



AppLHy! – Wasserstoff und Supraleitung

M. J. Wolf, KIT – ITEP

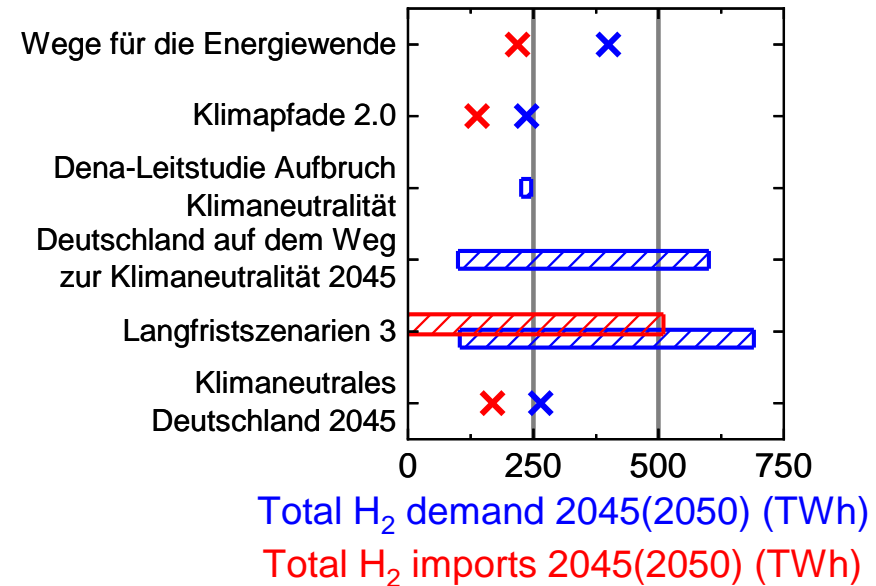
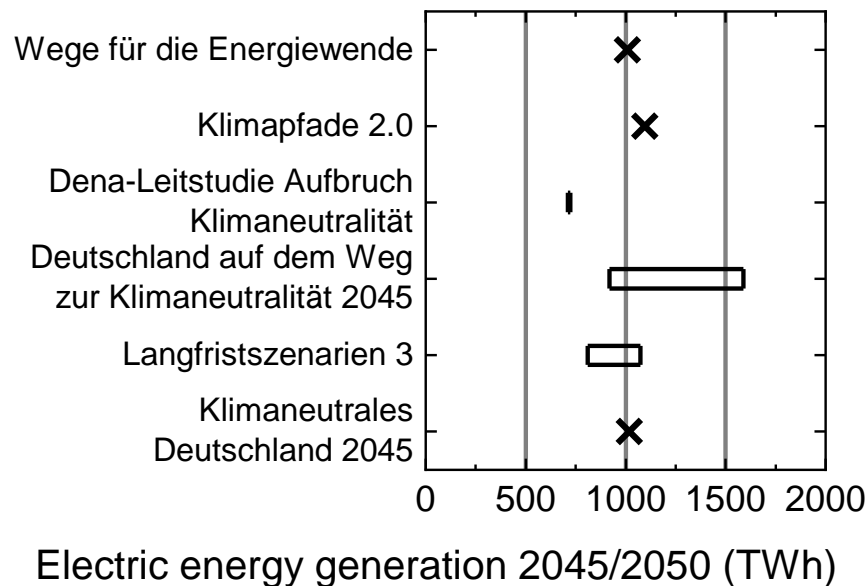
ZIEHL VIII, Berlin, April 5th, 2022

Content

- The role of **hydrogen and electric energy** in achieving the **climate** goals
- **AppLHy!** as part of the hydrogen lead project **TransHyDE**
- Use of **liquid hydrogen** and **superconductivity** in **mobility** applications
- Combining superconductive **electric power and liquid hydrogen transport**

Hydrogen and electric energy demand in 2045-2050

- Expected electric energy and hydrogen demand in Germany in 2045-2050 in different energy scenarios in order to achieve 95-100% greenhouse gas reductions



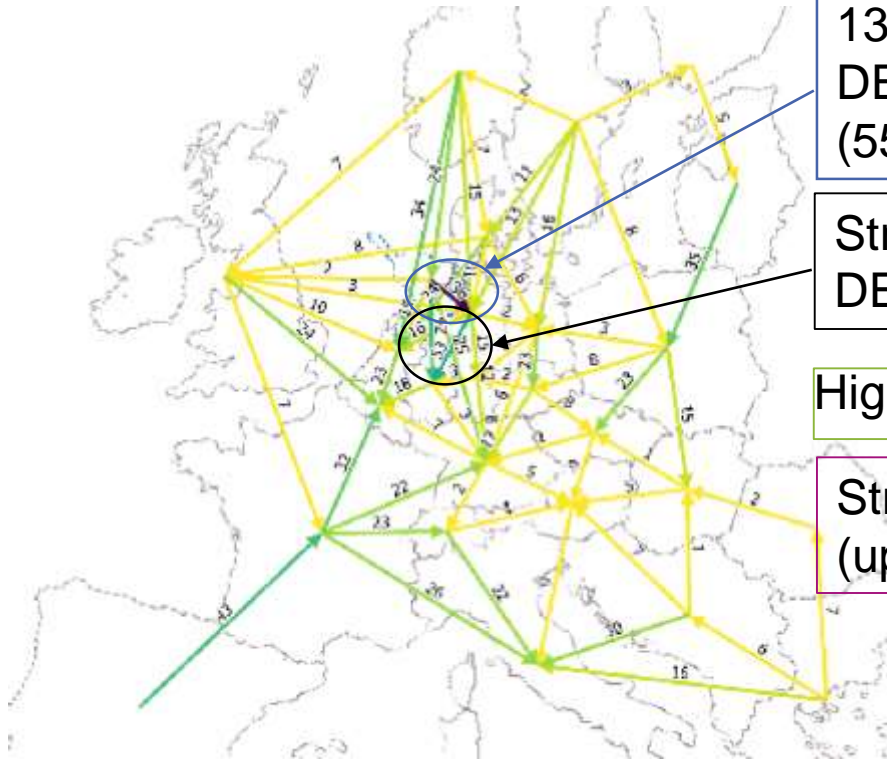
~1000 TWh electric energy production required (almost doubled comp. to today)
Green hydrogen production of >250 TWh required (and/or import of PtL fuels)
Hydrogen demand will be covered to a substantial degree by imports

Detailed references of the six energy scenarios can be found on the last slide.

Electric energy and hydrogen grids

Source: [Langfristszenarien](#), 2050, Scenario TN-H2-G

Electric energy



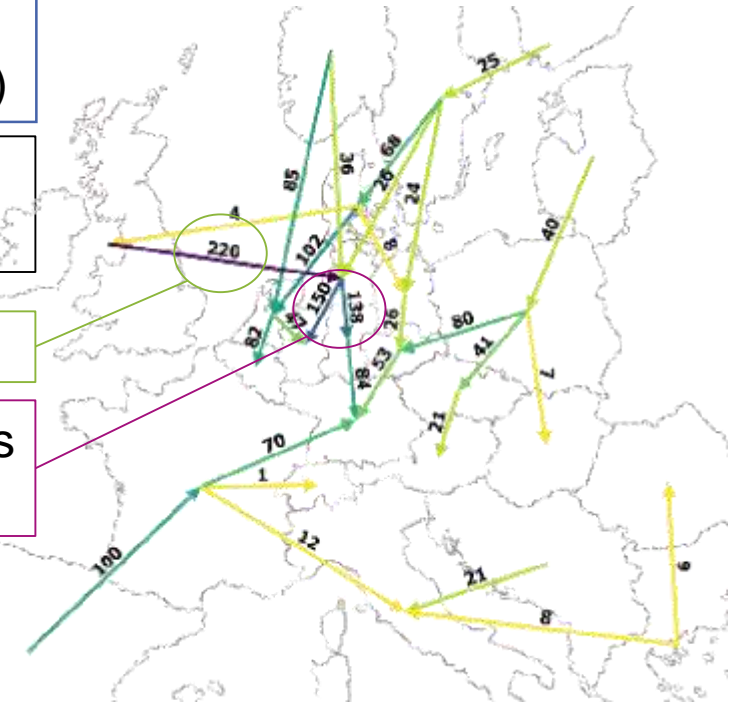
136 TWh transmitted el. energy from DE offshore to northern Germany (55 GW offshore wind capacity in DE)

Strong North-South connections in DE (up to 53 TWh)

Highest import from UK (220 TWh)

Strong North → South hydrogen flows (up to 150 TWh) in Germany

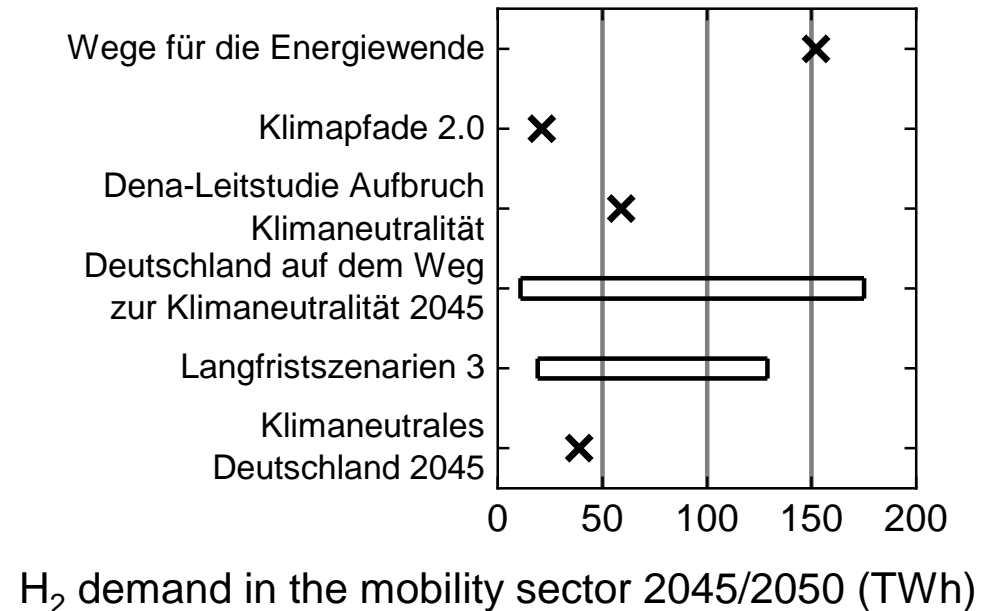
Hydrogen



Strong expansion of electric and realization of hydrogen transmission grids required. Same direction of flow (North to South) of both energy carriers within Germany

Hydrogen demand in mobility sector in 2045-2050

Wide spread of the expected hydrogen demand in mobility applications among scenarios involving different technologies, e.g. for heavy duty trucks (overhead lines, battery, fuel cell, PtL)



Highest hydrogen demand in the mobility sector generally for heavy-duty trucks.

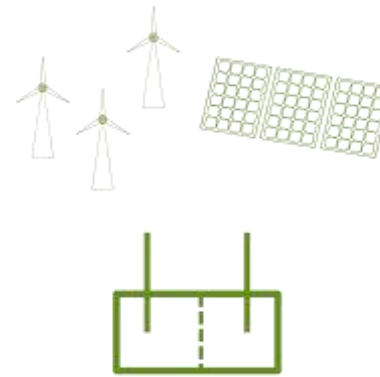
Note that: Seagoing ships are expected to be largely operated in 2050 by (syn.) diesel
Aircrafts are expected to be largely operated in 2050 by (syn.) kerosene
→ **Additional potential H₂ demands in the >100TWh range**

Detailed references of the six energy scenarios can be found on the last slide.

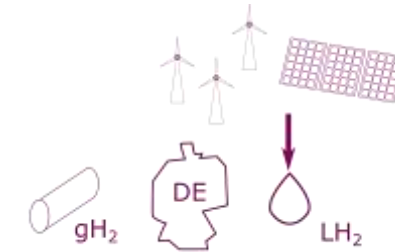
Hydrogen import options

- Cheapest large volume, long distance on ground H_2 import is generally **via pipeline** (in particular if retrofitted), e.g. from north africa to Germany
- **Liquid hydrogen (LH_2)** is a relevant, effective distribution and transmission option for **fluctuating demands** or as **intermediate solution** during the phase of realization of a gH_2 -pipeline network.
- **Intercontinental transport of H_2 by ship** through LOHC, ammonia or LH_2 are expected to be **of similar cost**
- Source: Hydrogen Council, McKinsey & Company (2021): Hydrogen Insights - A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness.

Green hydrogen



(by electrolysis from renewable sources)



On-site liquefaction:
Electric energy
for liquefaction in DE



Import of LH_2 =
energy for liquefaction
at the location of electrolysis

Mobility application
using LH_2
as energy carrier



**Hydrogen import as LH_2 =
import of a valuable coolant**

Content

- The role of hydrogen and electric energy in achieving the climate goals
- **AppLHy! as part of the hydrogen lead project TransHyDE**
- Use of liquid hydrogen and superconductivity in mobility applications
- Combining superconductive power and liquid hydrogen transport

Wasserstoff-Leitprojekte des BMBF

- ▮ Die Nationale Wasserstoffstrategie (2020):
- ▮ BMBF Ideenwettbewerb „Wasserstoffrepublik Deutschland“
- ▮ 3 industriegeführte Leitprojekte + Grundlagenforschungsprojekte
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/>

- ▮ H2 Giga: Serienfertigung v. H₂-Elektrolyseuren
- ▮ H2 Mare: Offshore-H₂-Produktion
- ▮ TransHyDE: H₂-Transport-Infrastruktur



Source: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/>

TransHyDE

Das Leitprojekt TransHyDE entwickelt verschiedene überregionale Speicher- und Transport-Infrastrukturen für grünen Wasserstoff, bewertet, demonstriert und skaliert sie hoch.

- ▮ H₂ Transport-Optionen:
 - ▮ gaseous H₂ (pipelines, container)
 - ▮ Ammonia
 - ▮ LOHC
 - ▮ Liquid H₂



Source: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/>

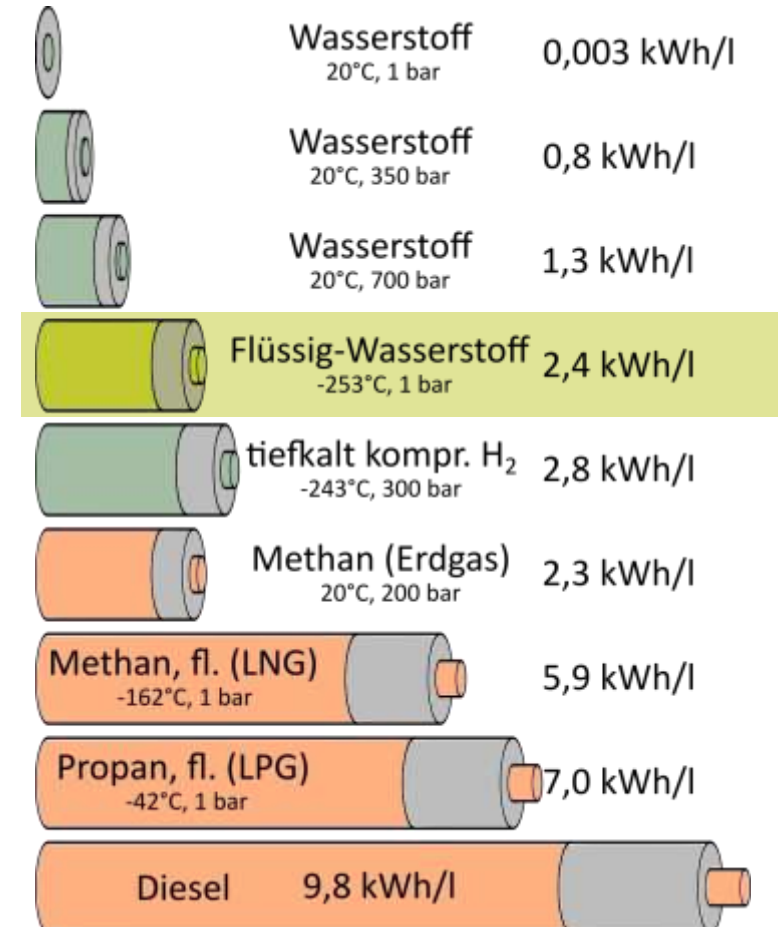
TransHyDE-Projekt AppLHy! – Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff (LH₂)

- ▮ Projektlaufzeit: 04/2021 – 03/2025
- ▮ Projektvolumen: ca. 17 Mio. €, Förderung: ca. 15 Mio. €
- ▮ 8 Partner, 1 assoziierter Partner



Eigenschaften und Vorteile von Flüssig-Wasserstoff (LH₂)

- ▮ Hohe volumetrische (2.4 kWh/l) und gravimetrische (33.3 kWh/kg) Energiedichte
- ▮ Hohe Reinheit
- ▮ Speicherung & Transport bei geringem Druck
- ▮ Energiebedarf (regenerativ) zur H₂-Verflüssigung am Ort der H₂-Erzeugung
- ▮ Keine hohen Temperaturen zur H₂-Freisetzung benötigt
- ▮ gebrauchsfertig als Treibstoff z.B. in Nutzfahrzeugen, Zügen, Schiffen, Flugzeugen und seit Jahrzehnten im industriellen Maßstab im Einsatz (z.B. Halbleiterindustrie, Raumfahrt)



LH₂ Transportoptionen

LH₂ Transport durch

- ▮ Schiffe, Kesselwagen und LKW (sog. „virtuelle Pipeline“) oder
- ▮ LH₂-Pipelines



interkontinental

überregional

lokal

Verflüssigung
Speicherung



Transport &
Speicherung
überregional



Verflüssigung
Transport &
Speicherung
Lokal



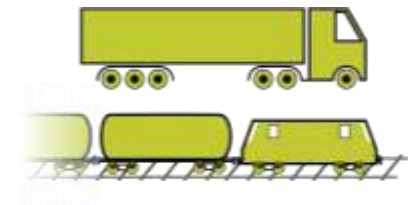
Einsatzmöglichkeiten von Flüssig-Wasserstoff (LH₂)



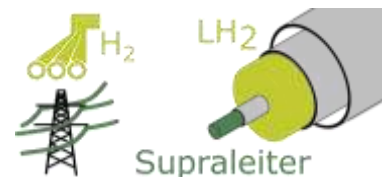
- ▮ Ziele: interkontinentaler Transport von Wasserstoff
Diversifizierung der Wasserstoff-Importe
- Vorteile: hohe volumetrische Energiedichte von LH₂
Import von Kälte zur Nutzung in Anwendungen



- ▮ Ziel: CO₂-freier Ersatz von Kerosin als Flugtreibstoff
- Vorteile: hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichte von LH₂

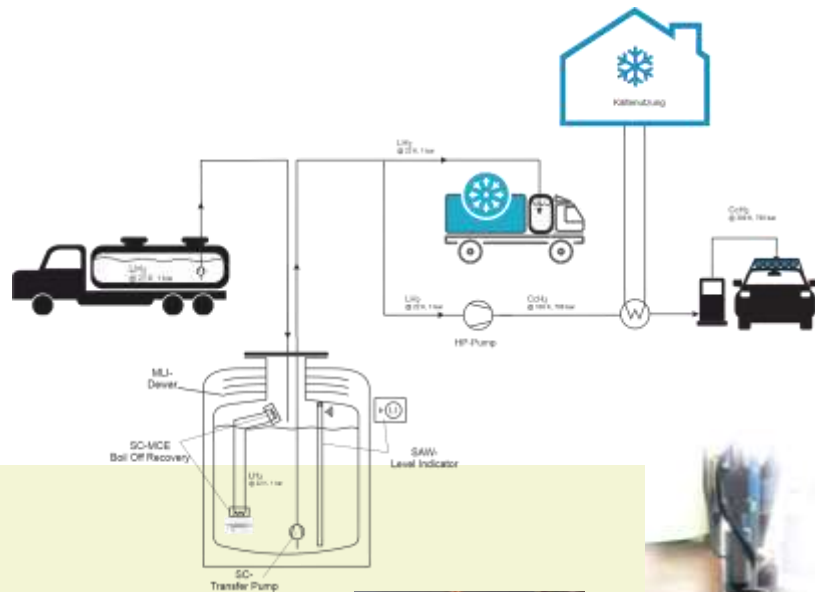


- ▮ Ziel: Bereitstellung des Treibstoffbedarfs für nicht-elektrifizierte Strecken
- Vorteil: hohe volumetrische Energiedichte von LH₂
Nutzung der LH₂-Kälte zur Kühlung



- ▮ Ziel: Trassenbündelung von Wasserstoff- und Stromnetzen
- Vorteil: H₂-Siedetemperatur von ca. 20 K (-253°C) erlaubt Einsatz von Supraleitern zur Realisierung kombinierter Transportstrecken hoher Energiedichte

AP1: Energieeffiziente Verflüssigung, Speicherung und Transport



- ▮ Untersuchung u. Optimierung von LH₂-Versorgungsketten
- ▮ Erforschung der effizienten, integrierten LH₂- Nutzung und dafür benötigter Komponenten wie
 - ▮ einer neuartigen LH₂-Pumpe
 - ▮ Kontaktloser LH₂-Füllstandsmessung
 - ▮ Rückverflüssigung
- ▮ Aufbau eines H₂-Verflüssigers mit angeschlossener LH₂-Demonstrationspipeline
- ▮ Skalierung von Komponenten für H₂-Verflüssiger

AP2: LH₂-Sicherheit und kryogene Materialaspekte



LH₂-Sicherheit

- ▮ Entwicklung von Sicherheitsstrategien, z.B. für Testeinrichtungen
- ▮ Untersuchungen zum LH₂-Unfallverhalten, insbes. im Zusammenhang mit elektromagnet. Feldern

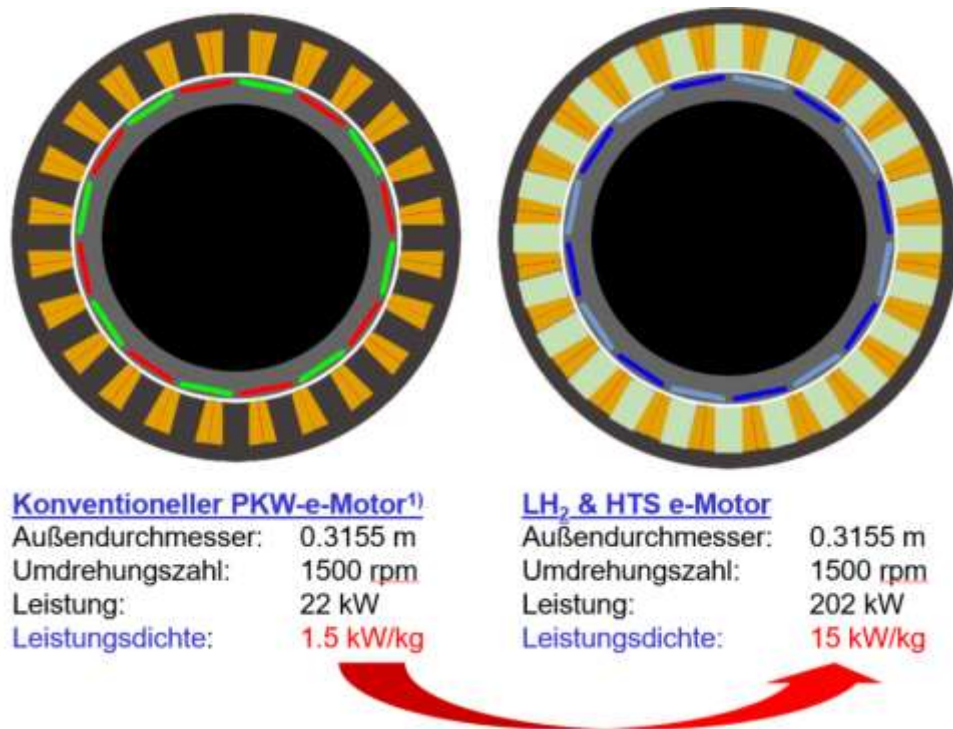


ATLAS, axial +/- 650 kN, RT to 4.2K

Kryogene Materialaspekte

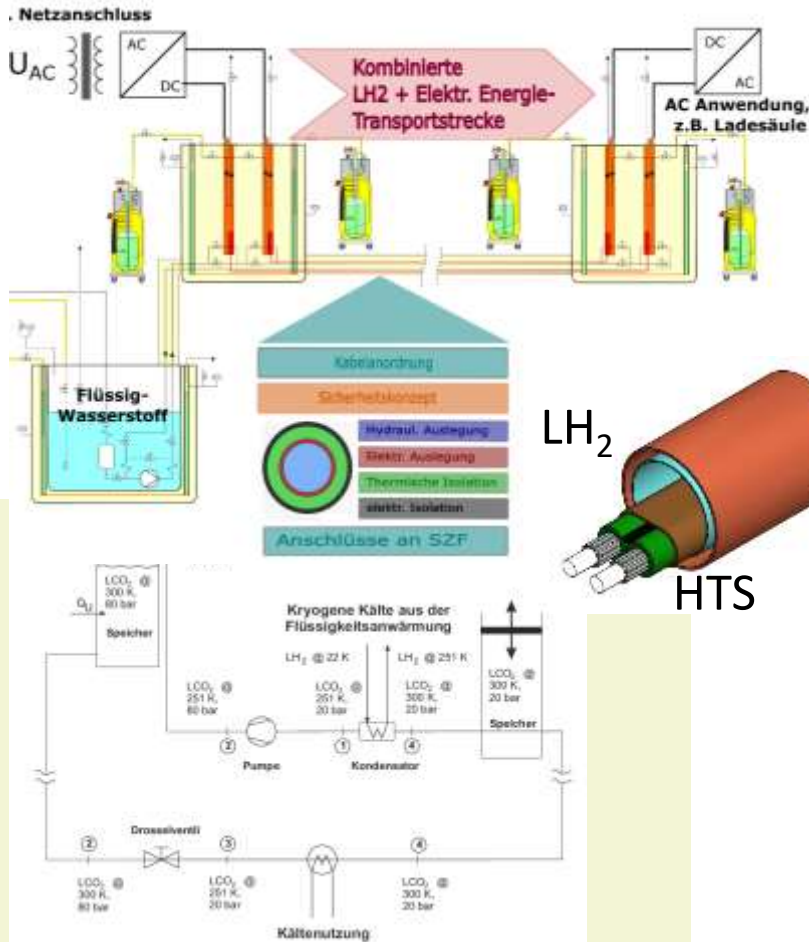
- ▮ Quantitative Analyse der kryogenen Wasserstoffaufnahme
- ▮ Materialanalysen bei 20 K, Bewertung bzgl. Versagensverhaltens und Lebensdauer
- ▮ Erweiterung der Wissensbasis für die sichere Auslegung Betrieb von LH₂-Transport- und Verteilsystemen

AP3: Konzepte für LH₂-betriebene elektrische Komponenten



- ▮ Straßentransport (Trucks)
- ▮ Windkraftanlagen
- ▮ Endpunkten hybrider LH₂ + elektrischer Energie-Transportstrecken (Transformatoren, Umrichter, DC/DC Wandler)
- ▮ Lokale LH₂-Distribution für Kraft-Wärme-Kopplung in Gebäuden

AP4: Synergien verbunden mit LH₂ Transport

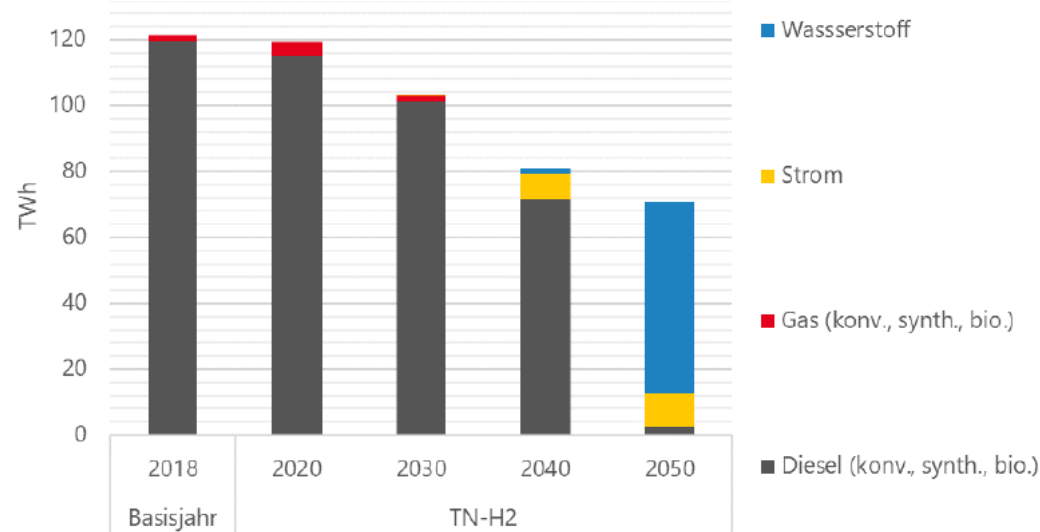


- ▭ Synergien u. Effizienzgewinn durch hybriden Transport von LH₂ und elektrischer Energie durch Hochtemperatur-Supraleiter
 - ▭ Entwicklung von Komponenten wie
 - ▭ Stromzuführungen
 - ▭ Hochtemperatur-Supraleiter
 - ▭ Bewertung von Konzepten und Einsatzszenarien
- ▭ Synergien durch Nutzung der „Tiefsttemperatur-LH₂-Kälte“
- ▭ Synergien durch Nutzung der „LH₂-Kälte“ in einem Sekundärkältekreislauf (z.B. Klimaanlage, Rechenzentren)

Content

- The role of hydrogen and electric energy in achieving the climate goals
- AppLHy! as part of the hydrogen lead project TransHyDE
- **Use of liquid hydrogen and superconductivity in mobility applications**
- Combining superconductive power and liquid hydrogen transport

Example: Long-range heavy-duty truck



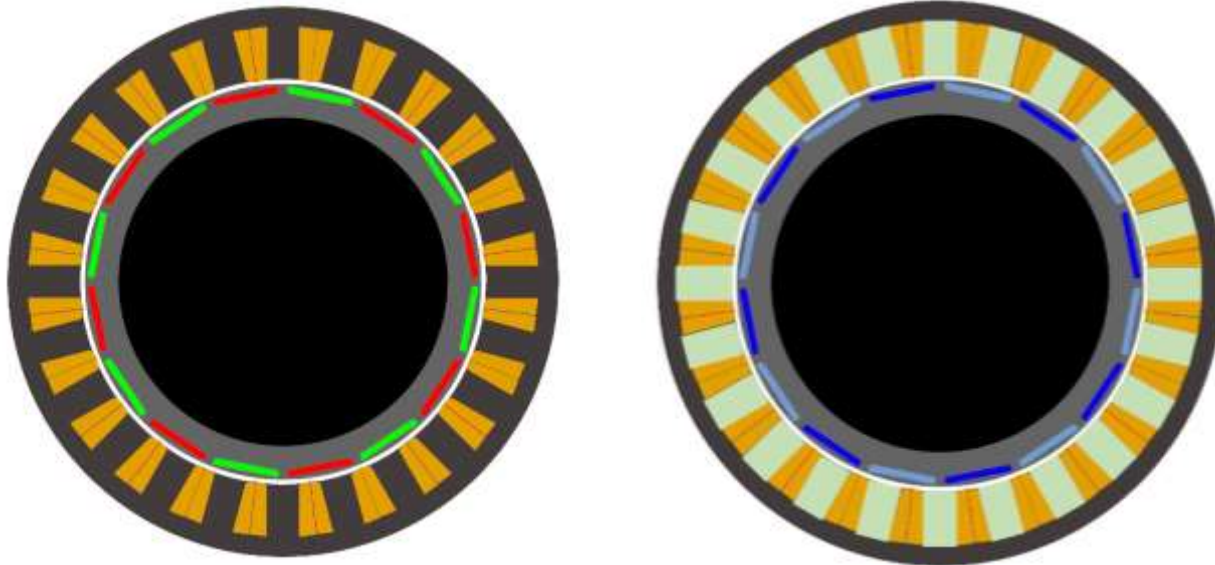
58 TWh of H₂ demand for heavy trucks in the study „Lngfristszenarien TN-H2“ in 2050

Source:
 Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland -
 Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Verkehr
 Online: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorerer-wAssets/docs/LFS3_Langbericht_Verkehr_final.pdf

| | |
|------------------------------------------------|----------|
| Average power long-range truck | 94 kW |
| Efficiency fuel cell | 60 % |
| Hydrogen fuel requirement per hour | 4,7 kg/h |
| Tank capacity LH ₂ for 10 h mission | 660 l |
| Power for evap. & warming up LH ₂ | 5,8 kW |
| Efficiency electric motor | 95 % |
| Motor loss power | 4,7 kW |

LH₂ can provide the fuel of a long-range heavy-duty truck and the required cooling power of the e-motor.

Further improvements by using HTS and LH₂ in rotating machines



conventional e-motor of a passenger car¹⁾

Outer diameter: 0.3155 m
Rotational speed: 1500 rpm
Power: 22 kW
Power density: **1.5 kW/kg**

¹⁾ Honda Accord

LH₂ & HTS e-Motor

Outer diameter: 0.3155 m
Rotational speed: 1500 rpm
Power: 202 kW
Power density: **15 kW/kg**

Rotor:

- LH₂ - cooling
- Replacement of Permanent Magnets by HTS
→ strong increase of the field in the air gap

Stator:

- Large air gap allows a design without iron teeth

Potential for further improvements:

- Rotor: increase of pole number
- Stator: increase of current
- Machine: reduction of size

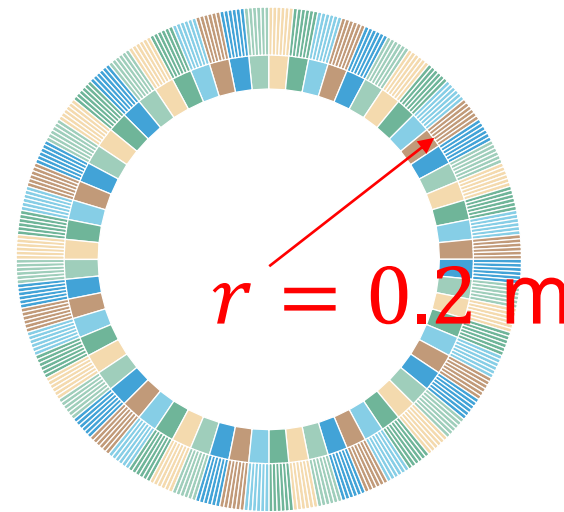
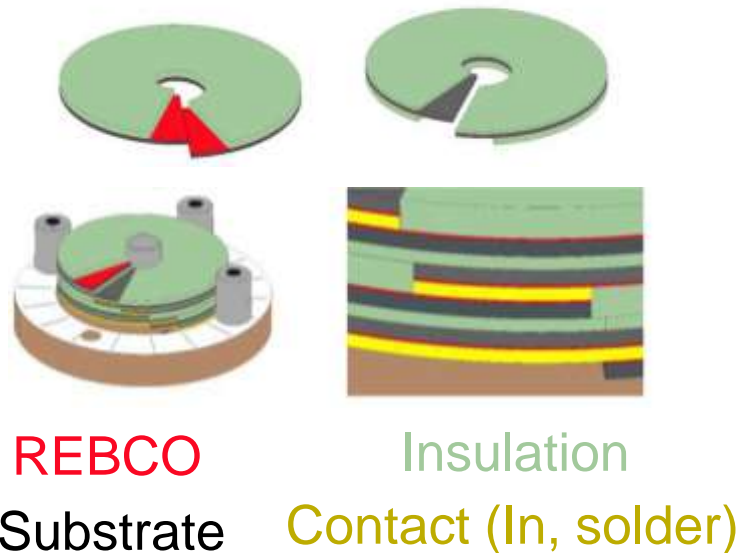


The combination of LH₂ + HTS is a key requirement to achieve the power densities needed for large electric vehicles

Advanced design options using HTS and LH₂

DUDA = **Disk Up Down Assembly**
 Topology similar to Bitter magnets,
 but with REBCO tapes

Design: rotor DUDA, airteeth-stator DUDA



Symbolic Sketch (not to scale)

| Parameter | Value | Unit |
|-----------------------------------------------|------------|-----------|
| Power | 7.3 | MW |
| Rotation | 3000 | rpm |
| Length | 0.300 | m |
| Radius of Airgap | 0.200 | m |
| Number of pole pairs | 32 | n.a. |
| Field Current (at $\approx 20 \text{ K}$) | 400 | A |
| Number of slots | 384 | n.a. |
| Armature current (at $\approx 20 \text{ K}$) | 80 | A |

The Fuel LH₂ compensates the I²R loss in DUDA

Source:
 T. Arndt, et al.(2021): New coil configurations with 2G-HTS and benefits for applications. In: *Superconductor Science and Technology* 34 (9), S. 95006. DOI: 10.1088/1361-6668/ac19f4.

Content

- The role of hydrogen and electric energy in achieving the climate goals
- AppLHy! as part of the hydrogen lead project TransHyDE
- Use of liquid hydrogen and superconductivity in mobility applications
- **Combining superconductive power and liquid hydrogen transport**

Hybrid energy transport (LH₂ + electric energy)

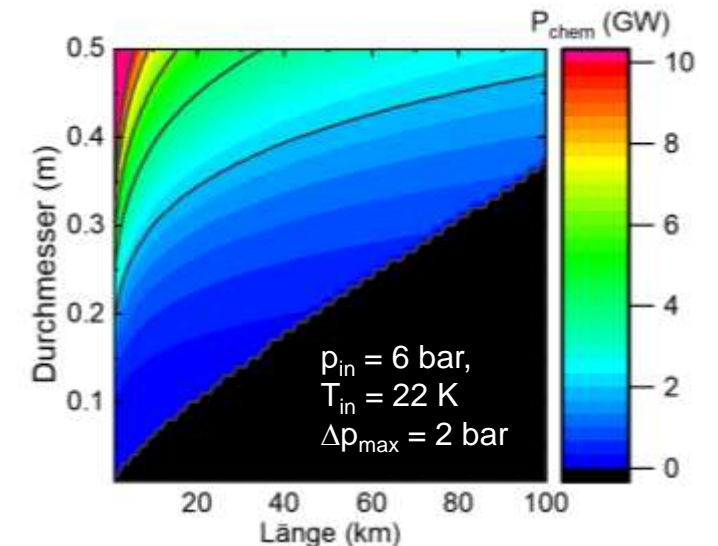
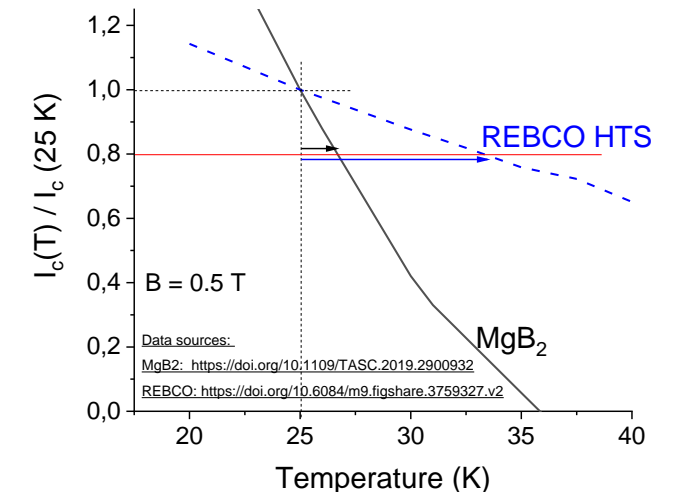
- “Old” concept of hybrid energy transport dates back to the 1970s
- long before the discovery of HTS or MgB₂

W. J. R. Bartlit, F. J. Edeskuty and E. F. Hammel, (1972)
"Multiple use of cryogenic fluid transmission lines", *Proc. ICEC4*, pp. 177-180,

- Hybrid energy transport lines using MgB₂ were developed and tested successfully in 2013-2015:

V. Vysotsky, et al. (2013): *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (3), Art. ID. 5400906.
V. Vysotsky, et al. (2015): *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 25 (3), Art. ID. 5400205

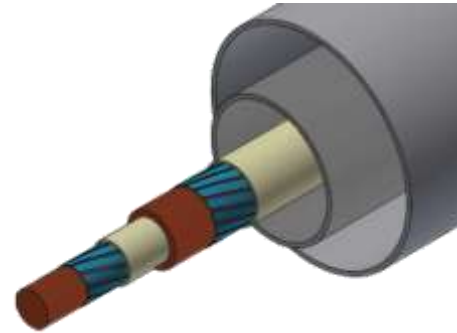
- REBCO HTS allow higher temperature margins or gradients along the cable due to the less steep decrease of $I_c(T)$ of REBCO compared to MgB₂ → higher margins with HTS
- First basic estimates on LH₂-Pipeline transport capacity indicate that the physical properties of LH₂ (e.g. low viscosity) allow a chemical transmission in the GW range
- Challenges for large LH₂ pipelines include the cooldown process of long LH₂ pipelines, LH₂ safety, and standardization aspects



First conceptual REBCO based cable designs

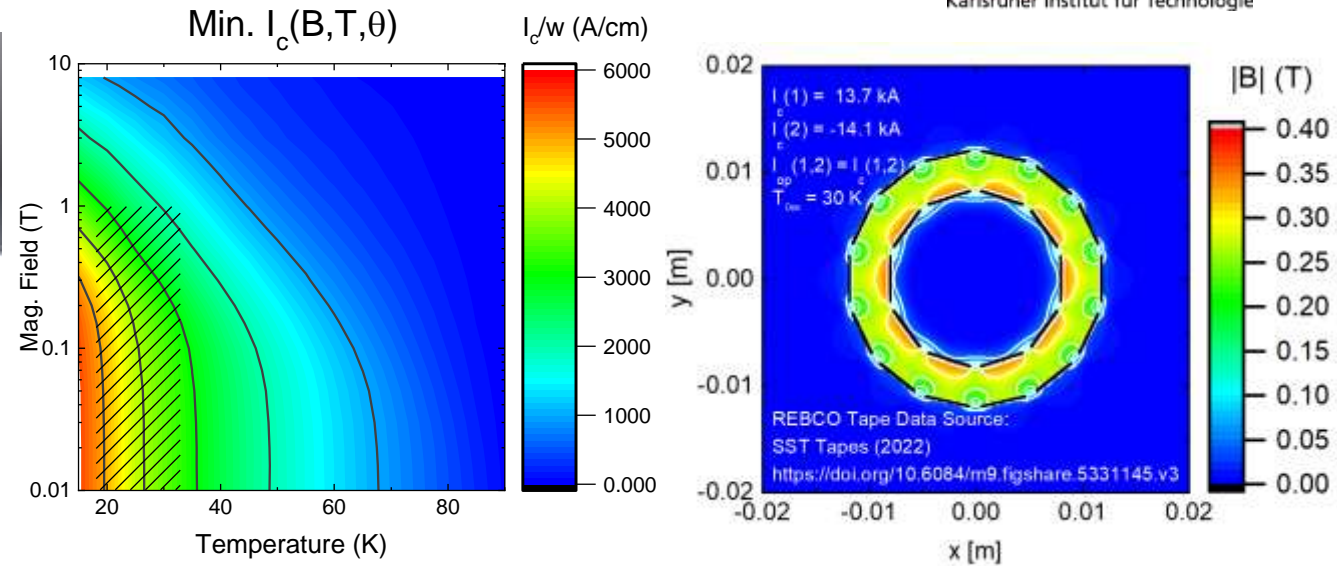
Hybrid Energy Pipeline:

- HTS-DC-Cable
- Two electric phases
- concentric arrangement
- $U = \pm 10\text{kV}$, $I_{op} = 10\text{ kA}$
- $I_c > 12.5\text{ kA}$ at $T = 30\text{ K}$
- 10-13 4-mm-wide REBCO tapes
- $P_{chem} = 200\text{ MW}$
- $\Delta p = 0.1\text{ MPa}$ over $L = 10\text{ km}$
- $D(\text{LH}_2\text{-pipe}) \sim 150\text{ mm}$

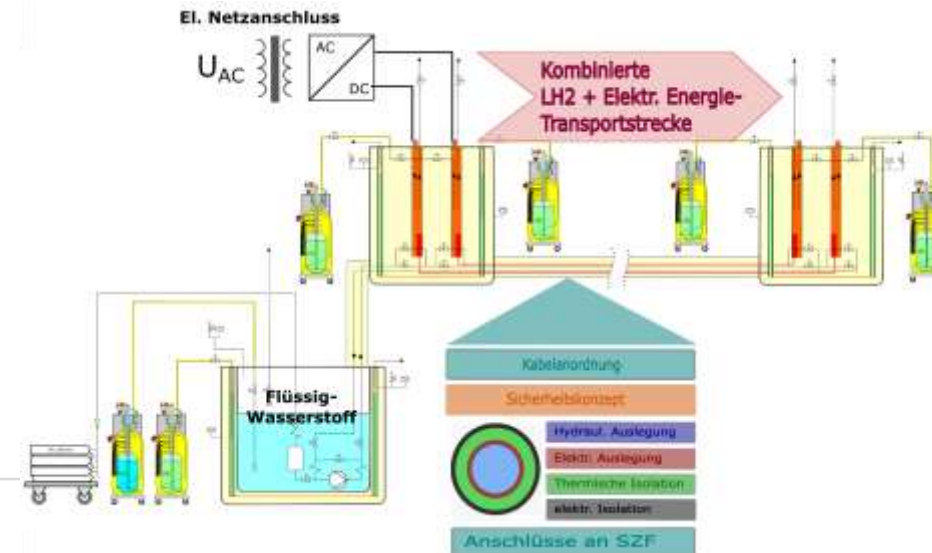


Key questions:

- Material compatibility with LH_2
- Improved cable arrangements
- Most relevant application scenarios
- Technology demonstration



Data source: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5331145.v3>



Conclusion

- For reduction of GHG emissions by 95% in 2045-2050, a strong increase of demands is expected:
electric energy up to 1000 TWh and
hydrogen up to 700 TWh
- Hydrogen import will represent a substantial share,
import in liquid state (LH₂) is in particular relevant for oversea transport
- Within the project **AppLHy!**, key challenges for the widespread use of LH₂ in a future hydrogen transportation system are addressed, including synergies that arise from the use of LH₂ & HTS.
- Several mobility applications, e.g. long-haul trucks or airplanes can make use of the high volumetric energy density of LH₂ and use its „for-free cold“ for cooling.
- A HTS motor with LH₂ cooling can have high energy densities, new approaches (e.g. DUDA) allow for even more powerful and efficient machines.
- Hybrid energy transport with HTS in a LH₂ pipeline allows the combined power transfer at high energy density and will be demonstrated in **AppLHy!** using REBCO superconductors.

Energy scenarios:

- Boston Consulting Group (BCG) (2021): **Klimapfade 2.0**. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI. Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), zuletzt geprüft am 18.03.2022.
- Jugel, Christoph; Albicker, Martin; Bamberg, Carsten; Battaglia, Manuel; Brunken, Elias; Bründlinger, Thomas et al. (2021): **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität**. Abschlussbericht. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), zuletzt geprüft am 18.03.2022.
- Luderer, Gunnar; Kost, Christoph; Sörgel, Dominika (2021): **Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045** - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam (Ariadne-Report), zuletzt geprüft am 17.03.2022.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): **Klimaneutrales Deutschland 2045**. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung. 1.0. Aufl. Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Sensfuß, Frank; Lux, Benjamin; Bernath, Christiane; Kiefer, Christoph; Pfluger, Benjamin; Kleinschmitt, Christoph et al. (2021): **Langfristszenarien 3** - Kurzbericht. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Karlsruhe, zuletzt geprüft am 15.03.2022.
- Robinius, Martin; Markewitz, Peter; Lopion, Peter; Kullmann, Felix; Heuser, Philipp-Matthias; Syranidis, Konsantinos et al. (2020): **Wege für die Energiewende**: kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag (Energie & Umwelt / Energy & Environment). Online verfügbar unter https://juser.fz-juelich.de/record/877960/files/Energie_Umwelt_499.pdf, zuletzt geprüft am 23.02.2022.