

Diplomarbeit

Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für ein Brennstoffzellenlaboratorium

Vorgelegt am: 31.08.2012

Von: David Sachs
Bahnhofstrasse 36
99819 Förtha

Studiengang: Versorgungs- und Umwelttechnik
Studienrichtung: Technische Gebäudesysteme

Seminargruppe: VU 09/2

Matrikelnummer: 4090520

Praxispartner: DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
HalsbrückerStrasse 34
09599 Freiberg

Gutachter: Dipl.-Ing. (BA) Markus Ranneberg
(DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg)
Prof. Bernd Dölling
(Berufsakademie Glauchau)

Freigabeerklärung

Hiermit erklären wir uns einverstanden, dass die Diplomarbeit des Studenten

Name Vorname: David Sachs

SG: VU 09/2

zur öffentlichen Einsichtnahme durch den Dokumentenserver der Bibliothek der Staatlichen Studienakademie Glauchau bereitgestellt wird.

Thema der Arbeit:

„Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für ein Brennstoffzellenlaboratorium“

Freiberg, 31.08.2012

Ort, Datum



.....
Unterschrift Student

DBI - Gastechnologisches
Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34
D-09599 Freiberg
Tel. +49 (0) 3731 4195310
Fax +49 (0) 3731 4195319



.....
Stempel, Unterschrift Bildungsstätte

Studiengang Versorgungs- und Umwelttechnik

Themenblatt Diplomarbeit

Student: Sachs, David **SG:** VU09/2 **Matr.-Nr.:** 4090520

Bildungsstätte: DBI Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

Anschrift: Halsbrücker Straße 34
09599 Freiberg

Gutachter/Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Markus Ranneberg

Gutachter (Studienakademie): Herr Prof. Bernd Dölling

Thema der Diplomarbeit

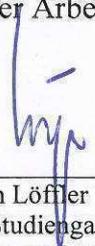
Erstellung des Sicherheitskonzeptes für ein Brennstoffzellenlaboratorium

Bearbeitungsschwerpunkte:

- Erarbeitung des Sicherheitskonzeptes
- Auswahl und Aufbau der erforderlichen Komponenten
- Erstellung einer Dokumentation
- Erarbeitung eines Wartungs- und Instandhaltungsplanes für die eingesetzten Komponenten

Ausgabe des Themas: 21. Mai 2012

Abgabe der Arbeit an die SR am: 20. August 2012


Prof. Jürgen Löffler
Leiter des Studienganges
Versorgungs- und Umwelttechnik

www.ba-glauchau.de



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Formelverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Abgrenzung und Zielstellung der Arbeit.....	2
2 Grundlagen	3
2.1 Technologische Grundlagen	3
2.1.1 Brennstoffzelle	3
2.1.2 Dampfreformierung.....	4
2.2 Beschreibung des Laboratoriums	5
2.2.1 Medienversorgung und Rohrleitungen.....	6
2.2.2 Raumluftechnische Anlage und Gassensoren	7
2.2.3 Apparaturen	8
3 Gefährdungsbeurteilung	10
3.1 Allgemeines	10
3.2 Gefährdungsfaktor Gefahrstoffe.....	11
3.2.1 Allgemeines	11
3.2.2 Brenngase	12
3.2.3 Stickstoff	13
3.2.4 Kohlendioxid	13
3.2.5 Kohlenmonoxid	13
3.2.6 Zusammenfassung	14
3.3 Gefährdungsfaktor Brände und Explosionen	15
3.3.1 Brandgefährdung	15

3.3.2	Explosionsgefährdung	16
3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	17
3.5	Zu ergreifende Maßnahmen, Vorgehensweise	18
4	Gefahrstofffreisetzung	19
4.1	Ermittlung der Freisetzungquellen.....	19
4.2	Bestimmung der Freisetzungsraten	22
4.2.1	Freisetzung an technisch dichten Anlagenteilen.....	22
4.2.2	Freisetzung durch eine Leckageöffnung.....	25
4.3	Explosionszonen.....	30
4.3.1	Zoneneinteilung	30
4.3.2	Zonenausdehnung.....	31
4.4	Maßnahmen.....	31
5	Raumlufotechnische Anlage.....	32
5.1	Allgemeine Anforderungen	32
5.2	Explosionsschutzanforderungen.....	32
5.3	Planungsvolumenströme	33
5.3.1	Zuluftvolumenstrom	33
5.3.1.1	Hygienisch bedingter Außenluftvolumenstrom.....	33
5.3.1.2	Einschränkung der Explosionszonen	34
5.3.1.3	Vermeidung lokaler akut toxischer Gefahrstoffkonzentrationen.....	36
5.3.1.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	37
5.3.1.5	Korrektur von armaturenbedingter Freisetzungen und resultierendem Zuluftvolumenstrom	38
5.3.1.6	Planungsvolumenstrom	39
5.3.2	Abluftvolumenstrom	39
5.4	Aggregate für Luftbehandlung	40
5.4.1	Luftherhitzer	40
5.4.2	Feuchtluftkühler	41
5.4.3	Dampfbefeuchter	42
5.5	Raumluffführung	42

5.5.1	Luftführungsprinzip	42
5.5.2	Positionierung der Luftdurchlässe.....	43
5.5.2.1	Zuluftdurchlässe.....	43
5.5.2.2	Abluftdurchlässe	43
5.6	Betriebsweisen der Lüftungsanlage	44
6	Gaswarnanlage	45
6.1	Allgemeines	45
6.2	Gassensoren	46
6.2.1	Anforderungen	46
6.2.2	Messprinzipien und Eigenschaften	46
6.2.2.1	Wärmetönungssensor.....	46
6.2.2.2	Halbleitersensor.....	47
6.2.2.3	Elektrochemischer Sensor	47
6.2.2.4	Infrarotsensor.....	48
6.2.3	Transmitter.....	48
6.2.4	Auswahl und Positionierung der Sensoren	48
6.2.4.1	Kohlenmonoxid, Wasserstoff	48
6.2.4.2	Methan, Propan, Butan.....	50
6.2.4.3	Kohlendioxid	50
6.3	Alarmmittel.....	51
6.4	Gaswarnzentrale.....	51
6.5	Energieversorgung.....	52
6.6	Festlegung der Alarmschwellen und nachgeordneter Maßnahmen.....	52
6.6.1	Allgemeines	52
6.6.2	Voralarm	52
6.6.3	Hauptalarm	53
6.6.4	Störungsalarm.....	54
6.7	Übersichtsplan	54
7	Wartung und Instandhaltung	55
7.1	Kontrollen.....	55

7.1.1	Allgemeines	55
7.1.2	Sichtkontrolle nach DIN EN 60079-29-2	56
7.1.3	Funktionskontrolle nach DIN EN 60079-29-2.....	57
7.1.4	Systemkontrolle nach DIN EN 60079-29-2	57
7.1.5	Aufzeichnungskontrolle.....	57
7.2	Kalibrierung und Justierung	57
7.3	Instandsetzung.....	58
8	Fazit.....	59
	Literaturverzeichnis	60
	Anhangverzeichnis.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise der Brennstoffzelle	3
Abbildung 2: Grundriss des Brennstoffzellenlaboratoriums, ohne Maßstab	5
Abbildung 4: Zu- und Abluftkanäle der installierten RLTA	7
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Reformerapparatur	9
Abbildung 5: Strömungsbild der tangentialen Verdünnungslüftung	42
Abbildung 6: Freistrahler in einem Raum mit Coanda-Effekt	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: AEGL-Werte für Kohlenmonoxid.....	14
Tabelle 2: Dichte, relative Dichte zur Luft und AGW der Stoffe.....	15
Tabelle 3: Zündgrenzen der Brenngase in Luft (20°C) bei $p_n=1,01325$ bar.....	17
Tabelle 4: Freisetzungsgrade.....	19
Tabelle 5: Auf Dauer technisch dichte bzw. technisch dichte Anlagenteile und Rohrleitungsverbindungen.....	20
Tabelle 6: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes an Durchführungen der Absperr- und Regelorgane sowie bei Flanschabdichtungen.....	23
Tabelle 7: Zusammenfassung der Grenzwerte.....	45

Formelverzeichnis

Formel 1	Relative Dichte	14
Formel 2	Emissionsmassenstrom am Dichtelement	24
Formel 3	Gesamtemissionsmassenstrom	25
Formel 4	Polytrope Kennzahl der adiabatischen Ausdehnung	26
Formel 5	Spezifische Wärmekapazität	26
Formel 6	Massenanteil	27
Formel 7	Dichte des Gases i	27
Formel 8	Dichte des Gasgemisches	27
Formel 9	Molare Masse	27
Formel 10	Kritischer Druck	29
Formel 11	Hygienischer Außenluftvolumenstrom	33
Formel 12	Mindestzuluftvolumenstrom zur Verdünnung des Emissionsmassenstromes	34
Formel 13	Hypothetisches Volumen explosionsfähigen Gemisches	35
Formel 14	Anzahl der Raumlufwechsels	35
Formel 15	Erforderlicher Zuluftvolumenstrom zur Zoneneinschränkung	35
Formel 16	Erforderlicher Zuluftvolumenstrom zur Verminderung der Kohlenmonoxidkonzentration	37
Formel 17	Abluftvolumenstrom	39
Formel 18	Luftheritzerleistung	40
Formel 19	Massenstrom trockener Luft	41
Formel 20	Entfeuchtungsleistung	41

Abkürzungsverzeichnis

AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BGR	Berufsgenossenschaftliche Regeln
CAS	Chemical Abstracts Service
DBI-GTI	DBI- Gastecnologisches Institut gGmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
IAG	Institut für Arbeit und Gesundheit
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
OEG	Obere Explosionsgrenze
PEMFC	Proton Exchange Membran Fuel Cell
PTFE	Polytetrafluorethylen
RLTA	Raumlufttechnische Anlage
SeIOx	Selektive Oxidation
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UEG	Untere Explosionsgrenze
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
ÜF	Überschreitungs faktor
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die DBI-Gastechnologische Institut Freiberg gGmbH (kurz DBI-GTI) ist ein Tochterunternehmen der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, welche 1991 aus der Gasfachabteilung des Deutschen Brennstoffinstitut Freiberg hervorging. Die DBI-GTI ist mit der Bearbeitung diverser Forschungsthemen auf den Gebieten der Gasförderung und –speicherung, Gasnetze und Anlagen, Gasanwendung sowie der Gaschemie und der Gasesstechnik betraut.

Zu dem Fachgebiet der Gasanwendung gehört unter anderem die Sparte Brennstoffzelle, zu deren Tätigkeitsschwerpunkten die wissenschaftliche Begleitung von Feldtests, Prüfung und Zertifizierung von stationären Brennstoffzellenheizsystemen und die mathematische Modellierung von Einzelkomponenten zählen. Außerdem befasst sich die Abteilung Brennstoffzelle mit der Entwicklung kompakter, effizienter Gaserzeugungssysteme zur Herstellung des Brennstoffzellen-Brenngases. Zur Anwendung und Prüfung dieser Gaserzeugungssysteme, so genannter Dampfreformer, wurde im Rahmen von Umbau- und Sanierungsarbeiten in den Jahren 2009/10 ein „Brennstoffzellenlaboratorium“ vorgesehen, für welches im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Sicherheitskonzept entwickelt werden soll.

Der Begriff „Sicherheit“ wird beschrieben als „Zustand des Sicherseins, Geschütztseins vor Gefahr oder Schaden.“¹ Dieser Zustand kann praktisch nicht erreicht werden, da unvorhersehbare Ereignisse auftreten oder schadensverursachende Ereignisse von außen einwirken können. Einem sicheren Zustand kann man sich jedoch annähern, indem man mit zumutbarer Sorgfalt die Gefährdungsfaktoren innerhalb eines Systems analysiert und Maßnahmen zur Vermeidung der Gefährdung durch diese Faktoren trifft oder die Gefährdung soweit einschränkt, dass sie beherrschbar ist. Das Konzept zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen besteht im Wesentlichen aus den drei Hauptkomponenten der arbeitsmittel-, der gefahrstoff- und der tätigkeitsbezogenen Gefährdungsbeurteilung.

Die Schutzmaßnahmen untergliedert man im Bereich der Arbeitssicherheit in organisatorische und technische Schutzmaßnahmen, des Weiteren trägt die persönliche Schutzausrüstung der Beschäftigten zur Minimierung der Gefährdung dieser bei. Zu den organisatorischen Schutzmaßnahmen gehören z.B. die

¹online: Duden.de, 2012

Unterweisung der Beschäftigten, Betriebsanweisungen für Arbeitsstoffe und Geräte, Flucht- und Rettungspläne sowie Anweisungen zum Verhalten im Notfall. Zu den technischen Schutzmaßnahmen zählen neben den allgemeinen Anforderungen an die Arbeitsplatzgestaltung von Laboratorien auch spezielle technische Schutzmaßnahmen, wie z.B. Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen beim Umgang mit brennbaren Gasen. Grundsätzlich sind Arbeitsplätze so zu gestalten und auszurüsten, dass eine Gefährdung der Beschäftigten weitestgehend vermieden wird. Die Regel für Sicherheit und Gesundheitsschutz BGR 120 „Laboratorien“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) gibt einen Überblick über die Mindestanforderungen an organisatorische und technische Schutzmaßnahmen in Laboratorien. Nur wenn allgemeine und spezielle organisatorische sowie technische Schutzmaßnahmen aufeinander abgestimmt sind und die technischen Schutzmaßnahmen dem Stand der Technik entsprechen, kann von einem hohen Maß an Sicherheit am Arbeitsplatz gesprochen werden.

1.2 Abgrenzung und Zielstellung der Arbeit

Das Ziel der Diplomarbeit „Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für ein Brennstoffzellenlaboratorium“ ist eine Minimierung der gefahrstoffbezogenen Gefährdungen durch die Konzipierung entsprechender technischer Schutzmaßnahmen. Dabei soll die Betrachtung der Apparaturen im Wesentlichen auf die Rohrleitungsinstallation beschränkt werden. Bei der Gefährdungsbeurteilung sollen tätigkeitsbezogene Gefährdungen nicht betrachtet werden. Die technischen Mindestanforderungen gemäß der BGR 120 „Laboratorium“ an Bedien- und Verkehrsflächen, Fluchtwege, Fußböden, Beleuchtung, elektrische Versorgungseinrichtungen sowie Zuführungsrohrleitungen und Armaturen sollen vor der Bearbeitung der Aufgabenstellung als umgesetzt gelten. Die angewendeten Normen und Gesetze entsprechen dem Stand vom 01.06.2012.

Die Bearbeitungsschwerpunkte beinhalten die Erarbeitung des Sicherheitskonzeptes, Auswahl und Aufbau der erforderlichen Komponenten der Gaswarneinrichtung, die Erstellung einer Dokumentation sowie eines Wartungs- und Instandhaltungsplanes für die eingesetzten Komponenten der Gaswarneinrichtung. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll geprüft werden, ob die bereits installierten Gassensoren und die Lüftungsanlage den Anforderungen des Sicherheitskonzeptes entsprechen.

2 Grundlagen

2.1 Technologische Grundlagen

Um ein Grundverständnis der Brennstoffzellentechnik aufzubauen, werden in den folgenden Abschnitten die Wirkweisen von Brennstoffzellen und Dampfreformern erläutert.

2.1.1 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen zählen zu den galvanischen Elementen und sind dazu in der Lage, chemisch gebundene Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Hierfür müssen die Reaktionspartner, Wasserstoff als Brenngas und Sauerstoff als Oxidationsmittel, kontinuierlich zugeführt werden. Für eine elektrochemische Reaktion müssen die Edukte durch einen ionenleitenden Elektrolyten räumlich voneinander getrennt werden, da es ohne diese Trennung zu einer normalen Verbrennung bzw. Knallgasreaktion kommen würde. Damit ergibt sich grundsätzlich ein identischer Aufbau der Brennstoffzellentypen, siehe Abbildung 2. Die Typen der Brennstoffzellen unterscheiden sich nach der Art des eingesetzten Elektrolyten. Von diesem Elektrolyten sind die Anforderungen an die Reinheit des Brenngases sowie die Betriebstemperaturen abhängig.

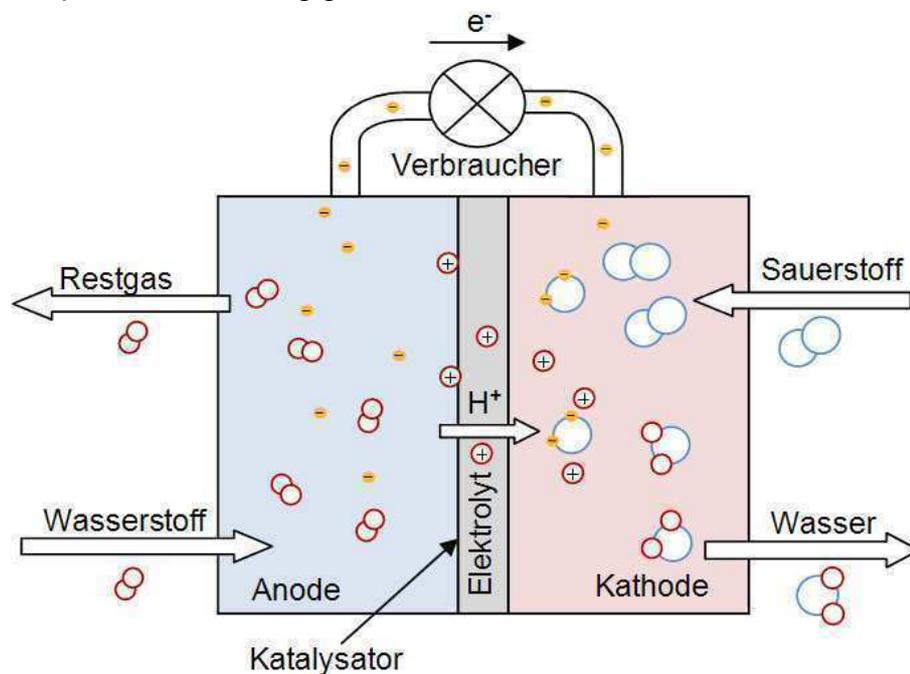


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise der Brennstoffzelle

Die Funktionsweise einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) soll im Folgenden vereinfacht erläutert

werden. An der Anode wird Wasserstoff katalytisch aufgebrochen, dabei werden positiv geladene Wasserstoffionen (H^+) und Elektronen (e^-), wie in Gleichung (1) beschrieben, freigesetzt.



An der Kathodenseite reagiert Sauerstoff mit Hilfe der Elektronen und den Wasserstoffionen und bildet Wasser (siehe Gleichung (2)).



Der Elektronenaustausch erfolgt nicht direkt zwischen den Reaktionspartnern, sondern wird über einen äußeren Stromkreis geleitet. Hierdurch kann elektrische Energie nutzbar gemacht werden. Zusammengesetzt ergibt sich aus den oben genannten Reaktionsgleichungen die Gesamtreaktionsgleichung (3) einer Brennstoffzelle:



Die in einer Brennstoffzelle erzeugbare Spannung ist gering, für technische Anwendungen werden in der Regel mehrere Zellen zu einem Zellstapel, auch Stack genannt, zusammengeschaltet.

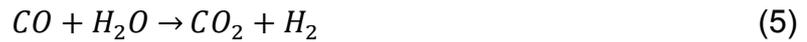
2.1.2 Dampfreformierung

Für die elektrochemische Reaktion in der Brennstoffzelle wird wie oben beschrieben das Brenngas Wasserstoff benötigt. Mit dem Prozess der Dampfreformierung ist es möglich, vorhandene Kohlenwasserstoffe in oxidierte Kohlenstoffe und Wasserstoff zu trennen und somit Brennstoffzellenbrenngas bereit zu stellen.

Bei der Dampfreformierung von Erdgas wird in einer ersten Teilreaktion das Methan zusammen mit Wasser unter Zuführung thermischer Energie zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. Dieser Prozess wird mit der Reaktionsgleichung (4) beschrieben.



Gleichzeitig reagiert in einer zweiten Teilreaktion das Kohlenmonoxid mit Wasser zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Der in Gleichung (5) beschriebene Prozess wird auch als Wassergas-Shift-Reaktion bezeichnet.



Zusammen ergeben die Gleichungen (4) und (5) die Gesamtreaktionsgleichung (6) für den Umsatz von Methan:



Da das Kohlenmonoxid nicht vollständig umgewandelt werden kann, wird der nun enthaltene restliche Anteil an Kohlenmonoxid bei der „selektiven Oxidation“ (SelOx) weitgehend oxidiert, siehe Gleichung (7).



Das Endprodukt der o.g. Reaktionen ist das Reformat, ein Gasmisch aus Wasserstoff und Kohlendioxid mit geringem Anteil an Kohlenmonoxid, welches der Brennstoffzelleneinheit zugeführt werden kann.

2.2 Beschreibung des Laboratoriums

Auf einer Grundfläche von insgesamt 36,64 m² sind vier Versuchsstände vorgesehen.

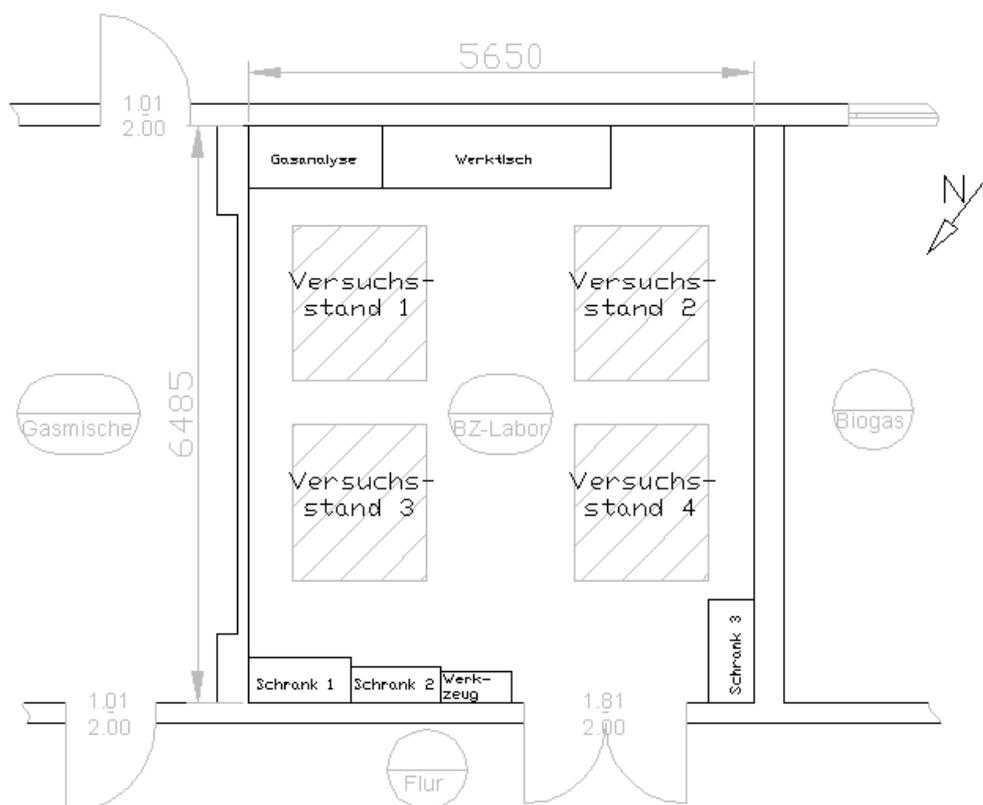


Abbildung 2: Grundriss des Brennstoffzellenlaboratoriums, ohne Maßstab

Die Rohdeckenhöhe des Laboratoriums beträgt 3,50 m, der Raum ist auf eine Höhe von 3,00 m abgehängt. In der Abbildung 2 ist die Geometrie des Raumes und die Anordnung der Versuchsstände erkennbar. Die Eingangstür ist eine selbstschließende, in Fluchrichtung zu öffnende Doppelflügeltür ohne Sichtfenster. Außenfenster oder Überströmöffnungen sind in dem Raum nicht vorhanden.

Das Brennstoffzellenlaboratorium liegt zwischen den Räumen „Gasmische“ und „Biogas“, grenzt an einen Flur an und besitzt eine Außenwand mit Südostausrichtung. An den Versuchsständen sollen neben Systemen zur Herstellung wasserstoffreicher Gasgemische aus Erdgas zur Nutzung als Brenngas für PEMFC auch Prototypen von Gasbrennern an Brennkammern betrieben werden. Diese sind speziell für so genannte Dampfreformer entwickelte Brenner zur Bereitstellung der für die endotherme Reaktion der Dampfreformierung benötigten Prozesswärme.

2.2.1 Medienversorgung und Rohrleitungen

Zur Simulation verschiedener Betriebszustände wird das Laboratorium über die Innenwand zum Nachbarraum „Gasmische“ mit folgenden Medien versorgt:

- Stickstoff N₂ (aus Flaschenlager), DN 10, PN 4
- Kohlenstoffdioxid CO₂ (aus Flaschenlager), DN 10, PN 4
- Erdgas E (GUS), 100 mbar, DN 20, PN 4
- Erdgas E (GUS), 4 bar, DN 20, PN 4
- Propan C₃H₈, DN 10, PN 10
- Butan C₄H₁₀, DN 10, PN 10
- Wasserstoff H₂ (aus Flaschenlager), DN 10, PN 4
- Mischgas (nach Bedarf ein Gemisch aus den o.g. Brenngasen, CO₂, N₂), DN 20, PN 4

Die Rohrleitungssysteme der Flaschengase sind mit Sicherheitsabsperrenten und Sicherheitsabblaseventilen vor dem Überschreiten des maximalen Überdruckes von $p_{ü,max} = 4 \text{ bar}$ abgesichert. In der isometrischen Darstellung der Rohrleitungsinstallation (Anhang I) ist ersichtlich, dass die Erdgas-Verteilungsleitungen der Druckstufe 100 mbar sowie die Mischgasleitungen an den Versuchsständen mit Gasmagnetventilen ausgestattet sind. Es handelt sich dabei um Gasmagnetventile des Typs Kromschroder VAS 115R/NW.

2.2.2 Raumluftechnische Anlage und Gassensoren

Aufgrund der Vornutzung ist in Brennstoffzellenlaboratorium bereits eine raumluftechnische Anlage installiert. Diese wird als Unterdruckanlage betrieben und ist manuelle ein- und auszuschalten. Die Führung der Zu- und Abluftkanäle im Raum ist in der Abbildung 4 dargestellt.

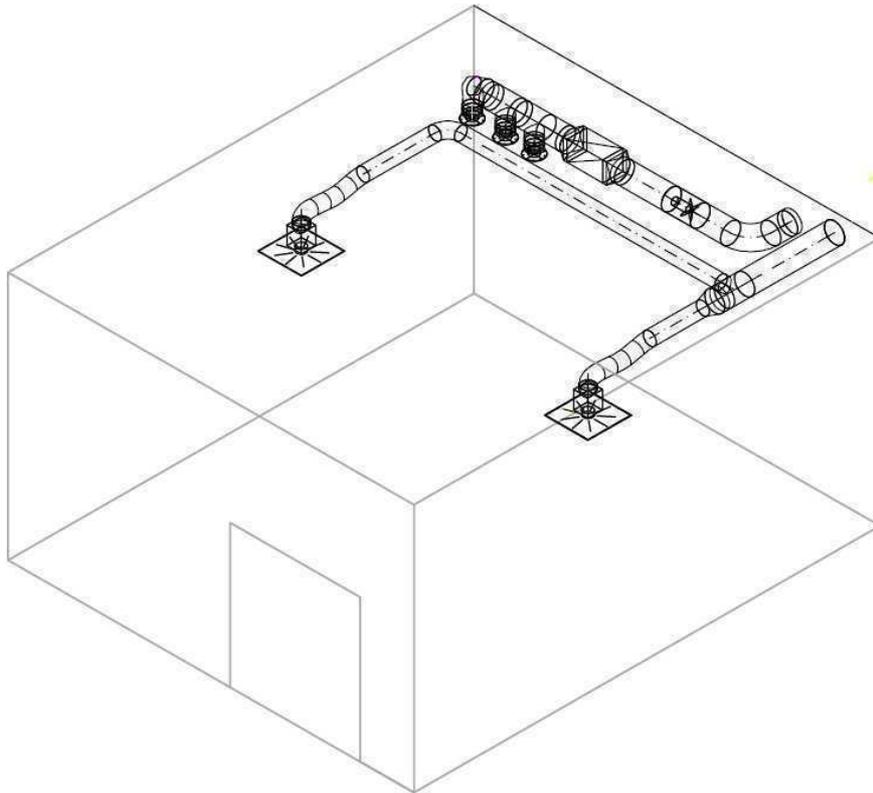


Abbildung 3: Zu- und Abluftkanäle der installierten RLTA

Die Zuluftanlage realisiert die Einführung der Luft über drei Drallluftauslässe in der Raumecke gegenüber der Eingangstüre. Die Zuluft wird durch ein Warmwasser-Heizregister mit einer Nennwärmeleistung von $\dot{Q}_{LE} = 4,1 \text{ kW}$ und einem Planungsvolumenstrom von $\dot{V} = 390 \text{ m}^3/\text{h}$ geleitet. Zuluftseitig ist ein Hochdruck-Rohrventilator mit steiler Kennlinie und einem maximalen Volumenstrom $\dot{V}_{\text{max}} = 960 \text{ m}^3/\text{h}$ installiert. Die Abluft wird über zwei Trichter abgesaugt und von einem Radial- Dachventilator gefördert.

Zuluftseitig:

- Hochdruck- Rohrventilator Helios VARD 225/4 TK, $\dot{V}_{\text{max}} = 960 \text{ m}^3/\text{h}$
- Warmwasser- Heizregister S&P MBW-200, $\dot{Q}_{LE} = 4,1 \text{ kW}$
- 3x Drallluftauslass

Abluftseitig:

- Radial- Dachventilator S&P CTVB/4 250 K, $\dot{V}_{\max} = 2800 \text{ m}^3/\text{h}$
- 2x Absagtrichter

Des Weiteren sind in dem Raum bereits zwei Gasetektoren installiert, deren Positionen in Anlage I ersichtlich sind.

- ExTox CO-300-EC
- ExTox BG-HL, Propan

Es handelt sich hierbei um einen elektrochemischen Kohlenmonoxidsensor sowie einen Halbleiter- Brenngassensor, der auf Propan kalibriert ist.

2.2.3 Apparaturen

Eine Reformieranlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Anlagenteilen:

- Reformier mit integriertem Brenner
- Shiftstufe
- SelOx
- Reformatkühler

Die Anlage ist so konzipiert, dass verschiedene Betriebszustände simuliert werden können. Die Reformereinheiten können sowohl mit als auch ohne Brennstoffzelleneinheit betrieben werden. Falls keine Brennstoffzelleneinheit in das System integriert ist, wird das gesamte Reformat abgefackelt. Dafür wurde eine eigens entwickelte Brennkammer im Raum „Biogas“ installiert, die mit einer erdgasbetriebenen und überwachten Stützflamme arbeitet. Zur Ermittlung der Konzentration der Gaskomponenten kann das Reformat nach den einzelnen Stufen der Brenngasaufbereitung an dafür vorgesehenen Armaturen entnommen und über Schlauchleitungen dem Gasanalysegerät zugeführt werden. Zusätzlich wird das für die Analyse entnommene Probengas abgefackelt.

Die Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines vollständigen Systems mit Reformier- und Brennstoffzelleneinheit sowie Gasanalysegerät.

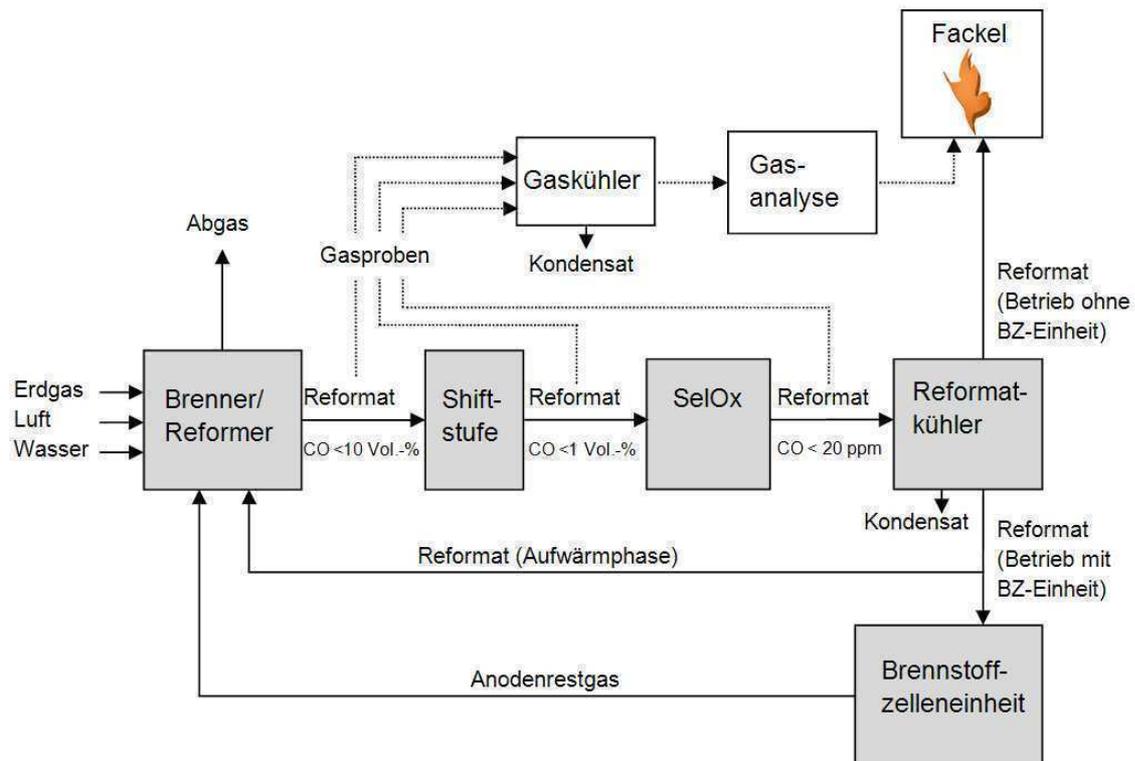


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Reformerapparatur

3 Gefährdungsbeurteilung

3.1 Allgemeines

Das „Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit“ (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) führt die Arbeitgeberpflichten auf. Das ArbSchG dient dazu, dem Beschäftigten ein möglichst sicheres Arbeitsumfeld zu schaffen und so dessen Gesundheit zu wahren. Der Arbeitgeber muss eine Beurteilung der Arbeitsbedingungen durchführen, um die Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten zu ermitteln und geeignete Arbeitsschutzmaßnahmen planen und durchführen zu können. Dabei sind folgende allgemeine Grundsätze² einzuhalten:

- (1) „Die Arbeit ist so zu gestalten, dass eine Gefährdung für Leben und Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird.
- (2) Gefahren sind an der Quelle zu bekämpfen.
- (3) Bei den Maßnahmen sind der Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen.
- (4) Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen.
- (5) Individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen.
- (6) Spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigungsgruppen sind zu berücksichtigen.
- (7) Den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen.
- (8) Mittelbar und unmittelbar geschlechtsspezifisch wirkende Regelungen sind nur zulässig, wenn dies aus biologischen Gründen zwingend geboten ist.

Weiterhin ist eine Durchführung der Gefährdungsbeurteilung gesetzlich vorgeschrieben³, welche die Gefährdungsfaktoren am Arbeitsplatz und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefährdung bei normalen Betriebsbedingungen, Instandhaltungsarbeiten, aber auch bei Betriebsstörungen und Fehlgebrauch einer Anlage oder deren Komponenten betrachtet. Das Institut für

²online: Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), i. d. F. des Gesetzes von 05.02.2009, § 4

³online: vgl. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), i. d. F. des Gesetzes von 05.02.2009, § 5 (1)

Arbeit und Gesundheit (IAG) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) unterscheidet in:

- Physikalische Gefährdungsfaktoren
- Chemische Gefährdungsfaktoren
- Gefährdungsfaktor biologische Arbeitsstoffe
- Physische Gefährdungsfaktoren
- Psychische Gefährdungsfaktoren
- Gefährdungsfaktor Tier und Mensch
- Kombinationen von Gefährdungsfaktoren

An den auftretenden Gefährdungsfaktoren wird eine Risikobeurteilung durchgeführt. Je höher das Risiko eingeschätzt wird, desto dringender ist der Handlungsbedarf, d.h. bei hohem Risiko sind Maßnahmen zur Verringerung des Risikos unverzüglich durchzuführen. Diese Maßnahmen zur Verringerung von Risiken können technische oder organisatorische Schutzmaßnahmen sowie die persönliche Schutzausrüstung des Beschäftigten betreffen.

Durch sinnvolle Anordnung und Gestaltung der Arbeitsplätze und die Umsetzung der baulich-technischen Schutzmaßnahmen sind Gefährdungen durch physikalische Faktoren weitgehend minimiert. Biologische, physische und psychische Gefährdungsfaktoren sowie von Mensch und Tier ausgehende Gefährdungsfaktoren sollen nicht Gegenstand dieser Analyse sein. Aufgrund der im Brennstoffzellenlaboratorium anliegenden Medien werden im Folgenden die Gefährdungsfaktoren Brände und Explosion sowie Gefahrstoffe beurteilt.

3.2 Gefährdungsfaktor Gefahrstoffe

3.2.1 Allgemeines

Die „Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen“ (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) konkretisiert das ArbSchG, wenn Beschäftigte Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ausüben, Gefahrstoffe entstehen oder freigesetzt werden können. Als Gefahrstoffe gelten alle Stoffe, denen ein Arbeitsplatzgrenzwert zugewiesen wurde, explosionsfähige Stoffe, gefährliche Stoffe und solche, die die Gesundheit und die Sicherheit der Beschäftigten gefährden können. Stoffe sind gefährlich, wenn sie mindestens eines der folgenden Eigenschaften aufweisen, d.h. explosionsgefährlich, brandfördernd, hochentzündlich, leichtentzündlich, entzündlich, sehr giftig, giftig, gesundheitsschädlich, ätzend, reizend, sensibilisierend, krebserzeugend,

fortpflanzungsgefährdend, erbgutverändernd oder umweltgefährlich sind.⁴ Der Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW), bisher auch Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) genannt, entspricht der höchst zulässigen Konzentration eines Arbeitsstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz, die nach langfristiger Exposition – d.h. 8 Stunden je Arbeitstag – nach derzeitigem Stand der Kenntnis die Gesundheit des Beschäftigten nicht beeinträchtigt. Der AGW und der Überschreitungsfaktor des Gefahrstoffes kann der TRGS 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“ entnommen werden. Der Überschreitungsfaktor (ÜF) entspricht dem Faktor, um den der AGW überschritten werden darf.

Die im Brennstoffzellenlaboratorium verfügbaren Arbeitsstoffe Methan, Propan, Butan und Wasserstoff sind hochentzündliche Gase und somit als Gefahrstoffe zu bezeichnen. Diese Stoffe sind für die technologischen Verfahren zwingend notwendig, eine Substitution durch andere Stoffe ist nicht möglich. Von diesen Gasen geht eine Gefährdung durch Brand und Explosionen aus, auf die im Späteren eingegangen wird. Kohlendioxid und Kohlenmonoxid sind toxische Gase, in den folgenden Abschnitten soll auf Gesundheit beeinträchtigenden Eigenschaften der Stoffe eingegangen werden.

Informationen zu den Stoffen können unter den Einträgen der entsprechenden CAS-Nummern (Registrierungsnummer des Chemical-Abstracts-Service) der GESTIS-Stoffdatenbank des IAG entnommen werden. Die CAS-Registrierungsnummern entsprechen dem international gültigen Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe.

3.2.2 Brenngase

Das im DBI- GTI anliegende Erdgas der Gruppe E stammt aus Russland. Dieses besteht durchschnittlich zu 98,3 Vol – %⁵ aus Methan, des Weiteren aus diversen Alkanen und Inertgasen in geringen Volumenkonzentrationen. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Erdgas als Methan bezeichnet. Die Alkane Methan (CAS-Nr. 74-82-8), Propan (CAS-Nr. 74-98-6) und Butan (n-Butan, CAS-Nr. 106-97-8) wirken hauptsächlich durch Verdrängung von Sauerstoff in der Atemluft und können in höheren Konzentrationen zum Tod durch Ersticken führen. Methan und Wasserstoff (CAS-Nr. 1333-74-0) gelten als gesundheitlich unbedenklich, für diese Stoffe sind keine Arbeitsplatzgrenzwerte vorhanden. Aufgrund der chronischen Toxizität von Butan und Propan sind für diese Stoffe Arbeitsplatzgrenzwerte von 1000 ml/m³ und ein Überschreitungsfaktor 4 festgelegt worden.

⁴ online: vgl Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), i. d. F. des Gesetzes vom 28.07.11, § 3

⁵ Cerbe, 2008, S. 40

3.2.3 Stickstoff

Stickstoff (CAS-Nr. 7727-37-9) ist ein farbloses, geruchloses und gesundheitlich unbedenkliches Gas, das in trockener Luft mit einer Volumenkonzentration von 78,1 %⁶ vorliegt. Stickstoff kann infolge unkontrollierter Freisetzung durch die Verdünnung des Luftsauerstoffs zu Erstickung führen.

3.2.4 Kohlendioxid

Kohlendioxid (CAS-Nr. 630-08-0) liegt als Versorgungsmedium an und ist ein nicht wahrnehmbares Gas. Bei Freisetzung sind die Folgen einer inhalativen Exposition größerer CO₂-Konzentrationen Kopfschmerz, Konzentrationsstörungen und Kurzatmigkeit. Bei Konzentrationen größer 5 Vol.-% wirkt CO₂ narkotisch. Eine andauernde Exposition mit erhöhter CO₂-Konzentration kann zu Carbonatablagerungen in der Knochenmatrix führen⁷, der AGW entspricht einer Konzentration von 5000 ml/m³, ÜF 2(II).

3.2.5 Kohlenmonoxid

Hinzu kommt der Gefahrstoff Kohlenmonoxid (CO), der bei dem technologischen Prozess der Dampfreformierung entsteht. Kohlenmonoxid ist nicht wahrnehmbar und besitzt zu dem zentralen Eisenatom im Hämoglobin eine 200- bis 300-fache Affinität als Sauerstoff besitzt.⁸ Nach dem Einatmen von CO resultiert eine O₂-Unterversorgung der Organe. Nachgewiesen wird CO im Blut durch die Bestimmung des CO-Hb-Gehaltes. Je nach Schwere der Vergiftung stellen sich Symptome von Kopfschmerz, Unwohlsein, Leistungsschwäche und Kurzatmigkeit bis hin zu Lähmungserscheinungen und dem Tod binnen weniger Minuten ein. Nachfolgend sind die LD-50-Werte von Kohlenmonoxid aufgeführt. Diese entsprechen den mittleren letalen Dosen, die für die Hälfte der Personen einer Probandengruppe den Tod zur Folge hätten:

- 40000 ppm (4,00 Vol.-%) während 2 Minuten
- 16000 ppm (1,60 Vol.-%) während 5 Minuten
- 8000 ppm (0,80 Vol.-%) während 10 Minuten
- 3000 ppm (0,30 Vol.-%) während 30 Minuten
- 1300 ppm (0,13 Vol.-%) während 60 Minuten⁹

⁶Cerbe, 2008, S. 69

⁷vgl. Reichl, S. 132

⁸vgl. Reichl, S. 132

⁹online: Stoffdatenbank GESTIS, Eintrag zu CAS-Nr. 630-08-0

Als Langzeitschäden bei niedriger Konzentration können Störungen des zentralen Nervensystems, Muskelschädigungen, Hautschäden und Nierenversagen auftreten.¹⁰ Der AGW des Kohlenmonoxids beträgt 30 ml/m³, die Spitzenbegrenzung liegt bei 60 ml/m³, ÜF 1(II).

Bei der Freisetzung von Kohlenmonoxid wird mittels Störfallbeurteilungs- bzw. AEGL-Werten (Acute Exposure Guideline Levels) in drei Schweregrade unterschieden,

- ab der Konzentration AEGL-1 wird spürbares Unwohlsein vorhergesagt,
- ab der Konzentration AEGL-2 wird das Erleiden schwerwiegender oder langanhaltender Gesundheitseffekte oder fluchtbehindernde Auswirkung vorhergesagt,
- ab der Konzentration AEGL-3 wird das Erleiden lebensbedrohlicher oder tödlicher Effekte vorhergesagt.

Die Werte sind für Expositionsdauern von 8 Stunden, 4 Stunden, 1 Stunde, 30 Minuten und 10 Minuten gegeben (siehe Tabelle 6).

Tabelle 1: AEGL-Werte für Kohlenmonoxid¹¹

Expositionsdauer/ Grenzwert	10 Minuten	30 Minuten	1 Stunde	4 Stunden	8 Stunden
AEGL-1	---*	---*	---*	---*	---*
AEGL-2	420 ppm	150 ppm	83 ppm	33 ppm	27 ppm
AEGL-3	1700 ppm	600 ppm	330 ppm	150 ppm	130 ppm

*AEGL-1 Werte für Kohlenmonoxid nicht vorhanden.

3.2.6 Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle sind für die vorliegenden Arbeitsmittel die Dichte im Normzustand, die relative Dichte d in Bezug auf Luft und die Arbeitsplatzgrenzwerte als zulässige Volumenkonzentration (k_{zul}) sowie Massenkonzentration (c_{zul}) zusammengefasst. Die relative Dichte d entspricht dem Verhältnis der Stoffdichte zur Bezugsdichte, in diesem Fall die Dichte der trockenem Luft im Normzustand, siehe Formel 1.

Formel 1

$$d = \frac{\rho_{n,i}}{\rho_{n,Luft}}$$

¹⁰vgl. Reichl, S. 133

¹¹ Online: tlug-jena.de, 2005

d relative Dichte

$\rho_{n,i}$ Dichte des Stoffes i im Normzustand in kg/m^3

$\rho_{n,Luft}$ Dichte der trockenen Luft im Normzustand in kg/m^3

$$(\rho_{n,Luft} = 1,293 \frac{kg}{m^3})$$

Tabelle 2: Dichte, relative Dichte zur Luft und AGW der Stoffe

Stoff	$\rho_n [kg/m^3]$	d	$k_{zul} [ml/m^3]l$	$c_{zul} [mg/m^3]$
Methan	0,718	0,56	---	---
Propan	2,010	1,55	1000	1800
Butan	2,709	2,06	1000	2400
Wasserstoff	0,090	0,07	---	---
Kohlenstoffmonoxid	1,251	0,97	30	35
Kohlenstoffdioxid	1,978	1,53	5000	9100

Schwere Gase mit einem Dichteverhältnis $d > 1,2$ sammeln sich bei ruhender Umgebungsluft in Bodennähe, leichte Gase mit $d < 0,8^{12}$ steigen auf. Dieses Dichteverhältnis wird für eine Anordnung von Messstellen im Falle ruhender Raumluft notwendig.

3.3 Gefährdungsfaktor Brände und Explosionen

3.3.1 Brandgefährdung

Wenn brennbare Gefahrstoff in den zu beurteilenden Bereichen vorhanden sein können, erfolgt die Beurteilung einer Brandgefährdung gemäß TRGS 800 „Brandschutzmaßnahmen“. Unterschieden wird in normale, erhöhte und hohe Brandgefährdung. Beim Vorhandensein brennbarer Stoffe in nur geringer Menge liegt eine normale Brandgefährdung vor, wenn die Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung und die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Brandes als gering eingestuft werden. Liegt der brennbare Stoff in nicht nur geringer Menge vor und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit mit der Entstehung eines Brandes zu rechnen und eine schnelle unkontrollierte Brandausbreitung oder große Rauch- oder Wärmefreisetzung zu erwarten, liegt eine hohe Brandgefährdung vor. Sind weder die Kriterien der normalen, noch der der hohen Brandgefährdung erfüllt, liegt eine erhöhte Brandgefährdung vor.

¹²vgl. DIN EN 60079-29-2, Juli 2008, S. 16

Entsprechend des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS, „Globally Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals“), sind die Gase

- Methan,
- Propan,
- Butan,
- Wasserstoff und
- Kohlenmonoxid

mit dem H-Satz H220 gekennzeichnet und gelten somit als extrem entzündbare Gase. Diese Kennzeichnung ersetzt nach Ablauf der Übergangsfrist die bisher gültige Kennzeichnung zum Hinweis auf besondere Risiken R12, hochentzündlich. Im regulären Betrieb des Laboratoriums sollten diese Gase in nur geringer Menge vorhanden sein. Im Störfall, bei Fehlgebrauch sowie im Havariefall können jedoch größere Mengen dieser Arbeitsstoffe austreten. Aus diesem Grund liegt im Brennstoffzellenlaboratorium eine erhöhte Brandgefährdung vor.

3.3.2 Explosionsgefährdung

Entzündbare Gase können in Verbindung mit dem Luftsauerstoff explosionsfähige Atmosphäre bilden. Es gibt eine untere (UEG) und eine obere Explosionsgrenze (OEG), die die Konzentrationsgrenzen eines brennbaren Stoffes in Luft bilden, innerhalb derer sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade noch selbstständig fortpflanzen kann. Unterhalb der UEG ist das Brenngas/Sauerstoff-Gemisch zu mager, oberhalb der OEG zu fett für eine selbstständige Flammenfortpflanzung. Der Zündbereich ist der Bereich zwischen der unteren und der oberen Explosionsgrenze einer explosionsfähigen Atmosphäre, in dem eine Explosion auftreten kann. Die Explosionsgrenzen werden auch als Zündgrenzen bezeichnet. Die UEG entspricht der unteren Zündgrenze k_{Zu} , die OEG der oberen Zündgrenze k_{Zo} .

Kann die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre nicht ausgeschlossen werden, ist die TRGS 720 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre“ zur Erkennung und Vermeidung von Explosionsgefährdungen hinzuzuziehen. Als Faustregel gilt, dass mehr als 10 Liter¹³ zusammenhängende explosionsfähige Atmosphäre in geschlossenen Räumen, unabhängig von der Raumgröße, als gefährlich anzusehen ist.

¹³online: vgl. TRGS 721, Juni 2006, S. 8

Für den Fall, dass die Entstehung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre nicht gänzlich auszuschließen ist, ist der Arbeitgeber laut „Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes“ (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) dazu verpflichtet, diese nach Wahrscheinlichkeit des Auftretens, Dauer, dem Wirksamwerden von Zündquellen und dem Ausmaß von Explosionen zu beurteilen.¹⁴

Die folgende Tabelle 3 zeigt die Explosionsgrenzen der im Laboratorium anliegenden brennbaren Gase in Luft auf, zur Vollständigkeit wird auch das Kohlenmonoxid aufgeführt.

Tabelle 3: Zündgrenzen der Brenngase in Luft (20°C) bei $p_n=1,01325 \text{ bar}$ ¹⁵

Stoff	k_{Zu} [Vol.-%]	k_{Zo} [Vol.-%]
Methan CH_4	4,4	17,0
Propan C_3H_8	1,7	10,8
Butan C_4H_{10}	1,4	9,4
Wasserstoff H_2	4,0	77,0
Kohlenmonoxid CO	10,9	76,0

3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Von dem Gefahrstoff Kohlenmonoxid gehen akute und chronische Gesundheitsgefahren aus, eine Gefährdung, die von diesem Stoff ausgeht, ist als sehr hoch zu beurteilen. Die Gefährdung durch die wiederholte Einwirkung der Gefahrstoffe Kohlendioxid, Propan und Butan und daraus resultierende chronische Gesundheitsgefahren sind als gering zu bewerten.

Die Gefährdung durch den Faktor Brand- und Explosionsgefahren ist als sehr hoch einzustufen. Dies ergibt sich durch die mögliche Freisetzung der Gefahrstoffe Methan, Propan, Butan und Wasserstoff, die als extrem entzündbare Gase gekennzeichnet sind.

¹⁴online: vgl. Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) i. d. F. des Gesetzes vom 08.11.2011, § 3 Abs.2

¹⁵vgl. Cerbe, 2008, S. 609

3.5 Zu ergreifende Maßnahmen, Vorgehensweise

Die Gefährdungen durch die Gefahrstoffe sollen durch die Installation einer wirksamen raumluftechnischen Anlage minimiert werden. Dabei sollen die Aspekte der Toxizität und die Gefahr der Entzündung der entsprechenden Gase beachtet und weitgehend minimiert werden. Zur Überwachung der Wirksamkeit der Lüftungsfunktion ist eine Gaswarnanlage vorzusehen.

Grundsätzlich sollen im weiteren Verlauf die möglichen Freisetzungquellen ermittelt und die resultierenden Freisetzungsraten bestimmt werden. Die zur Kompensation dieser Freisetzungsraten notwendigen Volumenströme zur Planung der raumluftechnischen Anlage werden berechnet und die Komponenten der zu installierenden Gaswarnanlage ausgewählt.

4 Gefahrstofffreisetzung

4.1 Ermittlung der Freisetzungsquellen

Zur Ermittlung der Freisetzungsquellen wird die gesamte Rohrleitungsinstallation mit Armaturen und Apparaturen auf Stellen untersucht, aus denen brennbare Gase in die Atmosphäre gelangen können. Grundsätzlich teilt man Freisetzungsquellen entsprechend der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins explosionsfähiger Atmosphäre in folgende Grade ein¹⁶ (Tabelle 4):

Tabelle 4: Freisetzungsgrade

kontinuierlich	ständig auftretende oder erwartungsgemäß langfristig auftretende Freisetzung
primär	periodisch oder gelegentlich bei Normalbetrieb zu erwartende Freisetzung
sekundär	Freisetzung, mit der im Normalbetrieb nicht gerechnet wird, und falls sie auftritt, dann nur selten und kurzzeitig

Als Normalbetrieb bezeichnet man den „Zustand, in dem die Arbeitsmittel oder Anlagen und deren Einrichtungen innerhalb ihrer Auslegungsparameter benutzt oder betrieben werden. [...] Störungen (z.B. Versagen von Dichtungen, von Pumpen oder Flanschen oder die Freisetzung von Stoffen infolge von Unfällen), die z.B. Instandsetzung oder Abschaltung erfordern, werden nicht als Normalbetrieb angesehen.“¹⁷

Je nach der Dichtheit der Anlagenteile unterscheidet man

- auf Dauer technisch dichte Anlagenteile sowie
- technisch dichte Anlagenteile und Anlagenteile mit betriebsbedingtem Austritt brennbarer Stoffe.

An auf Dauer technisch dichten Anlagenteilen ist das Austreten brennbarer Gase nicht zu erwarten, d.h. ein Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre ist nicht zu erwarten. Bei Anlagenteilen, die technisch dicht sind, sind seltene Freisetzungen zu erwarten. Bereiche um technisch dichte Anlagenteile in geschlossenen Räumen gelten als Zonen 2 explosionsfähiger Atmosphäre, Bereiche, in denen im Normalbetrieb nicht mit dem Auftreten einer explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen ist. Die folgende Tabelle 5 veranschaulicht die Einteilung von Anlagen- und

¹⁶vgl. DIN EN 60079-10-1, Oktober 2009, Anhang A, S. 18

¹⁷online: TRGS 720, Juni 2006, S. 3

Ausrüstungsteilen für Gase in technisch dichte bzw. auf Dauer technisch dichte Anlagenteile bzw. Verbindungen gemäß TRGS 720-2 „Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre“.

Tabelle 5: Auf Dauer technisch dichte bzw. technisch dichte Anlagenteile und Rohrleitungsverbindungen

auf Dauer technisch dicht	<p>A) Anlagenteile, wenn sie so ausgeführt sind, dass sie aufgrund ihrer Konstruktion technisch dicht bleiben oder ihre technische Dichtheit durch Wartung und Überwachung ständig gewährleistet wird, z.B.:</p> <p>Geschweißte Anlagenteile mit</p> <ul style="list-style-type: none"> • lösbaren Komponenten, wobei die hierfür erforderlichen lösbaren Verbindungen betriebsmäßig nur selten gelöst und konstruktiv wie die nachgenannten lösbaren Rohrleitungsverbindungen gestaltet sind (Ausnahme: metallisch dichtende Verbindungen), • lösbaren Verbindungen zu Rohrleitungen, Armaturen oder Blinddeckeln, wobei die hierfür erforderlichen lösbaren Verbindungen nur selten gelöst und konstruktiv wie die lösbaren, auf Dauer technisch dichten Rohrleitungsverbindungen gestaltet sind, <p>Anlagenteile, die auch Dichtungselemente enthalten können, wie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wellendurchführungen mit doppelt wirkender Gleitringdichtung, z.B. Pumpen, Rührwerk, • Spaltrohrmotorpumpen, • magnetisch gekoppelte dichtungslose Pumpen, • Armaturen mit Abdichtung der Spindeldurchführung mittels Faltenbalg und Sicherheitsstopfbuchse, • stopfbuchsenlose Armaturen mit Permanent-Magnetantrieb. <p>B) Rohrleitungsverbindungen bzw. Verbindungen zum Anschluss von Armaturen, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • unlösbare Verbindungen, z.B. geschweißt, • lösbare Verbindungen, die betriebsmäßig nur selten gelöst werden, z.B. <ol style="list-style-type: none"> a) Flansche mit Schweißlippendichtung, b) Flansche mit Nut und Feder,
---------------------------	--

	<p>c) Flansche mit Vor- und Rücksprung, d) Flansche mit V-Nuten und V-Nutdichtungen, e) Flansche mit glatter Dichtleiste und besonderen Dichtungen, wie z.B. Weichstoffdichtungen bis PN 25, metall-innerandgefasste Dichtungen oder metallummantelte Dichtungen, wenn bei Verwendung von Normflanschen eine rechnerische Nachprüfung ausreichende Sicherheit gegen die Streckgrenze aufweist, f) metallisch dichtende Verbindungen in Leitungen größer als DN 32, ausgenommen Schneid- und Klemmringverbindungen, g) NPT-Gewinde oder andere konische Gewinde mit Abdichtung im Gewinde bis DN 50, soweit sie nicht wechselnden thermischen Belastungen $\Delta T > 100 \text{ K}$ ausgesetzt sind</p>
technisch dicht	<p>Anlagenteile, wenn bei einer für den Anwendungsfall geeigneten Dichtheitsprüfung oder Dichtheitsüberwachung bzw. –kontrolle, z.B. mit schaubildenden Mitteln oder mit Lecksuchgeräten, eine Undichtheit nicht erkennbar ist, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flansch mit glatter Dichtleiste und keinen besonderen konstruktiven Anforderungen an die Dichtung, • Schneid- und Klemmringverbindungen in Leitungen größer DN 32, • Pumpen, deren Dichtheit nur auf einer einfach wirkenden Gleitringdichtung beruht, • Lösbare Verbindungen (siehe oben), die nicht nur selten gelöst werden

Betrachtet man das Brennstoffzellenlaboratorium, sind weder Freisetzungsquellen mit kontinuierlichen, noch mit primären Freisetzungsgraden aufzufinden, solche mit sekundären Freisetzungsgraden sind jedoch vorhanden. Alle Rohrleitungsverbindungen, abgesehen von denen mit konischen Gewinden und Schneidringverschraubungen, sowie alle Armaturen, abgesehen von den Gasmagnetventilen, sind als sekundäre Freisetzungsquellen zu betrachten.

Alle technischen Apparaturen, die dem Prozess der Brenngasaufbereitung dienen, Brennstoffzelleneinheiten, Brennkammern sowie Gasanalysegeräte werden in

Absprache mit dem betrieblichen Betreuer als auf Dauer technisch dichte Anlagenteile betrachtet.

4.2 Bestimmung der Freisetzungsraten

Im folgenden Abschnitt sollen die Freisetzungsraten bestimmt werden. Das geschieht zum einen durch die Betrachtung von Undichtheiten an Armaturen zur Beurteilung der explosionsgefährdeten Bereiche, zum anderen durch die Betrachtung einer Leckage infolge des Versagens eines Dichtelementes, um im Späteren den notwendigen Zuluftvolumenstrom zur Verminderung einer Gefährdung aufgrund akut toxischer Einwirkungen auf den Beschäftigten zu bestimmen.

4.2.1 Freisetzung an technisch dichten Anlagenteilen

Bei der Bestimmung von Freisetzungen an Dichtsystemen wird sich in Absprache mit dem betrieblichen Betreuer auf die VDI 2440 „Emissionsminderung Mineralölraffinerien“ berufen. Diese Richtlinie gibt Richtwerte für durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes an Durchführungen der Absperr- und Regelorgane sowie an Flanschabdichtungen vor und bezieht sich bei den Fördergütern sowohl auf gasförmige Kohlenwasserstoffe, als auch auf die bei der Bezinreformierung entstehenden Gasgemische mit größeren Mengen an Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Damit sollen die Richtwerte der VDI 2440 auf die mit den im Brennstoffzellenlaboratorium anliegenden Brenngasen beaufschlagten Armaturen und solche in der Prozessanlage der Brenngasaufbereitung übertragen werden. Zudem belegen Untersuchung gebräuchlicher Gas-Ventilkombinationen sowie Verbindungsarten bei Prüfungen auf Dichtheit mit einem Prüfmedium aus Wasserstoff und Methan zu gleichen Raumanteilen, dass an Pressverbindungen (Kupfer, Stahl) sowie an Flanschverbindungen mit Hartfaserdichtwerkstoff oder Gummi als Dichtwerkstoff keine höhere Freisetzungsraten als bei Beaufschlagung mit Methan zu erwarten sind.¹⁸

Für die entsprechenden Dichtsysteme an den Durchführungen der Absperr- und Regelorganen sowie bei Flanschabdichtungen sind die in Tabelle 6 vorliegenden Werte gegeben.

¹⁸vgl. ESSBACH, 2008, S. 67

Tabelle 6: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes an Durchführungen der Absperr- und Regelorgane sowie bei Flanschabdichtungen¹⁹

Dichtsystem mit nachfolgendem Dichtungstyp	Durchschnittliche gasförmige Emission des Fördergutes im laufenden Betrieb bezogen auf den mittleren Dichtungsumfang mg/(s * m)
a) Durchführungen	
Stopfbuchse mit Packung	1,0
Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring	0,1
Stopfbuchse mit Packung; Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring (mit Nachweis über die Einhaltung der spez. Leckagerate)	0,01
metallischer Faltenbalg, abgedichtet	0,01
Stopfbuchse mit Packung und Sperrmedium; metallischer Faltenbalg, beidseitig verschweißt	keine Emission
b) Flanschabdichtungen	
Weichstoffdichtung (Faserstoff-, PTFE-, oder Graphitplatte); Weichstoff-Metall-Dichtung; Metall-Weichstoff-Dichtung	0,01
Weichstoffdichtung (Elastomerdichtung) Weichstoff-Metall-Dichtung; Metall-Weichstoff-Dichtung	0,001
Metalldichtung; Schweißdichtung	keine Emission

Mit den gegebenen Werten soll für eine mit Flanschdichtungen aus PTFE-Platten in das Rohrleitungssystem eingebauten Armatur mit einem Nenndurchmesser DN 20 der Druckstufe PN 10 und einer Abdichtung der Durchführung mit Stopfbuchse und Packung ohne Nachweis über Einhaltung der spezifischen Leckrate berechnet werden. Da hiermit die gasförmige Emission des Fördergutes an der denkbar ungünstigsten Armatur berechnet wird, soll das Ergebnis der Berechnung mit ausreichender Sicherheit dem Maximalwert der Freisetzungsrates an einer Armatur gleichgesetzt werden.

¹⁹vgl. VDI 2440, November 2000, Tabellen 6, 7

Der Emissionsmassenströme werden anhand der Formel 2 berechnet.

Formel 2

$$\dot{m}_i = f_{E,i} * U_{D,i} * 3,6 * 10^{-3} = f_{E,i} * \pi * d_{D,i} * 3,6 * 10^{-3}$$

\dot{m}_i Emissionsmassenstrom an Dichtelement i in kg/h

$f_{E,i}$ Emissionsfaktor für Dichtelement i (siehe Tabelle 5) in $mg/(s * m)$

$U_{D,i}$ mittlerer Umfang des Dichtelementes i in m

$d_{D,i}$ mittlerer Durchmesser des Dichtelementes i in m

Die Spindeldurchmesser der verbauten Armaturen betragen 10 mm, bei Dichtelementen zur Abdichtung von Wellen entspricht der mittlere Durchmesser des Dichtelementes dem Durchmesser der Welle. Somit ergibt sich für den Emissionsmassenstrom $\dot{m}_1 = 113 \text{ mg/h.}$, verursacht von der Spindelabdichtung.

$$\dot{m}_1 = 1,0 \frac{mg}{s * m} * \pi * 0,01m * 3,6 * 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_1 = 1,13 * 10^{-4} \frac{kg}{h}}}$$

Die Dichtfläche des Flansches wird als Typ B gemäß DIN EN 1092-1 angenommen. Damit ergibt sich für die Druckstufe PN 10 ein Außendurchmesser der Flanschdichtfläche von 58 mm.

Die entsprechende Flachdichtung gemäß DIN EN 1514-1 hat einen Innendurchmesser von 27 mm, der Außendurchmesser beträgt 61 mm. Somit ergibt sich die effektive Dichtfläche mit einem Außendurchmesser von 58 mm und einen Innendurchmesser von 27 mm. Die Freisetzungsrate je Flanschverbindung beträgt aufgerundet $\dot{m}_2 = 5 \text{ mg/h.}$

$$\dot{m}_2 = 0,01 \frac{mg}{s * m} * \pi * \frac{(0,027 + 0,058)m}{2} * 3,6 * 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_2 = 4,81 * 10^{-6} \frac{kg}{h}}}$$

Die Gesamtemissionsmassenstrom ergibt sich aus der Summe der Freisetzungsraten für das Dichtsystem an der Durchführung der Armatur sowie der beiden Flanschabdichtungen.

$$\dot{m}_{ges} = \sum \dot{m}_i = \dot{m}_1 + 2\dot{m}_2$$

$$\dot{m}_{ges} = 1,13 * 10^{-4} \frac{kg}{h} + 2 * 0,05 * 10^{-4} \frac{kg}{h}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{ges} = 1,23 * 10^{-4} \frac{kg}{h}}}$$

Die Gesamtemissionsmassenstrom an der denkbar ungünstigsten Armatur beträgt $\dot{m}_{ges} = 123 \text{ mg/h}$.

4.2.2 Freisetzung durch eine Leckageöffnung

Da bei einer Freisetzung des Reformats auf Grund der akuten Toxizität des Kohlenmonoxids unmittelbare Lebensgefahr besteht, soll die Freisetzungsrates des Gasgemisches beim Versagen eines Dichtelementes an der Stelle der höchsten Kohlenmonoxidkonzentration ermittelt werden.

Vom Anlagenbetreiber wurde angegeben, dass prozessbedingt bei Temperaturen um 200°C ein Überdruck von bis zu 500 mbar herrscht, im Reformat liegt das Kohlenmonoxid mit einem maximalen Raumanteil von 10 Vol.-% vor. Für diesen Fall soll ein Gasgemisch mit folgender Zusammensetzung betrachtet werden:

- Wasserstoff: 80 Vol.-%
- Kohlenmonoxid: 10 Vol.-%
- Kohlendioxid: 10 Vol.-%

Die Berechnung der Freisetzungsrates des Gases soll wie in der DIN EN 60079-10-1 beschrieben durchgeführt werden. Die Freisetzungsrates von Gas ohne gedrosselte Geschwindigkeit, d.h. mit einer Freisetzungsrates unterhalb der Schallgeschwindigkeit, wird mit Formel 3 näherungsweise bestimmt.

Formel 3

$$\dot{m} = S * p \sqrt{\frac{M}{R * T} \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right) \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma}}$$

- \dot{m} Freisetzungsrates des Gases in kg/s
 S Öffnungsquerschnitt, durch den das Gas austritt in m^2
 p Druck innerhalb des Behälters in Pa
 p_0 Druck außerhalb des Behälters in Pa
 M molare Masse des Gasgemisches in $kg/kmol$

- R universelle Gaskonstante, $8314 \text{ J}/(\text{kmol} * \text{K})$
 T absolute Temperatur im Behälter in K
 γ polytrope Kennzahl der adiabatischen Ausdehnung

Das Gasgemisch soll als ideales Gas betrachtet werden, daraus ergibt sich die Berechnung der polytropen Kennzahl nach Formel 4:

Formel 4

$$\gamma = \frac{M * c_p}{M * c_p - R}$$

- γ polytrope Kennzahl der adiabatischen Ausdehnung
 M Molekülmasse des Gasgemisches in kg/kmol
 c_p spez. Wärmekapazität des Gasgemisches bei konstantem Druck in $\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$
 R universelle Gaskonstante, $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} * \text{K})$

Die spezifische Wärmekapazität des Gasgemisches bei konstantem Druck ergibt sich aus der Summe der Produkte der stoffspezifischen Wärmekapazitäten multipliziert mit den dazugehörigen Massenanteilen des jeweiligen Stoffes (Formel 5).

Formel 5

$$c_p = \sum (c_{p,i} * x_i)$$

- c_p spez. Wärmekapazität des Gasgemisches bei konstantem Druck in $\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$
 $c_{p,i}$ spezifische Wärmekapazität des Gases i in $\text{J}/(\text{kg} * \text{K})$
 x_i Massenanteil des Gases i

Die spezifischen Wärmekapazitäten der Gase sind temperaturabhängig. Eine Berechnung dieser wird näherungsweise gemäß VDI-Wärmeatlas mittels Polynom durchgeführt. Für eine Temperatur von 200 °C sind die spezifischen Wärmekapazitäten der Gase wie folgt angegeben:

Wasserstoff: $c_{p,H_2} = 14,44 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$

Kohlenmonoxid: $c_{p,CO} = 1,063 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$

Kohlendioxid: $c_{p,CO_2} = 0,985 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$

Der Massenanteil des jeweiligen Gases kann gemäß Formel 6 mit der Dichte der Gaskomponente i nach Formel 7 und der Dichte des Gasgemisches laut Formel 8 berechnet werden. Die molare Masse M des Gasgemisches wird mit Formel 9 berechnet.

$$x_i = \frac{r_i * \rho_i}{\rho_{gem}}$$

Formel 6

$$\rho_i = \frac{p_b * M_i}{RT}$$

Formel 7

$$\rho = \sum (\rho_i * r_i)$$

Formel 8

$$M = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{M_i}}$$

Formel 9

x_i Massenanteil des Gases i

r_i Volumenkonzentration des Gases i

ρ_i Dichte des Gases i in kg/m^3

ρ Dichte des Gasgemisches in kg/m^3

M_i Molare Masse des Gases i in $kg/kmol$

$$M_{H_2} = 2,02 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{CO} = 28,01 \text{ kg/kmol}$$

$$M_{CO_2} = 44,01 \text{ kg/kmol}$$

M Molekülmasse des Gasgemisches in $kg/kmol$

p_b atmosphärischer Druck, $p_b = 1013,25 * 10^2 \text{ Pa}$

R universelle Gaskonstante, $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} * \text{K})$

T Bezugstemperatur in K

Damit ergeben sich folgende Dichten und Massenanteile:

$$\rho_{H_2} = 0,052 \text{ kg/m}^3 \quad x_{H_2} = 0,183$$

$$\rho_{CO} = 0,721 \text{ kg/m}^3 \quad x_{CO} = 0,317$$

$$\rho_{CO_2} = 1,134 \text{ kg/m}^3 \quad x_{CO_2} = 0,500$$

$$\rho = 0,227 \text{ kg/m}^3$$

Berechnungsbeispiel Dichte H_2 (Formel 7):

$$\rho_{H_2} = \frac{101325 \frac{N}{m^2} * 2,02 \frac{kg}{kmol}}{8314 \frac{N*m}{kmol*K} * (273,15 + 200)K}$$

$$\underline{\underline{\rho_{H_2} = 0,052 \frac{kg}{m^3}}}}$$

Dichte des Gasgemisches (Formel 8):

$$\rho_{gem} = (0,8 * 0,052 + 0,1 * 0,721 + 0,1 * 1,134) \frac{kg}{m^3}$$

$$\underline{\underline{\rho_{gem} = 0,227 \frac{kg}{m^3}}}}$$

Berechnungsbeispiel Massenanteil H₂ (Formel 6):

$$x_{H_2} = \frac{0,8 * 0,052 \frac{kg}{m^3}}{0,227 \frac{kg}{m^3}}$$

$$\underline{\underline{x_{H_2} = 0,183}}}$$

Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Gasgemisches mit Formel 5 ergibt einen Wert von $c_p = 3472 \text{ J}/(\text{kg} * \text{k})$.

$$c_p = (0,183 * 14,44 + 0,317 * 1,063 + 0,5 * 0,985) \frac{kJ}{kg * K}$$

$$\underline{\underline{c_p = 3,472 \frac{kJ}{kg * K} = 3472 \frac{J}{kg * K}}}}$$

Die molare Masse des vorliegenden Gasgemisches wurde nach Formel 9 ermittelt und beträgt $M = 8,83 \text{ kg}/\text{kmol}$.

$$M = \frac{1}{\left(\frac{0,183}{2,02} + \frac{0,317}{28,01} + \frac{0,5}{44,01}\right) \frac{kmol}{kg}}$$

$$\underline{\underline{M = 8,83 \frac{kg}{kmol}}}}$$

Damit kann die polytrope Kennzahl der adiabatischen Ausdehnung mit Formel 2 berechnet werden:

$$\gamma = \frac{8,83 \frac{kg}{kmol} * 3472 \frac{J}{kg * K}}{8,83 \frac{kg}{kmol} * 3472 \frac{J}{kg * K} - 8314 \frac{J}{kmol * K}}$$

$$\underline{\underline{\gamma = 1,372}}}$$

Falls der Druck innerhalb des Behälters den kritischen Druck p_c übersteigt, wird die Freisetzungsgeschwindigkeit an der Austrittsstelle auf Schallgeschwindigkeit gedrosselt. Der kritische Druck p_c wird nach Formel 10 berechnet.

Formel 10

$$p_c = p_0 \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

p_c kritischer Druck

p_0 Druck außerhalb des Behälters

Daraus ergibt sich ein kritischer Druck von $p_c = 1901 \text{ hPa}$.

$$p_c = 1013,25 \text{ hPa} \left(\frac{2,372}{2} \right)^{\frac{1,372}{0,372}}$$

$$\underline{\underline{p_c = 1900,9 \text{ hPa}}}$$

Mit einem Überdruck von 500 mbar beträgt der Absolutdruck p im Inneren des Behälters 1513,25 hPa und liegt somit deutlich unterhalb des kritischen Druckes p_c . Somit erfolgt die Freisetzung ohne gedrosselte Geschwindigkeit, die Freisetzungsrates kann mit Formel 3 berechnet werden.

Als Loch wird ein „schwerwiegender Fehler in Folge des Bruchs der Verbindung“ einer ringförmigen Verbindungsstelle und ein Lochquerschnitt von $S = 0,5 \text{ mm}^2$ ²⁰ angenommen.

Somit wird mit folgenden Parametern die Freisetzungsrates bestimmt:

$$S = 5 * 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$p_0 = 101325 \text{ Pa}$$

$$p = 151325 \text{ Pa}$$

$$\gamma = 1,372$$

$$M = 8,83 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$R = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} * \text{K}}$$

$$T = 473,15 \text{ K}$$

²⁰vgl. E DIN EN 60079-10-1, Tabelle B.2

$$\dot{m} = 5 * 10^{-7} m^2 * 151325 Pa * \sqrt{\frac{8,83 \frac{kg}{kmol} * 7,376}{8314 \frac{J}{kmol * K} * 473,15 K} \left(1 - \left(\frac{101325}{151325} \right)^{0,372} \right) * \left(\frac{101325}{151325} \right)^{\frac{1}{1,372}}}$$

$$\underline{\underline{\dot{m} = 7,38 * 10^{-5} \frac{kg}{s}}}$$

Aus einem Leck mit einem Lochquerschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$ würden innerhalb einer Sekunde ca. $7,38 * 10^{-3} \text{ kg}$ des Gasgemisches austreten. Da bei dieser Betrachtung von einem freien Austritt ohne die Berücksichtigung der Öffnungseigenschaften und der Viskosität der Medien ausgegangen wird, ist das Ergebnis als konservativ einzuschätzen. Daraus ergibt sich für das austretende Kohlenmonoxid ein Massenstrom \dot{m}_{CO} von $23,4 \text{ mg/s}$ bzw. $84,24 \text{ g/h}$.

$$\dot{m}_{CO} = 0,317 * 7,38 * 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{CO} = 2,340 * 10^{-5} \frac{kg}{s} = 8,424 * 10^{-2} \frac{kg}{h}}}$$

4.3 Explosionszonen

4.3.1 Zoneneinteilung

Generell unterscheidet man folgende Zonen²¹:

- Zone 0: Bereich, in dem gefährliche Explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.
- Zone 1: Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen bilden kann.
- Zone 2: Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Im Inneren der Brenngasrohrleitungen sowie der Reformierapparaturen sind keine explosionsfähigen Atmosphären zu erwarten, da das Vorhandensein von Sauerstoff ausgeschlossen werden kann. Bei der Ermittlung der Freisetzungquellen wurden bereits die technisch dichten Rohrleitungsverbindungen sowie die Armaturen als

²¹online: Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), Anhang 3

Quellen von Freisetzungen ausgemacht. Damit wird das seltene und kurzzeitige Vorhandensein einer explosionsfähigen Atmosphäre angenommen, die direkte Umgebung dieser Anlagenteile muss somit als Zone 2 betrachtet werden.

4.3.2 Zonenausdehnung

Die Ausdehnung der Explosionszone beschreibt den Abstand von der Freisetzungsquelle zu der Stelle, an der das Gas/Luft-Gemisch auf eine Brenngaskonzentration unterhalb der UEG unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors verdünnt wurde. Das Volumen der Zonen ist direkt abhängig von dem Lüftungsgrad und dem von der Lüftungsanlage realisierten Luftwechsel, da ein hoher Luftwechsel eine wirksamere Verdünnung gewährleistet als ein geringerer. Mit Hilfe einer technischen Lüftung kann folglich die Ausdehnung der Zonen sowie die Verweilzeit einer explosionsfähigen Atmosphäre verringert oder die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre verhindert werden.

Bei der Ermittlung des Planungsvolumenstromes soll dieser Aspekt berücksichtigt werden, der Mindestluftwechsel ist so zu wählen, dass die Zonen 2 in vernachlässigbarer Ausdehnung vorliegen.

4.4 Maßnahmen

Die Explosionsschutzmaßnahmen werden unter Beachtung der „Handlungshilfe für Explosionsschutzmaßnahmen“ (siehe Anhang I) der TRGS 720 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines“ ermittelt. Diese sieht als primären Explosionsschutz Maßnahmen vor, die die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre soweit wie möglich einschränken. Aus diesem Grund ist eine technische Lüftung und zur Überwachung der Wirksamkeit dieser eine Gaswarnanlage mit Alarmgabe und automatischer Auslösung von Schaltungen zu installieren. Bei Erreichen einer festgelegten Alarmschwelle der Konzentration von brennbarem Gas in der Luft sollen neben der Alarmgabe (optisches und ggf. akustisches Signal) durch automatische Schaltvorgänge Maßnahmen ausgelöst werden, die die Ausbreitung bzw. Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre sicher verhindern sollen. Mit der Verhinderung der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre entfällt die Einstufung als Zone 2 und es sind keine weiteren Explosionsschutzmaßnahmen, d.h. die Vermeidung wirksamer Zündquellen und konstruktive Maßnahmen zur Beschränkung der Explosionsauswirkung, erforderlich. Des Weiteren soll die Gaswarnanlage bei Erreichen des Schwellenwertes von Schadstoffkonzentrationen die Verringerung dieser durch eine automatische Auslösung von Notfunktionen veranlassen.

5 Raumluftechnische Anlage

5.1 Allgemeine Anforderungen

Die DIN 1946-7 „Raumluftechnik; Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien“ gibt die Planungsgrundlagen für die Auslegung der RLTA vor. Die RLTA muss die im Labor freigesetzten Gefahrstoffe zu Vermeidung gesundheitlicher Schäden der Beschäftigten ausreichend stark verdünnen und abführen. Die Behaglichkeitsanforderungen gemäß DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme“ an die Luftgeschwindigkeit, Temperatur, und Feuchtigkeit sind, sofern nicht anders vereinbart, einzuhalten. Zur Begrenzung der Auswirkungen bei Schadstofffreisetzung ist die Anlage als Unterdruckanlage auszulegen, wodurch eine Überströmung kontaminierter Raumluft in Umgebungsräume weitgehend vermieden wird. Demzufolge sind eine Zuluft- sowie eine Abluftanlage notwendig. Die Anlagen sollen außerhalb des bestimmungsgemäßen Laborbetriebs eine Absenkung des Volumenstroms realisieren können. Als Planungsgrundlage zur Auslegung der RLTA ist in der Regel ein Abluftvolumenstrom von $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ²², bezogen auf die Hauptnutzfläche des Laboratoriums, anzunehmen, auf Grund besonderer Anforderungen kann dieser Auslegungsvolumenstrom höher ausfallen. Die dem Raum zugeführte Zuluft muss aufbereitete Außenluft sein. Eine Mischung mit Abluft zur thermischen Aufbereitung der Außenluft ist nur zulässig, wenn keine gefährliche Gefahrstoffkonzentration auftreten kann. Luftbelastungen wie Wärme oder Schadstoffe sollen nach Möglichkeit direkt am Ort der Freisetzung abgeführt werden, damit diese nicht verteilt werden. Bei der Planung soll berücksichtigt werden, dass der von der gesamten RLTA ausgehende Schalldruckpegel im Raum ohne die Vereinbarung höherer Werte den Höchstwert von 52 dB(A) ²³ nicht überschreitet.

5.2 Explosionsschutzanforderungen

Aus Gründen des Explosionsschutzes muss eine explosionsgeschützte Abluftanlage vorgesehen werden, wenn die Abführung eines Gas-/Luftgemisches mit Brenngaskonzentrationen innerhalb der Explosionsgrenzen möglich ist. Der Abluftventilator muss, falls er sich z.B. in einem Bereich der Zone 2 befindet, für einen Einsatz in Zone 2 ausgelegt sein und mindestens der Kategorie „II 3 G“²⁴

²²vgl. DIN 1946-7, S.11

²³vgl. DIN 1946-7, S.15

²⁴vgl. DIN EN 60079-0, S. 17

entsprechen. Mit dem Sicherheitskonzept wird die Bildung der Zone 2 vermieden bzw. das Ausmaß dieser auf ein vernachlässigbares Maß eingeschränkt, eine explosionsgeschützte Ausführung des Abluftventilators ist nicht notwendig.

5.3 Planungsvolumenströme

Der Planungsvolumenstrom der Zuluftanlage ergibt sich aus dem Maximum aus lastbedingtem und hygienischem Volumenstrom. Zur Realisierung des erforderlichen Unterdruckes ergibt sich der Planungsvolumenstrom der Abluftanlage aus dem Volumenstrom der Zuluftanlage. Die Zuluft soll in Absprache mit dem Betreiber zur Realisierung des Lüftungskonzeptes isotherm mit 20 °C in den Raum eingeführt werden, Wärme- sowie Feuchtelasten werden bei der Auslegung der Anlagenkomponenten nicht betrachtet.

5.3.1 Zuluftvolumenstrom

5.3.1.1 Hygienisch bedingter Außenluftvolumenstrom

Der hygienisch bedingte Volumenstrom soll den Anforderungen der ASR 5 „Lüftung“ genügen. Diese sieht einen Außenluftvolumenstrom von 40 – 60 m³ je Person und Stunde bei überwiegend nicht sitzender Tätigkeit vor. Bei einer Belegung des Laboratoriums mit maximal sechs Personen ergibt sich aus einem gewählten Volumenstrom von 50 m³/(h, n_p) ein hygienisch bedingter Außenluftvolumenstrom \dot{V}_{AU} von 300 m³/h, die Berechnung erfolgt nach Formel 11.

Formel 11

$$\dot{V}_{AU} = n_p * \dot{V}_{AU,P}$$

\dot{V}_{AU} Außenluftvolumenstrom in m³/h

n_p Personenanzahl

$\dot{V}_{AU,P}$ hygienisch bedingter Außenluftvolumenstrom je Person in m³/(h, P)

$$\dot{V}_{AU} = 6 * 50 \frac{m^3}{h, P}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{AU} = 300 m^3/h}}$$

5.3.1.2 Einschränkung der Explosionszonen

Die Lüftungsanlage soll das Volumen explosionsfähiger Atmosphäre auf ein unbedenkliches Maß beschränken und somit die Verminderung der Ausdehnung der Zone 2 um die bereits betrachtete ungünstigste Armatur auf vernachlässigbare Ausmaße begrenzen.

Bei der Berechnung des Zuluftvolumenstromes zur Einschränkung der Explosionszonen wird auf das Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Lüftungsgrades nach DIN EN 60079-10-1 verwiesen. Dieses Verfahren bezeichnet das Volumen explosionsfähiger Atmosphäre als hypothetisches Volumen V_Z , in dem die mittlere Konzentration eines brennbaren Gases je nach Freisetzungsgrad dem 0,25-fachen oder 0,5-fachen der UEG entspricht. Dies bedeutet, dass in einem Großteil des Volumens V_Z ein Gasgemisch mit einer Brenngaskonzentration unterhalb der UEG liegt, in einem deutlich kleineren Teil ein explosionsfähiges Gemisch.

Für die lokale Verdünnung des maximalen Emissionsmassenstromes \dot{m}_{max} des brennbaren Stoffes wird ein Mindestzuluftvolumenstrom \dot{V}_{min} nach Formel 12 berechnet.

Formel 12

$$\dot{V}_{min} = \frac{\dot{m}_{max}}{k * UEG_m} * \frac{T}{293K}$$

\dot{V}_{min} Mindestzuluftvolumenstrom in m^3/h

\dot{m}_{max} höchste Freisetzungsrate in kg/h

T Umgebungstemperatur in K

k Sicherheitsfaktor

$k = 0,25$ für ständige oder primäre Freisetzungsgrade

$k = 0,5$ für sekundäre Freisetzungsgrade

UEG_m massenbezogene untere Explosionsgrenze in kg/m^3

Die maximale Freisetzungsrate \dot{m}_{max} entspricht hier dem Gesamtemissionsmassenstrom, der bereits mit $\dot{m}_{ges} = 123 \text{ mg/h}$ berechnet. Für die Betrachtung des Brennstoffzellenlaboratoriums wird der Mindestzuluftvolumenstrom für die Verdünnung austretenden Wasserstoffs berechnet, da dieser mit $3,4g/m^3$ die geringste massenbezogene UEG aufweist, der Sicherheitsfaktor wird auf $k = 1$ korrigiert, da bei der Ermittlung der Freisetzungsrate bereits konservativ

vorgegangen wurde. Die Raumtemperatur beträgt 20 °C bzw. 293 K, eine Temperaturkorrektur ist nicht notwendig.

$$\dot{V}_{min} = \frac{1,23 * 10^{-4} \frac{kg}{h}}{3,4 * 10^{-3} \frac{kg}{m^3}}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{min} = 3,618 * 10^{-2} \frac{m^3}{h}}}}$$

Das hypothetische Volumen V_Z ist laut Formel 13 das Produkt aus dem Gütegrad f und dem Quotienten aus dem Mindestzuluftvolumenstrom \dot{V}_{min} , dividiert durch die Anzahl der Raumlufwechsel C . Der Gütegrad bewertet die Lüftung im Hinblick auf die Fähigkeit der Verdünnung explosionsfähiger Atmosphäre, wobei unter Idealbedingungen $f = 1$ sowie bei einer Behinderung des Luftstromes $f = 5$ beträgt.

Formel 13

$$V_Z = f * \frac{\dot{V}_{min}}{C}$$

V_Z hypothetisches Volumen in m^3

\dot{V}_{min} Mindestzuluftvolumenstrom in m^3/h

f Gütegrad der Lüftung

C Anzahl der Raumlufwechsel in h^{-1}

Die Anzahl der Raumlufwechsel entspricht dem Quotienten aus dem tatsächlichen Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{zu} und dem Raumvolumen V_0 (Formel 14).

Formel 14

$$C = \frac{\dot{V}_{zu}}{V_0}$$

C Anzahl der Raumlufwechsel in h^{-1}

\dot{V}_{zu} Zuluftvolumenstrom in m^3/h

V_0 Raumvolumen in m^3

Für die Ermittlung des erforderlichen Volumenstroms werden die Formeln 13 und 14 zu der Formel 15 zusammengefasst und diese wird nach dem Zuluftvolumenstrom umgestellt:

Formel 15

$$\dot{V}_{zu,erf} = \frac{f * \dot{V}_{min} * V_0}{V_Z}$$

$\dot{V}_{zu,erf}$ erforderlicher Zuluftvolumenstrom in m^3/h

f Gütegrad der Lüftung

\dot{V}_{min} Mindestzuluftvolumenstrom in m^3/h

V_0 Raumvolumen in m^3

V_Z hypothetisches Volumen in m^3

Für das Brennstoffzellenlaboratorium ist eine Raumlufftführung als tangentielle Verdünnungslüftung vorgesehen, mit einer hohen Fähigkeit der Verdünnung der Atmosphäre im Raum wird ein Gütegrad mit $f = 1$ festgelegt. Das hypothetische Volumen V_Z soll dem definitionsgemäß minimalen Wert gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre von 10l entsprechen. Mit dem Raumvolumen von $V_0 = 110 m^3$ ergibt sich ein erforderlicher Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_{zu,erf} = 398,0 m^3/h$.

$$\dot{V}_{zu,erf} = \frac{1 * 3,618 * 10^{-2} \frac{m^3}{h} * 110 m^3}{0,01 m^3}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{zu,erf} = 398,0 \frac{m^3}{h}}}$$

5.3.1.3 Vermeidung lokaler akut toxischer Gefahrstoffkonzentrationen

Damit ein Gassensor das Vorhandensein des akut toxischen Kohlenmonoxids überhaupt registrieren kann, muss sich das Gas von der Quelle ausgehend bereits bis zur Messstelle ausgebreitet haben, zudem verfügt der Sensor über eine gewisse Trägheit. Im Falle einer in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Leckage ist mit einer Freisetzung von Kohlenmonoxid mit einem Massenstrom von $\dot{m}_{CO} = 84,24 g/h$ zu rechnen. Dies würde bei unzureichender Verdünnung durch technische Lüftung zu lokalen Atmosphären mit lebensgefährlicher Kohlenmonoxidkonzentration führen.

Zur Vermeidung einer solchen lokalen akut toxischen Konzentration des Gefahrstoffs Kohlenmonoxid soll die Lüftungsanlage eine Verdünnung des austretenden Gases insofern gewährleisten, dass bis zur Detektion des Kohlenmonoxids und der Auslösung automatischer Gegenmaßnahme keine unmittelbare Gefahr der Gesundheitsbeeinträchtigung des Beschäftigten besteht.

Mit der Verwendung des AEGL-2-Wertes für eine 30-minütige Exposition ergibt sich ein Grenzkonzentration von $k_{\max} = 150 \text{ ppm}$ bzw. $c_{\max} = 181,1 \text{ mg/m}^3$ für das Kohlenmonoxid in der Luft. Der erforderliche Zuluftvolumenstrom zur Begrenzung der Kohlenmonoxidkonzentration wird mit Formel 16 berechnet. Bei einer mittleren CO-Konzentration von $0,2 \text{ ppm}^{25}$ in der Erdatmosphäre ist diese bei Verwendung von Außenluft vernachlässigbar gering.

Formel 16

$$\dot{V}_{zu,erf} = \frac{\dot{m}_{max}}{c_{m,max} - c_{m,zu}}$$

$\dot{V}_{zu,erf}$ erforderlicher Zuluftvolumenstrom in m^3/h

\dot{m}_{max} maximale Freisetzungsrates des Gefahrstoffes in kg/h

c_{max} zulässige Massenkonzentration des Gefahrstoffes in der Raumluf in kg/m^3

c_{zu} Massenkonzentration des Gefahrstoffes in der Zuluft in kg/m^3

$$\dot{V}_{zu,erf} = \frac{8,424 * 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{18,11 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{zu,erf} = 465,1 \text{ m}^3/\text{h}}}$$

Es resultiert ein erforderlicher Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_{zu,erf} = 465,1 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.3.1.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Berechnung des hygienisch bedingten Volumenstroms ergab einen notwendigen Außenluftvolumenstrom von $\dot{V}_{AU} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$. Der erforderliche Mindestluftwechsel zur Einschränkung der Explosionszonenausdehnung auf ein vernachlässigbares Ausmaß macht einen Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_{zu,erf} = 398,0 \text{ m}^3/\text{h}$ erforderlich. Die Verdünnung einer leakagebedingten Freisetzung des Reformats mit maximaler Kohlenmonoxidkonzentration auf einen AEGL-2-Wert für den Expositionszeitraum einer Stunde erfordert einen Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_{zu,erf} = 465,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Aufgrund des betrachteten Emissionsmassenstroms von $123 \text{ mg}/\text{h}$ ist auch mit geschlossenem Magnetventil bei gefüllten Rohrleitungen über mehrere Stunden mit einer Freisetzung zu rechnen. Zur Vermeidung der Ex-Zonen sollte die Lüftungsanlage daher immer mit dem zur Kompensation notwendigen Volumenstrom betrieben werden. Der hierfür berechnete Volumenstrom von $398,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ist für den Dauerbetrieb aus energetischer Sicht relativ aufwändig, aus diesem Grund soll der Volumenstrom zur

²⁵vgl. Cerbe, 2008, S.69

Vermeidung der Ex-Zonen durch korrigierte Freisetzungsraten infolge der Betrachtung besser abgedichteter Armaturen neu berechnet werden.

5.3.1.5 Korrektur von armaturenbedingter Freisetzungen und resultierendem Zuluftvolumenstrom

Unter der Prämisse, dass im Brennstoffzellenlaboratorium nur hochwertig abgedichtete Absperr- und Regelorgane mit Nachweis über die Einhaltung der spezifischen Leckagerate von $10^{-4} \text{mbar} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ bei Temperaturen am Dichtsystem bis $250 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. von $10^{-2} \text{mbar} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ²⁶ bei Temperaturen größer oder gleich $250 \text{ }^\circ\text{C}$ installiert werden, soll die für diese Armaturen zu erwartende Freisetzungsraten berechnet werden. Die durchschnittliche gasförmige Emission an den Dichtungselementen dieser Armaturen beträgt $0,01 \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{m})$.

Unter gleichen Randbedingungen resultiert aus der Freisetzung $\dot{m}_1 = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ kg/h}$ an der Spindelabdichtung (Formel 2) eine Gesamtfreisetzungsrate von $10,75 \text{ mg/h}$ an der Armatur.

$$\dot{m}_1 = 0,01 \frac{\text{mg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \cdot \pi \cdot 0,01 \text{ m} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 1,13 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{ges} = 1,13 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 2 \cdot 4,81 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{ges} = 10,75 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{h}}}}$$

Daraus ergibt sich nach Formel 12 der Mindestvolumenstrom $\dot{V}_{min} = 6,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ zur Verdünnung der Freisetzungsraten mit einem Korrekturfaktor von $k = 0,5$ für sekundäre Freisetzungsgrade.

$$\dot{V}_{min} = \frac{10,75 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0,5 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{min} = 6,32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}}$$

Durch einen verminderten Zuluftvolumenstrom wird die Fähigkeit der RLTA zur Verdünnung der Raumluf durch einen geringen Austrittsimpuls des Freistrahls

²⁶vgl. VDI 2440, November 2000, S.71

verringert. Aus diesem Grund wird der zu berechnende erforderliche Volumenstrom durch den Gütegrad $f = 3$ korrigiert.

$$\dot{V}_{zu,erf} = \frac{3 * 6,32 * 10^{-3} \frac{m^3}{h} * 110 m^3}{0,01 m^3}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{zu,erf} = 208,7 \frac{m^3}{h}}}$$

Es ergibt sich mit dem Einsatz ausschließlich hochwertig abgedichteter Armaturen mit dem Nachweis über die Einhaltung der oben genannten Leckraten ein für die Einschränkung der Ex-Zonen auf ein unbedenkliches Maß notwendiger Zuluftvolumenstrom von $\dot{V}_{zu,erf} = 208,7 m^3/h$.

5.3.1.6 Planungsvolumenstrom

Der Planungsvolumenstrom entspricht dem Maximum der o.g. Ergebnisse und somit $\dot{V}_{zu,erf} = 465,1 m^3/h$ für die Verdünnung erhöhter Kohlenmonoxidkonzentrationen. Da die Berechnung der Kohlenmonoxidkompensation mit einem Zuluftvolumenstrom ohne Anteil von Kohlenmonoxid berechnet wurde, ist die Verdünnung der Raumluf nur mit Außenluft gewährleistet. Die Nutzung von Umluft ist nicht möglich, da ein kontaminierter Zuluftvolumenstrom eine unzureichende Verdünnung zur Folge hat. Damit ist der planerische Zuluftvolumenstrom gleich dem Außenluftvolumenstrom $\dot{V}_{zu} = \dot{V}_{Au} = 465,1 m^3/h$.

5.3.2 Abluftvolumenstrom

Mit der Forderung des Betriebs der Zu- /Abluftanlage als Unterdruckanlage ergibt sich das Verhältnis von Zu- und Abluftvolumenstrom:

$$1,05 \dot{V}_{zu} < \dot{V}_{ab} < 1,15 \dot{V}_{zu}^{27}$$

Es wird festgelegt, dass der Planungsvolumenstrom der Abluftanlage 10 % größer als der Zuluftvolumenstrom ist. Somit berechnet man den Abluftvolumenstrom gemäß Formel 17.

Formel 17

$$\dot{V}_{ab} = 1,1 * \dot{V}_{zu}$$

\dot{V}_{ab} Abluftvolumenstrom in m^3/h

\dot{V}_{zu} Zuluftvolumenstrom in m^3/h

²⁷vgl. DIN EN 13779, September 2007, Tab. 8

$$\dot{V}_{ab} = 1,1 * 465,1 \frac{m^3}{h}$$

$$\underline{\underline{\dot{V}_{ab} = 511,6 \frac{m^3}{h}}}$$

Damit ergibt sich ein planerischer Abluftvolumenstrom $\dot{V}_{ab} = 511,6 m^3/h$.

5.4 Aggregate für Luftbehandlung

Die Zuluft soll nach Absprache mit dem Betreiber ganzjährig isotherm mit einer Temperatur $t_{zu} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte $\varphi = 50 \%$ zugeführt werden. Dazu ist neben der Förderung der Luftvolumenströme durch die entsprechenden Ventilatoren auch die thermische Luftbehandlung und Be- bzw. Entfeuchtung notwendig. In diesem Abschnitt sollen für die Luftbehandlung der Planungsvolumenströme notwendigen Aggregateleistungen berechnet werden. Hierfür wird im Sommerfall mit dem Außenluftzustand Temperatur $32 \text{ }^\circ\text{C}$ / relative Luftfeuchte 50% und im Winterfall mit einer Außentemperatur von $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 90% ²⁸ gerechnet. Die durchgeführten Luftbehandlungsfunktionen können in Anlage II im Mollier-h-x-Diagramm für einen Luftdruck von $1013,25 \text{ mbar}$ nachvollzogen werden.

Aus dem Diagramm wird erkenntlich, dass die Außenluft im Sommerbetrieb gekühlt und entfeuchtet werden muss. Für diese Luftbehandlungen werden ein Feuchtkühler sowie ein Luftherhitzer vorgesehen. Im Winterfall soll neben der Erwärmung mittels Luftherhitzer eine Befeuchtung vorgesehen werden.

5.4.1 Luftherhitzer

Mit der größten Temperaturdifferenz ergibt sich für die Erwärmung des Planungsvolumenstroms erforderliche Luftherhitzerleistung (Formel 18) aus der Betrachtung des Winterfalls.

Formel 18

$$\dot{Q}_{LE} = \dot{m}_{L,tr} * (h_{L2} - h_{L1})$$

\dot{Q}_{LE} Luftherhitzerleistung in J

$\dot{m}_{L,tr}$ Massenstrom der trockenen Luft in kg/h

h_{L2} Enthalpie der Luft nach der Erwärmung in kJ/kg

h_{L1} Enthalpie der Luft vor der Erwärmung in kJ/kg

²⁸vgl. eigene Mitschrift aus Vorlesung Angewandte Lüftungstechnik, Prof. J. Löffler

Der Massenstrom der zu behandelnden Luft wird mit Formel 19 ermittelt.

Formel 19

$$\dot{m}_{L,tr} = \dot{V}_{Li} * \rho_{Li}$$

$\dot{m}_{L,tr}$ Massenstrom der trockenen Luft in kg/h

\dot{V}_{Li} Volumenstrom der Luft im Zustands i in m^3/h

ρ_{Li} Dichte der Luft im Zustand i in kg/m^3

Damit ergibt sich eine benötigte Wärmeleistung von etwa 6,4 kW.

$$\dot{Q}_{LE} = \frac{465,1 \frac{m^3}{h} * 1,375 \frac{kg}{m^3} * [21,5 - (-14,5)] \frac{kWs}{kg}}{3600s}$$

$$\underline{\underline{\dot{Q}_{LE} = 6,394 kW}}$$

5.4.2 Feuchtluftkühler

Aus einem gewählten Bypassfaktor von 20 % resultiert eine benötigte Oberflächentemperatur von $t_0 = 7^\circ C$. Die Kühlleistung \dot{Q}_{LK} des Feuchtluftkühlers berechnet sich analog zur Lufterhitzerleistung und ergibt einen Bedarf von etwa 5,9 kW Kühlleistung.

$$\dot{Q}_{LK} = \frac{465,1 \frac{m^3}{h} * 1,375 \frac{kg}{m^3} * [29,0 - 62,0] \frac{kWs}{kg}}{3600s}$$

$$\underline{\underline{\dot{Q}_{LK} = -5,861 kW}}$$

Die Entfeuchtungsleistung \dot{m}_{LF} wird gemäß Formel 20 berechnet:

Formel 20

$$\dot{m}_{LF} = \dot{m}_{L,tr} * (x_{L2} - x_{L1})$$

\dot{m}_{LF} Entfeuchtungsleistung in g/h

$\dot{m}_{L,tr}$ Massenstrom der trockenen Luft in g/h

x_{L2} absoluter Luftfeuchtigkeitsgehalt der Luft nach der Entfeuchtung in g_{H_2O}/kg_{Luft}

x_{L1} absoluter Luftfeuchtigkeitsgehalt der Luft vor der Entfeuchtung in g_{H_2O}/kg_{Luft}

$$\dot{m}_{LF} = 465,1 \frac{m^3}{h} * 1,375 \frac{kg}{m^3} * (7,0 - 11,7) \frac{g_{H_2O}}{kg_{Luft}}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{LF} = - 3,006 \frac{kg}{h}}}$$

Die benötigte Entfeuchtungsleistung beträgt somit in etwa $3,0 \text{ kg/h}$.

5.4.3 Dampfbefeuchter

Für die Befeuchtung der trockenen Außenluft im Winterbetrieb ist eine analog zur o.g. Entfeuchtungsleistung berechnete Befeuchtungsleistung mit $\dot{m}_{LF} = 4,1 \text{ kg/h}$ notwendig.

$$\dot{m}_{LF} = 465,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 1,375 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (7,0 - 0,6) \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{Luft}}}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{LF} = 4,093 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}}$$

5.5 Raumluffführung

5.5.1 Luftführungsprinzip

Die Lüftung soll nach dem Mischungsprinzip mit tangentialer Luftführung ausgeführt werden, wodurch eine bewusste Vermischung von Zuluft und Raumluff realisiert werden soll. Die Freistrahlen strömen seitlich in Deckennähe in den Raum ein und bewirken eine raumfüllende Strömungswalze, wie in Abbildung 4 ersichtlich. Gemäß drittem Katz-Gesetz²⁹ treffen bei Räumen mit einer Raumlänge l bis höchstens dem 3- bis 4,5-fachen der Raumhöhe bei ordnungsgemäßer Planung auf die Gegenwand und werden abgelenkt (siehe Abbildung 4). Dies ist der Fall, wenn die Eindringtiefe L_E gleich der Raumlänge l ist.

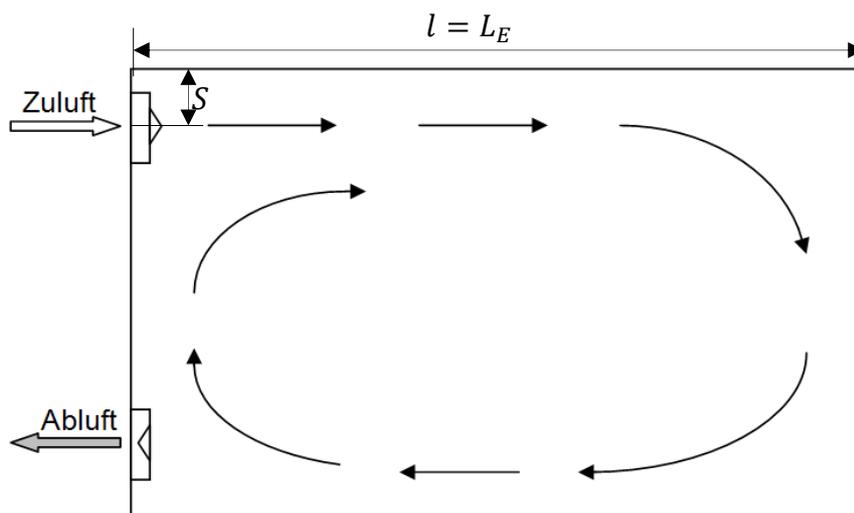


Abbildung 5: Strömungsbild der tangentialen Verdünnungslüftung

²⁹vgl. eigene Mitschrift aus Vorlesung Angewandte Lüftungstechnik, Prof. J. Löffler

Große Hindernisse im Raum und speziell im Deckenbereich sind bei dieser Form der Luftführung zu vermeiden.

5.5.2 Positionierung der Luftdurchlässe

5.5.2.1 Zuluftdurchlässe

Mit einer Installation der Zuluftauslässe in der Nähe der Decke soll sichergestellt werden, dass freigesetzter, aufgrund der geringen Dichte aufsteigender Wasserstoff induziert und im ganzen Raum verteilt wird. Um Totzonen im Deckenbereich und somit mögliche Zonen der Ansammlung größerer Mengen an Wasserstoff zu vermeiden, soll der Coanda-Effekt genutzt werden. Der Coanda-Effekt ist wie in Abbildung 5 veranschaulicht die Eigenschaft strömender Fluide, sich an ebene Flächen anzulegen, ohne dass diese angeblasen werden. Das Auftreten des Coanda-Effektes ist vom Abstand S des Luftauslasses zur Decke (siehe Abb. 4) abhängig, als größter zulässiger Abstand S_{grenz} gilt die 40-fache³⁰ Strahldicke, welche durch den verwendeten Luftauslass definiert wird.

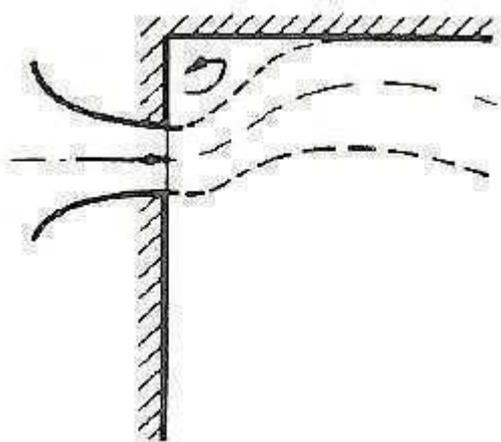


Abbildung 6: Freistrahle in einem Raum mit Coanda-Effekt

Quelle: Hanel, Raumlufströmung, 1994, S. 59, Abb. f

Art und Abstand der Luftauslässe sind so zu wählen, dass möglichst der gesamte Deckenbereich erfasst und umliegende Raumlufte induziert werden kann.

5.5.2.2 Abluftdurchlässe

Die Anordnung der Abluftdurchlässe hat keine Auswirkungen auf die Raumluftrömung, da aufgrund des Kontinuitätsgesetzes des Volumenstroms die

³⁰vgl. eigene Mitschrift aus Vorlesung Angewandte Lüftungstechnik, Prof. J. Löffler

durch den Abluftventilator verursachte Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar vor dem Eintritt in den Durchlass gegen Null geht.

Da bei einer Freisetzung von Propan oder Butan schwere Brenngas/Luft-Gemische entstehen, die sich in Bodennähe ansammeln, ist eine Installation von Abluftdurchlässen in der Nähe des Fußbodens vorzusehen, um diese Gemische abzuführen.

Zur Ableitung der Abgase sollen außerdem ein Abluftdurchlass über den Prüfständen 1 und 3 sowie einer über den Prüfständen 2 und 4 installiert sein, mit welchen das gekühlte Abgas der Reformier- bzw. Brennerapparatur über Flexrohre zugeführt werden kann.

5.6 Betriebsweisen der Lüftungsanlage

Zur Vermeidung von Explosionszonen soll die RLTA im Grundbetrieb stets einen Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{Zu} von 208,7 m³/h in den Raum einleiten. Ein in Bezug auf den Zuluftvolumenstrom um etwa 10 % größerer Abluftvolumenstrom zur Gewährleistung des Unterdrucks im Brennstoffzellenlaboratorium ergibt $\dot{V}_{Ab} = 229,6$ m³/h.

Während des Betriebes der Reformiereinheiten soll die RLTA die im Abschnitt 5.3.1.6 „Planungsvolumenströme“ berechneten Volumenströme mit $\dot{V}_{Zu} = 456,1$ m³/h und $\dot{V}_{Ab} = 511,6$ m³/h fördern. Um dies zu gewährleisten sollen die Ventilatoren beim Einschalten eines beliebigen Magnetventils mit der Betätigung des Schalters auf die zur Förderung der Planungsvolumenströme notwendigen Drehzahlen hochfahren. Dieser Zustand wird Arbeitsbetrieb genannt. Nach dem Ausschalten der Magnetventile ist eine Nachlaufzeit von 30 Minuten im Arbeitsbetrieb vorzusehen.

Im Fall des Überschreitens einer Alarmschwelle schaltet die RLTA auf Sturm Lüftung, das heißt auf den maximalen Volumenstrom des Zuluftventilators und den entsprechenden zur Einhaltung des Unterdruckes notwendigen Abluftvolumenstrom um.

6 Gaswarnanlage

6.1 Allgemeines

Der Umgang mit Gefahrstoffen macht die Installation einer Gaswarnanlage zur Überwachung der Wirksamkeit der technischen Lüftung notwendig. Diese soll zum einen den Schutz des Menschen vor gefährlichen, gesundheitsbeeinträchtigenden Gefahrstoffkonzentrationen gewährleisten, zum anderen soll die Anlage die Bildung bzw. Ausbreitung einer explosionsfähigen Atmosphäre verhindern.

Die Gefährdungsbeurteilung hat die in Tabelle 7 zusammengefassten Grenzwerte ergeben, wobei zur besseren Vergleichsmöglichkeit die Konzentration 20 % UEG mit angegeben wird.

Tabelle7: Zusammenfassung der Grenzwerte

Grenzkonzentration/ Gefahrstoff	AGW (TRGS 900)	Kurzzeitwert (TRGS 900)	20 % UEG	UEG
Butan	1000 ppm	4000 ppm	2400 ppm	1,4 %
Kohlenmonoxid	30 ppm	60 ppm	21800 ppm	10,9 %
Kohlendioxid	5000 ppm	10000 ppm	---	---
Methan	---	---	8800 ppm	4,4 %
Propan	1000 ppm	4000 ppm	3400 ppm	1,7 %
Stickstoff	---	---	---	---
Wasserstoff	---	---	8000 ppm	4,0 %

Aus toxikologischer Sicht ist der Beschäftigte vor einer Exposition gegenüber erhöhter Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentrationen zu schützen. Die erstickende Wirkung austretenden Stickstoffs durch Verdrängung des Luftsauerstoffs auf eine mangelhafte Konzentration ist durch den Betrieb der technischen Lüftung praktisch ausgeschlossen. Aus Gründen des Explosionsschutzes muss die Konzentration der Brenngase, d.h. von Wasserstoff, Methan, Propan und Butan, überwacht werden. Die Überwachung der Kohlenmonoxidkonzentration in Bezug auf die Explosionsgrenze ist nicht notwendig, da hierbei die Alarmschwellen deutlich über den gesundheitlich bedenklichen Konzentrationsgrenzwerten liegen.

Eine ortsfeste Gaswarnanlage setzt sich im Allgemeinen aus Gassensoren, einer Gaswarnzentrale und externen Alarmmitteln zusammen. In den folgenden Abschnitten sollen diese Komponenten näher beschrieben und ausgewählt werden.

6.2 Gassensoren

6.2.1 Anforderungen

Für die Gaswarnanlage sind technische Geräte zur direkten Konzentrationsmessung toxischer Gase sowie brennbarer Gase auszuwählen. Diese Gassensoren sollen für die Messaufgabe der Bereichsüberwachung kontinuierlich die Konzentration der entsprechenden Substanzen messen und die Messwerte zum Grenzwert-Vergleich an die Gaswarnzentrale weiterleiten.

Für Grenzwert-Vergleichsmessungen bei der Konzentrationsmessung toxischer Gase soll der Mindestmessbereich in Abhängigkeit des im Einzelfall festgelegten Grenzwertes (GW) 0,1 bis 2 GW bei einer relativen Messunsicherheit von $\leq 50\%$ im Bereich 0,1 bis 0,5 GW bzw. $\leq 30\%$ im Bereich 0,5 bis 2 GW umfassen³¹.

Die Anstiegszeit t_{90} , die Zeitspanne zwischen dem sprunghaften Anstieg der Gaskonzentration am Sensor und dem Zeitpunkt der Änderung des Messsignals auf 90 % des Endwertes, soll bei Sensoren zur Messung der Konzentration akut toxischer Gase, wie z.B. Kohlenmonoxid, so kurz wie möglich sein.

Viele Sensorarten reagieren nicht selektiv auf ein bestimmtes Gas. Bei Querempfindlichkeit wird bei dem Vorhandensein anderer Gase der Messwert verfälscht. Aus Sicherheitsgründen ist eine Verringerung des Messwertes in jedem Fall zu verhindern.

6.2.2 Messprinzipien und Eigenschaften

In den folgenden Abschnitten sollen die derzeit gängigsten Messprinzipien vorgestellt werden.

6.2.2.1 Wärmetönungssensor

Der Wärmetönungssensor arbeitet nach dem Prinzip des katalytischen Kalorimeters. Der Sensor, auch Pellistor genannt, besteht in der Regel aus zwei nah beieinander liegenden und in einer Halbbrücke verschalteten elektrisch ähnlichen Keramikperlen mit eingebetteter Platinwendel, von denen eine mit katalytischem Material imprägniert ist. Die Heizung hält die Perlen auf einer genügend hohen Temperatur von 450 °C bis 550 °C, um eine Verbrennung des Brenngases an der aktiven, d.h. an der mit dem Katalysator behafteten Perle zu gewährleisten. Je nach Höhe der Brenngaskonzentration variiert die Temperaturdifferenz zwischen den Perlen, die

³¹vgl. DIN EN 45544-4, Oktober 2000, Tab. 2

resultierende Widerstandsänderung an dem aktiven Sensorelement wird durch die Verstimmung der Brückenschaltung elektrisch in ein Ausgangssignal umgewandelt. Die Sensorreaktion verläuft in Abhängigkeit zur Gaskonzentration linear.

Wärmetönungssensoren werden für die Detektion brennbarer Gase in Konzentrationen bis zur UEG eingesetzt. Der Sensor ist nicht selektiv, im Allgemeinen ergeben alle brennbaren Gase ein Messsignal, Gase mit größeren Molekülen haben längere Anstiegszeiten. Durch den Vergleich zwischen aktivem und inaktivem Sensorelement kann eine Beeinflussung des Messwertes von Luftdruck, Luftgeschwindigkeit und –feuchte im Allgemeinen ausgeschlossen werden.

6.2.2.2 Halbleitersensor

Das Messprinzip der Halbleitersensoren basiert auf der durch Chemosorption von Gasen auf der Halbleiteroberfläche beruhenden Änderung der elektrischen Leitfähigkeit eines Halbleiters. Halbleitendes Material, in der Regel auf Zinkoxid basierendes Metalloxid, mit auf der Oberfläche angebrachten Elektroden wird elektrisch auf mehrere hundert Grad Celsius aufgeheizt. Das Vorhandensein anderer Gase als Luft kann eine Widerstandsänderung bewirken. Die Sensorreaktion in Abhängigkeit von der Konzentration des Messgases verläuft nicht linear.

Mit Halbleitersensoren können verschiedene Gase im ppm-Bereich, aber auch im Bereich großer Konzentrationen gemessen werden. Sie sind nicht selektiv und werden häufig als reine Warngeräte eingesetzt. Der Halbleitersensor ist vergiftungsanfällig gegenüber alkalischen oder sauren Verbindungen, Silikonen, Schwefelverbindungen, Zyaniden und halogenierten Verbindungen.³²

6.2.2.3 Elektrochemischer Sensor

Das Messprinzip elektrochemischer Sensoren beruht auf der Änderung elektrischer Parameter von Elektroden in Kontakt mit einem Elektrolyten aufgrund von Redox-Reaktionen des Messgases an der Elektrodenoberfläche. Elektroden und Elektrolyt sind durch halbdurchlässige Membranen eingeschlossen, durch die das Messgas an die Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektroden diffundiert.

Sowohl Kohlenmonoxid als auch Wasserstoff werden an der Messelektrode oxidiert, Kohlenwasserstoffverbindungen und somit Alkane sind nicht messbar. Die Anstiegszeit beträgt in der Regel mehr als 30 Sekunden.

³²Vgl. DIN EN 60079-29-2, Juli 2008, S. 80

6.2.2.4 Infrarotsensor

Der Infrarotsensor ist ein optischer Sensor, bei dem das Messprinzip auf der Absorption von Infrarotstrahlung durch Gasmoleküle in der Probenzelle beruht. Die verschiedenen Gase absorbieren dabei je nach Konzentration mehr oder weniger Infrarotstrahlung in dem spezifischen Wellenlängenbereich. Die von einer Wolframglühlampe oder im Infrarotbereich abstrahlenden Leuchtdiode emittierte Strahlung kann z.B. durch Photodioden oder optisch-thermische Detektoren gemessen werden. Durch einen Vergleich mit dem Strahlungsspektrum der Referenzzelle wird die Konzentration des Gases gemessen und Änderungen der Strahlungsintensität kompensiert.

Infrarotsensoren können die Volumenkonzentration vieler Gase im ppm-Bereich bis zu 100 Vol-% messen. Einatomige sowie zweiatomige symmetrische Gase (z.B. Wasserstoff) können nicht gemessen werden. Die Sensoren können auf ein bestimmtes Gas oder auf eine Gasfamilie, wie z.B. die Kohlenwasserstoffe, kalibriert werden, die Anstiegszeit ist sehr kurz. Infrarotsensoren sind nicht vergiftungsanfällig, ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit des Einsatzes von Selbstdiagnoseverfahren mit der Fähigkeit der automatischen Kalibrierung, die Strahlungsquelle auf Fehler zu überprüfen und Schmutzansammlungen an der Optik zu kompensieren.

6.2.3 Transmitter

Die Sensoren sind für eine Konzentrationsmessung nicht ausreichend. Sie detektieren zwar Gase, die Sensorsignale müssen jedoch für eine Auswertung elektronisch aufbereitet werden. Dies geschieht in den Transmittern, die das Sensorsignal in ein Ausgangssignal, in der Regel 4...20 mA, umwandeln und an die Gaswarnzentrale leiten. Dabei entspricht ein Strom von 4 mA dem Nullsignal bei reiner Luft, ein Strom von 20 mA bedeutet den Vollausschlag auf das Messgas. Damit von den Transmittern im Havariefall keine Zündgefahr ausgeht, sind zur Verwendung in Zone 2 freigegebene Transmitter einzusetzen.

6.2.4 Auswahl und Positionierung der Sensoren

6.2.4.1 Kohlenmonoxid, Wasserstoff

Zur Messung von Kohlenmonoxidkonzentrationen im ppm-Bereich sind elektrochemische Sensoren geeignet. In der Regel besteht bei Sensoren für die Konzentrationsmessung von Kohlenmonoxid eine Querempfindlichkeit zu Wasserstoff, eine Volumenkonzentration des Wasserstoffs von z.B. 100 ppm kann bei Geräten zur CO-Konzentrationsmessung einem Wert ergeben, der der CO-

Konzentration von 40 ppm³³ entspricht. Auf dem Markt existieren auch „wasserstoffkompensierte“ Kohlenmonoxidsensoren, die gleichzeitig die Kohlenmonoxid- und Wasserstoffkonzentration messen und daraus die tatsächliche Kohlenmonoxidkonzentration ermitteln.

Der Grenzwert der Kohlenmonoxidkonzentration entspricht der Spitzenbegrenzung von 60 ppm, deren Überschreitung den Hauptalarm auslöst. Der Grenzwert der Wasserstoffkonzentration soll 50 % UEG betragen, was einer Konzentration von 2,0 % bzw. 20000 ppm entspricht. Eine Freisetzung von Wasserstoff hat zur Folge, dass bei einer Konzentration, die Zehnerpotenzen unterhalb der Grenzkonzentration des Wasserstoffs liegt, die durch Querempfindlichkeit gemessene Kohlenmonoxidkonzentration über dem Grenzwert liegt. Für den Einsatz im Brennstoffzellenlaboratorium wird die Querempfindlichkeit gewöhnlicher elektrochemischer Sensoren akzeptiert, da ein durch das Vorhandensein von Wasserstoff ausgelöster CO-Fehlalarm auf eine Wasserstoffleckage zurückzuführen ist, die ohnehin beseitigt werden muss. Mit dem Einsatz eines elektrochemischen CO-Sensors wird somit auch die Überwachung der Wasserstoffkonzentration gewährleistet.

Die gebräuchlichen CO-Sensoren verfügen unter anderem über die Messbereiche 0...100 ppm, 0...300 ppm, 0...1000 ppm und darüber hinausreichende. Zur Installation im Brennstoffzellenlaboratorium werden Geräte mit dem Messbereich 0...300 ppm vorgesehen.

Eine Messung der Kohlenmonoxidkonzentration wird in Höhe des Aufenthaltsbereichs realisiert, das entspricht in einer Höhe von 1,5 m bis 1,8 m. Da freigesetzter Wasserstoff aufgrund der geringen Dichte bei ruhender Luft nach oben steigt und sich in Deckennähe sammelt, ist bei natürlicher Lüftung die Messstelle zur Überwachung der Wasserstoffkonzentration direkt unterhalb der Decke vorzusehen. Eine Messung der H₂-Konzentration im Deckenbereich ist bei der geplanten Raumluffführung der technischen Lüftung jedoch nicht zu empfehlen, da dort aufgrund der Zuluffführung die höchste Raumluffqualität zu erwarten ist. Daher ist in diesem Fall die Erfassung der Wasserstoffkonzentration in der Aufenthaltshöhe sinnvoll.

Wegen der akuten Toxizität des Kohlenmonoxids ist es notwendig, die Messstellen nah an den möglichen Freisetzungsstellen zu positionieren. Aus diesem Grund sollen zwei Sensoren, jeweils einer an der Wand zwischen den Versuchsständen 1/3 und

³³online: ExTox.de, Transmitterliste, S. 5

2/4, in einer Höhe von 1,5 m installiert werden. Als möglicher Sensor kann beispielsweise der ExTox CO-300-EC (Datenblatt im Anhang III) zum Einsatz kommen.

6.2.4.2 Methan, Propan, Butan

Für die Konzentrationsmessung der Gase Methan, Propan und Butan kann ein Sensor verwendet werden, der auf alle drei Gase reagiert. Dieser Sensor wird auf das Messgas eingestellt, auf das dieser am unempfindlichsten reagiert. Die Empfindlichkeiten auf die jeweiligen Brenngase sind sensorabhängig und können den entsprechenden Herstellerunterlagen entnommen werden.

In Frage kommen hierfür Halbleiter-, Wärmetönungs- und Infrarotsensoren. Da im Raum keine starken Schwankungen der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zu erwarten sind, kann ein im Vergleich zum Wärmetönungssensor preisgünstigerer Halbleitersensor eingesetzt werden. Außerdem ist nicht mit verschmutzter oder mit Sensorgiften kontaminierter Atmosphäre zu rechnen, was den Einsatz des teureren Infrarotsensors rechtfertigen würde.

Aus diesen Gründen soll ein Halbleitersensor für die Messung der Brenngaskonzentration eingesetzt werden. Dieser Sensortyp reagiert am empfindlichsten auf das Brenngas Butan und soll auf dieses kalibriert sein. Der Sensor soll über den Messbereich 0...100 % UEG Butan, das entspricht dem Volumenkonzentrationsbereich 0...1,4 % Butan in der Luft, verfügen. Dadurch wird der Sensor zwar überempfindlich mit einem höher angezeigten Wert als der tatsächlichen Volumenkonzentration auf die anderen Brenngase Methan und Propan reagieren, eine geringere als die tatsächliche Konzentration wird hierdurch aber für keines der Gase gemessen. Als Sensor kann beispielsweise ein auf Butan kalibrierter Halbleitersensor ExToxExSens BG-HL (siehe Anhang III) eingesetzt werden.

Die Positionierung des Sensors soll zur Detektion der schweren Gase Propan und Butan in Fußbodennähe sein. Die Verdünnung freigesetzten Methans durch technische Lüftungsmaßnahmen macht eine Detektion dieses Gases in Bodennähe möglich.

6.2.4.3 Kohlendioxid

Zur Messung von Kohlendioxidkonzentrationen werden Infrarotsensoren benutzt. Die erhältlichen Sensoren zur CO₂-Konzentrationsmessung haben die Messbereiche 0...1 %, 0...5 % oder 0...100 %. Wegen des Arbeitsplatzgrenzwertes von 5000 ppm

bzw. 0,5 Vol.-% und der Spitzenbegrenzung von 1 Vol.-% soll der CO₂-Sensor über den Messbereich 0...5 % verfügen. Es kann zum Beispiel der ExTox CO2-5-IR4 (siehe Anhang III) verwendet werden.

Der Sensor soll in Höhe des Aufenthaltsbereichs, d.h. 1,5 m bis 1,8 m über dem Boden, angebracht werden.

6.3 Alarmmittel

Als optische Alarmmittel sind zwei Signalampeln, eine im Laboratorium sowie eine außerhalb im Eingangstürbereich des Laboratoriums, vorzusehen. Die Ampel innerhalb des Raumes soll der optischen Signalgabe im Störungs- und Alarmfall dienen, hierfür sind die Farben Gelb und Rot notwendig. Die Ampel außerhalb des Laboratoriums soll zudem einen sicheren Zustand mit einer grünen Lampe anzeigen können, um den Raum zur Nutzung freizugeben. Die Ampel kann Zustände mit drei Farben - Grün, Gelb und Rot- anzeigen. Außerdem ist für die Warnung im Alarmfall ein akustischer Alarmgeber im Flur vorzusehen.

Aus optischen und akustischen Elementen modular aufbauende Ampeln sind z.B. beim Hersteller Sirena GmbH zu erwerben. Die entsprechenden Produktdatenblätter befinden sich in Anhang III.

6.4 Gaswarnzentrale

Zur Verarbeitung der von den Transmittern ausgegebenen Messsignale und Einleitung von Maßnahmen durch Signalausgabe bei Grenzwertüberschreitung wird die Gaswarnzentrale benötigt. Grundsätzlich gibt es Gaswarnzentralen mit modularem Aufbau und digitale Systeme für den Einsatz in größeren Gaswarnanlagen zur Überwachung mehrerer Bereiche. Des Weiteren sind Kompaktsysteme zur Installation mehrerer Gassensoren sowie Stand-Alone-Systeme verfügbar, bei denen Sensor und Messwertauswertung eine Einheit bilden.

Für die Bereichsüberwachung des Brennstoffzellenlaboratoriums soll eine kompaktes Auswertesystem installiert werden, an dem die vier Sensoren zur Messung der CO/H₂-, CO₂- und Brenngaskonzentration angeschlossen werden können.

Hierfür kann z.B. die Gaswarnzentrale ExTox ET-4D2 (siehe Anhang III) eingesetzt werden, die über vier Transmittereingänge, vier Digitaleingänge, drei Alarmschwellen je Kanal und zwölf frei konfigurierbare Wechselkontakte verfügt.

6.5 Energieversorgung

Die Energieversorgung der Gaswarnanlage muss so bemessen sein, dass ein uneingeschränkter Betrieb dieser auch bei Ausfall der regulären Spannungsversorgung sichergestellt wird.³⁴

Aus diesem Grund ist durch eine Ersatzenergieversorgung die unterbrechungsfreie Spannungsversorgung (USV) zur Aufrechterhaltung der Funktionen der Gaswarnanlage vorzusehen. Dies ist z.B. möglich durch die Integration eines USV BlueWalker PowerWalker VI 2000, siehe Anhang III.

6.6 Festlegung der Alarmschwellen und nachgeordneter Maßnahmen

6.6.1 Allgemeines

Als Betriebszustand soll der Zustand bezeichnet werden, bei dem weder Störungen noch Alarme vorliegen. Dieser ist optisch durch das Leuchten der grünen Lampe anzuzeigen. Der Betriebszustand liegt vor, wenn die Transmitter Messwerte unterhalb der Alarmschwellen ausgeben und die Flammenüberwachung der Stützflamme des Fackelbrenners eine Flamme detektiert. Nur in diesem Zustand ist die Betätigung der Magnetventile möglich, im Hauptalarm- bzw. Störfall soll die Stromversorgung der Magnetventile unterbrochen sein.

Die Alarmschwellen bei der Überwachung brennbarer Gase sollen zwischen 10 % und 40 % der UEG liegen³⁵. Alarmschwellen oberhalb 40 % UEG bedürfen einer besonderen Bewertung in der Gefährdungsbeurteilung. Zur Vermeidung von Fehlalarmen durch eine überempfindliche Reaktion des Halbleitersensors auf das Brenngas Methan werden die Alarmschwellen auf 20 % UEG Butan für den Voralarm und 40 % UEG für den Hauptalarm festgelegt.

6.6.2 Voralarm

Die Konzentrationsschwellen zur Auslösung des Voralarms liegen unter denen, die eine Auslösung des Hauptalarms zur Folge haben. Damit sollen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um die Gefahrensituation zu beherrschen, ohne einen Prozessstillstand zu bewirken.

³⁴vgl. BGI 518, Juli 2009, S. 19

³⁵vgl. BGI 518, Juli 2009, S. 17

Es sind folgende Schwellenwerte einzustellen:

- Kohlenmonoxid 30 ppm (AGW)
- Kohlendioxid 5000 ppm (AGW)
- Brenngase 20 % UEG Butan

Bei der Auslösung des Voralarms durch die Überschreitung eines der o.g. Schwellenwerte sollen folgende nachgeordnete Maßnahmen eingeleitet werden:

- Umstellen des Lüftungsbetriebes auf „Sturmlüftung“
- Optische Alarmierung: gelbes Licht

Mit der Umstellung auf verstärkte Lüftung wird eine effektivere Verdünnung der gefahrstoffbehafteten Raumluft bewirkt. Unterschreitet die Konzentration, deren Ansteigen den Voralarm ausgelöst hat, den Schwellenwert, wird nach einer Nachlaufzeit von 30 min die Lüftung auf Arbeitsbetrieb umgestellt.

6.6.3 Hauptalarm

Bei einer Auslösung des Hauptalarms soll der Gefahrenbereich abgesichert werden. Der Hauptalarm soll ausgelöst werden bei der Überschreitung eines der folgenden Schwellenwerte:

- Kohlemonoxid 60 ppm (Spitzenbegrenzung)
- Kohlendioxid 10000 ppm (Spitzenbegrenzung)
- Brenngase 40 % UEG Butan

Als nachfolgende Sicherheitsmaßnahmen sind vorgesehen:

- Unterbrechung der Spannungsversorgung der Gasmagnetventile
- Lüftungsbetrieb: Sturmlüftung
- Optische Alarmierung: rotes Licht
- Akustische Alarmierung

Durch das Unterbrechen der Gaszufuhr durch ein Schließen der Magnetventile soll die Bildung bzw. Ausbreitung gefährlicher Atmosphäre unterbunden werden. Mit der optischen und akustischen Alarmierung soll die Evakuierung eingeleitet werden, da eine unmittelbare Gefährdung der Gesundheit der Beschäftigten besteht. Der Hauptalarm wird selbsthaltend ausgeführt.

6.6.4 Störungsalarm

Bei Ausfall bzw. Störung einzelner Komponenten löst der Störungsalarm aus. Eine mögliche Störung ist z.B. die Unterbrechung der Messleitung zwischen Transmitter und Zentrale, durch den Wegfall des Messsignals wird der Ausfall des Transmitters von der Gaswarnzentrale registriert. Auch der Ausfall der regulären Spannungsversorgung soll als Störung angezeigt werden. Da die Gaswarnanlage bei Störung ggf. nicht auf die Freisetzung von Gefahrstoffen reagieren kann, sollen in diesem Fall die gleichen Maßnahmen wie bei einem Hauptalarm eingeleitet werden, jedoch ist eine akustische Alarmierung nicht notwendig, optisch soll eine Störung mit blinkendem gelben Licht signalisiert werden.

- Unterbrechung der Spannungsversorgung der Gasmagnetventile
- Lüftungsbetrieb: Sturm Lüftung
- Optische Alarmierung: gelbes Licht, blinkend

Damit soll bei Störung ein sicherer Zustand angestrebt werden.

6.7 Übersichtsplan

Mit einem Übersichtsplan (Anhang II) soll die Wirkweise der Gaswarneinrichtung veranschaulicht werden. Es ist dargestellt, welche Bauteile in Beziehung zueinander stehen.

Die Gassensoren sind innerhalb des zu überwachenden Raumes angebracht, die Transmitter leiten die Signale an die Gaswarnzentrale. Die Gaswarnzentrale sendet ein Signal an die Steuereinrichtung für die Magnetventile. Liegen weder Alarm noch Störung vor und sendet der Flammendetektor der Fackel-Stützflamme ein Signal, lassen sich die Magnetventile mit handbetätigten Schaltern einschalten, die entsprechenden Magnetventile öffnen und Gas kann dem Rohrleitungssystem entnommen werden. Ist dies der Fall, schaltet mit der Betätigung des Schalters die RLTA auf Arbeitsbetrieb. Die RLTA hat unmittelbaren Einfluss auf die Raumluftqualität, mit verstärkter Lüftung wird die Raumluft effektiver verdünnt.

Übermittelt der Transmitter ein Signal, das über dem an der Gaswarnzentrale eingestellten Schwellenwert für den Voralarm liegt, bewirkt die Zentrale ein Umschalten der RLTA auf Sturm Lüftung und die Signalisierung des Voralarms mit den Alarmmitteln. Beim Überschreiten einer Alarmschwelle für den Hauptalarm bzw. im Störfall veranlasst die Gaswarnzentrale das Abschalten der Magnetventile und dafür vorgesehen Alarme werden signalisiert.

7 Wartung und Instandhaltung

7.1 Kontrollen

Die Anforderungen an Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten gemäß BGI 518 und BGI 836 sind für die ausgewählten Komponenten in dem Kontrollplan (siehe Anhang V) zusammengefasst. In den folgenden Abschnitten werden die Unterpunkte näher erläutert.

7.1.1 Allgemeines

Der Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen, in diesem Fall Anlagen zum Umgang mit brennbare und toxischen Gasen sowie Gaswarneinrichtungen, ist verpflichtet, diese „in ordnungsgemäßem Zustand zu erhalten, zu überwachen, notwendige Instandsetzungs- oder Wartungsarbeiten unverzüglich vorzunehmen und die den Umständen nach erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen zu treffen“³⁶. Die Wartung ortsfester Gaswarneinrichtungen beinhaltet Sichtkontrolle, Funktionskontrolle und Systemkontrolle, Kalibrierung und Justierung und die Prüfung der Vollständigkeit der Aufzeichnungen.

Bei Kontrollen sind durch den Kontrolleur ggf. folgende Qualifikationen gemäß DIN EN 60079-29-2 nachzuweisen:

- Unterwiesene Personen müssen mindestens über Grundkenntnisse über Funktion und Aufbau der Gaswarnanlage, Kenntnisse der gerätespezifischen Testfunktionen und Beurteilung der Ergebnisse verfügen und offensichtliche Veränderungen an der Gaswarneinrichtung erkennen können.
- Qualifiziertes Fachpersonal verfügt zudem über Grundkenntnis über das Messprinzip; Kenntnisse über die zu verwendenden Prüfgase und deren sachgerechte Handhabung, der Betriebs- und Wartungsanleitung und der Bedienung der Einstellelemente, der Bedienung der Einrichtung zur Funktionskontrolle, insbesondere der Tätigkeiten zur Kalibrierung und Justierung sowie Kenntnis der Kriterien für die Beurteilung der Ergebnisse der Funktionskontrolle.
- Befähigte Personen erfüllen zudem die allgemeinen Anforderungen der TRBS 1203 (abgeschlossene Berufsausbildung, Berufserfahrung und Zeitnahe berufliche Tätigkeit auf dem Gebiet der Prüfung von Arbeitsmitteln), verfügen über umfassende Kenntnisse über Einsatz und Verwendungsmöglichkeiten von Gaswarneinrichtungen sowie der Einflüsse von störenden Gasen und

³⁶online: vgl. Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), i. d. F. der Verordnung vom 08.11.2011, § 12 Abs. 3

Umgebungsbedingungen des Messprinzips sowie die Nachweisgrenzen des Messverfahrens. Außerdem verfügen befähigte Personen über physikalische und chemische Eigenschaften der zu überwachenden Stoffe.

- Fachkundige sind Personen, die eine fachliche Ausbildung haben und eine zeitnahe berufliche Tätigkeit auf dem Gebiet von Gaswarneinrichtungen ausüben.

Anzuwendende Fristen werden folgendermaßen festgelegt:

- Liegen ausreichende Erfahrungen über die Zuverlässigkeit und Anzeigegenauigkeit vor, können die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Mindestintervalle der entsprechenden Prüfung festgelegt werden.
- Nach der Erstinbetriebnahme sind vier Funktionsprüfungen in wöchentlichem Abstand durchzuführen. Wenn innerhalb dieser Zeit nicht nachjustiert werden muss, sind drei weitere Funktionsprüfungen im Abstand von jeweils vier Wochen erforderlich. Wenn ein Nachjustieren innerhalb dieser Zeit nicht notwendig ist, kann auf das maximale Intervall übergegangen werden.
- Ist innerhalb der o.g. 16 Wochen eine Nachjustierung erforderlich, muss die Funktionskontrolle in kürzeren Zeitabständen erfolgen und auf Grundlage gewonnener Erfahrungen so festgelegt werden, dass zwischen den Funktionskontrollen keine Beeinträchtigungen zu erwarten sind.

Falls Einsatz- oder Umgebungsbedingungen geändert werden, ist wie nach einer Erstinbetriebnahme zu verfahren.

Kritisch ist außerdem die Eigenschaft von Wärmetönungs-, Halbleiter-, und Elektrochemischen Sensoren, auf Messbereichsüberschreitung eventuell mit Nullpunktverschiebung oder Empfindlichkeitsveränderung zu reagieren. Daher ist in diesem Fall eine vom regulären Intervall unabhängige Funktionsprüfung durchzuführen und nach einer Woche zu wiederholen.

7.1.2 Sichtkontrolle nach DIN EN 60079-29-2

Sichtkontrollen werden von unterwiesenen Personen mindestens einmal im Monat durchgeführt. Sie beinhalten mindestens eine Kontrolle der gesamten Anlage auf mechanische Beschädigung oder Verschmutzung sowie eine Kontrolle der Betriebsanzeige und der Statusmeldungen.

7.1.3 Funktionskontrolle nach DIN EN 60079-29-2

Eine Funktionskontrolle wird mindestens einmal alle vier Monate von qualifiziertem Fachpersonal durchgeführt und beinhaltet neben einer Sichtkontrolle eine Beaufschlagung der Sensoren mit Null- und Prüfgas zur Kontrolle und Bewertung der Messwertanzeige und ggf. Justierung, sowie zur Kontrolle und Bewertung der Ansprechzeit gemäß Herstellerangaben. Zudem werden gerätespezifische Testfunktionen für Anzeigeelemente bei laufendem Betrieb ausgelöst.

7.1.4 Systemkontrolle nach DIN EN 60079-29-2

Durch eine befähigte Person wird die Systemkontrolle mindestens jährlich durchgeführt. Neben der Funktionskontrolle werden alle Sicherheitsfunktionen einschließlich der Auslösung der Schaltfunktionen kontrolliert. Es ist eine Kontrolle der Parametrierung durch Soll-/ Istwert- Vergleich durchzuführen, die Funktion der Alarmmittel wird überprüft.

7.1.5 Aufzeichnungskontrolle

Mindestens einmal alle drei Jahre wird die Kontrolle der Vollständigkeit der Installations- und Wartungsunterlagen nach BGI 518 durchgeführt:

- Betriebsanleitung des Herstellers und Wartungsvorschrift für die Gaswarneinrichtung
- EG-Konformitätserklärung
- Nachweis der messtechnischen Eignung
- Protokoll der Erstinbetriebnahme
- Aufzeichnungen über:
 - Installationspläne; Elektropläne
 - Planungsgrundlagen
 - Art und Konzentration der zu verwendenden Prüfgase
 - Parametrierung der Gaswarneinrichtung
 - Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten
 - Änderungen und Erweiterungen der Gaswarneinrichtung

7.2 Kalibrierung und Justierung

Die Kalibrierung ist Bestandteil der Funktions- bzw. Systemkontrolle und dient zur Überprüfung der Messwertanzeige. Zur Nullpunktbestimmung wird der Sensor mit sauberer Luft, oder, falls eine Kontamination der Luft nicht ausgeschlossen werden kann, mit synthetischer Luft beaufschlagt. Bei der Kalibrierung soll in der Regel das

Prüfgas dem Messgas entsprechen, manche Hersteller geben jedoch in ihren Unterlagen Korrekturfaktoren zur Verwendung anderer als der zu messenden Prüfgase an. Die Konzentration des Prüfgases ist dabei so zu wählen, dass der Sollwert in etwa der Mitte des Messbereiches entspricht, aber in jedem Fall über der Alarmschwelle zur Auslösung des Hauptalarms liegt.³⁷ Diffusionsmessköpfen wird das Gas mittels Adapter mit den vom Hersteller vorgegebenen Volumenströmen aufgegeben.

Eine Justierung der Anzeige ist dann notwendig, wenn die durch die Kalibrierung festgestellten Abweichung von den Sollwerten bei Brenngasen mehr als 5 % am Nullpunkt bzw. bei der Empfindlichkeit bis zu 20 % vom Sollwert³⁸ (bezogen auf den Messbereichsendwert 100 % UEG) und im Fall toxischer Gase 10 % des Hauptalarmgrenzwerts am Nullpunkt bzw. bei der Empfindlichkeit bis zu 20 % des Hauptalarmgrenzwertes³⁹ beträgt.

7.3 Instandsetzung

Für die ordnungsgemäße Funktion und den ordnungsgemäßen Zustand der Gaswarneinrichtungen ist der Betreiber zuständig. Instandsetzungen und Austausch von Anlagenbestandteilen müssen nach den entsprechenden Betriebs- und Wartungsanleitungen durchgeführt werden.

Treten beispielsweise vermehrt Fehlalarme auf oder wird im Rahmen einer Funktionsprüfung festgestellt, dass die Sensorempfindlichkeit zu gering für die Einstellung des Sollwertes ist, muss das Sensorelement ersetzt werden. Dieses darf nur durch Original-Ersatzteile des Herstellers geschehen. Nach Instandsetzung ist in diesem Fall eine Funktionskontrolle durchzuführen.

³⁷ vgl. BGI 518, Juli 2009, S. 27

³⁸ vgl. BGI 518, Juli 2009, S. 27

³⁹ vgl. BGI 836

8 Fazit

Das im Rahmen der Diplomarbeit entwickelte Sicherheitskonzept für das Brennstoffzellenlaboratorium der DBI- Gastechnologisches Institut gGmbH sieht eine raumluftechnische Anlage vor, die zum einen das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verhindert und zum anderen eine ausreichende Verdünnung toxischer Schadstoffe in der Raumluft realisiert.

Zur Überwachung der Wirksamkeit der Lüftungsfunktion ist eine Gaswarnanlage mit Sensoren zur direkten Messung der Kohlenmonoxid-, Kohlendioxid- sowie der Brenngaskonzentration in der Raumluft notwendig. Mit der automatischen Auslösung von Schaltungen im Alarm- und Störfall wird ein hohes Maß an Sicherheit gewährleistet.

Spindeldurchführungen an Armaturen und Flanschverbindungen sowie lösbare Verbindungen (falls sie nicht nur selten gelöst werden) gelten als sekundäre Freisetzungsquellen und können seltene und kurzzeitige Freisetzungen von Gefahrstoffen verursachen. Aus diesem Grund sollen Flanschverbindungen vermieden werden, auf die Verwendung ausschließlich hochwertig abgedichteter Armaturen wird ausdrücklich verwiesen.

Die bereits installierten Gassensoren zur Messung der Kohlenmonoxidkonzentration und der Brenngaskonzentration können in die neue Anlage integriert werden, wobei der Propan-Brenngassensor mit Butan in Luft kalibriert werden muss. Außerdem ist eine Überwachung der Kohlendioxidkonzentration vorzusehen.

Die installierte Zuluftanlage kann aufgrund der Anordnung der Luftauslässe keine raumerfüllende Strömung und somit keine ordnungsgemäße Verdünnung der Raumluft sicherstellen. Eine gezielte Raumlufführung durch eine Verdünnungslüftung mit tangentialen Freistrahlen wird vorgeschlagen.

Die installierten Ventilatoren genügen den Anforderungen in Hinsicht auf die zu fördernden Volumenströme. Das Warmwasser-Heizregister ist für die Bereitstellung isothermer Zuluft von 20 °C im Winterbetrieb nicht ausreichend leistungsfähig dimensioniert. Weiterhin müssen zur Realisierung des Lüftungskonzeptes eine Luftkühlung sowie Geräte zur Luftbefeuchtung und -entfeuchtung vorgesehen werden, es wird die Verwendung eines Feuchtluftkühlers und eines Dampfbefeuchters empfohlen.

Literaturverzeichnis

- 1 Duden.de; Definition „Sicherheit“, 2012
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Sicherheit>
- 2 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG); i. d. F. des Gesetzes von 05.02.2009, § 4
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>
- 3 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG); i. d. F. des Gesetzes von 05.02.2009, § 5 (1)
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>
- 4 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV); i. d. F. der Verordnung vom 28.07.11, § 3
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gefstoffv_2010/gesamt.pdf
- 5, 6 CERBE, Günther: Grundlagen der Gastechnik. München. 7. überarb. Aufl., 2008
- 7,8 REICHL, Franz-Xaver: Taschenatlas der Toxikologie. Stuttgart. 2. überarb. Aufl., 2008
- 9 Eintrag zu CAS-Nr. 630-08-0 in der GESTIS-Stoffdatenbank
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001110.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001110.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)
- 10 REICHL, Franz-Xaver: Taschenatlas der Toxikologie. Stuttgart. 2. überarb. Aufl., 2008
- 11 Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie: AEGL-Werte, 2005
http://www.tlug-jena.de/umweltdaten/umweltdaten2005/inhalt/u_themen/chemikalien/leitfaden_havarien/05_anlage_3.pdf
- 12 DIN EN 60079-29-2; Explosionsfähige Atmosphäre- Teil 29-2: Gasmessgeräte- Auswahl, Installation, Einsatz und Wartung von Geräten für die Messung von brennbaren Gase und Sauerstoff. Juli 2008
- 13 TRGS 721; Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre- Beurteilung der Explosionsgefährdung. Juni 2006
http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-1.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 14 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV); i. d. F. der Verordnung vom 08.11.2011
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betrsv/gesamt.pdf>
- 15 CERBE, Günther: Grundlagen der Gastechnik. München. 7. überarb. Aufl., 2008

- 16 DIN EN 60079-10-1; Explosionsfähige Atmosphäre- Teil 10-1: Einteilung der Bereiche- Gasexplosionsgefährdete Bereiche. Oktober 2009
- 17 TRGS 720; Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre- Allgemeines. Juni 2006
http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 18 ESSBACH, Rico: Untersuchung des Transportes wasserstoffreicher Gase im bestehenden europäischen Erdgasleitungssystem: Diplomarbeit Studienakademie Glauchau. Glauchau, 2008
- 19 VDI 2440; Emissionsminderung Mineralölraffinerien. November 2000
- 20 E DIN EN 60079-10-1; -Entwurf- Explosionsfähige Atmosphäre- Teil 10-1: Einteilung der Bereiche- Gasexplosionsgefährdete Bereiche. September 2011
- 21 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), i. d. F. der Verordnung vom 08.11.2011
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betrnichv/gesamt.pdf>
- 22, 23 DIN 1946-7; Raumluftechnik- Teil 7: Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien, Juli 2009
- 24 DIN EN 60079-0; Explosionsfähige Atmosphäre- Teil 0: Geräte- Allgemeine Anforderungen, März 2010
- 25 CERBE, Günther u. a.: Grundlagen der Gastechnik. München. 7. überarb. Aufl., 2008
- 26 VDI 2440; Emissionsminderung Mineralölraffinerien. November 2000
- 27 DIN EN 13779; Lüftung von Nichtwohngebäuden- Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlungssysteme. September 2009
- 28, 29, 30 eigene Mitschrift aus Vorlesung Angewandte Lüftungstechnik, Dozent: Prof. J. Löffler
- 31 DIN EN 45544-4; Elektrische Geräte für die direkte Detektion und direkte Konzentrationsmessung toxischer Gase und Dämpfe- Teil 4: Leitfaden für Auswahl, Installation, Einsatz und Instandhaltung. Oktober 2000
- 32 DIN EN 60079-29-2; Explosionsfähige Atmosphäre- Teil 29-2: Gasmessgeräte- Auswahl, Installation, Einsatz und Wartung von Geräten für die Messung von brennbaren Gase und Sauerstoff. Juli 2008
- 33 ExTox.de; Transmitterliste, November 2011
<http://www.extox.de/Gas-Transmitterliste.pdf>
- 34, 35 BGI 518; Gaswarneinrichtungen für den Explosionsschutz. Juli 2009, in Form des Merkblattes T 023 der Berufsgenossenschaft Chemie

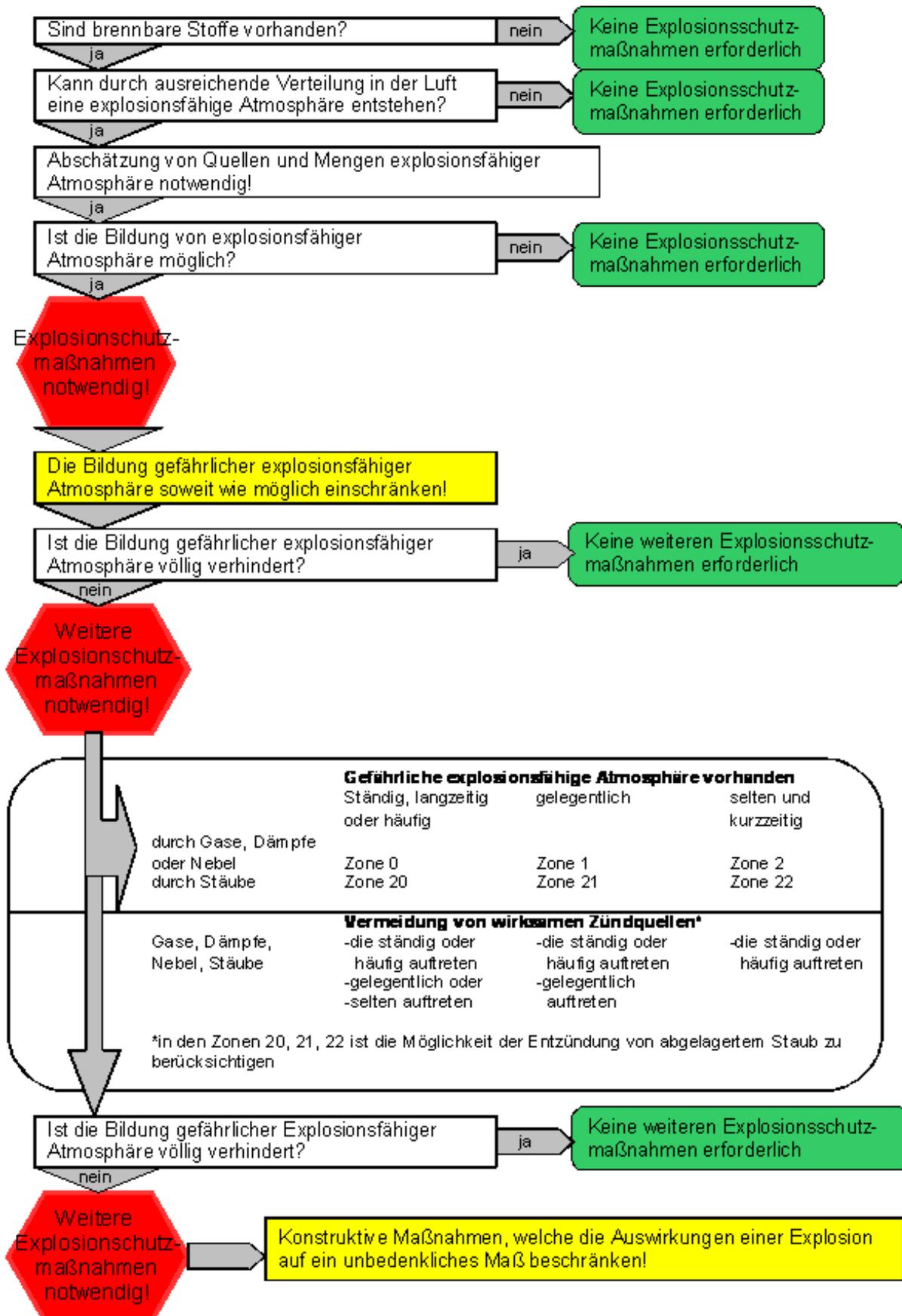
- 36 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV); i. d. F. der Verordnung vom
08.11.2011
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betrsv/gesamt.pdf>

Anhangverzeichnis

Anhang I	Handlungshilfe für Explosionsschutzmaßnahmen.....	A1
Anhang II	Mollier-h-x-Diagramm.....	A3
Anhang III	Produktdatenblätter Gaswarneinrichtung	A5
Anhang IV	Kontrollplan.....	A18
Anhang V	Wirkübersicht Gaswarneinrichtung	A22
Anhang VI	Isometrische Darstellung der Rohrleitungsinstallation	A24

Anhang I

Handlungshilfe für Explosionsschutzmaßnahmen



eigene Darstellung in Anlehnung an TRGS 720, 2006, Bild 1:
Abfrageschema zum Erkennen und Vermeiden von Explosionsgefährdungen

Anhang II

Mollier-h-x-Diagramm

Anhang III

Produktdatenblätter Gaswarneinrichtung

Gaswarnzentrale ET-4D(A)2



Beschreibung:

Gaswarnzentrale zur Messung brennbarer und/oder toxischer Gase sowie Sauerstoff. Rauchmelder-Option. Grafikdisplay. Menügeführte Konfiguration. 3 Alarmschwellen pro Kanal. 12 frei konfigurierbare Relais-Schaltausgänge. Analogausgänge 4...20 mA (nur ET-4DA2).

Artikel-Nr.	Wandaufbau		Hutschiene		Schalttafeleinbau		19"-Rack	
	230 V	24 V	230 V	24 V	230 V	24 V	230 V	24 V
ET-4D2	315000	315004	315001	315005	315002	315006	315008	315009
ET-4DA2	317000	317004	317001	317005	317002	317006	317008	317009

Funktionsmerkmale

Transmitteranzahl:	1 bis 4 (4-20 mA)
Signalauswertung:	Mikrocontroller mit A/D-Wandler
Alarm-/Störungs-/Anzeige:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beleuchtetes Grafikdisplay (160 x 80) zur Anzeige von Messwerten, Meldungen und Alarmen ▪ 12 (3 x 4) rote LEDs zur Alarmanzeige ▪ LEDs zur Anzeige von Kanalstörung (4 x gelb), Kanalbetrieb (4 x grün), Betrieb Zentrale (1 x grün), Störung Zentrale (1 x gelb)
Benutzerschnittstelle:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menügeführtes System über Grafikdisplay und Taster ▪ Vollständig am Gerät ohne Hilfsmittel konfigurierbar ▪ 3 Passwort-geschützte Bedienebenen
Alarmauswertung:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 frei einstellbare Alarmschwellen pro Kanal ▪ Überwachung: Überschreitung, Unterschreitung oder Min./Max. ▪ Selbsthaltung jedes Alarms konfigurierbar
Relais, potentialfrei:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 12 Wechsler 230 V / 5 A (Gesamtschaltstrom: max. 10 A), frei konfigurierbar mit Alarmen 1 bis 3 und Transmitterstörung ▪ 2 Wechsler 230 V / 5 A für Wartungsmodus und Gerätestörung
Zusatzfunktionen:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nullpunkt- und Empfindlichkeitsjustage der Messkanäle ▪ RS 232/RS 485-Schnittstelle für Kommunikation mit externer Peripherie (PC oder PLT-System) ▪ Schlüsselschalterfunktion (Wartungsmodus) ▪ Hupenreset ▪ Neuwertalarmierung ▪ 4 Digitaleingänge, potentialfrei ▪ 4 Analogausgänge 4-20 mA/0-10 V, potentialfrei (nur ET-4DA2)
Einsatztemperatur:	-10 °C bis +40 °C, Feuchte: nicht kondensierend
Lagertemperatur:	-25 °C bis +60 °C, Feuchte: nicht kondensierend
Optionen:	Profibus-, Modbus-, Ethernet-Anbindung, Visualisierung ET-View, ...

Gaswarnzentrale ET-4D(A)2

Elektrische Daten

Versorgungsspannung: • 230 V AC (85...264 V AC, 47...440 Hz / 120...340 V DC) oder

• 24 V DC

Leistungsaufnahme: 45 W (230 V AC: max. 0,2 A , 24 V DC: max 2 A)

Konformität

EG-Richtlinien: CE II (2)G (230 V AC, Software ET481118) oder CE II (3)G

94/9/EG (ATEX), 2004/108/EG (EMV), 2006/95/EG (LVD)

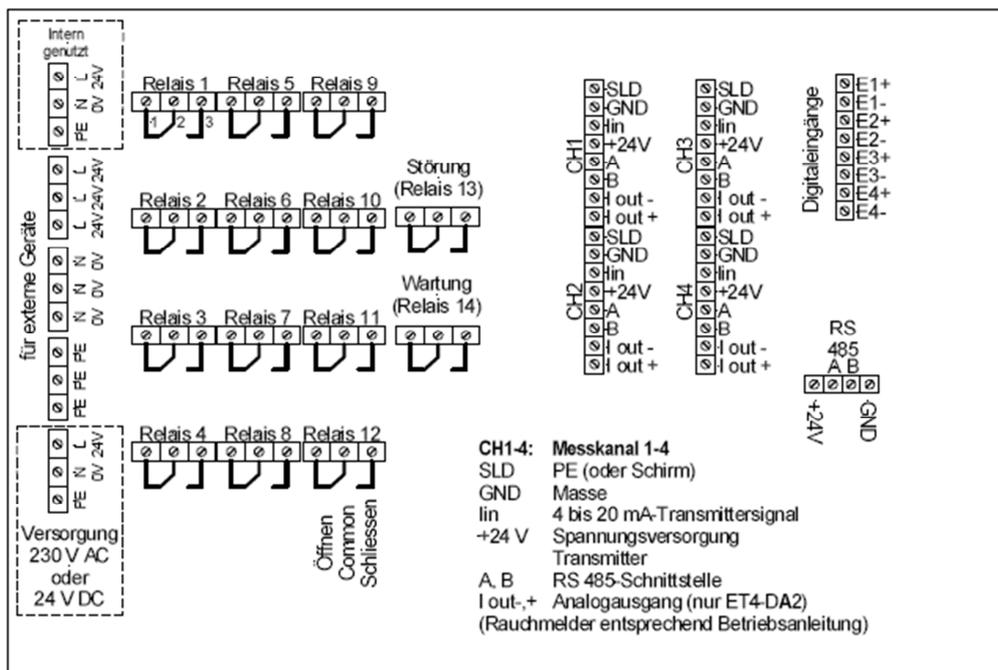
BAM 10 ATEX 0301 X (Art. 315000, 317000)

(gemäß Normen EN 60079-29-1:2007, EN 50271:2001)

Messfunktion: Ausgelegt nach

- DIN EN 60079-29-1
- DIN EN 45544-1 bis DIN EN 45544-3
- DIN EN 50104

I/O-Klemmenfeld



Relaiskonfiguration

Relais 1 bis 12: Frei konfigurierbar am Gerät (Alarmer 1 bis 3, Störung, quittierbar, Arbeits-/Ruhestromprinzip, Logische Verknüpfung AND/OR)

Relais 13: Gerätestörung

Relais 14: Wartungsmodus

Standardeinstellung:

Relais 1 bis 4: 1. Alarm der Kanäle 1 bis 4

Relais 5 bis 8: 2. Alarm der Kanäle 1 bis 4

Relais 9: 1. Sammelalarm Kanäle 1 bis 4

Relais 10: 2. Sammelalarm Kanäle 1 bis 4

Relais 11: 3. Sammelalarm Kanäle 1 bis 4

Relais 12: Sammelstörung Kanäle 1 bis 4

Alle Relais: Ruhestrom, nicht quittierbar

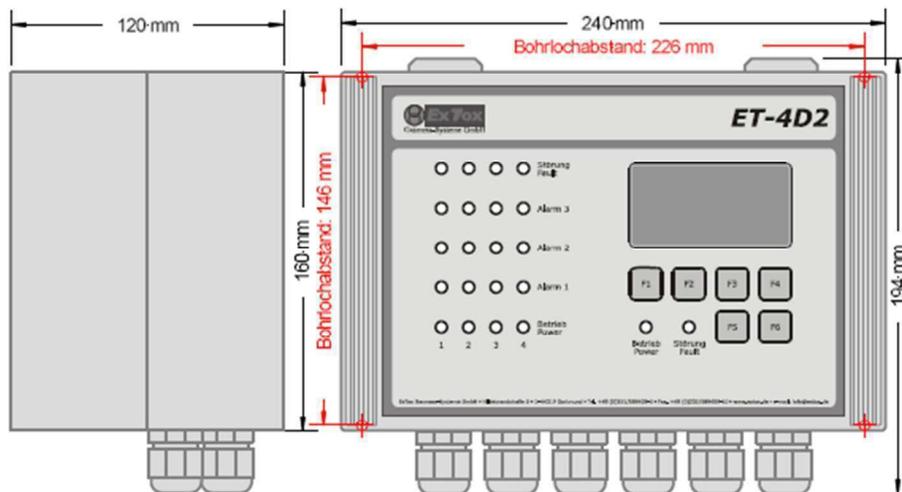
(Bei Verwendung in ExTox IMC, in Sonderversionen oder zusammen mit Rauchmeldern sind Abweichungen möglich)

Option: Anpassung nach Kundenvorgaben:

- bei Werksauslieferung
- am Einsatzort durch ExTox-Service

Gaswarnzentrale ET-4D(A)2

Version Wandaufbau



Version:
Abmessungen (BxHxT):
Werkstoff:
Schutzart:
Kabeleinführung:

Montagehinweise:

Wandaufbaugeschäft für ortsfeste Installation

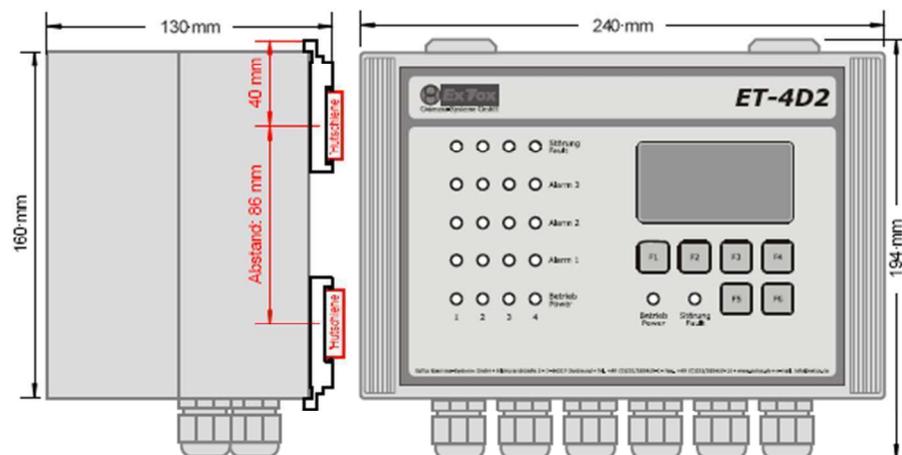
240 mm x 194 mm x 120 mm

Gehäuse ABS

IP 54

- 1 Stk. M20 x 1,5 (Kabeldurchmesser 7-13 mm)
- 10 Stk. M16 x 1,5 (Kabeldurchmesser 5-10 mm)
- Gehäusedurchführungen für Befestigungsschrauben: d= 4,5 mm
- Zur Durchführung von Installations- und Wartungsarbeiten kann das Gehäuse geöffnet werden und der Deckel nach oben geschwenkt werden. Ausreichenden Freiraum vorsehen.

Version Hutschiene



Version:

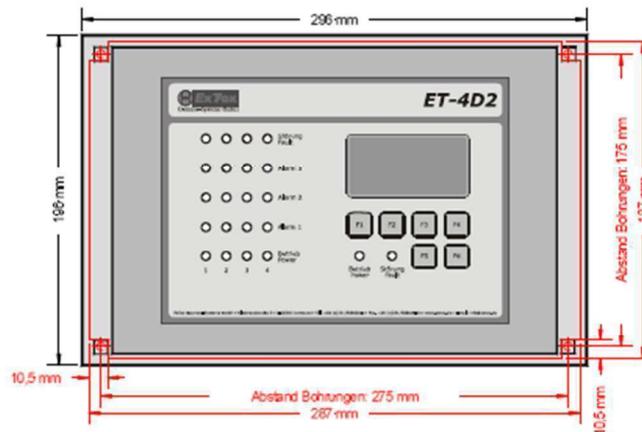
Montagehinweise:

Baugleich mit Version Wandaufbau, aber zusätzlich mit Adaptern für Montage auf Standard-Hutschienen 35 mm x 7,5 mm

- Die Befestigung auf zwei Hutschienen erfolgt durch Schnappmontage mittels der an der Gehäuserückwand befestigten Adapter. Die Verbindung kann mit einem Schraubendreher jederzeit leicht gelöst werden; dazu Laschen der Adapter mit Schraubendreher anheben.
- Zur Durchführung von Installations- und Wartungsarbeiten kann das Gehäuse geöffnet werden und der Deckel nach oben geschwenkt werden. Ausreichenden Freiraum vorsehen.

Gaswarnzentrale ET-4D(A)2

Version Schalttafeleinbau



Version:	Einbau in Schalttafeln oder Schaltschränken. Anzeige/Controller wird im Frontausschnitt montiert. I/O-Klemmenfeld kann frei auf Montageflächen positioniert werden.
Abmessungen (BxHxT):	296 mm x 196 mm x 80 mm (Anzeige/Controller) 240 mm x 160 mm x 40 mm (I/O-Klemmenfeld)
Werkstoff:	Schalttafel front: Polystyrol mit umlaufender Doppeldichtung
Schutzart:	IP 54 (zur Frontfläche)
Montagehinweise:	<ul style="list-style-type: none"> Gehäusedurchführungen für Befestigungsschrauben: d = 3 mm I/O-Klemmenfeld abgesetzt zur Montage im Schaltschrank: Bohrlochabstand: 226 mm x 146 mm, Verbindungskabel: ca. 1,8 m (Sonderlänge auf Anfrage)
Optionen:	<ul style="list-style-type: none"> I/O-Klemmenfeld nicht abgesetzt: Montage erfolgt auf der Rückseite der Controllerplatine. Tiefe des Gesamtgerätes: ca. 160 mm Frontrahmen zur Adaption an kundenspezifische Abmessungen des Schalttafelausschnitts

Version 19"-Rack

Version:	Baugleich mit Version Schalttafeleinbau, aber eingebaut in einen 19"-Baugruppenträger
Abmessungen (BxHxT):	482,6 mm (84 TE) x 265,35 mm (6 HE) x 185 mm

(Technische Änderungen vorbehalten)

Transmitter Serie Sens



- Beschreibung:
- Messwertgeber für brennbare Gase, toxische Gase oder Sauerstoff (siehe ExTox Gas- / Transmitterliste)
 - 4...20 mA-Ausgang mit linearer Kennlinie
 - Verwendung in industriellen und gewerblichen Anwendung

Funktionsmerkmale

- Messgas: ExTox Gas- / Transmitterliste
 Messbereich: ExTox Gas- / Transmitterliste. Der Standard-Messbereich kann bei der Werksjustage auf Wunsch im Bereich 50 bis 200 % variiert werden. Größere Abweichungen ggf. auf Anfrage
- Messprinzipien:
- Sens ...-WT: Wärmetönung
 - Sens ...-IR: Absorption
 - Sens ...-EC: Elektrochemische Zelle
 - Sens ...-KE: Elektrochemische Sauerstoffzelle
 - Sens ...-HL: Metalloxid-Halbleiter
- Betriebsart: Diffusion (Bestromungsbetrieb möglich, z. B. in ExTox IMC)
 Einstellzeit: ExTox Gas- / Transmitterliste

Einsatzbereich

- Temperatur: ExTox Gas- / Transmitterliste
 Feuchte: 10 r.F bis 90 r.F (Kondensation vermeiden)
 Druck: 800 hPa bis 1100 hPa
 Abweichungen:
- Änderungen der Klimagrößen können mit der für atmosphärische Schwankungen üblichen Rate erfolgen. Sehr schnelle Änderungen, z. B. Druckstöße, können kurzzeitig größere Messabweichungen hervorrufen.
 - Ausweitung der Klimabereiche im Einzelfall nach Absprache mit ExTox möglich.

Konformität

- EG-Richtlinien:
- 2004/108/EG (EMV)
 - nur Sens ...-EC/-KE: 94/9/EG (ATEX) CE Ⓜ II 3G (geeignet für Zone 2)
- Zündschutzart: Ex nA IIC T6 X (nur Sens ...-EC/-KE)
 Messfunktion:
- Ausgelegt nach
 - DIN EN 60079-29-1 (Brennbare Gase)
 - DIN EN 45544-1 bis DIN EN 45544-3 (Toxische Gase)
 - DIN EN 50104 (Sauerstoff)
 - Sens ...-HL: Messprinzipbedingte Einschränkungen hinsichtlich Normenanforderungen bzgl. Linearität und bei klimatischer Beeinflussung vorhanden. Bei Auslegung des Alarmkonzepts beachten.

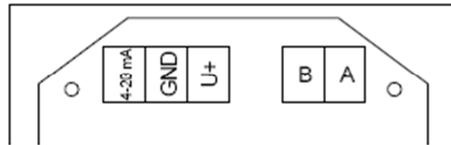
Transmitter Serie Sens

Mechanische Daten

Abmessungen: (Länge x Breite x Höhe)	<ul style="list-style-type: none"> Sens ...-WT/-IR/-EC/-HL: 138 mm x 105 mm x 65 mm Sens ...-KE: 188 mm x 105 mm x 65 mm
Gewicht:	ca. 0,5 kg
Werkstoff:	Aluminiumguss (lackiert) / Edelstahl
Schutzart:	<ul style="list-style-type: none"> IP 65 (ausgenommen Gaseinlass)
Installation:	<ul style="list-style-type: none"> Wandmontage Deckenmontage mit Winkel (Option) Einbau in Rohrleitungen mit Adapter (Option)
Lagertemperatur:	-25 °C bis +60 °C

Elektrische Daten

Versorgungsspannung:	24 ± 6 V DC								
Strom-/Leistungsaufnahme:	<ul style="list-style-type: none"> Sens ...-WT/-IR/-HL: 80 mA / 2 W Sens ...-EC/-KE: 40 mA / 1 W 								
Schnittstelle:	<ul style="list-style-type: none"> 4...20 mA, aktiv (andere Strom- und Spannungsbereiche auf Anfrage) lineare Kalibrierkurve Option: RS 485 für Fernjustage (Variante Sens-I) 								
Max. Bürde:	500 Ω								
Kabeleinführung:	M 16 x 1,5 (Kabeldurchmesser 5-9 mm)								
Anschlussbelegung:	<table> <tr> <td>U+</td> <td>Versorgungsspannung 24 V</td> </tr> <tr> <td>GND</td> <td>Masse (Versorgungsspannung und Stromausgang)</td> </tr> <tr> <td>4-20mA</td> <td>Stromausgang 4-20 mA</td> </tr> <tr> <td>A, B</td> <td>RS 485-Schnittstelle, nur Variante Sens-I</td> </tr> </table>	U+	Versorgungsspannung 24 V	GND	Masse (Versorgungsspannung und Stromausgang)	4-20mA	Stromausgang 4-20 mA	A, B	RS 485-Schnittstelle, nur Variante Sens-I
U+	Versorgungsspannung 24 V								
GND	Masse (Versorgungsspannung und Stromausgang)								
4-20mA	Stromausgang 4-20 mA								
A, B	RS 485-Schnittstelle, nur Variante Sens-I								



Leitung:	ExTox-Kabel 3 x 0,8 mm oder gleichwertig (Sens-I: ExTox-Kabel 6 x 0,8 mm oder gleichwertig)
Leitungslänge:	Abhängig vom Widerstand der verwendeten Kabel; bei Verwendung von ExTox-Kabel (Aderwiderstand von 9 Ω/km) <ul style="list-style-type: none"> Sens ...-WT/-IR/-HL: maximal 1000 m Sens ...-EC/-KE: maximal 2000 m

(Technische Änderungen vorbehalten)

Gas- und Transmitterliste



Messgas	Transmitter	Artikel-Nr. (Sens/ExSens)	Standard-Messbereich	Typenspezifische Eigenschaften/ Bemerkungen
Arsin (AsH ₃)				siehe: Hydride Gase (Silan, Phosphin)
Benzin (Gemisch)				siehe: Brennbare Gase
Benzol (C ₆ H ₆)				siehe: Brennbare Gase
Bortrichlorid (BCl ₃)				siehe: Chlorwasserstoff
Bortrifluorid (BF ₃)				siehe: Fluorwasserstoff
Brennbare Gase und Dämpfe	BG-100-IR4	211263/ 251054	0...100 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiet Gasanalyse Methan (CH₄), z. B. Bio- und Deponiegas Betrieb in Probenahmesystemen, z. B. ExTox IMC Temperatur: -20 °C bis +55 °C Einstellzeit t₉₀: 30 s (im Bestromungsbetrieb: 10 s)
	BG-IR4	211264/ 251055	0...100 % UEG	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiete: Bereiche mit Gefährdung durch Sensorgifte (z. B. Kläranlagen), Bereiche mit Sauerstoffminderung, Bereiche mit Verwendung höherwertiger Kohlenwasserstoffe Messgase: Kohlenwasserstoffe (HC) Temperatur: -20 °C bis +55 °C Einstellzeit t₉₀: 30 s (im Bestromungsbetrieb: 10 s)
	BG-WT	211206/ 251001	0...100 % UEG	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiet: Alle Standard-Einsätze im Explosionsschutz Messgase: Alle brennbaren Gase Temperatur: -25 °C bis +55 °C Einstellzeit t₉₀: 15...60 s, stoffabhängig
	BG-HL	211207/ 251004	0...100 % UEG	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiet: Raumluft-Überwachung, z. B. Heizung Messgase: Wasserstoff, Methan, Propan, Butan (Weitere Gase nach Absprache mit ExTox möglich) Warngerät, Messgenauigkeit prinzipbedingt eingeschränkt Temperatur: -25 °C bis +55 °C Einstellzeit t₉₀: 30...60 s, stoffabhängig
	BG-5000-HL	211215/ 251002	0...5000 ppm	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiete Leckage- und Spurendetektion Messgase: Wasserstoff, Methan, Propan oder Butan (Weitere Gase nach Absprache mit ExTox möglich) Temperatur: -25 °C bis +55 °C Warngerät, Messgenauigkeit prinzipbedingt eingeschränkt Einstellzeit t₉₀: 30...60 s, stoffabhängig
Bromwasserstoff (HBr)				siehe: Chlorwasserstoff
Butan, n-/ Isobutan (C ₄ H ₁₀)				siehe: Brennbare Gase
Butan-1-ol (C ₄ H ₉ OH)				siehe: Brennbare Gase
Butan-2-ol (C ₄ H ₉ OH)				siehe: Brennbare Gase
Butanon (CH ₃ COC ₂ H ₅)				siehe: Brennbare Gase
Butylacetat (CH ₃ COOC ₄ H ₉)				siehe: Brennbare Gase
Chlor (Cl ₂)	CI2-10-EC	211209/ 251039	0...10 ppm	<ul style="list-style-type: none"> Querempfindlichkeiten: 1 ppm Br₂ → ca. 1 ppm Cl₂ 1 ppm F₂ → ca. 0,4 ppm Cl₂ 10 ppm ClO₂ → ca. 3 ppm Cl₂ 10 ppm SO₂ → ca. 2 ppm Cl₂ 10 ppm NO₂ → ca. 2 ppm Cl₂ Alle gasberührten Teile müssen vor Kalibrierung mindestens 30 min mit Prüfgas gespült werden. Sens: Sensorschutzkappe in Teflon ausgeführt Temperatur: -10 °C bis +40 °C Einstellzeit t₉₀: 30 s

Gas- und Transmitterliste



Messgas	Transmitter	Artikel-Nr. (Sens/ExSens)	Standard-Messbereich	Typenspezifische Eigenschaften/ Bemerkungen
Kältemittel	KM-10-HL	211232/ -----	0...10 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiet: Leckageüberwachung für wasserstoffhaltige Kältemittel (z. B. R134a, R404a, R507, R152a, R22, ...) Warngerät, Messgenauigkeit prinzipbedingt eingeschränkt Temperatur: -20 °C bis +50 °C Einstellzeit t_{90}: 60 s
	KM-1-HL	211213/ 251018	0...10000 ppm (1 Vol.-%)	wie KM-10-HL
	IR-Absorption		0...2000 ppm	Sonderausführung auf Anfrage für wasserstoffhaltige Kältemittel
Klimagrößen: Temperatur, Feuchte, Druck	TF	211265/ 251047	-40 bis 120 °C, 0 bis 100 % r.F.,	separates Datenblatt
	TFD	211255	-40 bis 120 °C, 0 bis 100 % r.F., 0 bis 2000 hPa (mbar)	separates Datenblatt
Kerosin (Gemisch)				siehe: Brennbare Gase
Kohlendioxid (CO ₂)	CO2-100-IR4	211271/ 251062	0...100 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Haupteinsatzgebiet Gasanalyse, z. B. Bio- und Deponiegas Betrieb in Probenahmesystemen, z. B. ExTox IMC oberhalb von 50 Vol.-% ist die Messgenauigkeit eingeschränkt Temperatur: -10 °C bis +55 °C Einstellzeit t_{90}: 25 s (im Beiströmungsbetrieb: 10 s)
	CO2-5-IR4	211267/ 251060	0...5 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur: -10 °C bis +55 °C Einstellzeit t_{90}: 25 s
	CO2-T-5-IR4	211268/ 251059	0...5 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur: -25 °C bis +55 °C (Tiefemperaturanwendung) Einstellzeit t_{90}: 25 s
	CO2-5000-IR4	211272/ 251063	0...5000 ppm	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur: -10 °C bis +55 °C Einstellzeit t_{90}: 25 s
Kohlenmonoxid (CO)	IR-Absorption		0...100 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Sonderausführung auf Anfrage Betrieb in Probenahmesystemen, z. B. ExTox IMC
	IR-Absorption		0...10 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Sonderausführung auf Anfrage Betrieb in Probenahmesystemen, z. B. ExTox IMC
	CO-4-EC	211256/ -----	0...4 Vol.-% (40000 ppm)	<ul style="list-style-type: none"> Querempfindlichkeiten: 10000 ppm H₂ → ca. 10000 ppm CO 10000 ppm C₂H₄ → ca. 1000 ppm CO Temperatur: -10 °C bis +40 °C Einstellzeit t_{90}: 40 s
	CO-2-IR	211278/ -----	0...2 Vol.-%	<ul style="list-style-type: none"> Sonderausführung Betrieb in Probenahmesystemen, z. B. ExTox IMC Abmessungen Sens: 188 mm x 105 mm x 65 mm Temperatur: -10 °C bis +40 °C Einstellzeit t_{90}: 30 s
	CO-4000-EC	211230/ 251030	0...4000 ppm	<ul style="list-style-type: none"> Querempfindlichkeiten: 1000 ppm H₂ → ca.600 ppm CO 1000 ppm C₂H₄ → ca.100 ppm CO Temperatur: -10 °C bis +40 °C Einstellzeit t_{90}: 40 s
	CO-300-EC	211205/ 251006	0...300 ppm	<ul style="list-style-type: none"> Querempfindlichkeiten: 100 ppm H₂ → ca. 40 ppm CO Temperatur: -10 °C bis +40 °C Einstellzeit t_{90}: 40 s
Methan (CH ₄)				siehe: Brennbare Gase
Methanol (CH ₃ OH)				siehe: Brennbare Gase

Dauerbetrieb



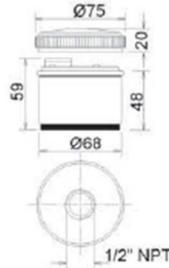
-30°C ..+60°C
IP 65

○ Modulfarbe grau
● Modulfarbe schwarz

Haube aus PC
selbstlöschend



Gewicht: 0,12 kg



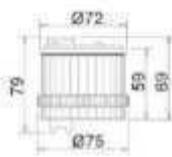
TWS B.C. – Basiselement

Spannung V	max. 240	max. 240
Farbe	grau RAL 7035	schwarz
Dichtungen	EPDM	EPDM
unverfärb. Schrauben	verzinkter Stahl	verzinkter Stahl
Sockel-Platine	FR 4	FR 4
Klembrett	6 Eingänge PA 6.6	6 Eingänge PA 6.6

Bezeichnung	TWS B.C.	NTWS B.C.
Best.-Nr.	○ 27 700	● 27 690



Gewicht: 0,09 kg



TWS F MT – Dauerlicht-Element

Spannung V	12 =/~	24 =/~	48 =/~	110 =/~	230 =/~
Lampenleistung W	5	5	5	5	5
Stromaufnahme mA	430	210	100	35	21
Lichtleistung Cd (p)	4	3	3	2,5	2,5
Lichtart	Glühlampe				
Lampensockel	BA 15d				

Ersatz-Leuchtmittel	27 780	27 781	27 782	27 783	27 784
Lieferung erfolgt ohne Leuchtmittel!					

Die TWS-Dauerlichtelemente können auch mit LED-Lampen ausgestattet werden.

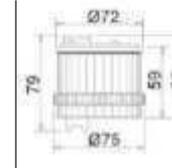


Details siehe Seite 88!

Bezeichnung	TWSFMT12240DA	NTWSFMT12240DA
● Best.-Nr. BLAU	○ 27 701	● 27 631
● Best.-Nr. ORANGE	○ 27 702	● 27 632
● Best.-Nr. ROT	○ 27 703	● 27 633
● Best.-Nr. GRÜN	○ 27 704	● 27 634
● Best.-Nr. GELB	○ 27 705	● 27 635
○ Best.-Nr. KLAR	○ 27 706	● 27 636



Gewicht: 0,10 kg



TWS L MT – Blinklicht-Element

Spannung V	12=	24=	48=	24~	48~	110~	230~
Stromaufnahme mA	430	210	103	210	103	37	26
Lampenleistung W	5						
Lichtleistung Cd (p)	4	3	3	3	3	2,5	2,5
Lichtart	Glühlampe			Glühlampe			
Lampensockel	BA 15d			BA 15d			

Ersatz-Leuchtmittel	27 780	27 781	27 782	27 781	27 782	27 783	27 784
Lieferung erfolgt ohne Leuchtmittel!							

Die TWS-Blinklichtelemente können auch mit LED-Lampen ausgestattet werden.



Details siehe Seite 88!

Bezeichnung	TWSLMT1248D		TWSLMT24240A	
● Best.-Nr. BLAU	○ 27 711	● 27 641	○ 27 721	● 27 651
● Best.-Nr. ORANGE	○ 27 712	● 27 642	○ 27 722	● 27 652
● Best.-Nr. ROT	○ 27 713	● 27 643	○ 27 723	● 27 653
● Best.-Nr. GRÜN	○ 27 714	● 27 644	○ 27 724	● 27 654
● Best.-Nr. GELB	○ 27 715	● 27 645	○ 27 725	● 27 655
○ Best.-Nr. KLAR	○ 27 716	● 27 646	○ 27 726	● 27 656

PowerWalker VI 2000 LCD

Line-Interactive UPS

2000VA Line-Interactive UPS

2x Schuko + 2x IEC outlets, RJ11/RJ45 Surge Protection

USB Connection for monitoring

LCD display for status view

Built-in boost and buck AVR function



Item-No. 10120020



Product Features

PowerWalker VI 2000 LCD is a Line- Interactive UPS which provides high performance and reliable and cost-effective backup power protection. The UPS can be automatically started up without AC power supplied. In addition, this UPS provides RJ11/RJ45 surge protection, and green power function for energy saving. Equipped with a voltage stabilizer, this UPS will continue providing clean and stable power to connected equipment and is perfect for any home or SMB (small medium business) application.

- Super smart charger to shorten charging time
- Built-in boost and buck AVR
- Simulated sine wave
- Auto restart while AC is recovering
- Off-mode charging
- Cold start function
- USB communication port
- RJ11/RJ45 surge protection
- Monitoring software included
- LCD display for status view
- Green function for energy saving (can be enabled by Software)



Backsite view



LCD Display



RJ11/RJ45 surge protection

PowerWalker is a brand of:
BlueWalker GmbH
Martin-Buber-Strasse 12 • D-41470 Neuss • Germany

Phone: +49 (0) 2137 / 92 98 73 • Fax: +49 (0) 2137 / 78 73 925
info@bluewalker.eu • www.bluewalker.eu • www.powerwalker.com

Technical Details

Product Features

Capacity	2000VA / 1200W
----------	----------------

Input

Voltage	220/230/240VAC
Voltage Range	160-290VAC

Output

Voltage	220/230/240VAC
Voltage Regulation	± 10% (Battery Mode)
Frequency	50 or 60Hz
Freq. Regulation	±1 Hz (Battery Mode)
Waveform	Modified Sine wave

Transfer Time

Typical	2-6ms
---------	-------

Battery

Type	12V / 9Ah
Quantity	2 x
Recharge Time	4h to 90%

Full Protection

Discharge	Yes
Overcharge	Yes
Overload	Yes

LCD Display

LCD Indicators	AC mode, Battery mode, Load level, Battery capacity, Input voltage, Output voltage, Overload alarm, Fault alarm and Low battery alarm.
----------------	--

Audio Indicators

Battery Mode	Beep every 10sec
Low Battery	Beep every second
Fault	Beep every 0.5sec
Battery Weak	Beep every 2sec
Battery faulty	Continuously sounding

Connections

Communication	USB
Outlets	2x Schuko and 2x IEC
Surge Protection	RJ11/RJ45 (in/out)

Software & System Requirements

Software	ViewPower
Operating System	For details visit: www.powerwalker.com/viewpower.html
Other	1x USB port

Product Details

Dimensions	397 x 146 x 205 mm
Colour	Black
Weight UPS case	12.1kg
Fan Control	Auto OFF: in LINE mode ON: in battery- and AVR mode

Noise Level	< 40dB
Model Code	VI 2000 LCD

Environment

Temperature	0°C – 40°C
Humidity	0 - 90% (non-condensing)

Package Content

Package Content	PowerWalker VI 2000 LCD, Input Power cable, IEC cable, Software CD, USB cable, manual
-----------------	---

Logistic Data

Giftbox Language	EN/DE/FR/ES/IT/PT/SV/FI/NO/TR RU/UA/BY/PL/CZ/HR/HU/BG/KK/SR
Manual Language	EN/DE/FR/ES/IT/PT/SV/FI/NO/TR RU/UA/BY/PL/CZ/HR/HU/BG/KK/SR
Dimension/Giftbox	495 x 230 x 290 mm
Weight/Giftbox	13.1kg
Pieces/Carton	1
Pieces/Palette	42
Item Number	10120020
EAN	4260074972795
Warranty	24 Month (except battery)

Version: EN 16/08/2012
We reserve the right for technical changes and mistakes

Use UPS configurator on www.powerwalker.com for detailed backup time information.

PowerWalker is a brand of:
BlueWalker GmbH
Martin-Buber-Strasse 12 • D-41470 Neuss • Germany

Phone: +49 (0) 2137 / 92 98 73 • Fax: +49 (0) 2137 / 78 73 925
info@bluewalker.eu • www.bluewalker.eu • www.powerwalker.com

Anhang IV

Kontrollplan

Fristen der Kontrollen und Qualifikation der Kontrolleure**Sichtkontrolle**

Intervall mind. 1 Monat
unterwiesene Person

Funktionskontrolle

mind. 4 Monate
qualif. Fachpersonal

Systemkontrolle

mind. 1 Jahr
befähigte Person

Aufzeichnungskontrolle

mind. 3 Jahr
befähigte Person

Inbetriebnahme: 4x 1 Woche
(Funktionskontrolle) 3x 4 Wochen

Bearbeiter: _____

Gaswarneinrichtung

Betriebsteil: Brennstoffzellenlaboratorium
Kennzeichnung: TO4, BZ

Datum der Kontrolle: _____

Gaswarnzentrale

Hersteller: ExTox **Typ:** ET-4D 2

Sichtprüfung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Gehäuse			
Anzeige/ Display			
Elektrische Anschlüsse			

Verwendetes Prüfgas

Synthetische Luft
Kohlendioxid in Luft

Konzentration

Nullgas
2,5 Vol.-% (50% des Messbereichs)

Messstelle 1**CO2**

Hersteller: Extox **Typ:** CO2-5-IR4

Interne Kennzeichnung:

Sichtprüfung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Gehäuse			
Gaseinlass			
Elektrische Anschlüsse			

Kalibrierung/ Justierung

Nullgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 0
	Anzeige nach Korrektur		
Prüfgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 2,5
	Anzeige nach Korrektur		
	Einstellzeit		max.
Innerhalb der Sensorspezifikation			ja/nein

Alarmer/ Störung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Optisch/Akustisch			
Relais			
Störung			

Durchgeführte Maßnahmen:

notwendige Instandsetzungen:

ja/nein: nicht zutreffendes streichen

Seite 1/3

Verwendetes Prüfgas

Synthetische Luft
Kohlenmonoxid in Luft

Konzentration

Nullgas
150 ppm (50% des Messbereichs)

Messstelle 2**CO, Sensor 1****Hersteller:****Extox****Typ: CO-300-EC**

Interne Kennzeichnung:

Sichtprüfung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Gehäuse			
Gaseinlass			
Elektrische Anschlüsse			

Kalibrierung/ Justierung

Nullgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 0
	Anzeige nach Korrektur		
Prüfgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 150
	Anzeige nach Korrektur		
	Einstellzeit		max.
Innerhalb der Sensorspezifikation			ja/nein

Alarmer/ Störung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Optisch/Akustisch			
Relais			
Störung			

Durchgeführte Maßnahmen:

notwendige Instandsetzungen:

Messstelle 3**CO, Sensor 2****Hersteller:****Extox****Typ: CO-300-EC**

Interne Kennzeichnung:

Sichtprüfung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Gehäuse			
Gaseinlass			
Elektrische Anschlüsse			

Kalibrierung/ Justierung

Nullgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 0
	Anzeige nach Korrektur		
Prüfgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 150
	Anzeige nach Korrektur		
	Einstellzeit		max.
Innerhalb der Sensorspezifikation			ja/nein

Alarmer/ Störung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Optisch/Akustisch			
Relais			
Störung			

Durchgeführte Maßnahmen:

notwendige Instandsetzungen:

ja/nein: nicht zutreffendes streichen

Seite 2/3

Verwendetes Prüfgas

Synthetische Luft
Butan in Luft

Konzentration

Nullgas
0,7 Vol.-% (50% des Messbereichs)

Messstelle 4**Butan****Hersteller:****Extox****Typ: BG-HL**

Interne Kennzeichnung:

Sichtprüfung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Gehäuse			
Gaseinlass			
Elektrische Anschlüsse			

Kalibrierung/ Justierung

Nullgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 0
	Anzeige nach Korrektur		
Prüfgas:	Anzeige vor Korrektur		Sollwert: 50
	Anzeige nach Korrektur		
	Einstellzeit		max.
Innerhalb der Sensorspezifikation			ja/nein

Alarmer/ Störung

	i.O.	n.i.O.	Kommentar
Optisch/Akustisch			
Relais			
Störung			

Durchgeführte Maßnahmen:

notwendige Instandsetzungen:

Beurteilung:

Gaswarneinrichtung in einwandfreiem Zustand	ja/nein
Gaswarneinrichtung kann Sicherheitsfunktionen übernehmen, es sind aber noch Arbeiten durchzuführen.	ja/nein
An der Anlage sind Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen	ja/nein
Bemerkungen:	

ja/nein: nicht zutreffendes streichen

Seite 3/3

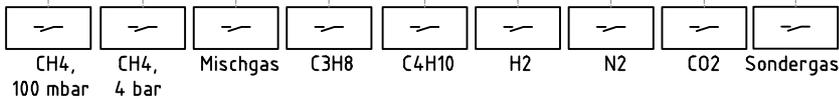
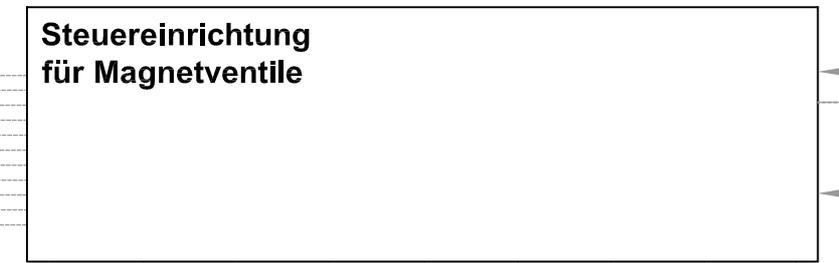
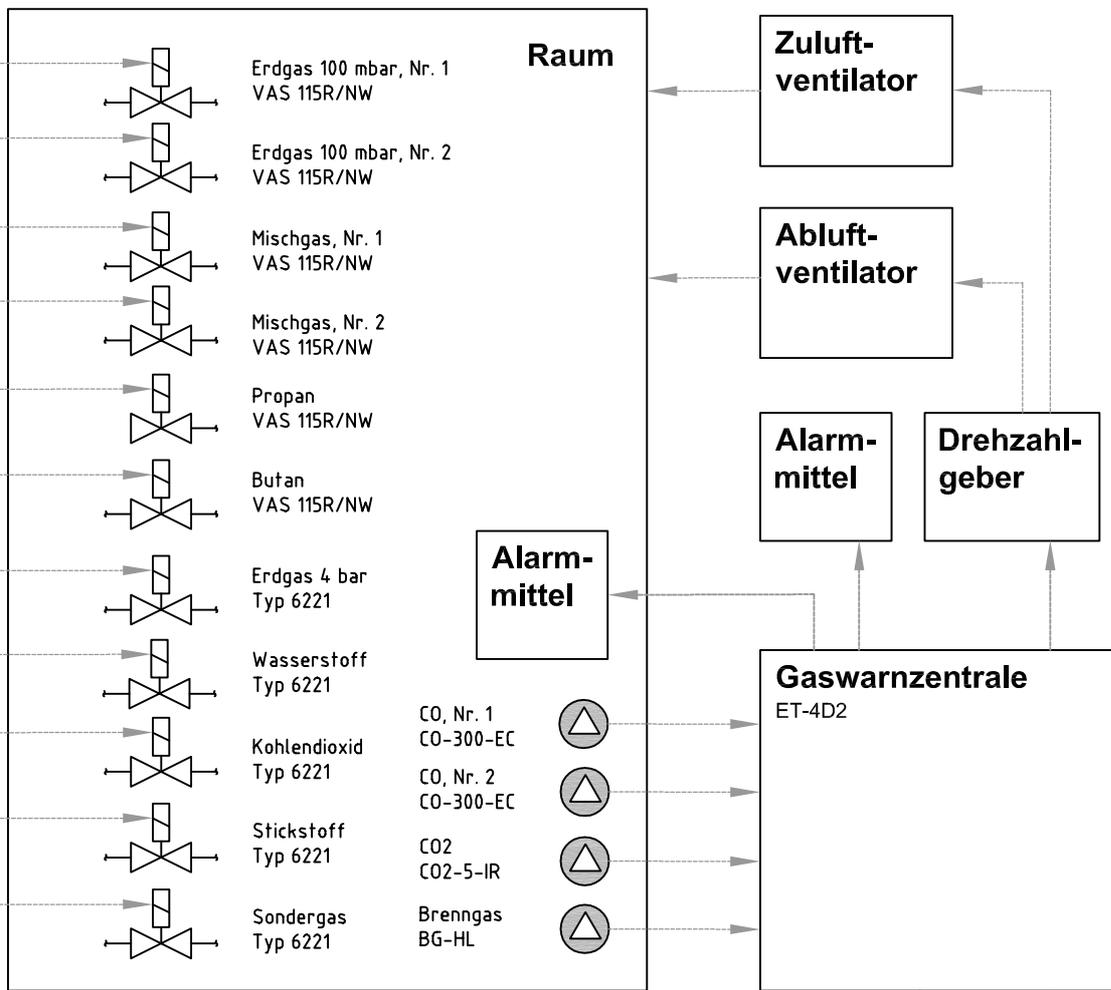
Anhang V

Wirkübersicht Gaswarneinrichtung

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



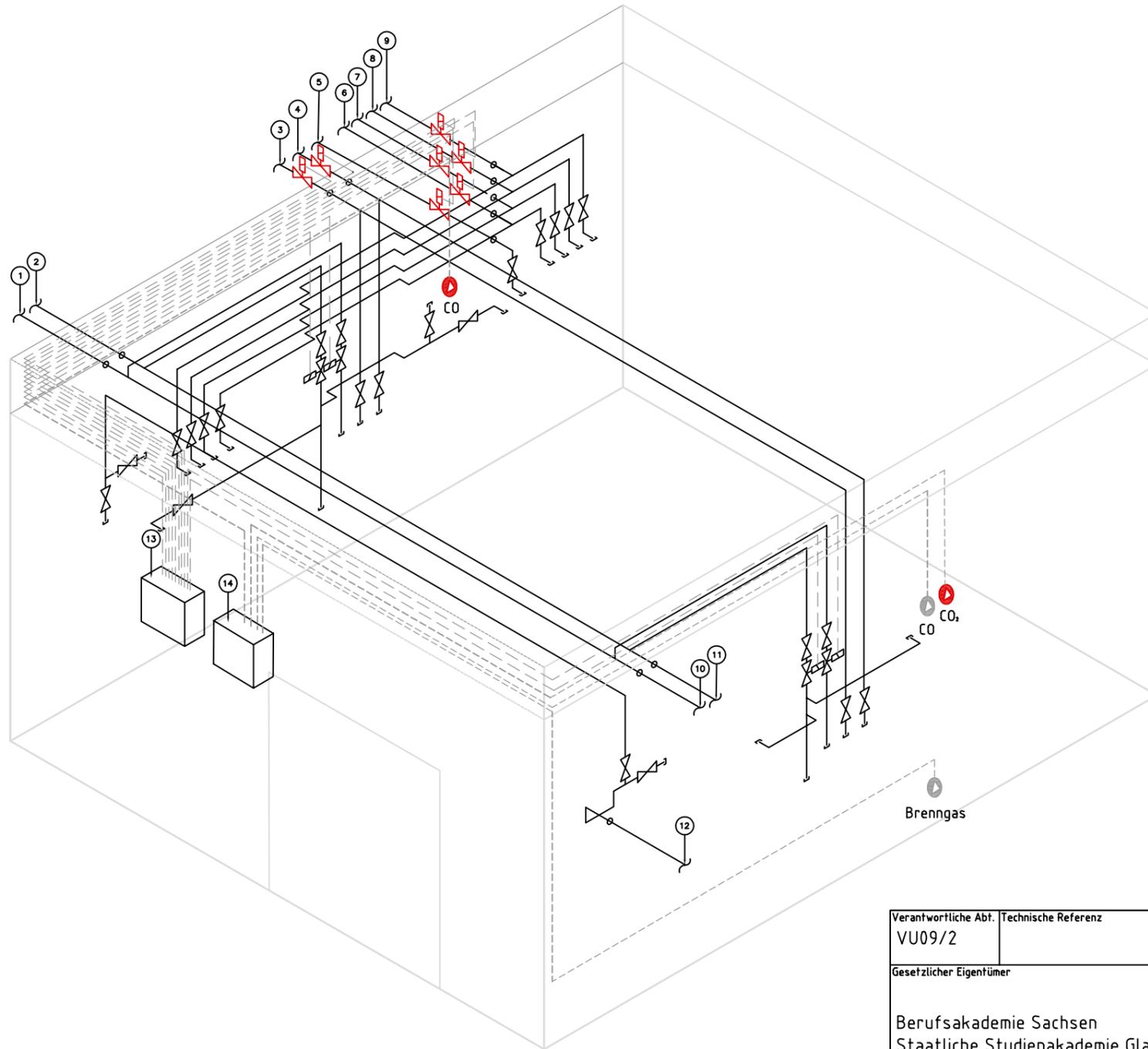
Maßstab
ohne
Maßstab

Verantwortliche Abt. VU09/2	Technische Referenz	Erstellt durch David Sachs	Genehmigt von		
Gesetzlicher Eigentümer Berufsakademie Sachsen Staatliche Studienakademie Glauchau www.ba-glauchau.de		Dokumentenart Wirkschema	Dokumentenstatus zur internen Verwendung		
		Titel, Zusätzlicher Titel Brennstoffzellenlaboratorium Gaswarneinrichtung	Änd.	Ausgabedatum 2012-08-21	Sprache de
					Blatt 1/1

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

Anhang VI

Isometrische Darstellung der Rohrleitungsinstallation



Legende:

- ① Mischgas
- ② Erdgas, 100 mbar
- ③ Propan
- ④ Butan
- ⑤ Erdgas, 4 bar
- ⑥ Wasserstoff
- ⑦ Kohlendioxid
- ⑧ Stickstoff
- ⑨ frei für Sondergas
- ⑩ Mischgas, weiter zu "Biogas"
- ⑪ Erdgas, 100 mbar, weiter zu "Biogas"
- ⑫ Leitung zur Fackel
- ⑬ Steuereinrichtung für Absperrventile mit Elektromagnetantrieb
- ⑭ Gaswarnzentrale
- Wanddurchführung Rohrleitung
- Kappe
- ⊗ Absperrventil
- ⊗ Absperrventil mit Elektromagnetantrieb, installiert
- ⊗ Absperrventil mit Elektromagnetantrieb, vorgesehen
- ▲ Gassensor, installiert
- ▲ Gassensor, vorgesehen

Maßstab
1:50

Verantwortliche Abf. VU09/2	Technische Referenz	Erstellt durch David Sachs	Genehmigt von		
Gesetzlicher Eigentümer Berufsakademie Sachsen Staatliche Studienakademie Glauchau www.ba-glauchau.de		Dokumentenart Isometrie	Dokumentenstatus zur internen Verwendung		
		Titel, Zusätzlicher Titel Brennstoffzellenlaboratorium, Rohrleitungsinstallation			
Änd.	Ausgabedatum 2012-08-20	Sprache de	Blatt 1/1		

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich,

1. dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema
„Erstellung eines Sicherheitskonzeptes für ein Brennstoffzellenlaboratorium“
ohne fremde Hilfe angefertigt habe,
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung
der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der
Arbeit gekennzeichnet habe und
3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Freiberg, 31.08.2012

.....
Ort, Datum



.....
Unterschrift (David Sachs)