

Brennstoffzellenforum Hessen 2024

Wasserstoff made in Hessen - dezentral erzeugen



Zuverlässige Wasserstoffsysteme für
einen erfolgreichen Hochlauf der
Wasserstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. Saskia Biehl

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

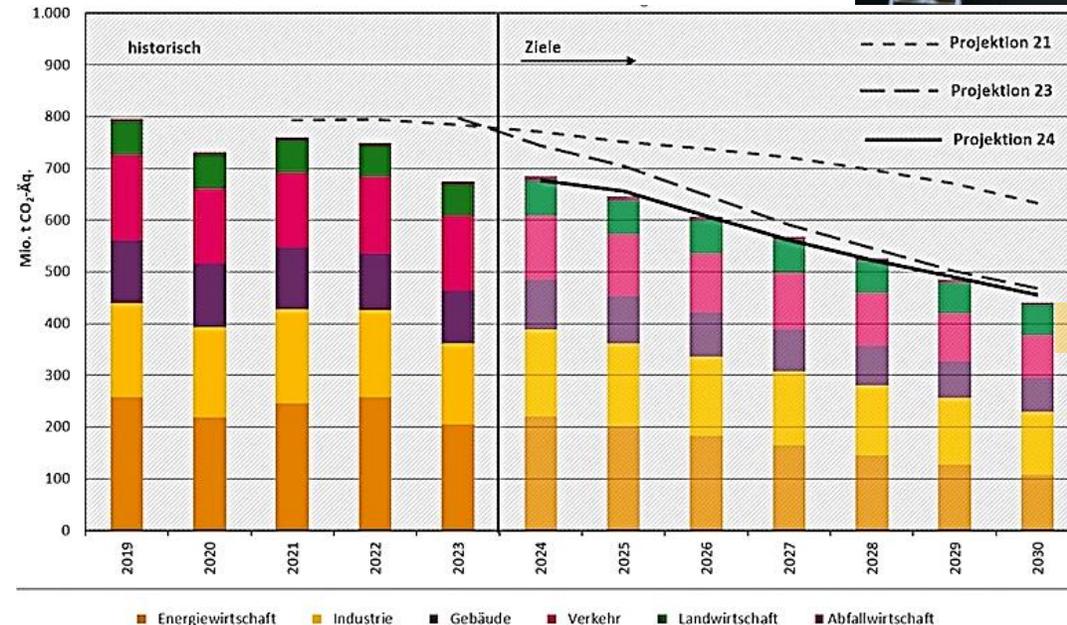
Motivation

Pariser Klimaabkommen (12.12.2015)

Rechtsverbindlicher internationaler Vertrag zur Begrenzung der **globalen Erderwärmung auf 1,5 K.**

Deutsche Klimaziele

- Bis **2030**: mindestens **65 %** THG-Minderung gegenüber 1990 (1990: 1.249 Mio t CO₂-Äquivalent)
=> **437 Mio t. CO₂ Äq.**
- Bis **2040**: mindestens **88 %** THG-Minderung gegenüber 1990
=> **150 Mio t CO₂-Äq.**
- Bis **2045**: **Netto-Treibhausgasneutralität**



437 Mio. t CO₂-Äq.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Bereichen in Deutschland (2019-2030)

Quelle: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement#:~:text=10%202011%20global%20warming%20to%201.5%20C%20by%202030,10%20greenhouse%20gas,10%20decline%20of%2025%20by%202030.>

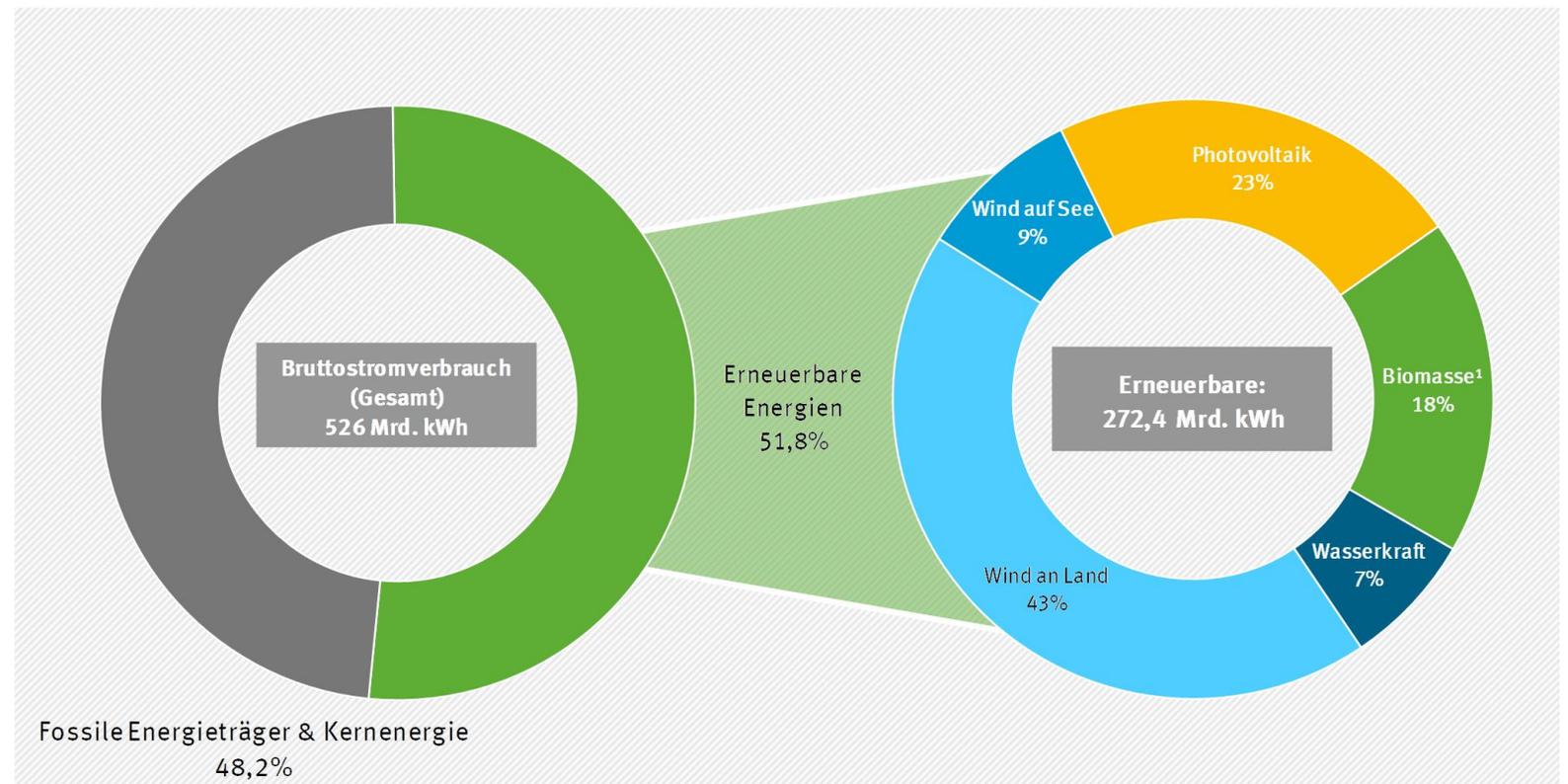
Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Umsetzung des Pariser Klimaabkommens durch ein beschleunigtes Substituieren von fossilen Energieträgern durch erneuerbare

Bruttostromverbrauch in Deutschland - 2023

- Fossile Energieträger: 48,2 %
- Erneuerbare Energieträger: 51,8 %

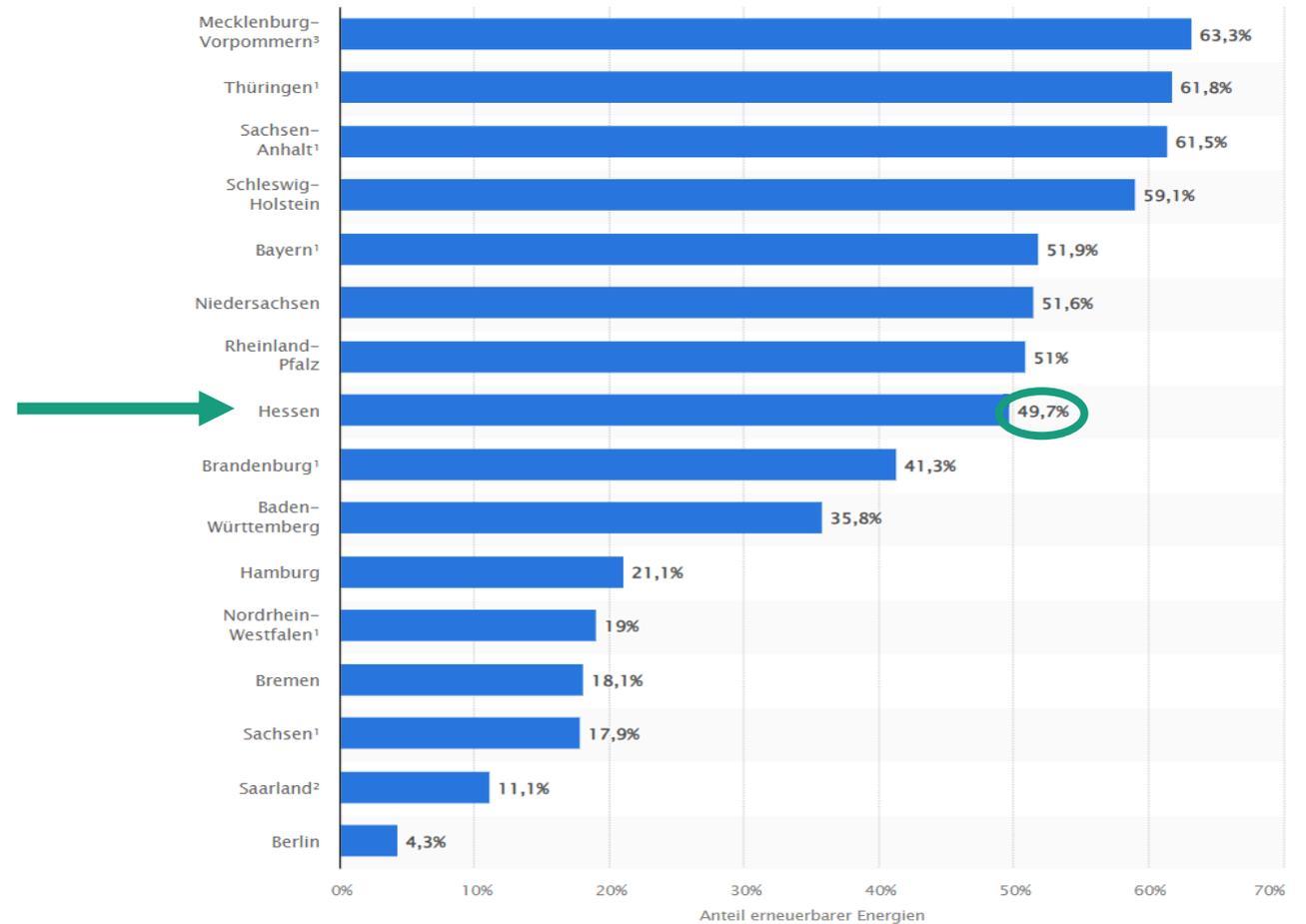


Quelle: [Erneuerbare Energien in Zahlen | Umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick-beitrag-erneuerbare) : <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick-beitrag-erneuerbare>

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Bundesländern im Jahr 2021



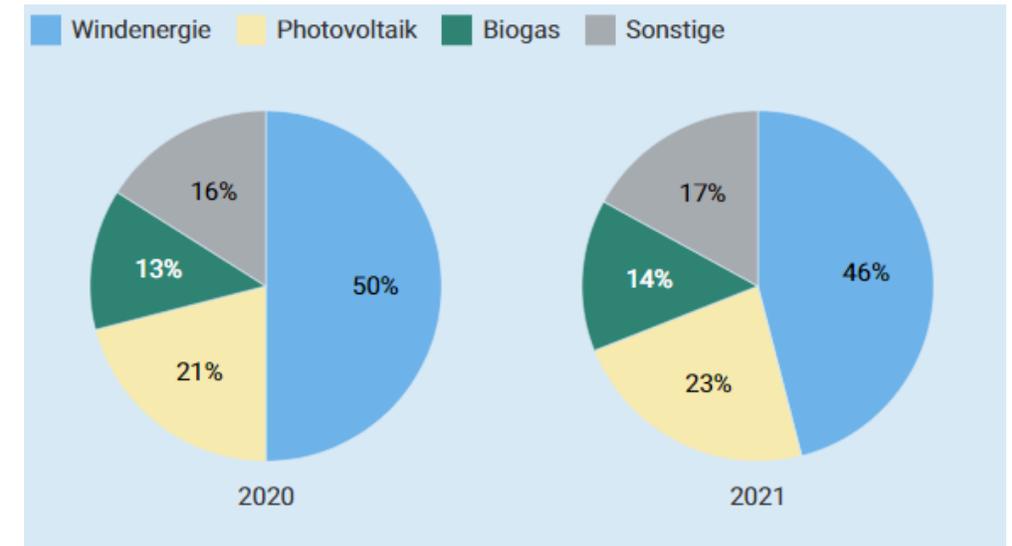
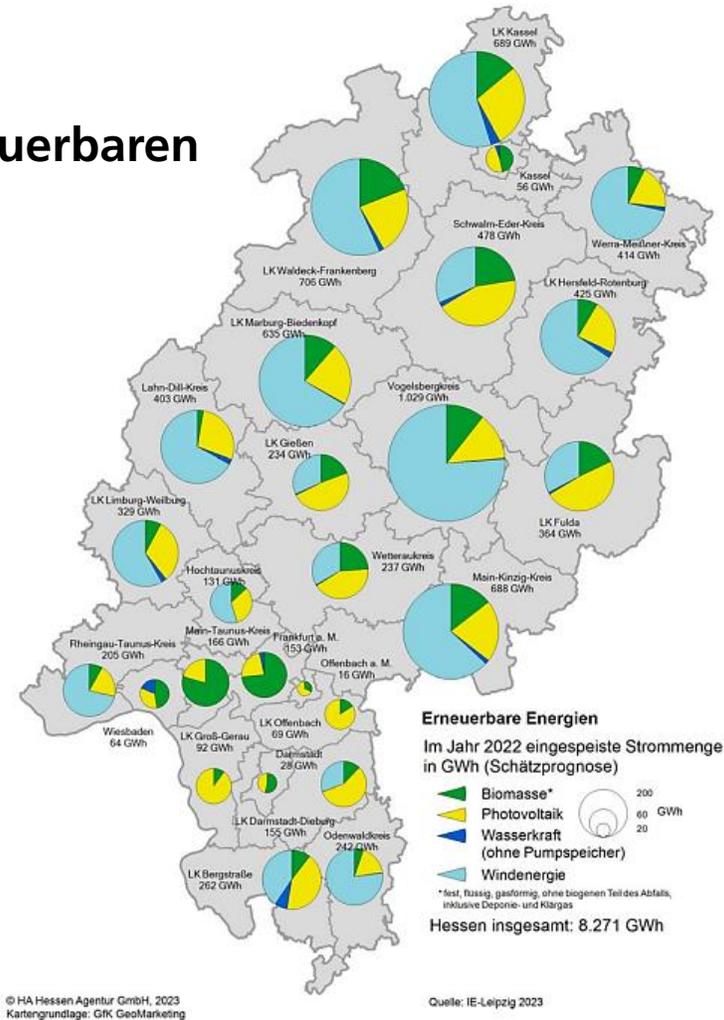
Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/255168/umfrage/anteil-erneuerbarer-energien-an-der-bruttostrom>

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen

Erzeugte und eingespeiste Strommenge von Energieanlagen in den hessischen Landkreisen und kreisfreien Städten nach Energieträgern 2022 (in GWh)



Anteile der wichtigsten Energieträger

Quelle: Landes Energie Agentur Hessen: Energiewende in Hessen – Monitoringbericht 2023: <https://www.lea-hessen.de/mediathek/publikationen/4186>
<https://www.hessenschau.de/wirtschaft/stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien-in-hessen-steigt---der-sonne-sei-dank-v1,energiemonitoring-100.html> ;

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Öffentliche Netto-
Stromerzeugung in
Deutschland am
28. Oktober 2024

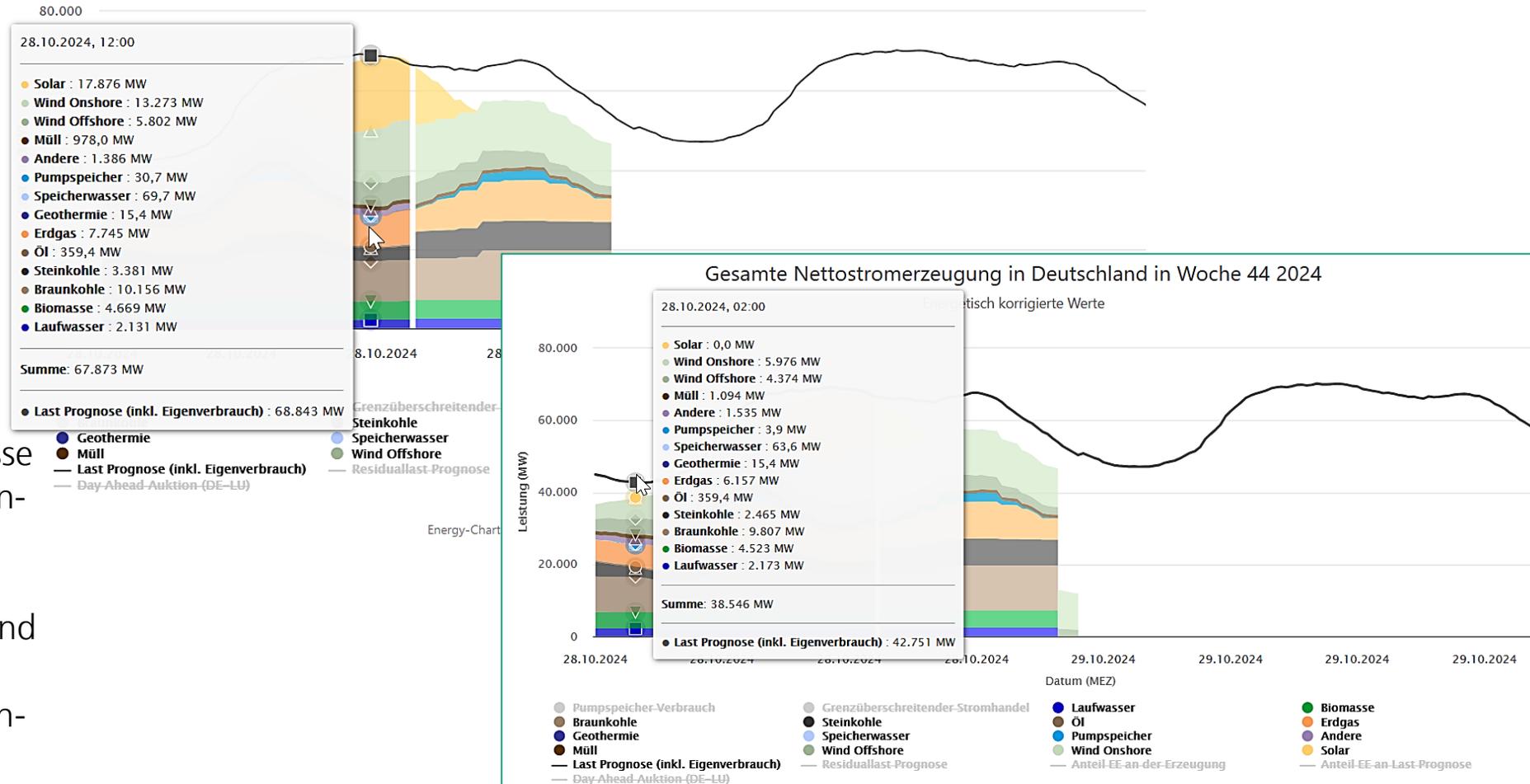
12 Uhr: 41,62 MW aus Solar,
Wind Onshore/Offshore, Biomasse
21.64 MW aus Öl, Erdgas, Braun-
und Steinkohle

2 Uhr: 14,87 MW aus Solar, Wind
Onshore/ Offshore, Biomasse
18,79 MW aus Öl, Erdgas, Braun-
und Steinkohle

Quelle: [Stromproduktion | Energy-Charts: https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?c=DE](https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?c=DE)

Gesamte Nettostromerzeugung in Deutschland in Woche 44 2024

Energetisch korrigierte Werte



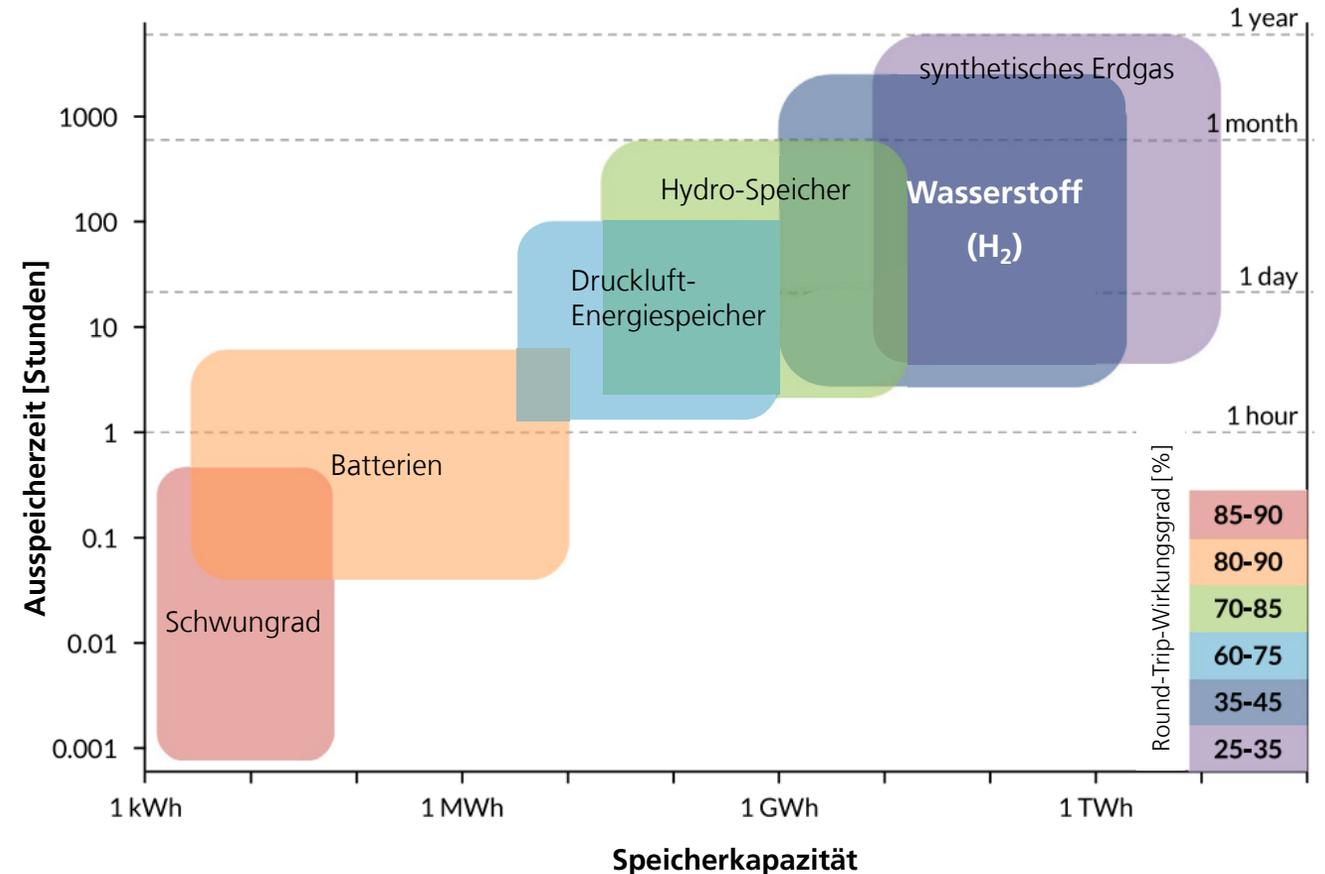
Energy-Charts.info - letztes Update: 28.10.2024, 15:37 MEZ

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Energiespeichertechnologien

- Vergleich der wichtigsten Energiespeichertechnologien in Hinblick auf Speicherung von Energie in verschiedenen Größenordnungen (Speicherkapazität) und für verschiedene Entladezeiten
- DC-Strom \rightarrow H₂ \rightarrow DC-Strom
- **Wirkungsgrad: 35 – 45 %**

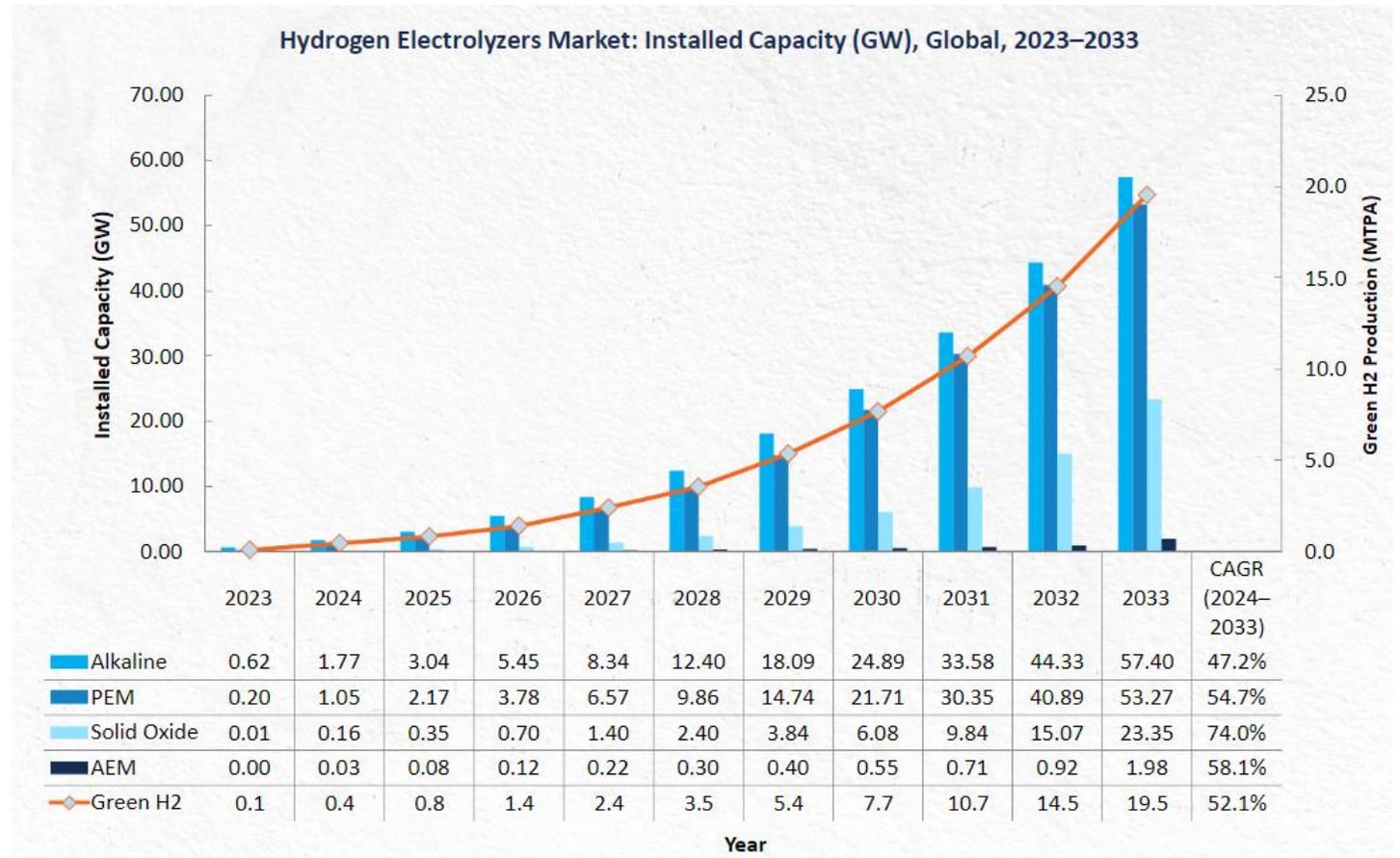


Quelle: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118130> : The role of hydrogen storage in an electricity system with large hydropower resources, 2024

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Prognosen zur Kapazität des Elektrolyseur-Marktes weltweit

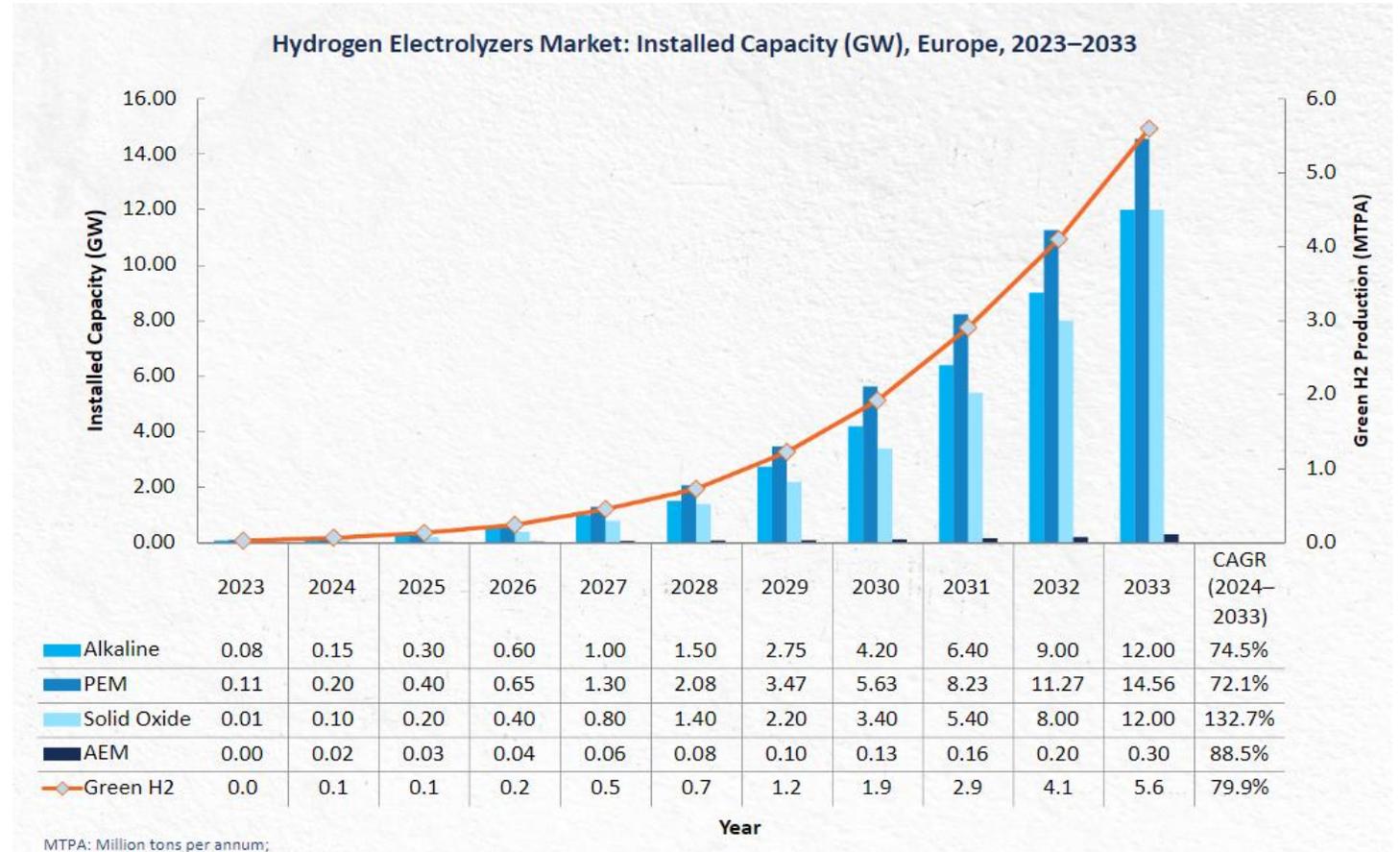


Quelle: Frost & Sullivan: Growth Opportunities in the Hydrogen Electrolyzers Market, 2023-2033; August 2024

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Prognosen zur Kapazität des Elektrolyseur-Marktes für Europa



Quelle: Frost & Sullivan: Growth Opportunities in the Hydrogen Electrolyzers Market, 2023-2033; August 2024

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Trends und Herausforderungen in der Elektrolyseur-Industrie

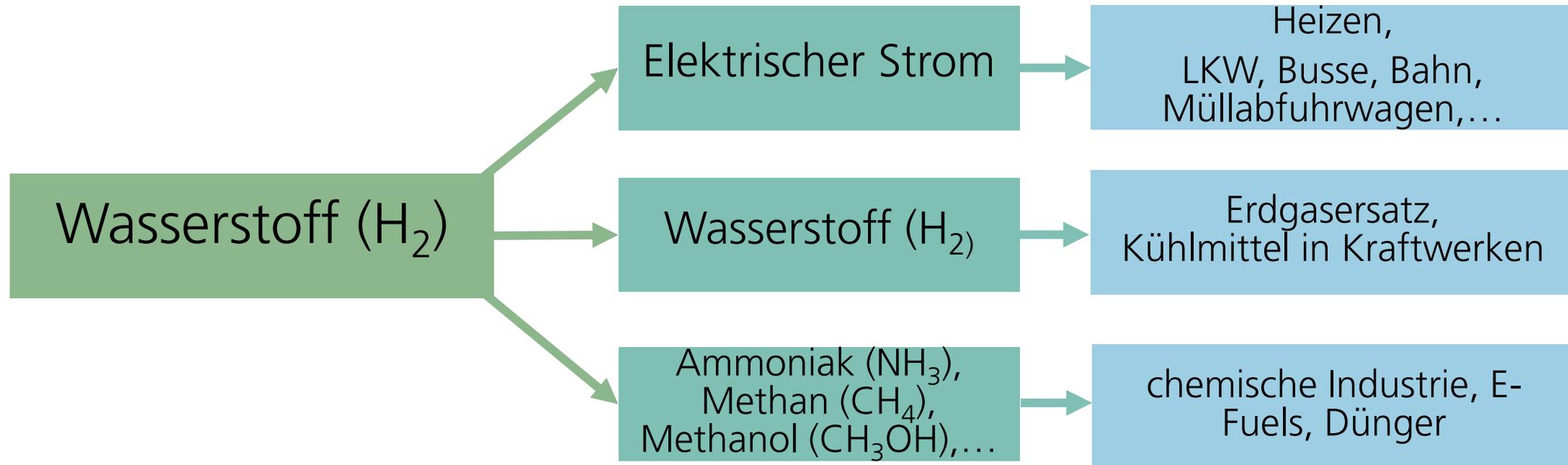


Quelle: Frost & Sullivan: Global Growth Opportunities in Electrolyzer Technologies for Hydrogen Production; Mai 2023

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

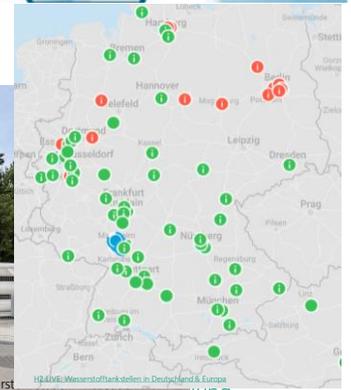
Vielseitige Nutzung von Wasserstoff



Zuverlässige Wasserstoffsysteme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Wasserstoff als Energieträger in Deutschland für
Stahlindustrie, chemische Industrie, Schwerlastverkehr,....



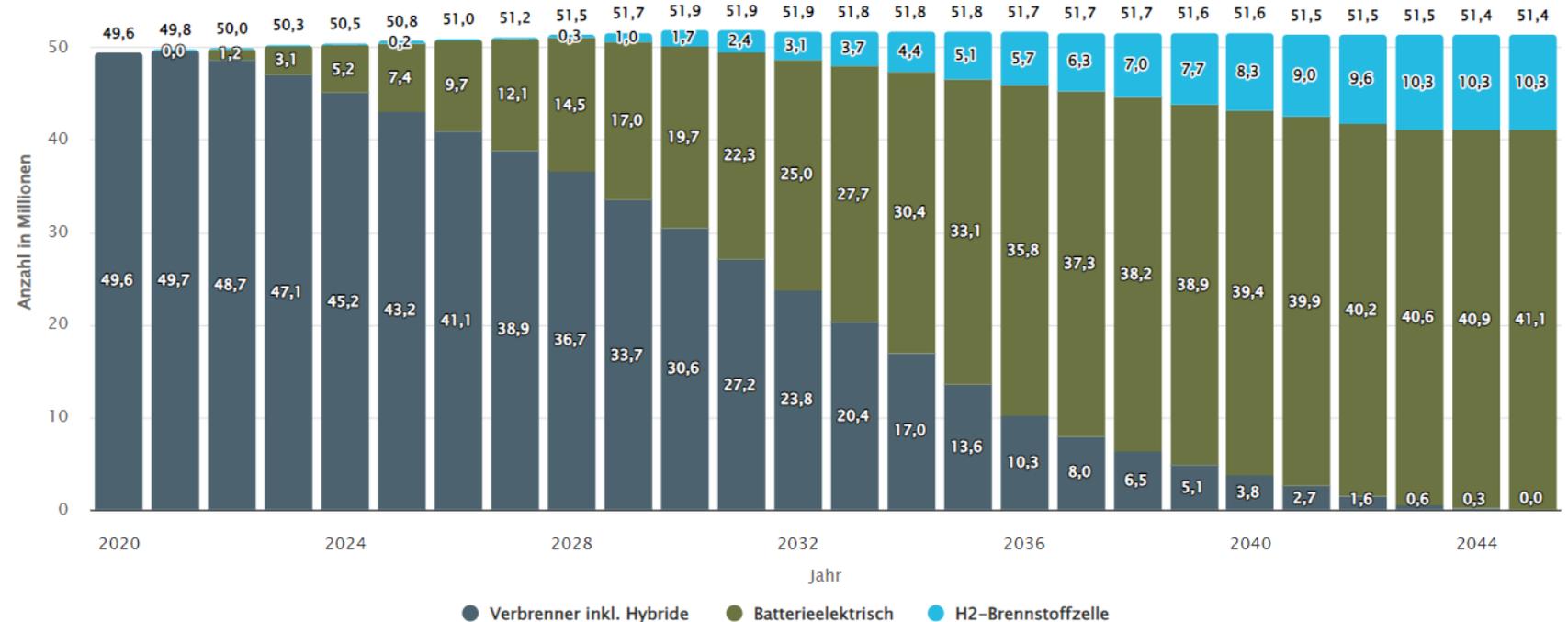
Quelle: [Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem | Umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-künftigen-energiesystem#industrie) : <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-künftigen-energiesystem#industrie>
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-künftigen-energiesystem#industrie>
<https://www.electrive.net/media/2017/06/daimler-shell-wasserstoff-schlüssel-im-künftigen-energiesystem#merstellung>

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Referenzszenario für Antriebstechnologien im PKW-Verkehr (2021)

Das Szenario stellt ein volloptimiertes Szenario mit Emissionsreduktion energiebedingter CO₂-Emissionen von 65 % in 2030, 88 % in 2040 und 100 % im Jahr 2045 dar.



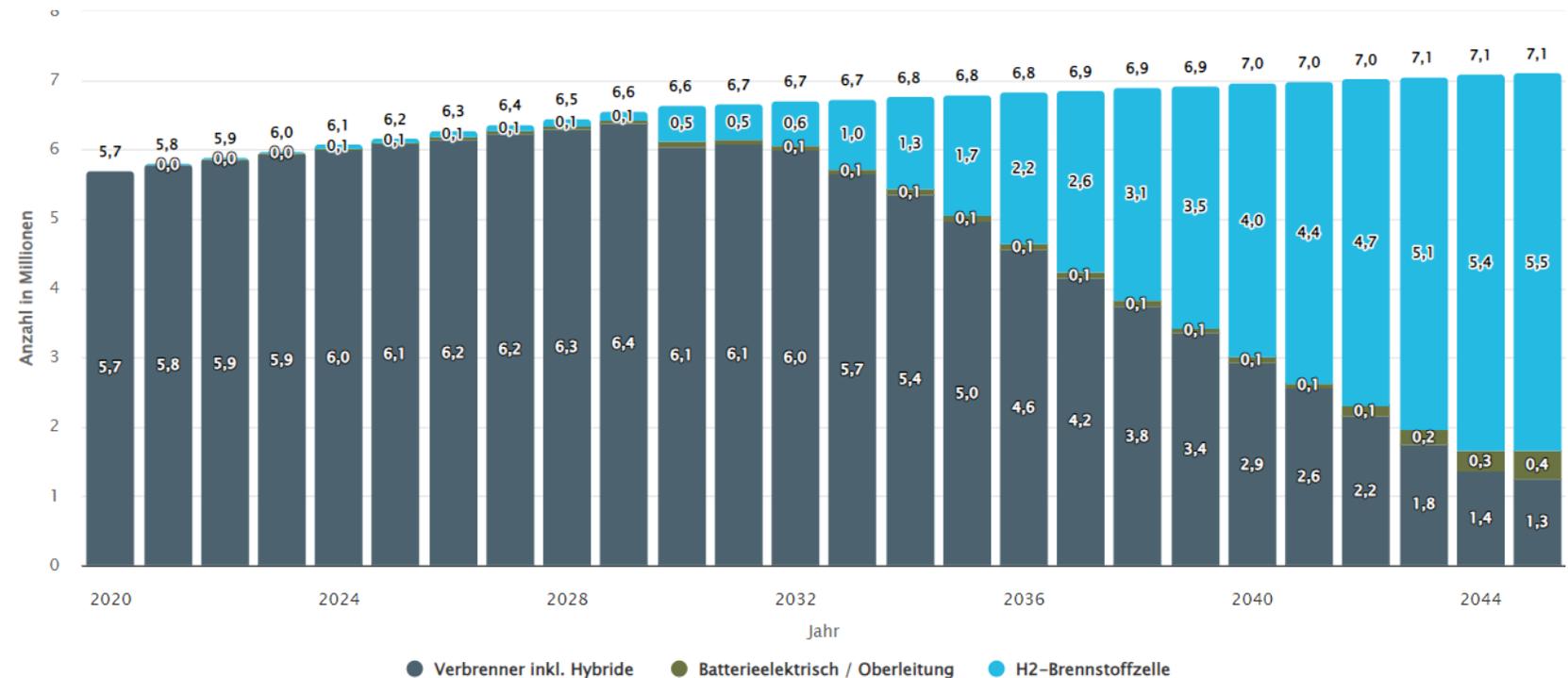
Quelle: https://www.energy-charts.info/charts/remod_sector_data/chart.htm?l=de&c=DE&scenario=reference&source=heating&charttype=column&sum=1&partsum=1

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Motivation

Referenzszenario für
Antriebstechnologien im
LKW-Verkehr (2021)

Das Szenario stellt ein volloptimiertes Szenario mit Emissionsreduktion energiebedingter CO₂-Emissionen von 65 % in 2030, 88 % in 2040 und 100 % im Jahr 2045 dar.



Quelle: https://www.energy-charts.info/charts/remod_sector_data/chart.htm?l=de&c=DE&scenario=reference&source=heating&charttype=column&sum=1&partsum=1

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

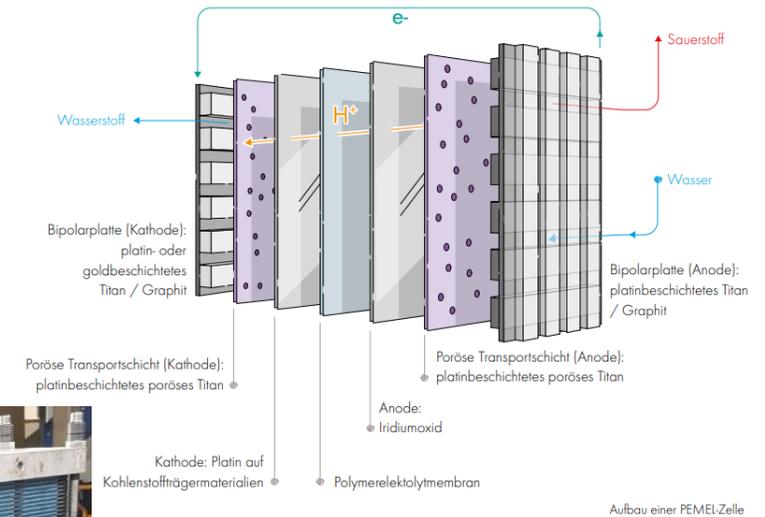
H₂ von der Erzeugung über die Speicherung und den Transport bis zur Nutzung

Elektrolyse zur H₂-Herstellung

Tank zur Speicherung

Tank und Pipeline zum Transport

Brennstoffzelle zur Wasserstoffumwandlung in elektrische Energie



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Prüfstandsentwicklung & Realitätsnahe Prüfung von Materialien der Wasserstoffwirtschaft



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Prüfstandsentwicklung & Realitätsnahe Prüfung von Materialien der Wasserstoffwirtschaft

Schwingfestigkeitsuntersuchungen unter Druckwasserstoff und Stickstoff für die Bauteillebensdaueranalyse

- Druckbereich von 10 bis 50 bar (ab 2025 bis 100 bar)
- Temperaturen zwischen -40 °C und $+130\text{ °C}$
- H_2/N_2 -Konzentrationen bis 99,9999
- O_2 -Konzentrationen $< 4\text{ ppm}$
- Durchführung von Zugversuchen und Zeitstandversuchen
- Servohydraulisches Prüfsystem mit Nennlast von 63 kN
- Erfüllung der Anforderungen zur Gasreinheit nach ANSI_CSA_CHMC1-2014
- Erfüllung der geforderten Genauigkeit bei der Versuchsdurchführung nach ISO 1099 und dem Code of Practise (ISBN-92826-9681; EUR 161382_EN)



Einfluss von Druckwasserstoff auf des Verformungsverhalten des Schmiedestahls 1.5132 unter 50 bar Druckwasserstoff.

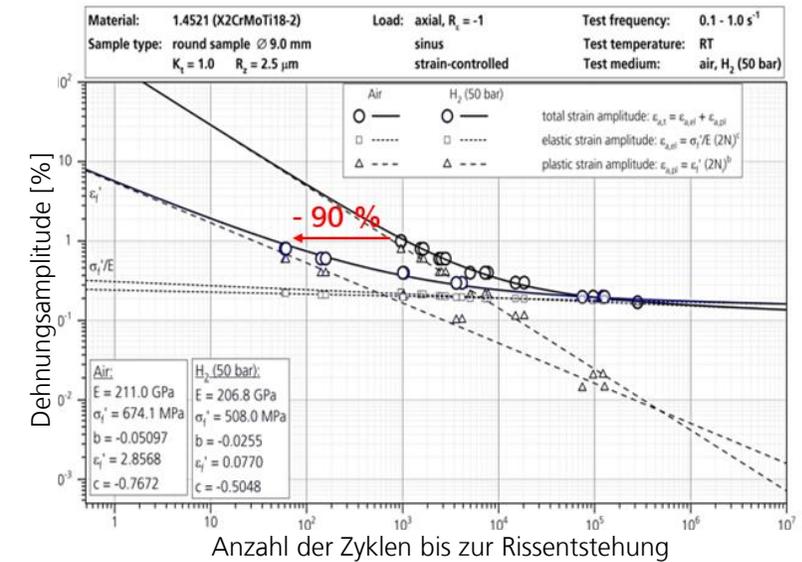
Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Realitätsnahe Prüfung von Materialien der Wasserstoffwirtschaft

Dehnungsgesteuerte Ermüdungsversuche unter Luft und 50 bar Wasserstoff an Rundproben aus ferritischem Stahl

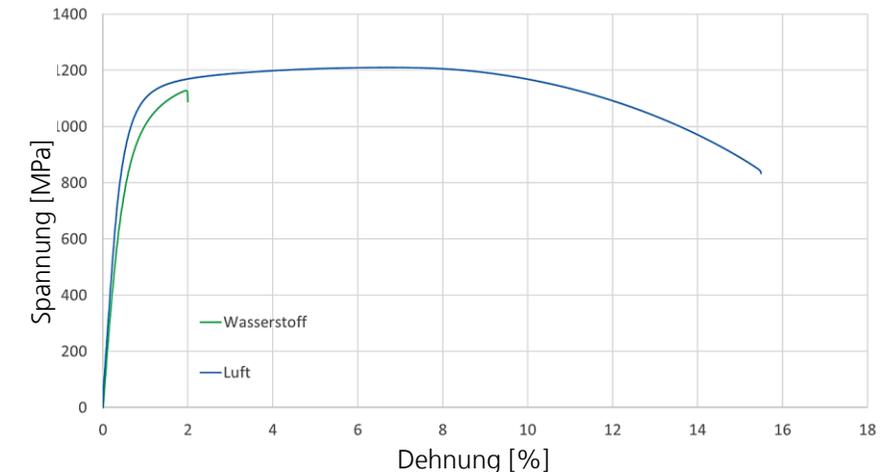
- Ähnliches Verhalten bei sehr hohen Ermüdungszyklen
- 90 % Lebensdauererminderung bei 50 bar Wasserstoff und einer Dehnungsamplitude von 1 %

Source: Melz, T.; Baumgartner, J.; Schmiedl, T.; Oechsner, M.; Engler, C. T.; Vatter, J., 2021. Abschlussbericht Hy2Design - Grundlagen für die Bemessung druckwasserstoffexponierter Komponenten unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Eigenschaften und Schädigungsmechanismen. ME 3301/4-1 | OE 558/13-1, Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG



Einfluss von Druckwasserstoff auf des Verformungsverhalten des Schmiedestahls 1.5132 unter 50 bar Druckwasserstoff

- Reduktion der Streckgrenze und Zugfestigkeit
- Signifikante Reduzierung der Bruchdehnung

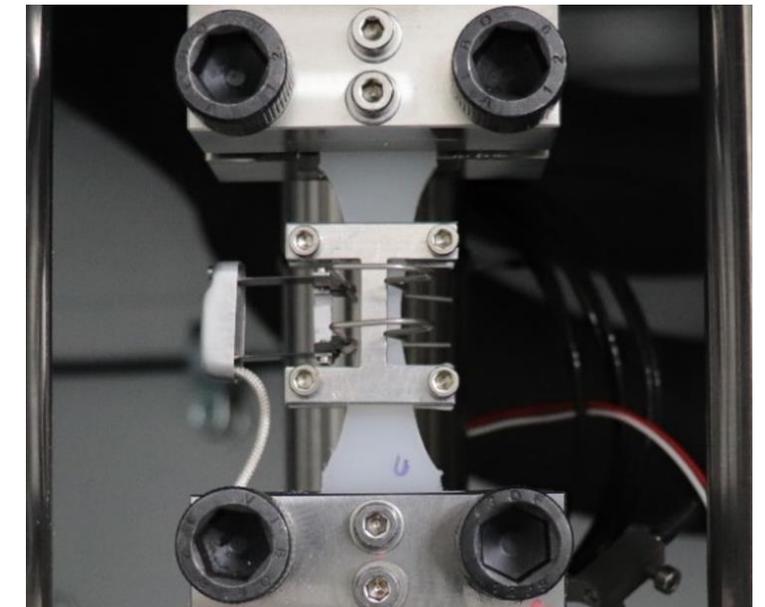
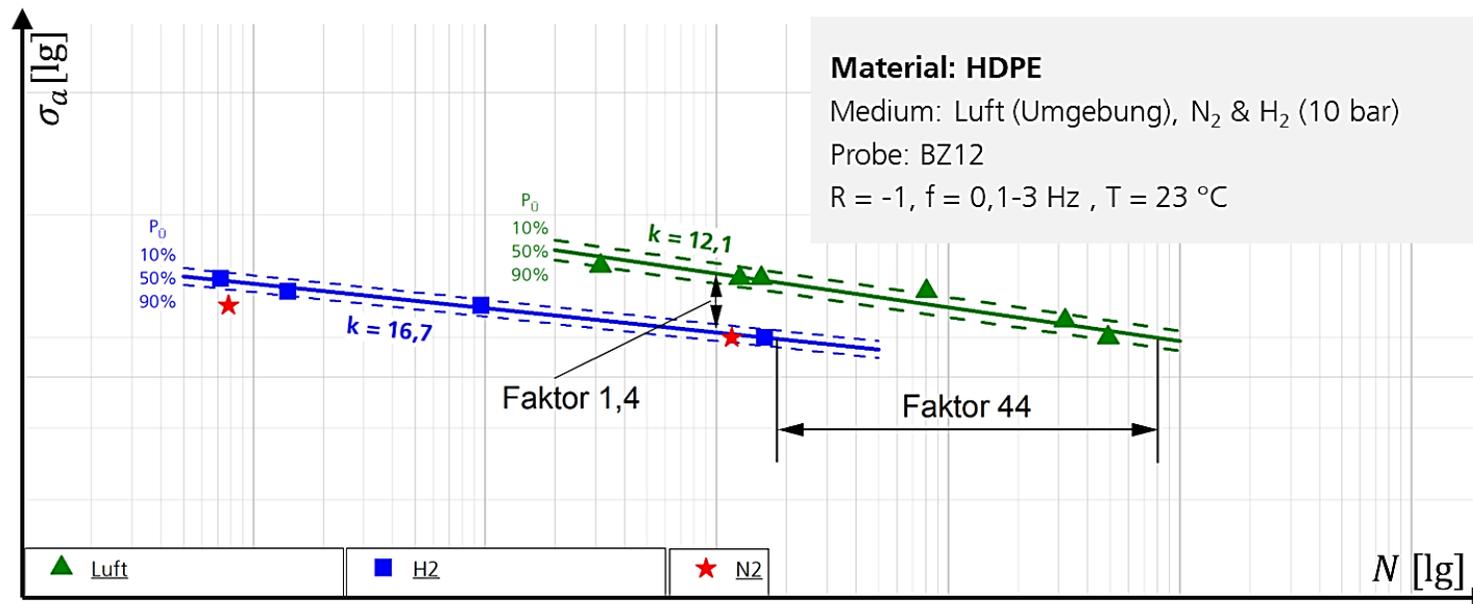


Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Chemische- & Physikalische Charakterisierung von Kunststoffen der Wasserstoffwirtschaft

Wöhlerlinie stellt Spannungsamplitude über erreichte Schwingspiele in 10 bar H₂ im Vergleich zur Prüfung unter Luft und N₂ dar.

Zyklische Prüfung unter Druckwasserstoff



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Chemische & physikalische Charakterisierung von Kunststoffen der Wasserstoffwirtschaft



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

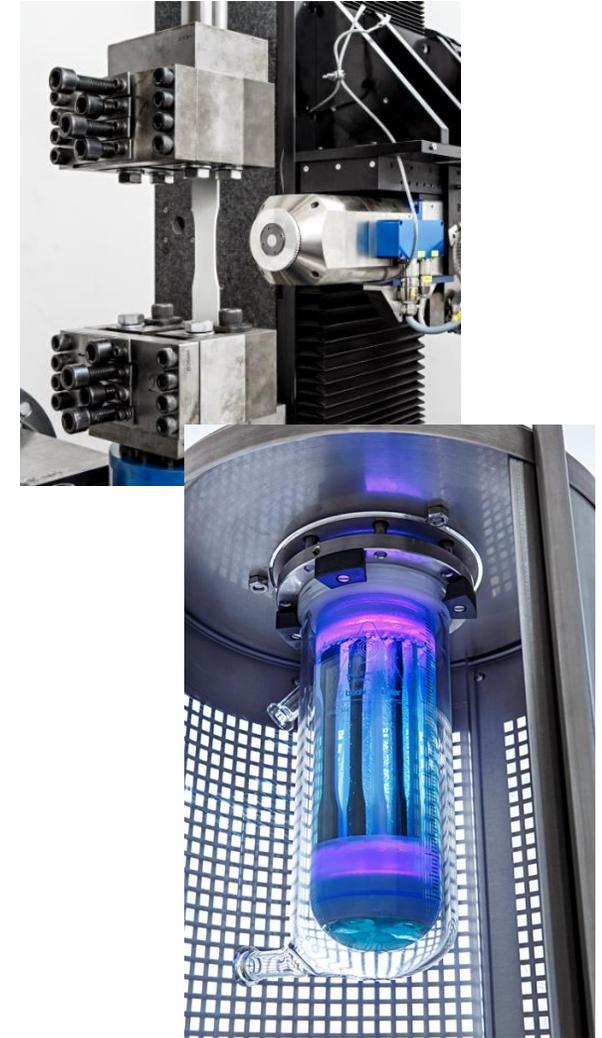
Chemische- & Physikalische Charakterisierung von Kunststoffen der Wasserstoffwirtschaft

Kunststoffe – Essenziell für die Wasserstofftechnologie

- In der Wasserstofftechnologie finden Kunststoffe Anwendung z. B. in Gehäusen und Bipolarplatten von Brennstoffzellen, Faserverbunden und Linern von Wasserstoffdrucktanks, Dichtungskomponenten, Rohrleitungen und Pipelines.
- Für den sicheren Betrieb ist es von erheblicher Relevanz, das Materialverhalten unter Betrachtung der Materialstruktur zu verstehen und vorhersagen zu können.
- **Wichtiges Thema: PFAS-Ersatz => Initiierung eines industriellen Verbundprojektes**

Welche Einflüsse sind relevant?

- Bei Kunststoffen stehen vor allem das mechanische Verhalten, die chemische und physikalische Alterung, Wechselwirkungen mit Flüssigkeiten und Gasen, die Sorptions- bzw. Diffusionseigenschaften, sowie das Quellverhalten im Fokus.
- Im direkten Wasserstoffkontakt sind unterschiedliche Temperatur- und Druckbereiche relevant.



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Chemische- & Physikalische Charakterisierung von Kunststoffen der Wasserstoffwirtschaft

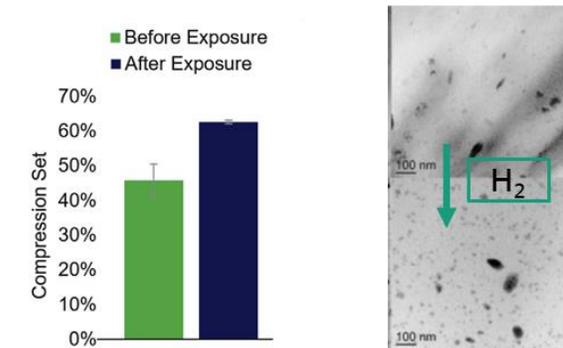
Realitätsnahe Alterungskonzepte:

- Kombiniert: H₂ unter Betriebsdrücken, thermische und mechanische Belastung, Kontakt zu anderen Medien
- Analytisch vom Bauteil zum Material: Molekulare und strukturelle Analyse, mechanische Charakterisierung
- Gezielte Additivierung
- Maßgeschneiderte Stabilisatorkonzepte

Ziele:

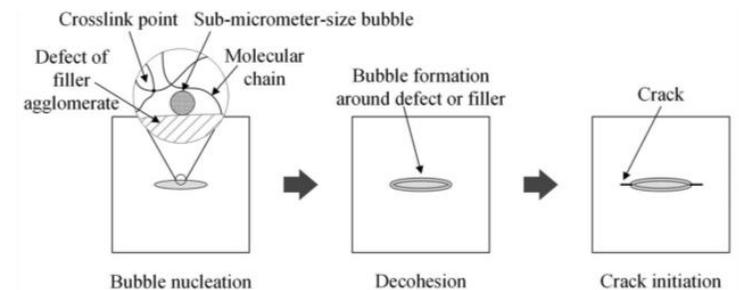
Schädigung von Kunststoffen durch H₂ unter Betriebsbedingungen erkennen, verstehen, verzögern und verhindern

- Polymere können mit H₂ quellen, Weichmacher separieren [1]
- In HDPE sinkt Zugfestigkeit bei H₂-Exposition unter Druck [2]



↑ Dichtungen versagen wegen separierter Weichmacher [1]

Phasengrenzen erzeugen Risse bei Druckänderung [2] ↓



[1] Simmons et al., Int. J. Hyd. En., 2021 (46), 23, 12300.;

[2] Balasooriya et al, Pol. Rev., 2021 (ahead of print).

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Multiphysikalische Bewertung von BZ & Zustandsüberwachung von Wasserstofftanks & FMEA



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Multiphysikalische Bewertung von Brennstoffzellen

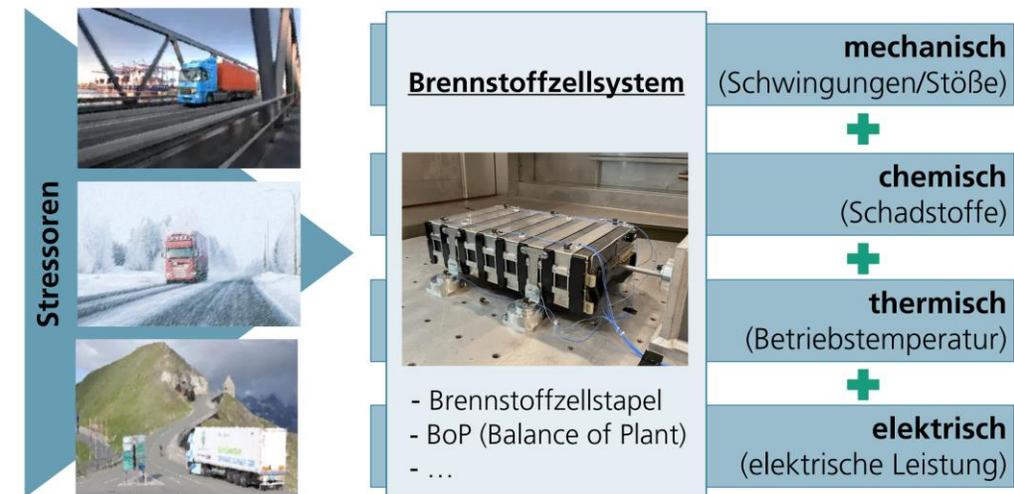
Experimentelle Testeinrichtung für die kombinierte Belastung von PEM-Brennstoffzellen unter voller Funktion

MAST (**M**ulti**a**xialer **S**chwing**t**isch)

- Anregung über 6 Freiheitsgrade bis 200 Hz und 11 g bis 1 t Masse
- Elektrische Beanspruchung: ± 600 A und 800 A, bis 800 V
- Thermische Beanspruchung: Klimakammer (Fläche: 16 m²) bei Temperaturen zwischen -40 °C und $+80$ °C

- Kombinierte Beanspruchung von Brennstoffzellen unter realitätsnahen Einsatzbedingungen
 - Mechanische Vibration, harmonisch, stochastisch, Schock
 - Temperatur und Feuchte
 - Elektrisch

- Nutzung der ermittelten Beanspruchungen für den Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsnachweis am Gesamtsystem (z.B. Brennstoffzelle)



Schema zur Überführung schädigender Betriebsituationen (Stressoren) auf einen Systemprüfstand.

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Zustandsüberwachung von Wasserstofftanks

Projektziel: Sensorische Überwachung von Drucktanks

- Kommerzielle Sensortechnologien wurden am Fraunhofer LBF zunächst an Materialproben mit unterschiedlichem Laminataufbauten untersucht. Hierdurch konnten die Versagensmechanismen wie Faserbruch, Matrixbruch oder Delamination gezielt im Ermüdungsversuch erzeugt und detektiert werden.
- Auf Basis der gesammelten Messdaten konnten Auswertungsalgorithmen entwickelt werden, um den Lebensdauerverbrauch des Materials zu bewerten.
- Die Methodik wurde auf Versuchsbehälter übertragen und im Behälterversuch verifiziert.

Anwendungen

- H₂-Drucktanks
- Lebensdauerüberwachung (mobil oder stationär)
- Unterstützung der Gutachter nach einem Verkehrsunfall bei der Beurteilung, ob ein Tank für den weiteren Betrieb noch sicher ist.



Gefördertes Projekt
HyMon³



Weitere Infos unter <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/hymon/>

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Fraunhofer-Leistungszentrum GreenMat4H₂ Hessen



Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS (Hanau)

Nachhaltige Materialien | Plasmalyse | Kreislaufkonzepte | Recyclingtechnologien | systemische Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen



Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (Darmstadt)

Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von H₂-Systemen | Optimierung und Lebensdauerbewertung von Werkstoffen und Komponenten | Entwicklung von acoustic emission basierter Sensorik als Monitoringsystem für Wasserstofftanks | probabilistische FMEA

Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Fraunhofer-Leistungszentrum GreenMat4H₂ Hessen

Leistungszentrum GreenMat4H₂ auf einen Blick

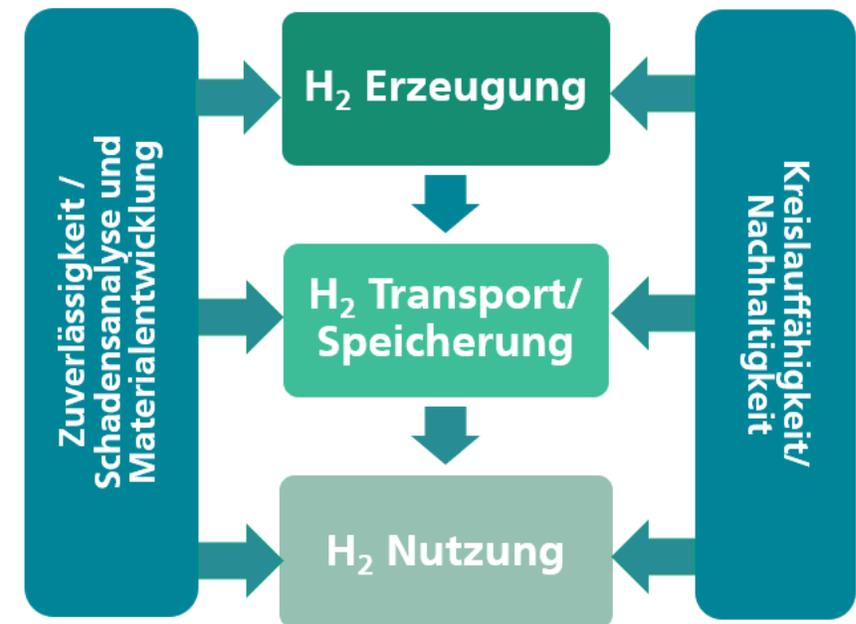
Wir erforschen und entwickeln „grüne“ Werkstoffe und Technologien zur sicheren **Herstellung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff** und für die Umstellung bestehender Strukturen auf Wasserstoffanwendungen

Unsere Ziele:

- Eine nachhaltige und zuverlässige Wasserstoffwirtschaft in Hessen realisieren und damit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten
- Stärkung von Hessen als Hochtechnologieland
- Informieren und Vernetzen (Bürger-Dialog, Messen, Foren, Workshops, Konferenzen, Wasserstoffstammtisch)

Unser Anspruch:

Zentrale Anlaufstelle für die Wasserstoffwirtschaft im Rhein-Main-Gebiet sowie darüber hinaus



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Fraunhofer-Leistungszentrum GreenMat4H₂ Hessen

12. Wasserstoffstammtisch an der Hochschule RheinMain

Am: 03.12.2024

Start: 16:00 Uhr

In: Am Brückweg 26
65428 Rüsselsheim

Anmeldung unter: <https://www.leistungszentrum-wasserstoff-hessen.de/de/veranstaltungen-und-messen/12-wasserstoffstammtisch.html>

oder einfach scannen =>

Die Teilnahme ist kostenfrei.



Zuverlässige Wasserstoff-Systeme für einen erfolgreichen Hochlauf der Wasserstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. Saskia Biehl
Leitung Strategisches Management LBF
Leitung Geschäftsstelle des Leistungszentrums
GreenMat4H₂

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und
Systemzuverlässigkeit LBF

Bartningstr. 47

64289 Darmstadt

Phone: +49 6151 705-282

Mobile +49 172 6911 527

saskia.biehl@lbf.fraunhofer.de



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**