



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Sicherheitstechnische Betrachtung und Planung
der Zumischung von Wasserstoff in die
Erdgaszuleitung für den RecoDust Prozess

Kevin Landa, BSc

Oktober 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 16.10.2023

Unterschrift Verfasser/in
Kevin Landa

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Wolfgang Reiter bedanken, der mir immer wieder Zuversicht gegeben hat, auch in schwierigen Phasen nicht aufzugeben und das Ziel vom Aufstellen der Anlage konsequent weiterzuverfolgen.

Also I want to gratefully acknowledge the funding support of K1-MET GmbH, metallurgical competence center. The research programme of the K1-MET competence center is supported by COMET (Competence Center for Excellent Technologies), the Austrian programme for competence centers. COMET is funded by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, the Federal Ministry for Labour and Economy, the Federal States of Upper Austria, Tyrol and Styria as well as the Styrian Business Promotion Agency (SFG) and the Standortagentur Tyrol. Furthermore, Upper Austrian Research GmbH gives continuous support. Beside the public funding from COMET, this research project is partially financed by the scientific partner Montanuniversität Leoben and the industrial partners voestalpine Stahl GmbH and voestalpine Stahl Donawitz GmbH.

Einen weiteren großen Dank geht an Dipl.-Ing. Dr. mont. Christoph Spijker, der stets Verständnis für meine Fragestellungen zeigte und mich immer wieder mit der richtigen Hilfestellung auf den richtigen Weg führte.

Außerdem geht ein besonderer Dank an das komplette Team vom Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, dass mir die Möglichkeit gegeben wurde, diese Masterarbeit an ihrem Lehrstuhl zu verfassen. Auch bei meinen durchgeführten HAZOP-Studys wurde ich von dem Team tatkräftig unterstützt, ohne deren kompetente Unterstützung wäre diese Masterarbeit nicht möglich gewesen.

Besonders meine Freundin verdient ein großes Dankeschön. Sie hat mir immer wieder die kleinen Dinge des Alltages abgenommen, mir gegenüber sehr viel Geduld aufgebracht und mich immer in jeglicher Hinsicht unterstützt. Weiteres hat sie sich die Zeit genommen, meine Masterarbeit komplett durchzulesen und Fehler darin zu korrigieren. Ebenfalls möchte ich mich noch bei allen anderen Korrekturlesern, Inputgebern und generell Helfern bei dieser Masterarbeit bedanken.

Abschließend möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium in Leoben durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr in sämtlichen Anliegen hatten, sei es in Bezug auf das Studium oder auch bei alltäglichen Herausforderungen.

Kurzfassung:

„Sicherheitstechnische Betrachtung und Planung der Zumischung von Wasserstoff in die Erdgaszuleitung für den RecoDust Prozess“

Mittels eines pyrometallurgischen Verfahrens können zinkhaltige Stäube aus der Eisen- und Stahlindustrie aufgeschmolzen und somit Zink und Eisen separat wiedergewonnen werden. Dieser „Recyclingprozess“ von Zink wird anhand des RecoDust Prozesses realisiert. Als Reduktionsmittel und gleichzeitig als Brenngas wird dabei Erdgas verwendet. Durch ein europäisches Projekt soll der Stahlwerksprozess und somit auch alle Folgeprozesse für das Recycling von Zink mit weniger CO₂ Ausstoß betrieben werden. Der Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, das Team für Hochtemperaturprozesstechnik und die Voestalpine Stahl GmbH haben sich somit zur Aufgabe gemacht, den RecoDust Prozess mit einem Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff zu betreiben, um ihn somit für die kommende Energiewende attraktiv und klimaneutral zu machen. Dafür wird eine neue Wasserstoffregelstrecke und eine Einbindung dieser in die bestehende Erdgaseindüsung beim RecoDust Prozess benötigt. Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem gesamten Prozess der Beschaffung dieser Wasserstoffregelstrecke inklusive der Lagerung des Wasserstoffs und dessen Zumischung zum Erdgas. Zusätzlich wurde die behördliche Kommunikation nach außen, sowie die Kommunikation mit internen Stellen geführt. Ein großer Teil des gesamten Projektes war es, eine Start-HAZOP-Study zur Evaluierung etwaiger Gefahrenquellen durchzuführen. Mit diesen initialen Erkenntnissen sind erste Eckpunkte für die Anlage ausgearbeitet worden. In einem weiteren Schritt wurden diese mit externen Lieferanten besprochen und umgesetzt. Nach der Aufstellung der Anlage wurde eine abschließende HAZOP-Study für das interne Ablegen, aber auch für die sicherheitstechnische Auslegung der Schrittketten bei Notabschaltungen sowie für die Einreichung der gesamten Anlage bei der Behörde erstellt und ausgearbeitet. Als Ergebnis konnte eine für die Warminbetriebnahme fertige Anlage aufgestellt werden, welche durch die sicherheitstechnische Betrachtung und deren Folgemaßnahmen ohne jegliche Bedenken in Betrieb genommen werden kann.

Abstract:

“Safety consideration and planning for the admixture of hydrogen into the natural gas feed line of the RecoDust process”

By applying a specific pyrometallurgical process, zinc-containing dusts from the iron and steel industry can be molten allowing zinc and iron to be recovered separately. This "recycling process" of zinc is realized by means of the RecoDust process. Natural gas is used as a reducing agent and simultaneously as a fuel gas. The European project aims to operate the steel mill process and all subsequent processes for the recycling of, for instance zinc, with reduced CO₂ emission. The Chair of Thermal Process Technologies, the High Temperature Process Engineering Team and Voestalpine Stahl GmbH have thus undertaken the task of operating the RecoDust process with a mixture of natural gas and hydrogen to make it attractive and climate-neutral for the upcoming energy transition. For this purpose, a new hydrogen control system and its integration into the existing natural gas injection system of the RecoDust process is required. This master's thesis deals with the entire process of procuring this hydrogen control line, including the storage of the hydrogen and its blending with natural gas. In addition, the external regulatory communication as well as the communication with internal departments was conducted. Prior to the entire project, a start-up HAZOP study was conducted to evaluate any potential hazards. With these initial findings, the first key points for the plant were elaborated and were thereafter discussed as well as implemented with external suppliers. After the installation of the plant, a final HAZOP study for internal documentation, but also for the safety-related design of the step chains in case of emergency shutdowns and for the submission of the entire plant to the authorities was prepared and subsequently elaborated. The result was a plant ready for warm commissioning, which can be put into operation without any concerns due to the safety considerations and their follow-up measures.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | III |
| Allgemeine Formelzeichen und Akronyme | V |
| 1 Einleitung..... | 6 |
| 1.1 Aufgabenstellung | 7 |
| 1.2 Zielsetzung | 7 |
| 2 Theoretische Grundlagen..... | 8 |
| 2.1 RecoDust-Verfahren | 8 |
| 2.2 Wasserstoff/Methan – Vergleich | 9 |
| 2.2.1 Joule-Thomson-Effekt | 11 |
| 2.3 Mischung von Wasserstoff (H ₂) und Methan (CH ₄) | 12 |
| 2.4 Gemisch Betrachtung von H ₂ und CH ₄ | 13 |
| 2.4.1 Heiz- und Brennwerte | 13 |
| 2.4.2 Explosionsgrenzen und -bereiche | 15 |
| 2.4.3 Normspaltweiten von Wasserstoff-Methan-Gemischen | 17 |
| 2.5 Sicherheitsbetrachtung | 18 |
| 2.5.1 Wasserstoffstrecke Theoretische Hintergründe | 18 |
| 2.5.2 HAZOP-Study | 19 |
| 3 Durchgeführte Tätigkeiten | 23 |
| 3.1 Vorplanung der Wasserstoffstrecke | 23 |
| 3.1.1 Berechnung der Temperatur mittels Joule-Thomson-Koeffizient..... | 24 |
| 3.2 Start-HAZOP-Study | 27 |
| 3.3 Variable Bilanzierung des Flash-Reaktors bei Verwendung eines Methan/Wasserstoff-Gemisches | 32 |
| 3.4 Auswahl der Partnerfirmen | 37 |
| 3.5 Aufstellplan der Anlage | 40 |
| 3.6 Fotodokumentation der Bau- und Aufstelarbeiten für das gesamte Projekt | 42 |
| 3.7 Abschließende HAZOP-Study..... | 51 |
| 4 Neue Betriebsarten und Störabschaltungen | 58 |
| 4.1 Ruhezustand der Anlage | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2 | Handbetrieb der Anlage | 59 |
| 4.3 | Anfahren der Anlage | 59 |
| 4.4 | Warmbetrieb der Anlage | 60 |
| 4.5 | Abfahren der Anlage | 61 |
| 4.6 | Störabschaltungen der Anlage | 61 |
| 4.6.1 | Prozesshalt der Anlage | 62 |
| 4.6.2 | Ausfall von Betriebswasserpumpe 02-P1 | 62 |
| 4.6.3 | Stromausfall der Anlage | 62 |
| 4.6.4 | NOT-Aus der Anlage | 62 |
| 5 | Ergebnisse | 63 |
| 5.1 | Berechnungsergebnisse | 63 |
| 5.2 | Fertige Anlage für die Kaltinbetriebnahme | 64 |
| 5.3 | HAZOP-Studys | 65 |
| 5.3.1 | Teilsystem Gasflaschenlager | 65 |
| 5.3.2 | Teilsystem Rohrleitung | 68 |
| 5.3.3 | Teilsystem Regelstrecke | 71 |
| 5.3.4 | Teilsystem Gasmischung | 75 |
| 5.4 | Störfallszenarien | 80 |
| 6 | Diskussion und Interpretation | 81 |
| 7 | Schlussfolgerung und Ausblick | 85 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 87 |
| 9 | Abbildungsverzeichnis | 89 |
| 10 | Tabellenverzeichnis | 91 |
| 11 | Anhänge | 93 |

Allgemeine Formelzeichen und Akronyme

| | |
|--------------------|---|
| TPT | Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik |
| MUL | Montanuniversität Leoben |
| H ₂ | Wasserstoff |
| CH ₄ | Methan (Erdgas) |
| UEG | Untere Explosionsgrenze |
| OEG | Obere Explosionsgrenze |
| MESG | Normspaltweite |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin |
| PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig |
| V _N | Normvolumenstrom [m ³ /h] |
| p _N | Normdruck [bar] _a |
| T _N | Normtemperatur [K] |
| V _B | Betriebsvolumenstrom [m ³ /h] |
| p _B | Betriebsdruck [bar] _a |
| T _B | Betriebstemperatur [K] |
| A | Rohrquerschnittsfläche [m ²] |
| d | Rohrleitungsdurchmesser [m] |
| v | Strömungsgeschwindigkeit [m/s] |
| c _p (T) | Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur [J/mol*K] |

1 Einleitung

Jährlich fallen in der Stahlproduktion 15 – 22 Kilogramm Staub pro Tonne produziertem Stahl an, welcher in einer Entstaubungsanlage gesammelt werden. Diese sind in der chemischen Zusammensetzung abhängig von den Einsatzstoffen und können somit auch Schwermetalle beinhalten. Da es sich bei diesen Schwermetallstäuben um umweltschädliche Stoffe und um kostbare Rohstoffe handelt, ist das Recycling ein wichtiger Teil der Produktionskette. Zink ist eines dieser Schwermetalle und wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt und benötigt. In der Bauindustrie, der Architektur, der Automobilproduktion, im Maschinenbau und vor allem im Korrosionsschutz ist Zink ein essenzieller Bestandteil. Aufgrund dieser enormen Mengen Staub, welche einen großen Anteil an Zink enthalten, ist eine effiziente Recyclingstrategie erforderlich. [1]

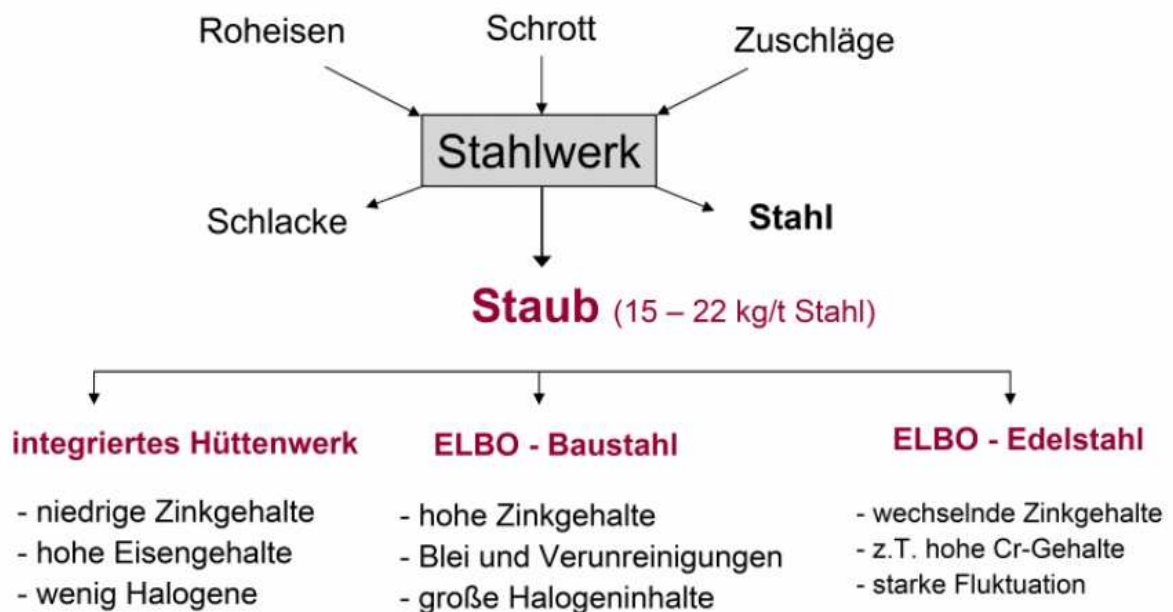


Abbildung 1: Eingangs- und Ausgangsstoffe bei Stahlwerksprozessen und die Entstehung und Eigenschaften von Stahlwerksstäuben [1]

Durch einen im Jahre 2010 errichteten Reaktor, welcher Flash-Reaktor genannt wird, kann durch reduzierende Bedingungen und hohen Temperaturen Zink selektiv verdampft werden. Um diese hohen Temperaturen im Flash-Reaktor zu realisieren, wird Erdgas mit O₂ unterstöchiometrisch verbrannt.

1.1 Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund, dass durch das Verbrennen von Erdgas CO_2 frei wird, wird nun im Zuge dieser Masterarbeit die Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas geplant und teilweise realisiert. Ein Teil der Masterarbeit ist die Planung der Wasserstoffstrecke, vom Gasflaschenlager über den Rohrweg, bis hin zur Regelstrecke und zur endgültigen Mischung mit Erdgas. Ebenso wird eine vollständige Sicherheitsbetrachtung für die geplante Anlage gemacht. Die Automation der Zumischung, die Steuerung und die Datenaufzeichnung werden ebenfalls überwacht und dokumentiert. Die Störabschaltungen der neuen Anlage werden Schritt für Schritt aufgebaut und dem Automatisierungstechniker zur Implementierung übergeben.

Bevor der praktische Teil in dieser Arbeit erläutert wird, welcher mit dem Aufstellen und Genehmigen der neuen Anlage beginnt und mit der Sicherheitsbetrachtung der gesamten Anlage mittels Start-HAZOP-Study und abschließender HAZOP-Study endet, wird noch auf die theoretischen Grundlagen eingegangen. Diese setzen sich aus dem RecoDust Verfahren samt Flash-Reaktor, dem energetischen Vergleich von H_2 zu CH_4 , der Gemisch Betrachtung von H_2 und CH_4 im Zusammenhang mit den Explosionsgrenzen und dem Energieinhalt, dem Joule-Thompson-Effekt für Wasserstoff und der Sicherheitsbetrachtung, inklusive kurzer Erläuterung der HAZOP-Study zusammen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine betriebsbereite sicherheitstechnisch vertretbare Wasserstoffregelanlage in einer Werkhalle der Montanuniversität aufzustellen. Ein übergeordnetes Ziel des Teams Hochtemperaturprozesstechnik vom Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik ist eine wesentliche CO_2 Einsparung für das Recycling von Zink aus Stahlwerksstaub im RecoDust Prozess zu erreichen. Nachdem diverse Versuche an der Montanuniversität durchgeführt wurden, soll der RecoDust Prozess in späterer Hinsicht auch in der Wirtschaft und in externen Unternehmen etabliert werden. Das ist einerseits wichtig, um die Stäube direkt wiederzuverwerten und diesen Prozess damit ressourcenschonender, aber auch CO_2 neutraler betreiben zu können. [2]

2 Theoretische Grundlagen

Für die theoretischen Grundlagen dieser Masterarbeit wird auf die Technologie des RecoDust-Verfahrens eingegangen, speziell auf die Funktionsweise des Flash-Reaktors. Ein Vergleich der Energieträger Wasserstoff und Erdgas wird erstellt, eine Betrachtung des Gemisches dieser beiden Gase durchgeführt und die Sicherheitsbetrachtung der Anlage und sämtlicher Teilsysteme unter allen behördlichen Aspekten beschrieben.

2.1 RecoDust-Verfahren

Bis dato werden in einer unterstöchiometrischen Erdgas-Sauerstoffflamme zinkhaltige Stäube aufgeschmolzen, dieser pyrometallurgische Prozess wird RecoDust Prozess genannt. Am Boden des Flash-Reaktors sammelt sich die eisenreiche RecoDust-Schlacke an. Über den Abgasstrom wird nach der Nachverbrennung und der Abgaskühlung Zinkoxid in der Abgasreinigung bzw. der Filtereinheit abgeschieden. In Abbildung 2 kann man das Blockschema des 1-stufigen RecoDust-Verfahrens sehen. [2]

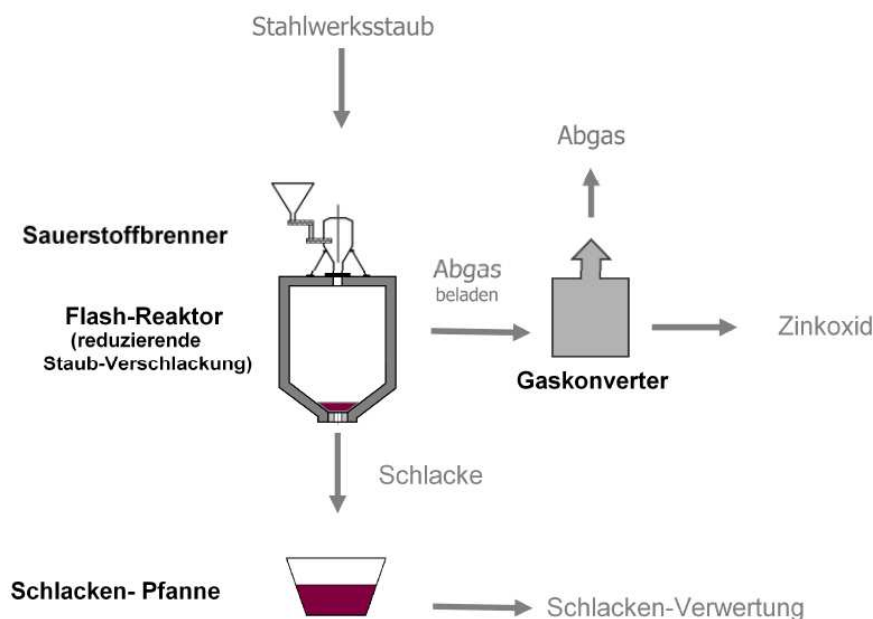


Abbildung 2: 1-stufiges RecoDust-Verfahren mit den einzelnen technischen Einheiten und ihren Produkten [2]

Der Staub wird über eine Dosiereinheit in den Flash-Reaktor eingebracht. Bei einer Luftzahl von $\lambda = 0,7 - 0,9$ und einer Temperatur von $1600 - 1800^\circ\text{C}$ findet die teilweise Verbrennung und Verschlackung des Staub-Erdgas-Sauerstoff-Gemisches statt. Dabei geht eine Verflüchtigung der volatilen Bestandteile und die Verschlackung der nicht flüchtigen Bestandteile vonstatten, welche am Boden des Flash-Reaktors abgestochen werden. Zinkoxid kann durch die reduzierende Atmosphäre in dem Reaktor zu gasförmigem Zink reduziert und gasförmig mit dem Abgas aus dem Flash-Reaktor ausgetragen werden. Im Konverter wird anschließend das CO- und H₂-haltige Abgas nachverbrannt und zeitgleich das gasförmige Zink wieder in seine stabilere Oxidform überführt. Nach dem Abkühlen wird das Abgas durch eine Filteranlage gereinigt und durch ein Saugzuggebläse in die Umgebung abgeblasen. [3]

2.2 Wasserstoff/Methan – Vergleich

Um die beiden Brennergase vergleichen zu können, muss man auf ihre Eigenschaften und Energieinhalte bei der Verbrennung eingehen. Nachfolgend wird zuerst Methan und anschließend Wasserstoff, mit den jeweiligen Formeln, beschrieben. Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit Erdgas immer als Methan angeführt, da Erdgas zu rund 95% aus Methan besteht. Der Betrag der chemischen Standardverbrennungsenthalpie eines Stoffes, welcher mit Sauerstoff bei Standardbedingungen (25°C , 1 bar) reagiert, entspricht dem Heizwert beziehungsweise dem Brennwert dieses Stoffes. Wenn das Reaktionsprodukt von Wasser bei der Reaktion gasförmig ist, spricht man vom Heizwert. Wenn aber vom flüssigen Wasser als Reaktionsprodukt ausgegangen wird, spricht man vom Brennwert. Die folgenden Gleichungen sind zum näheren Verständnis des Heizwertes und des Brennwertes von Wasserstoff und Methan angeführt.

Bei der Verbrennung von Methan (CH₄), bei Standardbedingungen gilt:



$$\Delta H = -802 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (2)$$

Die zusätzliche Wärme, welche bei der Kondensation von Wasser frei wird:



$$\Delta H = -88 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (4)$$

Daraus ergibt sich folgender Brennwert:



$$\Delta H = -890,4 \frac{kJ}{mol} \quad (6)$$

Die spezifischen Heiz- und Brennwerte können mit den molaren Massen von Wasserstoff und Methan berechnet werden. Dadurch ergibt sich ein Heizwert von 13,9 kWh/kg und ein Brennwert von 15,4 kWh/kg für Methan. Wenn man diese massenspezifischen Werte auf die jeweiligen volumenbezogenen Werte umrechnet, kommt man auf einen Heizwert von 9,94 kWh/m³ und einen Brennwert von 11,03 kWh/m³ für Methan.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff (H₂), bei Standardbedingungen gilt:



$$\Delta H = -241,8 \frac{kJ}{mol} \quad (8)$$

Die zusätzliche Wärme, welche bei der Kondensation von Wasser frei wird:



$$\Delta H = -44 \frac{kJ}{mol} \quad (10)$$

Daraus ergibt sich folgender Brennwert:



$$\Delta H = -285,8 \frac{kJ}{mol} \quad (12)$$

Die spezifischen Heiz- und Brennwerte können mit den molaren Massen von Wasserstoff und Methan berechnet werden. Dadurch ergibt sich ein Heizwert von 33,3 kWh/kg und ein Brennwert von 39,4 kWh/kg für Wasserstoff. Wenn man diese massenspezifischen Werte auf die jeweiligen volumenbezogenen Werte umrechnet, kommt man auf einen Heizwert von 3,00 kWh/m³ und einen Brennwert von 3,54 kWh/m³ für Wasserstoff. [4]

In der nachstehenden Tabelle 1 werden die Heizwerte, die Brennwerte, die Dichte, die Zündgrenzen und der Wobbeindex von Erdgas, Methan und Wasserstoff dargestellt. Die Stoffdaten für Erdgas sind dem „Aktuellen Informationsblatt der Stadtgemeinde Leoben“ entnommen worden. [5] Die Daten für Wasserstoff und Methan stammen aus dem Buch „Thermodynamik kompakt“ [6]. Die unteren und oberen Wobbeindizes wurden ebenfalls in der

Tabelle ergänzt. [7] Anhand dieser Tabelle kann man die für uns wichtigsten technischen Parameter der drei Gase direkt miteinander vergleichen.

Tabelle 1: Vergleich von Erdgas, Methan und Wasserstoff in Bezug auf seine brenntechnischen Eigenschaften [5-7]

| | Methangehalt vol.-% | Heizwert kWh/m ³ | Brennwert kWh/m ³ | Dichte bei 0°C und 1bar kg/m ³ | Zündgrenze in Luft vol.- % | Wobbeindex MJ/m ³ |
|--------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------|
| Erdgas | 95,24 | 10,26 | 11,37 | 0,76 | 4.....17 | 48,28-53,50 |
| Methan | 100 | 9,94 | 11,03 | 0,72 | 4.....17 | 44,90-49,89 |
| Wasserstoff | --- | 3,0 | 3,60 | 0,09 | 4.....75 | 38,11-45,10 |

Durch den Wobbeindex wird eine Austauschbarkeit von Brenngasen angegeben. Er beschreibt das Brennverhalten von verschiedenen Gasen und ist ein korrigierter Heizwert. Anhand der Formel (13) kann man die Parameter erkennen, welche für die Berechnung des oberen und unteren Wobbeindex gebraucht werden.

$$W_O = \frac{H_O}{\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}} \text{ bzw. } W_U = \frac{H_U}{\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}} \quad (13)$$

Für den oberen Wobbeindex wird der obere Heizwert bzw. der Brennwert, H_O , die Dichte des Brenngases, ρ_G , und die Dichte der Luft, ρ_L , benötigt. Durch diesen Wobbeindex kann die Düsenbelastung und der Brennerdruck ermittelt und auch verglichen werden. Bei gleichen Werten kann ein Gas mit gleichem Wobbeindex mit demselben Brenner verbrannt werden. Genau aus diesem Grund ist der jeweilige Wobbeindex auf jedem Brenner vermerkt, um zu wissen, welche Brennergase ohne Probleme verwendet werden können. [8] Durch die Wobbeindex Werte kann man sehen, dass alle drei angegebenen Werte nahe im selben Größenbereich liegen. Somit kann man ohne Probleme Gemische von Wasserstoff und Erdgas im Brenner des Flash-Reaktors verwenden.

2.2.1 Joule-Thomson-Effekt

Die Drosselung eines Gases und die dabei auftretende thermodynamische Zustandsänderung ist eine wichtige Anwendung in der Technik. Das fließende Fluid wird durch eine bauliche Einrichtung, zum Beispiel einer Drossel oder einem Expansionsventil gedrosselt. Dabei wird der Druck vermindert und das Volumen nimmt zu. Idealisiert wird keine Arbeit und

auch keine Wärme abgeführt und somit geht man von einer isenthalpen Zustandsänderung aus. Dabei ist häufig bei realen Gasen eine Temperaturabnahme zu erkennen, auch als Joule-Thomson-Effekt bekannt. Bei hohen Temperaturen und hohen Drücke können aber auch Temperaturerhöhungen beim Drosseln des realen Gases auftreten. Ob und wie stark diese Temperaturänderung auftritt, wird durch den Joule-Thomson-Koeffizienten vorgegeben. Der Joule-Thomson-Koeffizient von realen Gasen ist ungleich null und hat abhängig von Art des Gases, von der Temperatur und vom Druck ein positives oder negatives Vorzeichen. Dabei beschreibt die Inversionstemperatur jene Temperatur, bei der das Vorzeichen des Koeffizienten wechselt. Bei einem positiven Vorzeichen tritt bei Expansion eine Abkühlung des Gases auf. Umgekehrt ist es bei einem negativen Vorzeichen, denn da erwärmt sich das Gas bei der Expansion. Somit ist die Voraussetzung zur Berechnung des Joule-Thomson-Koeffizienten mit Hilfe des Lindeverfahrens ein positiver Koeffizient. Grund dafür ist, dass nur so die Energie des komprimierten Gases abgeführt werden kann, auch wenn die Umgebungstemperatur höher ist als die des Gases. Diese Erwärmung von Wasserstoff mit allen notwendigen Formeln und Rechenschritten wird im Kapitel 3.1.1 berechnet und zur Überprüfung der Machbarkeit herangezogen. [9-11]

2.3 Mischung von Wasserstoff (H₂) und Methan (CH₄)

Bei der Mischung von Gasen oder Fluiden kann auf statische oder dynamische Mischer zurückgegriffen werden. Feststehende Einbauten, welche die Strömungsenergie zur Mischung der fluiden Ausgangsstoffe nutzen, werden statische Mischer genannt. Besonders zur kontinuierlichen Homogenisierung und Dispergierung werden solche statischen Mischer eingesetzt. Der Energieaufwand bleibt durch die geringen Scherkräfte niedrig und somit besitzen die Fluide nahezu dieselben physikalischen Eigenschaften vor, sowie auch nach der Mischung.

Ein leeres Rohr, welches mit einem Fluid turbulent durchströmt wird, ist im Grunde genommen der einfachste statische Mischer, den es gibt. Wenn die beiden zu mischenden Medien radial in das Rohr eingeleitet werden, mischen sich diese wesentlich schneller, als wenn sie in Längsrichtung eingespritzt werden. Zusätzlich kann man bei turbulenten Strömungen durch Krümmer, verschiedene Rohrerweiterungen, Injektionsapparate, Drall-Apparate oder diverse andere Stahleinbauten Strömungsablösungen hervorrufen und somit intensive Quervermischungen herbeiführen.

Eine geringe Quervermischung tritt bei laminaren Strömungen auf. Hierbei umströmen die Fluide die eingebauten Hindernisse und Apparate, jedoch kann trotzdem keine ausreichende Mischung vorstattengehen. Darum benötigt man diverse Mischelemente, welche durch Umlagern, Zusammenfügen und Trennen den Produktstrom optimal vermischen.

Im Gegensatz zu dynamischen Mischern, welche bewegte Teile aufweisen, besitzen statische Mischer viele Vorteile. Diese erstrecken sich über einen weiten Viskositätsbereich, einen kontinuierlichen Betrieb, gute Anpassungsmöglichkeiten an die Gegebenheiten, keine bewegten Teile und dadurch wenig Wartung und Verschleiß, geringe Geräuschentwicklung, geringe Investitions- und Betriebskosten und ein relativ geringer Platzbedarf, da statische Mischer immer als In-line Mischer ausgelegt werden. [9]

2.4 Gemisch Betrachtung von H₂ und CH₄

Anschließend an die Mischung der beiden Gase, Wasserstoff und Methan, können das Gemisch und die dazugehörigen Stoffdaten betrachtet werden. Hier wird auf den Heiz- bzw. den Brennwert des Gemisches, auf die Explosionsbereiche, die Explosionsgrenzen und die Normspaltweite für die Einteilung in Explosionsgruppen eingegangen.

2.4.1 Heiz- und Brennwerte

Wie man in Abbildung 3 sehen kann, wird durch dieses Diagramm der Heiz- und Brennwert eines Wasserstoff/Methan-Gasgemisches dargestellt. Beide Werte sind abhängig von der Wasserstoffkonzentration im Gemisch. Man kann erkennen, dass 60 vol.% Wasserstoff zu ca. 33 Prozent zum volumenspezifische Heiz- und Brennwert beiträgt.

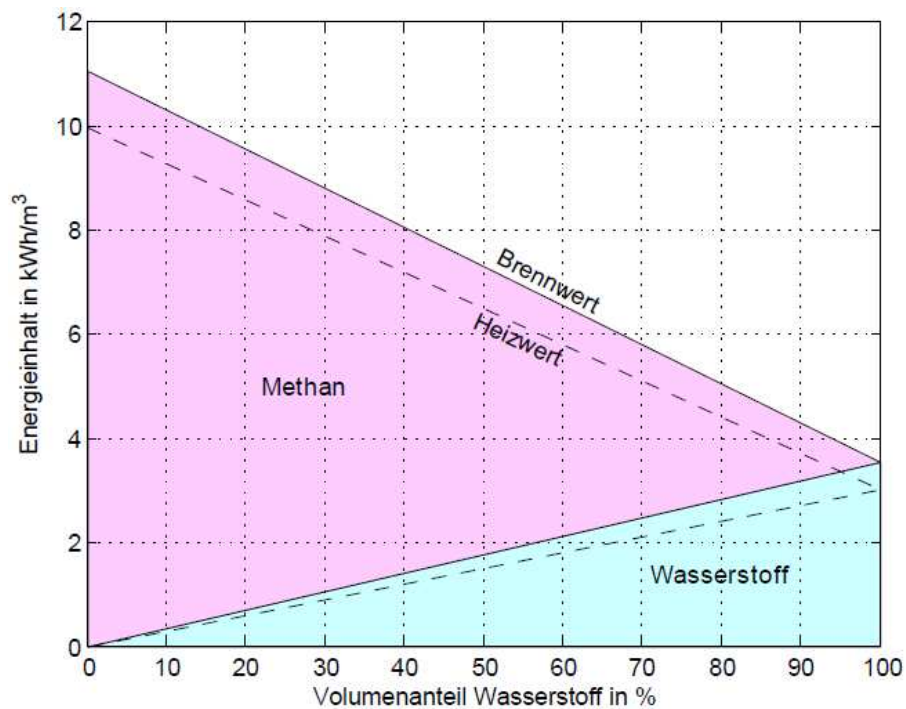


Abbildung 3: Volumenspezifische Heiz- und Brennwerte für ein Methan-Wasserstoff-Gasgemisch [4]

In Abbildung 4 kann man die relativen Energieinhalte bezogen auf den Heiz- und Brennwert erkennen. An diesem Diagramm kann man auch sehen, dass der Zusammenhang aufgrund des Energieinhaltes und auch aufgrund der Dichte nicht linear, sondern quadratisch ist.

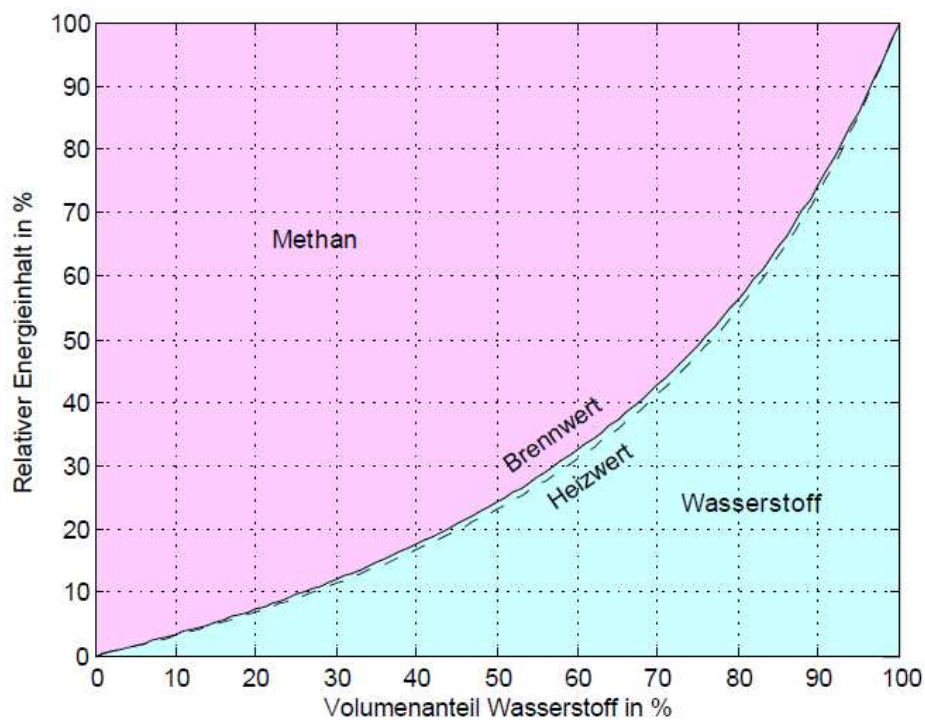


Abbildung 4: Relativer Energieinhalt von Wasserstoff im Gasgemisch mit Methan [4]

Man kann erkennen, dass der Energieinhalt, egal ob relativ oder absolut, abhängig von dem Methan in der Mischung ist und somit der Heiz- und Brennwert zu einem großen Teil vom Methan in der Mischung abhängt.

Somit sieht man, dass bei 75% Volumenanteil Wasserstoff im Gemisch nur 50% des Energieinhaltes auf Wasserstoff zurückzuführen ist. 50% des Energieinhaltes ist somit gleichbedeutend mit 50% CO_2 Reduktion, da 50% des Methans durch Wasserstoff ersetzt wurde.

2.4.2 Explosionsgrenzen und -bereiche

In Abbildung 5 sind die Explosionsbereiche von Methan-Wasserstoff-Gemischen im Dreistoffsystem Brenngas/Stickstoff/Luft mit bis zu 50 Mol-% Wasserstoff aufgetragen. Hierbei ist auch zu erkennen, dass die Zugabe von Wasserstoff zu Methan eine Ausweitung der Explosionsbereiche ergibt, dabei erhöhen sich die Explosionsgrenzen um bis zu 15%. Bei dem 50/50 Gemisch ist ein deutlich sichtbarer und größerer Explosionsbereich, nämlich zwischen 4% und 29%, als bei den anderen Mischungen zu erkennen. Dieser ist um 48% kleiner als bei reinem Wasserstoff. [10]

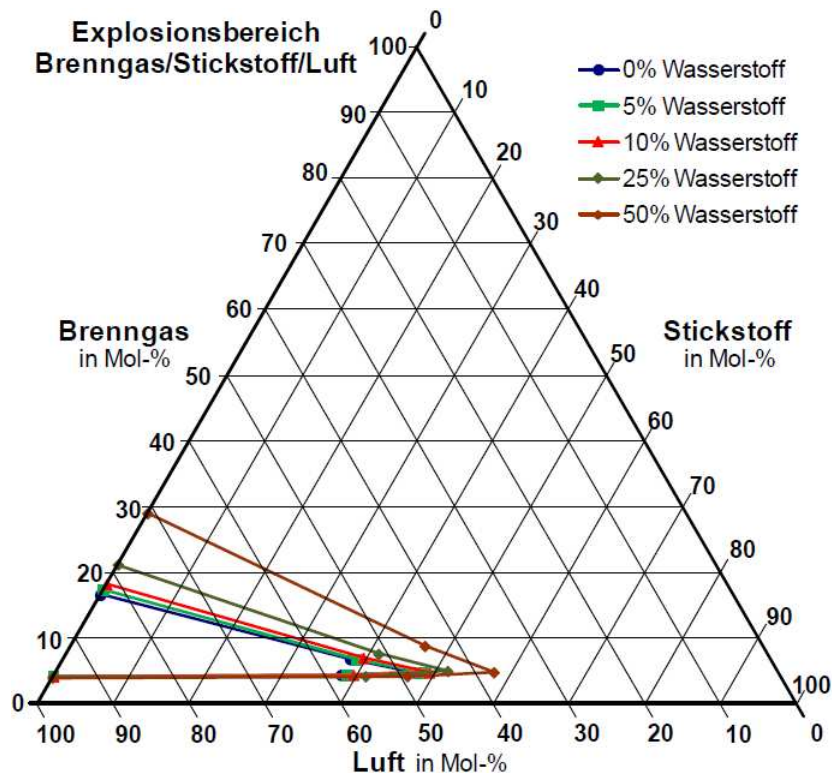


Abbildung 5: Explosionsbereiche von Methan mit unterschiedlichen Volumprozent Wasserstoff des Dreistoffsystems [10]

In Abbildung 6 kann man einen näheren Ausschnitt von Abbildung 5 sehen, um die verschiedenen Zusammensetzungen besser erkennen zu können. Hier kann man auch ablesen, dass mit 10% Wasserstoff sich nicht viel an dem Explosionsbereich im Vergleich zu reinem Methan ändert.

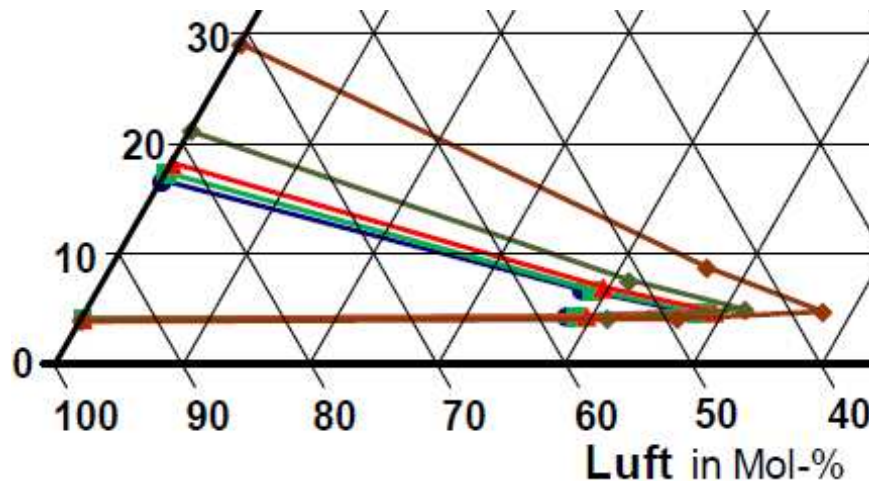


Abbildung 6: Explosionsbereiche von Methan mit unterschiedlichen Volumprozent Wasserstoff genauer aufgelöst [10]

In Tabelle 2 sind die unteren und oberen Explosionsgrenzen von Methan, Wasserstoff und Gemischen aus Methan und Wasserstoff aufgelistet. Hierbei wird klar, dass reiner Wasserstoff einen sehr großen Explosionsbereich von 4 Mol-% bis 77 Mol-% besitzt, dieser aber bei den Mischungen durch den größeren Anteil an Methan nicht so groß ausfällt. Dadurch kann man erkennen, dass die Änderung der Explosionsgrenzen nicht linear mit dem Anteil an Wasserstoff in dem Gemisch zusammenhängt. [10]

Tabelle 2: Gemessene UEG und OEG von Methan-Wasserstoff-Gemischen [10]

| Brenngas | UEG in Mol-% | OEG in Mol-% |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| Methan | 4,4 | 17,0 |
| Methan + 10 % H₂ | 4,2 | 18,2 |
| Methan + 25 % H₂ | 4,2 | 21,2 |
| Methan + 50 % H₂ | 4,0 | 29,0 |
| Wasserstoff | 4,0 | 77,0 |

2.4.3 Normspaltweiten von Wasserstoff-Methan-Gemischen

Als Normspaltweite wird der niedrigste Wert der Grenzspaltweite eines brennbaren Gases oder Dampfes bezeichnet, welches nach IEC 60079-20-1 gemessen wurde. Ein Flammendurchschlag einer Gemisch-Zusammensetzung ist dann nicht möglich, wenn die Spaltweite größer als die Grenzspaltweite ist. Die Messwerte aus Tabelle 3 sind durch das PTB der BAM zur Verfügung gestellt und in der Datenbank CHEMSAFE [11] veröffentlicht worden. Im Unterschied zu den anderen Parametern verhält sich die Normspaltweite bei Methan/Wasserstoff Gemischen in erster Näherung linear zum Wasserstoffanteil. [10]

Tabelle 3: Normspaltweiten von Wasserstoff-Methangemischen [11]

| Wasserstoffanteil im Brenngas in Mol-% | MESG (Methan) in mm |
|---|----------------------------|
| 0 | 1,15 |
| 10 | 1,10 |
| 25 | 0,96 |
| 50 | 0,75 |
| 75 | 0,52 |
| 90 | 0,33 |
| 100 | 0,29 |

Dadurch dass sich die Normspaltweiten von Methan und Wasserstoff deutlich unterscheiden, kann es sein, dass man durch Zumischung von Wasserstoff zu Methan in eine andere Explosionsgruppe kommt. Diese Information muss man unbedingt beachten, da jede Explosionsgruppe andere Vorgaben für Geräte und Sicherheitskonzepte vorschreibt. Bei der Zumischung von 30 Mol-% Wasserstoff kommt das Gemisch, wie man in Abbildung 7 erkennen kann, in den Bereich der Explosionsgruppe II B und ab 75 Mol-% H₂ gelangt das Gemisch in die Explosionsgruppe II C. [10]

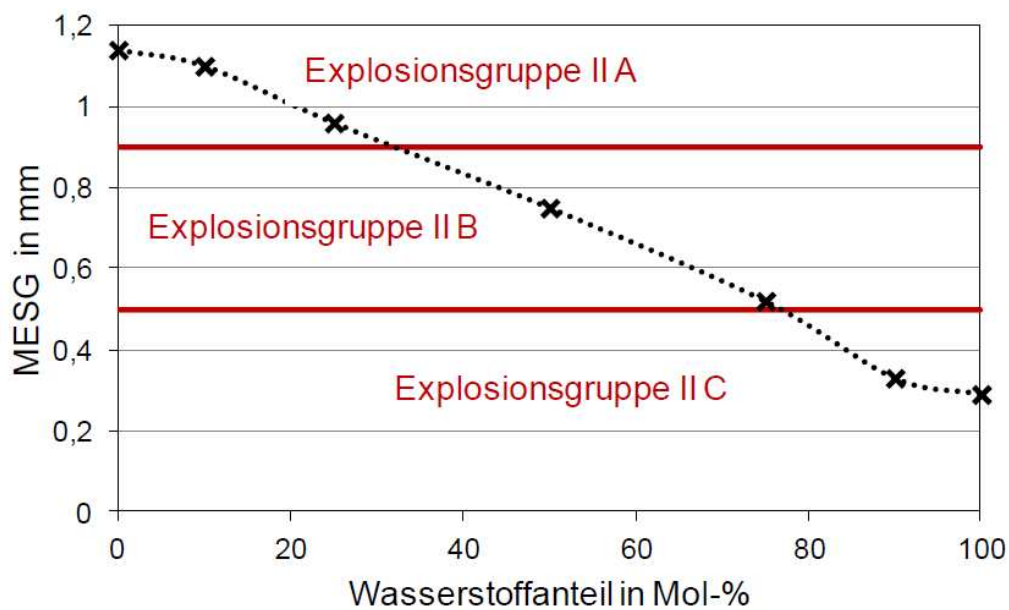


Abbildung 7: Normspaltweiten von Gemischen aus Methan und Wasserstoff und ihre Explosionsgruppen [13 - 14]

Die Einteilung der Gase in die jeweilige Explosionsgruppe erfolgt nach der Zündschlagfähigkeit des Gases bzw. aufgrund der explosionsfähigen Atmosphäre. Die Anforderungen an die Sicherheit und den Betrieb der Anlage steigen von IIA nach IIC.

2.5 Sicherheitsbetrachtung

Zum Kapitel Sicherheitsbetrachtung zählen die theoretischen Hintergründe der Wasserstoffstrecke, das generelle Sicherheitskonzept und die HAZOP-Study der Anlage.

2.5.1 Wasserstoffstrecke Theoretische Hintergründe

Für die geplante Wasserstoffstrecke, welche aus einem Wasserstoffbündel, einer Rohrleitung in die Barbarahalle, Wasserstoffregelstrecke, Mischung von Wasserstoff und Methan und schlussendlich dem Brenner besteht, müssen einige Dinge separat betrachtet werden. Für das Wasserstoffbündel wurde vom Ingenieurbüro ACS ein Ex-Schutz Konzept erstellt. Somit muss ein F90-Verbau für das Wasserstoffbündel aufgestellt werden. In einem Abstand von 3 Metern wird zusätzlich ein mindestens 1,5 Meter hoher, fix verbauter Zaun montiert. Dazu müssen im Umkreis von einem Meter eine Markierung und eine Kette installiert werden, um den Ex-Bereich genau zu kennzeichnen. Dieser wird ebenso mit einem

Piktogramm gut sichtbar am Verbau gekennzeichnet. Das gesamte Ex-Schutz-Konzept rund um den Aufstellort des Wasserstoffbündels ist detailliert im Kapitel 11 ersichtlich.

Bei den Materialien der Rohre und auch der Regelstrecke muss darauf geachtet werden, dass Rohre gemäß den Wasserstoffrichtlinien verbaut werden. Dabei kommt ein ungefähre Leitungsweg von circa 50 Meter, vom Bündel bis hin zum Brenner des Flash-Reaktors, zustande.

Bei der Regelstrecke wird zunächst nur ein Durchfluss von 0 bis 30 Nm³ benötigt. Diese Regelstrecke soll auch für zukünftige Projekte geplant werden und ein Durchfluss von bis zu 180-200 Nm³ regelbar und dokumentierbar sein.

Nach der Regelstrecke wird die Mischung der Gase durch einen statischen Mischer bewerkstelligt. Dies geschieht kurz vor der Einspeisung in den Brenner, somit kurz vor der Verbrennung. Zur Einreichung für die Behörde wird für den Brenner und den gesamten Flash-Reaktor eine Einschätzung des sicheren Betriebes gebraucht. Das Herstellungsunternehmen, in unserem Falle die Firma M.A.L. bestätigte, dass dieser Prototyp auch für Methan/Wasserstoff Gemische bis zu mindestens 30% geeignet ist. Ebenso ist seitens des Lehrstuhls bestätigt worden, dass dieser Brenner nach unserer Einschätzung für den Betrieb geeignet ist und somit sollte kein weiterer Bescheid notwendig sein.

2.5.2 HAZOP-Study

Die HAZOP-Study setzt sich aus den Wörtern „**H**azard“ and „**O**perability“ zusammen und ist ein Gefährdungsanalyseverfahren. In der deutschen Übersetzung wird es PAAG-Verfahren genannt. Diese Abkürzung setzt sich aus den Begriffen **P**rognose, **A**uffinden der Ursachen, **A**bschätzen der Auswirkung und **G**egenmaßnahmen zusammen. Das Ziel des Verfahrens ist eine systematische Gefährdungsanalyse, wobei Gefahren systematisch erkannt und identifiziert werden. Diese Gefahren beruhen darauf, dass Teilsysteme eines komplexen Systems einen Sollzustand/eine Sollfunktion zugeordnet bekommen. Wenn jedoch die tatsächlichen Zustände des Systems vom Sollzustand abweichen, wird die Funktionsfähigkeit der Anlage geprüft und dadurch die Gefahren beseitigt [12]

Das Prinzip basiert auf fünf grundlegenden Überlegungen:

- Was sind die Eigenschaften oder Sollzustände, die ein Teilsystem einer Anlage gewährleisten muss?
- In welcher Form können diese Eigenschaften abweichen? In diesem Fall werden Leitworte speziell für den Anwendungsfall festgelegt.
- Kann es Abweichungen geben? Für die Antwort zu dieser Frage kombiniert man die Sollzustände und die Leitworte und somit erhält man die Abweichung.
- Was sind die Ursachen und folglich die Folgen dieser Abweichungen?
- Lassen sich die Risiken durch Maßnahmen beherrschen oder minimieren?

Im ersten Schritt der Analyse werden vom Projektmanager oder Projektverantwortlichen das System, seine Teilsysteme und das Ziel festgelegt. Zusätzlich wird das HAZOP-Study-Team aus Personen verschiedenster Abteilungen und Arbeitsgruppen zusammengestellt. Anwender, Experten, Sekretärinnen, Werkstättenarbeiter und Ingenieure sind alle gleich wichtig bei dieser Art der Gefahrenanalyse, da es differenziertere Blickwinkel auf die Teilsysteme zulässt.

Zunächst müssen wichtige Informationen vom Projektmanager zusammengetragen und für alle Studienteilnehmer aufbereitet werden. Das gesamte Organisatorische rund um diese HAZOP fällt in seinen Aufgabenbereich. Ebenfalls ist es wichtig, dass durch ihn die seiner Meinung nach benötigten Leitworte, in einer Liste niedergeschrieben werden. Hier in Tabelle 4 sind die Leitworte nach der Norm IEC 61882 aufgeführt. [15 - 16]

Tabelle 4: Leitworte nach IEC 61882 [15 – 16]

| Leitworte (deutsch) | Guide words (english) | Erklärung |
|----------------------------|------------------------------|--|
| nein, nicht | no | Abweichung vom Sollverhalten |
| mehr | more | quantitativer Zuwachs, zu viel |
| weniger | less | quantitative Abnahme, zu wenig |
| sowohl als auch | as well as | zusätzliche Ereignisse zum Soll-Verhalten |
| teilweise | part of | Soll-Verhalten nur unvollständig erreicht |
| Umkehrung | reverse | Gegenteil des Soll-Verhaltens |
| anders als | other than | etwas anderes als das Soll-Verhalten |
| früher/später | earlier/later | Soll-Verhalten zu einem früheren/späteren Zeitpunkt |
| zuvor/danach | bevor/after | Soll-Verhalten in anderer Reihenfolge |
| schneller/langsamer | faster/slower | nicht erwartete Änderung der Ablauf- bzw. Ausführungsgeschwindigkeit |

Während der Durchführung der HAZOP-Study wird zunächst allen Teilnehmern das komplette System und somit auch alle Teilsysteme erklärt, damit jeder auf demselben Stand ist. Dann wird gemeinsam die Zweckbestimmung jedes Teils der Anlage eruiert. Dabei werden die Parameter, welche für jedes Teilsystem wichtig und notwendig sind, festgelegt. Nach diesen Punkten folgt der eigentliche Teil der HAZOP-Study, denn anschließend wird jeder Parameter mit jedem Leitwort kombiniert. So kann man mögliche Abweichungen erkennen und direkt danach die Gefährdungen, die die Abweichungen mit sich bringen, evaluieren. Um

Risiken minimieren zu können und mögliche Maßnahmen zu setzen, wird dieses Verfahren dokumentiert und in tabellarischer Form aufbereitet. [15, 17]

Zusammenfassend ist eine HAZOP-Study ein systematisches Verfahren zum Erkennen von Gefahren in einem System oder einer Anlage. Wie bei allen anderen Gefährdungsuntersuchungstools kann auch die HAZOP-Study nicht garantieren, dass alle Gefahren beleuchtet und besprochen wurden. Jedoch ist es ein einfach zu verstehendes Analyseverfahren, welches die Einbindung verschiedener Abteilungen und Personen erfordert. Dadurch werden Details und Sichtweisen vorgebracht, die einzelnen Abteilungen nicht auffallen würden.

3 Durchgeführte Tätigkeiten

Für die durchgeführten Tätigkeiten wurde vorab die Wasserstoffstrecke intern geplant und dazu eine Start-HAZOP-Study erstellt. Anschließend wurde die Spezifikation für die Angebote zusammengefasst. Vor dem Aufstellen musste mit einem lokalen Bauunternehmen der Ort für das Gasflaschenlager norm- und sicherheitsgerecht vorbereitet werden. Im Anschluss wurde die Wasserstoffanlage aufgestellt und die Automation, beziehungsweise die Einbindung ins bestehende Automationsprogramm von einem externen Partner durchgeführt. Abschließend wurde eine HAZOP-Study zum gesamten Projekt durchgeführt. Diese war dazu da, mögliche Gefahrenquellen aufzuzeigen und diese so gering wie möglich zu halten oder ganz zu eliminieren.

3.1 Vorplanung der Wasserstoffstrecke

Aufgrund von gesetzlichen Vorgaben musste das Wasserstoffbündel im Freien aufgestellt werden. Daher wurde sofort ein Experte in Sachen Explosionsschutzkonzepte herangezogen. Herr Gagstädter vom Ingenieurbüro ACS hat ein 4-seitiges Ex-Schutzkonzept für einen Standort außerhalb der Barbarahalle, direkt angrenzend an die Verfahrenstechnik-Werkhalle der Montanuniversität, erstellt. Der ausgewählte Standort war die einzige Möglichkeit, in der Nähe der Barbarahalle ein Wasserstoffflaschenlager aufzustellen. Im Kapitel 11 ist das detaillierte Ex-Schutzkonzept dazu beschrieben. Dieses sieht für das Wasserstofflager eine an 3 Seiten brandbeständige Wand vor, zum Beispiel ein Gasflaschenlager von der Firma Denios. Auch das Dach dieses Lagers ist, wie die drei Wandteile aus einem brandbeständigen Material gefertigt. Die Zugangsseite wird als Gittertor ausgeführt, über welche die Be- und Entlüftung sichergestellt wird. Über dieses Gittertor wird ebenfalls die Zu- und Ablieferung der Wasserstoffbündel durchgeführt. Durch das Einteilen des Bereiches in Zone 2 ist ein Schutzbereich von 1 Meter um die Flaschen herum herzustellen. Die Definition der Zone 2 ist im Anhang ersichtlich. In diesem Bereich dürfen Gase/Dämpfe/Nebel nur selten und während eines kurzen Zeitraums freigesetzt werden. Diese Ex-Zone ist mit einer Markierung am Boden, einer Absperrkette und einem Piktogramm zu markieren. Zusätzlich ist sicherzustellen, dass jederzeit ein Sicherheitsabstand von 3 Meter Radius um die Gasversorgung vorhanden sein muss. Dies muss laut Gesetz ein fest verankerter, 1,5 Meter hoher Metallzaun sein. In dieser

Schutzzone dürfen keine brennbaren Stoffe gelagert werden. In Abbildung 8 ist die Ex-Schutzzone rot und die Schutzzone für das Wasserstoffbündellager hellblau markiert.

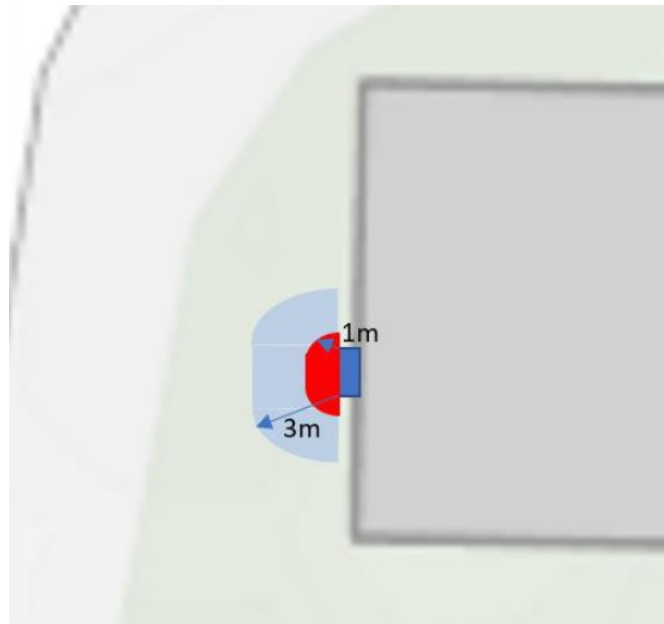


Abbildung 8: Schutzbereiche für ein Wasserstofflager

Das geplante Projekt soll auch die Rohrleitungsstrecke, welche aus ungefähr 50 Meter Kupferrohr bis in die Barbarahalle besteht, die Regelstrecke und die Vermischung mittels statischen Mischers umfassen. Notwendige Bestandteile sind: ein Magnetventil, ein Mass-Flow Controller, zwei Druckminderer und zwei Sicherheitsventile. Für die ersten Versuche nach Aufstellen der Anlage wird der Bereich von 0 bis 30 Nm³ Wasserstoff benötigt. Geplant ist in späterer Folge die Versuche mit immer mehr Wasserstoff durchgeführt werden, bis hin zu einem 100%igen Wasserstoffbetrieb. Daher soll die Rohrleitung bis hin zur Regelstrecke auch gleich für bis zu 200 Nm³ Wasserstoff ausgelegt sein. Hier muss dann nur mehr die Regelstrecke, nicht aber die Zuleitungen abgeändert werden.

3.1.1 Berechnung der Temperatur mittels Joule-Thomson-Koeffizient

Um sicher zu gehen, dass die erste Expansion des Wasserstoffgases, von dem Flaschenbündel in die Rohrleitung ohne Probleme vonstattengehen kann, wurde eine Berechnung der Temperatur mittels Joule-Thomson-Koeffizient durchgeführt. In Formel (14) ist die gesamte Berechnung dieses Koeffizienten dargestellt.

$$\mu_{JT} = \frac{1}{c_p} * \left(\frac{2 * a}{R * c_p} - 3 * \frac{a * b * P}{R^2 * T^2} - b \right) = \left[\frac{K}{Pa} \right] \quad (14)$$

c_p Wärmekapazität [J/mol*K]

a Van der Waals Koeffizient = 0,0247 [J m³/mol²]

b Van der Waals Koeffizient = 0,0000266 [m³/mol]

R ideale Gaskonstante [J/mol*K]

T Temperatur [K]

P Druck [Pa]

Die für die Berechnungen angenommenen Lagerbedingungen unseres Wasserstoffbündels betragen 300 K und 200 bar Flaschendruck. Mittels dieser Werte und den Konstanten konnte der erste Joule-Thomson-Koeffizient, siehe Gleichung (15), errechnet werden.

$$\mu_{JT} = \frac{1}{c_p} * \left(\frac{2 * a}{R * c_p} - 3 * \frac{a * b * 20000000}{R^2 * 300^2} - b \right) = - 5,88 * 10^{-6} \left[\frac{K}{Pa} \right] \quad (15)$$

Anschließend wurde in 1.000.000 Pascal (10 bar) Schritten nach unten gerechnet. Somit konnte mit dem zuvor ausgerechneten Joule-Thomson-Koeffizient und den vorherigen Druck (200 bar) auf den nächsten Druckschritt (190 bar), wie in Gleichung (16) ersichtlich, gerechnet werden.

$$\begin{aligned} T_{nach} &= T_{vor} + \mu_{JT} * (P_{vor} - P_{nach}) = \\ &= 300 \text{ K} + 5,88 * 10^{-6} * (20000000 - 19000000) = 305,88 \text{ K} \end{aligned} \quad (16)$$

Mit diesem Ergebnis konnte erneut ein Joule-Thomson-Koeffizient ausgerechnet werden. Wobei die neuen Drucke und Temperaturen in Gleichung (14) eingesetzt werden. So kann mit dem neuen Koeffizienten wieder eine neue Temperatur ausgerechnet werden. Diese Rechenabfolge wiederholt man so lange, bis man bei dem gewünschten Druck, auf welchen das Wasserstoffgas gedrosselt wird, angelangt ist. Schlussendlich kommt man mit einem μ_{JT} von $6,09 * 10^{-6}$ und einem Druck von 12 bar auf eine Temperaturerhöhung von 300 K auf 412,88 K (siehe Tabelle 5). Das ist eine Temperaturänderung von rund 113 K bei einer Expansion von 200 auf 12 bar. Beim Expandieren von 12 auf 1 bar fällt die Temperaturerhöhung mit rund 7 K vergleichsweise niedrig aus. Der gesamte Rechenweg und alle Ergebnisse für die einzelnen Druckebenen sind in Tabelle 5 dargestellt. Aus dieser sind auch die oben genannten Ergebnisse zu entnehmen. Der Effekt, dass beim Drosseln eines Gases, die Temperatur steigt, liegt am negativen Joule-Thomson-Koeffizient.

Tabelle 5: Berechnung der Temperaturänderung bei der Drosslung von Wasserstoff über den Joule-Thomson-Koeffizienten

| P [Pa] | P [bar] | cp [J/molK] | μT [K/Pa] | T [K] |
|----------|---------|-------------|----------------|--------|
| 2,00E+07 | 200 | 29,10 | -5,88E-06 | 300 |
| 1,90E+07 | 190 | 29,10 | -5,90E-06 | 305,88 |
| 18000000 | 180 | 29,10 | -5,92E-06 | 311,79 |
| 17000000 | 170 | 29,10 | -5,94E-06 | 317,71 |
| 16000000 | 160 | 29,10 | -5,95E-06 | 323,64 |
| 15000000 | 150 | 29,10 | -5,97E-06 | 329,60 |
| 14000000 | 140 | 29,10 | -5,98E-06 | 335,56 |
| 13000000 | 130 | 29,10 | -5,99E-06 | 341,54 |
| 12000000 | 120 | 29,10 | -6,00E-06 | 347,54 |
| 11000000 | 110 | 29,10 | -6,02E-06 | 353,54 |
| 10000000 | 100 | 29,10 | -6,03E-06 | 359,56 |
| 9000000 | 90 | 29,10 | -6,04E-06 | 365,58 |
| 8000000 | 80 | 29,10 | -6,05E-06 | 371,62 |
| 7000000 | 70 | 29,10 | -6,05E-06 | 377,66 |
| 6000000 | 60 | 29,10 | -6,06E-06 | 383,72 |
| 5000000 | 50 | 29,10 | -6,07E-06 | 389,78 |
| 4000000 | 40 | 29,10 | -6,08E-06 | 395,85 |
| 3000000 | 30 | 29,10 | -6,08E-06 | 401,93 |
| 2000000 | 20 | 29,10 | -6,09E-06 | 408,01 |
| 1900000 | 19 | 29,10 | -6,09E-06 | 408,62 |
| 1800000 | 18 | 29,10 | -6,09E-06 | 409,23 |
| 1700000 | 17 | 29,10 | -6,09E-06 | 409,84 |
| 1600000 | 16 | 29,10 | -6,09E-06 | 410,45 |
| 1500000 | 15 | 29,10 | -6,09E-06 | 411,06 |
| 1400000 | 14 | 29,10 | -6,09E-06 | 411,66 |
| 1300000 | 13 | 29,10 | -6,09E-06 | 412,27 |
| 1200000 | 12 | 29,10 | -6,09E-06 | 412,88 |
| 1100000 | 11 | 29,10 | -6,10E-06 | 413,49 |
| 1000000 | 10 | 29,10 | -6,10E-06 | 414,10 |
| 900000 | 9 | 29,10 | -6,10E-06 | 414,71 |
| 800000 | 8 | 29,10 | -6,10E-06 | 415,32 |
| 700000 | 7 | 29,10 | -6,10E-06 | 415,93 |
| 600000 | 6 | 29,10 | -6,10E-06 | 416,54 |
| 500000 | 5 | 29,10 | -6,10E-06 | 417,15 |
| 400000 | 4 | 29,10 | -6,10E-06 | 417,76 |
| 300000 | 3 | 29,10 | -6,10E-06 | 418,37 |
| 200000 | 2 | 29,10 | -6,10E-06 | 418,98 |
| 100000 | 1 | 29,10 | -6,10E-06 | 419,59 |

3.2 Start-HAZOP-Study

Als allererstes wurde zur Vorbereitung der Start-HAZOP-Study die Anlage in einen schematischen Black-Box-Aufbau eingeteilt. In Abbildung 9 kann man erkennen, dass sie in 5 Teilsysteme aufgeteilt wurde. Der letzte Teilbereich, der Brenner, wurde jedoch nicht mehr von der HAZOP-Study berücksichtigt. Der Grund dafür ist, dass der Brenner laut Hersteller für die Zumischung von mindestens 30 Vol.-% Wasserstoff kompatibel ist und nicht getauscht werden muss.



Abbildung 9: Blackbox Diagramm der Teilsysteme

Um Rahmenbedingungen für diese Start-HAZOP-Study zu schaffen, wurden für jedes Teilsystem wichtige Informationen gegeben, damit sich jeder Teilnehmer ein Bild von der Anlage machen kann. Für das Gasflaschenlager wurden aufgrund der zu beachteten Sicherheitsvorschriften (Ex-Zone, Sicherheitsabstand, usw.) entschieden, dass sich dieses außerhalb der Halle befinden soll. Ebenfalls wurde festgelegt, dass es mindestens aus einem Gasflaschenbündel, bestehend aus 12 Flaschen zu je 50L, bestehen soll. Zweck dieses Teilsystems ist das sichere Lagern und Verwenden von H_2 – Gasdruckflaschen in ausreichender Menge. Der genaue Rohrleitungsweg ist für die Start-HAZOP-Study noch nicht relevant. Es wurde jedoch entschieden, dass die Rohrleitung an der gleichen Stelle wie Sauerstoff- und Stickstoffrohrleitung in die Barbarahalle eingeführt wird. Der Zweck dieses Teilsystems, ist der sichere und zuverlässige Transport des Wasserstoffs vom Gasflaschenlager in die Barbarahalle bis hin zur Regelstrecke. Das nächste Teilsystem ist die Regelstrecke. Diese wird in der Barbarahalle, im ersten Stock, nahe dem Flash-Reaktor aufgestellt. Sie muss nicht redundant sein, da sicherheitstechnisch keine Redundanz für diese Wasserstoffregelstrecke notwendig ist. Die Regelventile sollen einen Durchfluss von 0 bis 30 Nm^3 Wasserstoff pro Stunde regeln. Jedoch soll die Zuleitung für eine Menge von 200 Nm^3 Wasserstoff pro Stunde ausgelegt sein, sodass für weiterführende Projekte nur die Regelstrecke geändert werden muss. Zweck dieser Regelstrecke ist, das genaue Regeln und Dosieren der Wasserstoffmenge für die jeweiligen Versuche und die Aufzeichnung der Daten für die Überwachung und Auswertung der Versuche. Das letzte betrachtete Teilsystem der Anlage ist die Gasmischung. Diese soll mittels statischen Mischers direkt in die Zuleitung für

den Flash-Reaktor eingebaut werden und somit eine zuverlässige Mischung der beiden Gase gewährleisten.

Als Teilnehmer für diese Start-HAZOP-Study wurden Personen aus verschiedenen Arbeitsgruppen vom Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik ausgewählt. Zusätzlich zu den zwei Projektverantwortlichen, Dipl.-Ing. Wolfgang Reiter und Kevin Landa, BSc wurde noch Dr. mont Christoph Spijker, Arnold Kozel, Thomas Ehgartner, Wolfgang Rühl, Dr. Klaus Doschek-Held und Prof. Harald Raupenstrauch eingeladen. Anwesend waren Dipl.-Ing. Wolfgang Reiter, Student Kevin Landa, BSc, Dr. mont. Christoph Spijker und Technikums Mitarbeiter Wolfgang Rühl.

Als erstes wurde die Wasserstoffstrecke und die Aufstellorte der einzelnen Teilsysteme abgegangen und in natura diskutiert und angesehen. Im Anschluss daran wurde im Seminarraum eine kurze PowerPoint-Präsentation über den Plan und die Details der Anlage abgehalten. Dabei wurden die vorausgewählten Parameter und Leitworte diskutiert. Die Leitworte wurden wie in Kapitel 2.5.2 in Tabelle 4 übernommen und angewandt. Die Parameter für die einzelnen Teilsysteme wurden diskutiert und wie folgt ausgewählt.

Für das Gasflaschenlager:

- Druck
- Temperatur
- Füllmenge

Für die Rohrleitung:

- Druck
- Temperatur
- Durchflussmenge
- Druckverlust

Für die Regelstrecke:

- Druck
- Temperatur
- Durchflussmenge
- Druckverlust

Für die Gasmischung:

- Druck
- Temperatur

Nachdem die Parameter und die Leitworte feststanden, konnte die eigentliche Start-HAZOP-Study beginnen. Für jedes Teilsystem wurden die Parameter und die Leitworte kombiniert, um zu eruieren, ob dabei Gefahren oder etwaige Folgen auftreten könnten. Direkt im Anschluss wurden mögliche Sicherheitsmaßnahmen besprochen. In den nachstehenden Tabellen ((6 bis (9) sind nur jene Leitworte aufgelistet, die laut Start-HAZOP-Study Team für dieses Teilsystem und diesen Prozessparameter Sinn machen.

Zuallererst wurde das Teilsystem rund um das Gasflaschenlager analysiert und die Gefahren aufgezeigt. In der nachfolgenden Tabelle 6 kann man durch die Kombination der Leitworte und der Prozessparameter mögliche Ursachen und Gefahren, die bei dem Gasflaschenlager entstehen können, aufzeigen. Die daraus entstehenden Folgen kann man ebenfalls erkennen. Mögliche Gegenmaßnahmen sind in der letzten Spalte der Tabelle angeführt, jedoch wurde nicht jede von ihnen für die Einholung der Angebote berücksichtigt.

Tabelle 6: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasflaschenlager"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------|-----------------|----------------------------|--|---|
| Druck | kein | falsche Befüllung, Leckage | keine Versuche möglich | Kontrolle bei Anlieferung und vor jedem Versuch |
| Druck | mehr | falsche Befüllung | Flaschendruck über Berstdruck? | Kontrolle bei Anlieferung |
| Druck | weniger | falsche Befüllung, Leckage | Druckregler macht zu --> kein Durchfluss | Kontrolle bei Anlieferung und vor jedem Versuch |
| Druck | sowohl als auch | falsche Befüllung, Leckage | Explosionsgefahr, keine Versuche möglich | Kontrolle bei Anlieferung |
| Temperatur | kein | Messgerät kaputt? | keine Datenaufnahme | Gerät regelmäßig warten |
| Temperatur | mehr | Sonneneinstrahlung | hohe Temperatur nur bei Leckage relevant | gut belüften |
| Füllmenge | kein | Leckage | Explosionsfähiges Gemisch | vor Versuch kontrollieren |
| Füllmenge | mehr | falsche Befüllung | Flaschendruck über Berstdruck? | Kontrolle bei Anlieferung |
| Füllmenge | weniger | falsche Befüllung, Leckage | keine Versuche möglich | Kontrolle bei Anlieferung |

In Tabelle 7 ist das Ergebnis der Start-HAZOP-Study für das zweite Teilsystem, der Rohrleitung, welche vom Gasflaschenlager in die Barbarahalle bis zur Regelstrecke führt, zusammengefasst.

Tabelle 7: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Rohrleitung"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------|-----------|--|---|--|
| Druck | mehr | Druckregler versagt | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung |
| Druck | teilweise | Regelventile funktionieren nicht ordnungsgemäß | keine geeignete Datenaufzeichnung | redundante Regelventile |
| Temperatur | mehr | zu hohe Temperaturen in der Barbarahalle | Festigkeit der Rohre beachten | auf Belüftung der Barbarahalle achten |
| Durchflussmenge | kein | Regelventile funktionieren nicht ordnungsgemäß | keine Versuche möglich | Bypassventil einbauen |
| Druckverlust | mehr | Leckage | weniger H ₂ , Versuchsdurchführung nicht richtig | regelmäßige Druckmesseinheiten |

In Tabelle 8 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Start-HAZOP-Study der Regelstrecke zusammengefasst.

Tabelle 8: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Regelstrecke"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------|-----------|--|---|------------------------------------|
| Druck | mehr | Druckregler versagt | Regeleinrichtungen werden kaputt | Sicherheitsventile |
| Druck | weniger | Druckregler versagt | Versuch muss wiederholt werden | redundante Regelventile |
| Druck | teilweise | Druckregler versagt | Geräte funktionieren nichtmehr ordnungsgemäß | redundante Regelventile |
| Temperatur | mehr | zu hohe Temperaturen in der Barbarahalle | Massflow-Regler wird kaputt | Stromlos geschlossene Regelventile |
| Durchflussmenge | mehr | mind. 3 Regelventile versagen gleichzeitig | überstöchiometrische Menge in Reaktor | zusätzliche Sicherheitsventile |
| Durchflussmenge | weniger | Regelventil funktioniert nicht ordnungsgemäß | Versuch muss wiederholt werden | redundante Regelventile |
| Durchflussmenge | teilweise | Regelventil funktioniert nicht ordnungsgemäß | Versuch muss wiederholt werden | redundante Regelventile |
| Durchflussmenge | nicht | Regelventil funktioniert nicht ordnungsgemäß | Versuch muss wiederholt werden | redundante Regelventile |
| Durchflussmenge | Umkehrung | Regelventil funktioniert nicht ordnungsgemäß | Versuch muss wiederholt werden | redundante Regelventile |
| Druckverlust | mehr | Leckage | weniger H ₂ , Versuchsdurchführung nicht richtig | regelmäßige Druckmess-einheiten |

Das letzte Teilsystem, die Gasmischung, wird in Tabelle 9 betrachtet. Hier kann man wie bei den anderen Teilsystemen die Ursachen, Folgen und die möglichen Maßnahmen für die Gefahren, welche auftreten können, erkennen.

Tabelle 9: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasmischung"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------|------------|--|---|--|
| Druck | mehr | Druckregler versagt | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung |
| Druck | teilweise | Druckregler versagt | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung |
| Druck | anders als | Druckregler versagt | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung |
| Temperatur | mehr | zu hohe Temperaturen in der Barbarahalle | Festigkeit des statischen Mischers beachten | auf Belüftung der Barbarahalle achten |

Diese Start-HAZOP-Study wurde als Grundlage für unsere Angebotseinholung bei den externen Anlagenbauunternehmen herangezogen. Das Projektteam bekam dadurch erste externe Sichtweisen auf die zu bauende Anlage und so konnte das Projekt mit weniger Komplikationen gestartet und durchgeführt werden.

3.3 Variable Bilanzierung des Flash-Reaktors bei Verwendung eines Methan/Wasserstoff-Gemisches

Die variable Bilanzierung wurde durch eine Adaption einer schon bestehenden Excel Datei von der Diplomarbeit „Verfahrenstechnische Auslegung einer Flash-Reaktor Pilotanlage zum Einschmelzen schwermetallbelasteter Stäube“ [3] durchgeführt. Dadurch konnte die Menge Wasserstoff, welche benötigt wird errechnet und folglich die Rohrleitungsplanung durchgeführt werden. Bei der Planung der Rohrleitungen und der Regelstrecke für Wasserstoff war die Firma Linde Gas GmbH involviert.

Zuerst mussten mittels Atkins` Physical Chemistry [13] die Konstanten a, b und c der molaren Wärmekapazitäten für Wasserstoff und Sauerstoff ermittelt werden. Anschließend

wurde mittels vorgegebener quadratischer Formel, die Wärmekapazität $c_p(T)$ in Abhängigkeit von der Temperatur und von λ , wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 ersichtlich, berechnet.

| Wärmekapazitäten von H2 abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|---------|----------|----------|
| [J/mol*K] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 23,2 | 23,4 | 23,6 | 23,8 | 24,1 | 0,002 | 20 |
| 0,75 | 24,8 | 25,1 | 25,3 | 25,5 | 25,8 | 0,002 | 21 |
| 0,8 | 26,5 | 26,7 | 27,0 | 27,2 | 27,5 | 0,003 | 23 |
| 0,85 | 28,1 | 28,4 | 28,7 | 28,9 | 29,2 | 0,003 | 24 |
| 0,9 | 29,8 | 30,1 | 30,4 | 30,6 | 30,9 | 0,003 | 25 |
| 0,95 | 31,4 | 31,7 | 32,0 | 32,3 | 32,7 | 0,003 | 27 |
| 1 | 33,1 | 33,4 | 33,7 | 34,1 | 34,4 | 0,003 | 28 |
| lx | 33 | 33 | 34 | 34 | 34 | | |
| L0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | bei [°C] | |
| | | | | | | 25 | 28,81444 |
| $cp(T) = a + b \cdot T + c/T^2$ | | | | a | 27,28 | | J/molK |
| | | | | b | 0,00326 | | |
| | | | | c | 50000 | | |

Abbildung 10: Wärmekapazitäten von H₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

| Wärmekapazitäten von O2 abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------------|----------|-----------|
| [J/mol*K] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 26,1 | 26,4 | 26,7 | 27,0 | 27,3 | 0,003 | 22 |
| 0,75 | 28,0 | 28,3 | 28,6 | 28,9 | 29,3 | 0,003 | 23 |
| 0,8 | 29,9 | 30,2 | 30,5 | 30,9 | 31,2 | 0,003 | 25 |
| 0,85 | 31,7 | 32,1 | 32,4 | 32,8 | 33,2 | 0,004 | 26 |
| 0,9 | 33,6 | 34,0 | 34,3 | 34,7 | 35,1 | 0,004 | 28 |
| 0,95 | 35,5 | 35,9 | 36,3 | 36,7 | 37,1 | 0,004 | 29 |
| 1 | 37,3 | 37,7 | 38,2 | 38,6 | 39,0 | 0,004 | 31 |
| lx | 37 | 38 | 38 | 39 | 39 | | |
| L0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | bei [°C] | |
| | | | | | | 25 | 29,327613 |
| $cp(T) = a + b \cdot T + c/T^2$ | | | | a | 29,96 | | J/molK |
| | | | | b | 0,00418 | | |
| | | | | c | -167000,00 | | |

Abbildung 11: Wärmekapazitäten von O₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

Anschließend wurde das $c_{p,mix}$, also die Wärmekapazität vom Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch berechnet. Dies wurde durch folgende drei Formeln berechnet. Als erstes wird ein Stoffmengengleichgewicht in Form von n_{ges} benötigt.

$$n_{ges} = n(O_2) + n(H_2) \quad (17)$$

Dadurch, dass Wasserstoff (H₂) nur ein Sauerstoffatom für die vollständige Verbrennung zu einem Wassermolekül benötigt und der Faktor des λ auch mit einbezogen werden muss, sieht die folgende Umformung so aus:

$$n(O_2) = n(H_2) * 0,5 * \lambda \quad (18)$$

Aus dieser Formel (18) kann nun die Formel für cp_{mix} vereinfacht dargestellt werden:

$$cp_{mix} = \frac{[cp(T, H_2) + cp(T, O_2) * 0,5 * \lambda]}{(1 + 0,5 * \lambda)} \quad (19)$$

Durch die Formel (19) wurden somit alle Daten, also die Misch-Wärmekapazitäten von Wasserstoff und Sauerstoff errechnet (siehe Abbildung 12).

| Wärmekapazitäten von H2 und O2 abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------------|----------|-----------|
| [J/mol*K] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 23,9 | 24,2 | 24,4 | 24,7 | 24,9 | 0,002450 | 20 |
| 0,75 | 25,7 | 25,9 | 26,2 | 26,5 | 26,7 | 0,002635 | 22 |
| 0,8 | 27,4 | 27,7 | 28,0 | 28,3 | 28,6 | 0,002821 | 23 |
| 0,85 | 29,2 | 29,5 | 29,8 | 30,1 | 30,4 | 0,003008 | 25 |
| 0,9 | 31,0 | 31,3 | 31,6 | 31,9 | 32,2 | 0,003195 | 26 |
| 0,95 | 32,7 | 33,1 | 33,4 | 33,7 | 34,1 | 0,003383 | 28 |
| 1 | 34,5 | 34,8 | 35,2 | 35,6 | 35,9 | 0,003573 | 29 |
| lx | 35,224 | 35,598 | 35,972 | 36,347 | 36,720 | | |
| L0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | bei [°C] | |
| | | | | | | 25 | -5,000475 |
| cp(T)= a +b*T + c/T ² | | | | a | -5,897581285 | | J/molK |
| | | | | b | 0,003008 | | |
| | | J/mol | | c | 35,9725 | | |

Abbildung 12: Wärmekapazitäten von H₂ und O₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

Mittels dieser Misch-Wärmekapazitäten konnte die richtige Verbrennungsenergie von Wasserstoff und Sauerstoff errechnet werden. Diese wurden mittels Formel (20) bei den jeweiligen Temperaturen und λ berechnet.

$$\Delta h_B^T(H_2O) = \Delta h_B^0(H_2O) + \int_{T_0}^T cp(T) dT \quad (20)$$

In Abbildung 13 kann man erkennen, dass die Verbrennungsenergie mit zunehmender Temperatur leicht absinkt.

| Verbrennungs- Energie von H2 und O2 abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|--|-----------|--------|-------|-------|-------------|-----------|----------|
| [kJ/mol] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 239,4 | 239,0 | 238,6 | 238,1 | 237,6 | -0,005 | 246 |
| 0,75 | 239,3 | 238,8 | 238,4 | 237,9 | 237,4 | -0,005 | 247 |
| 0,8 | 239,1 | 238,7 | 238,2 | 237,6 | 237,1 | -0,005 | 247 |
| 0,85 | 239,0 | 238,5 | 238,2 | 237,4 | 236,8 | -0,005 | 247 |
| 0,9 | 238,8 | 238,3 | 237,8 | 237,2 | 236,6 | -0,006 | 248 |
| 0,95 | 238,7 | 238,2 | 237,6 | 237,0 | 236,4 | -0,006 | 248 |
| 1 | 238,6 | 238,0 | 237,4 | 236,8 | 236,1 | -0,006 | 248 |
| lx | -3 | -3 | -4 | -4 | -5 | | |
| L0 | 241 | 241 | 241 | 241 | 241 | | |
| | | | | | | bei 0°C = | 242,1576 |
| H(T,L)= a +b*T + c*L | | | | a | 250,5087041 | | kJ/mol |
| | | | | b | -0,005 | | |
| | 238,51491 | kJ/mol | | c | -3,8 | | |

Abbildung 13: Verbrennungsenergie von H₂ und O₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

In Abbildung 14 ist das Eingabe- und Ergebnisfenster der erstellten Excel Datei zu sehen. In grün gehalten sind die Eingabefelder, welche man für jeden Versuch neu ausfüllen muss und somit seine Volumenbilanz verändern kann. In orange sind die Ergebnisfelder, welche durch die Excel Datei berechnet werden und wodurch dem Operator angezeigt wird, wie viel Methan, Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser für diesen Versuch benötigt wird. Dadurch, dass eine Volumenabhängigkeit von Wasserstoff zu Methan vorherrschen soll, muss man bei jedem Versuch die gelben Parameter neu einstellen und die Energiebilanz kontrollieren. Denn bei „Reaktor“ steht die benötigte Energiemenge für diesen Versuch. Diese Menge sollte möglichst nicht unterschritten werden und somit muss man sich mit der Erdgasmenge und dem Wasserstoffanteil an die benötigte Energiemenge herantasten. In unserem Fall, hier in Abbildung 14, wird statt 100% Erdgas, 92,5% Erdgas und 10 Vol.% Wasserstoff (4,6 Nm³/h) verwendet, um die Energiemenge von 179,13 kW zu erreichen. Somit wäre das ein Versuch mit 10 Vol.% Wasserstoff.

| Überschlägige Volumen-Bilanz für Versuche | | | |
|---|---------|------------------|----------------------------------|
| | | K12-07 | |
| | | kW | Infos |
| Reaktor | | 179,13 kW | |
| Temperatur | 1700 °C | | 1500-1900 |
| Lambda | 0,7 | | max. 1 - mit Staub 0,7, - 0,9 |
| Staubdurchsatz kg/h | 200 | | mind. 50 - max. 400 |
| Carry Over | 3% | | |
| Erdgasmenge von 100% [%] | 92,5 | 165,69 kW | von ursprünglicher Menge |
| Wasserstoffanteil [Vol.-%] | 10 | 13,67 kW | von der neuen Erdgasmenge |
| | Summe: | 179,37 kW | mind. > Reaktor kW |
| Converter | | | |
| Lambda | 1,4 | | mind. 1 |
| Eingabefelder | | | |
| Ergebnisfelder | | | |
| | | | REAKTOR |
| | | | (kg/h) (Nm3/h) |
| Gasbedarf | | 33,3 | 46,4 |
| Wasserstoffbedarf | | 0,4 | 4,6 |
| O ₂ - Bedarf | | 95,3 | 66,7 |
| | | | CONVERTER |
| | | | (kg/h) (Nm3/h) |
| O ₂ - Bedarf | | 60,2 | 42,1 |
| Wasserbedarf | | 212,9 | |
| | | | QUENCHE |
| | | | (kg/h) (Nm3/h) |
| Wasserbedarf | | 123,7 | |
| Luftbedarf | | 155,2 | 120 |

Abbildung 14: Ergebnisse der überschlägigen Volumenbilanz für Versuche mit einem Erdgas/Wasserstoff Gemisch

Für die Dimensionierung der Rohrleitungen waren die Ergebnisse der Massen-, Volumen- und Energiebilanzierungen ausschlaggebend. Bei diesen Bilanzierungen durfte die Tatsache, dass Gase, also auch Wasserstoff kompressibel sind, nicht vergessen werden. Denn dadurch mussten die Berechnungen mit Betriebsvolumen und nicht mit dem Normvolumen durchgeführt werden. Durch die Vorgaben des Flash-Reaktors selbst (Betriebsparameter) und der Lagerung des Wasserstoffs war der Druck und die Temperatur des Gases vorgegeben. Mithilfe der idealen Gasgleichung konnte der gewünschte Normvolumenstrom auf den Betriebsvolumenstrom umgerechnet werden.

$$V_B = \frac{p_N * V_N}{T_N} * \frac{T_B}{p_B} = \frac{1,013 * 200 \frac{Nm^3}{h}}{273,15 * 3600} * \frac{298,15}{15} = 0,004095 m^3/s \quad (21)$$

V_N Normvolumenstrom [m³/h]

p_N Normdruck [bar]_a

T_N Normtemperatur [K]

V_B Betriebsvolumenstrom [m³/s]

p_B Betriebsdruck [bar]_a

T_B Betriebstemperatur [K]

Für das Gas wurden die Normparameter für Druck (1,013 bar) und Temperatur (0°C) festgelegt. Über den zuvor errechneten Betriebsvolumenstrom und die Annahme einer

Gasgeschwindigkeit von 20 m/s konnte mittels Kontinuitätsgleichung der Rohrquerschnitt und damit die Nennweite berechnet werden.

$$A = \frac{V_B}{v} = \frac{0,004095}{20} = 0,0002048 \text{ m}^2 \quad (22)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,0002048}{\pi}} = 0,01615 \text{ m} \quad (23)$$

A Rohrquerschnittsfläche [m²]

d Rohrleitungsdurchmesser [m]

v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Durch diese Berechnungen konnten, wie in Formel (23) ersichtlich, die Nennweiten für die Rohrleitungen von dem Gaslager bis zur Regelstrecke berechnet werden. Die Berechnungen von der Firma Linde Gas wurden mit unseren Werten abgeglichen und somit verifiziert. Bei unserer Berechnung kam ein Nenndurchmesser von 16 mm heraus. Die Rohrleitungen wurden absichtlich immer etwas größer ausgelegt, denn die in der Zukunft folgenden Versuche werden mit komplett unterschiedlichen Wasserstoff Mengen durchgeführt, daher muss eine gewisse Flexibilität gegeben sein. Von der Firma Linde wurde somit die Zuleitung mit einem 1 Zoll Rohr (28 mm Außendurchmesser, 24 mm Innendurchmesser) angefertigt.

Dadurch kann sichergestellt werden, dass die eingebauten Rohrleitungen einen passenden Durchmesser aufweisen und die Menge Wasserstoff, die für unsere Versuche benötigt wird, durch diese Rohrleitungen bereitgestellt werden kann.

3.4 Auswahl der Partnerfirmen

Für das Auswählen einer Baufirma für die Beton- und Fundamentarbeiten und einer Ingenieursfirma für die Errichtung der Regelstrecke und der gesamten Rohrleitung mussten Vergleichsangebote eingeholt und verglichen werden. Für den Gasflaschenschrank und den statischen Mischer mussten keine zusätzlichen Angebote eingeholt werden, da die Kosten 10.000€ nicht überstiegen. Diese Grenzen sind intern von der Montanuniversität vorgegeben.

Für das Aufstellen des Wasserstofflagers musste ein Betonfundament und eine Umzäunung des Gasflaschenlagers errichtet werden. Hierfür wurden diverse Firmen in und um Leoben angeschrieben und Angebote eingeholt. Schlussendlich entschied man sich für das Angebot des Ingenieurbüros Majcen GmbH. Das detaillierte Angebot befindet sich im Projektordner am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.

Durch das Ex-Schutz-Konzept von Herrn Gagstädter wurde man auf die Firma Denios aufmerksam, da sich in diesem Konzept ein Denios Gasflaschenschrank, welcher auch für Wasserstoffgasflaschen geeignet ist, befunden hat. Das genaue Angebot ist im Projektordner am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik zu finden. Im Kapitel 11 Anhang 2 sind die exakten Abmessungen des Gasflaschenschrankes, welche für die Baubehörde von Relevanz sind, eingezeichnet. Ebenso richtete sich die Firma Linde nach dieser Fertigungszeichnung, um die Anbindung der Rohrleitung planen und vorbereiten zu können.

Auch bei den Angeboten diverser Ingenieursfirmen wurden zuerst Spezifikationen für die Anlage zusammengestellt. Anschließend wurden Telefonate und E-Mails mit mehreren kompetenten Anbietern geführt und schlussendlich wurde die Firma Linde mit dem Bau der Wasserstoffregelstrecke und der Rohrleitung beauftragt. Im Projektordner am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik können das detaillierte Angebot und alle darin enthaltenen Positionen eingesehen werden.

In einem vorhergehenden Projekt am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wurde schon einmal ein statischer Mischer verbaut und somit fiel die Wahl auf die Firma M.A.L. Metallbau Anlagenservice und Leitungsbau GmbH, um auch für dieses Projekt den passenden statischen Mischer zu entwerfen und einzubauen. In der Abbildung 15 ist die technische Zeichnung und Ausführung des speziell für dieses Projekt angefertigten statischen Mischers zu sehen. Wie man aus der Positionsliste erkennen kann, besteht der Mischer aus diversen Rohren für die Anschlüsse an die Methan- bzw. Wasserstoffleitungen. Ebenfalls sind im Rohr mit der Position 1 Links- und Rechtsdrallbleche integriert um die optimale und vollständige Vermischung der beiden Gase zu gewährleisten. Im Projektordner am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik ist das Angebot für den statischen Mischer zu sehen, welches auch angenommen wurde.

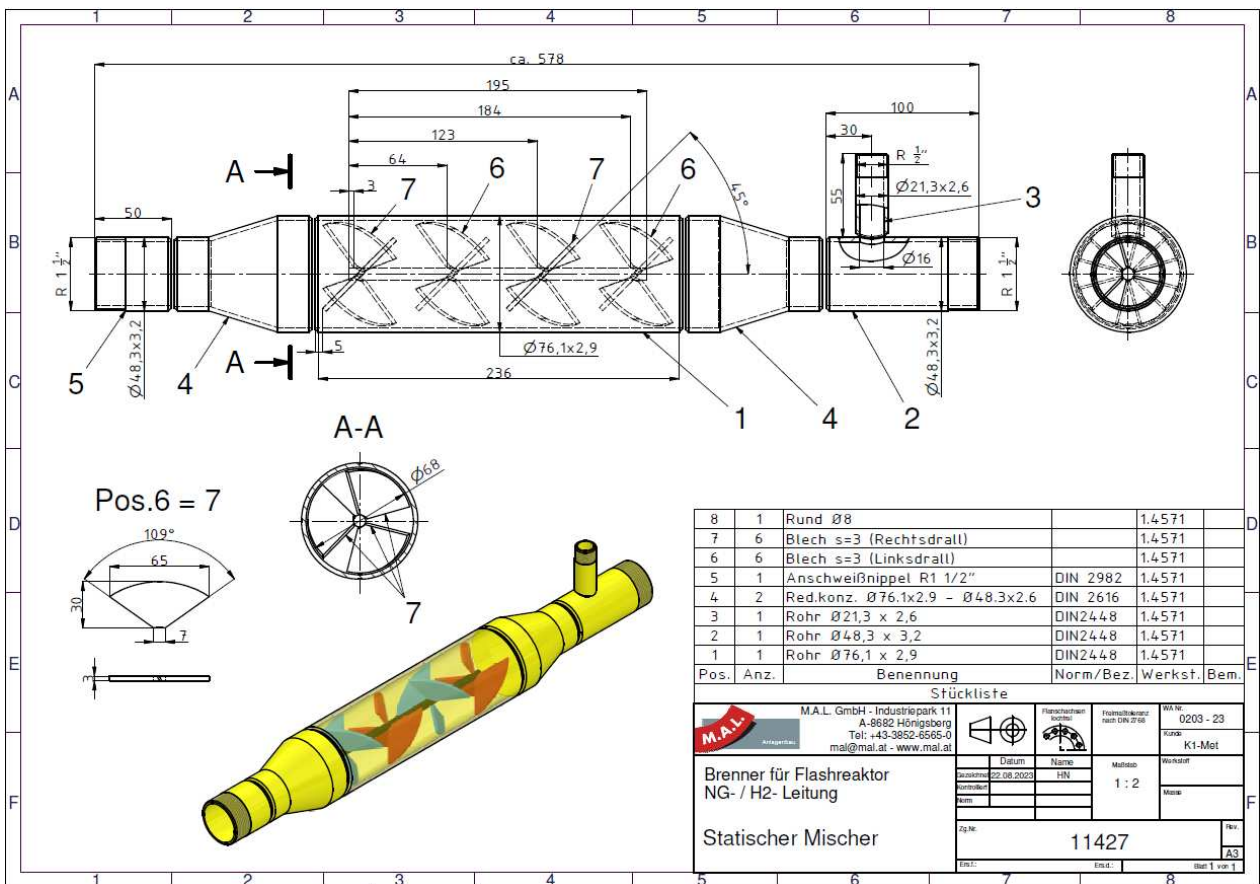


Abbildung 15: Technische Zeichnung des statischen Mixers für die Mischung von Methan und Wasserstoff

3.5 Aufstellplan der Anlage

Der Aufstellplan der Anlage ist ein erweitertes R & I Schema der schon bestehenden Anlage. Hierzu wurden die wichtigsten Teile von diesem R & I Schema ausgeschnitten und erläutert. In Abbildung 16 ist das Gasflaschenlager mit zwei Bündeln zu sehen. Damit hier, in der Ex-Zone eine Datenübertragung stattfinden kann, wird ein Signalgerät LSG 4 verwendet. Durch diesen Signalgeber können Datenaufzeichnungen im Ex-Bereich gemacht und zum Datenaufzeichnungsprogramm weitergeleitet werden. Zusätzlich dazu sind Druckindikatoren und ein Druckminderer eingebaut. Ebenso ist ein Sicherheitsventil, welches sich bei einem Druck von über 25 bar öffnet, installiert. Dieses sichert die Funktionsfähigkeit des zuvor eingebauten Druckminderers ab, dass auf keinen Fall Wasserstoffgas mit zu hohem Druck Richtung Regelstrecke gelangen kann.

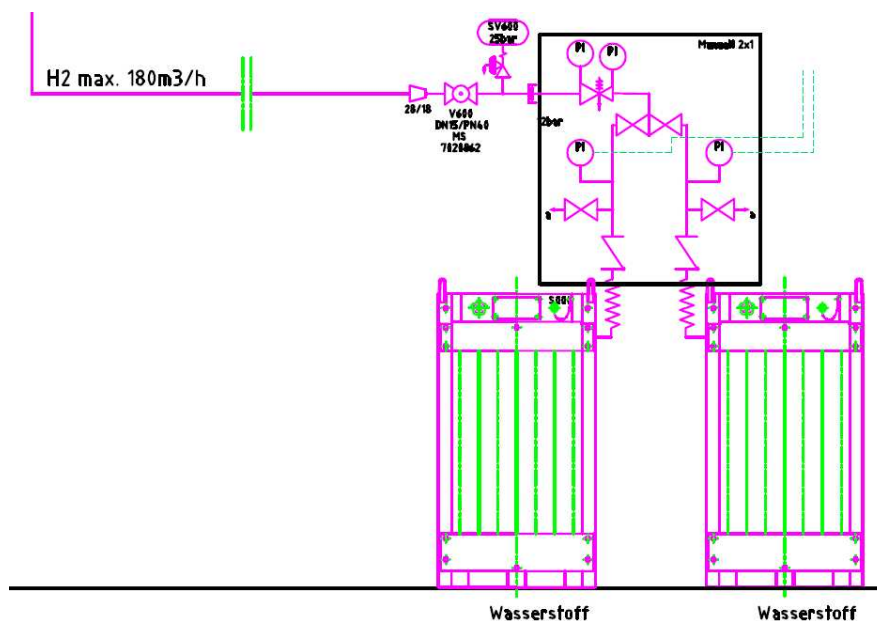


Abbildung 16: R & I Schema des Gasflaschenlagers und Anbindung durch Firma Linde

Der nächste Ausschnitt aus dem R & I Schema ist der Rohrleitungsweg in der Farbe Magenta, mit den händisch zu bedienenden Kugelhähnen direkt beim Eintritt in die Barbarahalle. In Orange ist in Abbildung 17 die Abblaseleitung, welche aus der Barbarahalle hinausgeführt wurde, eingezeichnet.

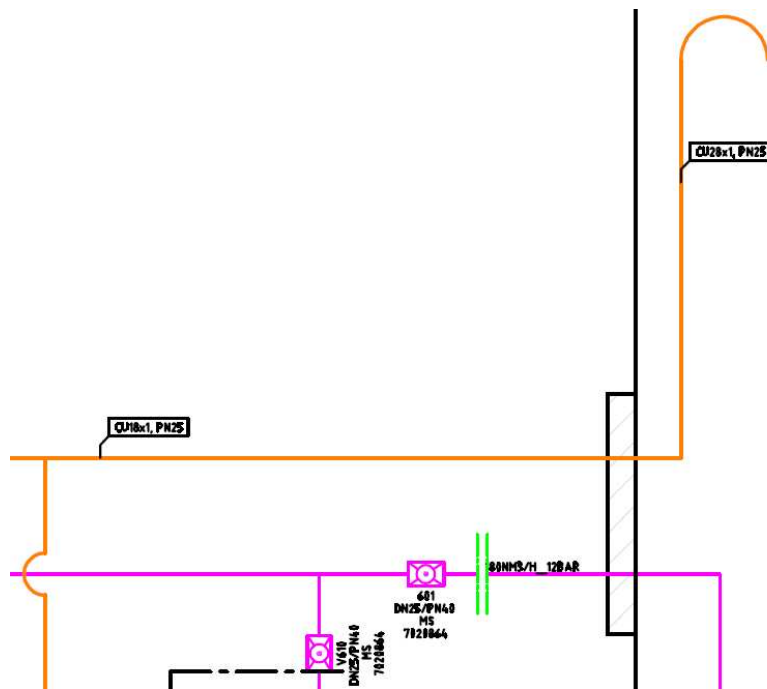


Abbildung 17: Rohrleitung (Magenta) mit Kugelhähnen und Abblaseleitung (Orange) in und von der Barbarahalle

In Abbildung 18 ist die gesamte Regelstrecke in der Farbe Magenta dargestellt. Die Abblaseleitung ist wie in den vorherigen Abbildungen in Orange gehalten. Über der Regelstrecke befindet sich noch eine Tabelle, mit den wichtigsten Eigenschaften der verbauten Geräte.

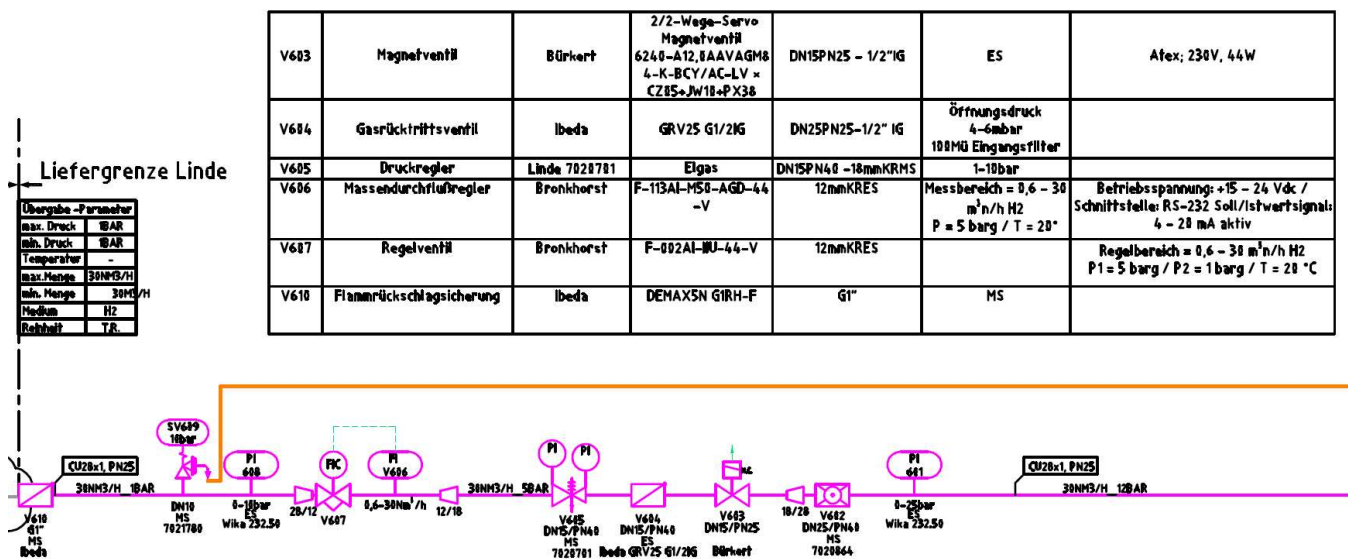


Abbildung 18: Ausschnitt der Regelstrecke für Wasserstoff aus dem R&I Schema

Zur genaueren Identifikation der einzelnen Elemente aus diesem R & I Schema werden in Tabelle 10 alle Bauteile mit ihren dazugehörigen Kurzbezeichnung und ihrer Bezeichnung aus dem R & I Schema aufgelistet.

Tabelle 10: Bauteiltabelle mit Kurzbezeichnung und ihrer Position in dem R & I Schema

| Bauteil | Kurzbezeichnung | Bezeichnung im R&I Schema |
|---|------------------------|--------------------------------------|
| Kugelhahn 1 | AV 01691 | 601 |
| Druckmessgerät | PI 01230 | PI 601 |
| Kugelhahn 2 | AV 01692 | V 602 |
| Magnetventil | GV 01693 | V 603 |
| Gasrücktrittsventil | keine Kurzbezeichnung | V 604 |
| Druckregler | keine Kurzbezeichnung | V 605 |
| Massendurchflussregler mit Regelventil (Mass Flow Controller) | GIV 01694 und FI 01314 | V 606 und V 607 |
| Druckmessgerät | PI 01227 | PI 608 |
| Sicherheitsventil | AV 01694 | SV 609 |
| Kugelhahn 3 | AV 01695 | SV 610 |
| Flammrückschlagsicherung | keine Kurzbezeichnung | V 610 |

3.6 Fotodokumentation der Bau- und Aufstellarbeiten für das gesamte Projekt

Die Bauarbeiten begannen damit, dass die Baufirma Majcen im August 2023 kam und die benötigte Fläche für das Betonfundament neben den Werkhallen der Montanuniversität in der Jahnstraße 2 aushob. Danach wurde ein Frostkoffer zum Schutz vor dem Auffrieren mit

Schotter errichtet und gleichzeitig ein Blitzschutz installiert. Nach diesem wurde die Fläche von 8600 mm x 4500 mm ausgeschalt, siehe Abbildung 19.



Abbildung 19: Schalungsarbeiten für die Betonfläche

Ebenso wurde ein Weg vom Gehsteig bis hin zur Fundamentplatte ausbetoniert. Die Maße des Weges auf der langen Seite sind 4200 mm, auf der kurzen Seite 2700 mm. Die Breite des Weges beträgt 1500 mm. Diese wurde so gewählt, dass der Stapler mit dem Wasserstoffbündel genug Platz zum Befahren der Betonfläche hat.



Abbildung 20: Fundamentfläche mit ausgeschalttem Weg für das Befahren mit dem Stapler

In Abbildung 21 sieht man die fertig betonierte Fundamentfläche und den Weg, der für das Befahren des Staplers inklusive Wasserstoffbündel gedacht ist.



Abbildung 21: Fertig betonierte Fundamentplatte und Weg für den Stapler

Da wegen organisatorischen Aspekten die Umzäunung des Fundamentes noch nicht realisiert werden konnte, konnte diese noch nicht als Bild in die Arbeit eingepflegt werden. Während der abschließenden Arbeiten wurde der Denios Sicherheitsschrank für die Montage im Freien für unser Gasflaschenbündel geliefert (siehe Abbildung 22). Dieser ist in einer F90 Ausführung hergestellt, was bedeutet, dass die Wände und auch das Dach des Gasflaschenlagers einen 90 Minuten Dauerbrand standhalten würden. Diese Eigenschaft ist eine behördliche Auflage für das Lagern von Wasserstoff in Gasflaschen.



Abbildung 22: Denios Gasflaschenschrank für die Montage im Freien

In der nächsten Abbildung 23 kann man den Aufstellort der Wasserstoffregelstrecke in der Barbarahalle und auch die Position der Flammrücktrittssicherung erkennen. Für die Regelstrecke wurde die zugemauerte Tür im Obergeschoss (rechts im Bild) der Barbarahalle als Aufstellort auserwählt. Für die Flammrücktrittssicherung wird derselbe Ort, wie schon bei den anderen Gasrücktrittssicherungen (links im Bild) gewählt, um diese thematisch und technisch am selben Platz zu positionieren.

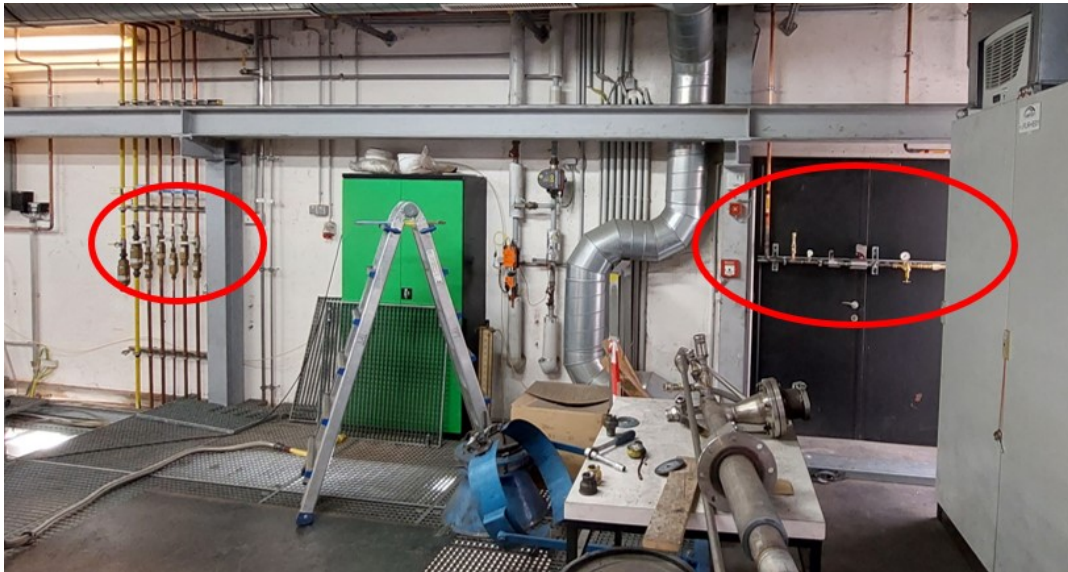


Abbildung 23: Aufstellort der Wasserstoffregelstrecke in der Barbarahalle

In Abbildung 24 erkennt man den Eintritt der Rohrleitung in die Barbarahalle inklusive anschließendem Kugelhahn zur Öffnung und Schließung des Wasserstoffflusses.

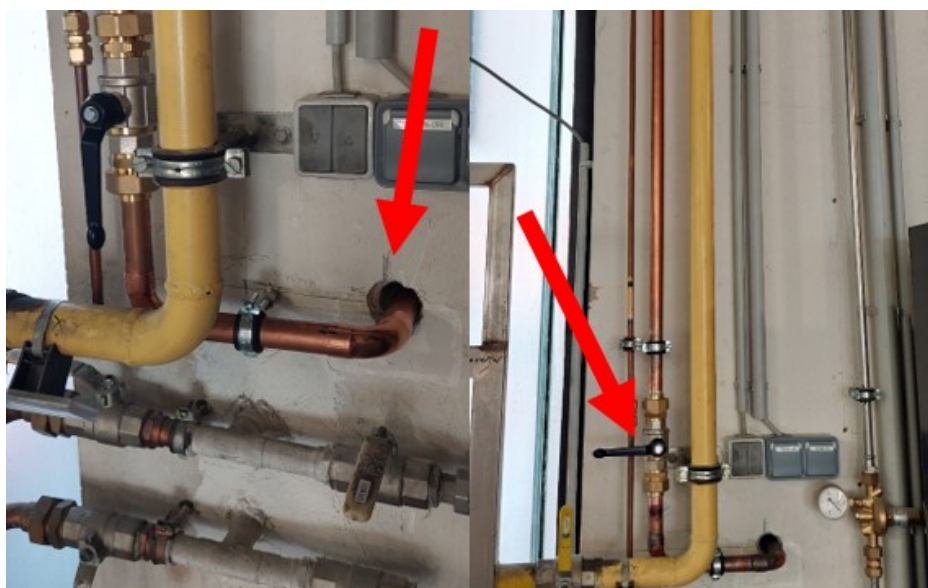


Abbildung 24: Wasserstoffeintritt in die Barbarahalle und Kugelhahn direkt nach Eintritt

Anhand des nächsten Bildes, Abbildung 25 kann man die Anordnung und die fertig aufgehängte Wasserstoffregelstrecke im ersten Stock der Barbarahalle sehen.



Abbildung 25: Komplette Regelstrecke beim zusammenbauen (oben) und fertig montiert (unten)

In Abbildung 26 sind die einzelnen Elemente der Wasserstoffregelstrecke zu sehen. Als erstes ist ein Kugelhahn zu erkennen. Dieser ist dazu da, dass entweder die Regelstrecke vom RecoDust Prozess oder die Regelstrecke der Brennergaseinrichtung, einer anderen Anlage in der Barbarahalle, mit Wasserstoff versorgt wird. In der Mitte der Abbildung 26 ist ein Gasrücktrittsventil eingebaut. Dieses Ventil ist dafür da, kein Gas zurück aus der Regelstrecke Richtung Gasflaschenlager fließen zu lassen und ist somit ein wichtiges sicherheitstechnisches Element in der Regelstrecke. Rechts in Abbildung 26 ist ein Druckminderer zu sehen. Mittels diesem wird der Druck von 12 auf 5 bar reduziert.



Abbildung 26: Kugelhahn (links), Gasrücktrittsventil (mitte) und Druckminderer (rechts)

Ein weiteres, wichtiges Element der Regelstrecke ist das Magnetventil, siehe Abbildung 27. Dieses Magnetventil ist mit dem Zustand stromlos geschlossen eingebaut. Zusätzlich zu dieser Eigenschaft ist es eine explosionsgeschützte Ausführung für Kat. 2 der Firma Bürkert. Dieses Servogesteuerte 2/2-Wege-Kolbenventil vom Typ 5404, in weiterer Folge immer Magnetventil genannt, ist geeignet für Gas- und Dampfananwendungen bis 180 °C und ist somit optimal für unsere Anwendung bei diesem Projekt.



Abbildung 27: Servogesteuertes 2/2-Wege-Kolbenventil vom Typ 5404 der Fa. Bürkert

Nach diesen Elementen der Regelstrecke kommt der Mass Flow Controller, siehe Abbildung 28. Dieser ist für die Steuerung der Wasserstoffmenge und die Mischung mit Methan und folglich für die Menge im Brenner beim RecoDust Prozess verantwortlich.



Abbildung 28: Eingebauter Mass Flow Controller in der Wasserstoffregelstrecke

Durch das Sicherheitsventil siehe Abbildung 29, kann garantiert werden, dass nach der Regelstrecke nicht mehr als 10 Bar in der Zuleitung zum Flash-Reaktor auftreten. Diese Sicherheitseinrichtung ist für das Betreiben einer Gasregelstrecke notwendig. Wenn ein Überdruck auftritt, drückt das Gas auf eine Dichtung hinter welcher sich ein Feder befindet.

Diese Feder wird bei zu hohem Druck zusammengedrückt und somit öffnet sich das Sicherheitsventil. Durch die Abblaseleitung, welche an dieses Sicherheitsventil angeschlossen ist, wird der Wasserstoff mit Überdruck über das Dach der Werkhalle geleitet und dort ausgeblasen.



Abbildung 29: Sicherheitsventil mit 10 bar als Obergrenze

Als nächstes sind die Druckmessstellen, welche vor und nach der Regelstrecke eingebaut sind, zu erkennen (Abbildung 30). Diese dienen dazu, dass jederzeit der Druck des Zuflusses und der Regelstrecke im Auge behalten werden kann.



Abbildung 30: Druckmessstellen vor und nach der Regelstrecke

Wichtig für den sicheren Betrieb der Anlage ist die Flammrückschlagsicherung (Abbildung 31) nach der Regelstrecke, aber noch vor dem statischen Mischer. Diese Sicherung dient dazu, dass sich die Flamme, welche sich zurück in die Zuleitung des Brenngases bewegen könnte, nicht bis zur Regelstrecke ausbreiten kann, sondern davor gestoppt wird.



Abbildung 31: Symbolbild für Flammrückschlagsicherung der Wasserstoffregelstrecke

Direkt danach wurde als letztes Element der Anlage ein statischer Mischer, wie in der technischen Zeichnung in Kapitel 3.4, eingebaut. In Abbildung 32 ist dieser in der Seitenansicht zu sehen. Durch diesen statischen Mischer ist sichergestellt, dass das Gemisch aus Methan und Wasserstoff vor dem Eintritt durch den Brenner in den Reaktor optimal vermischt wird.



Abbildung 32: Statischer Mischer für die Mischung von Methan und Wasserstoff

Mit dem Ende der Aufstellarbeiten startete die abschließende HAZOP-Study. Diese ist dazu da, Ursachen, Folgen und Maßnahmen schon vorab zu erkennen und dadurch keine sicherheitstechnisch relevanten Ereignisse auftreten zu lassen

Die elektrische Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (EMSR) der Wasserstoffregelstrecke wird, wie schon in dem vorherigen Kapitel anhand des R & I Schemas gezeigt, in späterer Folge umgesetzt. Zusätzlich zu der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) wird die Visualisierung des Steuerungssystems der Flash-Reaktor-Pilotanlage realisiert. Die Visualisierung ist die Schnittstelle zwischen die SPS und dem Bediener. Dadurch werden alle Messwerte im laufenden Anlagenbetrieb erfasst und stehen somit sofort zur Verfügung.

Die geplante und aufgebaute Wasserstoffregelstrecke wurde nach ÖNORM EN 746 Teil 1 [14], Teil 2 [15] und Teil 3 [16] ausgeführt. Die Informationen über die verwendeten Bauteile, wie Sensoren, Ventile und Reglern können dem Projektordner am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik entnommen werden.

3.7 Abschließende HAZOP-Study

Wie schon in Kapitel 3.2 Start-HAZOP-Study beschrieben, ist die gesamte Anlage in Teilsysteme unterteilt worden. Diese sind auch bei der abschließenden HAZOP-Study ident wie bei der Start-HAZOP-Study. Die Anlage teilt sich somit auf in:

- das Gasflaschenlager
- den Rohrleitungsweg
- die Regelstrecke und
- die Gasmischung

Als Teilnehmer für diese abschließende HAZOP-Study wurden wieder Personen aus verschiedenen Arbeitsgruppen vom Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik gewählt. Zusätzlich zu den zwei Projektverantwortlichen, Dipl.-Ing. Wolfgang Reiter und Kevin Landa, BSc waren noch Dipl.-Ing. Dr.mont. Christoph Spijker, Wolfgang Rühl, Dipl.-Ing. Michael Hohenberger und Thomas McFarlane Hoad, BSc anwesend.

Als erstes wurde die gesamte Wasserstoffstrecke und alle Aufstellorte der einzelnen Teilsysteme abgegangen und Fragen dazu beantwortet. Im Anschluss daran wurde im Seminarraum eine kurze PowerPoint-Präsentation über den Plan und die Details der Anlage abgehalten. Dabei wurden die vorausgewählten Parameter und Leitworte diskutiert. Die Leitworte wurden wie in Kapitel 2.5.2 in Tabelle 4 und auch schon bei der Start-HAZOP-Study übernommen und angewandt. Die Parameter für die einzelnen Teilsysteme wurden diskutiert und wie folgt ausgewählt.

Für das Gasflaschenlager:

- Druck
- Temperatur
- Füllmenge

Für die Rohrleitung:

- Druck
- Temperatur
- Durchflussmenge
- Druckverlust

Für die Regelstrecke:

- Druck
- Temperatur
- Durchflussmenge
- Druckverlust

Für die Gasmischung:

- Druck
- Temperatur
- Durchflussmenge
- Druckverlust

Hierbei hat sich eine Veränderung zur Start-HAZOP-Study ergeben. Beim Teilsystem "Gasmischung" wurden zwei zusätzliche Parameter, Durchflussmenge und Druckverlust in die Studie mitaufgenommen. Ansonsten waren bis zu diesem Zeitpunkt die beiden HAZOPs ident.

Nachdem die Parameter und die Leitworte feststanden, konnte die eigentliche HAZOP-Study beginnen. Für jedes Teilsystem wurden, wie auch schon bei der Start-HAZOP-Study die Parameter und die Leitworte kombiniert, um zu eruieren, ob dabei Gefahren oder etwaige Folgen auftreten könnten. Direkt im Anschluss wurden mögliche Sicherheitsmaßnahmen besprochen. In den nachstehenden vier Tabellen sind nur jene Leitworte vorhanden, die laut HAZOP-Study Team für dieses Teilsystem und diesen Prozessparameter Sinn machen.

Zuallererst wurde das Teilsystem rund um das Gasflaschenlager analysiert und die Gefahren dafür aufgezeigt. In der nachfolgenden Tabelle 11 kann man durch die Kombination der Leitworte und der Prozessparameter mögliche Ursachen und Gefahren, die bei dem Gasflaschenlager entstehen können, aufzeigen. Die daraus entstehenden Folgen kann man ebenfalls erkennen. Mögliche Gegenmaßnahmen sind in der letzten Spalte der Tabelle angeführt.

Tabelle 11: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasflaschenlager"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|-------------------|------------------------|---|---------------------------------|---|
| Druck | nein, nicht, Umkehrung | Leckage | Flasche leer, kein Druck | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen |
| Druck | mehr | extreme Temperaturerhöhung --> Brand | erhöhter Flaschendruck | Druckablassventil greift ein, Zaun 3 m entfernt von Box aufgestellt, F90 Brandschutzbox |
| Druck | weniger | falsche Befüllung, Flasche zu lange gestanden --> ausgasen, Leckage | Durchfluss ab 20 bar zu gering | Druckprüfen, Operator überprüft den tatsächlichen Durchfluss (Soll- und Istwert) |
| Temperatur | mehr | Brand | zu hoher Druck | Druckablassventil greift ein, Zaun 3 m entfernt von Box aufgestellt, F90 Brandschutzbox, Feuerwehr verständigen |
| Temperatur | weniger | niedrige Temperaturen | Leckage durch spröde Dichtungen | regelmäßige Dichtheitsprüfungen |
| Füllmenge | nein, nicht, Umkehrung | Leckage, Flasche leer | Flasche leer, kein Druck | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen |
| Füllmenge | weniger | Leckage, Flasche leer | Flasche leer, kein Druck | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen |

Hier in Tabelle 12 ist das Ergebnis der HAZOP-Study für das zweite Teilsystem, der Rohrleitung, welche vom Gasflaschenlager in die Barbarahalle bis zur Regelstrecke führt, zusammengefasst.

Tabelle 12: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Rohrleitung"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------------|-------------|--|--|---|
| Druck | nein, nicht | Druckregler kaputt, Kugelhahn zu, Flasche leer | kein Durchfluss, keine Versuche | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch, Druckaufnehmer bei Ablaseleitung für Magnetventil |
| Druck | mehr | Druckregler kaputt | zu hoher Druck | Wartung und Kontrolle der Anlage |
| Druck | weniger | zu wenig Füllmenge in Flaschenbündel | keine Versuche möglich | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Temperatur | mehr | Brandfall | Leitungen sind gelötet, könnten bei hohen Temperaturen aufgehen | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn, welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |
| Durchflussmenge | nein, nicht | Leckage, Flasche leer, Ventil geschlossen | Flasche leer, kein Druck | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen, Kugelhähne kontrollieren |
| Durchflussmenge | mehr | Mass-Flow Controller defekt | mehr Durchfluss somit H ₂ im Abgas | Operator Kontrolle Soll- und Istwert, Magnetventil schließt automatisch (stromlos geschlossen) |
| Durchflussmenge | weniger | Beschädigung der Rohrleitung | zu geringer Durchfluss, Versuch evtl. nicht möglich | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Druckverlust | mehr | Beschädigung der Rohrleitung | Senkung des max. Durchflusses | (optische) Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |

In Tabelle 13 wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse der HAZOP-Study von der Regelstrecke aufgelistet.

Tabelle 13: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Regelstrecke"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------------|-------------|---|--|---|
| Druck | nein, nicht | Kugelhahn zu, Flasche leer, Leckage | kein Durchfluss, keine Versuche | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Druck | mehr | Druckregler defekt | Abblaseleitung öffnet bis Druck wieder passend ist | Operator beendet Versuch mit schließen des Kugelhahns |
| Druck | weniger | Flasche leer, Leckage, Druckregler falsch eingestellt | zu wenig Durchfluss, keine Versuche | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Temperatur | mehr | Brandfall | Leitungen sind gelötet, könnten bei hohen Temperaturen aufgehen | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn, welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |
| Durchflussmenge | nein, nicht | Leckage, Flasche leer, Ventil geschlossen | Flasche leer, kein Druck | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen, Kugelhähne kontrollieren |
| Durchflussmenge | mehr | Mass-Flow Controller defekt | mehr Durchfluss somit H ₂ im Abgas | Operator Kontrolle Soll- und Istwert, Magnetventil schließt automatisch (stromlos geschlossen) |
| Durchflussmenge | weniger | Beschädigung der Regelstrecke, zu wenig Vordruck für Mass Flow Controller | zu geringer Durchfluss, Versuch evtl. nicht möglich | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Druckverlust | mehr | Beschädigung der Regelstrecke | Senkung des max. Durchflusses | (optische) Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch, H ₂ Wächter/Detektor |

Das letzte Teilsystem, die Gasmischung, wird in Tabelle 14 behandelt. Hier kann man wie bei den anderen Teilsystemen die Ursachen, Folgen und die möglichen Maßnahmen für die Gefahren, welche auftreten können, erkennen.

Tabelle 14: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasmischung"

| Prozessparameter | Leitwort | mögliche Ursachen | Folgen | mögliche Maßnahmen |
|------------------------|-------------|--|---|--|
| Druck | nein, nicht | Druckregler kaputt, Kugelhahn zu, Flasche leer | kein Durchfluss, keine Versuche | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Druck | weniger | zu wenig Füllmenge in Flaschenbündel | keine Versuche möglich | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |
| Temperatur | mehr | Brandfall | statischer Mischer ist geschweißt | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |
| Durchflussmenge | mehr | Mass-Flow Controller defekt | höherer Druckverlust | Durchflussmenge anpassen, um optimale Mischung zu erhalten |
| Durchflussmenge | weniger | Fehler in Gasregelstrecke | volle laminare Strömung im statischen Mischer --> keine vollständige Mischung, jedoch danach in Schlauch bzw. im Brenner | keine |
| Druckverlust | mehr | Beschädigung/Ver- schmutzung des statischen Mixers | geringerer maximaler Durchfluss | Überprüfen der Anlage und evtl. reinigen |

Diese abschließende HAZOP-Study wurde als Sicherheitsbetrachtung für die neue Anlage in der Barbarahalle für den Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik im Zuge dieser Masterarbeit erstellt. In diesem Kapitel sind die Durchführung der HAZOP-Study und alle dadurch gewonnenen Erkenntnisse aufgezeigt. Genauer werden die beiden HAZOP-Studys dann in den Kapiteln 5 Ergebnisse und 6 Diskussion und Interpretation erläutert. Ebenso werden sie verglichen, um mögliche Unterschiede der beiden HAZOP-Studys festzustellen. Gleichzeitig werden die wichtigsten Maßnahmen und die gravierendsten Ursachen bzw. Folgen aufgezeigt, analysiert und falls relevant, bei den Störfallszenarien berücksichtigt.

4 Neue Betriebsarten und Störabschaltungen

Ähnlich zur schon bestehenden „Funktionsbeschreibung Flash-Reaktor Pilotanlage“ [17] werden in diesem Kapitel jede Betriebsart und alle Störabschaltungen für die neu hinzugekommenen Elemente kurz erläutert. Die Betriebsarten sind zugleich die Vorgabe für die Automation der Anlage, sei es in einer der Normalbetriebsarten oder bei einer der Störabschaltungen. Praktischerweise können diese einzelnen Kapitel direkt für die „Funktionsbeschreibung Flash-Reaktor Pilotanlage“ [17] übernommen und dort ergänzt bzw. aktualisiert werden. Somit wäre dieses Dokument auch auf dem neuesten Stand.

4.1 Ruhezustand der Anlage

Der Ausgangszustand der RecoDust Anlage wird auch Ruhezustand genannt und bei dieser ist die Anlage außer Betrieb.

1. Die drei Absperrventile, von der Wasserstoffzuleitung bis zum statischen Mischer, müssen dabei geschlossen sein.

| | | |
|----------|--------------------------------|----|
| AV 01691 | Hauptabsperrventil Wasserstoff | ZU |
|----------|--------------------------------|----|

| | | |
|----------|---|----|
| AV 01692 | Absperrventil Wasserstoff RecoDust Regelstrecke | ZU |
|----------|---|----|

| | | |
|----------|--|----|
| AV 01695 | Absperrventil Wasserstoff statischer Mischer | ZU |
|----------|--|----|

2. Das Magnetventil der Wasserstoffregelstrecke ist in seiner Sicherheitsstellung stromlos geschlossen.

| | | |
|----------|---|----|
| GV 01693 | Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner | ZU |
|----------|---|----|

3. Das elektrische Regelventil, bei uns auch Mass-Flow Controller genannt, ist ebenfalls geschlossen bzw. in seiner Sicherheitsstellung.

| | | |
|---------------------------|----------------------------------|----|
| GIV 01694 und FI 01314 | Mass-Flow Controller Wasserstoff | ZU |
|---------------------------|----------------------------------|----|

4.2 Handbetrieb der Anlage

Durch das Programm „Handbetrieb“ können und werden alle schaltbaren Elemente der Anlage auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft.

1. Funktionsprobe des Magnetventiles in der Wasserstoffregelstrecke.

GV 01693 Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner AUF/ZU

2. Funktionsprobe des Mass-Flow Controllers der Wasserstoffregelstrecke.

GIV 01694
und FI 01314 Mass-Flow Controller Wasserstoff REGELBETRIEB EIN/AUS

4.3 Anfahren der Anlage

Damit man in das Programm „Normalbetrieb“ der Anlage wechseln kann, müssen mittels „Anfahren der Anlage“ alle drei Prozesseinheiten des Flash-Reaktors ordnungsgemäß in Betrieb genommen werden.

Durch den Operator ist vor Anfahren der Anlage zu prüfen, ob sich genügend Wasserstoff in dem Wasserstoffbündel befindet. Ebenso muss auch während des gesamten Versuches genug Wasserstoff für einen reibungslosen Versuch vorhanden sein.

1. Als Freigabe für einen Versuch mit Wasserstoff muss folgendes Kriterium erfüllt sein:

PIZ AHL 01230 Wasserstoffdruck in Gasflaschenlager > 20 bar

2. Beim Anfahren aus dem kalten Zustand und beim Anfahren nach einem Kurzstillstand wird gleich agiert wie schon in der „Funktionsbeschreibung Flash-Reaktor Pilotanlage“ [17] beschrieben. Auch beim Betrieb mit Wasserstoff geschieht das Hochfahren der Anlage bis zur Versuchstemperatur von ca. 1700 °C unter oxidierenden Bedingungen, was so viel heißt wie λ größer 1. Nach Erreichen der Zieltemperatur wird die Sauerstoffzufuhr reduziert (λ auf kleiner 1) und somit auf reduzierende Bedingungen umgestellt. [17]

Bei der Inbetriebnahme der Prozesseinheit 01 „Flash-Reaktor inkl. Brennerkammer und Steigrohr“ sind durch die hinzukommende Wasserstoffregelstrecke ebenfalls zusätzliche Punkte zu beachten:

3. Durch den Operator sind die Absperrventile entlang der Wasserstoffregelstrecke davor und auch danach von Hand zu öffnen.

| | | |
|----------|---|-----|
| AV 01691 | Hauptabsperrventil Wasserstoff | AUF |
| AV 01692 | Absperrventil Wasserstoff RecoDust Regelstrecke | AUF |
| AV 01695 | Absperrventil Wasserstoff statischer Mischer | AUF |

4. Das Magnetventil der Wasserstoffregelstrecke wird ebenso wie die anderen Magnetventile, bei Erreichen einer Reaktortemperatur von ~ 1000 °C, angesteuert.

| | | |
|----------|---|-----|
| GV 01693 | Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner | AUF |
|----------|---|-----|

5. Anschließend wird das elektrische Regelventil, der Mass-Flow Controller der Wasserstoffregelstrecke durch den Operator in der Warte eingestellt, betrieben und gegebenenfalls je nach Betriebsart umgestellt.

| | | |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| GIV 01694 und FI 01314 | Mass-Flow Controller Wasserstoff | REGELBETRIEB |
| FIZ AHL 01314 | Wasserstoffdurchfluss (Hauptbrenner) | ISTWERTANZEIGE |

4.4 Warmbetrieb der Anlage

Bei Warmbetrieb wird die Pilotanlage bei ihrem Betriebspunkt kontinuierlich betrieben. Der Volumenstrom wird durch die Bilanz und die richtige Menge Staub eingestellt und kann beim Normalbetrieb den ganzen Versuch hinweg gleichbleiben. Durch das ordnungsgemäße Anfahren der Anlage muss im Normalfall nicht mehr auf die Mengen des Wasserstoffeintrages geachtet werden.

1. Zusätzlich zu den in der in [17] stehenden Regelungsmöglichkeiten kann auch der Mass-Flow Controller der Wasserstoffregelstrecke von der Warte aus geregelt werden.

| | | |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| GIV 01694 und FI 01314 | Mass-Flow Controller Wasserstoff | REGELBETRIEB |
| FIZ AHL 01314 | Wasserstoffdurchfluss (Hauptbrenner) | ISTWERTANZEIGE |

4.5 Abfahren der Anlage

Das schrittweise außer Betrieb nehmen der drei Prozesseinheiten wird im Programm „Abfahren der Anlage“ beschrieben. Dabei muss der Reaktor durch Änderung der Durchflussraten im Hauptbrenner in den oxidierenden Zustand umgestellt werden.

1. Zusätzlich zu den Elementen, die laut [17] zu bedienen sind, muss der Mass-Flow Controller der Wasserstoffregelstrecke bedient werden.

| | | |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|
| GIV 01694 und FI 01314 | Mass-Flow Controller Wasserstoff | REGELBETRIEB |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|

| | | |
|---------------|--------------------------------------|----------------|
| FIZ AHL 01314 | Wasserstoffdurchfluss (Hauptbrenner) | ISTWERTANZEIGE |
|---------------|--------------------------------------|----------------|

2. Nach 10 Minuten oxidierende Bedingungen werden die Zuflussleitungen für den Hauptbrenner abgedreht.

| | | |
|----------|---|----|
| GV 01693 | Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner | ZU |
|----------|---|----|

3. Anschließend wird das elektrische Regelventil geschlossen.

| | | |
|---------------------------|----------------------------------|----|
| GIV 01694 und FI 01314 | Mass-Flow Controller Wasserstoff | ZU |
|---------------------------|----------------------------------|----|

4. Um den Versuch zu beenden und den Wasserstofffluss komplett zu unterbinden, müssen die drei Absperrventile in der Wasserstoffzuleitung und nach der Regelstrecke geschlossen werden.

| | | |
|----------|--------------------------------|----|
| AV 01691 | Hauptabsperrventil Wasserstoff | ZU |
|----------|--------------------------------|----|

| | | |
|----------|---|----|
| AV 01692 | Absperrventil Wasserstoff RecoDust Regelstrecke | ZU |
|----------|---|----|

| | | |
|----------|--|----|
| AV 01695 | Absperrventil Wasserstoff statischer Mischer | ZU |
|----------|--|----|

4.6 Störabschaltungen der Anlage

Durch die speicherprogrammierbare Steuerung werden im Falle einer Störabschaltung der Anlage die Elemente automatisch in einen sicheren Zustand gebracht und selbstständig abgeschaltet. Um die reduzierten Abgase aus der Brennkammer trotz einer der nachfolgenden Störabschaltungen nachzuverbrennen bzw. abkühlen zu können, ist das Abgassystem der Anlage 10 Sekunden länger in Betrieb als der Rest der Anlage.

Im Zuge der sicherheitstechnischen Betrachtungen rund um die HAZOP-Study wurden folgende zusätzliche Prozessschritte zu den schon vorhandenen Störabschaltungen in [17] festgelegt.

4.6.1 Prozesshalt der Anlage

Diese Störabschaltung wird unter anderem eingeleitet durch:

1. Einen Druckalarm des Betriebsmediums Wasserstoff.

PIZ AHL 01230 Wasserstoffdruck in Hauptleitung < ALARM LOW

PIZ AHL 01230 Wasserstoffdruck in Hauptleitung > ALARM HIGH

2. Bei Prozesshalt werden sofort nach Auslösen folgende zusätzliche Schritte ausgeführt.

GV 01693 Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner ZU

4.6.2 Ausfall von Betriebswasserpumpe 02-P1

Im Fall des Ausfalles der Betriebswasserpumpe wird folgender zusätzlicher Schritt durchgeführt.

GV 01693 Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner ZU

4.6.3 Stromausfall der Anlage

Im Fall eines Stromausfalles wird das Magnetventil GV 01693 in der Wasserstoffregelstrecke durch seinen stromlos geschlossenen Normalzustand automatisch geschlossen.

GV 01693 Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner ZU

4.6.4 NOT-Aus der Anlage

Die Störabschaltung NOT-Aus kann nur durch den Operator mittels NOT-Aus-Button ausgelöst werden. Dabei wird wie beim Stromausfall das Magnetventil der Anlage automatisch angesteuert.

GV 01693 Wasserstoff Magnetventil für Hauptbrenner ZU

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die einzelnen Ergebnisse dieser Masterarbeit dargestellt. Die Ergebnisse sind die Berechnung der Expansionstemperatur, die Rohrleitungsberechnung, die angepasste Bilanz, die fertige Anlage für die Kältinbetriebnahme, die Störfallszenarien für die neuen steuerbaren Elemente in der Wasserstoffregelstrecke und die beiden HAZOP-Studys, welche vor und nach dem Aufstellen der Anlage erfolgten.

5.1 Berechnungsergebnisse

Bei den Berechnungsergebnissen handelt es sich um reine Überprüfungen der Firma Linde. Durch die Berechnung der Expansionstemperatur mittels Joule-Thompson-Effektes konnte bestätigt werden, dass kein Problem bei der Entspannung des Wasserstoffgases von 200 bar (Flaschendruck) auf 12 bar, welcher in der Rohrleitung Richtung Barbarahalle herrscht, auftritt. Da der Joule-Thompson-Koeffizient von Wasserstoff negativ ist, erwärmt sich das Gas beim Entspannen von 300 auf 412 Kelvin. Diese Temperaturerhöhung ist im Vergleich zur Außentemperatur groß und deshalb wird auf diese in der Diskussion näher eingegangen. Innerhalb der Regelstrecke wird das Gas dann von 12 bar auf 1 bar gedrosselt. Bei dieser Expansion erwärmt sich das Gas um 7 Kelvin und ist somit vollkommen in der Norm für unsere Geräte in der Regelstrecke. Als Ergebnis der Rohrleitungsberechnung konnte bei einem maximalen Durchfluss von 200 Nm³/h ein Mindestdurchmesser von 16,15 mm berechnet werden. Somit ist die 1 Zoll Leitung, welche von der Firma Linde vorgeschlagen und installiert wurde, passend für unsere und für zukünftige Zwecke.

Das Ergebnis für die adaptierte und angepasste Bilanz ist das fertige Excel-Worksheet. Hierdurch kann überschlagsmäßig im Blatt „Übersicht“ jede beliebige Temperatur, λ , Menge Staub, Carry Over, das Erdgasvolumen und die passende prozentuale Wasserstoffmenge eingegeben und somit die Brenngasmenge berechnet werden. Nachdem alle grünen Felder vom Operator ausgefüllt worden sind, kann dieser von den orangen Feldern die wichtigsten Daten, wie das Volumen von Erdgas, Wasserstoff, Sauerstoff und die Kühlwassermenge ablesen. Diese Daten sind wichtig für den Betrieb und die Versuche mit dem Flash-Reaktor.

5.2 Fertige Anlage für die Kältinbetriebnahme

Ein weiteres Ergebnis dieser Masterarbeit ist die für die Kältinbetriebnahme fertige Wasserstoffregelstrecke sowie alle dazugehörigen Teilprojekte und Teilanlagen. Da ein Teil dieser Masterarbeit daraus bestand, die komplette Kommunikation und die Ausschreibungen beziehungsweise die Angebotseinholungen der einzelnen Projektteile zu koordinieren sowie diese auch zu überwachen, werden hier nochmal alle „Teilprojekte“ angeführt.

- Kommunikation mit Baubehörden und internen Stellen bei der Montanuniversität und der Bundes Immobilien Gesellschaft (BIG)
- Fundament und Absperrzaun rund um das Gasflaschenlager (von Baufirma Majcen GmbH)
- F90 Feuerfestgasflaschenlager (von Denios SE)
- Rohrleitung und Wasserstoffregelstrecke (von Linde GmbH)
- Statischer Mischer (von Metallbau Anlagenservice Leitungsbau GmbH - M.A.L.)

Schlussendlich steht eine fertige Wasserstoffregelstrecke mit Wasserstoffflaschenlager am Standort der Montanuniversität und ist für den Betrieb bereit.

5.3 HAZOP-Studys

Die Ergebnisse der Start-HAZOP-Study und der abschließenden HAZOP-Study werden nun kurz zusammengefasst und verglichen. Bei beiden HAZOP-Studys wurden dieselben Teilsysteme Gasflaschenlager, Rohrleitungsweg, Regelstrecke und Gasmischung untersucht. Ebenfalls wurden bei drei dieser vier Teilsysteme dieselben Parameter verwendet, nur im Teilsystem Gasmischung kamen zwei neue Parameter hinzu. Die Leitworte zu den jeweiligen Parametern und Teilsystemen unterscheiden sich minimal.

5.3.1 Teilsystem Gasflaschenlager

Beim Teilsystem Gasflaschenlager wurden beide Male die Parameter Druck, Temperatur und Füllmenge ausgewählt. Die Auswertung des Parameters Druck, siehe Tabelle 15, konnte keine wesentlichen Unterschiede darlegen. Lediglich konnten mehr Inputs für mögliche Gegenmaßnahmen eruiert werden.

Tabelle 15: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Gasflaschenlager"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--|---|
| Parameter | DRUCK | DRUCK |
| Leitworte | kein, mehr, weniger, sowohl als auch | nein, nicht, mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | falsche Befüllung und Leckage | falsche Befüllung, Leckage und Temperaturerhöhung |
| mögliche Folgen | keine Versuche möglich, Explosions-, Berstgefahr | kein oder zu viel Druck, keine Versuche möglich |
| mögliche Maßnahmen | Kontrolle bei Anlieferung | Kontrolle vor/während jedem Versuch |

Als nächstes wird in Tabelle 16 der Parameter Temperatur beim Teilsystem Gasflaschenlager beleuchtet.

Tabelle 16: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Gasflaschenlager"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|---|
| Parameter | TEMPERATUR | TEMPERATUR |
| Leitworte | kein, mehr | mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | Messgerät kaputt, Sonneneinstrahlung | Brand, zu niedrige Temperaturen |
| mögliche Folgen | keine Datenaufnahme, hohe Temperatur bei Leckage relevant | zu hoher Druck, Leckage durch spröde Dichtungen |
| mögliche Maßnahmen | Gerät regelmäßig warten, gut belüften | Feuerwehr verständigen, regelmäßige Dichtheitsprüfungen, |

Hierbei fällt auf, dass bei der abschließenden HAZOP-Study viel praxisorientierter gedacht wurde. Durch das Denios Gasflaschenlager, welches ein Dach hat, kann durch Sonneneinstrahlung keine Gasflasche eine so überhöhte Temperatur bekommen, dass es gefährlich werden kann. Bei der abschließenden HAZOP-Study wurde somit die Sonneneinstrahlung nicht mehr aufgegriffen. Ein weiteres Ergebnis der zweiten HAZOP-Study weist auf, dass niedrige Temperaturen zwar nicht für das Gasflaschenlager schlecht sind, jedoch für die Dichtungen, da diese spröde werden können.

Der dritte Parameter des Teilsystems Gasflaschenlager und die Ergebnisse der beiden HAZOP-Studys wurden in Tabelle 17 aufgelistet.

Tabelle 17: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Füllmenge beim Teilsystem "Gasflaschenlager"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|--|
| Parameter | FÜLLMENGE | FÜLLMENGE |
| Leitworte | kein, mehr, weniger | nein, nicht, weniger |
| mögliche Ursachen | falsche Befüllung, Leckage | Leckage, Flasche leer |
| mögliche Folgen | Flaschendruck über Berstdruck, keine Versuche möglich | Flasche leer, kein Druck |
| mögliche Maßnahmen | Kontrolle bei Anlieferung | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen |

Hier wird sichtbar, dass ebenfalls wenig bis gar keine Unterschiede in den einzelnen Studien auftreten. Bei den möglichen Maßnahmen wurde zusätzlich entschieden, die Flaschen bei der Anlieferung und vor jedem Versuch zu prüfen.

5.3.2 Teilsystem Rohrleitung

Bei den nächsten Vergleichen der beiden HAZOP-Studys beim Teilsystem Rohrleitung wurden die vier Parameter Druck, Temperatur, Durchflussmenge und Druckverlust untersucht.

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der beiden HAZOPs vom Parameter Druck für das Teilsystem Rohrleitung dargestellt. Dabei sind keine nennenswerten Unterscheidungen festzustellen.

Tabelle 18: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Rohrleitung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|---|
| Parameter | DRUCK | DRUCK |
| Leitworte | mehr, teilweise | nein, nicht, mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | Druckregler versagt, Regelventile funktionieren nicht ordnungsgemäß | Druckregler kaputt, Kugelhahn zu, Flasche leer oder zu wenig befüllt |
| mögliche Folgen | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck, keine geeignete Datenaufzeichnung | kein Durchfluss somit keine Versuche, zu hoher Druck |
| mögliche Maßnahmen | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung, Redundante Regelventile | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch, Druckaufnehmer bei Abblaseleitung für Magnetventil, regelmäßige Wartung |

Durch Tabelle 19 wird der Parameter Temperatur beleuchtet. Speziell hierbei kann man feststellen, dass durch fortschreitenden Projektverlauf genauere Angaben zur Beschaffenheit der Rohrleitung gemacht und somit bessere Ergebnisse erzielt werden konnten.

Tabelle 19: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Rohrleitung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|------------------------------------|--|
| Parameter | TEMPERATUR | TEMPERATUR |
| Leitworte | mehr | mehr |
| mögliche Ursachen | zu hohe Temperatur in Barbarahalle | Brandfall |
| mögliche Folgen | Festigkeit der Rohre beachten | Leitungen sind gelötet, könnten bei hohen Temperaturen aufgehen |
| mögliche Maßnahmen | auf Belüftung der Halle achten | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn, welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |

Beim Vergleich vom Parameter Durchflussmenge für das Teilsystem Rohrleitung in der Tabelle 20 kann man ein ähnliches Muster wie im Vergleich der Temperatur sehen. Hier wird deutlich, dass durch mehr Erkenntnisse und einem fortgeschrittenen bzw. fertigen Projekt mehr Inputs und Wissen vorhanden ist, um genauere Aussagen über Gefahren treffen zu können.

Tabelle 20: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Rohrleitung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--|---|
| Parameter | DURCHFLUSSMENGE | DURCHFLUSSMENGE |
| Leitworte | kein | nein, nicht, mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | Regelventile funktionieren nicht ordnungsgemäß | Leckage, Flasche leer, Ventil geschlossen, Mass-Flow Controller defekt, Beschädigung der Rohrleitung |
| mögliche Folgen | keine Versuche möglich | Flasche leer, kein Druck, mehr Durchfluss somit H ₂ im Abgas, zu geringer Durchfluss, Versuch evtl. nicht möglich |
| mögliche Maßnahmen | Bypassventil einbauen | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen, Operator Kontrolle Soll- und Istwert, Magnetventil schließt automatisch, Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |

Beim letzten Parameter des Teilsystems Rohrleitung handelt es sich um den Parameter Druckverlust. In Tabelle 21 finden sich die Ergebnisse dazu. Hier ist zu sehen, dass vor der Durchführung der zweiten Studie beim Druckverlust eine Leckage angenommen wurde, jedoch wurde bei der abschließenden HAZOP-Study von einer Beschädigung der Rohrleitung ausgegangen. Somit sind auch die Folgen und die Maßnahmen unterschiedlich.

Tabelle 21: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Rohrleitung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|---|
| Parameter | DRUCKVERLUST | DRUCKVERLUST |
| Leitworte | mehr | mehr |
| mögliche Ursachen | Leckage | Beschädigung der Rohrleitung |
| mögliche Folgen | weniger H ₂ , Versuchsdurchführung nicht richtig | Senkung des max. Durchflusses |
| mögliche Maßnahmen | regelmäßige Druckmesseinheiten | (optische) Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |

5.3.3 Teilsystem Regelstrecke

Das dritte Teilsystem ist die Regelstrecke. Diese kann im Grunde gleich wie die Rohrleitung behandelt werden, da es sich hierbei nur um eine Rohrleitung mit diversen eingebauten Elementen handelt. Somit sind auch die Parameter dieselben wie bei der Rohrleitung.

In Tabelle 22 wird der erste Parameter Druck verglichen. Hier sieht man, dass bei der Start-HAZOP-Studie noch an redundante Sicherheitsventile gedacht wurde. Jedoch wurde das aufgrund der Kosten und der nicht gegebenen Notwendigkeit bei der Planung verworfen.

Tabelle 22: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Regelstrecke"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|---|
| Parameter | DRUCK | DRUCK |
| Leitworte | mehr, weniger, teilweise | nein, nicht, mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | Druckregler versagt | Kugelhahn zu, Flasche leer, Leckage, Druckregler defekt |
| mögliche Folgen | Regeleinrichtungen werden kaputt, Versuch muss wiederholt werden, Geräte funktionieren nicht mehr ordnungsgemäß | kein/zu wenig Durchfluss → keine Versuche, Abblaseleitung öffnet |
| mögliche Maßnahmen | Sicherheitsventile, redundante Regelventile | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch, Operator beendet Versuch mit Schließen des Kugelhahns |

In Tabelle 23 haben sich genau dieselben Ergebnisse wie bei der Rohrleitung ergeben. Ebenfalls sind bei fortgeschrittenem Projektverlauf bessere Ergebnisse und genauere Aussagen entstanden.

Tabelle 23: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Regelstrecke"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--|--|
| Parameter | TEMPERATUR | TEMPERATUR |
| Leitworte | mehr | mehr |
| mögliche Ursachen | zu hohe Temperaturen in der Barbarahalle | Brandfall |
| mögliche Folgen | Massflow-Regler wird kaputt | Leitungen sind gelötet, könnten bei hohen Temperaturen aufgehen |
| mögliche Maßnahmen | stromlos geschlossene Magnetventile | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn, welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |

Bei den Ergebnissen in Tabelle 24 ist gut zu sehen, dass bei zwei HAZOP-Studys zwei unterschiedliche Ergebnisse herauskommen können. Hier ist es sinnvoll, beide HAZOP-Studys heranzuziehen, um dadurch bessere Maßnahmen für die Sicherheit setzen zu können. Die zusätzlichen Elemente, welche in der Start-HAZOP-Study erwähnt wurden, wurden aufgrund der zusätzlichen Kosten nicht in die Anlage eingebaut.

Tabelle 24: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Regelstrecke"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--|---|
| Parameter | DURCHFLUSSMENGE | DURCHFLUSSMENGE |
| Leitworte | mehr, weniger, teilweise, nicht, Umkehrung | nein, nicht, mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | mind. 3 Regelventile versagen gleichzeitig, Regelventil funktioniert nicht ordnungsgemäß | Leckage, Flasche leer, Ventil geschlossen, Mass-Flow Controller defekt, Beschädigung der Regelstrecke, Zu wenig Vordruck für Mass Flow Controller |
| mögliche Folgen | überstöchiometrische Menge in Reaktor, Versuch muss wiederholt werden | Flasche leer, kein Druck, mehr Durchfluss somit H ₂ im Abgas, zu geringer Durchfluss, Versuch evtl. nicht möglich |
| mögliche Maßnahmen | zusätzliche Sicherheitsventile, redundante Regelventile | Flaschendruck vor Versuch und bei Anlieferung prüfen, Kugelhähne kontrollieren, Operator Kontrolle Soll- und Istwert, Magnetventil schließt automatisch (stromlos geschlossen) Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |

Beim Druckverlust in Tabelle 25 ist ein ähnliches Ergebnis wie schon bei der Rohrleitung bei diesem Parameter ersichtlich. Hier wurde ebenso von einer Leckage auf eine Beschädigung umgeschwenkt und so die HAZOP-Study erstellt.

Tabelle 25: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Regelstrecke"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|---|
| Parameter | DRUCKVERLUST | DRUCKVERLUST |
| Leitworte | mehr | mehr |
| mögliche Ursachen | Leckage | Beschädigung der Regelstrecke |
| mögliche Folgen | weniger H ₂ , Versuchsdurchführung nicht richtig | Senkung des max. Durchflusses |
| mögliche Maßnahmen | regelmäßige Druckmesseinheiten | (optische) Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch, H ₂ Wächter/Detektor |

5.3.4 Teilsystem Gasmischung

Beim Teilsystem Gasmischung wurden die größten Unterschiede beim Erstellen der beiden HAZOP-Studys festgestellt. Grund dafür ist, das Start-HAZOP-Study Team nur den Druck und die Temperatur für notwendige Parameter erachtet hat. Bei der abschließenden HAZOP-Study wurde noch Durchflussmenge und Druckverlust als wesentliche Parameter hinzugenommen. Wahrscheinlich liegt dies daran, dass bei der zweiten HAZOP-Study das Teilsystem Gasmischung genauer definiert war.

In Tabelle 26, beim Parameter Druck im Teilsystem Gasmischung sind keine wesentlichen Unterschiede zu finden. Die Maßnahme, ein Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung zu bauen, wurde bei der Start-HAZOP-Study vorgeschlagen. Im laufenden Projekt wurde dieses dann eingebaut und somit wurde sie bei der abschließenden HAZOP-Study mitberücksichtigt.

Tabelle 26: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Gasmischung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--|--|
| Parameter | DRUCK | DRUCK |
| Leitworte | mehr, teilweise, anders als | nein, nicht, weniger |
| mögliche Ursachen | Druckregler versagt | Druckregler kaputt, Kugelhahn zu, Flasche leer |
| mögliche Folgen | zu hoher, nicht kontrollierbarer Druck | kein Durchfluss → keine Versuche möglich |
| mögliche Maßnahmen | Abblaseventil als Sicherheitseinrichtung | Kontrolle der Anlage vor jedem Versuch |

In Tabelle 27 lassen sich ebenfalls keine Differenzen aufzeigen. Das Wesentliche war wieder, dass mit fortschreitender Projektdauer mehr Wissen über die Anlage und somit mehr sicherheitstechnisches Know-How bei den HAZOP-Study Mitgliedern vorhanden war.

Tabelle 27: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Gasmischung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|---|--|
| Parameter | TEMPERATUR | TEMPERATUR |
| Leitworte | mehr | mehr |
| mögliche Ursachen | zu hohe Temperaturen in der Barbarahalle | Brandfall |
| mögliche Folgen | Festigkeit des statischen Mischers beachten | statischer Mischer ist geschweißt |
| mögliche Maßnahmen | auf Belüftung der Barbarahalle achten | Brandschutzkonzept Montanuniversität und Brandmelder Barbarahalle, Gasbündel abdrehen (Kugelhahn, welcher bei Brandfall relevant ist) Druckknopfmelder betätigen |

Bei Tabelle 28 ist der erste neue Parameter, die Durchflussmenge bei der abschließenden HAZOP-Study hinzugekommen. Dies ist dem besseren Verständnis der Anlage und der Sicherheitstechnik zuzuschreiben.

Tabelle 28: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Gasmischung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--------------------------|--|
| Parameter | DURCHFLUSSMENGE | DURCHFLUSSMENGE |
| Leitworte | - | mehr, weniger |
| mögliche Ursachen | - | Mass-Flow Controller defekt, Fehler in Gasregelstrecke |
| mögliche Folgen | - | höherer Druckverlust, volle laminare Strömung im statischen Mischer → keine vollständige Mischung, jedoch danach in Schlauch bzw. im Brenner |
| mögliche Maßnahmen | - | Durchflussmenge anpassen, um optimale Mischung in statischem Mischer zu erhalten |

In Tabelle 29 ist der Druckverlust als neuer Parameter hinzugekommen. Bei diesem Parameter gibt es gleich wie zuvor, keine Vergleichsergebnisse aus der Start-HAZOP-Study.

Tabelle 29: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Gasmischung"

| | Start-HAZOP-Study | Abschließende HAZOP-Study |
|---------------------------|--------------------------|--|
| Parameter | DRUCKVERLUST | DRUCKVERLUST |
| Leitworte | - | mehr |
| mögliche Ursachen | - | Beschädigung/Verschmutzung des statischen Mischers |
| mögliche Folgen | - | geringerer maximaler Durchfluss |
| mögliche Maßnahmen | - | überprüfen der Anlage und evtl. reinigen |

Die beiden HAZOP-Studys und davon ausgewählte Ergebnisse werden im Kapitel 6 analysiert und interpretiert.

5.4 Störfallszenarien

Als Ergebnis der ausgearbeiteten Störfallszenarien kann das Kapitel 4.6 Störabschaltungen der Anlage herangezogen werden. In diesem Kapitel wird bei den möglichen Störfallszenarien:

- Prozesshalt der Anlage
- Ausfall von Betriebswasserpumpe 02-P1
- Stromausfall der Anlage
- NOT-Aus der Anlage

die automatische Störabschaltung für die neuen Elemente der Wasserstoffregelstrecke beschrieben. Sehr wichtig dabei war es, ein stromlos geschlossenes Magnetventil von der Firma Linde verbauen zu lassen, da dadurch die Sicherheit der Anlage am besten gewährleistet werden kann. Die Störabschaltungen wurden dem Automatisierungstechniker übergeben, um diese in die schon bestehenden Störabschaltungen mit einzubetten. Durch diese automatischen Abschaltungen kann sichergestellt werden, dass bei einer Störung der Anlage der Zustand im Inneren der Anlage niemals einen kritischen Bereich erreicht. Damit werden die Barbarahalle und alle Personen in und um die Halle einem wesentlich geringeren Risiko ausgesetzt, als wenn diese Störabschaltungen nicht vorhanden wären.

6 Diskussion und Interpretation

Der Wasserstoff fließt bei der aufgestellten Anlage von dem Wasserstoffflaschenlager über die Rohrleitung, über die Regelstrecke bis hin zur Gasmischung und dann in den Flash-Reaktor. Beim Entspannen von Wasserstoff, vom Wasserstoffbündel über ein Ventil in die Rohrleitung, von 200 bar auf 12 bar tritt eine Erwärmung des Wasserstoffgases aufgrund des Joule-Thomson-Effektes um 113 Kelvin auf. Durch die lange ungedämmte Rohrleitung im Freien und die gute Temperaturleitfähigkeit von Kupfer, aus welchem die Rohrleitungen bestehen, kann man davon ausgehen, dass viel von dieser Expansionswärme abgeführt werden kann. Wichtig ist jedoch trotzdem, dass der Operator die Rohrleitung während der Versuche kennzeichnet, um außenstehende Personen vor Berühren der eventuell heißen Rohrleitungsteile zu schützen. Ebenso wird in der Regelstrecke das Wasserstoffgas von 12 bar auf 1 bar heruntergedrosselt, dabei tritt nur eine minimale Erwärmung von 7 Kelvin auf. Genau diese Aussagen wurde uns auch von der Firma Linde bei unserem Erstgespräch für die Anlage versichert. Somit konnte diese sicherheitstechnische Frage doppelt abgeklärt und bestätigt werden. Ebenfalls wurde die Rohrleitungsberechnung für die aufgestellte Anlage plausibilisiert. Der Sicherheitsfaktor von $S \approx 1,48$ kann baulich vertreten werden, um die Menge Wasserstoff, welche in späterer Folge gebraucht wird, durch die Rohrleitung transportieren zu können.

Bei der neu erstellten und adaptierten Flash-Reaktor Bilanz, welche als überschlagsmäßige Bilanz für Versuche mit einem Methan/Wasserstoff Gemisch dienen soll, gibt es Unstimmigkeiten. Die Berechnung konnte durchgeführt werden, jedoch sind die Verbrennungsenergien, welche der Energie- und schlussendlich Volumenberechnung dienen, diskussionswürdig. In der Abbildung 33 ist die übernommene Berechnung der Verbrennungsenergie von Methan und Sauerstoff zu sehen. Hier ist im unteren Bereich, ein Heizwert von Methan von 802,6 kJ/mol zu erkennen. Die Verbrennungsenergie bei einem λ von 0,7 und einer Temperatur von 1700 °C ist unten links zu sehen. Diese beträgt 288 kJ/mol. Das entspricht einer Heizwertverringerung von fast zwei Drittel und somit erscheint dieses Ergebnis plausibel. Ebenso sinkt die Verbrennungsenergie mit steigender Temperatur, was durch das exotherme Verhalten von Methan bei der Verbrennung zu erklären ist.

| Verbrennungs- Energie von CH ₄ und O ₂ abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|---|-------|--------|-------|----------|-------|-----------|--------------|
| [kJ/mol] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 313,9 | 299,9 | 285,9 | 271,8 | 257,6 | -0,141 | 525 |
| 0,75 | 361,2 | 346,9 | 332,5 | 318,0 | 303,4 | -0,145 | 578 |
| 0,8 | 408,8 | 394,1 | 379,3 | 364,4 | 349,4 | -0,148 | 631 |
| 0,85 | 456,6 | 441,6 | 426,5 | 411,2 | 395,8 | -0,152 | 685 |
| 0,9 | 504,7 | 489,4 | 473,9 | 458,2 | 442,3 | -0,156 | 739 |
| 0,95 | 553,1 | 537,4 | 521,6 | 505,4 | 488,2 | -0,162 | 797 |
| 1 | 599,9 | 582,2 | 563,3 | 542,6 | 519,7 | -0,201 | 901 |
| lx | 953 | 941 | 925 | 903 | 874 | | |
| L0 | -353 | -359 | -361 | -360 | -354 | | |
| | | | | | | Heizwert= | 802,6 kJ/mol |
| H(T,L)= a +b*T + c*L | | | a | -101,145 | | | |
| | | | b | -0,152 | | | |
| | 288 | kJ/mol | c | 924,6 | | | |

Abbildung 33: Verbrennungsenergie von CH₄ und O₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

Bei der durchgeführten Berechnung für die Verbrennungsenergie von Wasserstoff mit Sauerstoff ist ein anderes Schema zu erkennen. Auch wenn die Verbrennungsenergie mit steigender Temperatur ebenfalls absinkt, ist hier der Wert der Verringerung im 1-stelligen Bereich und somit viel geringer ausgeprägt. Beim Abfall des Heizwertes von 242,15 kJ/mol auf 238,5 kJ/mol (bei 1700 °C und $\lambda = 0,7$) ist ebenfalls ein komplett anderes Muster zu erkennen.

| Verbrennungs- Energie von H ₂ und O ₂ abhängig von Temperatur und Lambda | | | | | | | |
|--|-----------|--------|-------|-------------|-------|-----------|-----------------|
| [kJ/mol] | | | | | | | |
| | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | tx | T0 |
| 0,7 | 239,4 | 239,0 | 238,6 | 238,1 | 237,6 | -0,005 | 246 |
| 0,75 | 239,3 | 238,8 | 238,4 | 237,9 | 237,4 | -0,005 | 247 |
| 0,8 | 239,1 | 238,7 | 238,2 | 237,6 | 237,1 | -0,005 | 247 |
| 0,85 | 239,0 | 238,5 | 238,2 | 237,4 | 236,8 | -0,005 | 247 |
| 0,9 | 238,8 | 238,3 | 237,8 | 237,2 | 236,6 | -0,006 | 248 |
| 0,95 | 238,7 | 238,2 | 237,6 | 237,0 | 236,4 | -0,006 | 248 |
| 1 | 238,6 | 238,0 | 237,4 | 236,8 | 236,1 | -0,006 | 248 |
| lx | -3 | -3 | -4 | -4 | -5 | | |
| L0 | 241 | 241 | 241 | 241 | 241 | | |
| | | | | | | Heizwert= | 242,1576 kJ/mol |
| H(T,L)= a +b*T + c*L | | | a | 250,5087041 | | | |
| | | | b | -0,005 | | | |
| | 238,51491 | kJ/mol | c | -3,8 | | | |

Abbildung 34: Verbrennungsenergie von H₂ und O₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ

Es sind keine Bestätigungen, aber auch keine Beweise für einen Fehler in den Berechnungen gefunden worden, somit muss diese Variable Bilanz bei den ersten Versuchen mittels Methan/Wasserstoff-Gemisch verifiziert und gegebenenfalls ausgebessert werden. Die

Annahme, dass in den Berechnungen ein Fehler aufgetreten ist, begründet sich auf den Vergleich der beiden Verbrennungsenergien (von Methan und Wasserstoff), aber auch auf der Literaturrecherche. Denn wie in Kapitel 2.2 erläutert, hat Methan einen 3,3 Mal höheren Heizwert als Wasserstoff, somit deckt sich dieses Ergebnis nicht mit unserem berechneten Ergebnis von 288 kJ/mol Methan zu 238 kJ/mol Wasserstoff bei 1700 °C und einem λ von 0,7.

Beim Aufstellen, Planen und Organisieren der gesamten Anlage war die Kommunikation besonders wichtig. Auch hier hätten kleine Schwierigkeiten, wie ein vergessenes Magnetventil, welches dann nachbestellt werden musste, vermieden werden können. Schlussendlich konnten aber alle Details und Planungen wie gewünscht durchgeführt werden. Eine fertige Wasserstoffregelstrecke mit Wasserstoffflaschenlager am Standort der Barbarahalle ist nun bereit, auf Dauer in Betrieb genommen zu werden.

Die Ergebnisse der HAZOP-Studys rund um die einzelnen Teilsysteme werden jetzt diskutiert und die vorgeschlagenen Maßnahmen interpretiert.

Bei den Maßnahmen, welche für das **Teilsystem „Gasflaschenlager“** erstellt wurden, sticht die Kontrolle bei der Anlieferung der Wasserstoff-Gasflaschen und die Kontrolle dieser vor jedem Versuch hervor. Ebenso müssen regelmäßige Dichtheitsprüfungen durchgeführt werden, da das Gasflaschenlager im Freien steht und dadurch spröde Dichtungen oder sonstige Fehler bei der Dichtheit auftreten können. Auch auf die Temperaturerhöhung durch die Drosselung des Wasserstoffs muss geachtet werden. Hier müssen regelmäßig die Armaturen und Rohre kontrolliert werden. Generell fällt auf, dass bei der abschließenden HAZOP-Study viel praxisorientierter gedacht werden konnte. Bei den Ergebnissen des **Teilsystems „Rohrleitung“** ist festzuhalten, dass ein Rundgang unbedingt durchgeführt werden muss, denn Beschädigungen würden nicht an der zur Verfügung stehenden Datenaufzeichnung auffallen. Ebenso ist es wichtig, die einzelnen Elemente wie Kugelhähne oder Ventile, händisch und optisch zu überprüfen. Der zuständige Operator sollte zusätzlich noch die Ist- und Soll-Werte während des Versuchs im Auge behalten. Dadurch können etwaige Fehler so schnell wie möglich erkannt und bei Bedarf behoben werden. Beim **Teilsystem „Regelstrecke“** wurden bei der Start-HAZOP-Study einige zusätzliche Armaturen und Geräte vorgeschlagen. Jedoch ist während der Planungsphase klar geworden, dass keine redundanten Systeme notwendig sind und man sich somit Kosten für die Anlage sparen kann. Neben den Kosten war ein weiterer Grund die geringe Anzahl an Versuchen, welche mit dem Flash-Reaktor durchgeführt werden. Ebenso wie bei den anderen Teilsystemen, muss eine optische Kontrolle der Regelstrecke vor und während jedes Versuchs vom Operator durchgeführt werden. Besonders hier bei der Regelstrecke sind die Geräte regelmäßig auf ihre ordnungsgemäße Funktionalität zu überprüfen. Die Parameter beim **Teilsystem**

„**Gasmischung**“ unterscheiden sich von der ersten zur zweiten HAZOP-Study. Das ist auf das bessere Verständnis der Funktion des statischen Mischers und seine Bauweise zurückzuführen. Durch die Start-HAZOP-Study wurde man bei diesem Teilsystem auf die Abblaseleitung für die Anlage aufmerksam. Diese wurde auch wie in der Studie besprochen bei der Firma Linde angefordert und verwirklicht, um die Sicherheit der Anlage gewährleisten zu können. Ebenso wurden bei der Gasmischung deren eventuelle Beschädigung und Verschmutzung thematisiert, wobei beide Punkte durch regelmäßige Wartung, Reinigung und einer Kontrolle vor jedem Versuch nahezu ausgeschlossen werden können.

Durch das Zusammenspiel einer bestehenden Anlage wie dem Flash-Reaktor mit seiner bestehender Methan- und Sauerstoff-Regelstrecke und einer völlig neuen Regelstrecke, welche auf Wasserstoff ausgelegt ist, war das Durchführen einer HAZOP-Study sehr wichtig und lehrreich. Die handelnden Personen haben Erfahrung im Betrieb des Flash-Reaktors und wissen, was im Zusammenhang mit diesem wichtig ist. Dadurch wurde auch die HAZOP-Study rund um die Wasserstoffzuleitung einfacher und besser in der Durchführung. Sehr schnell war klar was wichtig ist, wieso diese HAZOP-Studys gemacht werden sollten. Infolgedessen waren die Ergebnisse, sowie die Mitarbeit der einzelnen Personen bei diesen zwei Studien, vollkommen zufriedenstellend.

Bei den Betriebsarten und den Störabschaltungen orientierte man sich an den bestehenden Betriebsarten und Störabschaltungen in der Funktionsbeschreibung. Hierbei wurden nur die zusätzlichen Funktionen, welche durch die neue Wasserstoffregelstrecke hinzukommen, erläutert. Die Störabschaltungen wurden ebenfalls ähnlich den bestehenden erstellt. Zusätzlich wurden Punkte der HAZOP-Study aufgegriffen und wenn notwendig, wurden diese in die Störabschaltungen integriert.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Schon aus der Literaturrecherche ist zu sehen, dass bei 75% Volumenanteil Wasserstoff im Gemisch, nur 50% des Energieinhaltes auf Wasserstoff zurückzuführen sind. 50% des Energieinhaltes sind somit gleichbedeutend mit 50% CO₂ Reduktion, da 50% des Methans durch Wasserstoff ersetzt wurden. Somit kann man schlussfolgern, dass sich erst mit einem nahezu 100%igen Wasserstoffbetrieb eine wesentliche Reduktion der CO₂ Emissionen bei Versuchen mit dem Flash-Reaktor erzielen lässt. Die Versuche mit verschiedenen Mischungen von Methan und Wasserstoff sind somit wichtig und notwendig für das Verständnis und die Funktionsweise des Brenners und des Flash-Reaktors. Denn mit großer Wahrscheinlichkeit muss an diesen Elementen für einen 100%igen Wasserstoffbetrieb noch geforscht und infolgedessen etwas adaptiert werden. Das alles sind notwendige Vorarbeiten, um das schlussendliche Ziel, den 100%igen Wasserstoffbetrieb und damit eine signifikante CO₂ Reduktion, erreichen zu können.

Bevor die Anlage erbaut wurde, musste das Angebot und auch die Berechnungen der Ingenieursfirma plausibilisiert werden. Durch die durchgeführten Berechnungen für die Expansionstemperatur und den Rohrleitungsdurchmesser konnten die Aussagen der Projektpartner Firma Linde und deren Behauptungen bestätigt werden. Somit ist die Anlage laut den Berechnungen baulich richtig und sicherheitstechnisch unbedenklich ausgeführt worden.

Die Berechnung rund um die neu adaptierte Flash-Reaktor Bilanz muss mit den ersten Versuchen bei denen ein Methan/Wasserstoff Gemisch verwendet wird, verifiziert und gegebenenfalls ausgebessert werden. Durch Versuche wird aber in weiterer Folge schnell klar, ob die Berechnungen dieser Masterarbeit stimmen. Denn wenn zu viel Brenngas und zu wenig Luft im Reaktor vorhanden sind, sinkt die Temperatur, das Brenngas wird nicht vollständig verbrannt und wird im Abgasstrom detektiert. Wenn zu wenig Brenngas und zu viel Luft im Reaktor vorhanden sind, kann nur ein Bruchteil des Zinkstaubes verdampft werden und auch das fällt bei der Durchführung der Versuche auf. Somit kann man herausfinden, ob man die Berechnungen für die Verbrennungsenergien von Wasserstoff bei den hohen Temperaturen und den gegebenen λ wiederholen muss.

Es ist ebenfalls möglich, dass bei diesen Bedingungen der Heizwert von Methan und Wasserstoff genau wie berechnet ausfällt und somit die Berechnungen richtig sind. Das

Positive daran ist, dass Wasserstoff bei hohen Temperaturen nur einen geringen Heizwertunterschied zu Methan aufweist als bei Normalbedingungen und somit die Verbrennung von Wasserstoff bei diesen Temperaturen energetisch effizienter ist.

Beim Aufstellen, Planen und Organisieren der gesamten Anlage war die Kommunikation besonders wichtig. Auch hier hätten, wie zuvor erwähnt, kleine Schwierigkeiten durch bessere und klarere Kommunikation vermieden werden können. Schlussendlich konnten aber alle Details und Planungen wie gewünscht durchgeführt und eine betriebsbereite Anlage am Standort der Barbarahalle aufgestellt werden.

Für ein Projekt wie dieses waren zwei HAZOP-Studys perfekt. Bei der Start-HAZOP-Study wurde durch die gründliche Vorbereitungszeit ein guter Überblick über das anstehende Projekt aufgebaut. Die Projektverantwortlichen konnten gute Inputs für die Gespräche mit der Ingenieursfirma aufgreifen und dadurch direkt im Angebot und bei der Umsetzung einfließen lassen. Durch diese anfängliche HAZOP-Study konnten auch sicherheitstechnische Fragestellungen geklärt und somit besser damit umgegangen werden. Auch der Standort des Gasflaschenlagers wurde durch die Start-HAZOP-Study festgelegt.

Die abschließende HAZOP-Study war viel praxisorientierter angelegt. Das liegt daran, dass große Teile der Anlage schon aufgebaut und installiert waren. Dadurch konnte man sich besser auf die sicherheitstechnischen Ursachen, Folgen und anschließenden Maßnahmen konzentrieren. Durch die ausgearbeiteten Statements der beiden HAZOP Studys konnte ein umfangreicher Katalog an Maßnahmen für Versuche mit Methan/Wasserstoff Gemischen aufgestellt werden. Durch die gesetzten Maßnahmen vor und nach der Aufstellung der Anlage ist das System und die Anlage bereit für einen sicherheitstechnisch unbedenklichen Betrieb. Da bei den beiden HAZOP-Studys keine Sicherheitsmängel an der Anlage aufgetreten sind, glauben wir, das Projektteam, die gesamte Anlage, von der Ex-Schutz-Zone beim Gasflaschenlager, über die Rohrleitung und die Regelstrecke bis hin zur Gasmischung und zum Eintritt des Brenngases in den Reaktor, sicher betreiben zu können.

Ebenso wurden die Störfallszenarien ausgearbeitet und dem Automatisierungstechniker übergeben. Dieser hat diese ebenfalls kontrolliert und den bestehenden Schrittketten angepasst bzw. zu diesen hinzugefügt. Somit steht einem sicheren Betrieb der Anlage nichts mehr im Weg.

Nach Abschluss dieses erfolgreichen Projektes werden Versuche mit Methan/Wasserstoff-Gemischen durchgeführt. Die Warminbetriebnahme und die ersten Versuche mit einem Methan/Wasserstoff-Gemisch werden am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bereits geplant und ehestmöglich durchgeführt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] J. Antrekowitsch, „Aufarbeitung komplexer schwermetallhaltiger Reststoffe aus der Metallurgie,“ Habilitation, Leoben, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2009.
- [2] A. Edlinger, „RecoDust-Verfahren - Pyrometallurgische Raffination von Stahlwerksrückständen,“ 2nd Meeting of the IISI-Project on By Product Management, Duisburg, 2007.
- [3] A. Schönberg, „Verfahrenstechnische Auslegung einer Flash-Reaktor Pilotanlage zum Einschmelzen schwermetallbelasteter Stäube,“ Diplomarbeit, Lehrstuhl für Thermoprosesstechnik, Montanuniversität Leoben, Graz, 2011.
- [4] B. Meier, „Heiz- und Brennwerte,“ Institut für Energietechnik, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Rapperswil, Schweiz, 2014.
- [5] S. Leoben, „Erdgasparameter 2016,“ Stadtgemeinde Leoben, Leoben, 2016.
- [6] J. K. J. v. W. Bernhard Weigand, Thermodynamik Kompakt, 3. aktualisierte Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [7] C. Skalla, „Gemischbildung und Verbrennung von Wasserstoff/Methan-Gemischen in Pkw-Anwendungen,“ Technische Universität Graz , Graz, 2011.
- [8] D. C. S. Dr. W. Bidlingmaier, „orbit-online.net,“ 5 August 2017. [Online]. Available: <https://www.orbit-online.net/index.php/formula/verbrennung>. [Zugriff am 11 Jänner 2023].
- [9] M. H. P. u. E. Muschelknautz, „Einsatz und Auslegung statischer Mischer,“ D-6940 Weinheim, Verlag Chemie GmbH, 1979, pp. 347 - 364.
- [10] E. A. T. T. A. K. H. Volkmar Schröder, „Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2539,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich „Gase, Gasanlagen“, Berlin, 2016.
- [11] CHEMSAFE, „Datenbank für empfohlene sicherheitstechnische Kenngrößen,“ DECHEMA, BAM und PTB, Inhouse-Version 2014, 2014.

- [12] B. T. Frank Crawley, HAZOP: Guide to Best Practice, Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries, Third Edition, Amsterdam, Oxford, Waltham: Elsevier, 2015.
- [13] J. D. P. J. K. Peter Atkins, Atkins' Physical Chemistry, 11th Edition, Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [14] A. S. International, ÖNORM EN 746-1, Wien: Komitee 270, Austrian Standards International, 2010.
- [15] A. S. International, ÖNORM EN 746-2, Wien: Komitee 270, Austrian Standards International, 2011.
- [16] A. S. International, ÖNORM EN 746-3, Wien: Komitee 270, Austrian Standards International, 2022.
- [17] A. Werner, „Funktionsbeschreibung Flash-Reaktor Pilotanlage,“ Lehrstuhl für Thermoprosesstechnik, Leoben, 2010.
- [18] I. G. P. D. L. R. D. J. S. D. G. U. Dipl.-Ing. (FH) Rudolf Kappelmaier, Das PAAG-Verfahren, Methodik Anwendung Beispiele, 4. Auflage, Heidelberg, Deutschland: Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, 2008.
- [19] M. Klessascheck, „Johner-Institut - "HAZOP – Risikoanalyse konform IEC 61882",“ 5. September 2019. [Online]. Available: <https://www.johner-institut.de/blog/iso-14971-risikomanagement/hazop-iec-61882/>. [Zugriff am 17. Jänner 2023].
- [20] D.-I. D. m. C. Spijker, B. Alexandra Holzer, B. Samuel Kainz und U. D.-I. D. H. Raupenstrauch, „Vorlesungsskript Technische Thermodynamik,“ Lehrstuhl für Thermoprosesstechnik, Leoben, 2018.
- [21] R. Plank, Handbuch der Kältetechnik, Karlsruhe: Springer Berlin, Heidelberg, 1953.

9 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Eingangs- und Ausgangsstoffe bei Stahlwerksprozessen und die Entstehung und Eigenschaften von Stahlwerksstäuben [1] | 6 |
| Abbildung 2: 1-stufiges RecoDust-Verfahren mit den einzelnen technischen Einheiten und ihren Produkten [2] | 8 |
| Abbildung 3: Volumenspezifische Heiz- und Brennwerte für ein Methan-Wasserstoff-Gasgemisch [4] | 14 |
| Abbildung 4: Relativer Energieinhalt von Wasserstoff im Gasgemisch mit Methan [4] | 14 |
| Abbildung 5: Explosionsbereiche von Methan mit unterschiedlichen Volumprozent Wasserstoff des Dreistoffsystems [10] | 15 |
| Abbildung 6: Explosionsbereiche von Methan mit unterschiedlichen Volumprozent Wasserstoff genauer aufgelöst [10] | 16 |
| Abbildung 7: Normspaltweiten von Gemischen aus Methan und Wasserstoff [13 - 14] | 18 |
| Abbildung 8: Schutzbereiche für ein Wasserstofflager | 24 |
| Abbildung 9: Blackbox Diagramm der Teilsysteme | 27 |
| Abbildung 10: Wärmekapazitäten von H ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ | 33 |
| Abbildung 11: Wärmekapazitäten von O ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ | 33 |
| Abbildung 12: Wärmekapazitäten von H ₂ und O ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ | 34 |
| Abbildung 13: Verbrennungsenergie von H ₂ und O ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ | 35 |
| Abbildung 14: Ergebnisse der überschlägigen Volumenbilanz für Versuche mit einem Erdgas/Wasserstoff Gemisch | 36 |
| Abbildung 15: Technische Zeichnung des statischen Mischers für die Mischung von Methan und Wasserstoff | 39 |
| Abbildung 16: R & I Schema des Gasflaschenlagers und Anbindung durch Firma Linde | 40 |
| Abbildung 17: Rohrleitung (Magenta) mit Kugelhähnen und Abblaseleitung (Orange) in und von der Barbarahalle | 41 |
| Abbildung 18: Ausschnitt der Regelstrecke für Wasserstoff aus dem R&I Schema | 41 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 19: Schalungsarbeiten für die Betonfläche..... | 43 |
| Abbildung 20: Fundamentfläche mit ausgeschalteten Weg für das Befahren mit dem Stapler..... | 43 |
| Abbildung 21: Fertig betonierte Fundamentplatte und Weg für den Stapler..... | 44 |
| Abbildung 22: Denios Gasflaschenschrank für die Montage im Freien..... | 44 |
| Abbildung 23: Aufstellort der Wasserstoffregelstrecke in der Barbarahalle..... | 45 |
| Abbildung 24: Wasserstoffeintritt in die Barbarahalle und Kugelhahn direkt nach Eintritt..... | 45 |
| Abbildung 25: Komplette Regelstrecke beim zusammenbauen (oben) und fertig montiert (unten)..... | 46 |
| Abbildung 26: Kugelhahn (links), Gasrücktrittventil (mitte) und Druckminderer (rechts)..... | 46 |
| Abbildung 27: Servogesteuertes 2/2-Wege-Kolbenventil vom Typ 5404 der Fa. Bürkert..... | 47 |
| Abbildung 28: Eingebauter Mass Flow Controller in der Wasserstoffregelstrecke..... | 47 |
| Abbildung 29: Sicherheitsventil mit 10 bar als Obergrenze..... | 48 |
| Abbildung 30: Druckmessstellen vor und nach der Regelstrecke..... | 48 |
| Abbildung 31: Symbolbild für Flammrückschlagsicherung der Wasserstoffregelstrecke..... | 49 |
| Abbildung 32: Statischer Mischer für die Mischung von Methan und Wasserstoff..... | 49 |
| Abbildung 33: Verbrennungsenergie von CH ₄ und O ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ..... | 82 |
| Abbildung 34: Verbrennungsenergie von H ₂ und O ₂ in Abhängigkeit von Temperatur und λ..... | 82 |

10 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Vergleich von Erdgas, Methan und Wasserstoff in Bezug auf seine brenntechnischen Eigenschaften [5-7]..... | 11 |
| Tabelle 2: Gemessene UEG und OEG von Methan-Wasserstoff-Gemischen [10]..... | 16 |
| Tabelle 3: Normspaltweiten von Wasserstoff-Methangemischen [11]..... | 17 |
| Tabelle 4: Leitworte nach IEC 61882 [15 – 16]..... | 21 |
| Tabelle 5: Berechnung der Temperaturänderung bei der Drosslung von Wasserstoff über den Joule-Thomson-Koeffizienten..... | 26 |
| Tabelle 6: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasflaschenlager"..... | 29 |
| Tabelle 7: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Rohrleitung"..... | 30 |
| Tabelle 8: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Regelstrecke"..... | 31 |
| Tabelle 9: Start-HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasmischung"..... | 32 |
| Tabelle 10: Bauteiltabelle mit Kurzbezeichnung und ihrer Position in dem R & I Schema..... | 42 |
| Tabelle 11: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasflaschenlager"..... | 53 |
| Tabelle 12: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Rohrleitung"..... | 54 |
| Tabelle 13: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Regelstrecke"..... | 55 |
| Tabelle 14: Abschließende HAZOP-Study für das Teilsystem "Gasmischung"..... | 56 |
| Tabelle 15: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Gasflaschenlager"..... | 65 |
| Tabelle 16: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Gasflaschenlager"..... | 66 |
| Tabelle 17: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Füllmenge beim Teilsystem "Gasflaschenlager"..... | 67 |
| Tabelle 18: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Rohrleitung"..... | 68 |


| | |
|--|----|
| Tabelle 19: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Rohrleitung" | 69 |
| Tabelle 20: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Rohrleitung" | 70 |
| Tabelle 21: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Rohrleitung" | 71 |
| Tabelle 22: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Regelstrecke" | 72 |
| Tabelle 23: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Regelstrecke" | 73 |
| Tabelle 24: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Regelstrecke" | 74 |
| Tabelle 25: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Regelstrecke" | 75 |
| Tabelle 26: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druck beim Teilsystem "Gasmischung" | 76 |
| Tabelle 27: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Temperatur beim Teilsystem "Gasmischung" | 77 |
| Tabelle 28: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Durchflussmenge beim Teilsystem "Gasmischung" | 78 |
| Tabelle 29: Auswertung und Vergleich der HAZOP-Studys vom Parameter Druckverlust beim Teilsystem "Gasmischung" | 79 |

11 Anhänge

Anhang 1 „Ex-Schutzkonzept für Gasflaschenlager“

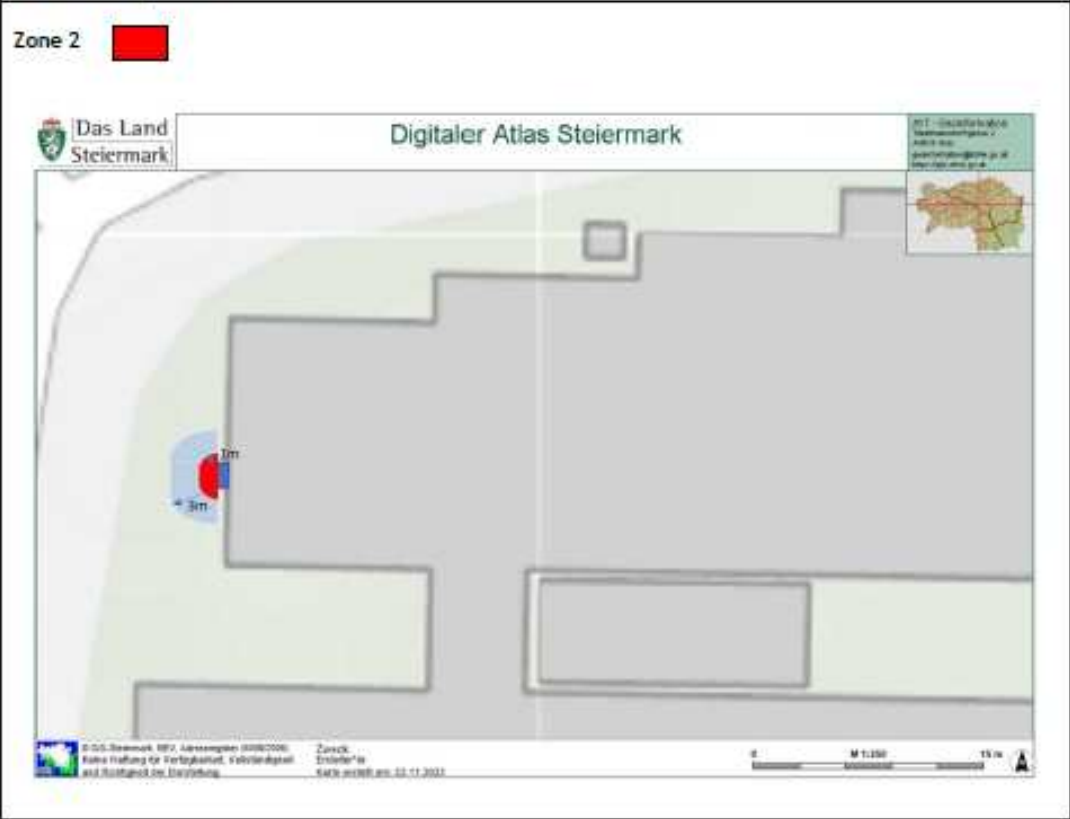
| | | |
|--|---|--|
| Explosionsschutzkonzept | | Gasversorgung 1 Bündel Wasserstoffflaschen |
| 1. Angaben zur Betriebsanlage | | |
| Firmenname: | Montanuniversität LEOBEN LEHRSTUHL FÜR THERMOPROZESSTECHNIK | |
| Ortsangaben: (Straße, Gebäude, Geschoss usw.) | A-5700 Leoben, Franz-Josef-Straße 18 | |
| 2. Beschreibung der baulichen Gegebenheiten und Anlagen | | |
| Gasversorgung (gem. ÖNORM M7387) für ein Bündel Wasserstoff | | |
| <p>Das Lager (Versorgungsbereich) wird an 3 Seiten mit einer brandbeständigen Wand (DENIOS) begrenzt. Die Zugangsseite wird als Einzäunung (Gittertor) ausgeführt, über welche auch die Be- und Entlüftung sichergestellt wird.</p> <p>Zum Schutz vor Sonneneinstrahlung ist das Lager mit einem brandbeständigen Dach ausgestattet.</p> | | |
|  | | |
| Gaszentralen im Freien müssen mit einer mindestens 1,5 m hohen Umzäunung, zB einem Gitter umgeben sein. | | |
| 3. Verfahrens- und ggf. Tätigkeitsbeschreibung | | |
| Folgende Gase werden verwendet. | | |
| 1 Bündel Wasserstoffflaschen : 12 Flaschen á 50 Liter, 200 bar | | |
| 4. Stoffdaten | | |
| Kenngrößen von Wasserstoff: | | |
| Aussehen | | |
| Aggregatzustand: | Gas | |
| Form: | Komprimiertes Gas | |
| Farbe: | Farblos | |
| Geruch: | Geruchlos | |
| Geruchschwelle: | Geruchswahrnehmung ist subjektiv und nicht geeignet, um vor einer Überexposition zu warnen. | |
| pH-Wert: | Nicht anwendbar. | |
| Schmelzpunkt: | -259,2 °C | |
| Siedepunkt: | -253 °C | |
| Sublimationspunkt: | Nicht anwendbar. | |
| Kritische Temperatur (°C): | -240,0 °C | |
| Flammpunkt: | Entfällt bei Gasen und Gasmischungen. | |
| Verdampfungsgeschwindigkeit: | Entfällt bei Gasen und Gasmischungen. | |
| Entzündbarkeit (fest, gasförmig): | Entzündliches Gas | |
| Explosionsgrenze - obere (%): | 77 %(V) | |
| Explosionsgrenze - untere (%): | 4 %(V) | |
| Dampfdruck: | Keine zuverlässigen Daten verfügbar. | |
| Dampfdichte (Luft=1): | 0,069 | |
| Relative Dichte: | 0,07 | |

| | | | | |
|--|---|---|--------------------------|---|
| Explosionsschutzkonzept | Gasversorgung 1 Bündel Wasserstoffflaschen | | | |
| 5. Ermittlung Beurteilung | | | | |
| <i>Frage 1) Sind brennbare Stoffe vorhanden?</i> | | | | |
| Ja. | | | | |
| <i>Frage 2) Kann durch ausreichende Verteilung in der Luft explosionsfähige Atmosphäre entstehen?</i> | | | | |
| Ja. | | | | |
| <i>Frage 3) Ist die Bildung eines explosionsgefährdeten Bereiches möglich?</i> | | | | |
| Ja, aber nur im Störfall. | | | | |
| <i>Frage 4) Ist die Bildung eines explosionsgefährdeten Bereiches zuverlässig verhindert?</i> | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Einstufung in Zone 2 1m um die Wasserstoffflaschen. Die Ex-Zone ist mit einer Kette abzusperren. ⇒ Die Wasserstoffleitung wird mit einer dauerhaft technisch dichten Leitung in das Institut für Thermoprozesstechnik geleitet. Hier wird auf die Ausführungen der Fa. Linde verwiesen. ⇒ 3 m um die Gasversorgung gibt es einen Sicherheitsabstand. Hier ist die Lagerung von brennbaren Stoffen verboten. Eine Bodenmarkierung und Umzähung ist erforderlich | | | | |
| <i>Frage 5) Ist die Entzündung in einem explosionsgefährdeten Bereich zuverlässig verhindert?</i> | | | | |
| Ja, bei Umsetzung und Einhaltung der technischen und organisatorischen Maßnahmen, die in Punkt 6 behandelt werden. | | | | |
| ERGEBNIS ZONENFESTLEGUNG | | | | |
| | Freisetzung von Gasen / Dämpfen / Nebel | | | |
| Bereich | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; padding: 5px;">Zone 0 ständig, langfristig oder häufig</td> <td style="width: 33%; padding: 5px;">Zone 1 gelegentlich</td> <td style="width: 33%; padding: 5px;">Zone 2 selten und während eines kurzen Zeitraums</td> </tr> </table> | Zone 0 ständig, langfristig oder häufig | Zone 1 gelegentlich | Zone 2 selten und während eines kurzen Zeitraums |
| Zone 0 ständig, langfristig oder häufig | Zone 1 gelegentlich | Zone 2 selten und während eines kurzen Zeitraums | | |
| Wasserstoffflaschen + 1 m Schutzbereich um die Flaschen | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Sicherheitsabstand | 3m um das Lager nach vorne | | | |
| 6. Maßnahmen | | | | |
| 6.1 Verhinderung oder Einschränkung der Bildung bzw. Überwachung der Konzentration in explosionsgefährdeten Bereichen | | | | |
| <p>Natürliche Lüftung gegeben.</p> <p>Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung durch Dach:</p> <p>In der Schutzzone von 3 m dürfen keine brennbaren Stoffe gelagert werden.</p> | | | | |

| | |
|---|--|
| Explosionsschutzkonzept | Gasversorgung 1 Bündel Wasserstoffflaschen |
| 6.2 Verhinderung von Zündquellen in explosionsgefährdeten Bereichen | |
| <p>Elektrische Ausrüstung</p> <p>Die elektrische Ausrüstung, die in Zone 2 angeordnet und installiert ist, muss mindestens der Kategorie 3 nach EN 60079-0 und EN 60079-15 entsprechen.</p> <p>( II 3 G, T1 IIC)</p> <p>Insbesondere werden folgende Maßnahmen durchgeführt:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) alle elektrisch leitenden Bauteile sind untereinander zu verbinden und zu erden. <p>Nichtelektrische Ausrüstung</p> <p>Ausrüstung der Kategorie 3, die in Zone 2 installiert werden darf während des Normalbetriebes keine wirksamen Zündquellen enthalten.</p> <ol style="list-style-type: none"> a) heiße Oberflächen sind nicht vorhanden. b) elektrostatische Aufladungen werden durch Erdung/Potentialausgleich unterbunden. <p>Mögliche Zündquellen sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mechanisch erzeugte Funken: <ul style="list-style-type: none"> o Funkenziehende Tätigkeiten sind in der Zone verboten. - elektrostatische Entladungen <ul style="list-style-type: none"> o Nachweis für Erdung/Potentialausgleich muss vorhanden sein. - elektrische Funken <ul style="list-style-type: none"> o Elektrische Ausführung in der Zone in II 3 G o Verbot von nicht ex-geschützten Arbeitsmittel/Betriebsmittel in der Zone - Schweißverfahren und andere Quellen thermischer Energie, die während Instandhaltungs- und Reinigungsarbeiten verwendet werden. <ul style="list-style-type: none"> o Freigabesystem für Heißarbeiten - Blitzschlag <ul style="list-style-type: none"> o Blitzschutzanlage muss vorhanden sein | |

Explosionsschutzkonzept Gasversorgung
1 Bündel Wasserstoffflaschen

7. Ex-Zonenplan



8. Verantwortlichkeit

Erstellt von TechnR. Dr. Rainer Gagstädter, Ingenieurbüro ACS, 4312 Ried/Riedmark am 22.11.2022

ACS
Analytical Control Services
Ingenieurbüro für Technische Systeme
Eisenstadt 73, A-4312 Ried/Riedmark
0572374010-24 Fax: 0572374931-48
mailto:info@acs-ried.com

Anhang 2 „Abmessungen und Spezifikation für Denios Gasflaschenschrank und Fundament“

