

# Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge

Dirk Uwe Sauer &

> 100 Expertinnen und Experten aller Fachdisziplinen aus Forschung u. Industrie

**RWTH Aachen University**  
**JARA Energy (Jülich Aachen Research Alliance)**

Contact: [sr@isea.rwth-aachen.de](mailto:sr@isea.rwth-aachen.de)

Jägerstrasse (ISEA)



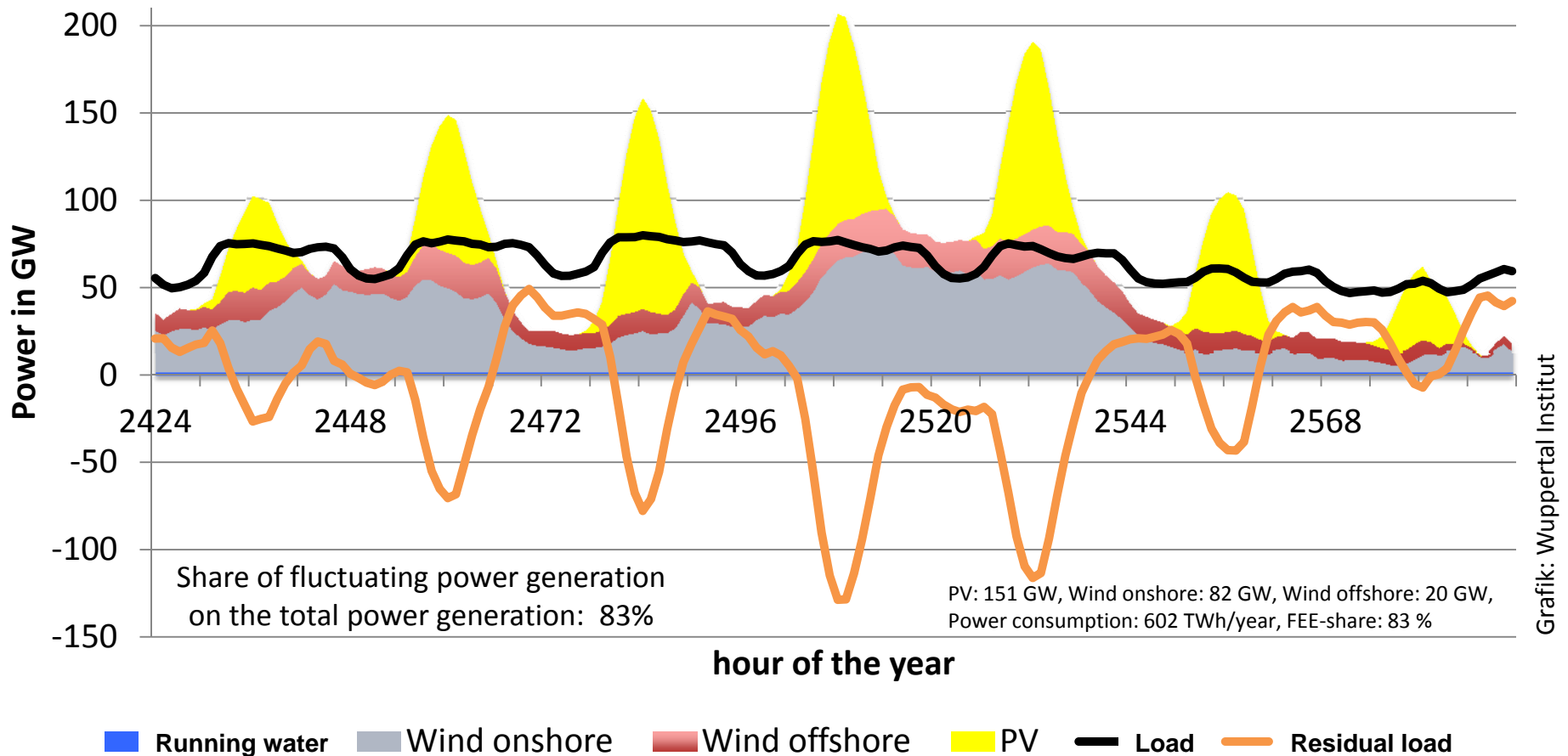
Mathieustrasse (E.ON ERC)



Hüttenstrasse  
(Test center)



## General principle of electrical power supply systems: Power generation and power consumption must be equal in any point in time



# Ad-hoc Working group „Flexibility Concepts“

Organisation: Sauer, Elsner

11 expert groups, more than 100 experts

## Power Generation and Flexibility Technologies

- Photovoltaics
  - Wind
  - Bio mass
  - Geothermal power generation
  - Solarthermal power generation
  - Conventional power plants
  - Storage Technologies
  - Demand Side Management (power)
  - Demand Side Management (heat)
  - Grids
- Fluctuating Renewables (FEE)**
- Flexible Power Generation Technologies  
(net power generators)**
- Flexibility technologies for shift in time**
- Flexibility technologies for regional shift**

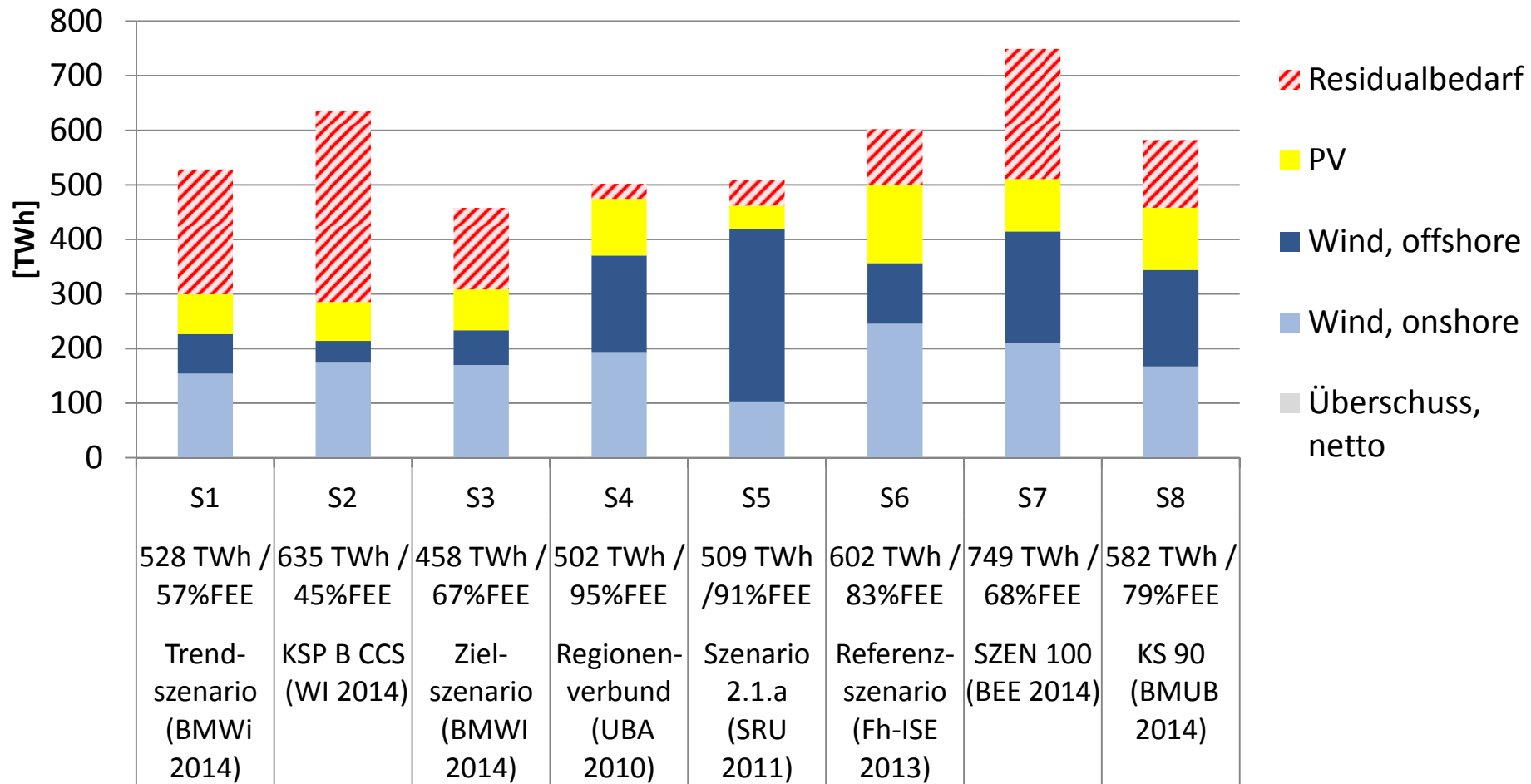
## Energy scenarios

- scenarios

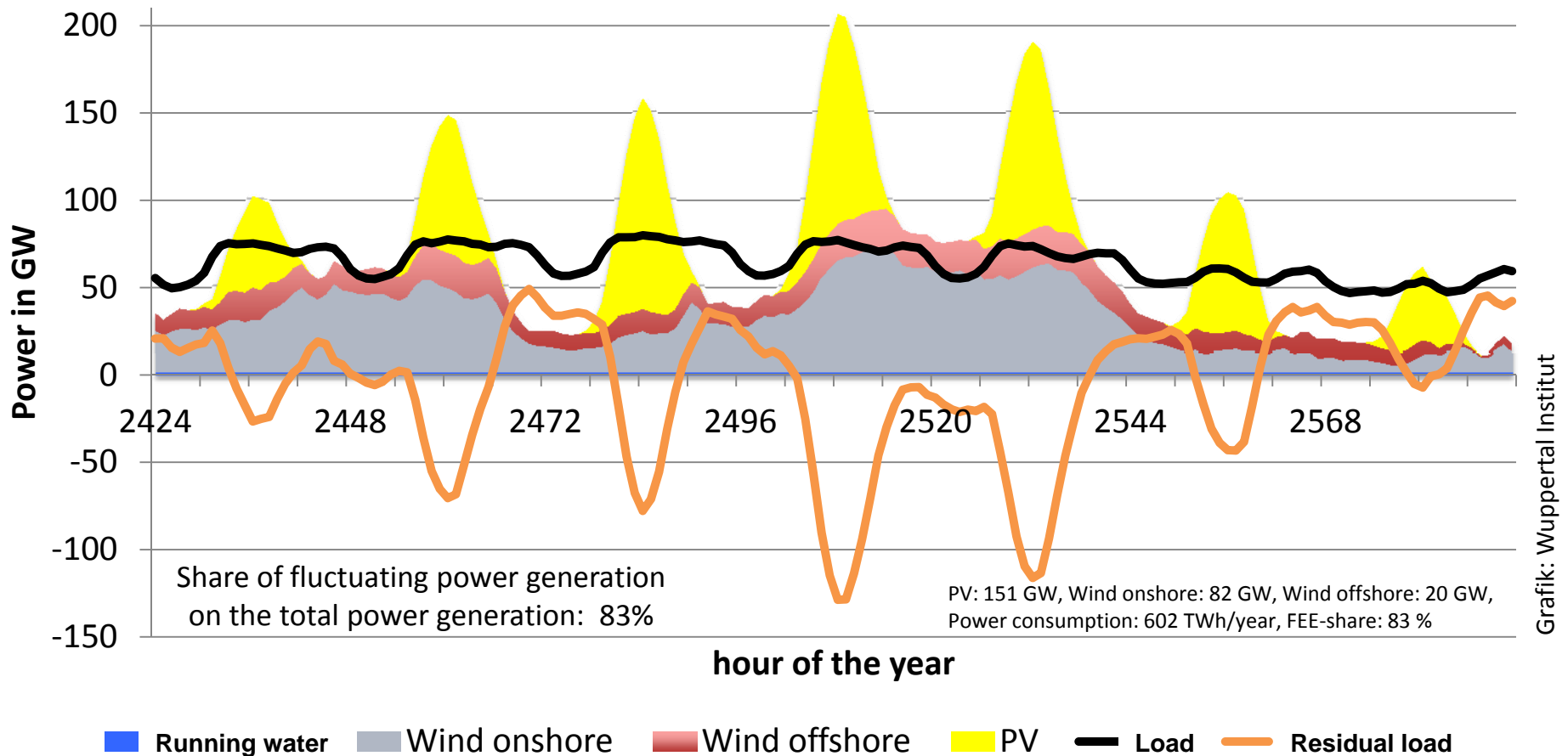
Lead Fishedick

## Charakterisierung der Szenarien

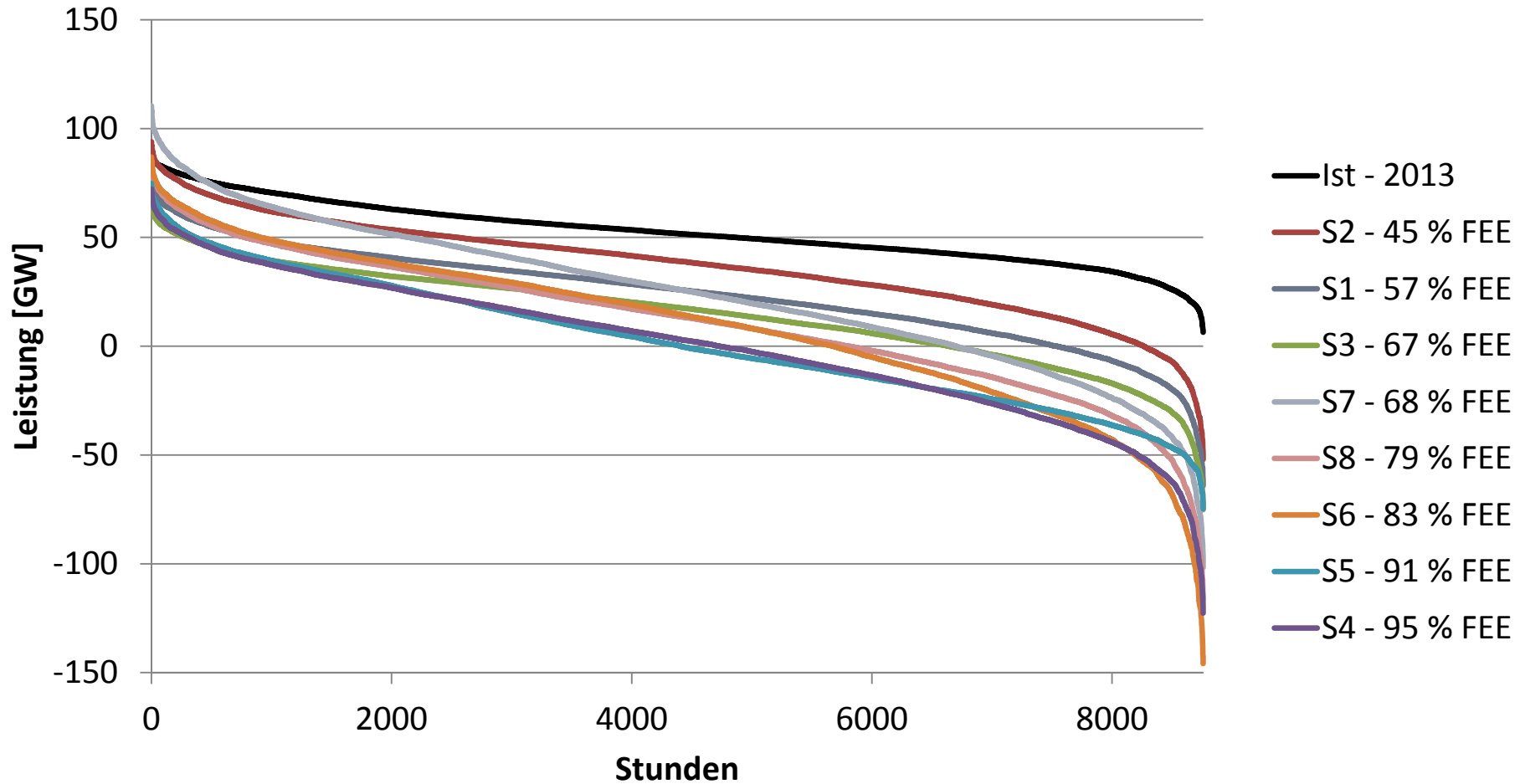
## Auswahl illustrativer Szenarien für mögliche Stromsysteme im Jahr 2050



## General principle of electrical power supply systems: Power generation and power consumption must be equal in any point in time



## Geordnete Residuallast



## Flexibilitätstechnologien





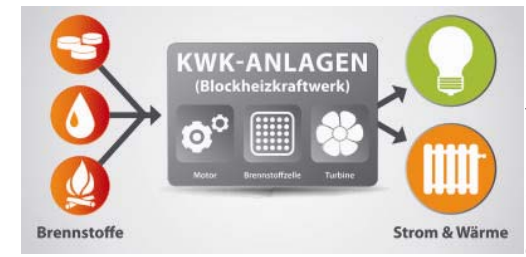
© Thecrgroup / Wikimedia Commons

Concentrated Solar Power mit  
Speicher



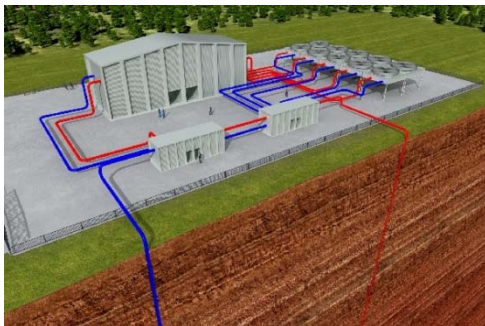
© Imaginis / Fotolia

Flexible konventionelle Kraftwerke



© Visual Concepts / Fotolia

Stromgeführte KWK-Anlagen



© visdia/ Fotolia

Geothermie mit Speicher



Bedarfsgesteuerte Biogasanlagen

## Flexible Erzeugungstechnologien (Nettostromerzeuger)



© exclusive design / Fotolia

Demand Side  
Management (Haushalte)



© Andrei Merkulov / Fotolia

Demand Side  
Management (Industrie)



© Petair / Fotolia

Doppelnutzenspeicher



Hanno Böck / <https://hböck.de/>

Power-to-Gas (Chemicals)



© Markus Gössing / Fotolia

Netzausbau



© copyright / Fotolia

Power-to-Heat



© Vladislav Kochelaevs / Fotolia

Speicher



© Gert Skriver / Wikimedia Commons

„Intelligente Netze“



© vege / Fotolia

Abschaltung von  
EE-Anlagen

# Flexibilitätstechnologien zur zeitlichen oder räumlichen Verschiebung

# Methodik der Bestimmung von Technologien zum Ausgleich der Residuallast

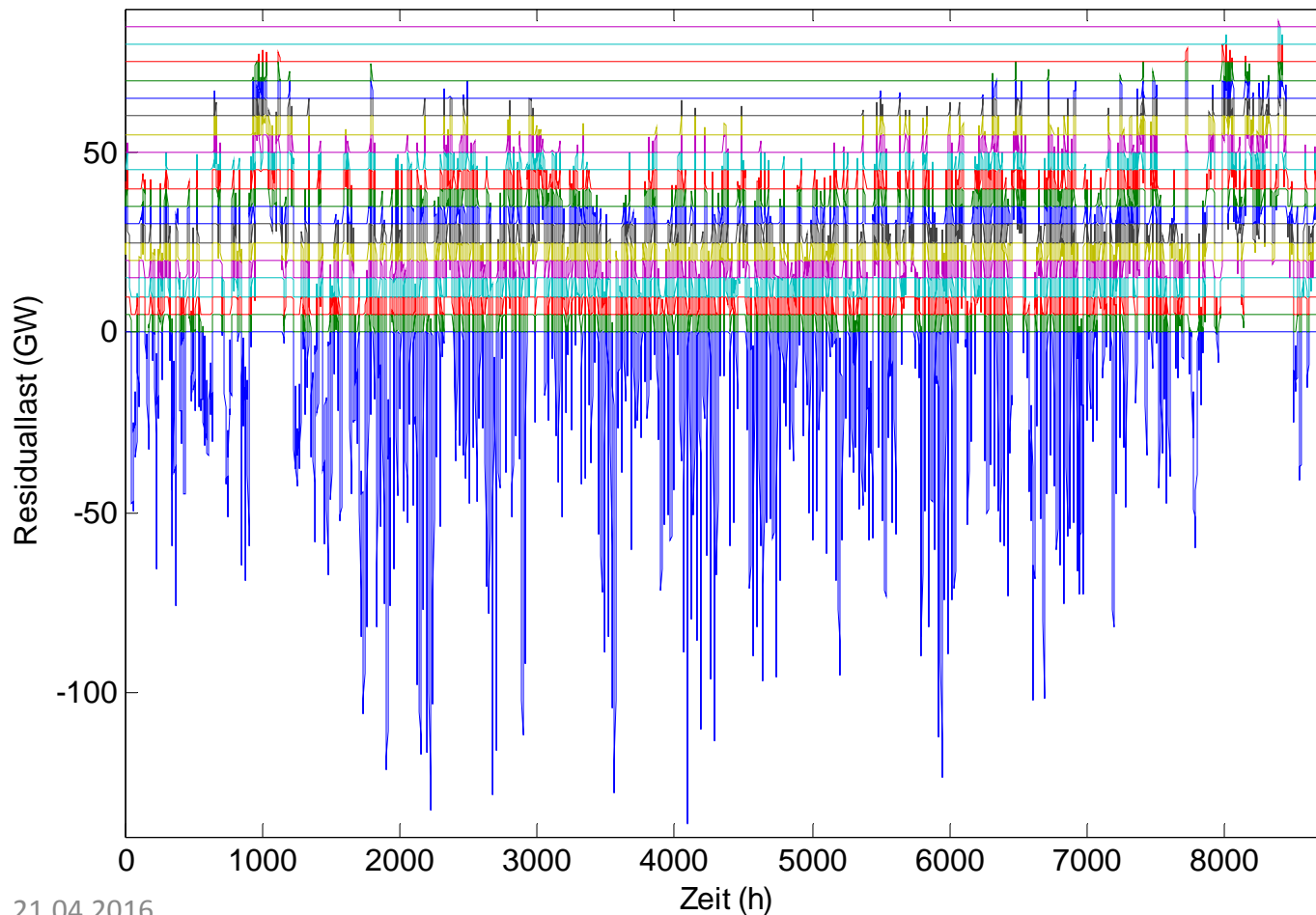
## Methodik zur Technologiezuordnung

Zerlegung der  
Residuallast in  
Leistungsbänder –  
PV & Wind schon  
„installiert“

Charakterisierung der  
verschiedenen  
Leistungsbänder

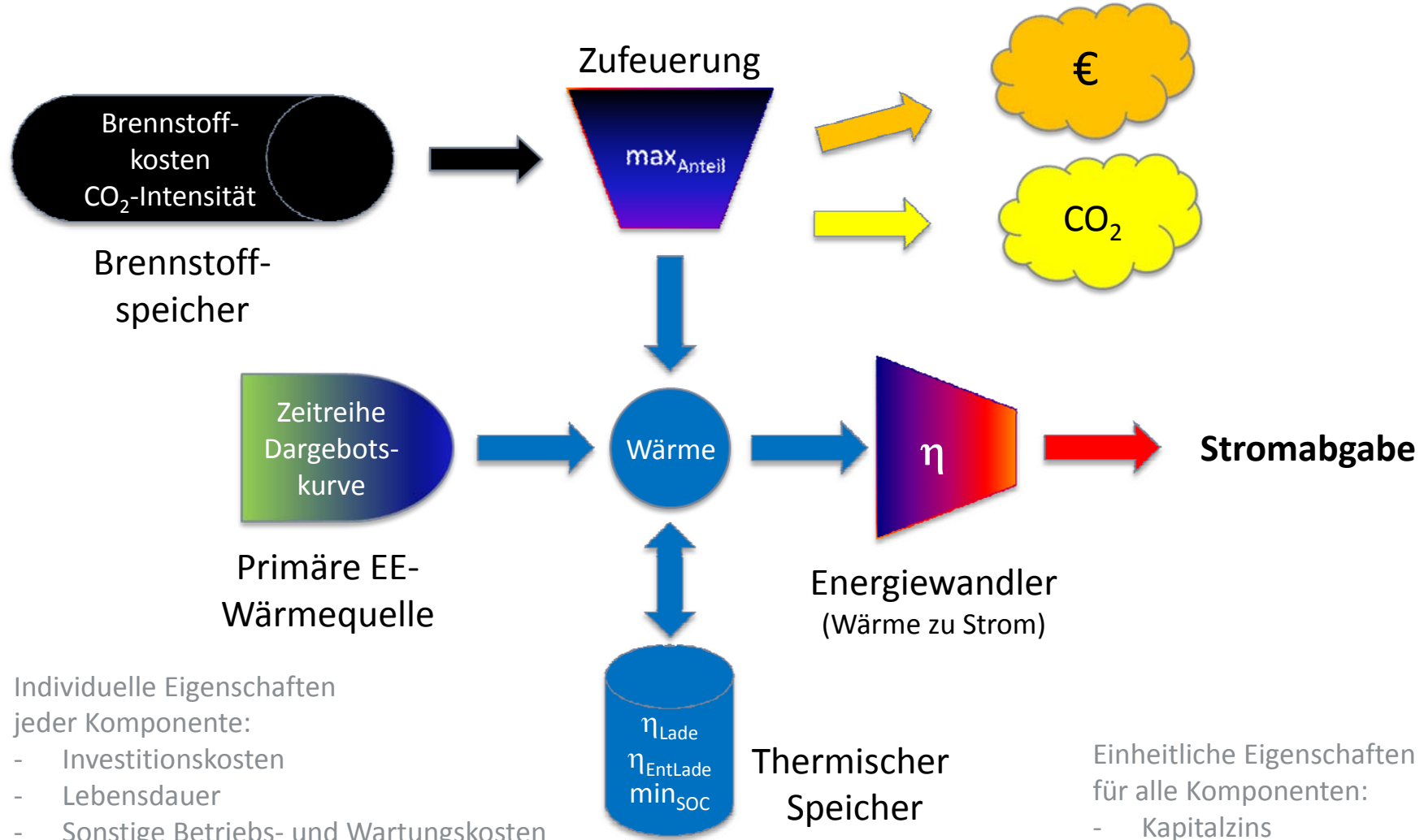
Kostenbasierte  
Technologiezuordnung  
vom kleinsten  
positiven Band  
beginnend. Ziel:  
Residuallast muss Null  
werden.

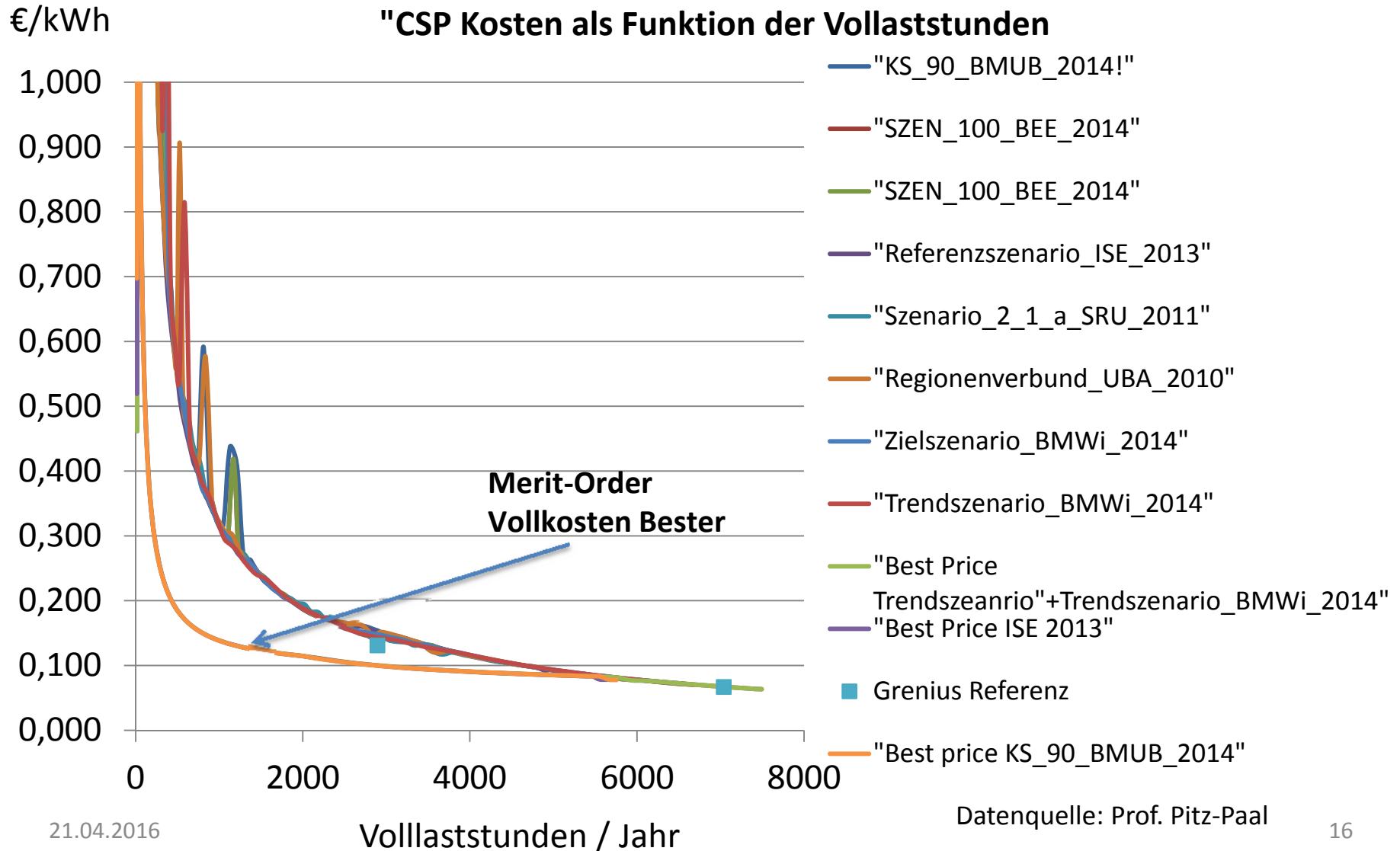
## Residuallast – ganzes Jahr: exemplarische Bandzerlegung



Szenario  
WKA & PV 76%

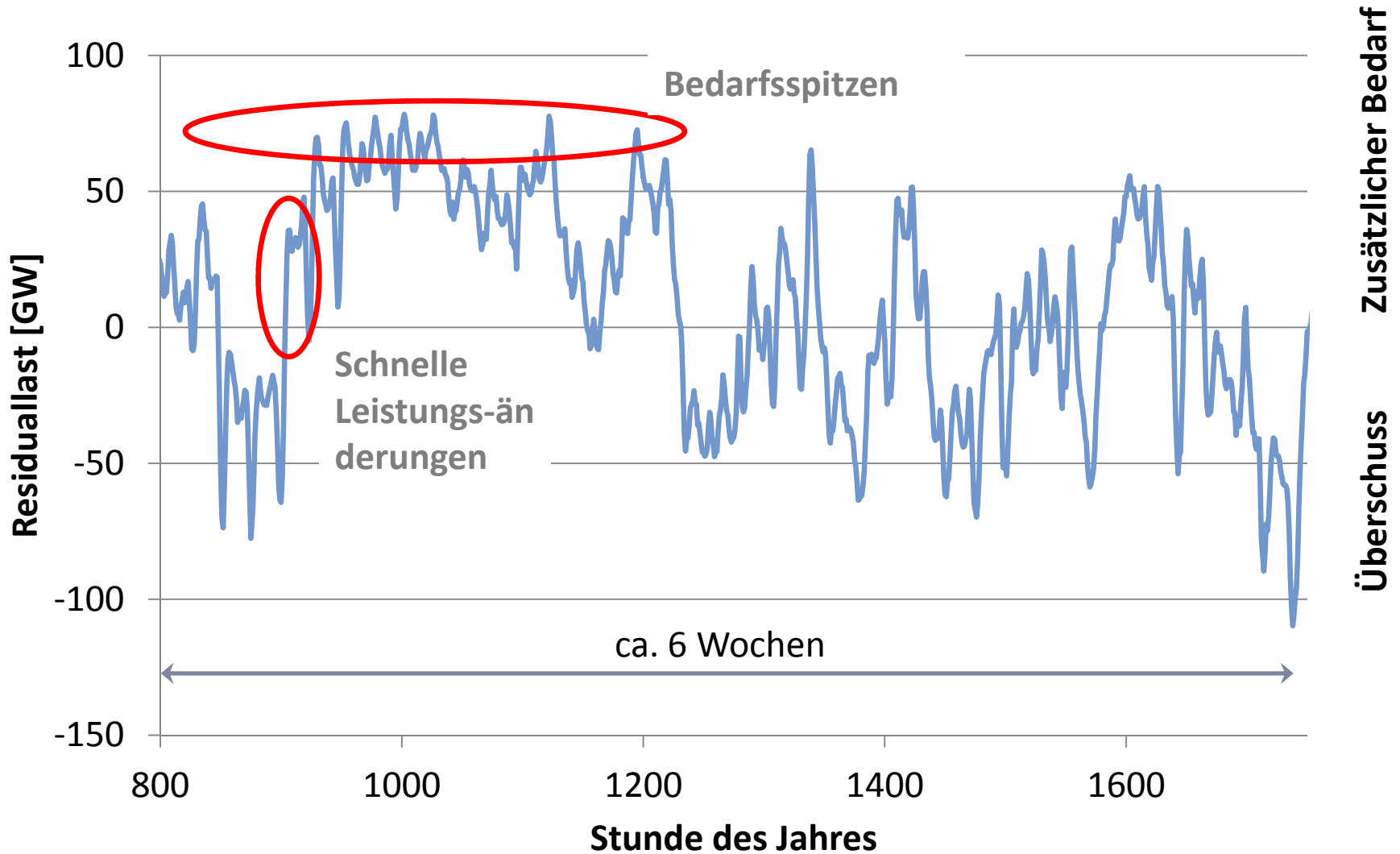
## Anlageklasse „Erzeuger Typ 2“ – CSP, Geothermie





## Herausforderung 1: Bedarfsspitzen und schnelle Leistungsänderungen





## Kurzzeitige Flexibilität

### Option 1

- Flexible Erzeuger wie Gasturbinen (Erdgas, Biogas, Wasserstoff)
- Weitere Erhöhung der Flexibilität bis 2050 erwartet



### Option 2

- Batteriespeicher
- Wichtige Technologie für die Transformationsphase des Stromsystems

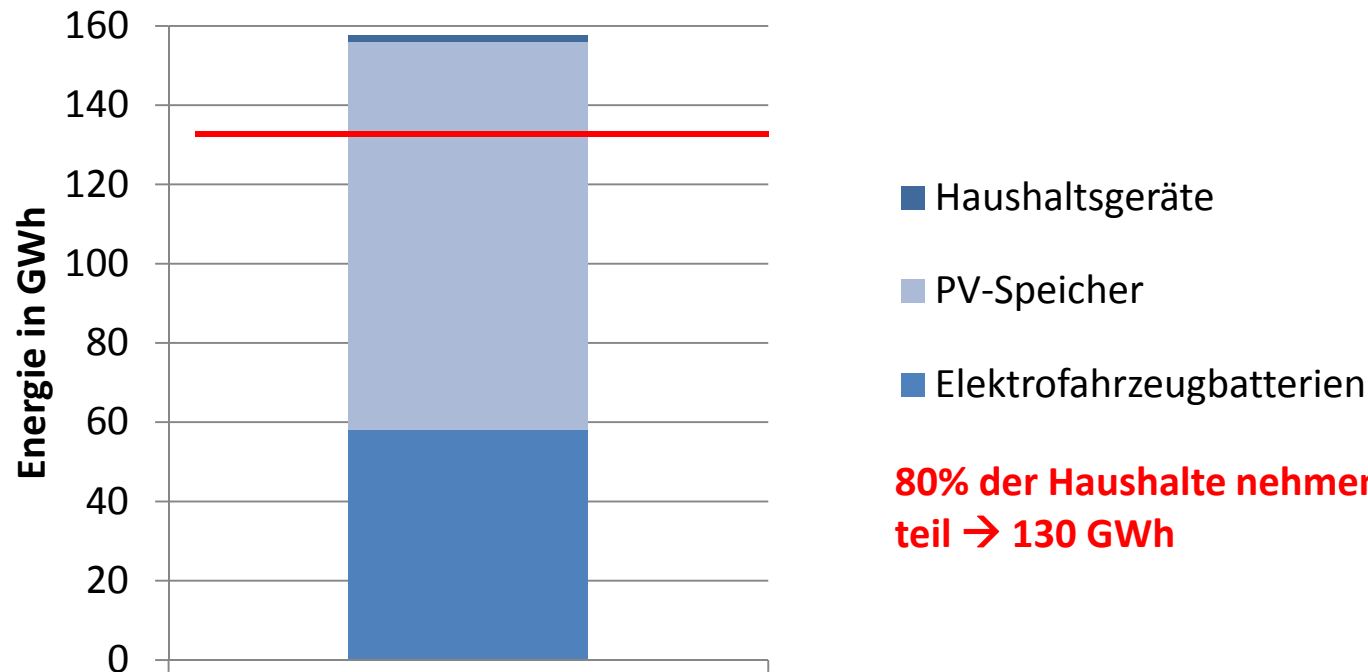


### Option 3

- Demand-Side-Management in Haushalten (inkl. Elektrofahrzeuge, PV-Speichersysteme, Haushaltsverbrauch & Wärmebedarf) und in der Industrie
- Sehr hohe Potenziale für 2050 erwartet. Kostengünstig, da wenig zusätzlicher Invest.



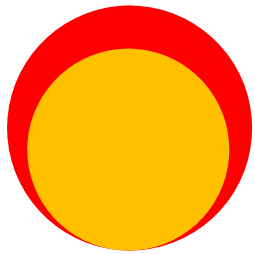
## Zusammenfassende Darstellung DSM Haushalte - Energie



Kosten:

- Investition: 50 EUR pro Haushalt
- Laufende Kosten: 30 EUR pro Haushalt und Jahr

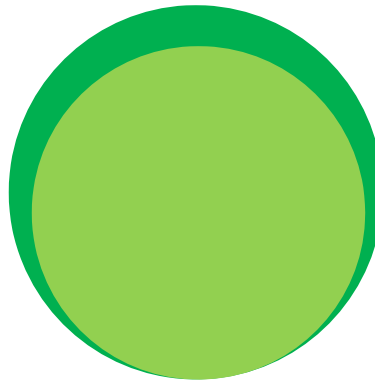
# Konsumausgaben von 4-Personen- haushalten in Deutschland



## Mobilfunkvertrag

4 Personen  
Tarife S bis M  
10 €/Monat Handymiete  
33% Rabatt ab 2. Vertrag

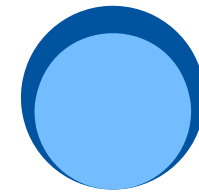
**1440 – 2160 €/Jahr**



## Mobilität

1 PKW mit 13500 km/Jahr  
@ 30 ct/km bis  
mittlere Haushaltsausgaben für  
Mobilität pro Familie 2011  
(Stat. Bundesamt 2013)

**4050 – 5112 €/Jahr**

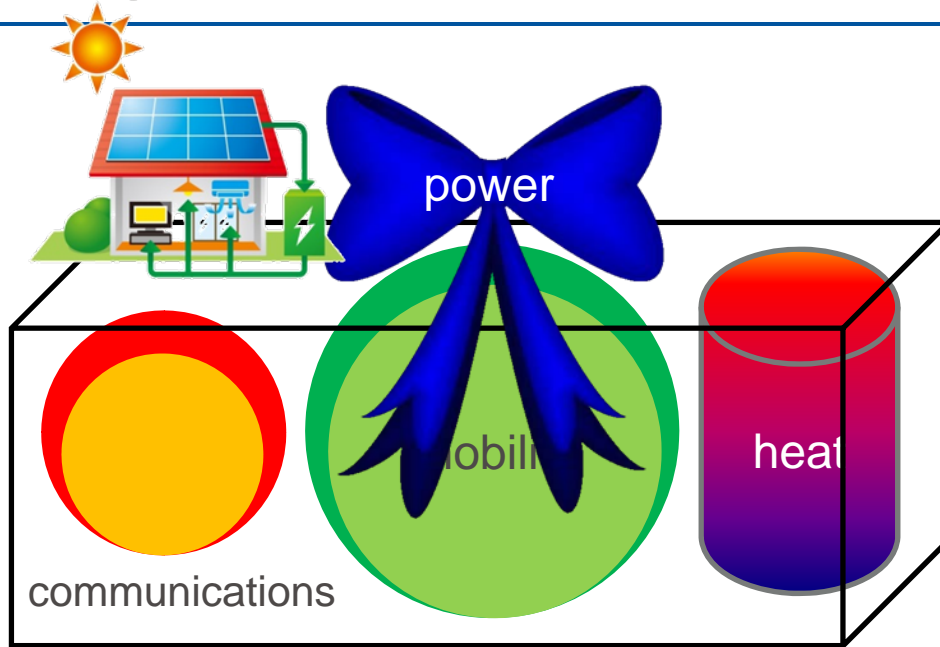


## Strom

4 Personen, 4000 kWh/Jahr  
PV-Anlage mit Speicher,  
70% Eigenversorgung &  
30% Zukauf bis  
vollständiger Zukauf @ 30 ct/kWh

**860 – 1200 €/Jahr**

# Anticipated business models of Google, Apple & Co.



## One contract fits it all



### Mobile communication

4 Personen  
 Tarife S bis M  
 10 €/Monat Handymiete  
 33% Rabatt ab 2. Vertrag

1440 – 2160 €/year



### Mobility

1 PKW mit 13500 km/Jahr  
 @ 30 ct/km bis  
 mittlere Haushaltsausgaben für  
 Mobilität pro Familie 2011  
 (Stat. Bundesamt 2013)

4050 – 5112 €/year



### Power

4 Personen, 4000 kWh/Jahr  
 PV-Anlage mit Speicher,  
 70% Eigenversorgung &  
 30% Zukauf bis  
 vollständiger Zukauf @ 30 ct/kWh

860 – 1200 €/year

## Demand side potential

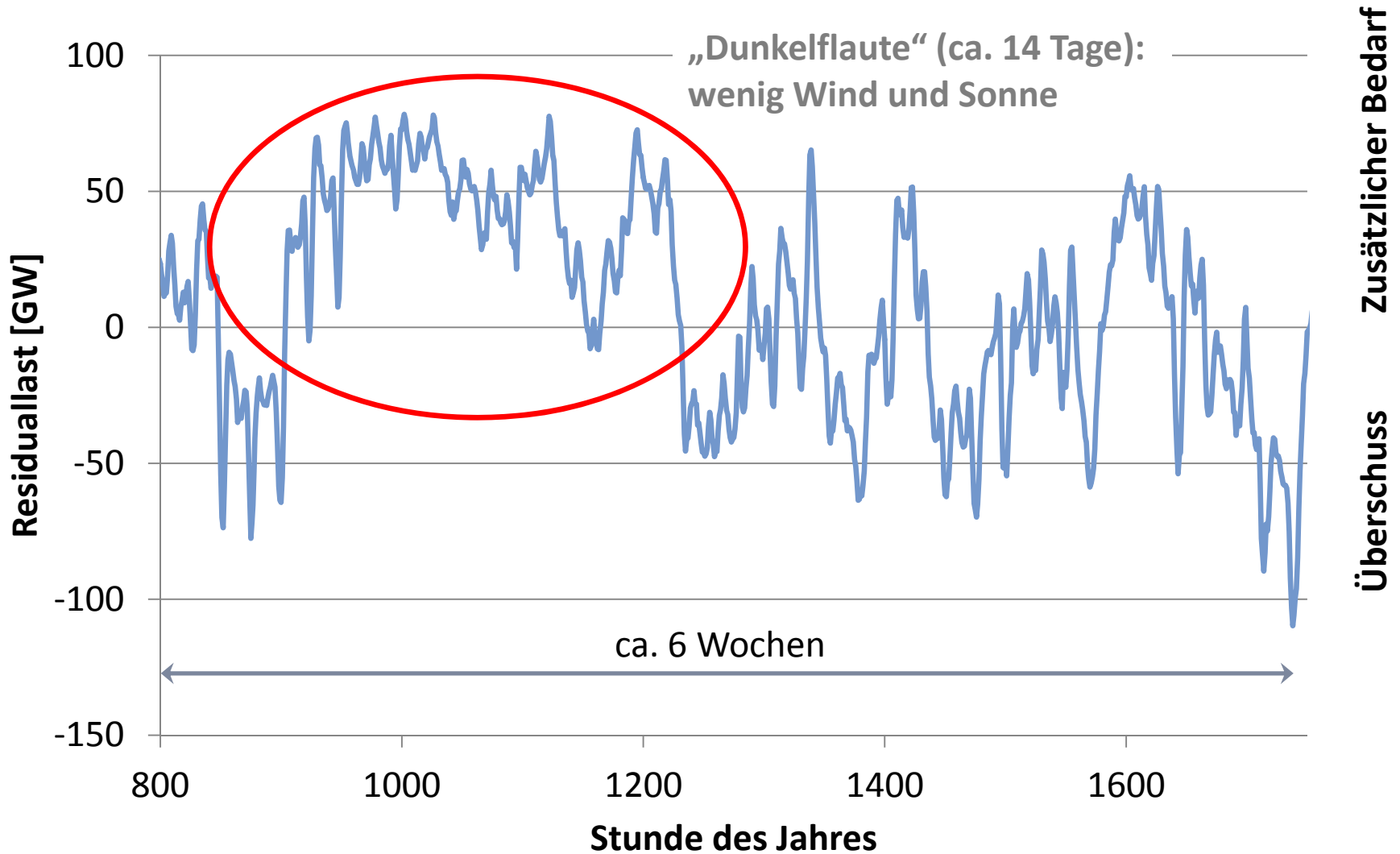
- PV home storage system
- Electric vehicle
- Electric hot water and space heating
- Appliances

## Assumption

- 2 kW / household
- 4 kWh shiftable load / household
- 40 Mill. households

→ **80 GW, 160 GWh flexible power**

## Herausforderung 2: Mehrwöchige Perioden mit geringer solarer Einstrahlung und geringem Windaufkommen („Dunkelflauten“)



## Überbrückung „Dunkelflauten“

### Option 1

- Flexible konventionelle Kraftwerke
- Wenn es das CO<sub>2</sub>-Ziel des Stromsektors zulässt



© Imaginis / Fotolia

### Option 2

- Flexible Biogaskraftwerke
- Biomassepotenzial kritisch (Flächenkonkurrenz, Akzeptanz)



### Option 3

- Langzeitspeicher, d.h. Rückverstromung von Wasserstoff
- Wenn genügend Überschüsse vorhanden sind, um den Speicher aufzufüllen

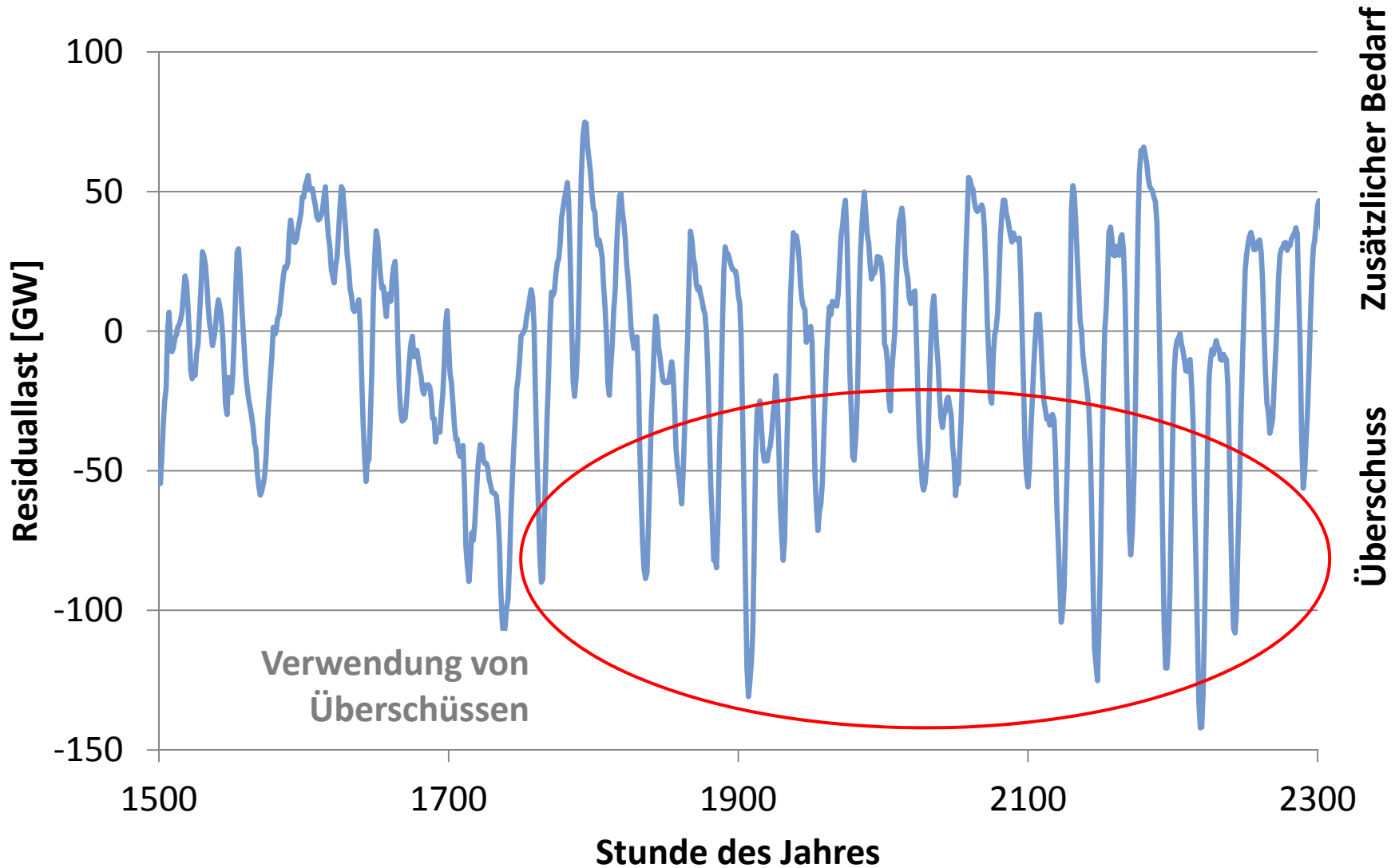


Hanno Böck / <https://hboeck.de/>

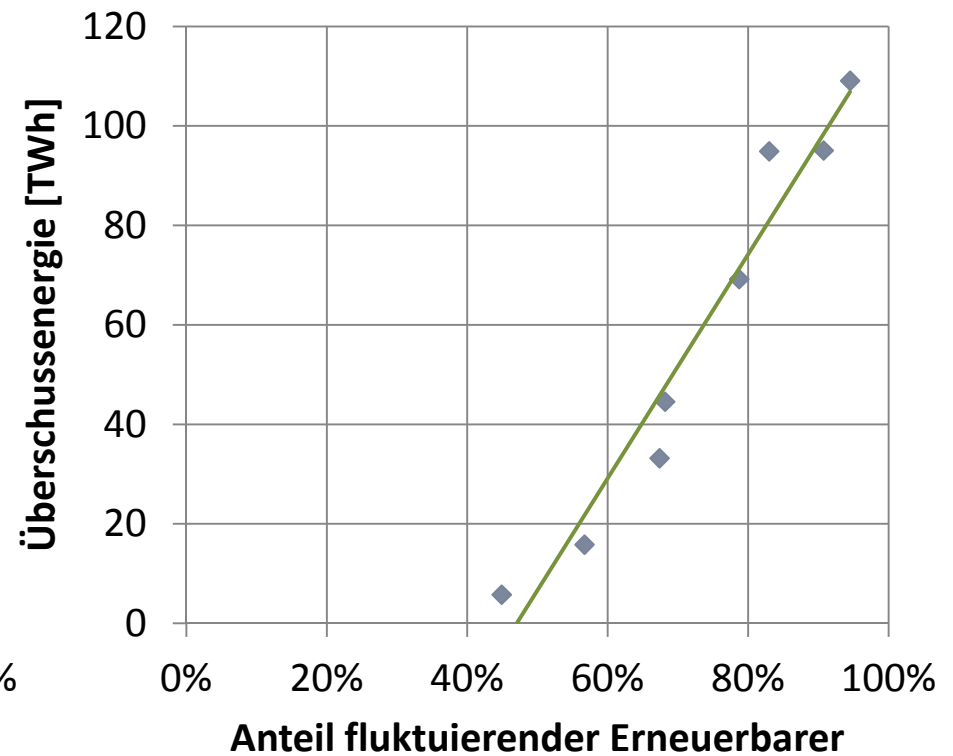
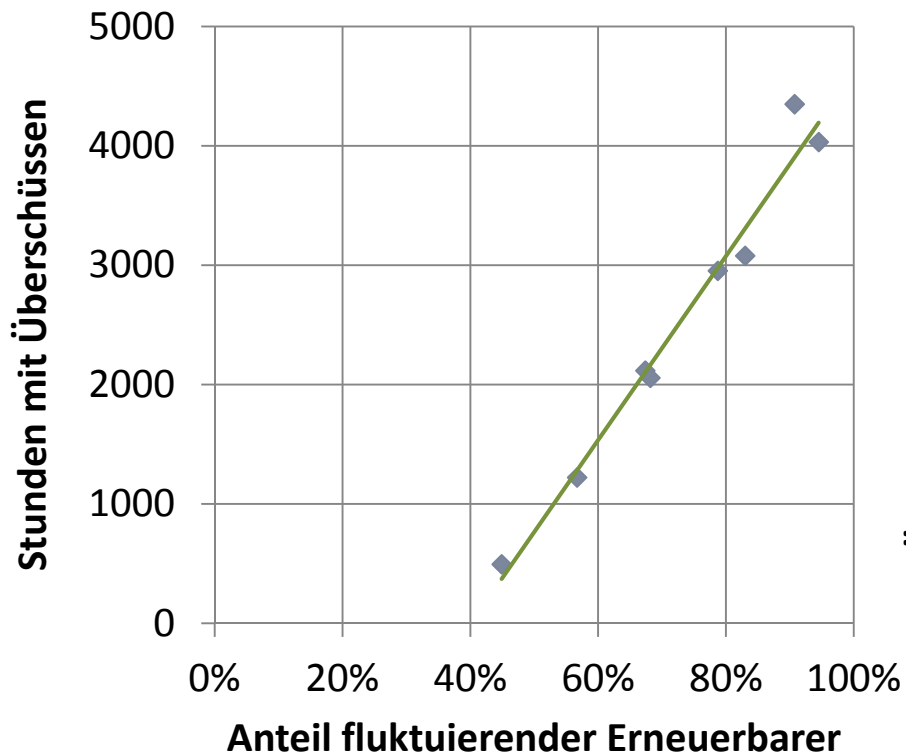
**Alle Optionen haben im Kern Gasturbinen, Gesamtkapazität 40 bis 60 GW**



## Herausforderung 3: Zeitweise hohe Überschüsse aus fluktuierender Erzeugung



## Warum ist die Nutzung der Überschüsse so gering?



## Wie können Überschüsse verwendet werden?

### Option 1

- Speicherung
- Wenn Speichereinsatz ökonomisch sinnvoll



© Vladislav Kochelaevs / Fotolia

### Option 2

- Elektrische Wärmeerzeugung (Power-to-heat in Hybridheizsystemen)
- Sehr hohes Potenzial, geringe Investitionskosten



© copyright / Fotolia

### Option 3

- Erzeugung von Stoffen und Gasen zur Verwendung außerhalb des Stromsektors (Power-to-X)
- Hohe Stundenzahl mit Überschüssen für wirtschaftlichen Betrieb notwendig (frühestens bei >80% Stromerzeugung aus PV und Wind)



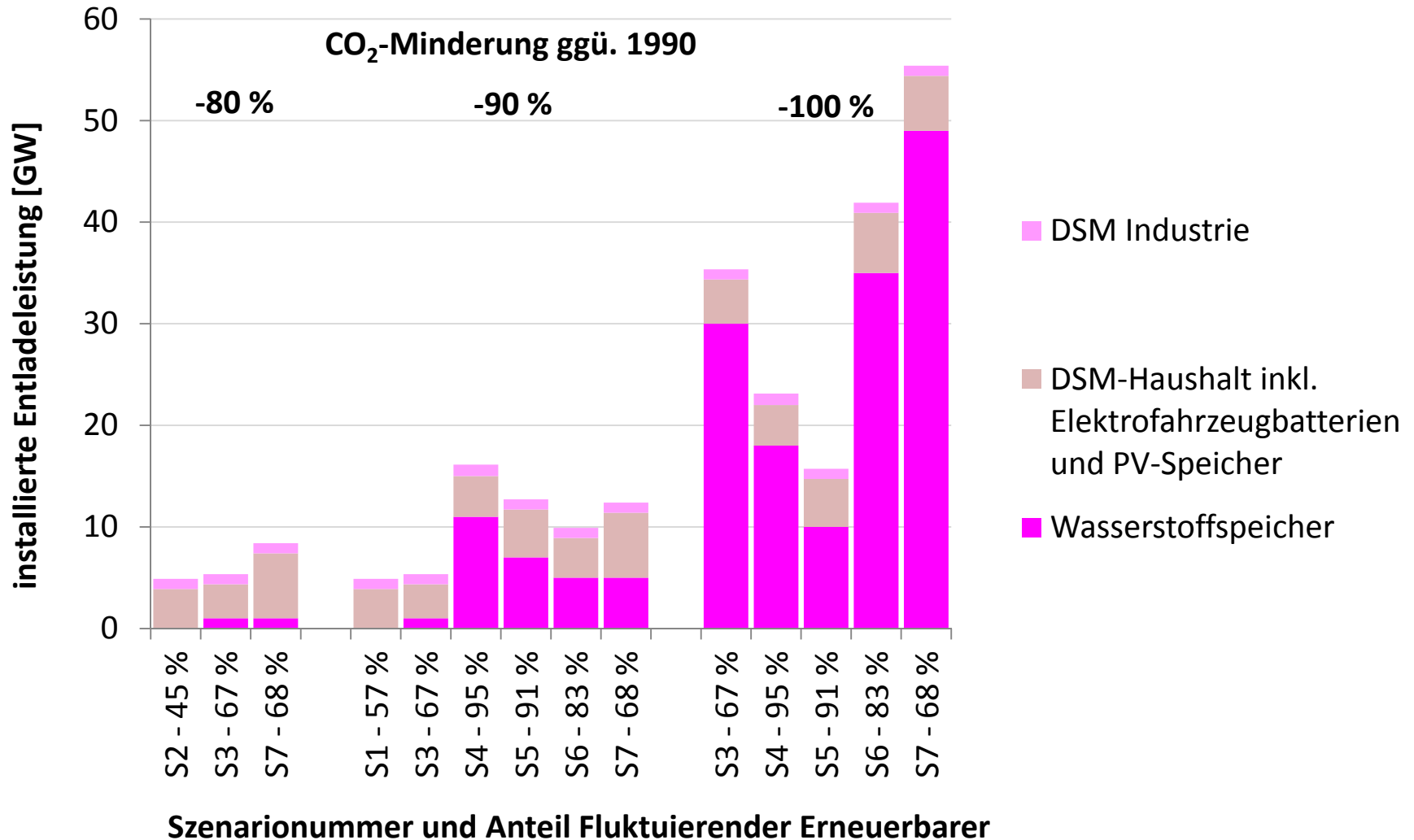
Hanno Böck / <https://hboeck.de/>

### Option 4

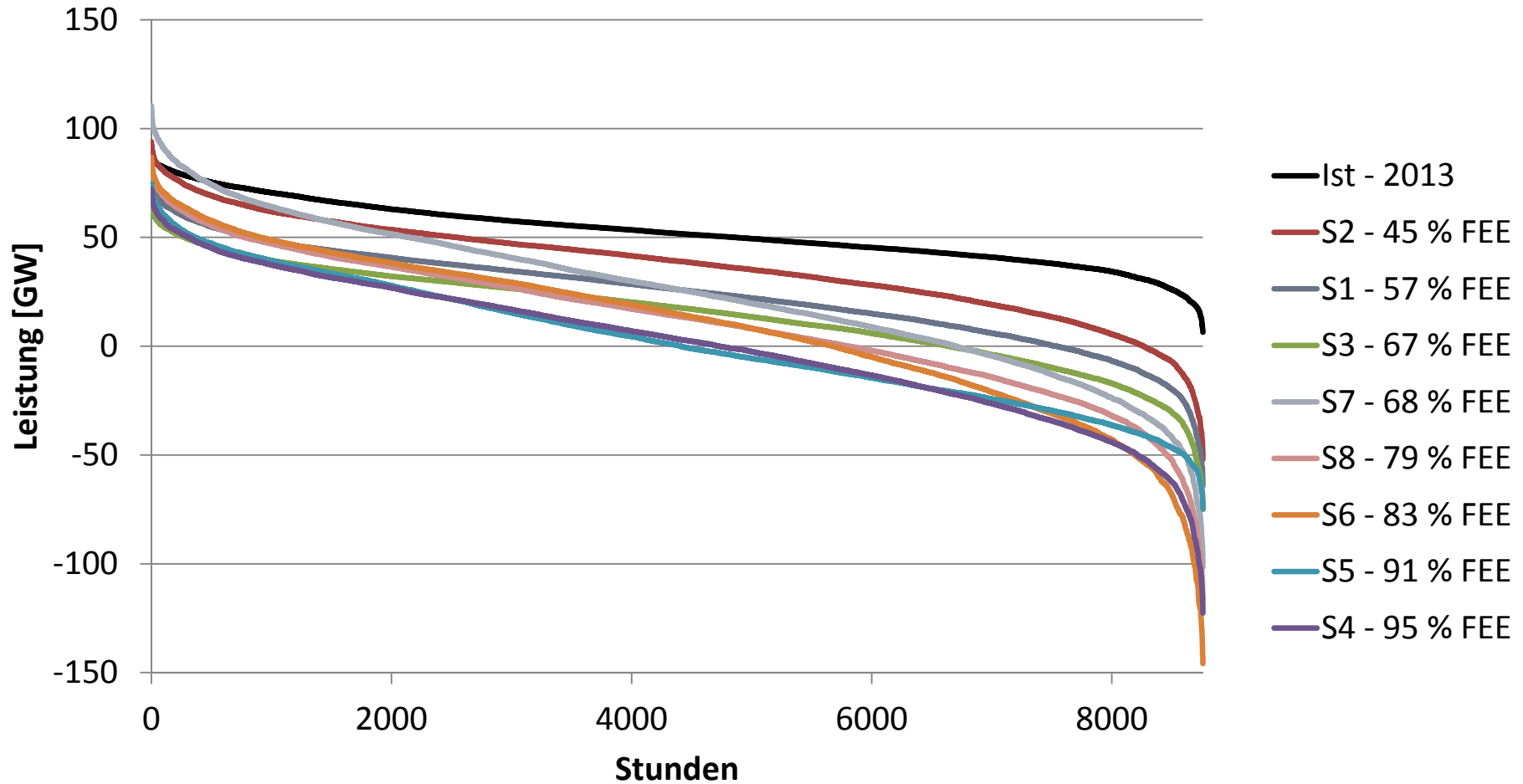
- Abregelung
- Wirtschaftlich, wenn Investkosten für Alternativnutzung zu hoch



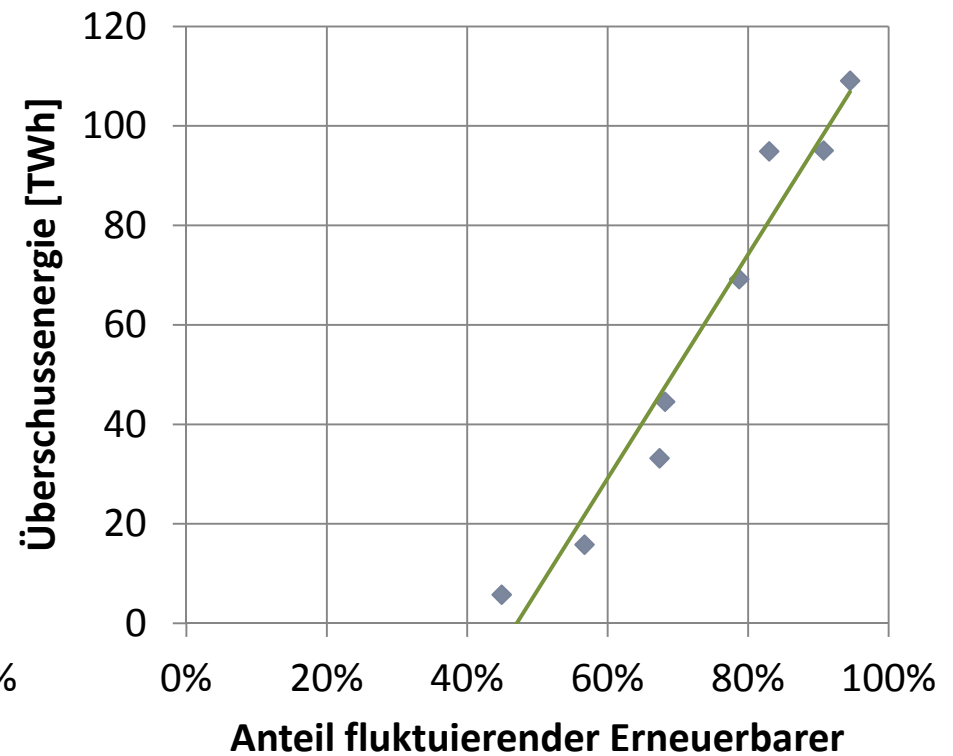
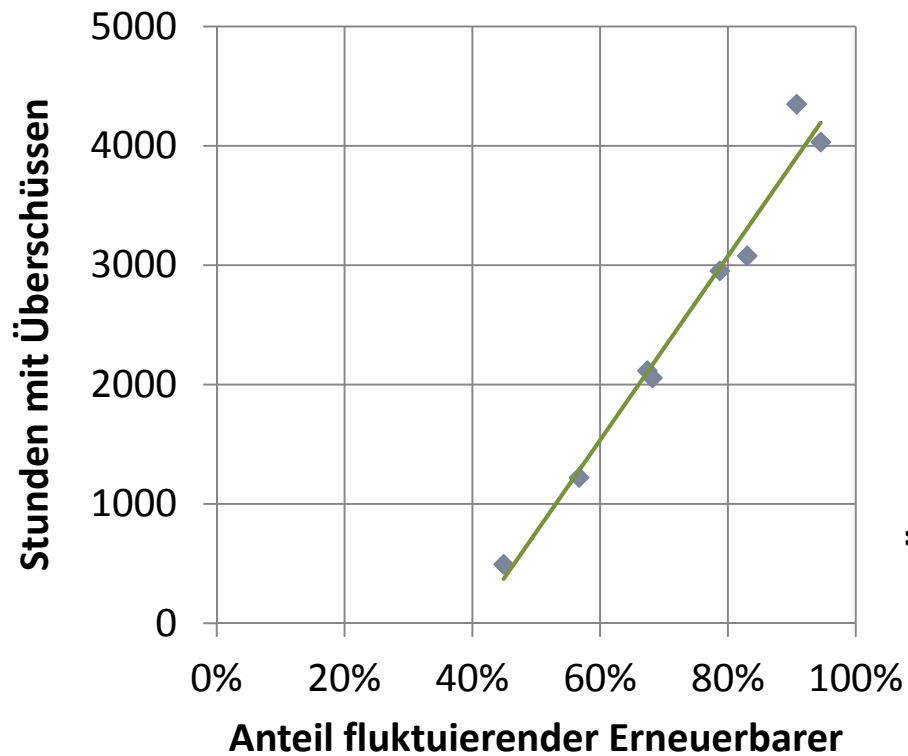
© vege / Fotolia



## Geordnete Residuallast



## Wann gibt es wie viele Überschüsse?



# “Power to gas” – yes, but through „power to heat“

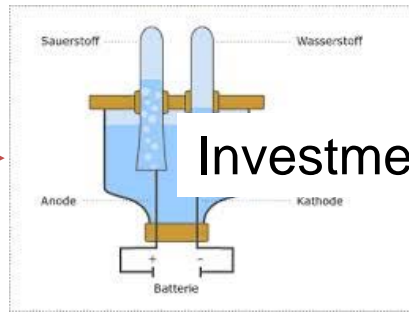
Hydrogen generation

Methanisation

Methane / natural gas



fluctuating  
power generation  
(Wind or PV)



Investment > 1000 €/kW



Efficiency ~ 60%



fluctuating  
power generation  
(Wind or PV)



investment < 50 €/kW



Efficiency ~ 93%

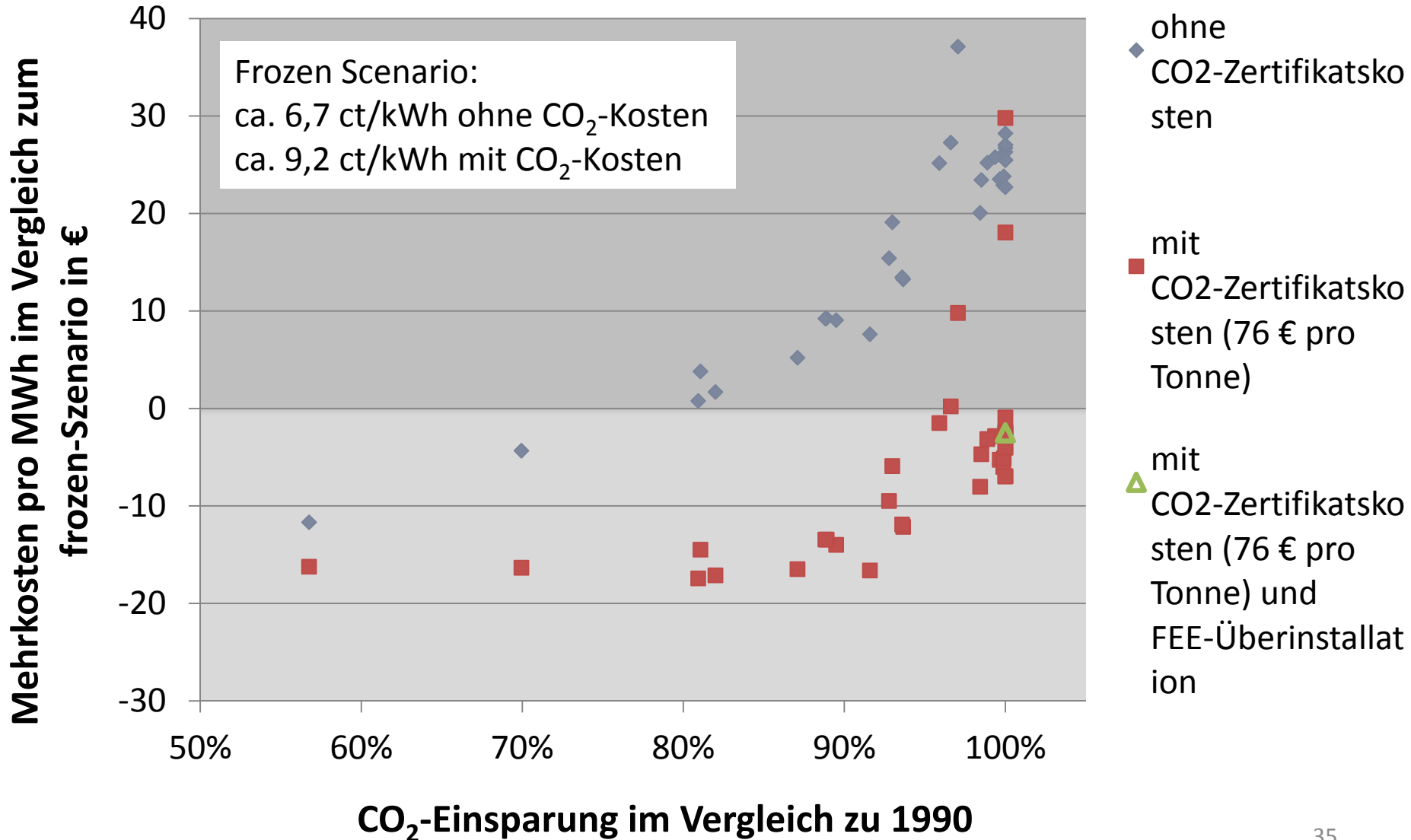
Power grid

Hybride heating system

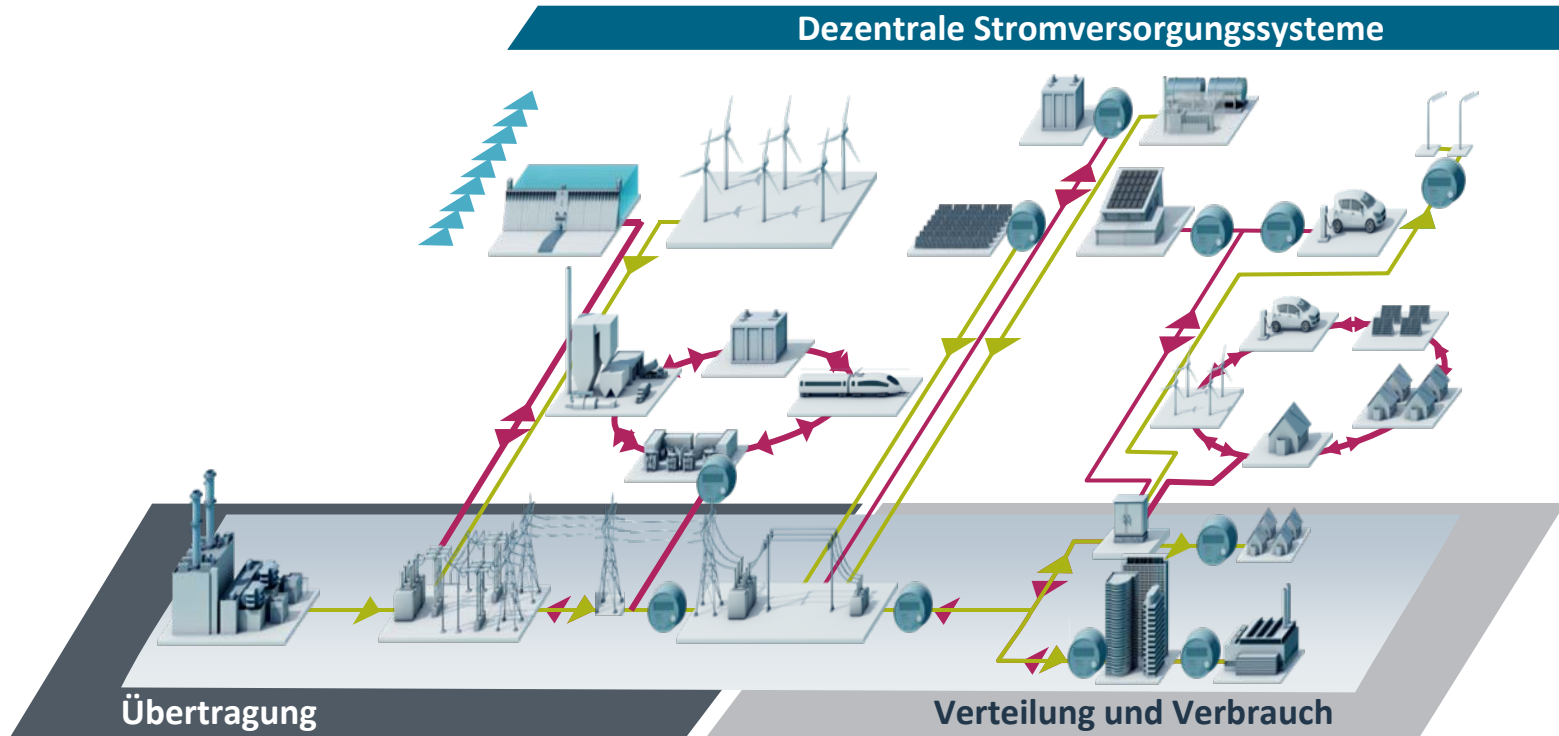
natural gas & electrical power



## Herausforderung 4: Wirtschaftlichkeit



## Herausforderung 5: Marktliberalisierung und Aussicht auf neue, kostengünstige Strom- erzeuger sind Treiber für eine Dezentralisierung der Energieversorgung



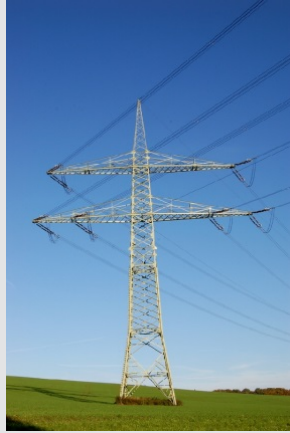
Von zentraler  
Stromversorgung  
und unidirektionalem Netz ...

... zu dezentralen  
Stromversorgungssystemen mit  
bidirektionalem  
Ausgleich

# Zentral



© Thecrgroup / Wikimedia Commons



© Markus Gössing / Fotolia



© SteKrueBe / Wikimedia Commons



© Terry Hughes / Wikimedia Commons



© Imaginis / Fotolia



© vege / Fotolia

# Dezentral



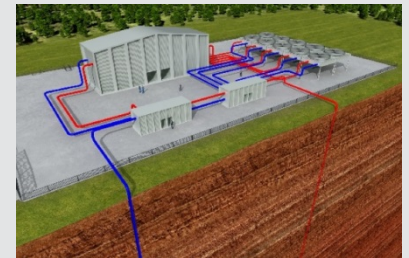
© vege / Fotolia



© Petair / Fotolia



© Visual Concepts / Fotolia

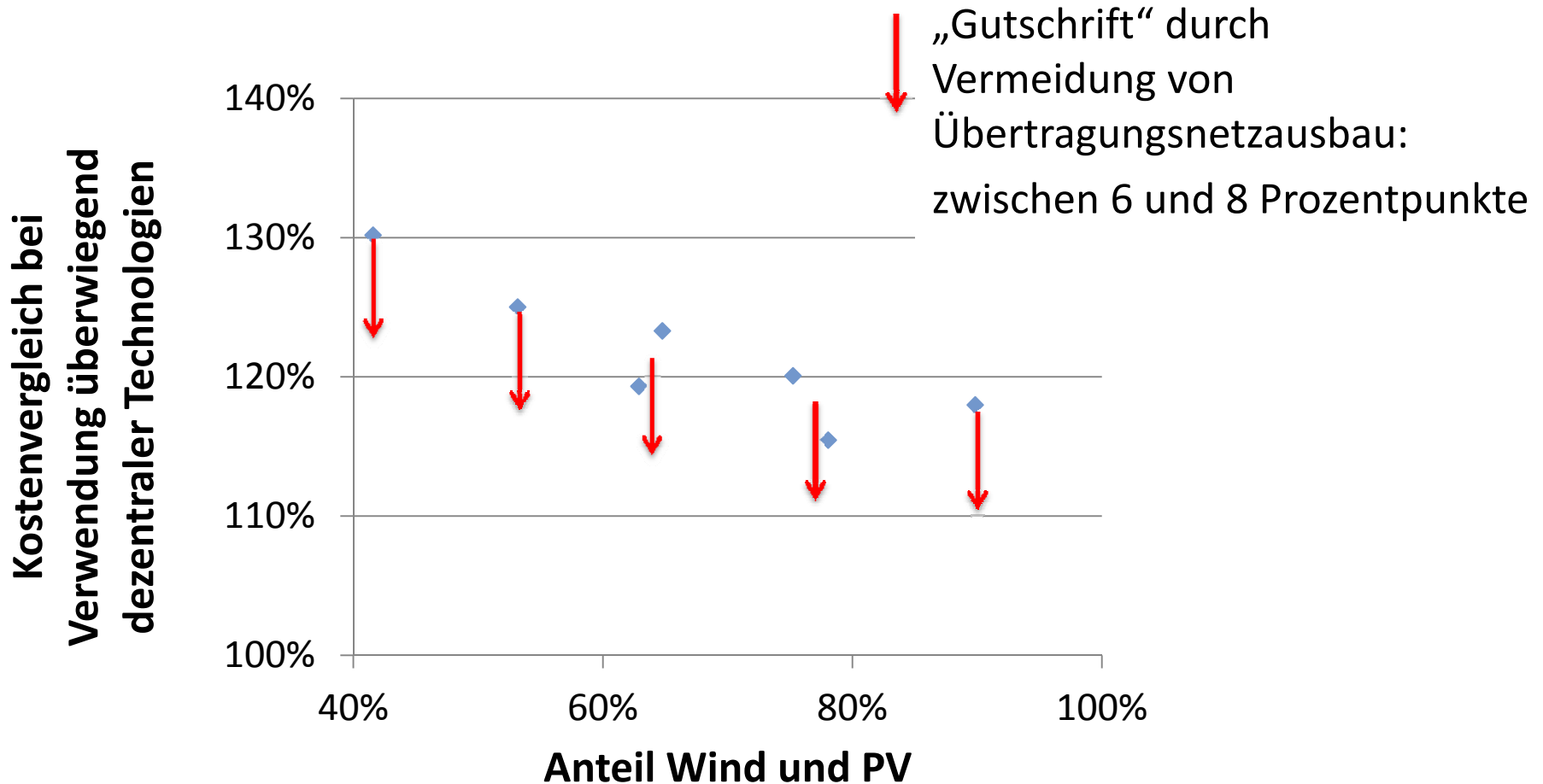


© visidia / Fotolia

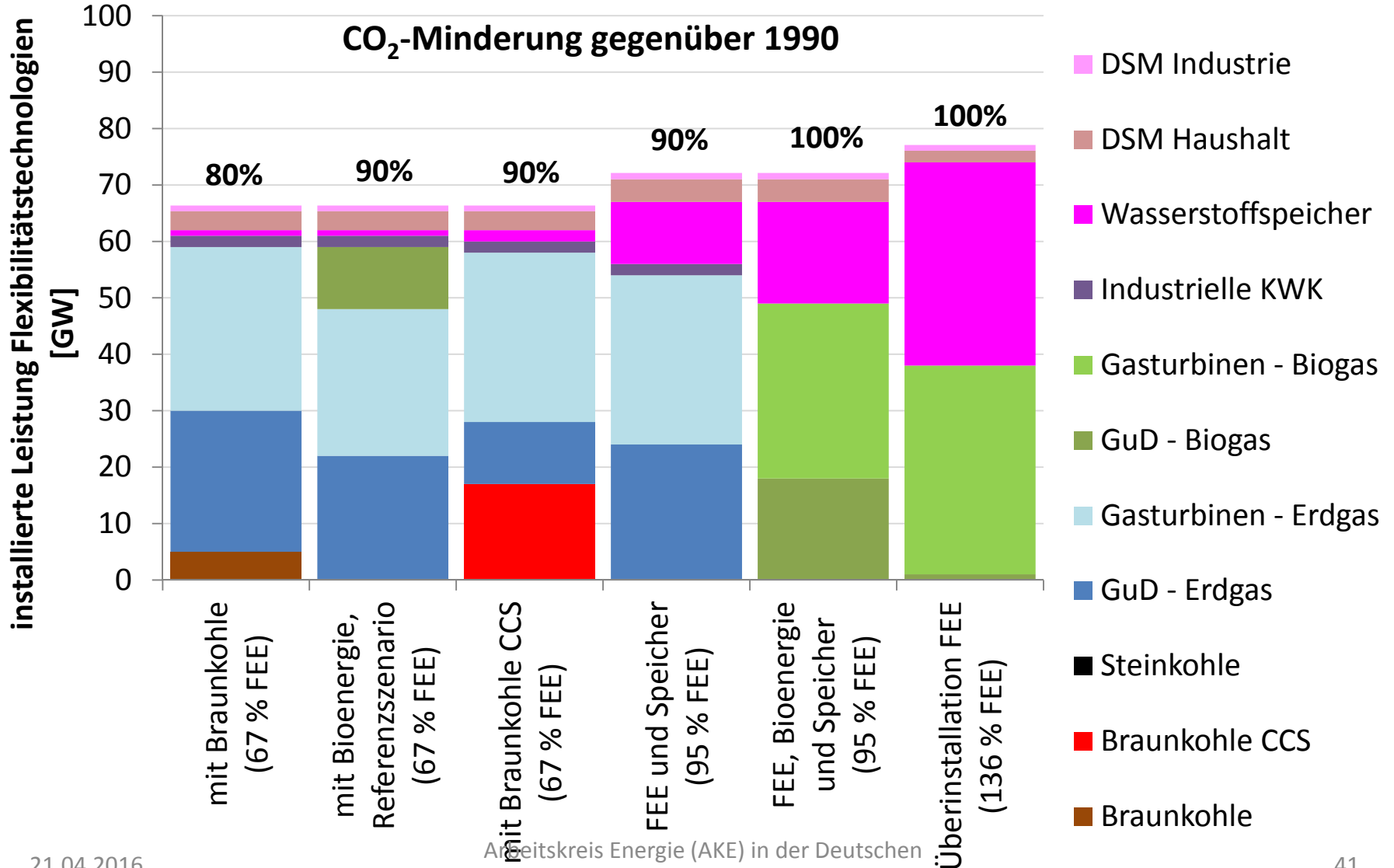


User:LSDSL / Wikimedia Commons

## Mehrkosten durch Dezentralität – 3 unabhängige Regionen in Deutschland



## Unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Einsparungsziele

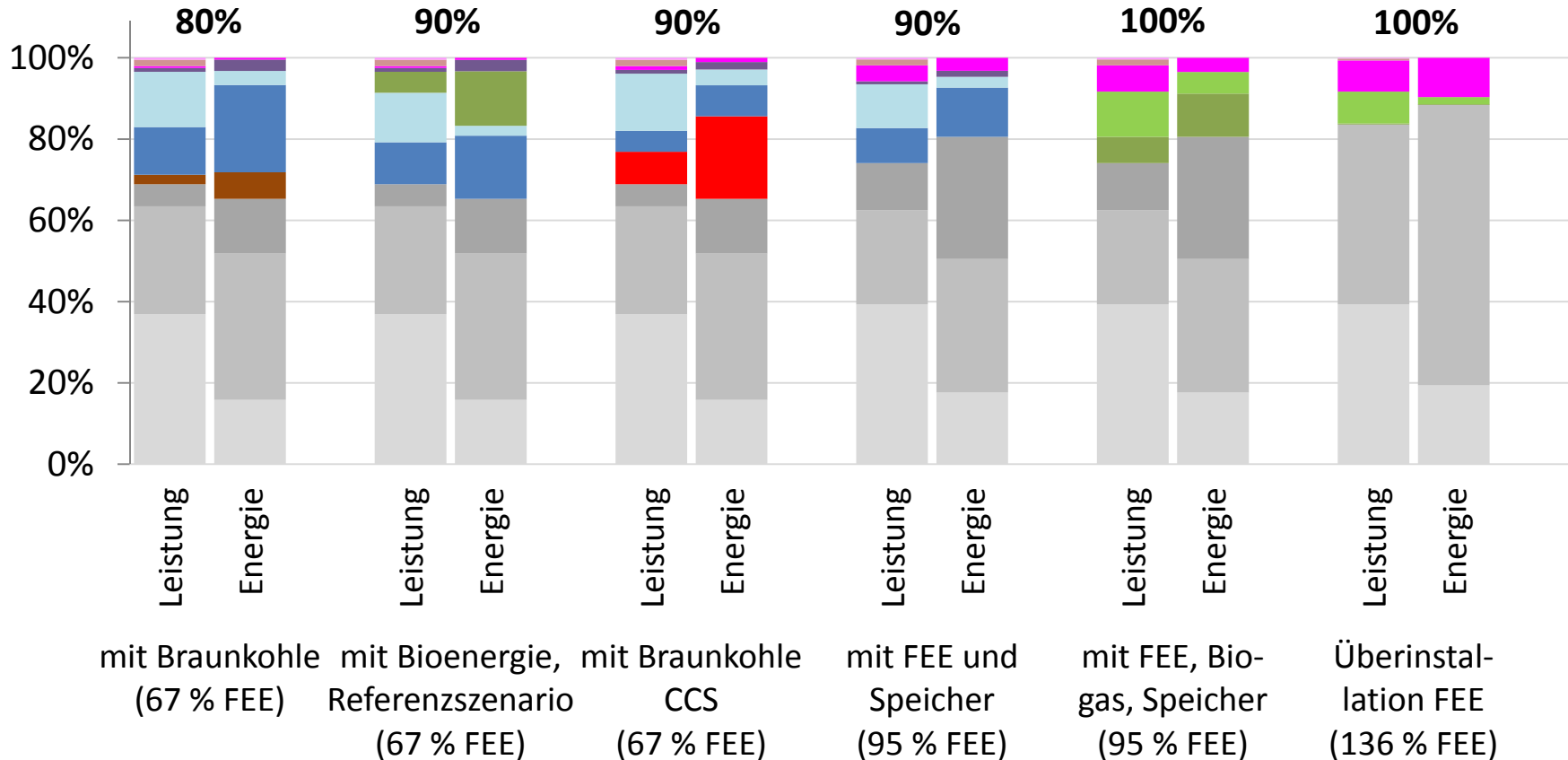




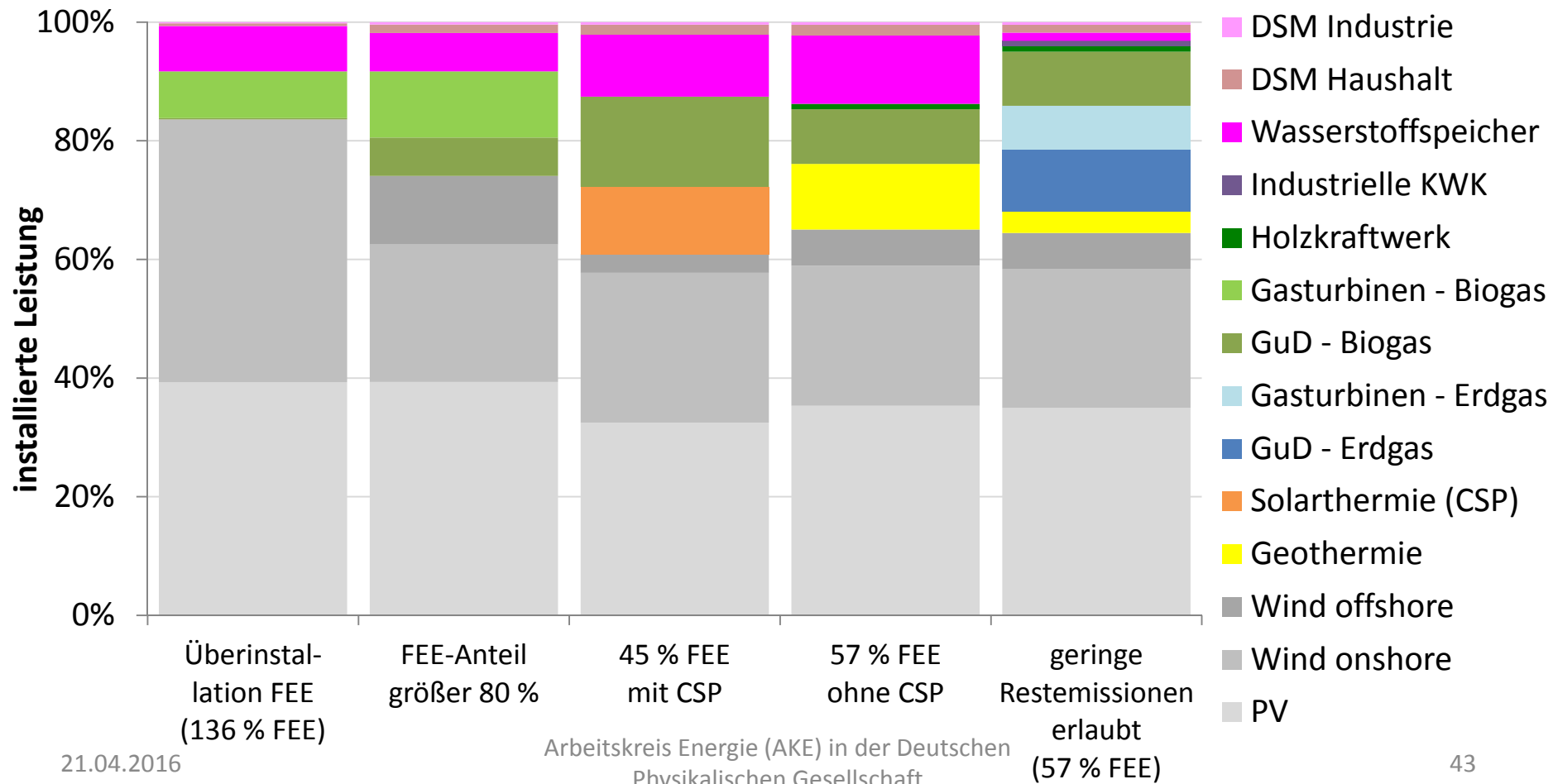
- PV
- Braunkohle CCS
- Gasturbinen - Biogas
- DSM Industrie
- Wind onshore
- GuD - Erdgas
- Industrielle KWK
- Wind offshore
- Gasturbinen - Erdgas
- Wasserstoffspeicher
- Braunkohle
- GuD - Biogas
- DSM Haushalt

### CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber 1990

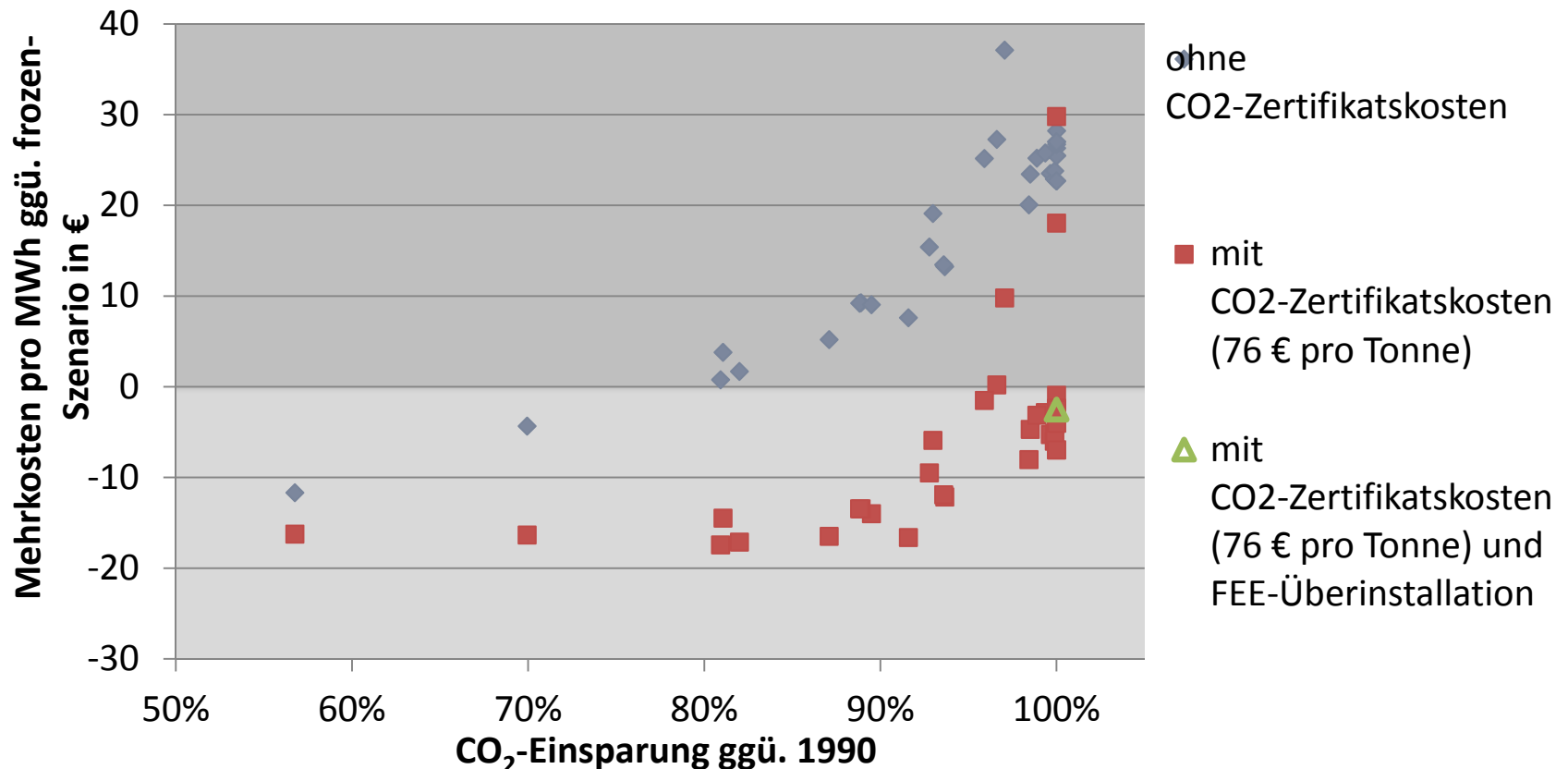
Anteile der Leistungs- und Energiebereitstellung der jeweiligen Technologien



## Technologie-Portfolios für mögliche Stromsysteme mit 100 Prozent Emissionsreduktion oder sehr geringen Restemissionen.



## Mehrkosten pro Megawattstunde gegenüber dem frozen-Szenario bei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Reduktionsgraden sowie jeweils mit und ohne Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten



## Zusammenfassung

**Hohe Anteile Wind und PV führen zu hohem Flexibilitätsbedarf**

**Technologien für Flexibilität werden ausreichend und wirtschaftlich zur Verfügung stehen**

**Gasturbinen werden eine zentrale Rolle für die gesicherte Stromversorgung spielen (mit Erdgas, Biogas, EE-Wasserstoff oder –Methan)**

**Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien wird 2050 günstiger sein als bei Weiternutzung fossiler Energieträger**

**Energieversorgung könnte stark dezentral werden**

## Fazit

**Frühe Festlegung des langfristigen CO<sub>2</sub>-Ziels für den Stromsektor von großer Bedeutung ist, um Fehlinvestitionen zu vermeiden.**

**Gasturbinentechnologie in allen Systemvarianten mit relativ ähnlichen installierten Leistungen (Betrieb je nach Szenario mit Erdgas, Biogas oder Wasserstoff)**

**Die Steigerung der CO<sub>2</sub>-Minderung bis hin zu einem vollständig dekarbonisierten Stromsystem ist günstiger, als den Kraftwerksmix des Jahres 2025 beizubehalten (frozen-Szenario bei 76 € pro Tonne)**

# Ad-hoc Working group „Flexibility Concepts“

Organisation: Sauer, Elsner

11 expert groups, more than 100

## Power Generation and Flexibility Technologies

- Photovoltaics
- Wind
- Bio mass
- Geothermal power generation
- Solarthermal power generation
- Conventional power generation
- Storage Technologies
- Demand management (power)
- Demand management (heat)

Actuating Renewables

Flexible Power Generation Technologies  
(power generators)

Flexibility technologies for shift in time

Flexibility technologies for regional shift

**Abruf von Analyse, Stellungnahme und allen Datensammlungen aus den Fachgruppen  
<http://www.acatech.de/de/aktuelles-presse/dossiers/dossier-stromversorgung-2050.html>**

**Stellungnahme syndiziert durch die drei Wissenschaftsakademien**

Energy scenarios

- scenarios

Lead Fishedick

# Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge

Dirk Uwe Sauer

**RWTH Aachen University**  
**JARA Energy (Jülich Aachen Research Alliance)**

Contact: [sr@isea.rwth-aachen.de](mailto:sr@isea.rwth-aachen.de)

Jägerstrasse (ISEA)



Mathieustrasse (E.ON ERC)



Hüttenstrasse  
(Test center)

