

Wasserstofftankstellen in globalen Lieferketten

Implementierungsstrategien und Herausforderungen

Exposé für eine Bachelorarbeit

Denny

13. Februar 2026

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage	1
Problemstellung / Herausforderung und Forschungsstand	2
Formulierung der Forschungsfragen	4
Zielsetzung und Aufgabenstellung	4
Gliederung	5
Konzeptioneller Rahmen	13

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 Wasserstofftankstellen (Hydrogen Refueling Stations, HRS) mit erheblichen Herausforderungen verbunden.

Die Implementierungslücke bei Wasserstofftankstellen (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 **Odenweller2025**. 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 **EUCommission2020**. Ziel: bis 2031 HRS alle 100 km entlang TEN-T-Hauptachsen (über 40.000 km Streckenlänge).
- **Japan:** Die nationale Wasserstoff-Strategie (2023) **METI2023** 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. 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 **Chung2024; Eissler2023**. Bei typischen Auslastungsszenarien (30–80%) zeigen ökonomische Modelle, dass 58% Subventionen erforderlich sind für Break-Even-Profitabilität **Vizza2025**. Eine Detailanalyse von HRS-Betriebsmodi unter verschiedenen Szenarien verstärkt diese Erkenntnisse Wu u. a. 2024. 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-Fahrzeugflotten) 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 Barrierekatgorien 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 Im-

plementierungshürden **ECH2A2023**. Zusätzlich regeln EU-Verordnungen (AFIR, Richtlinie 2014/94/EU) HRS-Netzwerk-Aufbau und schaffen neue Compliance-Anforderungen **EUCommission2020**.

2. **Technische Hürden:** HRS erfordern zuverlässige Kompressoren, Speichertanks, Kühlanlage und Dispensing-Systeme. Technische Herausforderungen umfassen: (a) Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (HRS sollten $\geq 95\%$ Uptime erreichen), (b) Wartungsanforderungen und Ausfallsicherheit, (c) Speicher- und Transportlogistik (Trailer, Pipeline, On-site Elektrolyse), (d) Skalierbarkeit je nach Standort und Nachfrage **Eissler2023; Prokopou2025**; Genovese, Blekhman u. a. 2024.
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 **Sujan2024; Eissler2023**; Raeesi u. a. 2024.

Stand der Forschung

Bestehende Arbeiten zu HRS konzentrieren sich häufig auf Einzelaspekte: Technische Designs und Zuverlässigkeit **Prokopou2025**, ökonomische Szenarien **Chung2024; Vizza2025**, oder regionale Markt-Analysen **METI2023; EUCommission2020**. 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 H₂-Versorgungslogistiken (Trailer, Pipeline, On-site Elektrolyse) optimal?
3. **RQ3:** Unter welchen Bedingungen (Subventionsniveaus, CO₂-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, CO₂-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, H₂-Kosten, Transport)
5. **Sensitivitätsanalyse erstellen:** Analyse der Rentabilität unter Variation kritischer Parameter (Subventionen 0%-80%, CO₂-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
- Odenweller2025**

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
- Zuverlässigkeitsanforderungen und Verfügbarkeitsziele

2.2 HRS-Versorgungskette und Netzwerkdesign

- Supply-Chain-Integration von H₂-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: H₂-Transportkosten, Versorgungskettenintegration, Lageroptimierung
- 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), H₂-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%), CO₂-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 (H₂)
- 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-Profile
- 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
- CO₂-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

- Datenunförmlichkeiten, Annahmen in der CBA-Modellierung
- Zukünftige Technologie-Entwicklungen (z.B. bessere Speicherung)
- Nachfrageprognosen für H₂-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.
- Genovese, Matteo, David Blekhan 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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
- **Logistische Hürden:** H₂-Transportmodi (Pipeline, Trailer, On-site Produktion), Versorgungskettenintegration von Produktion zu HRS, und Speicher-/Dispensing-Technologien
- **Technische Hürden:** Zuverlässigkeit und Wartungsanforderungen, Kompressor- und Kühltechnologie, sowie Skalierbarkeit und Modularität

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
- **Wirtschaftliche Bewertung:** Kostenstruktur-Analyse (CAPEX/OPEX), Net Present Value (NPV), Return on Investment (ROI), sowie Sensitivitätsanalyse für verschiedene Finanzierungsszenarien
- **Globaler Marktkontext:** Regionale Deployment-Trends, strategische Unterschiede zwischen Europa, Asien-Pazifik und Australien, sowie Markt-Treiber und Adoption-Barrieren

3. Integrationsszenarien (Integration Scenarios)

Die Thesis untersucht drei Hauptszenarien 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
- **Urbane Cluster:** Stadtnahe HRS-Netzwerke für städtische Mobilität (Busse, Taxis, Flotten), mit kleineren Stationen und höherer Nutzungsfrequenz
- **Industrie-Hubs:** Hafen- und Logistikzentren mit Fokus auf Schwertransport und lokale Versorgungsketten

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.