FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Forum Energiewende: Speicher für die Energiewende
vhs – Erlangen, 9. Mai 2016

Zentral oder dezentral? – Speicherstrategien für die Energiewende

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

1. Braucht die Energiewende Speicher?

- Folgen des Ausbaus Erneuerbarer Energien
- Versorgungssicherheit nach 2022

2. Speicheraufgaben

- Effiziente Speicher
- Dynamische Speicher
- Große Speicher

3. Speichertechnologien

- Potentielle Energie
- Wärmespeicher
- Druckluftspeicher
- Batterien und Kondensatoren
- Chemische Speicher

4. Große Speicher oder kleine Speicher?

- Economy-of-Scale oder Economy-of-Downscale?
- Der „Business-Case“ Speicher
- Speicheraufgaben für den Bilanzkreis Deutschland und weltweit

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

1. Braucht die Energiewende Speicher?

- Folgen des Ausbaus Erneuerbarer Energien
- Versorgungssicherheit nach 2022

Oberbecken des Happburger Stausees
Quelle: http://n-land.de/

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bil
Aufgab
Technolo
Groß ↔ k
Fazit

Rückblick: Diskussionspapier

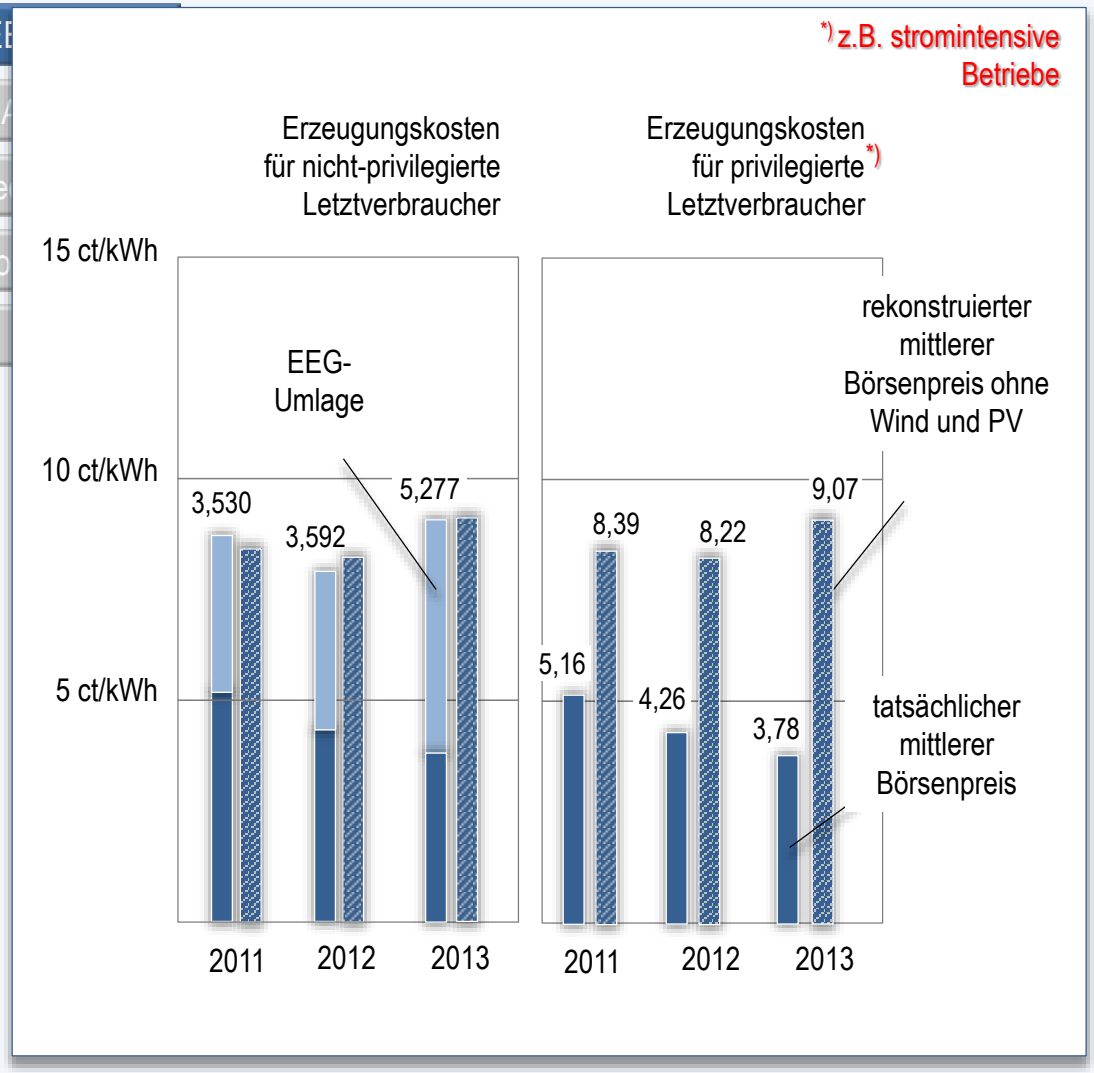
„Deutschland ohne Erneuerbare Energien?“

Inhalt der Studie:

- Rekonstruktion der Strompreise an der Strombörse EEX ohne Wind und Photovoltaik

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

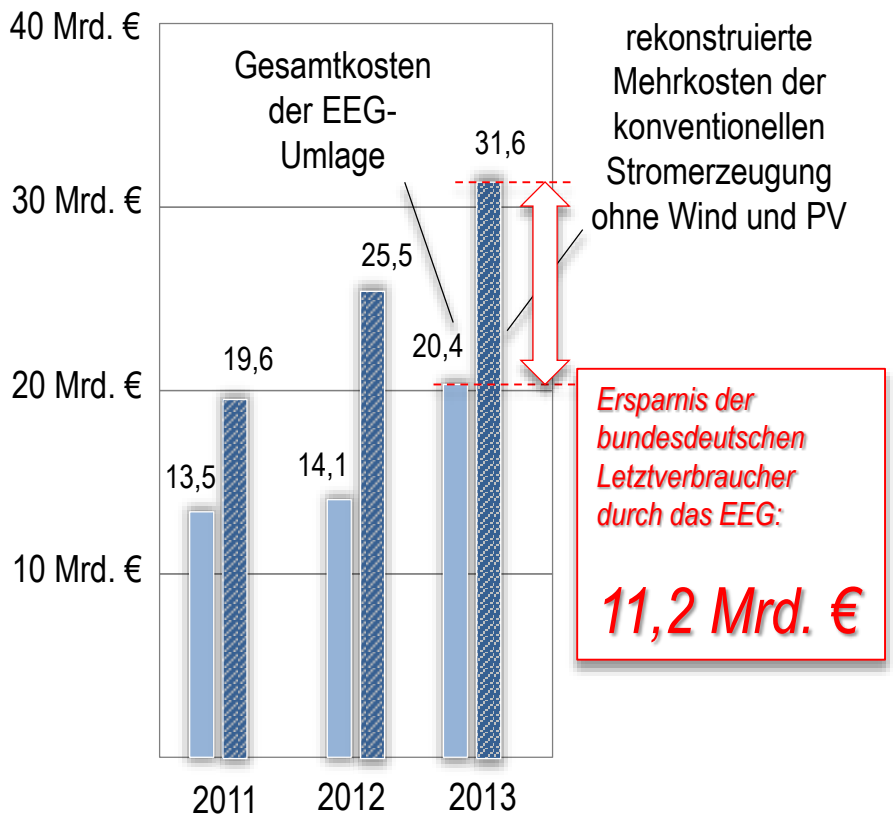
Ergebnisse



1. Strompreis an der Börse hätte sich mehr als verdoppelt

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Ergebnisse

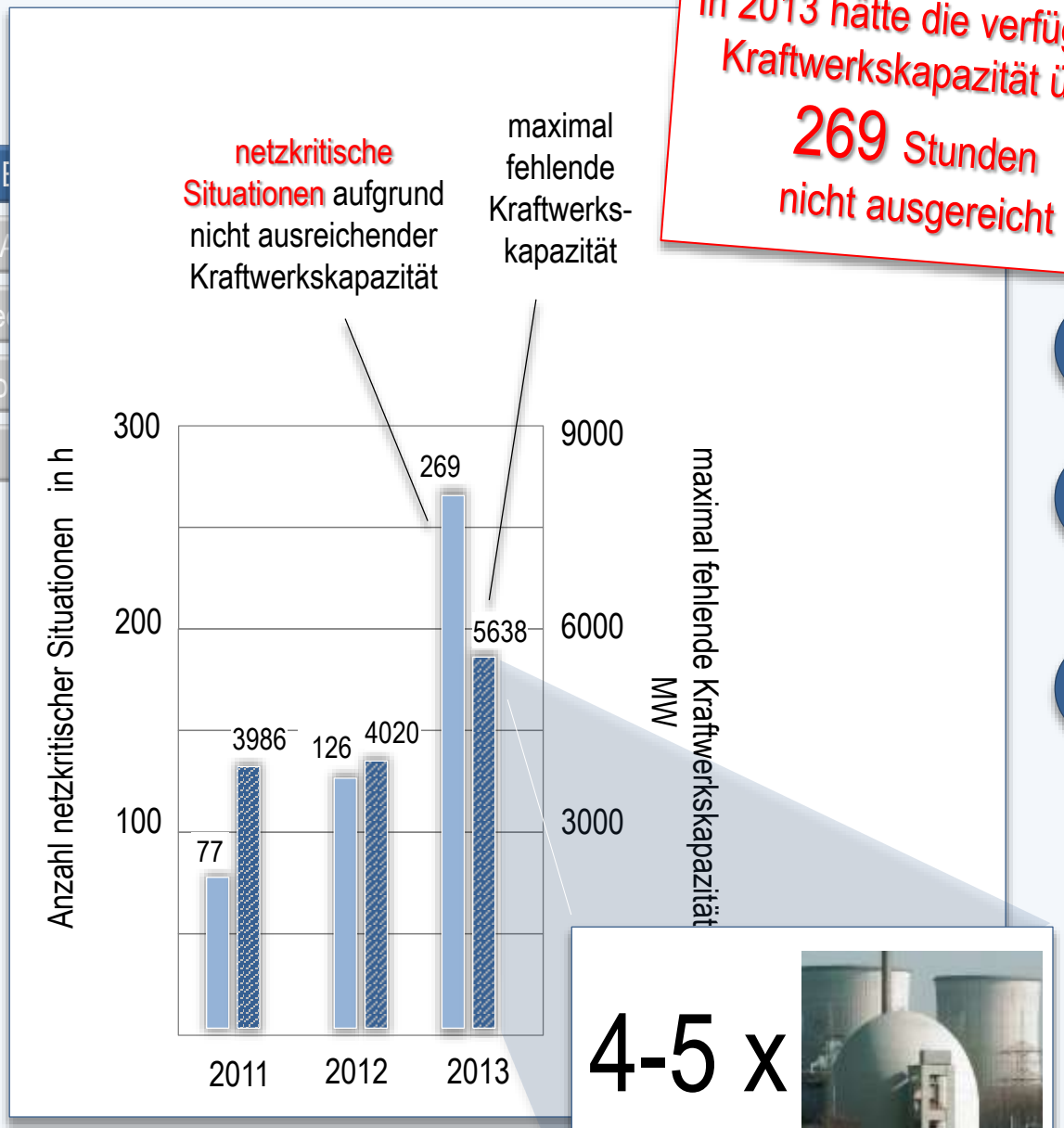


1. Strompreis an der Börse hätte sich mehr als verdoppelt
2. ohne Erneuerbare hätten deutsche „Letztverbraucher“ in 2013 ca. 11,2 Mrd. Euro mehr zu bezahlen
3. ohne Erneuerbare würde es schon heute zu massiven Versorgungsengpässen kommen

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Ergebnisse

In 2013 hätte die verfügbare Kraftwerkskapazität über **269** Stunden nicht ausgereicht

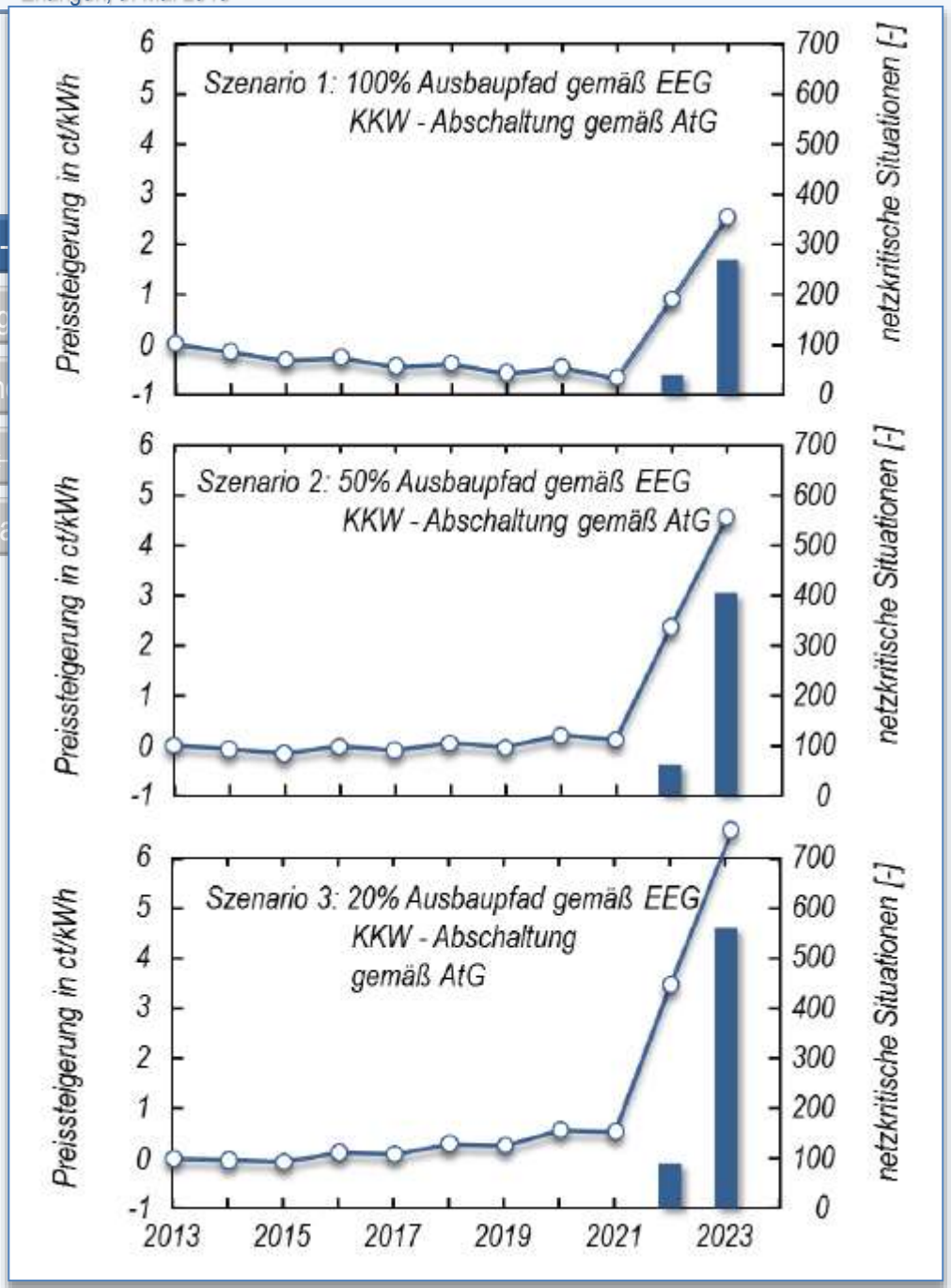


4-5 x

1. Strompreis an der Börse hätte sich mehr als verdoppelt
2. ohne Erneuerbare hätten deutsche „Letztverbraucher“ in 2013 ca. 11,2 Mrd. Euro mehr zu bezahlen
3. ohne Erneuerbare würde es schon heute zu massiven Versorgungsengpässen kommen

zum Download unter
http://www.evt.cbi.fau.de/aktuelles/Energiestudie.shtml

Ergebnisse



1. Strompreis an der Börse hätte sich mehr als verdoppelt

2. ohne Erneuerbare hätten deutsche „Letztverbraucher“ in 2013 ca. 11,2 Mrd. Euro mehr zu bezahlen

3. ohne Erneuerbare würde es schon heute zu massiven Versorgungsengpässen kommen

aber:

4. spätestens bis 2023 *) müssen signifikante Reserven entstehen

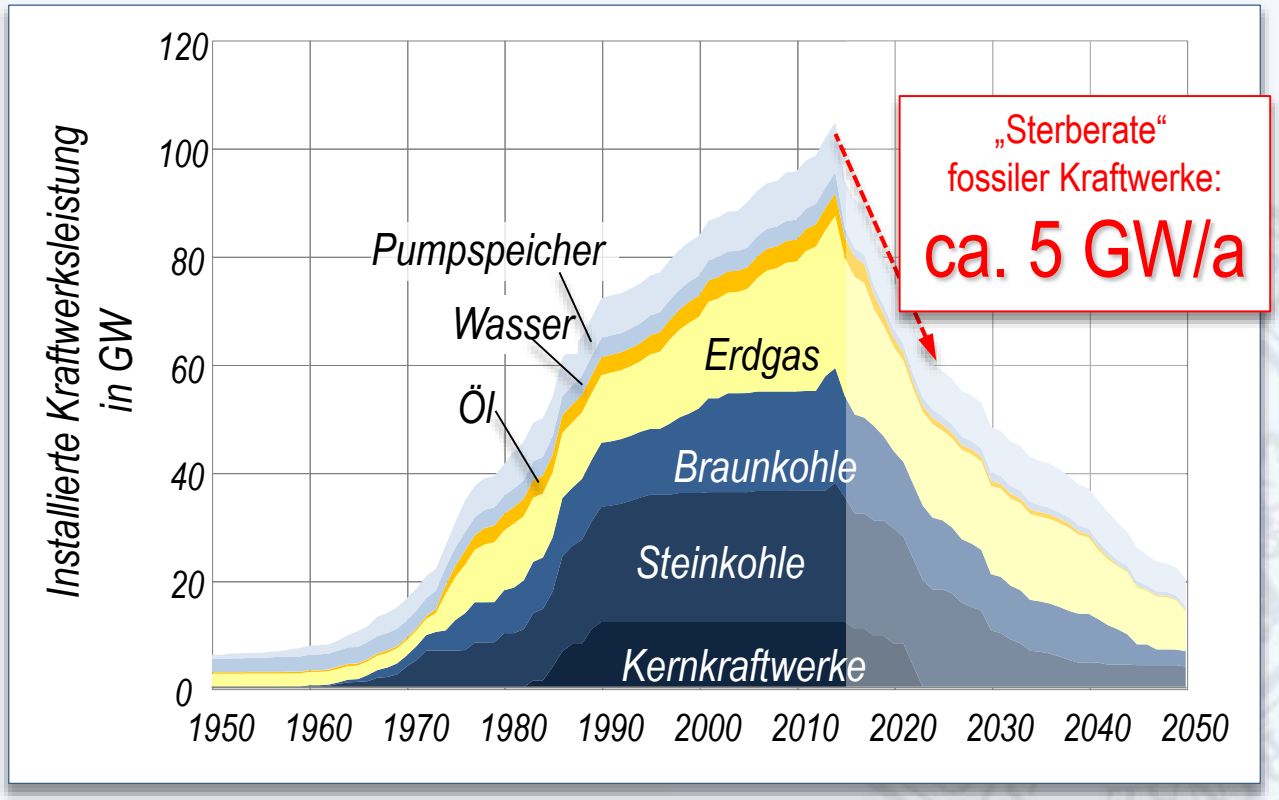
*) Abschaltung der letzten Kernkraftwerke

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Frage: Warum drohen Blackouts?

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Liberalisierung des Strommarktes führte zum Kapazitätsabbau und zur Überalterung des Europäischen Kraftwerksparks
- In den nächsten Jahren bestünde erheblicher Ersatzbedarf an konventionellen Kraftwerken



tatsächliche Inbetriebnahmen Kohle

- 2001-2012: 0,3 GW/Jahr

Inbetriebnahmen Erdgas

- 2001-2012: 0,9 GW/Jahr

statt ca. 5 GW/a

Kohle-Kraftwerks-Inbetriebnahmen in Deutschland:

1998	Schwarze Pumpe (2x800 MW, 41%)
1999	Cottbus (80 MW, 40%)
2000	Lippendorf (2 x 865 MW, 42,5%), Boxberg (900 MW, 41,8%)
2001	
2002	Niederaußem (965 MW, 43%)
2003	
2004	
2005	
2006	
2007	
2008	
2009	
2010	Köln-Merkenich (103 MW)
2011	
2012	Neurath (2x1100 MW_{brutto}>43%), Boxberg (675 MW_{brutto},43,9%

Hinweis:

Neubau eines Großkraftwerks dauert 5-10 Jahre…

Beispiel Neurath:

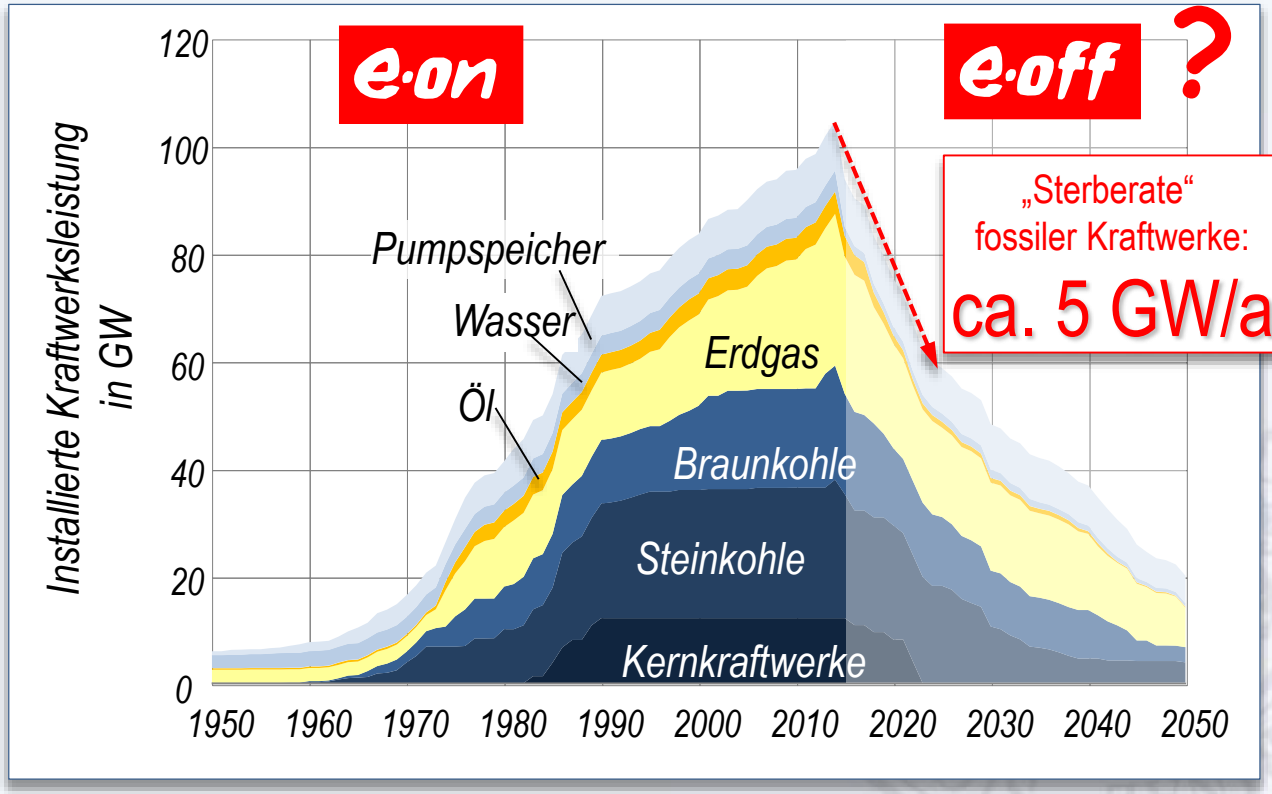
- Genehmigungsantrag: 05/2004
- Grundsteinlegung: 08/2006
- Inbetriebnahme 08/2012

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Frage: Warum drohen Blackouts?

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Liberalisierung des Strommarktes führte zum Kapazitätsabbau und zur Überalterung des Europäischen Kraftwerksparks
- In den nächsten Jahren bestünde erheblicher Ersatzbedarf an konventionellen Kraftwerken
- Einsatz konventioneller, fossil gefeuerter Groß-kraftwerke wird auch in Zukunft weiter zurück-gehen…



aus unter-nehmerischer Sicht

…weil die Liberalisierung des Strommarktes kaum noch Neuinvestitionen zulässt!

&

Erneuerbare Energien kompensieren derzeit den fehlenden Zubau…

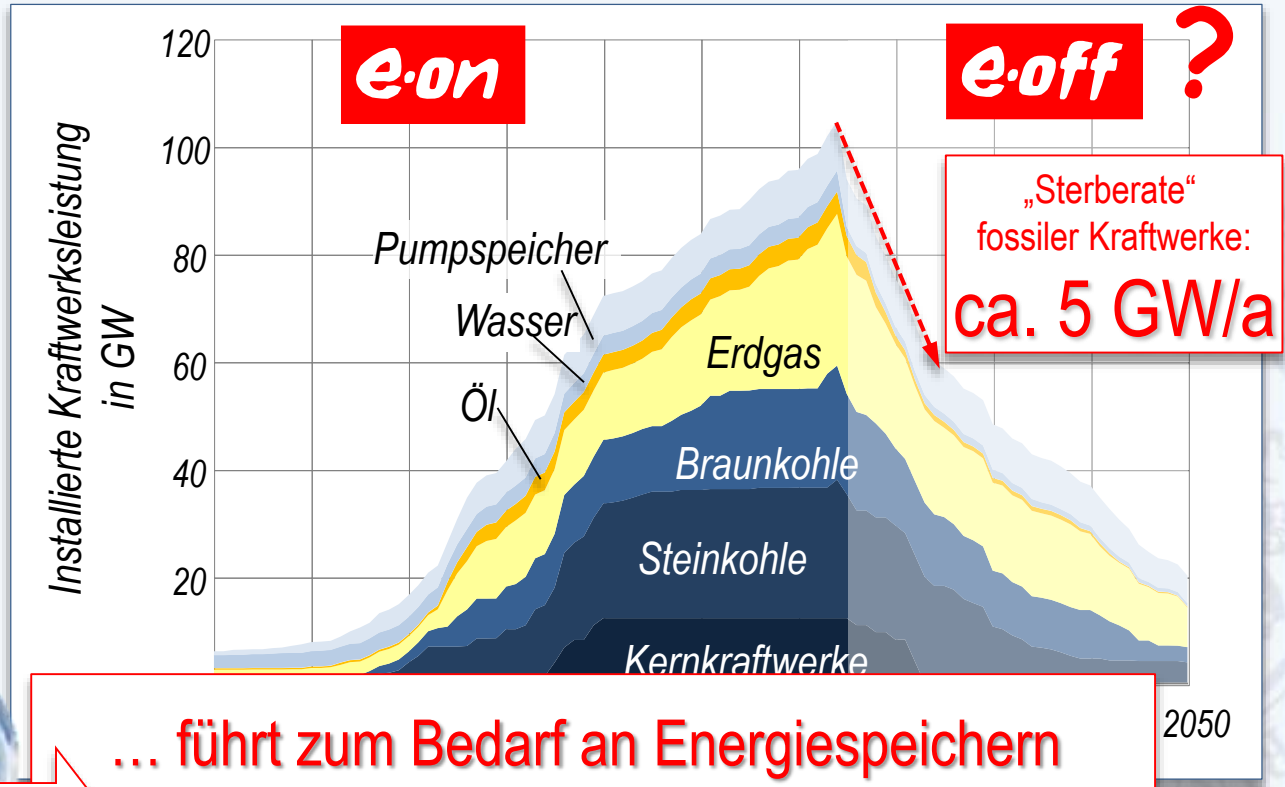
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

These:

- Altersstruktur des deutschen Kraftwerksparks…

Prognose 2023



… führt zum Bedarf an Energiespeichern um altersschwache (Reserve-) Kraftwerke zu ersetzen

Thesen

1. Wenn keiner mehr Kraftwerke baut, brauchen wir andere Back-up Lösungen, z.B. Speicher!

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

2. Speicheraufgaben

- Effiziente Speicher
- Dynamische Speicher
- Große Speicher

Quelle: Michael Sterner, Ingo Stadler
Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration
Springer Vieweg, 2014

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

Unterscheidung

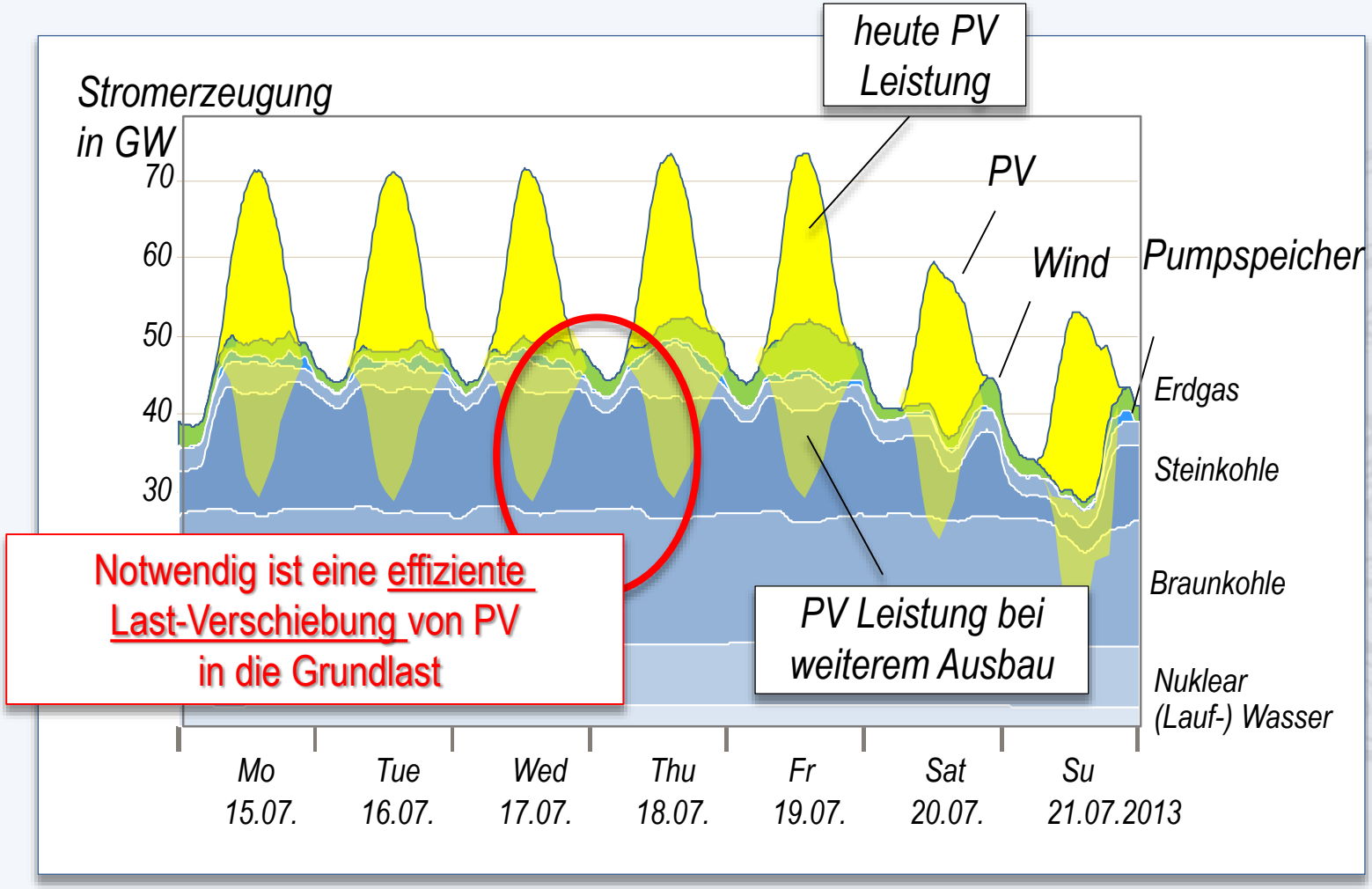
- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Quelle: Michael Sterner, Ingo Stadler
Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration
Springer Vieweg, 2014

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Stromerzeugung in Deutschland im Sommer

- „Fossiler Sockel“ wird auch die nächsten Jahre die Erneuerbaren ergänzen



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

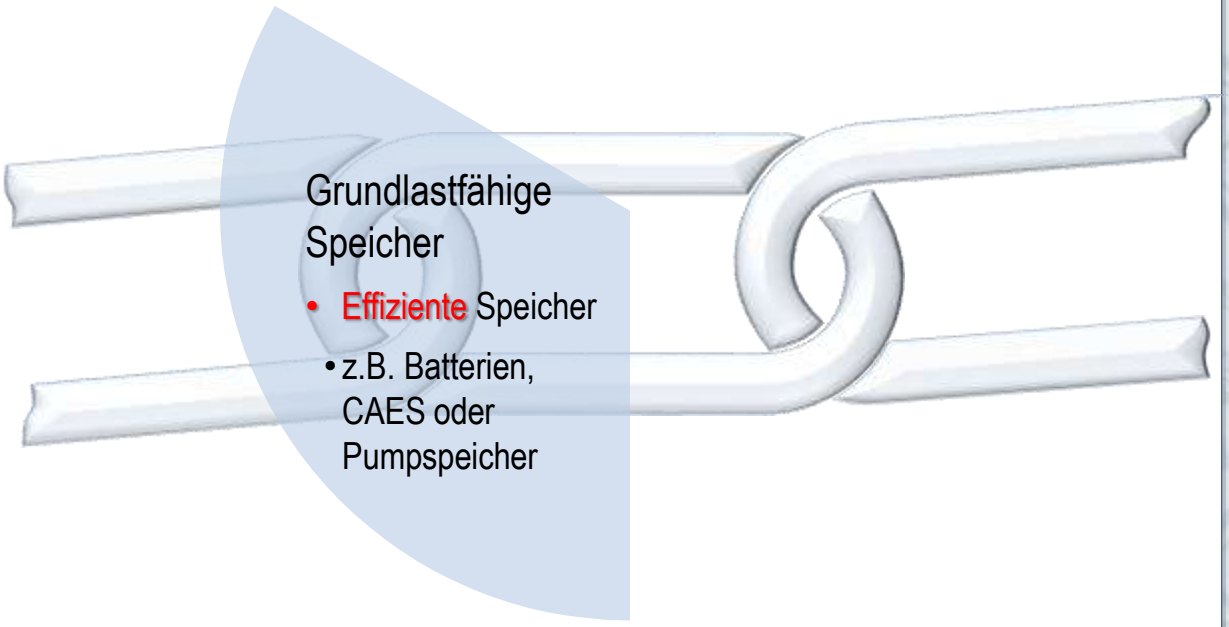
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

Unterscheidung

- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Weitere Unterscheidung:

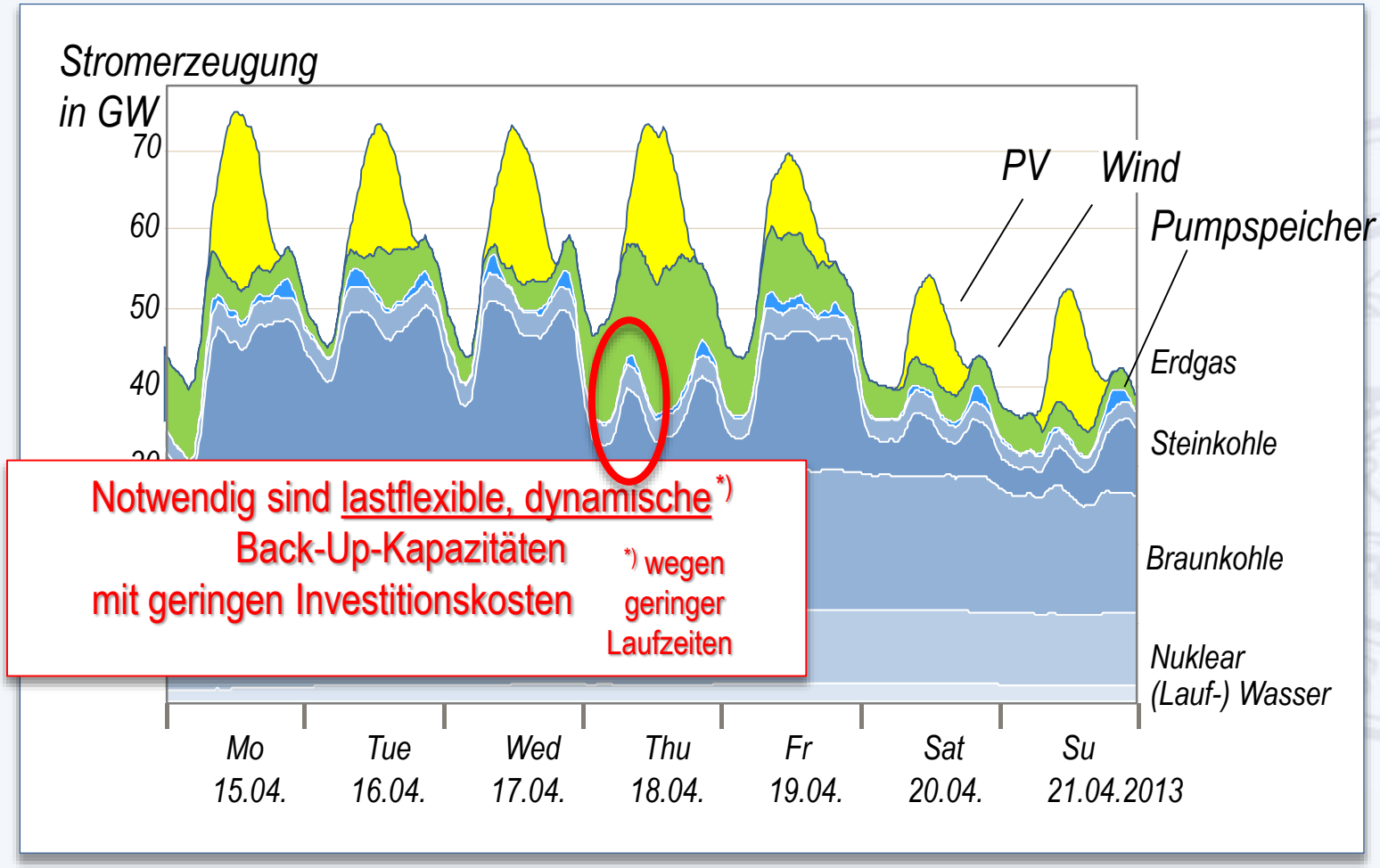
- Grundlastfähige Speicher (z.B. Batterien)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Stromerzeugung in Deutschland im Frühling / Herbst

- „Fossiler Sockel“ wird auch die nächsten Jahre die Erneuerbaren ergänzen
- Lastgradienten morgens und abends sind besonders hoch



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

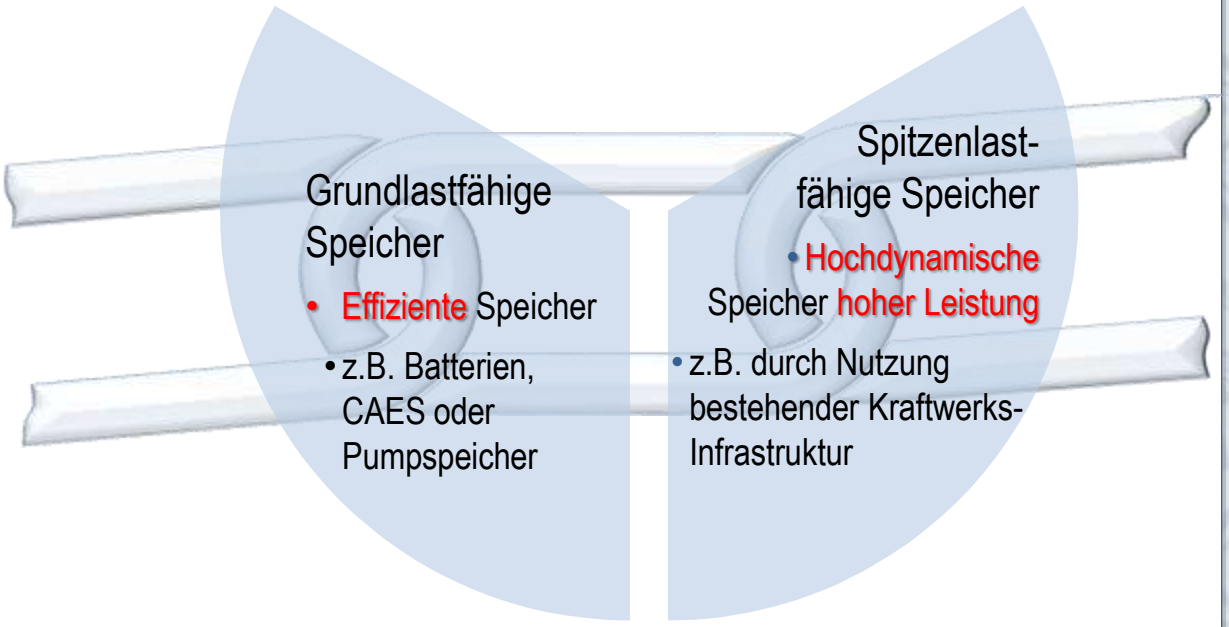
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

Unterscheidung

- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Weitere Unterscheidung:

- Grundlastfähige Speicher (z.B. Batterien)
- Spitzenlastfähige Speicher (z.B. Hochtemperaturspeicher, Pumpspeicherkraftwerke)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Stromerzeugung in Deutschland
Winter 2010-2013

- solare Leistung ist im Winter gering
- Problematisch sind längerdauernde Phasen mit Windstille

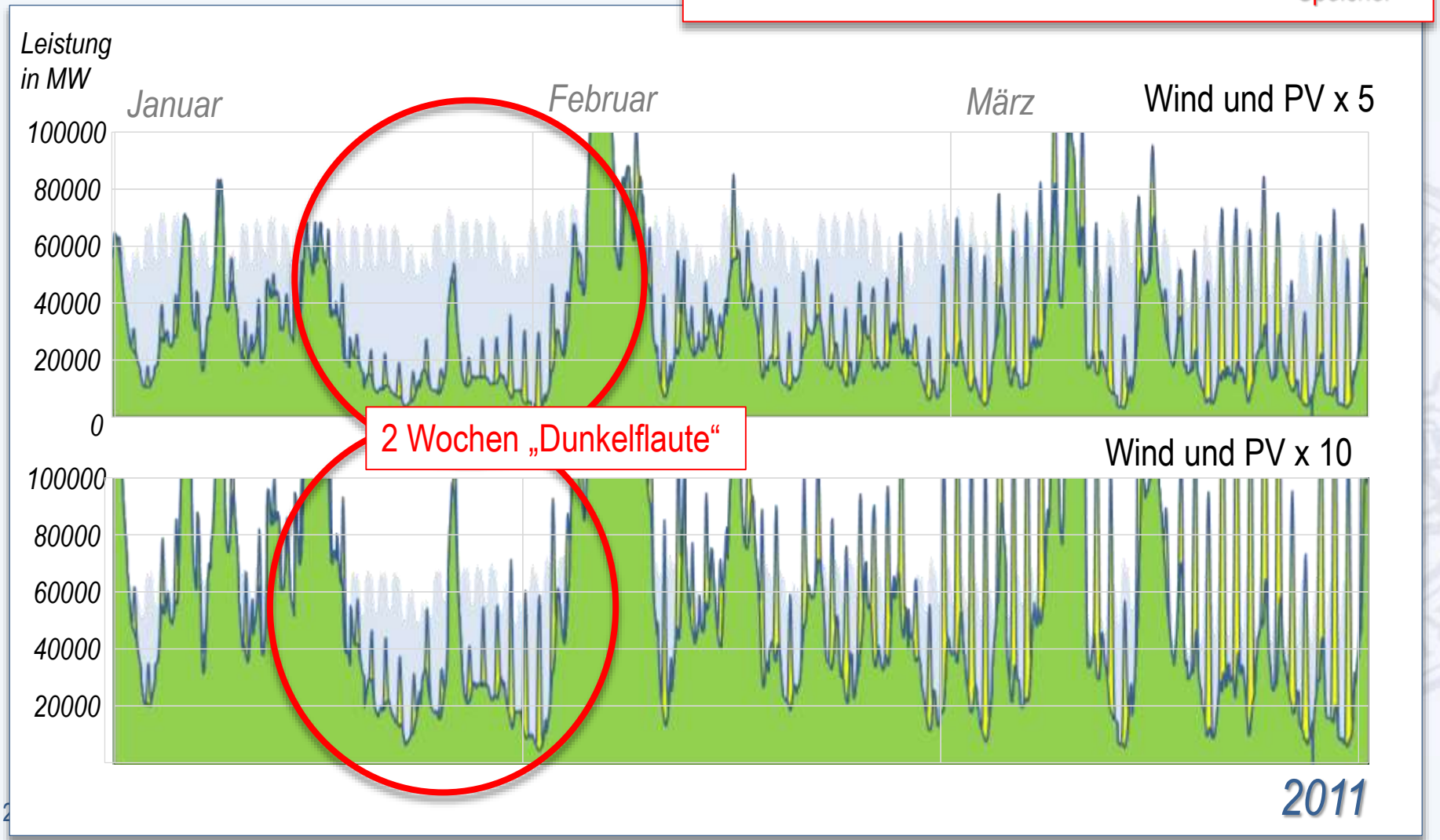
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiel: Winter 2011

- auch bei einer Vervielfachung von Wind und PV müssen bis zu zwei Wochen überbrückt werden

Notwendig sind <u>große Speicher</u> *) mit geringen Investitionskosten:

*) am besten existierende Speicher



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

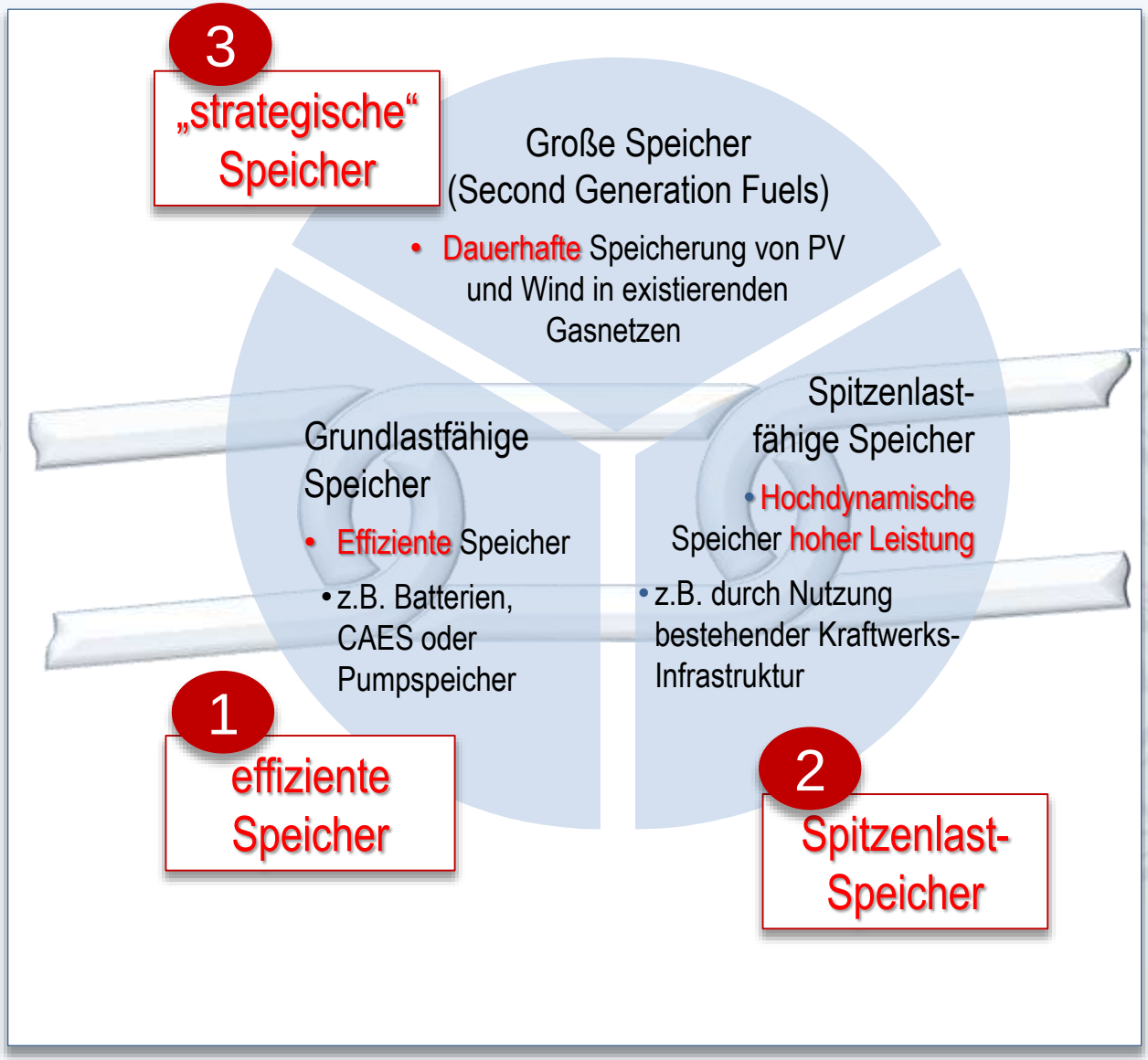
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

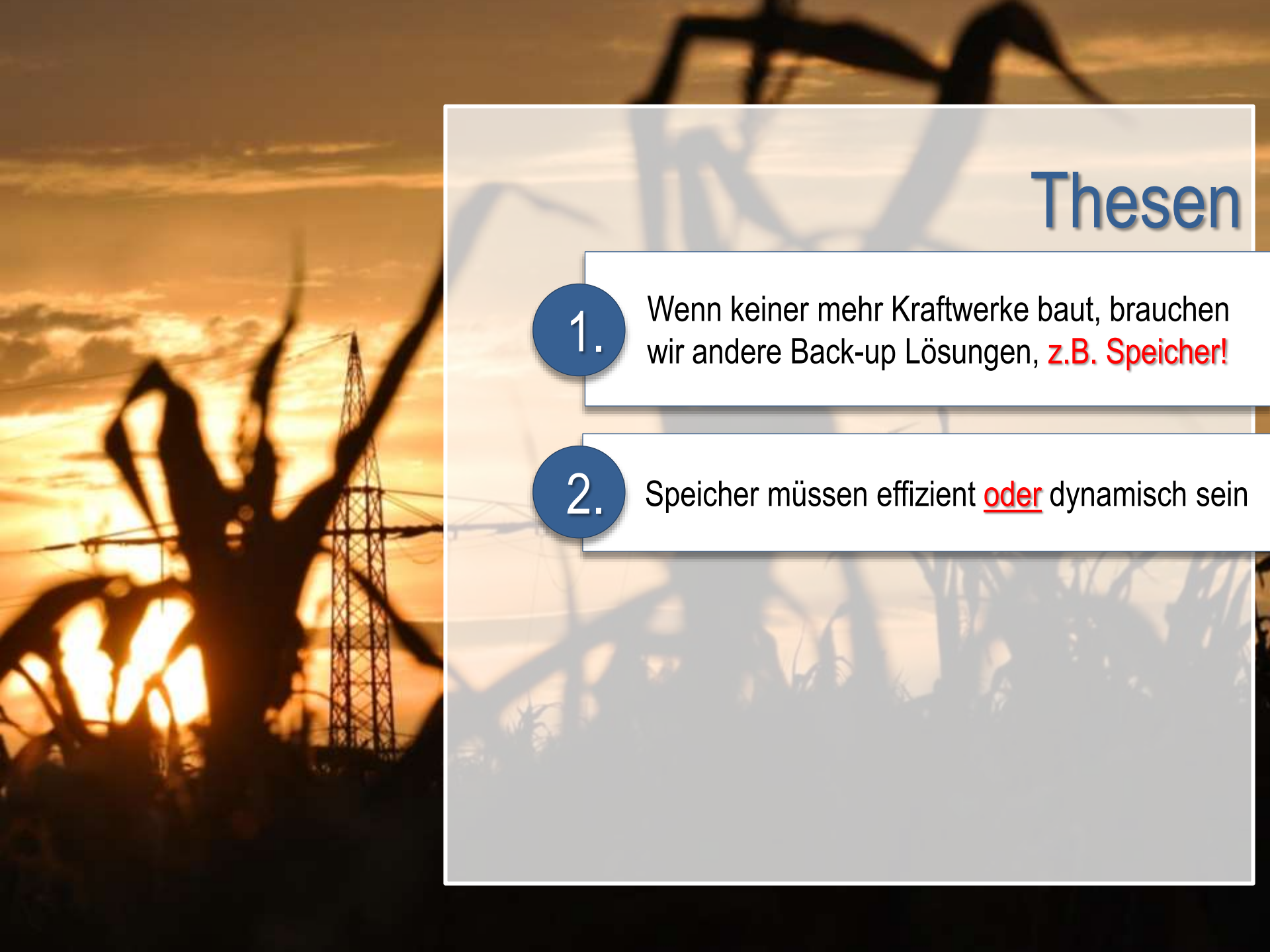
Unterscheidung

- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Weitere Unterscheidung:

- Grundlastfähige Speicher (z.B. Batterien)
- Spitzenlastfähige Speicher (z.B. Hochtemperaturspeicher, Pumpspeicherkraftwerke)
- Systeme mit großen Speicherkapazitäten (Second Generation Fuels bzw. Chemische Speicher)





Thesen

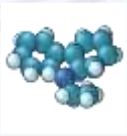
1. Wenn keiner mehr Kraftwerke baut, brauchen wir andere Back-up Lösungen, z.B. Speicher!

2. Speicher müssen effizient oder dynamisch sein

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

3. Speichertechnologien

- Potentielle Energie
- Wärmespeicher
- Druckluftspeicher
- Batterien und Kondensatoren
- Chemische Speicher



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speichertechnologien

(Pump-)speichertechnologien

- Speichersee-Kraftwerke
- Lageenergiespeicher

(Latent-)Wärmespeicher

- Pufferspeicher
- Saisonale Speicher

Druckluftspeicher

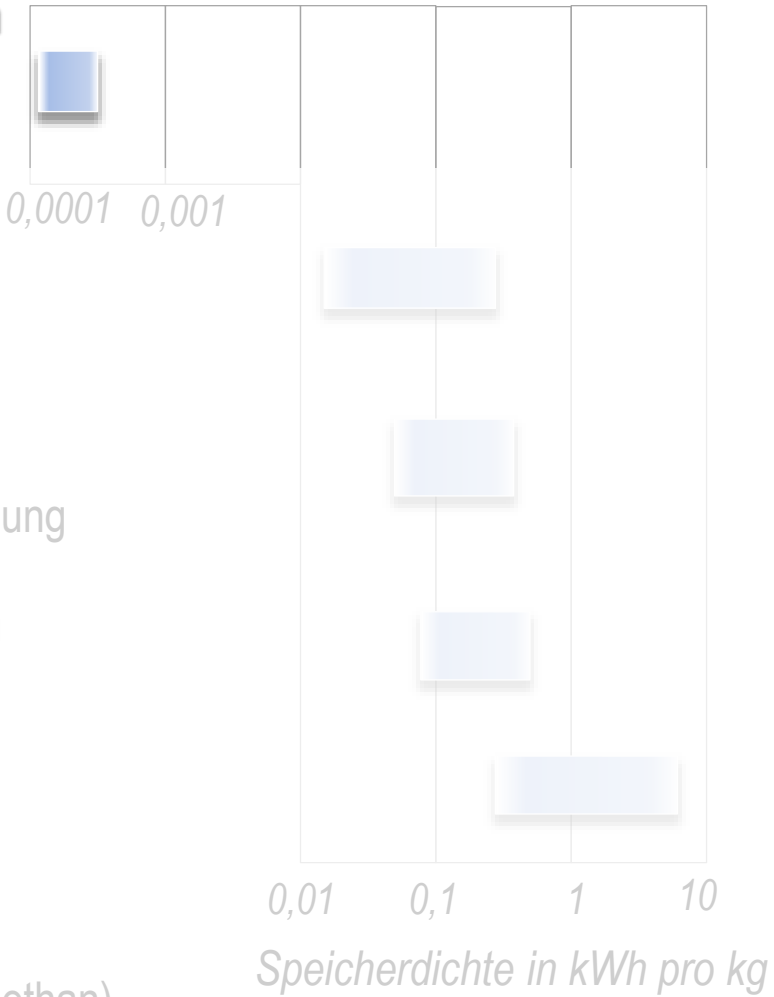
- Adiabate Druckluftsspeicher
- Speicherung mit Luftverflüssigung

Batterien und Kondensatoren

- Bauarten und Kapazitäten
- Redox-Flow

Chemische Speicher / Second Generation Fuels

- LOHCs
- Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

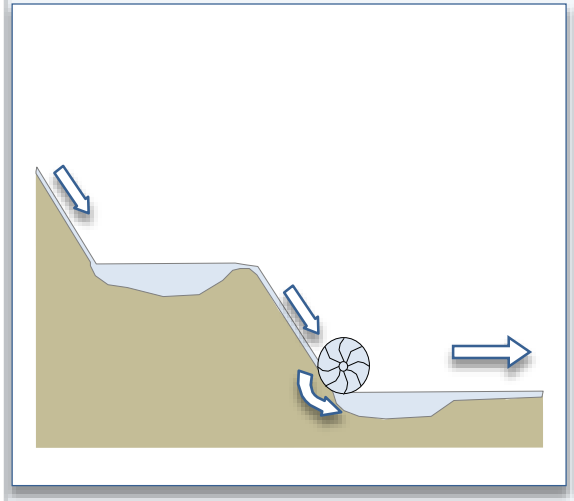
- Speicherkraftwerke nutzen Wasser aus einem hochgelegenen See oder Stausee
- über Rohrleitungen wird das Wasser der tief gelegenen Turbine zugeführt
- das in Deutschland verfügbare Speichervolumen von 40 GWh setzt sich aus rund 30 Pumpspeicherkraftwerken zusammen

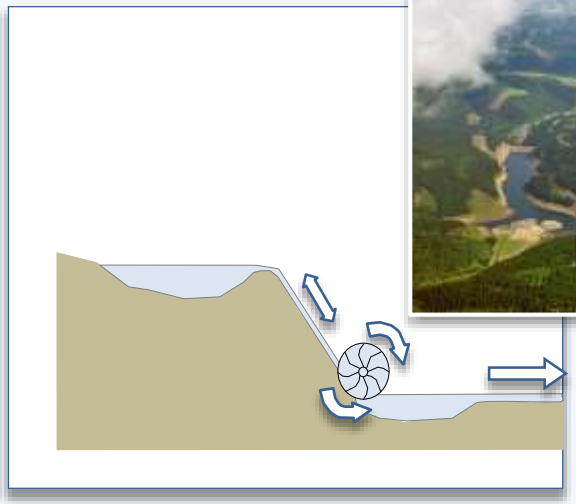
Speicherkraftwerke...

... nutzen Wasser aus einem See oder einem Stausee mit natürlichem Wasserzufluss

Pumpspeicherkraftwerke

- ... nutzen Wasser, das (nachts) aus dem unteren See nach oben gepumpt wird



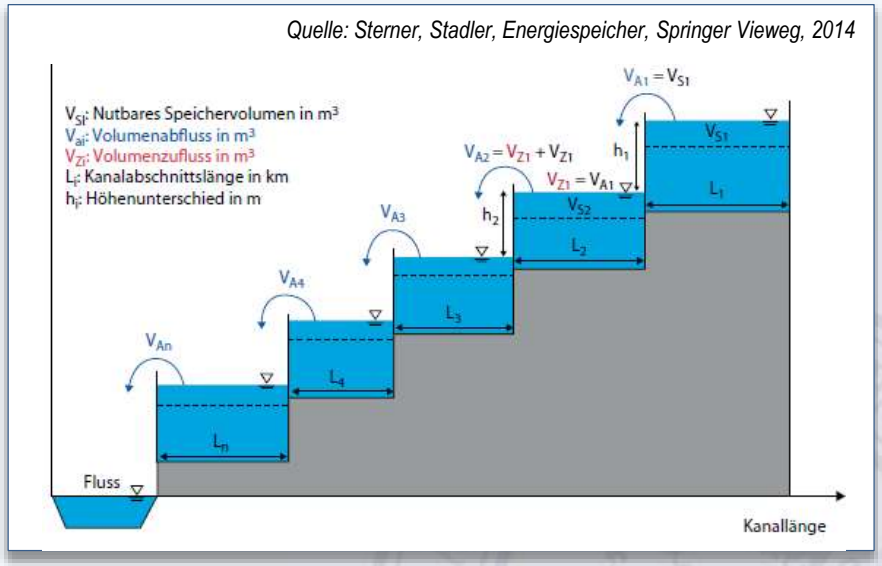


FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Staustufenspeicher

- Staustufenspeicher nutzen die geodätische Höhenunterschiede von Wasserstraßen

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit



Pumpspeicherwerke in aufgelassener Bergwerksstollen

- Vorhandene Pumpwerke in aufgelassenen Bergwerksstollen könnten in Pumpspeicherwerke umfunktioniert werden

Pumpspeicherwerke in Windkraftanlagen…

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Ringwallspeicher

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein
Fazit

- der Ringwallspeicher ist ein künstliches Pumpspeicherwerk
- Wind und PV werden direkt im Pumpspeicherwerk gespeichert

Konzept mit 10 GW (für 30 Tage)

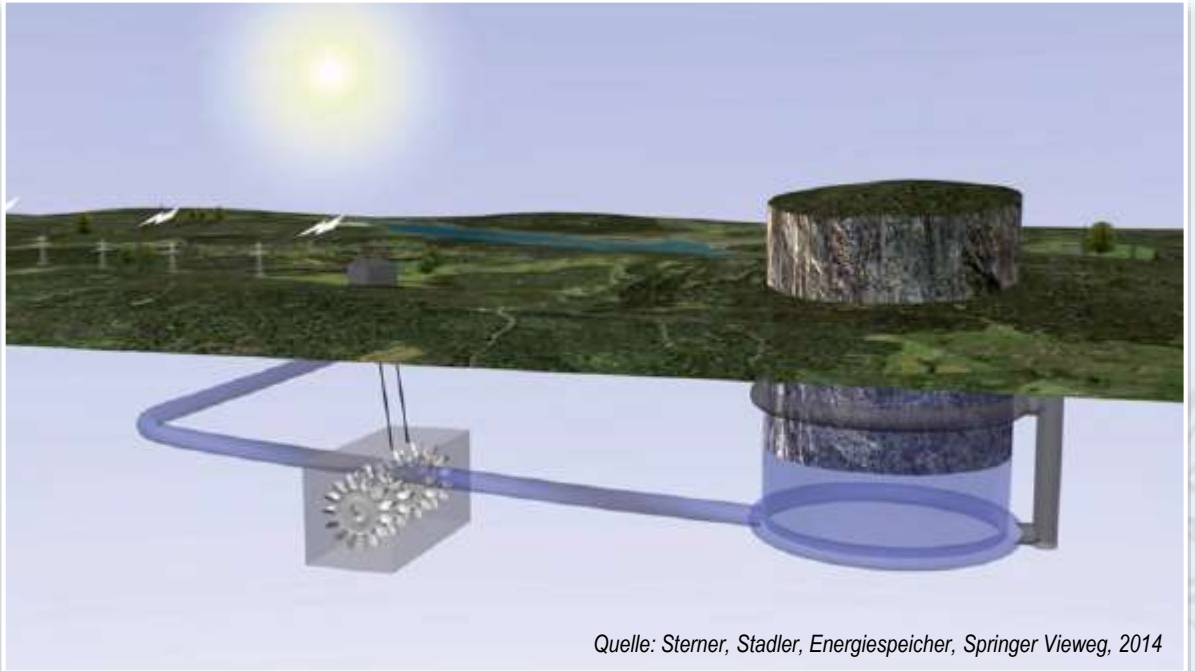
Oberbecken		Unterbecken		Gesamtsystem	
Höhe ü. Umgebung	440 m	Innendurchmesser	11,0 km	Austauschvolumen	7,00 km³
Durchmesser	9,6 km	Außendurchmesser	22,2 km	Flächenbedarf	400 km²
Wasserfläche	73,0 km²	Wasserfläche	290,0 km²	Wasserfüllung	37,00 km³
Böschungswinkel	32°	Pegelschwankung	25,0 m	Speicherkapazität	7,0 TWh
Pegelschwankung	100 m	Wassertiefe	34,5 m		

Quelle: Sterner, Stadler, Energiespeicher, Springer Vieweg, 2014

zum Vergleich: Chiemsee: 79,9 km²

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Lageenergiespeicher



Quelle: Sterner, Stadler, Energiespeicher, Springer Vieweg, 2014

- Felszylinder wird aus dem Untergrund ausgesägt, abgedichtet und hydraulisch angehoben…

...und verkantet beim runterlassen hoffentlich nicht.

Radius [m]	62,5	125	250	500
Bruttokapazität [GWh]	0,48	7,73	123,67	1.978,69
Nettokapazität ηRü = 90 % [GWh]	0,43	6,96	111,30	1.780,82

ca. 700 MW über 10 Stunden

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speichertechnologien

(Pump-)speichertechnologien

- Speichersee-Kraftwerke
- Lageenergiespeicher

(Latent-)Wärmespeicher

- Pufferspeicher
- Saisonale Speicher

Druckluftspeicher

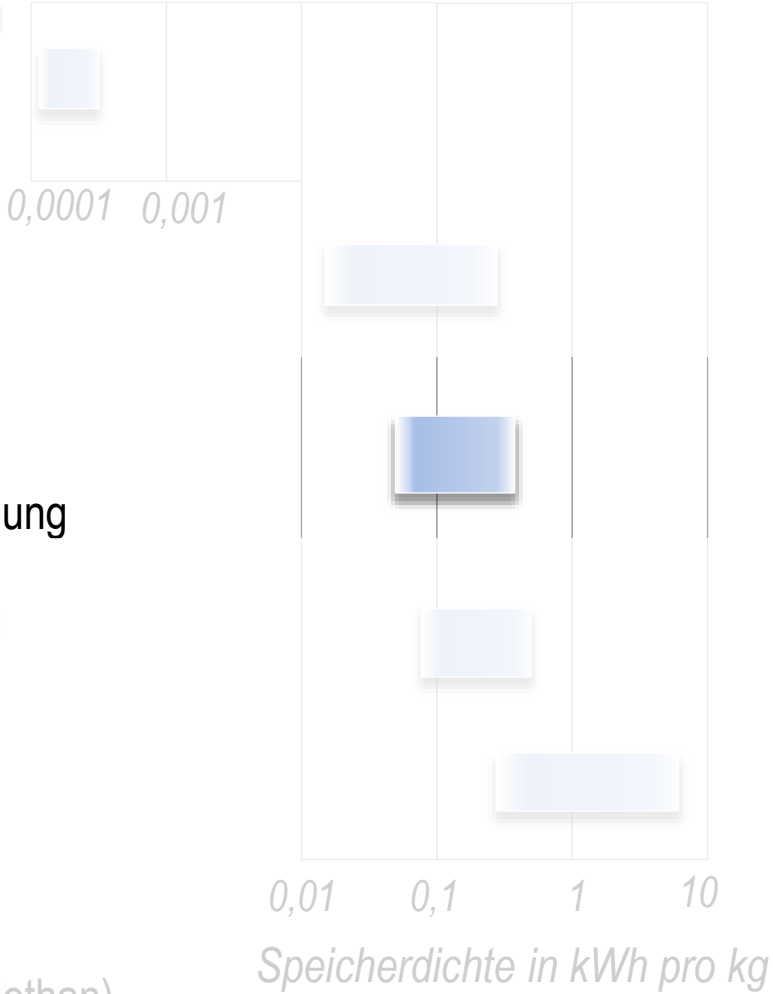
- Adiabate Druckluftsspeicher
- Speicherung mit Luftverflüssigung

Batterien und Kondensatoren

- Bauarten und Kapazitäten
- Redox-Flow

Chemische Speicher / Second Generation Fuels

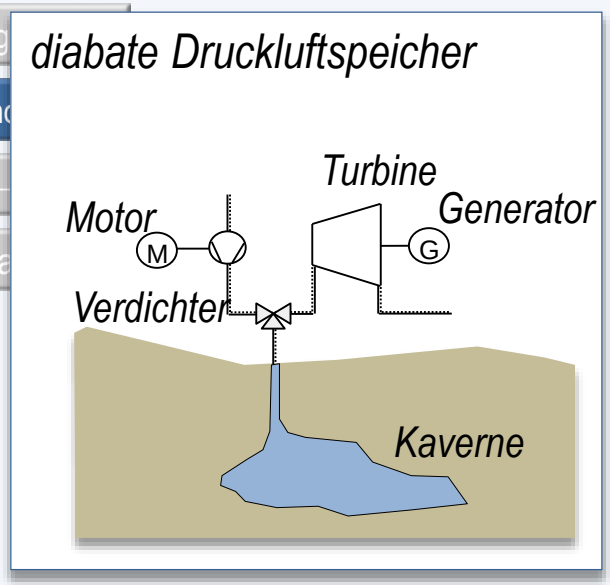
- LOHCs
- Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Diabate und adiabate Druckluftspeicher

(Compressed Air Energy Storage: CAES)

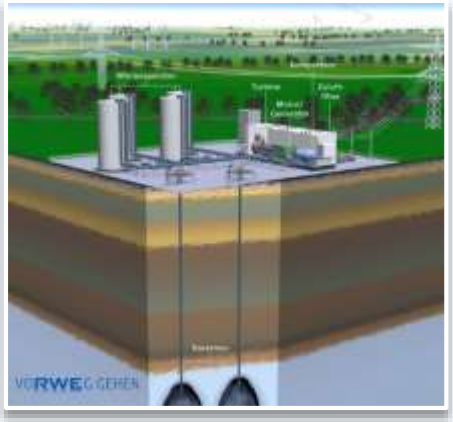


- Speicherung von Druckluft in unterirdischen Kavernen

Beispiel: Kavernenspeicher Hundtdorf

- Leistung 321 MW_{el}, Speicherkapazität ca. 400 MWh*)
- Inbetriebnahme 1978
- diente zur Speicherung von Kernenergie des Kernkraftwerks Unterweser in Schwachlastzeiten

*) entspricht einem kleinen Pumpspeicherkraftwerk)



Beispiel: RWE-Pilotanlage ADELE, Staßfurt

- Adiabates Druckluftspeicher-Gasturbinenkraftwerk
- 90 MW elektrische Leistung
- 360 MWh Speicherkapazität
- Geplante Inbetriebnahme: 2013

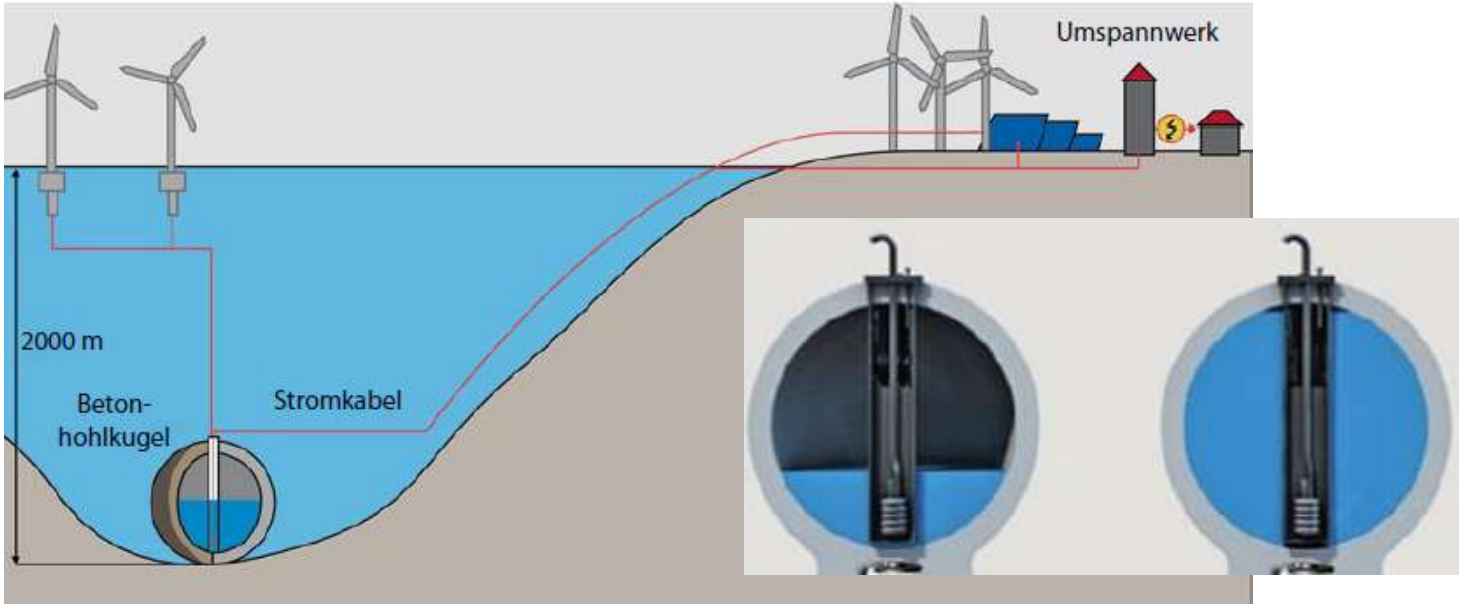
Projekt wurde 2015 von RWE gecancelt…

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Kugelpumpspeicher

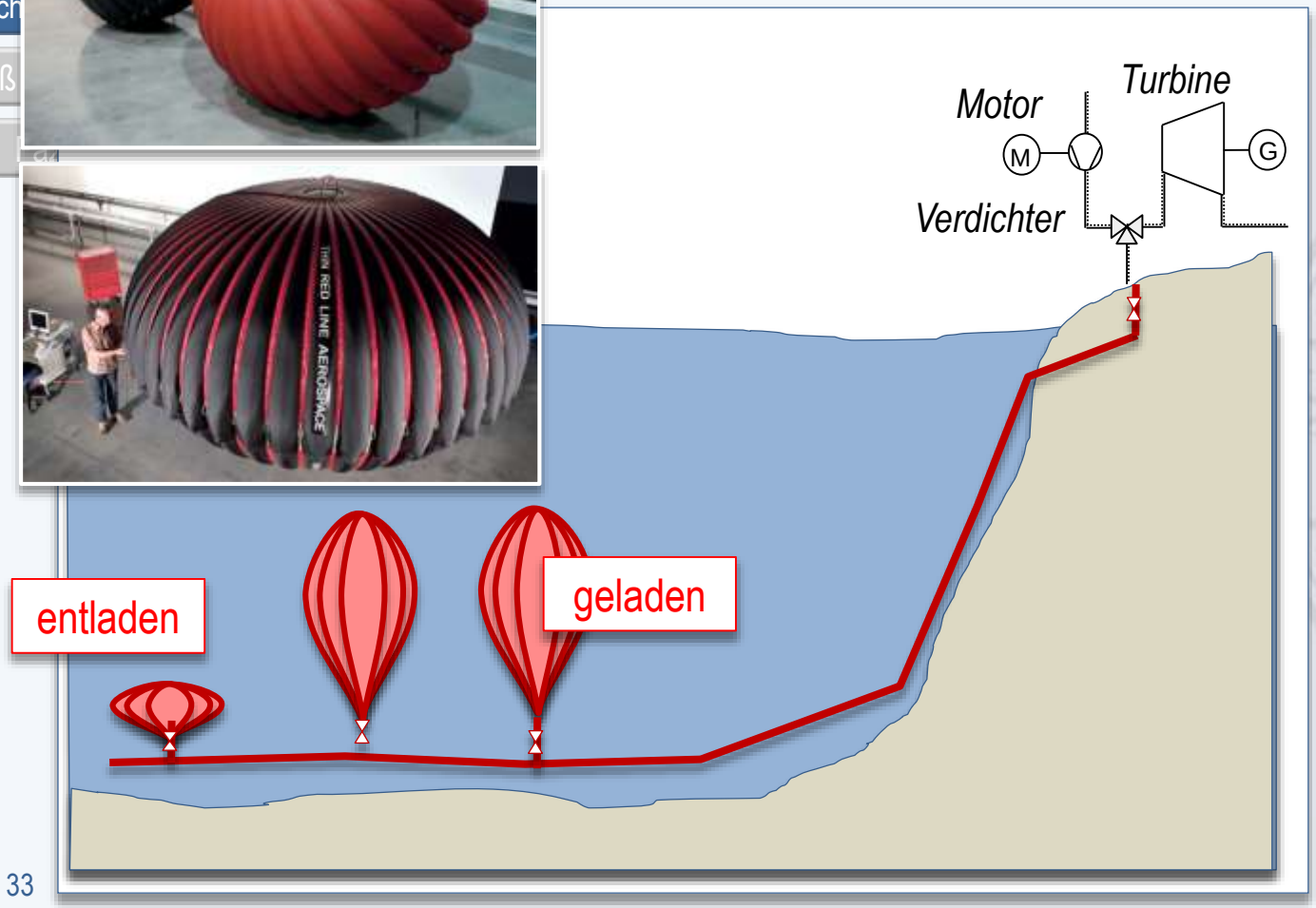
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Wasser wird in Hohlkugeln am Meeresgrund gepumpt und strömt bei Strombedarf in die Kugel zurück
- Zielgrößen pro Energiekugel: 20 MWh
- Entladezeit 4-8h mit 2,5-5 MW



Quelle: Sterner, Stadler, Energiespeicher, Springer Vieweg, 2014

Submarine Druckluftspeicher

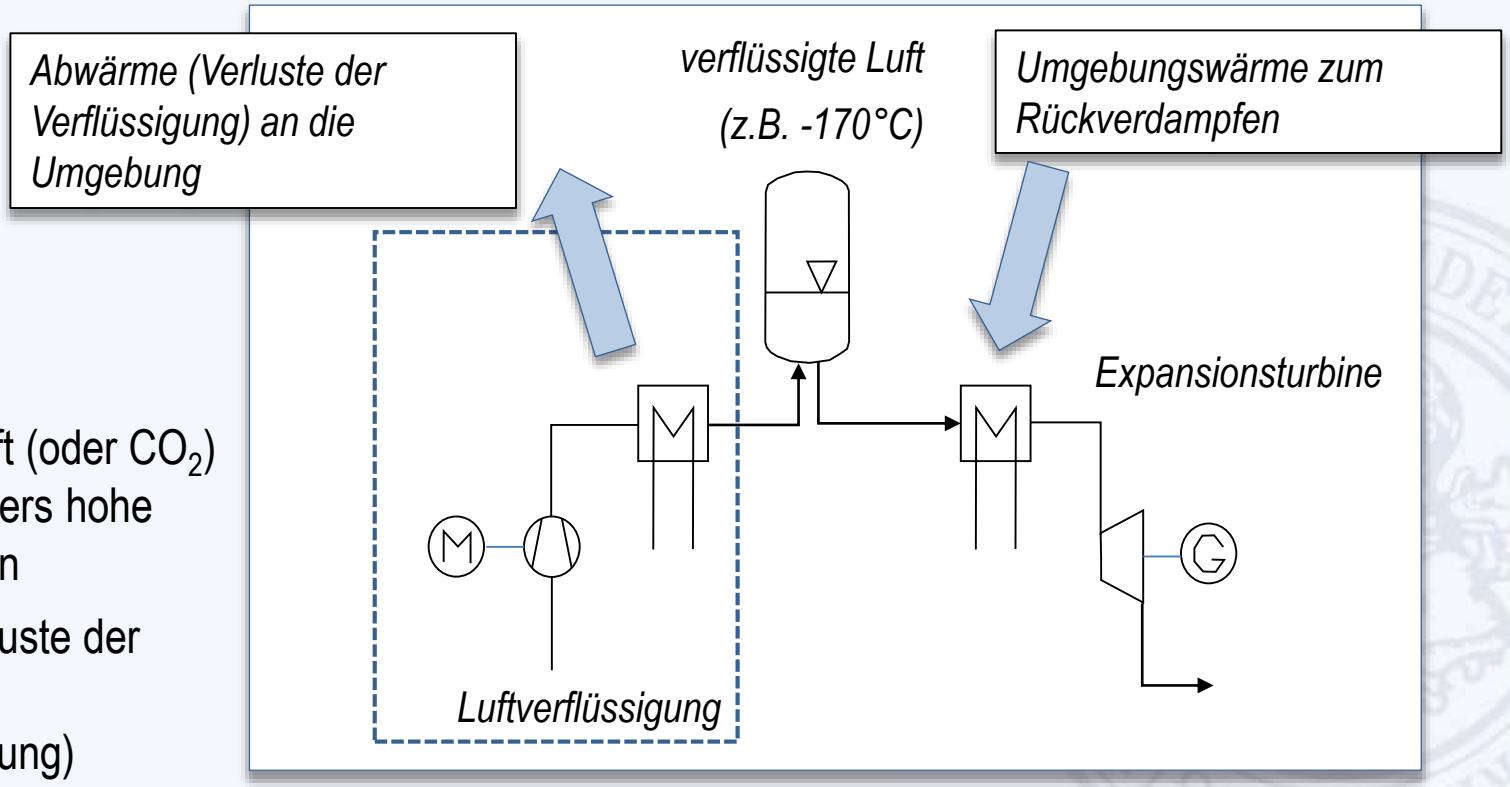


- Druckluft wird in Ballons am Meeresgrund gepresst
- Vorteil: Druck entspricht immer dem Tiefseedruck („isobare Speicherung“)

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Druckluftspeicher mit Luftverflüssigung

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit



- verflüssigte Luft (oder CO_2) erlaubt besonders hohe Speicherdichten
- Die hohen Verluste der Verflüssigung (an die Umgebung) können (teilweise) aus der Umgebung wieder gewonnen werden

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speichertechnologien

(Pump-)speichertechnologien

- Speichersee-Kraftwerke
- Lageenergiespeicher

(Latent-)Wärmespeicher

- Pufferspeicher
- Saisonale Speicher

Druckluftspeicher

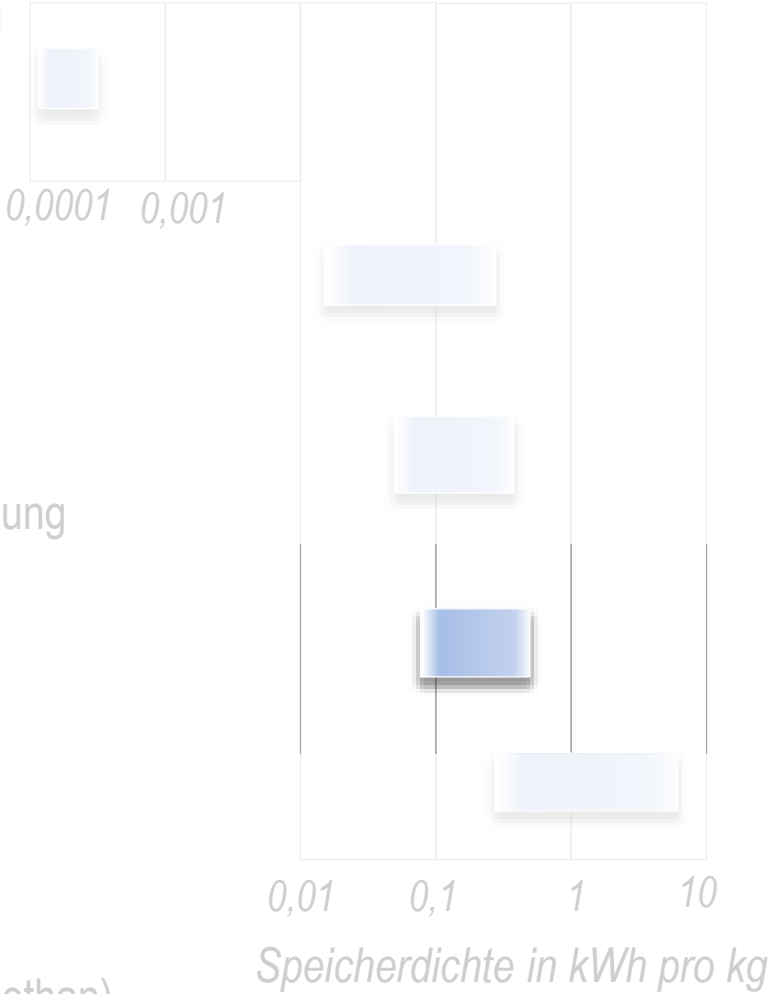
- Adiabate Druckluftsspeicher
- Speicherung mit Luftverflüssigung

Batterien und Kondensatoren

- Bauarten und Kapazitäten
- Redox-Flow

Chemische Speicher / Second Generation Fuels

- LOHCs
- Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan)



EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

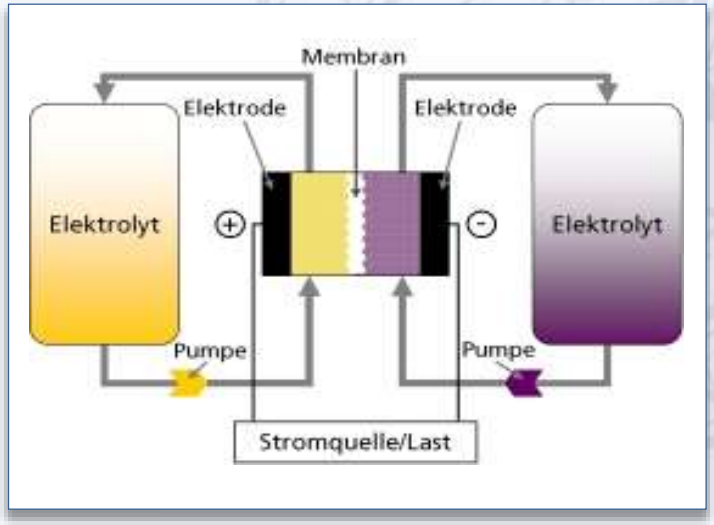
Batterien/Akkumulatoren und Kondensatoren

- Batterien und Kondensatoren (SuperCaps) sind für Speicherung großer Strommengen (noch?) zu teuer
- Interessant ist die Nutzung der Speicherkapazität von Elektrofahrzeugen…

Möglichkeiten zur Erhöhung der Speicherkapazität

Redox-Flow-Akku

- Elektrolyt wird in externen Tanks gespeichert
- Beispiel: Vanadium-Redox-Akkumulator mit Schwefelsäure-Elektrolyte



Luft-Batterien-/Akkumulatoren

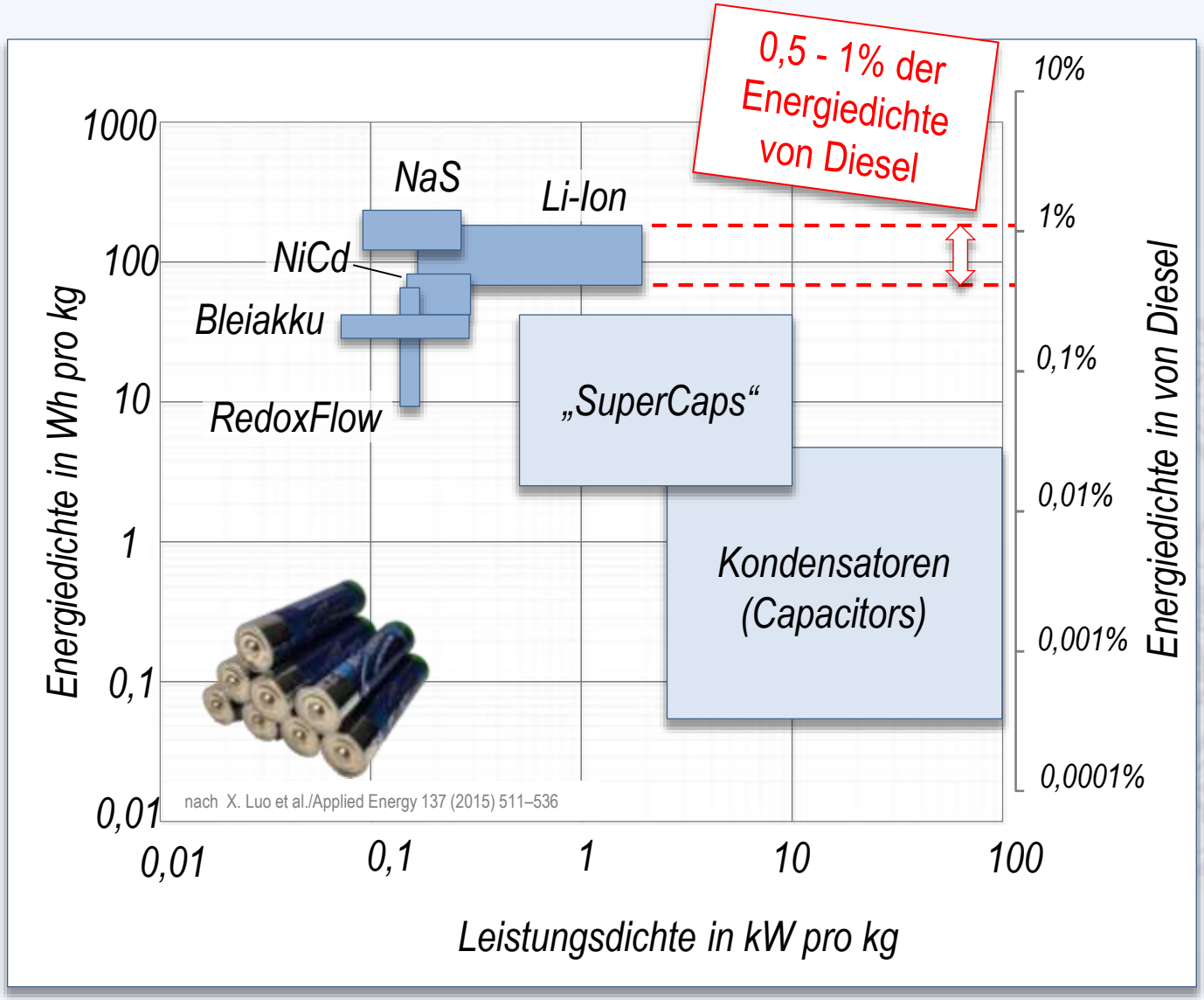
- z.B. Lithium-Luft-Akku, Natrium-Luft-Akku, Zink-Luft-Akku
- erspart das Einlagern des Oxidationsmittels

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicherdichten von Batterien und Kondensatoren

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Die Speicherkapazität von Batterien und Kondensatoren und ist vergleichsweise gering
- die gespeicherte Energie kann aber kurzfristig mit hoher Leistung bereit-gestellt werden

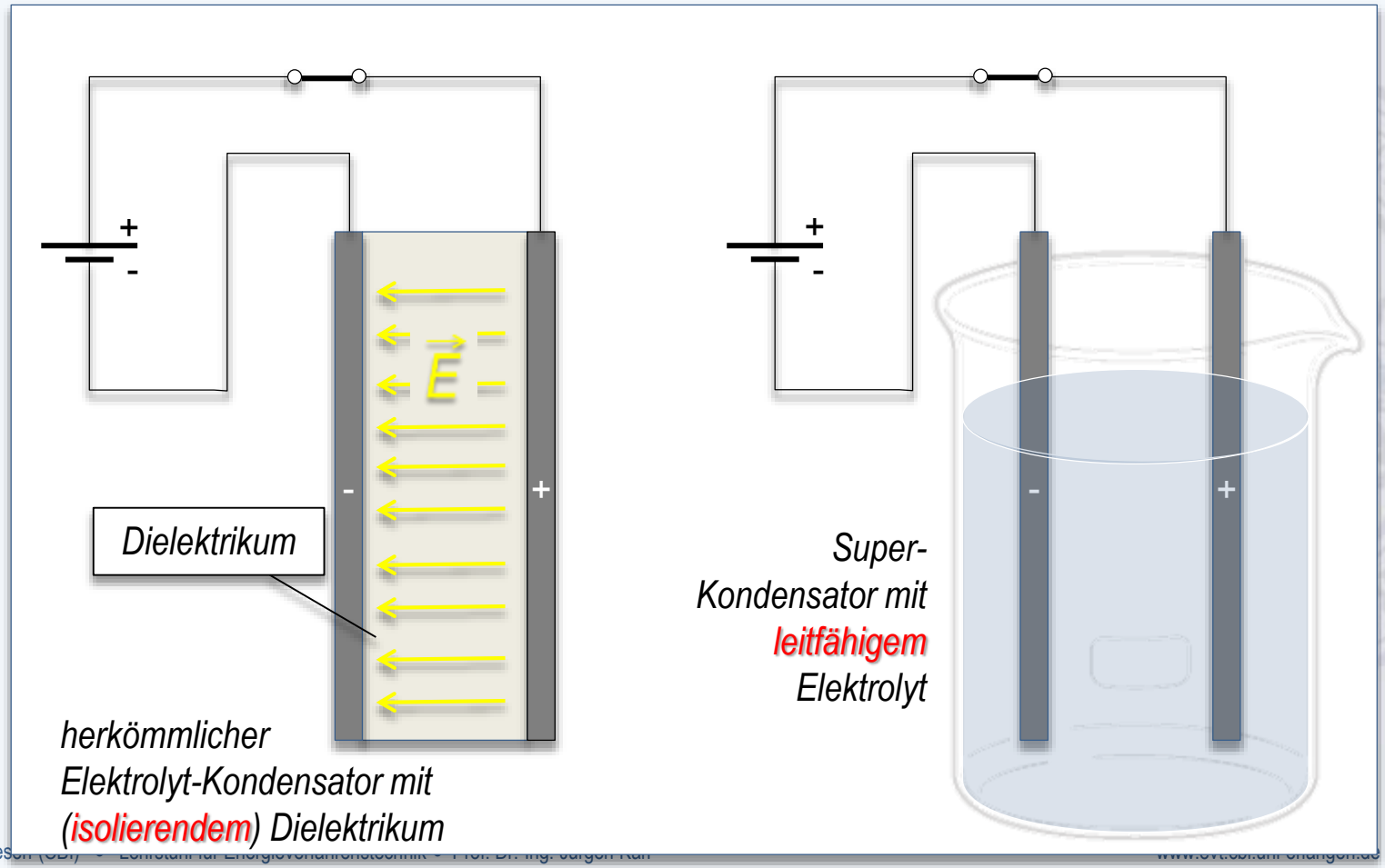


FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Kondensatoren und Supercapacitors

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Kondensatoren speichern Energie in elektrischen Feldern
- in „Supercaps“ erhöhen Ionen des Elektrolyten die Kapazität



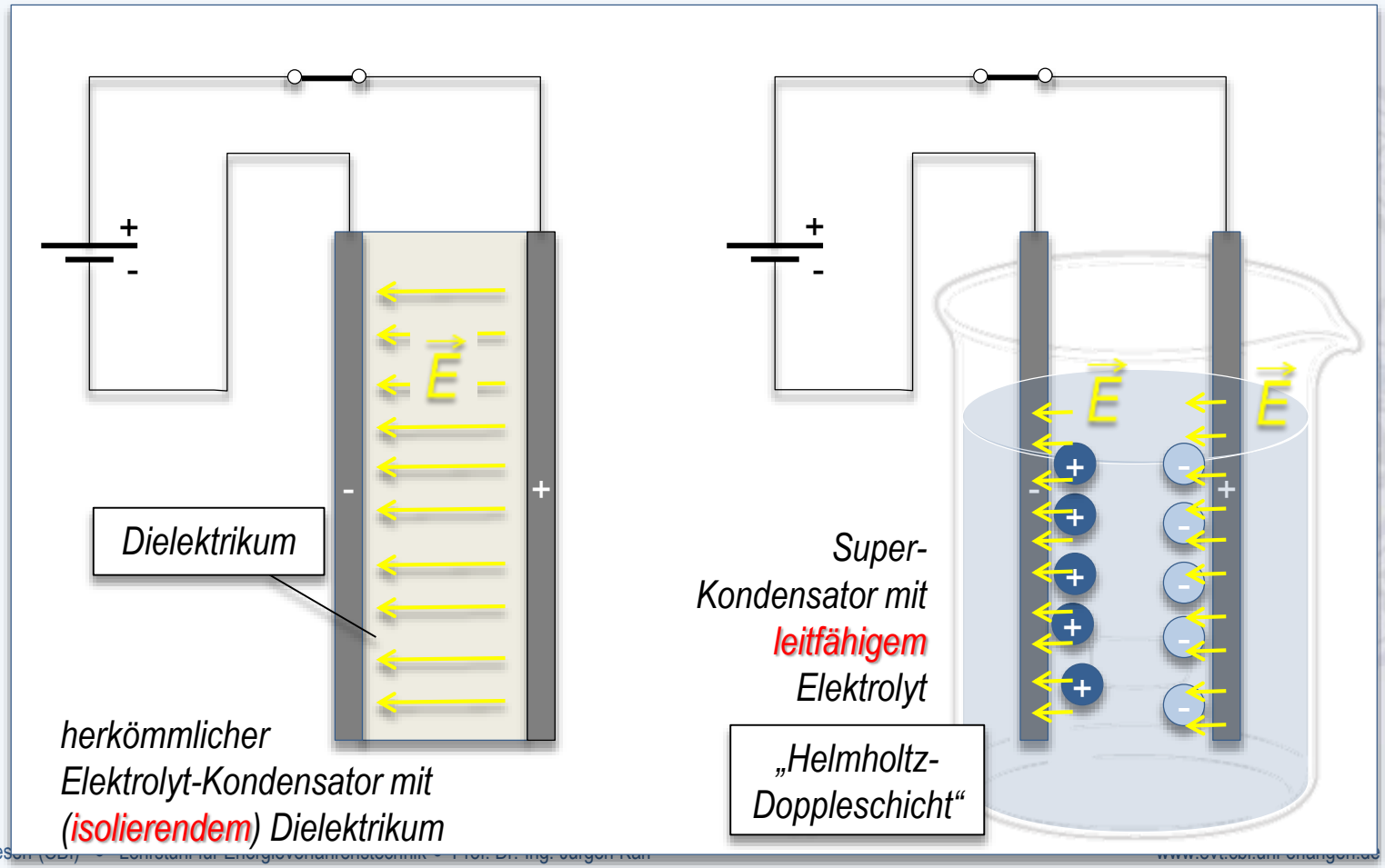
FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Kondensatoren und Supercapacitors

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Kondensatoren speichern Energie in elektrischen Feldern
- in „Supercaps“ erhöhen Ionen des Elektrolyten die Kapazität

- Supercaps werden oft mit anderen Strom-erzeugern (z.B. Brennstoffzellen) kombiniert



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Batteriesysteme für große Speicher

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- große Batterien werden besonders in schlechten Netzen seit Jahrzehnten eingesetzt
- derzeit sind Leistungen bis 1 GW in der Planung

weltgrößtes Batteriesystem bislang.

Vanadium-Redox-flow

Sumitomo Electric Demonstration, Yokohama Works

Blei-Säure

Puerto Rico's 20 MW Battery Energy Storage

Nickel-Cadmium

Golden Valley Electric Association 27 MW Battery Energy Storage System (BESS)

Li-Ion

AES Laurel Mountain Plant 32 MW lithium-ion battery storage facility

Natrium-Schwefel

Amplex Group, United Arab Emirates 350 MW Sodium-sulphur storage system

bis 3 MW$_{el}$ → bis 20 MW$_{el}$ → bis 27 MW$_{el}$ → bis 32 MW$_{el}$ → bis 350 MW$_{el}$

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speichertechnologien

(Pump-)speichertechnologien

- Speichersee-Kraftwerke
- Lageenergiespeicher

(Latent-)Wärmespeicher

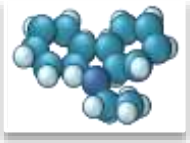
- Pufferspeicher
- Saisonale Speicher

Druckluftspeicher

- Adiabate Druckluftsspeicher
- Speicherung mit Luftverflüssigung

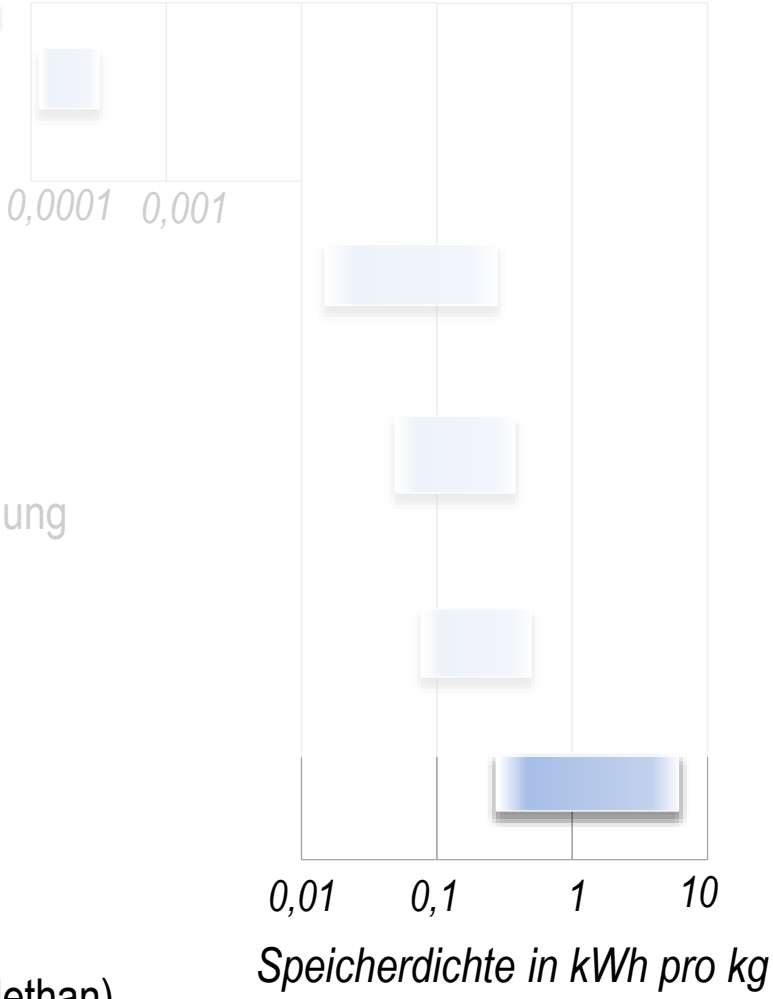
Batterien und Kondensatoren

- Bauarten und Kapazitäten
- Redox-Flow



Chemische Speicher / Second Generation Fuels

- LOHCs
- Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Vergleich der Speicherkapazitäten

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

1 Mio. Elektroautos
10 GWh

Referenz: Pumpspeicher-kraftwerke in Deutschland
40 GWh

Erdgas-Speicher
227 TWh

flüssige Treibstoffe
250 TWh

Quelle: M.Specht, Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse, Augsburg, 10.03.2010

- Besonders hohe Speicherkapazitäten bietet die bestehende Infrastruktur für flüssige und gasförmige Treibstoffe

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiel Langzeitspeicher: Erdgasspeicher

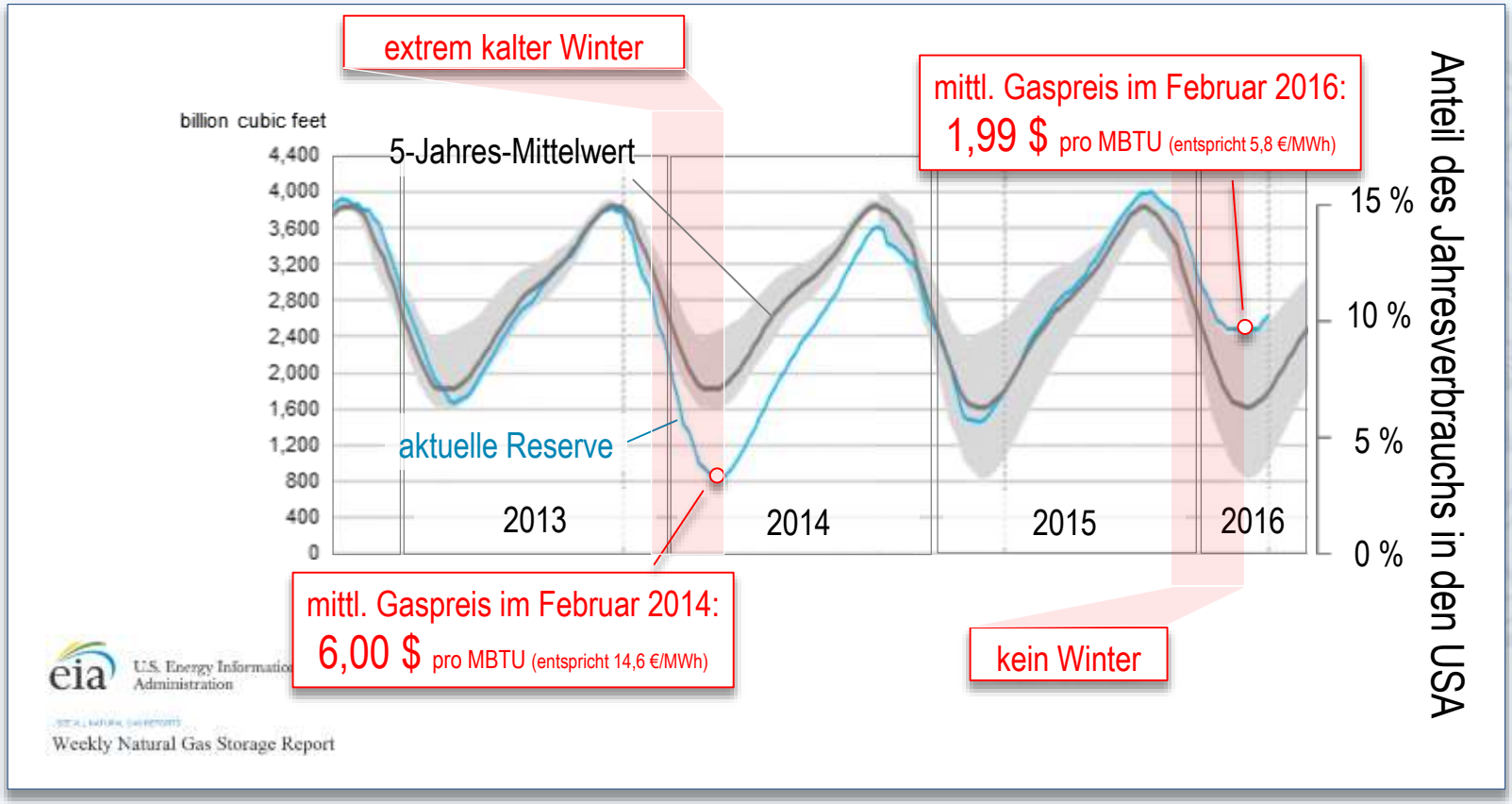
- Erdgas wird saisonal in Kavernen und Druckspeichern gespeichert

Quelle: Sterner, Stadler, Energiespeicher, Springer Vieweg, 2014

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiel Langzeitspeicher: Erdgasspeicher

- Erdgas wird saisonal in Kavernen und Druckspeichern gespeichert
- In den USA beträgt die (Untertage-) Speicherkapazität etwa 15% des Jahresverbrauchs, in Deutschland ca. 25%
- existierende Erdgasspeicher **könnten ca. 5 Jahre lang die heutige Wind und PV-Produktion speichern**
  (Annahme: Power-to-Gas-Wirkungsgrad ca. 50%)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiele für Second Generation Fuels: Power-to-Gas

1. Step:
Elektrolysis

$H_2O \xrightarrow{\text{Strom}} H_2 + ½\, O_2$

2. Step:
Sabatier-Reaktion

$CO_2 + 4\, H_2 \xrightarrow{\text{Katalysator}} CH_4 + 2\, H_2O$

Power-to-Liquids

$CO + 2{,}2\, H_2 \longrightarrow$ Fischer-Tropsch Diesel $+ H_2O$

$2\, CO + 4\, H_2 \longrightarrow$ Dimethylether (DME) $CH_3\text{-}O\text{-}CH_3$ $+ 2\, H_2O$

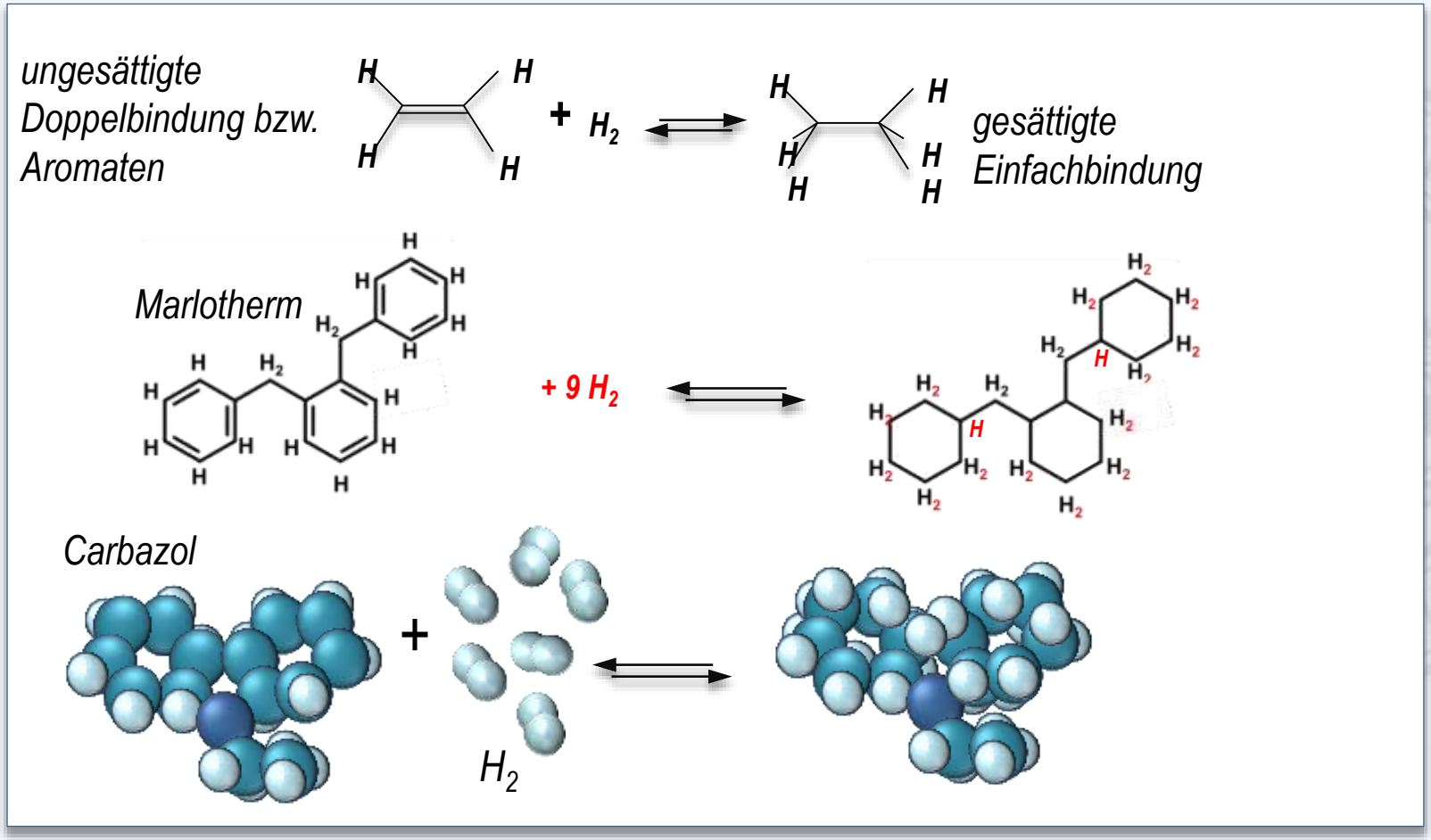
syngas

LOHCs + $H_2 \longrightarrow$ hydrierte LOHCs

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiel: Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs)

- katalytische Hydrierung/Dehydrierung von Kohlenwasserstoffen ermöglicht die Speicherung von Wasserstoff mit Speicherdichten bis 1 kWh/l (Heizöl: 10 kWh/l)
- Hydrogenious Technologies GmbH gewinnt den “Nordbayerischen Hochschulgründerpreis 2013”, “Bayerischen Gründerpreis 2014”, “Science4Life Venture Cup 2014” …



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Beispiel: Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs)

- katalytische Hydrierung/Dehydrierung von Kohlenwasserstoffen ermöglicht die Speicherung von Wasserstoff mit Speicherdichten bis 1 kWh/l (Heizöl: 10 kWh/l)
- Hydrogenious Technologies GmbH gewinnt den “Nordbayerischen Hochschulgründerpreis 2013”, “Bayerischen Gründerpreis 2014”, “Science4Life Venture Cup 2014” …

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

4. Große Speicher oder kleine Speicher?

- Economy-of-Scale oder Economy-of-Downscale?
  - Der „Business-Case“ Speicher
    - Speicheraufgaben für den Bilanzkreis Deutschland und weltweit

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Zentrale oder dezentrale Energieerzeugung?

Wärmepreis Endkunde 60-80 €/ MWh

Strompreis Endverbraucher 18-25 ct/ kWh

Gaspreise Endkunden 60-80 €/ MWh

Große Kraftwerke

- Economy-of-Scale **reduziert spezifische Investkosten**
- Ausgereifte Technik gewährleistet Sicherheit und **höchste Effizienz**

Strompreis Leipziger Strombörse 4-8 ct/ kWh

Wärmepreis 10-20 €/ M

Gas-Grenzübertrittspreise 20-30 €/ MWh

- Verbrauchernahe Erzeugung spart Infrastrukturkosten und erlaubt **höhere Erlöse**

Dezentrale Erzeuger

Economy-of-Scale

Economy-of-**Down-Scale**

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Zentrale oder dezentrale Energiespeicherung?

Wärmepreis Endkunde 60-80 €/ MWh

Strompreis Endverbraucher 18-25 ct/ kWh

Gaspreise Endkunden 60-80 €/ MWh

Große Speicher

- Economy-of-Scale reduziert spezifische Investkosten
- Ausgereifte Technik gewährleistet Sicherheit und höchste Effizienz

Strompreis Leipziger Strombörse 4-8 ct/ kWh

Wärmepreis 10-20 €/ M

Gas-Grenzübertrittspreise 20-30 €/ MWh

- Verbrauchernahe Erzeugung spart Infrastrukturkosten und erlaubt höhere Erlöse

Dezentrale Speicher

Economy-of-Scale

Economy-of-Down-Scale

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

Business-Case „Speicher“

Idee:

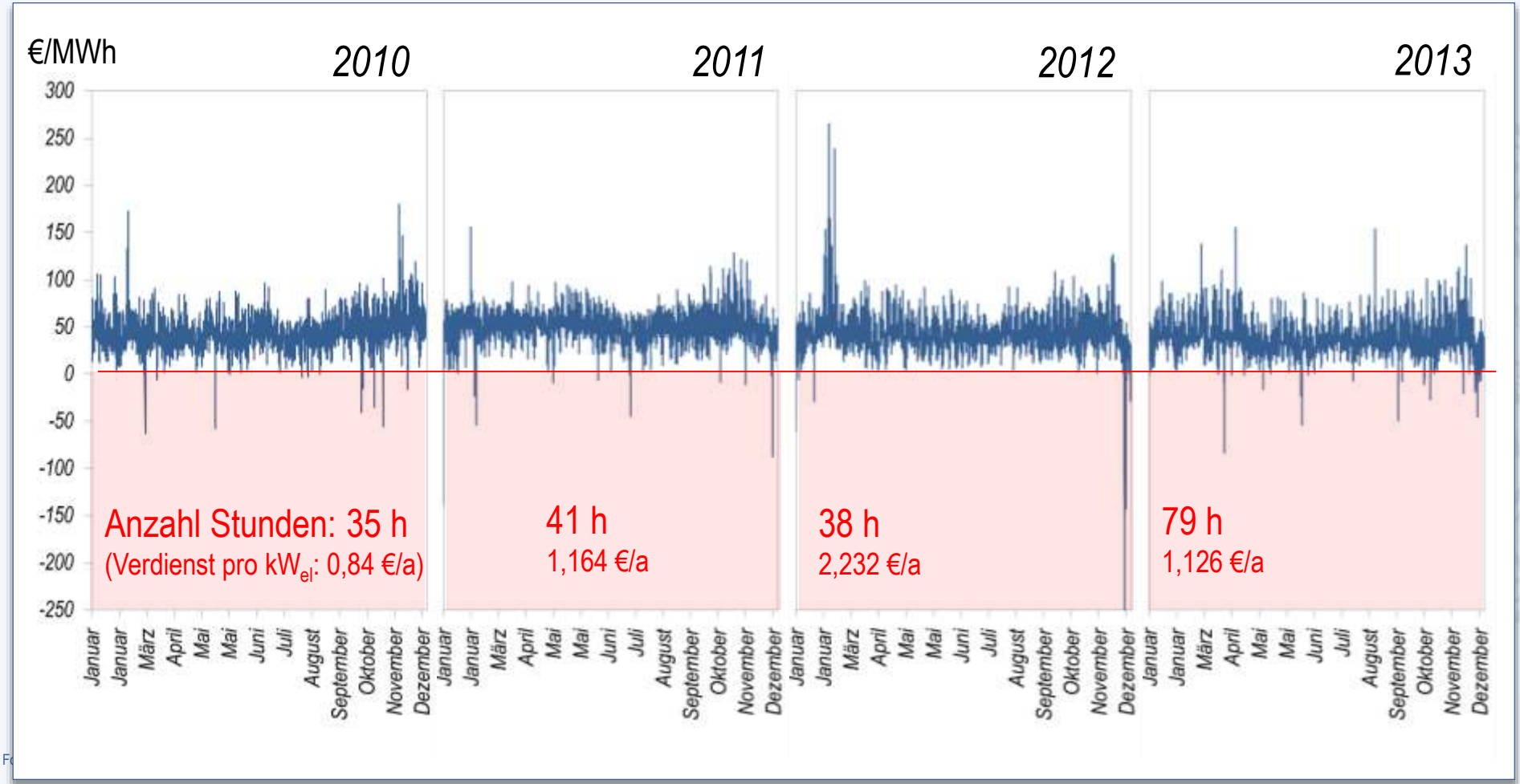
- „Überschussstrom“ mit negativen Strompreisen wird gespeichert und später teuer verkauft

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Entwicklung der Strompreise an der Leipziger Strombörse

- „Negative Strompreise“ nehmen etwas zu
- aber: mögliche Erlöse sind marginal…

PHELIX Spotpreise Intraday
Quelle: www.eex.com



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Entwicklung der Strompreise an der Leipziger Strombörse

- „Negative Strompreise“ nehmen etwas zu
- aber: mögliche Erlöse sind marginal und reichen bei weitem nicht, um notwendige Investitionen zu refinanzieren!

zum Vergleich:
(nur) Kapitaldienst Power-to-Gas
Investitionskosten 500-1200 €/kW$_{el}$
Kapitaldienst pro kW$_{el}$: ca. 42 - 135 €/a
(Zins 5%, 12 Jahre)

Anzahl Stunden: 35 h
(Verdienst pro kW$_{el}$: 0,84 €/a)

41 h
1,164 €/a

38 h
2,232 €/a

79 h
1,126 €/a

zum Vergleich:
- Aldi-Batterien AA — 58 €/kW (20 ct/Stück, 2300 mAh, Entladedauer 1h)
- Aldi-NiMH-Akkus AA — 1000 € /kW (3,24 €/Stück, 2700 mAh, Entladedauer 1h)

Business-Case „Speicher“

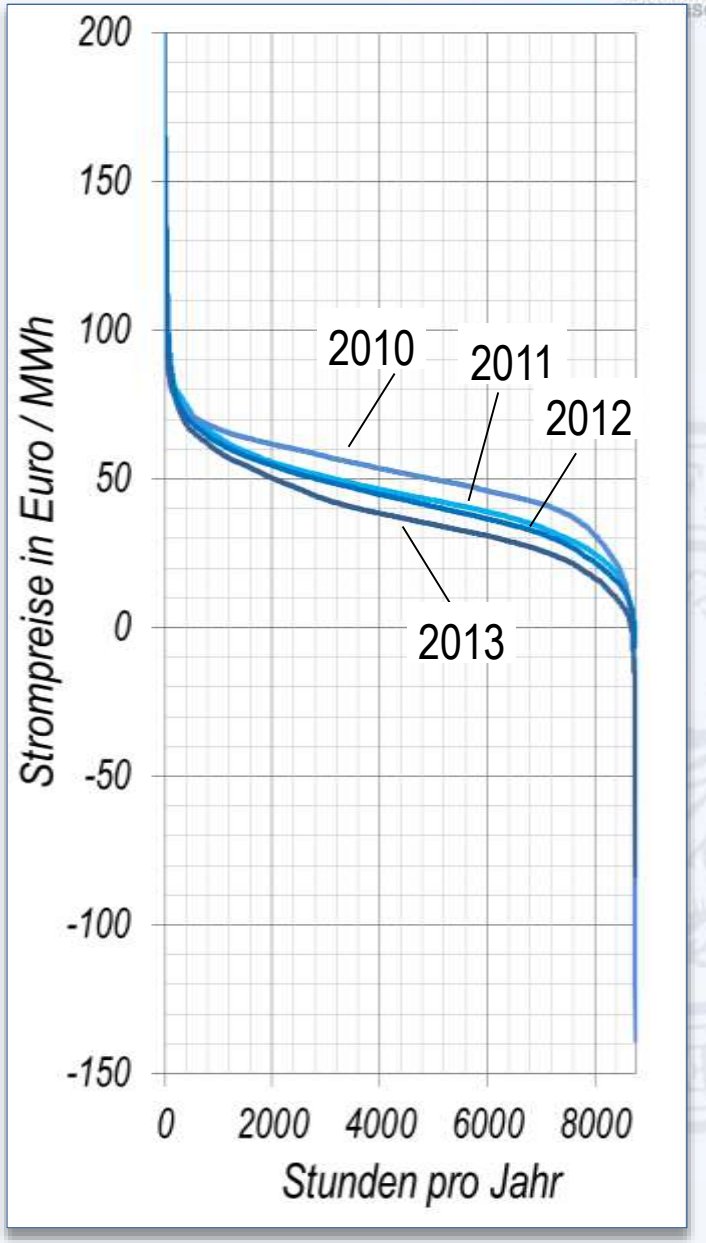
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

Idee:

- ~~„Überschuss~~strom“ mit ne~~gativen~~ günstigen Strompreisen wird gespeichert und später teuer~~er~~ verkauft

Bilanzkreis Deutschland

„Geordnete“ Börsenpreise



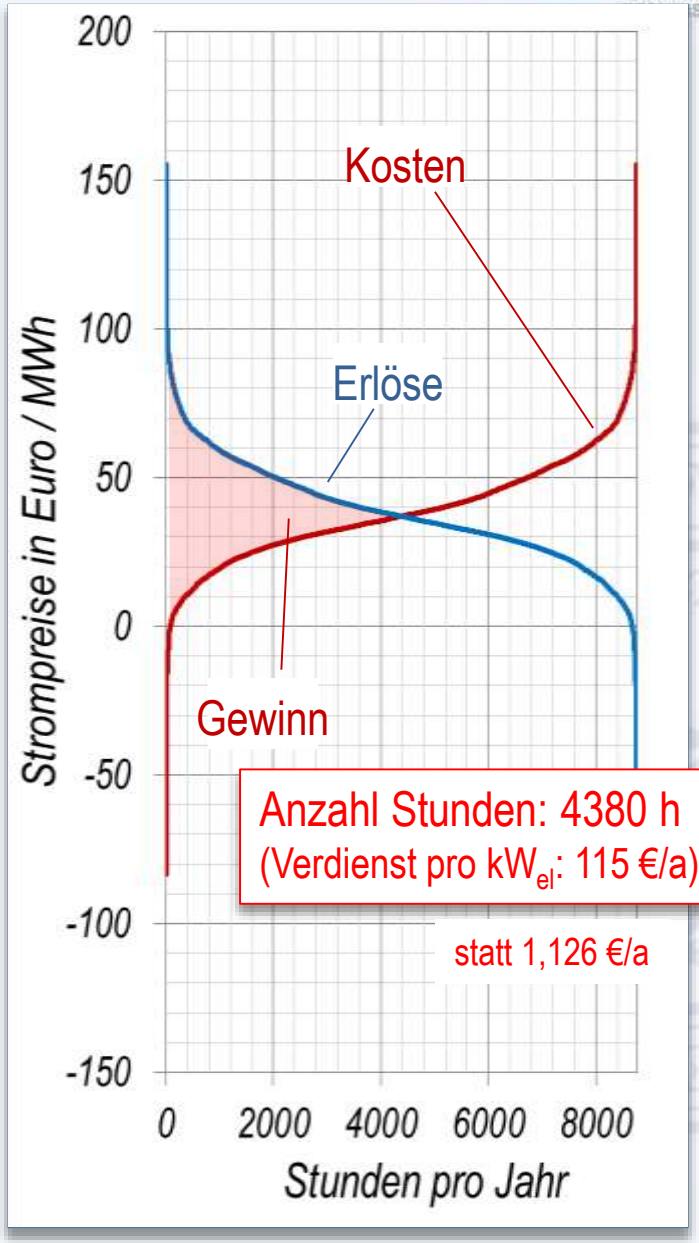
Business-Case „Speicher“

Idee:

- ~~„Überschuss~~strom“ mit ne~~gativen~~ günstigen Strompreisen wird gespeichert und später teuer~~er~~ verkauft

Bilanzkreis Deutschland

- Erlöse werden sich nicht grundsätzlich ändern, wenn Preisniveau steigt oder sinkt
- Erlöse könnten steigen, wenn sich die Schere zwischen min. und max. Strompreisen weiter öffnet



Business-Case „Speicher“

Idee:

- ~~„Überschuss~~strom“ mit ne~~g~~ativen Strompreisen wird gespeichert und später teuer~~er~~ verkauft

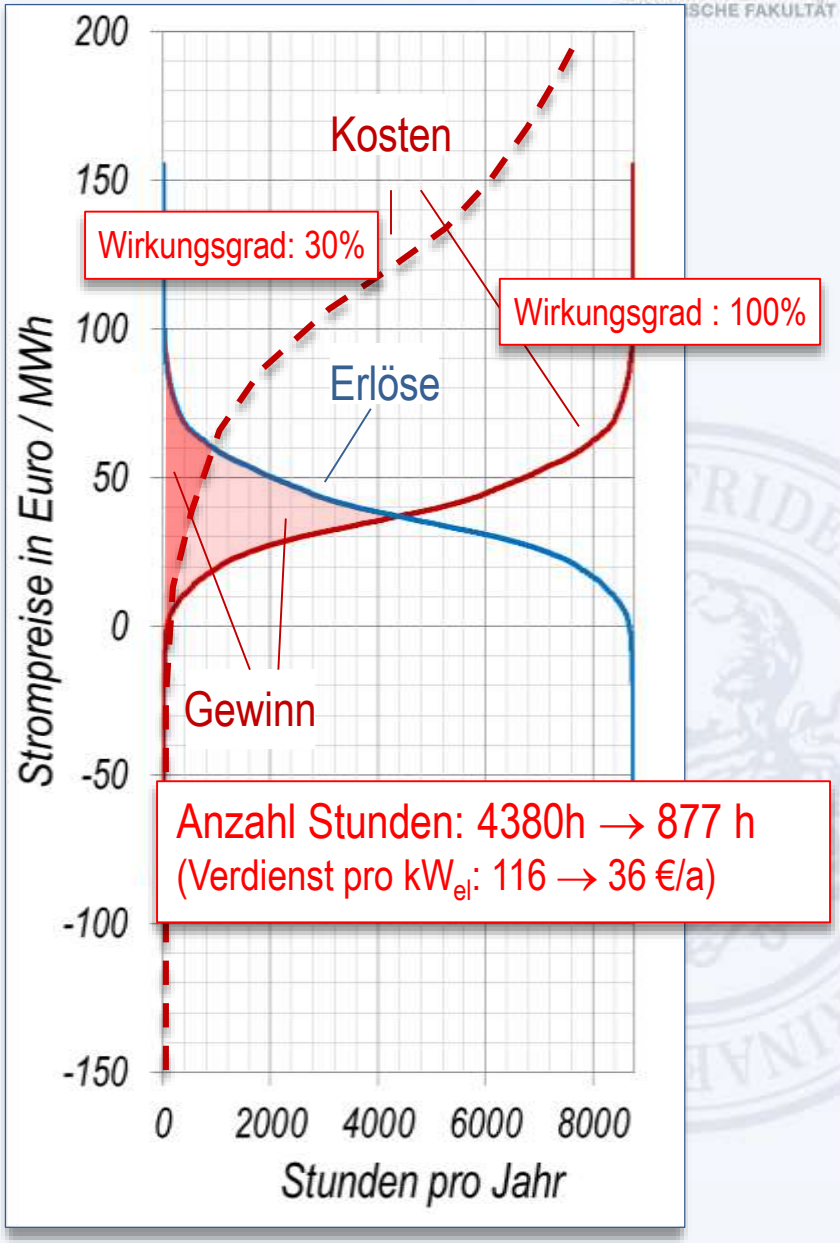
günstigen

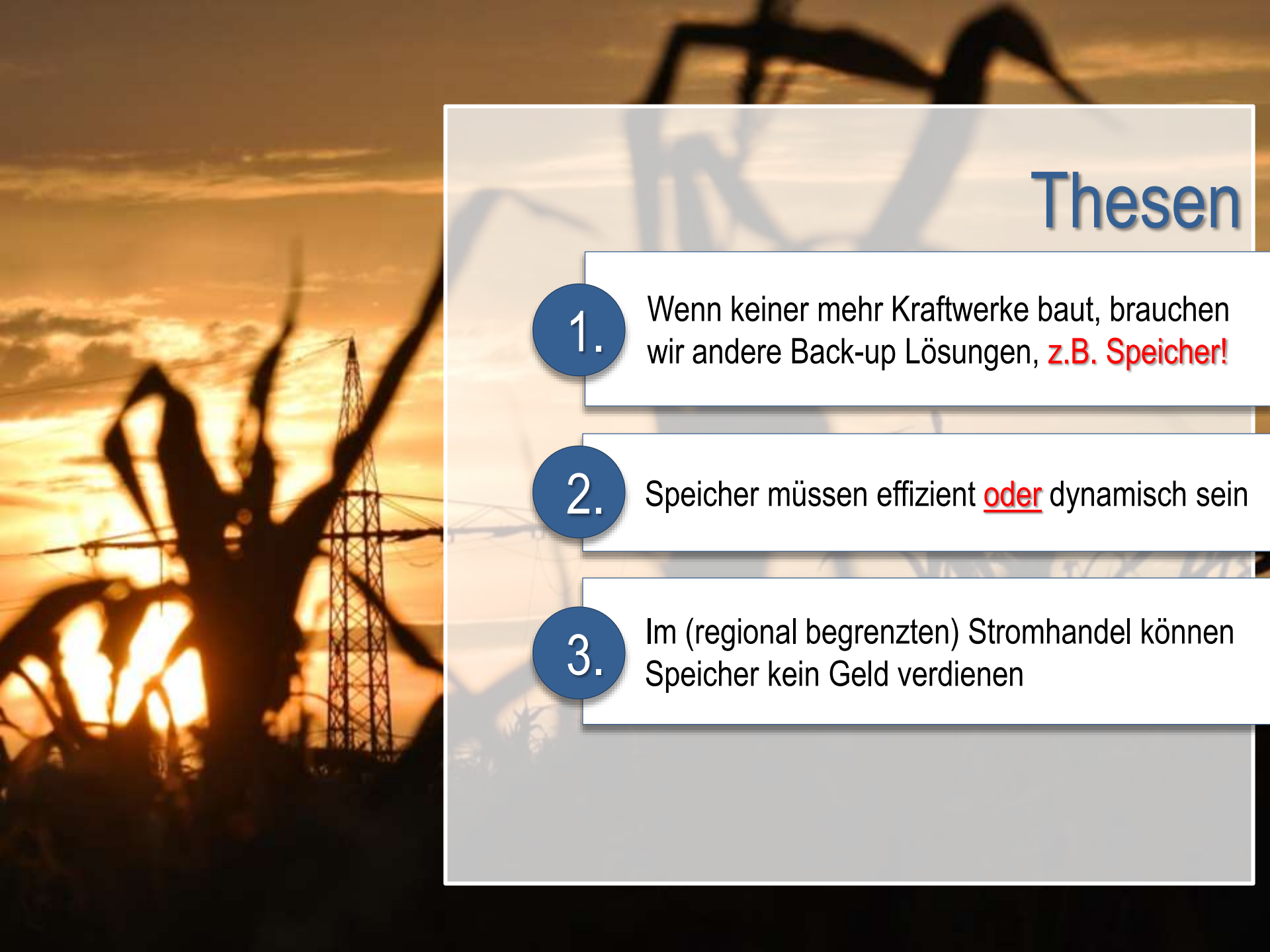
Bilanzkreis Deutschland

- Erlöse werden sich nicht grundsätzlich ändern, wenn Preisniveau steigt oder sinkt
- Erlöse könnten steigen, wenn sich die Schere zwischen min. und max. Strompreisen weiter öffnet

Kernproblem:

- Speicher-Wirkungsgrade …





Thesen

1. Wenn keiner mehr Kraftwerke baut, brauchen wir andere Back-up Lösungen, z.B. Speicher!

2. Speicher müssen effizient oder dynamisch sein

3. Im (regional begrenzten) Stromhandel können Speicher kein Geld verdienen

FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

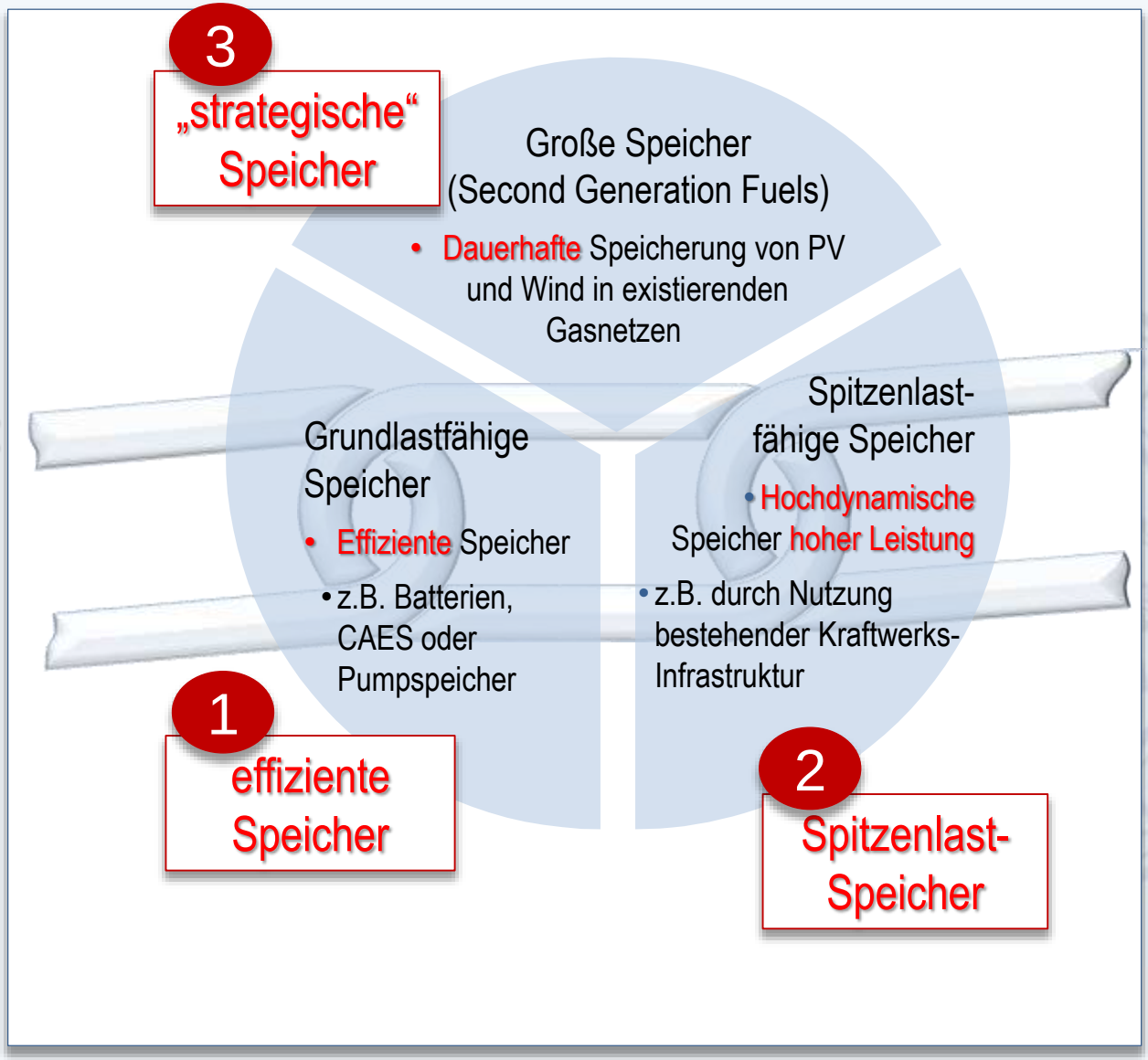
EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

Unterscheidung

- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Weitere Unterscheidung:

- Grundlastfähige Speicher (z.B. Batterien)
- Spitzenlastfähige Speicher (z.B. Hochtemperaturspeicher, Pumpspeicherkraftwerke)
- Systeme mit großen Speicherkapazitäten (Second Generation Fuels bzw. Chemische Speicher)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

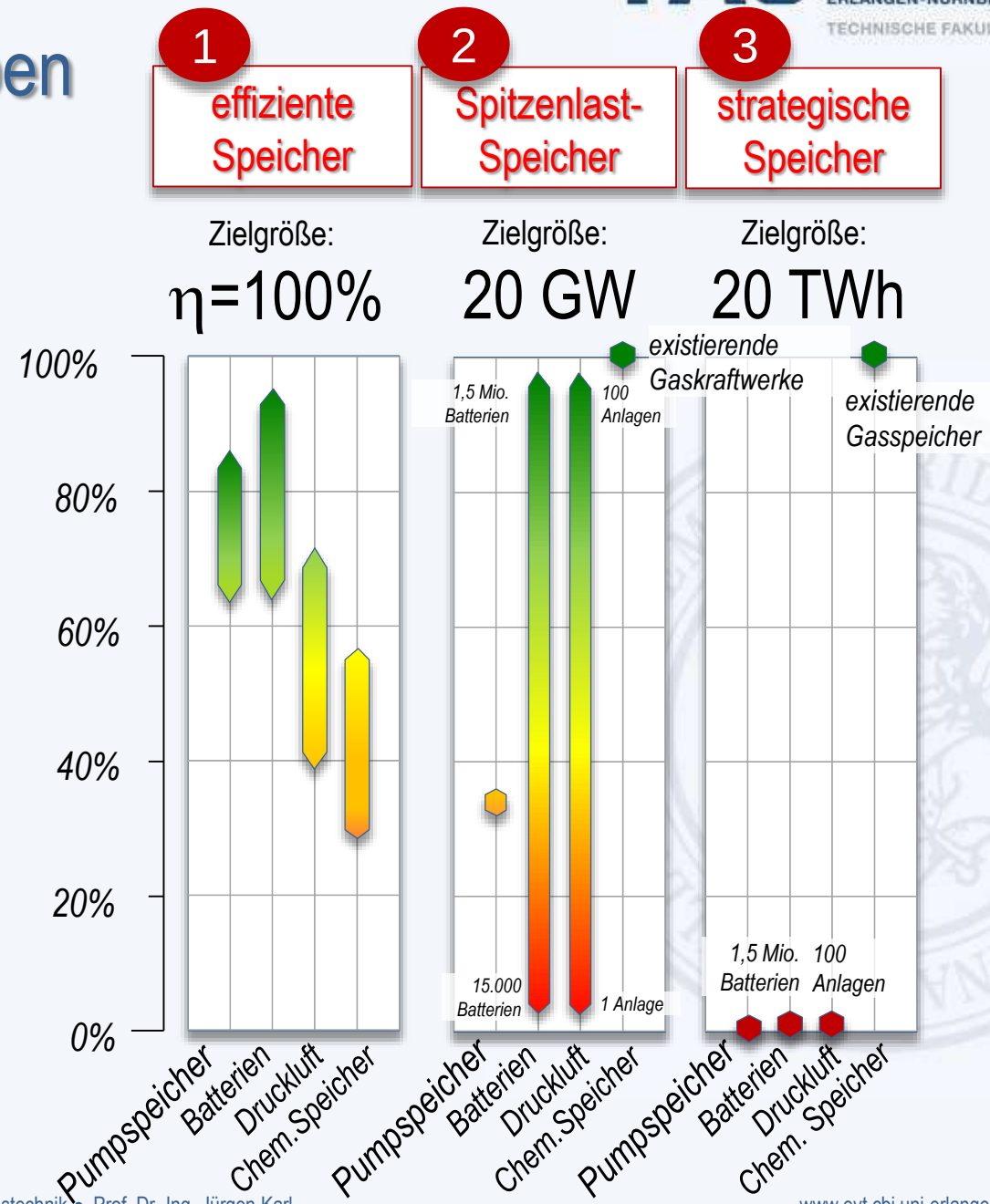
Speicheraufgaben

Unterscheidung

- Kurzzeitspeicher
- Langzeitspeicher

Weitere Unterscheidung:

- Grundlastfähige Speicher (z.B. Batterien)
- Spitzenlastfähige Speicher (z.B. Hochtemperaturspeicher, Pumpspeicherkraftwerke)
- Systeme mit großen Speicherkapazitäten (Second Generation Fuels bzw. Chemische Speicher)



FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

Speicheraufgaben

EEG-Bilanz
Aufgaben
Technologien
Groß ↔ klein?
Fazit

- Unterschiedliche Speicheraufgaben erfordern unterschiedliche Speicherlösungen
- Es gibt nicht eine richtige Speichertechnologie sondern viele – große und kleine

Groß und zentral!

Große Speicher (Second Generation Fuels)

- Dauerhafte Speicherung von PV und Wind in existierenden Gasnetzen

Grundlastfähige Speicher

- Effiziente Speicher
  - z.B. durch Aufwertung ungenutzter Niedertemperatur-potentiale

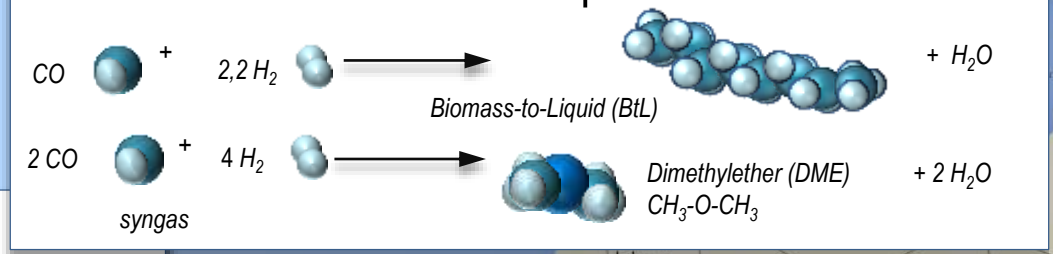
Spitzenlast-fähige Speicher

- Hochdynamische Speicher hoher Leistung
  - z.B. durch Nutzung bestehender Kraftwerks-Infrastruktur

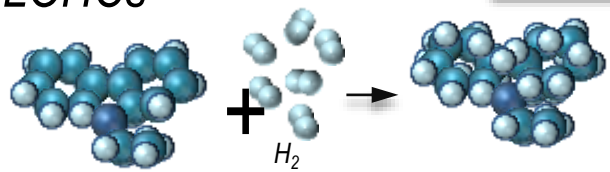
Klein und dezentral?

Groß und zentral?

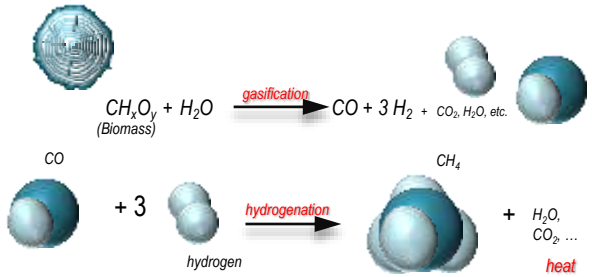
Power-to-Gas / Power-to-Liquids



LOHCs



Substitute-Natural-Gas



und …

…Speicher machen Erneuerbare Energien transportierbar !

Thesen

1. Wenn keiner mehr Kraftwerke baut, brauchen wir andere Back-up Lösungen, z.B. Speicher!

2. Speicher müssen effizient oder dynamisch sein

3. Im (regional begrenzten) Stromhandel können Speicher kein Geld verdienen

aber:

4. Spätestens ab 2023 brauchen wir zentrale und dezentrale Speichertechnologien – (fast) egal zu welchem Preis…