

# **Wasserstofftankstellen in globalen Lieferketten**

Implementierungsstrategien und Herausforderungen

Exposé für eine Bachelorarbeit

Denny

18. Februar 2026

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Ausgangslage</b>	<b>1</b>
<b>Problemstellung / Herausforderung und Forschungsstand</b>	<b>2</b>
<b>Formulierung der Forschungsfragen</b>	<b>4</b>
<b>Zielsetzung und Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
<b>Gliederung</b>	<b>6</b>
<b>Konzeptioneller Rahmen</b>	<b>14</b>

# Ausgangslage

Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors erfordert alternative Antriebskonzepte. Wasserstoff ( $H_2$ ) ist eine vielversprechende Lösung für schwere Nutzfahrzeuge (HDV), da Batterie-Elektromobilität für diesen Sektor technisch und wirtschaftlich herausfordernd bleibt. Allerdings ist der Aufbau eines flächendeckenden Netzes von Wasserstoftankstellen (Hydrogen Refueling Stations, HRS) mit erheblichen Herausforderungen verbunden.

## Die Implementierungslücke bei Wasserstoftankstellen (2025)

Trotz wachsender politischer Unterstützung zeigt sich eine signifikante Lücke zwischen geplanter und realisierter HRS-Infrastruktur. Die globale  $H_2$ -Infrastruktur weist insgesamt eine erhebliche Lücke zwischen Ankündigungen und Realisierung auf: Von den weltweit angekündigten  $H_2$ -Kapazitäten im Jahr 2022 wurden nur 2% pünktlich realisiert; 71% verzeichneten Verzögerungen und 25% wurden ganz aufgegeben Odenweller und Ueckerdt 2025. Diese Diskrepanz trifft besonders auf HRS-Netzwerke zu, wo Investoren garantierte Nachfrage benötigen, während Flottenbetreiber flächendeckende Infrastruktur voraussetzen.

Regionale HRS-Strategien unterscheiden sich erheblich Samsun u. a. 2022; C. Kim u. a. 2023:

- **Europäische Union:** Die EU-Verordnung für Alternative Fuels Infrastructure (AFIR) und die TEN-T-Richtlinie verpflichten Mitgliedstaaten, HRS-Netzwerke entlang von Verkehrskorridoren aufzubauen European Commission 2020. Ziel: bis 2031 HRS alle 100 km entlang TEN-T-Hauptachsen (über 40.000 km Streckenlänge).
- **Japan:** Die nationale Wasserstoff-Strategie (2023) Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan 2023 priorisiert den Aufbau von 160-320 öffentlichen HRS bis 2030 für Brennstoff-Zell-Fahrzeuge (FCEV), mit Fokus auf Stadtzentren und Verkehrskorridore.
- **Australien:** Mit reichlich vorhandener erneuerbarer Energie und geografischer Nähe zu asiatischen Märkten entwickelt sich eine HRS-Industrie als Drehscheibe für  $H_2$ -Versorgung zu Japan und Korea. Die regionale Vergleichsanalyse zeigt unterschiedliche Implementierungsansätze zwischen europäischen Korridoren und asiatischen

Nachfrage-fokussierten Modellen C. Kim u. a. 2023.

## Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeit von HRS

Die wirtschaftliche Rentabilität von Wasserstofftankstellen hängt stark von Standort, Stationsgröße und Auslastung ab. Kostenanalysen zeigen für 35-MPa-HRS (heute Standard) Investitionskosten (CAPEX) von €500k bis €2M pro Station, abhängig von regionalen Faktoren und Technik Wu u. a. 2024. Die Betriebskosten (OPEX) betragen €50k-€200k/Jahr, inklusive Wartung, Personal und Wasserstoff-Lieferkosten Wu u. a. 2024. Wasserstoff-Kosten liegen derzeit bei €7-12/kg grün (abhängig von Stromkosten), müssen aber bis 2030 auf €2-3/kg sinken für Rentabilität ohne Subventionen Chung 2024; Eissler u. a. 2023. Bei typischen Auslastungsszenarien (30–80%) zeigen ökonomische Modelle, dass 58% Subventionen erforderlich sind für Break-Even-Profitabilität Vizza u. a. 2025. Alternative Konzepte wie On-site-Elektrolyse können Kostenstrukturen erheblich verändern und regionale Verfügbarkeit von grünem Strom besser nutzen Atabay und Devrim 2024. Die räumliche Planung von HRS-Netzwerken folgt dabei verschiedenen Optimierungsansätzen, wobei Standortwahl und Netzwerktopologie entscheidend für wirtschaftliche Tragfähigkeit sind Isaac und Saha 2023. Diese Variation erfordert regionsabhängige Strategien und differenzierte Finanzierungsmechanismen.

## Problemstellung / Herausforderung und Forschungsstand

**Das Kern-Dilemma (Chicken-and-Egg Problem):** Investoren wollen nur in HRS investieren, wenn ausreichend Nachfrage (verfügbare Wasserstoff-Fahrzeugflossen) und regulatorische Klarheit vorhanden sind. Andererseits können Flottenbetreiber nicht in Wasserstoff-Fahrzeuge investieren, wenn flächendeckende HRS-Netzwerke fehlen. Dieses Koordinationsproblem verzögert weltweit die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Die beobachtete Diskrepanz zwischen angekündigten HRS-Projekten und ihrer tatsächlichen Realisierung wird durch drei systematische Barrierekategorien verstärkt:

## Drei zentrale Barriere-Kategorien

1. **Regulatorische Hürden:** Standards und Zertifizierung sind HRS-spezifisch fragmentiert. Unterschiedliche Drücke (35 MPa vs. 70 MPa), Sicherheitsstandards (ISO 14687, EU-Richtlinien, nationale Vorschriften) und Zertifizierungsprozesse erschweren interoperabilität und grenzüberschreitende Projekte Genovese, Cigolotti u. a. 2023. Die ECH2A-Roadmap identifiziert Harmonisierungslücken als kritische Implementierungshürden European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A) 2023. Zusätzlich regeln EU-Verordnungen (AFIR, Richtlinie 2014/94/EU) HRS-Netzwerk-Aufbau und schaffen neue Compliance-Anforderungen European Commission 2020.
2. **Technische Hürden:** HRS erfordern zuverlässige Kompressoren, Speichertanks, Kühlanlage und Dispensing-Systeme. Technische Herausforderungen umfassen: (a) Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (HRS sollten >95% Uptime erreichen), (b) Wartungsanforderungen und Ausfallsicherheit, (c) Speicher- und Transportlogistik (Trailer, Pipeline, On-site Elektrolyse), (d) Skalierbarkeit je nach Standort und Nachfrage Genovese, Blekhman u. a. 2024; Eissler u. a. 2023; Prokopou u. a. 2025.
3. **Logistische Hürden:** Die Versorgung von HRS mit Wasserstoff ist komplex und ortsabhängig. Optionen sind: (a) Central Production + Trailer-Transport (flexibel, skalierbar, aber teuer), (b) Pipeline-Versorgung (kostengünstig bei hohem Volumen, aber inflexibel), (c) On-site Elektrolyse (dezentral, abhängig von Stromverfügbarkeit). Optimale Netzwerk-Topologie hängt von Standort, Nachfrage und Wasserstoff-Quellen ab. Supply-Chain-Integration von Produktion über Transport zu HRS erfordert koordinierte Planung Raeesi u. a. 2024; Sujan u. a. 2024; Eissler u. a. 2023.

## Stand der Forschung

Bestehende Arbeiten zu HRS konzentrieren sich häufig auf Einzelaspekte: Technische Designs und Zuverlässigkeit Prokopou u. a. 2025, ökonomische Szenarien Chung 2024; Vizza u. a. 2025, oder regionale Markt-Analysen Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan 2023; European Commission 2020. Allerdings fehlt eine integrierte, **systematische Analyse**, die folgende Fragen beantwortet: (1) Wie wirken regulatorische, technische, logistische und ökonomische Barrieren zusammen? (2) Welche HRS-

Integrations-Szenarien (Korridore, urbane Cluster, Industrie-Hubs) sind unter regionalen Bedingungen optimal? (3) Welche Implementierungsstrategien unter realistischen Kosten und Finanzierungsbedingungen in verschiedenen Regionen wirtschaftlich tragfähig? Diese Arbeit schließt diese Forschungslücke durch einen integrativen Ansatz der HRS-Implementierung.

## Formulierung der Forschungsfragen

### Hauptforschungsfrage:

Welche Implementierungsstrategien für Wasserstofftankstellen (HRS) sind unter gegebenen regulatorischen, logistischen und technischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich tragfähig, und wie unterscheiden sie sich zwischen Regionen (Europa, Asien-Pazifik, Australien)?

### Teilforschungsfragen:

1. **RQ1:** Welche regulatorischen, logistischen und technischen Barrieren behindern die HRS-Implementierung in Europa, Asien und Australien, und wie adressieren regionale Strategien diese unterschiedlich?
2. **RQ2:** Welche HRS-Integrationsszenarien (Korridor-basiert, urbane Cluster, Industrie-Hubs) sind unter verschiedenen H<sub>2</sub>-Versorgungslogistiken (Trailer, Pipeline, On-site Elektrolyse) optimal?
3. **RQ3:** Unter welchen Bedingungen (Subventionsniveaus, CO<sub>2</sub>-Preisen, Nachfrageszenarien) erreichen HRS-Implementierungsstrategien wirtschaftliche Rentabilität in verschiedenen Regionen?

## Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Bachelorarbeit verfolgt das Ziel:

**Empirische und quantitative Grundlagen schaffen** für die Priorisierung von HRS-Investitionen durch systematische Barrierenanalyse und ökonomische Bewertung:

- Vergleichende Analyse von 3 regionalen HRS-Implementierungsmodellen (Europa mit Korridoransatz, Asien mit Nachfrage-fokussiertem Ansatz, Australien mit Export-Hub-Modell) entlang von 3 Barriere-Dimensionen (Regulatorisch, Logistisch, Technisch)
- Szenarioentwicklung: Definition und Bewertung von HRS-Integrationsszenarien (Korridor-basiert, urbane Cluster, Industrie-Hubs) unter verschiedenen Versorgungslogistiken
- Quantitative Kostennutzenanalyse (Cost-Benefit-Analysis mit NPV und ROI) für 2–3 realistische Szenarien pro Region basierend auf empirischen Kostendaten
- Sensitivitätsanalyse zur Prüfung kritischer Parameter (Subventionsniveaus, CO<sub>2</sub>-Preisierung, Stromkosten, Nachfrageentwicklung)

### **Die Arbeit wird:**

1. **HRS-spezifische Grundlagen** schaffen (Wasserstoff-Refueltechnologie, HRS-Komponenten, Versorgungslogistik, regionale Implementierungsmodelle, Barrieren-Klassifikation)
2. **Barrieren-Benchmarking durchführen:** Systematische Vergleichsmatrix (3 Barriere-Dimensionen × 3 Regionen) mit empirischen Beispielen und Policy-Ansätzen, basierend auf aktuellen regionalen Strategien und Literatur
3. **Szenarioentwicklung durchführen:** Definition von 3 HRS-Integrationsszenarien (Korridor, Cluster, Hub) mit Netzwerk-Optimierungsprinzipien und räumlicher Planung
4. **Cost-Benefit-Analysis (CBA) anwenden:** NPV- und ROI-Berechnungen für 2–3 realistische Szenarien pro Region mit disaggregierten Kostendaten (CAPEX, OPEX, H<sub>2</sub>-Kosten, Transport)
5. **Sensitivitätsanalyse erstellen:** Analyse der Rentabilität unter Variation kritischer Parameter (Subventionen 0%–80%, CO<sub>2</sub>-Preise, Stromkosten, Auslastung 30%–80%)
6. **Praktische Handlungsempfehlungen** formulieren für Entscheidungsträger (Policymaker, Infrastrukturbetreiber, Flottenbetreiber) pro Region

# Gliederung

## 1. Einleitung (4–5 Seiten)

- 1.1 Motivation: Wasserstoff als Schlüsseltechnologie der Energiewende
- 1.2 Problemstellung: Das Chicken-and-Egg Dilemma und die Implementierungslücke  
Odenweller und Ueckerdt 2025
- 1.3 Forschungsfragen und Ziele
- 1.4 Aufbau der Arbeit

## 2. Theoretische Grundlagen (8–10 Seiten)

- 2.1 Wasserstoff-Refuelling-Technologie
  - HRS-Komponenten: Kompressoren, Speichertanks, Dispenser, Kühlanlage
  - Druckstandards (35 MPa vs. 70 MPa) und deren Auswirkungen auf Kosten und Reichweite
  - Versorgungsoptionen: Central Production, Pipeline, On-site Elektrolyse
  - Zuverlässigkeitssanforderungen und Verfügbarkeitsziele
- 2.2 HRS-Versorgungskette und Netzwerkdesign
  - Supply-Chain-Integration von H<sub>2</sub>-Produktion zu Endnutzer Raeesi u. a. 2024
  - Transportmodi: Trailer, Pipeline, Schiff (für internationale Supply Chains)
  - Netzwerk-Topologie: Dezentral (Cluster), zentral (Backbone), hybrid (Corridor)
  - Räumliche Optimierung und Standortwahl für HRS Isaac und Saha 2023
- 2.3 Globale und regionale HRS-Landschaft
  - Aktueller Deployment-Status: Anzahl Stationen, Projekte, Timelines
  - EU-Strategie: AFIR-Verordnung, TEN-T-Korridore, Zielwerte bis 2031
  - Asien-Pazifik: Japan FCE-Strategie, Korea, Australien als Exporteur

- Regionale Unterschiede in Geschäftsmodellen und Finanzierungsansätzen

## 2.4 Regulatorische, logistische und technische Hürden bei HRS

- Regulatorische Hürden: ISO-Standards, nationale Zertifizierung, Druckstandards-Harmonisierung, AFIR-Compliance
- Technische Hürden: Zuverlässigkeit, Wartung, Skalierbarkeit, Speicher- und Transportlogistik
- Logistische Hürden: H<sub>2</sub>-Transportkosten, Versorgungskettenintegration, Lageoptimierung
- Ökonomische Barrieren: Hohe Kapitalkosten, geringe Auslastung, Subventionsabhängigkeit

## 3. Methodik (3–4 Seiten)

### 3.1 Forschungsdesign: Vergleichende Analyse mit Barrieren-Benchmarking und CBA

### 3.2 Barrieren-Benchmarking: 3 Dimensionen × 3 Regionen

- Dimension 1: Regulatorische Hürden (Standards, Zertifizierung, nationale Regelwerke) Genovese, Cigolotti u. a. 2023
- Dimension 2: Logistische Hürden (Versorgungskette, Transport, Speicherung) Raeesi u. a. 2024
- Dimension 3: Technische Hürden (Zuverlässigkeit, Wartung, Skalierung) Genovese, Blekhman u. a. 2024
- Anwendung auf 3 Regionen: Europa, Asien-Pazifik, Australien C. Kim u. a. 2023; Samsun u. a. 2022

### 3.3 Szenarioentwicklung: HRS-Integrationsszenarien

- Szenario A: Korridor-basiert (Highway-Deployment, TEN-T-Modell) H. Kim, Eom und B.-I. Kim 2020; Isaac und Saha 2023
- Szenario B: Urbane Cluster (Stadtnahe HRS-Netzwerke) Isaac und Saha 2023
- Szenario C: Industrie-Hubs (Hafen- und Logistikzentren)
- Versorgungslogistik-Varianten pro Szenario Raeesi u. a. 2024

### 3.4 Cost-Benefit-Analysis (CBA) Modell

- NPV-Berechnung mit 10-20 Jahre Zeithorizont
- Kostendisaggregation: CAPEX (Stationen, Speicherung), OPEX (Wartung, Personal), H<sub>2</sub>-Kosten, Transport Wu u. a. 2024; Atabay und Devrim 2024
- Empirische Kostenparameter aus Literatur
- Szenario-spezifische NPV-Berechnung pro Region

### 3.5 Sensitivitätsanalyse

- Parameter: Subventionsniveaus (0%-80%), CO<sub>2</sub>-Preise (€0-€150/t), Stromkosten, Auslastung (30%-80%)
- Identifikation kritischer Erfolgsfaktoren für Rentabilität
- Szenarien-Vergleich unter Unsicherheit

### 3.6 Datenquellen und Scope

- Primär: Literatur-basierte Analyse mit empirischen Kostendaten aus 10+ Core Papers
- Regionale Fokus: EU (AFIR/TEN-T), Japan (METI 2023), Australien (H<sub>2</sub>)
- Methodischer Scope: Qualitative Barrierenanalyse + quantitative CBA

## 4. Ergebnisse (12–15 Seiten)

### 4.1 Barrieren-Benchmarking-Ergebnisse: 3 × 3 Vergleichsmatrix

- Regulatorische Hürden pro Region (Standards, Zertifizierung, nationale Anforderungen)
- Logistische Hürden pro Region (Versorgungskosten, Transportmethoden, Verfügbarkeit)
- Technische Hürden pro Region (Zuverlässigkeit, Technologie-Status, Wartungsanforderungen)
- Gegenwärtige Implementierungsstrategien und deren Effektivität pro Region

### 4.2 HRS-Integrationsszenarien und Netzwerk-Analyse

- Szenario A (Korridor): Deployment entlang Hauptverkehrsachsen, Kapazitäten, Kosten
- Szenario B (Cluster): Urbane Netzwerke, Abdeckung, Nachfrage-Profil
- Szenario C (Hubs): Industrie-Standorte, Großmengen-Szenarien
- Vergleich der Szenarien nach Flächenabdeckung, Investmentbedarf, Zeitrahmen

#### 4.3 Cost-Benefit-Analysis Ergebnisse

- NPV-Berechnungen für 2–3 Szenarien pro Region (20 Jahre Zeithorizont)
- CAPEX- und OPEX-Breakdowns für verschiedene HRS-Größen und -Typen
- Break-Even-Analysen: Bei welcher Auslastung wird Rentabilität erreicht?
- Szenario-Ranking nach wirtschaftlicher Attraktivität pro Region

#### 4.4 Sensitivitätsanalyse

- Einfluss Subventionen: NPV-Entwicklung von 0% bis 80% Subventionierung
- CO<sub>2</sub>-Preis-Szenarios: €0/t bis €150/t und deren Effekt auf Rentabilität
- Stromkosten-Variation: Auswirkungen auf Wasserstoff-Kosten und Gesamtrentabilität
- Auslastungs-Szenarien: 30%, 50%, 80% und Break-Even-Punkte

### 5. Diskussion (8–10 Seiten)

#### 5.1 Synthese der Barrieren-Analyse: Regionale Muster und Unterschiede

- Vergleich: Welche Barrieren sind in welcher Region dominant?
- Effektivität regionaler Strategien zur Überwindung dieser Barrieren

#### 5.2 Interpretation der Szenario- und CBA-Ergebnisse

- Welche HRS-Integrationsszenarien sind unter realistischen Bedingungen rentabel?
- Break-Even-Punkte und kritische Erfolgsfaktoren pro Region

### 5.3 Beantwortung der Forschungsfragen

- RQ1: Barrieren und ihre regionalen Unterschiede - Antwort und Implikationen
- RQ2: Optimale Szenarien für verschiedene Logistiken - Erkenntnisse
- RQ3: Wirtschaftlichkeit unter verschiedenen Policy-Szenarien - Ergebnisse

### 5.4 Implikationen für verschiedene Stakeholder

- Policymaker: Welche Instrumente (Subventionen, Mandate, Standards) sind effektiv?
- Infrastrukturbetreiber: Welche Geschäftsmodelle sind nachhaltig?
- Flottenbetreiber: Welche regionalen Strategien reduzieren Nachfrage-Risiko?

### 5.5 Validierung gegen beobachtete Implementierungslücken

- Erklären die Ergebnisse, warum geplante Projekte verzögert/aufgegeben werden?
- Welche Policy-Änderungen könnten die Lücke schließen?

### 5.6 Limitationen und offene Fragen

- Datenunfähigkeitkeiten, Annahmen in der CBA-Modellierung
- Zukünftige Technologie-Entwicklungen (z.B. bessere Speicherung)
- Nachfrageprognosen für H<sub>2</sub>-Fahrzeuge

## 6. Fazit (3–4 Seiten)

### 6.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

- Hauptergebnisse zu HRS-Barrieren pro Region
- Effektivste Integrationsszenarien und Bedingungen für Rentabilität

### 6.2 Handlungsempfehlungen für verschiedene Stakeholder (regionsabhängig)

- **Policymaker:** Spezifische Policy-Instrumente (Subventionen, Standards, Mandate) für jede Region

- **Infrastrukturbetreiber:** Geschäftsmodelle, Finanzierungsquellen, Standortwahl-Strategien
- **Flottenbetreiber:** Nachfrage-Signale, Investitions-Timing, regionale Priorities
- **Investoren:** Rentabilitäts-Szenarien, Risikofaktoren, Opportunitäten pro Region

### 6.3 Ausblick und zukünftiger Forschungsbedarf

- Technologie-Roadmaps: Wie sinken HRS-Kosten bis 2035?
- Nachfrageentwicklung: Welche FCEV-Adoption-Raten sind realistisch?
- Institutionelle Reformen: Wie können regulatorische Barrieren schneller gelöst werden?
- Globale Wasserstoff-Märkte: Wie beeinflussen Importmodelle die HRS-Entwicklung?

## Literaturverzeichnis

- Atabay, Reyhan und Yilser Devrim (2024). „Design and techno-economic analysis of solar energy based on-site hydrogen refueling station“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.166.
- Chung, others (2024). *Hydrogen Cost Analysis Study*.
- Eissler, Karsten u. a. (2023). „Detailed Cost Analysis of Hydrogen Refueling Stations“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*.
- European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A) (2023). *Roadmap on Hydrogen Standardisation*.
- European Commission (2020). *A hydrogen strategy for a climate neutral Europe*.
- Genovese, Matteo, David Blekhman u. a. (2024). „Multi-year energy performance data for an electrolysis-based hydrogen refueling station“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.084.
- Genovese, Matteo, Viviana Cigolotti u. a. (2023). „Current standards and configurations for the permitting and operation of hydrogen refueling stations“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.324.
- Isaac, Nithin und Akshay K. Saha (2023). „A review of the optimization strategies and methods used to locate hydrogen fuel refueling stations“. In: *Energies* 16.5, S. 2171. DOI: 10.3390/en16052171.
- Kim, Changjong u. a. (2023). „Review of hydrogen infrastructure: the current status and roll-out strategy“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. Supplementary source for comparative regional analysis and strategic guidelines. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.053.
- Kim, Hyunjoon, Myungeun Eom und Byung-In Kim (2020). „Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.246.
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan (2023). *Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells*.
- Odenweller, Adrian und Falko Ueckerdt (2025). „The green hydrogen ambition and implementation gap“. In: *Nature Energy*.

- Prokopou, Dimitrios u. a. (2025). „Cost Optimal Design and Operation of Hydrogen Refueling Stations with Mechanical and Electrochemical Hydrogen Compressors“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Raeesi, Ramin u. a. (2024). „Hydrogen supply chain and refuelling network design: assessment of alternative scenarios for the long-haul road freight in the UK“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.03.474](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.474).
- Samsun, Remzi Can u. a. (2022). „Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: A global overview and perspectives“. In: *Energies* 15.14, S. 4975. DOI: [10.3390/en15144975](https://doi.org/10.3390/en15144975).
- Sujan, Vivek u. a. (2024). „Nationally Scalable Hydrogen Fueling Infrastructure Deployment“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Vizza, Domenico u. a. (2025). „Cost Optimal Design of a Stand-Alone PV-Driven Hydrogen Refueling Station“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Wu, Ling u. a. (2024). „Economic analysis of hydrogen refueling station considering different operation modes“. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.164](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.164).

# Konzeptioneller Rahmen

Die Arbeit strukturiert sich entlang von drei Dimensionen der HRS-Implementierung:

## 1. Herausforderungen (Challenges)

Die Implementierung von Wasserstofftankstellen steht vor drei Haupthürden:

- **Regulatorische Hürden:** Fragmentierung von Standards (ISO, nationale Vorschriften), Zertifizierungsprozesse, und grenzüberschreitende Regelungslücken Genovese, Cigolotti u. a. 2023; C. Kim u. a. 2023
- **Logistische Hürden:** H<sub>2</sub>-Transportmodi (Pipeline, Trailer, On-site Produktion), Versorgungskettenintegration von Produktion zu HRS, und Speicher-/Dispensing-Technologien Raeesi u. a. 2024; Atabay und Devrim 2024
- **Technische Hürden:** Zuverlässigkeit und Wartungsanforderungen, Kompressor- und Kühltechnologie, sowie Skalierbarkeit und Modularität Genovese, Blekhman u. a. 2024

## 2. Analyse-Framework (Analysis Framework)

Zur Analyse dieser Herausforderungen nutzt die Arbeit drei komplementäre Methoden:

- **Räumliche Planung & Optimierung:** Standortwahl, Netzwerk-Topologie und Deployment-Szenarien für unterschiedliche geografische Kontexte Isaac und Saha 2023; H. Kim, Eom und B.-I. Kim 2020
- **Wirtschaftliche Bewertung:** Kostenstruktur-Analyse (CAPEX/OPEX), Net Present Value (NPV), Return on Investment (ROI), sowie Sensitivitätsanalyse für verschiedene Finanzierungsszenarien Wu u. a. 2024; Atabay und Devrim 2024
- **Globaler Marktkontext:** Regionale Deployment-Trends, strategische Unterschiede zwischen Europa, Asien-Pazifik und Australien, sowie Markt-Treiber und Adoption-Barrieren Samsun u. a. 2022; C. Kim u. a. 2023

### 3. Integrationsszenarien (Integration Scenarios)

Die Thesis untersucht drei Hauptzzenarien für die Integration von HRS in bestehende Infrastrukturen:

- **Korridor-basiert:** HRS entlang von Hauptverkehrsachsen (z.B. TEN-T-Netzwerk in der EU), mit Fokus auf Long-Haul-Transport Isaac und Saha 2023; H. Kim, Eom und B.-I. Kim 2020
- **Urbane Cluster:** Stadtnahe HRS-Netzwerke für städtische Mobilität (Busse, Taxis, Flotten), mit kleineren Stationen und höherer Nutzungs frequenz H. Kim, Eom und B.-I. Kim 2020; Samsun u. a. 2022
- **Industrie-Hubs:** Hafen- und Logistikzentren mit Fokus auf Schwertransport und lokale Versorgungsketten Raeesi u. a. 2024; Samsun u. a. 2022

**Synthese:** Aus der Analyse dieser drei Dimensionen und Szenarien werden regionsabhängige Strategien und Handlungsempfehlungen abgeleitet, die Investoren, Policymaker und Infrastrukturbetreiber bei der effizienten HRS-Implementierung unterstützen.