

Hilfestellungen zum Explosionsschutzkonzept und zur Zoneneinteilung für explosionsgefährdete Bereiche verschiedener Verfahren in Galvanik- und Anodisieranlagen

Sachgebiet Oberflächentechnik
Stand: 31.03.2022

Aufgrund der in Galvanik- und Anodisieranlagen eingesetzten Gefahrstoffe und der verwendeten Verfahren können innerhalb und im Umfeld dieser Anlagen explosionsfähige Gemische entstehen, die zu Gefährdungen durch Explosionen führen können. Daher ist im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung gemäß § 6 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) [1] ein Explosionsschutzdokument für Galvanik- und Anodisieranlagen zu erstellen.

Inhaltsverzeichnis

1	Anforderungen an Explosionsschutzdokumente/rechtliche Grundlagen	1
2	Explosionsschutzdokumente	2
3	Relevante Verfahren mit explosionsgefährdeten Bereichen	4
4	Modelle von Prozessbehältern mit Wasserstoffentwicklung.....	5
5	Berechnungsgrundlagen ..	8
6	Beispiele für eine systematische Zoneneinteilung	12
7	Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen	25

Schutzmaßnahmen für den sicheren Betrieb von Galvanik- und Anodisieranlagen bei vorhandenen Gefährdungen durch Explosionen werden für die Betreiber in der DGUV Regel 109-602 „Branche Galvanik“ [2] und für die Hersteller in der Produktnorm DIN EN 17059:2018 „Galvanik- und Anodisieranlagen – Sicherheitsanforderungen“ [3] beschrieben.

Bislang gibt es nur ein publiziertes Muster eines Explosionsschutzdokuments, das sich konkret auf das Verfahren „Hartverchromen“ in Galvanikanlagen bezieht.

Eine systematische Hilfestellung zum Explosionsschutzkonzept und zur Zoneneinteilung für explosionsgefährdete Bereiche verschiedener Verfahren in Galvanik- und Anodisieranlagen fehlt bislang.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ gibt diese Hilfestellung zum Explosionsschutzkonzept und zur Zoneneinteilung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Modellierung.

1 Anforderungen an Explosionsschutzdokumente/rechtliche Grundlagen

Hat die Gefährdungsbeurteilung ergeben, dass eine Gefährdung durch Explosionen besteht, hat der Arbeitgeber oder die Arbeitgeberin entsprechend § 6 (9) GefStoffV ein Explosionsschutzdokument zu erstellen.

Aus diesem soll unter anderem ersichtlich sein

- auf welche Weise die Gefährdung zustande kommt,
- in welchen Bereichen diese Gefährdung besteht,
- welche Schutzmaßnahmen getroffen worden sind zur:
 - Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre
 - Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre
 - Beschränkung der Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß.

(Aufzählung sinngemäß nach § 6 Abs. 9 Satz 2 GefStoffV)

2 Explosionsschutzdokumente

2.1 Aufbau und Struktur von Explosionsschutzdokumenten

In der DGUV Information 213-106 [4] wird beispielsweise folgender Aufbau empfohlen:

- Angabe des Betriebs/Betriebsteils/Arbeitsbereichs
- Verantwortliche Person für den Betrieb/Betriebsteil/Arbeitsbereich, Erstellungsdatum und Anhänge sowie mitgeltende Dokumente
- Kurzbeschreibung der baulichen und geografischen Gegebenheiten
- Verfahrensbeschreibung
- Stoffdaten
- Beurteilung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Gemische
- Möglichkeit der Entstehung explosionsfähiger Gemische
- Möglichkeit der Entstehung gefährlicher explosionsfähiger Gemische
- Festlegung von Bereichen, innerhalb derer gefährliche explosionsfähige Gemische entstehen können
- Explosionsschutzmaßnahmen (Explosionsschutzkonzept):

- Vermeidung der Bildung gefährlicher explosionsfähiger Gemische
- Einteilung von explosionsgefährdeten Bereichen in Zonen
- Vermeidung wirksamer Zündquellen
- Beschränkung der Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Ausmaß
- Organisatorische Maßnahmen

Weitere Hinweise, die oben genannte DGUV Information sowie weitere Beispiele für Explosionsschutzdokumente finden Sie unter www.exinfo.de Seiten ID: #2BK8 [5].

Grundlage für das Explosionsschutzdokument ist die Gefährdungsbeurteilung. Beide Dokumente sind auf dem neuesten Stand zu halten und regelmäßig zu überprüfen. Werden Arbeitsmittel oder Arbeitsabläufe verändert, sind auch die Gefährdungsbeurteilung und das Explosionsschutzdokument zu überarbeiten.

2.2 Das Explosionsschutzkonzept

Wird im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung eine Gefährdung durch Explosionen ermittelt, ist dafür ein Explosionsschutzkonzept zu erstellen. In diesem Konzept sind sowohl die betrieblichen Gegebenheiten sowie die relevanten Stoff- und Betriebsdaten zu berücksichtigen

Inhalte des Explosionsschutzkonzepts sind:

- Ermittlung der Bereiche, in denen mit der Entstehung explosionsfähiger Atmosphäre zu rechnen ist
- Beurteilung der Explosionsgefahr in den zuvor ermittelten Bereichen
- Einteilung dieser Bereiche in explosionsgefährdete Bereiche, ggf. Einstufung als Ex-Zone
- Festlegung und Durchführung der erforderlichen Schutzmaßnahmen.

Dazu zählt auch, welche Überprüfungen nach § 7 Absatz 7 der GefStoffV und welche Prüfungen nach Anhang 2 Abschnitt 3 der

Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) [6] durchzuführen sind (siehe auch § 6 Abs. 9 Nr. 6 GefStoffV).

Ein Explosionsschutzkonzept kann auf Basis bekannter Konzepte aus Regelwerken und Normen aufgebaut werden. Diese sind oft spezifisch für bestimmte Arten von Anlagen erstellt worden. Im Falle von Galvanikanlagen kann ein solches Explosionsschutzkonzept aus der DIN EN 17059:2018 abgeleitet werden. Für Anlagen, die vor Erscheinen der DIN EN 17059:2018 in Verkehr gebracht worden sind, kann die frühere Unfallverhütungsvorschrift VBG 57 [7] zur Anwendung kommen.

Im Folgenden sind zwei Muster für Explosionsschutzkonzepte nach DIN EN 17059:2018 und der früheren Unfallverhütungsvorschrift VBG 57 aufgeführt.

Das Explosionsschutzkonzept basiert auf der zuverlässigen Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre durch Umsetzung überwachter lufttechnischer Maßnahmen (wirksame Erfassung und Absaugung an der Entstehungsstelle/am Prozessbehälter und ggf. raumluftechnische Maßnahmen).

Es gilt für

- Galvanikanlagen die nach DIN EN 17059:2018 gebaut sind und betrieben werden,

und für

- Galvanikanlagen, die nach VBG 57 in der Fassung vom 1. Januar 1997 gebaut sind und betrieben werden.

Die technische Lüftung ist so auszulegen, dass die untere Explosionsgrenze (UEG) zu jedem Zeitpunkt ausreichend unterschritten bleibt. Umfang und Effizienz der technischen Lüftung bestimmen die Ausdehnung der festzulegenden explosionsgefährdeten Bereiche und der zuzuordnenden Zonen. Geräte und Installationen, die in diesen Zonen betrieben werden,

sind in einer geeigneten explosionsgeschützten Bauart (Kategorie) im Sinne der ATEX-Richtlinie 2014/34/EU [8] auszuführen.

Bei Prozessen, in denen nur Wasserstoff freigesetzt wird, sind die explosionsgeschützten Geräte und Installationen für die Explosionsgruppe IIC und die Temperaturklasse T1 auszuführen.

Bei Prozessen, bei denen neben Wasserstoff auch Sauerstoff freigesetzt wird und somit Knallgas entsteht, ist zu untersuchen, welche (weiteren) Maßnahmen zur Vermeidung wirksamer Zündquellen umgesetzt werden müssen. Ein dabei ebenfalls zu berücksichtigender Faktor ist eine mögliche ausgeprägte Schaumbildung (vgl. DIN EN 17059:2018, 4.6.3.3.1).

Bei der Freisetzung von Lösemitteldämpfen sind ergänzende Betrachtungen in der Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Die erforderliche Temperaturklasse der in explosionsgeschützter Bauweise zu verwendenden Geräte und Installationen ist anzupassen.

Anmerkung: In vielen Fällen dürften Geräte und Installationen der Ausführung IIC T4 ausreichend sein.

2.2.1 Explosionsschutzkonzept nach DIN EN 17059:2018

Das Explosionsschutzkonzept gemäß GefStoffV § 6, Absatz 9, Nummer 2 gilt für Galvanikanlagen, die nach DIN EN 17059:2018 gebaut sind und betrieben werden.

Technische Lüftung im Sinne der DIN EN 17059:2018 stellt eine Objektabsaugung entsprechend Abschnitt 4.6.4 der TRGS 722 [9] dar.

Die technische Lüftung wird nach dem in der DIN EN 17059:2018 definierten Stand der Technik ausgelegt, installiert und überwacht.

Sobald der Abluftvolumenstrom der technischen Lüftung unter den Auslegungswerten liegt, wird die Bildung des Wasserstoffs durch das in der DIN EN 17059 definierte Abschalten der Gleichrichter so gestoppt, dass die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Wasserstoff-Luft-Gemische sicher vermieden wird.

Die Auslegung der technischen Lüftung erfolgt nach den Anforderungen der DIN EN 17059:2018 Abschnitt 4.6.1.3 „Technische Lüftung (Zuluft- und Abluftsysteme)“.

Die Verriegelung der Stromversorgung des Galvanikprozesses mit der technischen Lüftung, bei dem Gefährdungen durch das Freiwerden entzündbarer Stoffe (z. B. Wasserstoff) bestehen, ist nach DIN EN 17059:2018, Abschnitt 4.9.1 umzusetzen.

2.2.2 Explosionsschutzkonzept nach VBG 57

Das Explosionsschutzkonzept gemäß GefStoffV § 6, Absatz 9, Nummer 2 gilt für Galvanikanlagen, die nach VBG 57 in der Fassung vom 1. Januar 1997 gebaut sind und betrieben werden.

Die technische Lüftung wird unter Berücksichtigung der in der früheren VBG 57 definierten Maßnahmen betrieben und überwacht:

- Absaugeinrichtungen sind an Prozessbehältern erforderlich, die gefährliche explosionsfähige Atmosphäre entwickeln.
- Gefahrstoffe dürfen nicht in gesundheitsgefährlicher Konzentration oder gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in betriebliche Räume eindringen.
- Die Zufuhr von Frischluft in ausreichender Menge muss sichergestellt sein.
- Eine selbsttätig wirkende Warneinrichtung muss vorhanden sein, um Störungen an Lüftungstechnischen Anlagen und an Absaugeinrichtungen anzuzeigen.

(Siehe entsprechende Inhalte der früheren VBG 57 im Anhang A1.)

Die dabei getroffenen Maßnahmen haben sich am Stand der Technik zu orientieren. Nachrüstverpflichtungen nach BetrSichV sind zu erfüllen

3 Relevante Verfahren mit explosionsgefährdeten Bereichen

Tabelle 1 in Anhang A2 zeigt eine Übersicht der chemischen (außenstromlosen) und elektrochemischen Verfahren, bei denen aufgrund der Wasserstoff- und Sauerstoffbildung während der Prozesse mit dem Entstehen explosionsgefährdeter Bereiche gerechnet werden kann. Beide Verfahrenstypen werden zusammenfassend vereinfacht galvanische Verfahren genannt.

Bei den elektrochemischen Verfahren entsteht Wasserstoff an der Kathode durch Reduktion der Wasserstoff-Kationen und Sauerstoff an der Anode durch Oxidation der Sauerstoff-Anionen im Rahmen von Nebenreaktionen. Die Menge an gebildeten Wasserstoff bzw. Sauerstoff wird mit Hilfe der Faraday'schen Gleichungen berechnet (siehe Abschnitt 5).

Berechnungen zeigen, dass die Menge an gebildetem Sauerstoff bei den elektrochemischen Verfahren gegenüber dem Sauerstoffanteil von 20 Volumenprozent in der Umgebungsluft vernachlässigbar ist. Die Bildungsrate des an der Kathode gebildeten Wasserstoffs ist abhängig von der Stromstärke I und vom Umfang der Nebenreaktion, das heißt vom Wirkungsgrad (Stromausbeute) des Hauptbeschichtungsprozesses an der kathodisch geschalteten Werkstückoberfläche. Die Wasserstoff-Bildungsrate ist direkt proportional zur Stromstärke I und auch direkt proportional zur Stromdichte als verfahrensspezifischem Parameter und zur gesamten Werkstückoberfläche als prozessbedingtem Parameter.

Im Gegensatz zu den elektrochemischen Verfahren entsteht bei den chemischen, außenstromlosen Verfahren der Wasserstoff aufgrund chemischer Reaktionen, zum Beispiel beim Beizen durch Reaktion der Säure mit den Metalloxiden an der Werkstückoberfläche, und beim chemischen Vernickeln durch Reaktion des Aktivators mit der Werkstückoberfläche. Tabelle 1 zeigt die Einteilung dieser Verfahren in elektrochemische und außenstromlose Prozessarten.

Für die betreffenden galvanotechnischen Verfahren werden im Abschnitt 3 der DGUV Regel 109-602 „Branche Galvanik“ die Gefährdungen durch Brände und Explosionen und die zugehörigen Schutzmaßnahmen im Rahmen einer umfassenden Gefährdungsbeurteilung aufgezeigt und definiert. Über die in dieser DGUV Regel beschriebenen Prozesse hinausgehend wurden in Tabelle 1 auch Nachtauchlösungen als Verfahren mit aufgenommen.

Für die genauere Betrachtung und Beschreibung sowie für die Ausdehnung der explosionsgefährdeten Bereiche ist weiterhin der genaue Ort („Quellort“) der Wasserstoff-Bildung von hoher Bedeutung, das heißt, an welcher Stelle des Prozessbehälters sich die Kathode befindet (Ort der Kathode), an der dann der Wasserstoff entsteht.

Hierzu lassen sich die relevanten Verfahren in kathodische und anodische Prozesse unterteilen. Entscheidend ist dabei das elektrische Potenzial („die Polung“) des Warenträgers und damit das Potenzial der am Warenträger befestigten Werkstücke. Bei den kathodischen Prozessen ist der Warenträger als Kathode geschaltet. Bei den anodischen Prozessen ist der Warenträger als Anode geschaltet, und die beiden Elektroden an den Rändern des Prozessbehälters bilden die Kathoden.

Die Mehrzahl der relevanten Verfahren sind kathodische Prozesse; zu den selteneren anodischen Prozessen gehören bei der Vorbehandlung das Elektropolieren bzw.

chemische Entgraten und die elektrolytische Entfettung bei anodischer Polung, bei der Oberflächenbehandlung das Eloxieren und bei der Nachbehandlung das Entmetallisieren.

Tabelle 2 in Anhang A2 zeigt die Einteilung der relevanten Verfahren mit explosionsgefährdeten Bereichen in kathodische und anodische Prozesse.

4 Modelle von Prozessbehältern mit Wasserstoffentwicklung

Der vorangegangene Abschnitt zeigte, dass sich die relevanten elektrochemischen Verfahren mit Entwicklung von Wasserstoff in kathodische und anodische Prozesse aufteilen.

Tabelle 3 in Anhang A3 zeigt, wie daraus insgesamt 16 Modelle von Prozessbehältern mit Wasserstoffentwicklung abgeleitet werden, mit denen sich dann alle relevanten Verfahren in der Praxis beschreiben lassen.

Als Erstes wird definiert, wo sich der Wasserstoff bei den kathodischen und anodischen Prozessen bildet, und wie er sich dann innerhalb des Elektrolyten verteilt.

Bei den kathodischen Prozessen bildet sich der Wasserstoff am bzw. über dem kathodisch geschalteten Warenträger in der Mitte des Prozessbehälters. Er durchbricht die Elektrolytoberfläche entweder lokalisiert über dem Warenträger oder verteilt sich auch hier über die gesamte Elektrolytoberfläche.

Bei den anodischen Prozessen bildet er sich an den beiden kathodisch geschalteten Elektroden an den Rändern (langen Seiten) des Prozessbehälters (Randelektroden), entweder lokalisiert an bzw. über den beiden Randelektroden, oder verteilt über die gesamte Elektrolytoberfläche, wenn zum Beispiel der Elektrolyt bewegt wird, entweder durch Warenträgerbewegungen und/oder durch Umwälzen.

In der Tabelle 3 werden die vier Varianten angezeigt, die sich so prozessbedingt aus den anodischen und kathodischen Prozessen ableiten lassen.

Für die weitere Modellierung bzw. die Strömungssimulationen werden der Ort und die Abmaße der Flächen bestimmt, durch die der Wasserstoff die Elektrolytoberfläche durchbricht und freigesetzt wird.

Abbildung 1 zeigt die entsprechend bemaßte Skizze eines angenommenen Standardbehälters, Abbildung 2 bis Abbildung 5 zeigen die daraus resultierende Lage und Abmessungen der jeweiligen Wasserstoffdurchbruchflächen am Elektrolyten, dargestellt der besseren Übersichtlichkeit halber nur am offenen Prozessbehälter ohne Abdeckung.

Bei der lokalisierten Wasserstoffentwicklung wird die Durchbruchfläche anhand von Rechteckflächen definiert, deren Maße aus den Beobachtungen entsprechender Prozesse in der Praxis abgeleitet wurden. Demnach hat die resultierende Rechteckfläche einen Abstand von 0,20 m vom kurzen Rand des Prozessbehälters, so dass bei einem 3 m langen Prozessbehälter ein Rechteck mit einer Länge von 2,60 m resultiert. Als Breite dieser Durchtrittsfläche wird 0,20 m angenommen.

Der Abstand zu den langen Seiten des Prozessbehälters wird durch die Art des elektrolytischen Prozesses und die Prozessführung definiert, das heißt, ob es sich um einen anodischen oder kathodischen Prozess handelt und ob die Wasserstoffentwicklung an der Kathode lokalisiert oder prozessbedingt delokalisiert erfolgt. Das wird im Folgenden näher beschrieben.

Bei den anodischen Prozessen werden im Fall der lokalisierten Wasserstoffentwicklung zwei rechteckige Durchbruchflächen von 2,60 m x 0,20 m über den beiden Randelektroden angenommen, mit einem Abstand von 0,10 m bzw. 0,20 m von der langen bzw. kurzen Prozessbehälterseite, bzw. mit 0,40 m

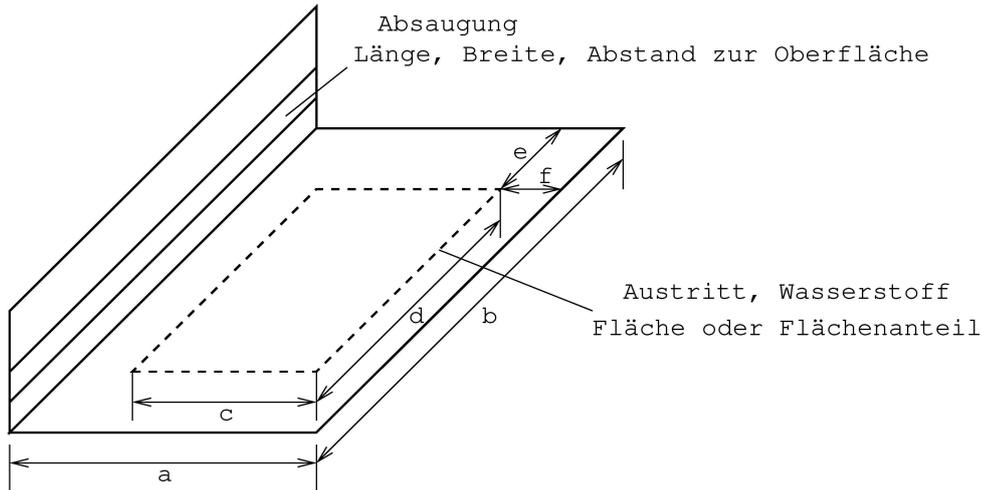
gegenseitigem Abstand. Bei einer Verteilung über die gesamte Elektrolytoberfläche entspricht die Durchbruchfläche für den Wasserstoff der gesamten Oberfläche des Prozessbehälters von 3 m x 1 m.

Werden kathodische Prozesse betrachtet, liegt die rechteckige Durchbruchfläche von 2,60 m x 0,20 m mittig im Prozessbehälter über dem Warenträger, mit einem Abstand von 0,40 m zu den langen Seiten und 0,20 m zu der kurzen Seite des Prozessbehälters. Bei einer Verteilung über die gesamte Elektrolytoberfläche entspricht auch hier die Durchbruchfläche für den Wasserstoff der gesamten Oberfläche des Prozessbehälters von 3 m x 1 m.

Für die vollständige Definition der Prozessbehältermodelle werden noch die Maße der Höhe der Lüftungskanäle, der Erfassungsöffnungen und des Abstands der Elektrolytoberfläche von der Oberkante des Prozessbehälters (Freibord) benötigt. Bei einer angenommenen Höhe des Lüftungskanals von 0,30 m, einem Freibord von 0,10 m und einer Höhe der Erfassungsöffnungen von 0,03 m ergibt sich ein Abstand von 0,4 m von der Elektrolytoberfläche bis zur Oberkante des Lüftungskanals.

Diese vier prozessbedingt unterschiedlichen Varianten werden, wie Tabelle 3 zeigt, anhand unterschiedlicher Schutzmaßnahmen gegen Explosionsgefährdungen am Prozessbehälter weiter unterteilt. Diese Schutzmaßnahmen sind lüftungstechnische Maßnahmen nach dem Stand der Technik. Zunächst kann bezüglich der lokalen Erfassung zwischen der einseitigen und zweiseitigen Randabsaugung unterschieden werden.

Eine weitere Unterteilung ist die mechanische Abdeckung der Prozessbehälter (Deckel); entweder handelt es sich um einen offenen Prozessbehälter ohne mechanische Abdeckung oder um einen abgedeckten Prozessbehälter. So entstehen die insgesamt 16 Modelle von Prozessbehältern mit Wasserstoffentwicklung



$a=1,0\text{m}$ Breite des Prozessbehälters
 $b=3,0\text{m}$ Länge des Prozessbehälters

Absaugung: Länge $3,0\text{m}$, Breite $0,03\text{m}$,
 Abstand zur Elektrolytoberfläche $0,2\text{m}$

Austrittsfläche Wasserstoff:

Variante 1: $c=a$, $d=b$

Variante 2: $e=0,2\text{m}$ $f=0,1\text{m}$ $c=0,2\text{m}$ $d=2,6\text{m}$ Austrittsfläche außen !

Variante 3: $e=0,2\text{m}$ $f=0,4\text{m}$ $c=0,2\text{m}$ $d=2,6\text{m}$

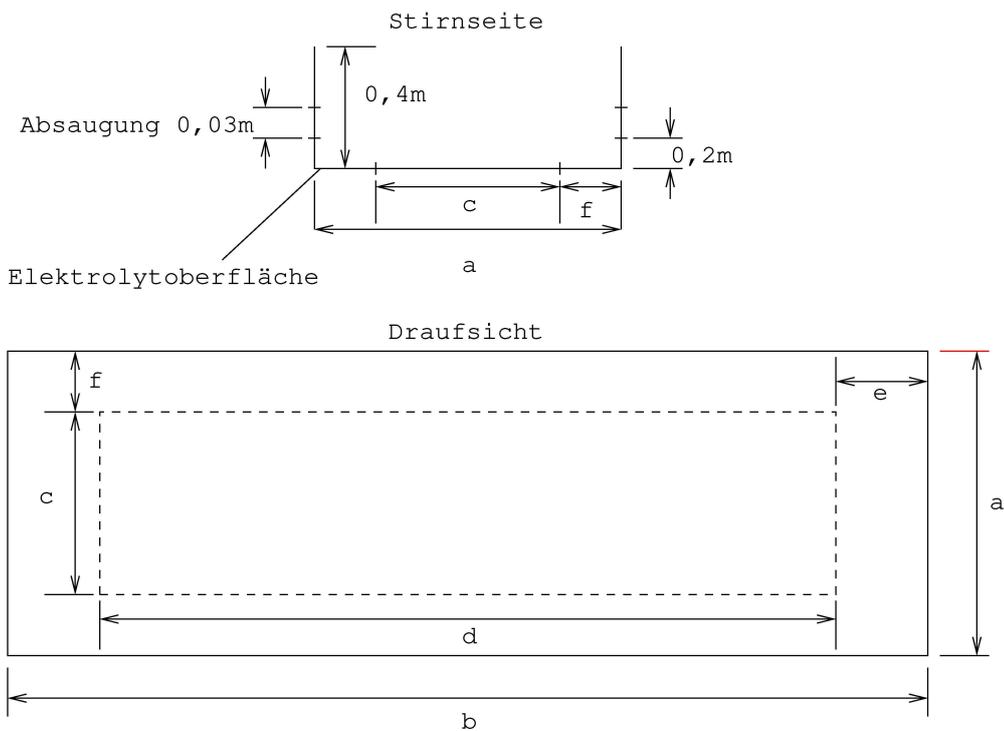


Abbildung 1 – Skizze eines Standardbehälters

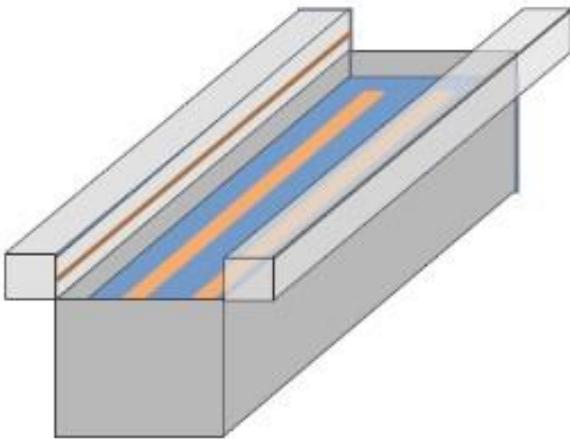


Abbildung 2 – Anodische Prozesse – lokalisierte H₂-Entwicklung an/über beiden Randelektroden (orangegefärbte Flächen)

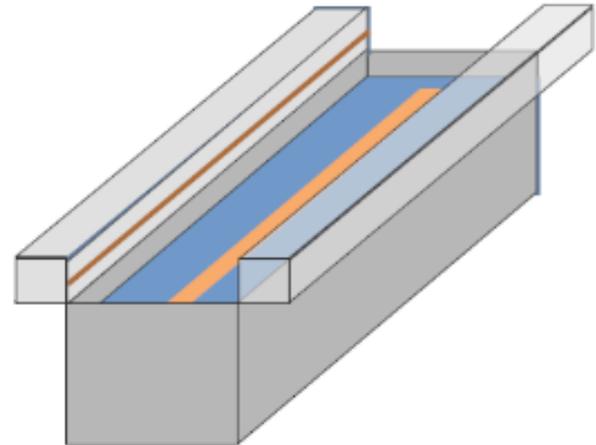


Abbildung 4– Kathodische Prozesse – lokalisierte H₂-Entwicklung mittig am/über dem Warenträger (orangegefärbte Fläche)

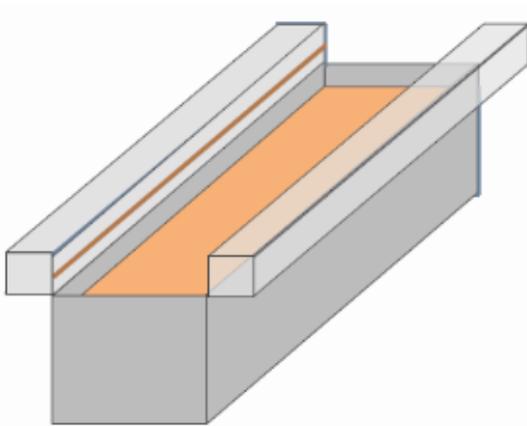


Abbildung 3 – Anodische Prozesse – H₂-Entwicklung über gesamte Elektrolytoberfläche verteilt (orangegefärbte Fläche)

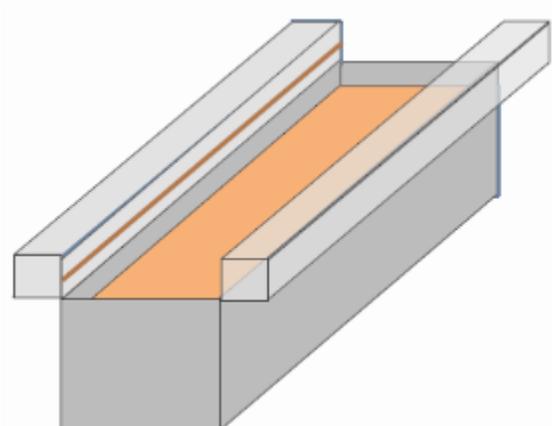


Abbildung 5 – Kathodische Prozesse – H₂-Entwicklung über gesamte Elektrolytfläche verteilt (orangegefärbte Fläche)

5 Berechnungsgrundlagen

5.1 Faraday'sche Gleichungen zur Bestimmung der Wasserstoff- und Sauerstoff- Bildungsrate an Kathode und Anode

Bei galvanischen Beschichtungsverfahren wird durch das Anlegen einer Gleichspannung Metall abgeschieden (z. B. Kupfer) oder im

umgekehrten Fall abgetragen (z. B. Eisen). Neben der Metallumwandlung wird je nach Verfahren auch ein unterschiedlich hoher Anteil an Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.

Die Elektrolyse von Wasser ist schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt:

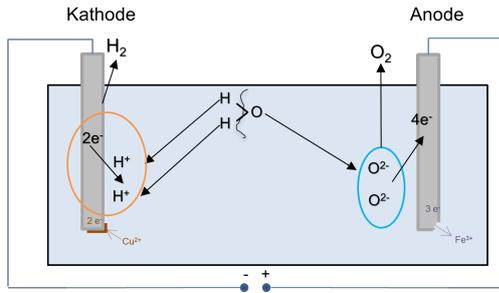


Abbildung 6 – Schematische Darstellung der Elektrolyse von Wasser

Wasser wird durch ein elektrisches Feld in H_3O^+ und OH^- -Ionen gespalten. Diese wandern zu Anode bzw. Kathode. Der Sauerstoff gibt ein Elektron (e^-) ab. Dieses nimmt der Wasserstoff auf. An der Anode entsteht Sauerstoff, an der Kathode Wasserstoff.

Die Menge des entstehenden Gases ist direkt proportional zu dem Strom, der nicht zur Metallabscheidung genutzt wird, und lässt sich über die Faraday'sche Gleichung berechnen.

Für den Volumenstrom Wasserstoff ergibt sich bei Raumtemperatur

Wasserstoffvolumenstrom: $\dot{V}_{H_2} [m^3/h]$
 Stromstärke: $I [A]$
 Stromausbeute: $\mu [-]$

$$\dot{V}_{H_2} = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{m^3}{A \cdot h} \cdot I \cdot (1 - \mu)$$

bzw. für den Volumenstrom an Sauerstoff:

Sauerstoffvolumenstrom: $\dot{V}_{O_2} [m^3/h]$
 Stromstärke: $I [A]$
 Stromausbeute: $\mu [-]$

$$\dot{V}_{O_2} = 2,242 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{m^3}{A \cdot h} \cdot I \cdot (1 - \mu)$$

5.2 Lufttechnische Maßnahmen nach dem Stand der Technik/ Beurteilung der explosionsgefährdeten Bereiche

Galvanikanlagen nach dem heutigen Stand der Technik werden mit einer technischen Lüftung nach Abschnitt 4.6.1.3 „Technische Lüftung (Zuluft- und Abluftsysteme)“ der DIN EN 17059:2018 „Galvanik- und Anodisieranlagen“ betrieben. Die dabei erforderlichen Volumenströme an Zu- und Abluft lassen sich nach DIN EN 17059:2018 ermitteln und berechnen. Sie hängen von der Bauart und Geometrie der Galvanikanlage und dem jeweiligen Prozess bzw. Verfahren ab. Mit Hilfe der Berechnungsverfahren und Gleichungen des Anhangs D sowie der Strömungsgeschwindigkeiten aus Anhang E der Norm ergeben sich die Volumenströme für die gängigen Hauptprozesse in der Galvanisier- und Anodisierindustrie.

Durch die Absaugung wird der an der Kathode entstehende Wasserstoff verdünnt. Er vermischt sich mit der abgesaugten Luft. Die Wasserstoffkonzentration beträgt nach vollständiger Mischung mit der abgesaugten Luftmenge:

Wasserstoffkonzentration: $x_{H_2} [Vol. \%]$
 Wasserstoffvolumenstrom: $\dot{V}_{H_2} [m^3/h]$
 Abgesaugter Volumenstrom: $\dot{V}_{ab} [m^3/h]$

$$x_{H_2} = \frac{\dot{V}_{H_2}}{\dot{V}_{H_2} + \dot{V}_{ab}} * 100 \%$$

Der Übergang von dem an der Elektrolytoberfläche austretenden reinen Wasserstoff bis zur vollständigen Durchmischung wird in der nachfolgenden CFD-Berechnung (CFD: Computational-Fluid-Dynamics – Erläuterungen dazu siehe Abschnitt 5.3) räumlich für

verschiedenen Anlagentypen und Verfahren ermittelt und dargestellt. Daraus lässt sich eine mögliche Zoneneinteilung ableiten.

Da die Sauerstoffmenge in der Zuluft deutlich größer ist als der durch die Elektrolyse entstehende Sauerstoff, ändert sich die Sauerstoffkonzentration in der Mischung nur unwesentlich und muss nicht weiter berücksichtigt werden.

Nach dem Anfahren der Lüftung und anschließendem Start des Galvanikprozesses stellt sich ein Gleichgewicht der Wasserstoffkonzentration ein. Dieses Gleichgewicht lässt sich berechnen.

Durch die hohen Luftmengen zur Erfassung der Gefahrstoffe an den Anlagen herrscht eine turbulente Strömung. Daher ist mit keinen Gegenströmungen zu rechnen. Die Absaugungen werden kontinuierlich betrieben, so dass sich konstante Strömungsverhältnisse einstellen.

Je nach Abstand zu der unteren Explosionsgrenze für Wasserstoff kann die Wahrscheinlichkeit des Entstehens einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre abgeschätzt werden. Liegt die Wasserstoffkonzentration oberhalb der unteren Explosionsgrenze des Wasserstoffs von 4 Vol.%, ist das Gemisch zündfähig.

Unter Zugrundelegung der Randbedingungen für die Wasserstoffentwicklung und für eine überwachte technische Lüftung werden für eine Zoneneinteilung folgende Bedingungen gewählt:

Da der konkrete Ort, an dem zu einem bestimmten Zeitpunkt Wasserstoff entsteht,

nicht exakt vorher bestimmbar ist und während des ganzen Prozesses variiert, wird im Sinn einer konservativen Betrachtung nicht nur der Bereich mit ≥ 4 Vol.% Wasserstoff, sondern

- der gesamte Bereich, in dem die strömungsmechanische Berechnung eine Wasserstoffkonzentration von mehr als 1 Vol.% liefert, als **Zone 0** angesehen.

Die strömungsmechanischen Berechnungen zeigen für alle betrachteten Verfahren, dass das Volumen dieses Bereichs keine gefährdrohende Menge darstellt. In der Realität wird dieses Volumen auch nicht zusammenhängend sein.

Je weiter die ermittelte Konzentration unterhalb der UEG liegt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es lokal zu einer zeitweisen Überschreitung der UEG kommt.

Damit ergibt sich bei Fortführung der Konvention in diesem Sinne

- bei einer ermittelten Wasserstoffkonzentration, die zwischen 10 und 25 % der UEG liegt, **Zone 1** sowie
- bei einer ermittelten Wasserstoffkonzentration zwischen 3 und 10 % der UEG **Zone 2**.

Ab einem Wert von weniger als 3 % der UEG (ermittelte Wasserstoffkonzentration $< 0,12$ Vol.-%) ist nicht, auch nicht selten und kurzzeitig, davon auszugehen, dass eine lokale Überschreitung der UEG auftritt, somit sind solche Bereiche als **zonenfrei** anzusehen.

Die sich aus diesen Überlegungen ergebende Konvention für die Zoneneinteilung ist in Abbildung 7 dargestellt:

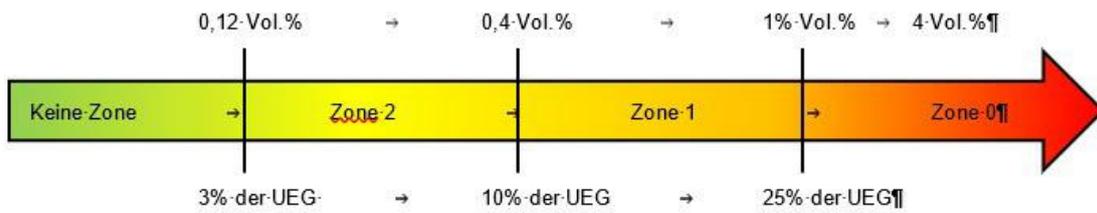


Abbildung 7 – Zoneneinteilung anhand der Wasserstoffkonzentrationen

Es sei an dieser Stelle (nochmals) darauf hingewiesen, dass bei ausgeprägter Schaumbildung diese Zoneneinteilung anzupassen ist. Hier ist das Schaumvolumen als vergleichbar einer Zone 0 zu betrachten.

Eine Betrachtung und Berechnung der gängigen Verfahren zeigt, dass sogar bei den beiden hinsichtlich der Wasserstoffentwicklung kritischsten Verfahren (hohe Stromstärke, geringe Stromausbeute):

- Hartverchromen (Hohe Stromstärken, geringer Wirkungsgrad und daher große Wasserstoffvolumenströme)
- Elektropolieren (hohe Stromstärken, der gesamte Strom wird in Wasserstoff umgesetzt, da Metall abgetragen wird)

die Verdünnung selbst bei abgedeckten Prozessbehältern (geringe Absaugvolumenströme) ausreicht. Mit einer nach der DIN EN 17059:2018 ausgelegten technischen Lüftung ist in der Absaugung keine Zone bei kontinuierlichem Betrieb erforderlich. Der entstehende Wasserstoff wird ausreichend verdünnt.

5.3 Strömungssimulation

Die Entstehung und Ausbreitung explosionsfähiger Gemische ist messtechnisch nur mit großem Aufwand umfassend zu bestimmen. Solche Messungen können daher zumeist nur punktuell erfolgen. Eine gute räumliche Beschreibung erfordert viele Messpunkte, die

in der Regel nicht simultan vermessen werden können.

Mit Hilfe der theoretischen Strömungsmechanik lassen sich solche Vorgänge mathematisch beschreiben. Dabei kommen verschiedene Modellgleichungen zum Einsatz: die Euler-Gleichung, die Stokes-Gleichung, die Potenzialgleichung und die Navier-Stokes-Gleichung. Die Navier-Stokes-Gleichung bietet die umfassendste Beschreibung:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \vec{f}$$

Navier-Stokes-Gleichung für inkompressible Strömungen

ρ	Dichte	\vec{v}	Geschwindigkeit eines Teilchens in der Strömung
p	Druck	μ	dynamische Viskosität
\vec{f}	Volumenkraft bezogen auf das Einheitsvolumen		

Diese Gleichung lässt sich nur stark vereinfacht (z. B. eindimensional und ohne Änderung der Dichte etc.) analytisch lösen, weshalb hier zumeist numerische Lösungsverfahren zum Einsatz kommen. Nur mit sehr großem Aufwand lässt sich die Navier-Stokes-Gleichung über mehrere Größenskalen (mehrere Meter bis Mikrometer) direkt numerisch lösen. Daher kommen

vielfach spezielle Näherungen zum Einsatz, insbesondere bei der Modellierung von Turbulenzen und von Grenzschichten an großen Objekten. Die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichung erfordert ein für das Problem geeignetes Lösungsverfahren. In der Strömungssimulation kommt zumeist eine Finite-Volumen-Methode zum Einsatz. Dabei wird das zu berechnende Volumen in Volumenelemente unterteilt, die beliebige polygonale oder polyedrische Gestalt haben können. Die Lösung der zu berechnenden Variablen erfolgt für den Mittelpunkt des finiten Volumenelements.

Der Einsatz solcher Methoden wird als Computational-Fluid-Dynamics (CFD) bezeichnet.

Reale Objekte sind aus vielen Details aufgebaut. Für eine CFD-Simulation ist die Geometrie der zu betrachtenden Objekte so weit zu vereinfachen bzw. zu abstrahieren, dass zwar die wesentlichen Eigenschaften erhalten bleiben, aber der Aufwand für die Simulation möglichst weit reduziert wird. Dazu ist ein Kompromiss zwischen Realitätsnähe und Aufwand zu finden [10].

6 Beispiele für eine systematische Zoneneinteilung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grundlagen für eine systematische Zoneneinteilung in den explosionsgefährdeten Bereichen erläutert, die bei den relevanten Verfahren entstehen.

Nachdem für die jeweiligen Verfahren der Entstehungsort des freiwerdenden Wasserstoffs definiert wurde, wird nun mit Hilfe der Faraday'schen Gleichung (siehe Abschnitt 5) dessen Menge und Bildungsrate (Menge Wasserstoff/Zeiteinheit) bestimmt.

Hinweis: Die nachfolgend genannten Abbildungen stehen auf den Seiten 18ff.

In den Tabellen 5 und 6 in Anhang A5 sind diese beiden Werte, Menge und Bildungsrate des freiwerdenden Wasserstoffs, für die in Tabelle 1 genannten relevanten Verfahren angegeben.

Während in Tabelle 5 diese Daten aus Stromdichte und gesamter Werkstückoberfläche als verfahrensspezifischen Parametern berechnet wurden, zeigt Tabelle 6 die Berechnung der Wasserstoffmenge direkt aus der den Elektrolyten durchfließenden Strommenge bzw. der Stromstärke.

In Tabelle 5 wird aus der Bildungsrate des freiwerdenden Wasserstoffs im nächsten Schritt die Größe des Abluftvolumenstroms bestimmt, die notwendig ist, um den freiwerdenden Wasserstoff unter die Grenze von 3 % der UEG von Wasserstoff (4 Vol.-%) zu verdünnen.

Dieser Wert wird in Tabelle 5 mit dem Wert verglichen, der sich nach DIN EN 17059:2018 Anhang D und E für den berechneten Abluftvolumenstrom nach dem Stand der Technik für diese Verfahren ergibt (siehe Abschnitt 5). Die Abluftvolumenströme werden sowohl für offene als auch für abgedeckte Prozessbehälter berechnet; bei den offenen Prozessbehältern sowohl für die einseitige als auch die zweiseitige Randabsaugung.

Der Vergleich zeigt, dass bei Auslegung der technischen Lüftung nach dem in der DIN EN17059:2018 definierten Stand der Technik der freiwerdende Wasserstoff für jedes Verfahren unter die Grenze von 3 % der UEG von Wasserstoff (4 Vol.-%) verdünnt wird.

Daher ist außerhalb der Prozessbehälter, das heißt oberhalb der Erfassungselemente der technischen Lüftung (Einlassöffnungen der Lüftungskanäle), unter diesen Bedingungen von keinen explosionsgefährdeten Bereichen auszugehen, das entspricht der Zoneneinteilung: „keine Zone“. Voraussetzung dafür ist, dass die technische Lüftung nach dem in der DIN EN 17059:2018 definierten Stand der

Technik überwacht wird, und die Bildung des Wasserstoffs durch die dort definierten Maßnahmen sicher gestoppt wird, sobald der Abluftvolumenstrom der technischen Lüftung unter den Auslegungswerten liegt.

Die Verriegelung der Stromversorgung des Galvanikprozesses mit der technischen Lüftung, bei dem Gefährdungen durch das Freiwerden entzündbarer Stoffe (z. B. Wasserstoff) bestehen, ist nach DIN EN 17059:2018, Abschnitt 4.9 umzusetzen:

- Die Erfassung des Abluft-Volumenstroms (Sensorik) muss mindestens einem Performance Level $PL_r=c$ entsprechen (nach DIN EN ISO 13849-1:2016, Anhang A [11], ermittelter erforderlicher Performance Level PL_r ; hierdurch wird die Anforderung an das Sicherheitsniveau beschrieben).
- Die Abschaltung bzw. Verriegelung der Stromversorgung (Aktorik) muss mindestens einem $PL_r=d$ entsprechen.
- Die Stromversorgung für einen galvanotechnischen Prozess mit Wasserstoffentwicklung unter Schaumbildung, bei dem eine Gefährdung durch das Freiwerden entzündbarer Stoffe wie Wasserstoff besteht, muss beim Einfahren und Ausfahren der Ware abgeschaltet bzw. auf Werte reduziert werden, bei denen eine Zündgefahr ausgeschlossen werden kann. Diese Verriegelung ist umzusetzen mit einem $PL_r=d$.

Weitere Ausführungen zum Stand der Technik bezüglich der Sicherheitsanforderungen an Steuerungen und der Sicherheitsfunktionen sind dem Unterabschnitt 4.9.1 „Sicherheitsfunktionen“ des Abschnitts 4.9 „Sicherheitsanforderungen an Steuerungen“ in der DIN EN 17059 : 2018 zu entnehmen.

Bei außenstromlosen Prozessen ist eine Unterbrechung der Wasserstoffentwicklung durch das Abschalten der Gleichrichter als Maßnahme wie bei elektrolytischen Prozessen nicht möglich.

Dort sind andere Maßnahmen nach Abschnitt 4.6.1.3 „Technische Lüftung“ der DIN EN 17059 : 2018 auf ihre Wirksamkeit hin zu prüfen und umzusetzen; Beispiele für solche Maßnahmen sind:

- kein Einfahren neuer Ware in die Anlage
- Stoppen von Absenk- bzw. Aushebevorgang durch das Transportsystem
- Sperren des Automatikbetriebs
- kein automatisches Wiederanlaufen des Absenk- bzw. Aushebevorgangs
- Abschalten der Badheizungen

Auch das nach Abschnitt 4.7.5 „Brandlast“ der DIN EN 17059:2018 als Maßnahme angegebene Ableiten der Prozessmedien in Sicherheitsbehälter ist als wirksame Schutzmaßnahme zu prüfen.

Diese Maßnahmen sind als Aktoren ebenfalls mit einem $PL_r=d$ umzusetzen

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen, dass die explosionsgefährdeten Bereiche nur innerhalb der Prozessbehälter liegen und dass keine explosionsgefährdeten Bereiche außerhalb der Prozessbehälter auftreten.

Diese Abbildungen 8 und 9 stellen Musterzonenpläne für offene und abgedeckte Prozessbehälter und für alle relevanten Verfahren mit Gefährdungen durch Explosionen dar. Diese hier betrachteten relevanten Verfahren sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Offen bleiben bei dieser Betrachtung die Verhältnisse zwischen den Erfassungselementen der technischen Lüftung und der Elektrolytoberfläche, da die dortige Vermengung zwischen dem freiwerdenden Wasserstoff und der Abluft von den sich dort schnell ändernden Strömungsverhältnissen abhängt.

Daher werden dieser Grad der Vermengung bzw. die daraus resultierenden Wasserstoffkonzentrationen durch die computerunterstützten Strömungssimulationen bestimmt (CFD-Berechnungen, siehe Abschnitt 5).

Die systematische Ableitung einer Zoneneinteilung wird im Folgenden am Beispiel des Verfahrens Glanzverchromen von Einzelbauteilen dargestellt.

Abbildung 10 zeigt eine Galvanikanlage mit dem betreffenden Prozessbehälter, in dem das Verchromungsverfahren durchgeführt wird. In Abbildung 11 wird der Prozessbehälter mit diesem elektrolytischen Prozess dargestellt. Die Bauteile sind am Warenträger befestigt, der sich mittig am Prozessbehälter befindet. Warenträger und Bauteile sind als Kathode geschaltet, so dass sich dort an ihrer Oberfläche der Wasserstoff lokalisiert bildet, und direkt über dem Warenträger die Elektrolytoberfläche durchbricht. Die Durchbruchfläche ist als Kerbe im orangefarbenen Netzmittel in Abbildung 10 gut zu erkennen.

Ergebnisse der CFD Simulationen

Zur beispielhaften Darstellung der Ergebnisse der CFD-Simulationen wurde der Prozess des Glanzverchromens ausgewählt, mit den in Tabelle 7 in Anhang A5 zusammengefassten Prozessparametern für die Wasserstoffentwicklung und den Abluftvolumenströmen.

Um den Rechenaufwand so gering wie möglich zu halten, wurde eine stark vereinfachte und auf das wesentliche reduzierte Geometrie betrachtet [10].

Es werden die beiden Anwendungsfälle eines offenen Prozessbehälters ohne Deckel und eines Prozessbehälters mit Deckel unterschieden.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die beiden verwendeten Geometrien. Das Bad hat einen rechteckigen Grundriss von 1 m x 3 m. Die an

der rechten und linken Wand erkennbaren Streifen sind die Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung. Das Volumen, in dem die Berechnungen durchgeführt wurden, ist der sich aus den sichtbaren Seitenwänden ergebende Quader. Der Eintritt des Wasserstoffs erfolgt vollflächig über die Bodenfläche. Der eintretende Wasserstoffvolumenstrom ergibt sich aus dem betrachteten Prozess. Der Volumenstrom der Absaugung entspricht den Anforderungen der DIN EN 17059:2018. Die Luft kann über die nicht eingefärbten Flächen, außer dem Boden, nachströmen.

Für eine Beurteilung der Gefährdungen durch Explosionen in einem betrachteten Prozess ist die Verteilung des Wasserstoffs maßgeblich. Die Möglichkeiten dies darzustellen sind vielfältig. Zuerst soll die Wasserstoffverteilung im Querschnitt (mit der Schnittfläche quer durch die Mitte des Prozessbehälters) und im Längsschnitt (Schnittfläche längs durch die Mitte des Prozessbehälters), betrachtet werden.

Tiefergehende Informationen bietet die anschließende Darstellung von Flächen gleicher Konzentration, so genannter Isokonzentrationsflächen.

Die Abbildungen 14 bis 23 zeigen die aus den CFD-Berechnungen resultierende Wasserstoffverteilung über der Elektrolytoberfläche des Prozessbehälters, die Abbildungen 14 bis 18 für einen offenen Prozessbehälter, die Abbildungen 19 bis 23 für einen abgedeckten Prozessbehälter.

Dargestellt sind zunächst jeweils die Wasserstoffverteilungen im Längsschnitt und Querschnitt des Prozessbehälters, das heißt, die Abbildungen 14 (Längsschnitt) und 15 (Querschnitt) zeigen die Wasserstoffverteilungen für den offenen, und die Abbildungen 19 und 20 die Wasserstoffverteilungen für den abgedeckten Prozessbehälter.

Die Wasserstoffverteilungen im Längs- und Querschnitt sind dargestellt als Konzentration des Wasserstoffs in Volumenprozent (% H₂); der dargestellte Konzentrationsbereich beträgt 0 % – 4 % , das heißt, er erstreckt sich von 0 % bis zur UEG des Wasserstoffs von 4 %.

Die Wasserstoffverteilung als Isokonzentrationsfläche ist dargestellt als Konzentration im Verhältnis zur unteren Explosionsgrenze (% der UEG).

Wie in Abschnitt 5 erläutert, wurde für die Beurteilung der Gefährdungen durch Explosionen folgende Einteilung der Zonen anhand der Wasserstoffkonzentrationen bei entsprechend großem Volumen angenommen: Zone 0: Wasserstoffkonzentration ≥ 25 % der UEG, Zone 1: 10 % \leq Wasserstoffkonzentration < 25 % der UEG, Zone 2: 3 % \leq Wasserstoffkonzentration < 10 % der UEG, und keine Zone: Wasserstoffkonzentration < 3 % der UEG

Daher wurden für die farbige Darstellung der Isokonzentrationsflächen von Wasserstoff genau diese 3 Konzentrationsbereiche gewählt; die Flächenfarbe entspricht dabei dem Farbschema in der Darstellung dieser Bereiche als „Konzentrationsstrahl“ aus Abschnitt 5:

- Die Isokonzentrationsfläche bei 3 % der UEG zeigt die Grenze zwischen den Bereichen ohne Zonenzuordnung und der Zone 2 (grün dargestellter Bereich).
- Die Isokonzentrationsfläche bei 10 % der UEG zeigt die Grenze zwischen den Bereichen der Zone 2 und der Zone 1 (gelb dargestellter Bereich).
- Die Isokonzentrationsfläche bei 25 % der UEG zeigt die Grenze zwischen den Bereichen der Zone 1 und der Zone 0 (rot dargestellter Bereich).

Beim offenen Prozessbehälter zeigt die Abbildung 14 im Längsschnitt einen ausgeprägten konkaven Konzentrationsverlauf für

den Wasserstoff, mit dem Minimum in der Mitte des Prozessbehälters, und den beiden Maxima kurz unter dem Rand des Prozessbehälters an dessen kleinerer Seite.

Auch im Querschnitt des Prozessbehälters in Abbildung 15 ist ein konkaver Konzentrationsverlauf für den Wasserstoff zu erkennen, mit dem Minimum wie in Abbildung 14 in der Mitte des Prozessbehälters und den beiden Maxima kurz unter den Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung.

Die resultierenden Isokonzentrationsflächen des Wasserstoffs beim offenen Prozessbehälter sind in Abbildung 16 (3 % der UEG), Abbildung 17 (10 % der UEG) und Abbildung 18 (25 % der UEG) dargestellt.

Die Isokonzentrationsfläche des Wasserstoffs bei 25 % der UEG (Abbildung 18) zeigt ebenfalls eine konkave Grundkontur, deren Begrenzungen als Schnittlinien mit den Wänden des Prozessbehälters deutlich unterhalb der Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung liegen.

Bei der Isokonzentrationsfläche bei 10 % der UEG (Abbildung 17) wird gegenüber Abbildung 16 ein der konkaven Grundstruktur überlagerter konvexer Bereich in der Mitte des Prozessbehälters sichtbar, diese Isokonzentrationsfläche liegt näher an den Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung als die bei 25 % der UEG.

Wird die Isokonzentrationsfläche bei 3 % der UEG betrachtet (Abbildung 16), ist deren konvexe Wölbung in der Mitte des Prozessbehälters gegenüber der in Abbildung 17 deutlich ausgeprägter. Es resultiert eine ausgeprägt geschwungene Isokonzentrationsfläche, deren Begrenzungen als Schnittlinien mit den Wänden des Prozessbehälters nahe an den Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung liegen.

Beim abgedeckten Prozessbehälter zeigen die Konzentrationsprofile für den Wasserstoff im Längsschnitt (Abbildung 19) und Querschnitt (Abbildung 20) gegenüber dem offenen Prozessbehälter einen insgesamt eher konvexeren Konzentrationsverlauf für den Wasserstoff.

Der Längsschnitt in Abbildung 19 zeigt einen konvexen Konzentrationsverlauf für den Wasserstoff, mit einem Maximum in der Mitte des Prozessbehälters und den beiden Minima kurz unter dem Rand des Prozessbehälters an dessen kleinerer Seite.

Im Querschnitt (Abbildung 20) unterbrechen zwei Maxima symmetrisch zum Mittelpunkt des Prozessbehälters den konvexen Verlauf kurz vor den Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung.

Die resultierenden Isokonzentrationsflächen des Wasserstoffs beim abgedeckten Prozessbehälter sind in Abbildung 21 (3 % der UEG), Abbildung 22 (10 % der UEG) und Abbildung 23 (25 % der UEG) dargestellt.

Der Verlauf dieser Isokonzentrationsflächen für den abgedeckten Prozessbehälter ähnelt grundsätzlich dem, der bereits für den offenen Prozessbehälter beschrieben wurde.

Ausgehend von der konkaven Isokonzentrationsfläche bei 25 % der UEG (Abbildung 23) wächst die konvexe Wölbung in der Mitte des Prozessbehälters bei 10 % der UEG in Abbildung 22 und 3 % der UEG in Abbildung 21 deutlich.

Diese konvexe Wölbung der Isokonzentrationsflächen in der Mitte des Prozessbehälters ist beim abgedeckten Prozessbehälter ausgeprägter als beim offenen Prozessbehälter.

Da die Verhältnisse an den Rändern der Prozessbehälter dennoch vergleichbar sind, enden auch beim abgedeckten Prozessbehälter die Isokonzentrationsflächen des Wasserstoffs unterhalb den Erfassungsöffnungen der Randabsaugung.

Den Abbildungen 14 bis 23 zufolge sind die Bereiche mit Wasserstoffkonzentrationen bis 25 % der UEG nur in dem Volumen unterhalb der Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung lokalisiert.

Daraus kann gefolgert werden, dass keine g.e.A von Wasserstoff („keine Zone“) in den Erfassungsöffnungen existiert, wenn von einer überwachten technischen Lüftung nach DIN EN 17059:2018 ausgegangen wird.

Die CFD-Berechnungen zeigen, dass der Bereich, in dem der Anteil an Wasserstoff in Luft mehr als 25 % der UEG entspricht (Bereich 4 in der Abbildung 24), auf das Volumen innerhalb des Prozessbehälters beschränkt ist, das sich unterhalb einer gedachten Grenzlinie befindet, die von den Erfassungsöffnungen der beidseitigen Randabsaugung („Lüftungsschlitzen“) gebildet wird (Grenzlinie 1 in Abbildung 24).

Der Bereich, in dem sich nach den CFD Berechnungen dagegen keine solche Konzentration von Wasserstoff befindet, beginnt deutlich unterhalb der Erfassungsöffnungen, wobei der genaue Abstand zur Erfassungsöffnung abhängig vom betrachteten galvanotechnischen Verfahren und dem Anlagentyp ist.

Das Volumen zwischen Elektrolytoberfläche und der unteren Kante der Absaugung (Grenzlinie 1 in Abbildung 24) zeichnet sich dadurch aus, dass die Konzentration des

freigesetzten Wasserstoffs von 100 % bis auf geringe Bruchteile der UEG abfällt. Der Übergang findet über wenige cm statt und lässt keine differenzierte Unterscheidung einzelner Zonen zu, z. B. auf Grund der unruhigen Elektrolytoberfläche oder der Strömungsverhältnisse.

Bei der Bewertung des Bereichs der g.e.A. von Wasserstoff unterhalb der Grenzlinie 1 bzw. im Bereich 4 ist zu berücksichtigen, dass dort nicht überall eine explosionsfähige Atmosphäre in gefahrdrohender Menge existiert.

Das zusammenhängende Volumen an explosionsfähiger Atmosphäre liegt nur gelegentlich sowie örtlich wechselnd und begrenzt oberhalb eines Werts von 10 Liter bzw. größer als 1/10.000 des vorhandenen Raumvolumens. Deshalb ist für den Bereich 4 eine Zone 1 anzunehmen.

Die explosionsgefährdeten Bereiche werden in Abbildungen 8 und 9 dargestellt. Sie befinden sich innerhalb der Prozessbehälter zwischen Elektrolytoberfläche und Unterkante der Erfassungseinrichtung (Randabsaugung), und werden als Zone 1 eingestuft. Es existieren keine explosionsgefährdeten Bereiche außerhalb der Prozessbehälter.

Sollen in diesem Bereich Geräte eingebracht oder installiert werden, die während des Betriebs eine potenzielle Zündquelle darstellen, sollten sie daher folgende Anforderungen nach ATEX-Richtlinie 2014/34/EU an eine Zone 1 zum Explosionsschutz erfüllen:

- Gerätegruppe II (Übertagegeräte)
- Gerätekategorie 2G (Zone 1 und Zone 2 bei Gasen)
- Explosionsgruppe IIC (Wasserstoff)
- Temperaturklasse T1 (Wasserstoff).

Diese Anforderungen haben Auswirkungen auf elektrische und nicht-elektrische Betriebsmittel wie die Zahnräder von Trommelantrieben, Füllstandsensoren oder elektrische Heizsysteme. Im Lüftungssystem (Bereich „2“ im Abluftkanal in der Abbildung 24) existiert im Normalbetrieb kein Bereich mit g.e.A., da sich das Lüftungssystem in deutlichem Abstand oberhalb des identifizierten explosionsgefährdeten Bereichs befindet. Auch bei Störung des Lüftungssystems, zum Beispiel im Falle des Leistungsabfalls des Ventilators (Bereich „3“ im Abluftkanal in der Abbildung 24, existiert im Normalbetrieb kein Bereich mit g.e.A.

Voraussetzung dafür ist, dass die technische Lüftung nach dem in der DIN EN 17059 definierten Stand der Technik überwacht wird. Sobald der Abluftvolumenstrom der technischen Lüftung unter den Auslegungswerten liegt, wird die Bildung des Wasserstoffs durch das in der DIN EN 17059 definierte Abschalten der Gleichrichter so gestoppt, dass die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Wasserstoff-Luft-Gemische sicher vermieden wird.

Es befinden sich nur geringe Mengen an Wasserstoff beim Wiederanfahren der Lüftung im Lüftungssystem, und es findet keine Entmischung statt.

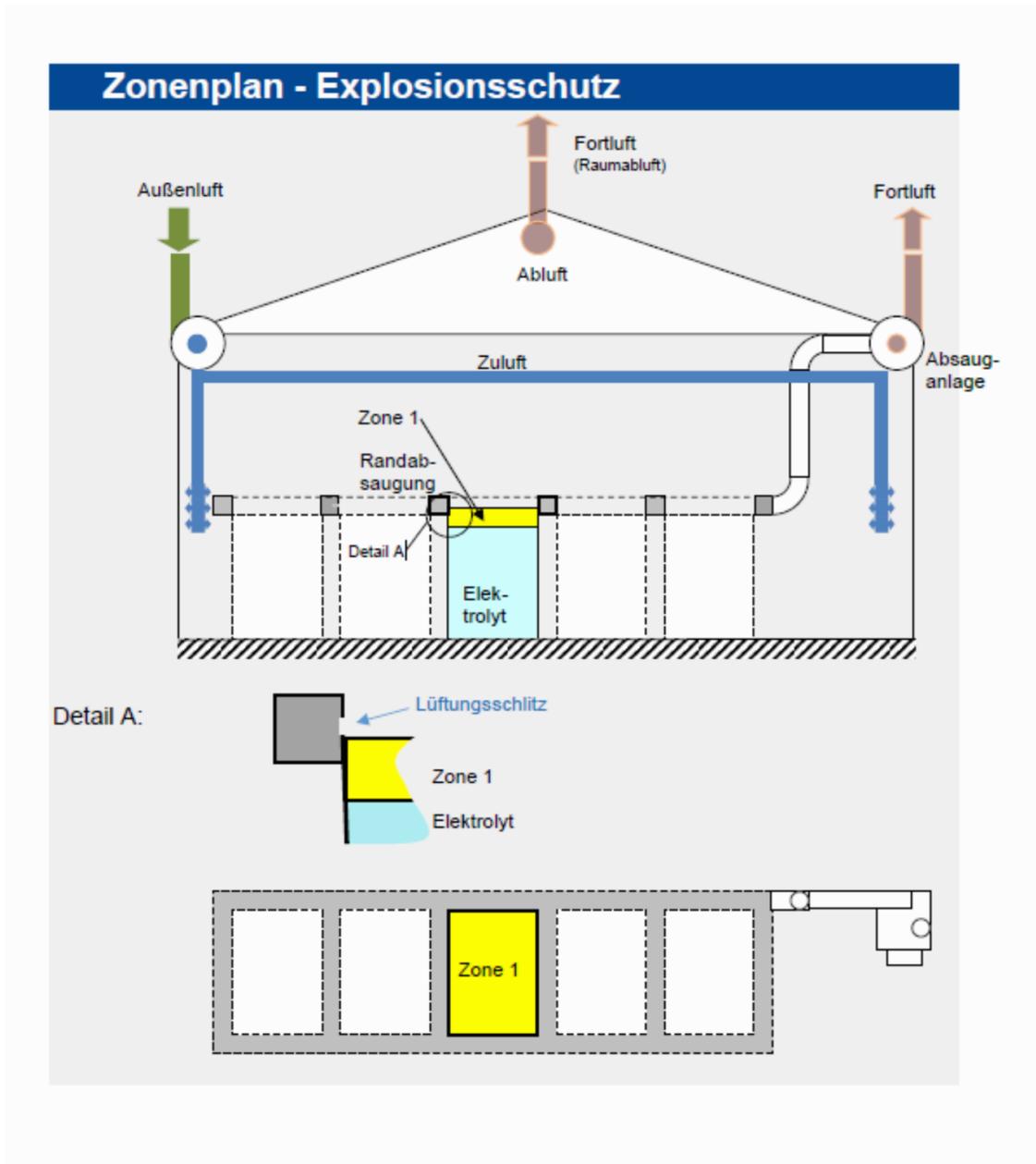


Abbildung 8 – Offener Prozessbehälter mit Darstellung der explosionsgefährdeten Bereiche innerhalb des Prozessbehälters zwischen Elektrolytoberfläche und Erfassungseinrichtung (Randabsaugung). Es gibt keine explosionsgefährdeten Bereiche außerhalb der Prozessbehälter.

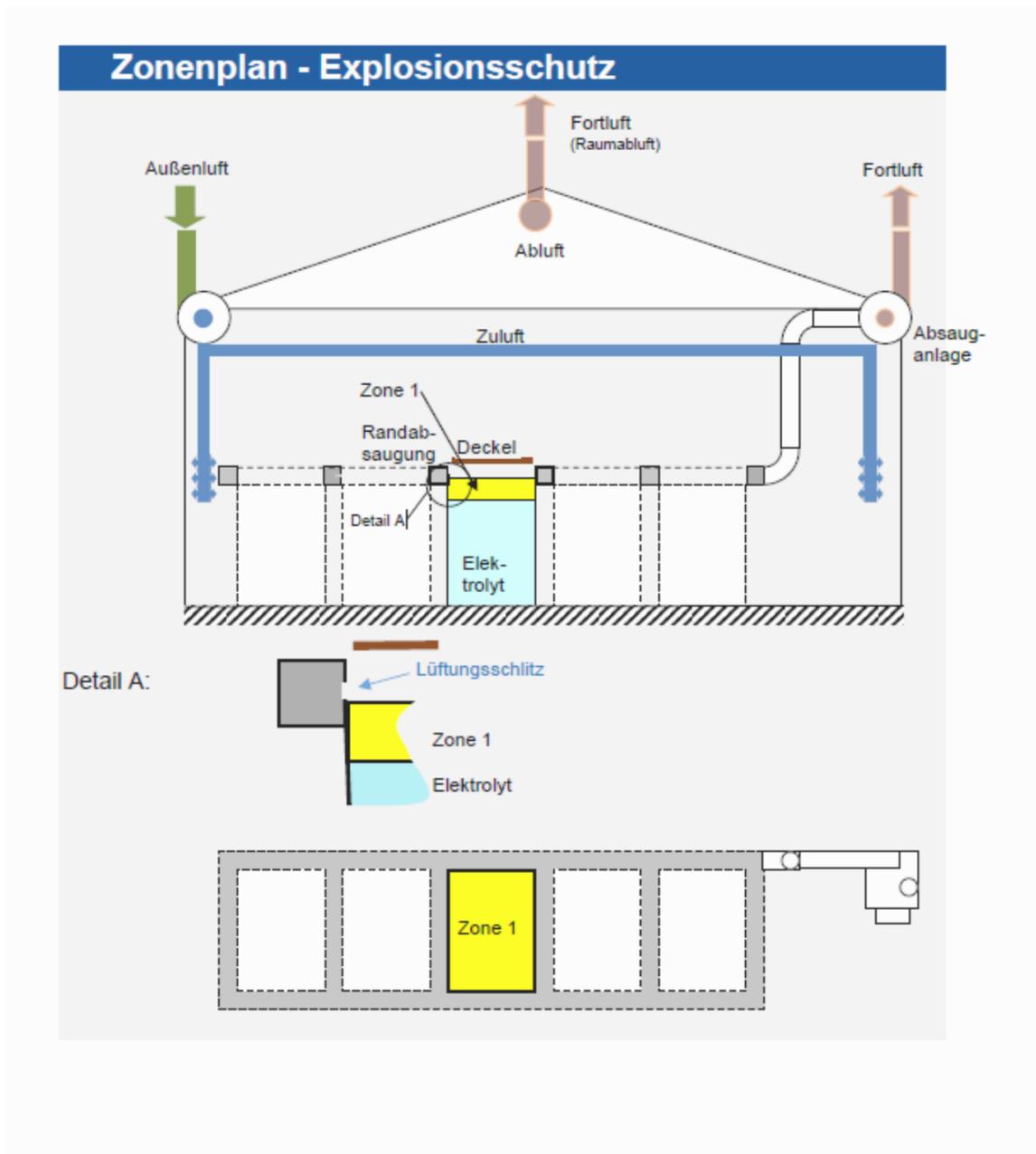


Abbildung 9 – Abgedeckter Prozessbehälter mit Darstellung der explosionsgefährdeten Bereiche innerhalb des Prozessbehälters zwischen Elektrolytoberfläche und Erfassungseinrichtung (Randabsaugung). Es gibt keine explosionsgefährdeten Bereiche außerhalb der Prozessbehälter.



Abbildung 10 – Verchromungsprozessbehälter mit Netzmittel auf dem Elektrolyten.

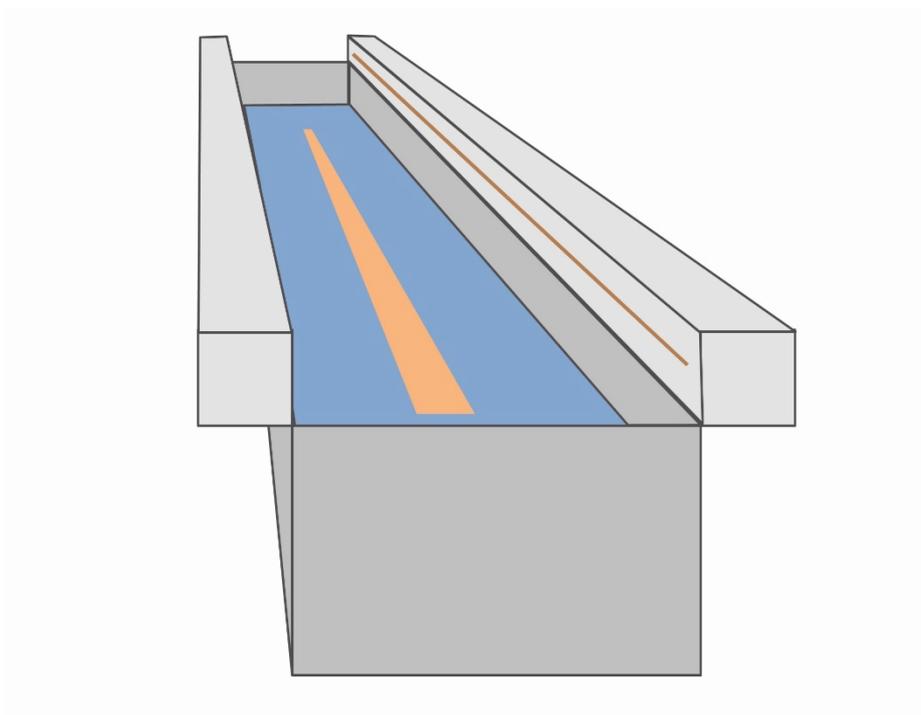


Abbildung 11 – Schema eines Prozessbehälters, in dem das Verfahren zum Verchromen als kathodischer Prozess mit lokalisierter Wasserstoffbildung am Warenträger bzw. an den Bauteilen abläuft (orangegefärbte Fläche)

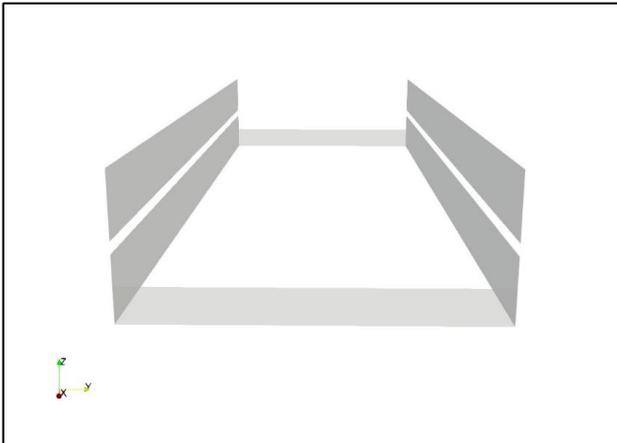


Abbildung 12 – Offener Prozessbehälter ohne mechanische Abdeckung (Deckel)

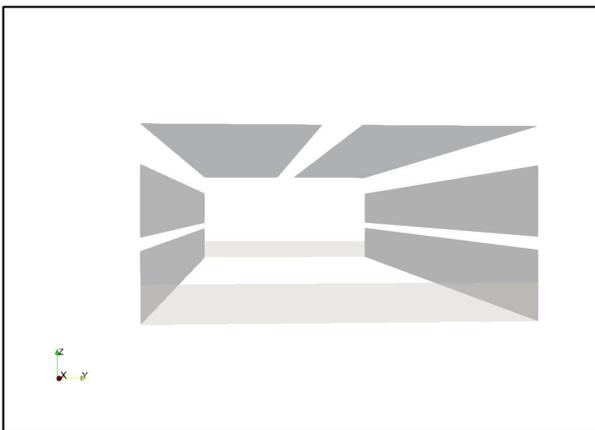


Abbildung 13 – Abgedeckter Prozessbehälter mit mechanischer Abdeckung (Deckel)

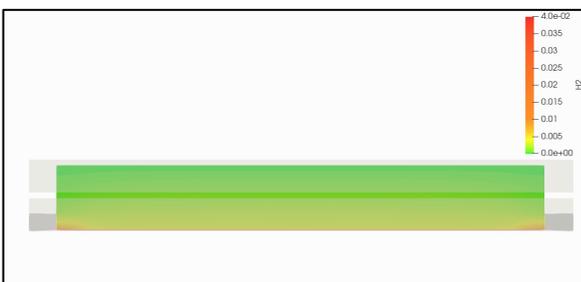


Abbildung 14 – Offener Prozessbehälter, Wasserstoffverteilung nach CFD Berechnungen im Längsschnitt. Dargestellter Konzentrationsbereich 0 – 4 % Volumenprozent Wasserstoff.

Die dargestellten Konzentrationen liegen zwischen 0 % der UEG (grün) und 100 % der UEG (rot).

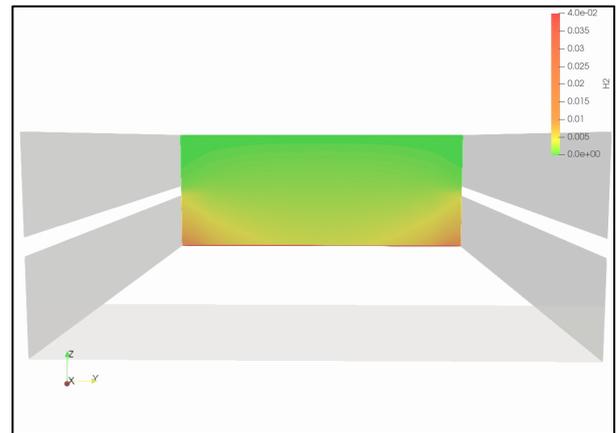


Abbildung 15 – Offener Prozessbehälter, Wasserstoffverteilung nach CFD Berechnungen im Querschnitt.

Dargestellter Konzentrationsbereich 0 – 4 % Volumenprozent Wasserstoff.

Die dargestellten Konzentrationen liegen zwischen 0 % der UEG (grün) und 100 % der UEG (rot).

Das Volumen über den dargestellten Flächen (Abbildungen 16-23) weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

Die genauere Betrachtung des Bereichs der Erfassungsöffnungen zeigt dort mittlere Konzentrationen an Wasserstoff, die von ihrer Höhe her stets kleiner sind als die Werte der UEG, die als Isokonzentrationsflächen dargestellt sind.

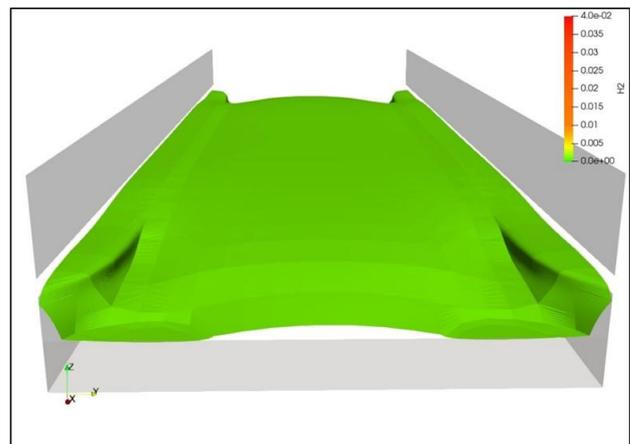


Abbildung 16 – Offener Prozessbehälter: Isokonzentrationsfläche bei 3 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

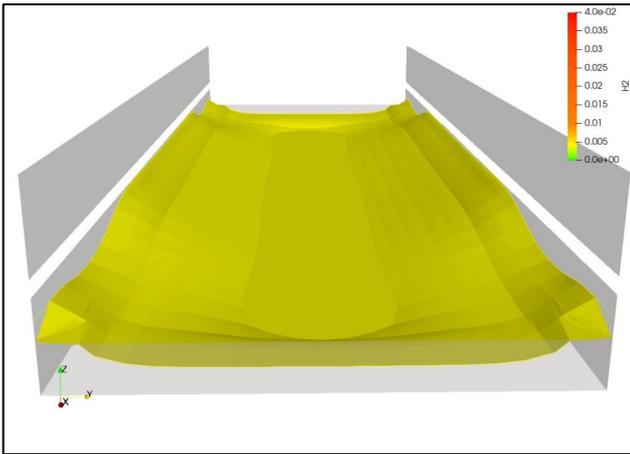


Abbildung 17 – Offener Prozessbehälter: Isokonzentrationsfläche bei 10 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

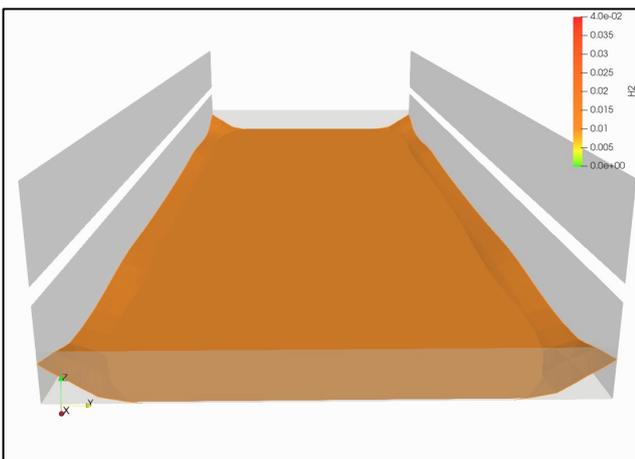


Abbildung 18 – Offener Prozessbehälter: Isokonzentrationsfläche bei 25 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

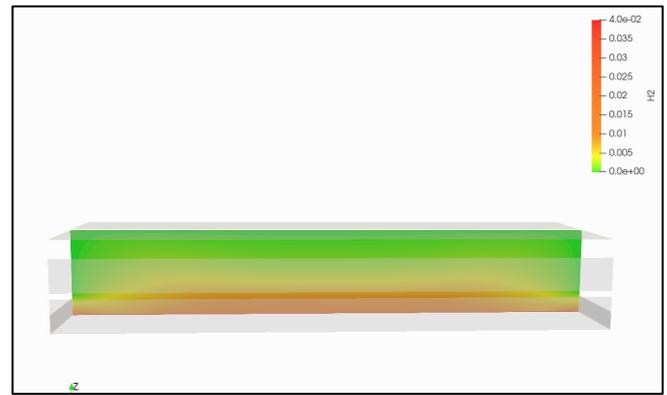


Abbildung 19 – Abgedeckter Prozessbehälter: Wasserstoffverteilung nach CFD Berechnungen im Längsschnitt.

Dargestellter Konzentrationsbereich 0 – 4 % Volumenprozent Wasserstoff.

Die dargestellten Konzentrationen liegen zwischen 0 % der UEG (grün) und 100 % der UEG (rot).

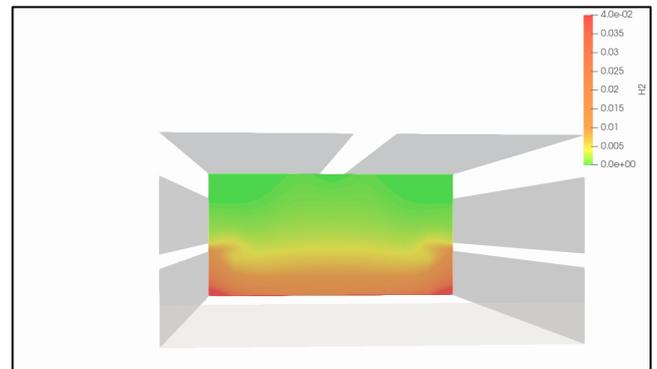


Abbildung 20 – Abgedeckter Prozessbehälter, Wasserstoffverteilung nach CFD Berechnungen im Querschnitt.

Dargestellter Konzentrationsbereich 0 – 4 % Volumenprozent Wasserstoff.

Die dargestellten Konzentrationen liegen zwischen 0 % der UEG (grün) und 100 % der UEG (rot).

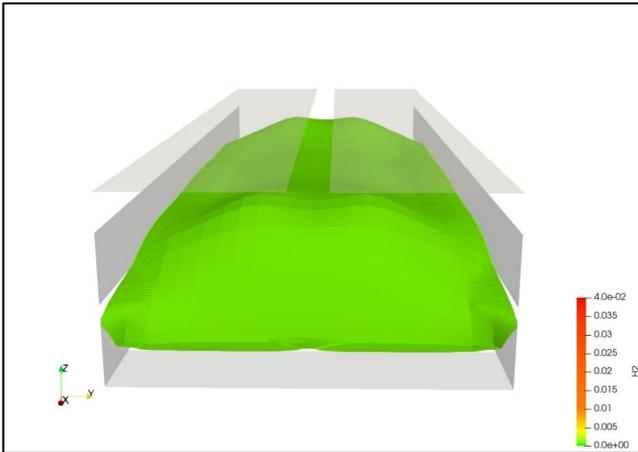


Abbildung 21 – Abgedeckter Prozessbehälter:
Isokonzentrationsfläche bei 3 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

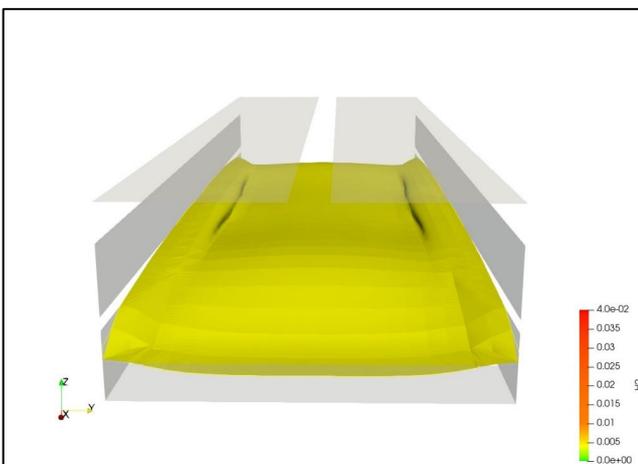


Abbildung 22 – Abgedeckter Prozessbehälter:
Isokonzentrationsfläche bei 10 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

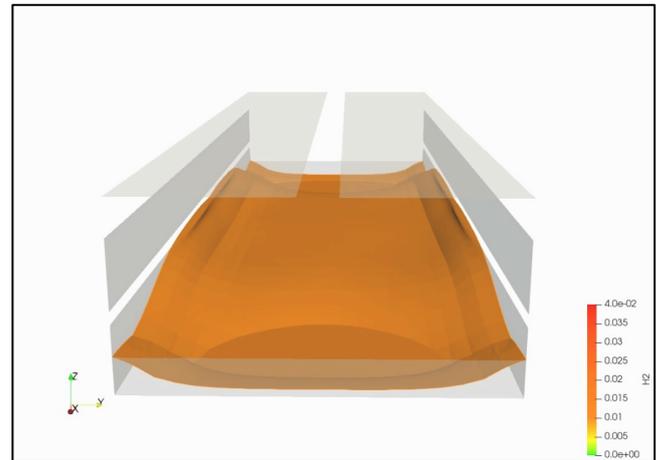


Abbildung 23 – Abgedeckter Prozessbehälter:
Isokonzentrationsfläche bei 25 % der UEG.

Das Volumen über dieser Fläche weist immer kleinere Konzentrationen, Volumen darunter weisen immer größere Konzentrationen auf.

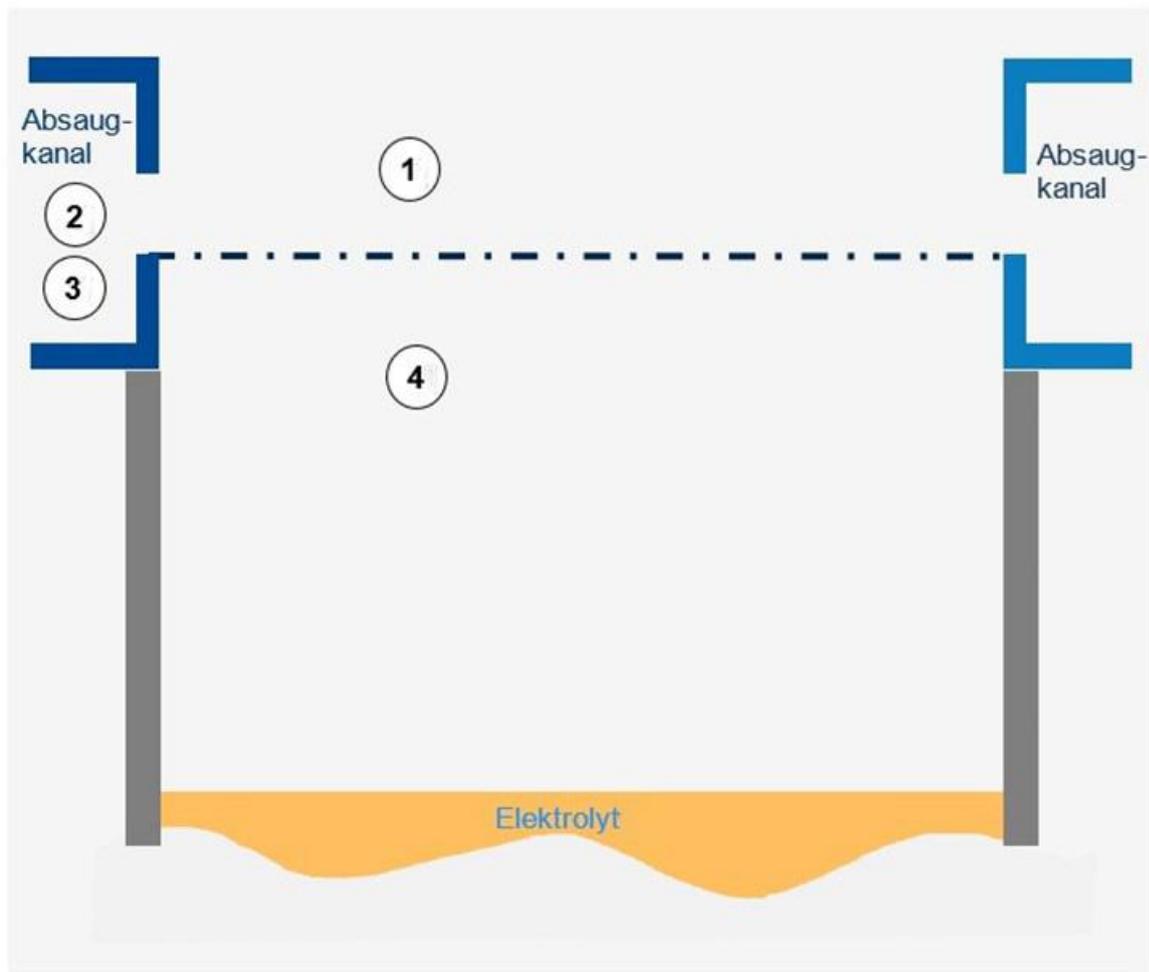


Abbildung 24 – Betrachtete Bereiche im Prozessbehälter und im Lüftungssystem (Querschnitt)
 – Ergebnisse der CFD Berechnungen

7 Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen

Diese „Fachbereich AKTUELL“ leitet Beispiele für die explosionsgefährdeten Bereiche in Galvanikanlagen ab und unterstützt bei der Erstellung der Explosionsschutzdokumente.

Eine Betrachtung aller relevanter Verfahren zeigt, dass auch bei den hinsichtlich der Wasserstoffentwicklung kritischsten Verfahren die Verdünnung ausreicht. Mit einer nach der DIN EN 17059:2018 ausgelegten technischen Lüftung existiert außerhalb der Prozessbehälter und in der kontinuierlich betriebenen Absaugung selbst keine Zone. Der entstehende Wasserstoff wird ausreichend verdünnt. Der Bereich zwischen Elektrolytoberfläche und Unterkante der Erfassungsöffnungen der technischen Lüftung wird in eine Zone 1 eingeteilt.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ ergänzt damit die Gefährdungsbeurteilung nach der DGUV Regel 109-602 „Branche Galvanik“ und der DGUV Information 209-006 „Galvanisieren“ [12], indem sie für alle relevanten Verfahren in Galvanik- und Anodisieranlagen mit Gefährdungen durch Explosionen Hilfestellungen zum angewandten Explosionsschutzkonzept und zur Zoneneinteilung liefert.

Die Bestimmungen nach einzelnen Gesetzen und Verordnungen bleiben durch diese „Fachbereich AKTUELL“ unberührt. Die Anforderungen der gesetzlichen Vorschriften gelten uneingeschränkt.

Um vollständige Informationen zu erhalten, ist es erforderlich, die in Frage kommenden Vorschriftentexte einzusehen.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ ersetzt die gleichnamige Entwurfsfassung, Stand 02/2022.

Der Fachbereich Holz und Metall setzt sich unter anderem zusammen aus Vertretern und Vertreterinnen der Unfallversicherungsträger, staatlichen Stellen, Sozialpartnern, herstellenden und betreibenden Firmen.

Weitere „Fachbereich AKTUELL“ oder Informationsblätter des Fachbereichs Holz und Metall stehen im Internet zum Download bereit [13]

Literaturverzeichnis

[1] [Gefahrstoffverordnung \(GefStoffV\) – Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen vom 26. November 2010 \(BGBl. I S. 1643, 1644\), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 21. Juli 2021 \(BGBl. I S. 3115\) geändert worden ist](#)

[2] [DGUV Regel 109-602 „Branche Galvanik, Ausgabe Oktober 2017, DGUV Berlin](#)

[3] [DIN EN 17059 „Galvanik- und Anodisieranlagen – Sicherheitsanforderungen“, Ausgabe Oktober 2018, Beuth Verlag Berlin](#)

[4] [DGUV Information 213-106 „Explosionsschutzdokument“, Ausgabe Juni 2021, DGUV Berlin](#)

[5] [Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie BG RCI, Explosionschutzportal: \[www.exinfo.de\]\(http://www.exinfo.de\) Seiten ID: #2BK8](#)

[6] [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\) – Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln vom 3. Februar 2015 \(BGBl. I S. 49\), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 \(BGBl. I S. 3146\) geändert worden ist](#)

[7] Frühere Unfallverhütungsvorschrift VBG 57 Elektrolytische und chemische Oberflächenbehandlung; Galvanotechnik, in der Fassung vom 01. Januar 1997, zurückgezogen im Februar 1999

[8] [Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen \(ATEX\)](#)

[9] [TRGS 722 „Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische“, BAuA, Februar 2021](#)

[10] [“CFD Simulation, Interpretation and Graphical Representation of Hydrogen Distribution in Electroplating Plants”](#),
[Masterarbeit Farshad Fahim, Otto von Guericke University of Magdeburg, Faculty for Process and Systems Engineering, Magdeburg, April 2022](#)

[11] [DIN EN ISO 13849-1 Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze, Ausgabe Juni 2016, Beuth Verlag Berlin](#)

[12] [DGUV Information 209-009 „Galvanisieren, Ausgabe November 2019, DGUV Berlin](#)

[13] Internet: www.dguv.de/fb-holzundmetall
 Publikationen oder www.bghm.de Webcode:
 <626>

Bildnachweis

Die gezeigten Bilder wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von:

Abbildungen 1, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23:

BGHM

Abbildungen 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 24:

Projektgruppe für das DGUV-Projekt
 2019-0011 „Explosionsschutzdokumente für explosionsgefährdete Bereiche verschiedener Verfahren in Galvanikanlagen“

Abbildung 10:

Kunststofftechnik Bernt GmbH
 Dr. Herbert-Kittel-Straße
 87600 Kaufbeuren

Herausgeber

Deutsche Gesetzliche
 Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
 10117 Berlin
 Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
 Fax: 030 13001-9876
 E-Mail: info@dguv.de
 Internet: www.dguv.de

Sachgebiet Oberflächentechnik
 im Fachbereich Holz und Metall
 der DGUV www.dguv.de
 Webcode: d544779

Die Fachbereiche der DGUV werden von den Unfallkassen, den branchenbezogenen Berufsgenossenschaften sowie dem Spitzenverband DGUV selbst getragen. Für den Fachbereich Holz und Metall ist die Berufsgenossenschaft Holz und Metall die federführende Unfallversicherungsträgerin und damit auf Bundesebene erste Ansprechpartnerin in Sachen Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit für Fragen zu diesem Gebiet.

An der Erarbeitung dieser Fachbereich
 AKTUELL haben mitgewirkt:

- BGHM, Hauptabteilung Zentrale Präventionsaufgaben, Abteilung Technologien Holz und Metall, SG Fahrzeugbau, Instandhaltung, Oberflächentechnik
- BG ETEM, Präventionsabteilung, PZ Augsburg
- BG RCI, FB RCI, SG Explosionsschutz
- Qubus Planung und Beratung Oberflächentechnik GmbH
- PTB Braunschweig, Arbeitsgruppe 3.72, Explosionvorgänge bei nichtatmosphärischen Bedingungen
- BG ETEM, PZ Köln, Galvanik

Anhang

A1 Anlage zum Explosionsschutz- konzept (Abschnitt 2)

Die Mehrzahl der in dieser früheren Unfallverhütungsvorschrift VBG 57 zitierten oder referenzierten Schriften sind zum aktuellen Zeitpunkt bereits außer Kraft gesetzt und nicht mehr gültig.

Auszüge aus der früheren Unfallverhütungsvorschrift VBG 57 „Elektrolytische und chemische Oberflächenbehandlung; Galvanotechnik“

Absaugung und Lüftung

§ 12

(1) Offene Reaktionsbehälter der Abwasserbehandlung und offene Bäder, die Gase, Dämpfe oder Nebel in gesundheitsgefährlicher Konzentration oder gefährliche explosionsfähige Atmosphäre entwickeln, müssen mit Absaugeinrichtungen versehen sein, die auch die Gase, Dämpfe oder Nebel erfassen, die beim Beschicken und Herausnehmen von Werkstücken entstehen.

(2) Abluftleitungen müssen so beschaffen und geführt sein, daß Gase, Dämpfe oder Nebel in gesundheitsgefährlicher Konzentration oder gefährliche explosionsfähige Atmosphäre nicht in betriebliche Räume eindringen können. Die Zufuhr von Frischluft in ausreichender Menge muss sichergestellt sein.

Durchführungsanweisung:

Gase, Dämpfe oder Nebel in gesundheitsgefährlicher Konzentration können z. B. entstehen bei Chrombädern, elektrolytischen Entfettungsbädern, Entfettungsbädern mit organischen Lösemitteln, elektrolytischen Entmetallisierungsbädern, Bädern für elektrolytisches und chemisches Glänzen (Polieren), cyanidischen Bädern, alkalischen Beizen für

Leichtmetalle, sauren Beizen, anodischen Oxidieren (Eloxieren), luftbewegten Bädern, Ätzmaschinen und bei der Abwasserbehandlung (z.B. Nitritentgiftung durch Oxidation mittels Natriumhypochlorit, Cyanidentgiftung, Chrom-VI-Reduktion).

Gesundheitsgefährliche Konzentrationen von Gefahrstoffen sind z. B. vorhanden, wenn die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) oder Technische Richtkonzentration (TRK-Wert) überschritten ist. Die jeweils gültigen MAK- sowie TRK-Werte sind in der „MAK-Werte-Liste (TRGS 900)“ (ZH 1/401) aufgeführt.

Bei der räumlichen Anordnung der Absaugöffnungen ist die Temperatur sowie die Dichte des Schad- oder Abfallstoffes zu berücksichtigen. Bei gesundheitsgefährlichen Gasen, Dämpfen oder Nebeln, deren Dichte höher als die der Luft ist, empfiehlt sich eine Luftführung von oben nach unten, das heißt, es ist eine Absaugung am Boden vorzusehen. Bei heißen Gasen, Dämpfen oder Nebeln, deren Dichte geringer als die der Luft ist, z. B. bei erwärmten Lösemitteldämpfen, ist eine Deckenabsaugung angebracht. Raumlüftung und Absaugung an der Entstehungs- oder Austrittsstelle sind aufeinander abzustimmen. Dabei darf schadstoffhaltige Luft nicht durch den Atembereich der Beschäftigten geführt werden. Beim Arbeiten mit salpetersäurehaltigen Beizen (Gelbbrennen) ist dies durch Absaugeinrichtungen zu erreichen, welche die Behälter so umschließen, daß die zum Einbringen der Werkstücke erforderlichen freien Öffnungen auf ein Mindestmaß beschränkt sind. Entwickeln sich gesundheitsgefährliche Dämpfe auch beim Überheben der Werkstücke von einem Bad ins andere, so ist die Absaugeinrichtung so zu gestalten, daß sie wenigstens diese beiden Bäder umschließt.

Die Leistung der Absaugeinrichtung darf durch eine Raumlüftung oder durch

nachträgliche Ein- oder Umbauten nicht verringert werden. Die Lüftung soll möglichst den ganzen Raum erfassen. Hinsichtlich der grundsätzlichen Anforderungen an die Lüftung von Arbeitsräumen wird auf § 5 Arbeitsstättenverordnung verwiesen. Wegen der zuträglichen Raumtemperatur ist § 6 Arbeitsstättenverordnung zu berücksichtigen. Insbesondere zu beachten ist das Vorhandensein einer selbsttätig wirkenden Warneinrichtung, um Störungen an lüftungstechnischen Anlagen (siehe § 5 Arbeitsstättenverordnung) und an Absaugeinrichtungen (siehe § 14 Arbeitsstättenverordnung) anzuzeigen.

Im Allgemeinen ist dann nicht mit der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen, wenn die Konzentration des Lösemitteldampf-Luft-Gemisches oder Wasserstoff-Luft-Gemisches genügend weit unter der unteren Explosionsgrenze liegt. Dies ist bei Lösemitteln im Allgemeinen dann der Fall, wenn bereits der MAK-Wert an jeder Stelle und zu jeder Zeit im ganzen Raum unterschritten bleibt.

Auf eine getrennte Leitungsführung beim Ableiten der Abluft ist dann zu achten, wenn die jeweiligen Abluftströme gefährlich miteinander reagieren können, z. B. Abluft aus säure- und cyanidhaltigen Bädern wegen der Gefahr der Cyanwasserstoff-Bildung (Blausäure).

Chemische und mechanische Mittel können das Auftreten gesundheitsgefährlicher Gase, Dämpfe oder Nebel mindern. Dies sind je nach Zusammensetzung des Badinhaltes z. B. schaubildende Mittel (Netzmittel) und Schwimmelemente aus Kunststoff (z. B. Kunststoffkugeln bei Chrombädern).

Können sich Flußsäuredämpfe bilden, so sind die Forderungen des Merkblattes „Fluorwasserstoff (Flußsäure) und anorganische Fluoride“ (ZH 1/161) zu berücksichtigen.

Siehe auch

- Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen (ElExV),
- §§ 44 und 45 UVV „Allgemeine Vorschriften“ (VBG 1),
- „Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung – Explosionsschutz-Richtlinien – (EX-RL)“ (ZH 1/10),
- „Richtlinien für Anlagen zum Reinigen von Werkstücken mit Lösemitteln (Lösemittel-Reinigungsanlagen)“ (ZH 1/562).
- ...

Kennzeichnung der Bäder

§ 15

Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, daß Bäder, in denen sich Wasserstoff unter Schaumbildung entwickelt, mit einem Hinweis auf mögliche Explosionsgefahr gekennzeichnet sind.

...

(2)

...

Absaugung und Lüftung

§ 16

Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, daß die Lüftungs- und Absaugeinrichtungen wirksam sind und in angemessenen Zeitabständen, mindestens jedoch einmal jährlich durch einen Sachkundigen geprüft werden.

Durchführungsanweisung:

Diese Forderung schließt ein, daß – solange Gase, Dämpfe, Nebel oder Stäube in gesundheitsgefährlicher Konzentration oder gefährlicher Menge auftreten – die Einrichtungen für die technische Lüftung, z. B. Ventilatoren, Lüftungskanäle, Leitbleche, Zu- und Abluftöffnungen, nicht unwirksam werden dürfen.

Ebenso ist zu beachten, daß die Absaugeinrichtungen auch während des Anheizens und Abkühlens und während der Benutzungspausen in Betrieb sein müssen. Im Einzelfall kann auch ein Abdecken nicht benutzter Bäder, welche gesundheitsgefährliche Gase oder Dämpfe abgeben, ausreichend sein.

Ist trotz Absaugung und Lüftung ein Überschreiten der Grenzwerte (MAK-, TRK-Werte) nicht sicher auszuschließen, ist nach UVV „Allgemeine Vorschriften“ (VBG 1) Atemschutz vom Unternehmer zur Verfügung zu stellen und von den Versicherten zu benutzen. Dies kann z. B. beim Ansetzen von Zubereitungen, beim Abfüllen von Gefahrstoffen, bei Arbeiten in Behältern oder engen Räumen möglich sein.

Atemschutzausrüstung muß auch für Betriebsstörungen bereitgehalten werden.

Siehe auch „Atemschutz-Merkblatt“ (ZH 1/134).

Zeitabstände für die Prüfungen sind angemessen, wenn sie unter Berücksichtigung der betrieblichen Umstände sicherstellen, daß Gefahren durch die Minderung der Wirksamkeit der Lüftungs- und Absaugeinrichtungen verhütet werden.

Sachkundige sind Personen, die aufgrund ihrer fachlichen Ausbildung und Erfahrung ausreichende Kenntnisse auf dem Gebiet lüftungstechnischer Anlagen haben und mit den einschlägigen staatlichen Arbeitsschutzvorschriften, Unfallverhütungsvorschriften, Richtlinien und allgemein anerkannten Regeln der Technik (z. B. DIN-Normen, VDE-Bestimmungen) soweit vertraut sind, daß sie den arbeitssicheren Zustand lüftungstechnischer Anlagen beurteilen und mit den dazu erforderlichen Meßgeräten umgehen können.

...

Entfetten, Reinigen und Trocknen mit Lösemitteln

§ 22

(1) Der Unternehmer hat für das Entfetten, Reinigen und Trocknen mit Lösemitteln

besondere Schutzmaßnahmen gegen Gesundheits-, Brand- und Explosionsgefahren zu treffen.

Durchführungsanweisung:

Lösemittel sind organische Flüssigkeiten, insbesondere Halogenkohlenwasserstoffe (Chlorkohlenwasserstoffe [CKW] und Fluorkohlenwasserstoffe [FKW], Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Ketone und Gemische der genannten Stoffe). Diese Forderung ist erfüllt, wenn in Bereichen von 5 m um Lösemittel-Reinigungsanlagen, in denen Halogenkohlenwasserstoffe verwendet werden, keine Gegenstände mit heißen Oberflächen (sinngemäß z. B. auch kein Schweißen, Schneiden), an denen sich die Halogenkohlenwasserstoffe zersetzen können, und keine offene Flammen (Rauchverbot !) oder Funken (Schleifen) vorhanden sind.

Siehe auch

- Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen 2. BImSchV –,
- Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen (ElexV),
- §§ 43 und 44 UVV „Allgemeine Vorschriften“ (VBG 1),
- „Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung – Explosionsschutz-Richtlinien – (EX-RL)“ (ZH 1/10),
- „Richtlinien für Anlagen zum Reinigen von Werkstücken mit Lösemitteln (Lösemittel-Reinigungsanlagen)“ (ZH 1/562),
- Merkblatt: „Chlorkohlenwasserstoffe“ (ZH 1/194),
- Merkblatt: „Lösemittel“ (ZH 1/319),
- „Merkblatt für den Umgang mit Fluorkohlenwasserstoffen – FKW-Merkblatt“ (ZH 1/409),
- „Kaltreiniger-Merkblatt“ (ZH 1/425).

Nach Anhang II Abschnitt 1.3.4 Gefahrstoffverordnung sind Reinigungsarbeiten mit Verdünnungsmittel wegen des darin enthaltenen Benzols verboten.

(2) Der Unternehmer hat sicherzustellen, daß zum Reinigen spanabhebend bearbeiteter Werkstücke aus Aluminium oder aluminiumhaltigen Werkstoffen mit Chlorkohlenwasserstoffen nur Tetrachlorethen (Perchloroethylen), sonderstabilisierte Chlorkohlenwasserstoffe oder sonderstabilisierte Lösemittel-Gemische verwendet werden. Die Eignung der sonderstabilisierten Chlorkohlenwasserstoffe und Lösemittel-Gemische für diesen Verwendungszweck muß durch ein Gutachten einer von der Berufsgenossenschaft benannten Prüfstelle nachgewiesen sein.

Durchführungsanweisung:

Von der Berufsgenossenschaft benannte Prüfstelle ist z. B. die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin. Auskünfte über den aktuellen Stand der geprüften sonderstabilisierten Chlorkohlenwasserstoffe und sonderstabilisierten Lösemittel-Gemische erteilt die Zentralstelle für Unfallverhütung und Arbeitsmedizin des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 53754 Sankt Augustin.

Bäder mit Wasserstoffentwicklung

§ 23

Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, daß bei Bädern, in denen sich Wasserstoff unter Schaumbildung entwickelt, vor Einsetzen und Herausnehmen der Werkstücke die Stromzufuhr unterbrochen wird.

Durchführungsanweisung:

Dies gilt wegen der lebhaften Wasserstoffbildung für das Eintauchen von Leichtmetall-Hohlprofilen in Lauge. Beim Eintauchen großflächiger Leichtmetall-Werkstücke ist außerdem das Überschäumen der Badflüssigkeit z. B. Durch Einhalten eines ausreichenden Abstandes der Flüssigkeitsoberfläche vom Behälterrand oder Einsetzen kleinerer Chargen in die Bäder zu verhindern.

A2 Anlage zu relevanten Verfahren mit explosionsgefährdeten Bereichen (Abschnitt 3)

Tabelle 1 – Relevante Verfahren mit explosionsgefährdeten Bereichen

Vorbehandlungsverfahren	Prozessart
Polieren, Glänzen, chemisches Entgraten	elektrochemisch
Elektrolytische Entfettung	elektrochemisch
Beizen	außenstromlos
Oberflächenbehandlung	
Hartverchromen	elektrochemisch
Glanzverchromen	elektrochemisch
Chemisches Vernickeln	außenstromlos
Galvanisches Vernickeln	elektrochemisch
Cyanidisches Verkupfern	elektrochemisch
Saures Verkupfern	elektrochemisch
Cyanidisches Verzinken	elektrochemisch
Alkalisches Verzinken	elektrochemisch
Vergolden	elektrochemisch
Versilbern	elektrochemisch
Sauer Verzinnen	elektrochemisch
Alkalisches Verzinnen	elektrochemisch
Eloxieren	elektrochemisch
Nachbehandlung	
Entmetallisieren	elektrochemisch
Nachtauchlösungen	außenstromlos

Tabelle 2 – Relevante Verfahren mit Einteilung in anodische und kathodische Prozesse

Vorbehandlungsverfahren	kathodischer / anodischer Prozess
Polieren, Glänzen, chemisches Entgraten	anodisch
Elektrolytische Entfettung	kathodisch / anodisch
Beizen	-
Oberflächenbehandlung	
Hartverchromen	kathodisch
Glanzverchromen	kathodisch
Chemisches Vernickeln	-
Galvanisches Vernickeln	kathodisch
Cyanidisches Verkupfern	kathodisch
Saures Verkupfern	kathodisch
Cyanidisches Verzinken	kathodisch
Alkalisches Verzinken	kathodisch
Vergolden	kathodisch
Versilbern	kathodisch
Sauer Verzinnen	kathodisch
Alkalisches Verzinnen	kathodisch
Eloxieren	anodisch
Nachbehandlung	
Entmetallisieren	anodisch
Nachtauchlösungen	-

A3 Anlage zu Modellen von Prozessbehältern mit Wasserstoffentwicklung (Abschnitt 4):

Tabelle 3 Prozessbedingte Varianten aus anodischen und kathodischen Prozessen

Anodische Prozesse Warenträger = Anode								Kathodische Prozesse Warenträger = Kathode							
lokalisierte H ₂ -Entwicklung an/über beiden Randelektroden Variante 2 c = 0,2m ; d = 2,6m ; e = 0,2m ; f = 0,1m freistehender Prozessbehälter				H ₂ -Entwicklung über gesamte Elektrolytoberfläche verteilt Variante 1 c = a = 1m; d = b = 3m freistehender Prozessbehälter				lokalisierte H ₂ -Entwicklung mittig am/über dem Warenträger Variante 3 c = 0,2m ; d = 2,6m ; e = 0,2m ; f = 0,1m freistehender Prozessbehälter				H ₂ -Entwicklung über gesamte Elektrolytoberfläche verteilt Variante 1 c = a = 1m; d = b = 3m freistehender Prozessbehälter			
einseitige Randabsaugung		zweiseitige Randabsaugung		einseitige Randabsaugung		zweiseitige Randabsaugung		einseitige Randabsaugung		zweiseitige Randabsaugung		einseitige Randabsaugung		zweiseitige Randabsaugung	
offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter	offener Prozess- behälter	abge- deckter Prozess- behälter

A4 Ableitung der Gleichung zur Bildung von Wasserstoff (Abschnitt 5)

Tabelle 4 – Symbole, Konstanten, Indizes und Stoffwerte

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Wasserstoff	Sauerstoff
Masse	m	kg		
Molare Masse	M	kg/kmol	2,01588 kg/kmol	16,00 kg/kmol
Stromstärke	I	A		
Zeit	t	s		
Faradaykonstante	F	96.484.560 A s/kmol		
Wertigkeit	z	-	2	4
Dichte	ρ	kg/m ³	0,0899 kg/m ³	1,4289 kg/m ³
Volumen	V	m ³		
Volumenstrom	\dot{V}	m ³ /s		
Temperatur	T	K		
Stromausbeute	μ	-		
20°C und 1013 hPa	Index R			
0°C und 1013 hPa	Index 0			

Über die Faraday'sche Gleichung lässt sich der Zusammenhang der Bildung von Wasserstoff durch die Elektrolyse und der eingesetzten Stromstärke herleiten.

Die Faraday Gleichung lautet:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad (1)$$

Über die Gleichung für die Dichte kann die Masse, bzw. Massenstrom in das Volumen bzw. den Volumenstrom umgerechnet werden.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Für die entsprechenden Ströme

$$\dot{V} = \frac{m}{\rho \cdot t}$$

Wird die Faraday-Gleichung (1) mit der Dichte ρ ergänzt, ergibt sich:

$$\frac{m}{t \cdot \rho} = \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot I$$

$$\dot{V} = \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot I \quad (2)$$

Bildung von Wasserstoff

Bei den in Anlagen vorkommenden Umgebungsbedingungen (20°C und 1013 hPa) kann die Luft und der Wasserstoff als ideales Gas betrachtet werden und mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung eine einfache Temperaturkorrektur vorgenommen werden.

Damit sind die Stoffwerte (Dichte) für Normalbedingungen (0°C und 1013 hPa) einsetzbar:

$$\frac{\rho_R}{\rho_0} = \frac{T_0}{T_R} \rightarrow \rho_R = \rho_0 * \frac{T_0}{T_R}$$

$$\dot{V} = \frac{M}{z * F * \rho_0} * \frac{T_R}{T_0} * I$$

$$\dot{V} = \frac{2,01588}{2 * 96.484.560 * 0.0899} * \frac{293}{273} * \frac{kg * kmol * m^3}{kmol * s * kg} * I/A$$

$$\dot{V} = 0,000000124 * \frac{m^3}{s} * I/A$$

Umgerechnet in die Einheit m³/h (multipliziert mit 3600 s/h)

$$\dot{V} = 0,00045 * \frac{m^3}{h} * I/A$$

Bei galvanischen Prozessen wird nur ein Teil des Stroms durch die Elektrolyse in Wasserstoff umgesetzt. Die Stromausbeute μ beschreibt, welcher Anteil in die erwünschte Umwandlung und Abscheidung des Metalls an der Werkstückoberfläche genutzt wird. Der verbleibende Rest (1- μ) wird in Wasserstoff umgewandelt:

$$\dot{V}_{H_2} = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{m^3}{A \cdot h} \cdot I \cdot (1 - \mu)$$

Bildung von Sauerstoff

Über die stöchiometrische Gleichung der Elektrolyse ist die Bildung von Sauerstoff mit der Entstehung von Wasserstoff verknüpft:



Die zuvor abgeleitete Gleichung gilt daher auch für die Bildung von Sauerstoff an der Anode.

Setzt man in die Gleichung die Stoffwerte von Sauerstoff ein ergibt sich:

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{16,00}{4 * 96.484.560 * 1,4289} * \frac{293}{273} * (1 - \mu) * \frac{kg * kmol * m^3}{kmol * s * kg} * I/A$$

$$\dot{V}_{O_2} = 6,2278 * 10^{-8} * (1 - \mu) * \frac{m^3}{s} * I/A$$

$$\dot{V}_{O_2} = 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{m^3}{A \cdot h} \cdot I \cdot (1 - \mu)$$

A5 Anlage zu Beispielen für eine systematische Zoneneinteilung (Abschnitt 6)

Tabelle 5 – Menge und Bildungsrate des Wasserstoffs, berechnet aus Stromdichte und gesamter Werkstückoberfläche sowie geforderte Strömungsgeschwindigkeiten v und Abluftvolumenströme V' nach Norm DIN EN 17059

Verfahren	Parameter			gebildete Wasserstoffmenge/ Bildungsrate m^3/h	Abluftvolumenstrom V' für $c(H_2) < 3\%$ der UEG m^3/h	Strömungsgeschwindigkeit v offenes Prozessbad DIN EN 17059 Anhang E m/s	Abluftvolumenstrom V' für offenes Prozessbad DIN EN 17059 einseitige Randabsaugung m^3/h	Abluftvolumenstrom V' für offenes Prozessbad DIN EN 17059 zweiseitige Randabsaugung m^3/h	Strömungsgeschwindigkeit v an Öffnungen des abgedeckten Prozessbads DIN EN 17059 Anhang E m/s	Abluftvolumenstrom V' für abgedecktes Prozessbad DIN EN 17059 ein-/zweiseitige Randabsaugung m^3/h
	Stromdichte I A/dm^2	Abscheiderate n $\mu m/min$	Stromausbeute μ							
Vorbehandlung										
Polieren, Glänzen, chemisches Entgraten	15,00	2,250	0,00	4,0954	3.408,74	0,50	10.533,03	9.492,90	0,90	4.536,00
Elektrolytische Entfettung	6,50	0,001	0,00	0,9761	812,42	0,75	15.799,55	14.239,35	0,65	3.276,00
Oberflächenbehandlung										
Hartverchromen	50,00	1,000	0,10	12,2862	10.226,23	0,75	15.799,55	14.239,35	1,30	10.764,00
Glanzverchromen	10,00	0,070	0,30	1,0512	874,91	0,75	15.799,55	14.239,35	1,30	6.552,00
Vernickeln, galvanisch	10,00	1,210	0,95	0,0751	62,49	0,50	10.533,03	9.492,90	0,90	4.536,00
Verkupfern, cyanidisch	3,00	1,280	0,97	0,0135	11,25	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00

Verfahren	Parameter			gebildete Wasserstoffmenge/ Bildungsrate m ³ /h	Abluftvolumenstrom V' für c(H ₂) < 3 % der UEG m ³ / h	Strömungsgeschwindigkeit v offenes Prozessbad DIN EN 17059 Anhang E m/s	Abluftvolumenstrom V' für offenes Prozessbad DIN EN 17059 einseitige Randabsaugung m ³ / h	Abluftvolumenstrom V' für offenes Prozessbad DIN EN 17059 zweiseitige Randabsaugung m ³ / h	Strömungsgeschwindigkeit v an Öffnungen des abgedeckten Prozessbads DIN EN 17059 Anhang E m/s	Abluftvolumenstrom V' für abgedecktes Prozessbad DIN EN 17059 ein-/zweiseitige Randabsaugung m ³ / h
	Stromdichte I A / dm ²	Abscheiderate n μm/min	Stromausbeute μ							
Verkupfern cyanidisch mit Umpolung	3,00	2,000	0,91	0,0417	34,68	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Verkupfern, sauer)*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verzinken, cyanidisch	3,00	0,770	0,90	0,0450	37,50	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Verzinken, alkalisch	3,00	0,350	0,50	0,4095	340,87	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Verzinken, sauer	3,00	0,840	0,98	0,0164	13,63	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Veredeln, Gold	1,00	0,560	0,88	0,0180	15,00	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Veredeln, Silber	1,00	0,630	0,91	0,0015	1,25	0,25	5.266,52	4.746,45	0,65	3.276,00
Verzinnen, sauer	1,00	0,480	0,95	0,0075	6,25	0,38	8.005,10	7.214,60	0,65	3.276,00
Verzinnen, alkalisch	1,00	0,230	0,90	0,0150	12,50	0,38	8.005,10	7.214,60	0,65	3.276,00
Eloxieren	1,50	0,390	0,00	0,4778	397,69	0,50	10.533,03	9.492,90	0,90	4.536,00

Tabelle 6 – Menge und Bildungsrate des Wasserstoffs, berechnet aus der den Elektrolyten durchfließenden Strommenge bzw. der Stromstärke

Verfahren	Volumenstrom	Stromausbeute	Stromstärke in A					Stromstärke in A				
			10	100	1.000	10.000	30.000	10	100	1.000	10.000	30.000
			Wasserstoffbildungsrate					Wasserstoffkonzentration**				
			m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %
Vorbehandlungsverfahren Prozessart												
Polieren, Glänzen, chemisches Entgraten	4600	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00010	0,00098	0,00983	0,09816	
	9500	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00005	0,00048	0,00476	0,04756	
	10550	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00004	0,00043	0,00428	0,04283	
Elektrolytische Entfettung	14500	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00003	0,00031	0,00312	0,03116	
Oberflächenbehandlung												
Hartverchromen	10500	0,1	0,00407	0,04068	0,4068	4,068	12,204	0,00004	0,00039	0,00387	0,03873	0,11609
	14500	0,1	0,00407	0,04068	0,4068	4,068	12,204	0,00003	0,00028	0,00281	0,02805	0,08409
	15800	0,1	0,00407	0,04068	0,4068	4,068	12,204	0,00003	0,00026	0,00257	0,02574	0,07718
Glanzverchromen	6600	0,3	0,00316	0,03164	0,3164	3,164		0,00005	0,00048	0,00479	0,04792	
Galvanisches Vernickeln	4600	0,95	0,00023	0,00226	0,0226	0,226		0,00000	0,00005	0,00049	0,00491	
Cyanidisches Verkupfern	3300	0,97	0,00014	0,00136	0,01356	0,1356		0,00000	0,00004	0,00041	0,00411	

Verfahren	Volumenstrom	Stromausbeute	Stromstärke in A					Stromstärke in A				
			10	100	1.000	10.000	30.000	10	100	1.000	10.000	30.000
			Wasserstoffbildungsrate					Wasserstoffkonzentration**				
	m³/h	-	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	m³/h	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %
Cyanidisches Verkupfern mit Umpolung	3300	0,91	0,00041	0,00407	0,04068	0,4068		0,00001	0,00012	0,00123	0,01233	
Saures Verkupfern*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanidisches Verzinken	3300	0,9	0,00045	0,00452	0,0452	0,452		0,00001	0,00014	0,00137	0,01370	
Alkalisches Verzinken	3300	0,5	0,00226	0,0226	0,226	2,26		0,00007	0,00068	0,00685	0,06844	
saures Verzinken	3300	0,98	9E-05	0,0009	0,00904	0,0904		0,00000	0,00003	0,00027	0,00274	
Vergolden	3300	0,88	0,00054	0,00542	0,05424	0,5424		0,00002	0,00016	0,00164	0,01643	
Versilbern	3300	0,99	4,5E-05	0,00045	0,00452	0,0452		0,00000	0,00001	0,00014	0,00137	
Sauer Verzinnen	3300	0,95	0,00023	0,00226	0,0226	0,226		0,00001	0,00007	0,00068	0,00685	
Alkalisches Verzinnen	3300	0,9	0,00045	0,00452	0,0452	0,452		0,00001	0,00014	0,00137	0,01370	
Eloxieren	4600	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00010	0,00098	0,00983	0,09816	
	6500	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00007	0,00070	0,00695	0,06949	
	9500	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00005	0,00048	0,00476	0,04756	
	10550	0	0,00452	0,0452	0,452	4,52		0,00004	0,00043	0,00428	0,04283	

* keine nennenswerte Wasserstoffbildung, Verfahren wird daher nicht berücksichtigt

** Die Konzentrationen beziehen sich auf die resultierende Konzentration des Wasserstoffs nach Verdünnung durch den in Spalte 2 jeweils angegebenen Volumenstrom (berechnet für die Absaugung).

Tabelle 7 – Parameter für die CFD-Berechnungen – Verfahren Hartverchromen (1), Elektropolieren (2) und Glanzverchromen (3); Wasserstoffbildungsrate und Abluftvolumenströme für die betrachteten Verfahren nach DIN EN 17059:2018 Anhang D und E.

Anodische Prozesse Warenträger = Anode	Kathodische Prozesse Warenträger = Kathode	
<p>Verfahren: Elektropolieren; I = 9.000 A</p> <p>H₂ - Bildungsrate: V' (H₂) = 4,068 m³/h</p> <p>zweiseitige Randabsaugung (offener Prozessbehälter): Abluftvolumenstrom (offener Be.) V'_{DIN EN 17059} = 9.500 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Luft})_{offen} = 0,000428</p> <p>einseitige Randabsaugung (offener Prozessbeh.): Abluftvolumenstrom (offener Be.) V'_{DIN EN 17059} = 10.550 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{offen} = 0,000428</p> <p>einseitige/ zweiseitige Randabsaugung (abgedeckter Prozessbehälter): Luftgeschwindigkeit n. Anhang E der DIN EN 17059 an den Öffnungen des abgedeckten Prozessbehälters: 0,90 m/s Abluftvolumenstrom (abgedeckter Prozessbehälter): V'_{DIN EN 17059} = 4.600 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{abgedeckt} = 0,000884</p>	<p>Verfahren: Glanzverchromen; I = 6.000 A</p> <p>H₂ - Bildungsrate: V' (H₂) = 1,898 m³/h</p> <p>zweiseitige Randabsaugung (offener Prozessbehälter): Abluftvolumenstrom (offener Be.) V'_{DIN EN 17059} = 14.250 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{offen} = 0,000131</p> <p>einseitige Randabsaugung (offener Prozessbeh.): Abluftvolumenstrom (offene Be.) V'_{DIN EN 17059} = 15.800 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{offen} = 0,000120</p> <p>einseitige/ zweiseitige Randabsaugung (abgedeckter Prozessbehälter): Luftgeschwindigkeit n. Anhang E der DIN EN 17059 an den Öffnungen des abgedeckten Prozessbehälters: 1,30 m/s Abluftvolumenstrom (abgedeckter Prozessbehälter): V'_{DIN EN 17059} = 6.500 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{abgedeckt} = 0,000292</p>	<p>Verfahren: Hartverchromen; I = 30.000 A</p> <p>H₂ - Bildungsrate: V' (H₂) = 12,024 m³/h</p> <p>zweiseitige Randabsaugung (offener Prozessbehälter): Abluftvolumenstrom (offene Be.) V'_{DIN EN 17059} = 14.250 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{offen} = 0,000841</p> <p>einseitige Randabsaugung (offener Prozessbeh.): Abluftvolumenstrom (offene Be.) V'_{DIN EN 17059} = 15.800 m³/h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{offen} = 0,000772</p> <p>einseitige/ zweiseitige Randabsaugung (abgedeckter Prozessbehälter): Luftgeschwindigkeit nach Anhang E der DIN EN 17059 an den Öffnungen des abgedeckten Prozessbehälters: 1,30 m/s Abluftvolumenstrom (abgedeckter Prozessbehälter): V'_{DIN EN 17059} = 10.500 m³ / h V'(H₂) / (V'(H₂) + V'_{Abluft})_{abgedeckt} = 0,001161</p>