



**EXPERTENEMPFEHLUNG 2023  
FORSCHUNGSNETZWERK WASSERSTOFF**





# WASSERSTOFF

FORSCHUNGSNETZWERKE  
ENERGIE

## Impressum

### Herausgeber

Projektträger Jülich (PtJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

### Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Wasserstoff

### Gestaltung und Produktion

Projektträger Jülich (PtJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

### Stand

Februar 2023

### Bildnachweise:

Titel: ©SmirkDingo – stock.adobe.com

Die Überarbeitung der Expertenempfehlung ist in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff im Dezember 2022/Januar 2023 erstellt worden.

Die Clustersprecher möchten sich bei den Themenpaten, AG-Moderatoren und Teilnehmenden des Konsultationsprozesses ausdrücklich bedanken, ohne deren Engagement es nicht möglich gewesen wäre, diese Überarbeitung zu erstellen.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## INHALT

---

	<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>	
<b>1.</b>	<b>Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten</b>	<b>6</b>	
<b>2.</b>	<b>Infrastruktur und Systemintegration</b>	<b>10</b>	
<b>3.</b>	<b>Nutzung</b>	<b>14</b>	
<b>4.</b>	<b>Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung</b>	<b>18</b>	
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		



## ZUSAMMENFASSUNG

---

Das Forschungsnetzwerk Wasserstoff umfasst knapp 1.350 aktive Mitglieder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verbänden und deckt mit seinen vier Themenclustern Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten; Infrastruktur und Systemintegration; Nutzung sowie Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung die gesamte deutsche Wasserstoffkompetenz im Bereich der angewandten Energieforschung ab.

Im September 2021 wurde die erste Version der Expertenempfehlung, welche den Forschungsbedarf entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft bis 2025 zusammenfasst, an die Vertreter der Bundesministerien übergeben. Diese wurde im Frühjahr 2022 durch eine Langfassung der Expertenempfehlung ergänzt, in welcher die in der Kurzfassung aufgeführten Themen aufgegriffen, detailliert dargestellt und in kurz-, mittel- und langfristige Forschungsbedarfe eingeordnet werden.



**Erzeugung von Wasserstoff  
und Folgeprodukten**



**Infrastruktur und  
Systemintegration**

Das in der hier vorliegenden, überarbeiteten Expertenempfehlung gebündelte Fachwissen wird in den Konsultationsprozess des 8. Energieforschungsprogramms einfließen und der Bundesregierung die zukünftigen Handlungsbedarfe und Förderstrategien aufzeigen.

Sie ist in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff im Dezember 2022/Januar 2023 erstellt worden.

Die Clustersprechenden möchten sich bei den Teilnehmenden des Konsultationsprozesses, an dem Forschung und Wirtschaft, kleine und große Unternehmen und Verbände gleichermaßen beteiligt waren, ausdrücklich bedanken. Ohne dieses Engagement wäre es nicht möglich gewesen, die überarbeitete Expertenempfehlung zu erstellen.



**Nutzung**



**Sicherheit, Akzeptanz  
und nachhaltige Markteinführung**

## Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Das Netzwerk besteht aus vier Clustern, die sich in Arbeitsgruppen unterteilen.





Blauer  
& Türkiser  
H<sub>2</sub>

Methan,  
Methanol,  
Ammonika, Olefine,  
Ether. Synth.  
Kerosine, Diesel &  
Ottokraftstoffe

Integration  
ins Energiesystem  
mit Strombezug

Pipelinetransport  
Verteilernetze

**INFRASTRUKTUR  
UND SYSTEM-  
INTEGRATION**

Transport-  
Infrastruktur  
für straßen-, schiffs-  
und schienenge-  
bundenen  
H<sub>2</sub>-Transport

Pipelinetransport  
Fernleitungsnetze

Gesamtsystem-  
integration  
und  
-modellierung

Mobil:  
PKW, LKW, NFZ,  
Schienenverkehr,  
Schifffahrt,  
Flugverkehr

Mittel-  
und großskalige  
H<sub>2</sub>-Speicherung

ERZEUGUNG  
& FOLGE-  
EFFEKTE

ANWENDUNG

Stationär:  
Industrie, Handel,  
Wohnquartier,  
Wärmehaube,  
Gebäude

# 1. ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN

---

## Motivation

---

Die Erzeugung von CO<sub>2</sub>-armem Wasserstoff sowie wasserstoffbasierten Folgeprodukten sind wichtige Säulen der Transformation des Rohstoff- und Energiesystems für eine nachhaltige Gesellschaft. In Summe existieren verschiedene Verfahren zur Herstellung nachhaltiger, stofflicher Energieträger und Grundstoffe, die auf dem Weg zur Klimaneutralität langfristig oder als Brückentechnologien eine entscheidende Rolle spielen.

Beim Wasserstoff fokussiert sich die Nationale Wasserstoffstrategie auf die Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Wasserelektrolyse, die regenerativ erzeugten Strom nutzt. Ferner können alternative photokatalytische, photobiologische und solarthermochemische Prozesse sowie Verfahren unter Einsatz von Biomasse zur regenerativen Wasserstoffherzeugung genutzt werden. Weitere Pfade zur CO<sub>2</sub>-armen Herstellung von sogenanntem blauem und türkischem Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger werden derzeit intensiv untersucht.

Im Bereich der Folgeprodukte werden Technologien zur Umwandlung in andere, wasserstoffbasierte Energieträger adressiert, die die Speicher- und Transportfähigkeit erhöhen. Insbesondere in der Luft- und Seeschifffahrt sowie zu Teilen im Schwerlastverkehr sind nachhaltige flüssige Kraft- und Treibstoffe bislang alternativlos, um auf absehbare Zeit Klimaneutralität zu erreichen. Auch in der Stahl- und chemischen Industrie müssen bestehende Produktionsabläufe zur Herstellung von Zwischen- und Endprodukten umgestaltet werden.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

---

Gemäß Koalitionsvertrag der Bundesregierung sollen bis zum Jahr 2030 H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen mit einer Gesamtleistung von zehn GW errichtet werden. Dies erfordert eine breite Industrialisierung und schnelle Umsetzung praxistauglicher Technologien. Die wirtschaftliche Implementierung dieser Verfahren setzt im Wesentlichen voraus, dass die Kosten durch Effizienzsteigerung, Skalierung und längere Nutzungsdauern sinken. Ferner muss die automatisierte, großindustrielle Herstellung der Komponenten und Zellstapel etabliert und hinsichtlich Quantität und Qualität optimiert werden.

Daneben besteht dringender Bedarf an der Weiterverfolgung disruptiver Ansätze mit bislang geringem TRL, die jedoch das Potenzial einer deutlichen Erhöhung der Effizienz bieten. Für alle diese Verfahren ist es grundlegend relevant, zeitnah neue Materialsysteme (Katalysatoren, Membranen, Elektrodenmaterialien, Werkstoffe) zu entwickeln und zu skalieren.

Die Entwicklung einzelner Technologien muss zudem durch eine systemische Optimierung ergänzt werden. Dies beinhaltet insbesondere folgende Aspekte:

- Ökonomische und ökologische Analyse der gesamten Wertschöpfungs- und Lieferketten
- Ganzheitliche Optimierung der Erzeugungsprozesse für Wasserstoff und Folgeprodukte, wie der Integration von Wärme- und Stoffströmen und der dynamischen Betriebsführung
- Integration der Erzeugungsanlagen in das Energiesystem durch Optimierung der elektrischen Systemtechnik (Kostenreduktion der Technik, netzdienliche Flexibilisierung und Wirtschaftlichkeitsverbesserung des Betriebs)
- Standardisierung und Harmonisierung von Bauteilen sowie Anpassung bestehender Normen und Standards an zukünftige Anforderungen und für einen weltweiten Einsatz

## Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse

---

Zur H<sub>2</sub>-Erzeugung durch Elektrolyse stehen Verfahren mit unterschiedlichen TRL zur Verfügung. Die alkalische Wasserelektrolyse (AEL) zählt zu den etablierten Verfahren mit hohem TRL. Sie benötigt kaum kritische Ressourcen und kann bereits heute in großen Stückzahlen mit hoher Leistung produziert werden. FuE-Bedarf besteht hinsichtlich Materialien und Komponenten für hohe Drücke und Temperaturen, angepassten Zelldesigns und bei der Serien- und Massenfertigung. Die alkalische Membran-Elektrolyse (AEMEL) hat trotz geringem TRL ein hohes Potenzial, kompakte Elektrolyseeinheiten mit hoher Dynamik zu entwickeln. Hier ist es notwendig, dass Komponenten (Membranen, Katalysatoren) weiterentwickelt, die Langzeitstabilität erhöht und Zellstapel und Anlagenkonzeptionen skaliert werden.





Die PEM-Wasserelektrolyse (PEMEL) befindet sich derzeit in der großskaligen Markteinführung. Sie weist eine hohe Flexibilität und Leistungsdichte sowie eine geringe Komplexität des Gesamtsystems auf, verwendet aber kostenintensive und teilweise kritische Materialien. Diese gilt es, in Zukunft zu reduzieren oder zu substituieren. Eine zentrale Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Entwicklung und Etablierung von Verwertungs- und Recyclingverfahren, die den Hochlauf der Produktion begleiten und in die bestehenden Fertigungsabläufe integriert werden müssen.

Die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) auf Basis von Festoxidzellen oder protonenleitenden, keramischen Zellen wandelt verdampftes Wasser in Wasserstoff beziehungsweise Gasgemische aus Wasserdampf und Kohlendioxid direkt in Synthesegas um. FuE-Bedarf besteht vor allem bei den Materialien (Erhöhung Leistungsdichte, Robustheit und Lebensdauer), dem Scale-up der Stacks und der Entwicklung vollautomatisierter Herstellungsprozesse. Recyclingmöglichkeiten sowohl für die metallischen als auch die keramischen Komponenten sind ebenfalls zu erarbeiten.

#### **Erzeugung von grünem Wasserstoff durch alternative Herstellverfahren**

---

Die photoelektrochemischen und photokatalytischen, die solarthermochemischen und die photobiologischen Prozesse wandeln solare Energie direkt in Wasserstoff oder andere chemische Energieträger um. Sie haben das Potenzial, grünen Wasserstoff besonders effizient und kostengünstig herzustellen. Die Verfahren weisen aber einen allgemein geringeren TRL auf. Ziele der Forschung sind, den Wirkungsgrad und die Langzeitstabilität zu erhöhen. Dies gelingt durch effiziente und stabile Materialien (Absorber), kostengünstige Konzepte zur Skalierbarkeit der Zellen und Reaktoren sowie durch die Optimierung photoelektrischer Systemaspekte und der Solarkonzentratoren beziehungsweise die Wärmerückgewinnung bei solarthermochemischen Systemen.

#### **Erzeugung von grünem Wasserstoff aus Biomasse und biogenen Reststoffen**

---

Bei der Produktion von Wasserstoff aus biogenen Quellen und Reststoffen werden Verfahren wie die Fermentation, Reformierung, Vergasung, Pyrolyse und

Plasmalyse genutzt. Sie können in regional geschlossenen Stoffkreisläufen kosteneffiziente Wasserstoffquellen erschließen und dadurch den Hochlauf des H<sub>2</sub>-Marktes beschleunigen. Durch angeschlossene Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung sowie -Nutzung (CCS/CCU) ergeben sich effektive Treibhausgas- (THG-) Senken. Forschungsbedarf besteht bei der Skalierung solcher Anlagen auf industriellen Maßstab sowie bei der effizienten Eduktaufbereitung und Abtrennung des Wasserstoffs. Parallel sollten Studien zur Erhebung der Reststoff- und daraus resultierenden Erzeugungspotenziale sowie deren CO<sub>2</sub>-Bilanzen durchgeführt werden.

#### **Erzeugung von blauem und türkischem Wasserstoff**

---

Blauer Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, indem das CO<sub>2</sub> abgeschieden und gespeichert wird. Türkiser Wasserstoff wird über die Methanpyrolyse aus fossilem Erdgas oder aus biogenen Quellen (wie Biogas) hergestellt, wobei kein gasförmiges CO<sub>2</sub>, sondern fester elementarer Kohlenstoff entsteht. Die für die Pyrolyse notwendige Energie kommt aus regenerativen Quellen. Beide Ansätze erfordern einen verhältnismäßig geringen Energieaufwand, bieten die Möglichkeit zu einem schnellen Hochlauf einer H<sub>2</sub>-basierten Energieversorgung und können innerhalb kurzer Zeit zu einer THG-Minderung beitragen. FuE-Bedarf besteht darin, Pyrolyse-Prozesse in den Demonstrationsmaßstab zu überführen und CCU-Verfahren sowie Verfahren der dauerhaften und sicheren Lagerung und/oder der Nutzung von CO<sub>2</sub> und Kohlenstoff zu entwickeln.

#### **Erzeugung von wasserstoffbasierten Folgeprodukten**

---

Die Produktion nachhaltiger synthetischer Grund- und Kraftstoffe auf Basis von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff, Kohlenstoff oder Synthesegas (H<sub>2</sub>/CO) ist ein wichtiger Baustein, um die Klimaziele zu erreichen. Produkte wie Methan, Methanol, Ammoniak, Olefine und Ether sind zentrale Elemente in der zukünftigen Chemie- und Kraftstoffindustrie. Zudem können sie, wie auch Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), als Trägermedium für Wasserstoff dazu beitragen, den Transport von Wasserstoff effizienter und sicherer zu gestalten. In der Luftfahrt und der maritimen Schifffahrt sowie zu Teilen im Schwerlastverkehr werden flüssige chemische Energieträger aufgrund ihrer hohen Energiedichte mittel- bis langfristig einen bedeutenden Beitrag leisten.

FuE-Bedarf für die Erzeugung wasserstoffbasierter Folgeprodukte besteht daher in der schnellen industriellen Umsetzung marktfähiger Gesamtprozessketten. Hierfür müssen unterschiedliche Teilprozesse ideal aufeinander abgestimmt werden, um eine wirtschaftliche großtechnische Produktion zu ermöglichen. Neben der Optimierung etablierter Technologien bieten neuartige disruptive Verfahren trotz niedrigem TRL das Potenzial für deutlich höhere Gesamteffizienzen, wie die direkte elektrochemische Synthese von Methan, Methanol, Ammoniak und Dimethylether (DME) sowie solarthermische, photochemische und biochemische Synthesen



## 2. INFRASTRUKTUR UND SYSTEMINTEGRATION

---

### Motivation

---

Als Bindeglied zwischen den Erzeugungs- und Nutzungsorten sowie als Speicher kommt der Wasserstoffinfrastruktur in einem zukünftigen Energiesystem eine zentrale Bedeutung zu. Die H<sub>2</sub>-Speicher sowie die Transport- und Verteil-Infrastrukturen müssen als Rückgrat einer Wasserstoffstrategie frühzeitig neugestaltet werden, um jene Engpässe und Verzögerungen von vornherein zu vermeiden, die erfahrungsgemäß zu Verzögerungen beim Umbau des Stromsektors geführt haben.

Zudem kann erst durch ein effektives Zusammenwirken der Strom- und Gas- beziehungsweise H<sub>2</sub>-Infrastruktur das Potenzial des Wasserstoffs zur Flexibilisierung und Defossilisierung des Gesamtsystems vollumfänglich genutzt werden. Eine optimale sektorenkoppelnde Gesamtsystemintegration der Wasserstoff-Infrastruktur ist daher von zentraler Bedeutung.

Da sowohl die Infrastruktur als auch die strategische Gesamtsystemintegration zu frühzeitigen Weichenstellungen im Transformationsprozess führen, haben beide Felder eine hohe Priorität auf der Forschungsseite.

Besondere Bedeutung kommt hierbei der klugen Konvertierung und Nutzung vorhandener Infrastrukturen zu, wie z. B. Pipelines und Kavernen. Wenn diese durch zielgerichtete Upgrades für Wasserstoff ertüchtigt werden, können substanzielle Kosteneinsparungen erzielt werden.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

---

Die FuE-Bedarfe im Bereich der H<sub>2</sub>-Infrastrukturen werden in fünf Themenbereiche unterteilt. Übergeordnet gilt für alle Bereiche:

- **Technologieoffenheit und ein gesamt-systemischer Ansatz** gewährleisten eine optimale Nutzung der Technologieoptionen und deren Synergien sowie eine schnelle Markteinführung und einen effektiven Hochlauf über die gesamte Einsatzbreite der H<sub>2</sub>-Infrastrukturen.
- **Fokus der FuE-Maßnahmen** liegt auf Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Konvertierung vorhandener Installationen, Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Resilienz durch Optimierung, Weiterentwicklung und Innovation sowie einem verbesserten Verständnis der zukünftigen Systemausgestaltung und Betriebsführung.

- **Zeitnahe Umsetzung** der notwendigen FuE-Maßnahmen ist erforderlich, da H<sub>2</sub>-Infrastrukturen eine wesentliche Basis einer Wasserstoffwirtschaft darstellen und frühe Fehler bei technischen Weichenstellungen volkswirtschaftliche teure Lock-In-Situationen hervorrufen können.
- **Markteintritt erster Technologieoptionen** ist in allen Bereichen bereits gegeben und sollte parallel zu notwendigen FuE-Maßnahmen verfolgt werden.
- **Kompatibilität sowie Interoperabilität** sind zu entwickeln und optimieren, um Synergieeffekte vollumfänglich ausschöpfen zu können.
- Klare Definitionen von **Standards und Normungen** über alle Themenbereiche bilden die Basis von marktfähigen Technologielösungen.

Nachstehend sind für die fünf Themenbereiche die jeweils wichtigsten FuE-Bedarfe bis 2025 zusammengefasst.

### Transport-Infrastruktur für straßen-, schiffs- und schienen-gebundenen H<sub>2</sub>-Transport

---

- Technische Entwicklung von H<sub>2</sub>-Transporttechnologien (wie Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>), Druckwasserstoff (CH<sub>2</sub>), synthetische Kraftstoffe, LOHC, Metalle und ihre Hydride, Ammoniak/Methanol als H<sub>2</sub>-Träger) bei fortlaufender techno-ökonomischer Analyse der unterschiedlichen Prozesspfade anhand spezifischer Use-Cases und Demonstrationsvorhaben
- Weiterentwicklung sowie Optimierung der mobilen H<sub>2</sub>-Speicherung, Betankungstechnologien/-prozesse und Umfüllungstechnologien/-prozesse (wie bedarfsgerechte H<sub>2</sub>-Qualität, H<sub>2</sub>-Druck, kontrollierte H<sub>2</sub>-Entspannung, Boil-Off-Effekte beim Transport von LH<sub>2</sub>)
- Neue Ansätze für Sicherheitsbeurteilungen der Elemente der Prozesskette, wie z. B. von Druckgefäßen auf Straße, Schiene und Wasserstraße
- Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung von H<sub>2</sub>-Komponenten, wie z. B. Speicher (Materialprüfung) sowie die H<sub>2</sub>-Qualitätssicherung



### Pipelinetransport Verteilnetze

---

- Analyse der bestehenden Verteilnetze und der Nutzerstruktur zur Identifikation kosten- und zeitoptimierter Transformationspfade für Privat- und Industrieverbraucher
- Materialforschung zur Identifikation und Entwicklung von H<sub>2</sub>-kompatiblen Werkstoffen für Leitungen, Armaturen und Anlagen mit Berücksichtigung der Hauptbelastung (Druck- und Temperaturzyklen) und der Permeation von Wasserstoff einschließlich der Qualifizierung der Materialien
- Entwicklung von Materialien für die Gase-Separation und von geeigneten Beschichtungsverfahren zur Erhöhung bestehender Gasleitungen für Wasserstoff
- Entwicklung sicherer Umstellungsprozesse und Strategien für die Transformation konventioneller Gasnetze hin zu Wasserstoffnetzen. Dabei kann neben reinen Wasserstoffleitungen auch die H<sub>2</sub>-Beimischung zu Erdgas berücksichtigt werden.
- Materialforschung zu den in Bestandsanlagen verbauten Materialien zur (Nach-)Qualifizierung/Festlegung von Einsatzbereichen bei Betrieb mit Wasserstoff
- Gasbeschaffenheitsmessungen für die Überwachung des Gas-Mischverhältnisses in den Leitungen und Gasdetektion ohne Odorierung auch im Verteilnetz bei möglichen Leckagen

### Pipelinetransport Fernleitungsnetze

---

- Materialforschung zur Identifikation und Entwicklung von H<sub>2</sub>-kompatiblen Werkstoffen für Leitungen, Armaturen und Anlagen mit Berücksichtigung der Parameter Druck bzw. zyklischer Druckvariation, Temperatur und der Permeation von Wasserstoff
- Weiterentwicklung zur Anhebung der TRL von relevanten Anwendungen, beispielsweise Verdichter (mechanische und elektrochemische Verdichter), Gasaufbereitung und Sensorik sowie Messtechnik, um die notwendige Skalierung und Kostenreduktion zu erreichen

- Im Bereich der Verdichter und deren Antriebe bestehen Entwicklungsbedarfe für die Anforderungen des H<sub>2</sub>-Transports mit entsprechend hohen Förderleistungen.
- Evaluierung der Netztopologie im Hinblick auf geeignete zusätzliche Einspeise- und Anlandepunkte im Binnenland

### Mittel- und großskalige H<sub>2</sub>-Speicherung

---

- Konzeptionierung von geologischen Speichern und Entwicklung von Transformationsstrategien zu H<sub>2</sub>-Speichern. Dabei sind verschiedene Themenaspekte wie Mikrobiologie, Eignungsprüfung von unter- und obertägigen Komponenten, Zementation/Komplementierung und Gasreinigung zu berücksichtigen.
- Erarbeitung von Maßnahmen zur Qualifizierung bestehender Speicher für H<sub>2</sub>
- Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien für H<sub>2</sub>-Speicher, um die veränderten Randbedingungen in Bezug auf dynamische Fahrweisen und thermodynamische Eigenschaften zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist eine Analyse der zu erwartenden Betriebsführungsdynamik im Hinblick auf Marktmechanismen, Elektrolyse-Wasserstofferzeugung etc. vorzunehmen.
- Weiterentwicklung zur Anhebung der TRL von oberirdischen Hochdruck-, Feststoff-, LH<sub>2</sub>- und anderen Flüssigspeichern sowie chemischen Speichern und deren Zusammenspiel (multimodale Speicher) zur Erreichung der notwendigen Skalierung und Kostenreduktion
- Technologien zur Systemintegration von Wasserstoffspeichern in lokale Strom-, Gas- und Wärmenetze (Abwärme Elektrolyse, Speicheranlagen und Verdichter, Nutzung von Druckpotentialen)

### Gesamtsystemintegration/-modellierung

---

- Entwicklung von Simulations- und Optimierungswerkzeugen für eine integrierte Systemplanung und effizienten Netzbetrieb mit technologieoffener Infrastrukturmodellierung im Viereck von Ver-

sorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Resilienz

- Technologien und Konzepte zur dezentralen Kopplung aller Energiesektoren mit der H<sub>2</sub>-Infrastruktur unter Einbezug verteilter Wasserstoffherstellungs- und Rückverstromungsansätze (wie H<sub>2</sub>-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Kältenachnutzung bei LH<sub>2</sub>)
- Open-Science-Modellierung der Transport- und Verteilnetze in Verbindung mit optimierenden Modellierungen zur ganzheitlichen Sektorenkopplung (Strom, H<sub>2</sub>, grüne Kohlenwasserstoffe, Wärme, Klimatisierung) und der Energienachfrage (Mobilität, Logistik, Industrie, Gewerbe, Gebäude)
- Entwicklung von Transformationsstrategien (global bis lokal, zentral vs. dezentral) sowie Roadmaps, die unterschiedliche Szenarien und Marktentwicklungen berücksichtigen (wie Sektorenkopplung mit H<sub>2</sub>, Transformationskosten, Betreibermodelle für H<sub>2</sub>-Infrastruktur)
- Digitale Architekturen und zugehörige Markt-designs zur dezentralen Sektorenkopplung
- Netzdienliche Ausgestaltung von Allokation und Betriebsführung künftiger Elektrolyse-Kapazitäten

Als Fazit und Zusammenfassung sind die Wasserstoffverteilung, -speicherung und -systemintegration der Lebensnerv resilienter klimaneutraler Energiesysteme. Daher kann und sollte der Markteintritt durch die Skalierung marktfähiger und bekannter Technologien zeitnah erfolgen, während gleichzeitig systemanalytische Forschungen helfen, das Systemdesign zu optimieren, um bestmögliche Weichenstellungen im Transformationsprozess sicherzustellen. Die aufgeführten FuE-Bedarfe sind bis 2025 essenziell, um die ökonomische Attraktivität der Speicher-, Transport- und Systemtechnologien durch Weiterentwicklung und Innovation zu steigern.



### 3. NUTZUNG

Prinzipiell kann Wasserstoff überall dort eingesetzt werden, wo heute fossile Brennstoffe genutzt werden. Die technische Reife der Anwendungen variiert jedoch deutlich: Während einige bereits industrialisiert sind,

werden andere erst in einigen Jahren Serienreife erreichen. Nachfolgende Tabelle fasst den Entwicklungsstand der Technologien anhand der TRL zusammen, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden sollen.

	Industrie: Stofflicher Einsatz	Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf	Stationär: Einsatz in Gewerbe und Industrie	Stationär: Einsatz in Haushalten	Mobil: Einsatz im PKW	Mobil: Einsatz im LKW	Mobil: Einsatz im Schienenverkehr	Mobil: Einsatz in der Schifffahrt	Mobil: Einsatz im Flugverkehr
H <sub>2</sub> -basierte Direktreduktion und Schmelzprozesse	TRL 7								
H <sub>2</sub> -Industrieöfen	TRL 6	TRL 2-7							
H <sub>2</sub> -Feuerungsanlagen/ Prozesswärme/ Brennwertechnik/ Dampferzeugung	TRL 6	TRL 2-9	TRL 4	TRL 6					
Stationäre H <sub>2</sub> -Brennstoffzelle (BZ)			TRL 4-8	TRL 4-8				TRL 3-6	
H <sub>2</sub> -Gasturbine	TRL 6		TRL 4					TRL 4-6	TRL >4
H <sub>2</sub> -Blockheizkraftwerk			TRL 5-6	TRL 8				TRL 3-6	
Mobile H <sub>2</sub> -BZ					TRL 3-9	TRL 4-7	TRL 4	TRL 3-6	TRL 1-6
H <sub>2</sub> -Speichersysteme				TRL 7	TRL 4-9	TRL 4-9	TRL 2-5	TRL 4	TRL 3-7
Mobiler H <sub>2</sub> -Verbrennungsmotor					TRL 6	TRL 4-6	TRL 4	TRL 5-6	TRL >4

#### Kurz- und mittelfristiger Forschungsbedarf

- Technologieentwicklung für sichere und effiziente Verbrennung von H<sub>2</sub> und Derivaten wie z. B. Ammoniak: Brennerentwicklung, Motorentwicklung, Flammenüberwachung, Emissionen, Abgasnachbehandlungssysteme, Abwärmenutzung
- Materialverträglichkeitsuntersuchung in H<sub>2</sub>-Atmosphäre sowie Gasen aus H<sub>2</sub>-Verbrennung
- Messverfahren, Steuer- und Regelstrategien für wechselnde Brennstoffbeschaffenheit
- Lebensdauererhöhung, Stresstestszenarien für beschleunigte/standardisierte Erprobung, z. B. für Brennstoffzellensystemen in Industrieanlagen
- Optimierung der Systemeffizienz und -integration von H<sub>2</sub>-Anwendungen
- Entwicklung von BZ- und KWK-Systemen
- Rahmenbedingungen und Standortfaktoren zum H<sub>2</sub>-Einsatz, Aufbau der Infrastruktur und Versorgungssicherheit
- Sozioökonomische Bewertung der Verfahrensumstellung auf die H<sub>2</sub>-Anwendung
- Nachhaltigkeit in der gesamten Lieferkette, wie zum Beispiel Recyclingstrategien aller Stackkomponenten





- Entwicklung und Optimierung von Tanksystemen, für alle mobilen Anwendungen, hinsichtlich optimierter Systemintegration und Reduktion von Investitions- und Betriebskosten sowie Crashesicherheit
- Entwicklung von Sensorik zur Überwachung und Steuerung von H<sub>2</sub> führenden Systemen

#### **Industrie: Stofflicher Einsatz, insb. in der Metallherzeugung**

---

- Stoffliche Nutzung zur Reduktion (Einsatz von NH<sub>3</sub> und Synthesegas) und für CCU
- Rohstoffeinfluss auf Produkteigenschaften und Prozessbedingungen in H<sub>2</sub>-basierter Produktion
- Systemintegration (Prozesssimulation, Regelleistung, Recycling von H<sub>2</sub>)
- Entwicklung einer Strategie (inklusive Standortanalyse), sowie Technologien zum Handling und zur langfristigen Speicherung von CO<sub>2</sub> als Teil der CCUS-Lösungen

#### **Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf**

---

- Materialuntersuchungen/-Entwicklungen für Anlagenkomponenten und Feuerfestmaterialien
- H<sub>2</sub>-Einsatz statt Erdgas/Kuppelgasen in HT-Prozessen
- Auswirkungen auf Produktqualität,- Kapazität, Schadstoffemissionen, Wärmeübertragung, Effizienz, Ausbringen der Anlage
- Optimierung der Anlagenperformance (Gasturbinen, Industrieöfen) hinsichtlich Last- (Minimallast/Laständerungsgeschwindigkeiten) beim Einsatz von H<sub>2</sub> und Mischungen von H<sub>2</sub> und Erdgas
- Entwicklungen von H<sub>2</sub>-basierten Systemen für die hocheffiziente Prozessdampferzeugung (einschl. KWK)
- Flexibilisierung von Prozessen durch Energieträgerwechsel (bspw. Einsatz von Wasserstoff in Kombination mit anderen Brennstoffen und/oder elektrischer Beheizung) zur Hebung von Demand Response Potentialen

#### **Stationär: Einsatz in Gewerbe und Industrie**

---

- Optimierte, kostengünstige Betriebsführung, Überwachung von Verbrennungsprozessen beim Einsatz von reinem H<sub>2</sub> und Nutzung der Abwärme
- Elektrochemische Nutzung (BZ und EHP/EHC): Skalierung in großvolumige Industrialisierung inkl. Aufbau einer Zuliefererlandschaft; Zustandsüberwachung, interoperable Systemtechnik, lebensdauerschonend/netzdienlicher BZ-Betrieb
- Entwicklung von hocheffizienten und kostengünstigen Wasserstoffbetriebenen Gasturbinenbasierten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kleiner Leistung (< 5 MW) durch direkte Integration in die Prozesswärmeerzeugung
- Einsatz in Off-Grid-Anwendungen, bzw. zur mobilen Stromerzeugung/Notstromversorgung

#### **Stationär: Einsatz in Haushalten**

---

- Wirtschaftlich/sozial-ökologische H<sub>2</sub>-Anwendungsfälle in Verbindung mit Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
- IST-Analyse der Netz- und Nutzerstruktur, um kosten- und zeitoptimierte Transformationspfade zu entwickeln
- Feldtests von wasserstoffbetriebenen Wärmeerzeugern, sowie motorischer und Brennstoffzellenbetriebener KWK/KKK-Anlagen unter Realbedingungen

#### **Mobil: Einsatz im PKW**

---

- Simulation und Optimierung von motorischen H<sub>2</sub>-Verbrennungsprozessen
- Industrialisierung und Effizienzoptimierung von BZ-Stack sowie von H<sub>2</sub>- Tanksystemen für gasförmigen Wasserstoff und deren Komponenten
- Materialforschung → Substituierung von problematischen Verbindungen knapper Ressourcen, Diaphragma, Zelldichtungsmaterialien auf Fluorpolymerbasis

- Betriebsstrategie/Hybridauslegung/Systemaufbau/TCO-Kosten

#### **Mobil: Einsatz in Nutzfahrzeugen und Arbeitsmaschinen (LKW)**

---

- Gesamtantriebsstrang-/Fahrzeuoptimierung von BZ sowie VKM Systemen (Betriebs-/Hybridstrategie, Kühlsystem)
- Verbrennungskraftmaschine (VKM) Konzepte für (Sub)-Zero Emissionen
- Wirkungsgradoptimierung (VKM: Tribologie, Abwärmenutzung, Direkteinblasung, Brennverfahren inklusive Simulation; BZ: Komponenten)
- Reduktion der Geräuschemissionen von H<sub>2</sub>-VKM
- Wasserstoffbasierte Kälteerzeugung für Transportkälte

#### **Mobil: Einsatz im Schienenverkehr**

---

- Untersuchen von bahnspezifischen Anforderungen, bezüglich der wirtschaftlichen Nutzung von H<sub>2</sub>
- Methoden und Technologien zur Um- und Ausrüstung von Bestands- und Neufahrzeuge
- Simulationsmethodik Fahrzeug-Antrieb und -Kühlung inkl. Hybrid-Energiemanagement
- Untersuchung von innovativen H<sub>2</sub>-Technologien zur Reichweitensteigerung und -sicherstellung, sowie zur Effizienzsteigerung, z. B. durch Abwärmenutzung oder Klimatisierung/Kühlung

#### **Mobil: Einsatz in der Schifffahrt**

---

- Systemvergleich H<sub>2</sub>(-träger)
- Demonstratoren im Schiffseinsatz (Bunkern, Tank-/Konvertersysteme, Kraftstoffaufbereitung, Systemintegration, Hybridisierung dynamischer Anwendungen); Transport- und Bunkerschiffe
- Verbrennung in Kolbenmaschinen/Direktnutzung in BZ, H<sub>2</sub>-Generierung aus wasserstoffbasierten Derivaten an Bord
- Schließen des CO<sub>2</sub> Kreislaufes durch CCS an Bord von Schiffen

- Hybride Nutzung mit anderen Kraftstoffen
- Untersuchung von innovativen H<sub>2</sub>-Technologien zur Effizienzsteigerung, z. B. durch Abwärmenutzung oder Klimatisierung/Kühlung

#### **Mobil: Einsatz im Flugverkehr**

---

- Flugzeugarchitektur für H<sub>2</sub> und SAF: Anpassung der Leitungssysteme und Dichtungen für LH<sub>2</sub>/SAF, Integration der LH<sub>2</sub>-Tanks (strukturell und thermisch)
- Flug-Gasturbinen für die H<sub>2</sub>/SAF-Verbrennung: Anpassung der Brennkammer und des Expansionssystems
- Brennstoffzellen (BZ): Erhöhung der Leistungs-/Energiedichte von BZ-Antriebssträngen (vom Tank zum bis Elektromotor), Skalierung der Leistung von BZ-Systemen in den für Passagierverkehr relevanten Bereich (> 1,5 MWel), Thermalmanagement des BZ-Systems
- Infrastruktur: Bereitstellung des LH<sub>2</sub>/SAF, Entwicklung der LH<sub>2</sub>-Bodeninfrastruktur inkl. Betankungstechnologien
- Querschnittsthemen für alle Neu – und Weiterentwicklungen: Gewährleistung der Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Nachweisbarkeit der Flugsicherheit



## 4. SICHERHEIT, AKZEPTANZ UND NACHHALTIGE MARKTEINFÜHRUNG

---

### Motivation

---

Die Wasserstoffwertschöpfungskette beinhaltet Themen, die weder der Erzeugung noch der Infrastruktur oder Nutzung zugeordnet werden können, jedoch Anknüpfungspunkte zu allen Technologien in den Bereichen besitzen. Daher ist es wichtig, die technischen Fragestellungen im Kontext der Themenbereiche zu betrachten und die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe miteinander zu kombinieren.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

---

Als übergeordnete Querschnittsthemen sind die Sicherheit, Klimawirkung, Normung und Standardisierung (RCS) sowie Akzeptanz, Nachhaltigkeit und die Fragestellungen der Markteinführung zu verstehen. Zur Adressierung der Querschnittsthemen bieten sich Projektkonzepte an, die die gesamte Wertschöpfungskette betrachten.

### Sicherheitstechnische Fragestellungen beantworten und Konzepte bedarfsorientiert weiterentwickeln

---

- Leckageüberwachung: Innovative Methoden zum Bereichsmonitoring, Konzepte zur Sensorauswahl, Sensorkombination und Sensorverteilung, auch unter Einsatz von KI
- Sensorentwicklung für Betriebsmessstellen
- Schutzkonzepte: Leitfäden für spezifische Schutzmaßnahmen und Festlegung von Schutzbereichen (wie Zonen, Sicherheitsabstände, Gefahrenbereiche), insbesondere für LH<sub>2</sub>; QRA Werkzeuge
- Verhalten von H<sub>2</sub> in Unfallszenarien: Verbesserung des Verständnisses entsprechender Szenarien zur Unterstützung der Entwicklung von RCS; Entwicklung von Modellen für Risikominderungspotenziale von Schutzmaßnahmen
- Materialeignung und -kompatibilitäten: Leitfäden für die sichere Auswahl geeigneter Materialien basierend auf Anforderungen entlang des Gesamtlebenszyklus; Entwicklung von Prüfverfahren für die H<sub>2</sub>-Readiness und Schadensfrüherkennung; Entwicklung neuer Werkstoffkonzepte; Erweiterung bestehender/Entwicklung neuer Prüfkonzepte und Prüfinfrastrukturen zur

Charakterisierung des Deformations- und Schädigungsverhaltens bei hohen Temperaturen

- Lebensdauermodelle und -konzepte für die Konstruktion von Bauteilen für H<sub>2</sub>-Anwendungen, insbesondere die Erweiterung bekannter und etablierter Lebensdauermodelle um den "Schädigungsparameter" Wasserstoff (z. B. Druckbehälterrichtlinie AD2000 oder FKM-Richtlinien)
- Überprüfung der Eignung und Dauersicherheit von additiv gefertigten Komponenten: Einsatz und Optimierung additiver Fertigungstechnologien für Komponenten als Produktionsansatz (wie Armaturen, Brennstoffzellen)

### Klimawirksamkeit von Wasserstoffemissionen besser verstehen und berücksichtigen, Wasserstoffemissionen quantifizieren und minimieren

---

- Besseres Verständnis der Klimawirkung von Wasserstoff und der grundlegenden atmosphärenchemischen Prozesse sowie des Wasserstoffzyklus
- Entwicklung von Messtechnik zur Quantifizierung und Lokalisierung von Wasserstoffemissionen (Leckagen und Permeabilität) entlang der gesamten Wertschöpfungskette: die Messmethoden müssen hinreichend empfindlich sein, um Emissionsraten von unter 1% entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu messen
- Quantifizierung von nicht-technisch verursachten Wasserstoffemissionen: „Faktor Mensch“
- Entwicklung/Optimierung von Methoden zur Vermeidung von Wasserstoffemissionen inkl. Materialentwicklung und Konzepten zur Wasserstoffrückgewinnung

### Erforderliche Normung für weltweite Qualitätsstandards

---

- Zertifizierung und Freigabe von Produkten: Erarbeiten von technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die international anerkannte Zertifizierung, Abnahme und Freigabe von Produkten; Berücksichtigung von Methoden zur Risikobewertung; Kombination von Prüfung und Simulation



### Akzeptanz bei verschiedenen Akteuren fördern

---

- Wissenstransfer: Konzepte zur Aus- und Fortbildung von Fachkräften; Information der Zivilgesellschaft für ein allgemeines Sicherheitsverständnis; Erarbeiten von Bildungsstrategien; Gestaltung der Akzeptanzkriterien
- Entwicklung von Kommunikationsstrategien für negative, medial relevante Einzelfälle im Zusammenhang mit Wasserstoff
- Akzeptanzforschung mit Zielgruppen unter Berücksichtigung von ökologischen und geo- und entwicklungspolitischen Fragen (wie Import: Akzeptanz und Teilhabe, bzw. Entwicklungsmöglichkeiten für die lokale Bevölkerung in Partnerländern) sowie Akzeptanzveränderung durch den Markthochlauf
- Erstellung eines Risikomodells für die Einführung und Analyse von Akzeptanzkriterien für Risiken
- Transferforschung aus der Energie- und Verkehrswende sowie Innovationsforschung

### Rahmenbedingungen für Geschäftsmodelle der Zukunft

---

- Erarbeitung von Szenarienwelten, um H<sub>2</sub>-Bedarfe mit regelmäßigen Aktualisierungen zu erörtern
- Erarbeitung eines EU-weit akzeptierten Markt-designs zum Hochlauf einer nachhaltigen H<sub>2</sub>-Erzeugung und -Nutzung
- Analyse zu Anreizsystemen unter Berücksichtigung von Aspekten der Sicherheit, Akzeptanz und ökologischer wie auch ökonomischer Nachhaltigkeit
- Identifikation von kurz-, mittel- und langfristig wirtschaftlich attraktiven Geschäftsmodellen
- Identifikation möglicher Marktbereiche mit besonderer Dynamik für den Markthochlauf
- Erleichterung der Skalierung und Erhöhung der TRL durch geeignete FuE-politische Maßnahmen

- Transferforschung aus der Energie- und Verkehrswende, Innovationsforschung und Analyse der Übertragbarkeit auf die H<sub>2</sub>-Wertschöpfungskette
- Untersuchung des Einflusses früherer energie-wirtschaftlicher Maßnahmen und Beurteilung der Übertragungsmöglichkeit (wie EEG)
- Analyse der Verträglichkeit von verschiedenen Regulierungsbedingungen mit internationalem Recht
- Analyse des Mehrwerts der Produktion von H<sub>2</sub> im Hinblick auf Netz- und Systemdienlichkeit unter Berücksichtigung der Anwendung in verschiedenen Sektoren
- Untersuchung der zu erwartenden Kostenentwicklung für die Produktion von H<sub>2</sub> und dessen Transportmöglichkeiten
- Analyse der Zahlungsbereitschaft für grünen Wasserstoff sowie Folgeprodukte
- Vergleichende Policy-Analysen in den EU-Staaten und Erörterung der Vereinheitlichung auf EU-Ebene zu bestimmten Themen (wie Zertifizierung grünen Wasserstoffs)
- Einordnung verschiedener Importstrategien vor dem Hintergrund geopolitischer Entwicklungen und potenziell normativer Zielsetzungen: Monitoring der internationalen Energiewirtschaft im Wandel von Gewinnung von Rohstoffen zu Konversion, Analyse der Rolle von Technologien und Technologieführerschaft
- Analysen, wie Wasserstoffwertschöpfungsketten in Schwellen- und Entwicklungsländern nachhaltig aufgebaut werden können
- Analyse unterschiedlicher Szenarien zu Importen, nationalen Speicherkapazitäten und nationaler Erzeugung vor dem Hintergrund einer kosten-optimierten Transformation unter Berücksichtigung gesteigerter Resilienz der Energieversorgung
- Analyse der Rolle der EU in einer sich entwickelnden H<sub>2</sub>-Wirtschaft mit größeren Wahlmöglichkeiten in Bezug auf mögliche Partner (wie möglicher Einfluss auf Standards und Werte)

### **Nachhaltigkeit als zentraler Treiber der H<sub>2</sub>-Wirtschaft**

---

- Durchführung von Lebenszyklusanalysen (LCA; sLCA; LCC) als Bewertungsmethode der Nachhaltigkeit zur Abbildung des gesamten Lebenszyklus
- Untersuchung aller H<sub>2</sub>-Produktionspfade hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen und anderer Umweltwirkungen (LCA)
- Durchführung von ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalysen von Importen aus Schwellen- und Entwicklungsländern, insbesondere unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer und gesellschaftlicher Aspekte, die über die Umweltbewertung hinausgehen
- Weiterentwicklung von sozialen Kriterien und Schaffung einheitlicher Datensätze im Bereich der sLCA zur transparenten Bewertung von Technologien
- Untersuchung der ökonomischen Nachhaltigkeit für Akteure und Systeme (LCC), wie für die Bewertung der Möglichkeiten zum Umgang mit externalisierten Kosten

### **Projektformate nach dem Vorbild der Reallabore der Energiewende**

---

- Schaffen von Projektformaten zur Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich Umweltkriterien und Ressourcen
- Integration des Projektendes und somit von Aspekten der Kreislaufwirtschaft in die Gesamtkonzeption von Projekten
- Weitere Stärkung transdisziplinärer Forschungsansätze auch in Verbindung mit nicht-technischen Bereichen, z. B. Einbindung von Multiplikatoren und Pädagogen
- Integration der erforderlichen Aus- und Weiterbildung von Fachkräften
- Citizen Science Projekte zur Einbindung und Weiterbildung von Gesellschaft und breiter Öffentlichkeit

- Sicherstellung des nachhaltigen Nutzens durch Schaffung einer offenen und für Interessierte zugänglichen Datenbasis



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

AEL	Alkalische Elektrolyse (AFC: Alkaline Fuel Cell)
AEMEL	Alkalischer Membran-Elektrolyse
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSZ/BZ	Brennstoffzelle (FC: Fuel Cell)
CCS	CO <sub>2</sub> -Abtrennung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO <sub>2</sub> -Abtrennung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DME	Dimethylether
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EHC	Electrochemical Hydrogen Compression
EHP	Electrochemical Hydrogen Purification
EL	Elektrolyse
FuE	Forschung und Entwicklung
GW	Gigawatt
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HT	Hochtemperatur
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse
KI	Künstliche Intelligenz
KKK	Kraft-Kälte-Kopplung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
(s)LCA	soziale Lebenszyklusanalysen (Social Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing)
LH <sub>2</sub>	Flüssigwasserstoff (Liquid Hydrogen)
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers)
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly)
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
PEMEL	Protonen-Austausch- oder Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyseur
QRA	Quick Reaction Alert beziehungsweise Quantitative Risk Assessment
RCS	Sicherheit, Normung und Standardisierung (Regulations, Codes and Standards)
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cells)
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
TRL	Technologischer Reifegrad (Technology Readiness Level)
VKM	Verbrennungskraftmaschine







Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages