DKV-Tagung
Magdeburg, 17. November 2022

Modellierung von Umfüllprozessen in der Flüssigwasserstoff-Transportkette

Chengyuan Wu[1,2], Christian Wolf[1,2], Alexander Alekseev[1,2], René Weber[1], Sebastian Rehfeldt[1], Harald Klein[1]

[1] Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik

[2] Linde GmbH
Clean Energy Technology R&D
Pullach i. Isartal

Agenda

1. Wasserstoff, Flüssigwasserstoff und Linde
2. Flüssigwasserstofftransport per Tankwagen
3. Dynamische Simulation (gleichgewichts- und nicht-gleichgewichtsbasierte Modelle)
4. Erste Erkenntnisse aus Modellen und Simulationsergebnissen
5. Zusammenfassung und Ausblick

Flüssigwasserstoff: Leistungsfähige Transport- und Speichertechnologie für eine globale Wasserstoffwirtschaft der Zukunft

Wasserstoff

- Zukunft: Verstärkter Einsatz in Energie, Industrie und Verkehr
- Bedarf wird stark steigen
- Wichtig: Transport zwischen Produktion und Anwendung

Flüssigwasserstoff (LH2)

- Hohe Produktreinheit
- Hohe vol. Energiedichte
- Know-How und Infrastruktur existieren bereits heute

Herausforderungen

- Verluste minimieren
- Anlagen- und Prozesse zukunftsfit machen
- Synergien und neue Einsatzgebiete

Linde ist integraler Bestandteil einer nachhaltigen Wasserstoff-Wertschöpfungskette

Grauer H_2 | Blauer H_2 | Grüner H_2 | H_2-Verteilung, -Umformung und Anwendung

H_2-Wertschöpfungskette	*H_2-Quellen*	*H_2-Produktion*	*H_2-Verteilung*	*H_2-Anwendungen*
	Erneuerbare Energie, Wasser	Elektrolyse	Verflüssigung, Trailer	Wasserstoff-Tankstellen
	Erdgas	SMR, ATR... ... mit CCS	Pipelines, Untergrund-speicher	Geräte- und Technologielösungen
Lindes Rolle bei *Clean H_2*	**Partner**	**Führend in allen H_2-Produktionstechnolgien**	**Führend bei Distribution** (Technologie & Betrieb) inkl. H_2-Kavernenspeicher	**Führend bei Wasserstoff-Umfülltechnologien**

Linde und Wasserstoff

50+ Jahre Erfahrung

Weltweit gefragte Technologielösungen

150+ SMR / PSA

80+ Elektrolyseure

1000+ km an Pipeline

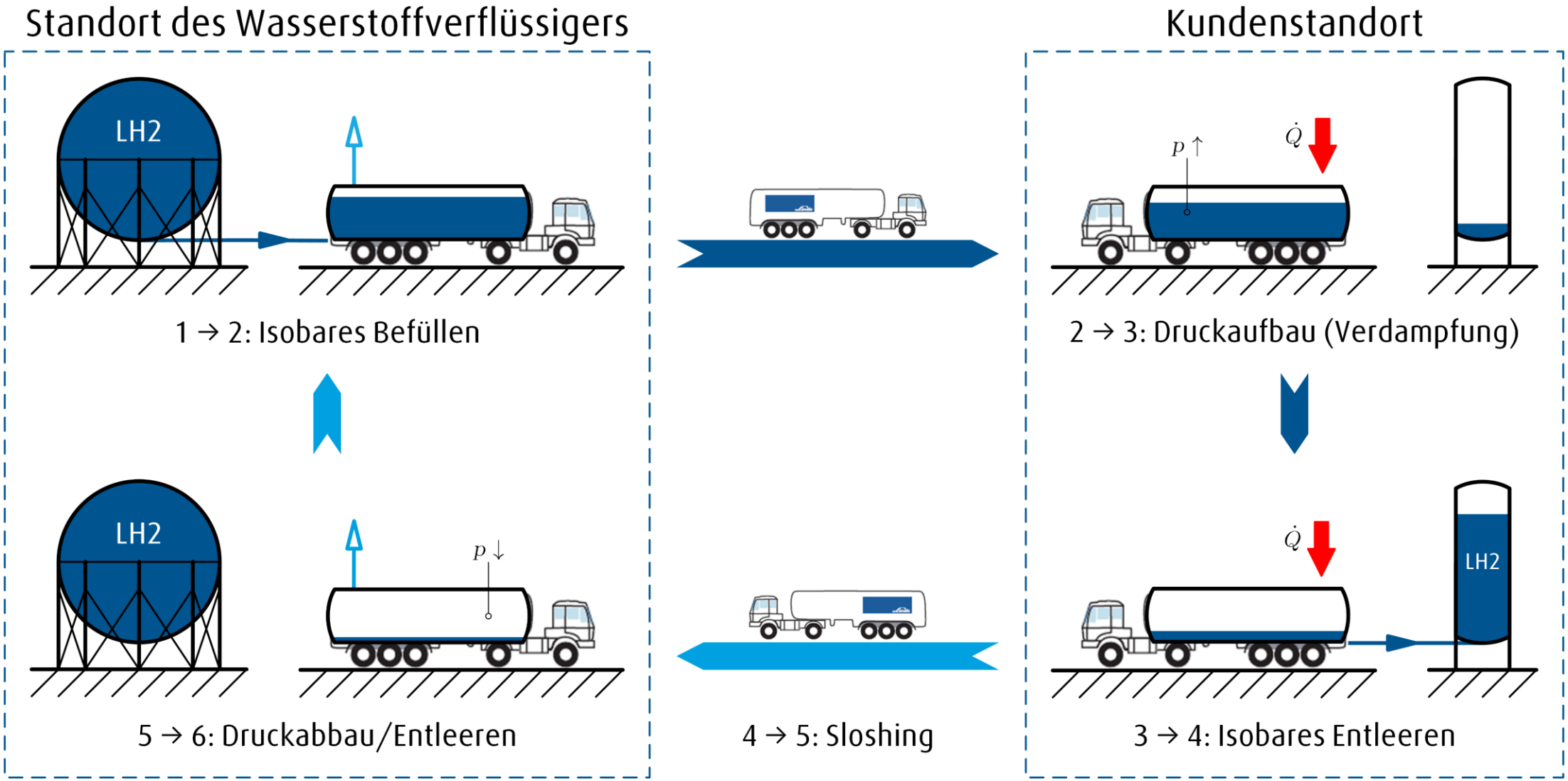
1600+ Trailer

200+ H_2-Tankstellen

2.5+ Mrd. $ Umsatz im Wasserstoffbereich

LH2 kann mit Tankwagen von der Lagerstätte zum Kunden transportiert werden

Beispiel eines einfachen Flüssigwasserstoff-Transportzyklus



Simulationen sollen tieferes Verständnis zu LH2-Transport und -Umfüllungen liefern

Ziele, Aufgaben, Methodik

Ziele

- Entwicklung von Konzepten zur Effizienzsteigerung in der heutigen und einer zukünftigen LH2-Infrastruktur
- Bedarfs- und marktorientierte Entwicklung der LH2-Infrastruktur

Aufgaben

- Prozess- und Transportkette von LH2 modellieren
- Verlustquellen und –ursachen identifizieren und verstehen
- Strategien zur Verbesserung der Prozesse ausarbeiten

Methodik

- Modellierung von kryogenen Behältern mit Wasserstoff
- Dynamische Simulation von Grundoperationen
- Simulation ganzer Auslieferungsszenarien

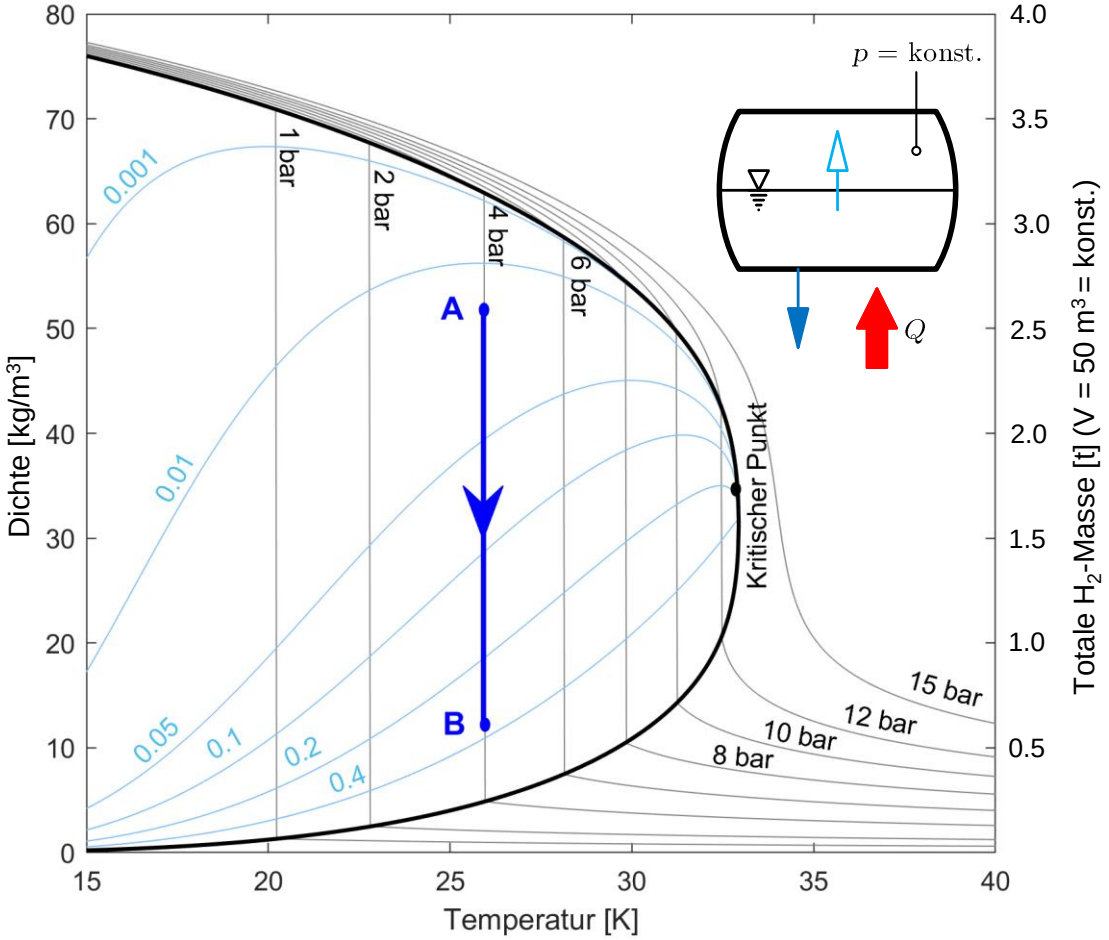
Unter Annahme des Phasengleichgewichts können Umfüllprozesse simuliert werden

Annahmen des **gleichgewichtsbasierten Modells (EQ)**:

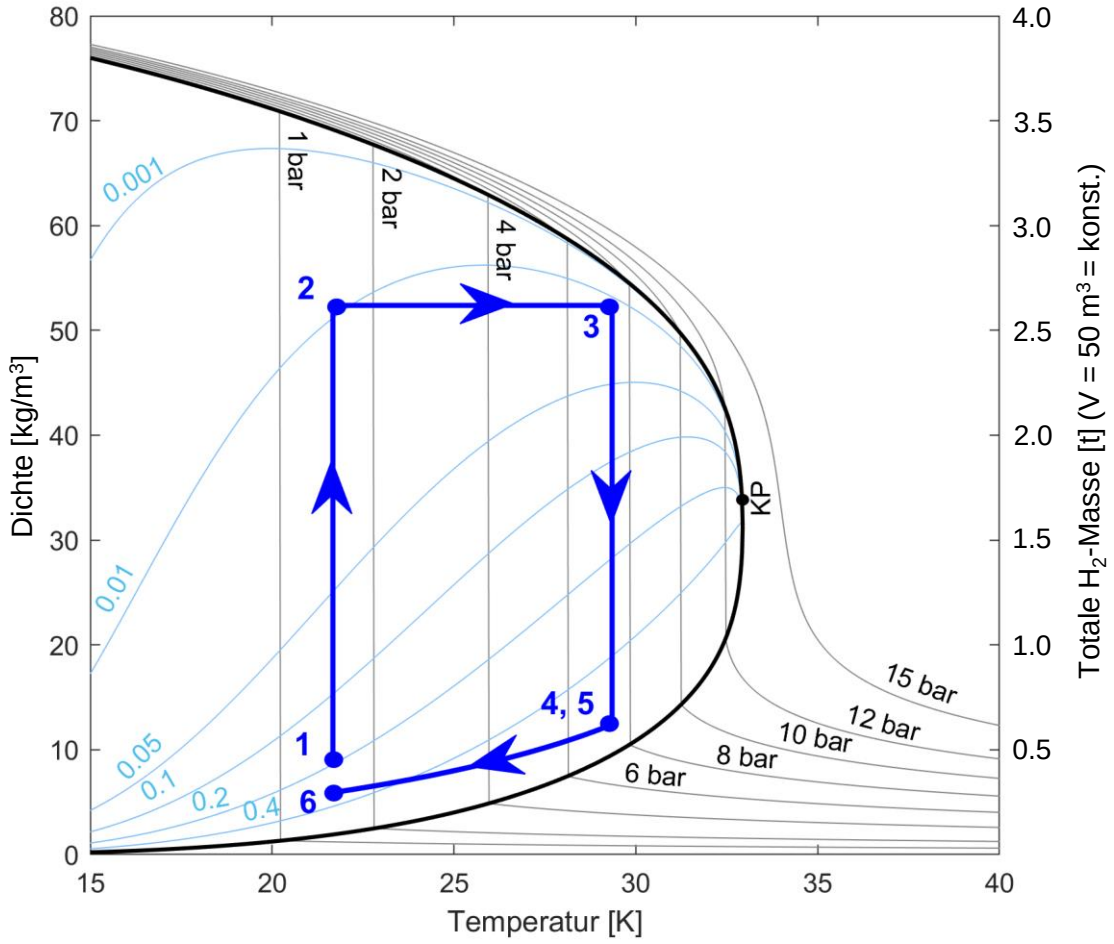
- Ein Kontrollvolumen für das Fluid ($V = \text{konst.}$)
- Gas- und Flüssigphase ideal vermischt
- Phasengleichgewicht zu jeder Zeit
- Einfluss des Behältermaterials vernachlässigbar

Simulation von Umfüllprozessen durch **Lösen der Massen- und Energiebilanzen** des Fluids

Beispiel: Gleichzeitige Flüssigkeitsabfuhr und Wärmezufuhr bei konstantem Behälterdruck p



Simulation eines Tankwagens (Spenderbehälter), welcher einen Kunden (Empfängerbehälter) mit LH2 beliefert

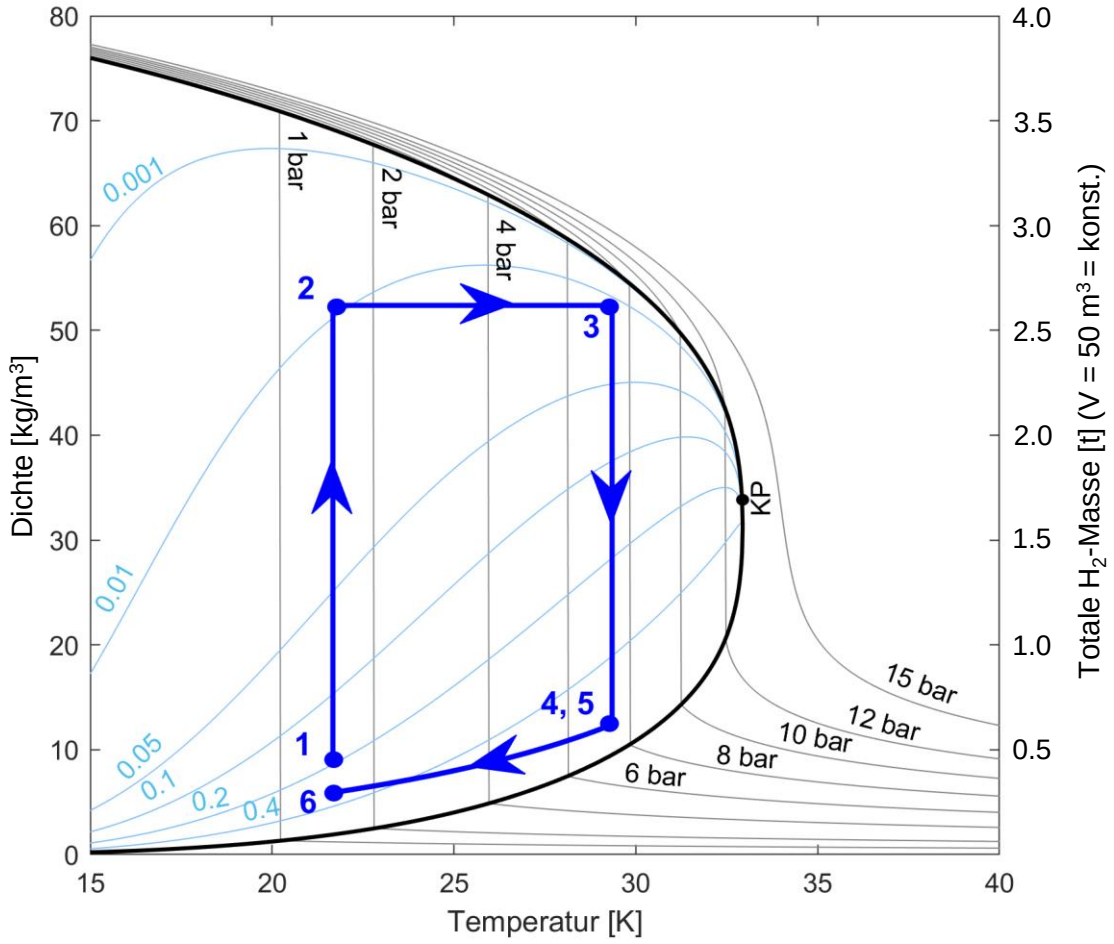


Szenario:

Tankwagen mit **50 m³** Behältervolumen füllt **2000 kg** H_2 in Kundentank (Druck im Kundentank: **6 bar**; Überdruck beim Umfüllen: **1.4 bar**).

		p [bar]	M_{tot} [kg]	M_{liq} [kg]
1	vor Befüllung	1.5	432	346
2	nach Befüllung	1.5	2619	2595
3	Nach Druckaufbau	7.4	2619	2584
4, 5	Nach Entleerung	7.4	619	174
6	Nach Druckabbau	1.5	296	206

Simulation eines Tankwagens (Spenderbehälter), welcher einen Kunden (Empfängerbehälter) mit LH2 beliefert



Szenario:

Tankwagen mit **50 m³** Behältervolumen füllt **2000 kg** H_2 in Kundentank (Druck im Kundentank: **6 bar**; Überdruck beim Umfüllen: **1.4 bar**).

Erkenntnisse aus der Simulation mit dem EQ-Modell:

- Bilanzraum um Tankwagen: **theoretisch 16 % LH2-Verluste** während des Transportzyklus
- Bilanzraum um Tankwagen und Kundentank: **theoretisch 23 % LH2-Verluste**, von 2000 kg nur ~1850 kg LH2 am Ende im Kundentank

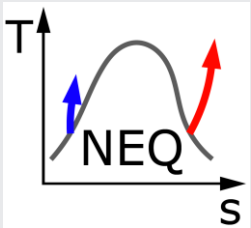
Entspricht nicht vollständig den Erfahrungen!

In der Realität weicht der thermodynamische Zustand von LH2 oft stark vom perfekten Phasengleichgewicht (EQ) ab

Prozesse, die in der LH2-Transportkette …

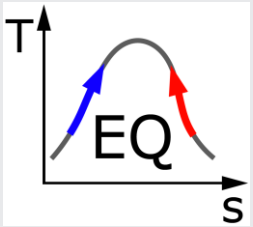
… Ungleichgewicht der Phasen (NEQ) induzieren:

- Wärmeeinfall durch die Isolierung
- Druckaufbau durch Eigenverdampfung



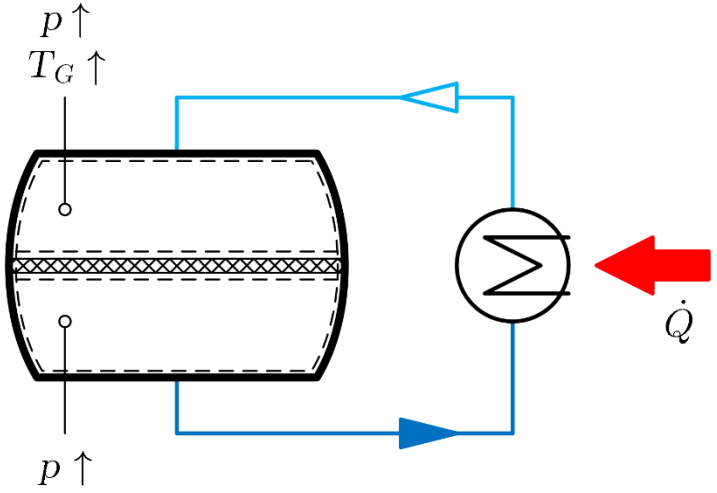
… zu Phasengleichgewicht (EQ) führen:

- Vermischung der Phasen *„Sloshing“*
- Druckabbau durch Gasabfuhr
- Befüllung eines Tanks durch LH2-Eindüsung



Notwendigkeit für Modelle zur Beschreibung des Ungleichgewichts (NEQ)

- Trennung der Phasenräume im Modell
- Einführung von Zwischenschichten, welche Phasenübergang dämpfen



Vollständiges Ungleichgewicht (NEQ)

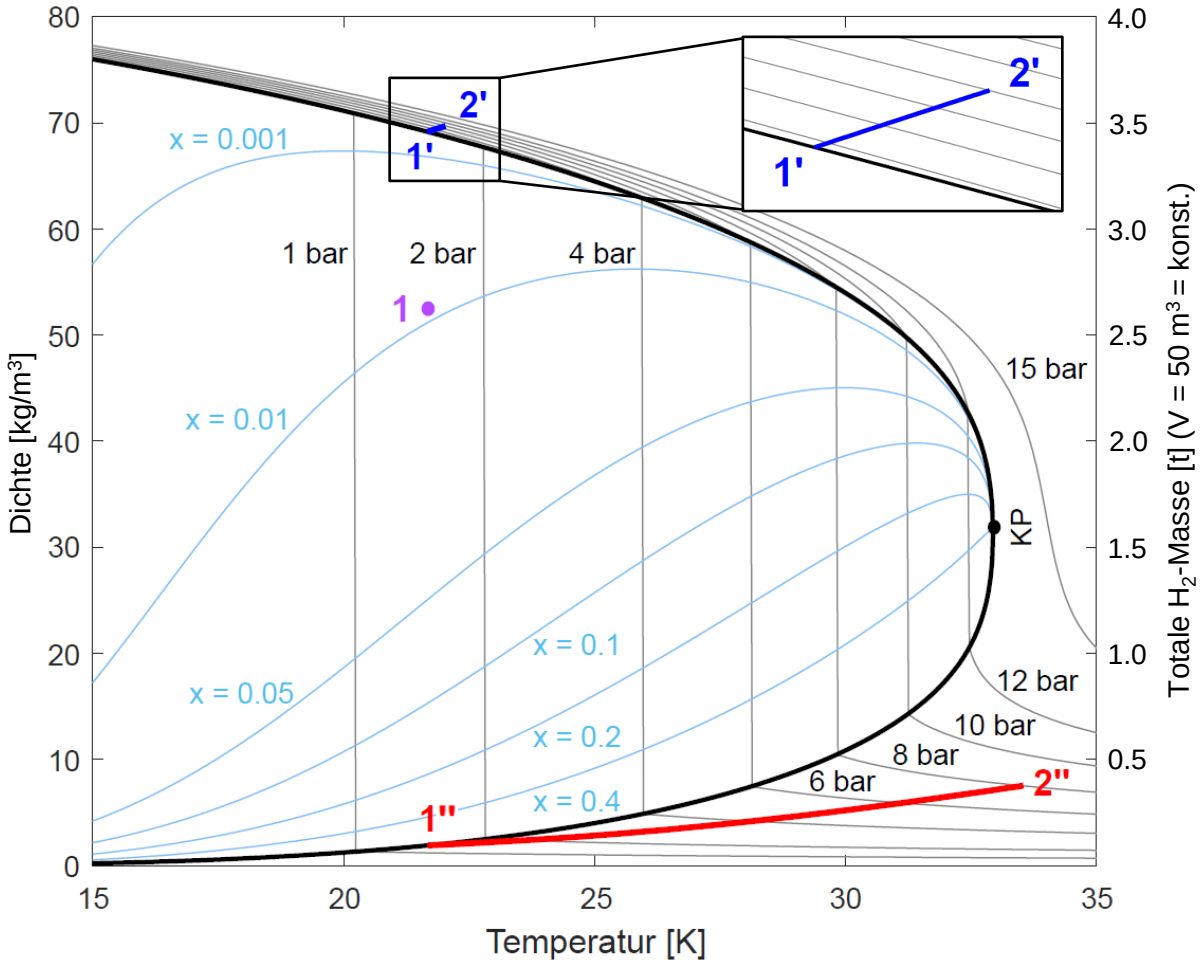
Modellierung mit adiabater Trennung zwischen Gasphase und Flüssigphase

- Kein Phasenübergang im Tank
- Druckaufbau über externen Verdampfer

→ Exemplarische Auslieferungsroute signifikant effizienter (Verluste: < 10%)

Perfektes **Phasengleichgewicht (EQ)** und vollständiges **Ungleichgewicht (NEQ)** bilden die harten **Grenzen**, zwischen denen der **reale Zustand** von LH2 liegt

Druckaufbauprozess bei Modellierung von adiabater Trennung der Phasen



Stark ausgeprägtes Ungleichgewicht der Phasen (NEQ) hilft in vielen Prozessschritten der LH2-Transportkette dabei, Verluste zu verringern

Ergebnisse

- Auftretende **Verluste** stark **abhängig** davon, **ob Gleich- oder Ungleichgewicht**
- **Rasche Durchführung** von Druckaufbau und Entleerung **im Spenderbehälter** verhindern Phasenübergang **(→ NEQ)** und **vermindern** somit **Verluste**
- Starkes **Phasenungleichgewicht** im Spenderbehälter erzeugt **unterkühltes LH2**
- **Ideal eingemischte**, unterkühlte **Flüssigkeit im Empfängerbehälter (→ EQ)** führt mit einer partiellen Rückkondensation von H2-Gas zur **Verlustminderung**

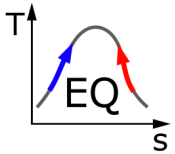
Modellierungsgrad

- EQ- und NEQ-Modell bilden thermodynamische Grenzfälle ab
- Empirische Datenlage zu LH2-Prozessen dünn

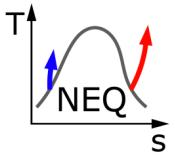
Zusammenfassung

- **Heutige LH2-Transferprozesse** (etwa LH2-Distribution per Tankwagen) sind **zeitintensiv und verlustanfällig**
- **Modellierung und dynamische Simulation** hilft dabei, Verlustquellen zu identifizieren und Strategien für **Effizienzsteigerungen** heute und in Zukunft zu entwickeln

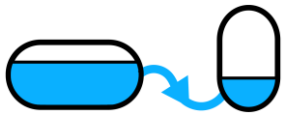
Modellierung und dynamische Simulation von LH2-Umfüllprozessen



Gleichgewichts-Modell (EQ): Grundlegender Ansatz für Prozesse in gut durchmischten LH2-Behältern, vollständiger Phasenausgleich wird angenommen



Ungleichgewichts-Modelle (NEQ): Gas- und Flüssigphase können unterschiedliche thermodynamische Zustände ausbilden, kein Ausgleich

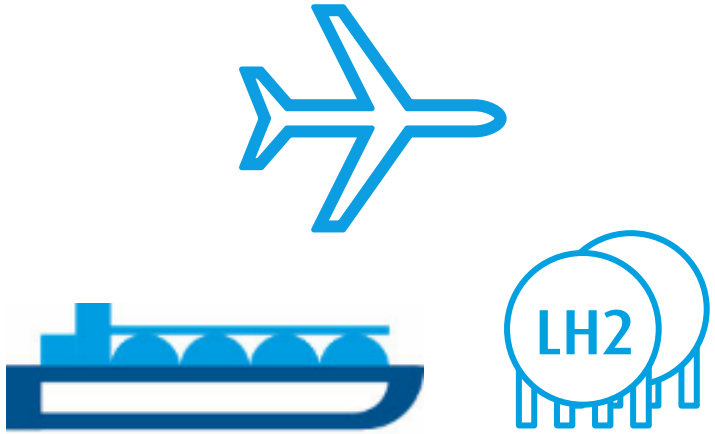


Bei Transferprozessen: **Geringe Verluste** im **Spenderbehälter** bei **rasch ablaufenden Prozessen (→ NEQ)**, Ausnutzen der unterkühlten Flüssigkeit im **Empfängerbehälter** durch **gutes Einmischen (→ EQ)**

Ausblick

Modell ist universell auf weitere LH2-Transferprozesse anwendbar

- Betankung von Flugzeugen
- Betankung von schweren Lastfahrzeugen
- Beladung oder Löschung von Schiffen an zukünftigen Import- und Export-Terminals



Weiteres Vorgehen:

- Entwicklung **Kombi-Modell** (EQ-NEQ)
- Sensitivitätsanalyse
- Modellierung von Komponenten, die Verluste minimieren können (z.B. LH2-Pumpen)
- **Validierung** durch Betriebsdaten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Chengyuan Wu
chengyuan.wu@linde.com

Christian Wolf
christian.wolf@linde.com

Wir bedanken uns herzlich beim

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

für die finanzielle Unterstützung.
(03HY204F)

Leitprojekt
TransHyDE

Linde