

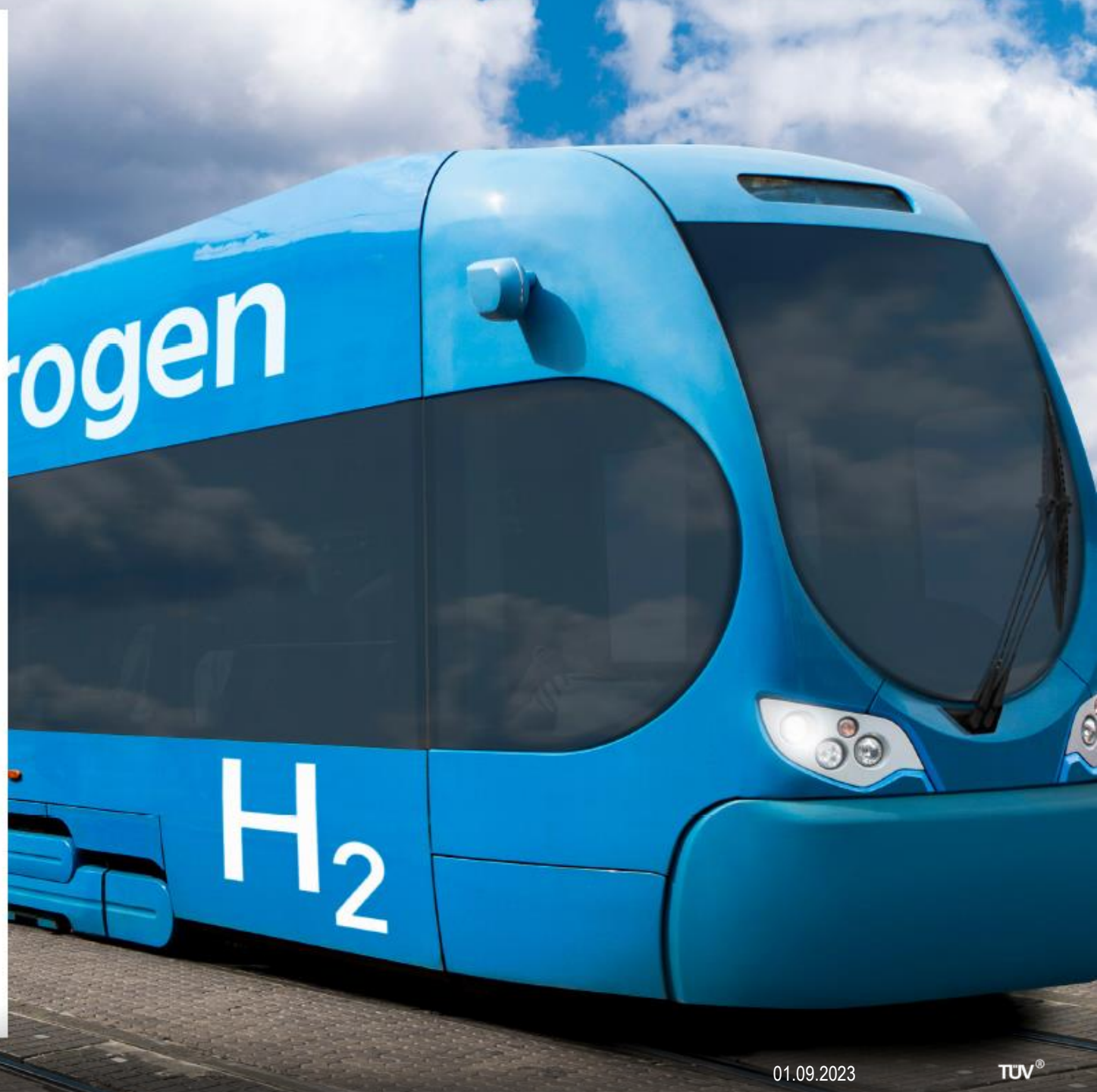


Add value.  
Inspire trust.

# Alternative Antriebe mit Wasserstoff bei Schienenfahrzeugen

**Was muss bei der Übernahme kraft-  
fahrzeugspezifischer Anforderungs-  
kriterien beachtet werden?**

Berlin, den 05.09.2023  
Tolga Wichmann



# TÜV SÜD auf einen Blick

Wenn Sie sich für TÜV SÜD entscheiden, unterstützt Sie ein engagiertes Team globaler Experten bei der Risikosteuerung und dem Zugang zu globalen Märkten durch ein umfassendes Portfolio an technischen Möglichkeiten.

- Unser Logo wird weltweit als unabhängiges und objektives Symbol für Sicherheit und Nachhaltigkeit respektiert.
- Die TÜV SÜD-Prüfzeichen und -Zertifikate stehen für die Zertifizierung durch eine weltweit anerkannte Organisation, während unsere Personenzertifikate unseren Kunden größere Marktchancen eröffnen.



**1** - ALLES  
AUS EINER  
HAND

**150 +**  
JAHRE SICHERHEIT  
UND NACHHALTIGKEIT

**1.000 +**  
STANDORTE  
WELTWEIT

**25.000+**  
MITARBEITER

**€ 2,7**  
MILLIARDEN  
JAHRESUMSATZ



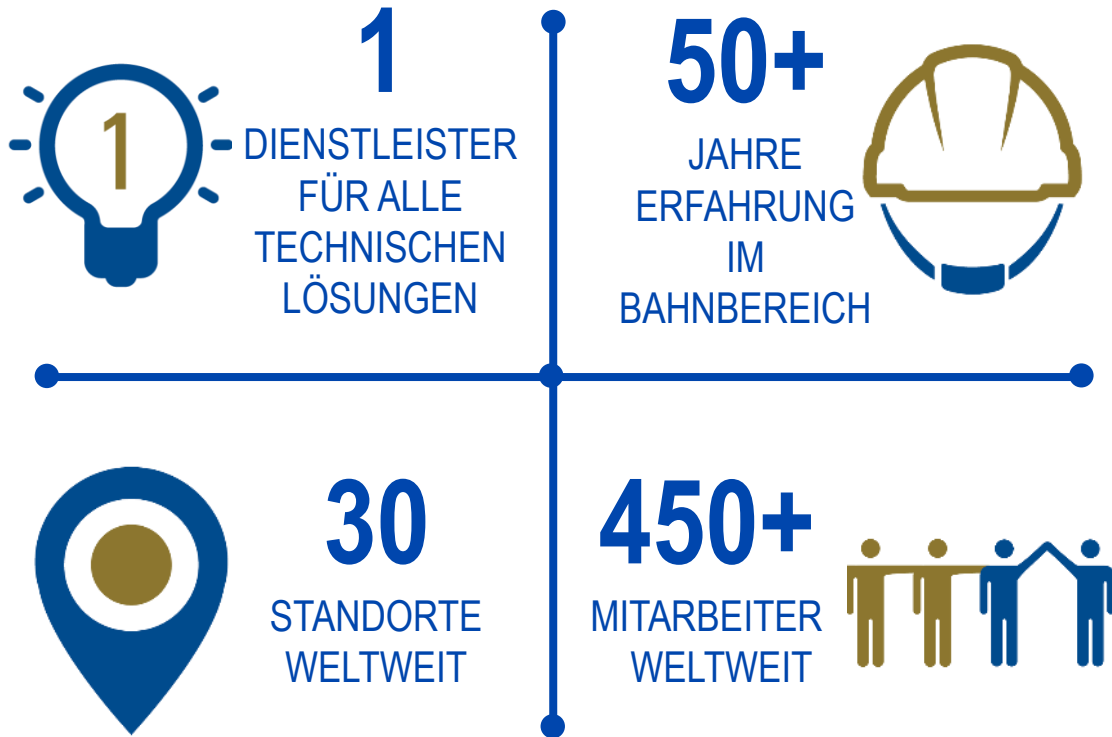
**100 %**  
UNABHÄNGIG  
UND OBJEKTIV

**55.000**  
SYSTEMZERTIFIKATE

**500.000**  
PRODUKTZERTIFIKATE

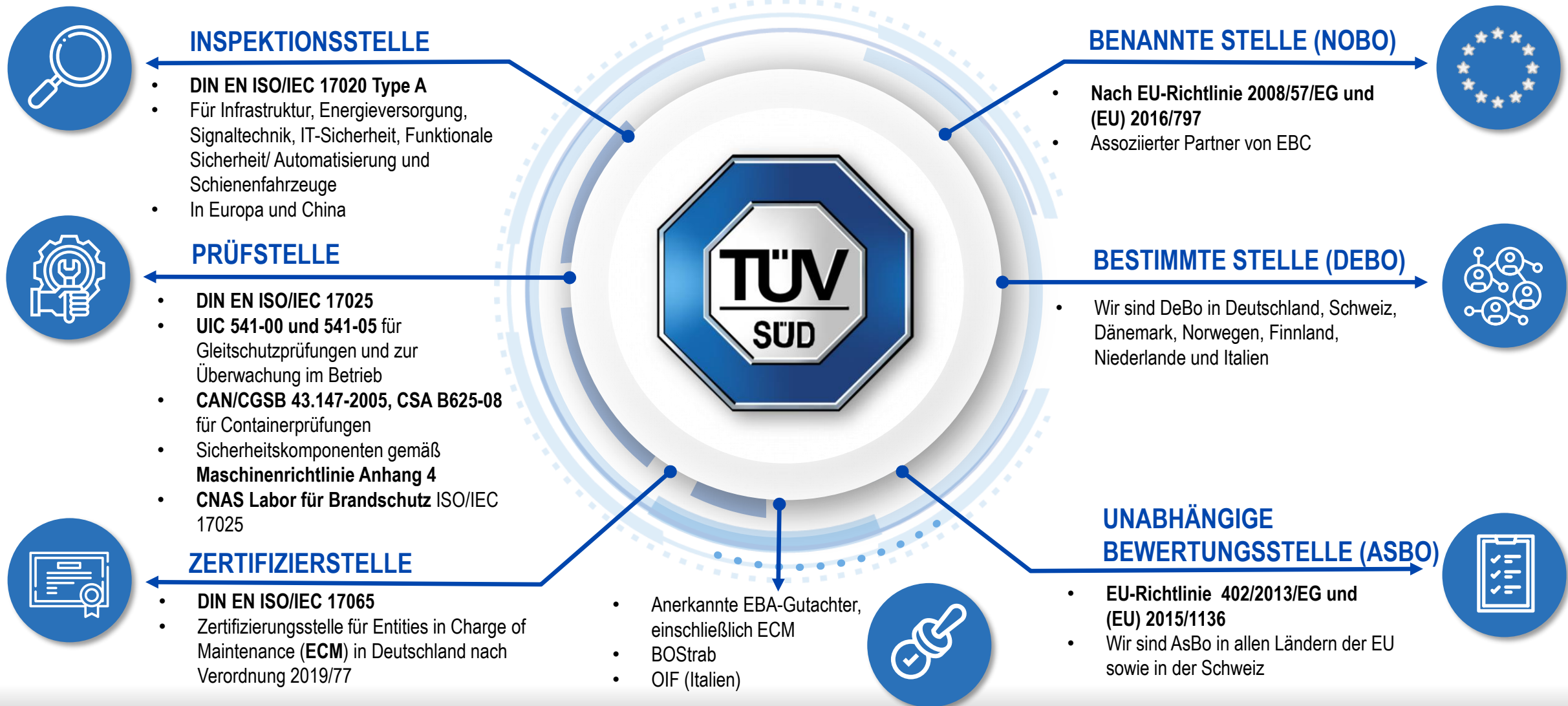
**55.000**  
PERSONENZERTIFIKATE

# TÜV SÜD Rail





# Unsere Akkreditierungen und Anerkennungen



# Unsere Hydrail Kompetenz auf einen Blick



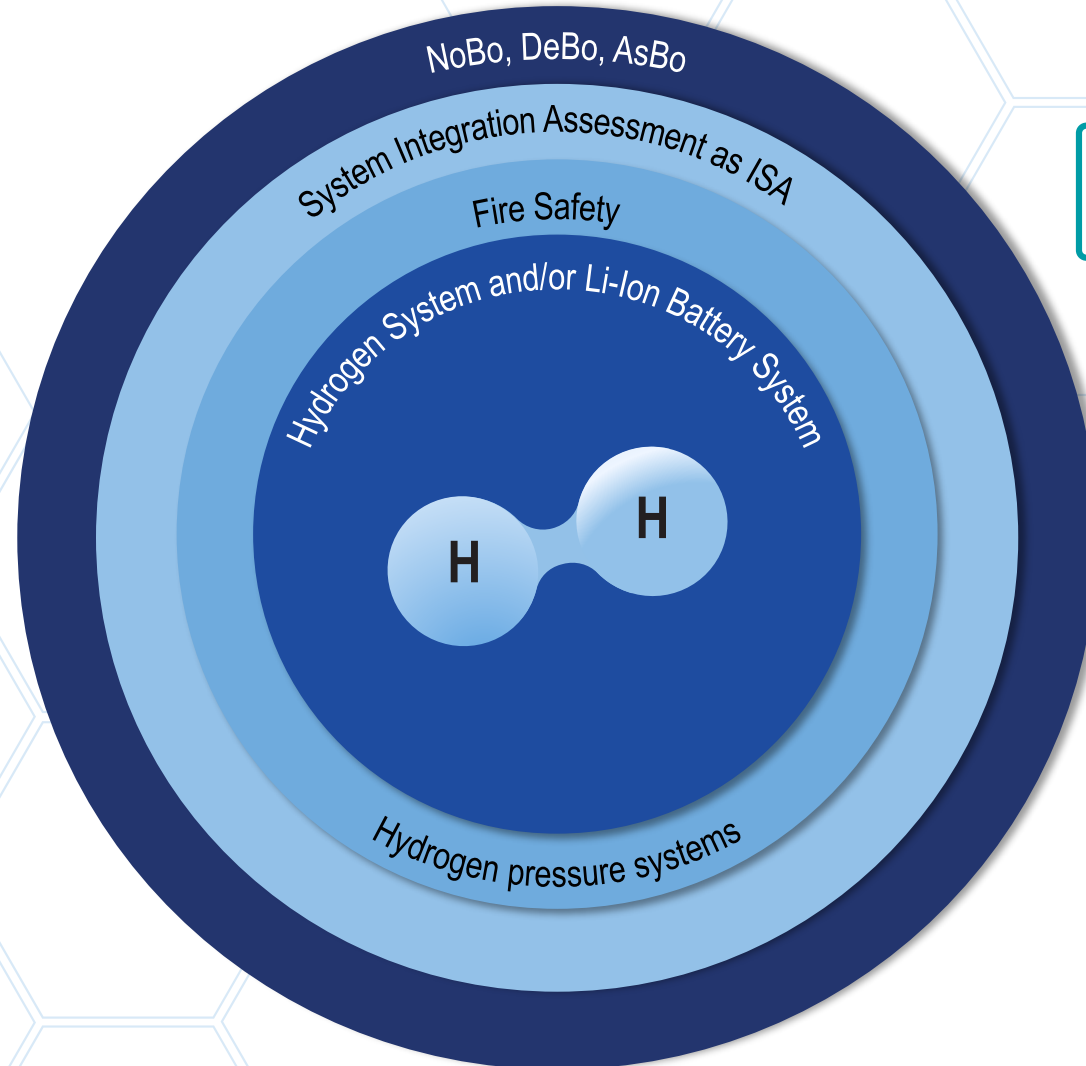
## Rail Assessment

- Rolling Stock Independent Safety Assessor (ISA)
- Check of hazard analyses
- Overall/System Integration Assessment
- Notified Body (NoBo), Designated Body (DeBo), Assessment Body (AsBo)



## Battery testing

- Battery abuse testing
- Certification



## Specific hydrogen services

- H<sub>2</sub>-Component testing, inspection and certification
- H<sub>2</sub>-Infrastructure inspection and certification
- H<sub>2</sub>-Automotive component and vehicle homologation



## Additional services

- Training, seminars and workshops
- Moderation of risk analyses

# FCH2RAIL – Legislative Gap Analysis

- TÜV SÜD wurde von CAF als Independent Safety Assessor (ISA) und unabhängige Bewertungsstelle (AsBo) für die Bewertung des FCH2RAIL CIVIA H2 Demonstrators beauftragt, der aktuell einen einjährigen Probebetrieb auf der iberischen Halbinsel durchführt
- Im Rahmen dieses Auftrages hat TÜV SÜD eine [Legislative-Gap-Analysis](#) (LGA) erstellt, die auf dem Gefährdungslogbuch und den aktuellen europäischen Regelwerken und Normen basiert, die für alternative Antriebe bei Schienenfahrzeugen anwendbar sind
- Diese LGA soll als Grundlage für EU-Gesetzgebungs- und Normungsaktivitäten in diesem Bereich dienen → und diene als Grundlage für diesen Vortrag

Abbildungen: CAF

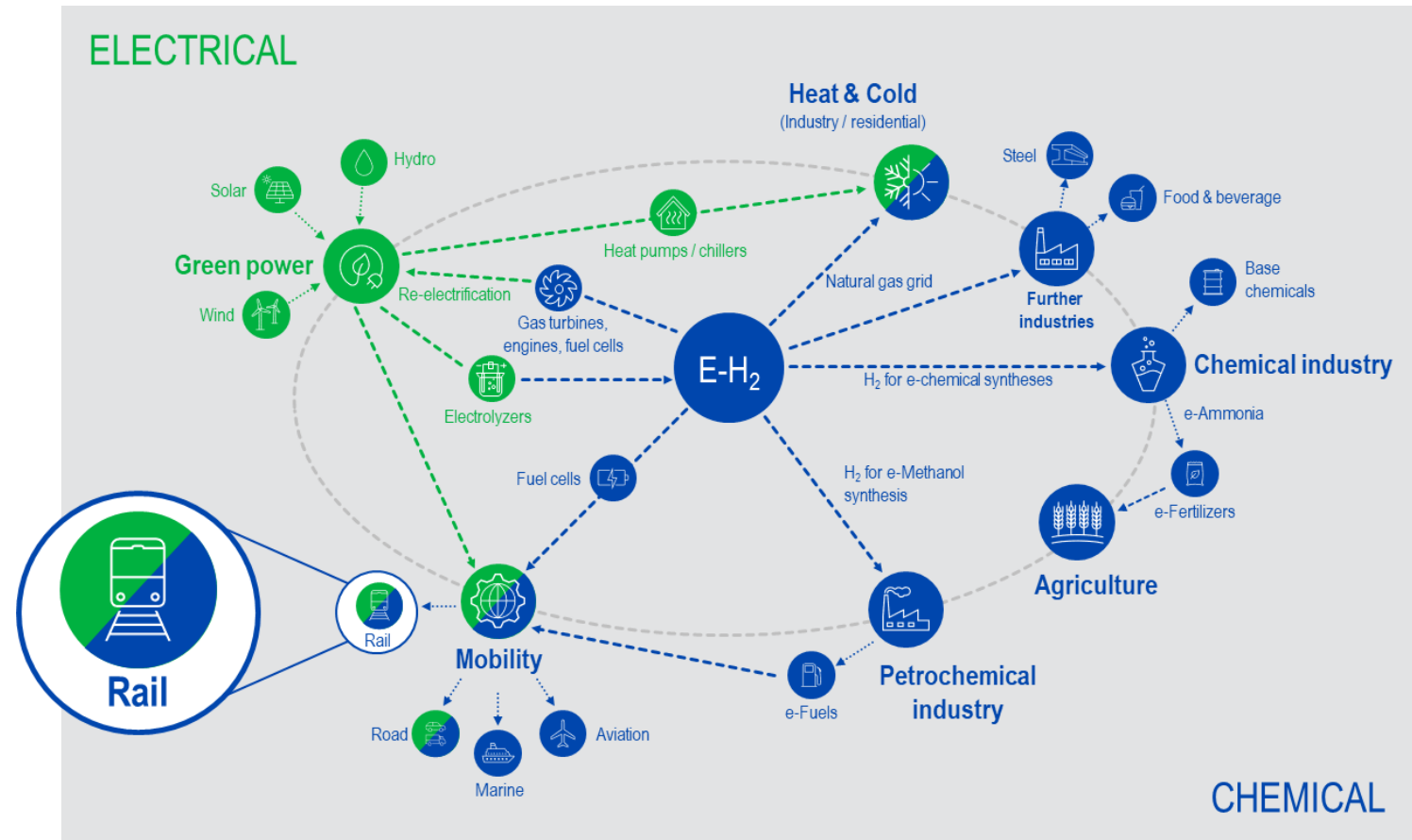


## Projektbilder



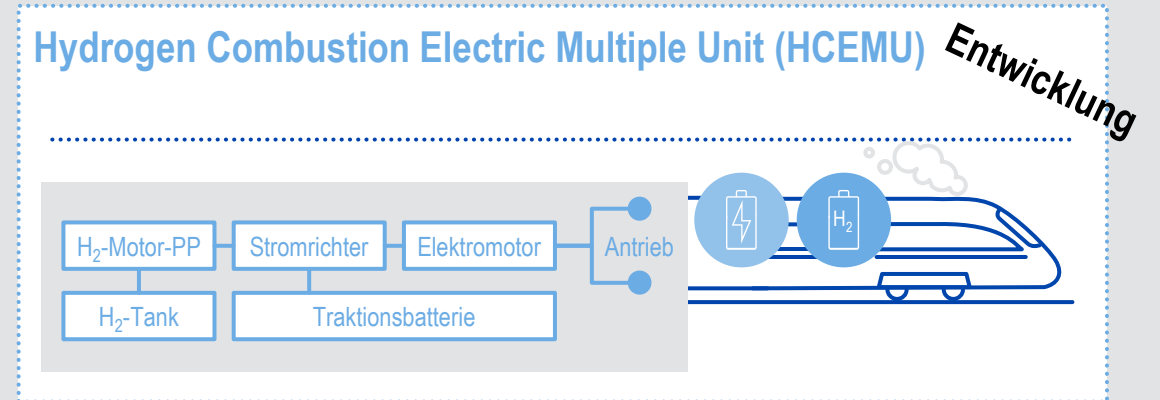
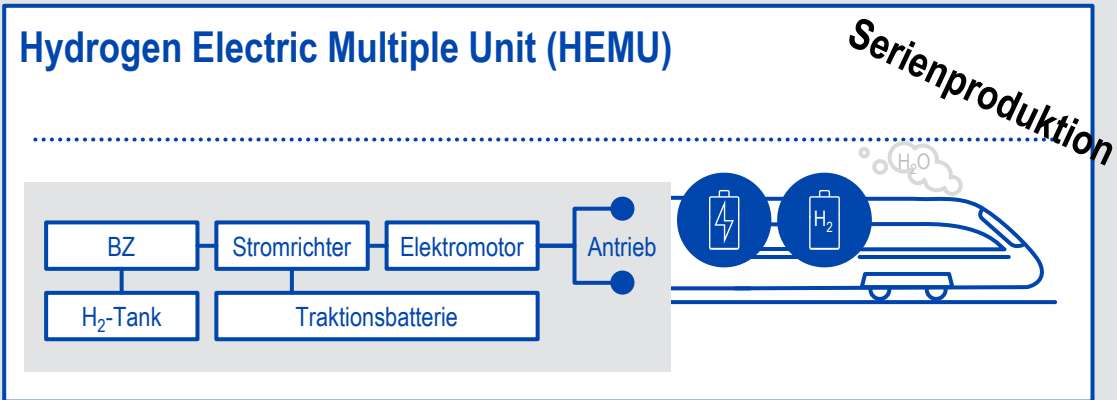
# Schienenfahrzeuge mit Wasserstoffantrieben bleiben eine Nische

- In einer fossilfreien Wirtschaft wird der Mobilitätssektor, insbesondere der Straßen- und Schienenverkehr, künftig in erster Linie **zwei** fossilfreie Energieträger nutzen: **Strom**, **Wasserstoff** oder beide.
- Verglichen mit der Marktgröße des Straßen-, Schiffs- und Luftverkehrs werden Wasserstoffzüge in Bezug auf die Gesamtproduktionszahlen eine Nische bleiben.
- Daher müssen die Synergien zwischen diesen Sektoren, insbesondere zwischen dem Straßen- und dem Schienenverkehr, genutzt und weiter ausgebaut werden!





# Stand der Technik bei Schienenfahrzeugen mit Wasserstoff



- Druckwasserstoffspeichersysteme speichern den Wasserstoff bei einem Nenndruck von 350 bar, in für die Kraftfahrzeuganwendung entwickelten Typ 3 oder Typ 4-CFK-Verbundbehältern
- Brennstoffzellen basieren überwiegend auf Stackmodulen aus der Kraftfahrzeuganwendung, die speziell für die Anwendung im Schienenverkehr angepasst werden
- Wasserstoffverbrennungsmotoren basieren auf adaptierten Dieselmotoren aus dem Nutzfahrzeugbereich, die in ein PowerPack integriert werden



# Wer bewertet Wasserstoffsysteme im Rahmen der Zulassung?

## Grundlegende Anforderungen:

Sicherheit, Zuverlässigkeit und Betriebsbereitschaft, Gesundheit, Umweltschutz, Technische Kompatibilität, Zugänglichkeit  
(Richtlinie 2016/797)

### TSI:

LOC&PAS, SRT, ENE, etc. stellen unter Einbeziehung der verpflichtenden und freiwilligen (harmonisierten) Normen **keine wesentlichen Anforderungen** an die fahrzeugseitige Energiebereitstellung mit oder ohne Wasserstoff

**Benannte Stelle**  
(NoBo)



### NNTR:

stellen in Deutschland (und weiteren Ländern) gegenwärtig keine wesentlichen Anforderungen an die fahrzeugseitige Energiebereitstellung bzw. Wasserstoffkomponenten

**Bestimmte Stelle**  
(DeBo)



**Sonstige EU Richtlinien:**  
**Sonstige nationale Gesetze oder Verordnungen**

**Sonstige Normen:**

TPED, PED, ProdSG, DGV, OrtsDruckV, RID, BetrSichV, AD 2000, etc.

§§§

**Gesamtsicherheitsniveau des Bahnsystems in der EU darf grundsätzlich nicht verschlechtert werden** (Richtlinie 2016/798)



**Unabhängige Bewertungsstelle**  
(AsBo)

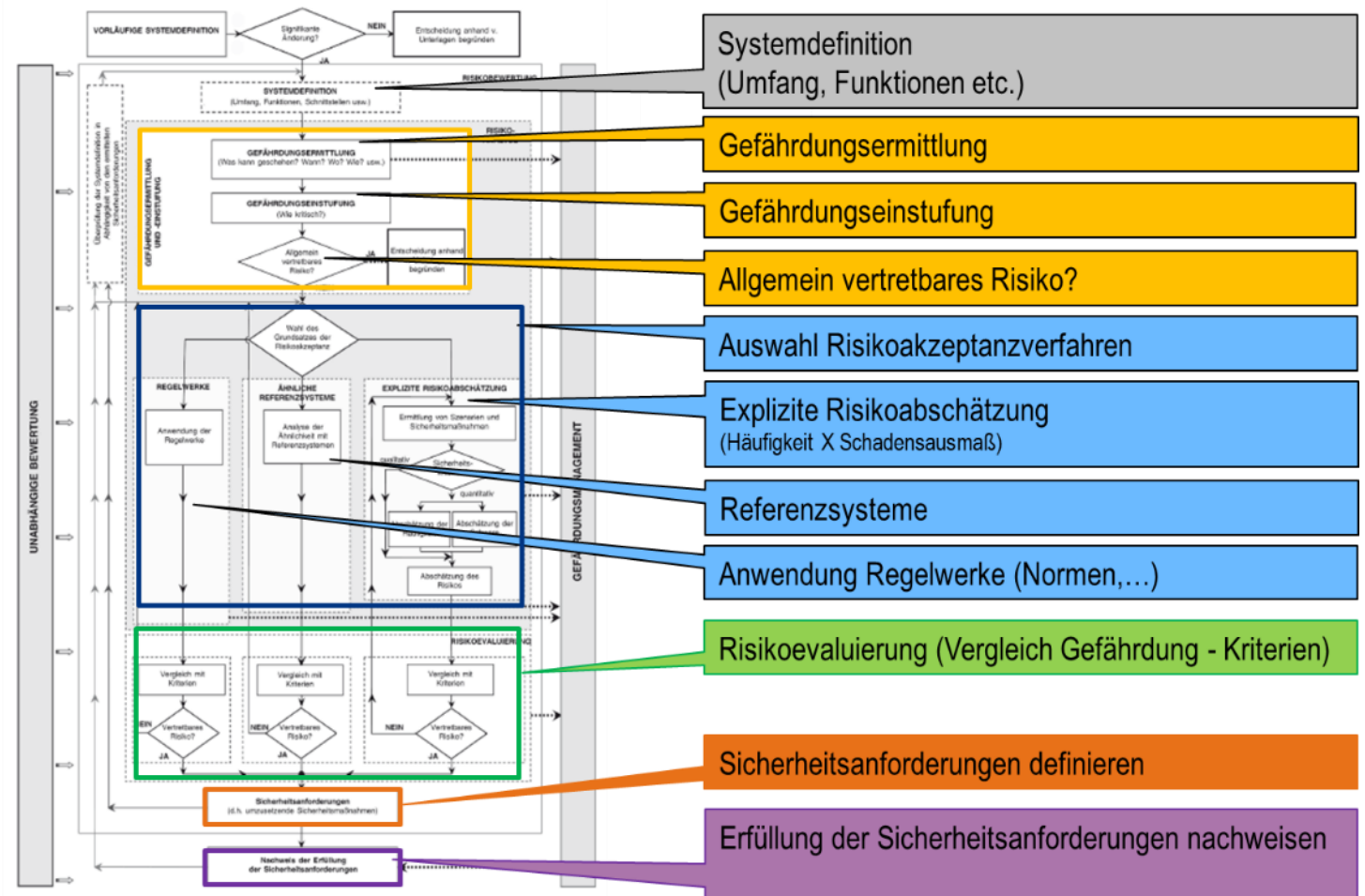


# CSM-VO – Vorteil für die Bahnindustrie!

- Der **Vorschlagende** (Fahrzeughersteller) identifiziert jene Gefährdungen, für deren Begrenzung kein geeignetes Bahn-Regelwerk vorliegt oder bestehende regulative Anforderungen nicht zur Anwendung kommen können bzw. sollten und definiert geeignete Maßnahmen zur Begrenzung auf ein akzeptables Restrisiko, z.B. unter Anwendung von Kfz-Standards
- Der **AsBo** bewertet die korrekte Anwendung des Sicherheitsmanagement Prozesses gemäß CSM 402/2013 und plausibilisiert die Inhalte

→ Ermöglicht Innovationen auf der Schiene auch vor der Entstehung anerkannter Regeln der Technik (aRdT)!

Abbildung: CSM-VO



# Unterschiede zwischen Straßen- und Schienenfahrzeugen

## Straßenfahrzeuge



- Dünne physische Barrieren aus Metall und Kunststoff für die Karosserie
- Manuelle Lenkung auf einer Fahrbahn
- Schutz vor Kollisionen, die hauptsächlich auf den Verkehrsregeln, der menschlichen Wahrnehmung und physischen Reaktionsfähigkeit des einzelnen Fahrers beruhen
- Hohe Wahrscheinlichkeit, dass bei schweren Unfällen Tanks beschädigt werden und flüssige Kraftstoffe auslaufen
- Begrenzte Materialanforderungen an das Brand- und Rauchverhalten von Materialien sowie eine Brandeindämmung



## Schienenfahrzeuge



- Solide Fahrzeugstruktur aus Stahl- oder Aluminiumprofilen sowie Isolierung und Verkleidung
- Schienen- / spurgeführtes System
- Fahrdienstleiter, Leitzentrale / Stellwerkseinrichtungen und sicherheitsnachgewiesene Zugsicherungs- und Signalsysteme zur Verhinderung von Kollisionen
- Zusammenstöße mit anderen Zügen führen in der Regel nicht zu Bränden
- Hohe Brand- und Rauchanforderungen an Materialien sowie an Brandschotts





# Merkmale des Wasserstoffspeichers im Vergleich

		
H <sub>2</sub> -Speicherkapazität	Kfz: 10 – 40 kg, Lkw: <100 kg	<b>bis zu 500 kg</b>
Lebensdauer	15 – 20 Jahre	<b>min. 30 Jahre</b>
Füllzyklen	5.000 – 10.000	<b>bis zu 20.000</b>
Füllvorgänge pro Tag	Kfz: ca. 1x/Woche, Lkw: ca. 1x/Tag	<b>bis zu 2x/Tag</b>
Erwartete Füllzeiten	5 bis 10 min	<b>15 bis 30 min</b>
Anzahl von Abblasventilen	2 bis 10 Stück	<b>bis zu 100 Stück</b>

# UNECE R134 Zulassungstests für Behälter

## Wasserstofftanks für Kraftfahrzeuge

### Ermittlung der Vergleichskennzahlen

Vergleichswert des erstmaligen Berstdrucks  
( $\geq 788$  bar bei 350 bar-Behältern)

Vergleichswert der erstmaligen Druckzyklus-Lebensdauer  
(22.000 bis 30.000 Zyklen)

### Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (Prüfsequenz)

Druckprüfung

Fall-(Stoß-)Prüfung

Oberflächenschaden

Chemische Einwirkung und Druckzyklus bei Umgebungstemperatur

Statische Druckprüfung bei hohen Temperaturen

Druckzyklus bei extremen Temperaturen

Prüfung verbleibender Druck

Prüfung verbleibender Berstdruck

### Überprüfung der zu erwartenden Leistung auf der Straße (Prüfsequenz)

Druckprüfung

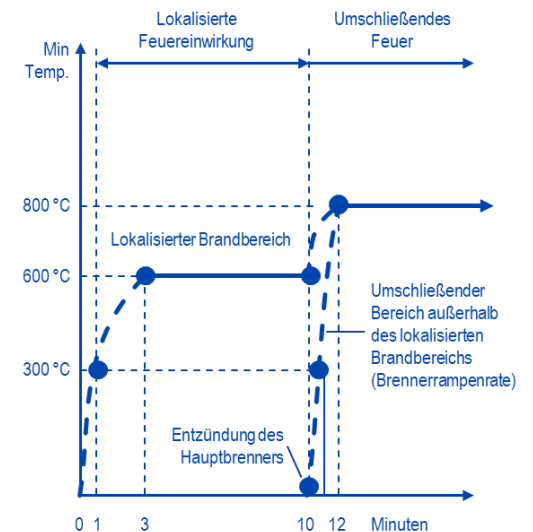
Zyklische Gasdruckprüfung bei Umgebungstemperatur und extremen Temperaturen (pneumatisch) I + II

Leckage- und Permeationsprüfung für statischen Gasdruck bei extremen Temperaturen (pneumatisch) I + II

Prüfung verbleibender Druck

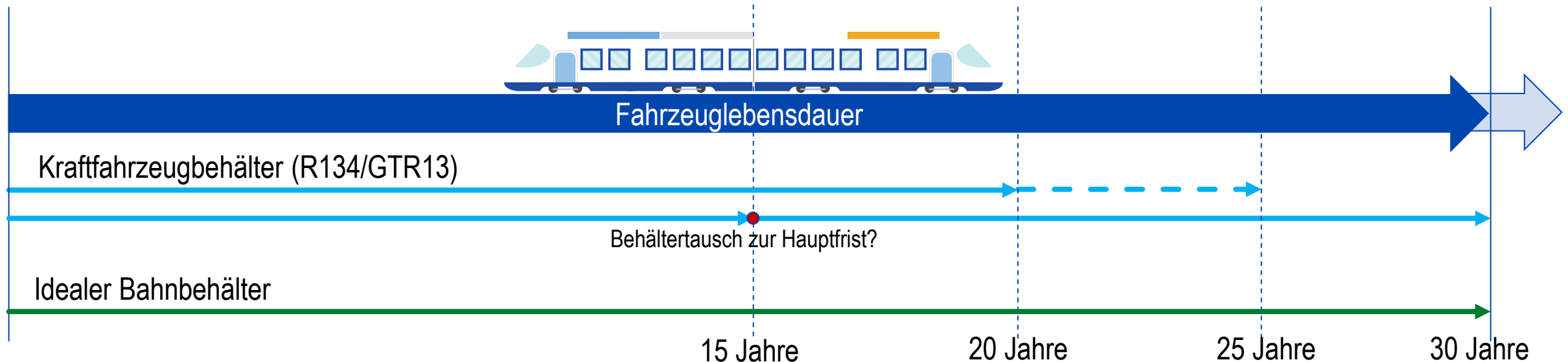
Prüfung verbleibender Berstdruck

### Überprüfung der Leistung des Betriebsabbruchsystems im Brandfall



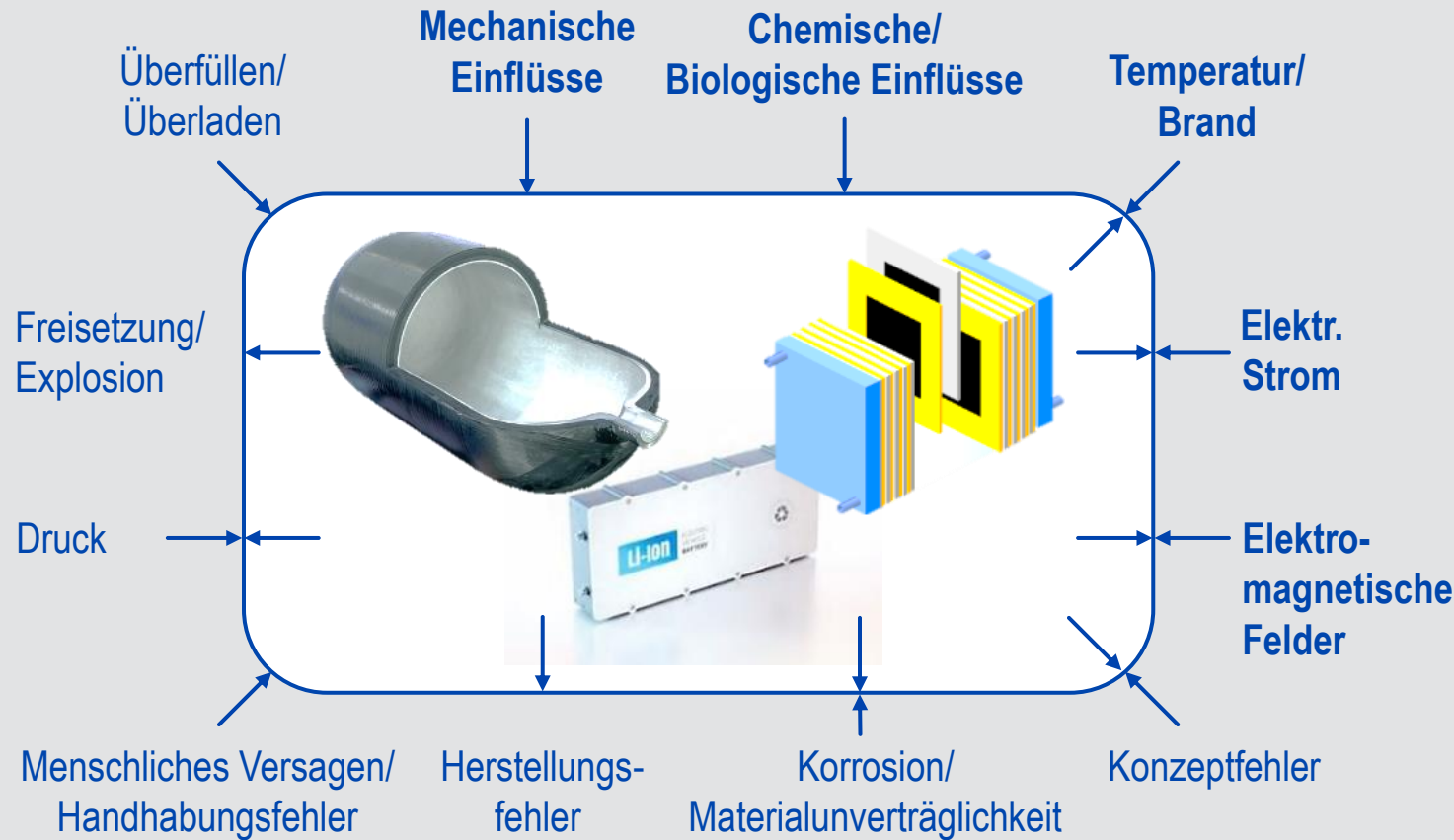
# Lebensdauieranforderung für Behälter und Komponenten

- R134 / GTR13 sieht eine maximale Behälterlebensdauer von **20 Jahren** (künftig 25 Jahre) und max. **15.000 Füllzyklen** vor
- Derzeit existieren keine Vorschriften für die Validierung von H<sub>2</sub>-Gaskomponenten (wie Magnetventile, Sicherheitsventile, Regler usw.) für die erforderliche Anzahl von Zyklen und Lebensdauer (künftige ISO 19887 soll dies abdecken)
- Schienenfahrzeuge sind in der Regel für eine Lebensdauer von **30 Jahren** ausgelegt → Verlängerung der Lebensdauer der Behälter wäre sinnvoll, um den Austausch der Tanks zu vermeiden → erfordert die nötige Erfahrung des Behälterherstellers





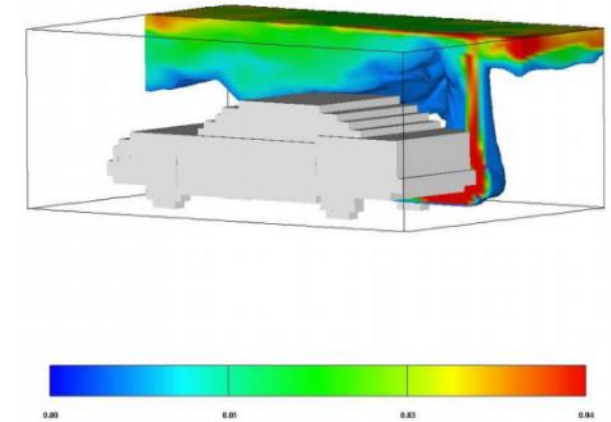
# Beachtung bahntypischer Einflussfaktoren



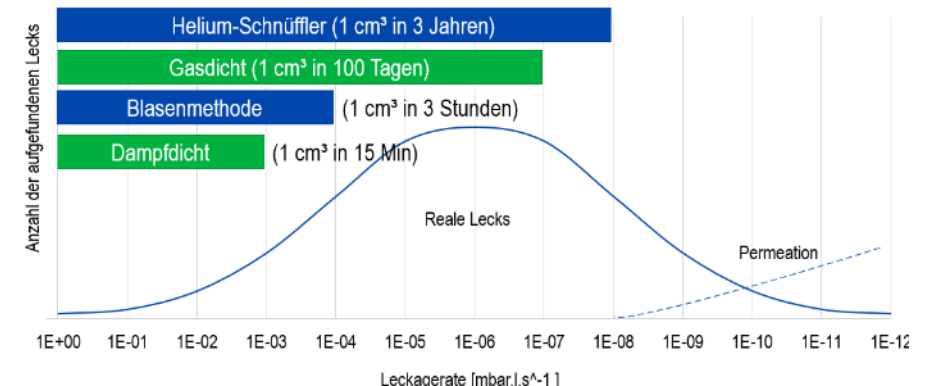
- Anwendbare Bahnnormen zur Risikobegrenzung:
  - Mech. Festigkeit / Schock & Vibration: EN 12663-1, EN 15227, EN 61373
  - Umwelteinflüsse: EN 50125-1, EN 50155
  - Brandschutz: EN 45545-x
  - Elektrische Sicherheit: EN 50124-1, EN 50153, EN 50343
  - EMV: EN 50121-3-2
  - Funktionale Sicherheit: EN 50126-x, EN 50128, EN 50129
  - Traktionsbatterien: IEC 62918
  - Brennstoffzellen: IEC 63341-1 (draft)
  - Wasserstoffspeicher: IEC 63341-2 (draft)

# Praktikabilität von Dichtheitsprüfungen

- Für das gasführende System besteht der Anspruch bzw. das Konstruktionsziel einer „auf Dauer technisch dichten“ Ausführung (in Anlehnung an TRGS 722)
- Demnach sind keine Ex-Zonen zu erwarten → Voraussetzung: Das System ist dicht!  
Aber wann ist ein System „dicht“?
- Die maximal zulässige Freisetzung leitet sich aus dem Ex-schutzkonzept ab  
→ liegt bei Schienenfahrzeuge weit über den zulässigen Permeationsraten aus den Kfz-Anforderungen von 6,0 Ncm<sup>3</sup>/h je Liter Behältervolumen (ca.  $17 \cdot 10^{-4}$  mbar·l/s)
- Die „Blasenmethode“ nach EN 1779, C.2 ist eine für Hersteller und Werkstätten praktikable Methode mit einer geringen Sensitivität von ca.  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar·l/s
- Eine Quantifizierung von Freisetzungen ist in engen Einbaulagen nicht praktikabel, weshalb das Standard-Kriterium „blasenfrei“ zu anspruchsvoll und aufgrund der Systemgröße in der Praxis teilweise zu unverhältnismäßigen Korrekturmaßnahmen führt
- **Erfordert weitere Untersuchungen zu praktikablen Prüfmethoden**

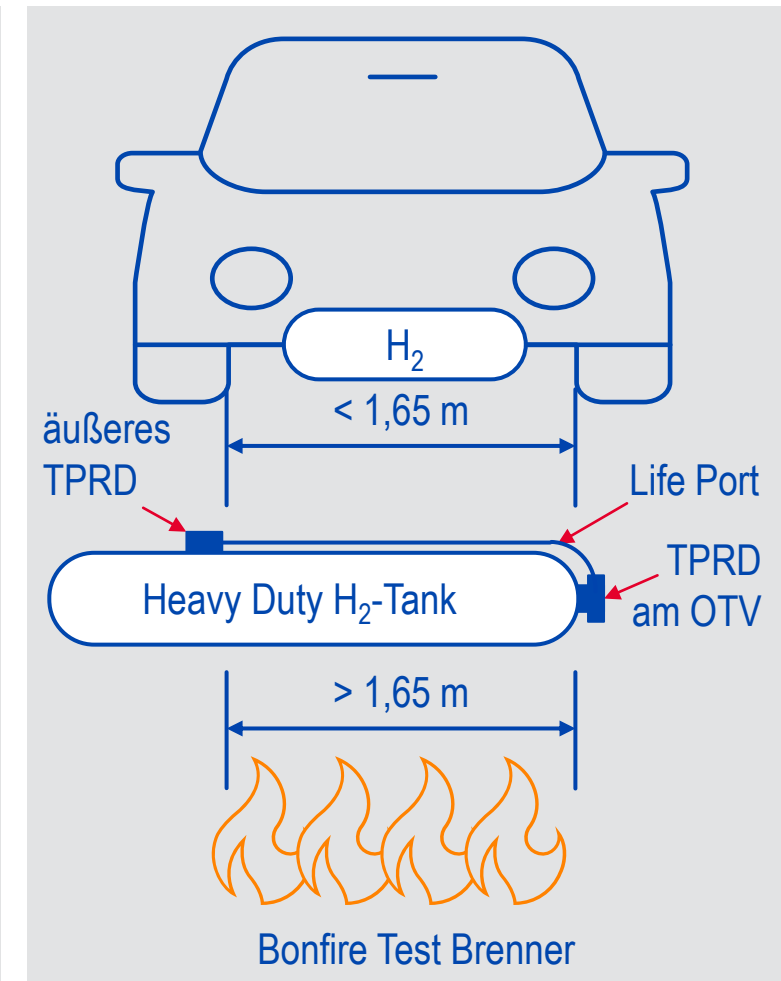
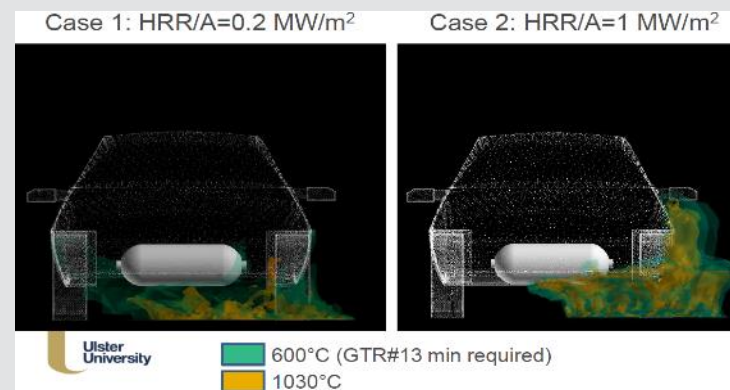
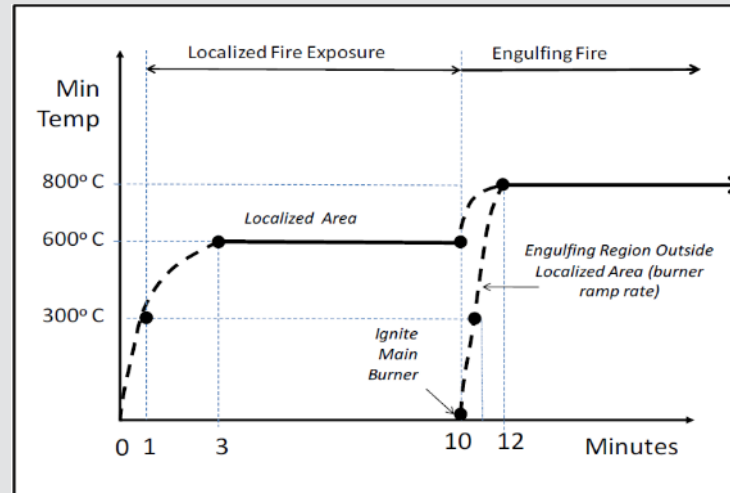


Häufigkeitsverteilung aufgespürter Lecks bei der Dichtheitsprüfung (Varian)



# Berstschutzkonzept von H<sub>2</sub>-Behältern für Straßenfahrzeuge

- Die Anforderung für den Berstschutz basiert auf einem Flüssigkeitsbrand unter dem Fahrzeug bzw. eines Vollbrands, bei dem die Wasserstofftanks direkt den Flammen ausgesetzt sind, was zu einer kurzzeitigen Hitzeeinwirkung und folglich zu einem Druckanstieg führt
- Aus diesem Grund sind die Behälter mit thermisch aktivierten Druckentlastungsventilen (TPRDs) ausgestattet
- Die Größe des Brenners zur Validierung basiert auf üblichen Breiten von Straßenfahrzeugen → größere Behälter erfordern mehrere TPRDs!

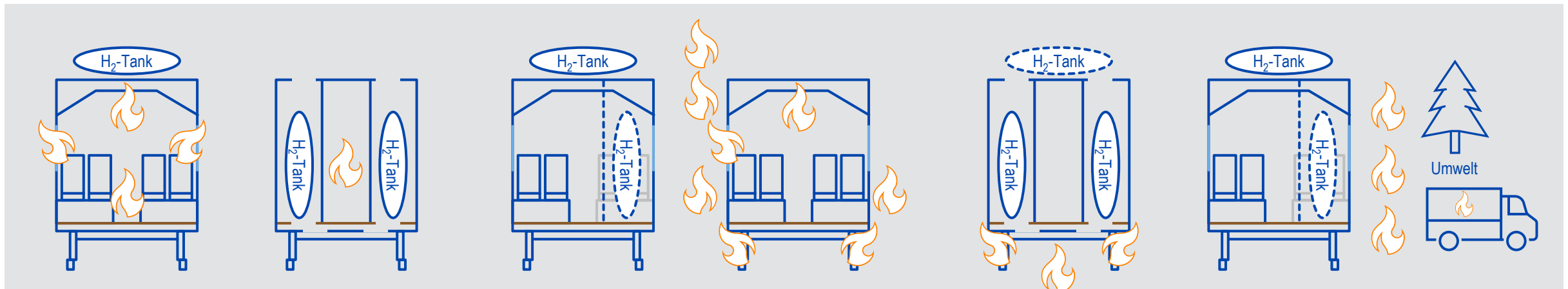


Quelle: SO 19881 und GTR13 Ulster University



# Mögliche Brandszenarien im Bahnsektor

- Je nach Anordnung der Tankanlage und dem potenziellen Brandszenario ergibt sich eine bestimmte Strahlungs- oder Konvektionswärmeeinwirkung auf das Wasserstoffspeichersystem bzw. die dort befindlichen TPRDs
- Je nach Konstruktion des Einbauraumes der Tankanlage würden die umgebenden Barrieren eine direkte Flammeneinwirkung verhindern → über einen größeren Zeitraum, im Vergleich zu Straßenfahrzeugen
- **Das Brand- und Berstschutzkonzept für Schienenfahrzeuge muss überdacht werden**, da die große Anzahl von TPRDs ein höheres Restrisiko von Ausfällen, Leckagen und frühzeitiger Aktivierung ohne Verbrennung des entweichenden Wasserstoffs mit sich bringt



# Restrisiko TPRD

## Relevante Fragestellungen:

- Werden die TPRDs (innen / außen) ihre Auslösetemperatur von 110 °C +/- 5 K erreichen? Wenn ja, wann?
- Wo und in welche Richtung wird Wasserstoff abgeleitet?
- Wird der freigesetzte Wasserstoff entzündet?
- Welche Dimension kann eine Stichflamme haben?
- Welche Menge Wasserstoff wird in welcher Zeit freigesetzt?



## Schlechtes Beispiel (CNG-Bus):



# Mögliche Crash-Szenarien im Bahnsektor



## Mögliche Unfallszenarien sind:

**Aufprall** (auf ein sich bewegendes Objekt)

**Anprall / Zusammenstoß**  
(mit einem starren Objekt)

**Schrägaufprall**  
(Flankenfahrt, Anstoß auf ein Hindernis)

- Bei Rohrbruch/-abriss kann der Gasfluss auf der Füll- und Entnahmeleitung unmittelbar durch eine Abströmsicherung (Excess-Flow-Valve) begrenzt oder unterbunden werden
- **Insbesondere außenliegende TPRDs mit unter Druck stehenden Rohren (Life-Ports) stellen eine Kritikalität dar,** weil eine Gasfreisetzung im Schadensfall nicht unterbunden werden kann
- **Erfordert weitere Untersuchungen zur Notwendigkeit und Anzahl von TPRDs bei Schienenfahrzeugen**



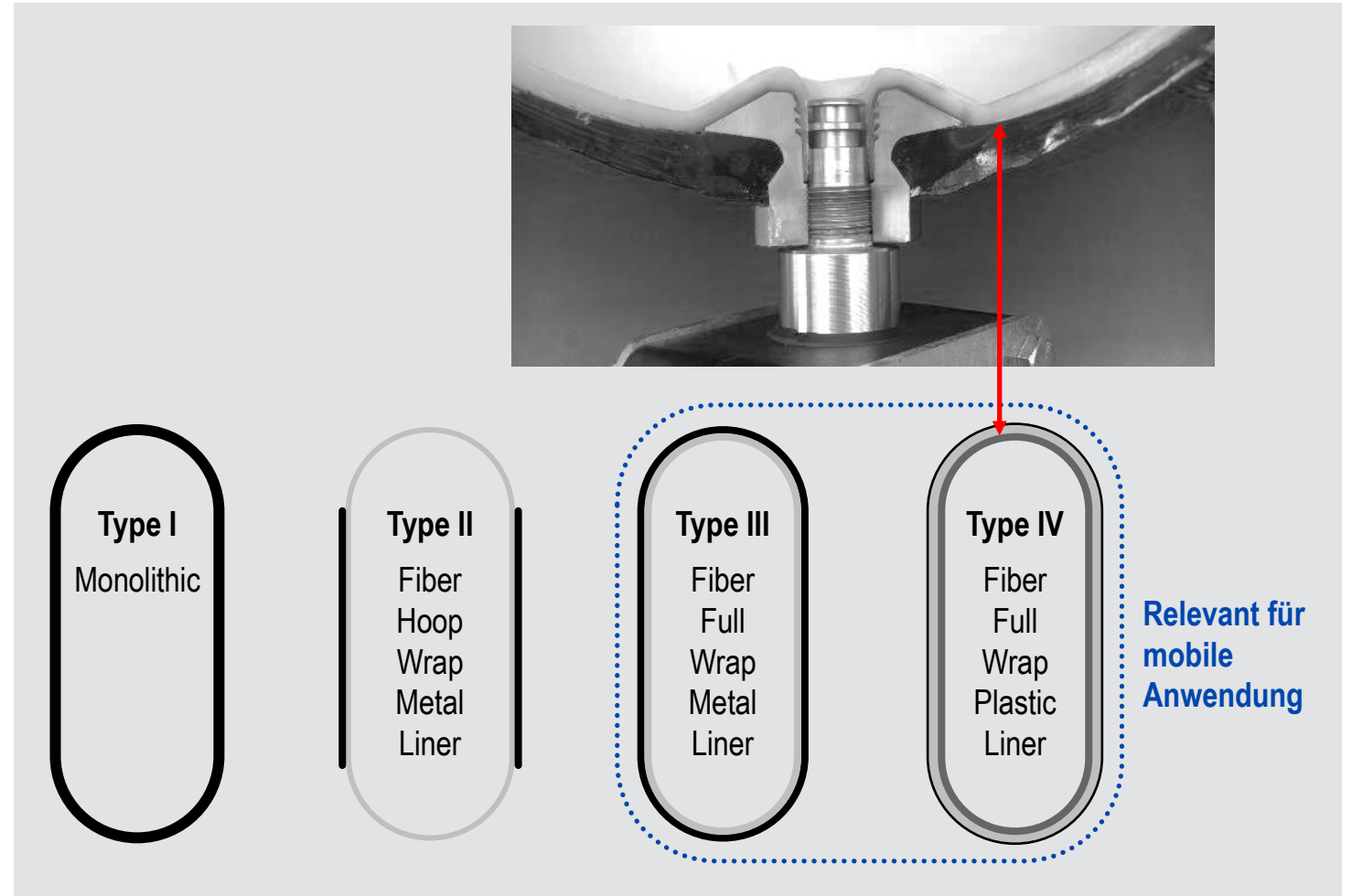
# Arten von Druckwasserstoffbehältern

## Übliche Druckstufen:

200 / 350 / 700 bar

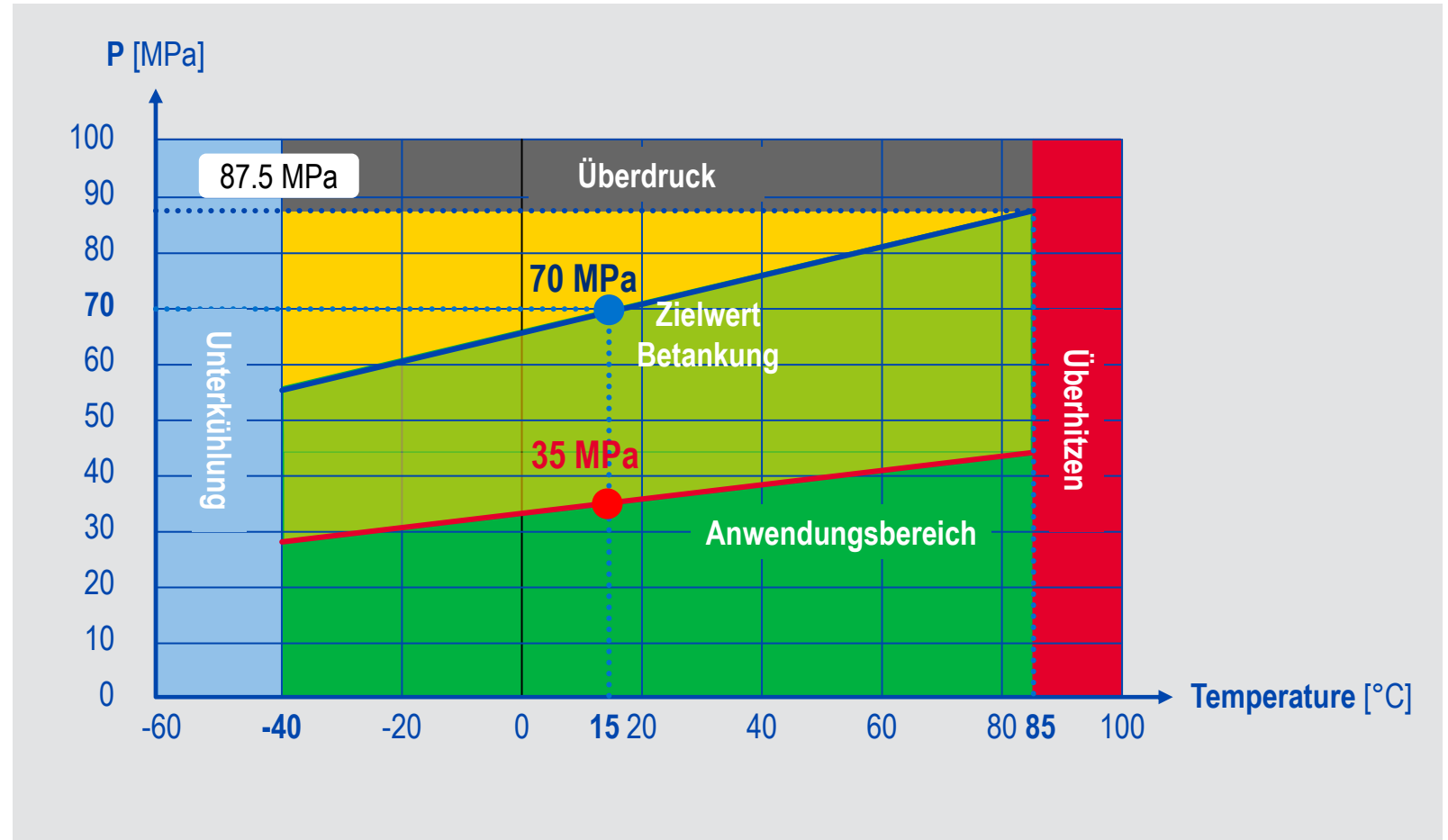
## Werkstoffe:

- Stahlbehälter (Typ 1)
- Kompositbehälter (Typ 2 bis 4)  
aus Stahl / Aluminium / Thermoplast + CFK / GFK



# Betankung mit Wasserstoff – aktuell die größte Herausforderung

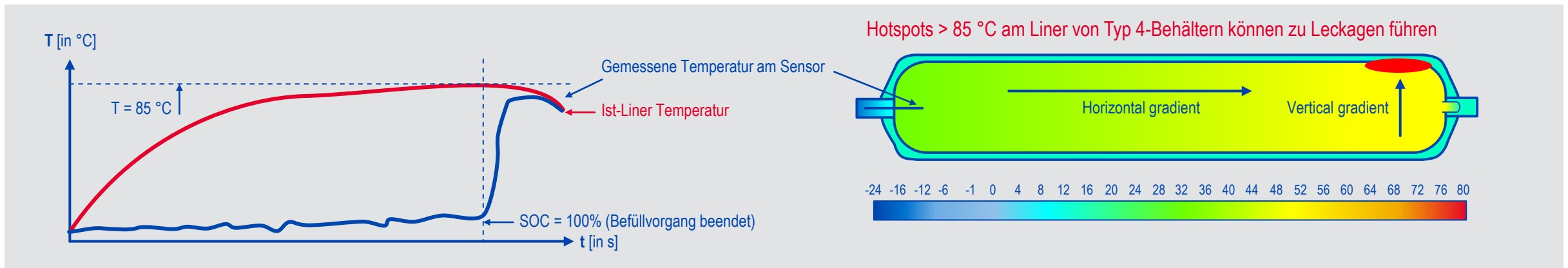
Die **Sicherheitsziele** des Betankungsprozesses sind die **Vermeidung** von **Überdruck, Überhitzung und Überfüllung des Wasserstoffspeichers**



Quelle: S. Pregassame, F. Barth, L. Allidières and K. Barral, Air Liquide, June 2006, "Hydrogen refuelling station: filling control protocols development", World Hydrogen Energy Conference

# Was kann schief gehen?

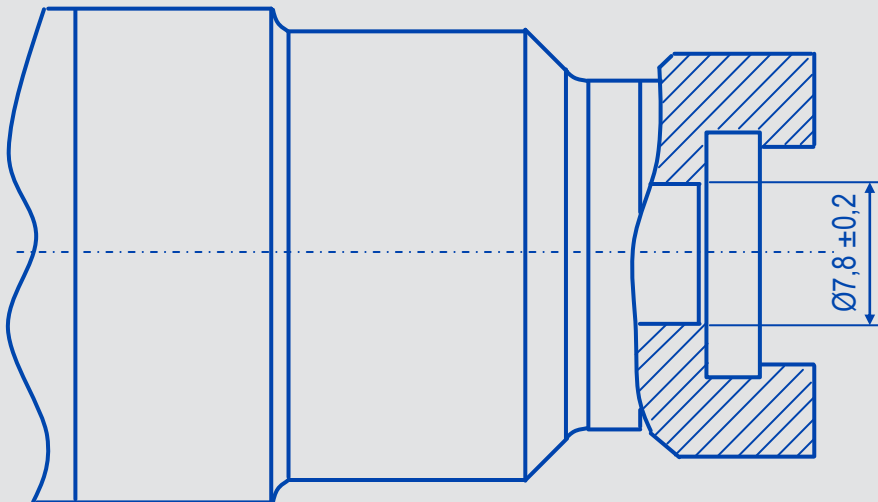
- Gas erwärmt sich während des Füllvorgangs aufgrund der Gasarbeit (isenthalpe Kompression), der Gasdynamik (Reibung) sowie des Joule-Thomson-Effekts
- Verstärkt wird dieser Effekt durch:
  - einen niedrigen Restdruck in den Tanks (z.B. unter 50 bar)
  - eine hohe Gastemperatur (z.B. über 30 °C)
- Temperatursensoren, die üblicherweise Teil des Tankventils sind, können die tatsächliche Gastemperatur im Behälter aufgrund von Turbulenzen und der kühlenden Wirkung des eintretenden Gasstroms nicht verlässlich messen → der Vorgang erfolgt „blind“
- Dies erfordert umfassend validierte Füllkurven – **gegenwärtig nicht verfügbar**
- Folglich ist die Wasserstofftankstelle verantwortlich für die sichere Befüllung des Fahrzeugs (Stand der Technik)



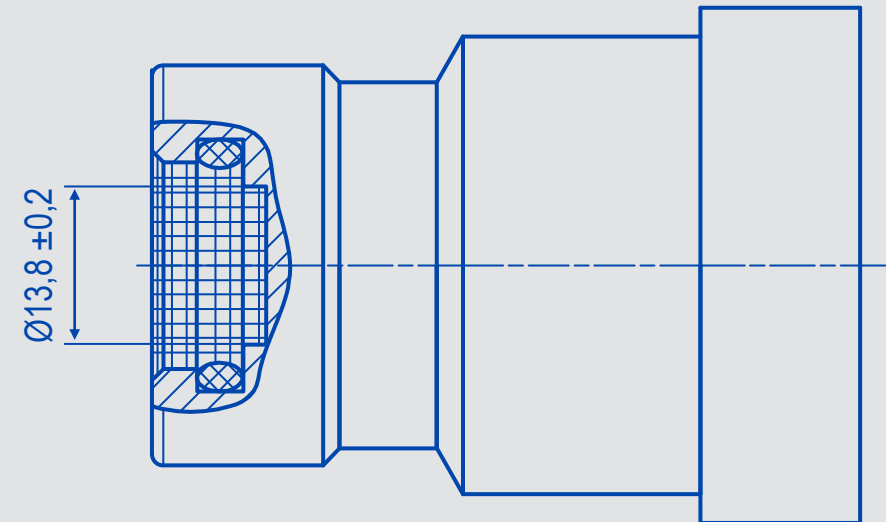
# Vergleich der Füllnippel

- Um unter den meisten Umweltbedingungen kurze Betankungszeiten zu erreichen, muss der Druckverlust in der Füllleitung minimiert werden, z.B. durch Vergrößerung des Durchmessers und Vermeidung von Drosseln auf dem Gasweg

**ISO 17268 – H35HF (LKW / Bus)**



**künftiger “H35 VHF” – Very High Flow (Bahn)**

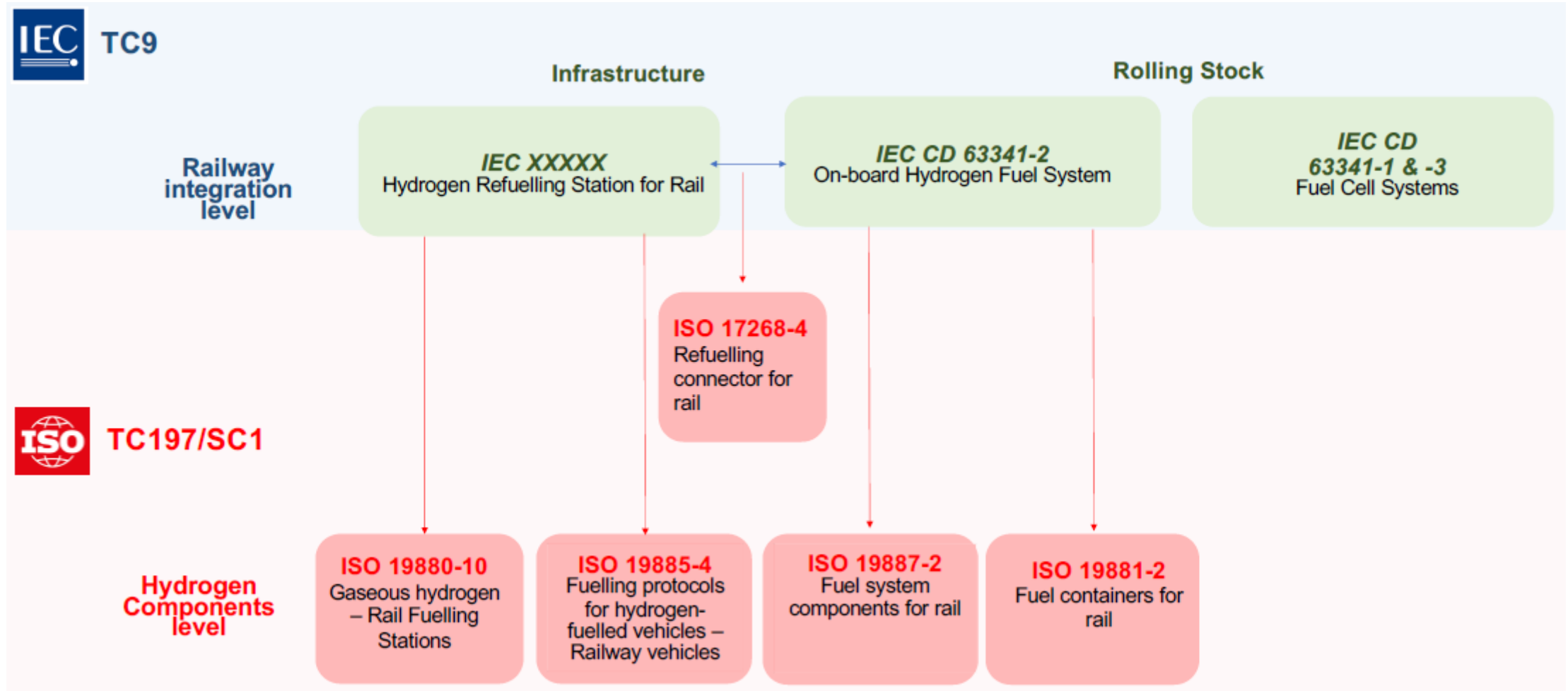


# Zusammenfassung

- Komponenten des Wasserstoffsystems, die nach den Automobilvorschriften EC79 (zurückgezogen) oder R134 typgeprüft sind, haben große Synergien mit Bahnanwendungen und bieten eine angemessene Grundsicherheit in Bezug auf gas-, druck-, temperatur- und zyklusbezogene Aspekte
- Solange keine speziellen Bahnanwendungen für Wasserstoffkomponenten und Betankungsprotokolle existieren, müssen Auslegung, Konstruktion, Betrieb und Wartung auf Risikoanalysen basieren – die CSM-VO bietet dazu die Grundlage
- Bestehende Bahnanwendungen wie EN 50155, EN 61373, EN 50121-3-2, EN 50125-1, etc. können zur Mitigation herangezogen werden – auch die Normentwürfe IEC 63341-1 und 2 liefern bereits eine erste Checkliste
- Lebensdauieranforderungen erfordern eine Harmonisierung mit bahntypischen Fristenplänen
- Brand- bzw. Berstschutzkonzepte erfordern genormte bahnspezifische Prüfgrundlagen um Restrisiken weiter zu minimieren
- Dichtheitsanforderungen erfordern praktikable Prüfkriterien, um Unverhältnismäßigkeiten zu begrenzen
- Befüllvorgänge müssen individuell (Fahrzeug <> Füllstation) durch Labortests validiert werden, bis standardisierte Füllprotokolle für Schienenfahrzeuge vorliegen



# Ausblick Normungsaktivitäten



Quelle: Hydrogen Council, New ITT Launch H2@Rail



Add value.  
Inspire trust.

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

M.Eng. Tolga Wichmann  
Leiter Task Force Wasserstoff

Tel +49 (0) 30 63 22 30 37  
Mobil +49 (0) 151 223 21 546  
E-Mail [tolga.wichmann@tuvsud.com](mailto:tolga.wichmann@tuvsud.com)

