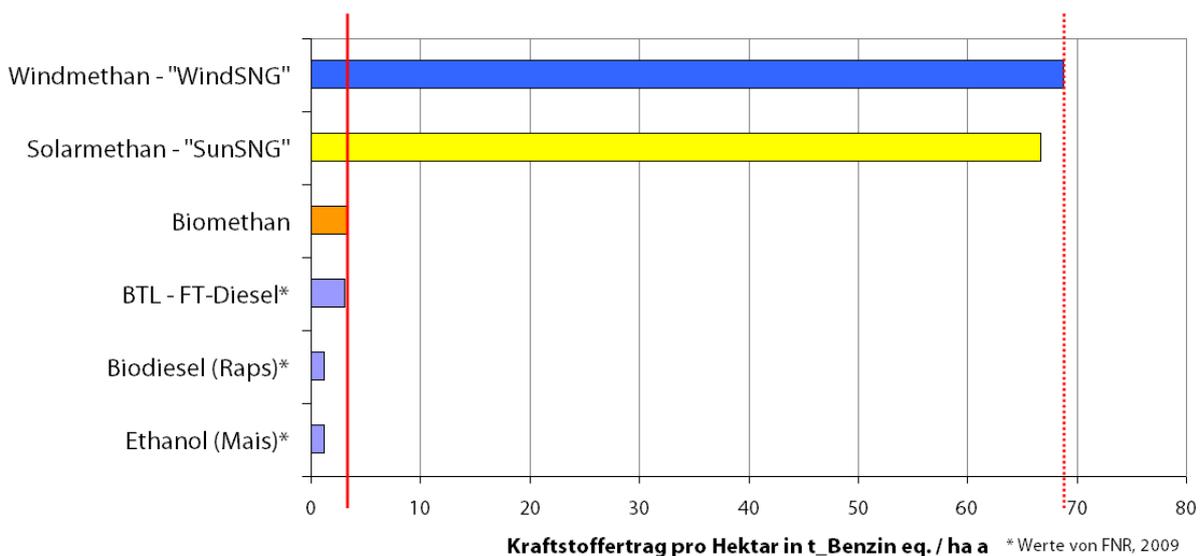


© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## Hektarertrag für regenerativen Kraftstoff in t\_Benzin\_eq./ ha a

1 t Benzin / gasoline = 43,2 GJ



Nutzung der Solarenergie: Biomethan – etwa 0,5%; Solarmethan – etwa 10%  
Vorteil von Windmethan: kombinierte Energie- und Landwirtschaft

Quelle: Sterner, Specht et al, 2010

© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

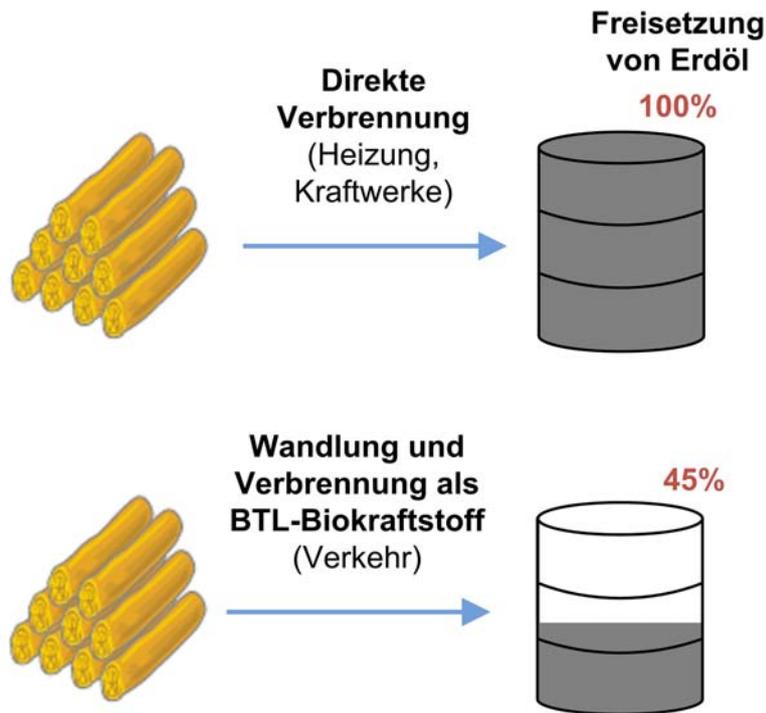
# Vorteile der Kopplung der Energienetze - erneuerbares Methan

- Speicherung von EE im Erdgasnetz und flexibler Einsatz
  - Langzeitspeicher, „keine“ Speicherbegrenzung, vorhandene Infrastruktur, weniger Konkurrenz zu anderen Lagerstätten, Nutzen des größten vorhandenen Energiespeichers
- Stabile Stromversorgung mit EE
  - Regel- und Ausgleichsenergie für fluktuierende EE von fluktuierenden EE
  - „Grundlast“ aus EE – Kombination EE & Gasturbinen / GuD / Mini-KWK
- CO<sub>2</sub>-neutraler kohlenstoff-basierter Energieträger für Verkehr (und Wärme)
  - hohe Energiedichte, keine Begrenzung der KFZ-Reichweite, keine Konkurrenz zu Nahrung bzw. landwirtschaftlichen Nutzflächen
- CO<sub>2</sub> aus der Luft – Recycling – Energiesysteme mit Kohlenstoffsenke
- Minderung der Importabhängigkeit von Erdgas
  - → Erhöhung der Versorgungssicherheit
  - → „Gas“ aus der Sahara – Pipeline zwischen Algerien und Spanien vorhanden

## Inhalt

- 1) Herausforderungen im Übergang zu 100% EE:  
Ergebnisse verschiedener Modellläufe mit unterschiedlichen Szenarien
- 2) Erneuerbarer Strom zu erneuerbarem Methan:  
Ein Lösungsansatz zur Integration erneuerbarer Energien
- 3) Die Rolle der Bioenergie in Industrieländern
- 4) 100% EE Versorgungsstrukturen
- 5) Fazit

# Holzartige Biomasse als Erdölersatz

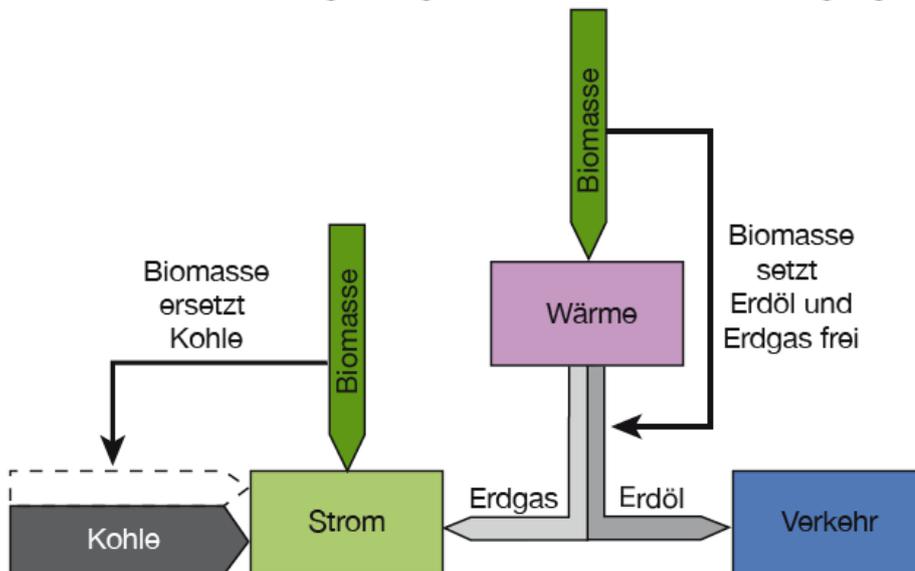


© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

## Stufen der Bioenergienutzung in Industrieländern

1. Stufe: Ohne große Verluste und zu geringen Kosten fossile Energieträger ersetzen – „low hanging fruits first“



Quelle: WBGU, 2008

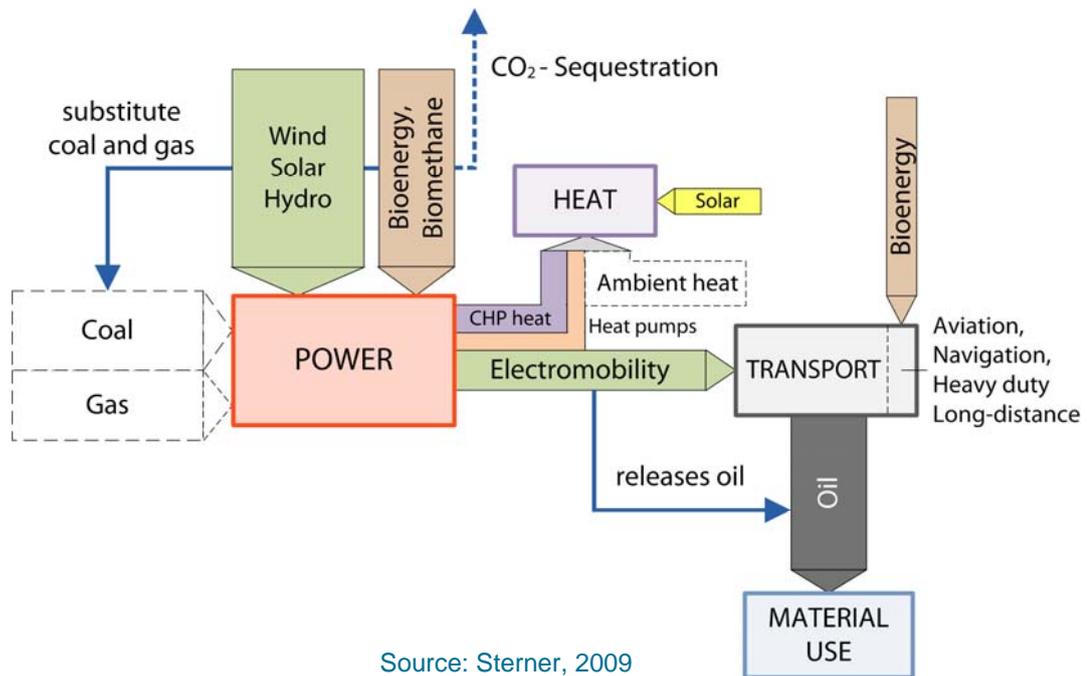
© Fraunhofer IWES 2010

Fraunhofer  
IWES

# Stufen der Bioenergienutzung in Industrieländern

## 2. Stufe: Strategische Funktionen:

Fluktuationsausgleich und Flug- und Güterverkehr

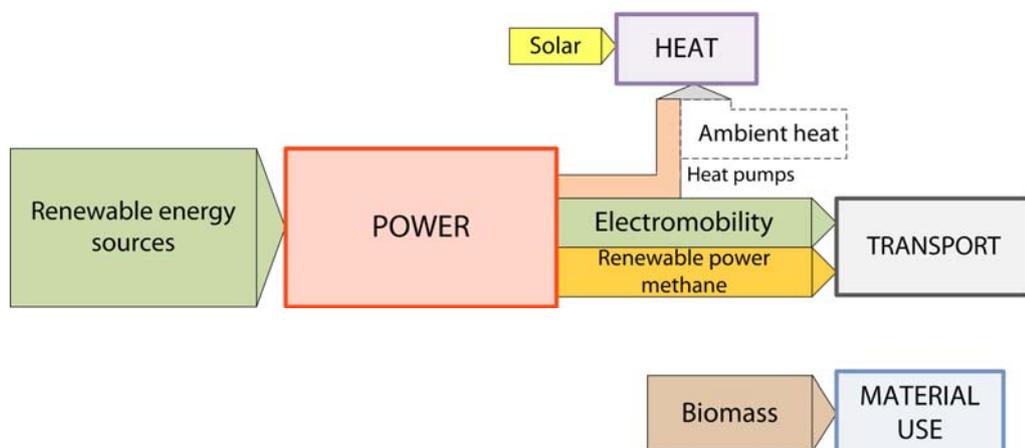


Source: Sterner, 2009

# Stufen der Bioenergienutzung in Industrieländern

## 3. Stufe: Ersatz von fossilen Rohstoffen für stoffliche Nutzung

„Biomaterials, Biorefineries“ → Kaskadennutzung

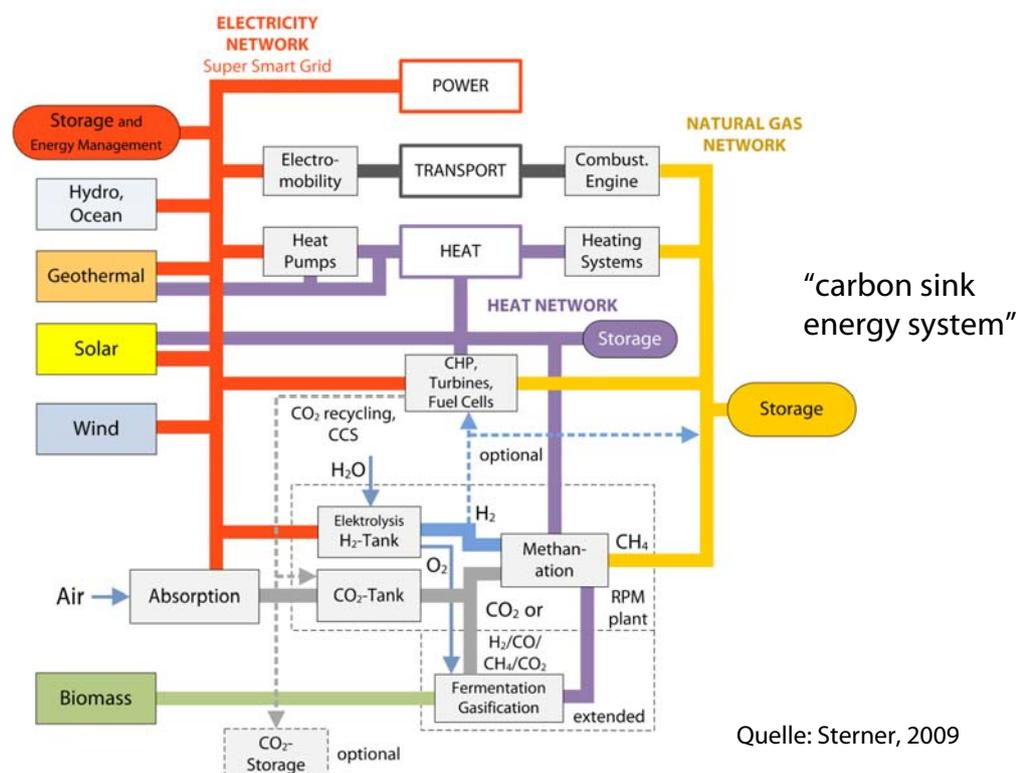


Source: Sterner, 2009

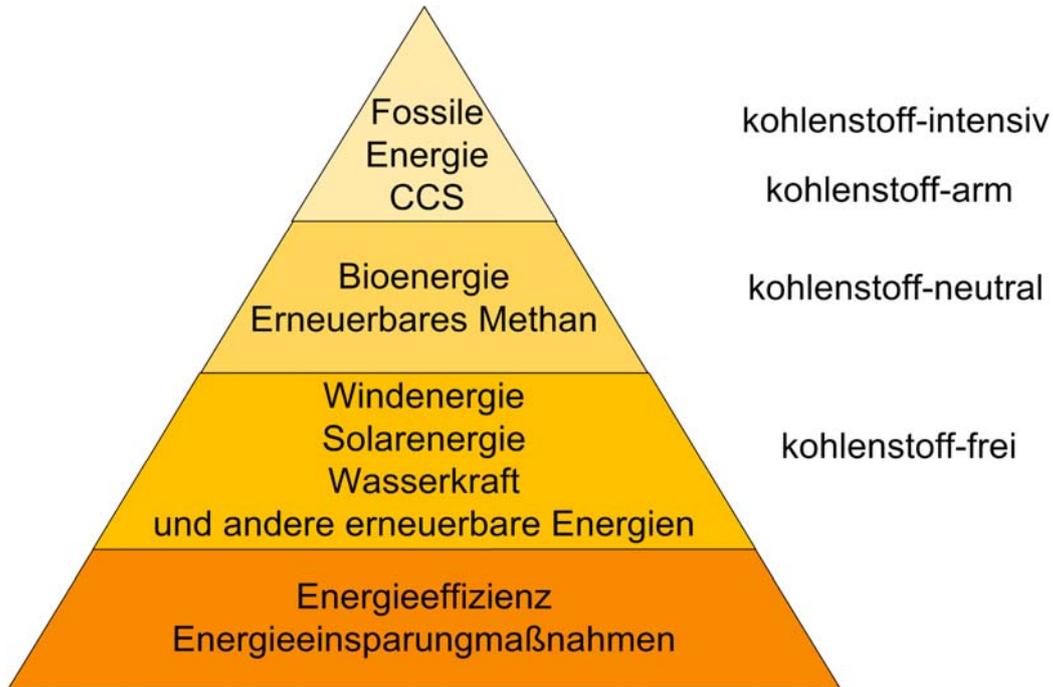
# Inhalt

- 1) Herausforderungen im Übergang zu 100% EE:  
Ergebnisse verschiedener Modellläufe mit unterschiedlichen Szenarien
- 2) Erneuerbarer Strom zu erneuerbarem Methan:  
Ein Lösungsansatz zur Integration erneuerbarer Energien
- 3) Die Rolle der Bioenergie in Industrieländern
- 4) 100% EE Versorgungsstrukturen
- 5) Fazit

## 100% erneuerbare Energie für Strom, Wärme und Verkehr

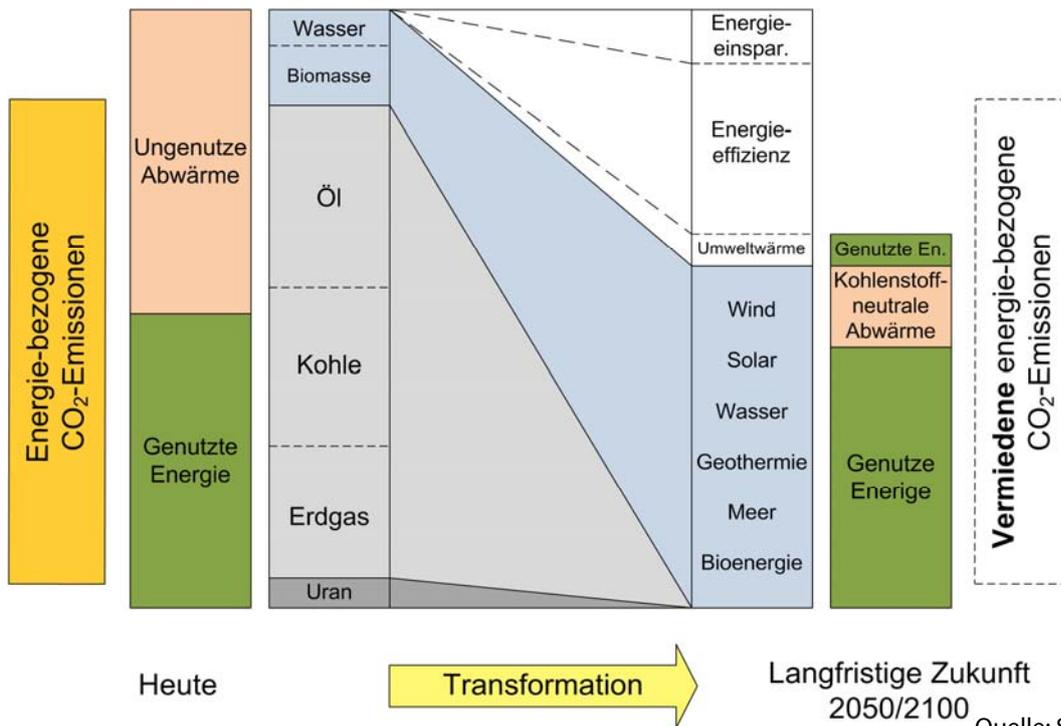


# Optionen für eine emissionsarme Energieversorgung



Quelle: Sterner, 2009

2°C Ziel: Globaler Umbau der Energieversorgung notwendig.  
Energieziel: Vermeidung von Abwärme und Emissionen durch Einsatz von EE



Quelle: Sterner, 2009

# Zusammenfassung

- Eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist
  - technisch möglich
  - ökonomisch vorteilhaft auf lange Sicht
  - ökologisch / klimatechnisch notwendig
  
- Herausforderungen
  - Umbau der Energieversorgungsstrukturen
  - Hoher Investitionsaufwand zu Beginn
  - Technologie- und Wissenstransfer
  - "Transformation" des Bewusstseins  
(1. Menschen mitnehmen; 2. konventionelle und regenerative Energiewirtschaft auf einen Weg bringen Richtung nachhaltiger Vollversorgung mit erneuerbaren Energien)
  
- Entscheidend
  - politischer Wille und Bewusstseinswandel

## Vielen Dank

# Quellen und weiterführende Informationen

BEE (2009): Branchenprognose Stromversorgung 2020. BEE, Berlin.

<http://www.bee-ev.de/Energieversorgung/Strom/Stromversorgung-2020.php>

LBBW Research (2010): Sector Report Energy & Power Technology, Institutional Equity Research, Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart.

Saint-Drenan, Y.M.; von Oehsen, A.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Bofinger, S.; Rohrig, K. (2009): Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem BEE-Szenario „Stromversorgung 2020“. Fraunhofer IWES, Kassel.

[http://www.bee-ev.de/downloads/publikationen/studien/2010/100119\\_BEE\\_IWES-Simulation\\_Stromversorgung2020\\_Endbericht.pdf](http://www.bee-ev.de/downloads/publikationen/studien/2010/100119_BEE_IWES-Simulation_Stromversorgung2020_Endbericht.pdf)

Specht, M.; Baumgart, F.; Feigl, B.; Frick, V.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U.; Sterner, M.; Waldstein, G. (2010): Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. FVEE Jahrestagung 2009. Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien. FVEE, Berlin.

Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel University, Dissertation. <http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-798-2>

Sterner, M.; Gerhardt, N.; Saint-Drenan, Y.M.; von Oehsen, A.; Hochloff, P.; Kocmajewski, M.; Lindner, P.; Jentsch, M.; Pape, K.; Bofinger, S.; Rohrig, K. (2010): Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Studie für Schluchseewerke AG. Fraunhofer IWES, Kassel. <http://www.schluchseewerk.de/105.0.html>

RWE (2009): The Need for Smart Megawatts Power Generation in Europe – Facts & Trends. December 2009. RWE, Essen.

<http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/355588/data/214416/55716/rwe/investor-relations/events-praesentationen/fakten-kompakt/power-generation-in-europe/The-Need-for-Smart-Megawatt-Power-Generation-in-Europe-Facts-Trends-Vollversion-PDF-Datei-.pdf>

# Kontakt



Dr.-Ing. Michael Sterner  
Fraunhofer Institut für Windenergie und  
Energiesystemtechnik  
Leiter Energiewirtschaft und Systemanalyse  
+49 – 561 – 72 94 361  
[msterner\\_at\\_iset.uni-kassel.de](mailto:msterner_at_iset.uni-kassel.de)