

Grüner Wasserstoff; Wie könnte der Bedarf in Baden-Württemberg gedeckt werden

15. Februar 2024

Prof h.c. Olaf Jedicke

Innovation Wasserstofftechnologie, modularer Aufbau und systemische Integration



Wasserstofftechnologie am KIT

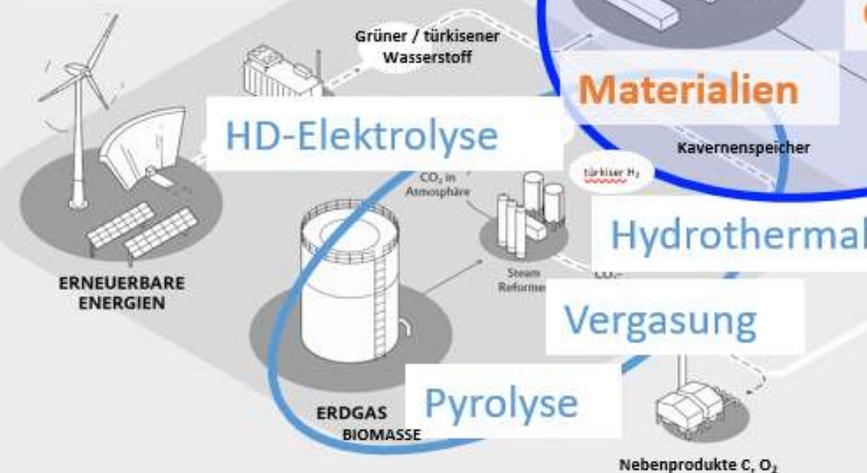


Wasserstofftechnologie am KIT

QUERSCHNITTSTHEMEN

- Sicherheitsforschung
- Lehre & Ausbildung
- Materialien

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG



ZENTRALE, VERBINDENDE ELEMENTE ZUR

SPEICHERUNG, TRANSPORT & VERTEILUNG



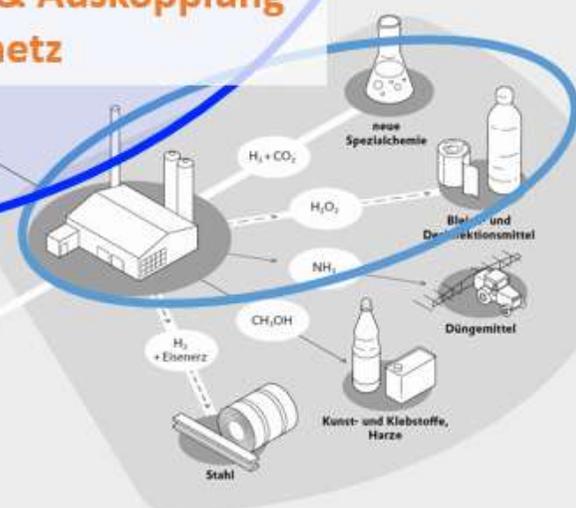
STROM, WÄRME UND KÄLTE



MOBILITÄT



PTX



INDUSTRIE-ANWENDUNG

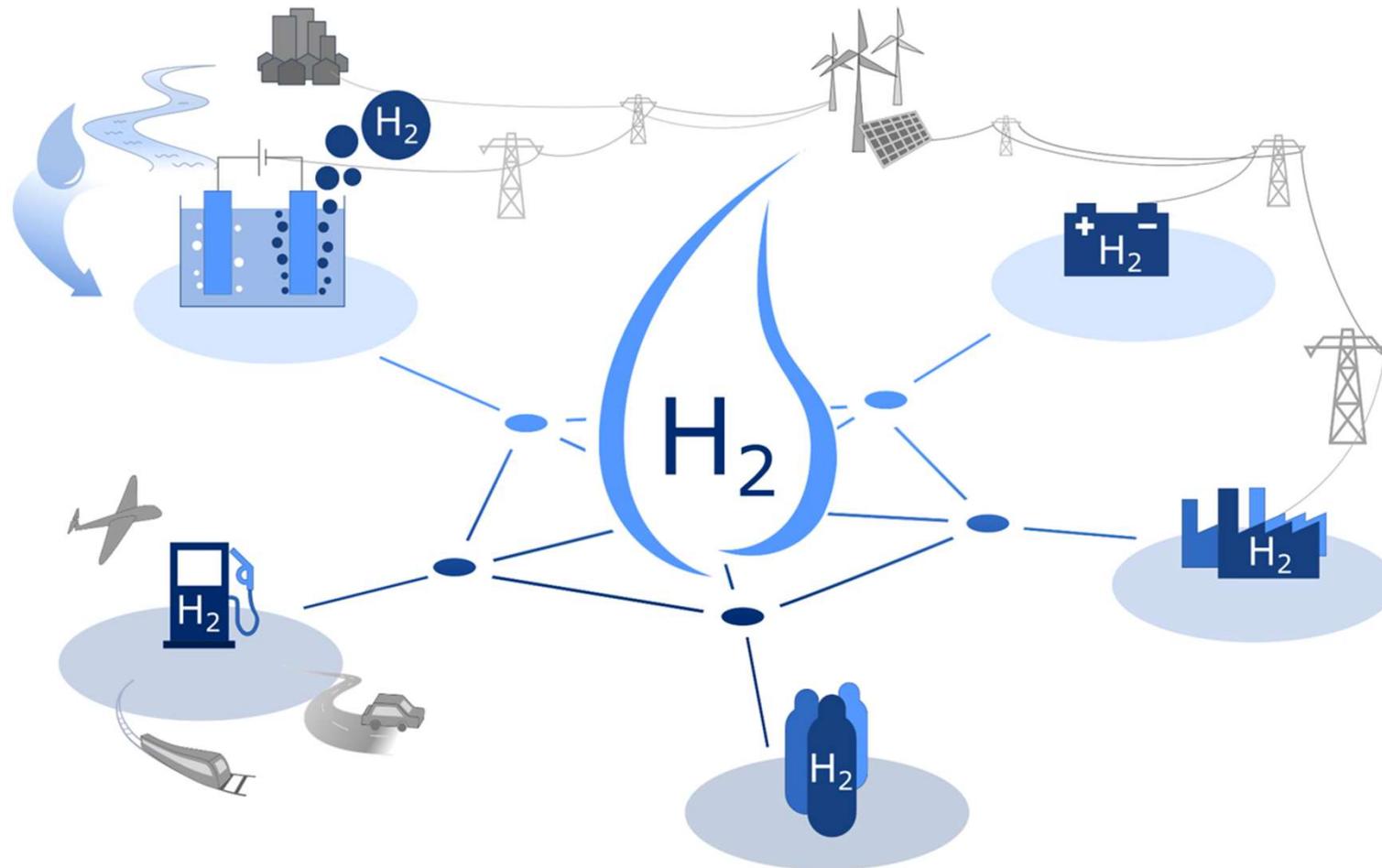
Energielabor 2.0 am KIT



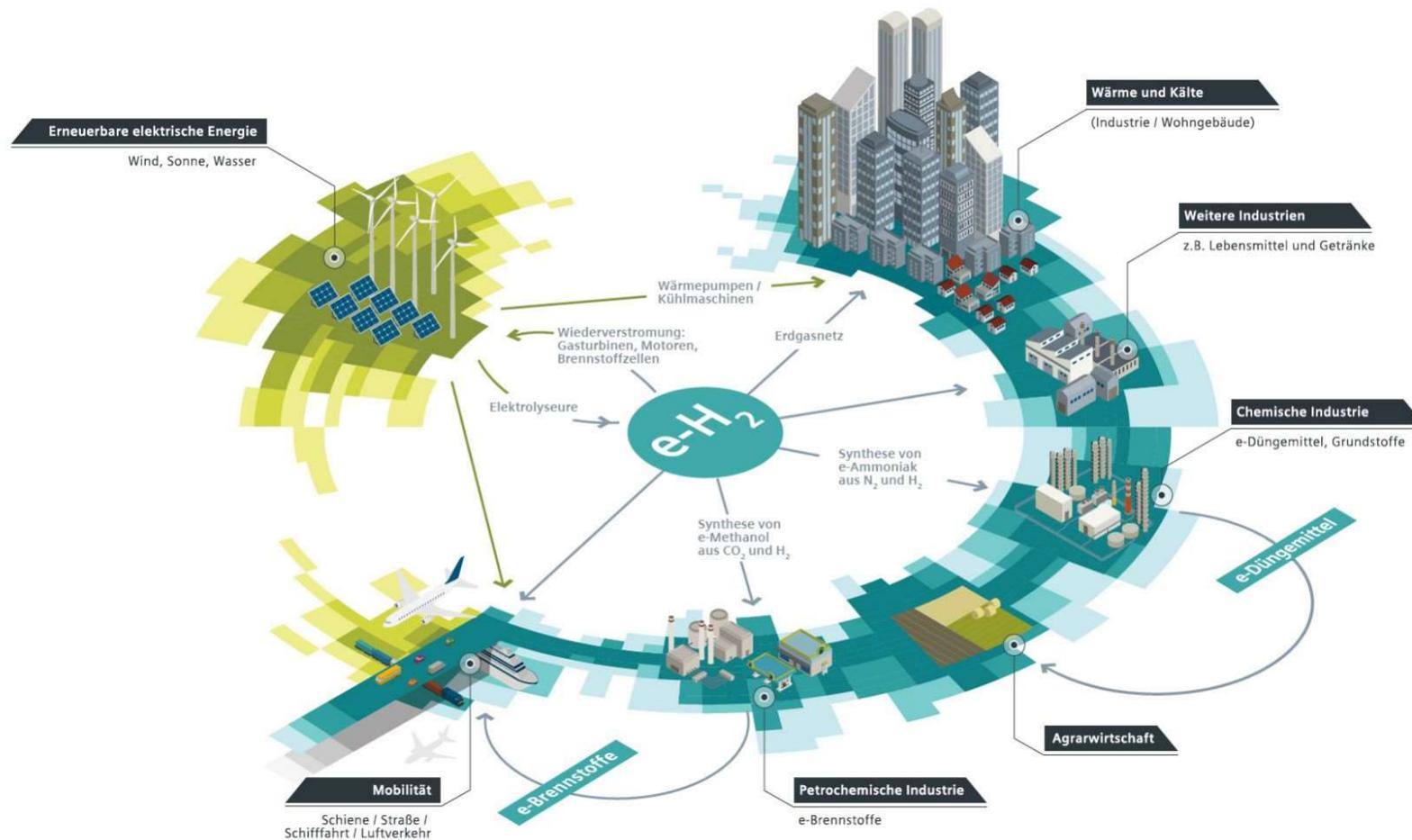
<https://www.elab2.kit.edu/english/index.php>

Grüner Wasserstoff

Wie könnte der Bedarf in der Region gedeckt werden?



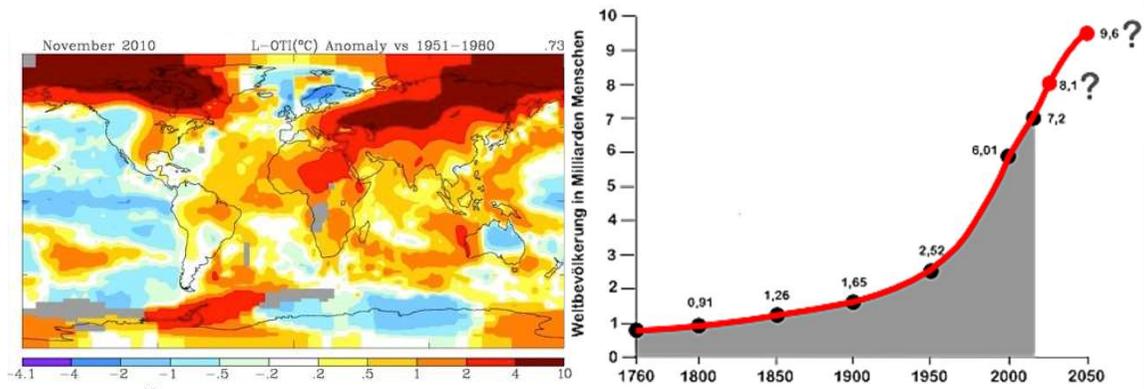
Grüner Wasserstoff



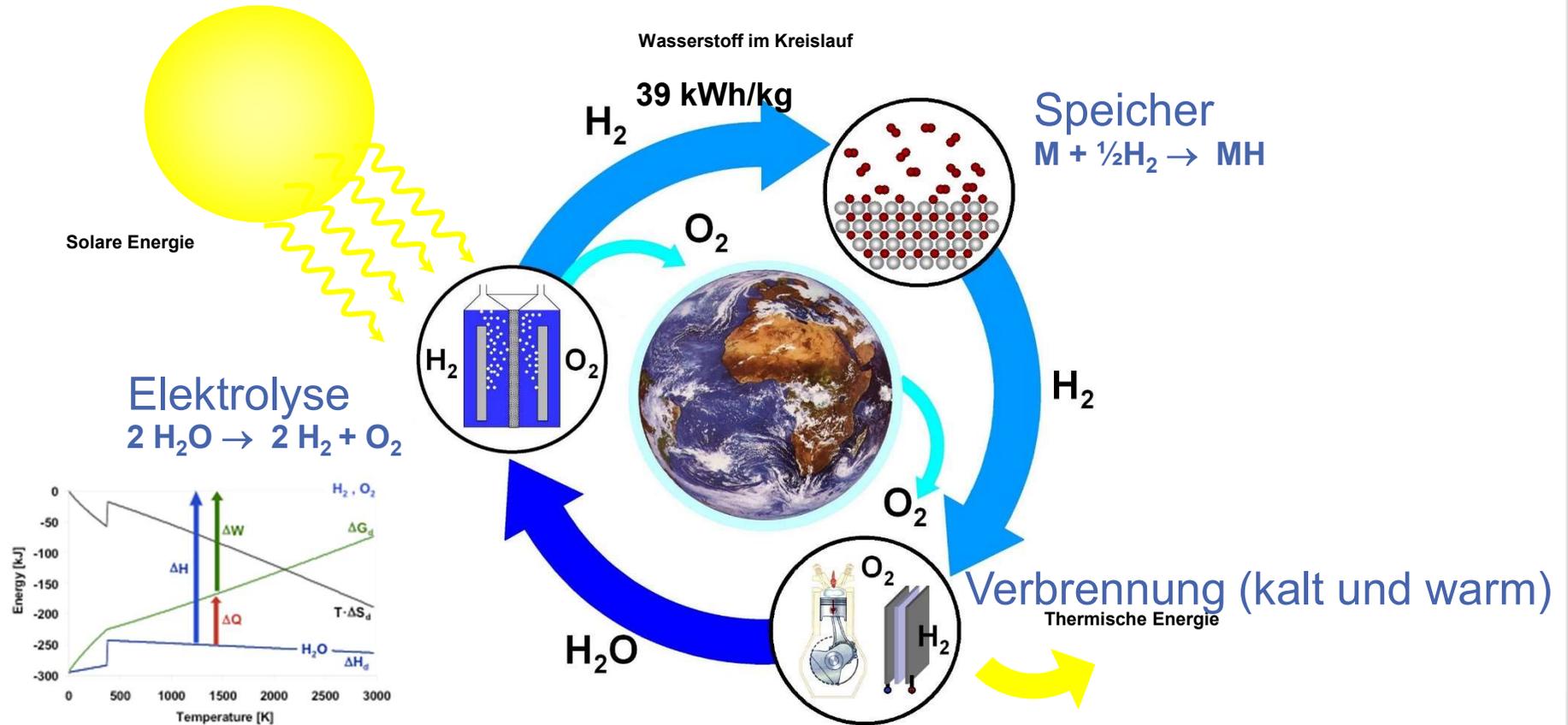
Siemens, Hydrogen Solutions

Grüner Wasserstoff

- Versiegende geologische Ressourcen (insbesondere langkettige Kohlenwasserstoffe, fest, flüssig, gasförmig)
- Lokale Luftverschmutzung (Stickoxide NO_x , Feinstaubemission)
- CO_2 Emissionen und einhergehender Klimawandel
- Wachsende Weltbevölkerung (steigender Energieverbrauch und Raumbedarf)
- Allgemeine Umweltverschmutzung



Grüner Wasserstoff



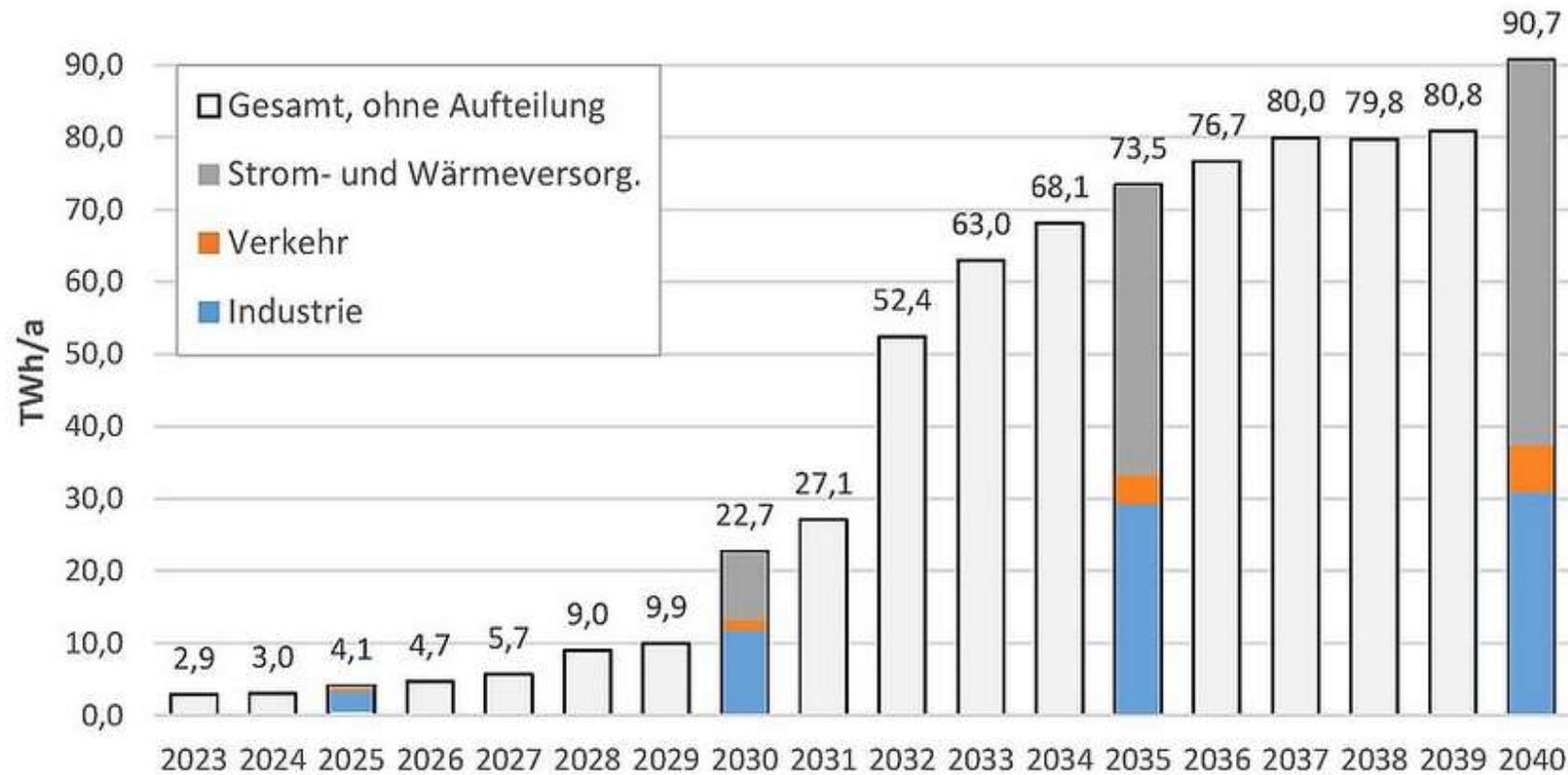
Wasserstoff H_2 (Bedarfsabfrage Baden-Württemberg)

Bedarfsabfrage 2023
90,7 TWh/a in 2040



Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Baden-Württemberg



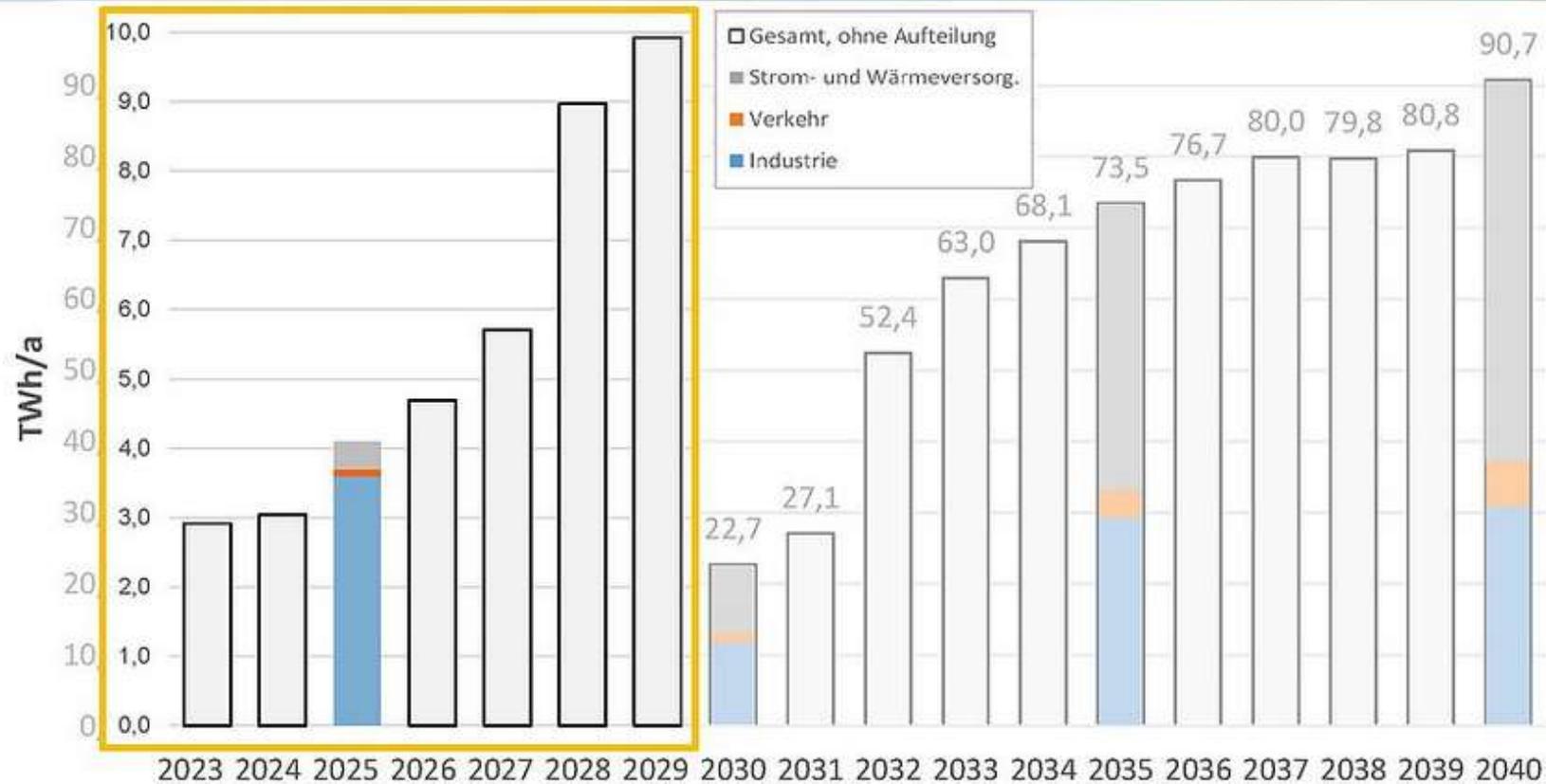
6

Quelle; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff Forschung 2023



Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

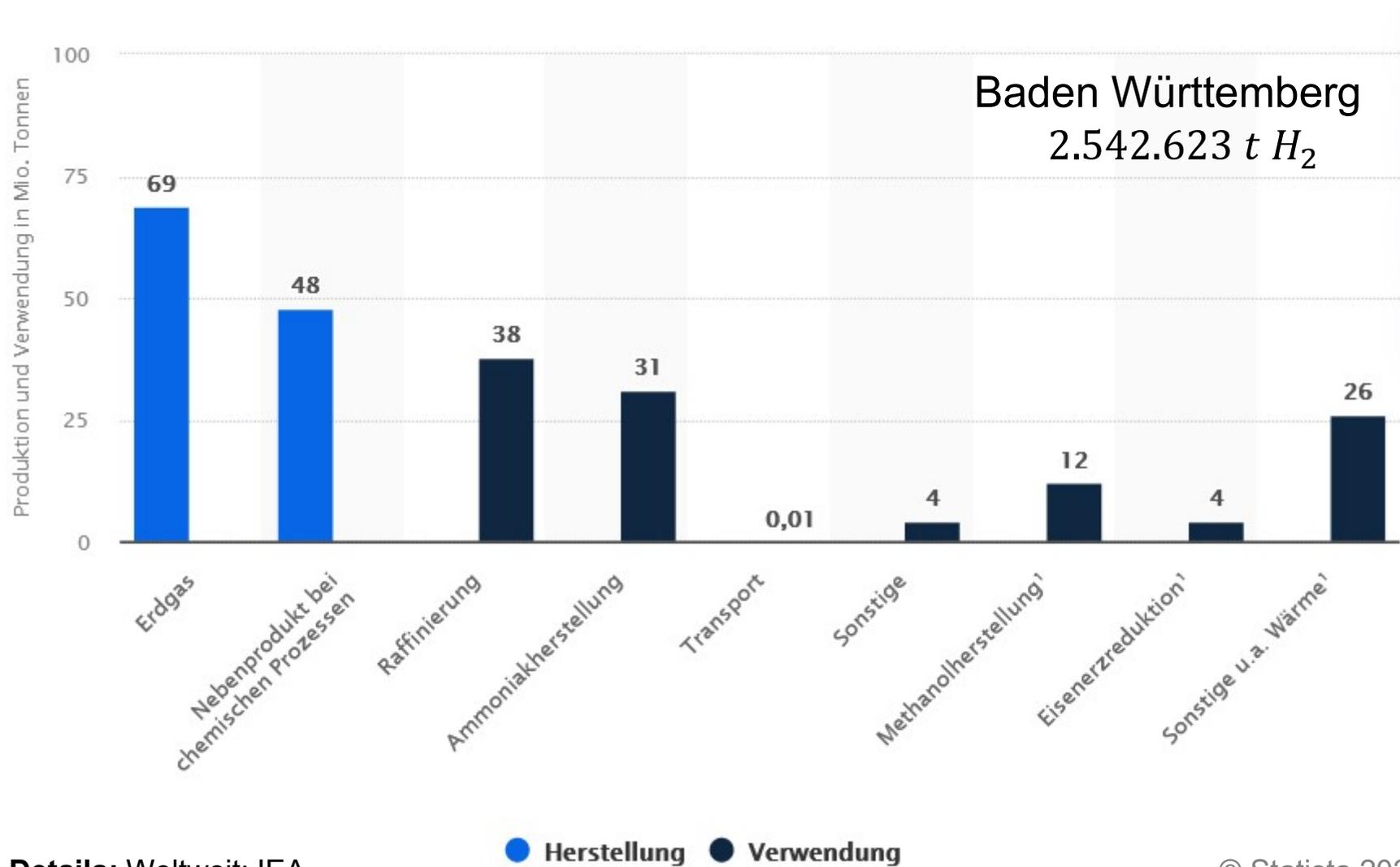
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Quelle; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff Forschung 2023

Gegenüberstellung H_2 (Bedarf Baden-Württemberg)

- Wasserstoffbedarf in 2040 geschätzt auf $90,7 \frac{TWh}{a}$
- Das entspricht grob $30.233.333.333 Nm^3 H_2$
- ...also $30.2 Mrd. Nm^3 H_2$
- ...also $2.542.623 t H_2$ mit $(0,0841 \frac{kg}{Nm^3})$
- Weltproduktion in 2019 von $H_2 \sim 117.000.000 t$
 - $69.000.000 t H_2$ aus Erdgas (Dampfreformierung grauer H_2)
 - $48.000.000 t H_2$ als Nebenprodukt aus chemischen Prozessen
- Bedarfsanalyse entspricht $\sim 2,2\%$ der Weltproduktion 2019
- Zeitfenster 17 Jahre
- Unklar bleibt: Speicher wie/wo? Transport wie/wohin?
Nutzung durch wen/wann/wo?

Gegenüberstellung H_2 (Bedarf Baden-Württemberg)

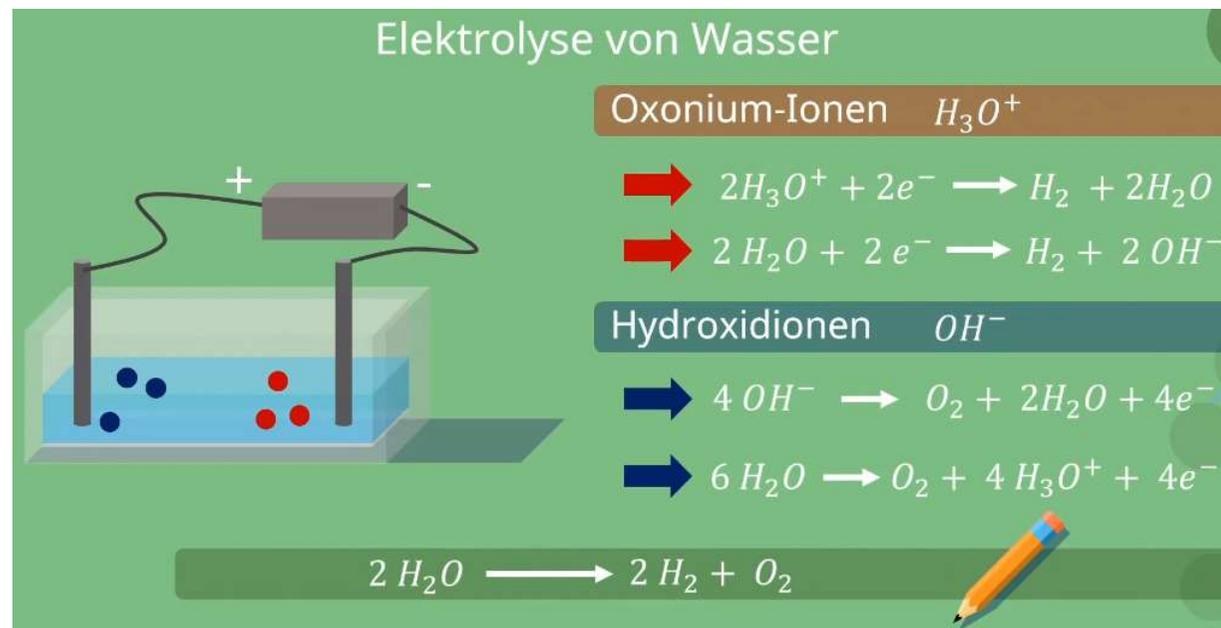


Details: Weltweit; IEA

© Statista 2023

Grüner Wasserstoff

Elektrolyse (elektrische Energie + Wasser + Technologie)



Wirkungsgrad Elektrolyse ~ 70%

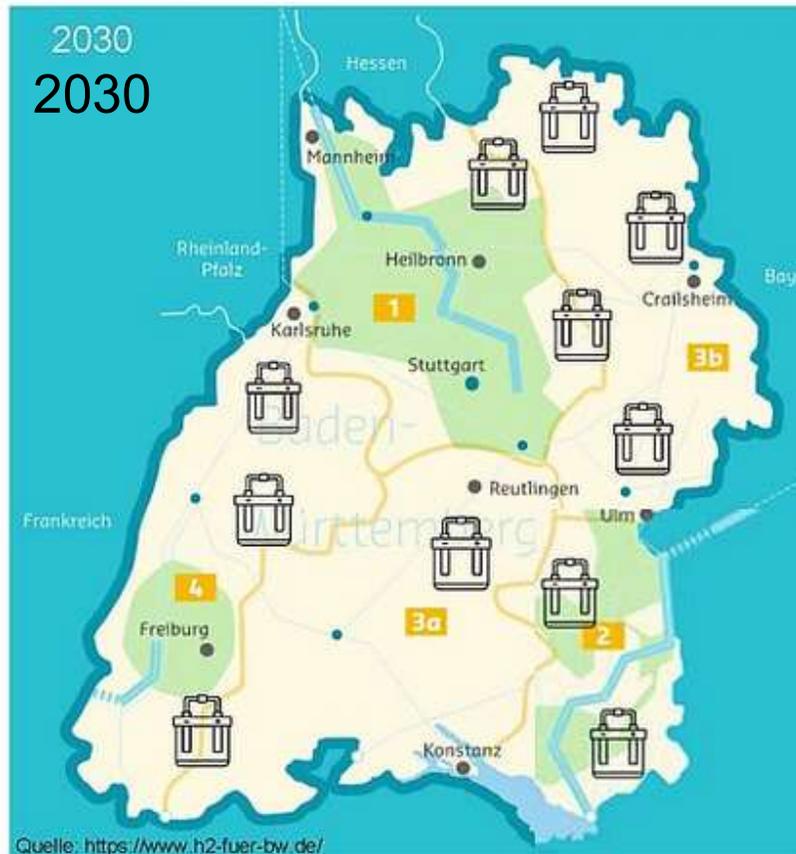
Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

Ausblick: Analyse der regionalen Verteilung der Bedarfe bis Dezember 2023

➔ Ziel: Bereitstellung einer Entscheidungsgrundlage für den Aufbau einer dezentralen Erzeugungsstruktur

➔ Hinweise zur Entwicklung von lokalen Versorgungsstrukturen, die als Cluster starten und perspektivisch zu einer Gesamt-Infrastruktur entwickelt werden.

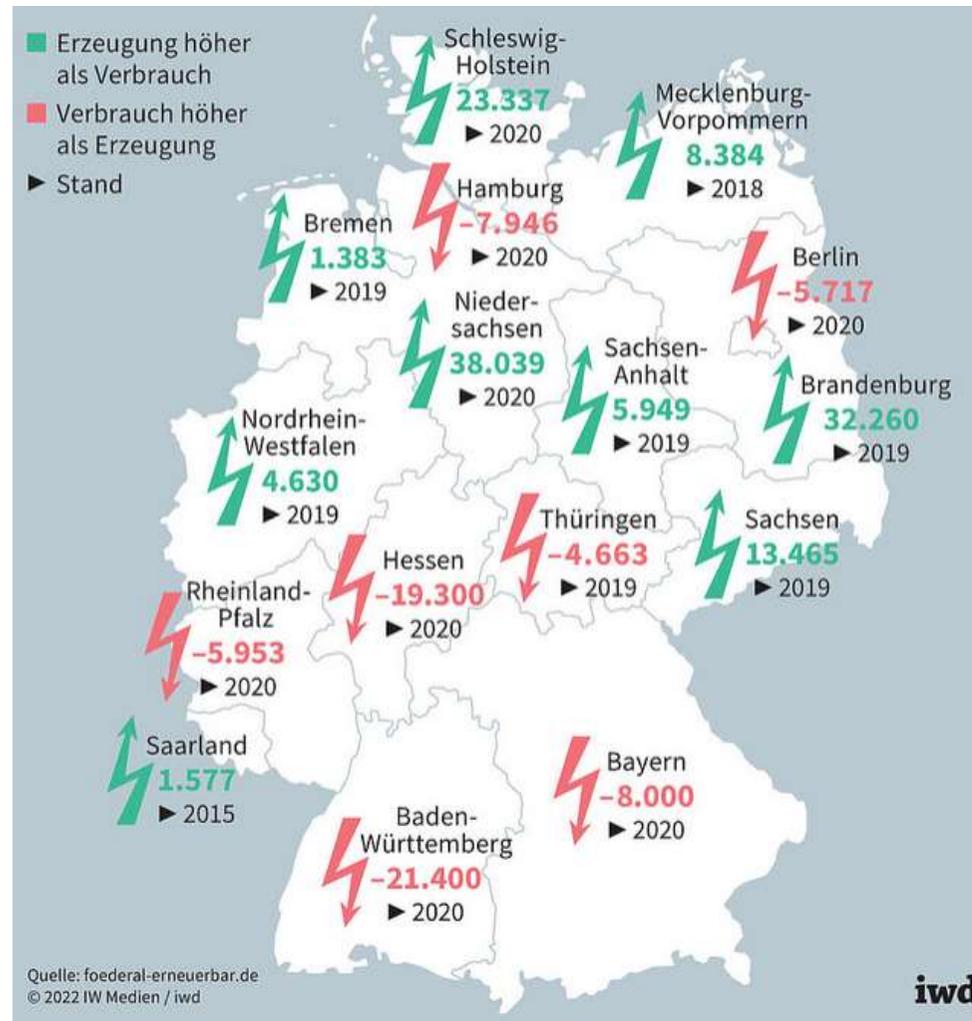
 Wasserstofftransportleitungen
 Versorgungsbereich der Wasserstoffpipeline



Quelle; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff Forschung 2023

Gegenüberstellung H_2 (Bedarf Baden-Württemberg)

Saldo aus Bruttostromerzeugung und Bruttostromverbrauch in GWh/a in 2020



Gegenüberstellung H_2 (Bedarf Baden-Württemberg)

- Wasserstoffbedarf in 2040 geschätzt auf $90,7 \frac{TWh}{a}$
- Wirkungsgrad Elektrolyse $\sim 70 \%$
- Bedarf an elektrischer Energie zur Wasserstoffherstellung in BaWü $129,6 \frac{TWh}{a}$
- Baden-Württemberg ist Spitzenreiter (Deutschland) bzgl. dem Stromimport

10. wie sie einer stärkeren Abhängigkeit Baden-Württembergs von ausländischem Strom aus fossilen oder atomaren Brennstoffen zu begegnen gedenkt.

An dieser Stelle muss nochmals auf die enge Einbettung des baden-württembergischen Stromsystems in das deutsche und europäische Versorgungs-System hingewiesen werden, die aus Gründen der Versorgungs-Sicherheit und der Kosteneffizienz klar zu befürworten ist. Baden-Württemberg ist schon historisch gesehen ein Stromimportland und wird dies auch bleiben.

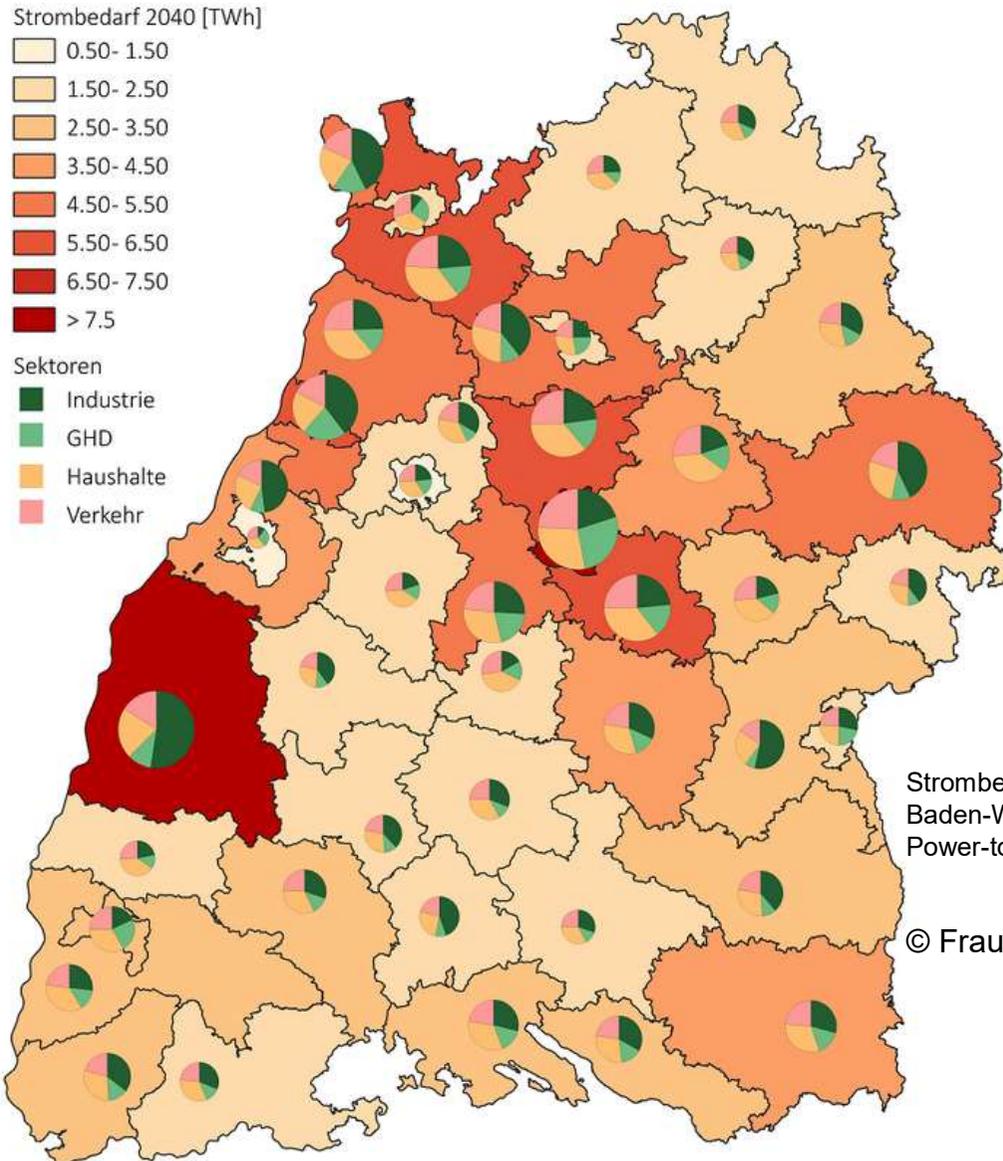
Gleichzeitig ist es aus Sicht des Umweltministeriums wichtig, dass Baden-Württemberg selbst einen wesentlichen Beitrag zur erneuerbaren Stromerzeugung im Land leistet. Daher setzt sich das Land auf Bundesebene für angemessene Rahmenbedingungen ein, die einen regional ausgewogenen Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland befördern. Auf Landesebene bestehen wesentliche Maßnahmen in der Gestaltung der in die Landeskompetenz fallenden Rahmenbedingungen, der Bereitstellung von Informationsmaterialien, wie beispielsweise dem Energieatlas, sowie in Form von Beratungsangeboten.

Untersteller

Minister für Umwelt,
Klima und Energiewirtschaft

https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/7000/16_7669_D.pdf

Gegenüberstellung H_2 (Bedarf Baden-Württemberg)



Strombedarf im Jahr 2040 nach Sektoren im Bundesland Baden-Württemberg für das Basisszenario (ohne den Sektor Power-to-X)

© Fraunhofer ISE

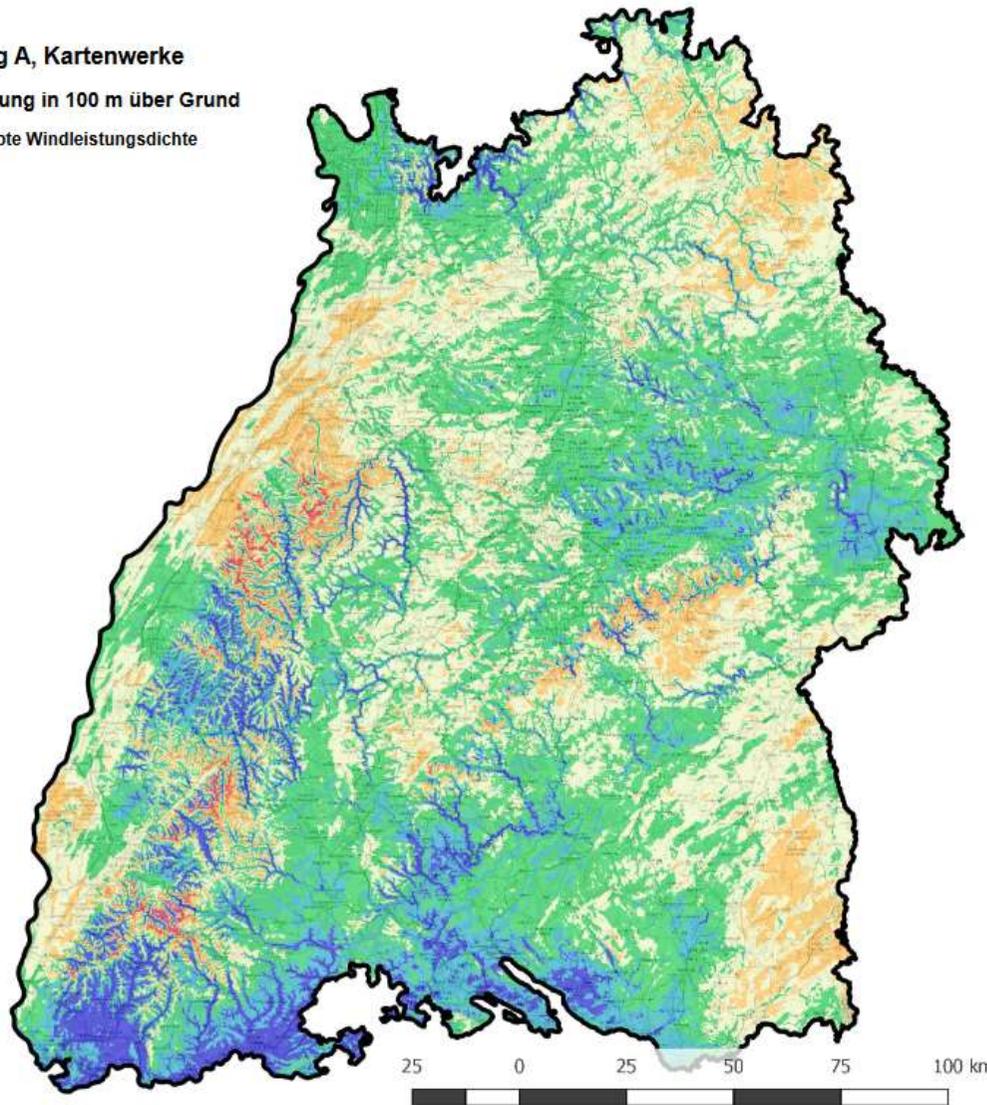
Faktencheck Windenergie

Endbericht Windatlas BW 2019

5 Anhang A, Kartenwerke

5.1 Kartierung in 100 m über Grund

5.1.1 Gekappte Windleistungsdichte



Windatlas
Baden-Württemberg
2019

Mittlere gekappte
Windleistungsdichte
in W/m²

Höhe 100 m über Grund

Legende

Blue	<= 75
Light Blue	75 - 105
Green	105 - 145
Light Green	145 - 190
Yellow	190 - 250
Orange	250 - 310
Red	310 - 375
Purple	375 - 515
Pink	515 - 660
Dark Purple	660 - 1600

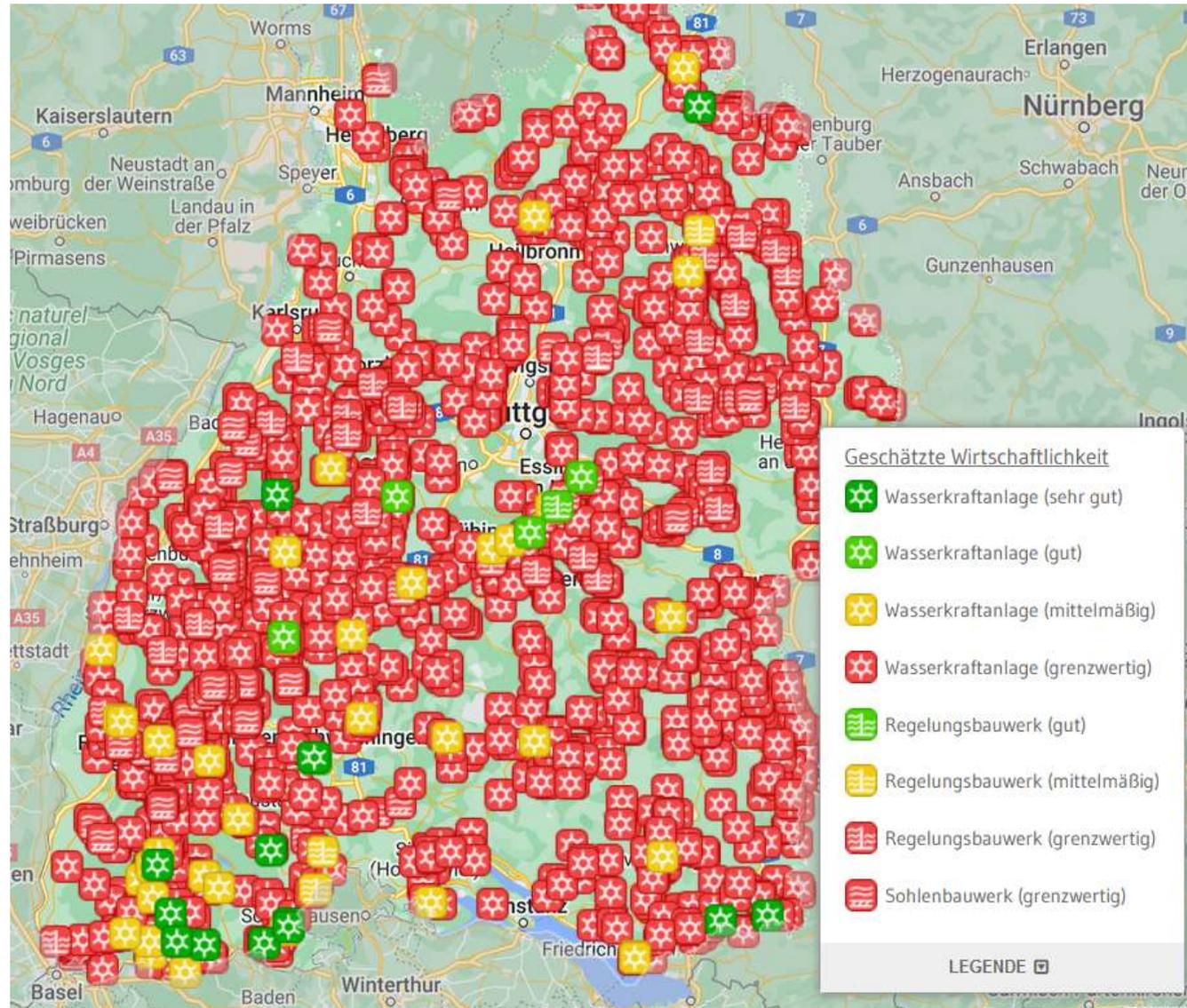
Quelle: Energieatlas BW



Faktencheck Windenergie Baden-Württemberg

- Herstellung von grünem Wasserstoff (mittels Elektrolyse)
- 2010 waren in Baden-Württemberg **353 Anlagen** mit einer Leistung von **462 MW** installiert
- 2018 waren in Baden-Württemberg **720 Anlagen** mit einer installierten Gesamtleistung von **1.534 MW** installiert
- Der Windenergie bieten sich in Baden-Württemberg auch zukünftig weitere Ausbaumöglichkeiten(?)
- Betriebs- und Lebensdauer bleiben unberücksichtigt (Neubau oder Reinstallation)
- Material und Ressourcen (stehen in Konkurrenz mit anderen Technologien)

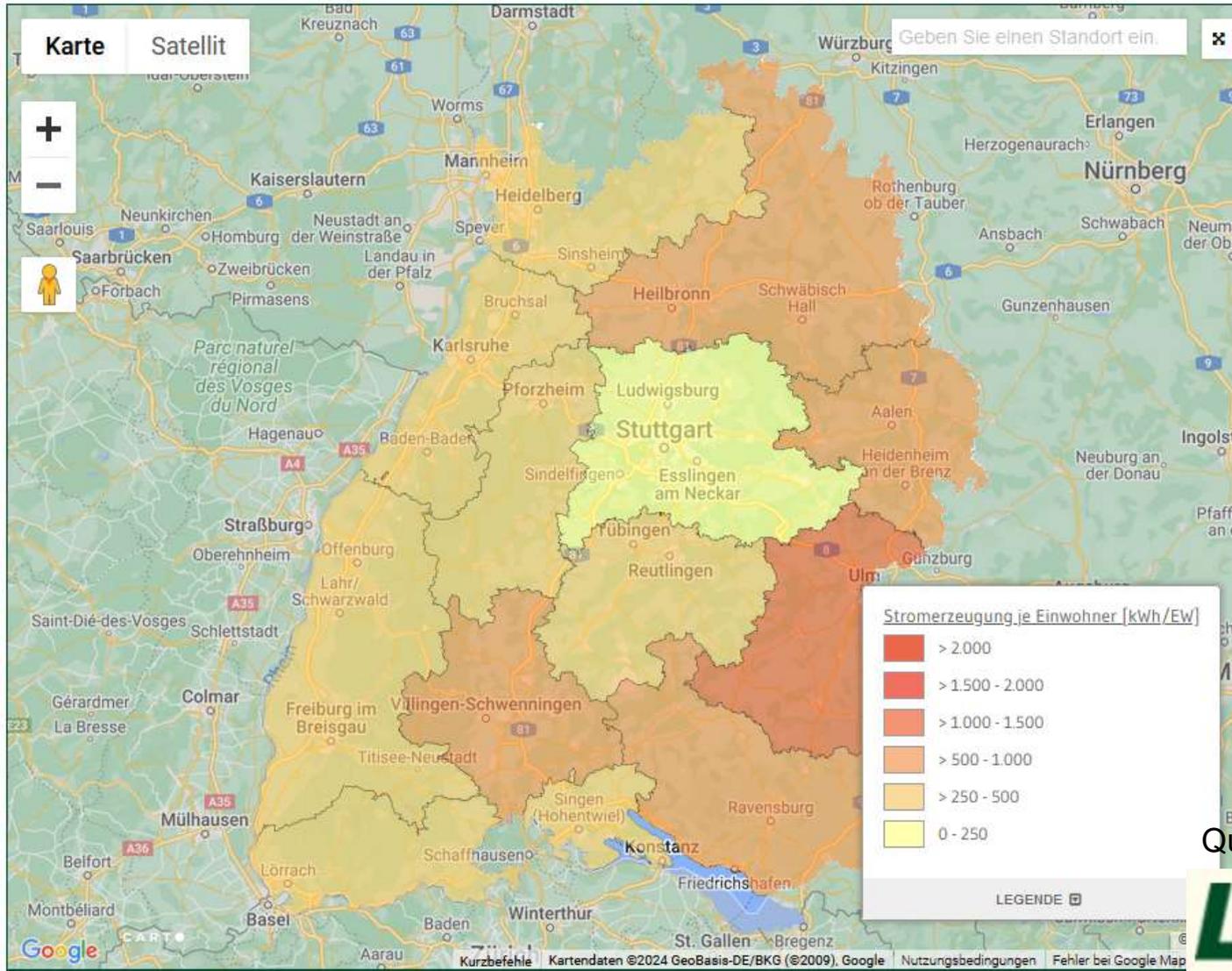
Faktencheck Wasserkraftwerke Baden-Württemberg



Quelle: Energieatlas BW



Faktencheck Photovoltaik Baden-Württemberg



Faktencheck Photovoltaik Baden-Württemberg

- Stand 2018 gab es in Baden-Württemberg insgesamt 325.395 Photovoltaikanlagen auf Dachflächen mit einer installierten Leistung von insgesamt 5.327 MW
- Diese erzeugten im Jahr 2018 ungefähr 5.196 GWh Strom. Von dieser Strommenge wurden ca. 4.900 GWh in das Stromnetz eingespeist
- Die EEG-Vergütung hierfür betrug etwa 1,6 Milliarden €
- Die erzeugte Strommenge können etwa 1,7 Millionen von 5,29 Millionen Haushalten bzw. 3,58 Millionen von 11 Millionen Einwohnern mit Strom versorgt werden
- Anteil von 32 % der Einwohner bzw. einer mittleren Stromerzeugung von ca. 470 kWh pro Einwohner.

Quelle: Energieatlas BW

Faktencheck Technologie „Elektrolyse“

Funding Secured for Refhyne II
Consortium announces grant award from CINEA for 100 MW project



Zitat: Im Shell Energy and Chemicals Park Rheinland in Wesseling hat Europas größte PEM-Wasserstoff-Elektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff, REFHYNE, den Betrieb aufgenommen... und wird pro Jahr bis zu **1300 Tonnen** grünen Wasserstoff produzieren

Zwischenergebnis (Deckung H_2 bis 2040)

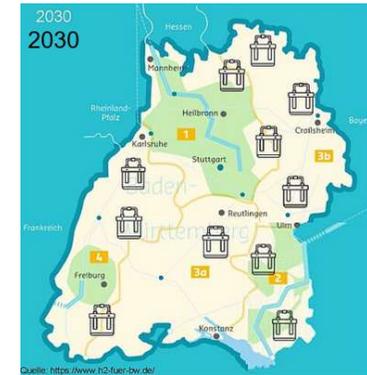
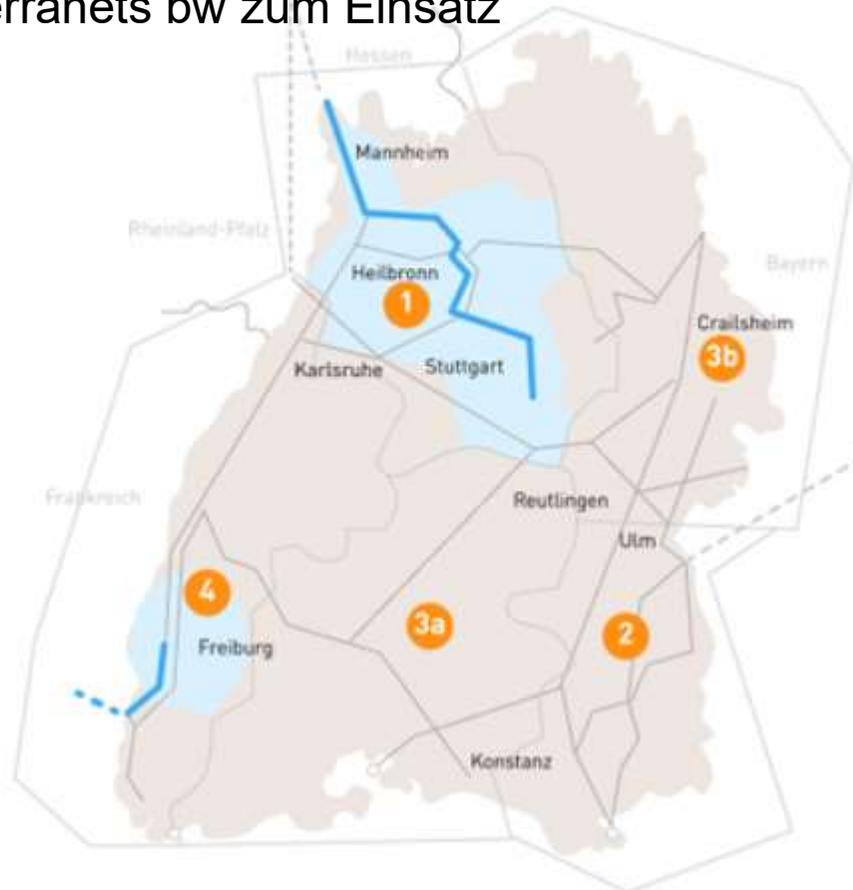
$$\frac{2.542.623 \text{ tH}_2}{1.300 \text{ tH}_2} = 1956 \cdot \text{REFHYNE}$$

- Etwa 122 REFHYNE Anlagen/a in Baden-Württemberg
- Konservative Kalkulation wegen Wirkungsgrade
- Zeitliche Realisierung und Finanzierung unrealistisch!
- Industrie (Herstellung/Installation) nicht vorhanden
- Zusätzliche Installationskapazitäten an Erneuerbarer Energie (Strom) unrealistisch!
- Speicher- und/oder Transportkapazitäten verschwindend
- Geplant Aufbau Gasinfrastruktur durch terranets bw

Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

2030

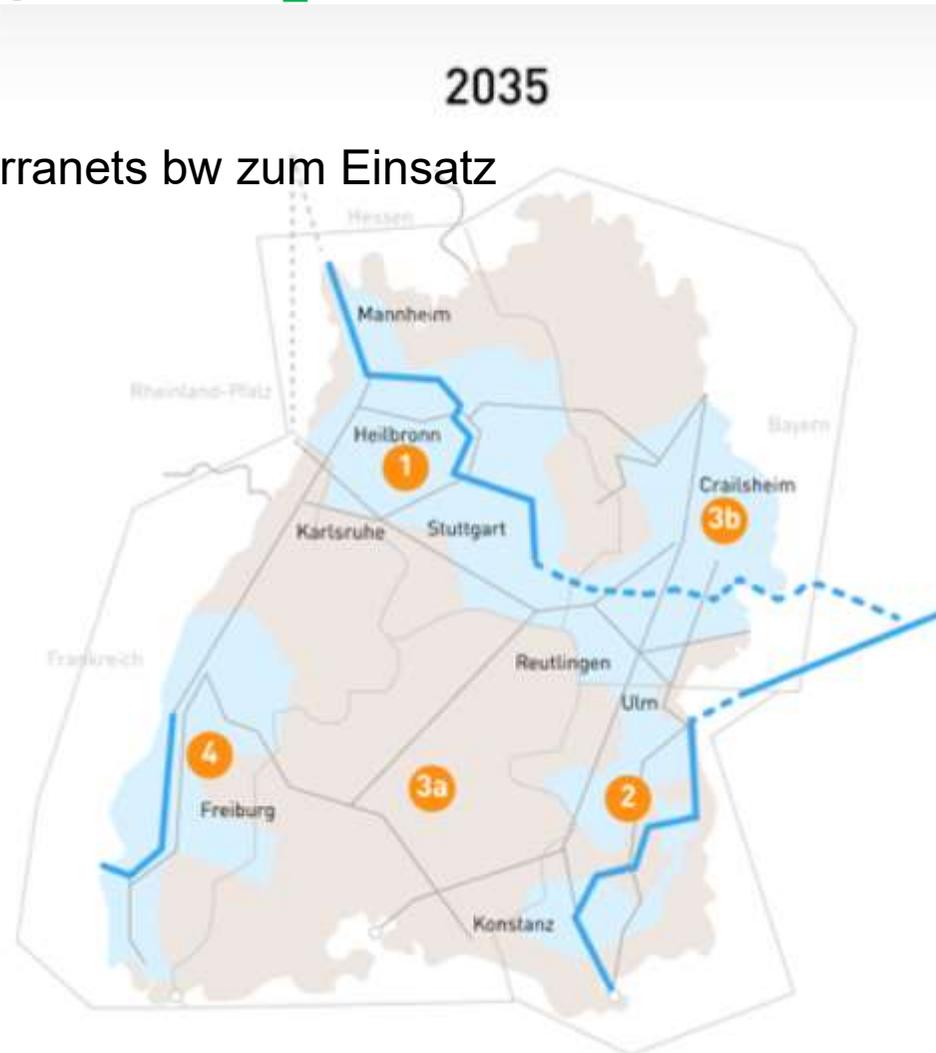
Infrastruktur von terranets bw zum Einsatz



Quelle; EnBW ECO-Journal Wasserstoff Import nach Baden-Württemberg

Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

Infrastruktur von terranets bw zum Einsatz

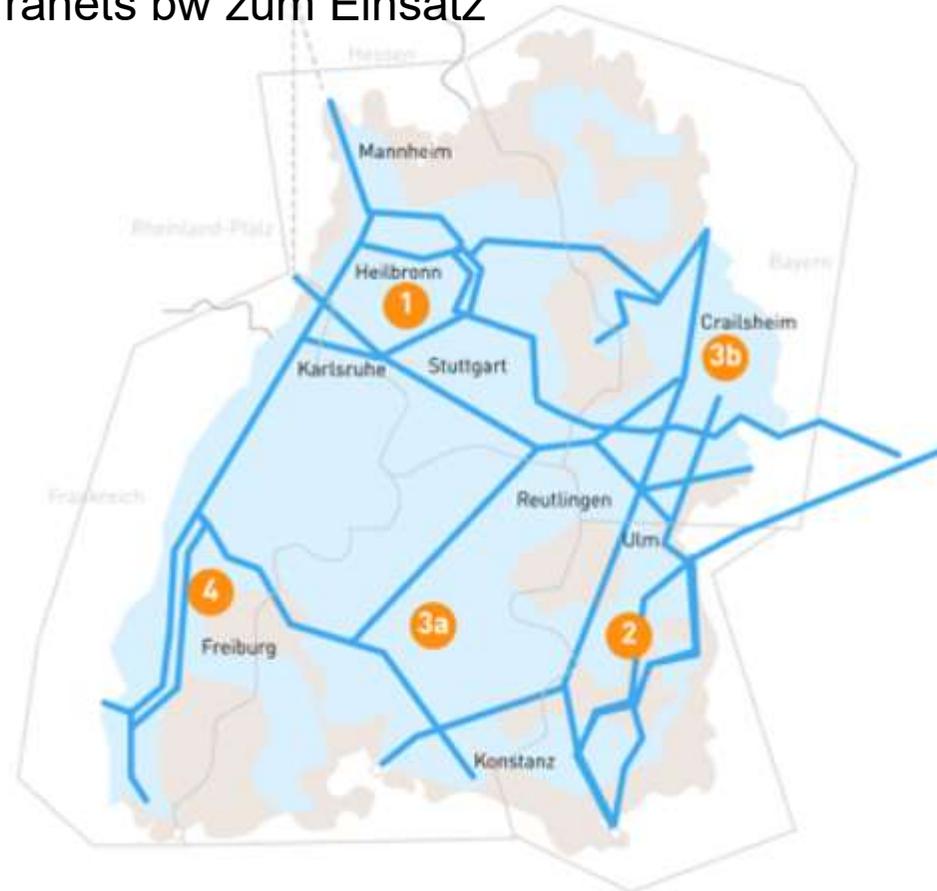


Quelle; EnBW ECO-Journal Wasserstoff Import nach Baden-Württemberg

Bedarfsabfrage von H_2 in Baden-Württemberg

2040

Infrastruktur von terranets bw zum Einsatz



Quelle; EnBW ECO-Journal Wasserstoff Import nach Baden-Württemberg

Bedarf in Baden-Württemberg

- Aufbau einer Infrastruktur zum internationalen Import von:
 - Wasserstoff
 - Elektrische Energie
- Planung, Auslegung und Aufbau von Speicherkapazitäten für Wasserstoff:
 - Gasnetz (terranets bw)
 - Stationäre Großspeicher (gas)
 - Stationäre Speicher an den Verwendungsorten (gas, flüssig)
- Aufbau einer neuen dezentralisierten (lokalen) Wirtschaft und Infrastruktur
- Wasserstoff als Produkt (Marktintegration)
- Integration neuer Industriezweige (SMEs)

Farbskala von H_2 (nicht mehr „was“, sondern „wie“)

Dampfreformierung inkl. Carbon Capture Storage CCS

Dampfreformierung Methan

Kohlevergasung

Elektrolyse mittels Strom-Mix

Natürliche Vorkommen/Reste aus Prozessen

Aus dem was übrig bleibt, Schlüsselenergie der Energiewende

Elektrolyse mittels Atomstrom

90,7 TWh/a

Biomasse, Biogas, Biomethan

Steinkohle

Pyrolyse von Methan – Kohlenstoffabscheidung

Technologisches Kernelement Elektrolyse

Wasserstoffherstellung und Abhängigkeiten des CO_2 Footprints

- Herstellungsverfahren
- Art der eingesetzten Energie
- Art der Edukte

Derzeit werden weltweit ca. 95% an H_2 mittels der Reformierung von Methan hergestellt



Technologisches Kernelement Elektrolyse

- Elektrolyse als Kernelement systemischer Ansätze (Herstellung von Wasserstoff)
- Bindeglied der Sektorenkopplung (z.B. Power to X)
- Dekarbonisierung (Vermeidung von Kohlenwasserstoffe)
- Aspekte einer Kreislaufwirtschaft und Dezentralisierung (Wirtschafts- und Energiesektor)



Elyntegration, MW-Bereich



Siemens, Hydrogen Solutions

Modelle zu Wasserstoff-Pilotprojekte



Pilot Projekt H2_A
“Versorgung der Industrie mit grünem H2”



Pilot Projekt H2_B
“Virtual Pipelines”



Pilot Projekt H2_C
“Transportwege und Möglichkeiten”



Pilot Projekt H2_D
“Dezentrale H2 Erzeugung und Nutzung (z.B. Landwirtschaft)”

Pilot Projekt H2_A “Versorgung der Industrie mit grünem H2”

Bedarf und Motivation

- Große Nachfrage der lokalen Industrie nach grünem Wasserstoff (Eigenproduktion)
- Starkes lokales Potenzial für grünen Strom
- Einsatz von Technologien mit hoher TRL für Elektrolyseanlagen im großen Maßstab (200-300 MW) für niedrige spezifische Kosten von grünem Wasserstoff

Resources, Potentielle Partner, Finanzen

- Potential und Nachfrage der Großindustrie z.B. BASF, Borealis, Euroglass
- Zugang zur Wasserkraft (EdF) und zusätzliche schwimmende PV-Anlagen (z.B. Abwind)
- Partnerschaften mit der Elektrizitätswirtschaft (EdF, Badenova), der Gasindustrie (Linde, Air Liquide, Air Products) und Technologielieferanten
- Identifizierung von Elektrolyseur-Betreiber
- Nutzung/Erweiterung der bestehenden Pipeline-Infrastruktur
- Verbesserung der H2-Wirtschaftlichkeit ($< 5\text{€/kg}$) durch Vermarktung der Elektrolyse-Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff

Ergebnisse und Auswirkungen

- ✓ Lösung der Stromnutzung aus Wasserkraft und Windkraft soweit als möglich
- ✓ Auswahl der optimalen See-/Wasserfläche für den Bau schwimmender Referenz-PV Anlagen
- ✓ Fertigstellung der Landplanung für einen 200-300MW-Elektrolyseure mit direktem Anschluss an die bestehende Pipeline-Installationen
- ✓ Installation neuer innovative Elektrolysezellen/-stapel-systeme zur Bewertung neuer Materialien, Komponenten und Betriebsstrategien
- ✓ Benchmarking mit ähnlichen Anlagen (MW-Pilotanlage von Energielieferanten, etc.)



Foto Quelle: EdF



Foto Quelle: ThyssenKrupp

Pilot Projekt H2_B “Virtual Pipeline”

Bedarf und Motivation

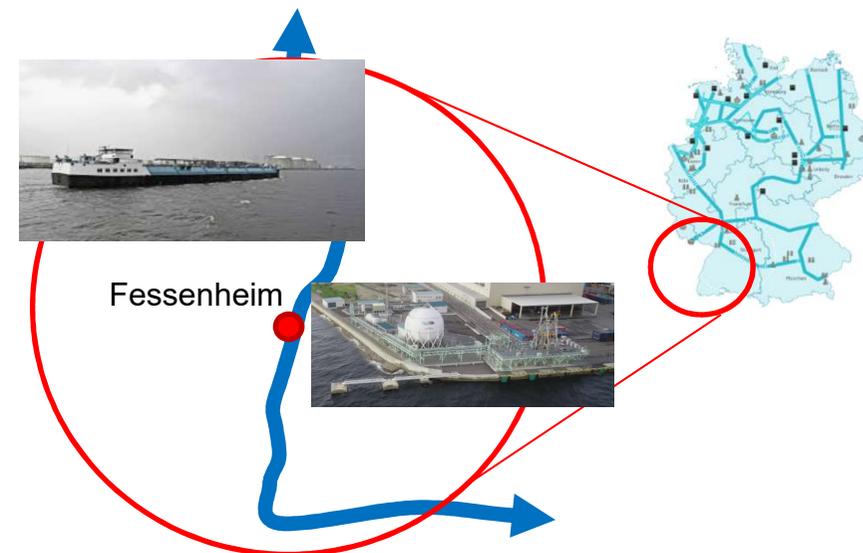
- Importinfrastruktur für grünen Wasserstoff erforderlich, um höhere Nachfrage in einer größeren Region zu decken (CH/F/D)
- Reale Pipelines als langfristige Projekte erfordern hohe Investitionen und sind statisch
- Pläne für die Anbindung der Region mit einer speziellen H2-Pipeline sind nur langfristig angelegt (> 2035 in der EU-Backbone-Planung)

Resources, Potentielle Partner, Finanzen

- Eine breite Beteiligung von Technologieanbieter ist erforderlich: z.B. Linde, Air Liquide, MTU, MAN, etc.
- Bau von lokalen Großlager-/Bunkeranlagen in den bestehenden Hafeninfrastrukturen am Rhein
- Multimodales, umweltfreundliches Transport- und Verteilungssystem auf Containerbasis (Wasser, Schienen, Straße) für gasförmigen, später flüssigen Wasserstoff LH2 (kritisch)
- Entwicklung und Bau von H2-getriebenen Hybrid-Elektro-Transportschiffs (ca. 10 t) Niedrigwassereinsatz
- Partnerschaft mit den Projekten hinsichtlich der notwendigen Technologie und Expertisen wie H2Global, RH2INE und HyRiver etc.

Ergebnisse und Auswirkungen

- ✓ Demonstration der Funktionsfähigkeit der "Virtuellen Pipeline", bestehend aus Rheinhafenanlagen mit LH2-Bunkerung und großtechnischer Lagerung
- ✓ Bau eines "grünen Verflüssigers" (hocheffizientes, grünes H2 und Strom) (1 t/d Kapazität)
- ✓ Etablierung der Region als grüne H2-Drehscheibe für die Verteilung und Förderung des Oberrheintals als Wasserstoff-Region



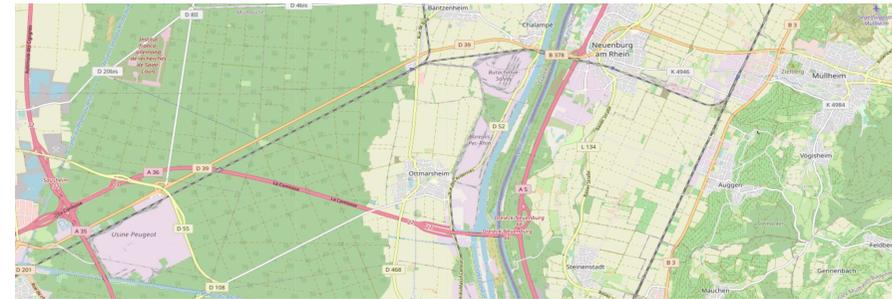
Pilot Projekt H2_C “Schwerlasttransport”

Bedarf und Motivation

- CO2-Reduktionen für den Schwerlastverkehr (FCH)
- A5/A36, Nordschweiz, Grand-East Frankreichs mit dem Südwesten Deutschlands verbinden
- > 13000 schwere Straßenfahrzeuge pro Tag
- Allgemeine Lösung für eine bessere, wirtschaftliche und nachhaltige Organisation des Güterverkehrs (Straße und Schiene) auf tri-nationaler Ebene

Resources, Potentielle Partner, Finanzen

- Geschäftskonzept analog zur Schweizer Hyundai Hydrogen Mobility (HHM): Vermietung von Lkw an gewerbliche Lkw-Betreiber auf Pay-per-Use-Basis
- Zentraler Service für den Betrieb (inklusive H2-Versorgung und Betankung)
- Ausweitung der Kraftstoffversorgung auf Busflotte(n)
- Optimale Ausgestaltung der Besteuerung und Subventionierung
- Kraftstofflieferant: Linde France, Air Liquide; Tankstellenbetreiber: Shell, Total; Lkw-Lieferanten: Hyundai, Daimler Trucks Anwender: Grieshaber, Schenker, JCL Logistikunternehmen



Ergebnisse und Auswirkungen

- ✓ Entwicklung eines Geschäftsmodells und Sammlung von Interesse bei Logistik- und Transportunternehmen
- ✓ Entwicklung und Installation einer hochmodernen Tankstelle mit unabhängigem Subsystem für F&E und LKW-Flotte
- ✓ Betrieb und weiterer Ausbau der Flotte im Rahmen eines multimodalen Verkehrskonzepts mit Schienen- und Schifffahrtsverkehr
- ✓ Unterstützung der Entwicklung von Technologien und Standards für die Betankung von Schwerlastkraftwagen



Foto Quelle: Hyundai, Daimler Truck

Pilot Projekt H2_D “Dezentrale H2 Erzeugung und Nutzung”

Bedarf und Motivation

- Die Region hat einen starken landwirtschaftlichen Hintergrund
- Die Landwirtschaft muss zur Entfossilisierung und zum Umweltschutz beitragen
- Grüne Technologien helfen bei der Förderung lokaler Produkte und unterstützen den Tourismus, z.B. in Verbindung mit dem Weinanbau
- Die derzeitigen öffentlichen Subventionsprogramme für die Stromerzeugung aus Biomasse/Gas laufen aus (in D)
- Landwirtschaftliche Gemeinden suchen nach neuen Geschäftsmöglichkeiten

Resources, Potentielle Partner, Finanzen

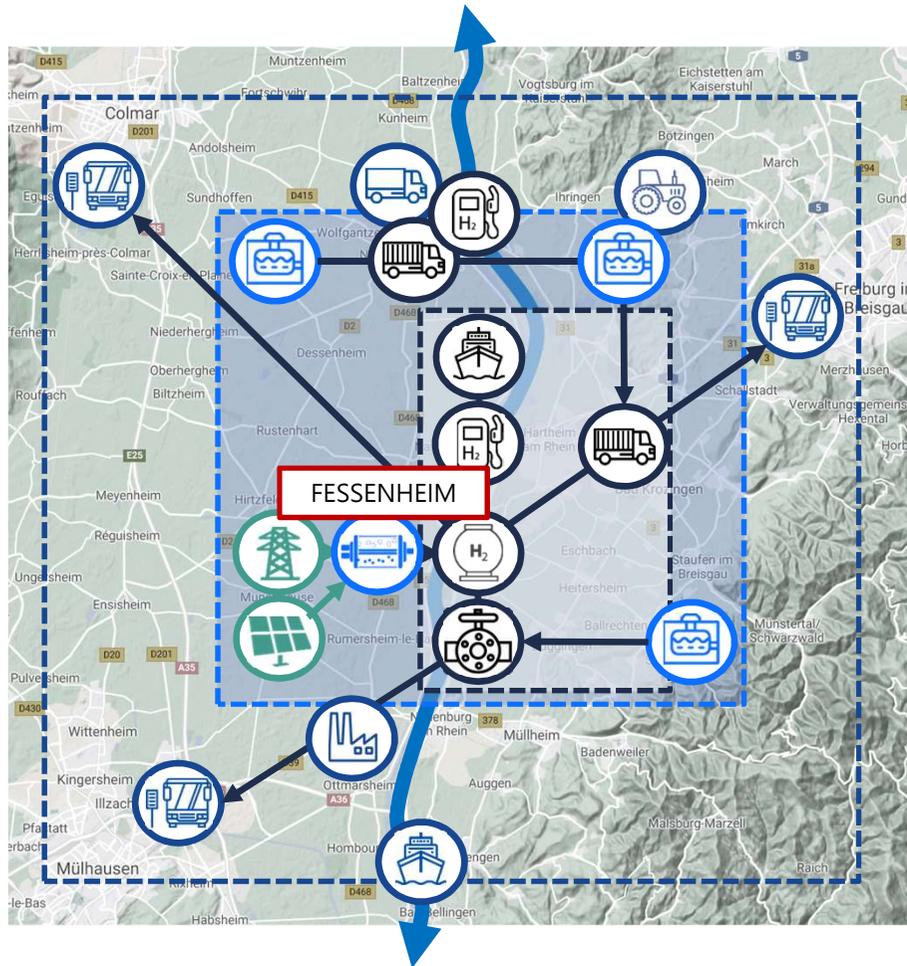
- Aufbauend auf erfolgreichen Vorläufern (z.B. Pilotprojekt mit verkleinerter VERENA-Anlage KIT am Kaiserstuhl)
- Lernen von guten Beispielen: Schottland wirbt mit "Whisky goes green with hydrogen" (The Times 5. März 2021)
- Raiffeisen Waren-Zentrale RWZ zeigt starkes Interesse
- Unterstützt durch regionale Fonds?



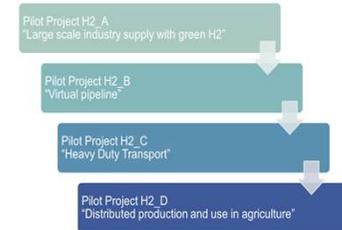
Ergebnisse und Auswirkungen

- ✓ Installation von Agro-PV auf einem prototypischen Bauernhof
- ✓ Umstellung einer bestehenden Biogasanlage auf H2-Produktion
- ✓ Installation einer prototypischen fortschrittlichen Plasmalyse-Anlage
- ✓ Betrieb einer Flotte von landwirtschaftlichen Maschinen auf demselben prototypischen Betrieb
- ✓ Umstellung des Geschäftsmodells der landwirtschaftlichen Genossenschaften für den Kraftstoffhandel auf lokal erzeugten grünen Kraftstoff





Zusammenfassung Multi-modal H2 Hub

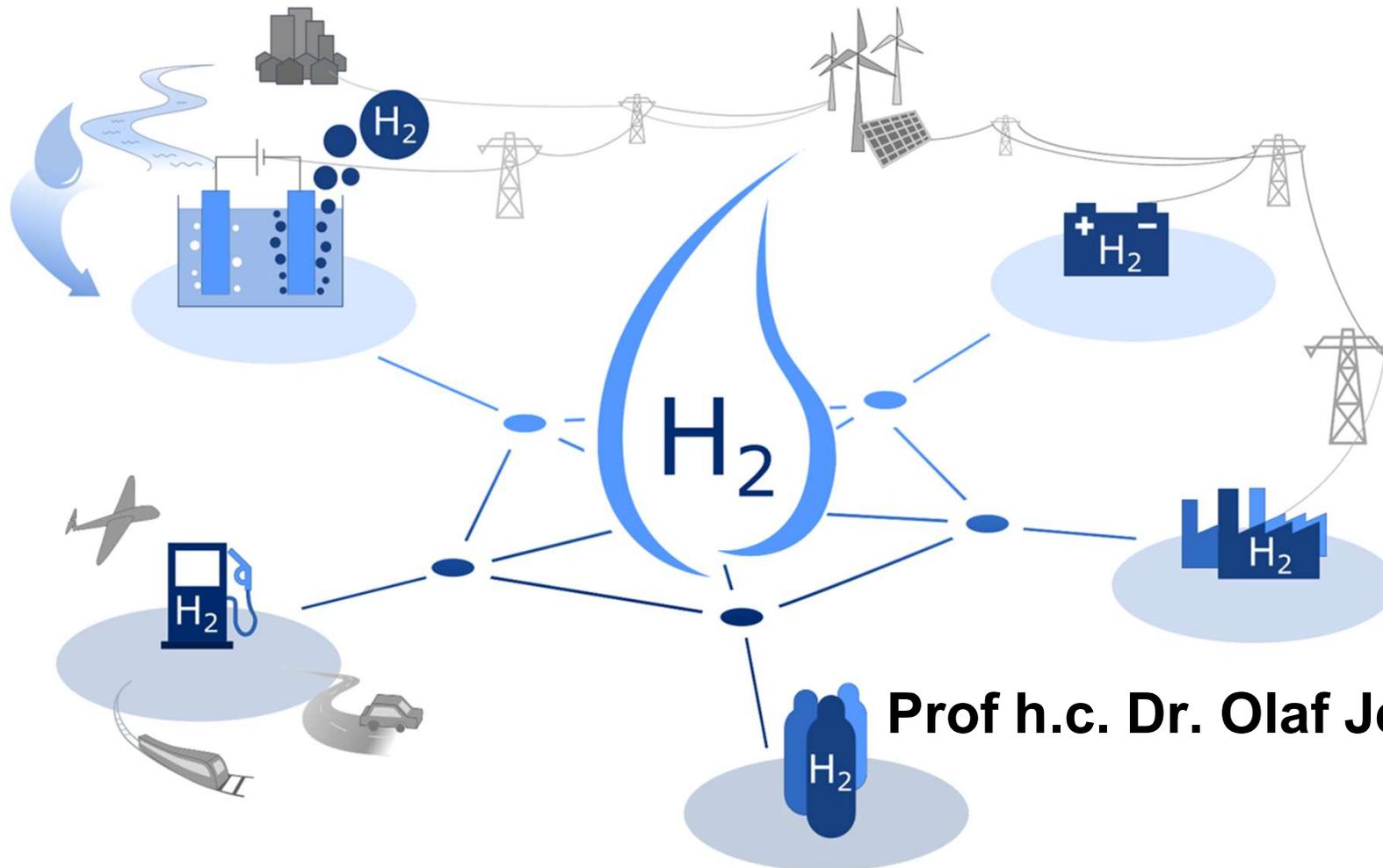


- 4 weitgehend unabhängige, sich gegenseitig unterstützende, sektorintegrierende Pilotprojekte
- Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette,
- Anwendung ausgereifter Wasserstofftechnologien für den kommerziellen Betrieb, begleitet von FuE-Aktivitäten
- Angepasst an spezifische lokale Bedürfnisse und Möglichkeiten
- Frühzeitiges Erreichen eines großen Maßstabs und niedriger spezifischer Kosten für grünen H2
- Robustheit durch externe Anbindung und sukzessive Ausweitung dezentralisierter Energiesysteme mit Annäherung an den Endverbraucher

Schlussfolgerungen

- Der erfasste Bedarf an Wasserstoff in Baden-Württemberg bis 2040 ist erheblich
- Der Aufbau an Elektrolyseanlagen zur Herstellung von grünem Wasserstoff schwierig wenn nicht unrealistisch
- Die Schöpfung zusätzlicher Erneuerbarer Energie aus Wind- und Wasserkraft zur Deckung der Elektrolyse ist stark eingeschränkt (unrealistische Eigenversorgung)
- Installation von Photovoltaik unumgänglich
- Infrastruktur zur Etablierung der Wasserstofftechnologie (Herstellungs-, Speicher- und Transportkapazitäten)
- Wasserstoffmarkt und -Gesellschaft

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Prof h.c. Dr. Olaf Jedicke