

## BEITRAG ZUR GANZHEITLICHEN SICHERHEITSFORSCHUNG WASSERSTOFFBASIERTER ENERGIESYSTEME

L. Römer<sup>1</sup>; C. Partmann<sup>1</sup>; W. Lippmann<sup>1</sup>; A. Hurtado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik, Dresden, Deutschland

---

*Mit der fortschreitenden Entwicklung wasserstoffbasierter Energiesysteme geht die Notwendigkeit einher, die neuen Technologiekonzepte hinsichtlich deren Sicherheit zu analysieren und zu bewerten.*

*Ziel des vorliegenden Papers ist daher zunächst die Beschreibung des aktuellen Standes zur Sicherheitsforschung für wasserstoffbasierte Energiesysteme. Die durchgeführte Literaturlauswertung erfolgte mit den Schwerpunkten Analyseziele, Anwendungsbereiche und angewendete Methoden. Durch Unterschiede hinsichtlich dieser Schwerpunkte in der herangezogenen Literatur ist die Vergleichbarkeit und Verknüpfung der Ergebnisse erschwert. Zusätzlich liefern die ausgewerteten Studien gegensätzliche Schlussfolgerungen zur Bewertung der Sicherheit von wasserstoffbasierten Systemen. Eine beispielhafte Gegenüberstellung der Analyse eines Einzelsystems zu der Analyse eines Gesamtsystems verdeutlicht darüber hinaus die Notwendigkeit für ganzheitliche Analysen in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff.*

*Ein einheitliches Fazit zur Sicherheit wasserstoffbasierter Energiesysteme ist anhand der ausgewerteten Studien aufgrund der großen Unsicherheiten und der Widersprüchlichkeiten in den Ergebnissen der Analysen aktuell nicht möglich. Hierfür sind weiterführende Arbeiten erforderlich.*

KEYWORDS: SICHERHEITSFORSCHUNG, WASSERSTOFFTECHNOLOGIE, RISIKOBEURTEILUNG

---

### 1. EINLEITUNG

Wasserstoff bietet, als Energiespeicher, eine zukunftsfähige Alternative zu fossilen Energieträgern [1], da die Erzeugung sowohl regenerativ als auch nachhaltig erfolgen kann und die Einsatzmöglichkeiten vielseitig sind. Die Gründung der Internationalen Partnerschaft für Wasserstoff und Brennstoffzellen in der Wirtschaft (IPHE) im Jahr 2003 mit dem Ziel der Entwicklung einer sicheren und zuverlässigen Wasserstoffinfrastruktur war der internationale Anstoß zur Förderung wasserstoffbasierter Energiesysteme.

Der Erfolg des Vorhabens ist dabei von der gesellschaftlichen Akzeptanz der Technologie abhängig, die maßgeblich von der Sicherheit der Systeme bestimmt wird. Besondere Gefahren im Vergleich zu fossilen Energieträgern [2] liegen durch den großen Zündbereich (4-77 Vol.% in Luft) und die geringe Zündenergie (0,016 mJ) von

Wasserstoff-Luft-Gemischen vor. Die Betriebserfahrungen zu fossilen Energiesystemen reichen deshalb für die Auswahl sicherheitstechnischer Maßnahmen für die Etablierung einer großflächigen Wasserstoffinfrastruktur nicht aus. Erfahrungsbasierte sicherheitstechnische Maßnahmen in Bezug auf derzeitige industrielle wasserstoffbasierte Anwendungen sind aufgrund der Komplexität und Vielfältigkeit des zukünftigen wasserstoffbasierten Energiesystems ebenfalls unzureichend [3]. Für die Zukunftsfähigkeit von Wasserstoff als Energieträger besteht deshalb die Notwendigkeit ganzheitlicher Sicherheitsanalysen zur Auswahl geeigneter Sicherheitsmaßnahmen, die alle Aspekte der Wertschöpfungskette – von der Erzeugung über den Transport und die Speicherung bis hin zur Nutzung des Wasserstoffs – abdecken [4].

## **2. ZIEL UND UMFANG DER LITERATURAUSWERTUNG**

Das Ziel dieser Arbeit ist die Darstellung des Standes der Sicherheitsforschung für wasserstoffbasierte Energiesysteme anhand einer repräsentativen Übersicht zu Sicherheits- und Risikoanalysen.

Zu diesem Zweck wurden veröffentlichte Studien zu Sicherheits- und Risikoanalysen für Wasserstofftechnologien ausgewertet. Die Schwerpunkte der Auswertung waren die Zielsetzungen der Analysen, die Anwendungsbereiche in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff sowie die verwendeten Methoden. Im Rahmen dieser Schwerpunkte wurden die Inhalte und Schlussfolgerungen der veröffentlichten Studien gegenübergestellt und diskutiert, um den Stand der Sicherheitsforschung und relevante Forschungsfelder darzulegen.

## **3. ZIELSETZUNG DER ANALYSEN**

Zur Ermittlung des Standes der Sicherheitsforschung sowie relevanter Forschungsfelder aus dem Schwerpunkt der Zielsetzungen veröffentlichter Analysen wurde die Vorgehensweise bei der Entwicklung sicherheitstechnischer Konzepte für neue Technologien herangezogen. Die Kategorien für die Auswertung sind entsprechend der Schritte dieser Vorgehensweise gewählt und umfassen die Prüfung und Anwendung von Normen und Richtlinien, die Identifikation von Gefährdungen, die Applikation von Methoden zur Analyse und Einschätzung des Risikos sowie die Risikobeurteilung mit Bewertung der implementierten Sicherheitsmaßnahmen.

Der Fokus der ausgewerteten Analysen liegt, wie in Abbildung 1 ersichtlich, auf der Risikobeurteilung von Anwendungen der wasserstoffbasierten Energiesysteme (50%) und der Applikation von Methoden (41%) für die Überprüfung der Anwendbarkeit sowie der Etablierung neuer Methoden. Die Identifikation von Gefährdungen (6%) sowie die

Bewertung von Normen und Richtlinien (3%) stellen dagegen nur vereinzelt Ziele der Analysen dar.

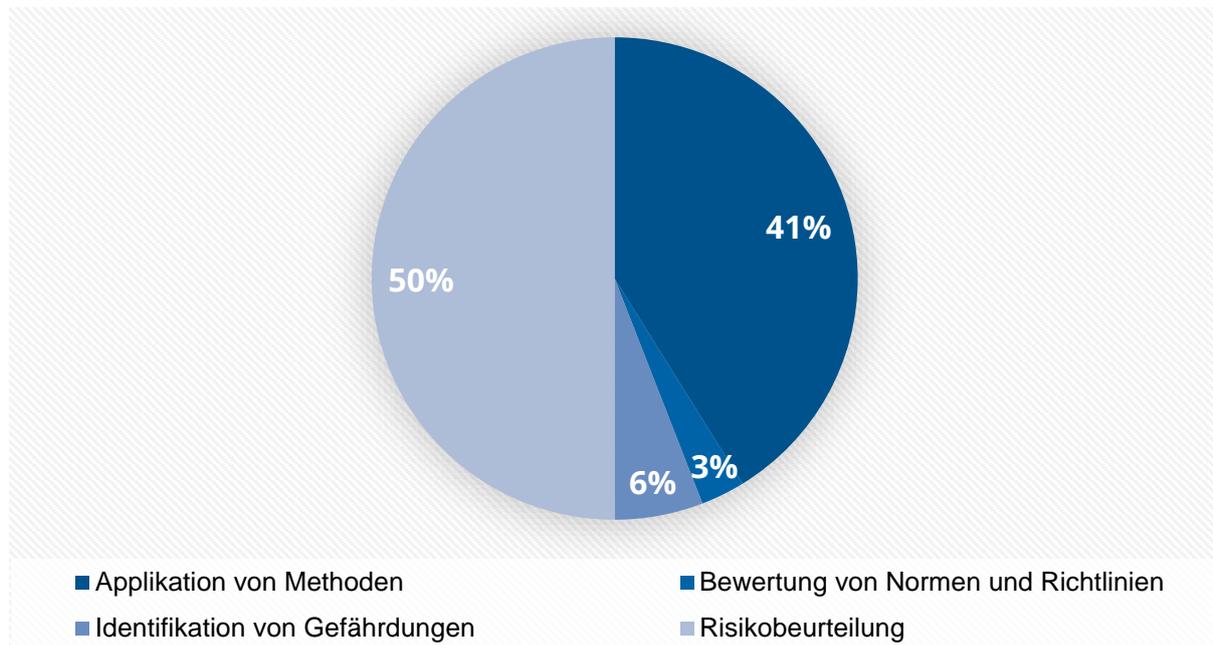


Abbildung 1: Zielsetzungen der ausgewerteten Studien

Mit der Zielsetzung zur Bewertung von Normen und Richtlinien wurden in Studie [5] internationale und nationale Normen und Richtlinien für CNG (Compressed Natural Gas) Tankstellen hinsichtlich deren Anwendbarkeit auf Wasserstofftankstellen bewertet. Bei der Anwendung der Regelwerke traten potentielle Probleme in Erscheinung, aufgrund derer die Entwicklung von Richtlinien für die spezielle Anwendung auf Wasserstofftechnologien erfolgte [5]. Die Überprüfung der Wirksamkeit der Richtlinien wurde anhand von Risikoanalysen und der hieraus ermittelten Sicherheitszonen vorgenommen. Mit der Anwendung der speziell für die Wasserstofftankstelle entwickelten Richtlinien, konnte ein Risiko erreicht werden, das durch den Vergleich der Sicherheitsabstände etablierter Anwendungen als akzeptabel eingestuft wurde [5].

In den ausgewerteten Studien [6] und [7] zur Identifikation von Gefährdungen wurden physikalische und chemische Kenndaten sowie Berechnungen verwendet, um allgemeine Gefährdungen von Wasserstoff zu ermitteln. In der Studie [6] erfolgte zusätzlich die Auswertung historischer Daten zu Unfällen mit Wasserstoff, anhand derer auf Gefährdungen im Umgang mit Wasserstofftechnologien zurück geschlossen wurde.

Aufgrund der geringen Anteile der ausgewerteten Studien mit den Zielsetzungen zur Bewertung von Normen und Richtlinien und der Identifikation von Gefährdungen, ist

für diese Zielsetzungen kein abschließendes Fazit zum Stand der Sicherheitsforschung möglich.

In den Studien zur Applikation von Methoden sind sowohl standardisierte Methoden [8–11] als auch die Entwicklung und Anwendung neuer Methoden wie Functional Modelling, System Hazard Identification Prevention and Prediction (SHIPP) sowie Accidental Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS) [12–16] berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgte eine Applikation von Methoden zur Untersuchung der Eignung für die Unterstützung in Prozessen zur risikobasierten Entscheidungsfindung von Genehmigungsbehörden und Investoren [17–21]. Für die Entscheidungsfindung bieten diese gegenüber den standardisierten Methoden den Vorteil der dynamischen Modellierung komplexer Systeme und Zusammenhänge, durch die eine hohe Transparenz und Flexibilität für risikobasierte Entscheidungen geboten wird [18, 19]. Die neu entwickelten Methoden in den Studien [12, 16] bieten den Vorteil der Transparenz durch detaillierte geometrische Modelle, die eine nachvollziehbare Priorisierung für die Entscheidungsfindung ermöglichen. Für die zuverlässige Anwendung der nicht standardisierten Methoden sind jedoch weitere Entwicklungen notwendig [16, 17, 21]. Die notwendigen Entwicklungen betreffen neben der Methodik auch die Verwendung von spezifischen Daten für Wasserstoff [13]. Die Verfügbarkeit geeigneter Daten führt auch im Falle der standardisierten Methoden zu großen Unsicherheiten der Ergebnisse [8, 9, 11] aus den Risikobeurteilungen. Die Ursache hierfür liegt in der Verwendung von Daten aus der chemischen Industrie [11], die nur bedingt auf die Wasserstofftechnologie anwendbar sind. In allen Bereichen zur Applikation von Methoden für die Risikobeurteilung sind für zuverlässige Analysen demnach weitere Arbeiten notwendig. Aufgrund der Vorteile der neu entwickelten Methoden sollten diese neben den standardisierten Methoden ebenfalls in die Risikobeurteilungen einbezogen werden.

Die Zielsetzung der Risikobeurteilung fokussiert die Bewertung der Technologien, weshalb in den ausgewerteten Studien eine abschließende Bewertung zur Sicherheit der analysierten Komponenten erfolgte. In einigen Studien [4, 11, 14, 19, 22–25] wurden Risikoanalysen als Teilbereich der Risikobeurteilung durchgeführt, in denen Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Identifikation von Szenarien zur Ermittlung des Schadensausmaßes im Vordergrund stehen. In Studien mit umfassenden Risikobeurteilungen [26–30] wurden dagegen die Identifikation von Gefährdungen, die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeit sowie des Schadensausmaßes und die Überprüfung der Wirksamkeit etablierter Schutzmaßnahmen einbezogen. Zusätzlich erfolgte in vergleichenden Risikobeurteilungen eine Gegenüberstellung von wasserstoffbasierten Energiesystemen und fossilen Energiesystemen [31–33] sowie Photovoltaik und Windkraftanlagen [31]. Ein einheitliches Fazit der Studien zur Risikobeurteilung wasserstoffbasierter Energiesysteme liegt nicht vor. Einige der

Studien führten zu keinem konkreten Fazit bezüglich des Risikos der Technologie [5, 11, 14], während in anderen Studien vergleichende Beurteilungen unterschiedlicher Konzepte und eine abschließende Priorisierung [4, 5, 19, 26] vorgenommen wurden. Weitere der ausgewerteten Studien widersprechen sich in der Beurteilung des Risikos als akzeptabel [25, 27, 31, 32] und nicht akzeptabel [23, 28]. In anderen Studien wurde das Risiko der untersuchten Systeme als nicht akzeptabel eingestuft und konnte anhand systemspezifischer Sicherheitsmaßnahmen auf ein akzeptables Niveau gesenkt werden [22, 24, 29, 30, 33]. Eine zuverlässige Aussage zur Sicherheit der Wasserstofftechnologie ist demnach zum aktuellen Stand der Sicherheitsforschung nicht möglich.

#### 4. ANWENDUNGSBEREICHE

Die ausgewerteten Studien zur Sicherheit in wasserstoffbasierten Energiesystemen umfassen unterschiedliche Anwendungsbereiche der Technologie. Die Abdeckung der Wertschöpfungskette von Wasserstoff reicht von der Berücksichtigung der gesamten Infrastruktur über mehrere Teilbereiche bis hin zu Einzelanwendungen.

Die Einordnung von Studien für die Berücksichtigung der Wasserstoffinfrastruktur erfolgt bei der Beurteilung je einer Technologie aus den Bereichen Erzeugung, Transport, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff. Für die übrigen Studien erfolgt die Einordnung entsprechend der berücksichtigten Teilbereiche der Wertschöpfungskette. Die Nutzung von Wasserstoff ist zusätzlich unterteilt in Brennstoffzellensysteme, Wasserstofftankstellen und Mobilität.

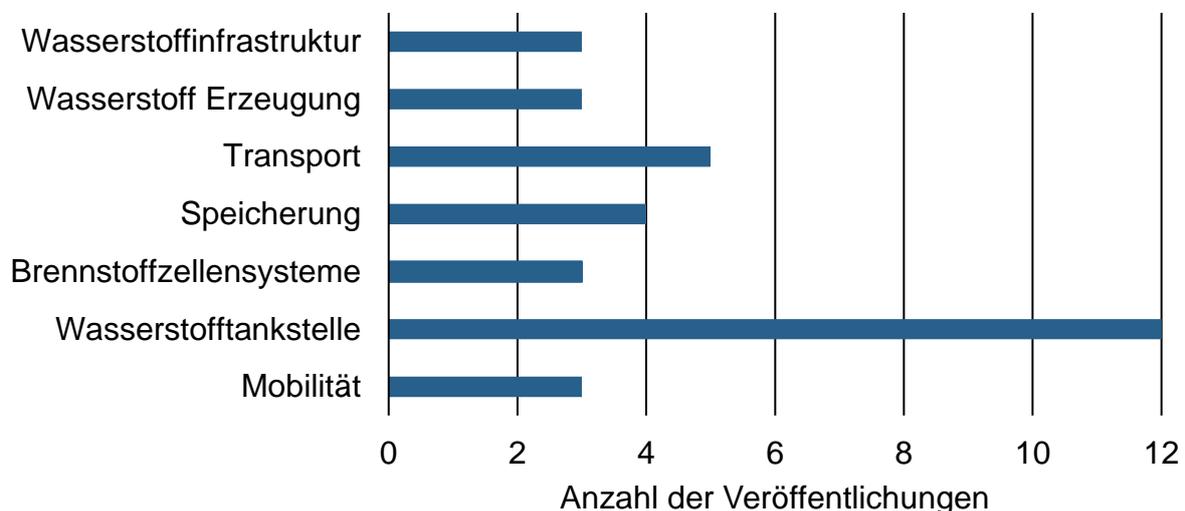


Abbildung 2: Abdeckung der Anwendungsbereiche von Wasserstofftechnologien in Sicherheitsforschungen

Abbildung 2 zeigt die Abdeckung der Anwendungsbereiche in den ausgewerteten Studien zur Sicherheitsforschung in der Wasserstofftechnologie. In drei Studien erfolgten Analysen für eine Wasserstoffinfrastruktur. Zusätzlich wurden die Bereiche Erzeugung von Wasserstoff sowie dessen Nutzung in Brennstoffzellensystemen und der Mobilität in ebenfalls je drei Studien als Einzelsysteme betrachtet. Die Anwendungsbereiche der Speicherung (4 Studien) und des Transports (5 Studien) fanden in der ausgewerteten Literatur mehr Berücksichtigung. Mit insgesamt 12 veröffentlichten Studien liegt der Fokus aktueller Sicherheitsforschungen für die Wasserstofftechnologien jedoch deutlich auf dem Anwendungsbereich von Wasserstofftankstellen.

*Tabelle 1: Aufschlüsselung der Anwendungsbereiche für Wasserstofftechnologien*

<b>Anwendung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Veröffentlichungen</b>
<b>Wasserstoffinfrastruktur</b>	3	[13, 15, 20]
<b>Wasserstoff Erzeugung</b>		
Elektrolyse	1	[22]
Dampfreformierung	2	[10, 26]
<b>Transport</b>		
Pipeline	5	[9, 12, 19, 27, 32]
Tanklastwagen	3	[9, 19, 27]
Güterzug	1	[9]
<b>Speicherung</b>		
Flüssiggasspeicherung	4	[6, 9, 19, 32]
Druckgasspeicherung	4	[6, 9, 19, 32]
<b>Brennstoffzellensysteme</b>	3	[8, 11, 31]
<b>Wasserstofftankstelle</b>		
Tankstelle für Flüssigwasserstoff	3	[14, 21, 23]
Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff	8	[5, 16–18, 24, 25, 29, 30]
Zapfsäule	1	[33]
<b>Mobilität</b>		
Brennstoffzellen Fahrzeug	1	[4]
Fahrzeuginternen Speicher	2	[7, 28]

Eine weitere Aufschlüsselung der Anwendungsbereiche (siehe Tabelle 1) zeigt zusätzlich den Fokus für die Analysen von Wasserstofftankstellen. Dieser liegt mit einer Berücksichtigung von 67% der ausgewerteten Studien auf Tankstellen für gasförmigen Wasserstoff. Zusätzlich erfolgte die Durchführung von Analysen für

Flüssigwasserstoff-Tankstellen und Zapfsäulen für Wasserstoff. Die Fokussierung auf den Anwendungsbereich der Wasserstofftankstellen steht im Zusammenhang mit der Etablierung der Wasserstofftechnologie im gesellschaftlichen Kontext, da die Verfügbarkeit von Wasserstoff zur Nutzung derzeit über diese gewährleistet wird. Für die Anzahl der Wasserstofftankstellen sind deshalb konkrete Steigerungen in den kommenden Jahren geplant. Die Lage der Wasserstofftankstellen erhöht dabei aufgrund dichter Besiedlungen das Schadensausmaß im Falle von Ereignissen wie Feuer oder Explosionen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist im Vergleich zu industriellen Anwendungen zusätzlich erhöht, da die Nutzer keine spezielle Ausbildung für die anzuwendende Technologie oder die Behebung von Störungen besitzen. Aus diesen Gründen ist die Risikobeurteilung von Wasserstofftankstellen von besonderem Interesse, das in dem Fokus der aktuellen Sicherheitsforschung erkennbar ist.

Im Anwendungsbereich des Transports liegt der Fokus der Analysen auf Pipelines. Diese wurden in allen zum Transport veröffentlichten Studien berücksichtigt. In den Analysen wurden sowohl Pipelines als Einzelsysteme als auch im Vergleich mit Tanklastwagen und Güterzügen bewertet. Die Begründung für diesen Fokus liegt in der Möglichkeit zur Umrüstung bestehender Rohrleitungsnetze von Erdgas auf Wasserstoff. Aufgrund des bestehenden Rohrleitungsnetzes bietet diese Möglichkeit eine kostengünstige Alternative für den Transport von Wasserstoff und wird deshalb intensiv verfolgt.

Für die Beurteilung der Sicherheit von Speichertechnologien werden Druckgas- und Flüssiggasspeicher gleichermaßen berücksichtigt und miteinander verglichen. Eine Priorisierung zwischen den Technologien ist demnach nicht zu erkennen. In der Entwicklung befindliche Möglichkeiten zur Speicherung wie LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) sind in den ausgewerteten Studien jedoch nicht berücksichtigt.

In den Anwendungsbereichen der Erzeugung, der Mobilität und der Brennstoffzellensysteme sind aufgrund der geringen Berücksichtigung keine Präferenzen hinsichtlich konkreter Ausführungen festzustellen.

Die Abdeckung der Wertschöpfungskette im Rahmen der Studien zur Wasserstoffinfrastruktur unterscheidet sich deutlich. Während in [15] Auszüge einer Studie zur Untersuchung von Szenarien, bestehend aus insgesamt 15 Einzelanwendungen der Wasserstofftechnologie, veröffentlicht wurden, beschränkt sich die Studie [13] auf Untersuchungen zu der Verknüpfung aus einem Elektrolyseur, Pipelines, einem Speichertank sowie einer Brennstoffzelle. Insgesamt vier Szenarien für Konstellationen aus zentralisierter Dampfreformierung, dezentralisierter Elektrolyse, Druck- und Flüssiggasspeichern sowie dem Transport in Tanklastwagen werden in der Studie [20] hinsichtlich des bestehenden Risikos analysiert und verglichen. Ein Fazit zur Risikobeurteilung der Infrastruktur wird dabei ausschließlich

in [20] gegeben, da die Zielsetzungen in [13, 15] die Applikation einer Methode waren. Durch die unterschiedlichen Zielsetzungen variieren auch die Erkenntnisse, die aus den Studien gewonnen werden können. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse oder gar die Verknüpfung der bewerteten Elemente der untersuchten Infrastrukturen ist nicht möglich.

## 5. VERWENDETE METHODEN

Zu den angewendeten Methoden in der Sicherheitsforschung für wasserstoffbasierte Energiesysteme zählen standardisierte Methoden, die auch in der internationalen Norm IEC 31010 [34] für das Risikomanagement vorgesehen sind. Für die Identifikation von Gefährdungen werden in der Norm unter anderem die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) sowie das HAZOP-Verfahren (Hazard and Operability) genannt. Für eine Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen werden mitunter die Fehlerbaumanalyse (FTA), die Ereignisbaumanalyse (ETA) und Bayes'sche Netze empfohlen. Zur Darstellung der ermittelten Risiken ist unter anderem die Risikomatrix gelistet. Die Verknüpfung der Methoden kann dabei in allen Konstellationen erfolgen.

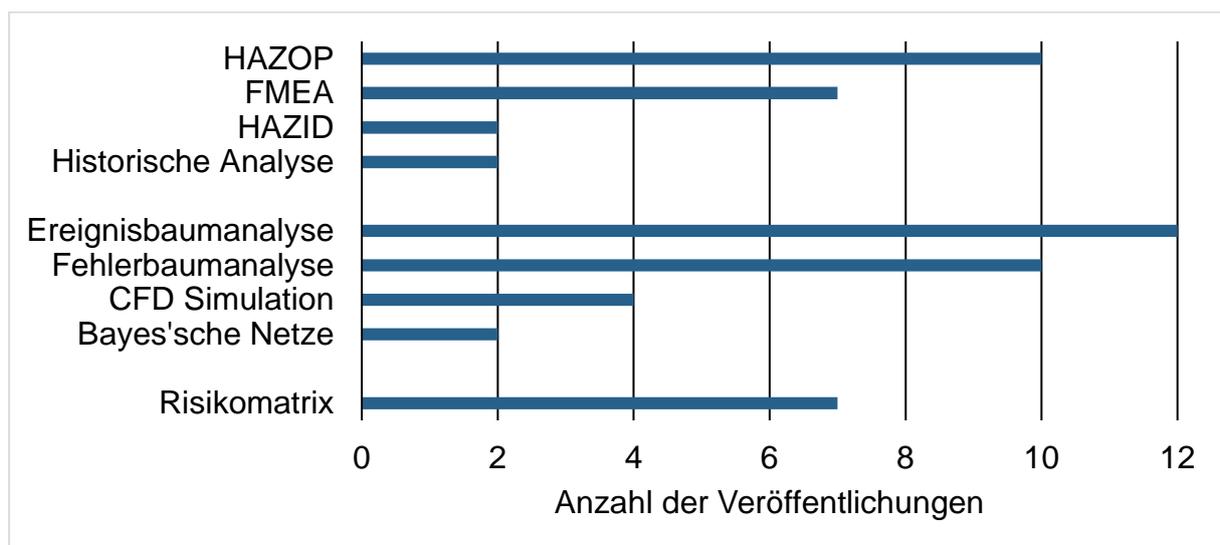


Abbildung 3: Angewendete Methoden zur Risikobeurteilung in den ausgewerteten Studien

Für die Identifikation der Risiken werden, wie in Abbildung 3 zu erkennen, vornehmlich die in der IEC 31010 empfohlenen Methoden HAZOP (10 Studien) und FMEA (7 Studien) verwendet. Deutlich seltener in je nur zwei Studien wurden die Methoden HAZID (Hazard Identification Study) und die historische Analyse, bei der Datenbanken zu Unfällen mit Wasserstoff ausgewertet werden, angewendet. Das HAZOP-Verfahren bietet durch ein Brainstorming mit Leitwörtern, anhand derer die Abweichung von Prozessparametern analysiert wird, die Möglichkeit zur strukturierten Analyse eines

Prozesses. Das HAZID-Verfahren verfolgt ein ähnliches Vorgehen. Im HAZID-Verfahren werden jedoch funktionale Gruppen analysiert, weshalb dieses besonders für die Analyse von Prozessen in der frühen Entwicklungsphase geeignet ist. In späteren Entwicklungsphasen bietet das HAZID-Verfahren jedoch keinen ausreichend Detaillierungsgrad der Ergebnisse, weshalb hierfür die Methoden HAZOP angewendet werden sollte. Die FMEA bietet durch die Ermittlung der Risikoprioritätszahl anhand qualitativ geschätzter Eintritts- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten sowie des Schadensausmaßes zusätzlich die Möglichkeit zur Priorisierung der Gefährdungen und der notwendigen Gegenmaßnahmen.

Die in der IEC 31010 zur Analysen von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen empfohlene Ereignisbaumanalyse ist mit der Anwendung in 12 Studien, die am häufigsten angewendete Methoden in der ausgewerteten Literatur. Im Gegensatz zur mit 10 Studien zahlenmäßig folgenden Fehlerbaumanalyse ermöglicht die ETA eine Analyse von Szenarien, die auf den Eintritt eines unerwünschten Ereignisses folgen. In der FTA dagegen werden die Ursachen für ein unerwünschtes Ereignis ermittelt und logisch verknüpft, wodurch sicherheitstechnische Schwachstellen im System identifiziert werden. Der Fokus der beiden Methoden ist die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, die für die Berechnung des Risikos benötigt werden. Im Rahmen von CFD (Computational Fluid Dynamics) Analysen liegt der Fokus dagegen auf der Bewertung des Schadensausmaßes. Hierfür erfolgt die Simulation von ermittelten Auswirkungen (z. B. Zündung eines Wasserstoff-Luft-Gemisches) unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen. Die ermittelten Faktoren können beispielsweise Tote, Verletzte oder Gebäudeschäden sein. Anhand dieser Methode ist eine spezifische Ermittlung der Auswirkungen hinsichtlich der Menge und der Verbreitung des zu erwartenden Wasserstoffs sowie der Zeitpunkt der Zündung möglich. Die CFD Simulationen wurden mit der Anwendung in vier der ausgewerteten Studien häufiger verwendet als die Bayes'schen Netze, die in zwei der Studien angewendet wurden. Mit Hilfe von Bayes'schen Netzen ist eine Ursache-Wirkung-Verknüpfung und somit die simultane Analyse von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen möglich.

Die Darstellung der Ergebnisse aus den Risikoanalysen erfolgte vornehmlich mit Hilfe von Risikomatrizen. Diese bieten eine übersichtliche tabellarische Darstellung und ermöglichen die Einordnung der Risiken nach dem ALARP-Prinzip (as low as reasonably practicable).

Elf weitere Methoden, die nur in je einer der Studien angewendet wurden, sind in der Auswertung nicht detailliert berücksichtigt.

Der Fokus der verwendeten Methoden zur Risikobeurteilung von wasserstoffbasierten Energiesystemen liegt für die Identifikation der Gefährdungen auf den Methoden

HAZOP und FMEA. Für die Analyse von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen stehen die Fehler- und Ereignisbaumanalysen im Vordergrund. Die Anwendung von nicht standardisierten Methoden kann jedoch auch Vorteile bieten, wie sich anhand der CFD Simulationen zeigt. Verknüpft mit Methoden zur Ermittlung der Auswirkungen, kann anhand der Simulationen das Schadensausmaß für die jeweilige Anwendung unter Berücksichtigung der spezifischen Stoffeigenschaften von Wasserstoff ermittelt werden. Die Verwendung von nicht standardisierten Methoden kann nach deren Evaluierung demnach lohnenswert sein und sollte auch in der zukünftigen Sicherheitsforschung wasserstoffbasierter Energiesysteme Anwendung finden.

## **6. NOTWENDIGKEIT GANZHEITLICHER SICHERHEITSANALYSEN**

Die Auswertung der Literatur verdeutlicht die starken Variationen in der Sicherheitsforschung wasserstoffbasierter Energiesysteme, beginnend mit den verschiedenen Zielsetzungen, die einen Vergleich der Ergebnisse erschweren. Hierzu tragen ebenfalls die verwendeten Methoden bei, deren Ergebnisse sich je nach Fokus auf Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Auswirkungen stark unterscheiden. Für die Abdeckung der Anwendungsbereiche in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff liegt der Fokus klar auf den Wasserstofftankstellen. Nur wenige Studien erheben den Anspruch ganze Infrastrukturketten zu bewerten. Die Notwendigkeit für ganzheitliche Analysen zeigt ein Vergleich zweier Studien [19, 20], die Risikobeurteilungen für Wasserstoffspeicher durchführen und hierbei zu gegensätzlichen Schlussfolgerungen zum Risiko von Flüssiggas- und Druckgasspeichern kommen.

In beiden Studien war die Zielsetzung eine Applikation von Methoden und eine resultierende Risikobeurteilung. Für dieses Ziel wurden in [19] Bayes'sche Netzwerke in [20] dagegen die Methoden FTA, FMEA sowie eine Risikomatrix und Relativ Risk Ranking angewendet. In beiden Studien werden Druck- und Flüssiggasspeicher für Wasserstoff sowie Transportsysteme hinsichtlich des Risikos bewertet. Während in der Studie [19] eine Bewertung der Einzelsysteme und eine anschließende Verknüpfung der Druckgasspeicher mit dem Transport in Tanklastwagen und Pipelines sowie die Verknüpfung von Flüssiggasspeichern mit Tanklastwagen erfolgt, werden die Risikobeurteilungen in [20] nur für die verknüpften Systeme der Wertschöpfungskette von Wasserstoff durchgeführt. Die Verknüpfung der analysierten Systeme ist in Abbildung 4 gezeigt.

Für die Bewertung von Flüssiggasspeichern und dem Transport in Tanklastwagen zieht [19] den Schluss eines höheren Risikos im Vergleich zu dem betrachteten Hochdruckgasspeicher und den Transportmöglichkeiten in Tanklastwagen und

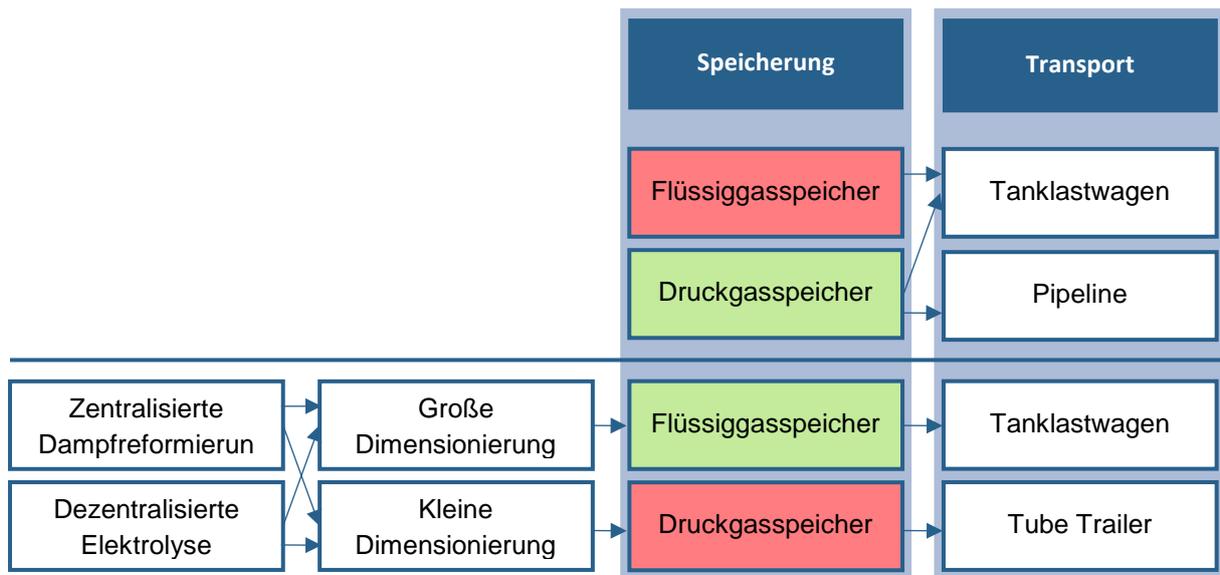


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Risikobeurteilungen für Speichersysteme und deren Verknüpfung in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff in [19] (oben) und [20] (unten); vergleichende Beurteilung in geringstes (grün) und höchstes (rot) Risiko

Pipelines. Für den Vergleich der Transportmöglichkeiten von komprimiertem Wasserstoff bietet der Tanklastwagen die Alternative mit höherer Sicherheit. Die Pipelines bergen jedoch noch immer ein geringeres Risiko als der Transport von verflüssigtem Wasserstoff. Diese Beurteilung zeigt sich sowohl bei der separaten Betrachtung der einzelnen Speicher- und Transporttechnologien als auch in der Analyse der verknüpften Systeme.

Zu dem gegenteiligen Schluss kommt die Studie [20]. Im Kontext einer zentralisierten Dampfreformierung und einer dezentralisierten Elektrolyse wird die Speicherung und der Transport von komprimiertem Wasserstoff als riskanter beurteilt als Flüssiggasspeicher und der Transport von verflüssigtem Wasserstoff in Tanklastwagen. In die Risikobeurteilung der Szenarien geht jedoch nicht ausschließlich der Aggregatzustand von Wasserstoff ein. Auch die zentralisierte Produktion trägt entscheidend zur Beurteilung hinsichtlich des höheren Risikos bei. Bei der zentralisierten Produktion werden die benötigten Wasserstoffmengen an wenigen Orten hergestellt und an den Ort des Bedarfs transportiert. Die großen Mengen am Produktionsort können somit ein enormes Schadensausmaß verursachen, wodurch das Risiko erhöht wird. Darüber hinaus wird das ermittelte Risiko für die untersuchte Wertschöpfungskette von der Möglichkeit beeinflusst, Wasserstoff in verflüssigter Form in größeren Kapazitäten zu speichern und zu transportieren. Die Anzahl der benötigten Anlagen und Fahrzeuge im Vergleich zu komprimiertem Wasserstoff verringert sich durch diese Möglichkeit, wodurch auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten und das daraus resultierende Risiko verringert werden.

Dieser Aspekt gilt auch in den Analysen in [19]. Dennoch gelangt die Studie zu der Erkenntnis, dass der Transport von verflüssigtem Wasserstoff ein höheres Risiko birgt. Diese Beurteilung resultiert aus dem im Vergleich zu [20] höher bewerteten Schadensausmaß von Dampfwolkenexplosionen.

Wie sich anhand dieses Beispiels zeigt, ist die Beurteilung des Risikos eines Einzelsystems nicht immer ausreichend, um die Auswirkungen in einer großflächig verknüpften Infrastruktur berücksichtigen zu können. Bei dem geplanten Vorhaben wasserstoffbasierte Energiesysteme zuverlässig und sicher einzuführen, ist es deshalb notwendig, die Sicherheitsforschung anhand eines ganzheitlichen Ansatzes für die Wertschöpfungskette von Wasserstoff durchzuführen.

## **7. FAZIT**

In dieser Veröffentlichung ist der Stand der Sicherheitsforschung wasserstoffbasierter Energiesysteme anhand von Studien zu Risikoanalysen der Wasserstofftechnologien dargestellt.

Die hinsichtlich der Analyseziele ausgewerteten Studien zeigen einen fortgeschrittenen Stand der Forschung durch die Übertragung der allgemeinen Gefährdungen von Wasserstoff auf spezifische Anwendungen der Technologie. Bedarf für weitere Untersuchungen besteht bei der Abdeckung der Anwendungsbereiche von Wasserstofftechnologien in Risikoanalysen. Aktuell stehen Wasserstofftankstellen im Fokus der Analysen. Für ganzheitliche Sicherheitsanalysen, deren Notwendigkeit anhand des Vergleichs der Studien [19] und [20] deutlich wird, ist eine breitere Abdeckung und die Verknüpfung der Einzelsysteme notwendig. Für die Risikobeurteilungen sollten zudem nicht ausschließlich bereits standardisierte Methoden angewendet werden. Auch nicht standardisierte Methoden wie die CFD Simulation bieten effektive Möglichkeiten die spezifischen Stoffeigenschaften von Wasserstoff in den Risikobeurteilungen zu berücksichtigen.

Ein einheitliches Fazit zur Sicherheit wasserstoffbasierter Energiesysteme ist aufgrund der großen Unsicherheiten und der Widersprüchlichkeiten in den Ergebnissen der Analysen jedoch noch nicht möglich. Hierfür sind weiterführende Arbeiten erforderlich.

## **8. DANKSAGUNG**

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben ist Bestandteil des Verbundprojektes „INES“ und wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0731B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Dokumentes liegt bei den Autoren.

**9. LITERATURVERZEICHNIS**

- 1 Najjar YSH.: Hydrogen safety: The road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013; (38): 10716–10728
- 2 Crowl DA.; Jo Y-D.: The hazards and risks of hydrogen. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2007; (20): 158–164
- 3 Pasman HJ.: Challenges to improve confidence level of risk assessment of hydrogen technologie. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 2407–2413
- 4 Rodionov A.; Wilkening H.; Moretto P.: Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 2398–2406
- 5 Kim E.; Lee K.; Kim J.; Lee Y.; Park J.; Moon I.: Development of Korean hydrogen fueling station codes through risk analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 13122–13131
- 6 Rigas F.; Sklavounos S.: Evaluation of hazards associated with hydrogen storage facilities. *International Journal of Hydrogen Energy* 2005; (30): 1501–1510
- 7 Utgikar VP.; Thiesen T.: Safety of compressed hydrogen fuel tanks: Leakage from stationary vehicles. *Technology in Society* 2005; (27): 315–320
- 8 Placca L.; Kouta R.: Fault tree analysis for PEM fuel cell degradation process modelling. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 12393–12405
- 9 Moonis M.; Wilday AJ.; Wardman MJ.: Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society. *Process Safety and Environmental Protection* 2010; (88): 97–108
- 10 Mohammadfam I.; Zarei E.: Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015
- 11 Collong S.; Kouta R.: Fault tree analysis of proton exchange membrane fuel cell system safety. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015; (40): 8248–8260
- 12 Lins PHC.; Almeida AT de.: Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; (37): 13545–13554
- 13 Duclos A.; Proust C.; Daubech J.; Verbecke F.: Engineering safety in hydrogen-energy applications
- 14 Al-shanini A.; Ahmad A.; Khan F.: Accident modelling and safety measure design of hydrogen station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014; (39): 20362–20370

- 15 Markert F.; Marangon A.; Carcassi M.; Duijm NJ.: Risk and sustainability analysis of complex hydrogen infrastructures. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; (42): 7698–7706
- 16 Skjold T.; Siccama D.; Hisken H.; Brambilla A.; Middha P.; Groth KM.; LaFleur AC.: 3D risk management for hydrogen installations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016
- 17 LaChance J.: Risk-informed separation distances for hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009; (34): 5838–5845
- 18 Haugom GP.; Friis-Hansen P.: Risk modelling of a hydrogen refuelling station using Bayesian network. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 2389–2397
- 19 Pasma HJ.; Rogers WJ.: Risk assessment by means of Bayesian networks: A comparative study of compressed and liquefied H<sub>2</sub> transportation and tank station risks. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; (37): 17415–17425
- 20 Kim J.; Lee Y.; Moon I.: An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 6387–6398
- 21 LaFleur AC.; Muna AB.; Groth KM.: Application of quantitative risk assessment for performance-based permitting of hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; (42): 7529–7535
- 22 Kasai N.; Fujimoto Y.; Yamashita I.; Nagaoka H.: The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016; (41): 13308–13314
- 23 Kikukawa S.; Mitsuhashi H.; Miyake A.: Risk assessment for liquid hydrogen fueling station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009; (34): 1135–1141
- 24 Kikukawa S.; Yamaga F.; Mitsuhashi H.: Risk assessment of hydrogen fueling stations for 70 MPa FCVs. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008; (33): 7129–7136
- 25 Casamirra M.; Castiglia F.; Giardina M.; Lombardo C.: Safety studies of a hydrogen refuelling station: Determination of the occurrence of the accidental scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009; (34): 5846–5854
- 26 Zhiyong L.; Xiangmin P.; Jianxin M.: Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 4079–4086
- 27 Jafari MJ.; Zarei E.; Badri N.: The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; (37): 19241-19249

- 28** Gye H-R.; Seo S-K.; Bach Q-V.; Ha D.; Lee C-J.: Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; (44): 1288–1298
- 29** Dadashzadeh M.; Kashkarov S.; Makarov D.; Molkov V.: Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; (43): 6462–6475
- 30** Gerboni R.; Salvador E.: Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis. *Energy* 2009; (34): 2223–2229
- 31** Spada M.; Burgherr P.; Rouelle PB.: Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; (43): 9470–9481
- 32** Rosyid OA.; Jablonski D.; Hauptmanns U.: Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007; (32): 3194–3200
- 33** Hirayama M.; Shinozaki H.; Kasai N.; Otaki T.: Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018
- 34** International Electrotechnical Commission. IEC 31010, Risk management - Risk assessment techniques; ICS 03.100.01, 2019