Beispiel für die Erstellung eines Lastenheftes

- Für eine Kaffeeextraktionsanlage -

Stand: 2026

Darstellung einer technischen Spezifikation für eine Kaffeeextraktionsanlage mit vollständiger Dokumentation von den Grundlagen über die Elektrotechnik bis hin zur Softwarelogik und Archivierung.

Autor: Dipl.- Ing. Christoph Spreuer

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

INHALT

Vorwort 5
1. Projekt: Kaffeeextraktionsanlage mit brennbaren Lösungsmitteln (Ethanol/Hexan) 6
1.1 Risikobeurteilung 6
1.1.1 Phase 1: Grenzen der Anlage und Lebensphasen definieren 6
1.1.2 Phase 2: Die verfahrenstechnische HazOp-Analyse (PAAG-Verfahren) 6
1.1.3 Phase 3: Die integrierte ATEX-Risikobeurteilung 7
1.1.4 Phase 4: Risikominderung & Ermittlung der erforderlichen Performance Level (PLr / SIL) 7
1.1.5 Phase 5: Dokumentation und das Explosionsschutzdokument 8
2. HAZOP-Beispiel: Extraktionsknoten (Reaktor & Lösungsmittel-Zulauf) 8
2.1 Die kritischsten Risiken bei diesem Verfahren 9
2.2 Wie werden die ATEX-Zonen (Explosionsschutzzonen) um einen solchen Reaktor aufgeteilt? 9
2.2.1 Die 3 ATEX-Zonen am Reaktor im Überblick 9
2.3 Visuelle Vorstellung der Zonenaufteilung 10
2.4 Wichtige technische Schutzmaßnahmen für diese Zonen 10
2. Die Spezifikation der elektrischen Bauteile (Sensorik/Aktorik) für den Anlagenbauer 11
3.1 Stoffspezifische Grundlagen (Die Basis) 11
3.2 Spezifikation der Zündschutzarten (Sensorik vs. Aktorik) 11
3.2.1 A - Sensorik (Temperatur-, Druck-, Füllstandssensoren) 11
3.2.2 B - Aktorik (Pumpenmotoren, Ventilinseln, Stellantriebe) 12
4. Checkliste für das Lastenheft (Spezifikationstext) 12
4.1 Exemplarische Typenbezeichnung oder Spezifikation im Detail 12
4.1.1 Beispiel 1: Der Drucktransmitter (Sensorik für Zone 0/1) 13
4.1.2 Beispiel 2: Das automatische Regelventil (Aktorik für Zone 1) 13
4.1.3 Die technische Spezifikation für das Lastenheft: 13
4.1.4 Bedeutung des Beispiels: 14
4.2 Konkretes Marktbeispiel (z. B. Samson Stellungsregler Typ 3730-5): 15
4.2.1 Was für die Schnittstelle zum Schaltschrank definiert werden muss 15
4.3 Vorgaben im Lastenheft für Kabel und Leitungswege und Pumpenantriebe (Motoren) 15
4.3.1 Kabel und Leitungswege im Ex-Bereich 15
4.3.2 Pumpenantriebe (Motoren für Zone 1) 16
4.3.3 Konkretes Marktbeispiel (z. B. Siemens Simotics XP): 17
5. Schaltschrank im sicheren Bereich 17
5.1 Spezifikation Schaltschrank (Sicherer Bereich) 17
5.2 Trennbarrieren und Ex-i-Feldstromkreise 17
5.3 Not-Aus-Logik und Sicherheitsgerichtete Abschaltung (SIS) 17
6. Dokumentationspflichten für die Inbetriebnahme 18

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

7. ATEX-Abnahme (Prüfung vor Inbetriebnahme) 18
7.1 Abschaltmatrix (Cause-and-Effect-Diagramm) 19
7.2 Vorlage: Cause-and-Effect-Matrix (Kaffeeextraktion) 20
7.3 Erklärung der Aktionen für den Programmierer **-Funktionsbeschreibung -** 20
7.3.1 Sichere Ventilstellungen (Fail-Safe) 20
7.3.2 Wiedereinschalt-Sperre (Interlock / Latch) 20
7.3.3 Zeitverzögerung bei Null-Durchfluss (Debounce) 20
7.4 Integration der Rückgewinnungs-Destillation in die Matrix 21
7.5 Erweiterte Cause-and-Effect-Matrix (Inklusive Destillation) 21
7.6 Wichtige Zusatzinstruktionen für den SPS-Programmierer 22
7.6.1 Verriegelung der Destillationsheizung (Kühlwasser-Interlock) 22
7.6.2 Verhalten der Vakuumpumpe bei Druckanstieg 22
7.6.3 Trockenlaufschutz des Destillationssumpfs 22
7.7 Teil 1: Ablaufsteuerung (SFC / Grafcet) 23
7.8 Teil 2: Vorgaben zur Prozessvisualisierung (HMI-Design) 24
7.8.1 Farbhierarchie und Alarmklassen 24
7.8.2 Zwingende HMI-Funktionen für den Programmierer 24
8 Spezifikation der HMI-Benutzerrechte (Rollenmatrix) 25
8.1 Definition der Benutzerrollen 25
8.2 Technische Umsetzung der Interlock-Überbrückung 25
9 Schnittstellenbeschreibung & Datenarchivierung (Audit Trail) 25
9.1 Anforderungen an den Audit Trail (Protokollierung) 26
9.2 Archivierungskriterien für die ATEX-Behörde (Beispiel-Log) 26
10 Zusammenstellung des Lastenheftes mit nachfolgenden Inhalten 27
10.1 Beispiel für ein Inhaltsverzeichnis 27

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

Vorwort

Die nachfolgend vorgestellte technische Spezifikation für eine Kaffeeextraktionsanlage ist ein Beispiel für eine vollständige Dokumentation von den Grundlagen über die Elektrotechnik bis hin zur Softwarelogik und Archivierung.

Das Inhaltsverzeichnis des Lastenhefts (Schnittstellen- und Spezifikationsdokument) am Ende der Spezifikation, fasst alle ausgearbeiteten Details in einer, normenkonformen Struktur zusammen, die direkt für den Anlagenbauer und SPS-Programmierer bestimmt ist.

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

1. Projekt: Kaffeeextraktionsanlage mit brennbaren Lösungsmitteln (Ethanol/Hexan)

1.1 Risikobeurteilung

Für eine Kaffeeextraktionsanlage, die mit leicht entzündlichen Lösemitteln betrieben wird, reicht eine Standard-Risikobeurteilung nach dem klassischen Maschinenbau-Schema nicht aus.
Man befindet sich hier an der Schnittstelle von **Maschinensicherheit (Konstruktion)** und **Verfahrenstechnik (Prozess- und Explosionssicherheit)**.
Die Risikobeurteilung muss daher zweigleisig aufgebaut werden: nach der **Maschinen-richtlinie** (bzw. ab Jan. 2027 der neuen *EU-Maschinenverordnung*) und zwingend nach der **ATEX-Betreiberrichtlinie 1999/92/EG** (in Deutschland umgesetzt durch die BetrSichV und GefStoffV) sowie der **ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU**.

Das folgende Phasen-Modell zeigt Schritt für Schritt, wie die Risikobeurteilung für eine solche Anlage normkonform aufgebaut wird:

1.1.1 Phase 1: Grenzen der Anlage und Lebensphasen definieren

Bevor die Gefahren analysiert werden, werden die Rahmenbedingungen festgelegt.
Bei einer Anlage mit leicht entzündlichen Lösemitteln sind dies besonders:

- **Bestimmungsgemäße Verwendung:** Welche Stoffe werden extrahiert / behandelt? (Die Stoffe können statische Elektrizität erzeugen!). Welche Lösemittel werden exakt verwendet (Flammpunkt, Explosionsgrenzen)?
- **Räumliche Grenzen:** Wo endet die Maschine, wo beginnt die bauseitige Abluft- oder Lösemittel-Aufbereitungsanlage?
- **Lebensphasen:** Nicht nur der Automatikbetrieb ist gefährlich. Zu berücksichtigen sind Rüstbetrieb, Wartung, Reinigung (Behälteröffnung!), Störungsbeseitigung (z.B. Stoffstau – hier Kaffeemehl) und die Entleerung.

1.1.2 Phase 2: Die verfahrenstechnische HazOp-Analyse (PAAG-Verfahren)

Weil es sich um eine prozesstechnische Anlage handelt, sollte die Risikobeurteilung der verfahrenstechnischen Abläufe mit einer **HazOp-Analyse** beginnen (Hazard and Operability Study, im Deutschen auch *PAAG-Verfahren)*:
Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen.

Eine **HAZOP-Analyse** untersucht systematisch Abweichungen vom geplanten Prozess-betrieb. Bei der Extraktion von Kaffeeöl oder Koffein mittels brennbarer Lösungs-mittel wie **Ethanol** (leicht entzündlich) oder **Hexan** (leicht entzündlich, toxisch)
liegt das Hauptaugenmerk auf dem

- **Explosionsschutz (ATEX)**,
- der **Leckagevermeidung** und
- der **thermischen Überlastung**.

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

Hier ist ein praxisnahes Beispiel für eine HAZOP-Tabelle. Wir betrachten als Systemknoten den **Extraktionsreaktor (Fest-Flüssig-Extraktor)**, in dem das Lösungsmittel durch das Kaffeemehl gepumpt und erwärmt wird.

Extraktionsanlage wird in verfahrenstechnische Abschnitte (z.B. Reaktor, Lösemittelleitungen, Lösemitteltank, Destillation/Rückgewinnung, Abluft).

- Sie wenden Leitworte an: Was passiert bei **„Zu viel“** Lösemittel (Überlauf)? Was bei **„Zu wenig“** Abluft? Was bei **„Zu hoch“** (Temperatur/Druck)?
- *Ergebnis:* Sie identifizieren Prozessrisiken, die später durch die Sicherheitssteuerung (PL) oder ATEX-Maßnahmen abgefangen werden müssen.

1.1.3 Phase 3: Die integrierte ATEX-Risikobeurteilung

Dies ist das Herzstück für Lösemittelanlagen. Sie müssen das Risiko einer Explosion in drei Stufen minimieren (Primärer, Sekundärer und Tertiärer Explosionsschutz):

- **Zoneneinteilung (Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre):**
  - Wo tritt Lösemitteldampf im Normalbetrieb auf (z.B. Inneres der Kaffeeextraktionsanlage /Textilfaser-Waschanlage = **Zone 0** oder **Zone 1**)?
  - Wo tritt er nur bei Fehlern auf (Umgebung der Anlage = **Zone 2**)?
- **Zündquellenanalyse (nach EN ISO 80079-36):**
  Sie müssen jede potenzielle Zündquelle in den Zonen untersuchen. Bei Kaffeeextraktionsanlagen sind die kritischsten Punkte:
  - **Statische Elektrizität:** Reibung des Kaffeemehls aneinander oder an Maschinenteilen.
  - **Heiße Oberflächen:** Antriebe, Pumpen oder Destillationsheizungen (müssen unterhalb der Zündtemperatur des Lösemittels bleiben).
  - **Mechanische Funken:** Reiben von Metallteilen bei Lagerschäden oder Fremdkörpern in der Trommel.
  - **Elektrische Betriebsmittel:** Schaltkontakte, Sensoren. [1]

1.1.4 Phase 4: Risikominderung & Ermittlung der erforderlichen Performance Level (PLr / SIL)

Nun werden die Gefahren mit der Steuerungstechnik (EN ISO 13849-1) verknüpft. Für jedes verbleibende Risiko, das durch eine Steuerung überwacht wird, wird das **erforderliche Performance Level (PLr / SIL)** ermittelt, anhand der Parameter *Schadensausmaß (S)*, *Aufenthaltsdauer (F)* und *Vermeidbarkeit (P)*.

Typische Sicherheitsfunktionen bei Kaffeeextraktions- /Textilfaser-Waschanlagen:

- **Abluftüberwachung:** Wenn die Absaugung ausfällt, steigt die Lösemittelkonzentration im Raum/in der Anlage. (Häufig eingestuft als **PL d /SIL2** oder **PL e / SIL3**).
- **Inertisierung (falls vorhanden):** Überwachung des Stickstoffdrucks, um Sauerstoff zu verdrängen. (Meist **PL d / SIL2**).
- **Temperaturbegrenzung:** Abschaltung der Heizung vor Erreichen der Lösemittel-Zündtemperatur. (Meist **PL d / SIL2**).
- **Türverriegelung:** Die Anlage darf sich erst öffnen lassen, wenn die Lösemittelkonzentration durch Spülen unter einen sicheren Grenzwert (z.B. 15% der unteren Explosionsgrenze UEG) gesunken ist. (**PL d / SIL2**).

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

1.1.5 Phase 5: Dokumentation und das Explosionsschutzdokument

Die Ergebnisse fließen in zwei finale Dokumente:

- Die klassische **Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie/Verordnung** (CE-Dokumentation).
- Das **Explosionsschutzdokument** (nach § 6 GefStoffV / BetrSichV in Deutschland). Dieses Dokument fasst die Zoneneinteilung, die Zündquellenanalyse und die organisatorischen Maßnahmen (z.B. PSA, Schulung der Mitarbeiter, Freigabescheine für Wartung) zusammen.

Empfohlene Software-Unterstützung für diesen Prozess:

- **Safexpert:** Vorteil, die Struktur der Risikobeurteilung kann normenkonform (EN ISO 12100) aufgebaut und der CE-Prozess gesteuert. Nachteil, wird von vielen Unternehmen nicht verwendet, da im Unternehmen immer jemand benötigt wird, der die Software beherrscht. Das ist allzu oft nicht gegeben, deshalb wird meistens mit MS-Office gearbeitet.
- **EXDrop (oder ähnliche Tools der BG RCI):** Unterstützen speziell bei der mathematischen Berechnung von Ex-Zonen und Lüftungsraten in Lösemittellägern und -anlagen.

Handelt es sich bei dem Lösemittel um einen **Stoff mit bekanntem Flammpunkt** (wie z.B. Isopropanol oder Kohlenwasserstoffe) oder wird mit **Inertisierung** (z.B. Stickstoffüberlagerung) gearbeitet, um die Explosion von vornherein zu verhindern

2. HAZOP-Beispiel: Extraktionsknoten (Reaktor & Lösungsmittel-Zulauf)

Soll-Zustand: Kontinuierlicher oder Batch-Zulauf von flüssigem Hexan/Ethanol bei 50 °C und 1,5 bar in den mit Kaffeemehl befüllten Reaktor.

Leitbegriff	Parameter	Abweichung	Mögliche Ursachen	Mögliche Folgen	Sicherheitsmaßnahmen (Gegenmaßnahmen)
Mehr	Temperatur	Temperatur zu hoch (> 65 °C)	• Regelfehler der Dampfheizung • Ausfall des Temperatursensors	• Lösungsmittel siedet unkontrolliert • Rascher Druckanstieg im Reaktor • Gefahr des Berstens / Produktaustritts	• Unabhängige Not-Ausschaltung (ESD) des Heizmediums bei \(T_{max}\) • Sicherheitsventil mit Abströmung in ein geschlossenes Fackelsystem/Auffangsystem
Mehr	Druck	Druck zu hoch	• Verstopfung des Filterbettes durch zu feines Kaffeemehl • Ventil am Ausgang fälschlicherweise geschlossen	• Mechanische Beschädigung von Flanschen/Dichtungen • Austritt von Hexan-/Ethanoldampf (Explosionsgefahr)	• Differenzdruck-Überwachung (\(\Delta P\)) über dem Kaffeebett • Berstscheibe oder Sicherheitsventil • ATEX-Zonierung und Gaswarnsensoren im Raum
Weniger / Kein	Durchfluss	Kein Lösungsmittel-Zulauf	• Pumpe defekt oder trocken gelaufen • Zulaufventil blockiert	• Trockenlaufen der Pumpe (Funkenbildung/Heißlaufen) • Lokale Überhitzung des Kaffees durch die Mantelheizung	• Trockenlaufschutz für die Pumpe (Durchflussmesser mit Interlock) • Automatische Abschaltung der Reaktorheizung bei Null-Durchfluss
Anders als	Medium / Qualität	Wasseranteil im Lösungsmittel zu hoch	• Leckage im vorgeschalteten Kondensator/Dampfnetz • Schlechte Destillation bei der Lösungsmittel-Rückgewinnung	• Verschlechterung der Extraktionsausbeute • Hydrolyse von Kaffee-Inhaltsstoffen • Emulsionsbildung im Separator	• Kontinuierliche Dichtemessung oder Feuchtigkeitsanalyse im Lösungsmitteltank • Regelmäßige Laborproben
Auch	Phase	Gasphase im Zulauf (Kavitation)	• Vordruck vor der Pumpe zu gering • Lösungsmittel im Zulauftank kocht	• Beschädigung der Zulaufpumpe durch Kavitation • Unregelmäßige Benetzung des Kaffees (Channeling)	• Füllstandsüberwachung im Vorlagetank mit Abschaltsignal • Kühlung des Lösungsmittels vor der Pumpe

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

2.1 Die kritischsten Risiken bei diesem Verfahren

- **Das "Hexan-Dilemma" (Toxizität vs. Entflammbarkeit):** Im Vergleich zu Ethanol ist Hexan nervenschädigend (neurotoxisch) und umweltgefährlich. Eine HAZOP für Hexan fordert deshalb zwingend eine **vollständige Kapselung** und Leckagewannen mit Absaugung direkt am Boden (Hexandampf ist schwerer als Luft).
- **Die Lösemittel-Rückgewinnung (Destillation):** Nach der Extraktion muss das Lösungsmittel vom Kaffeeöl verdampft werden. Der Leitbegriff **"Mehr Temperatur"** in der Destillationskolonne ist hochkritisch, da ein thermischer Crackprozess des Kaffeöls die Qualität ruiniert und Ethanol-/Hexandämpfe explosionsfähig modifiziert.

2.2 Wie werden die ATEX-Zonen (Explosionsschutzzonen) um einen solchen Reaktor aufgeteilt?

Die Einteilung der ATEX-Zonen um einen Extraktionsreaktor mit brennbaren Lösungsmitteln (wie Ethanol oder Hexan) folgt den europäischen Richtlinien (Richtlinie 1999/92/EG) und der Norm **DIN EN 60079-10-1**. Da es sich hier um Gase, Dämpfe und Nebel handelt, kommen die **Zonen 0, 1 und 2** zum Einsatz.
Da Hexan- und Ethanoldämpfe **schwerer als Luft** sind, sinken sie zu Boden. Dies beeinflusst die geometrische Form der Zonen entscheidend.

2.2.1 Die 3 ATEX-Zonen am Reaktor im Überblick

Zone 0 (Ständig oder langfristig explosionsfähig)

- **Definition:** Bereiche, in denen ständig, über lange Zeiträume oder häufig eine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden ist.
- **Wo am Reaktor?**
  - Das **Innere des Reaktors** (während des Betriebs, falls Sauerstoff vorhanden ist).
  - Das Innere von Lösungsmitteltanks, Destillationskolonnen und den Rohrleitungen.
- **Maßnahme:** Vermeidung von Sauerstoff durch **Inertisierung** (Spülen und Überlagern des Reaktorinnenraums mit Stickstoff (N_2)). Dadurch wird die Zone 0 im Inneren thermodynamisch entschärft.

Zone 1 (Im Normalbetrieb gelegentlich explosionsfähig)

- **Definition:** Bereiche, in denen im normalen Betrieb damit zu rechnen ist, dass eine explosionsfähige Atmosphäre gelegentlich auftritt.
- **Wo am Reaktor?**
  - Der direkte Nahbereich um **Probenahmestellen**, Entlüftungsventile oder offene Trichter.
  - Der Bereich um die **Dichtungen der Reaktorhaube** (besonders beim Öffnen und Schließen im Batch-Betrieb).

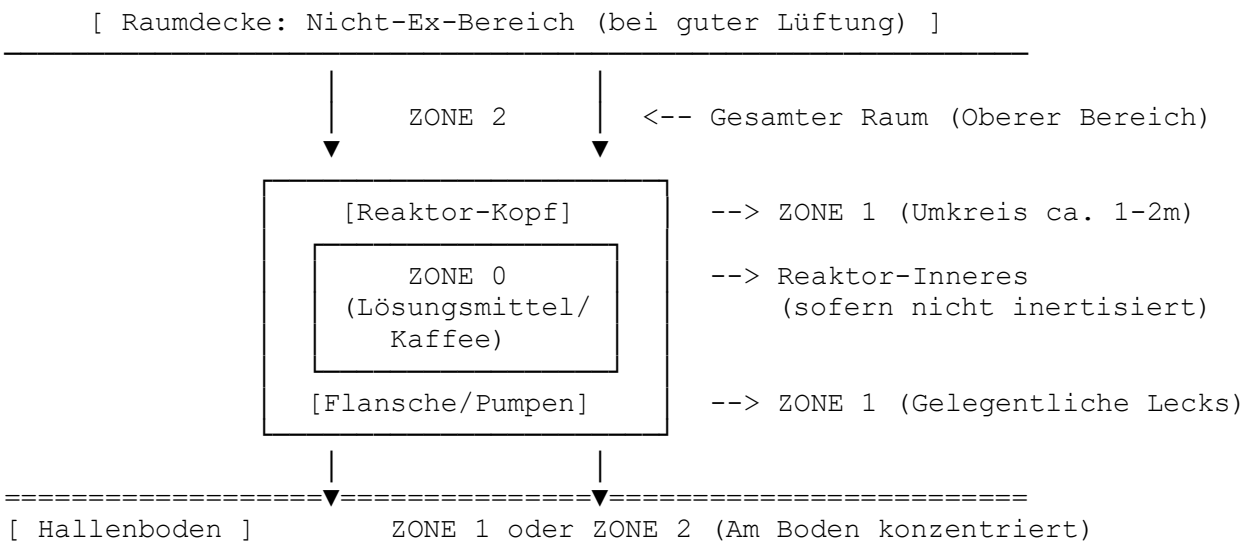
- Der Bereich um die Wellendichtungen von Rührwerken oder Pumpen.

- **Geometrische Ausdehnung:** Typischerweise ein Radius von **1 bis 2 Metern** um die potenzielle Freisetzungsstelle.

Zone 2 (Im Normalbetrieb selten oder kurzzeitig explosionsfähig) [1, 2]

- **Definition:** Bereiche, in denen im normalen Betrieb eine explosionsfähige Atmosphäre normalerweise nicht oder nur kurzzeitig (z. B. durch einen Fehler oder ein kleines Leck) auftritt.
- **Wo am Reaktor?**
  - Der gesamte **Raum (Produktionshalle)**, in dem der Reaktor steht, sofern er gut belüftet ist.
  - Flansche und Rohrleitungsverbindungen im Außenbereich des Reaktors.
- **Geometrische Ausdehnung:** Häufig der Bereich bis zu **3 bis 5 Meter** um den Reaktor herum sowie der gesamte Hallenboden bis zu einer Höhe von ca. 0,5 bis 1 Meter (wegen der schweren Dämpfe).

2.3 Visuelle Vorstellung der Zonenaufteilung



Verwende Code mit Vorsicht.

2.4 Wichtige technische Schutzmaßnahmen für diese Zonen

- **Bodenabsaugung:** Da Hexan und Ethanol zu Boden sinken, müssen die Lüftungsöffnungen der Halle zwingend bodennah platziert sein. Eine hohe Luftwechselrate (z. B. 6- bis 12-facher Raumluftwechsel pro Stunde) kann eine Zone 1 am Boden in eine sicherere Zone 2 herabstufen.
- **Ex-geschützte Betriebsmittel:** Alle elektrischen Geräte (Motoren für Pumpen, Sensoren, Beleuchtung) müssen für die jeweilige Zone zertifiziert sein (z. B. Kennzeichnung `Ex II 2G Ex db IIA T3` für Zone-1-Geräte bei Ethanol/Hexan).

- **Zündquellenfreie mechanische Bauteile:** Werkzeuge, Schaufeln (zum Entleeren des Kaffeesatzes) und Schuhe der Mitarbeiter müssen funkenfrei und ableitfähig (antistatisch) sein.

2. Die Spezifikation der elektrischen Bauteile (Sensorik/Aktorik) für den Anlagenbauer

Wenn die Anforderungen für die Sensorik und Aktorik an den Anlagenbauer übergeben werden, müssen diese Spezifikationen so präzise formuliert sein, dass dieser die passenden Geräte nach **ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU** auswählen kann.
Für ein Kaffeeextraktionsverfahren mit Ethanol oder Hexan sind dabei drei Faktoren entscheidend: die **Explosionsgruppe**, die **Temperaturklasse** und das **Geräteschutzniveau (EPL)**.
Hier sind die konkreten Vorgaben, die in das Lastenheft oder die Spezifikation aufgenommen werden sollten:

3.1 Stoffspezifische Grundlagen (Die Basis)

Sowohl Hexan als auch Ethanol definieren die Mindestanforderungen an die Hardware. Die Bauteile müssen für das jeweils „kritischere“ Medium ausgelegt sein:

- **Explosionsgruppe IIA:** Beide Stoffe gehören zur Gruppe IIA (weniger zündkritische Gase/Dämpfe als z. B. Wasserstoff). Bauteile mit der Kennzeichnung **IIA** (oder den sichereren Gruppen IIB/IIC) sind zwingend erforderlich.
- **Temperaturklasse T3:** Hexan hat eine Zündtemperatur von ca. 225 °C (Ethanol ca. 363 °C). Die maximale Oberflächentemperatur jedes elektrischen Bauteils darf im Fehlerfall **200 °C** nicht überschreiten. Die Bauteile müssen daher mindestens Klasse **T3** (oder besser T4, T5, T6) erfüllen.

3.2 Spezifikation der Zündschutzarten (Sensorik vs. Aktorik)

Je nachdem, ob es sich um Messsignale (Sensorik) oder Leistungskomponenten (Aktorik) handelt, wählt der Anlagenbauer unterschiedliche Schutzkonzepte:

3.2.1 A - Sensorik (Temperatur-, Druck-, Füllstandssensoren)

Im Ex-Bereich (besonders Zone 0 und 1) wird bei der Sensorik fast ausschließlich die Zündschutzart **Eigensicherheit „i“** eingesetzt.

- **Das Prinzip:** Strom und Spannung werden durch Sicherheitsbarrieren im Schaltschrank so stark begrenzt, dass kein Funke und keine heiße Oberfläche entstehen kann – auch bei Kabelbruch oder Kurzschluss.
- **Ihre Formulierung für den Anlagenbauer:**

  "Sämtliche Sensorik in Zone 0 und Zone 1 ist in Zündschutzart Eigensicherheit auszuführen (mindestens `Ex ia IIA T3` für Zone 0; `Ex ib IIA T3` für Zone 1). Die zugehörigen Trennschaltverstärker/ Zenerbarrieren sind im sicheren Bereich (Schaltschrank) vorzusehen."

3.2.2 B - Aktorik (Pumpenmotoren, Ventilinseln, Stellantriebe)

Da Motoren und Magnetventile Leistung benötigen, kann man sie nicht „eigensicher“ betreiben.
Hier nutzt man meist die **Druckfeste Kapselung „d“** oder die **Erhöhte Sicherheit „e“**.

- **Das Prinzip:** Bei „d“ darf eine Explosion im Inneren des Gehäuses stattfinden, dringt aber nicht nach außen. Bei „e“ wird durch hochwertige Isolierung und Gehäuse verhindert, dass Funken überhaupt entstehen. [1, 2]
- **Ihre Formulierung für den Anlagenbauer:**

  "Elektrische Antriebe (z. B. Pumpenmotoren, Rührwerke) in Zone 1 müssen in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung oder Erhöhte Sicherheit ausgeführt sein (mindestens `Ex db IIA T3` *oder* `Ex eb IIA T3`*)."*
  "Magnetventile und Stellglieder in Zone 1 sind bevorzugt in `Ex mb` *(Verkapselung) oder* `Ex db` *auszuführen."*

---

4. Checkliste für das Lastenheft (Spezifikationstext)

Das sind die Kernpunkte der technischen Spezifikation für den Anlagenbauer:

1. **Normenkonformität:** Alle gelieferten elektrischen Betriebsmittel müssen der Richtlinie 2014/34/EU (ATEX) sowie den Normenreihen EN 60079 entsprechen und eine gültige EU-Baumusterprüfbescheinigung inklusive CE-Kennzeichnung vorweisen.
2. **Mindestkennzeichnung:** Alle Komponenten in Zone 1 müssen mindestens die Kennzeichnung `II 2G Ex [Zündschutzart] IIA T3 Gb` erfüllen. Komponenten, die direkt in den Reaktor ragen (Zone 0), benötigen `II 1G Ex ia IIA T3 Ga`.
3. **Erdung und Potenzialausgleich:** Alle Gehäuse von Sensoren und Aktoren müssen über einen dedizierten, niederohmigen Anschluss in den zentralen Potenzialausgleich der Anlage eingebunden werden, um elektrostatische Aufladungen (wichtig bei Hexan/Ethanol) zu verhindern.
4. **Kabelverschraubungen:** Es dürfen nur für den Ex-Bereich zugelassene und zertifizierte Kabeleinführungen (passend zur jeweiligen Zündschutzart des Gehäuses, z. B. Ex-d-Kabelverschraubungen) verwendet werden.
5. **Dokumentation:** Der Auftragnehmer muss ein vollständiges **Explosionsschutzdokument** inklusive des Nachweises der Eigensicherheit (Schleifenberechnung nach EN 60079-14 für jeden i-Kreis) vorlegen.

4.1 Exemplarische Typenbezeichnung oder Spezifikation im Detail

Exemplarische Typenbezeichnung oder Spezifikation im Detail, z.B. für ein automatisches Regelventil oder einen Drucktransmitter.
Zunächst werden beide Komponenten im Detail beschrieben, da sie zwei völlig unterschiedliche Schutzkonzepte (Eigensicherheit bei der Sensorik und Kapselung/Erhöhte Sicherheit bei der Aktorik) perfekt repräsentieren.

Hier sind die konkreten, herstellerunabhängigen Spezifikationen und realistische Beispiele für Typenschlüssel (angelehnt an Marktführer wie Endress+Hauser und Samson), die direkt in das Lastenheft übernommen werden können.

4.1.1 Beispiel 1: Der Drucktransmitter (Sensorik für Zone 0/1)

Der Drucktransmitter misst den Innendruck im Extraktionsreaktor. Da der Sensor direkt mit dem Prozessmedium (Hexan/Ethanol) in Kontakt kommt, ragt die Messzelle in **Zone 0**, während das Gehäuse in **Zone 1** sitzt.

Die technische Spezifikation für das Lastenheft:

- **Zündschutzart:** Eigensicher (`Ex ia` für den Sensor in Zone 0, `Ex ib` oder `ia` für das Gehäuse in Zone 1).
- **Geräteschutzniveau (EPL):** Ga/Gb (Trennwandmontage zwischen Zone 0 und Zone 1).
- **Explosionsgruppe / Temperaturklasse:** Mindestens IIA T3 (Industriestandard ist meist das sicherere IIC T6).
- **Signalübertragung:** 4…20 mA mit HART-Protokoll (über eine Ex-i-Sicherheitsbarriere im Schaltschrank).

Exemplarische ATEX-Kennzeichnung auf dem Typenschild:

⟨ε⟩ (Epsilon im Achteck) II\ 1/2\ G\ Ex\ ia\ IIC\ T6...T4\ Ga/Gb}\)

- **Bedeutung des Beispiels:**
  - **II 1/2 G:** Gerät für Gas-Ex, geeignet zur Montage an der Grenze von Zone 0 (1) zu Zone 1 (2).
  - **Ex ia:** Höchste Eigensicherheit (darf zwei Fehler aufweisen und funkt nicht).
  - **IIC T6:** Deckt Hexan/Ethanol (IIA T3) bei Weitem ab. Die Oberfläche wird nicht wärmer als 85 °C.

Konkretes Marktbeispiel (z. B. Endress+Hauser Cerabar PMP51B):

Ein typischer Bestellschlüssel für diese Anwendung sieht beim Hersteller so aus:

- `PMP51B-BA...` (Das **BA** steht hier fest definiert für die Zulassung: *ATEX II 1/2G Ex ia IIC T6...T4 Ga/Gb*).

4.1.2 Beispiel 2: Das automatische Regelventil (Aktorik für Zone 1)

Das Regelventil steuert den Zufluss des heißen Lösungsmittels in den Reaktor. Da es mechanische Arbeit verrichtet, benötigt der elektrische Stellungsregler (Positioner) Leistung und sitzt komplett in **Zone 1**.

4.1.3 Die technische Spezifikation für das Lastenheft:

- **Zündschutzart:** Da hier Elektronik und Mechanik zusammenspielen, wird oft eine Kombination genutzt. Das Gehäuse ist meist **Druckfest gekapselt (Ex d)** oder **Erhöht sicher (Ex e)**, während die interne Elektronik optional eigensicher (Ex i) ausgeführt sein kann.
- **Geräteschutzniveau (EPL):** Gb (für Zone 1).

- **Explosionsgruppe / Temperaturklasse:** Mindestens IIA T3.
- **Exemplarische ATEX-Kennzeichnung auf dem Typenschild (Stellungsregler):**

(⟨ε⟩ **(Epsilon im Achteck)** \II\ 2\ G\ Ex\ db\ ia\ IIC\ T6/T4\ Gb)

4.1.4 Bedeutung des Beispiels:

- **II 2 G:** Gerät für Gas-Ex, zugelassen für Zone 1.
- **Ex db ia:** Das Hauptgehäuse ist druckfest gekapselt (`db`), die interne Sensorik zur Ventilpositionierung arbeitet intern eigensicher (`ia`).
- **T6/T4:** Die Temperaturklasse hängt von der Umgebungstemperatur ab (bei heißem Ethanol-Zulauf gilt oft T4 = max. 135 °C, was für Hexan/Ethanol mit T3 immer noch absolut sicher ist).

Das Ex-Symbol

- ⟨ε⟩ **(Epsilon im Achteck) :** Das spezifische Explosionsschutz-Symbol nach europäischem Recht (ATEX). Es zeigt an, dass das Gerät für explosionsgefährdete Bereiche geprüft ist.

Gerätegruppe und Kategorie

- **II:** Gerätegruppe II. Bedeutet, das Gerät ist für alle explosionsgefährdeten Bereiche außer Bergbau (Untertage) bestimmt (z. B. Chemieindustrie, Raffinerien).
- **2:** Gerätekategorie 2. Das Gerät bietet eine hohe Sicherheit und ist für **Zone 1** (gelegentliche Explosionsgefahr) sowie Zone 2 geeignet.
- **G:** Gas (Gas, Dämpfe oder Nebel). Das Gerät ist für explosionsfähige Gasatmosphären zugelassen (nicht für Staub).

Zündschutzarten

- **Ex:** Zeigt an, dass das Betriebsmittel den Explosionsschutz-Normen entspricht.
- **db:** Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ (Schutzniveau Gb). Ein internes Explodieren des Gases beschädigt das Gehäuse nicht und zündet die äußere Atmosphäre nicht.
- **ia:** Zündschutzart „Eigensicherheit“ (Schutzniveau Ga). Strom und Spannung im Stromkreis sind so stark begrenzt, dass kein Funke genügend Energie für eine Zündung hat.

Explosionsgruppe und Temperaturklasse

- **IIC:** Explosionsgruppe für Gase. IIC ist die höchste und strengste Stufe. Sie schließt extrem leicht zündbare Gase wie Wasserstoff oder Acetylen ein. Das Gerät darf auch bei weniger gefährlichen Gasen (IIA und IIB) genutzt werden.
- **T6/T4:** Temperaturklasse. Gibt die maximale Oberflächentemperatur an, die das Gerät im Fehlerfall erreichen darf.
  - **T6:** Maximal 85 °C (sehr sicher, für Gase mit niedriger Zündtemperatur).
  - **T4:** Maximal 135 °C.
  - *Hinweis:* Die Doppelangabe (T6/T4) hängt meist von der Umgebungstemperatur oder den Betriebsbedingungen ab, die im Handbuch definiert sind.

Equipment Protection Level (EPL)

- **Gb:** Equipment Protection Level (Geräteschutzniveau) nach internationaler Norm. „Gb“ bedeutet „hohes Schutzniveau“ für den Einsatz in Bereichen, in denen im Normalbetrieb gelegentlich eine explosionsfähige Atmosphäre auftritt (entspricht der ATEX-Kategorie 2G).

4.2 Konkretes Marktbeispiel (z. B. Samson Stellungsregler Typ 3730-5):

Ein typischer Bestellschlüssel für den explosionsgeschützten Stellungsregler auf dem Ventil:

- `3730-5xxx1xxxxxx...` (Die spezifische Ziffer an der Zulassungsposition definiert die Zündschutzart `Ex d` oder `Ex ia`).
- *Wichtig für den Anlagenbauer:* Auch das mechanische Ventil selbst muss nach **ISO 80079-36** (nicht-elektrischer Explosionsschutz) für Zone 1 zertifiziert sein (Kennzeichnung `Ex h`), um Reibungsfunken oder elektrostatische Aufladung an der Ventilspindel auszuschließen.

4.2.1 Was für die Schnittstelle zum Schaltschrank definiert werden muss

Der Anlagenbauer muss für den Drucktransmitter zwingend die passenden **Ex-Barrieren** einplanen.
Folgender Hinweis muss dringend in die Spezifikation aufgenommen werden:

*"Für alle eigensicheren Stromkreise (Ex ia) ist vom Auftragnehmer der **Nachweis der Eigensicherheit (Schleifenberechnung)** nach DIN EN 60079-14 zu erbringen.*

Die maximalen Werte des Sensors (\(U_i, I_i, P_i, C_i, L_i\)) müssen zu den Ausgangswerten der Speisebausteine im Schaltschrank (\(U_o, I_o, P_o, C_o, L_o\)) passen."

4.3 Vorgaben im Lastenheft für Kabel und Leitungswege und Pumpenantriebe (Motoren)

Hier sind die detaillierten Vorgaben für die Kabel und Leitungswege sowie für die Pumpenantriebe (Motoren). Diese Abschnitte können direkt in das Lastenheft für den Anlagenbauer übernommen werden.

4.3.1 Kabel und Leitungswege im Ex-Bereich

Die Installation von Kabeln in einer Hexan-/Ethanol-Atmosphäre erfordert eine strikte Trennung von eigensicheren (Ex-i) und nicht-eigensicheren Stromkreisen sowie den Schutz vor mechanischer Beschädigung und chemischem Angriff.

Technische Spezifikation für das Lastenheft:

- **Farbliche Kennzeichnung (Ex-i):** Alle Kabel für eigensichere Stromkreise (Sensorik wie der Drucktransmitter) müssen über ihre gesamte Länge einen **hellblauen Außenmantel** besitzen (RAL 5015) oder dauerhaft hellblau markiert sein.

- **Trennung der Kabelwege:** Blaue Ex-i-Kabel und schwarze/graue Leistungskabel (für Motoren und Ventile) müssen physisch getrennt verlegt werden. In gemeinsamen Kabelrinnen ist eine feste, geerdete Trennsteg-Barriere (meist aus Blech) oder ein Mindestabstand von **50 mm** zwingend vorgeschrieben.
- **Kabeltyp und Beständigkeit:** Da Hexan und Ethanol Kunststoffe angreifen können, sind halogenfreie, flammwidrige Kabel mit hoher chemischer Beständigkeit zu wählen (z. B. mit PUR- oder speziellen PVC-Mänteln). Reine Standard-NYM-Leitungen sind unzulässig.

- **Kabeleinführungen (Kabelverschraubungen):**
  - Für Ex-d-Gehäuse (Aktorik) müssen zertifizierte **Ex-d-Verschraubungen** (oft mit Vergussmasse oder speziellen Dichtringen) verwendet werden.
  - Für Ex-i-Gehäuse werden blaue Ex-e- oder Ex-i-Kunststoff-/Messingverschraubungen genutzt.
  - Nicht genutzte Öffnungen an Gehäusen müssen mit zertifizierten Ex-Blindstopfen verschlossen werden.

Satzbaustein fürs Lastenheft:

"Die gesamte Kabelverlegung hat nach DIN EN 60079-14 zu erfolgen. Eigensichere Stromkreise sind durchgehend hellblau zu kennzeichnen und räumlich getrennt von Nicht-Ex-i-Leitungen zu führen. Kabeleinführungen müssen exakt auf die Zündschutzart des jeweiligen Gehäuses abgestimmt und zertifiziert sein."

4.3.2 Pumpenantriebe (Motoren für Zone 1)

Die Pumpen fördern das flüssige Lösungsmittel unter Druck. Die Motoren benötigen hohe elektrische Leistung, weshalb Eigensicherheit hier ausscheidet. Zum Einsatz kommen meist die Zündschutzarten **Druckfeste Kapselung „d“** oder **Erhöhte Sicherheit „e“**.

Technische Spezifikation für das Lastenheft:

- **Mindestkennzeichnung:** `II 2G Ex db IIA T3 Gb` oder `II 2G Ex eb IIA T3 Gb` (Höhere Gruppen wie IIB/IIC oder T4 sind als "besser" immer zulässig).
- **Frequenzumrichter-Betrieb (VFD):** Da Extraktionspumpen oft drehzahlgeregelt werden, um den Durchfluss anzupassen, muss der Motor explizit für den Betrieb am Frequenzumrichter zertifiziert sein.
- **Thermischer Motorschutz (Pflicht bei Ex-Motoren):** Standard-Bimetallrelais im Schaltschrank reichen nicht aus. Der Motor muss zwingend mit im Wickelkopf integrierten **PTC-Kaltleitern (Kaltleiter-Temperaturfühlern)** ausgestattet sein. Diese müssen auf ein zertifiziertes Auslösegerät im Schaltschrank verdrahtet werden, dass bei Überhitzung den Motor sofort galvanisch vom Netz trennt. [1]
- **Wellen- und Gehäuseerdung:** Aufgrund der Strömung von unpolaren Lösungsmitteln wie Hexan kann es zu starker elektrostatischer Aufladung kommen. Der Motorrahmen muss über ein massives Erdungskabel (mindestens 4 mm², besser 10 mm² Kupfer) mit dem Hauptpotenzialausgleich verbunden werden. Zudem sind oft leitfähige Wellenerdungsringe vorgeschrieben, um Funkenbildung an den Lagern zu verhindern.

4.3.3 Konkretes Marktbeispiel (z. B. Siemens Simotics XP):

Ein typischer Motor für diese Anwendung trägt Bezeichnungen aus der Reihe **1MB1...** (Explosionsgeschützte Niederspannungsmotoren) mit der Option für Zone 1 (`Ex db` oder `Ex eb`).

Satzbaustein fürs Lastenheft:

"Alle Pumpenantriebe in Zone 1 müssen der Kategorie 2G entsprechen und mindestens für die Explosionsgruppe IIA und Temperaturklasse T3 zertifiziert sein. Bei Betrieb am Frequenzumrichter ist der Nachweis der Kaltleiter-Zertifizierung (PTC) für den Umrichterbetrieb zu erbringen. Die mechanische Kupplung zwischen Pumpe und Motor muss funkenfrei nach ISO 80079-36 (`Ex h`) ausgeführt sein."

5. Schaltschrank im sicheren Bereich

Schaltschrank im sicheren Bereich (z. B. Not-Aus-Logik, Trennbarrieren) danach Dokumentationspflichten für die Inbetriebnahme und die ATEX-Abnahme (Prüfung vor Inbetriebnahme) festlegen.
Hier sind die detaillierten Spezifikationen für den Schaltschrank im sicheren Bereich sowie die anschließenden Dokumentations- und Abnahmepflichten. Diese Struktur kann direkt als eigenständiges Kapitel in Ihr Lastenheft übernommen werden.

5.1 Spezifikation Schaltschrank (Sicherer Bereich)

Der Schaltschrank selbst steht außerhalb der ATEX-Zonen (z. B. in einem separaten Elektroraum oder einer Nicht-Ex-Zone der Halle). Er bildet jedoch die energetische und signaltechnische Schnittstelle zum Ex-Bereich. [1]

5.2 Trennbarrieren und Ex-i-Feldstromkreise

- **Galvanische Trennung:** Alle aus der Zone 0 und 1 kommenden eigensicheren Messsignale (z. B. 4…20 mA HART vom Drucktransmitter, PT100-Signale) müssen über **galvanische Trennbausteine (Speisetrenner / Isolationsverstärker)** geführt werden (z. B. Phoenix Contact MACX-Reihe oder Stahl ISpac). Zenerbarrieren sind aufgrund der zwingend erforderlichen, aufwendigen Erdung zu vermeiden.
- **Räumliche Trennung im Schaltschrank:**
    - Die Ex-i-Trennbausteine müssen in einem klar abgegrenzten Bereich des Schaltschranks montiert werden.
    - Zwischen den nicht-eigensicheren Klemmen (230V/400V/Standard-24V) und den eigensicheren Klemmen (blau) muss ein physischer **Mindestabstand von 50 mm** eingehalten werden (alternativ: eine isolierende Trennwand).
    - Die Verdrahtung im Schaltschrank zu den Feldabgängen hin muss zwingend in **blauen Kabelkanälen** erfolgen.

5.3 Not-Aus-Logik und Sicherheitsgerichtete Abschaltung (SIS)

- **Sicherheitsgerichtete SPS (F-CPU):** Die Not-Aus-Kette und die prozesskritischen Verriegelungen (z. B. Abschaltung der Heizung bei Übertemperatur oder Abschaltung der Pumpen bei Gasalarm) müssen über ein zertifiziertes Sicherheitsrelais oder eine Sicherheits-SPS (z. B. Siemens S7-Failsafe) nach **SIL 2 / PL d** (gemäß DIN EN 61511 / DIN EN ISO 13849) realisiert werden.

- **Kaltleiter-Auslösegeräte:** Für die Pumpenmotoren sind im Schaltschrank zertifizierte PTC-Auslösegeräte (z. B. mit ATEX-Zulassung nach Richtlinie 2014/34/EU) vorzusehen, die das Signal der Motor-Kaltleiter direkt auswerten und im Fehlerfall den Netzhauptschütz hardwaremäßig abwerfen.
- **Gaswarnanlage-Interlock:** Der Schaltschrank muss eine dedizierte Schnittstelle zur Raum-Gaswarnanlage besitzen. Bei Erreichen von 20 % UEG (Untere Explosionsgrenze) von Hexan/Ethanol muss eine Warnung erfolgen; bei 40 % UEG muss die Anlage über die Sicherheitssteuerung automatisch in einen sicheren, spannungsfreien Zustand (Not-Aus / Not-Halt) versetzt werden.

---

6. Dokumentationspflichten für die Inbetriebnahme

Ohne eine lückenlose Dokumentation darf die Anlage rechtlich nicht in Betrieb genommen werden (Betriebssicherheitsverordnung / BetrSichV). Der Anlagenbauer muss vor der Übergabe folgende Unterlagen zwingend vorlegen:

1. **Explosionsschutzdokument (Ex-Dokument):** Eine detaillierte Beschreibung des Prozesses, der Zoneneinteilung (Zonenplan als CAD-Zeichnung) und der getroffenen Schutzmaßnahmen.
2. **Nachweise der Eigensicherheit (Schleifenberechnung):** Für *jeden einzelnen* eigensicheren Stromkreis (Sensor) muss eine mathematische Berechnung nach DIN EN 60079-14 vorliegen, die beweist, dass die Kombination aus Barriere, Kabellänge und Feldgerät sicher ist (\(U_o \le U_i\), \(I_o \le I_i\), \(P_o \le P_i\), \(C_o + C_k \le C_i\), \(L_o + L_k \le L_i\)).
3. **ATEX-Zertifikate und EU-Baumusterprüfbescheinigungen:** Sämtliche Zertifikate aller im Ex-Bereich verbauten Komponenten (Sensoren, Aktoren, Motoren, Kabelverschraubungen, Blindstopfen).
4. **Konformitätserklärungen für nicht-elektrische Geräte:** Zertifikate nach ISO 80079-36/37 für mechanische Komponenten (Ventile, Pumpenköpfe, Rührwerke), die Reibungsfunken oder statische Aufladung erzeugen könnten (Kennzeichnung mit `Ex h`).
5. **Prüfberichte der Werkstatttests:** Nachweise über die Durchführung von Isolationsprüfungen, Durchgangsprüfungen des Potenzialausgleichs und Funktionstests der Sicherheitsketten vor Auslieferung (FAT - Factory Acceptance Test).

---

7. ATEX-Abnahme (Prüfung vor Inbetriebnahme)

In Deutschland und der EU ist eine **Prüfung vor der erstmaligen Inbetriebnahme** nach der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV, Anhang 2, Abschnitt 3) gesetzlich vorgeschrieben.

- **Wer darf prüfen?** Die Prüfung muss durch eine **zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS)** (z. B. TÜV, DEKRA) oder durch eine **zur Prüfung befähigte Person** mit

nachgewiesener besonderer Expertise im Explosionsschutz durchgeführt werden. Bei verknüpften oder komplexen Anlagen wird meist die ZÜS gefordert.

- **Umfang der physikalischen Prüfung vor Ort:**
    - **Sichtprüfung:** Stimmen die verbauten Geräte mit den Zertifikaten und dem Zonenplan überein? Sind alle Kabelverschraubungen fest und ordnungsgemäß montiert? Gibt es ungenutzte, offene Gehäusebohrungen?
    - **Messtechnische Prüfung:** Messung des Widerstands des gesamten Potenzialausgleichs. Jedes Gerät, jede Rohrleitung und jedes Kabelgestell muss nachweislich niederohmig (< 1 Ohm) mit dem Hauptbalken verbunden sein, um elektrostatische Funken durch Hexan/Ethanol-Strömungen auszuschließen.
    - **Funktionstest der Lüftung und Gaswarnanlage:** Simulation eines Gasalarms und Überprüfung, ob die Abschaltmatrix im Schaltschrank die Anlage wie spezifiziert stromlos schaltet und die Notlüftung anläuft.
- **Freigabe:** Erst wenn der Prüfer den fehlerfreien Zustand im **Prüfbericht** bescheinigt hat, darf die Anlage rechtlich mit brennbaren Medien (Hexan/Ethanol) befüllt und angefahren werden.

7.1 Abschaltmatrix (Cause-and-Effect-Diagramm)

Vorlage für die Abschaltmatrix (Cause-and-Effect-Diagramm), um dem Programmierer der SPS genau vorzugeben, was bei welchem Alarm passieren muss,
Eine **Abschaltmatrix** (auch *Cause-and-Effect-Diagramm* oder *Ursache-Wirkungs-Diagramm* genannt) ist das wichtigste Werkzeug, um dem SPS-Programmierer die Sicherheitslogik unmissverständlich vorzugeben. Sie übersetzt die Anforderungen aus der HAZOP-Analyse direkt in eine logische Schaltmatrix.
Für ein Kaffeeextraktionsverfahren mit Ethanol oder Hexan unterteilt man die Reaktionen meist in drei Stufen:

Warnung (Prozess anpassen),

Controlled Shutdown (Prozess kontrolliert anhalten) und

Emergency Shutdown / ESD (Sofortige, hardwareseitige Abschaltung).

Hier ist eine praxistaugliche Vorlage, die direkt für Ihre Programmierspezifikation genutzt werden kann.

7.2 Vorlage: Cause-and-Effect-Matrix (Kaffeeextraktion)

X = Auslöser (Aktion wird zwingend ausgeführt) | **(X)** = Bedingte Aktion (Sperre/Interlock)

Ursache (Cause / Input)	Stufe	Visualisierung (HMI / Horn)	Heizmedium (Ventil ZU)	Lösemittel-Pumpe (Motor AUS)	Rührwerk (Motor AUS)	Inertisierung (Stickstoff AUF)	Notlüftung Halle (EIN)	Hauptschütz (Spannungsfrei)
Gasalarm Halle > 20% UEG	1	**X** (Gelb)					**X**	
Gasalarm Halle > 40% UEG	3	**X** (Rot + Horn)	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X** (ESD)
Reaktordruck > \(P_{max}\) (z.B. 2,0 bar)	2	**X** (Rot)	**X**	**X**				
Reaktortemperatur > \(T_{max}\) (z.B. 65 °C)	2	**X** (Rot)	**X**					
Durchfluss Lösemittel = 0 (Pumpe läuft)	1	**X** (Gelb)	**X**	**X**				
Füllstand Lösemitteltank < \(L_{min}\)	1	**X** (Gelb)		**X**				
Not-Aus-Taster gedrückt (Feld oder Warte)	3	**X** (Rot + Horn)	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X** (ESD)
Ausfall Druckluft (Steuerluft)	3	**X** (Rot)	**X**	**X**	**X**	**X**		

7.3 Erklärung der Aktionen für den Programmierer **-Funktionsbeschreibung -**

Um Fehlinterpretationen beim Programmieren zu vermeiden, werden der Matrix folgende textliche Erläuterungen hinzugefügt:

7.3.1 Sichere Ventilstellungen (Fail-Safe)

*"Alle automatischen Prozessventile für das Lösungsmittel und das Heizmedium müssen als **NC (Normally Closed – im stromlosen Zustand geschlossen)** ausgeführt sein. Das Ventil für die Stickstoff-Inertisierung muss als **NO (Normally Open – im stromlosen Zustand geöffnet)** ausgeführt sein. Bei einem ESD-Signal oder Stromausfall müssen die Ventile automatisch federkraftgesteuert in diese Sicherheitslage fallen."*

7.3.2 Wiedereinschalt-Sperre (Interlock / Latch)

*"Sobald eine Ursache der Stufe 2 oder Stufe 3 ausgelöst hat, muss das Signal in der SPS **verriegelt (gespeichert)** werden. Auch wenn die physikalische Ursache wieder verschwindet (z. B. der Druck sinkt wieder), darf die Anlage nicht automatisch wieder anlaufen. Ein Neustart ist erst nach manueller Quittierung durch den Operator am HMI (Freigabetaste) zulässig."*

7.3.3 Zeitverzögerung bei Null-Durchfluss (Debounce)

*"Der Alarm 'Durchfluss Lösemittel = 0 bei laufender Pumpe' soll mit einer **Einschaltverzögerung von 5 Sekunden** programmiert werden. Dies verhindert Fehlauslösungen beim Anfahren der Pumpe, während sich der Druck in der Leitung noch aufbaut."*

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

Das Verhalten der **Rückgewinnungs-Destillation** wird in diese Matrix integriert, der SPS-Programmierer soll auf Basis dieser Vorlage auch die **Schrittkette (Sequenz)** für den normalen Start- und Stopp-Prozess aufbauen.

7.4 Integration der Rückgewinnungs-Destillation in die Matrix

Um die Rückgewinnungs-Destillation in die Sicherheitslogik zu integrieren, wird die Cause-and-Effect-Matrix erweitert.

Die Destillation birgt bei Hexan oder Ethanol zwei große Risiken:

Das Trockenlaufen der Kolonne/Blase (führt zu lokaler Überhitzung und Zersetzung von Kaffeeöl) sowie den

Ausfall der Kühlung (führt zu unkondensierten, hochentzündlichen Dämpfen, die über das Entlüftungssystem entweichen).

Hier ist die erweiterte Matrix, die sowohl den Extraktions- als auch den Destillationsprozess abdeckt.

7.5 Erweiterte Cause-and-Effect-Matrix (Inklusive Destillation)

X = Auslöser (Aktion wird zwingend ausgeführt) | **(X)** = Bedingte Aktion

Ursache (Cause / Input)	Stufe	Visualisierung (HMI / Horn)	Heizung Extraktor (ZU)	Heizung Destillation (ZU)	Lösemittel-Pumpe (AUS)	Produkt- / Rücklauf-Pumpe (AUS)	Vakuum-Pumpe (AUS)	Kühlwasser-Ventil (AUF)	Notlüftung Halle (EIN)	Hauptschütz (ESD)
Gasalarm Halle > 20% UEG	1	**X** (Gelb)							**X**	
Gasalarm Halle > 40% UEG	3	**X** (Rot+Horn)	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
Not-Aus-Taster gedrückt	3	**X** (Rot+Horn)	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
Extraktion (wie zuvor):										
Reaktordruck > \(P_{max}\)	2	**X** (Rot)	**X**		**X**					
Reaktortemperatur > \(T_{max}\)	2	**X** (Rot)	**X**							
Neu: Destillation:										
Destillationsdruck > \(P_{dest_max}\)	2	**X** (Rot)		**X**		**X**	**X**	**X**		
Kühltemperatur Kondensator > \(T_{kühl_max}\)	2	**X** (Rot)		**X**			**X**	**X**		
Kühlwasser-Durchfluss = 0	2	**X** (Rot)		**X**			**X**	**X**		
Füllstand Blase / Sumpf < \(L_{min}\)	2	**X** (Rot)		**X**		**X**				

7.6 Wichtige Zusatzinstruktionen für den SPS-Programmierer

Folgende Programmierregeln werden der Spezifikation für den Destillationsknoten hinzugefügt:

7.6.1 Verriegelung der Destillationsheizung (Kühlwasser-Interlock)

*"Die Heizung der Destillationsblase (Dampf oder Thermoöl) darf **nur dann freigegeben werden**, wenn der Durchflusssensor im Kühlwasserkreislauf des Kondensators einen ausreichenden Mindeststrom meldet UND die Kühlwassertemperatur unter dem definierten Grenzwert liegt. Fällt das Kühlwasser während des Betriebs aus, ist die Heizung innerhalb von < 2 Sekunden zwangsabzuschalten."*

7.6.2 Verhalten der Vakuumpumpe bei Druckanstieg

"Wird die Destillation unter Vakuum betrieben, um die Trenntemperatur für das Kaffeeöl zu senken, muss die Vakuumpumpe bei einem plötzlichen Druckanstieg (\(P_{dest_max}\)) sofort abgeschaltet und die Saugleitung mechanisch per NC-Ventil getrennt werden. Dies verhindert, dass unkondensierte Hexan-/Ethanoldämpfe durch die Vakuumpumpe in die Umgebung oder in das Abgassystem gesaugt werden."

7.6.3 Trockenlaufschutz des Destillationssumpfs

"Der Füllstandssensor im Sumpf der Destillationskolonne schützt das verbleibende Kaffeeöl vor thermischer Zersetzung und Verkrustung an den Heizflächen. Bei Erreichen von \(L_{min}\) muss die Sumpfheizung sofort abschalten, während die Produktpumpe zur Entleerung noch für eine definierte Nachlaufzeit von 10 Sekunden aktiv bleiben darf, um die Blase restlos zu leeren."

Nachfolgend ist die genaue Schrittkette (SFC / Grafcet) für das kontrollierte Anfahren und Herunterfahren der Gesamtanlage ausgearbeitet.
Danach werden Vorgaben zur Prozessvisualisierung (HMI-Design) für diese kritischen Alarme erstellt, um dem Programmierer eine exakte Umsetzung zu ermöglichen.

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

7.7 Teil 1: Ablaufsteuerung (SFC / Grafcet)

Für ein optimales Handling im Batch-Betrieb (Kaffeeextraktion und anschließende Destillation/Lösemittel-Rückgewinnung) wird die Schrittkette in zwei Hauptstränge unterteilt.

```
================================================================================
                              ANFAHR-SCHRITTE (START-UP)
================================================================================
[ Schritt 10: Grundstellung ]
     |   Bedingung: Alle Behälter geschlossen, keine Alarme aktiv, Not-Aus OK.
     ▼
[ Schritt 11: Inertisierung & Belüftung ]
     |   Aktion: - Hallenlüftung auf Nennlast schalten.
     |           - Stickstoff-Ventil (NO) für Reaktor und Destillation öffnen.
     |   Bedingung: Restsauerstoff im System < 2% (O2-Sensor) ODER Zeitsteuerung abgelaufen.
     ▼
[ Schritt 12: Kondensator & Kühlung aktivieren ]
     |   Aktion: - Kühlwasser-Hauptventil ÖFFNEN.
     |   Bedingung: Durchfluss Kühlwasser OK UND Kühlmedium-Temperatur < T_kühl_max.
     ▼
[ Schritt 13: Evakuierung (Optional bei Vakuum-Destillation) ]
     |   Aktion: - Vakuumpumpe EIN.
     |           - Vakuum-Regelventil regelt auf Solldruck (z.B. 100 mbar).
     |   Bedingung: Vakuum stabil im Sollbereich.
     ▼
[ Schritt 14: Lösemittel-Zulauf & Extraktionsstart ]
     |   Aktion: - Lösemittel-Pumpe EIN.
     |           - Heizung Extraktionsreaktor EIN (Kaskadenregelung startet rampenförmig).
     |   Bedingung: Füllstand Reaktor erreicht ODER Durchflussmenge (Liter) abgearbeitet.
     ▼
[ Schritt 15: Destillationsstart ]
     |   Aktion: - Sumpf-/Blasenheizung EIN (Zulauf aus Extraktor regeln).
     |           - Rücklaufpumpe / Destillatpumpe in Automatikbetrieb.
     |   Bedingung: Übergang in kontinuierlichen Betrieb / Schritt 20 (Produktion).

================================================================================
                            HERUNTERFAHR-SCHRITTE (SHUTDOWN)
================================================================================
[ Schritt 30: Einleiten des regulären Batch-Endes ]
     |   Bedingung: Extraktionszeit abgelaufen ODER Dichte/Farbe des Extrakts zeigt Batch-
Ende.
     ▼
[ Schritt 31: Abschaltung der Extraktion ]
     |   Aktion: - Heizung Extraktionsreaktor AUS.
     |           - Lösemittel-Pumpe AUS.
     |   Bedingung: Reaktor-Temperatur sinkt unter 35 °C.
     ▼
[ Schritt 32: Ausdampfen / Rest-Destillation ]
     |   Aktion: - Destillationsheizung bleibt EIN, um Lösemittelreste aus dem Kaffeeöl zu
jagen.
     |   Bedingung: Füllstand Blase erreicht L_min ODER Temperatur im Sumpf steigt (Öl ist
rein).
     ▼
[ Schritt 33: Abschaltung der Destillation ]
     |   Aktion: - Destillationsheizung AUS.
     |           - Vakuumpumpe AUS (System belüften mit Stickstoff N2, nicht mit Luft!).
     |           - Produktpumpe entleert Sumpf (Nachlauf 10 Sek., dann AUS).
     ▼
[ Schritt 34: Nachkühlung & Systemruhe ]
     |   Aktion: - Kühlwasser-Hauptventil schließt verzögert nach 5 Minuten.
     |           - Hallenlüftung läuft auf Grundlast zurück.
     |   Bedingung: Alle Temperaturen < 30 °C. -> Zurück zu Schritt 10 (Bereit für
Entleerung).
```

Verwende Code mit Vorsicht.

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

7.8 Teil 2: Vorgaben zur Prozessvisualisierung (HMI-Design)

Um Fehlbedienungen unter Stress zu vermeiden, folgt das HMI-Design den Prinzipien der **ISO 9241** (Ergonomie) und nutzt eine klare Farbhierarchie (Graustufen-Konzept mit Signalfarben nur im Fehlerfall).

7.8.1 Farbhierarchie und Alarmklassen

- **Normalzustand:** Hintergrund in hellem Grau. Rohrleitungen, Ventile und Motoren in Dunkelgrau/Schwarz. Ein laufender Motor wird durch ein dezentes Grün oder eine Konturveränderung angezeigt – kein grelles "Neon-Grün".
- **Klasse 1: Warnung (Informativ / Gelb)**
  - *Verhalten:* Gelbes statisches Dreieck mit Ausrufezeichen neben dem Messwert. Keine Pop-up-Blockade auf dem Bildschirm.
  - *Beispiel:* Gasalarm > 20% UEG, Füllstand Tank niedrig.
- **Klasse 2: Störung / Interlock (Kritisch / Rot blinkend)**
  - *Verhalten:* Das betroffene Aggregat (z. B. die Pumpe) blinkt rot. Ein globaler Alarmbalken am oberen Bildschirmrand blinkt rot und zeigt den Fehler im Klartext an (*z. B. "Interlock: Destillationsdruck zu hoch"*).
- **Klasse 3: Not-Aus / ESD (Katastrophal / Rot blinkend + Vollbild)**
  - *Verhalten:* Der gesamte Bildschirmhintergrund färbt sich dezent rot-weiß gestreift oder blendet ein unübersehbares rotes Pop-up ein: **"ESD AUSGELÖST"**. Alle anderen Steuerungselemente (Handbedienung) werden ausgegraut und gesperrt.

7.8.2 Zwingende HMI-Funktionen für den Programmierer

- **Das Interlock-Dashboard:**
  Es muss ein separates Bild ("Sicherheitsverriegelungen") geben. Wenn eine Pumpe nicht anläuft, weil eine Bedingung aus der Abschaltmatrix fehlt (z. B. Kühlwasser fehlt), muss das HMI dem Operator die exakte Ursache rot markiert anzeigen, statt nur den Start zu verweigern.
- **Quittier-Pflicht (Alarm-Sperre):**
  Kritische Alarme (Klasse 2 und 3) müssen ein zwingendes, zweistufiges Quittierverfahren besitzen. Der Operator muss zuerst den akustischen Alarm (Horn) stummschalten und nach Behebung des Fehlers den Interlock über eine separate Taste freigeben (*"Sicherheitskette zurücksetzen"*).
- **Ex-Zonen-Visualisierung:**
  Im Anlagenfließbild (P&ID) auf dem HMI müssen die ATEX-Zonengrenzen (Zone 1/2) als gestrichelte, farbige Linien im Hintergrund eingeblendet werden können, damit der Operator bei Wartungsarbeiten sofort sieht, welche Ventile im Ex-Bereich liegen.

Nachfolgend wird zuerst für das HMI die Spezifikation der Benutzerrechte (z. B. wer darf Interlocks überbrücken – Operator vs. Administrator) festgelegt, danach erfolgt die Schnittstellenbeschreibung mit einer Definition der Datenarchivierung (Audit Trail für die ATEX-Behörde).

Diese Abschnitte runden das Pflichtenheft für den SPS- und HMI-Programmierer ab.

8 Spezifikation der HMI-Benutzerrechte (Rollenmatrix)

Um Sabotage, Fehlbedienungen und das unbefugte Deaktivieren von Sicherheitsfunktionen in der Hexan-/Ethanol-Anlage zu verhindern, muss ein striktes Rollenkonzept nach **DIN EN IEC 62682** (Alarmmanagement) implementiert werden. Das temporäre Überbrücken (*Forcen* oder *Bypassen*) von sicherheitskritischen Interlocks ist streng reglementiert.

8.1 Definition der Benutzerrollen

- **Operator (Anlagenbediener / Schichtmitarbeiter):**
  - *Rechte:* Start/Stopp der regulären Schrittketten, Quittieren von Alarmen, Eingabe von Standard-Rezepturen (z. B. Chargenname, Kaffeesorte), Umschalten von Ansichten.
  - *Einschränkung:* **Kein** Zugriff auf Handbedienung blockierter Aggregate, **keine** Änderung von Alarmgrenzwerten, **absolutes Verbot** von Interlock-Überbrückungen.

- **Supervisor / Schichtführer (Erweiterte Rechte):**
  - *Rechte:* Alle Operator-Rechte, plus Freigabe von blockierten Schritten nach einem kontrollierten Halt, Ändern von unkritischen Prozessparametern (z. B. Solltemperaturen innerhalb enger Grenzen), Quittieren von hart verriegelten Interlocks der Stufe 2 nach Fehlerbehebung.
  - *Einschränkung:* Darf Sicherheits-Interlocks (z. B. Gasalarm-Abschaltung, Überdruck-Abschaltung) **nicht** überbrücken.
- **Administrator / Maintenance (Instandhaltung & Automatisierungsingenieur):**
  - *Rechte:* Voller Systemzugriff. Ändern von Grenzwerten, Kalibrierung von Ex-Sensoren, Software-Updates.
  - *Sonderrecht:* **Darf Interlocks temporär zu Wartungszwecken überbrücken (Bypass).**

8.2 Technische Umsetzung der Interlock-Überbrückung

- **Automatische Rücksetzung (Timeout):** Wenn der Administrator einen Interlock überbrückt (z.B. um ein Ventil im Ex-Bereich manuell zu testen, obwohl der Mindestdruck fehlt), muss die Software diesen Bypass nach maximal **30 Minuten automatisch deaktivieren**.
- **Visuelle Dauerwarnung:** Solange auch nur ein einziger Sicherheits-Interlock im System überbrückt ist, muss auf *jedem* HMI-Bildschirm ein gelb/schwarz gestreifter Warnbalken blinken: **"ACHTUNG: SICHERHEITSFUNKTION DEAKTIVIERT!"**

9 Schnittstellenbeschreibung & Datenarchivierung (Audit Trail)

Die lückenlose Aufzeichnung aller systemrelevanten Ereignisse ist für die **ATEX-Behörde**, die Berufsgenossenschaft und im Haftungsfall (z. B. nach einer Verpuffung) zwingend erforderlich. Das System muss den Richtlinien von **FDA 21 CFR Part 11** (für elektronische Aufzeichnungen) bzw. den entsprechenden EU-GMP- und Ex-Richtlinien genügen.

9.1 Anforderungen an den Audit Trail (Protokollierung)

Die Archivierung muss in einer manipulationssicheren SQL-Datenbank (oder einem geschützten Binärformat auf dem HMI/SCADA-Server) erfolgen. Ein Löschen oder Ändern der Daten darf – auch für den Administrator – softwareseitig unmöglich sein.
Jeder Eintrag im Audit Trail muss folgende vier Fragen lückenlos beantworten:

- **Wer?** (Eindeutiger Benutzername der angemeldeten Person; anonyme Sammel-Logins wie "Bediener" sind verboten).
- **Wann?** (Zeitstempel mit Datum, Stunde, Minute, Sekunde und Millisekunde, synchronisiert über einen NTP-Zeitserver).
- **Wo / Was?** (Eindeutige Tag-Bezeichnung, z. B. `PT_101_Reaktordruck`, und die Aktion, z. B. *Wert geändert von 1,5 bar auf 2,5 bar*).
- **Warum?** (Zwingende Eingabeaufforderung: Bei jeder Änderung von Grenzwerten oder beim Aktivieren eines Bypasses muss der Nutzer einen Freitext-Grund eingeben, bevor die SPS die Änderung übernimmt).

9.2 Archivierungskriterien für die ATEX-Behörde (Beispiel-Log)

Folgende Ereignisse müssen permanent und für mindestens **10 Jahre** archiviert werden:

- **Sicherheitsrelevante Benutzereingriffe:** Logins, Logouts, Passworteingaben, Rezepturänderungen und vor allem jede Aktivierung/Deaktivierung eines Bypasses.
- **Prozess-Alarme und Statuswechsel:** Das Auftreten, die Quittierung und das Verschwinden jedes Alarms aus der Cause-and-Effect-Matrix.
- **Prozesswert-Archivierung (Historian):** Kontinuierliche Aufzeichnung (alle 1 bis 5 Sekunden) kritischer Messwerte zur Rekonstruktion von Störfällen:
  - Raum-Gaskonzentration (UEG-Werte der Sensoren in der Halle)
  - Reaktordruck und Reaktortemperatur
  - Destillationsdruck und Sumpftemperatur
  - Status der Hallenlüftung (Frequenzumrichter-Rückmeldung oder Strömungswächter)

```
[Beispiel eines Audit-Trail-Eintrags für den Prüfer:]
Zeitstempel:          2026-07-25 16:14:02.123 CET
Benutzer:             M_Mueller (Instandhaltung / Admin)
Ereignis-Typ:         Interlock-Bypass AKTIVIERT
Komponente:           I_L_102 (Interlock: Sumpffüllstand Destillation Min)
Eingegebener Grund:   "Wartungskalibrierung des Füllstandssensors im Leerzustand"
SPS-Reaktion:         Bypass aktiv. Maximale Laufzeit 30 Minuten gestartet.
```

Verwende Code mit Vorsicht.

10 Zusammenstellung des Lastenheftes mit nachfolgenden Inhalten

10.1 Beispiel für ein Inhaltsverzeichnis

Technisches Lastenheft: Prozess- und Automatisierungsspezifikation

Projekt: Kaffeeextraktionsanlage mit brennbaren Lösungsmitteln (Ethanol/Hexan)

1. Allgemeine Grundlagen & Verfahrenstechnik
- **1.1 Prozessbeschreibung & Systemgrenzen**
  - 1.1.1 Fest-Flüssig-Extraktion (Reaktor)
  - 1.1.2 Lösungsmittel-Rückgewinnung (Destillationskolonne)
- **1.2 Stoffdaten & Auslegungsparameter**
  - 1.2.1 Ethanol (Spezifikation, Zündtemperaturen)
  - 1.2.2 Hexan (Spezifikation, Toxizität, Zündtemperaturen)
- **1.3 Wirtschaftliche Eckpunkte & Kapazitäten**
  - 1.3.1 Jährliche Produktionsmengen & Chargengrößen
  - 1.3.2 Anlagenlaufzeiten & Schichtmodelle

2. Sicherheits- und Risikoanalyse (HAZOP / PAAG)
- **2.1 Methodik und Systemknoten**
- **2.2 Cause-and-Effect-Matrix (Ursache-Wirkungs-Diagramm)**
  - 2.2.1 Sicherheitsstufen (Warnung, Kontrollierter Stopp, ESD)
  - 2.2.2 Abschaltlogik Extraktionsknoten
  - 2.2.3 Abschaltlogik Destillationsknoten
- **2.3 Schnittstelle zur Raum-Gaswarnanlage (UEG-Abschaltmatrix)**

3. Explosionsschutz & ATEX-Zonierung
- **3.1 Zonenpläne und geometrische Einteilung**
  - 3.1.1 Definition Zone 0 (Inertisierungskonzept mit Stickstoff N_2)
  - 3.1.2 Definition Zone 1 (Freisetzungsstellen, Flansche, Dichtungen)
  - 3.1.3 Definition Zone 2 (Hallenboden, Lüftungskonzept)
- **3.2 Nicht-elektrischer Explosionsschutz (ISO 80079-36/37)**
  - 3.2.1 Mechanische Funkenvermeidung an Ventilen und Pumpenköpfen
  - 3.2.2 Antistatische Erdung und Potenzialausgleich

4. Elektrotechnische Spezifikation (Sensorik & Aktorik)
- **4.1 Vorgaben für die Sensorik (Zone 0 / Zone 1)**
  - 4.1.1 Eigensicherheit (Ex ia /Ex ib) und Kennzeichnung (z. B. Drucktransmitter)
  - 4.1.2 Speisebausteine und Sicherheitsbarrieren im Schaltschrank
- **4.2 Vorgaben für die Aktorik (Zone 1)**
  - 4.2.1 Druckfeste Kapselung (Ex d) und Erhöhte Sicherheit (Ex e)
  - 4.2.2 Regelventile und Stellungsregler
- **4.3 Pumpenantriebe (Motoren)**
  - 4.3.1 Frequenzumrichterbetrieb und ATEX-Zertifizierung
  - 4.3.2 Thermischer Motorschutz (PTC-Kaltleiter-Auswertung)
- **4.4 Kabel und Leitungswege**
  - 4.4.1 Farbliche Kennzeichnung (Ex-i / Hellblau RAL 5015)
  - 4.4.2 Trennungsabstände in Kabelrinnen (≥ 50 mm)
  - 4.4.3 Chemische Beständigkeit gegen Hexan/Ethanol

5. Schaltschrank & Sicherheitssteuerung (SIS)

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com

- **5.1 Schaltschrankaufbau im sicheren Bereich**
  - 5.1.1 Räumliche Trennung Ex-i / Nicht-Ex-i (Blaukanäle, Trennstege)
- **5.2 Sicherheitsgerichtete Hardware (F-SPS / F-CPU)**
  - 5.2.1 SIL 2 / PL d Anforderungen nach DIN EN 61511
  - 5.2.2 Fail-Safe-Logik der Feldgeräte (NC/NO-Verhalten bei Stromausfall)

6. Softwarelogik & Ablaufsteuerung (SFC / Grafcet)

- **6.1 Schrittkette: Kontrolliertes Anfahren (Start-up)**
  - 6.1.1 Vorlüftung und Inertisierungsprüfung (O_2 < 2%)
  - 6.1.2 Kondensator- und Kühlwasserfreigabe
  - 6.1.3 Lösemittel-Zulauf und Druckaufbau
- **6.2 Schrittkette: Kontrolliertes Herunterfahren (Shut-down)**
  - 6.2.1 Rest-Ausdampfung der Blase (Trockenlaufschutz)
  - 6.2.2 Stickstoff-Belüftung (Vakuumbrechen)
  - 6.2.3 Nachkühlphase
- **6.3 Interlock-Verriegelungslogik (Wiedereinschaltsperren / Latch)**

7. Prozessvisualisierung (HMI-Design) & Benutzerrechte

- **7.1 Ergonomie und Farbhierarchie (Graustufen-Konzept)**
- **7.2 Alarmklassen und HMI-Verhalten (Gelb/Rot/ESD-Vollbild)**
- **7.3 Benutzerrollen und Zugriffsebenen**
  - 7.3.1 Operator / Supervisor / Administrator
  - 7.3.2 Reglementierung von Interlock-Überbrückungen (Bypass-Timeout 30 Min.)

8. Datenarchivierung & Behörden-Compliance (Audit Trail)

- **8.1 Datenintegrität nach FDA 21 CFR Part 11 / EU-GMP**
- **8.2 Mindestaufzeichnungsumfang (Wer, Wann, Was, Warum)**
- **8.3 Langzeitarchivierung (10 Jahre) für die ATEX-Behörde**

9. Qualitätssicherung, Dokumentation & Abnahme

- **9.1 Dokumentationspflichten des Lieferanten vor Inbetriebnahme**
  - 9.1.1 Nachweise der Eigensicherheit (Schleifenberechnungen)
  - 9.1.2 EU-Baumusterprüfbescheinigungen
- **9.2 ATEX-Abnahme nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)**
  - 9.2.1 Erstprüfung vor Inbetriebnahme durch zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS)
  - 9.2.2 Messtechnischer Nachweis des Potenzialausgleichs (< 1 Ω)

DIPL. -ING. C. SPREUER | Emser Straße 19 | 65195 Wiesbaden | Tel. (0611) 59 99 33 | E-Mail: info@spreuer.com | Page: www.spreuer.com