

# Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff – Wirkung auf das Gesamtenergiesystem

Florian Peterssen<sup>1,3</sup>, Lena Bühre<sup>1,3</sup>, Raphael Niepelt<sup>2,3</sup>,  
Rolf Brendel<sup>2,3</sup>, Richard Hanke-Rauschenbach<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover

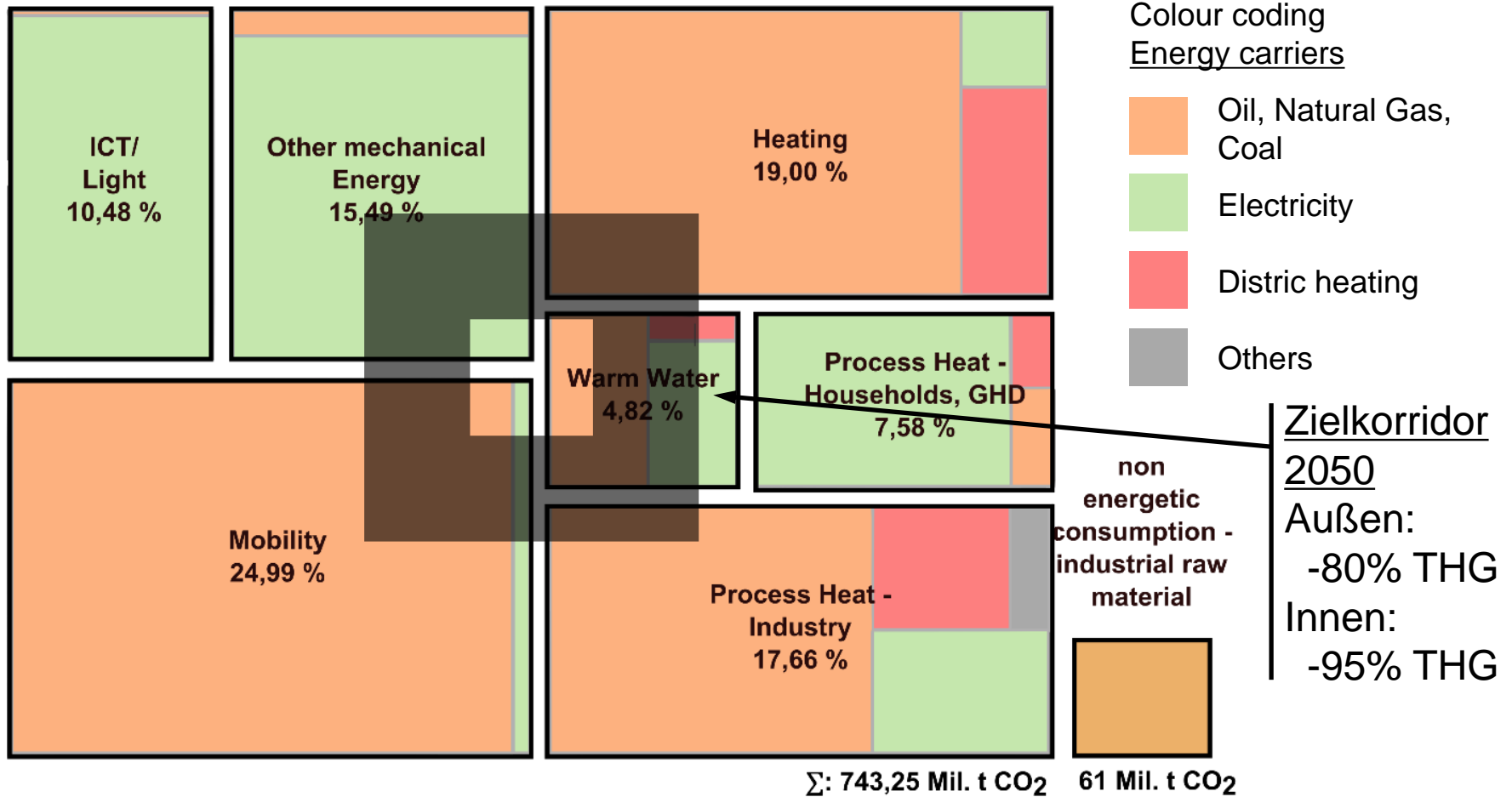
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)

<sup>2</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)

<sup>3</sup>Leibniz Forschungszentrum Energie 2050

- I. Welche Potentiale bietet Wasserstoff für die Defossilisierung unseres Energiesystems?
- II. Welche Potentiale werden in „Konkurrenz“ mit anderen Defossilisierungs-Optionen künftig genutzt?
- III. Ausblick: Wann muss mit der Implementierung von Wasserstoff im Energiesystem begonnen werden?

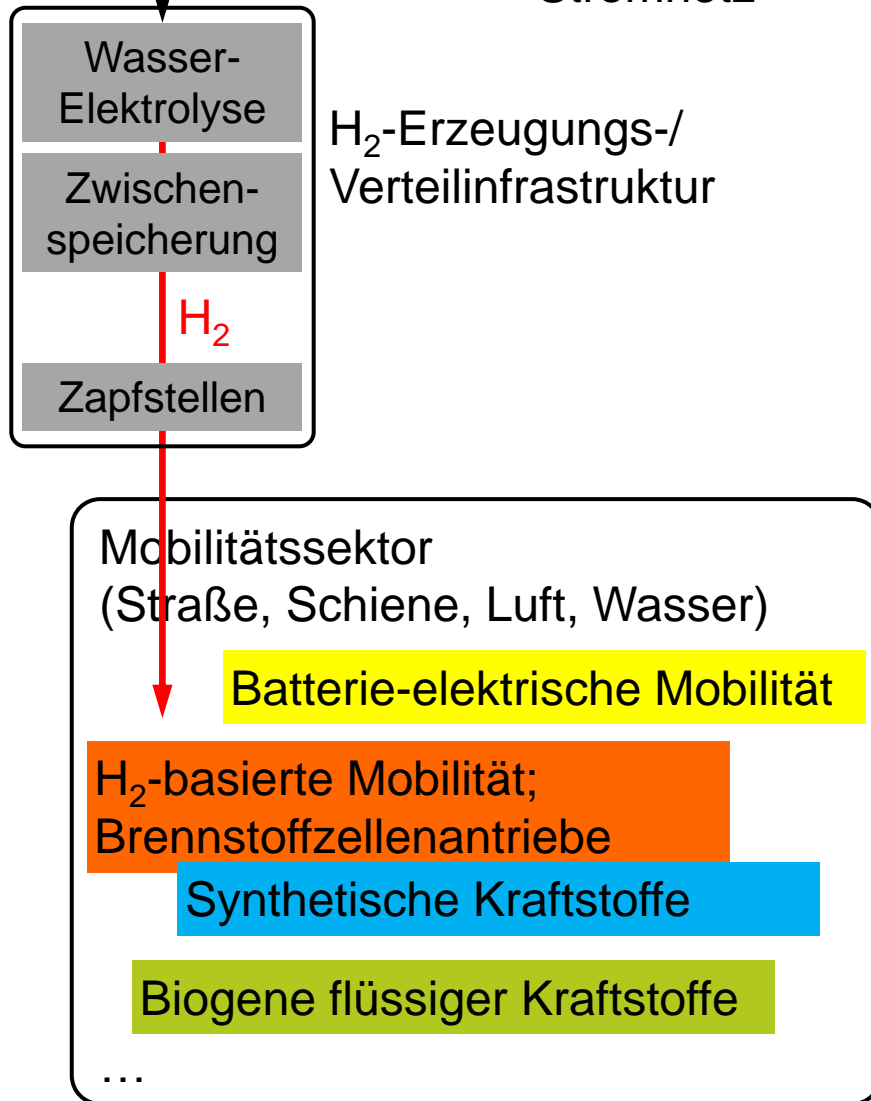
# Einleitung: CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Anwendungsbereichen (Basisjahr: 2014)



B. Bensmann. Energetische Untersuchungen zur Druckwasserelektrolyse im Kontext von Power-to-Gas-Anwendungen. Dissertationsschrift Universität Magdeburg, 2017.

# Potentielle Funktionalitäten von H<sub>2</sub> im künftigen Energiesystem

Stromnetz

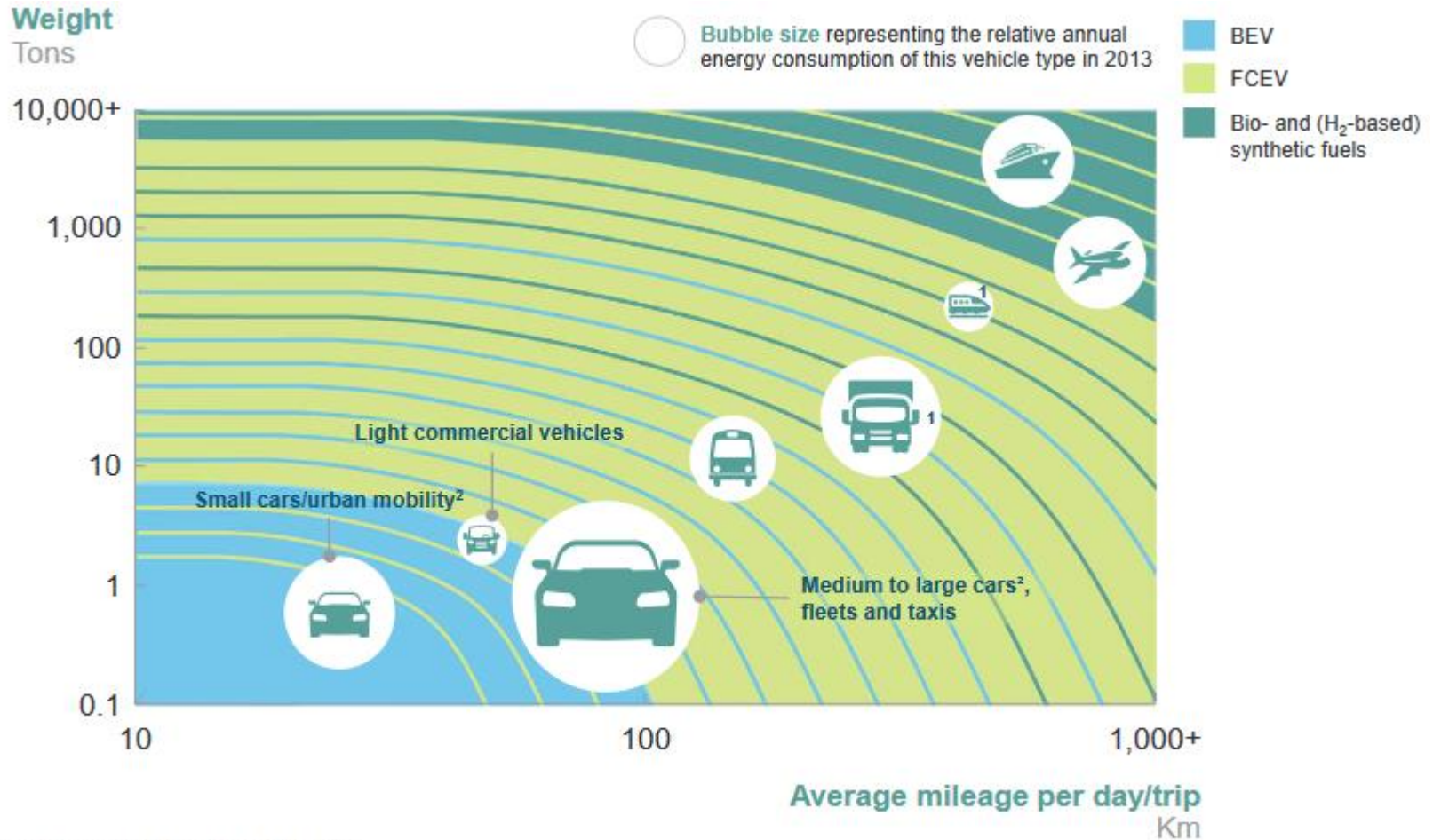


## Funktionalität 1: Lösungselement zu Defossilisierung der Mobilität

- jährl. Substitutionspotential/-bedarf\*: 185 Mio t<sub>CO<sub>2</sub></sub> (25% d. CO<sub>2</sub>-Emiss.)  
720 TWh (30% d. Endenergiebed.)
- H<sub>2</sub>-basierte Mobilität als Teil eines komplementären Ansatzes
- Alternativen zum Einsatz von H<sub>2</sub>
  - \* Einsatz biogener Treibstoffe
  - \* Batterie-elektrische Antriebe
  - \* Einsatz synthetischer Kraftstoffe
- „Nebeneffekt“ durch dynamische Betriebsweis der Wasser-Elektrolyse: Bereitstellung von Flexibilitäten für Betrieb des Stromsystems

\*Deutschland, Bezugsjahr: 2014

# zu: Defossilisierung der Mobilität



<sup>1</sup> Battery-hydrogen hybrid to ensure sufficient power

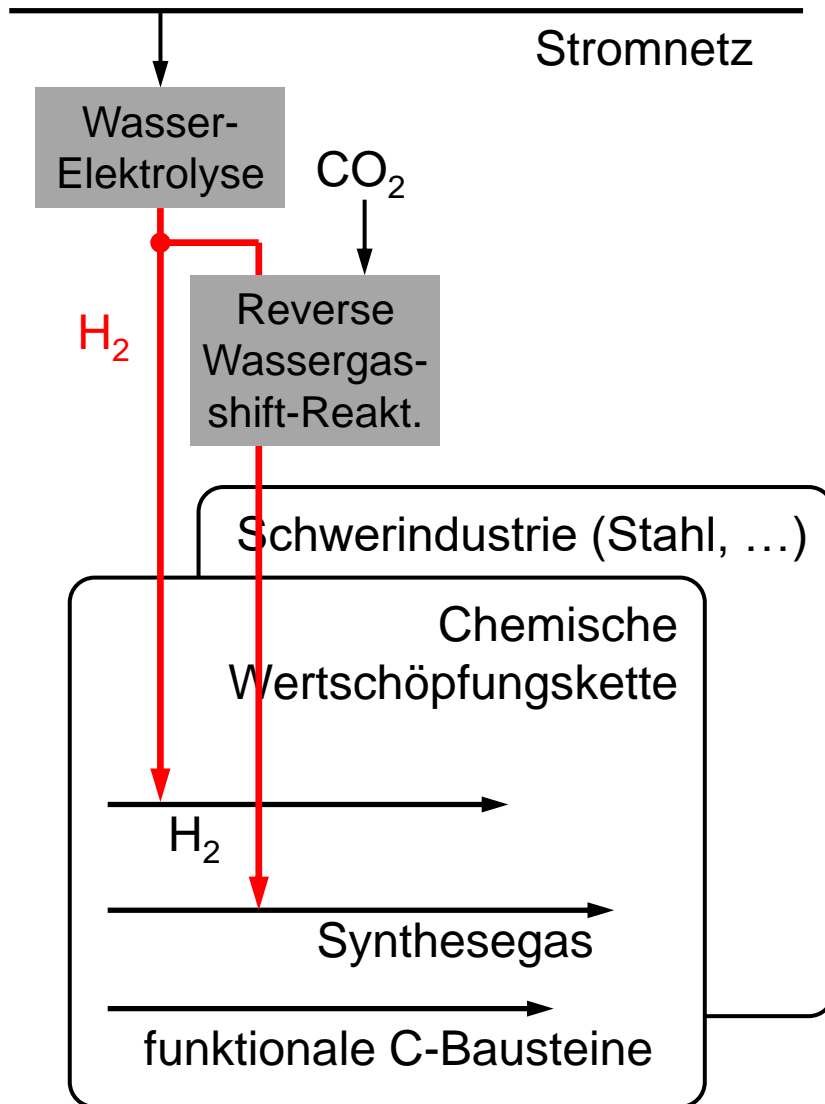
<sup>2</sup> Split in A- and B-segment LDVs (small cars) and C+-segment LDVs (medium to large cars) based on a 30% market share of A/B-segment cars and a 50% less energy demand

Source: Toyota, Hyundai, Daimler

Quelle: Hydrogen Council, How hydrogen empowers the energy transition, 2017

[Link zum Download](#)

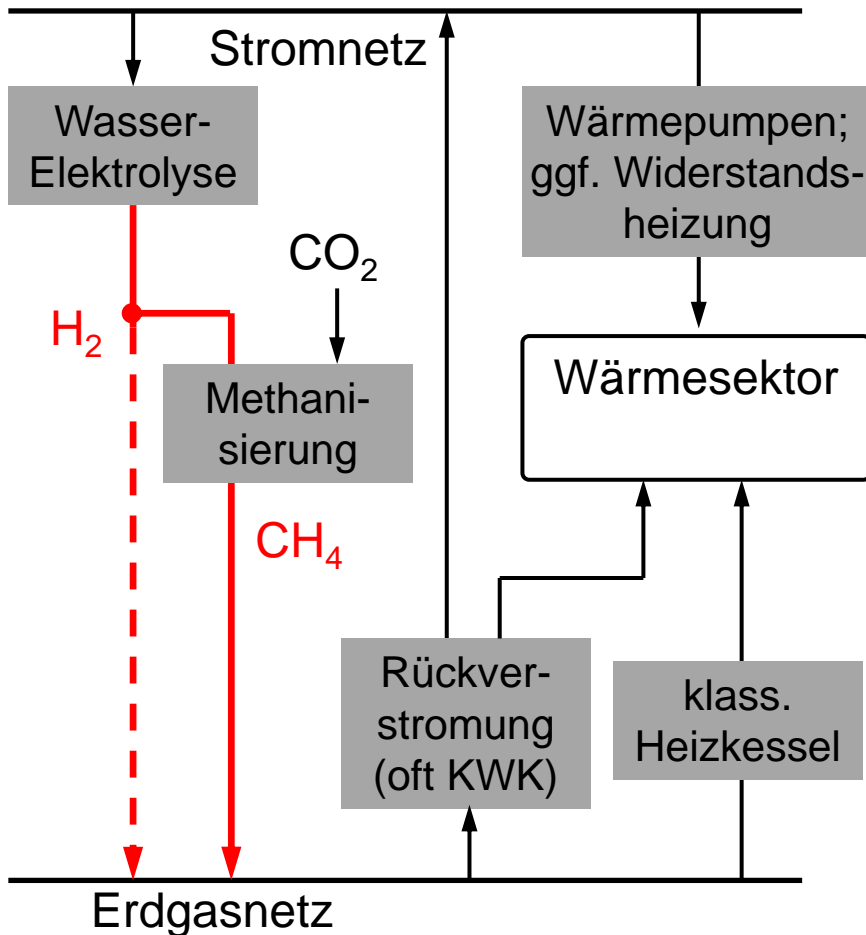
# Potentielle Funktionalitäten von H<sub>2</sub> im künftigen Energiesystem



## Funktionalität 2: Lösungselement zur Substitution fossilstämmiger Rohstoffe in der Grundstoff-/Schwerindustrie

- jährl. Substitutionspotential/-bedarf: 60 Mio t<sub>CO<sub>2</sub></sub> (8% d. CO<sub>2</sub>-Emiss.)
- Zwei Ansätze
  - \* Deckung von bestehenden Wasserstoffbedarfen durch grünen/blauen Wasserstoff; Bsp. Raffinerien, Ammoniak-/Methanol-Synthese
  - \* Änderung von bestehenden Prozessrouten unter Einbindung von grünem/blauen Wasserstoff; Bsp. Stahlherstl.
- Auch hier denkbar: Bereitstellung von Flexibilitäten für Betrieb des Stromsystems durch dynamische Fahrweise der Wasserelektrolyse

# Potentielle Funktionalitäten von H<sub>2</sub> im künftigen Energiesystem

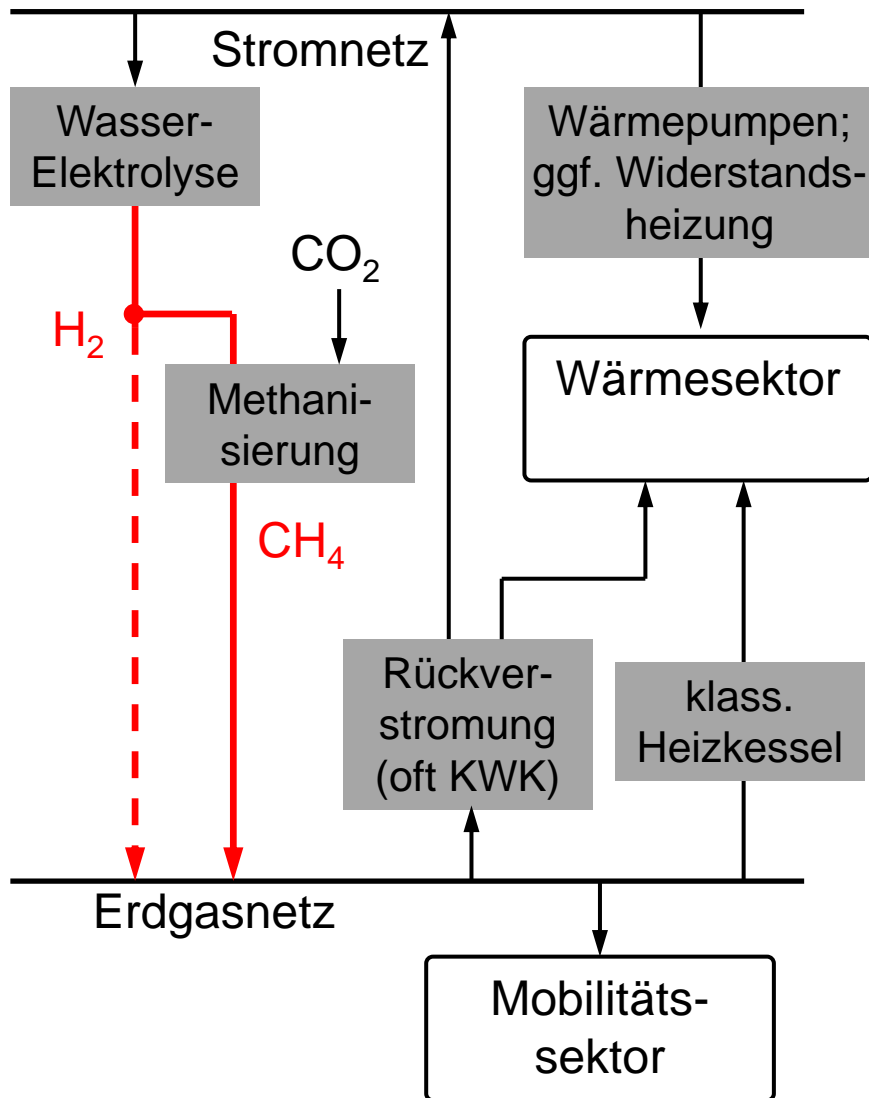


## Funktionalität 3: Lösungselement zur Defossilisierung des Wärmesektors

- jährl. Substitutionspotential/-bedarf: 178 Mio t<sub>CO<sub>2</sub></sub> (24% d. CO<sub>2</sub>-Emiss.) 770 TWh (32% d. Endenergiebed.)
- Weiterkonversion zu synt. Erdgas und Nutzung bestehender Infrastruktur; wichtige Option für die Wärmewende im Altbau
- Alternativ: Verteilung von Wasserstoff und Nutzung in Brennstoffzellenheizgeräten
- Alternativen zum Einsatz von H<sub>2</sub>
  - \* Nutzung nachwachsender Rohstoffe
  - \* Einsatz von Wärmepumpen, ggf. in Komb. mit saisonal. Wärmespeichern
  - \* Nutzung von Geothermie
- Auch hier denkbar: Bereitstellung von Flexibilitäten für Betrieb Stromsystem



# Potentielle Funktionalitäten von H2 im künftigen Energiesystem

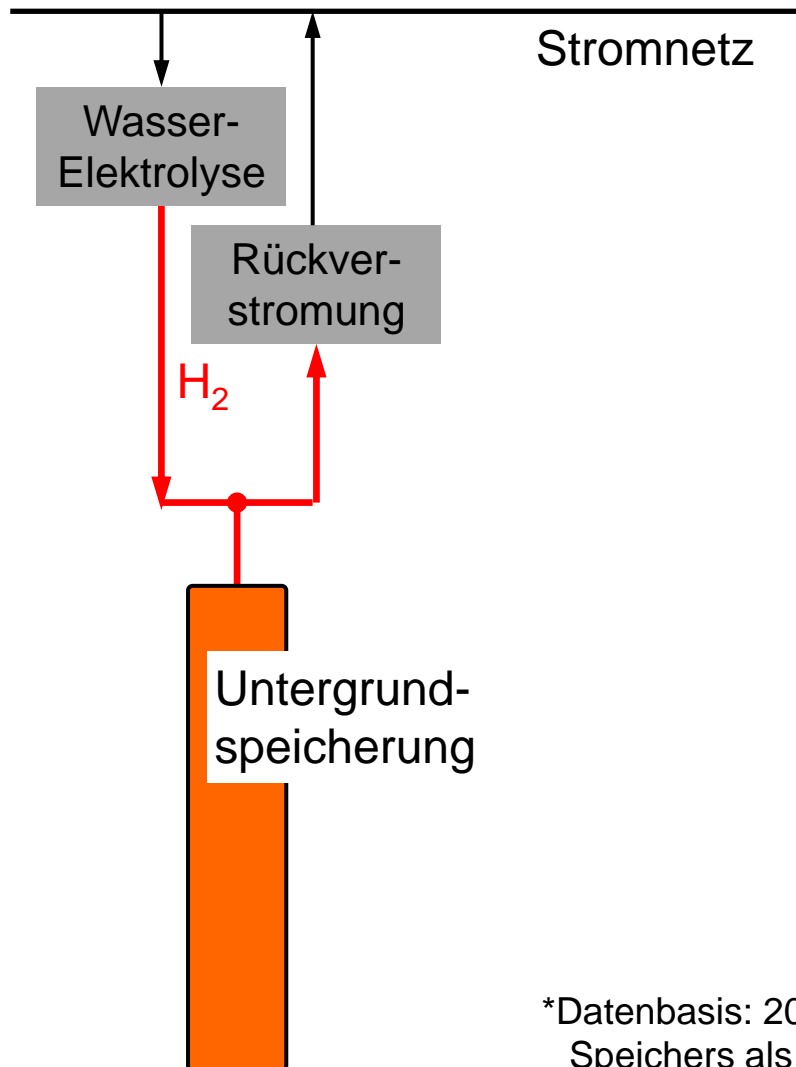


## Funktionalität 4: Lösungselement zur volkswirtschaftlichen Optimierung des Stromnetzausbaus

- Wandlung von sog. nicht-integrierbarem EE-Strom in H2 und Verteilung über H2-Infrastruktur (bzw. Wandlung in synth. Erdgas und Abgabe ins Erdgasnetz)
- anschließende Nutzung in verschied. Sektoren (insb. Wärmesektor)
- Systemdienlicher Betrieb der Power-to-Gas-Anlage ist notwendig
- volkswirtschaftlich sorgfältig zu bewerten
- Weiterer Vorteil: Infrastruktur lässt sich auch für Import von grünem/blauen Wasserstoff nutzen



# Potentielle Funktionalitäten von H<sub>2</sub> im künftigen Energiesystem

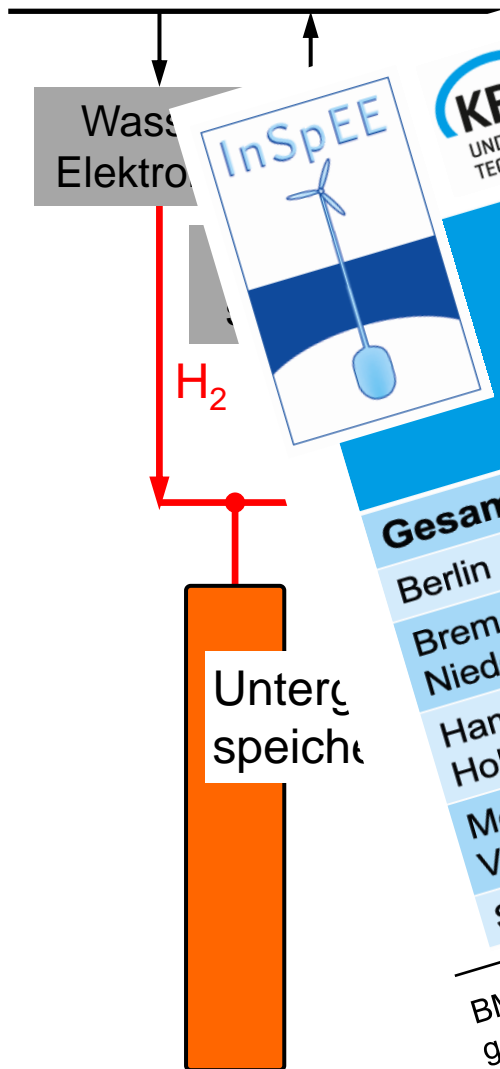


## Funktionalität 5: Lösungselement zur Langzeitspeicherung von erneuerbarer Energie

- Voraussetzung zur Erreichung hoher erneuerbarer Deckungsgrade; konkret: Überbrückung von sog. Dunkelflauten (10-20 Tage)
- benötigt werden hierfür Speicher mit hoher spez. Kapazität > 250 kWh/kW
- H<sub>2</sub>-basierte Untergrundspeicherung stellt hierfür eine sinnvolle Lösung dar:
  - ökonomische Sicht\*: < 5 EUR/kWh (Pumpspeicher: ≈ 50 EUR/kWh, Li-Ionen-Akku: ≈ 100 EUR/kWh)
  - Verfüg. Potential: ≈ 1.600 TWh (Pumpspeicher: ≈ 100 GWh)

\*Datenbasis: 2050, berücksichtigt sind sowohl Kosten für Energieteil des Speichers als auch für den entsprechend dimensionierten Leistungsteil

# Potentielle Funktionalitäten von zukünftigen Energiesystemen



	Ausgewertete Strukturen [-]	Energiegehalt	
		CAES [TWh]	H2 [TWh]
<b>Gesamt</b>	<b>269</b>	<b>4,5</b>	<b>1.614</b>
Berlin / Brandenburg	24	0,5	159
Bremen / Niedersachsen	160	2,0	702
Hamburg / Schleswig-Holstein	44	0,7	413
Mecklenburg-Vorpommern	9	0,6	193
Sachsen-Anhalt	32	0,8	147

## Lösungselement zur Nutzung von erneuerbarer

Erreichung hoher Nutzungsgrade; Nutzung von sog. (Tage) für Speicher mit > 250 kWh/kW speicherung le Lösung dar: 5 EUR/kWh (EUR/kWh) 1000 TWh (ca. 100 GWh)

BMBF-Projekt InSpEE – Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien

... berücksichtigen sind sowohl Kosten für Energieteil des ... auch für den entsprechend dimensionierten Leistungsteil

- Leitfrage: Welche Potentiale bietet Wasserstoff für die Defossilisierung unseres Energiesystems?
- die Wandlung von erneuerbarem Strom in Wasserstoff stellt ein Lösungselement für die Defossilisierung folgender Bereiche dar
  - \* Mobilität (vgl. Funktionalität 1)
  - \* Grundstoff-/Schwerindustrie (vgl. Funktionalität 2)
  - \* Wärmesektor (vgl. Funktionalität 3)
- Wasserstoff ist ein Hilfsmittel/Enabler zum Ausgleich von zeitlichen und örtlichen Unterschieden zwischen Energieverbrauch und Energiedargebot
  - \* entweder in direktem Sinne (vgl. Funktionalität 4, 5)
  - \* oder in indirektem Sinne (vgl. Funktionalität 1-3)
- Wasserstoff wird dabei dauerhaft in Konkurrenz zu alternativen Technologien stehen, die weniger Flexibilität aber höheren Wirkungsgrad bieten






- I. Welche Potentiale bietet Wasserstoff für die Defossilisierung unseres Energiesystems?
- II. Welche Potentiale werden in „Konkurrenz“ mit anderen Defossilisierungs-Optionen künftig genutzt?
- III. Ausblick: Wann muss mit der Implementierung von Wasserstoff im Energiesystem begonnen werden?

# Übersicht: Studien zur Transformation des Energiesystems mit Bezug zu Wasserstoff

Auftraggeber	Jahr	Link
Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches	2013	<a href="#">Link</a>
Agora Energiewende	2014	<a href="#">Link</a>
Dechema	2016	<a href="#">Link</a>
BASF	2016	<a href="#">Link</a>
N-ERGIE	2016	<a href="#">Link</a>
Leopoldina et al.	2017	<a href="#">Link</a>
EnergieAgentur.NRW	2017	<a href="#">Link</a>
Initiative Erdgasspeicher et al.	2017	<a href="#">Link</a>
dena	2017	<a href="#">Link</a>
Third Generation Environmentalism	2018	<a href="#">Link</a>

Auftraggeber	Jahr	Link
dena	2018	<a href="#">Link</a>
amprion	2018	<a href="#">Link</a>
Bundesverband der Deutschen Industrie	2018	<a href="#">Link</a>
Greenpeace	2019	<a href="#">Link</a>
International Council on Clean Transportation	2019	<a href="#">Link</a>
European Climate Foundation	2019	<a href="#">Link</a>
Agora Energiewende	2019	<a href="#">Link</a>
Forschungszentrum Jülich	2019	<a href="#">Link</a>

# Hier näher zu besprechende Studien

Studie	Auftraggeber	Jahr	Kurztitel	Modell	THG Reduktionsziele
	Initiative Erdgasspeicher et al.	2017	Erneuerbare Gase	Enervis Modellandschaft	100%
	European Climate Foundation	2019	Fossil Free Energy	Eigenes Modell	100%
	Leopoldina et al.	2017	Sektorkopplung	ReMOD-D	60%, 75%, 85%, 90%
	dena	2018	Integrierte Energiewende	DIMENSION+	80%, 95%
	Forschungszentrum Jülich	2019	Wege für die Energiewende	FINE Modellandschaft	80%, 95%

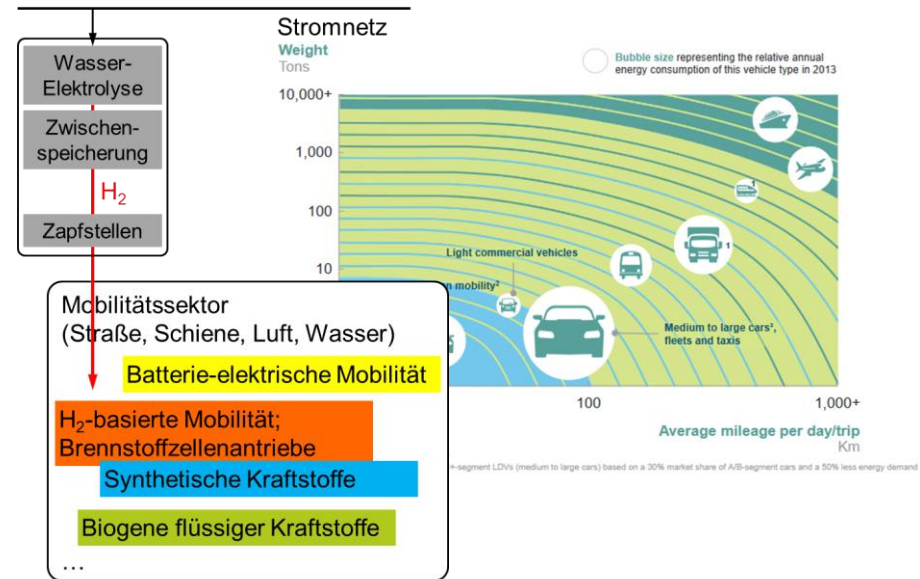
# Zu berücksichtigen bei der Interpretation der Studienergebnisse

– Simulative Ansätze erfordern mathematische Beschreibung der Konkurrenzsituation\* in den Anwendungsbereichen

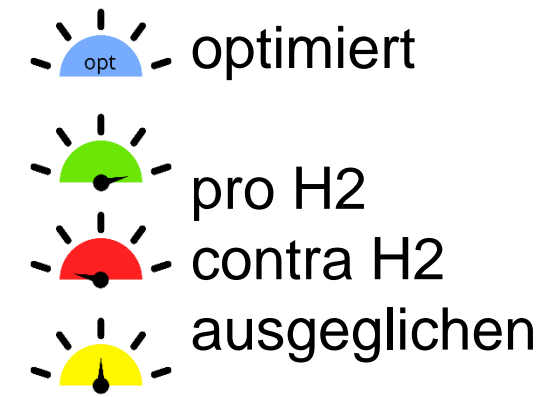
- \* Verkehr/Mobilität
- \* Wärme
- \* Grundstoff-/Schwerindustrie
- \* Speicherung

– muss anschließend in die Optimierung einbezogen werden; wird allerdings aktuell nur selten umgesetzt, stattdessen: Treffen von Annahmen

\* bzgl. Kosten, Wirkungsgraden, techn. Limitierungen






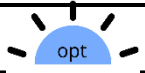

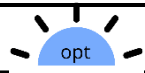

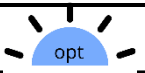


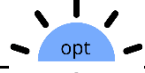

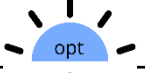

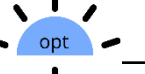


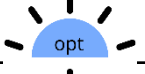




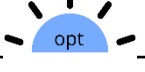






Hier:  
Indikation  
mittels  
folgend.  
Systems






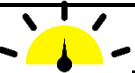




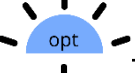























# Studienergebn. f. 80-85% THG Reduktion

Szenario	 85_offen	 85_H2	 TM80	 EL80	 80	
Fazit in Bezug auf Wasserstoff im Energiesystem	Rolle von Wasserstoff im Energiesystem eher gering; Verwendung im Verkehrsbereich und zur Erzeugung von Methan	Große Rolle von Wasserstoff im Energiesystem; Verwendung im Verkehrsbereich und zur Erzeugung von Methan	Wasserstoff wird in allen Sektoren des Energiesystems eingesetzt; Synthetisches Methan wird importiert	Wasserstoff hat auch in stark elektrifiziertem Energiesystem hohe Bedeutung	Wasserstoff und synthetisches Methan sind als Langzeitspeicher erforderlich	
Kenngroßen	40 GW PtH2 87 TWh H2	13 GW PtH2 239 TWh H2	60 GW PtH2 147 TWh H2	60 GW PtH2 151 TWh H2	22 GW PtH2 145 TWh H2	
ANNAHMEN	Verkehr					
	Wärme					
	Industrie					
	Speicherfkt.					
	Preisentwicklung					k.A.

# Studienergebn. f. 100% THG Reduktion

Szenario	 Optimiertes System	 Maximale Elektrifizierung	 HighM	 HighE	 HighM-Import
Fazit in Bezug auf Wasserstoff im Energiesystem	Grundstoff-Industrie kann nur durch erneuerbare Gase defossilisiert werden; Saisonaler Ausgleich erfordert Gasspeicher	Grundstoff Industrie kann nur durch erneuerbare Gase defossilisiert werden; Saisonaler Ausgleich erfordert Gasspeicher	Wasserstoff wird als Saisonspeicher gebraucht sowie zum Heizen und Antrieb von Brennstoffzellenautos eingesetzt	Wasserstoff wird ausschließlich als Saisonspeicher gebraucht	Wasserstoff wird wie im Szenario HighM gebraucht; ein signifikanter Teil des Wasserstoffs wird dabei importiert
Kenngroößen	281 GW PtG	170 GW PtG	k.A.	k.A.	k.A.
Verkehr					
Wärme					
Industrie					
Speicherfkt.					
Preisentwicklung					

ANNAHMEN


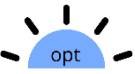




- Leitfrage: Welche Potentiale werden in „Konkurrenz“ mit anderen Defossilisierungs-Optionen künftig genutzt?
- 80/85%-Szenarien
  - H2 spielt eine Rolle in allen Anwendungen, wo genau hängt allerdings von den getroffenen Annahmen ab
  - Elektrolyse-Leistungen: ca. 40 GW (Min: 13 GW, Max: 60 GW)
  - H2-Mengen im System: ca. 150 TWh (Min: 87, Max: 239 TWh)
- Szenarien mit höheren THG-Reduktion
  - H2 spielt erneut in allen Anwendungen eine Rolle, insb. im Bereich Speicherung und Industrie
  - Elektrolyse-Leistungen und H2-Mengen gehen weiter nach oben

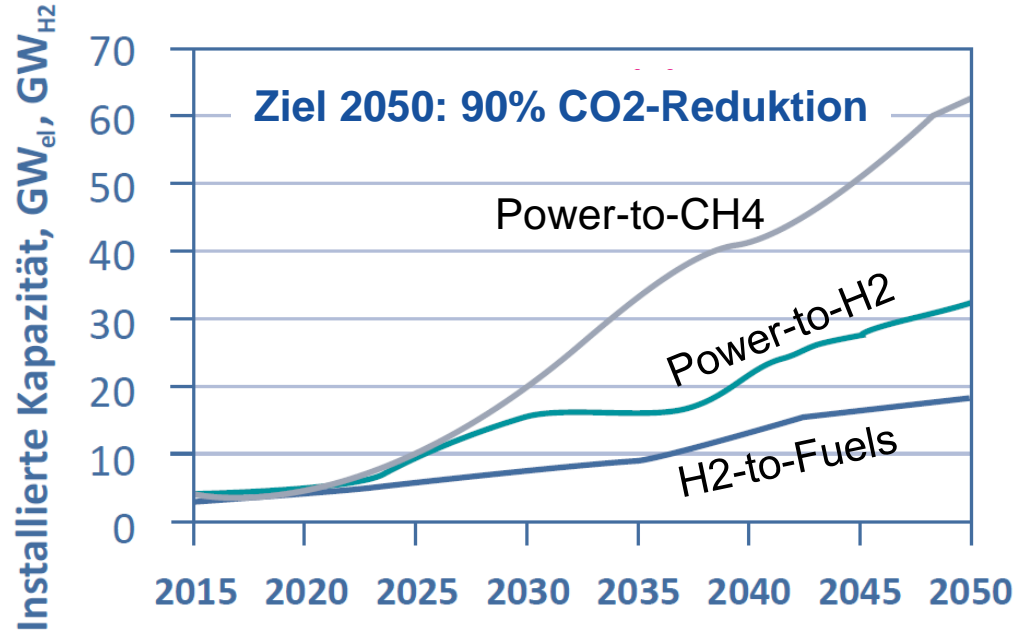
- I. Welche Potentiale bietet Wasserstoff für die Defossilisierung unseres Energiesystems?
- II. Welche Potentiale werden in „Konkurrenz“ mit anderen Defossilisierungs-Optionen künftig genutzt?
- III. **Ausblick: Wann muss mit der Implementierung von Wasserstoff im Energiesystem begonnen werden?**

# Ausblick – Transformations-/Ausbaupfade

## Aktuell nicht ausreichend betrachtet

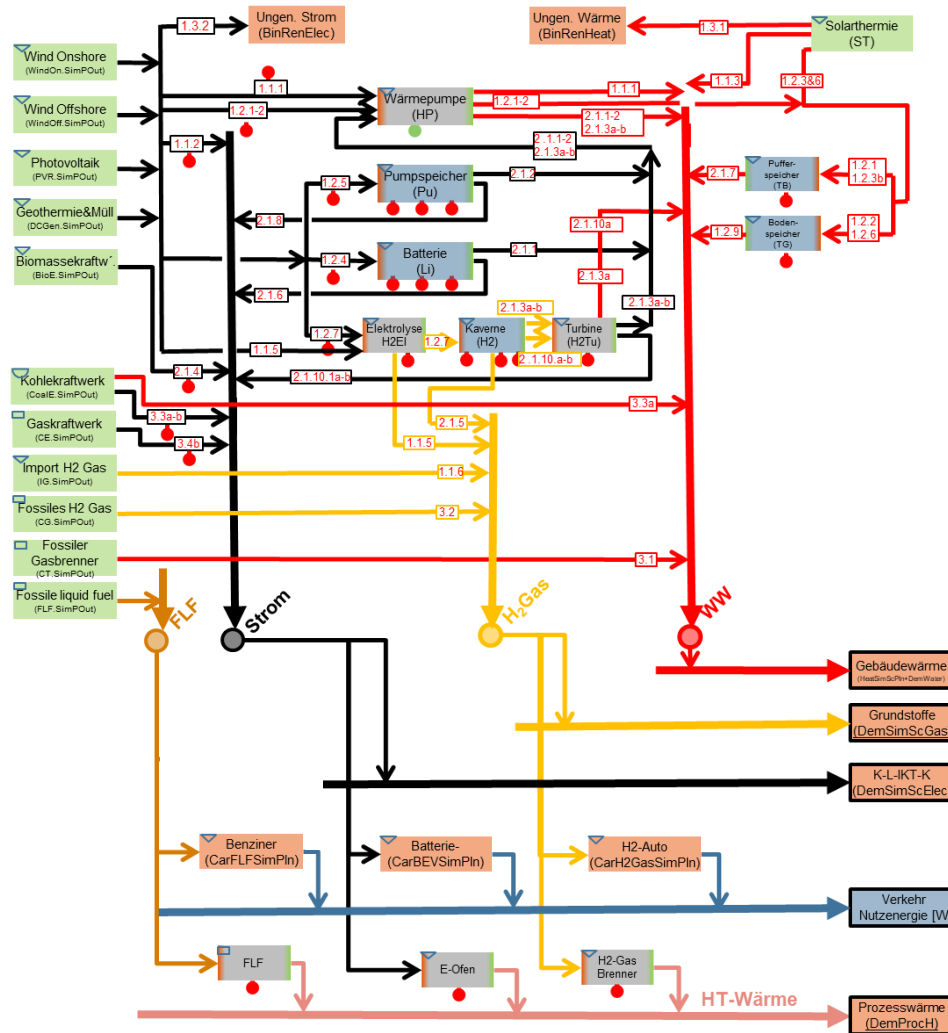
ANNAHMEN

Szenario	 90_offen
Kenngroößen	40 GW Ely 88 TWh H2
Verkehr	
Wärme	
Industrie	
Speicherfunktion	
Preisentwicklung	



# Ausblick – Transformations-/Ausbaupfade Eigene laufende Arbeiten

## Einsatz des ISFH-Werkzeuges ReLoS



Faulstich et al. (2016),  
Szenarien zur Energie-  
versorgung in Niedersachsen  
im Jahr 2050

Faulstich et al. (2016),  
Szenarien zur Energie-  
versorgung in Niedersachsen  
im Jahr 2050 –  
Zusatzgutachten zeitlich  
höher aufgelöste  
Szenarien

Energieversorgung  
in Niedersachsen  
im Jahr 2050

Sachsen

Szenarien zur Energieversorgung  
in Niedersachsen im Jahr 2050  
Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöste  
Szenarien

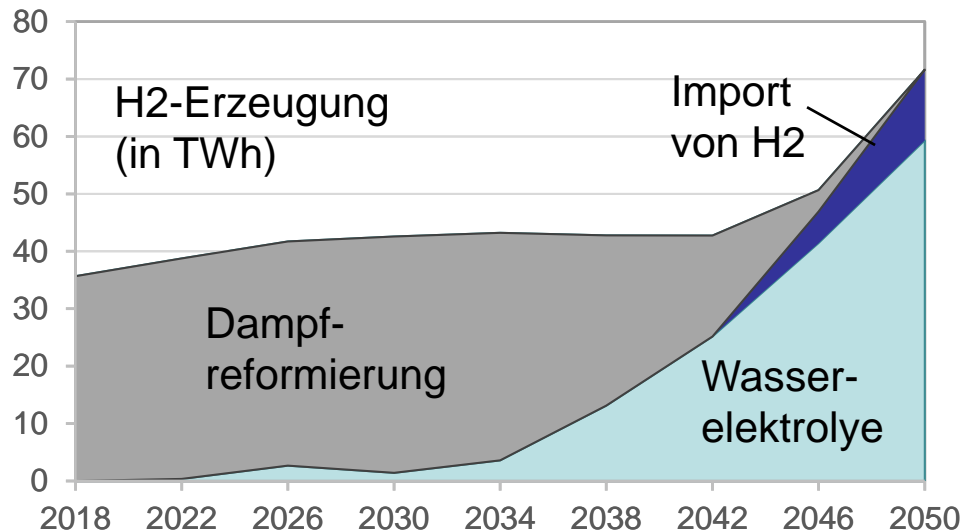
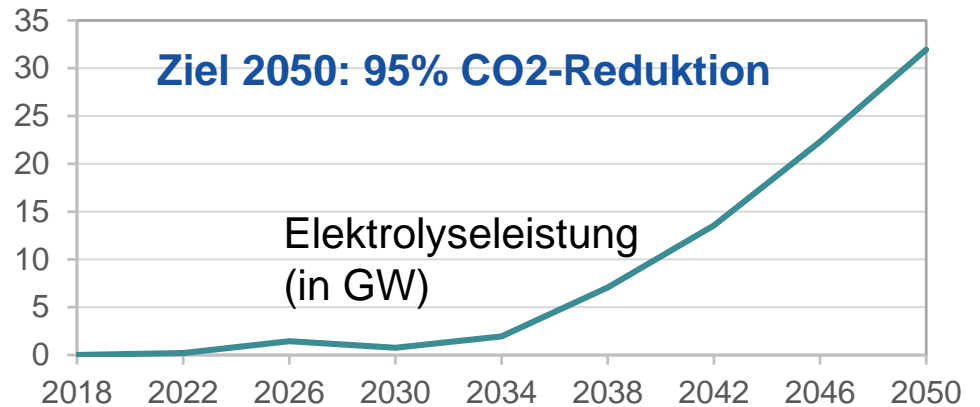
Erstellt für  
Niedersächsisches Ministerium  
für Umwelt, Energie und Klimaschutz

# Ausblick – Transformations-/Ausbaupfade Eigene laufende Arbeiten

## H2-Transformationspfad für Niedersachsen

	ISFH- Werkzeug ReLoS
Kenngroßen	33 GW Ely 72 TWh H2
Verkehr	
Wärme	
Industrie	
Speicher- funktion	
Preisent- wicklung	

ANNAHMEN





- Wasserstoff ist ...
  - Lösungselement für die Defossilisierung der Mobilität, der Grundstoff-/Schwerindustrie und des Wärmesektors
  - Hilfsmittel zum Ausgleich von zeitlichen und örtlichen Unterschieden zwischen Energieverbrauch und -dargebot
  - wird dabei dauerhaft in Konkurrenz zu alternativen Technologien stehen, die weniger Flexibilität aber höheren Wirkungsgrad bieten
- Studien zur Quantifizierung der Rolle von Wasserstoff
  - gehen teilweise von unterschiedlichen Annahmen aus
  - räumen aber Wasserstoff gleichermaßen eine Bedeutung in oben aufgeführtem Sinne ein
- Verlauf der Zubaukorridore für die Wasserelektrolyse/P2Gas
  - aktuell schlechte Daten-/Studienlage
  - hängt von unterschiedlichen Parametern ab
  - muss im Rahmen weiterführender Arbeiten geklärt werden

# Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff – Wirkung auf das Gesamtenergiesystem

Florian Peterssen<sup>1,3</sup>, Lena Böhre<sup>1,3</sup>, Raphael Niepelt<sup>2,3</sup>,  
Rolf Brendel<sup>2,3</sup>, Richard Hanke-Rauschenbach<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover  
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)

<sup>2</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)

<sup>3</sup>Leibniz Forschungszentrum Energie 2050

**Vielen Dank für Ihr Interesse!**

**... sprechen Sie uns gern an:**

- Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel  
Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)  
Institutsleiter  
E-Mail: [brendel@isfh.de](mailto:brendel@isfh.de)
- Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach  
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)  
Institutsleiter  
E-Mail: [rhr@ifes.uni-hannover.de](mailto:rhr@ifes.uni-hannover.de)

# Modellieren der Energiesystem-Transformation im Verbund ISFH-IfES

Ziel: Entwicklung eines Energiesystemsensors, der die entscheidenden ökonomischen und technischen Einflussfaktoren sowie die Akzeptanz der Energiewende berücksichtigt und Transformationspfade abbildet.

## Schwerpunkte

- Techno-ökonomische und ökologische Aspekte der Defossilisierung des Strom-, Wärme- und Verkehrssektors
- Technikfolgenabschätzung von neuen oder weiterentwickelten Energietechnologien

## Features

- Energie-Infrastrukturen
- Technologiescharfe örtliche Verteilung
- Stündlicher Auflösung der Betriebsführung
- Begrenzte Flächen- und Raumnutzung

## Fragestellungen (beispielhaft)

- Regionale Auswirkungen der Energiewende in Niedersachsen
- Bedarf an Schlüsseltechnologien
- Standorte für Erzeugungs- und Wandlungsanlagen oder Speicher und benötigter Netzausbau

## Partner

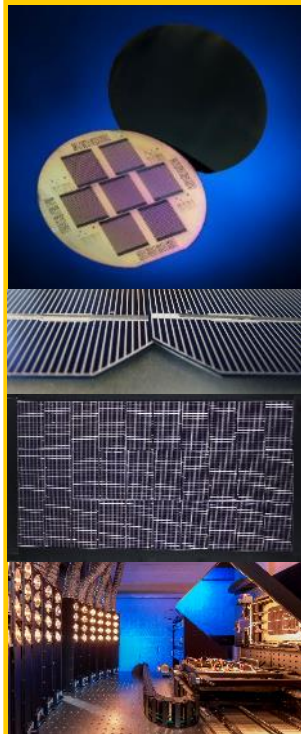


# Forschung am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)



Landesinstitut und An-Institut LUH | Mitglied der Zuse-Gemeinschaft | R&D für Photovoltaik und Solare Energiesysteme | R&D in Kooperation mit Industriepartnern | 155 Mitarbeiter | 12 Mio. € Umsatz | 70% Drittmittel

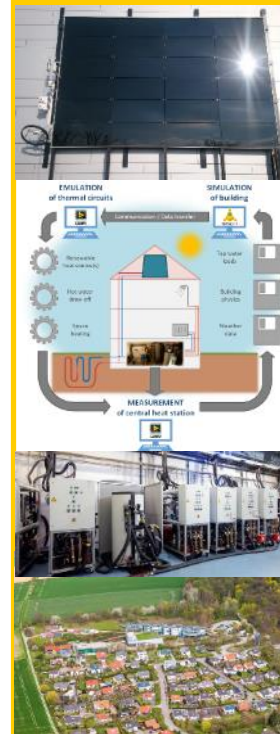
## Abteilung Photovoltaik: R&D vom Siliziumwafer bis zum Solarmodul



### Highlights:

- Weltrekord für p-typ-Si-Solarzellen ( $\eta=26,1\%$ )
- Innovative lückenlose Verschaltungstechnik für höchsteffiziente Si-Solarmodule ( $\eta=22,1\%$ )
- DAkkS-Akkreditiertes Kalibrierlabor für Spektralradiometeter und Solarzellen

## Abteilung Solare Systeme: R&D von der Einzelkomponente zum Quartier



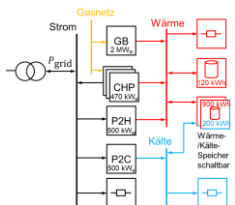
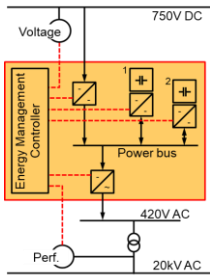
### Highlights:

- Glasfassade mit integrierter Solarwärmegewinnung
- Hardware-in-the-Loop-Teststände für Energiesysteme von Gebäuden
- Simulation und Feldtest an einem Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier für Niedersachsen

# Forschung am Fachgebiet für elektrische Energiespeichersysteme des IfES

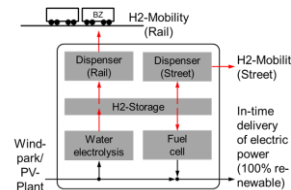
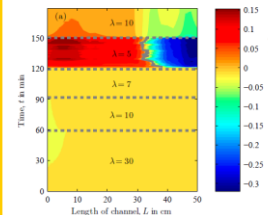
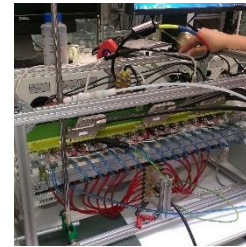
Übergeordnete Zielsetzung: Gestaltung und Betriebsführung von vernetzten Energie- und Stoffwandlungssystemen und Weiterentwicklung ausgewählter Komponenten und Prozesse

## AG Energiesysteme und Speicher



- Technologieauswahl- und Auslegungsmethodiken f. Energiespeicher
- Gestaltung von Fahrzeug-Energiesystemen zur Nutzung erneuerbarer Energien
- Gestaltung und flexibilisierter Betrieb von stationären Power-to-Heat/Cold-Systemen

## AG Wasserstoff



- PEM-Wasserelektrolyse im Kontext von Power-to-Gas-Anwendungen: Material- und Apparateentwicklungen
- Techno-ökonomische Bewertung von Geschäftsmodellen im Kontext der H<sub>2</sub>-Bereitstellung