



Roadmap Norm

TransHyDE-Projekt Norm

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Autorinnen und Autoren

Miriam Bäuerle – GWI Essen e. V.

Leandra Schulz – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V.

Fabian Lindner – Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit

Thomas Jordan – Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit

Dominic Schmolke – ISC Inspection GmbH

Maximilian Stoermer – DVGW CERT GmbH

Thomas Systemans – DVGW e. V.

Disclaimer

Die Erarbeitung des Whitepapers erfolgte durch eine ausgewählte Autorenschaft aus dem TransHyDE-Projekt Norm. Die Inhalte der Autorenpublikation wurden unabhängig vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt erstellt und spiegeln nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Leitprojekts wider.



Impressum

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE

cruh21 GmbH

Erste Brunnenstraße 1

20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und
Geothermie IEG

Gulbener Straße 23

03046 Cottbus

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion

Stiftstraße 34-36

45470 Mülheim an der Ruhr

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	S. 5
	Tabellenverzeichnis	S. 6
	Abkürzungsverzeichnis	S. 7
1 	Kurzfassung	S. 9
2 	Einleitung	S. 10
3 	Grundlagen	S. 11
	3.1 Bedeutung der technischen Regelungsetzung	S. 11
	3.2 Verhältnis von technischer Regelungsetzung und Recht	S. 12
	3.3 Transportvektoren	S. 12
	3.3.1 Gasförmiger Wasserstoff	S. 12
	3.3.2 Gasförmiger Wasserstoff in Gasleitungen	S. 12
	3.3.3 Gasförmiger Wasserstoff in Hochdruckbehältern	S. 13
	3.3.4 Flüssigwasserstoff	S. 13
	3.3.5 Ammoniak	S. 13
	3.3.6 Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)	S. 13
	3.4 Farbenlehre	S. 14
4 	Methodik	S. 15
	4.1 Bestandsanalyse	S. 15
	4.2 Bedarfsanalyse	S. 15
	4.2.1 Interne Bedarfsanalyse – Interviews mit den Forschungs- und Umsetzungsverbünden aus TransHyDE	S. 15
	4.2.2 Externe Bedarfsanalyse – Stakeholder Workshop	S. 16
	4.2.3 Auswertung der internen und externen Bedarfsanalyse	S. 16
	4.2.4 Rechtliche Bedarfsanalyse	S. 16
5 	Bestandsanalyse	S. 17
	5.1 Datenbankstruktur	S. 17
	5.2 Statistische Auswertung der Bestandsanalyse	S. 18
	5.3 Fachliche Einordnung	S. 19
6 	Bedarfsanalyse	S. 20
	6.1 Leitung	S. 21
	6.2 Hochdruckbehälter	S. 22
	6.3 Flüssigwasserstoff	S. 23
	6.4 Liquid Organic Hydrogen Carriers	S. 24
	6.5 Ammoniak	S. 24
7 	Handlungsempfehlungen	S. 27
	7.1 Organisatorische Handlungsempfehlungen	S. 27
	7.2 Fachliche Handlungsempfehlungen	S. 28
	7.3 Leitung	S. 28

7.4	Hochdruckbehälter	S. 29
7.5	Flüssigwasserstoff	S. 29
7.6	Liquid Organic Hydrogen Carriers	S. 30
7.7	Ammoniak	S. 30
7.8	Rechtliche Handlungsempfehlungen in Bezug auf Ammoniak	S. 32
8 	Zusammenfassung und Bewertung	S. 35



Abbildungsverzeichnis

5.1	Datenbankstruktur Transportvektoren.	17
5.2	Datenbankstruktur „Rechtsvorschriften Ammoniak“	18
5.3	Statistische Auswertung der Datenbank	19
6.1	Auswertung der internen (IB) und externen Stakeholder-Bedarfsanalyse (EB).	21
7.1	Organisatorische und fachliche/technische Handlungsempfehlungen.	28
7.2	Bewertungsschema zur Einordnung des rechtlichen Anpassungsbedarfs.	32



Tabellenverzeichnis

3.1 Kennzeichnung der Transportvektoren.	14
--	----

Abkürzungsverzeichnis

14. ProdSV	Vierzehnte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Druckgeräteverordnung)
ADN	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen
ADR	Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
CEN	Committee for Standardization
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DNV	Det Norske Veritas
EFMA	European Fertilizer Manufacturers Association
EMSA	European Maritime Safety Agency
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
GC	Gas Chromatography
GDB	Gashochdruckbehälter
GGVSEB	Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern, Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
H₂	Wasserstoff
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
IACS	International Association of Classification Societies
IGC-Code	International Gas Carrier Code
IMDG-Code	International Maritime Dangerous Goods Code
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LH₂	Flüssigwasserstoff
LKW	Lastkraftwagen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier, Flüssige organische Wasserstoffträger
MS	Mass Spectrometry

NH₃	Ammoniak
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
RID	Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
RohrFItgV	Rohrfernleitungsverordnung
SCC	Stress Corrosion Cracking
SOFC	Festoxidbrennstoffzelle
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRL	Technology Readiness Level
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1

Kurzfassung

Der Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur ist ein zentrales Element der deutschen und europäischen Energiewende. Damit Wasserstoff und seine Transportvektoren sicher, effizient und in großem Maßstab transportiert werden können, bedarf es klarer technischer Regelwerke und rechtlicher Rahmenbedingungen. Das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderte Leitprojekt TransHyDE – Verbund Norm hat sich dieser Herausforderung angenommen und untersucht, welche normativen Voraussetzungen für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft geschaffen oder angepasst werden müssen.

Im Fokus des Projekts stehen fünf zentrale Transportvektoren: Leitung, Gashochdruckbehälter, Flüssigwasserstoff, Ammoniak und LOHC. Für jeden dieser Transportvektoren wurde eine umfassende Bestandsanalyse bestehender technischer Regelung und Zertifizierungsprogramme durchgeführt. Ergänzt wurde diese durch eine Bedarfsanalyse, die sowohl interne Projektpartner als auch externe Stakeholder aus Industrie, Forschung und Behörden einbezog. Die Ergebnisse zeigen: Während für etablierte Technologien wie Leitung und Gashochdruckbehälter bereits viele technische Regelwerke existieren, bestehen für neuere Transportoptionen wie Flüssigwasserstoff, LOHC und Ammoniak erhebliche Lücken.

Ein zentrales Ergebnis des Projekts ist die Erkenntnis, dass pränormative Forschung, insbesondere in noch nicht markteta-blierten Technologien, eine Schlüsselrolle spielt. Sie schafft die wissenschaftliche Grundlage und Akzeptanz für neue technische Regelwerke, ermöglicht die sichere Einführung innovativer Technologien und fördert die internationale Anschlussfähigkeit deutscher Standards. Zudem müssen gesetzliche Verweise auf technische Regelwerke aktuell gehalten werden, um Rechtsklarheit zu gewährleisten. Die Roadmap Norm identifiziert konkre-

te Forschungs- und Regelsetzungsbedarfe, benennt prioritäre Handlungsfelder und zeigt auf, wie bestehende Strukturen weiterentwickelt werden können.

Für die Politik liefert der Bericht eine Entscheidungsgrundlage: Er zeigt, wo Investitionen in Forschung, Normung und Greniarbeit notwendig sind, um regulatorische Hemmnisse abzubauen und Planungssicherheit für Industrie und Infrastrukturprojekte zu schaffen. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer koordinierten, interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Staat, Wirtschaft, Verbänden und Wissenschaft, um den Wasserstoffhochlauf erfolgreich und sicher zu gestalten.

2

Einleitung

Das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE adressiert die praktische Einführung von Transport-, Verteil- und Speicheroptionen für Wasserstoff und seine Derivate. Dieses Projekt ist damit ein zentraler Bestandteil der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung, die darauf abzielt, klimafreundliche Wasserstofftechnologien zu fördern und eine leistungsfähige Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. [1]

Neben den technischen Voraussetzungen bedarf es dafür auch einheitlicher Vorgaben in Form von technischen Regelwerken. Diese bilden die Grundlage im Hinblick auf Sicherheit, Vergleichbarkeit und Umweltverträglichkeit. Der TransHyDE-Verbund Norm, mit einer Laufzeit von April 2021 bis März 2025, untersucht die genannten Aspekte ganzheitlich, um so Bedarfe in der technischen Regelsetzung aufzuzeigen und Lösungsansätze zu entwickeln. Die Arbeiten im Verbund ermöglichen es, bestehende Defizite in der Regelsetzung für die in TransHyDE betrachteten Transportvektoren:

- komprimierter Wasserstoff in Gashochdruckbehältern und Leitungen,
- flüssiger Wasserstoff,
- Ammoniak,
- und Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)

zu identifizieren und klare Handlungsempfehlungen abzuleiten. Damit wird ein entscheidender Beitrag zum nationalen Wasserstoffhochlauf geleistet. Aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften ist eine Standardisierung der sicherheitsrelevanten Handlungsabläufe, technischen Prozesse und weiterer Aspekte in den angestrebten Anwendungsfeldern der Transportvektoren unverzichtbar. [2]

Hierfür wurden in einem ersten Schritt bestehende nationale, europäische und internationale Normen, technische Anwendungsregeln und Zertifizierungsprogramme erhoben, in einer Datenbank inventarisiert und zugänglich gemacht. Im zweiten Schritt wurde sowohl projektintern als auch mit externen Stakeholdern eine Bedarfsanalyse durchgeführt. Abschließend wurden aus der ausgewerteten Bedarfsanalyse Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese Handlungsempfehlungen behandeln organisatorische als auch fachliche Aspekte sowie Empfehlungen für rechtliche Anpassungen.

3

Grundlagen

3.1. Bedeutung der technischen Regelung

Technische Regelwerke beschreiben u. a. Anforderungen an Produkte, Prozesse und Dienstleistungen. Ihr Ziel ist es, in Wirtschaft, Technik, Wissenschaft und Verwaltung Rationalisierung und Qualitätssicherung zu unterstützen, Sicherheit und Kompatibilität zu gewährleisten und damit Effizienz und Innovation zu fördern. Technische Regelwerke werden regelmäßig aktualisiert, um technologische Fortschritte zu berücksichtigen und neue Herausforderungen, bspw. im Bereich der erneuerbaren Energien, adäquat abzubilden. Nachfolgend wird der Begriff technisches Regelwerk als Überbegriff für Normen und technische Regeln verwendet. [3, 4]

Technische Regelwerke werden innerhalb von unabhängigen nationalen, europäischen und internationalen Organisationen, wie z. B. national dem Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN), auf europäischer Ebene dem European Committee for Standardization (CEN) oder der International Organization for Standardization (ISO) erarbeitet.

Auf nationaler Ebene gibt es weitere anerkannte Regelsetzer, wie den Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW e. V.), die für ihre Branche im Sinne der Selbstverwaltung der Industrie den Auftrag haben, technische Regelwerke zu erstellen. Dieser Auftrag kann innerhalb von Gesetzen bekräftigt werden, welche die Institutionen als Regelsetzer der Branche benennen, wie es bspw. im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) für den DVGW der Fall ist. [5, 6]

Technische Regelwerke sind auch ein wesentlicher Faktor für die Marktfähigkeit von Produkten und Dienstleistungen. Sie schaffen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene einheitliche Standards und erleichtern die wirtschaftliche

Zusammenarbeit, indem sie Handelshemmnisse abbauen und technische Barrieren zwischen Märkten reduzieren. Während europäische Regelwerke den Binnenmarkt fördern, tragen technische Regelwerke international dazu bei, globale Lieferketten zu harmonisieren und den Export technologischer Innovationen zu erleichtern. Besonders im Energiesektor ist eine enge Abstimmung zwischen verschiedenen Ländern essenziell, um den sicheren und effizienten Betrieb von Infrastruktur und grenzüberschreitenden Projekten zu gewährleisten. [7]

Ein weiterer Vorteil von technischen Regelwerken liegt in ihrer Rolle als Treiber für Innovationen. Sie sorgen dafür, dass neue technologische Entwicklungen effizient in bestehende Systeme integriert werden können und fördern die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschung und Entwicklung. Mit einem nationalen volkswirtschaftlichen Nutzen von etwa 17 Mrd. Euro jährlich haben Normen einen Einfluss auf verschiedene Aspekte der Gesellschaft [8].

Zudem sind technische Regelwerke oft die Grundlage für Zertifizierungen, die für den Marktzugang entscheidend sind. Zertifizierungsstellen wie die DVGW CERT GmbH prüfen, ob Unternehmen und Produkte die relevanten Anforderungen einhalten, und stellen entsprechende Zertifikate aus. Diese Nachweise sind insbesondere für den internationalen Handel von Bedeutung, da sie die Erfüllung technischer und sicherheitsrelevanter Anforderungen belegen und das Vertrauen in neue Technologien stärken.

3.2. Verhältnis von technischer Regelung und Recht

Im Grundsatz stehen technische Regelwerke zur freiwilligen Anwendung und sind rechtlich unverbindlich. Sie unterscheiden sich daher hinsichtlich ihres reinen Empfehlungscharakters grundlegend von allgemein gültigen verbindlichen Rechtsvorschriften [9]. Rechtsvorschriften, auch geläufig unter der Bezeichnung Regulatorik, sind dagegen verbindliche, mit Zwang durchsetzbare Regelungen und beruhen auf demokratischer Legitimation. Dazu zählen insbesondere Gesetze und Rechtsverordnungen. Sie knüpfen Rechtsfolgen an Tatbestände. Demgegenüber führen technische Regelwerke keine Rechtsfolgen herbei und gehören nicht zu den Rechtsnormen. [10, 11]

Technische Regelwerke und Gesetze stehen jedoch nicht als voneinander gänzlich unabhängige Regelungsbereiche isoliert nebeneinander. Vielmehr enthalten zahlreiche Rechtsvorschriften sogenannte Verweise auf technische Regelwerke. Verweise ermöglichen es dem Gesetzgeber, eine dynamische Anpassung an den technischen Fortschritt zu erzielen und zugleich technische Detailfragen aus den Rechtsvorschriften auszuklammern [12]. Mittels derartiger Verweise werden technische Regelwerke Bestandteil der verweisenden Vorschrift: Zwar verleiht der Verweis dem technischen Regelwerk keinen Rechtscharakter, der in Bezug genommene technische Regelwerksinhalt wird aber durch die Rechtsvorschrift „einverleibt“ und erhält insofern Rechtsverbindlichkeit [13].

Unterschieden wird zwischen „dynamischer“ und „starrer/statischer“ Verweisung. Eine Verweisung ist dynamischer Natur, wenn sie auf die jeweils geltende Fassung eines technischen Regelwerks verweist. Die verweisende Vorschrift unterliegt so der Entwicklung des technischen Regelwerks, auf das verwiesen wird, und bleibt folglich ohne weitere Änderungen aktuell. Dies geschieht häufig durch Verweise auf Oberbegriffe in Form sogenannter unbestimmter Rechtsbegriffe wie „allgemein anerkannte Regeln der Technik“. Bei der Auslegung dieser unbestimmten Rechtsbegriffe können wiederum grundsätzlich technische Regelwerke herangezogen werden [13]. So wird bei deren Einhaltung angenommen, dass auch die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten sind (siehe hierzu auch die explizite Regelung in § 49 Abs. 2 S. 1 EnWG) [14].

Demgegenüber bezieht sich eine statische Verweisung auf den Text eines technischen Regelwerks während eines bestimmten Zeitraums oder zu einem bestimmten Zeitpunkt, in der Regel die Fassung, die bei Inkrafttreten der verweisenden Vorschrift gilt.

Abhängig von der Art des Verweises können durch eine Überarbeitung der technischen Regelwerke auch Änderungen auf der rechtlichen Ebene erforderlich werden, um Aktualität zu gewährleisten. Für die Ausarbeitung und Weiterentwicklung von technischen Regelwerken folgt hieraus, dass ein Widerspruch in technischen Regelwerken zu den materiellen Vorgaben des Rechts vermieden werden muss [15].

Welche konkreten Anpassungen auf rechtlicher Ebene aufgrund der Weiterentwicklung von technischen Regelwerken erforderlich sind, wurde im Projekt im Kontext des Ammoniaktransports analysiert.

3.3. Transportvektoren

3.3.1. Gasförmiger Wasserstoff

Wasserstoff kommt unter atmosphärischen Bedingungen (1 atm, 20 °C) gasförmig vor. Dieser kann komprimiert ohne jegliche Umwandlung oder chemische Reaktion transportiert werden. Der Transport erfolgt unter bestimmten Druckbedingungen via Leitungen oder Druckbehältern. Diese müssen so beschaffen sein, dass die Materialien dem erforderlichen Druck standhalten können und gleichzeitig nicht unter Korrosionsschäden während der Nutzungsdauer leiden [16]. Die bestehende Infrastruktur und etablierte Technologien können für den Transport und die Nutzung von Wasserstoff verwendet und um neue wissenschaftliche Erkenntnisse ergänzt werden [17]. Die Umstellung der Infrastrukturen auf den Transport von Wasserstoff kann auf den vorhandenen Kenntnissen und Ressourcen aufbauen. Der Transport kann trimodal, d. h. via Schiff, Lastkraftwagen (Lkw) und Zug erfolgen.

3.3.2. Gasförmiger Wasserstoff in Gasleitungen

Der Nationale Wasserstoffrat hat in seiner Veröffentlichung „Wasserstofftransport“ bereits im Jahr 2021 dargelegt, dass der Transport von größeren Mengen gasförmigen Wasserstoffs u. a. per Gasfernleitungen erfolgen könne. Dabei sei im europäischen Umfeld für Distanzen von bis zu 10.000 km der Wasserstofftransport über Gasleitungen am wirtschaftlichsten, auch bei etwaigen neuzubauenden Strecken. [18]

Die Hochdruckferngasleitungen werden in der Regel mit Betriebsdrücken von 67,5 bar, 80 bar bzw. 100 bar betrieben, wobei der Betriebsdruck bei älteren Hochdruckleitungen bei 20–40 bar liegt. Aus diesen Hochdruckferngasleitungen werden Großkunden versorgt und in die regionalen Hochdrucknetze (regelmäßig bis 4 bar, ggf. 10–16 bar) eingespeist, die wiederum die Ortsnetze und größere Kunden versorgen. Die Endkunden werden über das Niederdruck- (bis 45 mbar), erhöhte Niederdruck- (45–100 mbar), Mitteldruck- (bis 1 bar) und ggf. Hochdrucknetz (bis 4 bar) versorgt. [19]

Vorhandene Erdgasfernleitungen können von Erdgas auf Wasserstoff durch den Austausch nicht wasserstoffgeeigneter Komponenten (z. B. Mess- und Regelanlagen, Verdichter etc.) umgestellt werden. [18]

Für Erdgasverteilnetze führt der Nationale Wasserstoffrat aus, dass diese „auf lokaler Ebene [...] in weiten Teilen dazu geeignet [sind], ein Erdgas-Wasserstoff-Gemisch oder reinen Wasserstoff zu transportieren, da die im Verteilnetz eingesetzten Leitungswerkstoffe (niedriglegierte Stähle, Kunststoffe wie PE und PVC) grundsätzlich die entsprechende Materialverträglichkeit besitzen. Andere Netzbestandteile (wie z. B. Armaturen) müssen nach den Regeln der Technik für den konkreten Einsatz bewertet werden“ [18]. Nicht geeignete Bestandteile müssen angepasst werden [20].

Daten von Hydrogen TCP unter der Schirmherrschaft der International Energy Agency (IEA) zeigen, dass der Neubau von Wasserstofffernleitungen entsprechend dem erweiterten Technology Readiness Level (TRL) der IEA mit 10 angenommen wird. Der TRL für die Beimischung von Wasserstoff in bestehende Erdgasleitungen liegt bei 7, während die Umstellung bestehender Erdgasleitungen auf Wasserstoff mit einem TRL von 8 bewertet wird. Diese Einschätzungen stammen aus dem Jahr 2022 und bewerten den jeweils durchschnittlichen globalen Technologiestandard. In einzelnen Ländern kann der TRL abweichen. [21]

3.3.3. Gasförmiger Wasserstoff in Hochdruckbehältern

Als weiteres Transportmedium kann gasförmiger Wasserstoff gemäß dem Nationalen Wasserstoffrat auch in hochverdichteter Form in Druckbehältern abgefüllt und transportiert werden. Dadurch kann Wasserstoff in einer Größenordnung von mehreren Hundert Kilogramm via Straßen-, Schiffs- und Schienenverkehr befördert werden. [18]

Diese Transportart wird u. a. für eine dezentrale Versorgung genutzt, um netzunabhängig flexibel schwankende Nachfragen auszugleichen und die Versorgung abgelegener Orte zu gewährleisten [22].

Entsprechend dem erweiterten TRL der IEA wird für Druckbehälter sowie den Transport per Lkw ein TRL von 11 angegeben [21]. Dies bestätigt, dass es sich um eine ausgereifte Technologie handelt.

3.3.4. Flüssigwasserstoff

Unter atmosphärischen Bedingungen (1 atm) geht Wasserstoff bei einer Temperatur unter -253 °C in den flüssigen Zustand über. In diesem Zustand hat dieser eine Energiedichte von $2,3\text{ kWh/l}$ [23]. Im Vergleich dazu hat gasförmiger Wasserstoff bei atmosphärischem Druck eine Energiedichte von $0,003\text{ kWh/l}$, während er bei einem Druck von 700 bar eine Energiedichte von etwa $1,3\text{ kWh/l}$ hat [24]. Der Energieaufwand zur Verflüssigung ist mit 6 bis 15 kWh/kg höher als der Kompressionsaufwand bei hochkomprimiertem Wasserstoff ($1,67$ bis $6,7\text{ kWh/kg}$) [25].

Die hohe Energiedichte und eine drucklose Lagerung machen Flüssigwasserstoff zu einem geeigneten Kandidaten, um große Mengen Wasserstoff über weite Distanzen zu transportieren. Die Herausforderung liegt vor allem in der Aufrechterhaltung der niedrigen Temperaturen. Daher sind hochgradig isolierte Behälter und spezialisierte Tanks erforderlich, um die Verdampfung des Wasserstoffs (Boil-off) zu minimieren. Zusätzlich zur Infrastruktur für den Transport ist es wichtig, die verschiedenen Transportwege zu standardisieren. Flüssigwasserstoff könnte auf Schiffen oder mittels Lkw transportiert werden. Die Standardisierung dieser Transporteinrichtungen ist entscheidend, um die Effizienz und Sicherheit zu maximieren und eine breite Marktakzeptanz zu erreichen. [26]

In einigen Bereichen wird Flüssigwasserstoff bereits in großem Maßstab verwendet, bspw. als Treibstoff für Raketenantriebe. Für Mobilitätsanwendungen wie Flugzeuge, Schiffe und Lkw existieren erste Flüssigwasserstofftankstellen und -systeme [27]. Der TRL für den Transport von Flüssigwasserstoff per Lkw wird in der Hydrogen TCP mit 2 bis 3 angegeben [21].

3.3.5. Ammoniak

Ammoniak ist eine der bedeutendsten anorganischen Chemikalien und spielt sowohl in der Natur als auch in der Industrie eine zentrale Rolle. Die chemische Verbindung aus einem Stickstoffatom (N) und drei Wasserstoffatomen (H) wird seit über 100 Jahren im großtechnischen Maßstab über das etablierte Haber-Bosch-Verfahren hergestellt. Ammoniak ist ein farbloses, toxisches Gas mit einem stechenden, charakteristischen Geruch, der bereits in sehr geringen, gesundheitlich unbedenklichen Konzentrationen deutlich wahrgenommen werden kann. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung eignet sich Ammoniak als Wasserstoffderivat und kann somit als Transportmedium für Wasserstoff genutzt werden. [28]

Ammoniak lässt sich bereits bei atmosphärischem Druck (1 atm) und einer Temperatur von -33 °C verflüssigen. Alternativ ist

eine Verflüssigung auch bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einem Druck von 8,9 bar(a) möglich [29, 30]. Im flüssigen Zustand weist Ammoniak eine hohe volumetrische Energiedichte von $3,2\text{ kWh/l}$ auf [28]. Im Vergleich zu Flüssigwasserstoff (Siedepunkt -253 °C , [29]) oder Flüssigerdgas (LNG, Siedepunkt -162 °C , [29]) liegt die Siedetemperatur von Ammoniak mit -33 °C [29] deutlich höher. Dadurch sind die Anforderungen an Speichermaterialien und Isolierung wesentlich geringer, was die Speicherung und den Transport erleichtert und Boil-off-Verluste reduziert.

Ein weiterer Vorteil liegt in der bereits bestehenden globalen Infrastruktur: Ammoniak wird weltweit in großen Mengen transportiert und gespeichert. In Deutschland erfolgt der Transport bimodal – per Schiff bzw. Binnenschiff sowie per Schienenverkehr. Der Straßentransport mit Lkw ist auf Basis des Verlagerungsgrundsatzes, ein Prinzip der Gefahrgutverordnung Eisenbahn, See- und Binnenschifffahrt, nur in Ausnahmefällen und mit spezieller Genehmigung zulässig. Für den lokalen Transport zwischen Industrie- und Chemiestandorten existieren zudem Onshore-Pipelines.

Zur Rückgewinnung von Wasserstoff kann Ammoniak thermisch gespalten werden (Cracking), wobei der Wasserstoff ohne CO_2 Emissionen freigesetzt und bspw. in ein Leitungsnetz eingespeist werden kann. Um dabei entstehende NO_x -Emissionen zu minimieren, ist eine geeignete Abgasnachbehandlung erforderlich [31]. Alternativ kann Ammoniak auch direkt energetisch genutzt werden – etwa in Gasturbinen, Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) oder speziellen Verbrennungssystemen –, ohne zuvor in Wasserstoff umgewandelt zu werden. [32]

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette variiert der technologische Reifegrad (TRL) für Ammoniak als Wasserstoffträger erheblich. Laut IEA reicht dieser von TRL 3 – etwa bei innovativen Verfahren wie der einstufigen Elektrosynthese – bis hin zu TRL 11 für etablierte Technologien wie das klassische Haber-Bosch-Verfahren zur großtechnischen Ammoniakproduktion [33].

3.3.6. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)

Flüssige organische Wasserstoffträger (engl.: Liquid Organic Hydrogen Carriers, kurz: LOHC) sind chemische Energiespeicher für Wasserstoff. Diese organischen Verbindungen können durch chemisch-katalytische Prozesse Wasserstoff aufnehmen (Hydrierung) und abgeben (Dehydrierung) und dadurch als Speichermedien für Wasserstoff dienen. Sie ermöglichen die Langzeitspeicherung von u. a. regenerativ erzeugtem Wasserstoff unter Umgebungsdruck und -temperatur für zahlreiche Hydrier-Dehydrier-Zyklen. LOHC weisen ein geringes Gefährdungspotenzial beim Transport auf, erfordern weder Kryotanks noch Druckbehälter für Lagerung bzw. Transport und können sowohl per Lkw, per Güterzüge, per Schiff wie auch in Leitungen transportiert werden. [34]

Eine enge Verzahnung der Dehydrierungs- und Hydrierungsprozesse in andere thermische Prozesse ist für eine akzeptable Energieeffizienz nötig. Eine Besonderheit der LOHC ist die Begebenheit, dass sowohl das mit Wasserstoff beladene LOHC zum Verwendungsort als auch das entladene LOHC zurück zum Hydrierungsort transportiert werden muss [34]. Bspw. könnten künftig die Infrastrukturen der Mineralölindustrie und der LNG-Terminals zur Lagerung von beladenem LOHC sowie zur Lagerung von entladene LOHC, das auf ein Schiff zum Transport zu einer Wasserstoffquelle verladen wird, genutzt werden.

Der TRL für LOHC-Prozesse wird global zwischen 5 und 7 im Jahr 2023 eingeordnet, wobei in Deutschland für das spezifische Trägeröl Benzyltoluol bereits ein TRL von 7 verzeichnet ist [21],

Tabelle 3.1. Kennzeichnung der Transportvektoren.

Transportvektor	Abkürzung	Farbkennzeichnung
Wasserstoff (gasförmig) Leitung	H ₂	Rot
Wasserstoff (gasförmig) Gashochdruckbehälter	GDB	Orange
Flüssigwasserstoff	LH ₂	Blau
Ammoniak	NH ₃	Gelb
Flüssige organische Wasserstoffträger	LOHC	Grün

35]. Der TRL zum Transport per LOHC-Tanker liegt im Jahr 2023 bei 11 [21]. Dies zeigt, dass insbesondere der Transport bereits Stand der Technik ist, die verschiedenen Prozesse aber noch verfeinert werden können. Außerdem sind LOHC noch nicht global verbreitet. [36]

3.4. Farbenlehre

Die Farbkennzeichnung der verschiedenen Transportvektoren wurde in Anlehnung an die europäische Kennzeichnung von Gasflaschen vorgenommen. Da gasförmiger Wasserstoff zu den entzündbaren Gasen gehört, wird dieser mit der Farbe Rot gekennzeichnet. Zur Unterscheidung von gasförmigem Wasserstoff in Leitung und Gashochdruckbehältern wird Rot für Leitungen und Orange für Gashochdruckbehälter gewählt. Ammoniak zählt zu den giftigen und/oder ätzenden Gasen und wird deshalb mit der Farbe Gelb gekennzeichnet [37]. Es gilt jedoch zu beachten, dass die allgemeinen Farbkennzeichnungen für verschiedene Stoffe je nach Land variieren können, da DIN EN-Normen nur für die Mitglieder des Europäischen Komitees für Normung verpflichtend sind [38]. Für LOHC wurde die Farbe Grün und für Flüssigwasserstoff die Farbe Blau gewählt.

4

Methodik

4.1. Bestandsanalyse

Zur Erfassung relevanter technischer Regelwerke wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Ziel war es, bereits bestehende technische Regelwerke und Zertifizierungsprogramme zum Thema Wasserstoff in den Bereichen Leitung, Gashochdruckbehälter, Flüssigwasserstoff, Ammoniak und LOHC zu identifizieren. Für die Recherche wurden zum Bearbeitungszeitpunkt gültige Dokumente bekannter Regelsetzer und Normungsorganisationen eingesehen, darunter bspw. das DVGW-Regelwerk und DIN (EN (ISO))-Normen.

Zunächst erfolgte die Vorauswahl anhand von Titel und Kurzfassung. Danach wurde, wenn verfügbar, der Volltext auf relevante Schlagwörter analysiert. Die Ergebnisse wurden anhand von Dokumentennummer, -typ, Gültigkeitsbereich, Titel sowie Gewerk und Fokus der Norm, Anwendungsbereich, Gremium, Veröffentlichungsdatum, Status der Überarbeitung und Dokumentenzugang in einer Datenbank aufgenommen und kategorisiert.

Im Hinblick auf den Transport von in Ammoniak gebundenem Wasserstoff wurde neben der Erfassung einschlägiger technischer Regelwerke auch eine Bestandsanalyse in rechtlicher Hinsicht durchgeführt. Ziel war es, Anknüpfungspunkte an nationale, europäische und internationale technische Regelwerke durch Verweisungen in Rechtsvorschriften zu identifizieren. Hierzu wurde der Status quo des Rechtsrahmens mit Blick auf die gesamte Logistikkette des Ammoniaktransports aufbereitet. Die Bestandsaufnahme umfasst eine Vielzahl an Vorschriften aus verschiedenen Gesetzen, Rechtsverordnungen sowie internationalen Übereinkommen.

4.2. Bedarfsanalyse

Um nicht ausschließlich bestehende Regelwerke zu erfassen, sondern auch zukünftige Anforderungen und mögliche Lücken in der Standardisierung für den Wasserstofftransport zu identifizieren, wurde eine Bedarfsanalyse durchgeführt. Diese umfasst eine interne Erhebung durch Interviews mit Partnern sämtlicher TransHyDE-Projekte sowie eine externe Analyse in Form eines Stakeholder-Workshops.

Die Ergebnisse der Befragungen wurden anschließend analysiert, um Handlungsempfehlungen für die Regelsetzung abzuleiten. Für den Transportvektor Ammoniak wurde zudem untersucht, inwieweit rechtliche Anpassungen erforderlich sind, um neu zu entwickelnde technische Regelwerke wirksam einzubinden.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Weiterentwicklung von technischen Regelwerken, Zertifizierungen und rechtlichen Vorgaben, um eine sichere und effiziente Wasserstofflogistik zu gewährleisten.

4.2.1. Interne Bedarfsanalyse – Interviews mit den Forschungs- und Umsetzungsverbänden aus TransHyDE

In der internen Bedarfsanalyse für die im Leitprojekt TransHyDE entwickelten Technologien sowie Speicher-, Transport- und Verteilkonzepte wurde ein Interviewfragebogen (siehe Anhang) für die TransHyDE-internen Subprojekte erstellt, um daraus Anforderungen hinsichtlich der Erstellung, Überarbeitung bzw. Erweiterung von technischen Regelwerken und Zertifizierungsmethoden abzuleiten. Die Konsolidierung der TransHyDE-Projekte fand wesentlich im 4. Quartal 2022 statt. Das Interview wurde

in drei thematische Blöcke aufgeteilt. Im ersten Block wurden Fragen zu den bereits verwendeten technischen Regelwerken gestellt. Daran anknüpfend wurde im zweiten Block auf aktuell fehlende bzw. für die Zukunft wichtige technische Regelwerke verwiesen. Im letzten Block gab es weitergehende Fragen, z. B. zu relevanten Stakeholdern. Dabei konnten entscheidende Punkte von den Interviewten angesprochen werden, die für das jeweilige Umsetzungs- bzw. Forschungsprojekt wichtig sind. Insbesondere Informationen zu relevanten Stakeholdern wurden bei der Planung der externen Bedarfsanalyse berücksichtigt.

4.2.2. Externe Bedarfsanalyse – Stakeholder Workshop

Anknüpfend an die interne Bedarfsanalyse fand im April 2023 ein umfangreicher Austausch mit externen Interessenvertretern in Form eines Stakeholder-Workshops statt. Der Workshop zielte darauf ab, wichtige Interessengruppen zusammenzubringen, um deren Perspektiven und Anliegen in Bezug auf Lücken und bereits angestoßene Regelwerke und Standardisierungsprozesse zu erörtern. Dazu wurden Vertreter aus Forschung, Industrie und Gewerbe sowie Behörden nach Berlin geladen. Diese wurden zuvor vom Projektkonsortium dahingehend ausgewählt, dass möglichst viele unterschiedliche Bereiche (Forschung und Entwicklung, Industrie, KMU etc.) bei den Anfragen zur Teilnahme abgedeckt waren. Die hier behandelten Speicher-, Transport- und Verteilkonzepte wurden in kleinen Gruppen diskutiert. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden thematisch in die Kategorien

- Anforderung an den Energieträger,
- Werkstoff/Material,
- Funktion/technische Sicherheit und
- Qualifikation/Betriebssicherheit & organisatorische Voraussetzungen

gruppiert und auf einem Zeitstrahl eingeordnet. Dieser besteht aus den Zeitintervallen

- „läuft bereits“ für aktuell bereits in Entwicklung befindliche Regelsetzungsprozesse,
- „kurzfristig“ für Anforderungen an Regelsetzungsprozesse bis 2025,
- „mittelfristig“ zu entwickelnde technische Regelwerke bis 2030 und
- „langfristig“ für die zeitliche Einordnung bis 2045.

4.2.3. Auswertung der internen und externen Bedarfsanalyse

Für die Auswertung der internen und externen Bedarfsanalyse ist zu beachten, dass die hier beschriebenen Ergebnisse ausschließlich auf den durchgeführten Interviews sowie den Aussagen der Stakeholder während des Workshops basieren. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass hier lediglich ein Auszug von Meinungen der in den TransHyDE-Projekten vertretenen Partner wiedergegeben werden kann. Daher zeigen die Ergebnisse keineswegs ein vollständiges Bild aller nationalen Interessenvertreter. Darüber hinaus stellt ein Abgleich mit bestehender Regelung lediglich eine Momentaufnahme dar.

Die technische Regelung basiert auf vorgegebenen Prozessen und dem Erfahrungsaustausch von unterschiedlichen

Stakeholdern. Zur Schließung bestehender Regelsetzungslücken kann Forschungsbedarf bestehen. Daher sind einige der hier genannten Regelsetzungslücken bereits in Regelsetzungsorganisationen bekannt, aber noch nicht im technischen Regelwerk geschlossen.

4.2.4. Rechtliche Bedarfsanalyse

Neben der Aufnahme von Lücken in technischen Regelwerken sind ebenfalls regulatorische Bedarfe in die Analyse mit eingeflossen. Welche Auswirkungen Veränderungen auf technischer Regelwerkebene auf die Rechtsebene haben, wurde im Projekt in Bezug auf den Wasserstofftransportvektor Ammoniak untersucht. Ist aus technischer Sicht eine Überarbeitung der Regelung geboten, so muss eine entsprechende Anpassung des Rechtsrahmens mitbedacht werden, um eine umfassende Anwendbarkeit des technischen Regelwerks sicherzustellen. Enthält eine Rechtsvorschrift einen statischen Verweis auf ein bestimmtes technisches Regelwerk, so muss dieser Verweis bei einer Neufassung des Regelwerks überarbeitet werden. Unter Umständen muss die Inbezugnahme des Regelwerks im Rechtsrahmen auch erst hergestellt werden, weil hierzu noch keine rechtliche Regelung besteht.

Anhand der ermittelten Bedarfe auf technischer Regelwerkebene wurde daher untersucht, welche Änderungen im Rechtsrahmen in Bezug auf den Transport von Ammoniak erforderlich sind. Daraus wurden gezielte Handlungsempfehlungen abgeleitet, die konkrete Anpassungen des Rechtsrahmens vorschlagen, um einen sicheren und effizienten Transport von Ammoniak zu gewährleisten.

5

Bestandsanalyse

5.1. Datenbankstruktur

Im Rahmen der Bestandsanalyse ist eine Excel-Datenbank in Zusammenarbeit mit allen Partnern aus dem Verbund Norm erstellt worden, die bis zum Ende des Projekts fortlaufend aktualisiert und ergänzt wurde. Die Datenbank stellt eine Sammlung zum existierenden technischen und teilweise gesetzlichen Ordnungsrahmen dar. Die Datenbank umfasst dabei allgemein gültige technische Regelwerke, wie z. B. DVGW G 463 (A), die keinen spezifischen Energieträgerbezug haben, sondern generell Gase nach DVGW G 260 (A) berücksichtigen. Daneben existieren auch spezifisch auf Wasserstoff angepasste Dokumente wie DVGW G 221 (M), und für Wasserstoff spezifisch entwickelte Inhalte wie die DVGW G 265-3 (M). Darüber hinaus sind auch Dokumente, die noch nicht auf Wasserstoff angepasst wurden, aber auch keine allgemeine Gültigkeit aufweisen, jedoch thematisch eine Relevanz für den jeweiligen Transportvektor haben, mit aufgeführt.

Die Beurteilung der H₂-Readiness, das heißt die Verträglichkeit einer Transport- oder Speicheroption mit Wasserstoff zu gewissen Volumenanteilen, ist nicht enthalten, da eine klare und vergleichbare Definition der H₂-Readiness über die verschiedenen hier betrachteten Transportvektoren hinweg nicht zu realisieren ist. Die Datenbank soll als Überblick für potenzielle technische Regelwerke dienen und dabei die bereits existierende Regelung für die betrachteten Transportvektoren aufzeigen und einen beschleunigten Zugang zur existierenden Regelung bieten.

Die Datenbank besteht aus sechs Tabellenblättern, wobei sich fünf Tabellenblätter mit je einem der Transportvektoren befassen. Für den Transportvektor Ammoniak existieren zwei Tabellenblätter, da hier zusätzlich gesetzliche Verweise auf technische Regelwerke in einem zweiten Tabellenblatt gesammelt wurden. Die Struktur der fünf Tabellenblätter zu den einzelnen Transportvektoren ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Das sechste Tabellenblatt „**Rechtsvorschriften Ammoniak**“

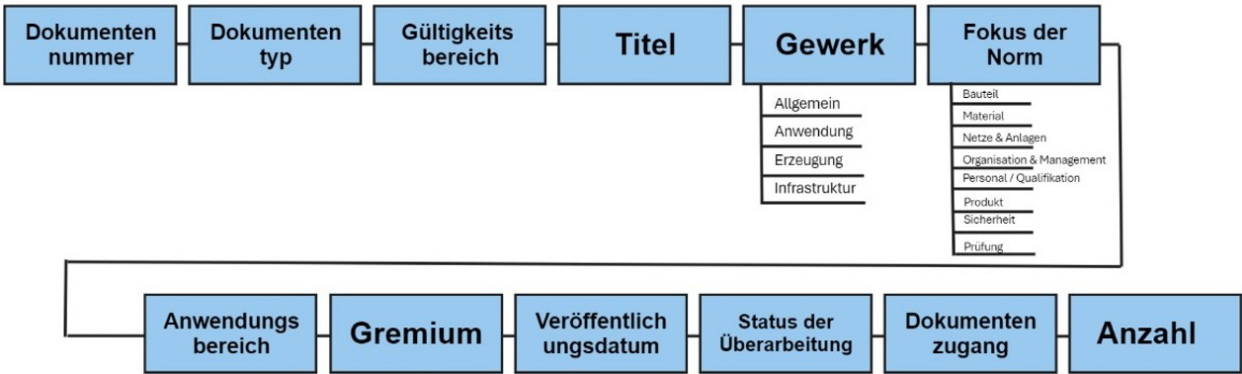


Abbildung 5.1. Datenbankstruktur Transportvektoren.

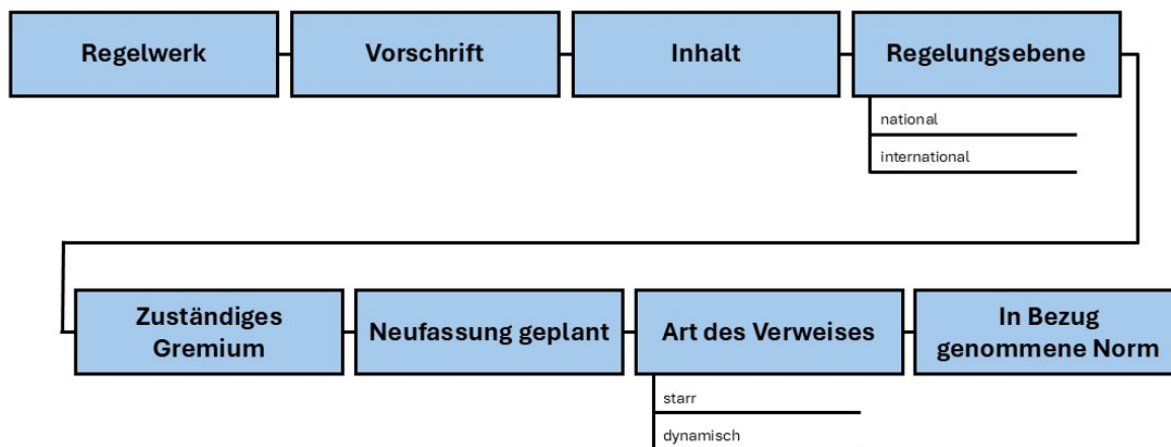


Abbildung 5.2. Datenbankstruktur „Rechtsvorschriften Ammoniak“

(Abbildung 5.2) weicht von der Struktur der übrigen fünf Tabellenblätter ab und führt eine Vielzahl an Vorschriften aus verschiedenen Gesetzen, Rechtsverordnungen sowie Übereinkommen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Regelungsebene auf, die im Zusammenhang mit dem Transport von Ammoniak zur Anwendung kommen. Diese verweisen vielfach auf technische Regelwerke, die detaillierte Anforderungen für die praktische Umsetzung enthalten, und bilden das regulatorische Fundament für den sicheren Transport, die Lagerung und den Umgang mit Ammoniak.

Im Fokus der Untersuchung stand das Gefahrgutrecht auf nationaler und europäischer Ebene. Die Darstellung wurde u. a. durch Regelungen zum Arbeitsschutzrecht ergänzt.

Für den Transport von Ammoniak gelten spezifische Gefahrgutvorschriften. Die Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (GGVSEB) regelt den Transport gefährlicher Güter auf der Straße, der Schiene und auf Binnenwasserstraßen. Sie verweist auf internationale Vorschriften wie das ADR (Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße), das den Straßentransport von Ammoniak und anderen gefährlichen Stoffen regelt. Ähnliche Regelungen bestehen für den Schienenverkehr in der Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID) und für den Transport auf Binnenwasserstraßen in dem Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen (ADN). Der International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG-Code) regelt wiederum den Seetransport von gefährlichen Gütern, zu denen auch Ammoniak gehört. Für den maritimen Transport von verflüssigten Gasen, einschließlich Ammoniak, ist zudem der International Gas Carrier Code (IGC-Code) von Bedeutung, der spezielle Sicherheitsanforderungen für Gastransporte auf See enthält.

Die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) bezweckt, die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln zu gewährleisten und trifft Regelungen zum Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen, zu denen auch die Lagerung und der Transport von Ammoniak zählen. Ergänzend dazu enthält die Druckgeräteverordnung (14. ProdSV) sicherheitstechnische Anforderungen für Druckgeräte, die beim Transport und der Lagerung von Ammoniak relevant sind.

Weitere relevante rechtliche Bestimmungen betreffen den Bau und Betrieb von Rohrleitungen für den Transport von Am-

moniak. Die Rohrfernleitungsverordnung (RohrFltGV) legt die Anforderungen für den Bau und Betrieb solcher Rohrleitungen fest. Das Umweltverträglichkeitsprüfungsge-setz (UVPG) regelt, wann eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich ist, bspw. beim Aus- oder Neubau von Transport- oder Lagerkapazitäten. Im Hinblick auf den Schutz von Gewässern ist das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) zu beachten, das Anforderungen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (wie Ammoniak) stellt. Weitere Vorschriften finden sich in der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV), die Sicherheitsmaßnahmen für Anlagen festlegt, in denen wassergefährdende Stoffe gelagert oder umgeschlagen werden.

5.2. Statistische Auswertung der Bestandsanalyse

Abbildung 5.3 zeigt die Verteilung der insgesamt 1.131 eingepflegten technischen Regelwerke auf die verschiedenen Transportvektoren und dem Gewerk der Regelwerke. Dabei kann ein Regelwerk zu mehreren Gewerken zählen, wodurch die Summe der Gewerke pro Transportvektor nicht zwingend der Gesamtanzahl entsprechen muss.

Die meisten technischen Regelwerke liegen dabei im Bereich der beiden Transportvektoren leitungsgebundener Wasserstoff und LOHC vor. Für den leitungsgebundenen Wasserstoff ist dies insbesondere durch die Vielzahl an Regelwerken für die Infrastruktur getrieben. Begründet durch die lange Historie der leitungsgebundenen Gasversorgung insbesondere mit Erdgas existiert hier ein großes Fundament an Regelwerken.

Für LOHC basiert die hohe Zahl an eingepflegten Dokumenten auf allgemeinen technischen Regelwerken. Abbildung 5.3 verdeutlicht, dass eine klare Zuordnung der Regelsetzung für LOHC zu einem spezifischen Gewerk (Anwendung, Erzeugung, Infrastruktur) im Vergleich zu anderen Transportvektoren anteilig geringer ausfällt. Lediglich ein in der Datenbank erfasstes technisches Regelwerk, die DIN SPEC 91437, umfasste den Begriff LOHC zum Stand der Veröffentlichung der Datenbank. Die restlichen technischen Regelwerke sind dementsprechend nicht speziell für eine LOHC-Anwendung erstellt worden.

Seither sind die Entwicklungen von technischen Regelwerken für LOHC vorangeschritten: Darunter ist das unter deutscher Leitung Anfang 2025 initiierte Normungsprojekt ISO 19870-4 zu nennen. Die ISO 19870-X-Reihe erstellt eine umfassende THG-Bilanzierungsmethodologie für Wasserstofflieferketten. Teil 4

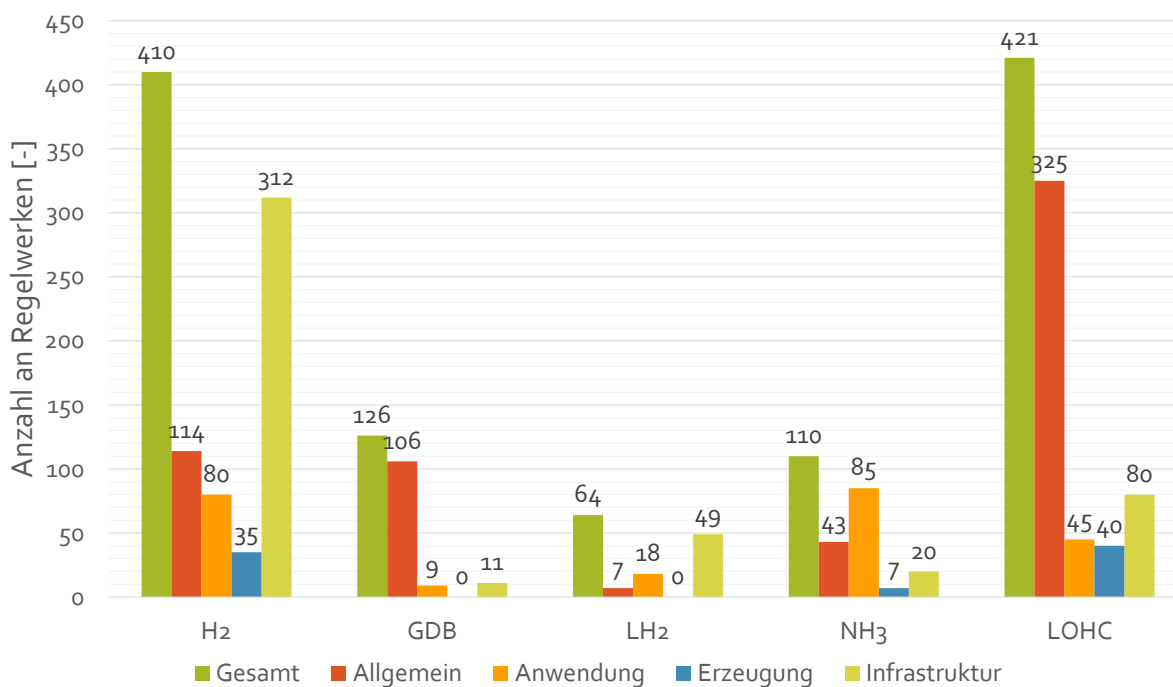


Abbildung 5.3. Statistische Auswertung der Datenbank

behandelt dabei LOHC als Transportvektor. [39]

Weiterhin werden mit der SN EN ISO 24078 „Wasserstoff in Energiesystemen – Vokabular“ seit Juni 2025 technische Definitionen zu LOHC in einer Norm festgehalten. [40]

Einige LOHC-Trägersubstanzen wie Benzyltoluol sind bereits unter internationalen Vorschriften wie das ADR, RID und ADN als Gefahrgut klassifiziert und damit die Transportmodalitäten geregelt. Ende 2024 wurde für alle LOHC-Substanzen, die unter der UN-Nummer 3082 gemäß der UN Model Regulations transportiert werden, eine Sondervorschrift verabschiedet, um einen klaren, aber nicht rechtsverbindlichen Rahmen für den internationalen Transport dieser Substanzen, wenn sie als Wasserstoffträger verwendet werden, sicherzustellen. Diese Sondervorschrift hat in der neuen Version, UN Model Regulations Rev. 24 (2025), Einzug erhalten. Durch den Verweis in nationalen Vorschriften oder der Überführung in Regelwerke können die UN Model Regulations Rechtsverbindlichkeit erlangen. [41]

Für Wasserstoff in Gashochdruckbehältern, Flüssigwasserstoff und Ammoniak ist die Anzahl an Regelwerken deutlich geringer. Für Wasserstoff in Gashochdruckbehältern sind allgemeine Regelwerke dominierend, da insbesondere Anforderungen an das Produkt und nicht an den Transport von Gashochdruckbehältern benötigt werden.

Für Flüssigwasserstoff überwiegen die Regelwerke zur Infrastruktur. Dies liegt vor allem an den hohen sicherheitstechnischen Anforderungen für die Lagerung und den Transport von kryogenen Flüssigkeiten. In Bezug auf die Erzeugung von Flüssigwasserstoff gibt es zwar technische Regelwerke für bestimmte Aspekte der Verflüssigung, jedoch ist der gesamte Verflüssigungsprozess bislang nicht als solcher standardisiert.

Für Ammoniak gibt es die meisten Regelwerke im Bereich der Anwendung. Davon ist der Großteil generisch, d. h. es handelt sich um Regelwerke, in denen Ammoniak nicht explizit erwähnt wird, sondern bspw. als chemisches Erzeugnis implizit in einer Vielzahl von Stoffen angesprochen wird. Außerdem stammt ein Teil der Regelwerke für Ammoniak aus dem Bereich der Kältetechnik, da Ammoniak als Kältemittel mit der Bezeichnung R-717 eingesetzt wird.

5.3. Fachliche Einordnung

Die [Datenbank](#) ist der Öffentlichkeit online auf der Internetseite der Wasserstoff-Leitprojekte zugänglich gemacht [42]. Dadurch ist bereits jetzt ein Nutzen der entwickelten Ergebnisse gegeben.

Bezogen auf die Akzeptanz, insbesondere in der breiten Öffentlichkeit, bieten technische Regelwerke die Grundlage im Hinblick auf Sicherheit, Vergleichbarkeit und Umweltverträglichkeit. Hier bietet die Bedarfsanalyse die Möglichkeit, aufbauend auf der Bestandsanalyse, Lücken in der Gesetzgebung zu schließen und damit die erforderlichen Maßnahmen zu erreichen. Dies ist bei Wasserstoff oder als toxisch, ätzend und gewässergefährdend eingestuft chemischen Stoffen, wie Ammoniak, ein unverzichtbarer Prozess. Als konkretes Beispiel kann hier die Skalenbewertung zur Gefährlichkeitsbeurteilung von Ammoniak, die meist schwer verständlich ist, genannt werden.

Im Bereich der techno-ökonomischen Bewertung schafft das TransHyDE-Projekt Norm die nationale Basis für gleiche Voraussetzungen beim globalen Handel. Im Hinblick auf Trägermedien für Wasserstoff, wie Ammoniak, LOHC und den Transport von gasförmigem Wasserstoff via Leitung oder Gashochdruckbehältern existieren derzeit keine einheitlichen internationalen Vorgaben bezüglich rechtlicher Sicherheit, Qualität, Planung, Fertigung, Errichtung, Prüfung, Inbetriebnahme, Betrieb, Instandhaltung und Qualifikation für Anlagen der in TransHyDE betrachteten Transport- und Speicheroptionen. Deutschland ist für seine hohen Standards und die hohe Sicherheit in technischen Anwendungen international bekannt und akzeptiert. Es ist damit von deutschem Interesse, an der internationalen Gesetzgebung entscheidend mitzuwirken. Dafür sind nationale Vorarbeiten hinsichtlich notwendiger Regelwerksentwicklungen grundlegend. Hierfür zeigt die nachfolgende Bedarfsanalyse (Normierungsstrategien und Stakeholder-Analyse), welche zusätzliche Gesetzgebung für die in TransHyDE untersuchten Transport- und Speicheroptionen erforderlich ist, um den angestrebten nationalen, aber auch europäischen, Wasserstoffhochlauf umzusetzen.

6

Bedarfsanalyse

Abbildung 6.1 zeigt die quantitative Analyse sowohl der internen (IB) als auch der externen Bedarfsanalyse (EB) und verknüpft die ermittelten Bedarfe mit den in Abschnitt 4.2.2 eingeführten Zeiträumen („läuft bereits“, „kurzfristig“, „mittelfristig“ und „langfristig“). Abbildung 6.1 ist das Ergebnis der Bedarfsanalysen im Jahr 2023. Wie bereits in Abschnitt 5.2 erläutert, sind seither diverse Anpassungen und Neuentwicklungen in technischen Regelwerken durchgeführt worden, womit einige identifizierte Bedarfe bereits gedeckt wurden. Dadurch kann die Darstellung einzelner Kategorien innerhalb der Abbildung aktuell anders aussehen. Die Bedarfsanforderungen für Normung und Regelung in Bezug auf alle betrachteten Transportvektoren wurden in vier Kategorien gemäß Abschnitt 4.2.2 unterteilt. Die von den Experten genannten Bedarfe des jeweiligen Transportvektors wurden zunächst den Kategorien zugeordnet. Anschließend wurde die Anzahl der Bedarfe in jeder Kategorie ermittelt und in Form eines Kreises, dessen Radius abhängig von der Anzahl der identifizierten Regelungslücken oder Normungsbedarfe ist, im Diagramm dargestellt. Um einen direkten Vergleich zwischen der internen und der externen Bedarfsanalyse zu ermöglichen, wurde jeder Zeitraum in zwei Bereiche unterteilt. Im Folgenden sind die Kernaussagen zusammengefasst:

- Sowohl interne als auch externe Stakeholder sind der Meinung, dass die meisten identifizierten Regelungslücken für die erfolgreiche Implementierung der betrachteten Transportvektoren kurzfristig geschlossen werden sollten. Kurzfristige Ergänzungen und Neuentwicklungen in den Regelwerken werden insbesondere für die noch nicht als Energieträger etablierten Transportvektoren Ammoniak und LOHC als erforderlich angesehen.
- Für die bereits etablierten Transportvektoren leitungsge-

bundener Wasserstoff und die Wasserstoffspeicherung in Gashochdruckbehältern sind bereits zahlreiche Normungsprozesse hinsichtlich der Anpassung auf Wasserstoff initiiert. Dies erklärt, dass diese Transportvektoren in der Spalte „läuft bereits“ vertreten sind.

- Abbildung 6.1 verdeutlicht auch, dass die Stakeholder Anpassungen im Bereich „Werkstoff/Material“ für alle Transportvektoren als erforderlich erachten, um deren Implementierung zu ermöglichen.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird in Bezug auf die verschiedenen Transportvektoren inhaltlich auf die Ergebnisse der internen und externen Befragungen eingegangen. Die identifizierten Bedarfe werden anhand „allgemeingültiger Aussagen“ sowie den in Abbildung 6.1 dargestellten vier Kategorien unterteilt: „Anforderungen an den Energieträger“, „Werkstoff/Material“, „Funktion/technische Sicherheit“ sowie „Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen“. Anhand dieser Kategorien werden die in den Befragungen identifizierten Bedarfe und Regelungslücken strukturiert diskutiert.

Die Analyse der Befragungsergebnisse zeigt, dass sich viele Bedarfe über verschiedene Transportvektoren hinweg ähneln, insbesondere in Bezug auf die technische Sicherheit, Werkstoffe und Qualifikationsanforderungen. Dennoch gibt es für einzelne Transportmedien und Energieträger spezifische Herausforderungen, die eine vertiefte Betrachtung erfordern. Ammoniak nimmt in der Bedarfsanalyse eine Sonderstellung ein, da neben den technischen und sicherheitsrelevanten Aspekten auch die rechtliche Einordnung betrachtet wurde.

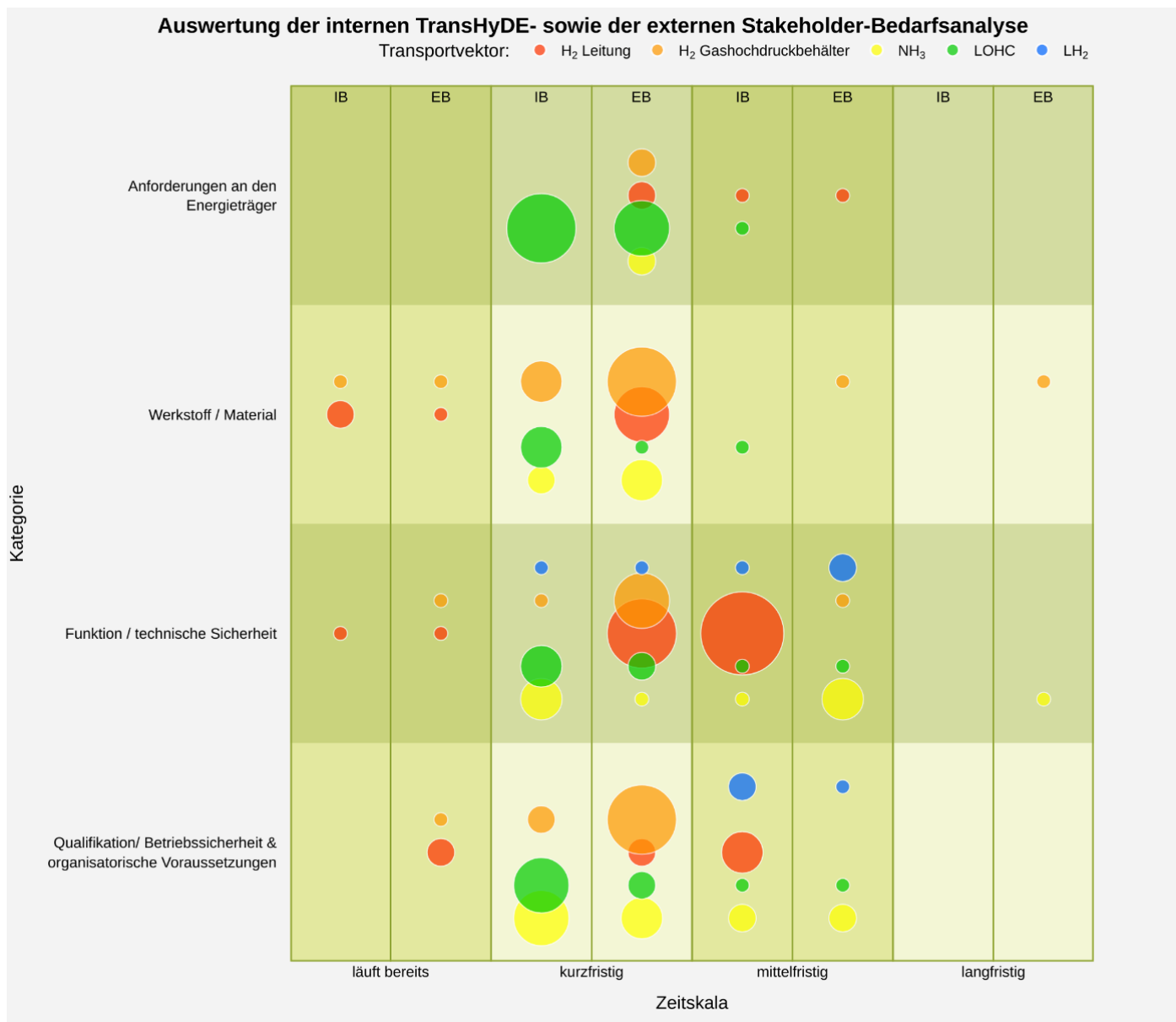


Abbildung 6.1. Auswertung der internen (IB) und externen Stakeholder-Bedarfsanalyse (EB).

6.1. Leitung

Insgesamt wurden 32 Bedarfe formuliert, wobei einige die gleiche Thematik betreffen. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass sowohl in der internen als auch der externen Bedarfsanalyse die gleichen Aspekte thematisiert wurden, aber auch dadurch, dass die Bedarfe teilweise aufgedgliedert wurden.

Einige Bedarfe, insbesondere aus der externen Bedarfsanalyse, sind nicht eindeutig formuliert, weswegen die Bewertung hierfür lediglich bedingt vorgenommen werden konnte. Daher wurden 13 formulierte Bedarfe aus der ursprünglichen Kategorisierung herausgenommen und werden nachfolgend als **allgemeingültige Aussagen** betrachtet. Die drei Hauptursachen, warum diese keine konkreten Regelwerksbedarfe darstellen, sind: Allgemeinheit und Unklarheit, Informationsbedarf und Schulungs- und Qualifikationsanforderungen.

1. Allgemeinheit und Unklarheit: Einige Bedarfe, wie bspw. die Bedarfe zur Planungssicherheit, zu den Herstellungsverfahren und zur technischen Sicherheit aller Assets, sind zu allgemein formuliert oder nicht spezifisch genug, um in ein technisches Regelwerk integriert zu werden.
2. Informationsbedarf: Einige Bedarfe sind als Informationsanforderungen formuliert und daher nicht als konkrete

Regelwerksbedarfe zu betrachten. Dies betrifft bspw. die H₂-Readiness vorhandener Gasinstallationen und die Information zu Dichtungsmaterialien.

3. Schulungs- und Qualifikationsanforderungen: Einige Bedarfe beziehen sich auf Schulungsinhalte und Qualifikationsanforderungen, sind jedoch nicht konkret genug, um spezifischen Regelwerken zugeordnet zu werden. Dazu gehören die Bedarfe nach Schulungsinhalten und Schulungsangeboten für Betriebspersonal. Bspw. werden Schulungsinhalte für Sachverständige im Bereich des leitungsgebundenen Wasserstoffs im DVGW-Arbeitsblatt G 100 geregelt, welches bereits H₂-ready ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die genannten Bedarfe aufgrund ihrer Allgemeinheit, Unklarheit oder ihres Informationscharakters nicht als konkrete Regelwerksbedarfe betrachtet werden können. Eine weitere Präzisierung und Konkretisierung der Bedarfe wären notwendig, um sie in spezifische technische Regelwerke zu integrieren.

In der Kategorie **Anforderungen an den Energieträger** werden drei Bedarfe an die Gasbeschaffenheit von Wasserstoff formuliert. Ein zentraler Bedarf betrifft die Ergänzung des DVGW-Arbeitsblattes G 260, welches auf nationaler Ebene die Gasbeschaffenheit definiert und bereits H₂-ready ist. Dieses Arbeits-

blatt wird regelmäßig überarbeitet und an den aktuellen Stand der Technik angepasst. Ergänzend dazu gibt es je einen Bedarf nach spezifischen Reinheitsanforderungen für Wasserstoff in Abhängigkeit von den Druckstufen und für Reste aus Cracking. Im DVGW-Arbeitsblatt G 260 werden keine spezifischen Vorgaben hierfür gemacht. Auf europäischer Ebene wird die Gasbeschaffenheit in EN 437 geregelt, welche nicht H₂-ready ist.

Dass bei verschiedenen Druckstufen unterschiedliche H₂-Reinheiten benötigt werden, stimmt bedingt. Die Anforderungen an die Reinheit werden primär über die verschiedenen Anwendungen gestellt. Bei einer stofflichen Verwendung wird eine hohe, bei einer energetischen Verwendung eine eher niedrige Reinheit benötigt [43]. Jedoch benötigen bspw. Brennstoffzellen bei hohen Drücken eine hohe Reinheit. Die ISO 14687, SAE J2719 oder DIN EN 17124 beschreiben die Anforderungen an die Beschaffenheit von Wasserstoff als Kraftstoff, insbesondere im Bereich der Brennstoffzellen, aber auch bei anderen Anwendungen.

Die Qualität des erzeugten Wasserstoffs variiert je nach Technologie: Während per Elektrolyse erzeugter Wasserstoff nach Sauerstoffabscheidung und Trocknung eine hohe Qualität hat, gibt es beim Ammoniak-Cracking höhere Unsicherheiten. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass durch Reinigung eine Reinheit nach Grade A aus dem DVGW-Arbeitsblatt G 260 erreicht werden kann. Dies stellt die Mindestqualität bei der Einspeisung in ein (größeres) Netz dar [43].

Die Kategorie **Werkstoff/Material** umfasst fünf formulierte Bedarfe. Diese richten sich je einmal an Dichtstoffe und Kupferwerkstoffe und drei Bedarfe an Stahl. Für Dichtstoffe und Kupfer ist es richtig, dass bestehende Regelwerke die Thematik noch nicht betrachten. Für Kupfer zeigt u. a. die Werkstofftabelle des DVGW-Forschungsprojekts G 202021 „F&E für H₂“ die Beständigkeit gegenüber Wasserstoff [44]. Diese Erkenntnis scheint noch nicht in Regelwerken aufgenommen zu sein. Für Dichtstoffe ist eine Neuentwicklung nicht sinnvoll, da es bereits einige Normen, wie z. B. die DIN EN 751 oder DIN 3535, gibt. Diese Regelwerke umfassen die Thematik Wasserstoff nicht. Derzeit laufende Forschungsprojekte, wie G 202208 „HydEKuS“, untersuchen die Aspekte.

Für Stahl ist ein Bedarf als Information formuliert, welche besagt, dass nach dem Forschungsprojekt G 202006 „SyWeSt H₂“ Stähle wasserstofftauglich sind. Diese Information ist auf einen repräsentativen Querschnitt typischer deutscher und teilweise europäischer Pipeline- und Rohrleitungsstähle zu beschränken. Für z. B. Armaturengehäuse sind die Ergebnisse nicht direkt zu übertragen [45]. Die Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt sind in Regelwerke (z. B. die DVGW-Merkblätter G 409 und G 464) für die Umstellung von Gashochdruckleitungen mit eingeflossen, womit die formulierten Bedarfe zur Neuentwicklung von Regelwerken für die Umstellung von Gashochdruckleitungen erledigt scheinen.

Insgesamt werden acht Bedarfe für die Kategorie **Funktion/technische Sicherheit** formuliert. Ein Bedarf besteht wie in der Kategorie Werkstoff/Material für die Umstellung von Gashochdruckleitungen. Konkret betrifft dies das DVGW-Arbeitsblatt G 463, welches bereits für Wasserstoffverwendung revidiert ist, aber noch nicht die Forschungsergebnisse aus dem Projekt G 202006 „SyWeSt H₂“ berücksichtigt.

Der Bedarf zur Funktion von Flachdichtungswerkstoffen kann bestätigt werden, da das entsprechende Regelwerk DIN 3535-6 bisher keine Wasserstoffanwendung berücksichtigt und dies derzeit im DVGW-Forschungsprojekt G 202208 „HydEKuS“ untersucht wird.

Sechs Bedarfe beziehen sich auf die Notwendigkeit, das

DVGW-Merkblatt G 501 zu ergänzen, welches zuletzt im Jahr 2012 revidiert wurde. Dieser technische Hinweis befasst sich mit der luftgestützten Gasferndetektion und ist ein zentraler Bestandteil der Inspektion von Gasverteilungssystemen. Voraussetzung für die Ergänzung des Merkblattes ist, dass andere Regelwerke angepasst werden, auf welche die G 501 verweist. Die Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes G 465-1 und des DVGW-Merkblattes G 465-4 ist hierfür notwendig. Andere Regelwerke, auf die verwiesen wird, sind bspw. bereits für Wasserstoff angepasst (DVGW-Arbeitsblatt G 466-1) oder bereits gänzlich zurückgezogen (DIN 2425-3).

In der Kategorie **Qualifikation/Betriebssicherheit** und organisatorische Voraussetzungen ist ein Bedarf genannt, welcher sich auch auf den Bedarf nach Ergänzung des DVGW-Merkblattes G 501 bezieht. Dieses Merkblatt verweist für die Geoinformationen auf das DVGW-Arbeitsblatt GW 120, welches die Thematik Wasserstoff nicht behandelt. Eine Überarbeitung der GW 120 scheint keine zwingende Voraussetzung für die Bearbeitung der G 501 zu sein.

6.2. Hochdruckbehälter

Insgesamt wurden 29 Bedarfe für Ergänzungen und Neuentwicklungen im Bereich Hochdruckbehälter identifiziert. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Bedarfe sich teilweise überschneiden. Das ist dadurch zu begründen, dass sowohl in der internen als auch der externen Bedarfsanalyse gleiche Themen und Aspekte thematisiert wurden.

Unter **allgemeingültige Aussagen** wurden die angesprochenen Themen gesammelt, die sich auf keine spezifische Norm o. Ä. beziehen. Beim Thema Gasdruckbehälter sind sowohl bei der internen als auch der externen Bedarfsanalyse überwiegend allgemeine Themenbereiche und weniger spezifische Normen genannt worden. Es beziehen sich acht der genannten Bedarfe auf konkrete Inhalte bestimmter Normen, während 21 allgemein gehalten werden.

Für die **Anforderungen an den Energieträger** wurden Ergänzungen im Bereich Qualitätssicherung und Spülen (der Behälter) sowie Reinheit und Druck des Wasserstoffs gefordert. Es wurde dabei nicht auf spezifische Normen zu den Themengebieten eingegangen. Für die genannten Themenbereiche soll keine Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Normen und Regelwerke bestehen, vielmehr sollten bestehende Vorschriften an diese Themen angepasst und um aktuelle Erkenntnisse im Bereich Wasserstoff ergänzt werden.

Die **Werkstoffe/Materialien** von Gasdruckbehältern betreffend wurden folgende Anliegen geäußert. Langzeitversuche zur Untersuchung des Wasserstoffeinflusses auf die Werkstoffeigenschaften, Prüfungen sowohl vor als auch während des Betriebs (z. B. bezüglich des Materials (Stähle/Composite), Spannungsrisskorrosion) und Beachtung der Drucklastwechsel gehören zu den genannten Punkten. Des Weiteren wurde explizit die Harmonisierung und Zusammenführung einzelner Normen gefordert (harmonisierte Norm zur Werkstoffprüfung, Zusammenführung einzelner ISO-, ASTM- und ASME-Normen) und eine stetige Aktualisierung nicht nur zyklisch, sondern ebenso nach Bedarf (z. B. neue Kenntnisstände, innovative Fertigungsverfahren). Innovative Fertigungsverfahren und Materialentwicklungen sollten in den technischen Regelwerken Berücksichtigung finden, um die Forschung an dieser Stelle zu unterstützen.

Spezifische Anmerkungen gab es zu den Normen DIN EN 13445-14, CEN/TC 235 SFG und der Druckgeräterichtlinie. Die DIN EN 13445-14 beschäftigt sich mit dem

Thema „Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 14: Zusätzliche Anforderungen an additiv gefertigte Druckgeräte und deren Bauteile“. Hier werden Ergänzungen um den Themenbereich Wasserstoff und seine Materialanforderungen erbeten; Arbeiten dazu sind bereits angestoßen worden. Diese Anforderungen werden ebenfalls an die CEN/TC 235 SFG gestellt. Hierbei handelt es sich um ein Technisches Komitee des Europäischen Komitees für Normung, das für „Gasdruckregler und zugehörige Sicherheitseinrichtungen für den Einsatz in der Gasübertragung und -verteilung“ zuständig ist. Der Bereich Sektor Forum Gas (SFG) beschäftigt sich mit den darunterfallenden Gasfragen. Ergänzungen im Materialbereich wurden bereits angestoßen. Die Druckgeräterichtlinie regelt die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem europäischen Markt und stellt sicher, dass diese ein hohes Sicherheitsniveau erfüllen. Auch diese Richtlinie sollte fortlaufend angepasst werden, um stets den Anforderungen der Energieträger zu entsprechen.

Bezüglich der Anforderungen an die **Funktion/technische Sicherheit** wurde generell die Vereinheitlichung von Normen (hier: UN & ADR MEGC, Behälterprüfung) angeregt. Des Weiteren sollen in naher Zukunft auch in diesem Bereich mögliche Prüfungen entwickelt werden. Hier geht es speziell um die Prüfung von Schweißnähten und Materialien sowie zerstörungsfreie Prüfungen und Schallemissionsprüfungen. Die ISO-Normen können angestoßen werden, um neue Prüfungen auf den Weg zu bringen.

Die TRBS geben detaillierte Vorgaben zur Umsetzung der allgemeinen Anforderungen der BetrSichV. Sie sollen Unternehmen helfen, Sicherheitsmaßnahmen für den Betrieb von Maschinen, Anlagen und Druckgeräten festzulegen, um Gefährdungen für Beschäftigte und die Umwelt zu minimieren. Hier wird der Bedarf gesehen, dass die technischen Regeln für die Betriebssicherheit um das Thema Wasserstoff fortlaufend erweitert werden.

Die Druckgeräterichtlinie soll einheitliche Standards für Druckgeräte in der EU schaffen, den freien Warenverkehr innerhalb der EU sicherstellen, Mensch und Umwelt vor Gefahren durch Druckgeräte schützen sowie Hersteller dazu verpflichten, eine CE-Kennzeichnung für ihre Produkte zu erlangen.

Die FKM-Richtlinie ist eine technische Richtlinie für die Berechnung von Bauteilen aus Stahl, Gusseisen und Aluminiumlegierungen hinsichtlich ihrer Festigkeit und Betriebsfestigkeit. Die Richtlinie bietet ein standardisiertes Verfahren zur statischen Festigkeits- und Ermüdungsfestigkeitsbewertung sowie Nachrechnung kritischer Bauteile. Diese soll um das Thema Wasserstoff ergänzt werden, damit der rechnerische Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen und die Auslegung von Bauteilen (Ventile, Druckminderer etc.) dahingehend angepasst werden können.

Für die **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorischen Voraussetzungen** werden keine konkreten Normen oder Regelwerke benannt. Im Allgemeinen wird sich allerdings dafür ausgesprochen, dass die Bereiche Brand- und Ex-Schutz, Dichtigkeit sowie Prüfbedingungen und äquivalente Prüfmedien um Ergänzungen für den neuen Energieträger erweitert werden bzw. bei Bedarf neue Normen implementiert werden. Vor allem bei organisatorischen/administrativen Angelegenheiten, wie Dokumentation und klaren Anlaufstellen (z. B. zur Zulassung), wird der Bedarf von Neuentwicklungen gesehen.

6.3. Flüssigwasserstoff

Als **allgemeingültige Aussage** gilt, dass der Transport und die Handhabung von Flüssigwasserstoff sich noch am Anfang ihrer breiten Anwendung befinden, was zu einer Vielzahl offener Fragen führt, insbesondere im Hinblick auf technische Regelwerke [26]. Aufgrund der begrenzten praktischen Erfahrung im Umgang mit Flüssigwasserstoff gibt es derzeit zahlreiche Unsicherheiten, die eine präzise Regelsetzung erschweren. In der Befragung wurde häufig betont, dass viele Lücken in technischen Regelwerken noch nicht eindeutig identifiziert werden können, da der Markt für Flüssigwasserstofftransporte noch unreif ist und die Industrie oft zögerlich in Bezug auf die Veröffentlichung von technischen Regelwerken ist – oftmals aufgrund des Schutzes geistigen Eigentums. Trotz dieser Unklarheiten wurde dennoch festgestellt, dass in mehreren Bereichen, die den Transport und die Handhabung von Flüssigwasserstoff betreffen, klare technische Regelwerke erforderlich sind.

Im Bereich **Anforderungen an den Energieträger** fehlen technische Regelwerke zu Messverfahren sowohl für das Ortho-/Para-Gleichgewicht von Wasserstoff als auch für die technische Auslegung von Ortho-/Para-Shift-Reaktoren. Letztere benötigen klare Vorgaben hinsichtlich der eingesetzten Katalysatoren sowie konstruktiver und prozesstechnischer Parameter. Diese Lücken in der technischen Regelsetzung stellen ein bedeutendes Hindernis dar, wenn es darum geht, den Wasserstoff im flüssigen Zustand sicher und effizient zu transportieren und zu verwenden.

Bezüglich der Kategorie **Werkstoff/Material** geht aus der Befragung hervor, dass aktuell keine spezifischen technischen Regelwerke für die Werkstoffauswahl und -prüfung für Flüssigwasserstoffanwendungen festgelegt sind, was die Entwicklung und den Transport von Flüssigwasserstoff weiter erschwert. Da Flüssigwasserstoff aufgrund der niedrigen Verflüssigungstemperatur (–253 °C) Materialien verspröden lässt, stellen sich besonders hohe Anforderungen an die Auswahl und Prüfung von Werkstoffen. Dieser Umstand erfordert eine präzise technische Regelsetzung, um die Sicherheit und Effizienz in der Handhabung von Flüssigwasserstoff zu gewährleisten. Es besteht daher ein großer Bedarf an klaren und international anerkannten technischen Regelwerken, die die Werkstoffanforderungen für Flüssigwasserstoffanwendungen festlegen.

Ein weiteres großes Thema stellt die **Funktion/technische Sicherheit** im Umgang mit Flüssigwasserstoff dar. Es gibt einen klaren Mangel an spezifischen technischen Regelwerken, die die Funktion und die Schnittstellen im Bereich des Flüssigwasserstofftransports regeln. Insbesondere ist der Markt noch zu wenig entwickelt, um klare und allgemein gültige Richtlinien zu bieten.

Ein besonders wichtiger Punkt ist der sichere Transfer von Flüssigwasserstoff, insbesondere beim Abblasen von verdampftem Wasserstoff an Fahrzeugen und stationären Anlagen. Hier gibt es momentan keine spezifischen technischen Regelwerke, die ein sicheres Abblasen und Abbrennen von kryogenem Wasserstoff regeln. Auch die Bewertung des Außendrucks von 0 bar für Innenbehälter von Kryostaten, insbesondere in Bezug auf die AD2000-Normen, bleibt oft unklar.

Im Bereich der **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorischen Voraussetzungen** besteht ebenfalls ein großer Bedarf an technischen Regelwerken. Insbesondere fehlt es an technischen Regelwerken zur Qualifizierung von Detektionsverfahren, die in der Feldüberwachung eingesetzt werden, etwa bei LIDAR- oder BOS-Systemen. Ein weiterer Aspekt ist der Zugang zu technischen Regelwerken, der derzeit nicht immer öffentlich

und kostenfrei ist.

Die befragten Experten forderten, dass der Zugang zu diesen technischen Regelwerken erleichtert wird, um eine breitere Marktakzeptanz und die Entwicklung des Sektors zu fördern. Der Wunsch nach einem Überblick über technische Regelwerke für Flüssigwasserstoff wurde ebenfalls genannt, um die bestehenden Lücken klarer zu identifizieren und zu schließen.

6.4. Liquid Organic Hydrogen Carriers

Insgesamt wurden 13 unterschiedliche Bedarfe für Ergänzungen und Neuentwicklungen im Bereich LOHC identifiziert. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich die genannten Bedarfe teilweise stark thematisch überschneiden. Dies ist dadurch zu begründen, dass sowohl in der internen als auch der externen Bedarfsanalyse gleiche Themen und Aspekte thematisiert wurden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die LOHC-Technik noch keine Marktetablierung aufweist und somit auch noch keine ausgereiften technischen Regelwerke für Prozesse, Qualitätssicherung, Sicherheit und vieles mehr existieren. Daher sind die meisten formulierten Bedarfe, sowohl bei der internen als auch der externen Bedarfsanalyse, überwiegend unspezifisch und unter **allgemeingültige Aussagen** einzuordnen. Hierunter sind bspw. die Forderungen nach internationaler Harmonisierung wie auch einer verbesserten Zugänglichkeit zu nennen.

Aber auch technische Inhalte wie die Skalierbarkeit von LOHC-Prozessen sowie die Definition von LOHC-Fachvokabular sind in allen Kategorien wiederzufinden und damit allgemeingültig.

Es beziehen sich drei der genannten Bedarfe auf konkrete Inhalte und davon zwei Bedarfe auf die DIN SPEC 91437, welche auf Basis von Toluol die Bewertung, Prüfung und Sicherstellung der LOHC-Qualität behandelt.

Bezüglich der **Anforderungen an den Energieträger** wurde die Definition von Trägermedien für Wasserstoff, darunter Benzyltoluol als Wasserstoffspeicher, in Abgrenzung zu anderen Energieträgern wie auch deren Herkunftszertifizierung gefordert. Insbesondere in Bezug auf Benzyltoluol ist eine Ergänzung der DIN SPEC 91437 als Bedarf formuliert worden. Eine Validierung dieser Aussage ergab, dass Benzyltoluol neben Toluol und Dibenzyltoluol explizit in technischen Regelwerken als LOHC beschrieben wird. Aber auch die Forderung nach einer Definition von Trägermedien im Allgemeinen sieht eine klare Verbindung zur DIN SPEC 91437 vor. Der Bedarf geht jedoch weiter und fordert eine spezifische Auseinandersetzung mit dem Begriff LOHC. Daneben ist die Definition des LOHC-Prozesses als geforderte Neuentwicklung zu nennen.

Die **Werkstoffe/Materialien** von LOHC sind aktuell nicht weiter spezifiziert und während der Bedarfsanalyse ist kein konkreter Bezug zu technischen Regelwerken vorgenommen worden. Die Anforderung, abhängig vom jeweiligen LOHC passende Werkstoffe zu wählen, liegt vor und sollte als Ergänzung in etwaigen Neuentwicklungen von technischen Regelwerken zum LOHC-Prozess oder verschiedenen LOHC-Definitionen mit aufgeführt werden.

Im Bereich **Funktion/technische Sicherheit** sind zwei spezifische Bedarfe formuliert worden. Die sicherheitstechnische Betrachtung, ob der Thermalöl-Transport (als beladenes LOHC) weitere Anforderungen mit sich bringt (auch regulatorisch) als für die Beförderung von entzündbaren Flüssigkeiten in Tankfahrzeugen üblich ist, wird als kurzfristige Neuentwicklung gefordert. Weiterhin wird die technische Regelsetzung für die Nutzung von LOHC in der bestehenden Flüssigkraftstoffinfrastruktur im

Allgemeinen als mittelfristige Neuentwicklung für notwendig erachtet. Diese zwei Bedarfe sind grundlegend, können thematisch jedoch in einem technischen Regelwerk zusammengeführt werden. Internationale regulatorische Ansätze zum Umgang mit beladenem und unbeladenem LOHC existieren bereits (vgl. Abschnitt 5.2) [41].

Für die Kategorie **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen** werden keine spezifischen technischen Regelwerke benannt. Allerdings wird der sichere und kontaminationsfreie Umgang mit LOHC (beladen und unbeladen) spezifisch für jedes verwendbare Thermalöl als kurzfristig entscheidende Regelwerksneuentwicklung angesehen. Der Inhalt ist auch in Ergänzung zu anderen Neuentwicklungen im Bereich LOHC zu betrachten. In diesem Zusammenhang sind Qualitätsaspekte und mögliche Kontaminationsrisiken mittelfristig zu definieren. Zu berücksichtigen ist, dass die Besonderheiten für jedes verwendbare Thermalöl im jeweiligen Sicherheitsdatenblatt gefunden werden können, in dem auch die Anforderungen für den sicheren Umgang beschrieben sind.

6.5. Ammoniak

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wird Ammoniak industriell durch das Haber-Bosch-Verfahren synthetisiert. Dieses Verfahren wurde rasch zur großtechnischen Reife weiterentwickelt und ist heute weltweit etabliert. Im Jahr 2023 lag die globale Produktionsmenge bei über 220 Millionen Tonnen. Rund 80 % dieser Menge findet Anwendung in der Düngemittelindustrie. [46, 47]

Im Zuge der jahrzehntelangen industriellen Nutzung hat sich eine global verfügbare Infrastruktur für den Transport und die Lagerung von Ammoniak etabliert. Diese ist weitgehend standardisiert, wenn auch in Abhängigkeit nationaler Regelungen unterschiedlich ausgestaltet. Für Transport und Speicherung kommen typischerweise folgende Optionen zum Einsatz [48]:

- See- und Binnenschiffe,
- Eisenbahnkesselwagen,
- Lastkraftwagen (Lkw),
- Rohrfernleitungen,
- Druck- sowie Kryotanks.

Eine Analyse technischer Regelwerke (vgl. Datenbank aus Kapitel 5, Tabellenblatt Ammoniak) zeigt, dass im Zusammenhang mit Ammoniak insbesondere technische Regelwerke aus dem Bereich der Kältetechnik zur Verfügung stehen. Auch die in Verbindung mit Ammoniak stehende Spannungsrisikokorrosion wird explizit in technischen Regelwerken thematisiert. Ansonsten gelten zusätzlich generische technische Regelwerke, die sich mit chemischen Erzeugnissen und damit lediglich implizit mit dem Molekül Ammoniak befassen. Speziell für energetische Anwendungen, etwa die Nutzung von Ammoniak als Brennstoff oder Wasserstoffträger, bestehen bislang kaum spezifische technische Regelwerke.

Im Rahmen der internen und externen Bedarfsanalyse wurden insgesamt 29 konkrete Bedarfe identifiziert. Die überwiegende Mehrheit von 22 Bedarfen entfiel auf die Kategorien

- „Funktion und technische Sicherheit“ (neun Bedarfe) und
- „Qualifikation, Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen“ (13 Bedarfe).

Zwei weitere Bedarfe ließen sich der Kategorie „Anforderungen an den Energieträger“ zuordnen, während fünf der Kategorie „Werkstoff und Material“ zugeordnet wurden.

Hinsichtlich der **Anforderungen an den Energieträger** fokussierten sich die Befragungen auf zwei zentrale Themen:

- Definition von Ammoniak als Kraftstoff und
- Definition von grünem Ammoniak.

Die Stakeholder waren sich einig, dass für die Entwicklung technischer Lösungen zur Energiewende auf Basis des Wasserstoffderivats Ammoniak zunächst die Definition des Kraftstoffs zwingend erforderlich ist. Damit würde die Spezifikation des Kraftstoffs festgelegt und die ersten Randbedingungen für die Auslegung technischer Apparate gesetzt.

Sowohl in der internen als auch in der externen Bedarfsanalyse wurden in der Kategorie **Werkstoff/Material** die Themen ammoniakkompatible Konstruktionswerkstoffe und Dichtungsmaterialien intensiv diskutiert. Aufgrund aktueller Forschungsarbeiten auf dem Gebiet konnte bei der internen Bedarfsanalyse der Bedarf spezifischer benannt und insbesondere auf den Einsatz bei drucktragenden Bauteilen verwiesen werden.

Komponenten, die mit Ammoniak in Kontakt kommen, müssen speziellen Anforderungen genügen. Bei der Werkstoffauswahl ist insbesondere die Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion (engl.: Stress Corrosion Cracking, kurz: SCC zu berücksichtigen. Diese Form der Korrosion verläuft meist unbemerkt und zeigt sich oft erst im Versagensfall. Dabei entstehen zunächst mikroskopisch kleine, häufig unsichtbare Anrisse im Material, die sich mit der Zeit zu makroskopischen, erkennbaren Rissen ausweiten. [49]

Spannungsrisskorrosion ist gemäß AD 2000-Merkblatt HP 801 Nr. 14 [50] nicht zu erwarten, wenn u. a. zähe Werkstoffe mit einer Streckgrenze von ≤ 370 MPa zum Einsatz kommen und die Rohrleitungen sauerstoff- bzw. luftfrei betrieben werden. Darüber hinaus wirkt ein Restwassergehalt im Ammoniak von $\geq 0,2$ Gew.-% als Inhibitor zur Vermeidung von Spannungsrisskorrosion. Zudem dürfen Kupfer, Zink und Kupfer- sowie Nickellegierungen nicht zum Einsatz kommen. Detaillierte Informationen über geeignete Werkstoffe für Bleche, Stutzen, Flansche sowie Gussbauteile für Ammoniaklagerbehälteranlagen können dem AD 2000-Merkblatt HP 801 Nr. 34 [51] entnommen werden. Die Angaben lassen sich auch auf andere Anwendungsbereiche, in denen Ammoniak zum Einsatz kommt, übertragen.

Im Rahmen der Bedarfsanalyse wurde auch der Einsatz von Schlauchleitungen für den sicheren Transport von flüssigem oder gasförmigem Ammoniak thematisiert. Dabei wurde insbesondere auf die derzeit gültige Norm DIN EN ISO 5771 verwiesen, die die Mindestanforderungen an ammoniakkompatible Gummischläuche bei Umgebungstemperaturen von -40 °C bis $+55$ °C sowie einem Betriebsdruck von 2,5 MPa (25 bar) definiert. Die Norm ist aktuell ausschließlich auf Nenndurchmesser zwischen DN 12,5 und DN 76 beschränkt, wie sie in einer normativen Tabelle festgelegt sind. Kleinere und größere Durchmesser sind derzeit nicht erfasst.

Mit Blick auf die zunehmende Bedeutung von Ammoniak als alternativer Energieträger der Wasserstoffwirtschaft, insbesondere im Kontext maritimer Anwendungen und der Versorgung von Hafeninfrastrukturen, gewinnt der leitungsgebundene Transport von Ammoniak an Relevanz. Rohrfernleitungen für wassergefährdende und toxische Stoffe wie Ammoniak (Risikosätze gemäß veraltetem Chemikalienrecht: R10, R23, R34, R50 bzw. Gefahrensätze nach aktuellem Chemikalienrecht: H221, H331, H314, H400) unterliegen der Rohrfernleitungsverordnung

(RohrFltV) sowie der Technischen Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL). Letztere konkretisiert den Stand der Technik, bezieht sich bislang jedoch hauptsächlich auf landgestützte Leitungsführungen. Im Rahmen des Stakeholderworkshops wurde angemerkt, dass die TRFL kaum spezifische Vorgaben für Unterwasserverlegungen von Rohrfernleitungen enthält. Dies lässt erhebliche Auslegungsspielräume für wasserverlegte Trassen z. B. bei Querungen von Flüssen und Seen sowie in Küstengewässern und Hafenzonen mit möglichen Auswirkungen auf die Betriebssicherheit und die behördliche Genehmigungsfähigkeit zu.

Im Zuge zukünftiger Energieimporte, z. B. via Ammoniakterminals, besteht Bedarf nach klaren rechtlichen und technischen Anforderungen, um ein einheitliches Sicherheitsniveau zu gewährleisten. In Bezug auf die Kategorie **Funktion/technische Sicherheit** wurde bei der externen Bedarfsanalyse näher auf den Transport und den Umschlag von Ammoniak und insbesondere auf Trocken- und Abreißkupplungen zur sicheren und schnellen Verbindung zwischen Rohrleitungssystemen eingegangen. Es wurde darauf hingewiesen, dass es aktuell kein einheitliches technisches Regelwerk gibt. Teilweise kommen diverse Adaptierungen zum Anschluss eines Kesselwagens an ein Rohrleitungssystem zur Anwendung. Aufgrund der erhöhten Anzahl an Schnittstellen geht diese Vorgehensweise mit unnötig erhöhten Sicherheitsrisiken einher.

Im Bereich des Schienentransports kommen aktuell nachfolgende Kupplungen zum Einsatz:

- Schraubkupplungen
- Flanschkupplungen
- Trockenkupplungen

Die European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA) empfiehlt die Reduktion von Kupplungsarten und favorisiert Schraubkupplungen. Trockenkupplungen können gemäß DIN EN 14432 auch als Schnellkupplungen für Ammoniak als Schnittstelle zwischen Land und Schiff eingesetzt werden. Es besteht der Wunsch nach einer Standardisierung ggf. in Anlehnung an DIN EN ISO 21593:2020 02.

Mit Blick auf das Ziel, die deutsche Energieversorgung bis zum Jahr 2045 vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, stellt sich die Frage nach der zukünftigen Nutzung bestehender Infrastrukturen, insbesondere der derzeit errichteten LNG-Terminals. Ohne technische Anpassung droht diesen Anlagen der Verlust ihrer wirtschaftlichen Relevanz.

Um dem vorzubeugen, sollten LNG-Terminals so ausgelegt werden, dass sie künftig auch alternative, klimafreundliche Energieträger wie Ammoniak oder Flüssigwasserstoff aufnehmen, lagern und umschlagen können. Hierzu ist die Entwicklung praxisnaher Leitfäden sinnvoll, die Planern und Genehmigungsbehörden eine strukturierte Umsetzung entsprechender technischer und organisatorischer Anforderungen ermöglichen. Außerdem besteht der Bedarf, im Rahmen eines Leitfadens zu prüfen, unter welchen Bedingungen bestehende Rohrfernleitungen technisch für den Transport von Ammoniak nachgerüstet werden können.

Im Rahmen der Bedarfsanalyse wurde darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Membrantanks für den Transport von Ammoniak auf Binnenwasserstraßen derzeit nicht zulässig ist. Diese Einschränkung ergibt sich aus den Vorgaben des Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen (ADN) in der Ausgabe 2023. Gemäß Kapitel 4.5.1.2 (S. 595) ADN ist für druckverflüssigtes Ammoniak ausschließlich die Verwendung von unabhängigen

Ladetanks erlaubt. Der Einsatz von Membrantanks wird in diesem Zusammenhang nicht zugelassen, da diese Konstruktion nicht den spezifischen Anforderungen an den Druckbehälterbau für diese Transportart entspricht.

Für kaltverflüssigtes Ammoniak sieht das ADN in Kapitel 4.5.1.4 (S. 661) hingegen vor, dass sowohl unabhängige Lade-tanks als auch Membrantanks verwendet werden dürfen – unter der Voraussetzung, dass sie den technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen entsprechen.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von Antriebssystemen auf Basis von Ammoniak wurde der Bedarf identifiziert, bestehende Regelwerke auf ihre Übertragbarkeit auf neue Einsatzbereiche zu prüfen. Insbesondere betrifft dies die Normenreihe DIN EN 378-1 bis -4, die sicherheitstechnische Anforderungen für stationäre Kälteanlagen, Wärmepumpen und deren Baugruppen beschreibt. Da Ammoniak in diesen Systemen als natürliches Kältemittel der Gruppe B2L eingesetzt wird, enthält das Regelwerk zahlreiche Anforderungen, die auch für andere Anwendungen mit Ammoniak als Energieträger relevant sein könnten.

Dazu zählen insbesondere:

- Sicherheitsabstände und Leckagekontrolle
- Anforderungen an Rohrleitungswerkstoffe und Dichtsysteme
- Anforderungen an die betriebliche Überwachung
- Personenschutzmaßnahmen bei Ammoniakaustritt

Auch weitere Regelwerke der Kältetechnik, wie die ISO 5149, enthalten potenziell übertragbare Vorgaben für den sicheren Umgang mit Ammoniak.

Hinsichtlich der Kategorie Qualifikation/Betriebssicherheit & organisatorische Voraussetzungen wurden Spülkonzepte, sogenannte Purging-Verfahren, diskutiert. Im Rahmen von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an Ammoniakanlagen im Allgemeinen und an Ammoniakbunkernanlagen im Speziellen ist es sicherheitstechnisch erforderlich, ammoniakführende Rohrleitungssysteme vor Beginn der Arbeiten zuverlässig freizuspülen, um sicherheitskritische Restmengen zu entfernen. In der Praxis wird hierfür überwiegend Stickstoff als Inertgas verwendet. Für solche Spülungen bestehen aktuell keine einheitlichen Prozessvorgaben, die in einem technischen Regelwerk dokumentiert sind, jedoch existieren verschiedene und bereits erprobte Spülkonzepte [52]. Die Entwicklung eines verbindlichen technischen Regelwerks für Spülprozesse in ammoniakführenden Systemen wäre aus sicherheitstechnischer Sicht sinnvoll. Diese sollte u. a. Spülmedien, Ablauf, Überwachung, Restgasanalytik und Freigabekriterien standardisieren.

Im Fall von Leckagen kann gasförmiges Ammoniak z. B. durch den Einsatz von Wasservorhängen kontrolliert werden. Das Ammoniak wird dabei chemisch im Wasser gebunden und bildet eine Lösung aus Ammoniumhydroxid (Ammoniakwasser/Salmiakgeist). Diese Lösung muss aus umwelt- und sicherheitstechnischen Gründen aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden, da es sich gemäß der AwSV um ein wassergefährdendes Stoffgemisch (Wassergefährdungsklasse 2 (WGK2)) handelt.

Obwohl für Betriebe an Land Anforderungen zum Umgang mit Ammoniakwasser bestehen, wurde im Rahmen der Stakeholderbefragung angemerkt, dass insbesondere für die Seeschifffahrt keine klaren Vorgaben zum Auffangen und zur Entsorgung ammoniakhaltiger Wasseranteile existieren. Dies betrifft u. a. Bunkerstationen und Ladeeinrichtungen für Ammoniak an Bord.

Aktuell existieren keine expliziten internationalen technischen Regelwerke für das Bunkern von Ammoniak als Energieträger, weder hinsichtlich technischer Sicherheit noch in Bezug auf Schnittstellen oder Prozessführung. Im Rahmen der Stakeholderbefragung wurde daher der Wunsch geäußert, Designempfehlungen für Bunkerstationen in einem praxisnahen Leitfaden zusammenzufassen, der später als Basis für eine Standardisierung dienen kann.

Der Leitfaden sollte u. a. folgende Aspekte berücksichtigen:

- Schnittstellenkompatibilität (Tanker-Land, Schiff-Schiff, Schiff-Hafen)
- Sicherheitsabstände und Gaswarnsysteme
- Standards für Kupplungen und Absperrentechnik
- Schulung und Qualifikation des Personals
- Emissionsbegrenzung und Notfallmaßnahmen

In den vergangenen Jahren wurden dazu bereits mehrere Vorarbeiten (z. B. durch DNV, European Maritime Safety Agency (EMSA), International Association of Classification Societies (IACS)) initiiert, jedoch ist die Konsolidierung in einem internationalen Standardisierungsprozess noch offen. [53–59]

Aufbauend auf den Bedarfen auf Regelwerksebene wurde der Anpassungsbedarf aus rechtlicher Sicht in Bezug auf den Transport von Ammoniak ermittelt. Zur besseren Übersicht wurden die ermittelten Bedarfe und die entsprechenden Handlungsempfehlungen in Abschnitt 7.8 zusammengefasst.

7

Handlungsempfehlungen

Die erfolgreiche Umsetzung des Wasserstoffhochlaufs erfordert den zügigen und gleichzeitig sicheren Aufbau leistungsfähiger Infrastrukturen für die Erzeugung, den Transport und die Nutzung von Wasserstoff. Insbesondere der Transport von Wasserstoff, sowohl in reiner Form als auch über Derivate und Trägermedien, spielt dabei eine zentrale Rolle. In Anbetracht der ambitionierten Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS), darunter der Aufbau eines Wasserstoff-Kernnetzes bis 2032 und die Integration internationaler Importe, müssen alle relevanten Transportoptionen kurzfristig, spätestens mittelfristig, durch geeignete technische Regelwerke adressiert werden. [60]

Dieses Kapitel zeigt die aus den Bedarfsanalysen abgeleiteten Handlungsempfehlungen zum Erzielen einer umfassenden technischen Regelsetzung für alle betrachteten Transportvektoren. Es werden sowohl organisatorische als auch fachliche Handlungsempfehlungen formuliert. Transportvektorübergreifend werden organisatorische Aspekte betrachtet, wie bspw. der Aufbau von Gremienstrukturen. Daneben sind spezifische fachliche Anpassungen von technischen Regelwerken und Gesetzen, aber auch allgemeinere Aspekte wie die Etablierung der betrachteten Themen in Schulungsmaterialien aufgelistet. Abbildung 7.1 zeigt eine Übersicht der formulierten Roadmap inklusive einer zeitlichen Priorisierung bis 2045.

7.1. Organisatorische Handlungsempfehlungen

Besonders etablierte Technologien wie der leitungsgebundene Transport von Wasserstoff sowie der Transport in Gashochdruckbehältern profitieren von vorhandenen Gremienstrukturen, pränormativer Forschung und jahrzehntelanger Betriebserfahrung

aus dem Erdgasbereich, sodass für diese Technologien schneller Fortschritte in der technischen Regelsetzung erzielt werden. Im Bereich des leitungsgebundenen Transports wird dies besonders deutlich, denn durch den Aufbau des Wasserstoff-Kernnetzes sind die technischen Regelwerke bereits durch einen politischen Rahmen abgesichert.

Demgegenüber stehen neue Transportvektoren wie Flüssigwasserstoff, Ammoniak sowie LOHC, für die bislang weder ausreichende Forschungsgrundlagen noch etablierte Gremienstrukturen existieren oder eine umfassende technische Regelsetzung vorhanden ist. Die fehlende Standardisierung dieser Transportvektoren stellt ein wesentliches Hemmnis für ihren breiten industriellen Einsatz und die Markteinführung dar. Um die Dekarbonisierung industrieller und maritimer Anwendungen nicht zu verzögern, ist hier ein kurzfristiger Handlungsbedarf gegeben. Notwendig sind insbesondere

- die Einrichtung neuer Gremienstrukturen, die regelmäßige und strukturierte Diskussionen zu sicherheitstechnischen, betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen ermöglichen,
- der Aufbau anwendungsorientierter Forschungsnetzwerke und -plattformen, welche die wissenschaftlichen Grundlagen schaffen sowie
- die gezielte finanzielle Unterstützung von Forschungsnetzwerken und -plattformen sowie der Industrie durch die Politik, um Innovationshemmnisse abzubauen und erste Projekte abzusichern.

Während sich für bewährte Transportvektoren Regelwerke oft entlang bestehender Strukturen weiterentwickeln lassen, sind bei neuen Transportvektoren Verzögerungen in der technischen



Handlungsempfehlungen

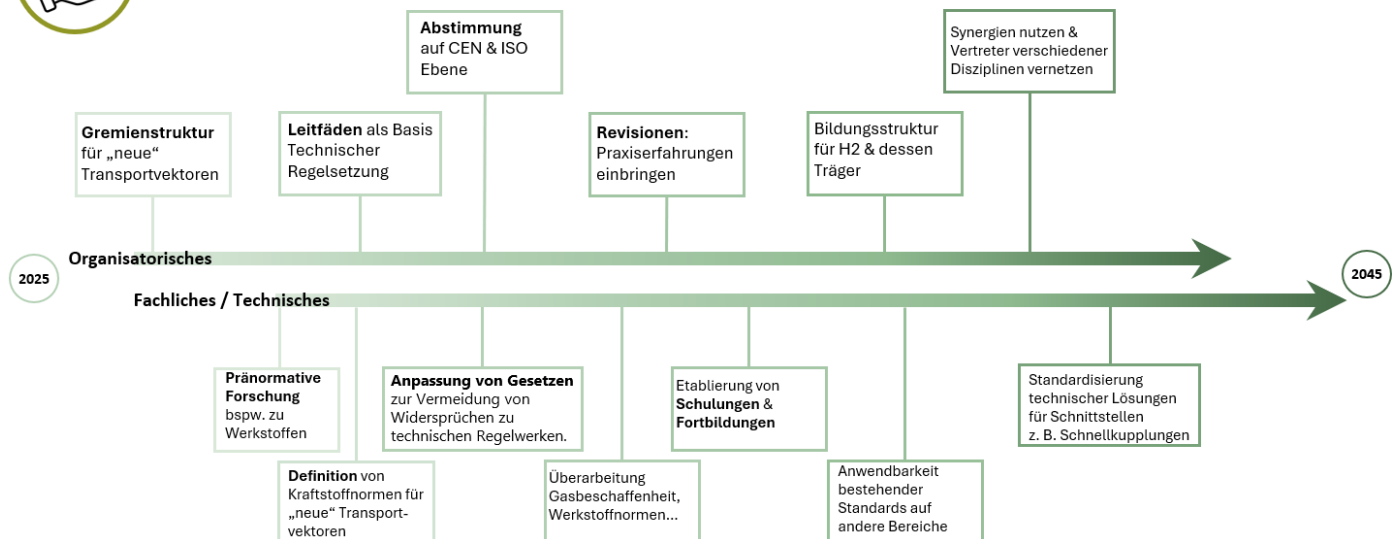


Abbildung 7.1. Organisatorische und fachliche/technische Handlungsempfehlungen.

Regelsetzung absehbar, sofern keine koordinierte politische und industrielle Initiative erfolgt. Um diesen Prozess zu beschleunigen, ist eine enge Abstimmung zwischen allen relevanten Regelsetzern sowie die Förderung interdisziplinärer Industrie- und Forschungs Kooperationen unerlässlich. Ziel ist es, konkrete Bedarfe an technischen Regelwerken und pränormativer Forschung frühzeitig zu identifizieren, systematisch zu priorisieren und gemeinsam in umsetzbare Formate zu überführen.

7.2. Fachliche Handlungsempfehlungen

Für den erfolgreichen Aufbau einer tragfähigen Wasserstoffinfrastruktur ist eine frühzeitige fachliche Fundierung der technischen Regelsetzung unerlässlich. Zentrale Elemente sind pränormative Forschungsaktivitäten, insbesondere im Bereich der Werkstoff- und Systemauslegung, sowie die Entwicklung einheitlicher Anforderungen an neue Transportvektoren wie Flüssigwasserstoff, Ammoniak und LOHC. Auch die Erarbeitung spezifischer Kraftstoffnormen ist notwendig, um den sicheren und effizienten Einsatz dieser Medien entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu ermöglichen. Bestehende gesetzliche Vorgaben sind im Hinblick auf ihre technische Anschlussfähigkeit zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen, um Widersprüche und Zielkonflikte zu vermeiden.

Im weiteren Verlauf ist die inhaltliche Weiterentwicklung bestehender technischer Regelwerke, bspw. zur Gasbeschaffenheit oder Materialbeständigkeit, essenziell, um neue wissenschaftliche und betriebliche Erkenntnisse zu berücksichtigen. Ergänzend sollten bestehende technische Regelwerke hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf neue Anwendungen systematisch geprüft werden. Schulungs- und Qualifizierungsmaßnahmen für Fachpersonal bilden die Grundlage für einen sicheren Betrieb und eine breite Umsetzung technischer Anforderungen. Darüber hinaus ist eine frühzeitige Standardisierung technischer Schnittstellen erforderlich, um die Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Systemkomponenten zu gewährleisten.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten aus der Bedarfsanalyse abgeleitete Handlungsempfehlungen zur Regelsetzung und Forschungsunterstützung für alle betrachteten Wasserstofftransportvektoren.

7.3. Leitung

Obwohl die unter die Kategorie **allgemeingültige Aussagen** fallenden Bedarfe keinen konkreten technischen Regelwerken zugeordnet werden können, verdeutlichen sie dennoch einen grundsätzlichen Bedarf in verschiedenen Bereichen. Um den jeweiligen Bedarf zu decken, ist es wichtig, gezielte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu fördern. Die Bedarfe lassen sich in folgende thematische Kategorien einteilen:

1. Planung und Sicherheit: Bedarfe, wie die zur Planungssicherheit und zur technischen Sicherheit aller Assets, zeigen, dass es notwendig ist, klare und spezifische Anforderungen zu entwickeln, die eine verlässliche Planung und den sicheren Betrieb von Wasserstofftechnologien ermöglichen. Hier besteht ein erheblicher Bedarf an Forschung, um präzise Richtlinien und Standards zu erarbeiten, die diese Aspekte abdecken.
2. Herstellungsverfahren und Materialien: Die Bedarfe zu den Herstellungsverfahren und Dichtungsmaterialien verdeutlichen, dass es an detaillierten Informationen und spezifischen Vorgaben für die Herstellung und den Einsatz von Materialien im Wasserstoffsektor mangelt. Eine Grundlage für entsprechende Standards ist durch die Identifizierung geeigneter Verfahren und Materialien in Forschungsprojekten zu schaffen.
3. Schulung und Qualifikation: Bedarfe nach Schulungsinhalten und -angeboten für Betriebspersonal unterstreichen die Notwendigkeit, qualifiziertes Personal für den Umgang mit Wasserstofftechnologien auszubilden. Es ist wichtig, Schulungsprogramme und Qualifikationsanforderungen zu entwickeln, die den aktuellen und zukünftigen Anforderungen gerecht werden. Bestehende Regelwerke wie das DVGW-Arbeitsblatt G 100 bieten bereits eine Grundlage, die weiter ausgebaut werden kann.
4. Informationsbereitstellung: Bedarfe wie die H₂-Readiness vorhandener Gasinstallationen und die Information zu Dichtungsmaterialien zeigen, dass es eine Nachfrage nach umfassenden und zugänglichen Informationen gibt. In zukünftigen Forschungsinitiativen sind diese Informatio-

nen zu sammeln, zu strukturieren und in geeigneter Form bereitzustellen.

Die Analyse in der Kategorie **Anforderungen an den Energieträger** zeigt den Bedarf an einer weiteren Konkretisierung der Thematik Gasbeschaffenheit von Wasserstoff in den technischen Regelwerken. Hierfür bedarf es weiterer Untersuchung und Forschung. Es ist zu überprüfen, inwieweit es sinnvoll ist, dass die Wasserstoffreinheit konkret in Bezug auf die Druckstufen und Art der Erzeugung innerhalb der Regelwerke zur Gasbeschaffenheit betrachtet wird, oder ob es ausreichend ist, dies in Regelwerken zum Betrieb von Anlagen und Anwendungen darzustellen. Weiterhin ist eine einheitliche Fortschreibung europäischer und internationaler Regelwerke in Bezug auf diese Thematik zu fördern, um nationale Regelwerke zu ergänzen.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sind gezielte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu fördern. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag zur Weiterentwicklung und Standardisierung von Wasserstofftechnologien geleistet werden.

Die Bedarfsanalyse im Bereich **Werkstoff/Material** hat gezeigt, dass es notwendig ist, die Forschung im Bereich der Werkstoffbeständigkeit und -eignung weiter zu fördern. Dies betrifft bspw. die Untersuchung der Dichtstoffe oder die Ausweitung der Forschung zur Stahlverträglichkeit auf weitere Anwendungsbereiche wie Armaturen. Durch gezielte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten können die spezifischen Anforderungen für den Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Materialien und Anwendungen präzisiert werden.

Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass die Ergebnisse dieser Forschungsprojekte, wie bspw. zu Kupfer, zeitnah in die Standardisierung einfließen und diese vorantreiben. Dafür ist bspw. eine enge Verzahnung von Forschung, Wirtschaft, Verbänden und den regelsetzenden Institutionen zu gewährleisten. Die regelmäßige Überarbeitung und Anpassung bestehender Normen und Regelwerke ist entscheidend, um den sicheren und effizienten Einsatz von Wasserstofftechnologien zu gewährleisten.

Die Bedarfsanalyse im Bereich **Funktion/technische Sicherheit** hat gezeigt, dass diese für die Gewährleistung der sicheren und effizienten Nutzung von Wasserstofftechnologien unerlässlich ist. Ein zentraler Aspekt ist die Weiterentwicklung und Anpassung der technischen Regelwerke, die die Inspektion, Überprüfung und Instandhaltung von Gasverteilungssystemen betreffen. Dies umfasst bspw. die Integration moderner Detektionstechnologien und die Anpassung der Inspektionsmethoden an die besonderen Eigenschaften von Wasserstoff. Dieser Bedarf wird ebenfalls in der Kategorie **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen** benannt. Basierend auf den weiteren identifizierten Bedarfen in dieser Kategorie sind bereits im Bereich **allgemeingültige Aussagen** Handlungsempfehlungen formuliert worden.

7.4. Hochdruckbehälter

Es wurden insgesamt 29 Bedarfe für Ergänzungen und Neuentwicklungen identifiziert, bei denen ein Handlungsbedarf besteht oder sogar schon erste Handlungen erfolgt sind. Einige wenige beziehen sich auf konkrete technische Regelwerke, während die meisten Handlungsbedarfe ganze Themenbereiche betreffen. Bestehende Normen sollten an neue und aktuelle Erkenntnisse im Bereich Wasserstoff angepasst werden, ohne dass eine Neuentwicklung zwingend erforderlich ist.

Bezüglich der **Anforderungen an den Energieträger** in den Bereichen Qualitätssicherung, Spülen der Behälter sowie Rein-

heit und Druck sind in Bezug auf Wasserstoff kurzfristig Anpassungen erforderlich.

Langzeitversuche zum Einfluss von Wasserstoff auf den Bereich **Werkstoff/Material** sowie Prüfungen vor und während des Betriebs (z. B. Spannungsrisskorrosion, Drucklastwechsel) sind notwendig, um technische Regelwerke auf den aktuellen Stand zu bringen. Ebenso wird eine Harmonisierung und Zusammenführung von Standards (ISO, ASTM, ASME) gefordert. Zyklische und bedarfsgerechte Aktualisierungen bestehender Standards, um neue Erkenntnisse und innovative Fertigungsverfahren zu berücksichtigen, sind ebenfalls nötig, um den Wasserstoffhochlauf über den Transportweg Gasdruckbehälter in Deutschland zu fördern und zu unterstützen. Spezifisch soll die DIN EN 13445-14 für Wasserstoff ergänzt und Materialanforderungen angepasst werden. In der CEN/TC 235 SFG müssen die Materialanforderungen überarbeitet und ergänzt werden. Für die Druckgeräte-Richtlinie sind regelmäßige Anpassungen in technischen Regelwerken notwendig, um dem Stand der Technik im Bereich Wasserstoff zu entsprechen.

Im Bereich **Funktion/technische Sicherheit** sind Vereinheitlichungen von technischen Regelwerken für die Prüfung von Behältern (z. B. UN & ADR MEGC, Behälterprüfung) gefordert. Ebenso soll eine Entwicklung neuer Prüfverfahren (z. B. Schweißnahtprüfung, zerstörungsfreie Prüfung, wie bspw. Schallemissionsprüfung) aufgesetzt sowie neue ISO-Standards für erweiterte Prüfverfahren initiiert werden. Ebenso ist es bei der TRBS erforderlich, dass diese um Wasserstoffthemen erweitert wird. Die FKM-Richtlinie sollte um Wasserstoff ergänzt werden, um rechnerische Festigkeitsnachweise und Bauteilauslegungen anzupassen.

Für **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen** im Bereich Dichtheit, Brand- und Explosionsschutz sowie Prüfbedingungen müssen die bestehenden Regelwerke angepasst werden. Es wird eine Notwendigkeit zur Ergänzung und/oder Neuentwicklung von technischen Regelwerken für organisatorische und administrative Anforderungen (z. B. Dokumentation, Zulassungsverfahren) gesehen.

Die identifizierten Bedarfe zeigen einen umfassenden und kurzfristigen Anpassungs- und Ergänzungsbedarf in bestehenden technischen Regelwerken. Die Schwerpunkte liegen in der Materialprüfung, Harmonisierung, Sicherheitsprüfung sowie der kontinuierlichen Aktualisierung bestehender Vorschriften, um neuen technologischen Entwicklungen gerecht zu werden und diese zu unterstützen.

7.5. Flüssigwasserstoff

Flüssigwasserstoff ist eine bisher wenig etablierte Technologie, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet. Daher bestand während der Bedarfsanalyse eine hohe Unklarheit darüber, in welchen Bereichen Regelsetzungsbedarfe bestehen. Trotzdem konnten mehrere Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die für die Weiterentwicklung und den sicheren Einsatz von Flüssigwasserstoff notwendig sind.

Bezüglich der **Anforderungen an den Energieträger** sollen gezielt Forschung und Entwicklung in den Bereichen der Ortho-/Para-Gleichgewichtsmessung und der Auslegung von Ortho-/Para-Shift-Reaktoren gefördert werden. Es ist notwendig, neue technische Regelwerke für Messverfahren zu entwickeln und die technischen Vorgaben für diese Reaktoren präzise zu definieren. Diese neuen technischen Regelwerke sind in bestehende internationale Standards zu integrieren, um eine sichere Handhabung und einen effizienten Transport von Flüssigwasserstoff

zu gewährleisten.

Im Bereich **Werkstoff/Material** konnte aus der Bedarfsanalyse keine konkrete Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Dennoch sind technische Regelwerke für den Bereich kryogener Flüssigkeiten, insbesondere für Flüssigwasserstoff, derzeit rar. Die Forschung hat als Aufgabe, Materialien für den Umgang mit Flüssigwasserstoff bei extrem niedrigen Temperaturen zu identifizieren und deren Eignung zu prüfen.

Betreffend **Funktion/technische Sicherheit** sollen neue Sicherheitsstandards entwickelt werden, die den sicheren Transport und die Handhabung von Flüssigwasserstoff, insbesondere beim Abblasen und Abbrennen, regeln. Diese technischen Regelwerke müssen spezifische Druck- und Temperaturgrenzen festlegen und neue Prüfverfahren für Sicherheitseinrichtungen definieren. Ergänzend sind bestehende Regelwerke wie die AD-2000 zu aktualisieren und um relevante Anforderungen für Flüssigwasserstoff zu erweitern, damit die Sicherheit im Umgang mit der Technologie gewährleistet werden kann.

Im Hinblick auf **Qualifikation, Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen** sind standardisierte Ausbildungsinhalte für Personal im Umgang mit Flüssigwasserstoff zu entwickeln. Diese müssen auf den neuesten Forschungsergebnissen basieren und praxisorientierte Schulungsprogramme umfassen. Der Zugang zu relevanten technischen Regelwerken ist zu verbessern, um eine breite Marktakzeptanz zu fördern. Weiterhin muss die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Standardisierung intensiviert werden. Die Harmonisierung der europäischen und internationalen Standards für Flüssigwasserstoff muss vorangetrieben werden. Dies kann durch Erweiterungen bestehender Arbeitsgruppen innerhalb der ISO und CEN erfolgen, die sich auf die spezifischen Anforderungen von Flüssigwasserstoff fokussieren. So wird eine einheitliche Grundlage für die Entwicklung und Anwendung von Standards auf globaler Ebene geschaffen, die eine effiziente und sichere Handhabung von Flüssigwasserstoff weltweit ermöglichen.

7.6. Liquid Organic Hydrogen Carriers

Die LOHC-Technologie bietet großes Potenzial für die sichere und skalierbare Wasserstoffspeicherung und -logistik. Um den Technologiehochlauf zu ermöglichen, sind gezielte Maßnahmen in den vier genannten Kategorien erforderlich.

Die DIN SPEC 91437 enthält bereits die geforderten Definitionen und Prüfmethode für LOHC-Trägermedien wie Benzyltoluol. Damit sind in der Kategorie **Anforderungen an den Energieträger** keine Handlungsempfehlungen formuliert worden. Nach Erstellung der Bedarfsanalysen haben bereits weitreichende Weiterentwicklungen in diesem Feld stattgefunden. Weiterhin ist unsicher, ob eine international harmonisierte Klassifikation von LOHCs möglich ist, da die Trägermedien teils unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und bspw. im Gefahrgutrecht unter verschiedenen Gefahrgutklassen eingestuft werden.

Technische Regelwerke müssen die Auswahl geeigneter **Werkstoffe/Materialien** für LOHC-Prozesse spezifizieren – insbesondere hinsichtlich thermischer und chemischer Stabilität sowie Kompatibilität mit LOHC-Medien und deren Nebenprodukten. Die Integration geeigneter Polymer-, Metall- sowie Verbundwerkstoffe und Dichtmaterialien in technische Regelwerke ist grundlegend und muss anhand von Praxiserfahrungen erfolgen. Die ist durch Langzeituntersuchungen hinsichtlich der Materialkompatibilität von beladenem und unbeladenem LOHC zu erzielen.

Im Bereich **Funktion/technische Sicherheit** ist kurzfristig ein

technisches Regelwerk für den Transport von beladenem LOHC zu entwickeln, das über bestehende Vorschriften für entzündbare Flüssigkeiten hinausgeht. Maßgeblich für eine umfassende sicherheitstechnische Beurteilung ist eine vorhergehende Risikoanalyse für Thermalöl-Transporte hinsichtlich Explosionsgefahr und Umweltauswirkungen bei Leckagen wie auch die Definition spezifischer Sicherheitscharakteristika aller gängiger Thermalölararten. Weitergehend ist die Entwicklung von Sicherheitskonzepten für die Integration in bestehende Energieinfrastrukturen notwendig. Darauf aufbauend ist die Eingliederung von LOHC in bestehende Flüssigkraftstoffinfrastrukturen normativ zu regeln. [61]

Der sichere Umgang mit LOHCs erfordert spezifische Schulungen und Qualifikationen für das Erzielen der personellen **Qualifikation** sowie einer hinreichenden **Betriebssicherheit**, die über bestehende Regelwerke hinausgehen. Die TRBS 1116 ist als Basis für ein dahingehend um spezifische Anforderungen für den Umgang mit LOHC zu ergänzendes neues Dokument zu sehen. Dazu zählen Schulungen zum kontaminationsfreien Handling, Sicherheitsunterweisungen für beladenes und unbeladenes LOHC sowie die Definition von Qualitätsstandards und Grenzwerten für Kontamination.

7.7. Ammoniak

Ammoniak als Transportoption für Wasserstoff, insbesondere zum Transport über große Distanzen, hat sich im Laufe der letzten vier Jahre signifikant entwickelt, sodass abzusehen ist, dass Ammoniakinfrastrukturen in Europa und in Deutschland erforderlich sind, um die Klimaziele zu erreichen und den europäischen Energiebedarf zu decken. Zur Beschleunigung der Planung und Errichtung der erforderlichen Infrastrukturen, wie z. B. Importterminals und Ammoniakcracker bedarf es der Neuentwicklung und Überarbeitung bestehender technischer Regelwerke, da diese Ammoniak bislang nicht als Energieträger, sondern als chemisches Edukt und als Kältemittel behandeln. Durch die Verwendung von Ammoniak als Energieträger bilden sich neue Nutzergruppen, die zusätzliche Anforderungen an die Regelung des Transports, der Speicherung und der Verteilung von Ammoniak stellen. Ammoniak wurde bisher insbesondere von Fachfirmen mit speziellen Kompetenzen und Qualifikationen transportiert, gelagert oder umgeschlagen. Durch die Etablierung von Ammoniak als Transportlösung für Wasserstoff ist mit der Ausweitung der Anwendungsfälle und Nutzerkreise, aber auch der Betroffenheiten bei Störungen zu rechnen. Das Sicherheitsniveau ist dementsprechend neu zu definieren und durch technische Regelwerke anzupassen.

Die Entwicklungen der letzten vier Jahre haben aber auch gezeigt, dass andere Länder in Europa, wie z. B. die Niederlande, Ammoniak als Energieträger einsetzen werden und bereits jetzt einen Teil ihrer bestehenden Infrastrukturen umgerüstet haben. [62, 63] Deutschland wird diesbezüglich vermutlich keine Vorreiterrolle mehr einnehmen können, sollte hinsichtlich der Standardisierung jedoch dringend die erforderlichen Weichen stellen, um Ammoniak als Transportvektor für Wasserstoff etablieren zu können.

Die fachlichen Handlungsempfehlungen bezüglich der **Anforderungen an den Energieträger** können dem ?? entnommen werden, da diese den rechtlichen Handlungsempfehlungen zu zuordnen sind.

In der Kategorie **Werkstoff/Material** wird empfohlen, einen übergreifenden Standard zur Auswahl und Anwendung ammoniakkompatibler Werkstoffe zu entwickeln. Anwendungsüber-

greifende Werkstoffanforderungen und die Neigung zu Spannungs-riss-korrosion sind bei der Regelsetzung zu berücksichtigen sowie Bezug auf bestehende Regelwerke wie z. B. AD-2000-Merkblätter zu nehmen. Ziel ist es, die Werkstoffauswahl in allen relevanten Anwendungsbereichen zu erleichtern, eine einheitliche Grundlage für die Planung und den Betrieb zu schaffen und sicherheitstechnische Ausfallrisiken durch falsche Materialwahl zu minimieren. Es wird darüber hinaus empfohlen, den Geltungsbereich der DIN EN ISO 5771 zu überprüfen und gezielt zu erweitern, um auch ammoniakkompatible Schläuche und Schlauchleitungen außerhalb des bisherigen Nenndurchmesserbereichs (DN < 12,5 und DN > 76) normativ abzudecken.

Eine entsprechende Weiterentwicklung soll:

- Anforderungen an Materialien, Druckstufen und Temperaturbeständigkeit für alle praxisrelevanten Nenndurchmesser definieren,
- den Anwendungsbereich auf neue technologische Einsatzfelder (insbesondere Wasserstoffderivatinfrastruktur) ausweiten sowie
- Prüf- und Kennzeichnungsverfahren sowie Betriebsgrenzen für Sonderanwendungen klarstellen.

Damit kann eine einheitliche sicherheitstechnische Basis für den Einsatz von Schläuchen in ammoniakführenden Systemen geschaffen und gleichzeitig die Planungs- und Betriebssicherheit erhöht werden.

Für Unterwasserverlegungen von Rohrfernleitungen wird empfohlen, die Technische Regel für Rohrfernleitungen (TRFL) um spezifische technische Anforderungen zu ergänzen, insbesondere für Anlagen, die toxische und wassergefährdende Stoffe wie Ammoniak transportieren. Dabei sollen besonders nachfolgende Aspekte berücksichtigt werden:

- klar definierte technische Mindestanforderungen für Planung, Bau, Betrieb und Überwachung unterwasserverlegter Rohrleitungen
- Schutzkonzepte gegen externe mechanische Einwirkungen (z. B. Schiffsverkehr, Sedimentverlagerung, Erosion...)
- Vorgaben zu Leckageüberwachungssystemen, Kapselung und Notfallkonzepte bei Havarien unter Wasser
- Berücksichtigung von hydrogeologischen Besonderheiten in Küsten- und Binnengewässern

Ein praxisnahes technisches Regelwerk oder eine ergänzende DIN-Spezifikation kann zudem als Übergangsinstrument dienen, bis die TRFL entsprechend überarbeitet ist. Dies würde sowohl die Planungssicherheit für Betreiber als auch die Sicherheit der Energieinfrastruktur verbessern.

In der Kategorie **Funktion/technische Sicherheit** wird für Schnellkupplungen für den Einsatz mit Ammoniak empfohlen, ein technisches Regelwerk zu entwickeln, sodass die Schnittstelle eindeutig definiert wird. Es sollten insbesondere die Erfahrungen der EFMA bei der Ausgestaltung berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sind praxisnahe Leitfäden zu entwickeln, die eine strukturierte und einheitliche Auslegung oder Umrüstung von LNG-Terminals für die Aufnahme, Lagerung und den Umschlag alternativer Energieträger wie Ammoniak oder Flüssigwasserstoff ermöglichen. Des Weiteren ist in einem solchen Leitfaden zu prüfen, unter welchen technischen und regulatorischen Bedingungen bestehende Rohrfernleitungen für den Ammoniaktransport nachgerüstet werden können. Solche Leitfäden können Planern, Betreibern und Genehmigungsbehörden

als Orientierungshilfe für eine sichere und zukunftsfähige Infrastruktur dienen. Um die Sicherheitsstandards für mobile, industrielle und energetische Anwendungen mit Ammoniak an ein einheitlich hohes Niveau anzugleichen, muss die Übertragbarkeit bestehender sicherheitstechnischer Regelwerke aus der Kältetechnik, insbesondere DIN EN 378 und ISO 5149, systematisch geprüft werden. Ziel ist es, relevante Inhalte zu identifizieren, ggf. anzupassen und in neue technische Regelwerke zu überführen. Im Mittelpunkt stehen dabei sicherheitskritische Aspekte wie Leckageverhinderung, Werkstoffanforderungen, betriebliche Überwachung sowie der Personenschutz.

Es wird empfohlen, eine technische Regel oder eine anwendungsorientierte DIN-Spezifikation für Spülprozesse (Purgungsverfahren) in ammoniakführenden Systemen zu entwickeln. Diese soll insbesondere folgende Aspekte beinhalten:

- geeignete Spülmedien (z. B. Stickstoff)
- Ablauf und Durchführung des Spülprozesses
- Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen
- Restgasanalytik
- Freigabekriterien vor Wiederinbetriebnahme

Dadurch sollen einheitliche und sicherheitskonforme Verfahren für den Umgang mit Ammoniakrestmengen im Rahmen von Wartungsarbeiten geschaffen und so das Risiko für Personal und Umwelt deutlich reduziert werden. Der sichere Umgang mit ammoniakhaltigem Wasser, auch im maritimen Kontext (z. B. auf Schiffen, Bunkerstationen und Hafenumschlagsanlagen), ist in einem praxisnahen Regelwerk zu definieren. Dieses soll insbesondere:

- Anforderungen an Auffangsysteme und deren Kapazitäten definieren,
- Vorgaben zur Zwischenlagerung und Entsorgung von Ammoniakwasser enthalten und
- mit bestehenden landseitigen Vorgaben harmonisiert werden.

Ziel ist ein einheitliches Sicherheits- und Umweltschutzniveau entlang der gesamten logistischen Ammoniakette, zu Land und zur See.

Die Entwicklung eines praxisorientierten nationalen Leitfadens für Ammoniakbunkersysteme dient als Grundlage für ein internationales Standardisierungsverfahren. Konkret ist die Initiierung eines ISO-New Work Item Proposals (NWIP) anzustreben, um die weltweite sicherheitstechnische Standardisierung dieses wachsenden Anwendungsfeldes zu fördern. Der Leitfaden kann dazu beitragen, einheitliche Mindestanforderungen zu etablieren, Investitionssicherheit zu schaffen und den sicheren internationalen Einsatz von Ammoniak als Schiffskraftstoff und Energieträger zu ermöglichen.

Für die Ableitung von Handlungsempfehlungen aus dem Bedarf nach Regelsetzung von Hydroschilden in der Kategorie **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorischen Voraussetzungen** sind folgende Grundlagen zu beachten: Bei der Beurteilung der Gefahren von freigesetztem Ammoniak stehen im Gegensatz zu allen anderen in diesem Projekt betrachteten Transportvektoren toxische Eigenschaften im Vordergrund. Ammoniak gilt aufgrund der hohen Mindestzündenergie (14 MJ) und Mindestzündtemperatur (ca. 630 °C) praktisch als nicht entzündbar und verbrennt lediglich mit Stützflamme oder in Verbindung mit einem anderen Brennstoff. Explosions- und Brandergebnisse von Ammoniak im Freien sind nicht bekannt und in den

einschlägigen Ereignisdatenbanken auch nicht dokumentiert. In Verbindung mit einer hohen unteren Explosionsgrenze von etwa 15 Vol.-% kann die Ausdehnung eines explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisches vernachlässigt werden. Eine Brandgefährdung aufgrund einer Leckage von Ammoniak kann daher vernünftigerweise ausgeschlossen werden.

Zur Begrenzung der toxischen Gefährdung bei einer Freisetzung von Ammoniak sind geeignete technische Sicherheitsmaßnahmen erforderlich. Eine etablierte Strategie zur Beeinflussung der Ammoniakausbreitung über den Luftpfad ist der Einsatz von Wasservorhängen, sogenannten Hydroschilden. Diese dienen primär dazu, die horizontale Ausbreitung der Gaswolke zu begrenzen, um potenziell exponierte Personenbereiche oder sicherheitsrelevante Anlagenteile zu schützen. Eine vertikale Ausbreitung wird in vielen Anwendungsfällen als weniger kritisch eingestuft und kann unter Umständen toleriert werden. Daher können gezielt platzierte Hydroschilde als barriereartige Maßnahme konzipiert werden, um die Ausbreitung in horizontaler Richtung gezielt zu kanalisieren oder einzudämmen. Ein vollständiges Niederschlagen der Ammoniakwolke ist in der Regel mit sehr hohen Wassermengen verbunden, die aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden müssen. In vielen Fällen ist dies jedoch nicht zwingend erforderlich, sofern das Schutzziel auf eine kontrollierte Kanalisierung oder partielle Reduktion der Ammoniakkonzentration beschränkt ist.

Für die Auslegung und Dimensionierung von Hydroschilden zur Ammoniakrückhaltung existieren derzeit weder harmonisierte Leitfäden noch technische Regelwerke. Zwar gibt es einzelne experimentelle Studien und technische Berichte, in denen Wirksamkeit und Randbedingungen verschiedener Hydroschildkonfigurationen untersucht wurden, jedoch liegen die Ergebnisse nicht gebündelt vor und sind bislang nicht systematisch ausgewertet oder in ein konsolidiertes technisches Regelwerk überführt worden.

Zentrale technische Fragestellungen, die derzeit unbeantwortet sind und für einen praxisorientierten Leitfaden erforderlich wären, sind u. a.:

- Welche Wassermenge (in Liter pro Minute und Meter) ist erforderlich, um eine definierte Schutzwirkung bei gegebener Ammoniakfreisetzung zu erzielen?
- In welcher Höhe über kritischen Anlagenteilen müssen Hydroschilde installiert werden, um eine effektive Barriere Wirkung gegenüber der Gaswolke zu gewährleisten?

- Wie lange muss die Berieselung mindestens aufrechterhalten werden, um typische Störfallszenarien ausreichend abzusichern?
- Welche Ammoniakmengen werden unter realen Bedingungen tatsächlich im Wasser gebunden? Hier ist nicht die theoretische Löslichkeit, sondern die effektive Absorptionsrate unter praxisnahen Bedingungen maßgeblich.

Angeichts dieser offenen Fragen wird empfohlen, zunächst einen praxisnahen Leitfaden auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes und vorliegender Literatur zu erstellen. Dieser kann kurzfristig als Planungshilfe und Orientierung für Anlagenbetreiber und Behörden dienen. Langfristig ist auf dieser Grundlage und auf Ergebnissen pränormativer Forschungsvorhaben ein technisches Regelwerk zu erarbeiten, um eine konsistente, überprüfbare Auslegung zu ermöglichen und technischen Wildwuchs mit individuellen Lösungen und unterschiedlichen Schutzzielen zu vermeiden.

7.8. Rechtliche Handlungsempfehlungen in Bezug auf Ammoniak

Im folgenden Abschnitt werden – basierend auf den regelwerksbezogenen Handlungsempfehlungen für den Transportvektor Ammoniak (Abschnitt 7.7) – exemplarisch konkrete Handlungsempfehlungen für rechtliche Anpassungen vorgestellt.

Der Umsetzungsaufwand richtet sich danach, auf welcher gesetzlichen Ebene Anpassungen vorgenommen werden müssen. Hierfür dient ein Bewertungsschema (Abbildung 7.2), das den Anpassungsbedarf nach einem Ampelsystem einstuft und eine übersichtliche Einordnung von geringfügigen, schnell umsetzbaren Änderungen (grün) bis hin zu komplexen, langwierigen Verfahren (rot) ermöglicht.

Der gesetzliche Handlungsbedarf hängt davon ab, ob die in Rede stehenden Rechtsnormen auf konkrete technische Regelwerke verweisen oder ob es sich um Generalklauseln handelt, die bspw. auf die „anerkannten Regeln der Technik“ Bezug nehmen (vgl. hierzu Abschnitt 3.2). Derartige Generalklauseln erfassen auch technische Regelwerke, die erst noch erstellt werden müssen, sodass kein gesetzlicher Anpassungsbedarf besteht. Sofern eine Rechtsvorschrift jedoch auf konkrete noch zu entwickelnde Regelwerke verweisen soll, müssen gesetzliche Vorschriften angepasst werden, um Aktualität zu gewährleisten.

	Beschreibung
	Ergänzung/Anpassung eines Normverweises, kein Gesetzgebungsprozess mit mehreren Organen erforderlich
	Ergänzung/Anpassung eines Normverweises; ordentliches Gesetzgebungsverfahren erforderlich (z.B. Anpassung des ADR)
	Inhaltliche Überarbeitung ohne erforderliches Gesetzgebungsverfahren
	Inhaltliche Überarbeitung in nationalem Gesetzgebungsverfahren
	Inhaltliche Anpassung in EU-Richtlinie oder Verordnung oder völkerrechtlichem Vertrag mit periodischer Revision
	Inhaltliche Anpassung in einem sonstigen völkerrechtlichen Vertrag

Abbildung 7.2. Bewertungsschema zur Einordnung des rechtlichen Anpassungsbedarfs.

Im Bereich **Anforderungen an den Energieträger** ergab die Stakeholderbefragung den Bedarf an einer Norm für Ammoniak in Anlehnung an bereits bestehende Kraftstoffnormen.

Die Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BImSchV) legt Anforderungen an die Beschaffenheit von Kraftstoffen fest. Ammoniak als Kraftstoff wird darin bislang nicht berücksichtigt, gilt jedoch – unter bestimmten Voraussetzungen – auf europäischer Ebene als „alternativer Kraftstoff“ im Sinne der AFIR-Verordnung (Art. 2 Nr. 4 lit. a und lit. b Verordnung (EU) 2023/1804). Da Verordnungen nach Art. 288 UAbs. 2 AEUV (Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union) unmittelbar in jedem Mitgliedstaat gelten, wird Ammoniak folglich im Geltungsbereich der AFIR-Verordnung unmittelbar durch EU-Recht als „alternativer Kraftstoff“ definiert.

Die EU erkennt mit der AFIR-Verordnung die Notwendigkeit technischer Spezifikationen für Ammoniak als Schiffskraftstoff an und fordert deren Entwicklung speziell für das Bunkern im See- und Binnenschiffsverkehr. Konkrete Anforderungen an die Herstellung und das Inverkehrbringen von Ammoniak als Kraftstoff fehlen jedoch bislang.

Da Qualitätsanforderungen für Kraft- und Brennstoffe dem Schutz der Umwelt vor schädlichen Einflüssen dienen [64], wäre es naheliegend, Ammoniak entsprechend der Zielsetzung der 10. BImSchV analog zu Wasserstoff in den Katalog der 10. BImSchV aufzunehmen. Eine gesetzliche Verankerung einer noch zu entwickelnden Norm für Ammoniak in der 10. BImSchV könnte dabei insbesondere die Herstellung und die Kraftstoffqualität regeln. Dies würde die Rechtsanwendung auf nationaler Ebene erheblich vereinfachen, da klare Vorgaben im nationalen Recht bestünden und so nicht zusätzlich auf europäische Regelungen zurückgegriffen werden müsste. Dies könnte Rechtsunsicherheiten vermeiden und die praktische Umsetzung für Unternehmen sowie Behörden erleichtern.

Es wird daher empfohlen, Ammoniak als Kraftstoff in die 10. BImSchV aufzunehmen. Hierfür bedarf es mehrere Anpassungen:

- Es wird empfohlen, die 10. BImSchV analog zu den bereits enthaltenen Kraftstoffen (§§ 3 9a der 10. BImSchV) um Ammoniak zu erweitern. An dieser Stelle soll auf die zu erstellende Kraftstoffnorm für Ammoniak verwiesen werden.
- Der Katalog in § 13 Abs. 1 S. 1 der 10. BImSchV (Auszeichnung von Kraft- und Brennstoffen) soll ebenfalls um Ammoniak als Kraftstoff ergänzt und an dieser Stelle auf die zu erstellende Norm für Ammoniak als Kraftstoff verwiesen werden.
- § 11 der 10. BImSchV (Gleichwertigkeitsklausel) ist um den zu erstellenden Paragraphen für Ammoniak als Kraftstoff und die neu zu erstellende Kraftstoffnorm zu ergänzen.
- Um die Konsistenz der gesetzlichen Anpassungen sicherzustellen, muss die 10. BImSchV – analog zu den anderen Kraftstoffen – um ein Zeichen für Ammoniak erweitert werden.

Anhand des dargestellten Bewertungsschemas erfolgt in diesem Fall eine Einordnung des Anpassungsbedarfs in die Kategorie Gelb: Eine gesetzliche Verankerung einer Kraftstoffnorm für Ammoniak in der 10. BImSchV kann nur durch eine entsprechende Änderung der Verordnung erfolgen. Diese stützt sich auf § 34 BImSchG. Danach wird die Bundesregierung ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise mit Zustimmung des Bundesrates Rechtsverordnungen u. a. hinsichtlich der Beschaffenheit von Treibstoffen zu erlassen. Der Zeithorizont für die Aufnahme einer Regelung für Ammoniak als Kraftstoff in die 10. BImSchV hängt maßgeblich vom politischen Willen ab und kann je nach Priorisierung durch die politischen Entscheidungsträger variieren.

Im Rahmen des Themenbereichs **Anforderungen an den Energieträger** hat die Befragung der Stakeholder zudem ergeben, dass Bedarf an einer Definition von grünem Ammoniak besteht. Eine solche Begriffsbestimmung ist nicht nur für regulatorische Zwecke von Bedeutung, sondern auch für die Schaffung von Investitionssicherheit und die Förderung eines nachhaltigen Markthochlaufs. Die Stakeholderbefragung fand jedoch bereits im Jahr 2023 statt. Mittlerweile haben sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen – zumindest auf europäischer Ebene – deutlich weiterentwickelt, sodass der ursprüngliche Bedarf auf gesetzlicher Ebene in gewissem Umfang bereits adressiert wurde.

Bislang existiert zwar weder auf nationaler noch auf europäischer Ebene eine gesetzliche Definition von grünem Ammoniak. Auch in technischen Regelwerken finden sich keine spezifischen Vorgaben, auf die im Rechtsrahmen verwiesen werden könnte. Ein relevanter gesetzlicher Anknüpfungspunkt auf europäischer Ebene stellt jedoch die Regulierung erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs („Renewable Fuels of Non-Biological Origin“, kurz: RFNBO) durch die Delegierte Verordnung (EU) 2023/1184 der Kommission vom 10. Februar 2023 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates (RED II) dar. Die Delegierte Verordnung legt ein strenges Nachhaltigkeitsverständnis zugrunde, das insbesondere die Herkunft und zusätzliche Bereitstellung von erneuerbarem Strom sowie zeitliche und geografische Korrelationen zwischen Stromerzeugung und -nutzung berücksichtigt. Sie legt fest, welche Anforderungen elektrischer Strom erfüllen muss, damit aus ihm hergestellter Wasserstoff und darauf beruhende synthetische Kraftstoffe als erneuerbar bezeichnet werden können. Ammoniak gilt als RFNBO, sofern dieses aus erneuerbarem Wasserstoff hergestellt wurde [65]. Die Delegierte Verordnung gilt inzwischen nicht mehr nur für den Verkehrssektor, sondern für sämtliche Sektoren (Delegierte Verordnung (EU) 2024/1408 der Kommission vom 14. März 2024 zur Änderung der Delegierten Verordnung (EU) 2023/1184 der Kommission im Hinblick auf die Anpassung eines Fachbegriffs an die Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates).

Anhand des dargestellten Bewertungsschemas erfolgt in diesem Fall eine Einordnung des Anpassungsbedarfs in die Kategorie Gelb bzw. Orange: Um Investitionssicherheit und regulatorische Klarheit zu schaffen, wird empfohlen, auf gesetzlicher Ebene eine verbindliche Definition von grünem Ammoniak einzuführen. Diese ist möglichst auf europäischer Ebene abzustimmen. Eine uneinheitliche Definition könnte andernfalls zu Handelshemmnissen führen oder Investitionsentscheidungen erschweren. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die globalen Bestrebungen zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse und des Verkehrssektors.

Es ist zudem anzudenken, eine konkrete Definition von grünem Ammoniak in Anlehnung an bereits bestehende Definitionen im Rechtsrahmen zu schaffen: Auf nationaler Ebene finden sich Vorgaben zu grünem Wasserstoff an verschiedenen Stellen (u. a. § 3 Abs. 1 Nr. 13b GEG und § 3 Nr. 27a EEG). § 93 EEG ermächtigt die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung Anforderungen an die Herstellung von „Grünem Wasserstoff“ zu bestimmen, um sicherzustellen, dass nur Wasserstoff als grün gilt, der ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde und der mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung vereinbar ist (§ 93 Abs. 1 S. 1 EEG). Es könnte in Erwägung gezogen werden, eine Verordnungsermächtigung bezüglich der Anforderungen an grünen Ammoniak in Anlehnung an § 93 EEG in den Rechtsrahmen aufzunehmen, um eindeutige Anforderungen an dessen Herstellung festzulegen. Hierfür bedarf es einer Änderung des EEG.

Im Bereich **Werkstoff/Material** wurde der Bedarf eines technischen Regelwerks zur Ammoniakverträglichkeit ermittelt.

Verweise auf technische Regelwerke mit Blick auf die Ammoniakverträglichkeit von Werkstoffen und Materialien finden sich insbesondere im Bereich des Gefahrgutrechts in verschiedenen internationalen Abkommen, an die die Bundesrepublik Deutschland gebunden ist, darunter im ADR, RID und ADN. Die Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) verweist in § 2 Nr. 7 auf Vorschriften des ADR, RID und ADN, sodass diese auch nach dem nationalen Recht zu beachten sind. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die Aktualität der darin enthaltenen Verweise auf technische Regelwerke sicherzustellen. Übereinkommen wie das ADR, RID oder ADN unterliegen festen Überarbeitungsperioden, in der Regel alle zwei Jahre. Aufgrund regelmäßiger Aktualisierungszyklen technischer Regelwerke kann es vorkommen, dass auf veraltete Versionen verwiesen wird. Dadurch entsteht eine potenzielle Diskrepanz zwischen dem Stand der Technik und den geltenden Vorschriften. Sollte künftig ein neues technisches Regelwerk entwickelt werden, das die Anforderungen an ammoniakverträgliche Werkstoffe – etwa bei Konstruktions- oder Dichtmaterialien – umfassender und aktueller beschreibt, müssten die entsprechenden Übereinkommen zeitnah angepasst werden. Nur so lassen sich Rechtsklarheit und technische Sicherheit dauerhaft gewährleisten – besonders in dynamischen Bereichen wie dem Gefahrgutrecht.

Im Bereich **Funktion/technische Sicherheit** wurde der Bedarf nach einem technischen Regelwerk für Ammoniak-Schnellkupplungen (insbesondere für Eisenbahnkesselwagen) festgestellt, um eine sichere und schnelle Verbindung zwischen Rohrleitungssystemen herzustellen zu können.

Rohrfernleitungsanlagen müssen so beschaffen sein und betrieben werden, dass eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit vermieden wird und insbesondere schädliche Einwirkungen auf den Menschen und die Umwelt nicht zu besorgen sind (§ 3 Abs. 1 RohrFLtV). Sie müssen entsprechend dem Stand der Technik errichtet und betrieben werden (§ 3 Abs. 2 S. 1 RohrFLtV). Als Stand der Technik gelten insbesondere die Technischen Regeln, die nach § 9 Abs. 5 RohrFLtV durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit veröffentlicht werden. Auf dieser Grundlage ist die TRFL veröffentlicht worden. Sie gilt für die Errichtung, den Betrieb, die Änderung sowie die Prüfung von Rohrfernleitungsanlagen im Sinne der RohrFLtV.

Ein gesetzlicher Anpassungsbedarf ergibt sich aus der Handlungsempfehlung (vgl. Abschnitt 7.7) nicht, da die RohrFLtV bereits die Anwendung des Standes der Technik fordert und auf die TRFL verweist. Solange die neuen technischen Anforderungen

als Ergänzung der TRFL oder – übergangsweise – im Rahmen einer DIN-Spezifikation formuliert werden, können diese innerhalb des bestehenden Rechtsrahmens nach § 3 Abs. 2 S. 1 RohrFLtV und § 9 Abs. 5 RohrFLtV als Stand der Technik berücksichtigt werden.

Angesichts der zukünftigen Nutzung von LNG-Terminals zur Lagerung und Verarbeitung klimafreundlicherer Brennstoffe wie Ammoniak und Flüssigwasserstoff ergibt sich die Notwendigkeit einer normativen Orientierungshilfe. Ein entsprechender Leitfaden könnte Planern und Behörden eine praxisnahe Hilfestellung bieten, um sicherzustellen, dass LNG-Terminals bereits in der Planungsphase vollständig kompatibel mit alternativen Kraftstoffen sind. Allerdings besteht hierbei kein unmittelbarer gesetzlicher Handlungsbedarf, da es an einem Anknüpfungspunkt auf gesetzlicher Ebene fehlt. Ein derartiger Leitfaden wäre in erster Linie als freiwillige Hilfestellung für die Branche zu verstehen. Er könnte als praxisnahe Unterstützung für Unternehmen und Behörden dienen, um Orientierung zu bieten und technische Möglichkeiten und Sicherheitsaspekte aufzuzeigen, ohne dass eine gesetzliche Grundlage oder Verpflichtung zur Umsetzung besteht. Gleiches gilt für Leitfäden zur Umrüstung von Rohrfernleitungsanlagen.

Im Bereich **Qualifikation/Betriebssicherheit und organisatorische Voraussetzungen** wurde ein Bedarf an einem spezifischen Leitfaden für Schulungen und Unterweisungen im Umgang mit Ammoniak identifiziert, insbesondere für Beschäftigte, die mit relevanten Mengen arbeiten. Es gibt bereits umfassende gesetzliche Vorschriften zur Unterweisungspflicht von Personen im Umgang mit gefährlichen Substanzen.

Die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) bezweckt etwa den Schutz des Menschen und der Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen (§ 1 Abs. 1 GefStoffV). Dem soll insbesondere durch Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen entgegengewirkt werden (§ 1 Abs. 1 Nr. 2 GefStoffV). Ammoniak (CAS 7664-41-7) ist akut toxisch, ätzend und gewässergefährdend und fällt daher als Gefahrstoff unter die Verordnung (§ 3 Abs. 1, 2 S. 1 Nr. 2 lit. a und b, Nr. 3 GefStoffV i. V. m. Anhang I Verordnung (EG) Nr. 1272/2008). Eine grundlegende Voraussetzung für die Sicherheit der Beschäftigten im Umgang mit Gefahrstoffen ist deren fachgerechte Qualifikation und regelmäßige Unterweisung. Grundlage für die Unterweisung ist die sogenannte Gefährdungsbeurteilung durch den Arbeitgeber (§ 6 Abs. 1 GefStoffV). Dieser hat dabei insbesondere die bekannt gegebenen Regeln und Erkenntnisse zu berücksichtigen (§ 7 Abs. 2 S. 2 GefStoffV), die vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) dem jeweiligen Stand von Technik und Medizin entsprechend erarbeitet werden (§ 20 Abs. 3 Nr. 2 GefStoffV). Ein technisches Regelwerk, das Vorgaben zu notwendigen Schulungen und Unterweisungen für Personen enthält, die mit relevanten Mengen an Ammoniak arbeiten, wäre von dem unbestimmten Rechtsbegriff der Regeln und Erkenntnisse erfasst. In Ermangelung eines Verweises auf konkrete technische Regelwerke besteht insofern kein gesetzlicher Anpassungsbedarf.

Gleiches gilt bspw. für die Gefährdungsbeurteilung im Rahmen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), die die Gewährleistung der Sicherheit der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln bezweckt. Zum Umfang der regelmäßigen Unterweisung der Beschäftigten (§§ 1 Abs. 3 Nr. 3, 12 Abs. 1 S. 2 BetrSichV) zählen insbesondere die nach § 21 Abs. 6 Nr. 1 BetrSichV bekannt gegebenen Regeln und Erkenntnisse. Da ein noch zu entwickelnder Leitfaden ebenfalls unter diesen Begriff fiele, ergäbe sich auch im Rahmen der BetrSichV insoweit kein gesetzlicher Anpassungsbedarf.

8

Zusammenfassung und Bewertung

Im Rahmen des TransHyDE-Verbundprojekts „Norm“ wurde eine umfassende Analyse zur Regelsetzung für den Wasserstofftransport durchgeführt. Ziel war es, den Bestand der technischen Regelwerke für die betrachteten Transportvektoren – Leitung, Gashochdruckbehälter, Flüssigwasserstoff, LOHC und Ammoniak – systematisch zu erfassen, mit Hilfe einer Bedarfsanalyse zu bewerten und daraus konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Darüber hinaus sind die rechtlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf Ammoniak untersucht und Anpassungen formuliert worden. Die formulierten Bedarfe stammen aus dem Jahr 2023 und spiegeln die Wahrnehmung der befragten Stakeholder wider.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Weiter- und Neuentwicklung technischer Regelwerke und die Ausgestaltung pränormativer Forschung, die für den erfolgreichen Wasserstoffhochlauf in Deutschland und Europa unerlässlich ist. Die nachfolgenden Absätze fassen die zentralen Erkenntnisse für jeden der betrachteten Transportvektoren zusammen.

Der **leitungsgebundene Transport** von Wasserstoff ist technologisch weit fortgeschritten und profitiert von jahrzehntelanger Erfahrung im Stadtgas- und Erdgasbereich. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Bedarfsanalyse, dass insbesondere bei der Gasbeschaffenheit, Werkstoffauswahl und technischen Sicherheit weiterer Regelsetzungsbedarf besteht. Die pränormative Forschung sollte sich u. a. auf die Untersuchung der H₂-Readiness bestehender Infrastrukturen, die Materialverträglichkeit (z. B. Kupfer, Dichtstoffe) und die Weiterentwicklung von Detektionsverfahren konzentrieren. Bestehende Regelwerke wie das DVGW-Arbeitsblatt G 260 und das DVGW-Merkblatt G 501 müssen aktualisiert oder durch neue ergänzt werden, um den sicheren Betrieb und die Umstellung auf Wasserstoff zu gewährleisten.

Für den **Transport von Wasserstoff in Gashochdruckbehältern** besteht ein hoher Bedarf an Harmonisierung und Aktualisierung bestehender technischer Regelwerke. Die Bedarfsanalyse zeigt, dass insbesondere die Werkstoffprüfung, Langzeitverhalten unter Wasserstoffeinfluss und Prüfverfahren wie die Schallemissionsprüfung weiterentwickelt werden müssen. Die pränormative Forschung sollte sich u. a. auf die Integration neuer Fertigungsverfahren und die Bewertung von Spannungsrisskorrosion konzentrieren. Die Anpassung der Druckgeräterichtlinie und der TRBS ist notwendig, um den aktuellen Stand der Technik abzubilden und die Sicherheit im Betrieb zu gewährleisten.

Der **Transport von Flüssigwasserstoff** befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Die Bestandsanalyse zeigt Lücken hinsichtlich technischer Regelwerke, insbesondere bei Werkstoffen, Sicherheitssystemen und Schnittstellen. In der Bedarfsanalyse hat sich herausgestellt, dass neben fehlenden organisatorischen Strukturen auch Praxiserfahrungen im Themenfeld fehlen, wodurch aktuell nicht eindeutig identifiziert werden kann, welche technischen Regelwerke im Detail gefordert sind. Weitere pränormative Forschung ist essenziell, um die Grundlagen für Regelsetzung zu schaffen – etwa zur Ortho-/Para-Konversion, zur Werkstoffversprödung bei tiefen Temperaturen und zur sicheren Handhabung beim Transfer.

LOHC-Technologien befinden sich noch nicht in der Marktreife, was sich in der aktuell unspezifischen technischen Regelsetzung widerspiegelt. Die Bedarfsanalyse aus dem Jahr 2023 zeigt, dass insbesondere Definitionen, Sicherheitsanforderungen und Schnittstellenregelungen zu diesem Zeitpunkt fehlten. Einige LOHC-spezifische Regelwerke sind seitdem angepasst oder neuentwickelt worden bzw. befinden sich in Erstellung (vgl. Abschnitt 5.2) und schließen diese identifizierten Lücken in der Regelsetzung. Die pränormative Forschung ist ein zentraler

Hebel für die weitergehende erfolgreiche Standardisierung von LOHC-Technologien. Sie schafft die wissenschaftliche Basis für belastbare, international anschlussfähige technische Regelwerke und unterstützt den Technologiehochlauf durch Sicherheit, Qualität und Akzeptanz. Dahingehend sollte sie sich u. a. auf die Skalierbarkeit der Prozesse, die Werkstoffauswahl und die Integration in bestehende Infrastrukturen konzentrieren. Die DIN SPEC 91437 bietet erste Ansätze, muss jedoch erweitert und nach Möglichkeit international harmonisiert werden. Hierbei sind die unterschiedlichen Thermalölartern zu berücksichtigen, die international Anwendung finden. Politik, Industrie und technische Regelsetzer müssen gemeinsam eine strukturierte Strategie für die Standardisierung im Bereich LOHC entwickeln. Nur durch klare, international abgestimmte technische Regelwerke kann die Technologie sicher und effizient in die Wasserstoffwirtschaft integriert werden.

Ammoniak zeichnet sich als vielversprechender Transportvektor für Wasserstoff ab, insbesondere für internationale Importe und maritime Anwendungen. Die Bedarfsanalyse zeigt, dass trotz bestehender industrieller Infrastruktur erhebliche Regelsetzungslücken bestehen – insbesondere im Hinblick auf die energetische Nutzung, die Werkstoffverträglichkeit und die technische Sicherheit. Die pränormative Forschung sollte sich u. a. auf die Bewertung von Spannungsrisskorrosion sowie die Entwicklung sicherer Schnittstellen und Spülprozesse konzentrieren. Darüber hinaus besteht Bedarf an Leitfäden zur Umrüstung bestehender LNG-Terminals und Rohrfernleitungen sowie zur Standardisierung von Bunkersystemen. Die Übertragbarkeit bestehender Regelwerke aus der Kältetechnik auf neue Anwendungen mit Ammoniak sollte systematisch geprüft und ggf. erweitert werden.

Ammoniak als Kraftstoff sollte in den Kraftstoffkatalog der 10. BImSchV aufgenommen werden. An dieser Stelle könnte sodann auf eine noch zu entwickelnde Kraftstoffnorm für Ammoniak verwiesen werden. Eine gesetzliche Definition von grünem Ammoniak fehlt bislang sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene. Bei einigen festgestellten Bedarfen (z. B. Schulungen) besteht wiederum kein gesetzlicher Anpassungsbedarf.

Die **Gesamtanalyse** zeigt, dass für alle betrachteten Transportvektoren Lücken in der technischen Regelung existieren. Insbesondere für Flüssigwasserstoff, LOHC und Ammoniak besteht ein erheblicher Regelsetzungsbedarf, was auf fehlende Praxiserfahrungen und technische Grundlagen sowie auch fehlende organisatorische Strukturen zurückzuführen ist. Eine gezielte pränormative Forschung, um erforderliche technische Grundlagen zu schaffen und darauf aufbauend Regelwerke zu entwickeln, ist essenziell. Daneben können etablierte Technologien wie Leitungen und Gashochdruckbehälter auf bestehende Strukturen und langjährige Erfahrungen mit anderen Medien zurückgreifen.

Transportvektorübergreifend ist ein erleichterter Zugang zur nationalen, aber auch zur internationalen technischen Regelung erforderlich, da aufgrund von zahlreichen verschiedenen Regelsetzern und Normungsinstituten Wettbewerbsnachteile für den Erwerb von technischen Regelwerken bei finanziell schwächer aufgestellten Akteuren entstehen können. Des Weiteren ist die zeitnahe Initiierung von internationalen Standardisierungsprozessen von hoher Bedeutung, um eine breite Marktakzeptanz zu ermöglichen.

Die enge Verzahnung von Forschung, Industrie und Regelsetzern ist entscheidend, um die Standardisierung voranzutreiben und den Wasserstoffhochlauf erfolgreich zu gestalten. Die Roadmap Norm liefert hierfür eine fundierte Grundlage und zeigt konkrete Handlungsfelder auf.

Literaturverzeichnis

- [1] Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE, "Transport- und Speicherinfrastruktur für grünen Wasserstoff," 2024.
- [2] M. Bäuerle, T. Paintner, D. Schmolke, T. Systemans, W. Kinnen, and T. Jordan, "H₂-Transport- und Speicheroptionen: Normen und technische Regeln," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 96, no. 1-2, pp. 211–219, 2024.
- [3] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. *Regelsetzung und Normung*. [Online]. URL: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/was-wir-tun/regelsetzung>
- [4] Deutsches Institut für Normung e. V. *Grundsätze und Regeln der DIN-Normungsarbeit*. [Online]. URL: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm/grundsaeetze>
- [5] DIN e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., NWB Verein für die Normung und Weiterentwicklung des Bahnwesens e.V., and VDA Verband der Automobilindustrie e.V., "Normungsroadmap Wasserstofftechnologien 2024, year = 2024,,"
- [6] "Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz), §49 Abs. 2 S. 1," 2005.
- [7] DIN e. V. *Normen und standards*. [Online]. URL: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards>
- [8] K. Blind, *Der Gesamtwirtschaftliche Nutzen der Normung - Eine Aktualisierung der DIN-Studie aus dem Jahr 2000*. Berlin: DIN Media, 2011.
- [9] "BGH, Urteil vom 15.10.2008, Az.: VIII ZR 321/07," 2008.
- [10] "BGH, Urteil vom 10.03.1987, Az.: VI ZR 144/86," 1987.
- [11] "BGH, Urteil vom 14.05.1998, Az.: VII ZR 184/97," 1998.
- [12] Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags, "DIN-Normen und Rechtssetzung, Az.: WD 7-3000-198/19, S. 5," Deutscher Bundestag, Berlin, Tech. Rep., 2019.
- [13] M. Nussbaum, "Grund und Grenzen der Rezeption technischer Normen im Technikstrafrecht," *Zeitschrift für Internationale Strafrechtsdogmatik*, pp. 33–45, 2021.
- [14] M. Seibel, "Abgrenzung der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ vom „Stand der Technik“,“ *Neue Juristische Wochenschrift*, pp. 3000–3004, 2013.
- [15] Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags, "DIN-Normen und Rechtssetzung, Az.: WD 7-3000-198/19, S. 7," Deutscher Bundestag, Berlin, Tech. Rep., 2019.
- [16] W. Li, R. Cao, L. Xu, and L. Qiao, "The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels - a review," *Corrosion Communications*, vol. 4, pp. 23–32, 2021.

- [17] S. Lipiäinen, K. Lipiäinen, E. Vakkilainen, and A. Ahola, "Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 80, pp. 31 317–31 329, 2023.
- [18] Nationaler Wasserstoffrat. Wasserstofftransport. [Online]. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02_NWR-Grundlagenpapier_Wasserstofftransport.pdf
- [19] G. Cerbe and B. Lendt, *Grundlagen der Gastechnik; Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung*. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [20] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (2021, 06) DVGW. [Online]. URL: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energiewende/h2-wochen-factsheet-gasnetze-ready-for_h2-dvgw.pdf
- [21] Hydrogen TCP - International Energy Agency. (2023) Technology Collaboration Programme by IEA. [Online]. URL: <https://www.ieahydrogen.org/trl-assessments/>
- [22] Fraunhofer Materials. (2019) Sichere und leichte Hochdrucktanks für Speicherung und Transport von Grünem Wasserstoff. [Online]. URL: <https://www.materials.fraunhofer.de/de/presse/imws---sichere-und-leichte-hochdrucktanks-fuer-speicheru ng-und-t.html>
- [23] J. Friedl and U. Stimming, "Model catalyst studies on hydrogen and ethanol oxidation for fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 101, pp. 41–58, 2013.
- [24] C. Willich, "Hydrogen as an Energy Carrier—An Overview over Technology, Status, and Challenges in Germany," *J*, vol. 7, no. 4, pp. 546–570, 2024.
- [25] S. Z. Al Ghafri, S. Munro, U. Cardella, T. Funke, W. Notardonato, J. P. M. Trusler, J. Leachman, R. Span, S. Kamiya, G. Pearce, A. Swanger, E. D. Rodriguez, P. Bajada, F. Jiao, K. Peng, A. Siahvashi, M. L. Johns, and E. F. May, "Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities," *Energy & Environmental Science*, no. 15, pp. 2690–2731, 2022.
- [26] A. Schiaroli, L. Claussner, A. Campari, D. Cirrone, B. Linseisen, A. Friedrich, E. L. Torres de Ritter, M. Kuznetsov, and F. Ustolin, "A comprehensive review on liquid hydrogen transfer operations and safety considerations for mobile applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 107, pp. 164–182, 2025.
- [27] S. Kikukawa, H. Mitsuhashi, and A. Miyake, "Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 1135–1141, 2009.
- [28] Gestis Stoffdatenbank - Institut für Arbeitsschutz der DGUV. Gestis. [Online]. URL: <https://gestis.dguv.de/data?name=001100>
- [29] K. Nabert, G. Schön, T. Redeker, and F. Flemming, *Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase und Dämpfe Band 1*. Freiberg: Deutscher Eichverlag, 2021.
- [30] K. Nabert, G. Schön, T. Redeker, and F. Flemming, *Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase und Dämpfe Band 2*. Freiberg: Deutscher Eichverlag, 2021.
- [31] M. Xiangyu, Q. Meichao, L. Lizi, C. Zechuan, T. Jiangping, L. Wuqiang, and B. Mingshu, "Investigation of ammonia cracking combined with lean-burn operation for zero-carbon combustion and NO/N₂O/NO₂ improvements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 428, p. 139478, 2023.
- [32] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. David, and P. Bowen, "Ammonia for power," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, pp. 63–102, 2018.
- [33] S. Sun, Q. Jiang, D. Zhao, H. Sha, C. Zhang, and Z. Da, "Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112918, 2022.
- [34] Wasserstoff Leitprojekt „TransHyDE-Helgoland“. (2024) Sicherer und effizienter Wasserstofftransport über große Distanzen mit LOHC. [Online]. URL: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/e7708166-5fc0-11ef-bacd-a0369fe1b6c9/live/document/Sicherer_und_effizienter_Wasserstofftransport_%C3%BCber_gro%C3%9Ffe_Distanzen_mit_LOHC_.pdf
- [35] Hydrogenious, "Hydrogenious," 2024.
- [36] International Energy Agency, "Global Hydrogen Review," 2024.

- [37] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 1089-3:2011-10, Ortsbewegliche Gasflaschen - Gasflaschen-Kennzeichnung (ausgenommen Flüssiggas (LPG)) - Teil 3: Farbcodierung*, Std., 2011.
- [38] Industrieverband Büro und Arbeitswelt e. V. (IBA). iba knowledge. [Online]. URL: <https://iba.online/knowledge/raeume-planen/vorschriften/normungsinstitutionen/>
- [39] ISO. ISO/CD 19870-4: Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the hydrogen supply chain. [Online]. URL: <https://www.iso.org/standard/88689.html>
- [40] DIN. SN EN ISO 24078: Wasserstoff in Energiesystemen - Vokabular (ISO 24078:2025). [Online]. URL: <https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:394557518>
- [41] UNECE. UN Model Regulations Rev. 24 (2025). [Online]. URL: <https://unece.org/transport/dangerous-goods/un-model-regulations-rev-24>
- [42] Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2025) Wasserstoff-Leitprojekte.de. [Online; Zugriff am 29.08.2025]. [Online]. URL: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/transhyde/uebersicht>
- [43] M. Janssen, M. Reger, J. Gorochovsij, U. Lubenau, and P. Damp, "Interviewbasierte Analyse aktueller Entwicklungen zur Wasserstoffqualität," 2024.
- [44] F. Erler, C. Knorr, M. Wiersig, A. Strauß, R. Anghilante, H. Dörr, O.-H. Elhami, N. Janßen, F. Burmeister, and W. Kinnen, "F&E als Grundlage für den Einsatz von Wasserstoff in der Gasversorgung und der Umsetzung in Prüfgrundlagen - F&E für H₂," Bonn, 2024.
- [45] M. Steiner, U. Marewski, and H. Silcher, "DVGW-Projekt SyWeSt H₂: Stichprobenhafte Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf Wasserstofftauglichkeit," Bonn, 2023.
- [46] H. Birch, "Das Haber-Bosch-Verfahren," in *50 Schlüsselideen Chemie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 68–71.
- [47] Weltenergieerat - Deutschland e. V., "Ammoniak als Energieträger für die Energiewende," 2023.
- [48] F. Gillentine and J. T. H. Jr., "Handling of Ammonia," in *Agricultural Anhydrous Ammonia Technology and Use*, 1966, pp. 143–168.
- [49] H. Kaesche, *Die Korrosion der Metalle*. Berlin: Springer, 1979.
- [50] TÜV-Verband e. V., *AD 2000-Merkblatt HP 801 Nr. 14: Besondere Druckbehälter - Druckbehälter in Kälteanlagen und Wärmepumpen*. Berlin: DIN Media GmbH, 2017.
- [51] TÜV-Verband e. V., *AD 2000-Merkblatt HP 801 Nr. 34: Besondere Druckbehälter - Ammoniaklagerbehälteranlagen*. Berlin: DIN Media GmbH, 2016.
- [52] A. O. Gezerman, "Industrial-scale purging of ammonia by using nitrogen before environmental discharge," *International Journal of Industrial Chemistry*, vol. 7, no. 4, pp. 411–418, 2016.
- [53] Manifold Times. (2024, Sep.) DNV on IMO CCC 10 interim guidelines for ammonia and hydrogen as bunker fuel. [Accessed 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/dnv-on-imo-ccc-10-interim-guidelines-for-ammonia-and-hydrogen-as-bunker-fuel/>
- [54] International Association of Classification Societies. IACS withdraws unified requirement UR H1 on control of ammonia releases in ammonia-fuelled vessels. [Accessed 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://iacs.org.uk/news/iacs-withdraws-unified-requirement-ur-h1-on-control-of-ammonia-releases-in-ammonia-fuelled-vessels>
- [55] DNV, "Safe introduction of alternative fuels: Focus on ammonia and hydrogen as ship fuels."
- [56] DNV. (2022, Jan.) DNV selected to lead pioneering ammonia bunkering safety study in Singapore. [Accessed 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.dnv.com/news/2022/dnv-selected-to-lead-pioneering-ammonia-bunkering-safety-study-in-singapore-216787/>
- [57] DNV. (2021, Jul.) New DNV Fuel Ready and Gas fuelled ammonia class notations provide maximum flexibility to tackle shipping's carbon curve. [Accessed 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.dnv.com/news/2021/new-dnv-fuel-ready-and-gas-fuelled-ammonia-class-notations-provide-maximum-flexibility-to-tackle-shipping-s-carbon-curve-203646/>
- [58] DNV. (2025, May) Managing the safe use of ammonia as a marine fuel. [Zugriff am 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/managing-the-safe-use-of-ammonia-as-a-marine-fuel/>

- [59] Manifold Times. (2024, Dec.) DNV: Use of ammonia as a bunker fuel among highlights in IMO MSC 109. [Zugriff am 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/dnv-use-of-ammonia-as-a-bunker-fuel-among-highlights-in-imo-msc-109/>
- [60] Bundesregierung. (2025) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – Wasserstoffstrategie. [Online; Zugriff am 08.07.2025]. [Online]. URL: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Navigation/DE/Wasserstoff/wasserstoffstrategie.html>
- [61] S. H. Spitzer, A. Abed, A. Seifert, and E. Salzano, "Risks from Hydrogen Carriers - Safety Characteristics of the LOHC System Toluene/Methylcyclohexane," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 116, 2025.
- [62] H. van't Noordende, G. Tubben, K. H. Rouwenhorst, and M. Fruytier, "Clean Ammonia Roadmap," 2024.
- [63] Ammonia Energy Association. (2025, Aug.) Ammonia bunkering: Moving from demonstrations to operations. [Accessed 12.08.2025]. [Online]. URL: <https://ammoniaenergy.org/articles/ammonia-bunkering-moving-from-demonstrations-to-operations/>
- [64] Röckinghausen, *Landmann/Rohmer Umweltrecht, 105. Auflage September 2024, 10. BImSchV vor §1 Rn. 2.* München: Verlag C.H.Beck GmbH & Co. KG, 2024.
- [65] Europäische Kommission. (2023, Feb.) Fragen und Antworten zu den delegierten Rechtsakten der EU über erneuerbaren Wasserstoff. [Online; Zugriff am 06.2025]. [Online]. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_23_595/QANDA_23_595_DE.pdf