Lehrstuhl für
Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme

Speichermöglichkeiten mit Zukunftspotential – Ist Power-to-Gas die Lösung?

Dipl.-Ing. Johannes Winklmaier

Technische Universität München

Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme

Bad Hindelang, 12.12.2014

Treiber der Energiewende: Der Klimawandel

Hohe Ernteverluste drohen in den heutigen Kornkammern der Welt

Quelle: weltagrarbericht.de

Treiber der Energiewende: Der Atomausstieg

Betriebssicherheit und Lagerung des Atommülls weiterhin fragwürdig!

Quelle: Digital Globe / Wikimedia

Quelle: ddp, planet-wissen.de

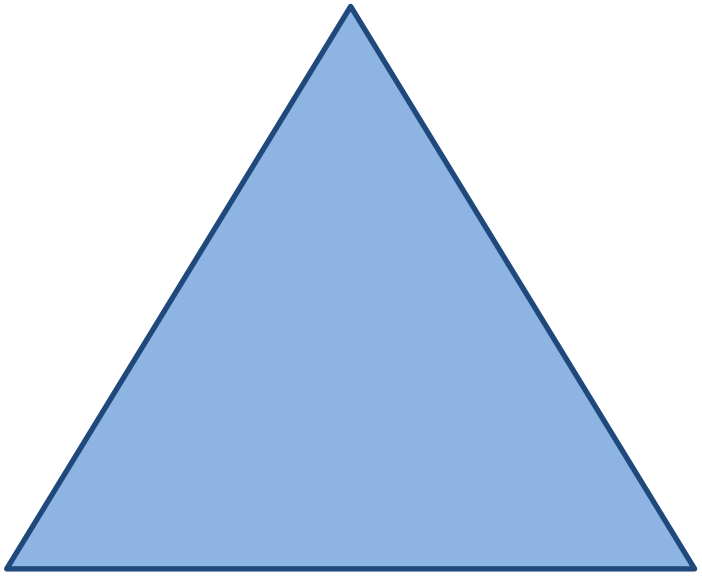
Agenda

- ☐ Vor welche Herausforderungen stellt uns die Energiewende?
- ☐ Welche generellen Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung?
- ☐ Welche Speichertechnologien haben wir zur Auswahl?
- ☐ Wie funktionieren Power-to-Gas-Anlagen?
- ☐ Zusammenfassung

Das Zieldreieck der Energiepolitik

Kriterien für zukunftsfähige Energiesysteme

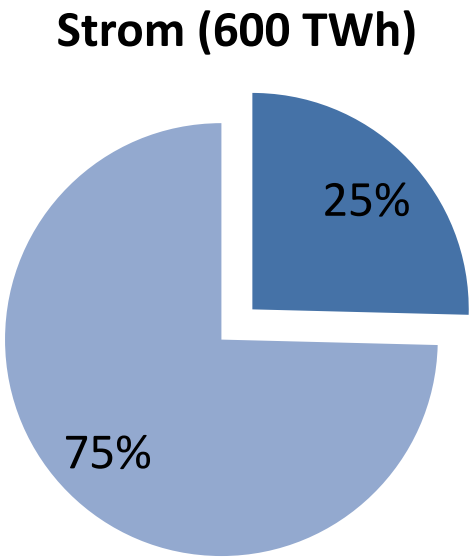
Umweltverträglichkeit



Wirtschaftlichkeit

Versorgungssicherheit

Umweltverträglichkeit

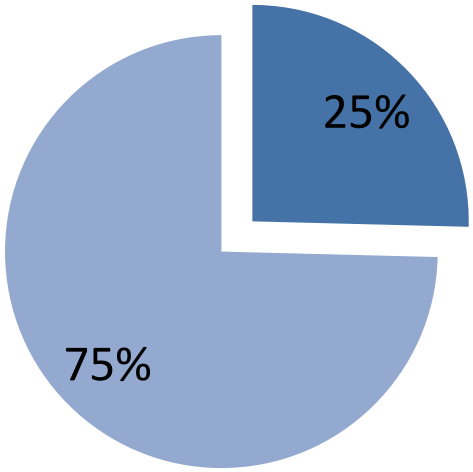


Quelle: BMWi

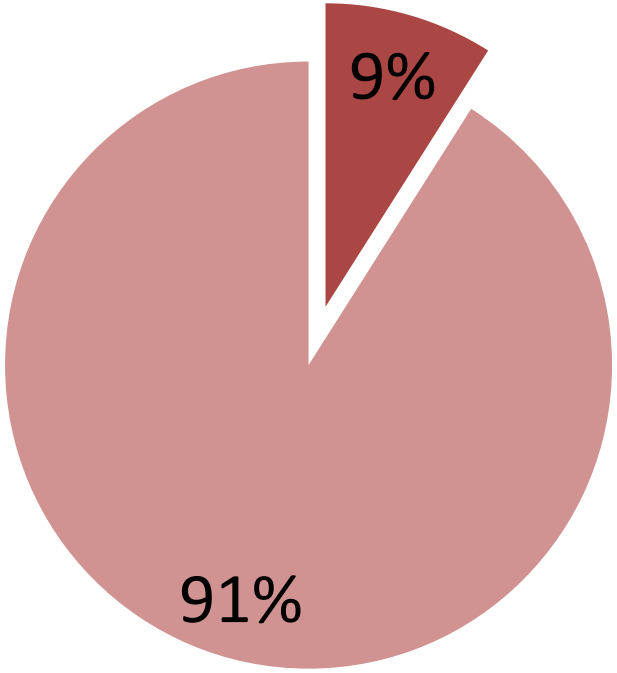
Umweltverträglichkeit

Energiewende = Stromwende + Wärmewende + Mobilitätswende

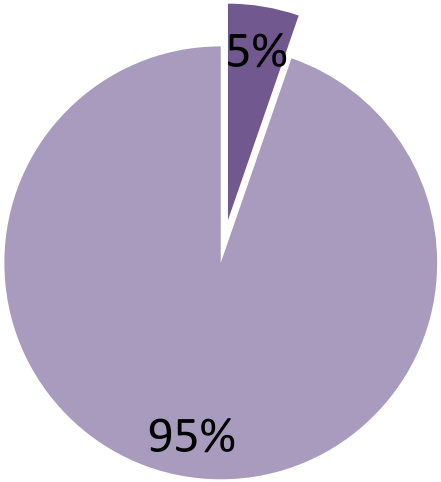
Strom (600 TWh)



Wärme (1480 TWh)



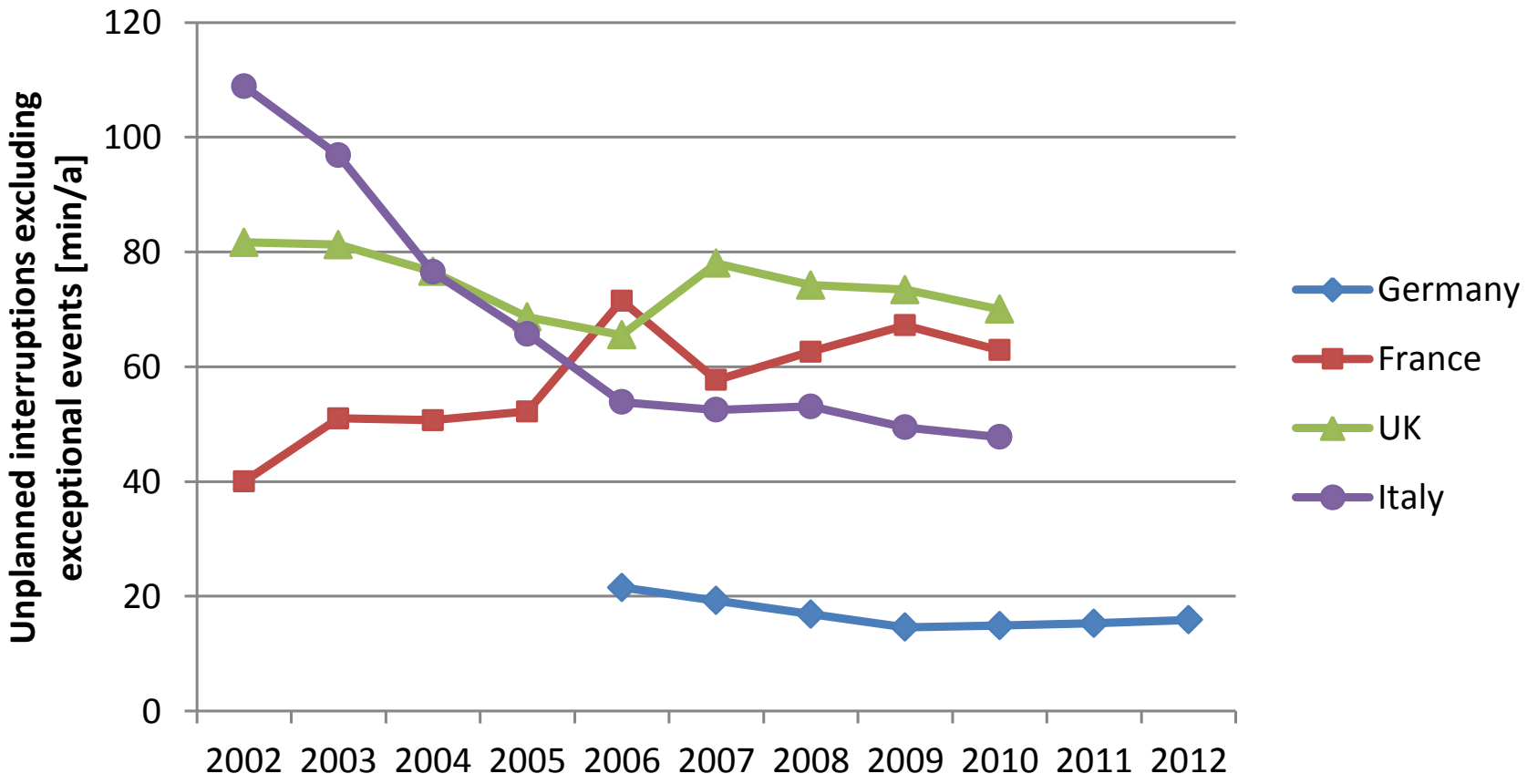
Verkehr (620 TWh)



Quelle: BMWi

Versorgungssicherheit

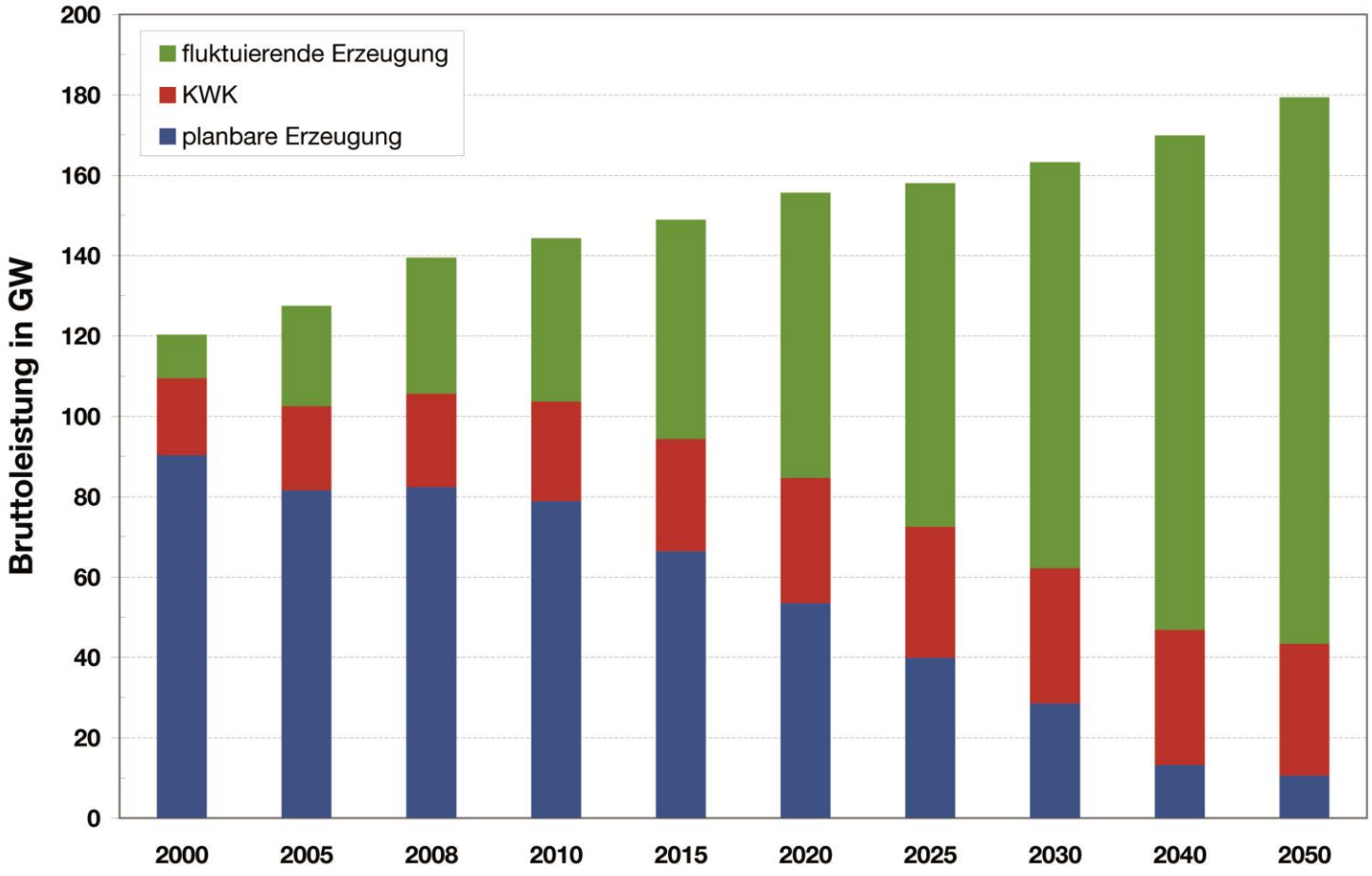
Deutschland belegt nach wie vor einen Spitzenplatz in der EU



Quelle: Council of European Energy Regulators (CEER)

Versorgungssicherheit

Zeitliche Entkopplung von Angebot und Nachfrage



Quelle: BMU

Versorgungssicherheit

Räumliche Entkopplung von Angebot und Nachfrage

Bisher:

- Lastzentren im Süd-Westen
- Kohle im Westen
- Atom im Süden

In Zukunft:

- Lastzentren im Süd-Westen
- Wind im Norden
- Photovoltaik im Süden

Quelle: Deutsche Umwelthilfe e.V.

Wirtschaftlichkeit

Markteinführung von Technologien

Wirtschaftlichkeit

Markteinführung von Technologien

Notwendige Rahmenbedingungen:

- Geeignete Anwendung
- Wirtschaftlichkeit
- Akzeptanz

Agenda

- [x] Vor welche Herausforderungen stellt uns die Energiewende?
- [ ] Welche generellen Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung?
- [ ] Welche Speichertechnologien haben wir zur Auswahl?
- [ ] Wie funktionieren Power-to-Gas-Anlagen?
- [ ] Zusammenfassung

Lösungsmöglichkeiten

Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung

- Flexibilisierung der Erzeugung
  - Hochflexible (Gas-)Kraftwerke
  - Biogaskraftwerke

Lösungsmöglichkeiten

Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung

- Flexibilisierung der Erzeugung
  - Hochflexible (Gas-)Kraftwerke
  - Biogaskraftwerke
- Flexibilisierung der Nachfrage
  - Demand Side Management
  - Smart Grid

Lösungsmöglichkeiten

Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung

- Flexibilisierung der Erzeugung
  - Hochflexible (Gas-)Kraftwerke
  - Biogaskraftwerke
- Flexibilisierung der Nachfrage
  - Demand Side Management
  - Smart Grid
- Ausbau der Infrastruktur
  - Ausbau Verteilnetze
  - Ausbau Übertragungsnetze (EU Supergrid)

Lösungsmöglichkeiten

Verschiedene Optionen stehen zur Verfügung

- Flexibilisierung der Erzeugung
  - Hochflexible (Gas-)Kraftwerke
  - Biogaskraftwerke
- Flexibilisierung der Nachfrage
  - Demand Side Management
  - Smart Grid
- Ausbau der Infrastruktur
  - Ausbau Verteilnetze
  - Ausbau Übertragungsnetze (EU Supergrid)
- Ausbau von Energiespeichern
  - Kurzzeit (Pumpspeicher, Batterien, Kondensatoren)
  - Langzeit (Power-to-Gas)

Gaskraftwerk in Irsching (Bayern)

Wirtschaftlicher Betrieb derzeit nicht möglich

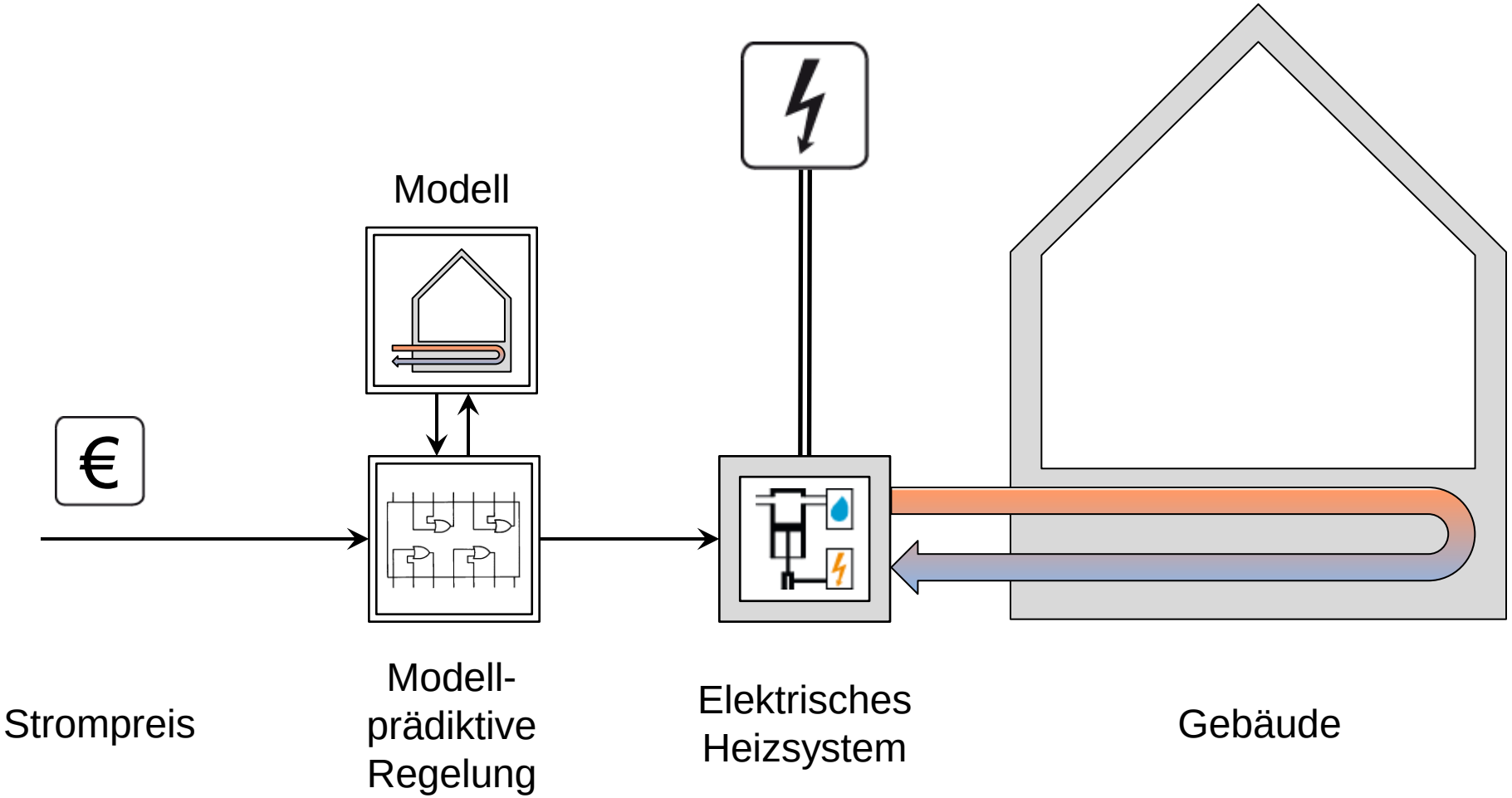
- Gaskraftwerk Irsching Block 4 & 5:
  - Modernstes Gaskraftwerk der Welt
  - Wirkungsgrad: ca. 60%
  - Kosten: ca. 1 Mrd. EUR
  - Leistung: 561 & 845 MW netto
  - Inbetriebnahme: 2010, 2011
  - Betrieb 2012: ca. 2.000h
  - Kalkulation: 4.000-5.000h

Quelle: E.ON

- FOCUS 26.04.2013: „Teures Opfer für die Energiewende: Der Irrsinn von Irsching – Selbst das weltweit effizienteste Gaskraftwerk in Irsching lässt sich wegen des Ökostrom-Booms nicht mehr wirtschaftlich betreiben. Trotzdem muss es am Netz bleiben. Zahlen muss mal wieder der Stromkunde.“

Demand Side Management

Flexibilisierung der Nachfrage nach Gebäudewärme



Quelle: Herzog, Jungwirth (TUM)

Ausbau des Stromnetzes

- Netzausbau aufgrund von räumlicher Entkopplung dringend notwendig
- Ausbau sorgt zudem für Ausgleichseffekte, d.h. weniger Speicher werden benötigt
- Problem: Netzausbau kommt derzeit nur schleppend voran
- Ursachen für verzögerten Netzausbau
  - Akzeptanzprobleme
  - Unzureichende Anreize durch die Anreizregulierung
  - Langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren

Quelle: dpa

Agenda

- [x] Vor welche Herausforderungen stellt uns die Energiewende?
- [x] Welche generellen Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung?
- [ ] Welche Speichertechnologien haben wir zur Auswahl?
- [ ] Wie funktionieren Power-to-Gas-Anlagen?
- [ ] Zusammenfassung

Klassifikation von Energiespeichern

Quelle: TH Regensburg FENES 2013

Pumpspeicherkraftwerke

Derzeit wichtigste Speichertechnologie

Pumpspeicherkraftwerke

Derzeit wichtigste Speichertechnologie

- Funktionsweise: elektrische Energie ⇔ potentielle Energie
- Leistung (D): ca. 7 GW
- Kapazität (D): ca. 40 GWh
  - => ca. 7h Betrieb pro Jahr
- Stärken: hoher Wirkungsgrad (ca. 80%), hohe Flexibilität, wirtschaftlicher Betrieb, keine Selbstentladung, erprobte Technologie (seit 1926), Schwarzstartfähigkeit
- Schwächen: Akzeptanz (Landschaftsbild, Ökologie), **begrenztes Potential**, **Entfernung möglicher Standorte von EE-Erzeugungsanlagen**

Quelle: E.ON

Druckluftspeicherkraftwerke

Funktionsweise: Druckluft-Gas-Kombikraftwerk

Quelle: KBB Underground Technologies

Druckluftspeicherkraftwerke

Neue Technologie, Forschung und neue Konzepte notwendig!

- Funktionsweise: Elektrische Energie ➔ Kompressor ➔ Speicherung von Druckluft in Kaverne ➔ Gasturbine ➔ Elektrische Energie
- Kombination mit Gasturbinenkraftwerk
- Stärken: hohe Flexibilität (steile Rampen, Teillastbetrieb), schwarzstartfähig, mögliche Standorte an dt. Nordseeküste (Nähe zu EE-Erzeugungsanlagen)
- Schwächen: Akzeptanz (Kaverne = ausgehöhlter + luftdichter Salzstock), bisher nur Pilotanlagen (1x in D), **Wirkungsgrad** (Strom und Gas als Inputs)
- Neue Konzepte:
  - Adiabatischer Druckluftspeicher: Speicherung der Kompressionswärme in Wärmespeicher ➔ kein Erdgas notwendig!

Power to Heat

Erzeugung von Wärme mit Strom erlebt eine Renaissance

- Ausführungen:
  - Heizstäbe / Tauchsieder (Joulesche Wärme)
  - Wärmepumpe (Kreisprozess, Umgebungswärme)
- Einsatzmöglichkeiten:
  - Haushalte (Warmwasser, Raumwärme)
  - Nah- und Fernwärme

Quelle: Amazon

- <u>Stärken</u>: Geringe Investitionskosten, hoher Wirkungsgrad (ca. 98%), Bereitstellung von neg. Regelenergie zur Netzstabilisierung
- <u>Schwächen</u>: **Unidirektionaler Speicher → keine Rückverstromung möglich**
- Konzepte: Integration von PV in Wärmeversorgung, Integration von Wind in Fernwärmeanlagen

Elektroautos als Stromspeicher

Erste Modellversuche sind gestartet

Quelle: Volkswagen

Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland

Kapazität Pumpspeicher 2010
(0,04 TWh)

Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland

Potential Pumpspeicher maximal (0,08 TWh)

Kapazität Pumpspeicher 2010 (0,04 TWh)

Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland

- Abgeregelte Überschüsse 2010 (0,17 TWh)
- Potential Pumpspeicher maximal (0,08 TWh)
- Kapazität Pumpspeicher 2010 (0,04 TWh)

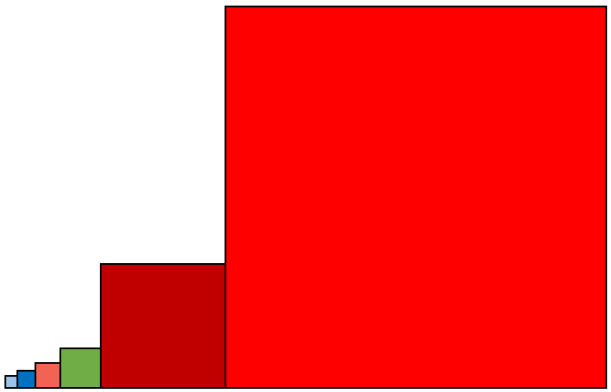
Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland

- Potential 100% E-Mobilität (0,42 TWh)
- Abgeregelte Überschüsse 2010 (0,17 TWh)
- Potential Pumpspeicher maximal (0,08 TWh)
- Kapazität Pumpspeicher 2010 (0,04 TWh)

Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

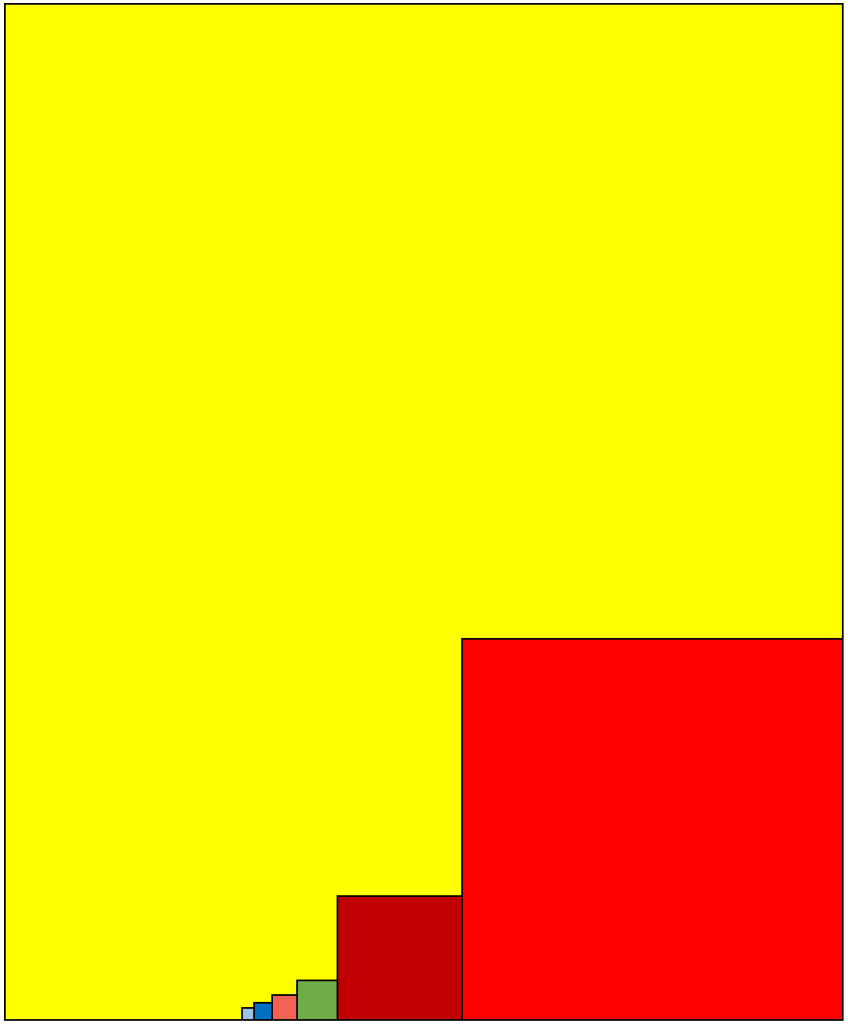
Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland



- Bedarf Stromspeicher 2050 lt. IWES (40 TWh)
- Bedarf Stromspeicher 2050 lt. KW21 (4,0 TWh)
- Potential 100% E-Mobilität (0,42 TWh)
- Abgeregelte Überschüsse 2010 (0,17 TWh)
- Potential Pumpspeicher maximal (0,08 TWh)
- Kapazität Pumpspeicher 2010 (0,04 TWh)

Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

Speicher: Bedarf und Potentiale in Deutschland



- Kapazität Erdgasnetz 2010 (220 TWh)
- Bedarf Stromspeicher 2050 lt. IWES (40 TWh)
- Bedarf Stromspeicher 2050 lt. KW21 (4,0 TWh)
- Potential 100% E-Mobilität (0,42 TWh)
- Abgeregelte Überschüsse 2010 (0,17 TWh)
- Potential Pumpspeicher maximal (0,08 TWh)
- Kapazität Pumpspeicher 2010 (0,04 TWh)

Quellen: Fraunhofer IWES, KW21

Agenda

- [x] Vor welche Herausforderungen stellt uns die Energiewende?
- [x] Welche generellen Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung?
- [x] Welche Speichertechnologien haben wir zur Auswahl?
- [ ] Wie funktionieren Power-to-Gas-Anlagen?
- [ ] Zusammenfassung

Photosynthese

Wie speichert die Natur Energie über lange Zeiträume?

enz: ca. 1%

Quelle: sciencewithme.com

Elektrolyse und Methanisierung

Umwandlung von elektrischer Energie in Erdgas erfolgt in zwei Stufen

Effizienz: 50% - 60%

Quelle: Karl, FAU

PtG Prozesskette

Quelle: Audi

Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche Argumente sprechen für einen Einsatz von PtG

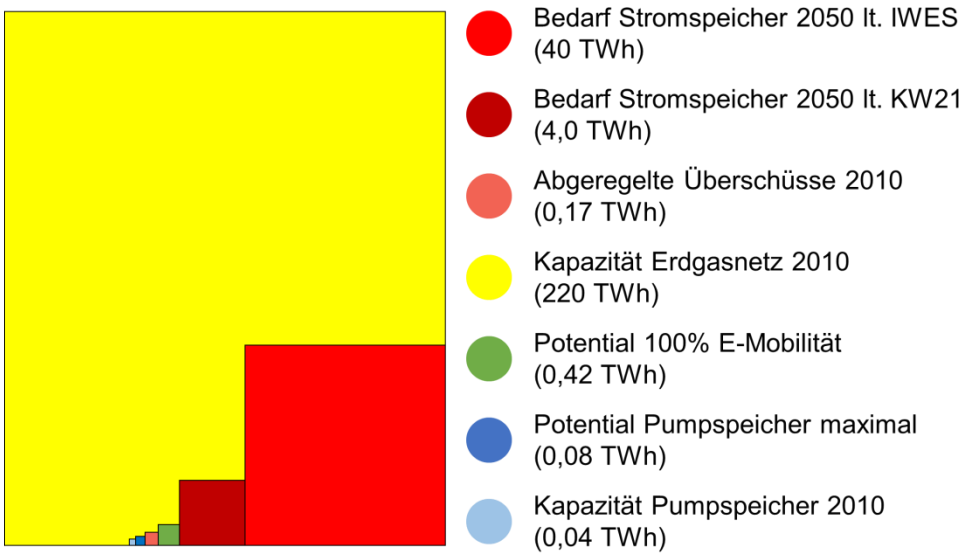
- **Notwendige Infrastruktur (Erdgasnetz und -speicher) ist vorhanden und ermöglich dezentrale Einspeisung**

Quelle: BMWi

Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche Argumente sprechen für einen Einsatz von PtG

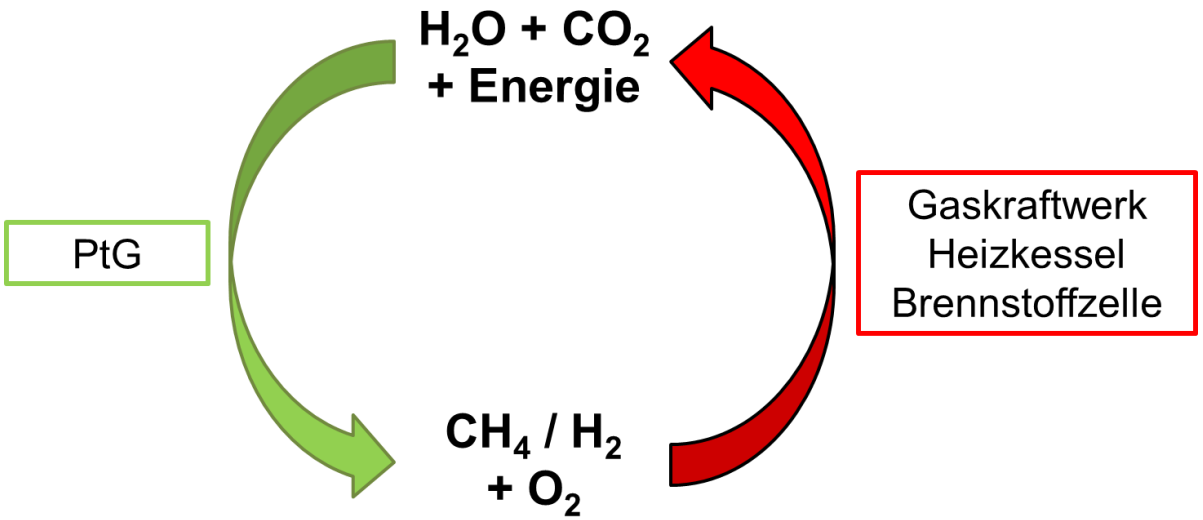
- Notwendige Infrastruktur (Erdgasnetz und -speicher) ist vorhanden und ermöglich dezentrale Einspeisung
- **Infrastruktur deckt zukünftigen Speicherbedarf um ein Vielfaches ab (Alleinstellungsmerkmal)**



Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche Argumente sprechen für einen Einsatz von PtG

- Notwendige Infrastruktur (Erdgasnetz und -speicher) ist vorhanden und ermöglich dezentrale Einspeisung
- Infrastruktur deckt zukünftigen Speicherbedarf um ein Vielfaches ab (Alleinstellungsmerkmal)
- **PtG-Prozess ist CO_2 neutral**



Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche Argumente sprechen für einen Einsatz von PtG

- Notwendige Infrastruktur (Erdgasnetz und -speicher) ist vorhanden und ermöglich dezentrale Einspeisung
- Infrastruktur deckt zukünftigen Speicherbedarf um ein Vielfaches ab (Alleinstellungsmerkmal)
- PtG-Prozess ist CO_2 neutral
- **Geringe Selbstendladung der gespeicherten Energie, damit auch Langzeitspeicherung möglich**

Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche Argumente sprechen für einen Einsatz von PtG

- Notwendige Infrastruktur (Erdgasnetz und -speicher) ist vorhanden und ermöglich dezentrale Einspeisung
- Infrastruktur deckt zukünftigen Speicherbedarf um ein Vielfaches ab (Alleinstellungsmerkmal)
- PtG-Prozess ist CO_2 neutral
- Geringe Selbstendladung der gespeicherten Energie, damit auch Langzeitspeicherung möglich
- **Zahlreiche Power-To-Gas-Demonstrationsanlagen sind bereits erfolgreich in Betrieb**

Motivation Power-to-Gas

Zahlreiche PtG-Demonstrationsanlagen sind bereits erfolgreich in Betrieb

PtG-Anlage Werlte (Niedersachsen):

- 6 MW (größte Anlage der Welt)
- Entspricht Bedarf einer Kleinstadt/Gemeinde der Größe Bad Hindelangs bei 100% Stromerzeugung durch EE

Elektrolyseur

CO_2-Aufbereitung

Methanisierung

Quelle: Audi

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- 450.000 € / a Tilgung (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- 450.000 € / a Tilgung (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)
- Strom wird kostenlos bezogen

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- 450.000 € / a Tilgung (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)
- Strom wird kostenlos bezogen
- 24.000 MWh / a Stromverbrauch (bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr)

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- 450.000 € / a Tilgung (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)
- Strom wird kostenlos bezogen
- 24.000 MWh / a Stromverbrauch (bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr)
- 14.400 MWh / a Methan-Produktion (bei 60% Wirkungsgrad)

Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- 450.000 € / a Tilgung (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)
- Strom wird kostenlos bezogen
- 24.000 MWh / a Stromverbrauch (bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr)
- 14.400 MWh / a Methan-Produktion (bei 60% Wirkungsgrad)
- 25 € / MWh Handelspreis Erdgas (Stand 2012)

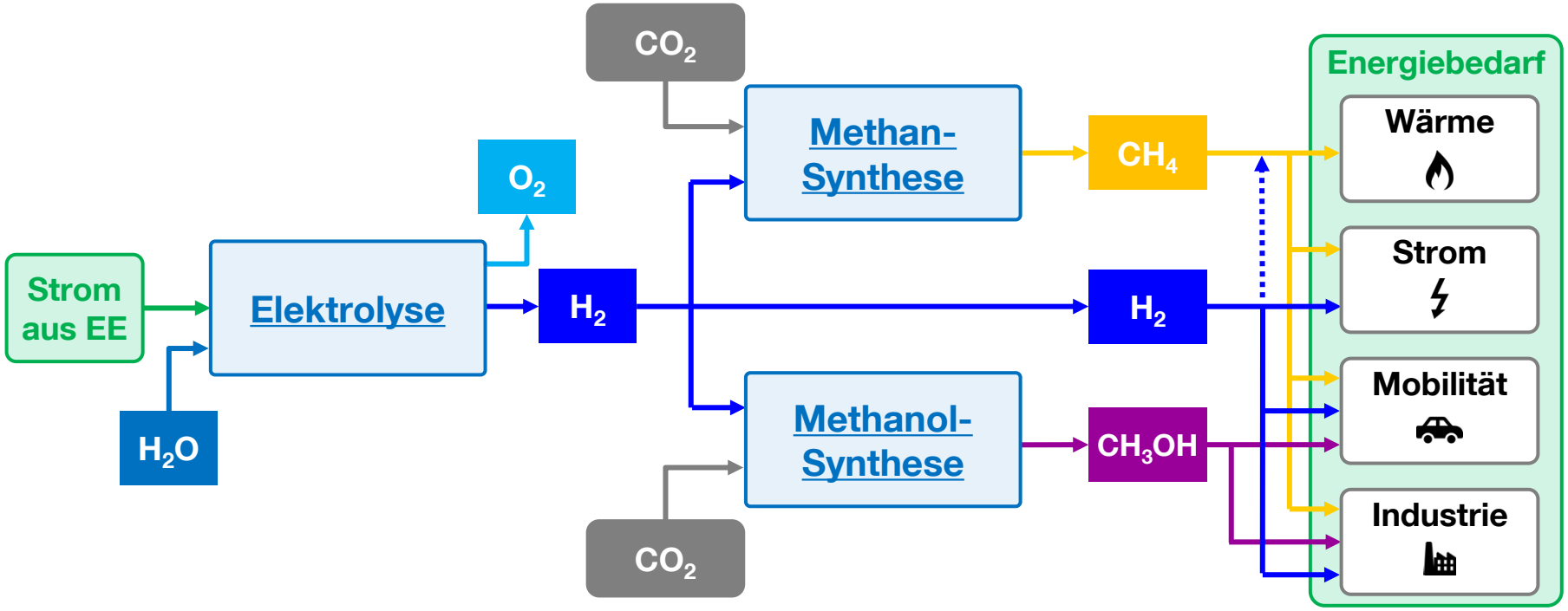
Wirtschaftlichkeit PtG

Wie rentabel wäre die PtG-Anlage in Werlte im Industriebetrieb?

- 6 MW Leistung
- 9.000.000 € Investmentkosten (ca. 1.500 € / kW)
- **450.000 € / a Tilgung** (bei 20 Jahren Laufzeit und 0% Zins)
- **Strom wird kostenlos bezogen**
- 24.000 MWh / a Stromverbrauch (bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr)
- 14.400 MWh / a Methan-Produktion (bei 60% Wirkungsgrad)
- 25 € / MWh Handelspreis Erdgas (Stand 2012)
- **360.000 € / a Erlös**

Neues Konzept: Power-to-Fuel

PtG-Prozess kann EE-Strom in verschiedenste Energieträger umwandeln



TUM Projekt: Power-to-Fuel

Interdisziplinäre Forschungsplattform zur Bündelung der Kompetenzen

System

- Prof. Hamacher, ENS
- Prof. Spliethoff, LES

Elektrolyse

- Prof. Gasteiger, TEC
- Dr. Hauer, ZAE Bayern

Synthese

- Prof. Hinrichsen, TC1
- Prof. Klein, APT
- Prof. Spliethoff, LES

Agenda

- [x] Vor welche Herausforderungen stellt uns die Energiewende?
- [x] Welche generellen Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung?
- [x] Welche Speichertechnologien haben wir zur Auswahl?
- [x] Wie funktionieren Power-to-Gas-Anlagen?
- [ ] Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage

Zusammenfassung

- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher

Zusammenfassung

- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher
- Speichertechnologien: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Power-to-Heat, Batterien in E-Autos, Power-to-Gas

Zusammenfassung

- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher
- Speichertechnologien: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Power-to-Heat, Batterien in E-Autos, Power-to-Gas
- Power-to-Gas: Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff / Methan mittels Elektrolyse und eventuell Synthese

Zusammenfassung

- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher
- Speichertechnologien: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Power-to-Heat, Batterien in E-Autos, Power-to-Gas
- Power-to-Gas: Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff / Methan mittels Elektrolyse und eventuell Synthese
  - Zahlreiche Vorteile: Infrastruktur vorhanden, Langzeitspeicherung möglich, Prozess ist CO2 neutral

Zusammenfassung

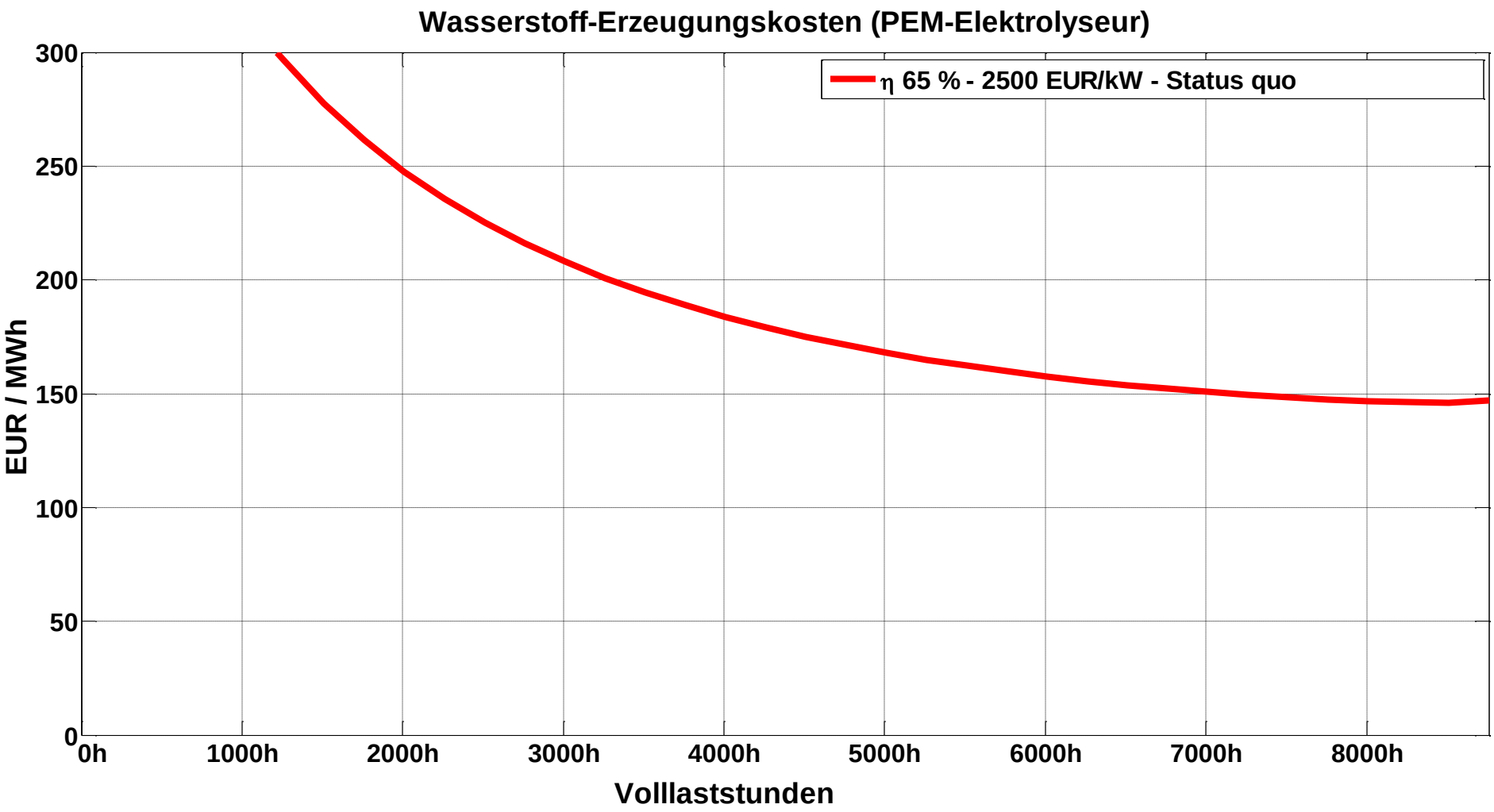
- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher
- Speichertechnologien: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Power-to-Heat, Batterien in E-Autos, Power-to-Gas
- Power-to-Gas: Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff / Methan mittels Elektrolyse und eventuell Synthese
  - Zahlreiche Vorteile: Infrastruktur vorhanden, Langzeitspeicherung möglich, Prozess ist CO2 neutral
  - Probleme: Anlagenkosten, Stromzusatzkosten, Handelspreis Erdgas unschlagbar niedrig

Zusammenfassung

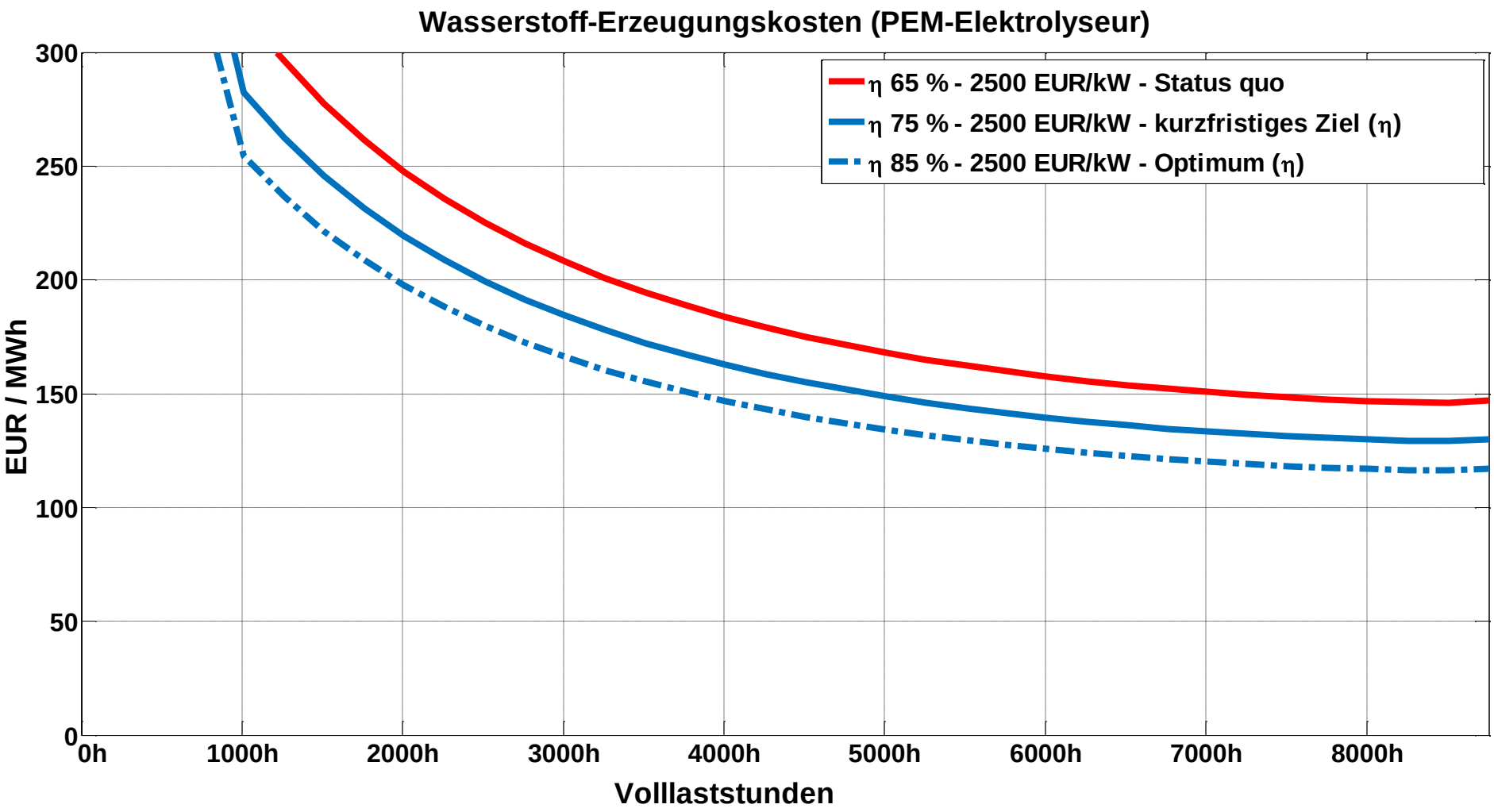
- Herausforderungen: Hoher Anteil an EE führt zu zeitlicher und räumlicher Entkopplung von Angebot und Nachfrage.
- Lösungsmöglichkeiten: Hochflexible Kraftwerke, Netzausbau, Demand Side Management, Energiespeicher
- Speichertechnologien: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Power-to-Heat, Batterien in E-Autos, Power-to-Gas
- Power-to-Gas: Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff / Methan mittels Elektrolyse und eventuell Synthese
  - Zahlreiche Vorteile: Infrastruktur vorhanden, Langzeitspeicherung möglich, Prozess ist CO2 neutral
  - Probleme: Anlagenkosten, Stromzusatzkosten, Handelspreis von Erdgas derzeit nicht zu unterbieten
  - Lösungen: Power-to-Fuel (Standortspezifisch Wahl des optimalen Prozesses), Kostenreduktion durch Serienfertigung, Abwärmenutzung

Ist Power-to-Gas die Lösung?

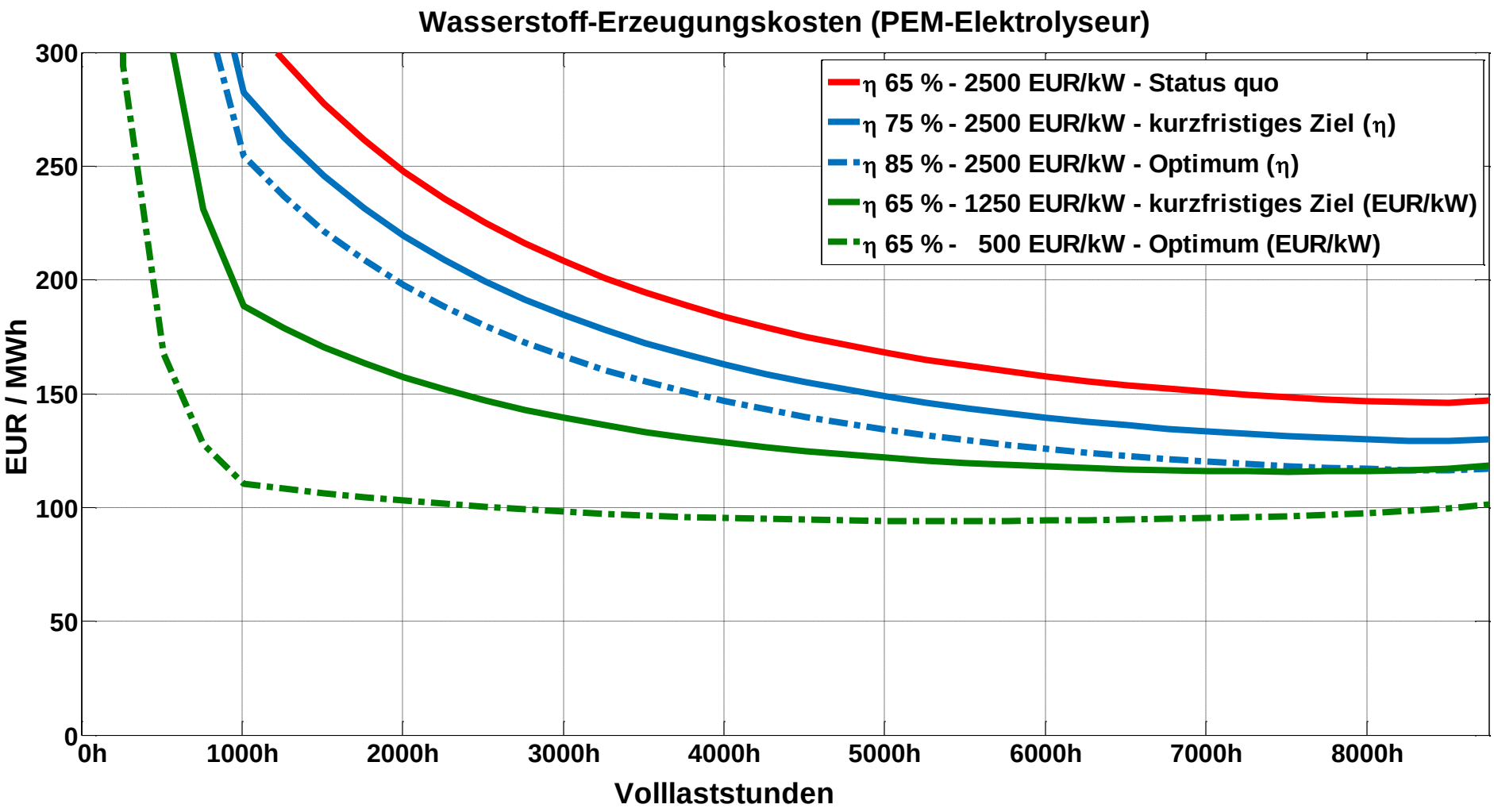
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen



Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

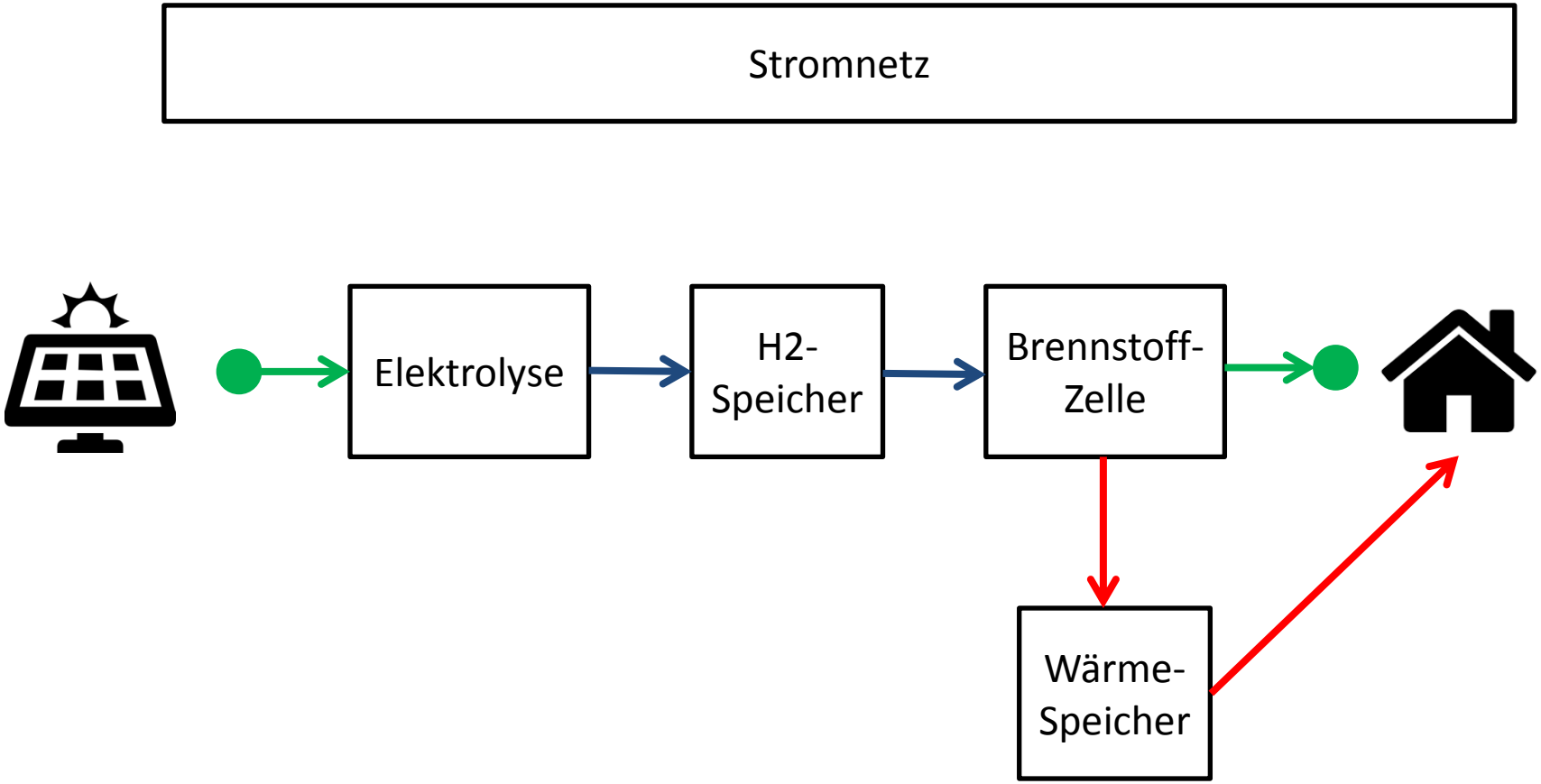


Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen



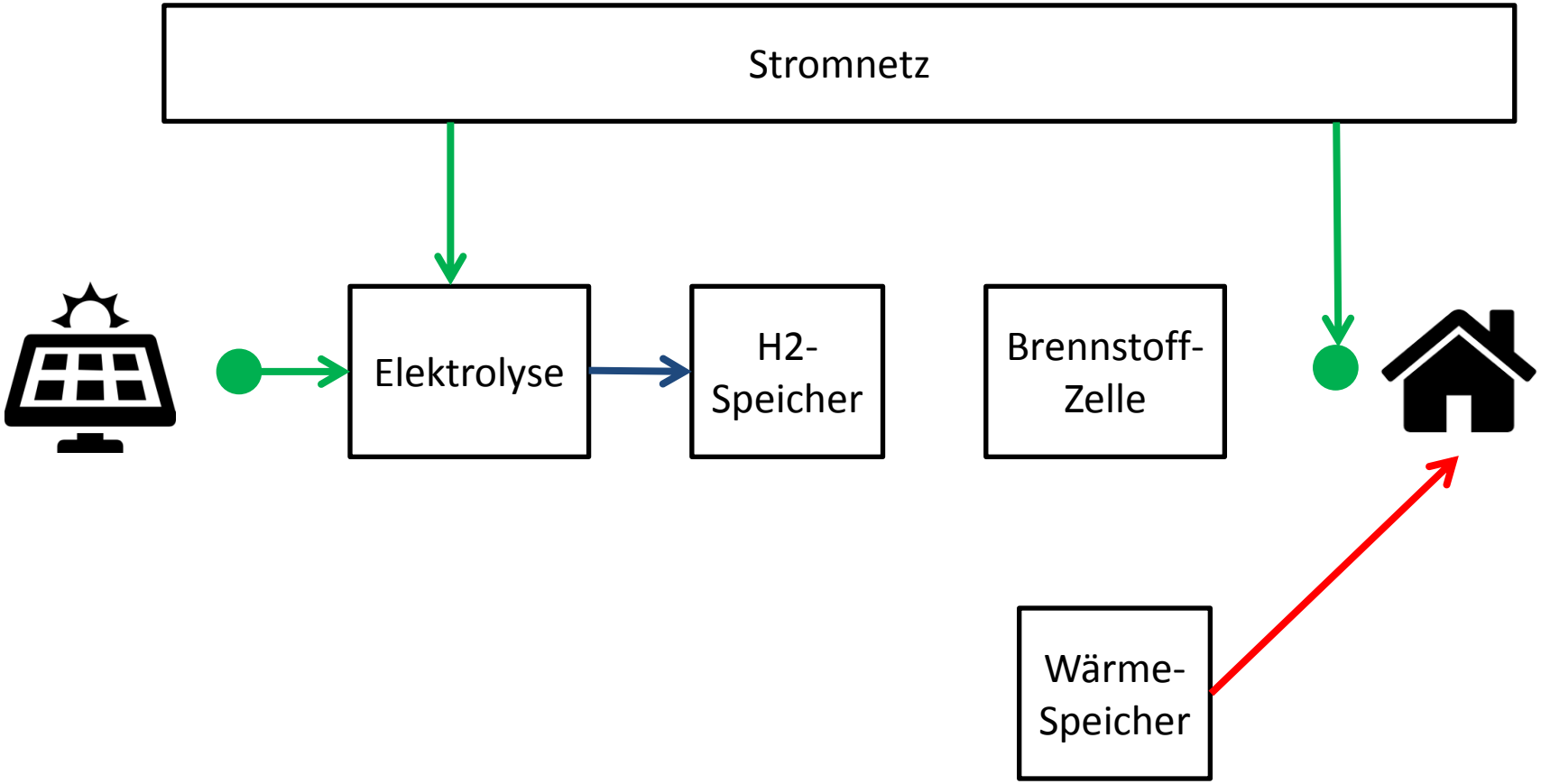
Power-to-Fuel: Dezentrale Wärmeproduktion

Elektrolyse + Brennstoffzelle + Wärmespeicher



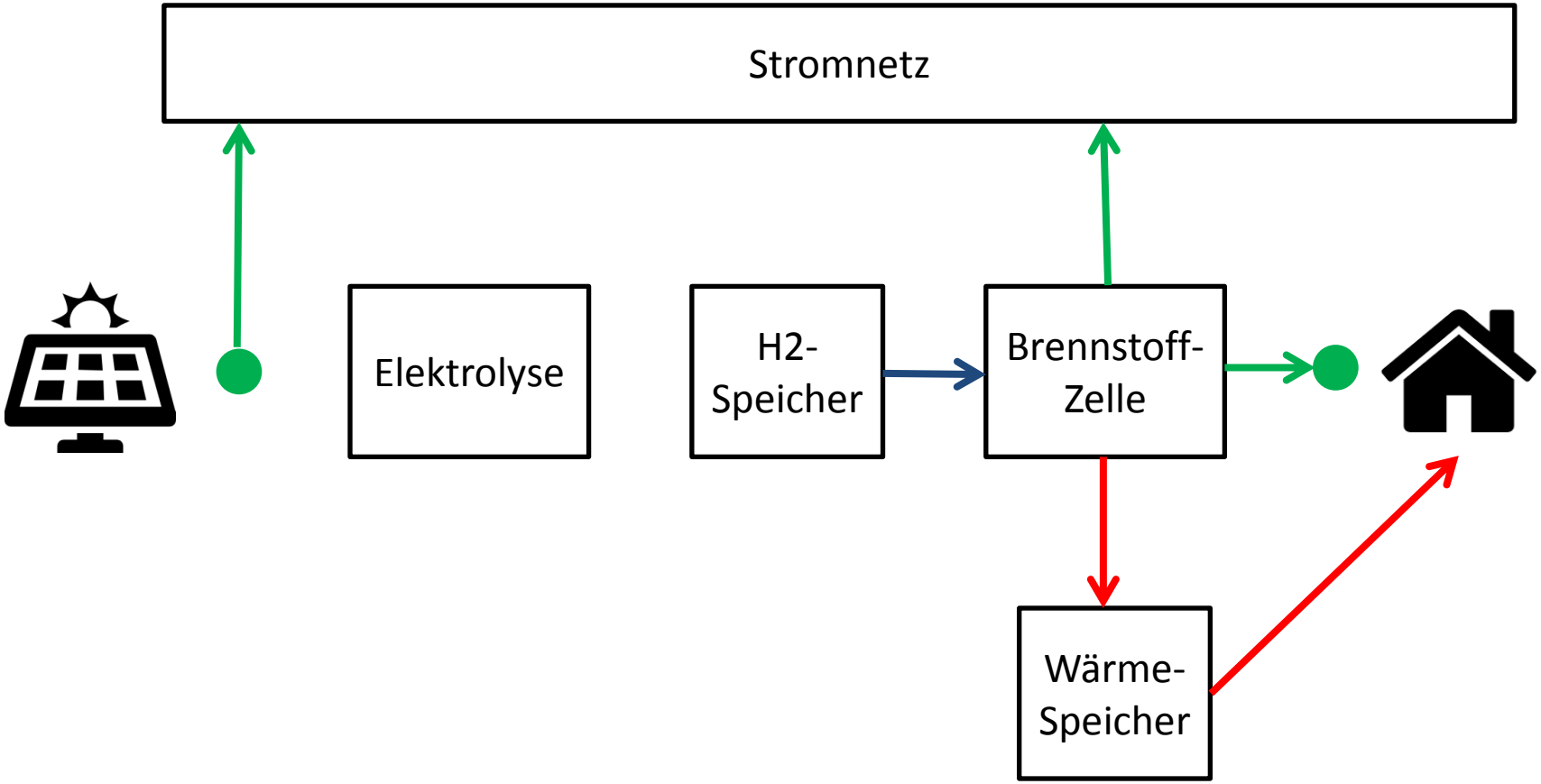
Power-to-Fuel: Dezentrale Wärmeproduktion

Strom an der Börse günstig



Power-to-Fuel: Dezentrale Wärmeproduktion

Strom an der Börse teuer



Kontaktdaten

Gerne stehen ich für Ihre Fragen zur Verfügung!

Dipl.-Ing. Johannes Winklmaier
johannes.winklmaier@tum.de

Technische Universität München
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme
Arcisstraße 21
80333 München

Tel: +49 89 289 - 28307
Fax: +49 89 289 - 28313
www.ens.ei.tum.de