

Reallabor H₂-Wyhlen - Abstandsempfehlung für die Bauleitplanung

Auftraggeber:

Energie Baden-Württemberg AG, Durlacher Allee 93, 76131 Karlsruhe

Gutachten: 2022-ENBW-01

Stand: August 2022

Inhalt

1	AUFGABENSTELLUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	2
2	BESCHREIBUNG DES BETRIEBBEREICHES.....	4
2.1	ÖRTLICHE LAGE.....	4
2.2	ANLAGENKURZBESCHREIBUNG	6
3	STOFFE UND BEURTEILUNGSWERTE	8
3.1	STOFFE.....	8
3.2	BEURTEILUNGSWERTE	9
4	GRUNDLAGEN FÜR AUSWIRKUNGSUNTERSUCHUNGEN.....	10
4.1	EINGESetzte RECHENWERKZEUGE UND GEMEINSAME ANNAHMEN	10
4.2	PARAMETER FÜR DIE AUSBREITUNGSBERECHNUNGEN	11
5	AUSWIRKUNGSUNTERSUCHUNGEN.....	12
5.1	EXPLOSION.....	12
5.2	FREISTRABLBRAND.....	14
5.3	DISKUSSION DER UNSICHERHEITEN	16
6	ÜBERSICHT DER ERGEBNISSE.....	19
7	REFERENZEN	20
8	ANHANGSÜBERSICHT	21

1 Aufgabenstellung und Zusammenfassung

In der bestehenden „Power to Gas“-Anlage (i.W. Altanlage) auf dem Gelände des Wasserkraftwerkes der Energiedienst AG in 79639 Grenzach-Wyhlen mit der elektrischen Leistung von 1 MW, wird in zwei Elektrolyseuren unter Einsatz elektrischer Energie Wasser in seine beiden Komponenten Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Mit angeschlossenen ist eine Versuchsanlage (0,3 MW Leistung) des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) für spezielle Elektrolyseverfahren.

Während der Sauerstoff ungenutzt in die Atmosphäre gelangt, wird der Wasserstoff gereinigt/getrocknet, komprimiert und zum Verkauf in Speicherflaschen mit einem Gesamtvolumen von 54 m³ bei ≤ 300 bar, entsprechend ≈ 1.000 kg, gasförmig gespeichert.

Diese Anlage soll um eine weitere Anlage „Reallabor H₂-Wyhlen“ (i.W. Neuanlage) mit einer Leistung ≥ 5 MW und einer zusätzlich Speicherkapazität von 3.000 - 6.000 kg Wasserstoff ergänzt werden. Betreiber wird ebenfalls die Energiedienst AG sein, eine Tochtergesellschaft der mehrheitlich zur Energie Baden-Württemberg AG gehörenden Energiedienst Holding AG.

Anlagen zur Lagerung bzw. Erzeugung von Wasserstoff sind der Nr. 9.3 (hier 9.3.2) bzw. Nr. 4.1.12 des Anhangs 1 zur 4. BImSchV [R3] zuzuordnen. Würde in den Anlagen zukünftig eine Menge von mehr als 5.000 kg gehandhabt, wäre die Mengenschwelle der Spalte 4 des Anhangs I zur 12. BImSchV (StörfallV [R2]) überschritten. Damit würde dieser Betriebsbereich im Sinne §3(5a) BImSchG [R1] unter die Grundpflichten der StörfallV fallen (Betriebsbereich der *unteren Klasse*).

Im Zuge der vorhabenspezifischen Bauleitplanung soll der *angemessene Abstand* im Sinne §50 BImSchG i.V.m. Leitfaden KAS-18 [R4] für den Betriebsbereich ermittelt werden. Dabei kommt der geplanten Anlage eine zentrale Bedeutung zu, da für diese mit maximal 500 bar einen deutlich höherer Speicherdruck als bei der bestehenden Anlage geplant ist. Für den Leckagefall ist deshalb mit einem deutlich höheren austretendem Massenstrom zu rechnen und damit verbunden größeren Auswirkungen durch Brand oder Explosion.

Da eine relevante störungsbedingte Freisetzung von gasförmigem Wasserstoff mit einem hohen treibenden Druck verbunden ist, kommt es in jedem Fall zur Ausbildung eines s.g. *Freistrahles*. In diesen *Freistrahle* aus zunächst reinem Wasserstoff wird mit wachsender Entfernung vom Leck zunehmend Luft eingemischt.

Addiert man die in diesem *Freistrahle* zwischen der unteren und oberen Explosionsgrenze vorliegende Masse Wasserstoff, erhält man die maximal momentan vorhandene explosionsfähige Wasserstoffmenge. Zur mathematischen Modellierung eines *Freistrahles* gibt es zahlreiche Ansätze in der Literatur, welche bei ansonsten gleichen Randbedingungen signifikant unterschiedliche explosionsfähige Massen ergeben.

Im Gegensatz zu anderen Ausbreitungsformen wie der Verdunstung und Ausbreitung toxischer Gase erfolgen im Leitfaden KAS-18 zu einer *Freistrahle*-Freisetzung mit nachfolgender Explosion oder der Entzündung des Freistrahles mit länger andauerndem Freistrahlebrand keine Vorgaben hinsichtlich zu verwendender Modelle.

Durch den Gutachter wurden deshalb eingeführte kommerzielle Berechnungsprogramme (incl. verschiedener Programmversionen) zur Untersuchung einer Leckage im Bereich des höchsten Anlagendrucks genutzt. Dabei erfolgten Variationen der Eingangsparameter der Freistrahleberechnungen zur Identifikation der konservativsten Parameterkombinationen hinsichtlich einer maximal denkbaren explosionsfähigen Wasserstoffmenge und auch von Stoffeigenschaften um die Modellunsicherheiten zu kompensieren.

Für die Explosionsdruckausbreitung nennt Leitfaden KAS-18 ein spezifisches Berechnungsmodell. Der mit dem dort genannten Modell nach *Wiekema* ermittelte Druckverlauf über die Entfernung wurde durch den Gutachter mit weiteren Explosionsdruckmodellen verglichen.

Im Ergebnis errechnet sich mit dem in Leitfaden KAS-18 genannten Modell nach *Wiekema* eine Überschreitung des Beurteilungswertes von 0,1 bar für den Spitzenüberdruck nach Explosion eines Wasserstoff/Luft-Gemisches bis zu einer Entfernung von 45 m zum Ort der Leckage im Hochdruckbereich der Neuanlage. Damit ergibt sich für Explosionen keine Überschreitung des Beurteilungswertes außerhalb des Betriebsbereiches in Richtung auf schutzbedürftige Nutzungen.

2 Beschreibung des Betriebsbereiches

2.1 örtliche Lage

Der Betriebsbereich der Energiedienst AG liegt am östlichen Rand von Grenzach-Wyhlen nördlich des Rhein. Die Lage des rot markierten Betriebsbereiches mit angrenzender Umgebungsnutzung zeigt das nachfolgende Luftbild.

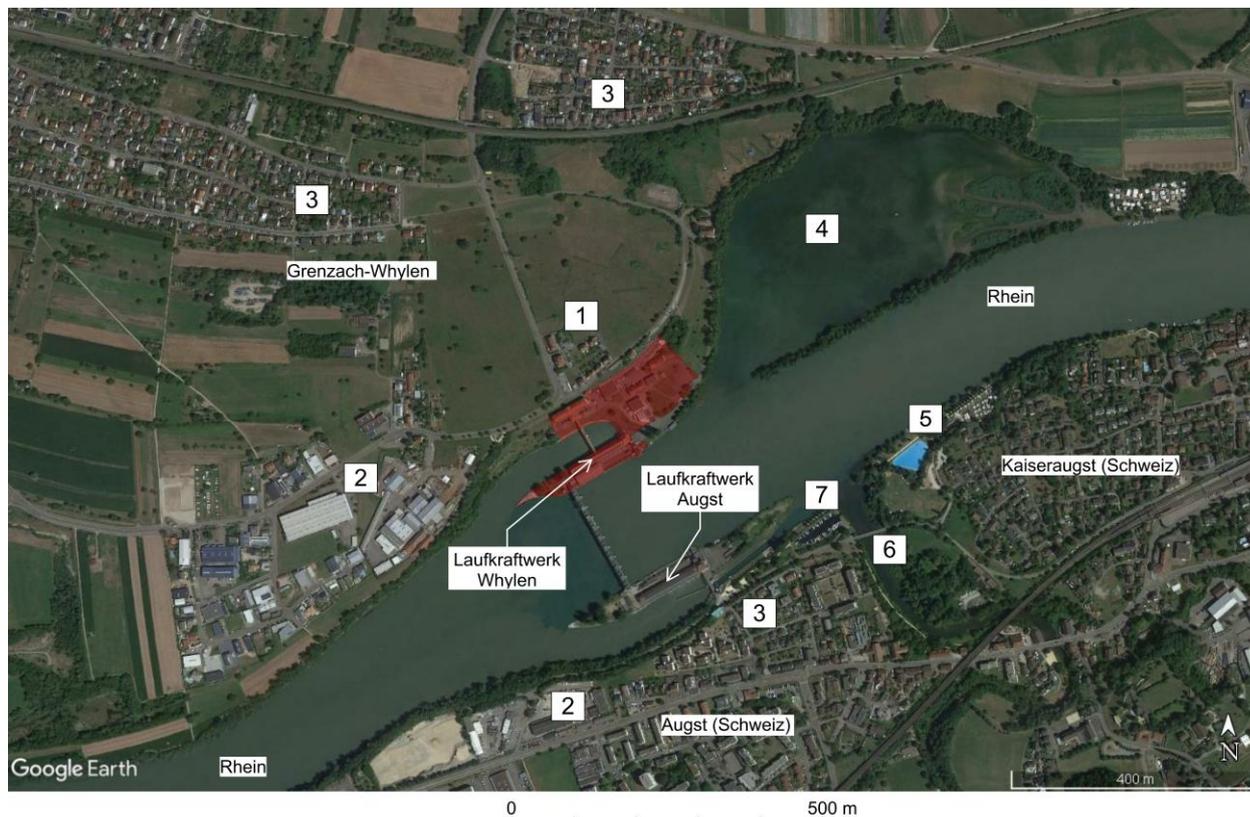


Abbildung 1: örtliche Lage mit Umgebungsnutzung (Norden oben, Bildquelle Google Earth)

Nr.	Objektbeschreibung
1	Mischgebiet mit überwiegender Wohnnutzung
2	Gewerbegebiet mit vereinzelter Wohnnutzung
3	Wohngebiet bzw. überwiegende Wohnnutzung
4	Naturschutzgebiet „Altrhein Whylen“
5	Campingplatz und Schwimmbad
6	Naturschutzgebiet „Ergolzmündung“
7	Sportboothafen

Tabelle 1: Umgebungsnutzung (nach Nummerierung in Abbildung 1)

Eine Plandarstellung der momentan angedachten Aufstellung für die Neuanlage ist als Anh. 1 beigefügt. Anh. 2 beschreibt die Aufstellung der vorhandenen Altanlage an Hand der ausgewiesenen Explosions-schutz-zonen.

Für den Betriebsbereich und seine Umgebung ist ein Flächennutzungsplan, für das nördlich angrenzende Mischgebiet der Bebauungsplan „Am Wasserkraftwerk“ (siehe Anh. 3) und für den Aufstellbereich der vorhandenen Anlage der vorhabenbezogene Bebauungsplan „Power-to-Gas-Anlage“ vorhanden (siehe Anh. 4).

Für den in der nachfolgenden Abbildung mit „EE“ gekennzeichneten Bereich soll ein analoger vorhabenbezogener Bebauungsplan zur Neuanlage erstellt werden.



Abbildung 2: Flächennutzungsplan aus [R17] (Norden oben)



Abbildung 3: Blick nach Südosten auf die Altanlage (Bildquelle Energiedienst AG)

Für Abstandsempfehlungen sind gemäß §50 BImSchG

- dem Wohnen oder der Freizeit dienende Gebiete mit öffentlicher Nutzung,
- unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle oder besonders empfindliche Gebiete,
- Gebiete und Gebäude mit Publikumsverkehr (z.B. Parkanlagen, Einkaufszentren, Hotels),
- sensible Einrichtungen (z.B. Kirchen, Schulen, Kindergärten, Altenheime, Krankenhäuser) und
- wichtige Verkehrswege

zu betrachten. Eine weiter erläuternde Aufstellung enthält Kap. 2.1.2 im Leitfaden KAS-18 [R4].

Gebiete und Gebäude mit besonderem Publikumsverkehr oder sensible Einrichtungen wie Kirchen oder Schulen befinden sich nicht in der direkten Nachbarschaft zum Betriebsbereich.

Verkehrswege sind ab einer bestimmten Frequentierung als *wichtiger* Verkehrsweg einzustufen (Nr. B 18 in [R12]):

... nicht als „wichtige Verkehrswege“ bewertet werden: - Straßen mit weniger als 10.000 Pkw in 24 Stunden - Schienenwege mit weniger als 50 Personenzügen in 24 Stunden ...

... Verkehrswege ... sollten jedenfalls als „wichtige Verkehrswege“ bewertet werden: ... - andere Straßen (zulässige Höchstgeschwindigkeit < 100 km/h) mit mehr als 100.000 Pkw in 24 Stunden oder mehr als 4.000 Pkw in der verkehrsreichsten Stunde ... - Schienenwege mit mehr als 250 Personenzügen in 24 Stunden oder mehr als 60 Personenzügen in der verkehrsreichsten Stunde (beide Fahrtrichtungen).

Für Wasserwege wie den Rhein existieren keine entsprechenden Vorgaben. Aus den obigen Angaben zu Straßen und Schienenwegen lässt sich jedoch eindeutig das Kriterium einer hohen personellen Frequentierung ableiten.

Eine mit der Schifffahrt auf dem Rhein verbundene Personenzahl entsprechend der von 10.000 Pkw in 24 Stunden wird durch den Gutachter als nicht plausibel erachtet. Schutzbedürftige Verkehrswege sind damit in der näheren Umgebung ebenfalls nicht vorhanden.

Hingegen wird die in Tabelle 1 gelistete Umgebungsnutzung vollständig, bis auf die unter Nr. 2 genannte gewerbliche Nutzung, als schutzbedürftig im Sinne §50 BImSchG angesehen.

Im westlich gelegenen Gewerbegebiet sind keine Betriebsbereiche im Sinne der StörfallV angesiedelt. Eine Überschneidung mit anderen, externen, Abstandsempfehlungen ist damit nicht zu berücksichtigen.

2.2 Anlagenkurzbeschreibung

Vor der Auftrennung von Wasser (H₂O) durch Elektrolyse in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) wird das Wasser soweit möglich gereinigt. In der Altanlage kommen dann zwei mit jeweils ≈ 1.300 A Strom betriebene Elektrolyseure zum Einsatz.

Bei einem Arbeitsdruck von ≤ 30 bar wird der erzeugte Wasserstoff in der Gasreinigung gefiltert und getrocknet. Der Verdichter fördert den Wasserstoff auf einen der mit bis zu 300 bar betriebenen drei Speicher.

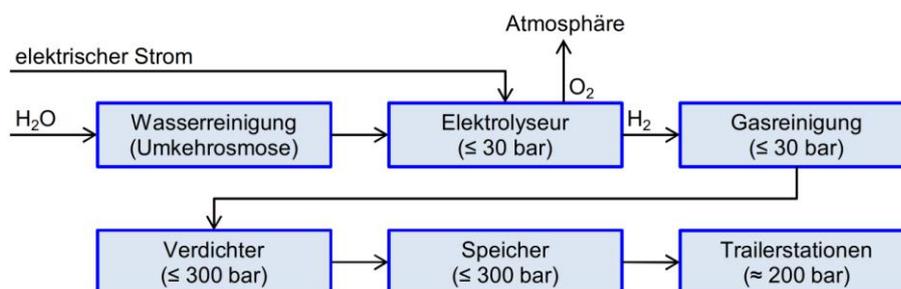


Abbildung 4: Verfahrensschritte bei der Wasserstoff-Erzeugung in der Altanlage

Die Speicher, die gerade nicht befüllt werden, können zur Abgabe an einen Wasserstoff-Trailer durch Überströmen des gespeicherten Wasserstoffes in die Druckgasflaschen des Trailers genutzt werden. Der maximale Fülldruck der Wasserstoff-Trailer liegt bei ≈ 200 bar.

An diesen grundlegenden Verfahrensschritten wird sich auch bei der geplanten Neuanlage nichts ändern. Allerdings soll hier der Wasserstoff bis auf 500 bar verdichtet und gespeichert werden. Durch den um 66% höheren Druck steigt dann bei gleicher Temperatur die im selben Volumen speicherbare Masse um 50%.

Im laufenden Betrieb der Altanlage fällt regelmäßig diskontinuierlich nicht nutzbarer Wasserstoff an

- beim Wiederanfahren eines Elektrolyseurs nach Abschaltung z.B. bei vollen Speichern,
- bei Umschaltung zwischen Filterstufen in der Gasreinigung,
- bei der Druckentlastung des Verdichters nach einer Abschaltung und
- beim Entspannen der Befüllschläuche an den Trailerstationen vor Abkopplung.

Diese betrieblich anfallenden Wasserstoff-Mengen werden über eine zentrale Sammelleitung zu einem Wasserstoff-Ausbläser geführt, welcher in ca. 10 m Höhe den Wasserstoff in die Atmosphäre ableitet.

Einen analogen Wasserstoff-Ausbläser wird auch die Neuanlage benötigen, von einer betrieblichen Abgabe von Wasserstoff in die Atmosphäre in ähnlicher Höhe kann ausgegangen werden.

Jeder der drei Speicher der Altanlage besteht aus 20 Bündeln von jeweils 18 Druckgasflaschen. Jeder Speicher ist durch Sicherheitsventile mit einem Ansprechdruck von 330 bar abgesichert.



Abbildung 5: Blick nach Südosten auf die Wasserstoff-Speicher der Altanlage

Für die Neuanlage ist mit einer ähnlichen Stückelung der Speicherkapazität zu rechnen. Der Absicherungsdruck der mit maximal 500 bar betriebenen neuen Speicher wird aber sicherlich im Bereich von 550 bar liegen.

Für das vorliegende Gutachten ist die Kapazität der einzelnen neuen Speicher nicht relevant. Es wird konservativ davon ausgegangen, dass in jedem Fall ausreichend Wasserstoff austreten kann, um das für das jeweilige Szenario maximale Gefahrenpotential auszubilden.

Da hier wie im Leitfaden KAS-18 der maximale betriebliche Druck betrachtet wird, ist für das Gutachten auch der Absicherungsdruck der neuen Speicher nicht entscheidend.

3 Stoffe und Beurteilungswerte

3.1 Stoffe

Im vorliegenden Fall sind weder inhalativ toxische noch entzündbare oder gewässergefährdende Stoffe zu betrachten. Der *angemessene Abstand* wird allein von den Auswirkungen einer Entzündung von ausgetretenem gasförmigem Wasserstoff bestimmt.

Wasserstoff ist ein geruchsloses farbloses physiologisch unbedenkliches Gas und in seiner molekularen Form das kleinste bekannte Molekül.

Unter Normalbedingungen liegt ein Gemisch aus $\approx 25\%$ *para*-Wasserstoff mit paralleler Kernspinausrichtung und $\approx 75\%$ *ortho*-Wasserstoff mit antiparalleler Kernspinausrichtung vor¹. Das Verhältnis dieser beiden Molekülformen hängt von Temperatur und Druck ab. Bei tiefen Temperaturen dominiert der *para*-Wasserstoff, die energetisch günstigere Form.

Dies ist jedoch nur wichtig bei der Speicherung von verflüssigtem Wasserstoff, da die bei der tiefkalten Verflüssigung beginnende Umwandlung von *ortho*- in *para*-Wasserstoff eine Umwandlungsenergie größer als die Verdampfungsenthalpie freisetzt und dadurch zur Erwärmung führt. Im vorliegenden Fall ist keine Verflüssigung des erzeugten Wasserstoffes vorgesehen, sodass diese unterschiedlichen Wasserstoffformen hier keine Relevanz besitzen.

Wasserstoff hebt sich gegenüber anderen als Energieträger genutzten Gasen wie Methan und Ammoniak in seinen Stoffeigenschaften u.a. in Bezug auf Gasdichte und Entzündbarkeit deutlich hervor.

Stoff	Siedepunkt (1 bar ²) [°C]	Gasdichte (20 °C / 1 bar) [kg/m ³]	unterer Heizwert [MJ/kg]	UEG / OEG [Vol%]	Mindest- zündener- gie [mJ]	laminare Flammge- schwindigkeit [m/s]
Wasserstoff	-252,8	0,0827	119,9	4 / 77	0,017	2,7
Methan	-161,5	0,6594	50,0	5,3 / 17	0,274	0,37
Ammoniak	-33,3	0,7067	18,6	15,4 / 33,6	14	0,08

Tabelle 2: Stoffeigenschaften von Wasserstoff, Methan und Ammoniak

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich, besitzt Wasserstoff einen sehr großen Explosionsbereich zwischen unterer und oberer Explosionsgrenze in Luft (UEG und OEG) bei gleichzeitig äußerst geringer Mindestzündenergie³.

Die hohe laminare Flammgeschwindigkeit als wichtiger Parameter für die Größe einer möglichen Druckwelle nach Zündung zeigt auf, dass hinsichtlich der Explosionsgefahr Wasserstoff gegenüber anderen Stoffen dominiert.

Andererseits bedingt die niedrige Mindestzündenergie bei der gasförmigen Freisetzung unter hohen Druck, die mit Austritt praktisch sofort erfolgende Entzündung durch zahlreiche mögliche wirksame Zündmechanismen wie z.B. Elektrostatik.

Entsprechend sind in der „Zentralen Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen“ (ZEMA⁴) keine Wasserstoff-Explosionen im Freien hinterlegt, Freistrahlblände hingegen schon.

¹ „normal hydrogen“ nach [R13]

² Überdruck wird in *bar*, Absolutdruck in *bara* angegeben.

³ Alle Angaben zu Zünd-/Brandeigenschaften beziehen sich auf eine optimale Mischung mit Luft.

⁴ www.infosis.uba.de

Eine Wasserstoffflamme emittiert überwiegend im UV-Bereich. Dies führt dazu, dass die Flamme nahezu unsichtbar ist und obwohl sehr heiß (bis zu 2.045 °C), eine deutlich geringe Wärmestrahlung als zum Beispiel ein Kohlenwasserstoffbrand abgibt (vgl. [R16]). Beides führt dazu, dass Wasserstoffbrände nur schwer über technische Sensoren zu detektieren sind.

Als weitere Besonderheit besitzt Wasserstoff oberhalb seiner Inversionstemperatur von -73 °C einen negativen Joule-Thomson-Koeffizienten. Dies bedeutet, dass sich Wasserstoff im Gegensatz zu den meisten Gasen ab dieser Temperatur bei der Expansion nach Austritt aus einem Leck erwärmt.

Damit reduziert sich die unter Normalbedingungen bereits ca. 15fach geringere Gasdichte weiter und der durch den Dichteunterschied erhebliche Auftrieb von Wasserstoff in Luft wird zusätzlich erhöht. Expandiert Wasserstoff mit 30 °C von 500 bar auf Luftdruck, erwärmt er sich z.B. auf ≈ 51 °C.

Dies bedingt, dass in Freianlagen nur innerhalb eines durch hohen Druck erzeugten Freistrahles mit einem Massenstrom in der Größenordnung von einigen kg/s eine relevante Menge an gasförmigen Wasserstoff als zusammenhängende explosionsfähige Masse auftreten kann.

3.2 Beurteilungswerte

Für die Beurteilung von Explosionswirkungen unter dem Gesichtspunkt des §50 BImSchG ist nach Leitfaden KAS-18 ein Spitzenüberdruck Δp von 0,1 bar heranzuziehen, was etwa der Zerstörung gemauerter Wände entspricht.

Für die Beurteilung von Brandauswirkungen wird eine flächenbezogene Strahlungsleistung von 1,6 kW/m² über mindestens 10 Minuten als Beginn nachteiliger Auswirkungen in Leitfaden KAS-18 genannt.

Weitere Beurteilungswerte für Explosions- bzw. Brandauswirkungen sind im Anh. 6 aufgeführt.

4 Grundlagen für Auswirkungsuntersuchungen

4.1 Eingesetzte Rechenwerkzeuge und gemeinsame Annahmen

Als kommerzielle Rechenwerkzeuge kamen das Programm ProNuSs in den Versionen [R5] und [R6] sowie das Programm EFFECTS [R7] zum Einsatz.

Berechnungen zu Leckraten sowie Wärme-/Druckbelastungen am Immissionsort wurden zusätzlich mit eigenen Rechenwerkzeugen nach den Berechnungsmodellen in [R8] und [R9] durchgeführt.

Für die Bestimmung der Eigenschaften von Wasserstoff bei fester Temperatur-/Druckvorgabe wurde das Programm REFPROP [R15] genutzt.

Zur anzunehmenden Leckfläche gibt Leitfaden KAS-18 in Abschnitt 3.2 vor:

Bei Prozessanlagen ist davon auszugehen, dass Leckagen aus vorhandenen Rohrleitungen, Behältern, Sicherheitseinrichtungen etc. auftreten können.

- *In der Regel wird als Ausgangspunkt der Überlegung von einer Leckfläche von 490 mm² (entspricht einem Äquivalentdurchmesser von 25 mm) ausgegangen.*
- *In einer Einzelfallbetrachtung wird unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Technik die zugrunde zu legende Leckfläche bestimmt.*
- *Als minimale Grundannahme wird empfohlen, dass eine Leckfläche von 80 mm², entsprechend einem Äquivalentdurchmesser von 10 mm, nicht unterschritten wird.*

Für die Altanlage ließe sich auf Grund der maximalen Nennweite von 10 mm für die Rohrleitungen vom Verdichter zu den Speichern eine Leckfläche von 80 mm² für einen vollständigen Rohrleitungsabriss begründen. Da zur Neuanlage aber noch keine konkrete Anlagenplanung vorliegt, wird konservativ eine Leckfläche von 490 mm² angesetzt.

Bei Berechnung der Freisetzung kam generell die im Leitfaden KAS-18 benutzte Ausflussziffer von 0,62, ohne Berücksichtigung eines zusätzlich mindernden Reibungsbeiwertes, zum Ansatz.

Nach Leitfaden KAS-18 ist in der Regel eine primäre Freisetzungsdauer von 10 min anzunehmen. Dies spielt für die untersuchten Explosionsszenarien keine Rolle, da sich bereits wenige Sekunden nach Beginn der Leckage ein stabiler Freistrahle mit der rechnerisch maximalen explosionsfähigen Masse ausbildet.

Für die Speicher der Altanlage kann dies jedoch hinsichtlich der möglichen Branddauer eines Freistrahles relevant sein. Jeder der drei Speicher mit jeweils 18 m³ Volumen enthält bei 300 bar und 20 °C nur ≈ 375 kg Wasserstoff.

Für die nach Leitfaden KAS-18 für eine relevante Brandeinwirkung notwendige Branddauer von 10 Minuten, dürften damit nur relativ kleine Massenströme von ≈ 0,6 kg/s austreten. Dies begründet sich darin, dass in der Altanlage die drei Speicher betrieblich nie untereinander verbunden sind. Sie werden immer getrennt befüllt oder entleert.

Für die Speicher der Neuanlage sind dem Gutachter keine vergleichbaren Festlegungen bekannt, konservativ wird deshalb von einem ausreichenden Speichervolumen für einen Brand über 10 Minuten auch bei großen Massenströmen ausgegangen.

Die Altanlage wird mit dem maximalen Arbeitsdruck von 300 bar betrieben, die Neuanlage soll bis zu 500 bar erzeugen können. Für die Berechnung des Massenstromes bei einer Wasserstoffleckage kam deshalb nur der Druck von 500 bar, abdeckend auch für die Altanlage, zum Ansatz.

Umso kühler und damit dichter der Wasserstoff vor dem Leck ist, umso größer wird rechnerisch der austretende Massenstrom. In der Altanlage wird nach der Verdichtung der Wasserstoff gekühlt, um die speicherbare Masse zu erhöhen. Die Annahme einer unteren Temperatur von 30 °C ist hier sicher konservativ und auf die Neuanlage übertragbar.

4.2 Parameter für die Ausbreitungsberechnungen

Im Konsens mit Leitfaden KAS-18 wird eine Umgebungstemperatur von 20 °C angenommen.

Die Rauigkeit des Untergrundes ist für Ausbreitungsrechnungen von toxischen Gasen relevant, da sie mit über die Verdünnung der Gaswolke auf dem Ausbreitungsweg entscheidet. Im vorliegenden Fall, bei der Betrachtung eines turbulenten Freistrahles, spielt sie hingegen keine Rolle.

Da die kommerziellen Programme jedoch eine Festlegung erfordern, wurde dort die Rauigkeitslänge $z_0 = 1,2$ m (*sehr rauh: Stadt- und Waldgebiete*) analog den Beispielrechnungen des Leitfadens KAS-18 angegeben.

Die nach Leitfaden KAS-18 zu verwendende häufigste Windgeschwindigkeit in der Ausbreitungsklasse III/1 -

Es ist für den Betriebsbereich die häufigste Windgeschwindigkeit für eine indifferente Temperaturschichtung zu ermitteln

- kann nur über eine durch einen Wetterdienst gutachterlich erstellte Datendatei für das aktuell repräsentative Jahr ermittelt werden. Eine solche meteorologische Zeitreihe steht für den Betriebsbereich nicht zur Verfügung.

Durch den DWD wurden 2004 Windkarten des statistischen Windfeldmodells für Deutschland veröffentlicht⁵. Diese Karten geben die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit im 200 m Raster mit einer Auflösung von 0,3 m/s an und beziehen sich auf den Zeitraum der Jahre 1981 bis 2000 und alle Ausbreitungsklassen.

Nach der Karte für Baden-Württemberg zeigt sich für das Umfeld des Betriebsbereiches eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von $\bar{u}_{\text{Windfeld}} = 2,6$ m/s in 10 m Höhe.

Erfahrungsgemäß liegt die häufigste Windgeschwindigkeit in der Ausbreitungsklasse III/1 über der mittleren Windgeschwindigkeit aller Ausbreitungsklassen. Diese Differenz variiert von Jahr zu Jahr und beträgt z.B. für den Flughafen Frankfurt +0,9 m/s (Jahr 2002) und den Flughafen Hamburg +0,4 m/s (Jahr 2005).

Damit ist für den Betriebsbereich eine häufigste Windgeschwindigkeit in der Ausbreitungsklasse III/1 im Bereich von 3 m/s wahrscheinlich. Um im Kontext mit den Beispielrechnungen im Leitfaden KAS-18 zu bleiben, wird für die weiteren Untersuchungen diese Windgeschwindigkeit in der mittleren Ausbreitungssituation mit indifferenter Temperaturschichtung der Atmosphäre angesetzt. Siehe dazu auch Kap. 5.3.

⁵ www.dwd.de → Suchbegriff „Windkarten“

5 Auswirkungsuntersuchungen

Im Rahmen der Bauleitplanung nach §50 BImSchG werden s.g. *Dennoch*-Szenarien betrachtet. Szenarien, die *vernünftigerweise auszuschließen* sind, da sie nur im Zusammenhang mit z.B. gleichzeitigen Wirksamwerden zweier voneinander unabhängiger Gefahrenquellen oder dem Komplettversagen einer Barriere wie einem Rohrleitungsabriss statt einer Flanschleckage auftreten.

Untersucht werden nachfolgend Freisetzungen im Freien mit durch Gebäude ungehinderter Ausbreitung von Wärmestrahlung bzw. Druckwellen.

Wie in Kap. 4.1 dargelegt, wird der Abriss einer Rohrleitung mit Nennweite 25 mm entsprechend einer Leckfläche von $A = 0,00049 \text{ m}^2$ (490 mm²) bei einem Absolutdruck p_0 von $501 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (500 bar Überdruck) unterstellt. Bei diesem Druck und der Temperatur von 30 °C besitzt Wasserstoff nach [R15] eine Dichte ρ_0 von 30,46 kg/m³ und einen Isentropenexponenten κ von 1,415.

Mit der Ausflussziffer C_D von 0,62 errechnet sich dann über

$$\dot{m} = C_D \cdot A \cdot \Psi_0 \cdot \sqrt{2 \cdot p_0 \cdot \rho_0} \quad \text{und} \quad \Psi_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

ein austretender Massenstrom \dot{m} von 8,16 kg/s.

Dieser Massenstrom kommt einheitlich als Vorgabe sowohl für die Freistrahlexplosion als auch den Freistrahbrand für die nachfolgenden Untersuchungen zum Ansatz.

5.1 Explosion

Wie zuvor beschrieben, ist für die mathematische Modellierung eines *Freistrahles* kein einzelner allgemein anerkannter Ansatz vorhanden. Entscheidend für das Ergebnis zur mit dem Freistrah verbundenen explosionsfähigen Masse ist in allen Modellen aber die als Anfangsbedingung u.a. von Leckfläche und Ausflussziffer, als Maß für die Scharfkantigkeit des Lecks, abhängige Ausdehnung b_0 der Basis der s.g. Kernzone.

Auf diese, im Verhältnis zum gesamten Freistrah kleine, Kernzone mit der ersten Gasexpansion, folgt dann nach einem Übergangsbereich der voll ausgebildete Freistrah.

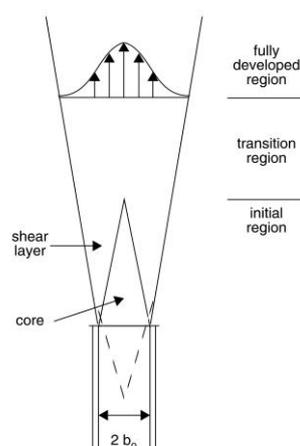


Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines Freistrahles nach [R9]

Da im Leitfaden KAS-18 kein anzuwendendes Modell festgelegt ist und um den Einfluss verschiedener Modellannahmen aufzuzeigen, wurden durch den Gutachter Berechnungen für den Massenstrom von 8,16 kg/s mit dem Programm ProNuSs in den zwei verschiedenen Programmversionen aus 2012 und 2022 durchgeführt. Die Berechnungsprotokolle für die senkrechte Freisetzung sind im Anh. 5 beigefügt.

Eine Validierung der Ergebnisse mit dem Programm EFFECTS war nicht möglich, da sich für die hier untersuchte große Freisetzung bei sehr hohem Druck mit dem in EFFECTS genutzten Freistrahlmmodell keine explosionsfähigen Masse für Wasserstoff errechnen lässt.

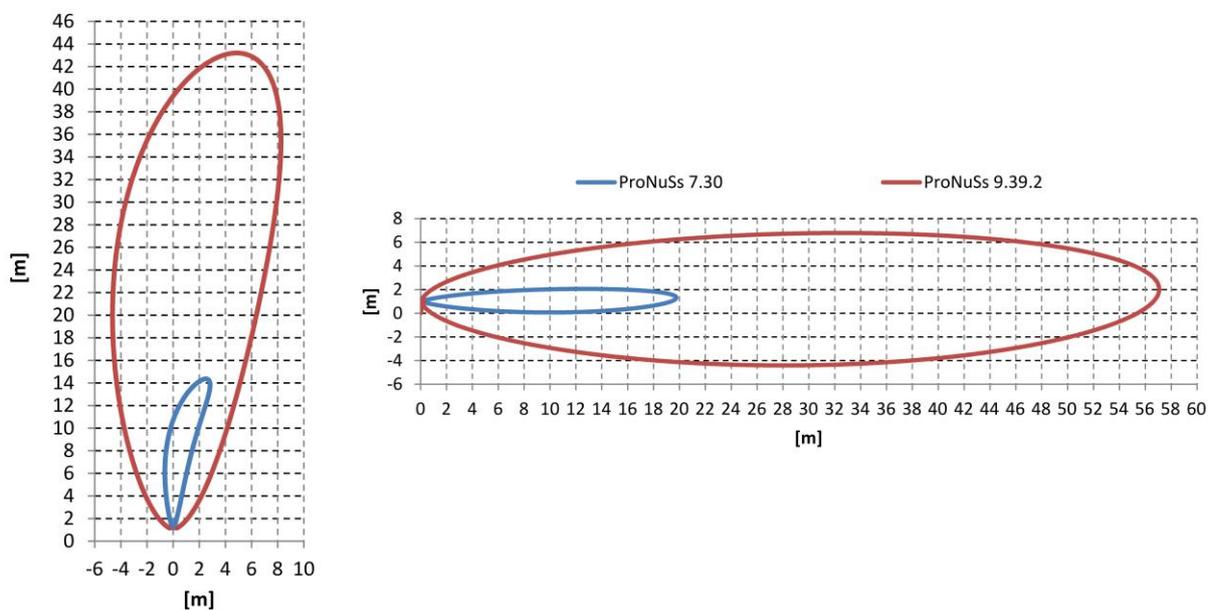


Abbildung 7: Verlauf der UEG-Konzentration des H₂-Freistrahles nach [R5] (blau) und [R6] (rot) für senkrechte (links) und waagerechte (rechts) Freisetzung in 1 m Höhe

Im Ergebnis ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Programmversionen, was sich rechnerisch nachvollziehbar in der Hauptsache mit der zwischenzeitlich geänderten Berechnung der Ausdehnung b_0 der Basis der Kernzone des Freistrahles begründet.

ProNuSs	Freisetzung	
	senkrecht	waagrecht
Version 7.30	2,2 kg	2,9 kg
Version 9.39.2	15,4 kg	19,0 kg

Tabelle 3: explosionsfähige Massen Wasserstoff für verschiedene Freistrahlmmodelle

Die im Vergleich mit Modellansätzen der Vergangenheit hohen explosionsfähigen Massen von > 10 kg für eine gasförmige Freisetzung führen zu einem scheinbaren Widerspruch mit Leitfaden KAS-18, Anhang 3, Kap. 2.1:

Bei einer gasförmigen Freisetzung aus einer verfahrenstechnischen Anlage kann davon ausgegangen werden, dass dies unter erhöhtem Druck erfolgt, sodass sich ein Freistrahlm bildet. Durch die Einnischung von Luft wird die untere Explosionsgrenze nach einer relativ kurzen Entfernung unterschritten. Die explosionsfähige Masse innerhalb des Freistrahls ist so gering, dass die Auswirkungen der Explosion auf die nähere Umgebung der Anlage beschränkt bleibt und im Rahmen der vorliegenden Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Große Gaswolken mit entsprechender explosionsfähiger Masse sind nur bei der Freisetzung von Gasen mit gegenüber Luft höherer Dichte zu erwarten. Dies können z. B. druckverflüssigte Gase (Propan, Butan usw.) als auch tiefkalt gelagerte Gase (z. B. Wasserstoff) sein.

Die Dokumentation zur neuen Programmversion ProNuSs 9.39.2 zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung von vergleichenden Berechnungen mit experimentellen Untersuchungen von Wasserstoffaustritten in der Größenordnung von bis zu 20 kg/s. Ein Vergleich von explosionsfähigen Massen von Freisetzungen zu denen EFFECTS ein Ergebnis berechnet, ergibt zudem ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit dem konservativen Modell in ProNuSs 9.39.2.

Für die weitere Betrachtung wird deshalb die unter den neuen Berechnungsansätzen ermittelte hohe explosionsfähige Masse von 15,4 kg entsprechend einem explosionsfähigen Volumen von $\approx 3.000 \text{ m}^3$ als konservative Vorgehensweise weiter benutzt.

Die größte explosionsfähige Masse von 19 kg ergibt die Berechnung eines waagerechten Freistrahles in Windrichtung. Da die Hochdruck führenden Leitungen incl. der Speicher jedoch in wenigen Metern Höhe angeordnet sind (vgl. Abbildung 5), kommt es hier bereit nach kurzem Ausbreitungsweg zum Bodenkontakt mit zusätzlicher Verwirbelung und Aufbrechen des Freistrahles. Bei einer Freisetzungshöhe von 3 m gemäß Abbildung 7 z.B. nach $\approx 6 \text{ m}$.

Diese Berechnung ist deshalb auf Grund der realen Gegebenheiten insbesondere hinsichtlich der horizontalen Ausdehnung der Wolke nicht nutzbar. Vergleichend wird aber nachfolgend der Explosionsüberdruck sowohl für 15,4 kg als auch 19 kg explosionsfähige Masse dargestellt.

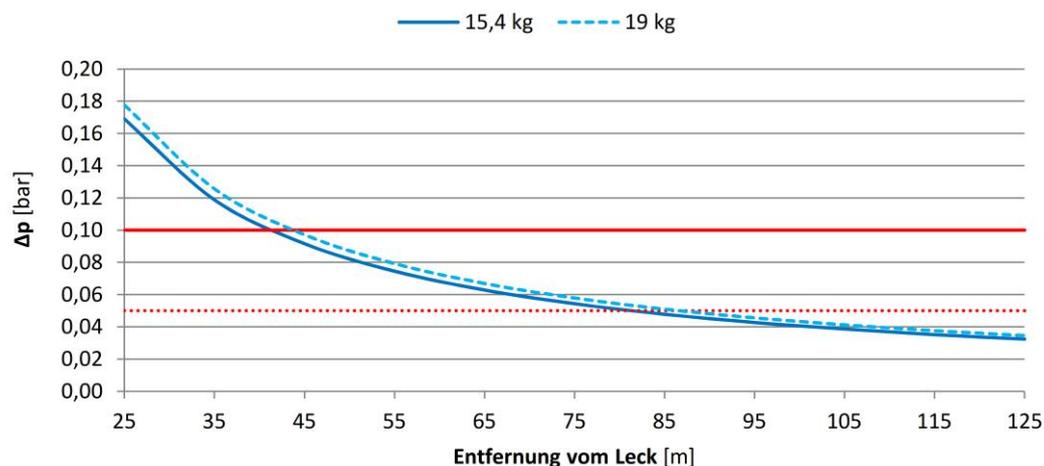


Abbildung 8: Spitzenüberdruck nach Wiekema für verschiedene explosionsfähige Massen

Mit dem nach Leitfaden KAS-18 zu nutzendem Explosionsmodell von Wiekema errechnet sich bei Zündung von 15,4 kg noch bis in 41 m Entfernung vom Leck eine Überschreitung des Beurteilungswertes von $\Delta p \geq 0,1 \text{ bar}$ (vgl. Anh. 5, Seite 3).

Legt man eine explosionsfähige Masse von 19 kg zu Grunde, erhöht sich diese Entfernung lediglich auf 44 m. Wie bei der Freistrahlberechnung, ergeben sich größere Änderungen erst mit alternativen Berechnungsmodellen für den Explosionsüberdruck, siehe dazu Kap. 5.3.

Für ein Explosionsszenario wird deshalb vom Gutachter ein Abstand von 45 m zum Wasserstoffleck als konservativ abdeckend angesehen.

5.2 Freistrahbrand

Wie in Kap. 3 erläutert, brennt Wasserstoff sehr gut, jedoch unter geringer Wärmestrahlung. Der als Wärmestrahlung emittierte Anteil an der Verbrennungswärme beträgt z.B. nach [R10] bei Propan und Butan $\approx 30 \%$, während für Wasserstoff dort $\approx 15 \%$ genannt sind.

In [R11] wird speziell für einen „Hochdruck-Wasserstoff-Freistrah“ sogar nur ein Anteil von 3 % empfohlen. Dies ist im Zusammenhang mit der hohen Austrittsgeschwindigkeit durchaus plausibel, am ausführlichsten wurden jedoch aus Sicht des Gutachters Freistrahbrände mit großen Massenströmen im Rahmen von Fackelanlagen in der Petrochemie untersucht.

Entsprechend finden sich in [R14] dezidierte Angaben zum Strahlungsanteil in Abhängigkeit vom Durchmesser der Brenneröffnung.

Stoff	Brennerdurchmesser [mm]	Anteil Wärmestrahlung [%]
Wasserstoff	9,1	9,1
	19	9,7
	41	11,1
Butan	9,1	25,3
	19	28,6
	41	28,5

Tabelle 4: Anteil der Wärmestrahlung an der Verbrennungswärme, Auszug aus Tabelle 13 in [R14]

Für den hier betrachteten Fall eines Lecks mit 25 mm Durchmesser ist damit ein Strahlungsanteil von $\approx 11\%$ abdeckend.

Die Flammenstrahlberechnung erfolgt deshalb konservativ für einen solchen Strahlungsanteil mit dem in [R9] beschriebenen Modell für den zuvor bestimmten Massenstrom von 8,16 kg/s und verschiedene Freisetzungswinkel von senkrecht nach oben (90°) bis nahezu waagrecht (15°) für eine Leck- und Immissionspunkthöhe von 2 m.

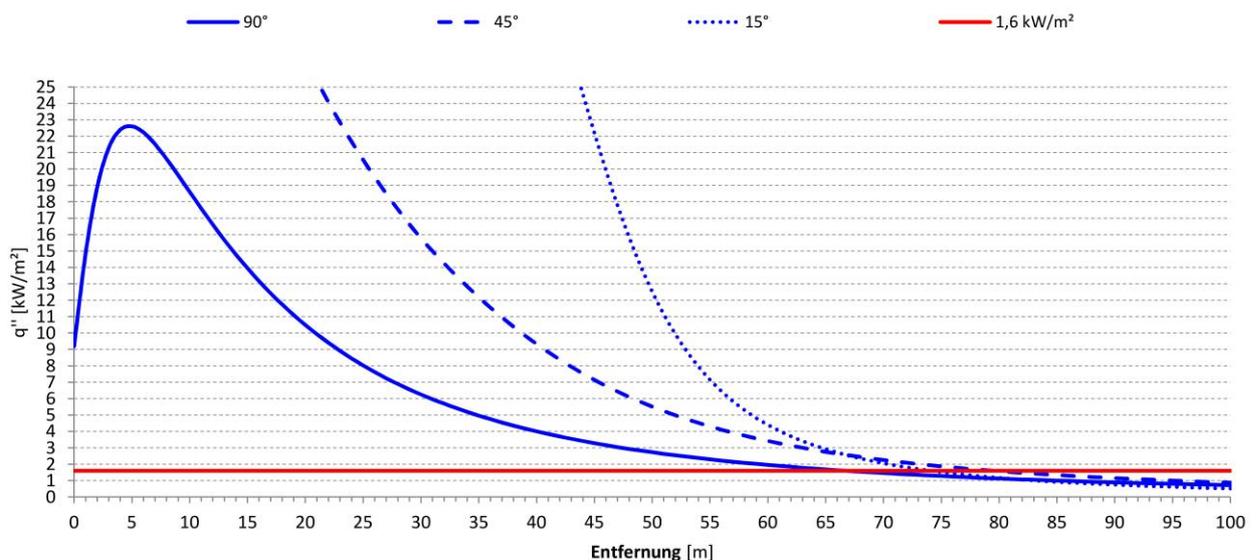


Abbildung 9: Wärmeimmission des Freistrahbrandes für verschiedene Austrittswinkel

Für den senkrechten Freistrahler ergibt sich ab einer Entfernung von 68 m eine Wärmeimmission $< 1,6 \text{ kW/m}^2$ (vgl. Anh. 5, Seite 4). Bei 45° müssen stattdessen 80 m, hingegen bei 15° nur 74 m überschritten werden.

Entscheidend für die Wärmeimmission ist, wieviel von der Flammenoberfläche visuell am Immissionspunkt in welchem Winkel und welchem Abstand zu sehen ist. Vorgaben zur Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse von Flamme zu Umgebung sind im Leitfaden KAS-18 nicht vorhanden.

Aus gutachterlicher Erfahrung ist für den Abstand von 80 m die Betrachtung der Freisetzung in einem Winkel von 45° bei Flammenlängen um 20 m hinreichend konservativ. Viel entscheidender sind die Annahmen z.B. zum Strahlungsanteil der Verbrennungswärme, siehe dazu Kap. 5.3.

Für ein Brandszenario wird deshalb vom Gutachter ein Abstand von 80 m zum Wasserstoffleck als konservativ abdeckend angesehen.

5.3 Diskussion der Unsicherheiten

Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit ist von Bedeutung für alle Szenarien mit toxischer Gasausbreitung, da eine höhere Windgeschwindigkeit eine höhere Verdünnung der Emission auf dem Ausbreitungsweg bedingt. Im vorliegenden Fall spielt sie hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

Für die rechnerisch mögliche explosionsfähige Masse innerhalb eines Freistrahles, würde die Absenkung der Windgeschwindigkeit in jedem Fall eine Erhöhung bedingen. Setzt man eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s statt 3 m/s an, ergäbe sich unabhängig vom Berechnungsmodell eine $\approx 15\%$ größere explosionsfähige Masse. Betrachtet man jedoch den geringen Unterschied zwischen den Druckverläufen einer Explosion von 15,4 kg und 19 kg in Abbildung 8, zeigt sich für ein Explosionsszenario keine wesentliche Relevanz.

Durch die größere Flammenneigung des brennenden Freistrahles in Richtung Immissionspunkt würde sich für eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s statt 3 m/s der notwendige Abstand zur Unterschreitung von $1,6 \text{ kW/m}^2$ bei einer Freisetzung senkrecht nach oben (90°) von 68 m auf 69 m erhöhen, für eine Freisetzung im Winkel 45° durch die ungünstigere Geometrie hingegen von 80 m auf 78 m verringern. Auch für das Brandszenario kann eine wesentliche Relevanz der in Kap. 4.2 aufgezeigten Unsicherheit bezgl. der anzusetzenden Windgeschwindigkeit verneint werden.

Explosionsmodell

Für Explosionsszenarien wird im Leitfaden KAS-18 das Modell von *Wiekema* genutzt. Im Rahmen der Untersuchung von Störfallszenarien innerhalb von Sicherheitsberichten nach StörfallV wird häufig auch das *Multi-Energy* – Modell aus [R9] angewandt. Dies deshalb, weil dieses Modell die Verdämmung einer Zündung zwischen zwei Gebäudewänden und die Verblockung durch in der Gaswolke befindliche Hindernisse wie Behälter berücksichtigen kann. Zusammen mit der Unterscheidung einer geringen und hohen Zündenergie ist dann entsprechend einer Auswahlmatrix aus zehn normierten Druckverlaufkurven zu wählen.

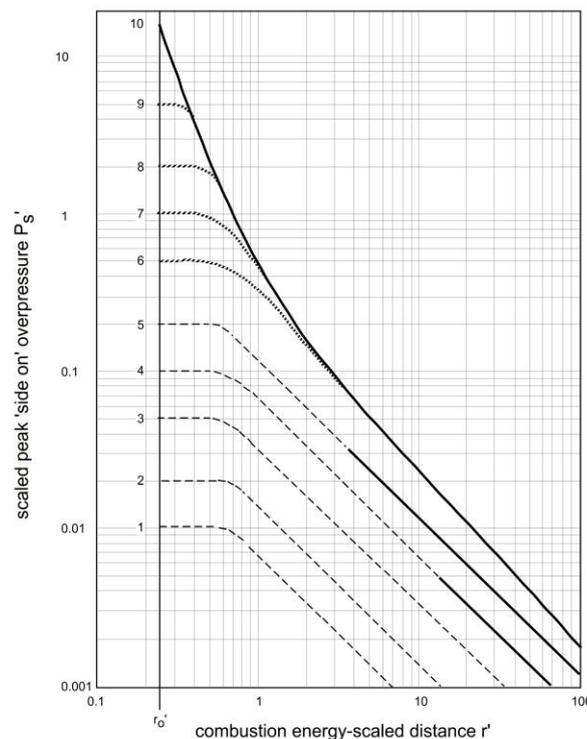


Abbildung 10: Normkurven des Multi-Energie Explosionsmodells, Figure 1 in [R18]

Aus obiger Abbildung ist ersichtlich, dass ein Spitzenüberdruck von 0,1 bar erst ab Kurve 4 überhaupt erreichbar ist. Für die hier untersuchte explosionsfähige $\approx 3.000 \text{ m}^3$ große Gaswolke im Freien ist jedoch zunächst weder eine Verdämmung noch eine Verblockung anzunehmen.

Da gleichzeitig eine niedrige Zündenergie z.B. durch einen Funken oder eine heiße Oberfläche zu erwarten ist, wäre nach der Auswahlmatrix des Modells die Kurve 1 zu wählen. Nach den Anwendungsvorschriften des *Multi-Energy* – Modells wäre also unabhängig von der explosionsfähigen Masse der Beurteilungswert von 0,1 bar nicht erreichbar. Dies ist aber angesichts der hohen laminaren Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff nicht plausibel.

Nimmt man deshalb einmal fiktiv die Ausbildung der Wasserstoffwolke in einem Bereich mit hoher Verblockung durch in der Gaswolke befindliche Hindernisse an, auch wenn dies im Widerspruch zu einer geschlossenen Freistrahlausbreitung steht, wäre zwischen Kurve 4 und 5 zu wählen. Mit der Kurve 5 errechnet das Programm EFFECTS für die explosionsfähige Masse von 15,4 kg den Spitzenüberdruck von 0,1 bar für eine Entfernung von 34 m zum Massenzentrum der explosionsfähigen Wolke (siehe Anh. 5, Seite 5).

Auf Grund der zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff in der Industrie wurden in der Fachwelt in den letzten Jahren zahlreiche Versuche zur Explosion von Wasserstoffwolken durchgeführt. Dabei wurde auch versucht, unabhängig von der Auswahlmatrix des *Multi-Energy* – Modells zu Verblockung, Verdämmung und Zündenergie einen Zusammenhang zu den Normkurven zu finden. Einen guten Überblick dazu gibt die nachfolgende Abbildung aus [R19].

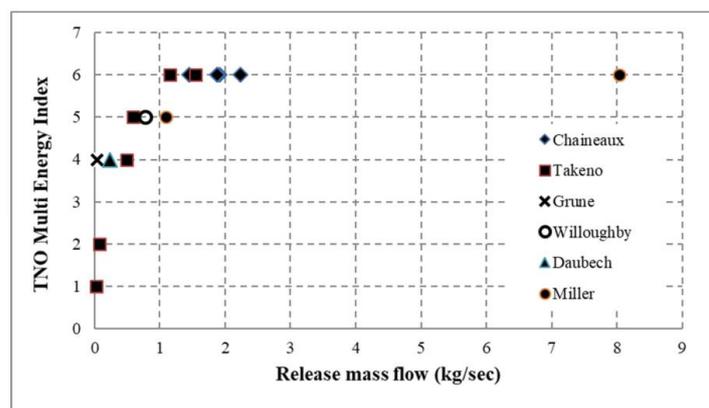


Abbildung 11: Zuordnung der Normkurven des Multi-Energie Explosionsmodells zur Freisetzungsrates von Wasserstoff bei Zündung im Konzentrationsbereich von 30 Vol%, Figure 5 in [R19]

Angesichts des ermittelten Massenstromes von 8,16 kg/s wäre damit die Kurve 6 zu wählen. Dies ergäbe bei gleicher explosionsfähiger Masse einen notwendigen Abstand von 80 m statt 34 m zum Massenzentrum der explosionsfähigen Wolke. Es ist jedoch zu beachten, dass nach [R19] nur der Teil der explosionsfähigen Wolke mit einer Wasserstoffkonzentration $> 10 \text{ Vol}\%$ zu einer hohen Flammgeschwindigkeit bzw. hohem Druckanstieg entsprechend Kurve 6 beiträgt.

Bestimmt man Wasserstoffmasse im Freistrah zwischen 10 Vol% und 77 Vol% statt 4 Vol% und 77 Vol% (vgl. Tabelle 2), sinkt die zu betrachtende explosionsfähige Masse deutlich. So würden sich z.B. die in Tabelle 3 genannten 2,9 kg rechnerisch fast um den Faktor 10 auf 0,3 kg reduzieren.

Mindert man die angenommenen 15,4 kg explosionsfähige Masse nur um den Faktor 5 auf 3,1 kg, ergeben sich unter Ansatz der Kurve 6 statt 80 m bereits nur noch 47 m als notwendiger Abstand. Dies entspricht nahezu dem im Kap. 5.1 mit dem *Wiekema* - Modell ermittelten Ergebnis.

Brandmodell

Entscheidend für die Auswirkungsbetrachtung zum Freistrahbrand ist nicht so sehr die Variation der Austrittswinkel des Freistrahles, mit im Ergebnis variierenden notwendigen Abständen von 68 m bis 80 m, sondern der angenommene Strahlungsanteil an der Verbrennungswärme.

Nimmt man die in [R11] vorgeschlagenen 3 % statt der benutzten 11 % Strahlungsanteil, sinkt der notwendige Abstand für die Freisetzung im Winkel von 45° von 80 m auf 49 m. Die im Kap. 6.2 als maßgebend festgelegten 80 m als notwendigen Abstand zum Wasserstoffleck können deshalb als sehr konservatives Ergebnis angesehen werden.

Massenstrom und Freisetzungsdauer

Wesentlich wichtiger als alle vor genannten Variationen zu Modellen oder einzelnen Parameterannahmen ist für alle Szenarien der durch die angenommene Leckfläche bestimmte initiale Massenstrom.

Wie in Kap. 4.1 ausgeführt, ist auch bei der Neuanlage im Hochdruckbereich von 500 bar wahrscheinlich nicht mit Rohrleitungen einer Nennweite größer 10 mm zu rechnen. Könnte man dies gesichert annehmen und damit die anzunehmende Leckfläche für einen Rohrleitungsabriss von 490 mm² auf 80 mm² reduzieren, ergäbe sich ein Massenstrom von 1,33 kg/s statt 8,16 kg/s.

Für das maßgebende Brandszenario sinkt dann für die Freisetzung im Winkel von 45° und konservativen 11 % Strahlungsanteil der notwendige Abstand von 80 m auf 34 m.

Ein weiterer Grund den Massenstrom für das Brandszenario zu reduzieren, wäre die nicht ausreichende Speicherkapazität im Hochdruckbereich. Für eine relevante Wärmeeinwirkung über 10 Minuten, müsste für einen Massenstrom von 8,16 kg/s ein zusammenhängendes Speichervolumen von ≈ 4.900 kg Wasserstoff entsprechend ≈ 160 m³ zur Verfügung stehen.

Durch getrennt arbeitende Speicher in der vorhandenen Größenordnung von 18 m³ pro Speichereinheit, könnte man in der konkreten Planung der Neuanlage den notwendigen Abstand für das Brandszenario deutlich reduzieren.

6 Übersicht der Ergebnisse

Szenario (Kap.)	Beurteilung mit	notwendiger Abstand zum Hochdruckbereich der Neuanlage
Explosion eines Wasserstoff-Freistrahls im Hochdruckbereich der Neuanlage (Kap. 5.1)	$\Delta p = 0,1 \text{ bar}$	45 m
Wärmeimmission durch einen Freistrahbrand im Hochdruckbereich der Neuanlage (Kap. 5.2)	$W = 1,6 \text{ kW/m}^2$	80 m

Tabelle 5: Übersicht zu den untersuchten Szenarien

Im Ergebnis erweist sich die Wärmestrahlung des Freistrahbrandes durch sehr konservative Annahmen als maßgebend. Die notwendigen Abstände zum zurzeit geplanten rot markierten Hochdruckbereich der Neuanlage zur Unterschreitung der Beurteilungswerte für den Explosionsüberdruck (hellblau) und der Wärmeimmission (orange) sind nachfolgend visualisiert



Abbildung 12: Notwendige Abstände zum Hochdruckbereich der Neuanlage

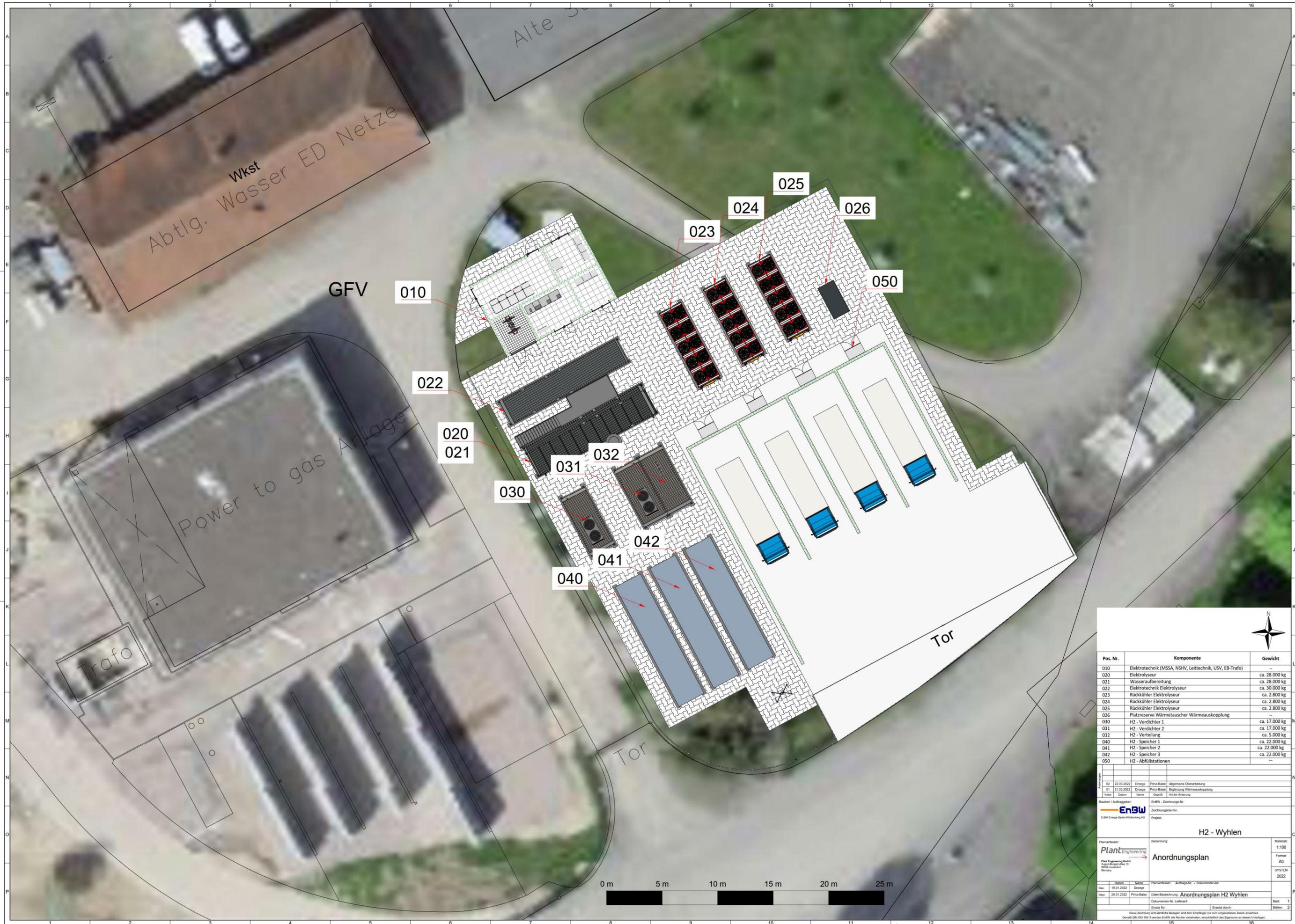
Durch eine geeignete räumliche Anordnung der den Hochdruck 500 bar führenden Anlageteile auf der Fläche der Neuanlage, ließe sich in nördlicher Richtung eine hinsichtlich der Beurteilungswerte relevante Einwirkung über die Betriebsgrenze hinaus vermeiden.

7 Referenzen

- [R1] Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG, Stand Jul. 2022.
- [R2] Störfall-Verordnung, 12. BImSchV, Stand Jun. 2020.
- [R3] Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen, 4. BImSchV, Stand Jan. 2021.
- [R4] Leitfaden "Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG", KAS-18, Nov. 2010 mit Korrekturen Nov. 2013 und Mär. 2014 sowie Ergänzung Dez. 2018.
- [R5] ProNuSs - Programm zur Numerischen Störfallsimulation, Dr.-Ing. B. Schalau, Version 7.30, 2012.
- [R6] ProNuSs - Programm zur Numerischen Störfallsimulation, ProNuSs Engineering GmbH, Version 9.39.2, 2022.
- [R7] TNO Safety software EFFECTS, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Version 9.0.16.8022, 2013.
- [R8] Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes - „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“, UFOPLAN 29748 428, Feb. 2000.
- [R9] TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific Research: Methods for the Calculation of Physical Effects, „Yellow Book“, CRP 14 E, Stand Nov. 2005.
- [R10] Heat Radiation of Flares, Environmental Engineering Program Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Kanada, Mai 2000.
- [R11] Flame Characteristics of High-Pressure Hydrogen Gas Jet, Mogi et al., Research Center for Explosion Safety, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan, Jul. 2005.
- [R12] Fragen und Antworten zur Richtlinie 96/82/EG (Seveso II), www.kas-bmu.de - Studien/Ergänzende Dokumente, Feb. 2006.
- [R13] Basic considerations for the safety of hydrogen systems, ISO/TR 15916, Dez. 2015.
- [R14] Pressure-relieving and Depressuring Systems, API Standard 521, 6. Ed., American Petroleum Institute, USA, Jan. 2014..
- [R15] Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) - Version 10, National Institute of Standards and Technology (NIST), USA.
- [R16] Thomas J. Peterson und J. G. Weisend II, *Cryogenic Safety*, International Cryogenics Monograph Series, Springer Verlag 2019.
- [R17] 1. punktuelle Änderung des Flächennutzungsplans „Power-to-Gas-Anlage“ (Gemarkung Wyhlen), Gemeinde Grenzach-Wyhlen, 14.03.2017.
- [R18] Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations, TNO report PML 1998-C53, TNO Prins Maurits Laboratory, Niederlande, 1998.
- [R19] Worst Case Scenario for Delayed Explosion of Hydrogen Jets at a High Pressure: Ignition Position, E. Vyazmina et al., AIR LIQUIDE Research & Development, Jouy-en-Josas, France, Jun. 2021.

8 Anhangsübersicht

- Anh. 1** Lageplan Neuanlage
- Anh. 2** Explosionsschutzzonen Altanlage
- Anh. 3** Bebauungsplan „Am Wasserkraftwerk“
- Anh. 4** Bebauungsplan „Power-to-Gas-Anlage“
- Anh. 5** Szenariendaten
- Anh. 6** Erläuterungen zu den Wirkungen von Bränden und Explosionen



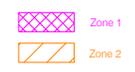
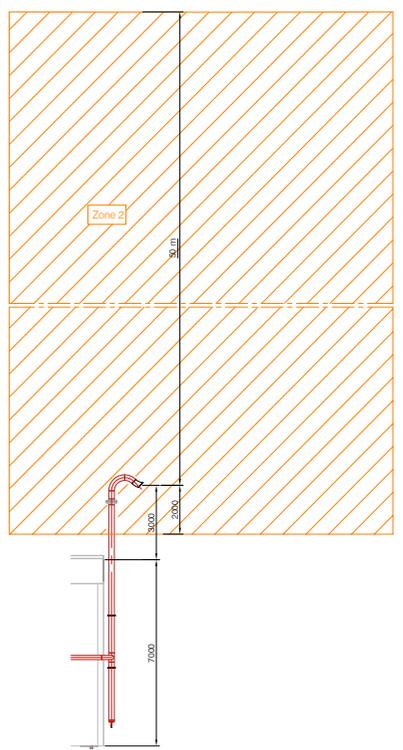
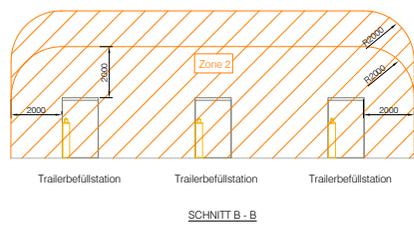
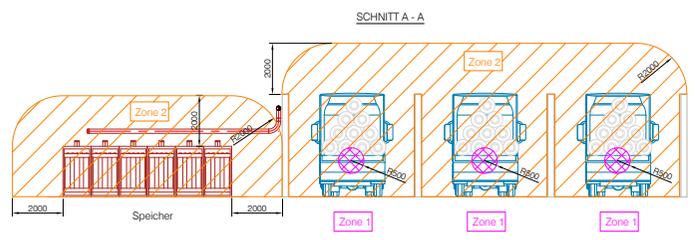
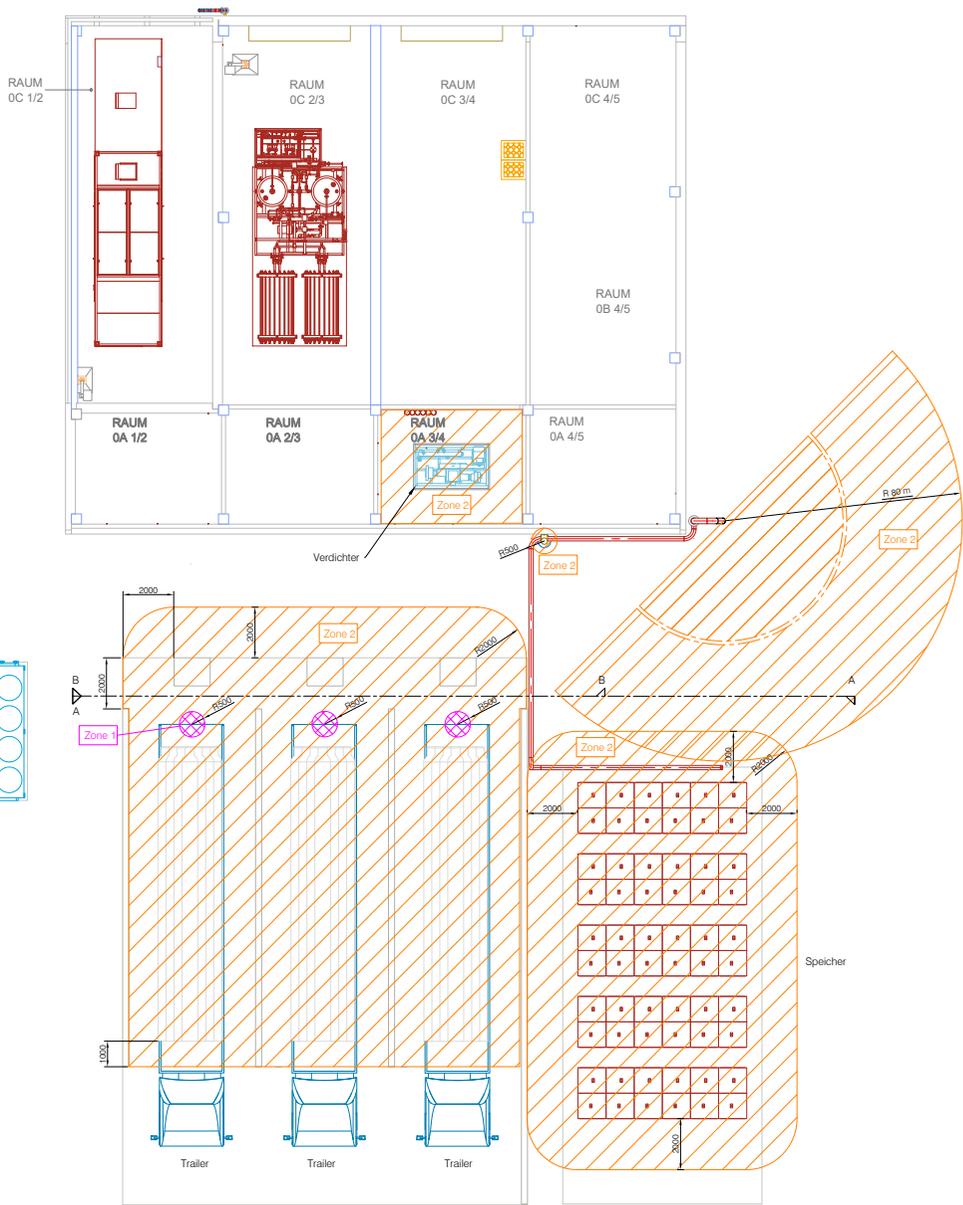
Pos. Nr.	Komponente	Gewicht
010	Elektrotechnik (MSSA, NSHV, Leittechnik, USV, EB-Trafo)	---
020	Elektrolyseur	ca. 28.000 kg
021	Wasseraufbereitung	ca. 28.000 kg
022	Elektrotechnik Elektrolyseur	ca. 30.000 kg
023	Rückkühler Elektrolyseur	ca. 2.800 kg
024	Rückkühler Elektrolyseur	ca. 2.800 kg
025	Rückkühler Elektrolyseur	ca. 2.800 kg
026	Platzreserve Wärmetauscher Wärmeauskopplung	---
030	H2 - Verdichter 1	ca. 17.000 kg
031	H2 - Verdichter 2	ca. 17.000 kg
032	H2 - Verteilung	ca. 5.000 kg
040	H2 - Speicher 1	ca. 22.000 kg
041	H2 - Speicher 2	ca. 22.000 kg
042	H2 - Speicher 3	ca. 22.000 kg
050	H2 - Abfüllstationen	---

Änderung	Datum	Ursache	Prüfung	Name	Geprüft	Art der Änderung
02	22.03.2022	Dringl.	Prüfz-Balaz	Algemeine Überarbeitung		
01	21.02.2022	Dringl.	Prüfz-Balaz	Ergänzung Wärmeauskopplung		

Bauplan / Auftraggeber:		EnBW	
EnBW Energie Baden-Württemberg AG		Projekt:	
Planverfasser:		Benennung:	
Plant Engineering GmbH		H2 - Wytlen	
Plant Engineering GmbH		Anordnungsplan	
Siedel-Gartenstr. 11		Maststab:	
70372 Stuttgart		1:100	
Germany		Format:	
		A0	
		SYSTEM:	
		2022	

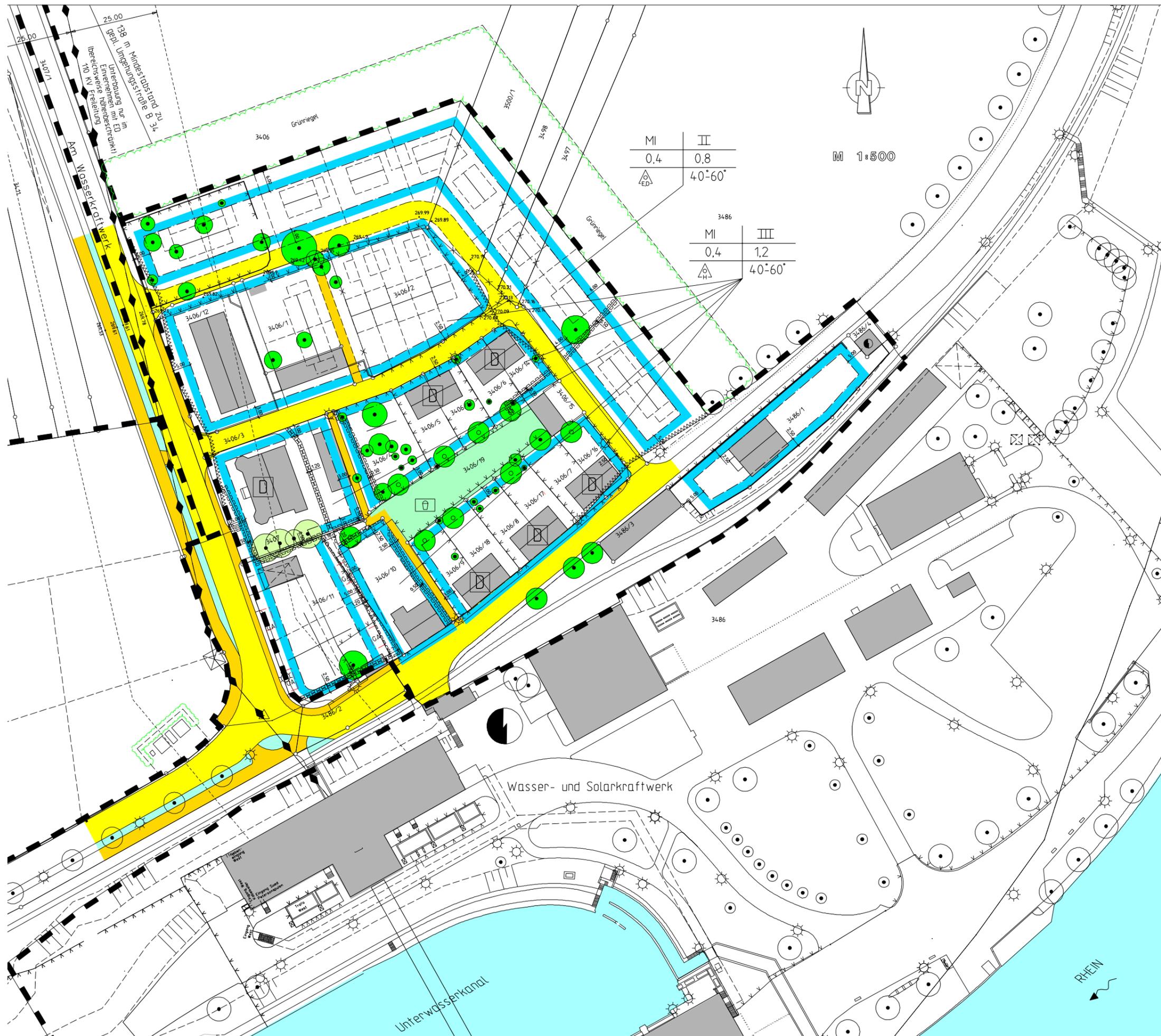
Datum	Ursache	Prüfung	Name	Geprüft	Art der Änderung
18.01.2022	Dringl.	Prüfz-Balaz	Prüfz-Balaz		
20.01.2022	Prüfz-Balaz	Prüfz-Balaz	Prüfz-Balaz		

Blatt:		Blatt:	
1		1	
Blätter:		Blätter:	
2		2	



Index	Datum	Zeichner	Änderung	approb
1	09.11.2016	Reisch	Neuerstellung	
01	09.02.2017	Reisch	Änderung	
02	12.12.2017	Reisch	Änderung	
03	06.12.2018	Reisch	aktualisiert nach 3. Gutachten Dr. Hasenpflug	

Multisub: 1 : 100		HAASENGINEERING Reinhold-Schneider-Str. 18a 79194 Gundelfingen
Energiedienst Power-to-Gas Exschutzonenplan		Zeichnungsnummer 1466-020-03-1 Bemerkung
Für dieses Dokument behalten wir uns alle Rechte nach ISO 16016 vor		



PLANZEICHENERKLÄRUNG

ART DER BAULICHEN NUTZUNG

MI Mischgebiet

MASS DER BAULICHEN NUTZUNG

MI	III	Baugebiet	Zahl der Vollgeschosse
0,4	Traufhöhe	Grundflächenzahl	Traufhöhe
△	40-60°	Bauweise	Dachform - Neigung

BAUWEISE, BAULINIE, BAUGRENZE

- Offene Bauweise
- △ Hausgruppen
- Baugrenze
- Firstrichtung zwingend
- Gebäudeversatz zwingend
- TGA Tiefgaragen
- GA Garagen

VERKEHRSLÄCHEN

- Fuss- Radwege öffentlich
- Privatwege
- Strassenverkehrsflächen
- Verkehrsgrün
- Einfahrt
- Einfahrtbereich

FLÄCHEN FÜR HAUPTVERSORGUNGSG- UND HAUPTABWASSERLEITUNGEN

- GR/FR/LR Geh- Fahr- Leitungsrecht gem. § 9 Abs. 1 Nr. 21 BaUGB

FLÄCHEN FÜR VERSORGSANLAGEN

- best. Wasser- und Solarkraftwerk
- best. Trafostation
- best. Elektrizitätsfreileitung mit Sicherheitsstreifen

GRÜNFLÄCHEN

- bestehende Bäume
- Pflanzgebot Bäume
- erhaltenswerte Bäume
- Kinderspielplatz

SONSTIGE PLANZEICHEN UND HINWEISE

- Grenze Geltungsbereich
- Abgrenzung unterschiedlicher Nutzung
- Bestehende Grundstücksgrenze
- Wegfallende Grundstücksgrenze
- Geplante Grundstücksgrenze
- Eingemessene Gebäude
- Kulturdenkmal, Teil der Sachgesamtheit Rheinkraftwerk

Auszug des Gutachters aus:
Bebauungsplan "Am Wasserkraftwerk"
 Gemeinde Grenzach-Whylen, 14.07.2006



Zeichenerklärung

- Art der baulichen Nutzung
 - Power-to-Gas-Anlage
- Maß der baulichen Nutzung (§ 9 Abs. 1 Nr. 1 BauGB; § 16 BauNVO)
 - GR maximal zulässige Grundfläche von Gebäuden
 - H maximal zulässige Höhe baulicher Anlagen
- Bauweise, Baulinien, Baugrenzen (§ 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB; §§ 22 und 23 BauNVO)
 - Baugrenze
- Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Natur und Landschaft (§ 9 Abs. 1 Nr. 20, 25 und Abs. 6 BauGB)
 - Flächen zum Anpflanzen von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen (§ 9 Abs. 1 Nr. 25 a und Abs. 6 BauGB)
 - Grünordnerische Maßnahmen (siehe Bauvorschriften)
- Sonstige Planzeichen
 - Grenze des räumlichen Geltungsbereichs des Bebauungsplans (§ 9 Abs. 7 BauGB)
- Vorschriften nach § 74 LBO
 - FD Flachdach bzw. flach geneigtes Dach
- Sonstige Darstellungen (keine Festsetzungen)
 - bestehende Hauptgebäude
 - bestehende Nebengebäude
 - bestehende Flurstücksgrenzen mit zugehörigen Flurstücksnummern
 - Rhein

Auszug des Gutachters aus:
*Vorhabenbezogener Bebauungsplan
und örtliche Bauvorschriften
"Power-to-Gas-Anlage"*
Gemeinde Grenzach-Whylen, 24.10.2017

Nutzungsschablone

Art des Baugebiets	zulässige Höhe baulicher Anlagen
zulässige Grundfläche von Gebäuden	Dachform/Dachneigung (Örtliche Bauvorschriften § 74 LBO)

Kap. 6.1 - Freistrah - Programm ProNuSs Version 7.30 - 90°

Stoffdaten:
 Ausgewählter Stoff: Wasserstoff (YAWS)
 Bearbeitungsdatum: 19.08.2022
 Molare Masse [g/mol]: 2,02
 Isentropenexponent [-]: 1,406
 Realgasfaktor [-]: 1,247
 Temperatur [K]: 303,15
 (Dampf)-Druck [bar-abs]: 501,013
 Überdruck [bar]: 500,0
 Gasdichte [kg/m³]: 32,19
 Wärmekapazität der Gasphase [kJ/kg K]: 14,2512
 Untere Explosionsgrenze [Vol.-%]: 4,0
 Obere Explosionsgrenze [Vol.-%]: 77,0
 KG-Wert [bar m/s]: 550,0
 Temperaturklasse: T1
 Explosionsgruppe: II C

Freistrahmodell: Schatzmann

Eingabedaten:
 Massenstrom [kg/s]: 8,1600E+00
 Durchmesser Austritt [mm]: 25,0
 Austrittswinkel [°]: 90,0
 Austrittshöhe [m]: 1,0
 Variable Windgeschwindigkeit:
 Exponent des Geschwindigkeitsprofils [-]: 0,28
 Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe [m/s]: 3,0
 Windgeschwindigkeit in Austrittshöhe [m/s]: 1,574
 Wetterlage: indifferent
 Bodenrauigkeit: sehr rauh
 Sigma [m]: 29,182
 Umgebungstemperatur [K]: 293,15
 Gaskonzentration im Freistrah [Vol.-%]: 100,0

Ergebnisse:

Startwerte nach Schatzmann:
 Ausströmgeschwindigkeit U_j [m/s]: 2160,56
 Temperatur des Freistrahls bezogen auf Luft [K]: 1996,83
 Rho/Rholuft [-]: 1,6943E+01
 Dichte des Freistrahls [kg/m³]: 0,18
 Rho_{st}/Rho_u [-]: -0,84
 T_{st}/T_u [-]: 5,81
 Fr [-]: 4498,21

Startwerte nach am Ende der Kernzone:
 Länge der Kernzone s₀ [m]: 0,17
 Winkel Theta₀ [°]: 89,92
 Breite des Freistrahls b₀ [m]: 1,8289E-02
 Konzentration [Vol.-%]: 87,16
 Temperatur des Freistrahls T₀ [K]: 1778,05

Abstand [m]	Höhe [m]	Winkel [°]	Konzentration [Vol.-%]	Geschwindigkeit [m/s]	Temperatur [K]
3,57E-07	1,17E+00	8,99E+01	9,41E+01	2,15E+03	1,77E+03
7,22E-07	1,17E+00	8,99E+01	9,41E+01	2,14E+03	1,77E+03
.
2,68E+00	1,44E+01	5,93E+01	3,97E+00	1,35E+01	3,01E+02
2,70E+00	1,44E+01	5,92E+01	3,96E+00	1,35E+01	3,01E+02

Höhe der Freistrahlmittellinie [m]: 1,0
 Radius des Freistrahls [m]: 2,7
 Freisetzungsfläche [m²]: 22,86
 Höhe der Austrittsfläche (Oberkante) über Freisetzungsort [m]: 15,8
 Entfernung der Austrittsfläche vom Freisetzungsort [m]: 3,0

Ende der Berechnung: Soll-Konzentration unterschritten
 Explosionsfähige Masse [kg]: 2,212

Kap. 6.1 - Freistrah - Programm ProNuSs Version 9.32.2 - 90°

Stoffdaten:
 Ausgewählter Stoff: Wasserstoff
 Bearbeitungsdatum: 18.11.2020
 Molare Masse (Gasphase) [g/mol]: 2,02
 Isentropenexponent [-]: 1,405
 Realgasfaktor [-]: 1,25
 Temperatur [K]: 303,15
 (Dampf)-Druck [bar-abs]: 501,013
 Überdruck [bar]: 500,0
 Gasdichte [kg/m³]: 32,1176
 Wärmekapazität der Gasphase [kJ/kg K]: 14,2906
 Untere Explosionsgrenze [Vol.-%]: 4,0
 Obere Explosionsgrenze [Vol.-%]: 77,0
 KG-Wert [bar m/s]: 550,0
 Unterer Heizwert [MJ/kg]: 120,0
 Diffusionskoeffizient in Luft [m²/s]: 7,896e-05
 Temperaturklasse: T1
 Explosionsgruppe: II C

Freistrahmodell: mod. Schatzmann

Eingabedaten:
 Massenstrom [kg/s]: 8,160
 Durchmesser Austritt [mm]: 25,00
 Austrittswinkel [°]: 90,00
 Austrittshöhe [m]: 1,00

Verwendung des Potenzansatzes für das Geschwindigkeitsprofil
 Exponent für das Geschwindigkeitsprofil: 0,28
 Anemometerhöhe [m]: 10,00
 Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe [m/s]: 3,00
 Windgeschwindigkeit in Freisetzungshöhe [m/s]: 1,57
 Umgebungstemperatur [K]: 293,15

Ergebnisse

Startwerte am Austritt

Mach-Zahl [-]: 1,00
 Überdruck [bar]: 286,488
 Ausströmgeschwindigkeit [m/s]: 1281,41
 Temperatur [K]: 252,15
 Dichte [kg/m³]: 12,97

Startwerte am Ende der Kernzone

Strömungsgeschwindigkeit [m/s]: 2187,66
 Temperatur [K]: 135,70
 Dichte des Freistrahls [kg/m³]: 0,18
 Länge der Kernzone s0 [m]: 0,15
 Winkel Theta0 [°]: 89,92
 Breite des Freistrahls b0 [m]: 1,3514E-01
 Konzentration [Vol.-%]: 87,16

Abstand [m]	Höhe [m]	Winkel [°]	Konzentration [Vol.-%]	Geschwindigkeit [m/s]	Temperatur [K]
2,1363E-04	1,1549E+00	8,9921E+01	8,7132E+01	2,1838E+03	1,5599E+02
2,1759E-04	1,1577E+00	8,9920E+01	8,6836E+01	2,1415E+03	1,5670E+02
.
5,7273E+00	4,3406E+01	7,0628E+01	3,9629E+00	2,0144E+01	2,8903E+02
5,7372E+00	4,3434E+01	7,0607E+01	3,9597E+00	2,0132E+01	2,8904E+02

Höhe der Freistrahlmittellinie [m]: 43,43
 Radius des Freistrahls [m]: 15,70
 Freisetzungsfläche [m²]: 774,07
 Höhe der Austrittsfläche (Oberkante) über Freisetzungsort [m]: 48,65
 Entfernung der Austrittsfläche vom Freisetzungsort [m]: 5,74

Berechnung beendet.

Die gewünschte minimale Konzentration wurde unterschritten.
 Explosionsfähige Masse [kg]: 1,5428E+01
 Explosionsfähiges Volumen [m³]: 3,0094E+03

Kap. 6.1 - Explosion - Wiekema-Modell

Name	Wasserstoff	---
CAS	1333-74-0	---
Molekulargewicht	2,016	g/mol
Formel	H2	---
Heizwert	119,962	MJ/kg
Reactivity:	1	high Reactivity
Umgebungsdruck	1013	mbar
Umgebungstemperatur	20	°C
Verbrennungsenergiegedichte	3,0	MJ/m ³
charakteristische Länge	26,3	m
Uzd horizontal	8,0	m
Ex-Masse	15,4	kg
Überdruck	0,1	bar
unterschriften ab	41	m
Uzd horizontal	8,0	m
Ex-Masse	19,0	kg
Überdruck	0,1	bar
unterschriften ab	44	m

Kap. 6.2 - WärmestrahlungLeckage- und Brandbedingungen

Name	Wasserstoff	-
CAS	1333-74-0	-
Molekulargewicht	2,016	g/mol
Heizwert	119,962	MJ/kg
Rußanteil	0%	-
Innendruck	501	barabs
Innentemperatur	30	°C
Schallgeschwindigkeit	1758	m/s
Austrittstemperatur	51,3	°C
Austritt	8,16	kg/s

Ausbreitungssituation

Lufttemperatur	20	°C
rel. Feuchte	30%	-
Molmasse Luft	28,89	kg/kmol
Luftdichte	1,201	kg/m ³
Windgeschwindigkeit	3	m/s
Quellhöhe	2	m
Aufpunkthöhe	2	m

Ergebnis

Winkel	90	°
Jetlänge	28,8	m
Abhebung der Flamme	5,6	m
Länge des Flammenkegels	23,2	m
Durchmesser der Flammenkegelbasis	0,3	m
Durchmesser der Flammenkegelspitze	7,7	m
äquivalente Zylinderoberfläche	319	m ²
Strahlungsanteil	11,1%	-
max. Emission der Jetoberfläche	340	kW/m ²
Abstand IP	68	m
Wärmeimmission am IP	1,59	kW/m ²

Kap. 6.3 - Explosion - Multi-Energy-Modell - Programm EFFECTS

Inputs	
Chemical name	HYDROGEN (USER)
Ambient pressure (bar)	1,0133
Total mass in explosive range (kg)	15,4
Fraction of flammable cloud confined (-)	1
Curve number	5 (Medium deflagration)
Threshold overpressure (mbar)	100
Results	
Confined mass in explosive range (kg)	15,4
Total combustion energy (MJ)	2185,3
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	33,903

Inputs	
Chemical name	HYDROGEN (USER)
Ambient pressure (bar)	1,0133
Total mass in explosive range (kg)	15,4
Fraction of flammable cloud confined (-)	1
Curve number	6 (Strong deflagration)
Threshold overpressure (mbar)	100
Results	
Confined mass in explosive range (kg)	15,4
Total combustion energy (MJ)	2185,3
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	79,297

Inputs	
Chemical name	HYDROGEN (USER)
Ambient pressure (bar)	1,0133
Total mass in explosive range (kg)	3,1
Fraction of flammable cloud confined (-)	1
Curve number	6 (Strong deflagration)
Threshold overpressure (mbar)	100
Results	
Confined mass in explosive range (kg)	3,1
Total combustion energy (MJ)	439,89
Dist. from center mass of cloud at threshold overpressure (m)	46,473

Die Schäden durch **Druckwirkungen** können vereinfacht anhand des positiven Spitzenüberdrucks der Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung abgeschätzt werden. Dabei wird außer Acht gelassen, dass auch die Dauer und Form des Druckimpulses im Zeitverlauf eine Rolle spielen und dass auch Schäden durch den dem Überdruck folgenden Unterdruck, der erheblich länger anhält, verursacht werden können.

Schadensbild	Δp in bar	Schadensbild	Δp in bar
Glasscheiben			
Gelegentlicher Bruch großer unter Spannung stehender Scheiben	0,002	Bruch von 10 % der Scheiben	0,01
Glasbruch durch Schallwellen	0,003	Bruch von 75 % der Scheiben	0,03
Bruch kleiner unter Spannung stehender Scheiben	0,005	Bruch von 100 % der Scheiben	0,05
Schäden an Häusern			
Schäden an Fensterrahmen, Türen, Dächern	0,005	Zerstörung von Wänden aus Ziegel- und Schlackesteinen	0,13
Geringe Schäden an Dächern	0,020	Zerstörung von 20 bis 30 cm dicken Ziegelsteinausfachungen	0,15
Gelegentliche Beschädigung von Fensterrahmen, Risse im Mauerputz	0,035	Mittlere Schäden an Fachwerkgebäuden	0,20
Zerstörung der Dächer und Wände von Holzhäusern	0,06	Zerstörung 24er Mauerwerk	0,25
Zerstörung Seitenwandverkleidungen	0,075	Schwere Schäden an Fachwerkgebäuden	0,31
Beschädigung des Außenputzes	0,085	Nahezu vollständige Zerstörung üblicher Gebäude	0,40
Zerstörung gemauerter Wände	0,10	Zerstörung 50er Mauerwerk	0,50
Schäden an Anlagenteilen			
Stahlblechplatten verbeult	0,075	Eisenbahnwagen umgeworfen	0,46
Stahlrahmen von Skelettgebäuden leicht verformt	0,095	99 % Schaden an Tanks mit konischem Dach	0,55
Öltanks aufgerissen	0,215	Beladene Güterwagen umgestürzt	0,60
Zerstörung von Stahlbetonwänden	0,35	Beladene Güterwagen zerstört, 99 % Schaden an horizontal gelagerten Druckkesseln, chemischen Reaktoren und Wärmetauschern	0,75
Personenschäden			
Unangenehme Knallwirkung tiefer Frequenz	0,0015	Untere Grenze Trommelfellriss	0,175
Sehr lauter Knall	0,003	Untere Grenze für Lungenschäden	0,85
Umstoßen von Personen	0,010	Untere Grenze für ernste Lungenschäden	1,85
Druckbezogener Grenzwert für Schäden durch Spreng- und Wurfstücke	0,015	Untere Letalitätsgrenze	2,05

Tabelle 1: Auswirkung von Druckspitzen¹

¹ Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes - „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenerarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“, UFOPLAN 29748 428, Feb. 2000.

Die nachfolgenden Auszüge aus KAS-18² stellen die möglichen **Auswirkungen von Bränden** auf Schutzobjekte in der Anlagenumgebung dar.

Zur Beurteilung welche Objekte nach kurzer Zeit selbst entzündet und so zu einer Ausbreitung des Brandes beitragen, gilt die nachfolgende Tabelle.

Wirkung/Entzündung	Bestrahlungsstärke	Einwirkungsdauer
Maximale Sonneneinstrahlung	1,3 kW/m ²	lange
Platzen von Fensterscheiben	5,0 kW/m ²	6 s
Kunstfaser	7,0 kW/m ²	sofort
Papier	8,0 ... 13,0 kW/m ²	5 ... 8 s
Schmieröl an Maschinen	9,2 kW/m ²	-
Anstrichfarbe an Anlagenteilen	12,2 kW/m ²	-
Baumwollgewebe	24,0 kW/m ²	900 s
Ungestrichene Holzfaserplatte	25,0 kW/m ²	900 s
Ungestrichenes Holz	32,0 kW/m ²	900 s
Stahlkonstruktionen versagen	42,0 kW/m ²	900 s
Duroplastischer Kunststoff	84,0 kW/m ²	900 s

Tabelle 2: Auswirkung von Strahlungswärme (Kurzezeitwirkung)

Zur Beurteilung lang andauernder Brandeinwirkungen wird die kritische Bestrahlungsstärke definiert; sie ist in der folgenden Tabelle angegeben.

Zu schützendes Objekt	Kritische Bestrahlungsstärke
Grenze für nachteilige Wirkungen	1,6 kW/m ²
Empfindliche Gebäude: Krankenhäuser, Altenheime, Schulen, Wohnhäuser	2,0 kW/m ²
Öffentliche Straßen	4,5 kW/m ²
Grenze für wahrscheinliche Feuerübertragung	8 kW/m ²
Ungekühlte Lagertanks	10 kW/m ²
Fabrikgebäude: Leitwarten, Werkstätten	12,6 kW/m ²
Gekühlte Lagertanks	37,8 kW/m ²

Tabelle 3: Auswirkung von Strahlungswärme (Langzeiteinwirkung)

Falls die ungeschützte menschliche Haut betroffen ist, können unterschiedlich schwere Verletzungen (Verbrennungen) bis zum Tod bewirkt werden.

Die Abhängigkeit der Zeitdauer t_{Str} bis zum Erreichen der Schmerzgrenze von der Bestrahlungsstärke b ist in der folgenden Tabelle enthalten.

b in kW/m ²	1,7	2,3	2,9	4,7	6,9	9,5	11,7	19,9
t_{Str} in s	60	40	30	16	9	6	4	2

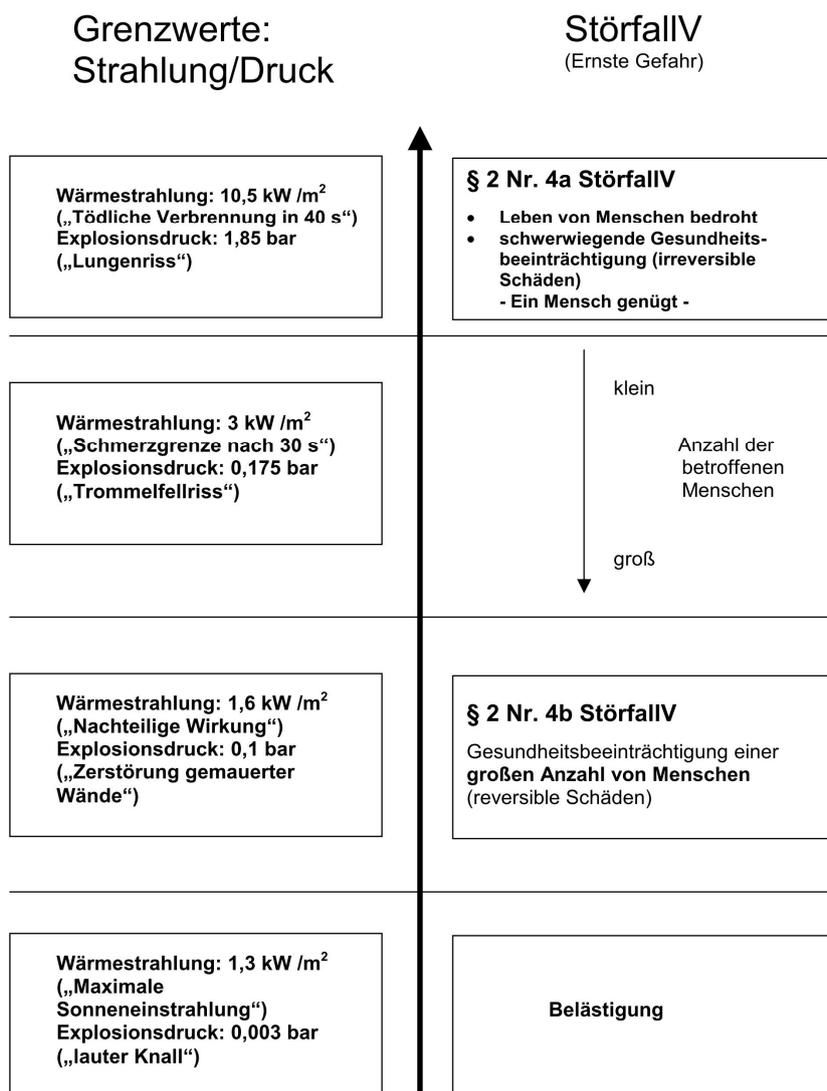
Tabelle 4: Auswirkung von Strahlungswärme auf den Menschen (Schmerzgrenze)

Bei einer Bestrahlungsstärke von 10,5 kW/m² kommt es nach 10 bis 12 s zur Blasenbildung auf der Haut. Der Tod tritt bei dieser Bestrahlungsstärke nach etwa 40 s ein. Bis zu einer Bestrahlungsstärke von 5 kW/m² ist ein kurzfristiger Feuerwehreinsatz noch möglich.

Für Menschen kann eine Bestrahlungsstärke von 1,6 kW/m² als Grenze für nachteilige Wirkungen betrachtet werden.

² Leitfaden "Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG", KAS-18, Nov. 2010.

Zu den Beurteilungswerten für die Bauleitplanung wird in KAS-18 erläutert:



Für die **Wärmestrahlung** ist mit einem Grenzwert von **1,6 kW/m²** die Grenze des Beginns nachteiliger Wirkungen für Menschen erreicht (....).

Bei den Wirkungen von **Explosionen** ist eine Grenze zu irreversiblen Gesundheitsschäden bei 0,175 bar Spitzenüberdruck für den Trommelfellriss gesetzt. Schäden durch z. B. zersplittertes Glas sind schon ab 0,05 bar (für 100 % Bruch) zu erwarten (....). Als mittlerer Grenzwert könnte für die Flächennutzungsplanung **0,1 bar** gesetzt werden.