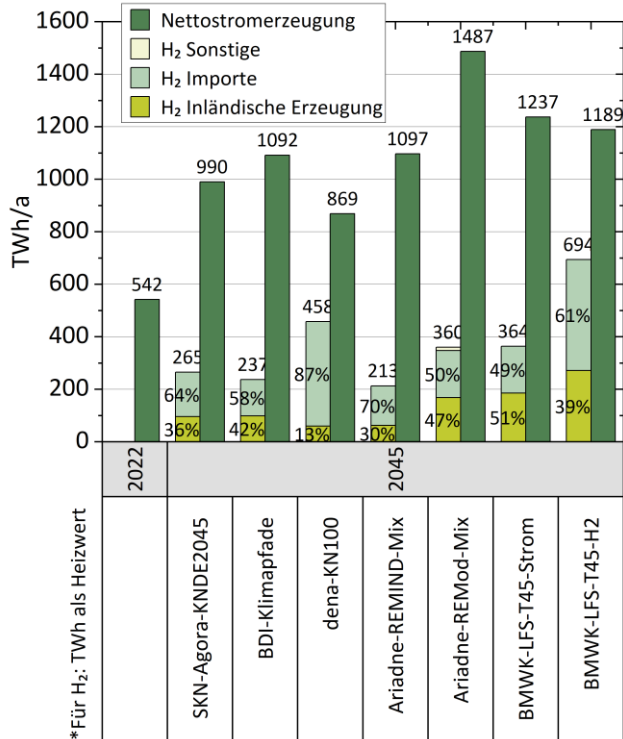


AppLHy! und TransHyDE - Hybride Pipeline: Synergetische Energieübertragung mittels HTS und LH₂

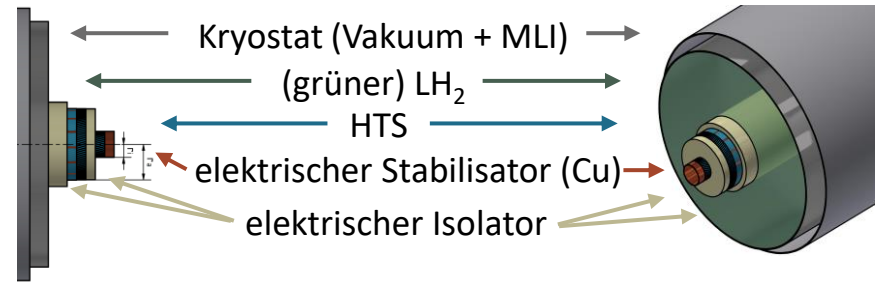
S. Palacios, M. Wehr, M. J. Wolf, T. Arndt, M. Noe | ZIEHL IX, Berlin | 11.04.2024

Motivation: zwei Energieträger zur Klimaneutralität



- Bedarf an neuer Übertragungsinfrastruktur
- Ansatz: synergetische Energieübertragung
Supraleitendes Stromkabel (HTS) + Flüssigwasserstoff (LH₂)

Hybride Pipeline



- Ziel des Vortrags:** Darstellung ausgewählter Entwicklungsaspekte
- Zwei Szenarien unterschiedlicher Größenskala: Referenz & Anwendung

[1-3]

Strom und Wasserstoff synergetisch betrachten!

Agenda

1. Was sind *AppLHy!* und *TransHyDE*?
2. Das Anwendungsszenario für eine techno-ökonomische Bewertung
3. Das Referenzszenario für einen Pipeline-Prototyp
4. Fazit & Ausblick

Agenda

1. Was sind *AppLHy!* und *TransHyDE*?
2. Das Anwendungsszenario für eine techno-ökonomische Bewertung
3. Das Referenzszenario für einen Pipeline-Prototyp
4. Fazit & Ausblick

Wasserstoff-Leitprojekte des BMBF


 Leitprojekt
H₂Giga

Industrialisierung und Hochskalierung
 der *Wasserelektrolyse*


 Leitprojekt
H₂Mare

Offshore-Produktion von grünem
 Wasserstoff und Power-to-X-Produkten


 Leitprojekt
TransHyDE

Überregionale *Speicher- und*
Transportinfrastrukturen

Im Rahmen von TransHyDE leitet das **KIT-ITEP** das Forschungsprojekt **AppLHy!** zum Thema:
 Transport und Anwendung von **Flüssigwasserstoff (LH₂)**

Flüssigwasserstoff (LH₂) Nutzungskette



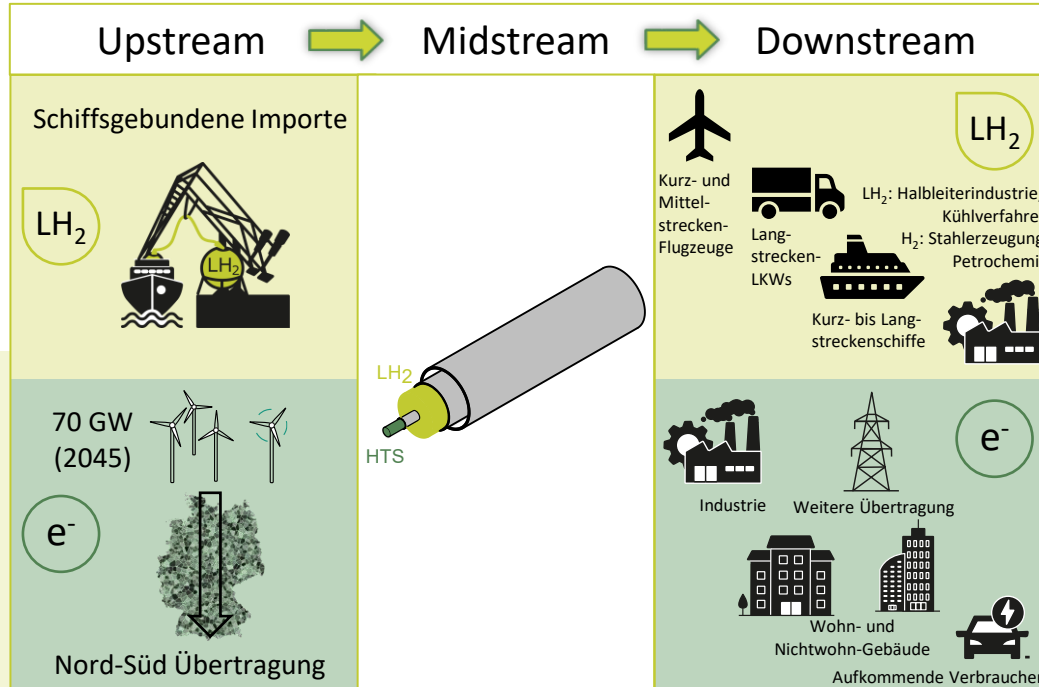
AppLHy!-Projektpartner



Agenda

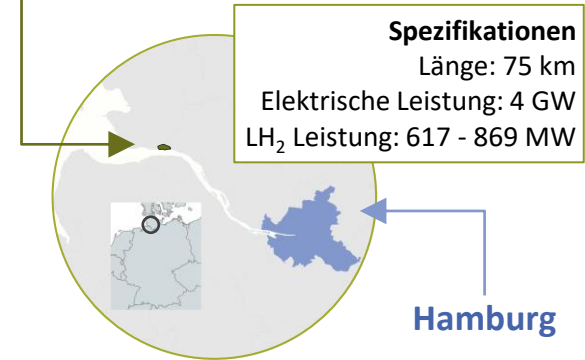
1. Was sind *AppLHy!* und *TransHyDE*?
2. Das Anwendungsszenario für eine techno-ökonomische Bewertung
3. Das Referenzszenario für einen Pipeline-Prototyp
4. Fazit & Ausblick

Definition des Anwendungsszenarios



[1, 4-20]

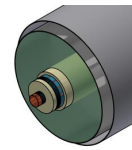
- Brunsbüttel**
- Kritischer elektrischer Knotenpunkt
 - LNG terminal potenziell für LH₂ [16-18]



- Große H₂-Nachfrage: 5,4-7,6 TWh/a 2030/32
 - Verbraucher: Industrie, Flugzeuge, Schiffe [20-21]
- ▣ Auslegung für einen sicheren Betrieb – elektrisch und thermohydraulisch
 - ▣ Beispiel: Kabelverhalten im Kurzschluss
- Sinnhafte Anwendung in dieser Region

Agenda

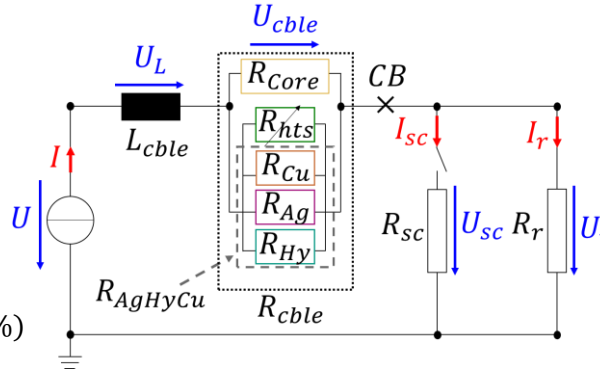
1. Was sind *AppLHy!* und *TransHyDE*?
2. Das Anwendungsszenario für eine techno-ökonomische Bewertung
3. Das Referenzszenario für einen Pipeline-Prototyp
4. Fazit & Ausblick



Stromkabelverhalten im Kurzschlussfall

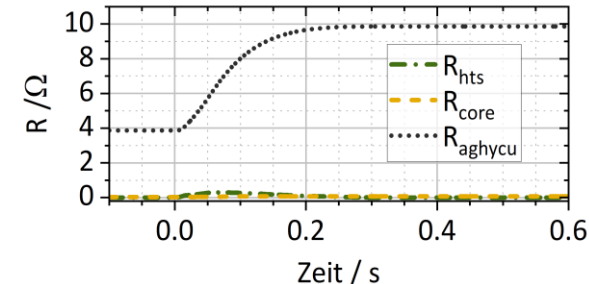
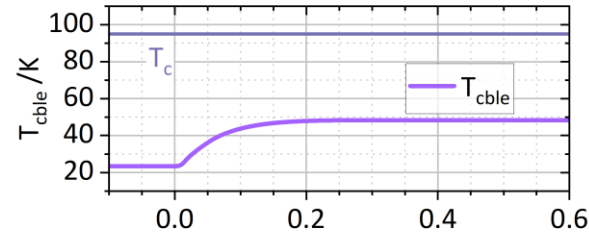
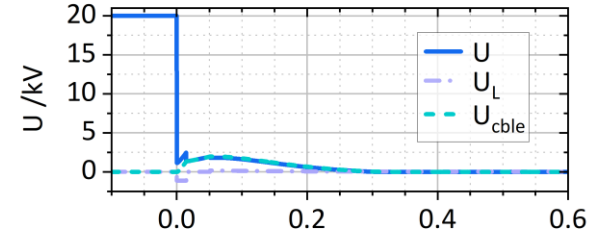
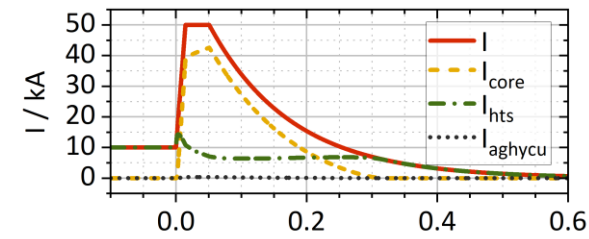
Auslegungsparameter

- Länge: 10 km
- Nennstrom I_0 : 10 kA
- Nennspannung U_0 : ± 10 kV
- Elektrische Leistung: 200 MW
- Max. Temperatur LH_2 : 23,5 K
- Kupfer-Radius: 7,4 mm (Füllfaktor 60%)



- ▮ **Ziel:** Darstellung der Kabel-Temperatur T_{cble} und -Spannung U_{cble} in Abhängigkeit des Radius des Kupfer-Stabilisators
- ▮ **Methode:** Adiabatische 0-D-Simulation mit vorgegebenem Stromprofil $I(t)$ und maximalem Strom $I_{max} = 5 \cdot I_0 = 50$ kA
- ▮ **Annahmen:** Ideale Stromquelle, Power-Law-Modell (nichtlinear)

Sicherer Betrieb des Stromkabels auch im Kurzschlussfall möglich



Grundlegende Auslegungsaspekte

Thermohydraulisches Design

- Minimierung des Druckverlusts: starre / glatte Pipeline
- Minimierung des Temperaturanstiegs: thermische Isolation aus Vakuum + MLI

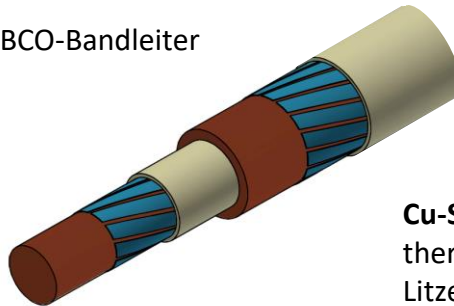
Elektrisches Kabel

2-phasig koaxial

optimale Performance der REBCO-Bandleiter
Kompensation von \vec{F}_L

kompakte Geometrie

kein innerer Strömungskanal



Feststoffdielektrikum

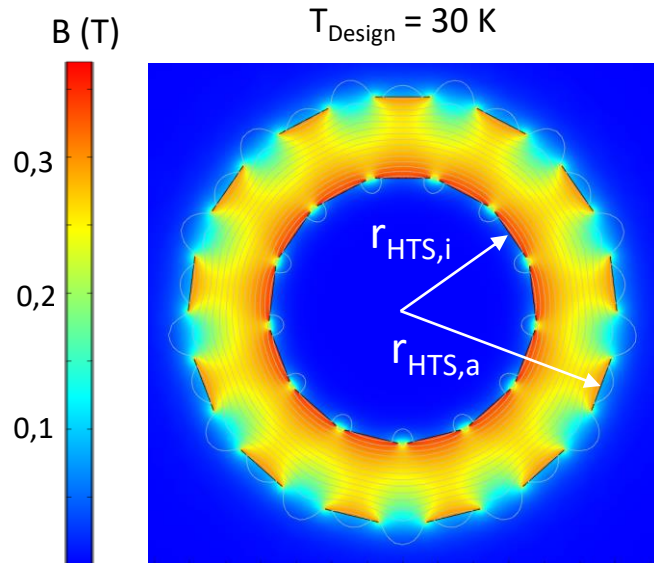
PI: hohe Durchschlagsfestigkeit

Cu-Stabilisator

thermisch / elektrisch / mechanisch
Litzenbündel für Flexibilität

Kabelgeometrie

Methoden: elektromagnetische Modellierung (FEM, COMSOL)



Anzahl Bandleiter pro Phase: 13 (Breite 3 mm)

Innerer Radius: $r_{\text{HTS},i} = 7,4 \text{ mm}$

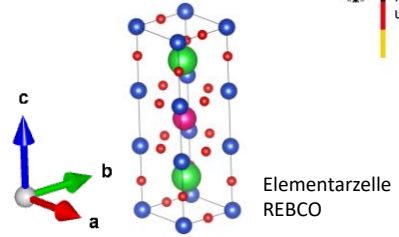
Äußerer Radius: $r_{\text{HTS},a} = 12 \text{ mm}$ (Cu + PI, $d_{\text{PI}} = 1,5 \text{ mm}$)

→ $I_c > 12 \text{ kA} > I_0$

→ 2-phasig coaxial: günstige \vec{B} -Feldverteilung

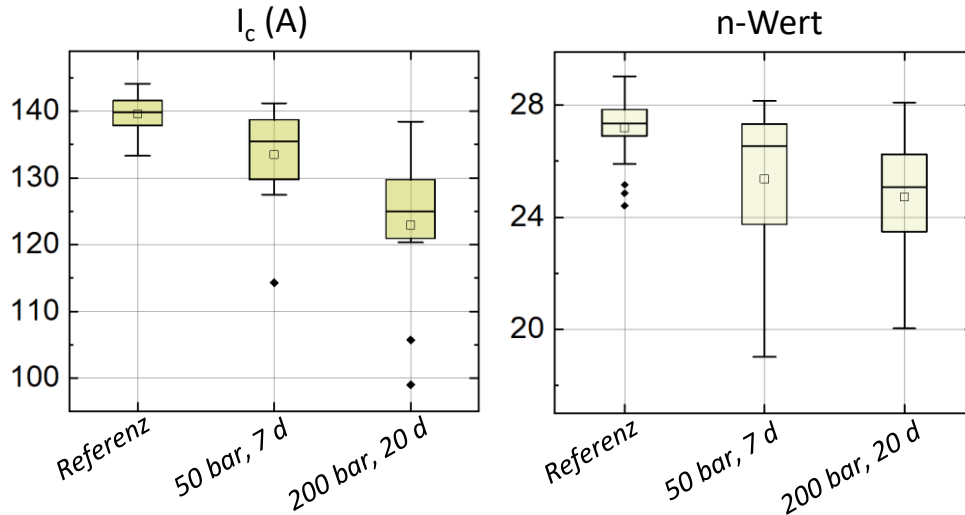
→ REBCO: hohe Stromdichte bei LH_2 -Temperatur,
kompakte Kabelgeometrie

Materialverträglichkeit



REBCO und Wasserstoff

- Tests: gH₂-Beladung von verkupferten Bandleitern (verschiedene Hersteller, Breite 3 mm)
- I_c-Messungen in LN₂ (Ergebnisse von einem Hersteller):



Materialtechnische Untersuchung (PPMS, XRD):^(*)

	prä-H ₂	post-H ₂
T _c (K)	94,7 ±0,1	94,5 ±0,1
c (Å)	11,7478 esd 0,0012	11,7578 esd 0,0024

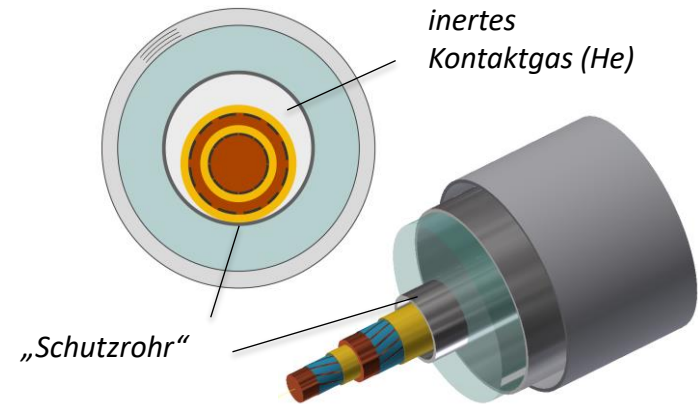
→ Nachweis einer Schädigung der REBCO-Schicht durch H₂

Materialverträglichkeit

REBCO und Wasserstoff ?? mögliche Lösungsansätze:

- geeignete Wahl des Supraleiters
- genauere Untersuchung des Schädigungsmechanismus (z.B. Reaktionskinetik)
- Konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung der Materialpaarung

Alternatives Konzept: indirekte Kühlung



- Herausforderung: thermische Anbindung an SL
- Bereits vielversprechende Untersuchungen durchgeführt

Agenda

1. Was sind *AppLHy!* und *TransHyDE*?
2. Das Anwendungsszenario für eine techno-ökonomische Bewertung
3. Das Referenzszenario für einen Pipeline-Prototyp
4. Fazit & Ausblick

Fazit



- ▮ Hybride Pipeline als eine Lösung für den Übertragungsbedarf großer Strom- und H₂-Mengen
- ▮ Kombinierte Energieübertragung in der Region Brunsbüttel-Hamburg erscheint sinnvoll
- ▮ Sicherer Betrieb des Stromkabels auch im Kurzschlussfall möglich
- ▮ REBCO-Supraleiter zeigen enorm hohe Leistungsdichten bei LH₂-Temperatur und ermöglichen ein kompaktes Gesamtdesign
- ▮ Komponentenentwicklung unter besonderer Betrachtung der Materialkompatibilität

Ausblick



Weitere Arbeiten:

- ▮ Techno-ökonomische Bewertung des Anwendungsszenarios (inkl. Vergleich mit konventionellen Alternativen)
- ▮ Erforschung und Entwicklung der Komponenten für die Prototyp-HEP (Kontakte / Joints, CTE-Konzept, Sicherheit, ...) → Basisarbeiten für den Bau der Demonstrator-Pipeline am KIT-ITEP als Teil der Hydrogen Integration Platform

Vielen Dank!

M.Sc., Sebastian Palacios, Doktorand

Tel.: +49 (0)721 608 23707 • E-Mail: sebastian.palacios@kit.edu

M.Sc., Mira Wehr, Doktorandin

Tel.: +49 (0)721 608 23813 • E-Mail: mira.wehr@kit.edu

Datenquellen:

- [1] Stiftung Klimaneutralität, "Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien," 2022
 - [2] Fraunhofer ISI et al., "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland," 2022
 - [3] BDEW, "Die Energieversorgung 2023 – Jahresbericht –," 2023
 - [4] A. Alekseev et al., 2023, doi: 10.5445/IR/100015519
 - [5] Bundesregierung, "Accelerated expansion of offshore wind energy", Berlin, 2023.
 - [6] C. N. Bonacina et al., 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.043
 - [7] F. Staiß et al., "Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030", München, 2022.
 - [8] IEA, "Global Hydrogen Review 2021", Paris, 2021.
 - [9] Joint Research Centre, "Assessment of Hydrogen Delivery Options", 2021.
 - [10] A. Wang et al., "Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen: European Hydrogen Backbone", Utrecht, 2021.
 - [11] Hydrogen Council et al., "Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective", 2020.
 - McKinsey & Company, "Hydrogen powered aviation", Luxembourg, 2020.
 - [12] S. Schäfer and S. Maus, "Technology Pitch: Subcooled Liquid Hydrogen (sLH2)", 2021.
 - [13] K. Lorentsson, "Hydrogen as Marine Power Source: MAN Energy Solutions", 2021.
 - [14] J. Miyazaki et al., 1996, doi: 10.1016/0360-3199(95)00100-X
 - [15] Demaco Cryogenics. "The versatility of cryogenics: 11 cryogenic applications - Demaco Holland B.V."
 - [16] Bundesnetzagentur, "Bedarfsermittlung 2021-2035: Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom" Bonn, 2022.
 - [17] BMWK, "Übersicht Offshore-Netzanbindungen", 2022.
 - [18] F. Sensfuß et al., "Langfristszenarien: Webinar Netze," 2022
 - [19] BMWK, "Habeck: Standortentscheidung für zwei weitere schwimmende Flüssigerdgasterminals ist gefallen", 2022.
 - [20] FNB Gas, "Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032: Zwischenstand", Berlin, 2022.
 - [21] Hamburg Behörde für Wirtschaft und Innovation, "Ergebnisse einer aktuellen Abfrage bei den größten Hamburger Industriebetrieben", 2022.
- (*) Materialtechnische Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Kai Walter (KIT-ITEP), Kontakt: kai.walter@kit.edu

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03HY204A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.