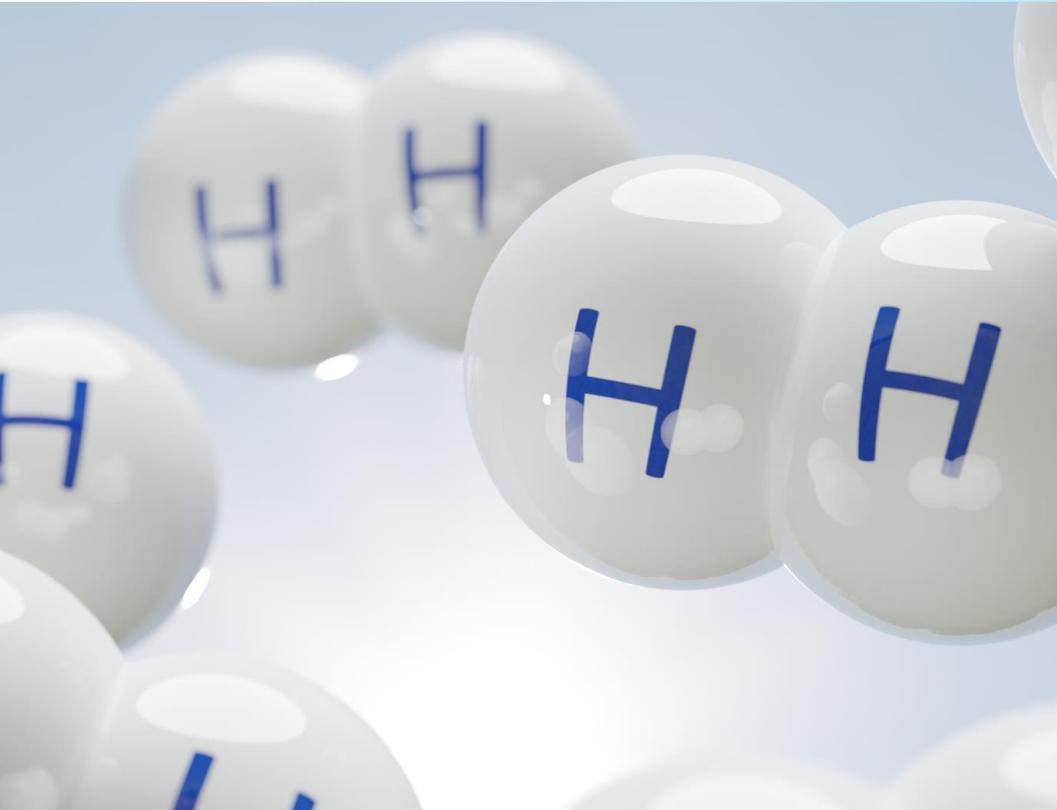


# Die Rolle des Wasserstoffs im Stromsystem

Damien Rolland und das Wasserstoff-Kompass-Team



## **Einleitung: Systemtransformation**

- Endenergieverbrauch
- Stromsystemstabilität

## **Die Rolle von Wasserstoff für die Stromsystemstabilität**

- Verbrauchsflexibilisierung
- Speicherung von Energie
- Energietransport und -import

## **Wasserstoffbedarfe für das Stromsystem**

## **FuE-Bedarfe entlang der H<sub>2</sub>-Prozesskette im Stromsystem**

## **Übersicht von Studien und Szenarien**

# Einleitung: Systemtransformation

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Energiesystem



Die Defossilisierung des Energiesystems erfolgt primär durch den zunehmenden Einsatz erneuerbaren Stroms, sowohl direkt als auch indirekt durch Wasserstoff und seine Derivate. Dabei sinkt der Gesamtenergieverbrauch durch Effizienzsteigerung.



Das Stromsystem als Teil des Energiesystems gewinnt also an Bedeutung und ermöglicht, die unterschiedlichen Sektoren miteinander zu koppeln. Das Gesamtsystem wird dadurch integrierter und flexibler, aber auch komplexer.



Aufgrund der wetterabhängigen fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie ist es in einem 100% erneuerbaren Stromsystem eine besondere Herausforderung, Erzeugung und Verbrauch in Einklang zu bringen, um jederzeit die Systemstabilität gewährleisten zu können.



Die Prozessketten „Strom-zu-Wasserstoff (und Derivaten)“ sowie „Wasserstoff (und Derivate)-zu-Strom“ sind notwendiger Bestandteil eines zukünftigen sicheren Stromsystems:

- Elektrolyseure sind flexible Stromverbraucher.
- Wasserstoff(-Derivate) ermöglichen die langfristige, großskalige Speicherung von Energie zur späteren Rückverstromung.
- Wasserstoff(-Derivate) ermöglichen den Transport bzw. Import von Energie über weite Strecken.

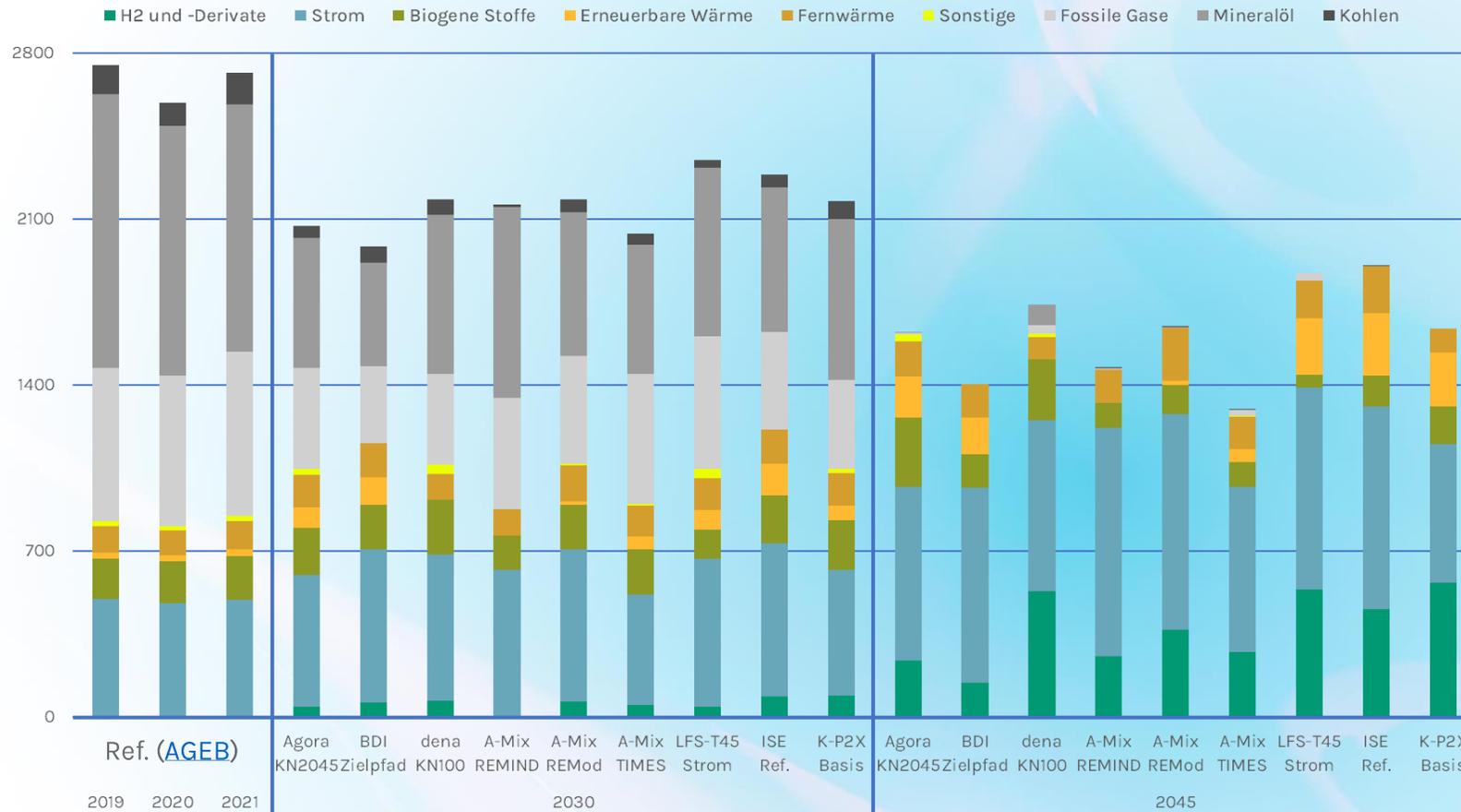
# Endenergieverbrauch



- Mehrere Studien haben die Transformation des Energiesystem bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 modelliert, um mögliche Szenarien zu skizzieren. (s. Liste der betrachteten Studien/Szenarien [Folie 27](#))
- Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs zeigt: die Defossilisierung erfolgt wesentlich durch Elektrifizierung. Bis 2045 steigt der Anteil des Stroms sowie des Wasserstoffs und seiner Derivate am Endenergieverbrauch deutlich.
- Dabei sinkt der Gesamtenergieverbrauch dank der effizienteren elektrischen Anwendungen, insbesondere im Verkehrsbereich und in der Gebäudewärme.

# Endenergieverbrauch

Jährlicher Endenergieverbrauch in Deutschland laut Szenarien (TWh)



## Defossilisierung durch Elektrifizierung:

a) Grundsätzliche Einsparung durch **effiziente elektrische Anwendungen**

b) Direkte Nutzung von **Strom** (2045: 36–65% der Endenergie)

c) Indirekte Nutzung von Strom durch **H<sub>2</sub> und seine Derivate** (2045: 10–35% der Endenergie)

Szenarien (s. Liste [Folie 27](#))

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Die Rolle von Wasserstoff für die Stromsystemstabilität

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Stromsystemstabilität

Zur Gewährleistung der Systemstabilität können fünf Stellschrauben unterschieden werden:

1. der Ausbau sowohl von Windkraft- als auch PV-Anlagen
2. die Stärkung des Stromnetzes auf der überregionalen und europäischen Ebene
3. die Flexibilisierung des Verbrauchs (sogenanntes „Demand-Side-Management“)
4. die Speicherung durch Energieumwandlung und Rückverstromung von H<sub>2</sub> bzw. -Derivaten
5. der Import von Wasserstoff und seinen Derivaten zur Verstromung



Grund-  
stellschrauben

Elektrolyse und Wasserstoff  
spielen eine zentrale Rolle

Jede einzelne spielt eine wesentliche Rolle und ihr jeweiliger Beitrag hängt von den jeweils anderen ab.

In diese Präsentation konzentrieren wir uns auf die Rolle von Wasserstoff.

# Verbrauchsflexibilisierung



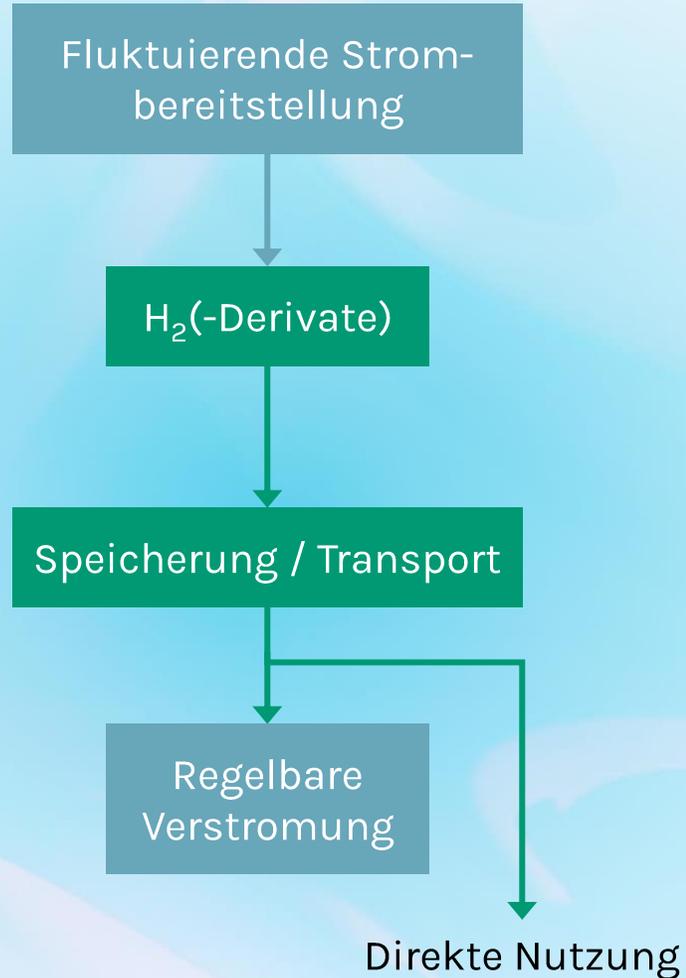
JP JOULE

- Die Flexibilisierung des Stromverbrauchs ist eine entscheidende Stellschraube, um (fluktuierende) Stromerzeugung und Verbrauch in Einklang zu bringen.
- Neben Elektrodenkessel, Ladesäulen für E-Autos und Wärmepumpen bieten auch Elektrolyseure signifikantes Flexibilisierungspotenzial: sie können je nach Stromangebot ab- oder zugeschaltet bzw. runter- oder hochgefahren werden.

# Energiespeicherung

Für die **langfristige Speicherung**, die große Kapazitäten einbezieht, ist die Speicherung von Energie in Form von Molekülen erforderlich. Im heutigen Stromsystem nutzen wir dazu fossile Energieträger, aber in Zukunft werden **Wasserstoff oder seine Derivate** diese Funktion übernehmen.

Mit Hilfe von EE-Strom werden H<sub>2</sub>(-Derivate) erzeugt, die einfach speicher- und transportierbar sind und bei Bedarf rückverstromt oder direkt eingesetzt werden können:



Für die Stromsystemstabilität ist die Rückverstromung von H<sub>2</sub>(-Derivaten) in Gaskraftwerken in allen betrachteten Szenarien notwendig. Aufgrund der Knappheit von H<sub>2</sub>(-Derivaten) sowie der Kosten und hohen Verlusten entlang der Gesamtkette werden H<sub>2</sub>-Kraftwerke nur als **Reserve** eingesetzt, um Spitzenlasten oder Extremwetterphasen abzudecken. In solchen seltenen Fällen müssen hohe Leistungen gesichert werden.

# Energietransport und -import



- Wasserstoff und seine Derivate lassen sich insbesondere über weite Strecken einfacher transportieren als Strom. Dadurch lässt sich Energie aus Ländern importieren, die hohe Potenziale an erneuerbare Energien haben.
- Wasserstoff kann gasförmig per Pipeline, flüssig per Schiff, oder mittels sog. Wasserstoff-Träger (z.B. *Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC*) importiert werden.
- Auch Wasserstoffderivate lassen sich gut transportieren. Hierzu zählen Methanol, Ammoniak, Methan und langkettige Kohlenwasserstoffe.

# Wasserstoffbedarfe für das Stromsystem

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Stromerzeugung



- Bis 2045 steigen die jährlichen Stromerzeugungsmengen deutlich an.
- Laut Studienlage besteht ein 100% erneuerbares Stromsystem zu ungefähr 90% aus fluktuierendem Wind- und Solarstrom sowie zu etwa 10% aus steuerbarem Strom.
- Der steuerbare Strom trägt zur Stabilität und Versorgungssicherheit bei und stammt laut Studien etwa zur Hälfte aus Wasserstoff/ E-Methan und zur Hälfte aus Wasserkraft, Biomasse und Abfällen.

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

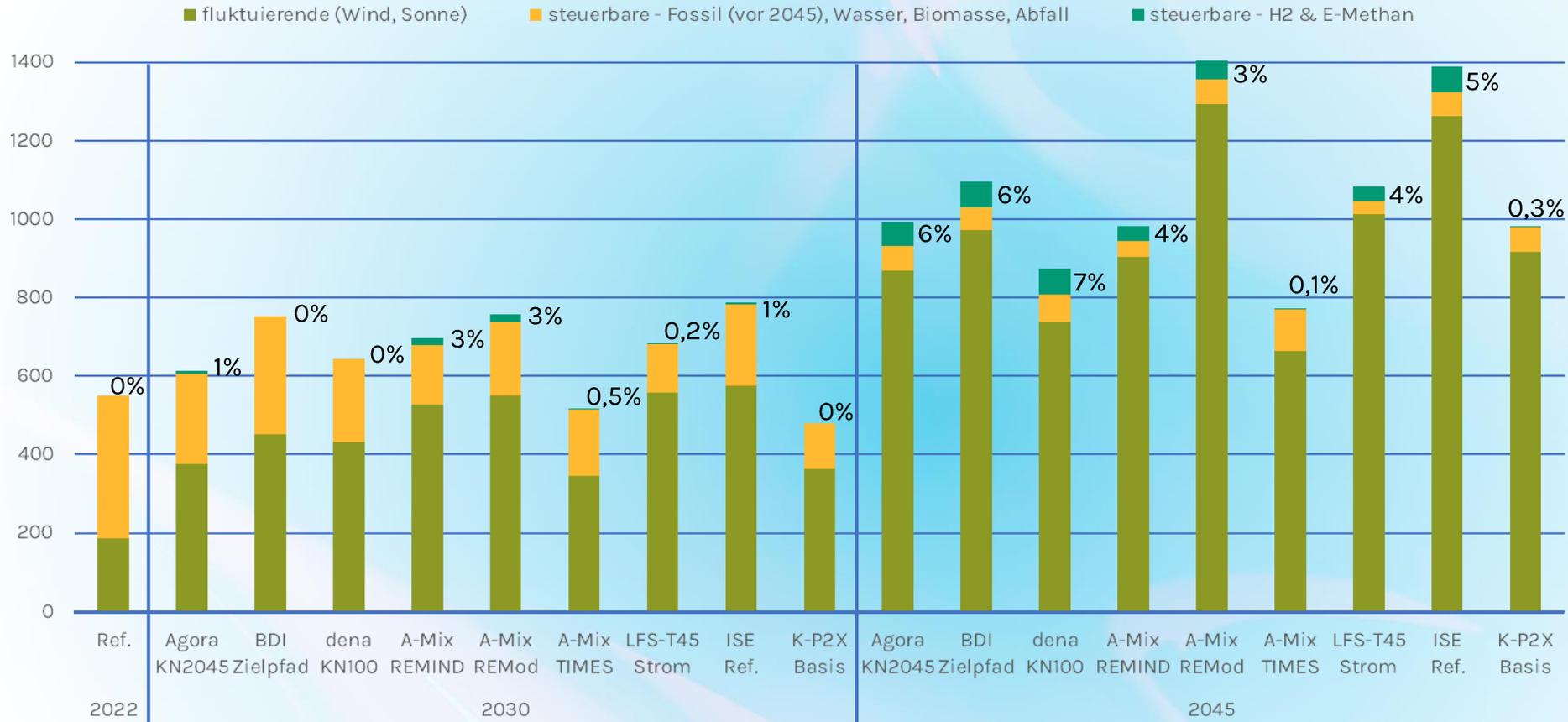
Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Stromerzeugung

Fluktuierende und steuerbare Stromerzeugung (TWh/Jahr)



2045:  
1-67 TWh Strom aus H<sub>2</sub>

2030:  
0-21 TWh Strom aus H<sub>2</sub>

Szenarien (s. Liste [Folie 27](#))

Steuerbare Stromerzeugung  
noch größtenteils aus  
fossilen Energieträgern

Steuerbare Stromerzeugung in den meisten  
Szenarien jeweils etwa zur Hälfte aus H<sub>2</sub>/E-Methan  
bzw. aus Wasser, Biomasse und Abfall

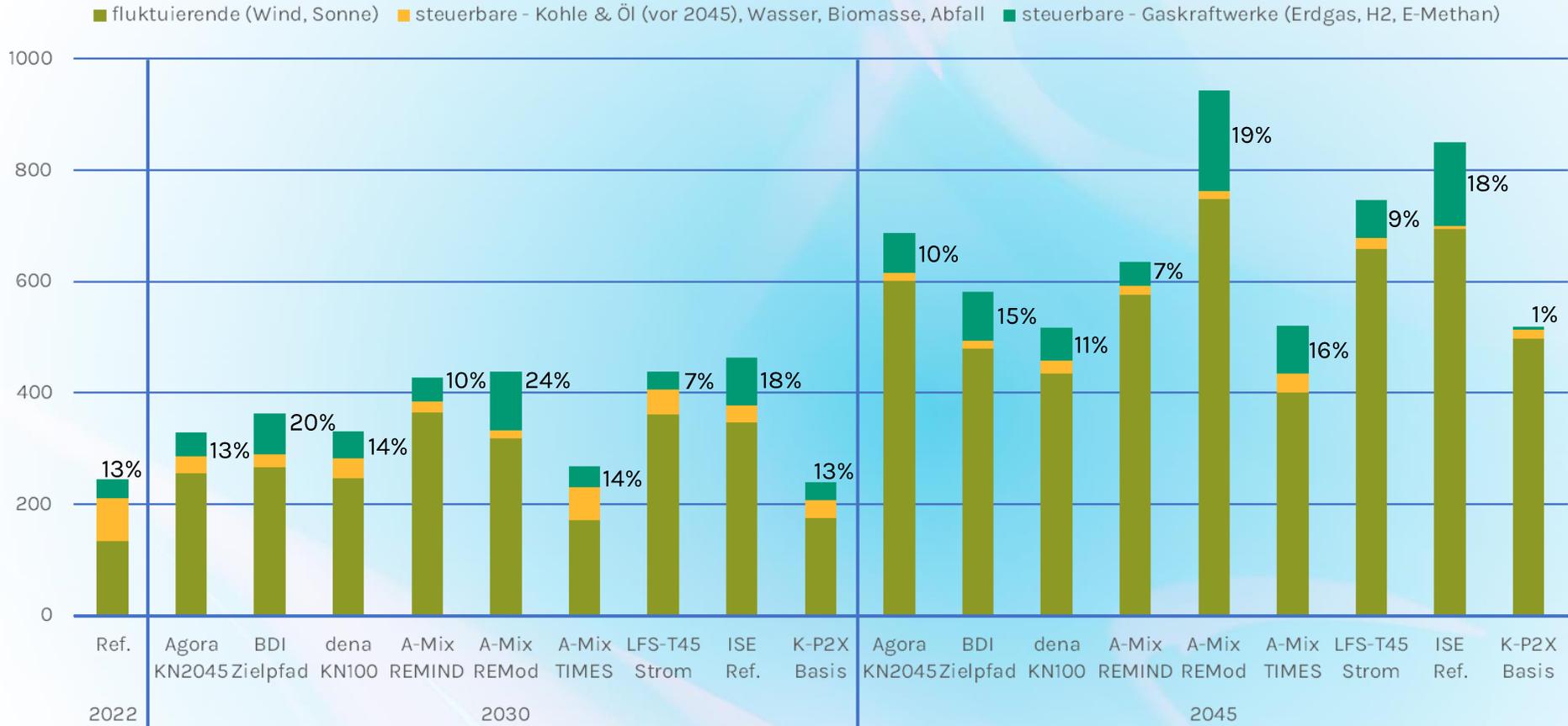
# Kraftwerkskapazitäten



- Die Kraftwerkskapazitäten steigen ebenfalls deutlich an.
- Dies betrifft insbesondere die (H<sub>2</sub>-Ready-) Gaskraftwerkleistung, die um den Faktor 2 bis 4 erhöht wird, da sie hohe Leistungen während Dunkelflauten sichern müssen.

# Kraftwerkskapazitäten

Fluktuierende und steuerbare Kraftwerkskapazitäten (GW)



2045:  
43-181 GW Gaskraftwerksleistung  
(6 GW bei Kopernikus-P2X)

2030:  
32-106 GW Gaskraftwerksleistung

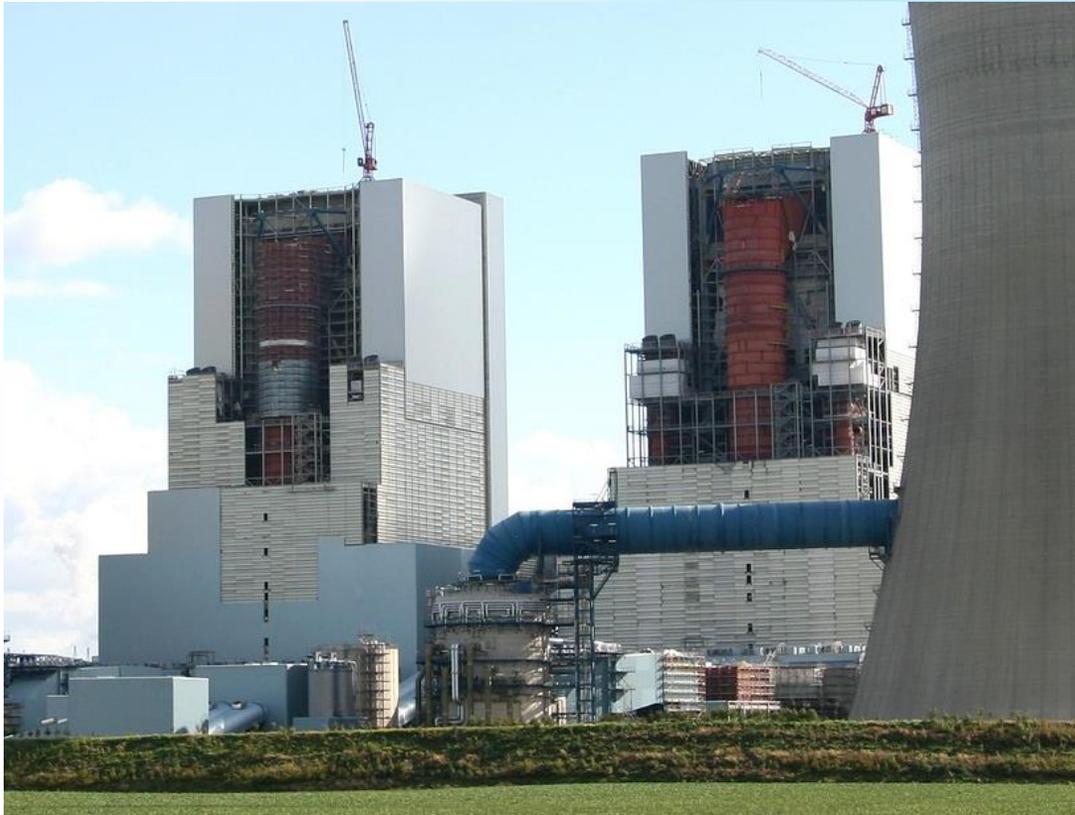
2022:  
34 GW Erdgaskraftwerksleistung

Szenarien (s. Liste [Folie 27](#))

Gaskraftwerke laufen noch im Wesentlichen mit Erdgas.

Gaskraftwerke laufen mit H<sub>2</sub> oder E-Methan. Die Studien gehen von Verstromung in Turbinen aus.

# Gaskraftwerke-Laufzeiten



- Wasserstoff-Gaskraftwerke werden allerdings wenig laufen.
- Ihre Stromgestehungskosten sind hoch, in seltenen Fällen sichern sie jedoch die Stromversorgung.
- Mit geringen Jahresvolllaststunden sind Investitionskosten entscheidender für die Wahl der Verstromungstechnologie.

Inhalt

Systemtransformation

Rolle von Wasserstoff

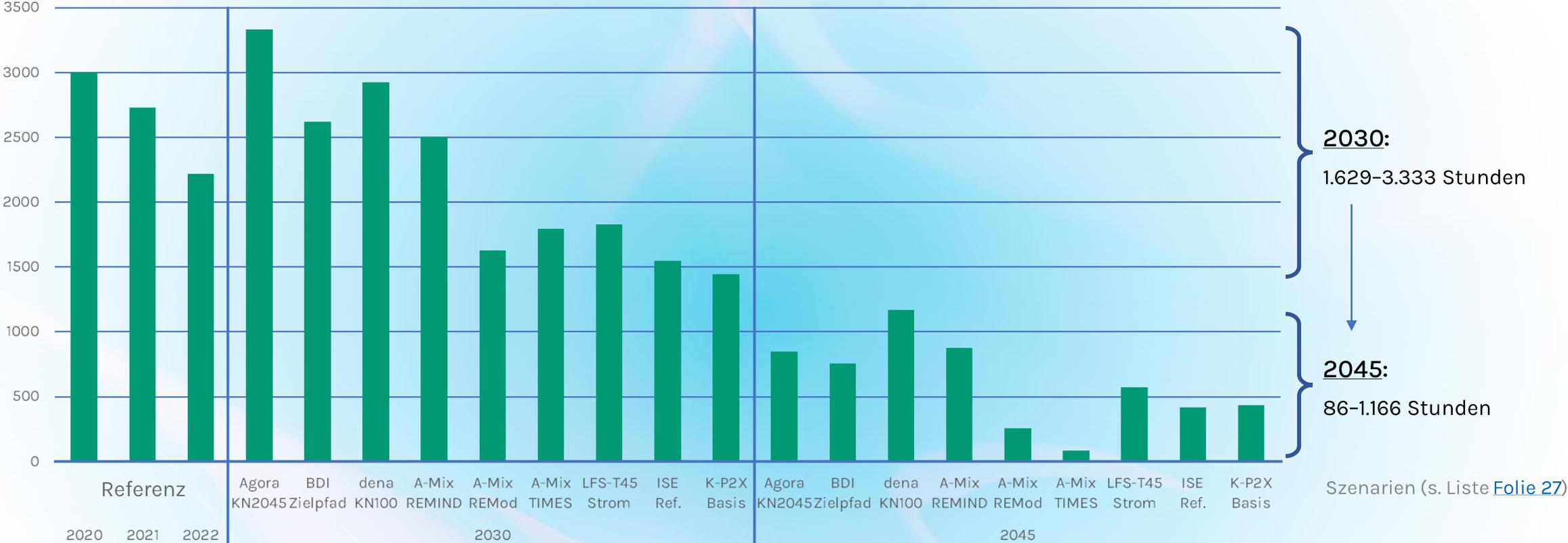
Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# Gaskraftwerke-Laufzeiten

Jahres-Volllaststunden von Gaskraftwerken (Erdgas, H<sub>2</sub>, E-Methan)



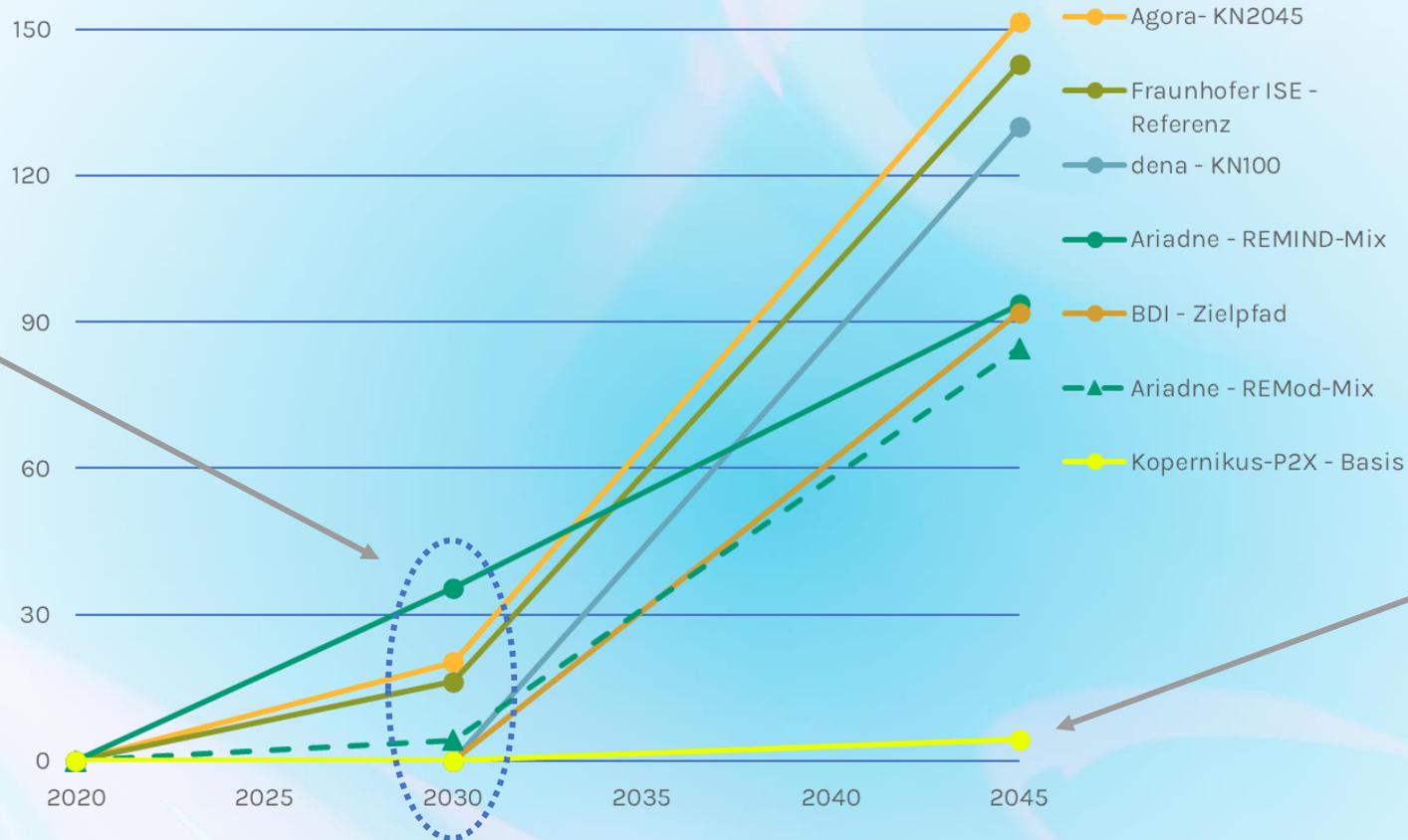
# Bedarfe zur Verstromung



- In den Modellen werden zur Verstromung in Reservekraftwerken Biogas, Wasserstoff und/oder sein Derivat E-Methan betrachtet.
- Die meisten Szenarien erwarten, dass 2045 85 bis 150 TWh Wasserstoff oder E-Methan verstromt werden.
- 2030 ist die  $H_2$ -Verfügbarkeit noch limitiert, somit stammt der steuerbare Strom noch größtenteils aus fossilen Energiequellen, insbesondere Erdgas.

# Bedarfe zur Verstromung

Bedarfe an Wasserstoff oder E-Methan zur Verstromung (TWh/Jahr)



Wegen limitierter H<sub>2</sub>-Verfügbarkeit wird noch Erdgas zur Verstromung genutzt werden.

Im Basis-Szenario von Kopernikus-P2X wurde der Verstromung von Wasserstoff eine untergeordnete Rolle zugesprochen, und Übertragungsleitungen (Stromimporte) wurden für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit bevorzugt.

# FuE-Bedarfe entlang der H<sub>2</sub>-Prozesskette im Stromsystem

Inhalt

Systemtransformation

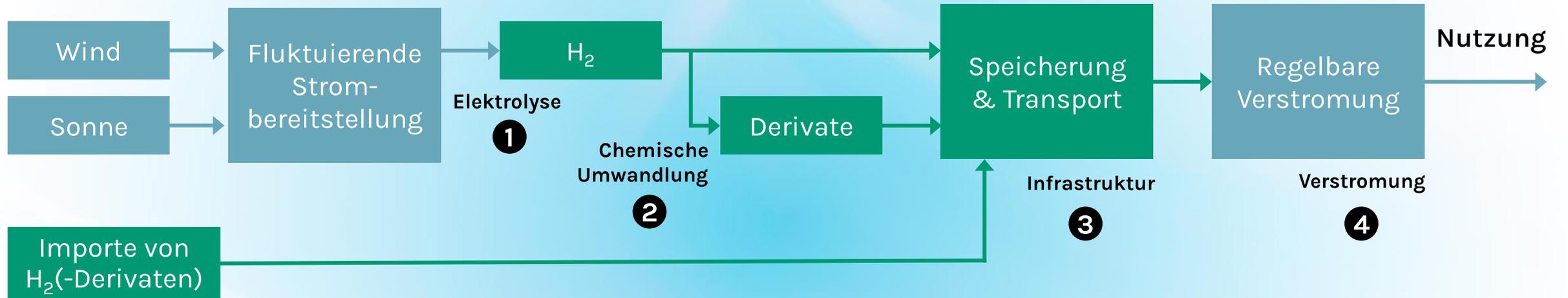
Rolle von Wasserstoff

Bedarfe an Wasserstoff

FuE-Bedarfe

Studien

# H<sub>2</sub>-Prozesskette im Stromsystem



# FuE-Bedarfe: H<sub>2</sub> im Stromsystem

## Elektrolyse

1

Der Umgang mit fluktuierender Stromerzeugung muss bei dem Aufbau eines resilienten Stromsystems berücksichtigt werden:

- Inwieweit werden Elektrolyseure flexibel oder kostenoptimal betrieben?
- Wie wirkt sich ein flexibler Betrieb in der Praxis auf die Elektrolyseur-Lebensdauer aus?

Der Elektrolyse-Stack muss entsprechend robuster gegen mechanische Belastungen im flexiblen Betrieb durch Temperatur- und Druckschwankungen werden (Reduktion von Elektroden- und Katalysatorverschleiß).

Wie kann "Process Orchestration" (Management von mehreren Elektrolyse-Stacks) weiterentwickelt werden, um zur Flexibilisierung beizutragen?

# FuE-Bedarfe: H<sub>2</sub> im Stromsystem

## Chemische Umwandlung

2

Chemische Umwandlungen zu H<sub>2</sub>-Derivaten weisen teils hohe Energieverluste, weshalb an effizienteren Prozessen geforscht werden muss.

Kohlenstoffbasierte Derivate wie Methan, Methanol und Fischer-Tropsch-Produkte erfordern verlässliche CO<sub>2</sub>-Quellen, weshalb eine effizientere CO<sub>2</sub>-Abscheidung (insbesondere auch aus der Luft) weiterer Entwicklungen bedarf.

Synthetisches Methan ermöglicht die einfache Weiternutzung bereits existierender Gaskraftwerke und -infrastrukturen, und hat eine höhere volumetrische Energiedichte als H<sub>2</sub>, während flüssige Derivate (PtL) aufgrund ihrer noch höheren volumetrischen Energiedichte besonders vorteilhaft für den Import von Energie sind. Es bedarf weiterer Begleitforschung inkl. ökonomischer, ökologischer und sozialer Systembetrachtung zur Analyse regionaler Umsetzungsmöglichkeiten.

# FuE-Bedarfe: H<sub>2</sub> im Stromsystem

## Infrastruktur

3

Allgemein gilt es, existierende Infrastrukturelemente (z.B. Anschlüsse, Leitungen und anderen Komponenten) hinsichtlich einer potenziellen Materialversprödung durch Wasserstoff zu prüfen, Dichtigkeitstests durchzuführen und geeignete Monitoringmethoden zu entwickeln.

Wasserstoffpipelines erfordern die Erhebung von Wasserstoffreinheitsanforderungen, je nach Anwendungsfall die Entmischung („Deblending“) von Erdgas-Wasserstoffgemischen, die (Weiter-)Entwicklung von elektrischen Kompressoren, sowie

auch hier die Untersuchung der genutzten Materialien, insbesondere in Form von Langzeittest nach erfolgreichen initialen Ergebnissen.

Wasserstoffspeicher gilt es weiterhin bezüglich lokaler Speichermöglichkeiten, Fahrweisen großer Wasserstoffspeicher sowie mikrobiologischer Prozesse in Poren- beziehungsweise Aquiferspeichern zu untersuchen. Auch hier spielt die Entwicklung geeigneter Monitoringmethoden und Gasanalytik eine wichtige Rolle.

# FuE-Bedarfe: H<sub>2</sub> im Stromsystem

## Verstromung

4

Es gibt verschiedene Verstromungstechnologien: Brennstoffzellen, Gasturbinen, und Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke. Gasturbinen sind flexibler als Dampf-Turbinen und können innerhalb von ca. 15 Min. (im Vgl. zu etwa 2 Std.) hochfahren. Reservekraftwerke werden nur in seltenen Fällen (Versorgungsengpässe) laufen, so dass die Investitionskosten so weit wie möglich reduziert werden müssen.

Für die Stromerzeugung mittels Wasserstoffturbinen sind weitere Materialentwicklungen (gegen Korrosion und für höhere Prozess-Temperaturen) notwendig. Das Verbrennungsverfahren muss (fluktuierende)

H<sub>2</sub>-Erdgas-Beimischungen mit 0 bis 100 Prozent H<sub>2</sub> akzeptieren können, ggf. müssen sogar neue Verbrenner-Designs entwickelt werden.

Strategien zur Emissionsvermeidung (insbesondere NO<sub>x</sub> bei über 1500 °C) müssen weiter adressiert werden.

Generell müssen stationäre Brennstoffzellen (inkl. Abwärmenutzung) effizienter und langlebiger werden. (Katalysator-)Materialien (inkl. innovativer Recyclingkonzepte) sowie Systemintegration / -Demonstration spielen eine wesentliche Rolle.

# Studien und Szenarien



ABKÜRZUNG	INSTITUT	STUDIE	SZENARIO
--	Kopernikus-Ariadne	Szenarien zur Klimaneutralität: Vergleich der „Big5“-Studien	
Agora - KN2045	Agora	Klimaneutrales Deutschland 2045	KNDE2045
BDI - Zielpfad	BDI	Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft	Zielpfad
dena - KN100	dena	Aufbruch Klimaneutralität	KN100
A-Mix - REMIND A-Mix - REMod A-Mix - TIMES	Kopernikus-Ariadne	Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045	Szenario: Technologie-Mix Modellen: REMIND, REMod, TIMES PanEU
LFS-T45 - Strom	BMWK	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3	T45-Strom
Fhg ISE	Fraunhofer ISE	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Update Klimaneutralität 2045)	Referenz Szenario
Kop. - P2X	Kopernikus-P2X	Roadmap 4.0 - Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit P2X-Technologien	Basis Szenario
--	Deutsche Umwelthilfe	Versorgungssicherheit mit 100% EE	

# Kontakt

**acatech** – Deutsche Akademie  
der Technikwissenschaften  
Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München

Hauptstadtbüro  
Georgenstr. 25  
10117 Berlin  
T +49 (0)30/2 06 30 96-0  
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

[info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)  
[www.acatech.de](http://www.acatech.de)

**DECHEMA** Gesellschaft für  
Chemische Technik und  
Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee  
2560486 Frankfurt am Main  
T +49 (0)69 75 64-0

[info@dechema.de](mailto:info@dechema.de)  
[www.dechema.de](http://www.dechema.de)

## Ansprechpartner\*innen:

Dr. Andrea Lübcke  
[luebcke@acatech.de](mailto:luebcke@acatech.de)

Dr. Damien Rolland  
[damien.rolland@dechema.de](mailto:damien.rolland@dechema.de)

[www.wasserstoff-kompass.de](http://www.wasserstoff-kompass.de)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages