

## Anlagensicherheit

# Maßnahmen der Prozesssicherheit in verfahrenstechnischen Anlagen



R 002  
Stand: Dezember 2015  
(Redaktionelle Überarbeitung der Ausgabe 7/2014)

## Inhaltsverzeichnis dieses Ausdrucks

1 Anwendungsbereich	4
2 Begriffsbestimmungen	5
Bestimmungsgemäßer Betrieb	5
Betriebseinrichtungen	6
Überwachungseinrichtungen	6
Schutzeinrichtungen	7
Eigensicher/Inhärent sicher	8
Redundanz	8
Aktive Fehler	8
Passive Fehler	8
Common Cause-Fehler	9
Fail Safe-Verhalten	9
(Sicherheits-) Lebenszyklus	9
Risiko	9
3 Sicherheitskonzepte	9
3.1 Anforderungen des technischen Regelwerkes an Sicherheitskonzepte	10
3.2 Festlegung des Sicherheitskonzeptes	11
3.2.1 Checklistenverfahren	12
3.2.2 PAAG/HAZOP	12
3.2.3 Layers of Protection Analysis (LOPA)	15
3.2.4 FMEA/Ausfalleffektanalyse	15
3.2.5 Ereignisablaufanalyse	15
3.2.6 Fehlerbaumanalyse	15
3.2.7 Zurich Hazard Analysis (ZHA)	15
3.3 Risikobewertung	16
3.4 Auswahl des Sicherheitskonzeptes	16
3.5 Dokumentation des Sicherheitskonzeptes	18
4 Maßnahmen zur Beherrschung exothermer chemischer Reaktionen	19
4.1 Maßnahmen der inhärenten Sicherheit	19
4.1.1 Substitution	19
4.1.2 Minimierung/Reduktion	20
4.1.3 Moderation	21
4.1.4 Vereinfachung	22
4.1.5 Grenzen der inhärenten Sicherheit	22
4.2 Ereignisverhindernde Maßnahmen	23
4.2.1 Einrichtungen der Prozessleittechnik (PLT)	23
4.2.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen	27
4.3 Konstruktive Maßnahmen	32
4.3.1 Druckentlastungseinrichtungen	32
4.3.2 Betriebliche Entsorgungssysteme	34
4.3.3 Geschlossene Auffangsysteme mit Tauchvorlagen	35
4.3.4 Schwerkraftabscheider	35
4.3.5 Direkte Ableitung in die Atmosphäre	35
4.4 Notmaßnahmen zur Beherrschung durchgehender Reaktionen	36
4.4.1 Notkühlung	36
4.4.2 Notdurchmischung	36
4.4.3 Notstopper	36
4.4.4 Notverdünnung	36
4.4.5 Nottransfer	37
5 Schadensbegrenzende Schutzeinrichtungen	37
Anhang 1: Schema zur Beurteilung des gefahrlosen Ableitens von Stoffen nach Gefährlichkeitsmerkmalen	38
Anhang 2: Beispiele zur Absicherung von Reaktoren	39
Prämissen	39

Verfahren und Apparate .....	40
Gefahrenpotential .....	41
Normalbetrieb .....	41
Abweichungen (Störungen) .....	42
Daten und Informationen zur Beurteilung .....	42
Beurteilung der Störungen .....	43
Anhang 3: Literaturverzeichnis .....	48
Bildnachweis .....	52
Sonstiges .....	52

Die vorliegende Schrift konzentriert sich auf wesentliche Punkte einzelner Vorschriften und Regeln. Sie nennt deswegen nicht alle im Einzelfall erforderlichen Maßnahmen. Seit Erscheinen der Schrift können sich darüber hinaus der Stand der Technik und die Rechtsgrundlagen geändert haben.

Die Schrift wurde sorgfältig erstellt. Dies befreit nicht von der Pflicht und Verantwortung, die Angaben auf Vollständigkeit, Aktualität und Richtigkeit selbst zu überprüfen.

Das Arbeitsschutzgesetz spricht vom Arbeitgeber, das Sozialgesetzbuch VII und die Unfallverhütungsvorschriften der Unfallversicherungsträger vom Unternehmer. Beide Begriffe sind nicht völlig identisch, weil Unternehmer/innen nicht notwendigerweise Beschäftigte haben. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Thematik ergeben sich daraus keine relevanten Unterschiede, sodass „die Unternehmerin/der Unternehmer“ verwendet wird.

## 1 Anwendungsbereich

Von verfahrenstechnischen Anlagen können Gefahren für Menschen, Umwelt und Sachgüter ausgehen. Das Gefahrenpotential hängt dabei unter anderem ab von

- der Art und Menge gehandhabter Stoffe und Stoffgemische,
- den Zustandsgrößen (z. B. Konzentration, Temperatur und Druck) sowie
- der Art der Anlage (z. B. Freianlage oder Containment).

Neben dem Gefahrenpotential des Verfahrens spielen bei Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs der Standort der Anlage und das Schutzbedürfnis der Umgebung eine wichtige Rolle. Diese Faktoren beeinflussen das abzuschätzende Schadensausmaß, welches eine Basis für das Sicherheitskonzept der Anlage darstellt.

An die Maßnahmen und Einrichtungen, die der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes dienen, werden entsprechend des abzudeckenden Risikos unterschiedlich hohe Anforderungen gestellt. Die höchsten Anforderungen werden an Schutzeinrichtungen gestellt, die eine unmittelbare Gefahr für Mensch und Umwelt abwenden sollen.

Abbildung 1: Standort und Umgebung einer Chemieanlage beeinflussen das Sicherheitskonzept



**Ziel dieser Schrift ist es,**

- Kriterien für das Festlegen von Schutzeinrichtungen und
- Anforderungen an die Verfügbarkeit und Wirksamkeit von Schutzeinrichtungen darzustellen. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Beherrschung exothermer chemischer Reaktionen.

**Diese Schrift richtet sich an**

- Betreiber und Betreiberinnen verfahrenstechnischer Anlagen sowie an
- den Personenkreis, der mit der Planung und der sicherheitstechnischen Überwachung solcher Anlagen beauftragt ist.

**In erster Linie soll sie unterstützen bei der**

- Festlegung der erforderlichen Einrichtungen, Maßnahmen und Verhaltensregeln,
- Ausarbeitung von Betriebsvorschriften und Anweisungen,
- Durchführung von Unterweisungen und Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen.

## 2 Begriffsbestimmungen<sup>1</sup>

### Bestimmungsgemäßer Betrieb

Der bestimmungsgemäße Betrieb umfasst insbesondere:

<sup>1</sup> Die Begriffsbestimmungen verwenden durchgängig den Terminus „Einrichtungen“, da sie vorrangig für die technische Ausrüstung einer Anlage definiert wurden. Sie lassen sich sinngemäß auch auf organisatorische Maßnahmen übertragen.

- den Betrieb, für den eine Anlage nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt und geeignet ist (Gutbereich)
- Betriebszustände, die bei einer Fehlfunktion von Komponenten oder bei einer Fehlbedienung auftreten, ohne dass einer Fortführung des Betriebes sicherheitstechnische Gründe entgegenstehen oder zulässige Grenzwerte überschritten werden (zulässiger Fehlbereich)

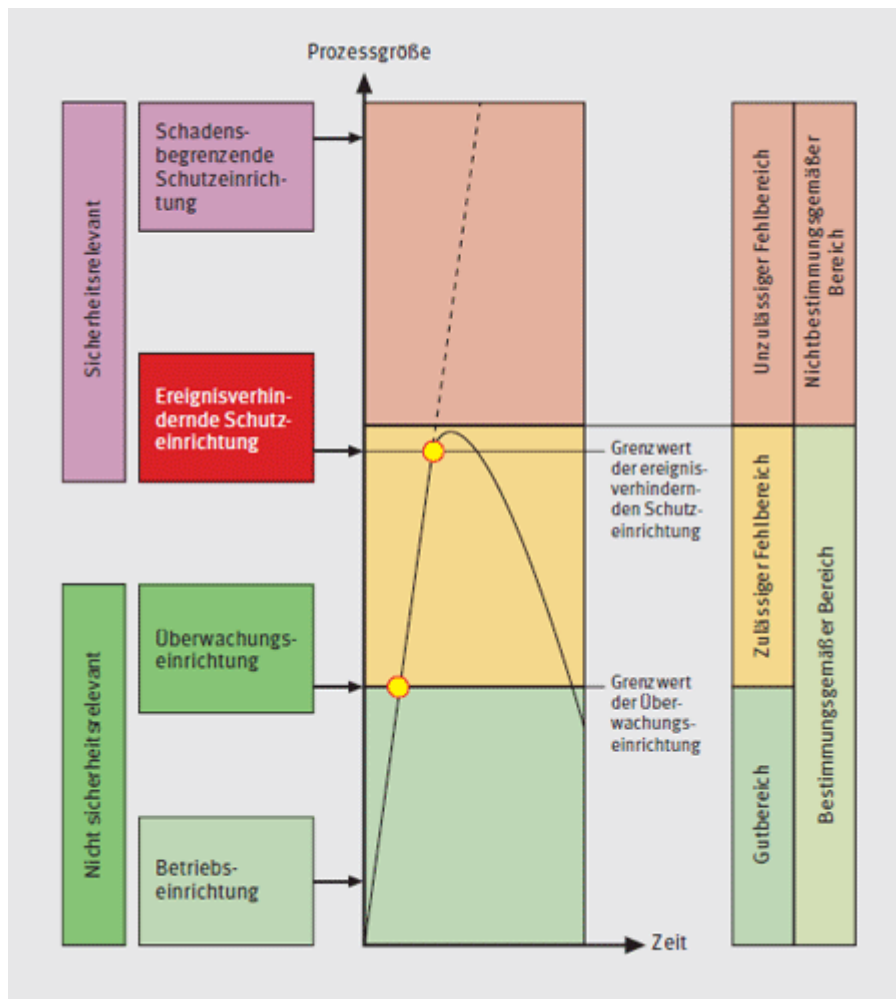
## **Betriebseinrichtungen**

Betriebseinrichtungen dienen dem bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage in ihrem Gutbereich. Dazu gehören z. B. das Messen, Regeln und Steuern aller hierfür relevanten Prozessgrößen einschließlich der dazugehörigen Funktionen, wie Registrieren und Protokollieren.

## **Überwachungseinrichtungen**

Überwachungseinrichtungen sprechen im bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage an der Grenze zwischen Gutbereich und zulässigem Fehlbereich an, sie melden zulässige Fehlzustände der Anlage. Einer Fortführung des Betriebes steht aus Gründen der Sicherheit nichts entgegen, es ist jedoch erhöhte Aufmerksamkeit erforderlich.

Abbildung 2: Klassifizierung von Einrichtungen und Maßnahmen



## Schutz-einrichtungen

Im Gegensatz zu den Aufgaben der nicht sicherheitsrelevanten Betriebs- und Überwachungseinrichtungen liegt die Funktion der Schutz-einrichtungen darin, einen unzulässigen Fehlzustand der Anlage zu verhindern. Schutz-einrichtungen müssen daher vor dem Verlassen des zulässigen Fehlbereichs aktiv werden, so dass bis zum Wirksamwerden der Maßnahme eine Abweichung der Prozessgröße in den unzulässigen Fehlbereich zuverlässig ausgeschlossen ist.

Als Kriterium für die Einstufung als Schutz-einrichtung gilt, dass bei deren Nichtvorhandensein mit solchen Zuständen der Anlage gerechnet werden muss, die zu Personenschäden, größeren Umweltschäden oder schwerwiegenden Sachschäden führen können. Darin inbegriffen ist auch die „ernste Gefahr“ im Sinne der Störfall-Verordnung<sup>2</sup>.

Damit das Ansprechen von Schutz-einrichtungen möglichst vermieden wird, sind diesen häufig Überwachungseinrichtungen vorgeschaltet.

Im Sinne der Störfall-Verordnung sind neben den ereignisverhindernden Schutz-einrichtungen auch schadensbegrenzende Maßnahmen sicherheitstechnisch relevant. Schadensbegrenzende Schutz-einrichtungen

2 Siehe Anhang 3, Nr. 9

verhindern nicht das Eintreten des unerwünschten Ereignisses, sondern dienen dazu, dessen Auswirkungen zu begrenzen (z. B. Auslösung eines Wasservorhangs zur Niederschlagung austretenden Gases).

## Eigensicher/Inhärent sicher

„Eigensicher“ ist ein Kunstwort für die Übersetzung des englischen „intrinsically safe“ und wird im Bereich des elektrotechnischen Explosionsschutzes verwendet. Dort bedeutet eine „eigensichere“ Ausführung elektrischer Systeme oder Betriebsmittel, dass z. B. Ströme oder Spannungen bei festgelegten Bedingungen zu keiner Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen können.

In dieser Schrift wird statt „eigensicher“ der Begriff „inhärent“ („innewohnend“) verwendet. Darunter werden Anlagen oder Verfahren verstanden, bei denen das Gefahrenpotential entweder vermieden oder auf ein Maß gesenkt wurde, dass selbst bei vollständiger Freisetzung von Energie- und Stoffpotentialen Mensch und Umwelt nicht gefährdet werden.

## Redundanz

Redundanz bezeichnet das Vorhandensein weiterer Einrichtungen mit gleicher Aufgabe, die zur Erhöhung der Verfügbarkeit der vorgesehenen Funktion installiert sind. Man unterscheidet

- homogene Redundanz, bei der die redundanten Elemente der Einrichtung gleichartig aufgebaut sind und nach gleichen physikalischen Verfahren arbeiten und
- diversitäre Redundanz, bei der die redundanten Elemente der Einrichtung nach unterschiedlichen physikalischen Verfahren arbeiten oder unterschiedlich aufgebaut sind.

## Aktive Fehler

Beim Auftreten eines aktiven Fehlers in einer Schutzeinrichtung wird die Sicherheitsfunktion vom betroffenen Bauteil aktiv ausgelöst. Dies führt dazu, dass die Anlage in den sicheren Zustand geführt, d. h. in der Regel abgeschaltet wird. Ein Beispiel dafür ist ein Leitungsbruch in einem Stromkreis, der ständig von Strom durchflossen wird. Hierdurch wird dem System eine Grenzwertüberschreitung vorgetäuscht und die Sicherheitsfunktion wird ausgelöst. Solche Fehler heißen deshalb auch „funktionsauslösend“ und sind unter dem Blickwinkel der Sicherheit unkritisch.

## Passive Fehler

Passive Fehler werden durch das Prozessleitsystem nicht bemerkt. Beispiele sind Fremdkörper in Ventilen (ein Schließen ist gar nicht oder nicht vollständig möglich) oder korrodierte mechanische Teile, die sich nicht mehr bewegen lassen. Bei passiven Fehlern wird im Anforderungsfall (z. B. Druck zu hoch, Füllstand zu hoch) die Schutzfunktion nicht ausgelöst.

Bei passiven Fehlern in PLT-Schutzeinrichtungen wäre die Sicherheit der Anlage im Anforderungsfall nicht mehr gewährleistet. Daher müssen passive Fehler vermieden, beherrscht oder durch geeignete technische Maßnahmen in aktive Fehler umgewandelt werden.



## Common Cause-Fehler

Unter einem Common Cause-Fehler versteht man den Fehlzustand verschiedener Anlageteile, der auf eine gemeinsame Ursache zurückgeht (z. B. Ausfall verschiedener Pumpen infolge Ausfalls der gemeinsamen Stromversorgung).

## Fail Safe-Verhalten

Fail Safe-Verhalten ist die Fähigkeit einer Schutzeinrichtung, beim Auftreten eines bestimmten Fehlers die Anlage bzw. Teilanlage in einen sicheren Zustand zu überführen und zu halten, so dass der Fehler nicht zu einem unzulässigen Fehlzustand der Anlage führt. Dies entspricht einem aktiven Fehlverhalten bezüglich eines bestimmten Fehlers.

## (Sicherheits-) Lebenszyklus

Der Lebenszyklus einer Anlage, eines Anlagenteils oder einer (sicherheits-)technischen Komponente beginnt mit der Planungsphase und endet mit der Außerbetriebnahme. Innerhalb dieses Lebenszyklus sind alle durchzuführenden Tätigkeiten, die mit der Sicherheit der Anlage zu tun haben, zu planen und entsprechend durchzuführen. Nach jedem Schritt innerhalb des Zyklus ist zu verifizieren, dass die Ergebnisse dieses Schrittes korrekt abgearbeitet sind.

## Risiko

Der Begriff Risiko wird als die Verknüpfung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß eines Ereignisses definiert. Eine „objektive“ Risikobewertung ist in Deutschland gesellschaftlich nicht gegeben. Subjektive Einflüsse sind beispielsweise:

- persönliche Gefahrenempfindungen (z. B. geprägt durch die Tatsache, dass bestimmte Gefahren sichtbar, andere nicht sichtbar sind, oder die Frage, ob die unter Umständen gefährdeten Personen selbst Einfluss auf das Prozessgeschehen haben)
- persönliche Nutzempfindungen
- gesellschaftliche Akzeptanz von Gefahren (z. B. ethisch, religiös, politisch geprägt, abhängig von der Bevölkerungsdichte)
- die Art des potentiell betroffenen Personenkreises (z. B. besonderes Schutzbedürfnis von Kindern und Kranken)

## 3 Sicherheitskonzepte

### 3.1 Anforderungen des technischen Regelwerkes an Sicherheitskonzepte

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen der chemischen Industrie unterliegen einer Reihe von Vorschriften, die unterschiedliche Schutzziele verfolgen. Die im Regelwerk getroffenen Festlegungen müssen bei der sicherheitstechnischen Beurteilung eines exothermen Prozesses berücksichtigt werden.

Nachfolgend sind die wichtigsten gesetzlichen Regelwerke mit Anforderungen zum Schutz von Beschäftigten, Dritten, Umwelt und Sachgütern dargestellt<sup>3</sup>

- Sozialgesetzbuch VII (SGB VII) mit Unfallverhütungsvorschriften (DGUV Vorschriften)
- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) mit Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)
- Chemikaliengesetz (ChemG) mit Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) und Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit Störfall-Verordnung (StörfallV) und Technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS)
- Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) mit entsprechenden Verordnungen (ProdSV)

Bei der Planung einer Anlage, spätestens bis zur Bereitstellung, ist eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen (§ 3 BetrSichV). Dabei sind sämtliche Gefährdungen im Zusammenhang mit der Anlage zu ermitteln und zu dokumentieren.

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebs in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen, bedürfen einer Genehmigung (§ 4 BImSchG). Die Konkretisierung der Anlagen erfolgt durch die 4. BImSchV. Bei chemischen Reaktionen sind insbesondere Anlagen von Interesse, die unter der Nummer 4.1 des Anhangs 1 zur 4. BImSchV aufgelistet sind (Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische Umwandlung in industriellem Umfang). Hierbei sind keine Mengenschwellen angegeben, aber der unbestimmte Ausdruck „industrieller Umfang“ verdeutlicht, dass nicht jede Anlage, in der eine chemische Umwandlung vonstatten geht, auch gleichzeitig genehmigungsbedürftig nach BImSchG ist. Die Einstufung ist einzelfallbezogen mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können (§ 5 BImSchG).

Für Betriebsbereiche, in denen bestimmte gefährliche Stoffe vorhanden sind oder bei einer Betriebsstörung entstehen können, gilt die Störfall-Verordnung (12. BImSchV, StörfallV). Die Anwendung der StörfallV ist an Mengenschwellen gebunden. Der Anhang I benennt eine Liste mit Stoffgruppen bzw. Stoffen, für die unterschiedliche Mengenschwellen angegeben sind.

Im Fokus stehen die besonderen Gefahren Stofffreisetzung (insbesondere toxischer Stoffe), Brände und Explosionen. Zur Beherrschung dieser Gefahren sind Betreiber und Betreiberinnen verpflichtet,

- die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern,
- vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten,
- ein schriftliches Konzept zur Verhinderung von Störfällen auszuarbeiten und umzusetzen.

Eine Anlage muss hinsichtlich Beschaffenheit und Betrieb dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen und nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren mit ausreichend zuverlässigen Messeinrichtungen und Steuer-

<sup>3</sup> Siehe Anhang 3, Nr. 1–10

oder Regeleinrichtungen ausgestattet sein. Diese müssen, soweit dies sicherheitstechnisch geboten ist, jeweils mehrfach vorhanden, verschiedenartig und voneinander unabhängig sein (§§ 3 und 4 StörfallV).

Bei Betriebsbereichen, die aufgrund der gehandhabten Mengen gefährlicher Stoffe unter die erweiterten Pflichten fallen (§§ 9–12 StörfallV), müssen Betreiberinnen und Betreiber zusätzlich

- einen Sicherheitsbericht erstellen, in dem dargelegt wird, dass ein Konzept zur Verhinderung von Störfällen umgesetzt wurde und ein Sicherheitsmanagementsystem vorhanden ist,
- interne Alarm- und Gefahrenpläne erstellen.

Die Behörden haben insbesondere zu prüfen,

- ob die Betreiberpflichten eingehalten werden (hierfür sind ein Überwachungssystem mit Inspektionen vor Ort und die Prüfung des Sicherheitsberichts vorzusehen),
- bei welchen Betriebsbereichen aufgrund ihres Standortes, ihres gegenseitigen Abstands und der in ihren Anlagen vorhandenen gefährlichen Stoffe eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Störfällen bestehen kann (in diesem Fall sind die Betreiberinnen und Betreiber entsprechend zu unterrichten).

Bevor mit Gefahrstoffen umgegangen wird, ist eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen (§ 5 ArbSchG), um die mit dem Umgang verbundenen Gefahren zu ermitteln, zu beurteilen und geeignete Maßnahmen zur Abwehr der Gefahren festzulegen. Dazu gehören auch Maßnahmen zur Verhinderung von Betriebsstörungen und Vorsorgemaßnahmen zu deren Begrenzung (§ 19 ChemG sowie § 13 GefStoffV).

Stoffe, die bei Drucküberschreitung aus Sicherheitseinrichtungen austreten, dürfen Beschäftigte oder Dritte nicht gefährden. Einrichtungen zum Ableiten von gefährlichen Stoffen dürfen nicht in Räume münden (zurückgezogene TRB 600 „Aufstellung der Druckbehälter“).

## 3.2 Festlegung des Sicherheitskonzeptes

Die Festlegung eines Sicherheitskonzeptes erfolgt zweckmäßigerweise in einem interdisziplinär zusammengesetzten Team, das

- mittels systematischer Methoden mögliche Abweichungen eines Verfahrens bzw. Verfahrensschrittes ermittelt,
- die potentiellen Auswirkungen abschätzt und danach
- angemessene Gegenmaßnahmen festlegt.

Hierzu werden umfassendes Wissen und Erfahrung benötigt zu Fragen

- des bereits laufenden bzw. geplanten Betriebes,
- der Abläufe im Betrieb,
- des Arbeits- und Umweltschutzes,
- der Prozesssicherheit,
- der technischen Sicherheit.

Dem Team sollten daher (zumindest zeitweise) Teilnehmer(innen) mit folgenden Funktionen angehören:

- Betriebsleitung, Betriebsingenieur/-in, Betriebschemiker/-in, gegebenenfalls Verfahrensentwickler/-in bzw. Projektleiter/-in,
- Betriebsmeister/-in, gegebenenfalls auch Anlagenfahrer/-in,
- Fachkraft für Arbeitssicherheit,

- Mess- und Regeltechniker/-in,
- Umweltschutzbeauftragte(r),
- Experte/Expertin zur Prozesssicherheit und zum Explosionsschutz,
- Befähigte Person zur Druckgeräterichtlinie.

Die Ausarbeitung des Sicherheitskonzeptes bedarf in der Regel einer systematischen Vorgehensweise. Je nach Komplexität des betrachteten Systems haben sich hierfür verschiedene Verfahren bewährt<sup>4</sup>. Üblich sind induktive Methoden, bei denen aus einem Einzelfehler auf mögliche Auswirkungen geschlossen wird. Sie bewerten Auswirkungen in erster Linie qualitativ.

### 3.2.1 Checklistenverfahren

Eine einfache und weit verbreitete Methode zur Identifikation von Gefährdungen einfacher Prozesse und Systeme ist die Abarbeitung spezifischer Checklisten. Ausgehend von vorstellbaren Prozessstörungen werden deren Auswirkungen eingeschätzt. Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist, dass die angewandte Checkliste für das betrachtete System zutreffend und vollständig ist. Verknüpfungen auftretender Fehlermöglichkeiten werden mit dieser Methode ungenügend erfasst.

### 3.2.2 PAAG/HAZOP

PAAG (Prognose von Abweichungen, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen) bzw. HAZOP (Hazard and Operability, IEC 61882) ist eine systematische Vorgehensweise zum Auffinden von Gefahrenquellen. Der zu untersuchende Prozess oder das System wird in Funktionseinheiten gegliedert und der bestimmungsgemäße Betrieb jeder einzelnen Einheit mit vorgegebenen Fragestellungen auf mögliche Abweichungen hinterfragt. Die Studie wird von einer interdisziplinären Gruppe bearbeitet, deren Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus unterschiedlichen Fachbereichen stammen. Somit können unterschiedliche Gesichtspunkte und Erfahrungen berücksichtigt werden.

Eine Sicherheitsbetrachtung nach PAAG bzw. HAZOP läuft üblicherweise in folgenden Schritten ab:

#### Prognose von Abweichungen

Im ersten Schritt gilt es, mögliche Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb des betrachteten Verfahrens vorherzusehen. Hierzu wird der Prozess zunächst in Einzelschritte (so genannte Sollfunktionen) zerlegt.

**Beispiel:**

Befülle den drucklosen Behälter R1 bei 80 °C mittels Dosierpumpe P3 innerhalb von 1 Stunde mit 25 kg der 30 %igen Katalysatorlösung RX13.

Ein Prozess kann dabei viele Dutzend bis hin zu Hunderten von Sollfunktionen umfassen. Entsprechend ist der Zeitbedarf für die Studie zu planen. Gegebenenfalls lässt sich die detaillierte Betrachtung auf sicherheitsrelevante Anlagenteile eingrenzen.

Zur Prognose der Abweichungen wird jede dieser Sollfunktionen mit so genannten Leitworten verknüpft. Das klassische PAAG- bzw. HAZOP-Verfahren nutzt hierzu die folgenden sieben Leitworte (in der Praxis kommen

4 Siehe Anhang 3, Nr. 19, 20, 22, 23, 27, 28

zahlreiche Modifikationen dieser Fragestellungen zum Einsatz, die häufig die Leitworte mit verschiedenen Prozessparametern konkretisieren).

**NEIN/NICHT:** Die Sollfunktion wird nicht erfüllt.

**Beispiel:**

Die Katalysatorlösung wird nicht zugegeben.

**MEHR:** Die quantitativen Größen der Sollfunktion werden überschritten.

**Beispiele:**

Es werden mehr als 25 kg Katalysatorlösung zugegeben.

Die Zugabe dauert länger als 1 Stunde.

Die Zugabe erfolgt bei einer Temperatur über 80 °C.

In dem Reaktor herrscht bei der Zugabe Überdruck.

Hinweis: die verschiedenen Szenarien werden jeweils einzeln und unabhängig voneinander betrachtet.

**WENIGER:** Die quantitativen Größen der Sollfunktion werden unterschritten.

**Beispiele:**

Es werden weniger als 25 kg Katalysatorlösung zugegeben.

Die Zugabe dauert weniger als 1 Stunde.

Die Zugabe erfolgt bei einer Temperatur unter 80 °C.

In dem Reaktor herrscht bei der Zugabe Unterdruck.

**SOWOHL ALS AUCH:** Die Sollfunktion wird vollständig erfüllt, gleichzeitig geschehen zusätzliche Effekte, kommen zusätzliche Stoffe ins Spiel, werden zusätzliche Wege beschriftet usw.

**Beispiele:**

Es wird zusätzlich zur Katalysatorlösung auch noch Rost eingetragen (dies könnte einen stärkeren katalytischen Effekt bedeuten).

Es wird zusätzlich eine inhibierende Verunreinigung eingetragen.

Es wird zusätzlich zum Reaktor R1 auch noch Reaktor R2 befüllt.

Die Katalysatorlösung gelangt (aufgrund einer Leckage) zusätzlich zum Reaktor R1 auch noch in die Umgebung.

**TEILWEISE:** Die Sollfunktion wird nur unvollständig erfüllt bzw. einzelne Teile der Sollfunktion sind nicht vollständig vorhanden.

**Beispiele:**

In der Katalysatorlösung fehlt das Lösemittel.

In der Katalysatorlösung fehlt der Katalysator.

**UMKEHRUNG:** Schritte der Sollfunktion verlaufen in umgekehrter Richtung oder in umgekehrter Reihenfolge.

**Beispiele:**

Aus dem Behälter R1 wird Katalysatorlösung entnommen.

Die Zugabe der Katalysatorlösung erfolgt vor bzw. nach den anderen Prozessschritten.

**ANDERS ALS:** In der Sollfunktion werden einzelne Elemente vollständig ausgetauscht.

**Beispiele:**

Zugabe eines anderen Stoffes als die Katalysatorlösung.  
Zugabe des Katalysators in einen anderen Behälter als R1.  
Zugabe auf eine andere Weise als mit Dosierpumpe P3.

### Auffinden der Ursachen

Das Expertenteam sucht auf der Basis von Prozesskenntnissen und eigenen Erfahrungen nach (organisatorischen und technischen) Ursachen, die dem jeweiligen Szenario zugrunde liegen könnten. Dabei werden in der Anlage bereits vorhandene Gegenmaßnahmen (z. B. Betriebsanweisungen, Überfüllsicherungen, Berstscheiben) zunächst nicht berücksichtigt.

**Beispiele für „Zu viel Katalysator zugegeben“:**

Falsche Mengenvorgabe in der Rezeptur.  
Falsche Mengenvorwahl am Zähler.  
Mehrfachzugabe infolge fehlender Dokumentation.  
Kein automatisches Abschalten der Pumpe.

In der Praxis wird häufig zusätzlich eine (semiquantitative) Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit vorgenommen.

### Abschätzen der Auswirkungen

Das Expertenteam überlegt bzw. berechnet auf der Basis der Prozesskenntnisse die möglichen Auswirkungen, die aus jedem Szenario hervorgehen könnten. Auch hier werden vorhandene Gegenmaßnahmen zunächst nicht berücksichtigt.

**Beispiel für „Zu viel Katalysator zugegeben“:**

Beschleunigung der Reaktion → Verstärkte Wärmeproduktion, die durch die vorhandene Kühlung nicht abgeführt werden kann → Temperaturanstieg in der Reaktionsmasse → Erreichen der Zersetzungstemperatur → Druck- und Temperaturanstieg über die Auslegungsgrenzen des Reaktors → Behälterversagen mit Austritt von gesundheitsschädlichem Produkt und entzündlichem Lösemittel → Gesundheitsgefahr für Beschäftigte und Dritte sowie Explosionsgefahr.

In der Praxis wird häufig zusätzlich eine (semiquantitative) Bewertung des Schadensausmaßes vorgenommen.

### Gegenmaßnahmen

Das Expertenteam legt für die identifizierten sicherheitsrelevanten Szenarien auf Basis der Erkenntnisse und der technischen Realisierbarkeit eintrittsverhindernde und gegebenenfalls schadensbegrenzende Maßnahmen fest. Dabei kann auf bereits vorhandene Einrichtungen und Anweisungen verwiesen werden, sofern diese unter den diskutierten Schadensverläufen als wirksam und ausreichend angesehen werden.

Die geforderte Zuverlässigkeit (Wirksamkeit) der zu treffenden Maßnahmen wird sich dabei an der Schwere der Auswirkungen und der Wahrscheinlichkeit für das Wirksamwerden der Ursachen orientieren. In der Praxis wird

das PAAG-Verfahren daher häufig mit risikobewertenden Methoden (z. B. ZHA, FMEA, LOPA, Risikograph) verknüpft und dabei als Instrument der Gefahrenidentifizierung verwendet.

### 3.2.3 Layers of Protection Analysis (LOPA)

Layers of Protection Analysis (LOPA) ist eine von dem Unternehmen DOW Chemical entwickelte und im Unternehmen weltweit angewandte Methode zur Bestimmung von Anforderungen für PLT-Schutzeinrichtungen.

Grundgedanke dieser Methode ist, dass jede verfahrenstechnische Anlage über verschiedene Ebenen der Sicherheit verfügt: beginnend beim Design (Maßnahmen der inhärenten Sicherheit), über organisatorische Maßnahmen (z. B. Betriebsanweisungen, Qualifizierung des Anlagenpersonals), PLT-Betriebs-, Überwachungs- und Schutzeinrichtungen, Druckentlastungseinrichtungen, bis hin zu Schadensbegrenzungseinrichtungen und Maßnahmen der Gefahrenabwehr. Jede dieser Ebenen verfügt über eine Schutzwirkung im Sinne der Störfallverhinderung und wirkt damit – jede für sich – risikoreduzierend.

Eine solche Analyse verschafft mittels systematischer Vorgehensweise und durch die Nutzung standardisierter Bezugsgrößen sowie der detaillierten Dokumentation jedes einzelnen Schrittes einen genauen Überblick über Gefahrenpotenziale und über die jeweilige Zuordnung von Maßnahmen zur Gefahrenreduzierung.

### 3.2.4 FMEA/Ausfalleffektanalyse

Die Ausfalleffektanalyse (engl. FMEA – Failure Mode and Effect Analysis, DIN EN 60812) beinhaltet neben dem Auffinden möglicher Ausfälle von Bauteilen auch Bedienfehler durch Beschäftigte. Die Auswirkungen von Ausfällen werden in Kategorien eingeteilt, anhand derer eine Bewertung und ein Vergleich der einzelnen Komponenten erfolgen kann. Hierbei werden nur Einzelfehler und keine Kombinationen betrachtet.

### 3.2.5 Ereignisablaufanalyse

Die Ereignisablaufanalyse (DIN 25419) kann qualitativ oder unter Verwendung quantitativer Aussagen durchgeführt werden. Dabei werden anlageninterne und -externe Ereignisse betrachtet, wenn sie in Bezug auf Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung bedeutsam sind. Verknüpfte Ereignisse lassen sich anhand eines Ereignisablaufdiagramms darstellen.

### 3.2.6 Fehlerbaumanalyse

Die bekannteste deduktive Methode ist die Fehlerbaumanalyse (DIN 25424). Ausgehend von einem Ereignis werden dessen mögliche Ursachen und Kombinationen von Ursachen gesucht und quantitativ mit Eintrittswahrscheinlichkeiten bewertet. Durch die Verknüpfungen werden Komponenteneinflüsse untereinander, Einwirkungen von außen und menschliche Fehlhandlungen berücksichtigt. Das Verfahren ist komplex und erfordert Kenntnisse über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Komponentenausfällen.

### 3.2.7 Zurich Hazard Analysis (ZHA)

Die „Zürich“ Gefahrenanalyse (englisch: Zurich Hazard Analysis, ZHA) basiert auf dem System-Safety-Konzept, das in den 1950er Jahren für die Luft- und Raumfahrtindustrie in den USA entwickelt wurde. Jedes Ereignis wird nach seiner Eintrittswahrscheinlichkeit (von sehr unwahrscheinlich bis häufig) und seiner Auswirkung (von

unbedeutend bis katastrophal) klassifiziert und das resultierende Risiko mittels einer zweidimensionalen Matrix dargestellt. Fortgeschrieben wurde die Methode im Risk Engineering der „Zürich“ Versicherungen, um für Kundinnen und Kunden systematisch und schnell Gefahren und Bedrohungen aufzuzeigen und sinnvolle Maßnahmen zur Risikobewältigung anzubieten.

### 3.3 Risikobewertung

Aus dem technischen Regelwerk lassen sich einige grundlegende Aspekte für die Risikobewertung ableiten.

Bei Ereignissen mit potentiell großen Auswirkungen darf ein einzelner Fehler nicht zum auslösenden Faktor werden. Ebenso ist es in der Regel nicht vertretbar, ein solches Ereignis allein durch personelle und organisatorische Maßnahmen verhindern zu wollen. Das gleichzeitige Auftreten zweier unabhängiger Fehler wird im Allgemeinen nicht unterstellt. Dabei muss gewährleistet sein, dass diese Fehler tatsächlich unabhängig voneinander sind und keine gemeinsame Ursache haben (Common Cause-Fehler). Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass der erste Fehler erkannt und behoben werden kann, bevor der zweite Fehler sich ereignet.

Mit technischen, gegebenenfalls redundanten Schutzeinrichtungen können auch schwierige Prozesse beherrscht werden. Hierbei ist zu beachten, dass jede technische Maßnahme auch organisatorische Aspekte nach sich zieht, weil Sicherheitseinrichtungen der Kontrolle und Wartung bedürfen.

Bei der Festlegung von Schutzeinrichtungen ist von dem Risiko auszugehen, das **ohne** Vorhandensein der zu betrachtenden Schutzeinrichtung anzunehmen ist. Wesentliche Gesichtspunkte dieser Betrachtung sind Art und Umfang der Auswirkungen (Schadensausmaß) und die zu erwartende Häufigkeit des unzulässigen Fehlzustandes der verfahrenstechnischen Anlage (Eintrittswahrscheinlichkeit).

Abbildung 3: Diskussion von Sicherheitskonzepten



### 3.4 Auswahl des Sicherheitskonzeptes

Die Sicherheit verfahrenstechnischer Anlagen wird zweckmäßigerweise bereits in der Planungsphase durch die Wahl möglichst inhärent sicherer Verfahren bzw. Verfahrensschritte berücksichtigt. Durch dieses Prinzip wird Einfluss genommen auf die Auswirkungen einer Abweichung. Beispiele für solche **Maßnahmen der inhärenten Sicherheit** sind in Abschnitt 4.1 dargestellt.



Können Gefährdungspotentiale nicht vollständig vermieden, sondern nur reduziert werden, kommen in der Regel **ereignisverhindernde Maßnahmen** zum Tragen, die die Häufigkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit) einer Abweichung reduzieren. Hierzu gehören in erster Linie Konzepte mit Mitteln der Prozessleittechnik (PLT<sup>5</sup>). Daneben stehen organisatorische Maßnahmen, die darauf abzielen, identifizierte Gefahrenpotentiale nicht wirksam werden zu lassen. Beispiele für ereignisverhindernde Maßnahmen sowie Anforderungen an deren Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind in Abschnitt 4.2 beschrieben.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft drei zeitliche Verläufe einer Prozessgröße und die Klassifizierung der davon abgeleiteten PLT-Einrichtungen.

Verbleibende Sicherheitsanforderungen können ggf. durch **konstruktive Maßnahmen** gelöst werden. Hierzu gehören z. B. die druckfeste/druckstoßfeste Auslegung von Behältern und Apparaten oder der Einbau von Druckentlastungseinrichtungen (Abschnitt 4.3).

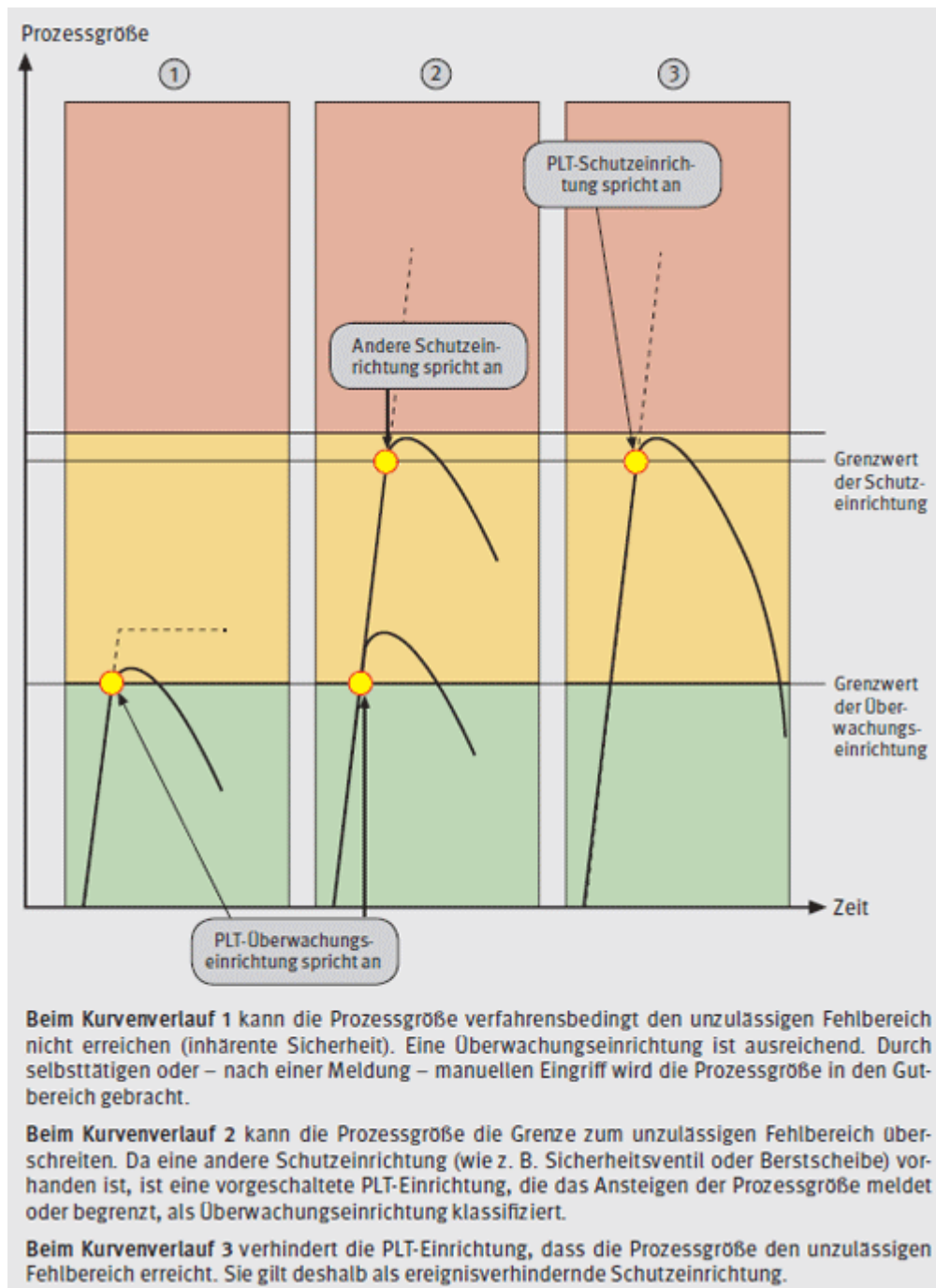
Abschnitt 4.4 beschreibt darüber hinaus einige verfahrenstechnische Prinzipien, die unter bestimmten Voraussetzungen zur Beherrschung durchgehender Reaktionen genutzt und als Notmaßnahmen zusätzlich eingesetzt werden können.

Da die Erfahrung lehrt, dass es beim Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen trotz ereignisverhindernder Maßnahmen zu einem unerwünschten Ereignis kommen kann, sind bei entsprechendem Gefahrenpotential schadensbegrenzende Schutzeinrichtungen vorzusehen. Diese werden in Kapitel 5 thematisiert.

---

5 Im Folgenden wird PLT auch als Synonym für die Bezeichnungen MSR- (Mess-, Steuer- und Regelungs-) Technik und EMR- (Elektro-, Mess- und Regelungs-) Technik verwendet.

Abbildung 4: Wirkungsweise von PLT-Einrichtungen



### 3.5 Dokumentation des Sicherheitskonzeptes

Nachdem das Sicherheitskonzept festgelegt ist, wird das Ergebnis dokumentiert. Damit soll gewährleistet werden, dass das Wissen bei personellen Veränderungen nicht verloren geht. Weiterhin dient dieses Dokument dazu, bei Änderungen an der Anlage zu prüfen, ob die geplante Änderung mit dem existierenden Sicherheitskonzept vereinbar ist.

Das Sicherheitskonzept kann beispielsweise in folgender Grundform aufgebaut sein: „Hauptrisiko des Rührkessels ist Bersten durch zu hohen Druck als Folge von zu hoher Temperatur und entsprechend hohem Dampfdruck des

Lösemittels. Dieses Risiko wird beherrscht durch eine sicherheitsrelevante Schaltung, die beim Erreichen des Temperaturgrenzwertes automatisch die weitere Eduktzufuhr unterbricht und den Heizdampf absperrt.“

Es empfiehlt sich, in dem Dokument sowohl den Schaltpunkt als auch die sicherheitsrelevanten Mess- und Regelstellen samt Armaturenbezeichnungen anzugeben. Entsprechend dem Gefährdungspotential sollten in der Dokumentation nicht nur das Hauptrisiko, sondern auch weitere Risiken samt Gegenmaßnahmen dargestellt werden.

## 4 Maßnahmen zur Beherrschung exothermer chemischer Reaktionen

### 4.1 Maßnahmen der inhärenten Sicherheit

Im übertragenen Sinne können Anlagen oder Verfahren als inhärent sicher bezeichnet werden, wenn das Gefahrenpotential entweder vermieden oder auf ein solches Maß gesenkt ist, dass selbst bei vollständiger Freisetzung von Energie- und Stoffpotentialen keine Gefährdung für Mensch und Umwelt entstehen kann.

Gegebenenfalls erfordert dies Änderungen

- des Verfahrensweges (z. B. Substitution thermisch instabiler Stoffe),
- des Verfahrenskonzeptes (z. B. Reihenfolge der Dosierung oder Konzentration der Reaktanden) oder
- der Verfahrensführung (z. B. temperaturkontrollierte Dosierung eines Reaktionspartners).

Dabei ist zu beachten, dass durch jede Änderung neue bzw. andere Gefahrenpotentiale entstehen können.

**Das Konzept der inhärenten Sicherheit beruht auf vier Grundsätzen**, die bei der Planung und Entwicklung von Verfahren sowohl auf die stoffumwandelnden Prozesse als auch auf die Apparate sowie die gesamte räumliche Anordnung und die Bedienung der Anlage angewandt werden sollten<sup>6</sup>.

#### 4.1.1 Substitution

**Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften sind durch solche Stoffe zu ersetzen, die weniger gefährliche Eigenschaften aufweisen.**

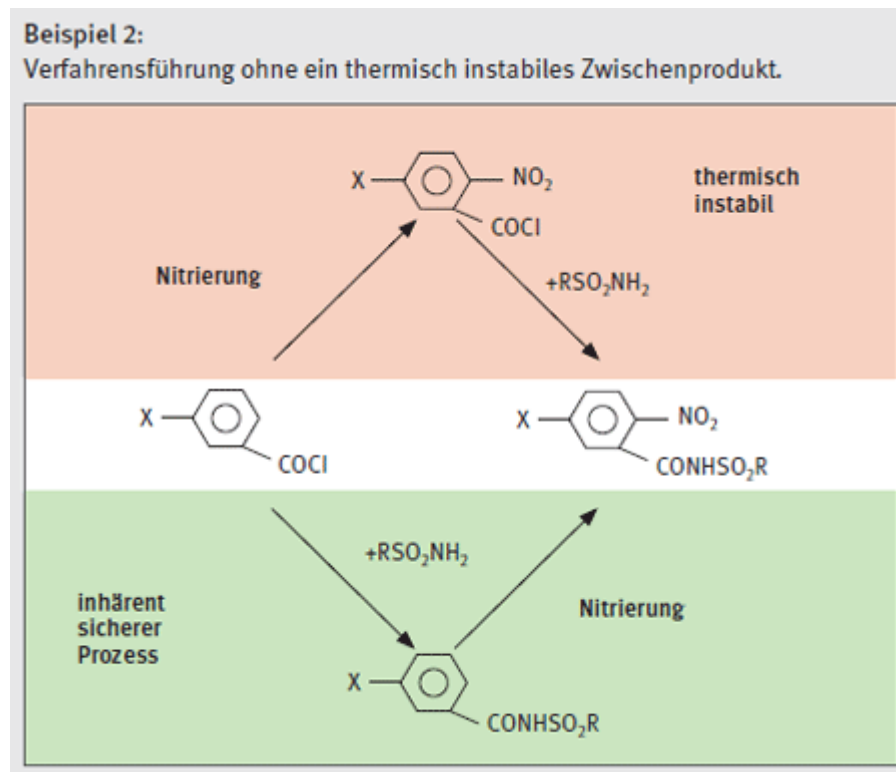
**Beispiel:**  
Ersatz brennbarer durch nicht brennbare Lösemittel.

Bezogen auf exotherme chemische Reaktionen bedeutet dieser Grundsatz: Von verschiedenen Verfahrensalternativen ist diejenige auszuwählen, die mit dem geringsten Risiko verbunden ist.

**Beispiel 1:**  
Einsatz von Katalysatoren, die bei Überschreitung einer bestimmten Temperatur deaktiviert werden.

6 Siehe auch Anhang 3, Nr. 31

Abbildung 5: Alternative Synthesewege mit und ohne thermisch instabilem Zwischenprodukt

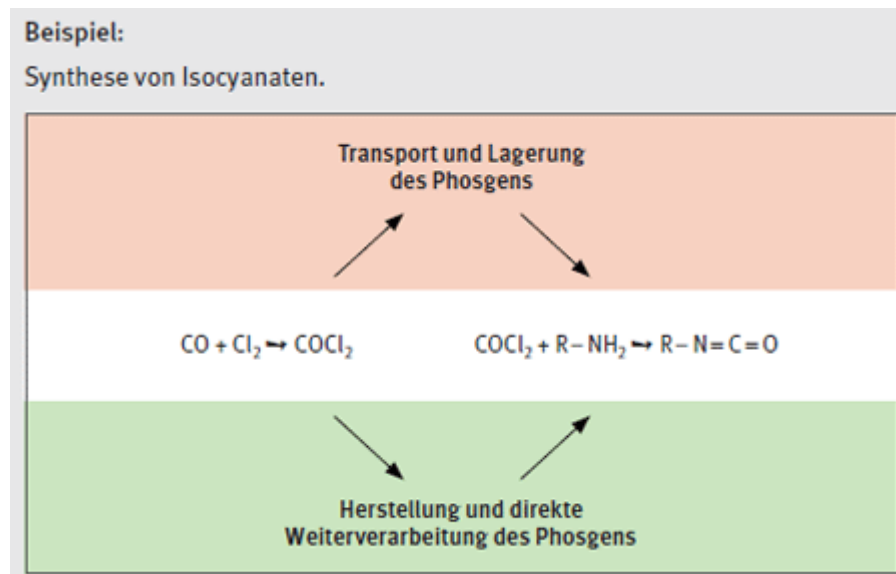


#### 4.1.2 Minimierung/Reduktion

Die Menge an Stoffen mit gefährlichen Eigenschaften ist auf ein Minimum zu reduzieren.

Bezogen auf Gefahrstoffe bedeutet dieser Grundsatz den Verzicht auf große Puffervolumina und die räumlich und zeitlich nahe Umsetzung gefährlicher Zwischenprodukte gegenüber einer Lagerung. Bezogen auf exotherme Reaktionen bedeutet das z. B. die Bevorzugung eines kontinuierlichen Verfahrens gegenüber einer batch-Fahrweise, bei der das gesamte Stoff- und Energiepotential auf einmal vorgelegt wird.

Abbildung 6: Alternative Synthesewege mit und ohne Zwischenlagerung



### 4.1.3 Moderation

Die Handhabungsform der Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften ist möglichst ungefährlich zu gestalten.

**Beispiel 1:**

Einsatz von pastösen Gemischen statt staubförmiger Reinstoffe.

**Beispiel 2:**

Tiefkaltlagerung von Flüssiggasen statt der Hochdrucklagerung der gleichen Gasmenge.

Bezogen auf exotherme chemische Reaktionen bedeutet dieser Grundsatz, die Verfahrensparameter Druck, Temperatur und Konzentration zu begrenzen.

**Beispiel 1:**

Verdünnung des Reaktionspotentials bei Diazotierungen in wässriger Lösung, um den adiabaten Temperaturanstieg auf einen ungefährlichen Wert zu begrenzen.

**Beispiel 2:**

Verwendung eines Lösemittels, dessen Siedepunkt unterhalb der Grenztemperatur  $T_{\text{exo}}$  (siehe Merkblatt R 001<sup>7)</sup> eine wirksame Wärmeabfuhr ermöglicht.

**Beispiel 3:**

Einbeziehen stoff- und energieverzehrender Reaktionsschritte zur Beseitigung von Stoff- und Energieüberschüssen, z. B. sofortige Umsetzung überschüssiger Gasmengen bei Chlor- oder Phosgenverarbeitungsanlagen in einem Wäscher oder Aktivkohleturm.

7) Siehe Anhang 3, Nr. 13

## 4.1.4 Vereinfachung

**Prozesse und Anlagen sind möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten.**

**Beispiel 1:**

Eindeutige, übersichtlich gestaltete und in chronologischer Abfolge verfasste Arbeitsanweisungen und Rezepturen sowie entsprechend gestaltete Module der automatischen Prozesssteuerung.

**Beispiel 2:**

Durchführung der einzelnen Prozessschritte in verschiedenen Reaktionsbehältern.

Bezogen auf exotherme chemische Reaktionen bedeutet dieser Grundsatz, unnötige Komplexitäten in der Anlage und im Reaktionssystem zu vermeiden und Möglichkeiten für Fehler und Fehlbedienungen sowie technische Störungen weniger wahrscheinlich zu machen. In der einschlägigen Literatur werden hierbei häufig auch konstruktive Maßnahmen genannt.

**Beispiel 1:**

Druckfeste Bauweise von Reaktoren, da bei entsprechender Auslegung (unter Berücksichtigung aller denkbaren Abweichungen) auf komplexe nachgeschaltete Entsorgungseinrichtungen verzichtet werden kann.

**Beispiel 2:**

Begrenzung der Heizmitteltemperatur, z. B. durch die Verwendung eines offenen Heizwasserkreislaufs, sodass die maximal erreichbare Temperatur des Reaktionsgemischs bei einer Störung nicht zu einer durchgehenden Reaktion führen kann.

**Beispiel 3:**

Begrenzung der Dosiergeschwindigkeit zur Vermeidung einer gefährlichen Akkumulation des Reaktionspotentials. Hierzu kann bei semi-batch-Prozessen der Mengenstrom der zudosierten Komponente über Lochblenden, Rohrdurchmesser oder Pumpenleistungen limitiert werden.

## 4.1.5 Grenzen der inhärenten Sicherheit

Inhärente Sicherheit ist oft nur begrenzt zu realisieren, da sie an Randbedingungen geknüpft sein kann. Für die im Abschnitt 4.1.3 genannten Beispiele ist es erforderlich, stets eine ausreichende Menge an Lösemittel zur Verfügung zu stellen, und zum anderen ist zu gewährleisten, dass die Verdampfungsleistung am Siedepunkt nicht die zulässigen Werte übersteigt.

Bei der Durchführung einer semi-batch-Reaktion zur Minimierung des Stoff- und Energiepotentials muss sichergestellt sein, dass die zugegebene Komponente hinreichend schnell abreagiert, sodass es nicht zu einer gefährlichen Akkumulation von Reaktionspotential kommt.

Bei der Substitution von Stoffen mit gefährlichen Eigenschaften ist zu beachten, dass Gefahrenpotentiale nicht immer unabhängig voneinander sind. Verfahrensänderungen, die bestimmte Gefahrenpotentiale vermeiden sollen, können andere beinhalten.

Daher ist bei Verfahrensänderungen stets die Bewertung aller Gefahrenpotentiale erforderlich. Ziel ist, bei verschiedenen Alternativen unter Berücksichtigung aller Gefahrenpotentiale ein ausgewogenes Sicherheitskonzept zu erreichen. Die Inhärenz wird damit zu einer relativen Größe. Ein sicherheitstechnisches Gesamtkonzept wird daher in der Regel immer aus Aspekten der inhärenten Sicherheit und zusätzlichen

technischen und organisatorischen Maßnahmen bestehen, welche die Randbedingungen für die Inhärenz gewährleisten. Man spricht dann von integrierter Sicherheit.

## 4.2 Ereignisverhindernde Maßnahmen

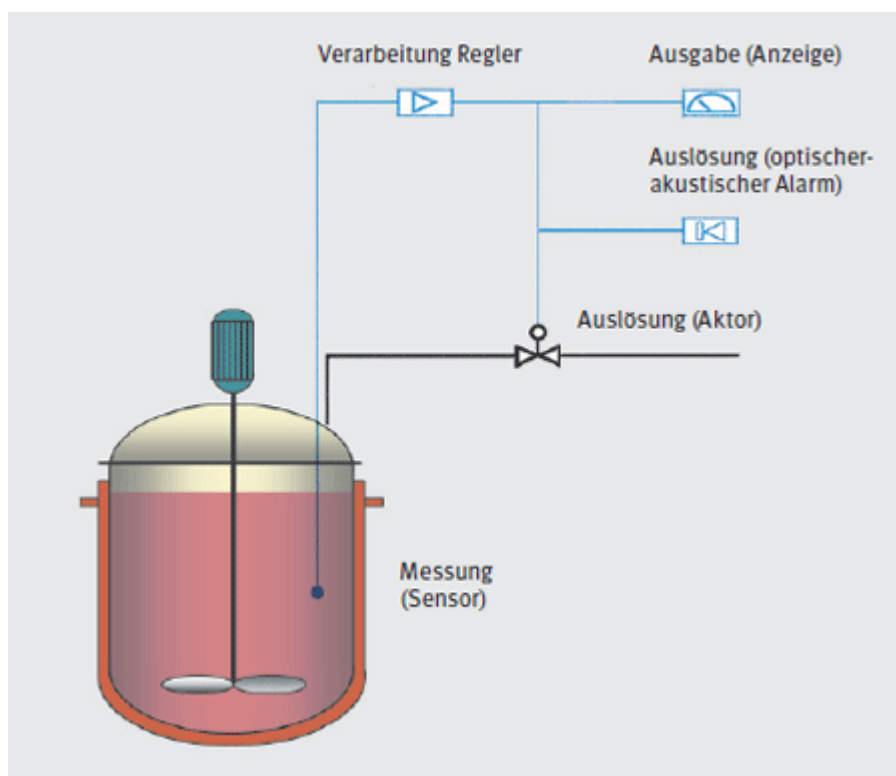
### 4.2.1 Einrichtungen der Prozessleittechnik (PLT)

Der Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen wird heute überwiegend mit Einrichtungen der PLT gesteuert und überwacht. Eine PLT-Einrichtung umfasst dabei

- einen oder mehrere Sensoren zur Messwertaufnahme (z. B. Thermoelemente),
- einen Logikteil zur Messwertverarbeitung (z. B. Rechner),
- einen oder mehrere Aktoren (z. B. Anzeigen, Signalgeber, angesteuerte Stellgeräte).

Der weitaus größte Teil der PLT-Einrichtungen wird im Sicherheitskonzept als Betriebs- und Überwachungseinrichtungen klassifiziert, an die keine besonderen Anforderungen hinsichtlich der sicherheitstechnischen Verfügbarkeit gestellt werden. Mit dem Fortschreiten der technischen Entwicklung und der zunehmenden Komplexität verfahrenstechnischer Anlagen wurden der PLT in erheblichem Maße auch Sicherheitsaufgaben übertragen.

Abbildung 7: Komponenten einer PLT-Einrichtung



Zur systematischen und nachvollziehbaren Ermittlung des von einer Schutzeinrichtung abzudeckenden Risikos kann die qualitative Methode nach VDI/VDE-Richtlinie 2180, Blatt 1<sup>8</sup>, herangezogen werden. Mit dem dort geschilderten Verfahren lassen sich aus vier Risikoparametern

- Schadensausmaß S
- Aufenthaltsdauer A
- Gefahrenabwendung G
- Eintrittswahrscheinlichkeit W

vier so genannte „Safety Integrity Levels“ (SIL 1 bis SIL 4) ermitteln (siehe auch Abbildung 8). Je höher der SIL-Wert, umso größer ist das von der PLT-Schutzeinrichtung zu beherrschende Teilrisiko und umso höher sind die Anforderungen an die daraus resultierenden Maßnahmen.

Bei der Auswahl der Komponenten einer PLT-Schutzeinrichtung sind Sensor, Signalverarbeitung und Aktor gegebenenfalls getrennt zu betrachten, wobei die PLT-Schutzeinrichtung insgesamt den festgelegten SIL-Wert erfüllen muss. Für produktberührte Sensoren und Aktoren sind die Einsatz- und Umgebungsbedingungen mit zu berücksichtigen.

Dieses Vorgehen ist nur anwendbar für einzelne PLT-Einrichtungen, nicht jedoch für eine gesamte Anlage oder Teilanlage. Üblicherweise werden die Risikoparameter konservativ bestimmt, d. h. in Zweifelsfällen wird jeweils ein höherer Wert gewählt.

Auf internationaler Ebene befasst sich die Norm IEC 61511<sup>9</sup> mit der funktionalen Sicherheit in der Prozessindustrie. Grundsätzliches Ziel dieser Norm ist die Vermeidung gefährlicher Ausfälle sicherheitsrelevanter PLT-Funktionen aufgrund systematischer oder zufälliger Fehler. Typische systematische Fehler sind dabei Planungs-, Design- oder Programmierfehler, typische zufällige Fehler Gerätefehler aufgrund defekter Bauteile.

Die Norm IEC 61511 definiert die quantitative sicherheitstechnische Verfügbarkeit sicherheitstechnischer Systeme zum Schutz von Personen und Umwelt. Die Absicherung gegen reine Sachschäden, also Schäden, bei denen keine Personen- oder Umweltschäden zu befürchten sind, liegt in der unternehmerischen Eigenverantwortung, kann jedoch nach der gleichen Methode vorgenommen werden.

---

8 Siehe Anhang 3, Nr. 26

9 Siehe Anhang 3, Nr. 25



Abbildung 8: Risikograph nach VDI/VDE 2180

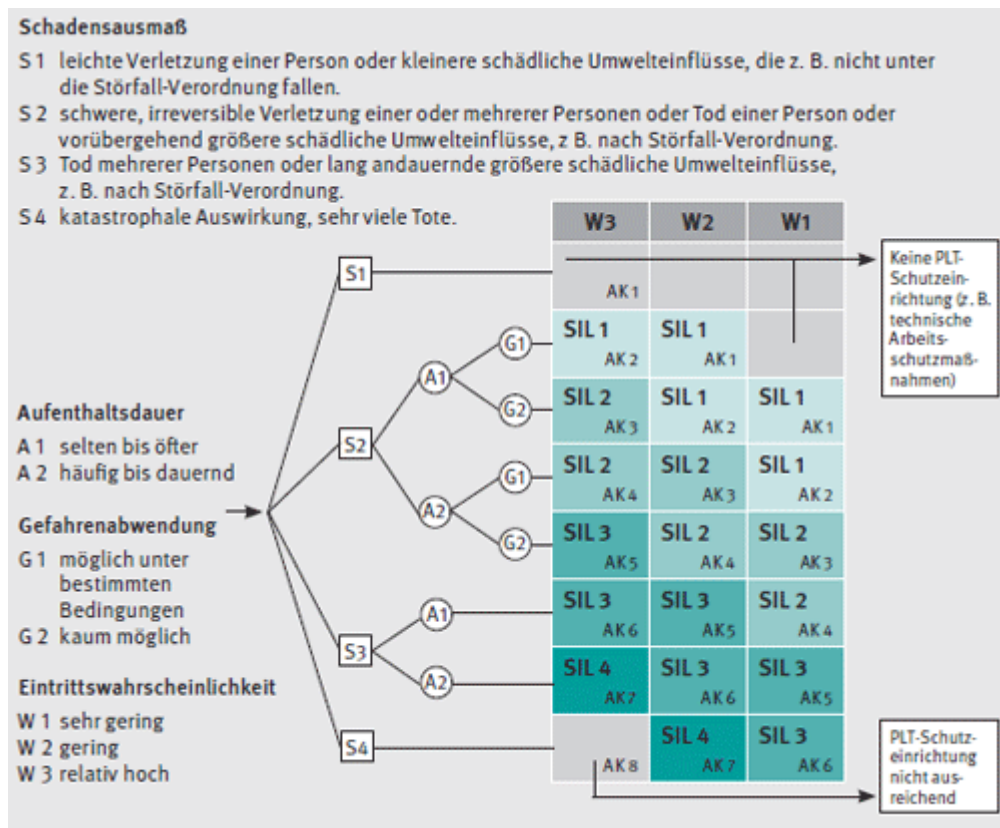


Abbildung 9 zeigt die für die verschiedenen SILs zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeiten für den in den verfahrenstechnischen Anlagen der chemischen und pharmazeutischen Industrie üblichen Fall, dass die Schutzfunktion seltener als einmal pro Jahr benötigt wird.

Abbildung 9: Quantitative Anforderungen der IEC 61511

SIL	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung	Mittlerer Ausfallabstand in Jahren
1	$> 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	10–100
2	$> 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	100–1000
3	$> 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	1000–10000
4	$> 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	10000–100000

Die Norm IEC 61511 betrachtet komplette Sicherheitsfunktionen. Das bedeutet, dass alle Komponenten vom Sensor über die Steuerung bis zum Aktor behandelt werden. Auch für eine sicherheitstechnische Funktion erforderliche Eingriffe des Bedienpersonals sind mit zu berücksichtigen.

Für die Ausführung der SIL-klassifizierten Schutzeinrichtungen gilt im Allgemeinen:

- Mit SIL 1 und 2 klassifizierte PLT-Schutzeinrichtungen können bei üblichen Einsatzbedingungen in einkanaliger betriebsbewährter Ausführung realisiert werden, wenn eine kurze Fehlererkennungszeit gewährleistet ist, in der eine nur geringe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines passiven Fehlers gegeben ist.
- Es kann erforderlichenfalls sein, mit SIL 2 klassifizierte PLT-Schutzeinrichtungen bei erschwerten Betriebsbedingungen mit Teilredundanz (d. h. redundanter Auslegung einzelner Geräte oder Baugruppen) zu installieren.
- Ab SIL 3 ist in der Regel eine redundante Ausführung erforderlich.
- Bei SIL 4 sind die Risiken nicht mehr allein mit Mitteln der Prozessleittechnik abzudecken. Es sind dann weitergehende Maßnahmen zu ergreifen (z. B. konstruktive Maßnahmen oder Änderungen des Verfahrens).

Eine Reihe von Anforderungen aus der IEC 61511 orientieren sich an der Normung im Bereich Qualitätssicherung. Beispiele dafür sind:

- der Sicherheitslebenszyklus einer Anlage (siehe Begriffsbestimmungen)
- Managementanforderungen. Diese beschäftigen sich insbesondere mit der Auswahl, Schulung und Verantwortung des Personals, das Tätigkeiten im Bereich der Anlagensicherung durchführt.
- das Konzept der Sicherheitsbetrachtungen, in denen abhängig vom Prozessrisiko die Anforderungen an die Schutzeinrichtungen festgelegt werden
- das so genannte „Vier-Augen-Prinzip“, nach dem an für die Anlagensicherheit wesentlichen Tätigkeiten mindestens eine weitere, von der Projektbearbeitung unabhängige Person zu beteiligen ist
- die Durchführung von Audits

Solche Standard-Anforderungen werden in der Regel über ein funktionierendes Qualitätssicherungssystem sowie vorhandene Standards zu Planung, Betrieb und Instandhaltung von PLT-Schutzeinrichtungen abgedeckt.

**Beispiele für Maßnahmen zur Fehlervermeidung sind:**

- Einsatz betriebsbewährter Geräte und Installationstechnik unter Berücksichtigung möglicher Produkt- und Umgebungseinflüsse (z. B. Korrosion, Abrasion).
- Kurze Fehlererkennungszeiten durch häufige Plausibilitätsprüfungen.
- Regelmäßige Wartung und Inspektion der Schutzeinrichtungen mit Sichtkontrolle und Funktionsprüfung.
- Einfacher, übersichtlicher Aufbau und wartungsfreundliche Installation der Schutzeinrichtungen. Möglichst ohne längeren Funktionsausfall prüfbar.
- Einsatz von qualifiziertem Personal in Betrieb und Instandhaltung.

**Beispiele für Maßnahmen zur Fehlerbeherrschung sind:**

- Fehlertoleranz durch redundante Ausführung, wenn möglich Ausschluss von Common Cause-Fehlern durch Diversität. Alternativ ist Fehlertoleranz durch die Verwendung fehlersicherer (fail-safe) oder selbstüberwachender Einrichtungen erreichbar.
- Sicherer Zustand bei Ausfall der Energieversorgung.

**Beispiele für die Umwandlung von passiven in aktive Fehler sind:**

- Einrichtungen zur Überwachung der Speiseenergien und der Funktionsfähigkeit der Übertragungswege (z. B. Ruhestromprinzip).

**Für die einzelnen PLT-Schutzeinrichtungen gelten darüber hinaus nach verschiedenen Regelwerken u. a. folgende Anforderungen:**

- Technische Maßnahmen
  - Die Funktion der Schutzeinrichtung hat Vorrang vor anderen Einrichtungen und Funktionen.
  - Wenn eine Schutzeinrichtung ausgelöst hat, darf das Quittieren des Alarms nicht zum selbsttätigen Fortführen des Betriebs der Anlage führen.
  - Die PLT-Schutzeinrichtung ist von PLT-Betriebseinrichtungen insoweit unabhängig, dass bei Ausfällen von PLT-Betriebseinrichtungen die Funktion der PLT-Schutzeinrichtung erhalten bleibt.
  - Gemeinsame Komponenten für PLT-Schutzeinrichtungen und PLT-Betriebseinrichtungen sind nach den Maßstäben für PLT-Schutzeinrichtungen auszulegen und zu betreiben.
- Kennzeichnung
  - Alle wichtigen Komponenten der PLT-Schutzeinrichtung sind in der Dokumentation, vor Ort, im Schaltraum und in der Messwarte als PLT-Schutzeinrichtung zu kennzeichnen.

Abbildung 10: Kennzeichnung von PLT-Schutzeinrichtungen



- Organisatorische Maßnahmen
  - Vor der Erstinbetriebnahme der PLT-Schutzeinrichtungen sind Funktionsprüfungen durchzuführen und zu dokumentieren. Zusätzlich werden die Planung und gegebenenfalls die Anwendersoftware entsprechend des Sicherheitslebenszyklus geprüft.
  - PLT-Schutzeinrichtungen sind regelmäßig auf äußerlich erkennbare Mängel oder Schäden zu prüfen.
  - PLT-Schutzeinrichtungen sind regelmäßig auf ihre Funktion zu prüfen. Die Prüfung ist zu dokumentieren.

Für die erforderlichen **wiederkehrenden Prüfungen von PLT-Schutzeinrichtungen** ist „der zeitliche Abstand zwischen zwei regelmäßigen Prüfungen so kurz zu wählen, dass für diesen Zeitraum ein passiver Fehler der Schutzeinrichtung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann“.

Bei der Festlegung der Prüffristen sind insbesondere zu beachten:

- die erforderliche Verfügbarkeit der Schutzfunktion.
- die eingesetzte Gerätetechnik und -qualität.
- der Redundanzgrad der einzelnen Komponenten.
- Vorgaben im technischen Regelwerk.

Falls keine vergleichbaren Erfahrungen vorliegen, ist der Prüfabstand zunächst den möglichen Frühausfällen bzw. Schwachstellen entsprechend angemessen kurz zu wählen. Er kann bei festgestellter Zuverlässigkeit mit zunehmender Betriebszeit verlängert werden.

## 4.2.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen

In Fällen, in denen technische Lösungen nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand zu realisieren sind, können organisatorische Maßnahmen in den verfahrenstechnischen Prozess eingebunden werden.

Organisatorische Schutzmaßnahmen sind Tätigkeiten, die das Betriebspersonal aufgrund einer vorgegebenen Anweisung durchführt, um den Übergang vom zulässigen Fehlbereich in den unzulässigen Fehlbereich einer sicherheitsrelevanten Prozessgröße zu verhindern.

Bei organisatorischen Schutzmaßnahmen ist zu differenzieren zwischen

- sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, die beim Normalbetrieb bzw. der Abarbeitung der Rezeptur notwendigerweise durchzuführen sind (z. B. Kontrolle der Identität und der Anzahl von Gebinden der Einsatzstoffe, Überprüfung der Stellung von Armaturen, Einhaltung der Reihenfolge der Arbeitsschritte) und
- Handlungen, deren Durchführung bei Abweichungen vom Gutbereich erfolgen müssen, um den unzulässigen Fehlbereich nicht zu erreichen.

Es ist Aufgabe der Betriebsleitung, die entsprechenden Betriebsanweisungen zu erstellen, die Beschäftigten zu unterweisen und gegebenenfalls mit praktischen Übungen zu schulen.

### **Bestimmungsgemäßer Betrieb**

Organisatorische Schutzmaßnahmen, die im Rahmen der Abarbeitung der Rezeptur ausgeführt werden, werden zweckmäßigerweise in der betriebsüblichen Fahrvorschrift dokumentiert und gegebenenfalls durch Gegenzeichnung bestätigt. Auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung ist z. B. bei Unterweisungen hinzuweisen.

Für die Ausführung von Schutzmaßnahmen mit ausschließlich organisatorischen Mitteln ist gegebenenfalls eine organisatorische Redundanz mittels zweier unabhängiger Kontrollen oder Messungen erforderlich.

Abbildung 11: Kontrolle von Prozessparametern vor Ort



### **Abweichende Betriebszustände**

Organisatorische Schutzmaßnahmen, die bei abweichenden Betriebszuständen (z. B. auf Alarme hin) vorzunehmen sind, müssen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Durchführbarkeit folgende Kriterien erfüllen:

- Der Zeitbedarf für die Durchführung und das Wirksamwerden der organisatorischen Maßnahme muss auch im ungünstigsten Fall stets kleiner sein als die Zeit vom Erkennen der Abweichung bis zum Erreichen des unzulässigen Fehlbereiches der betreffenden Prozessgröße.
- Die Kausalkette (d. h. der Zusammenhang zwischen Ursache und Auswirkung der Störung) muss eindeutig und klar erkennbar sein, so dass keine falschen Handlungen erfolgen.

- Das Anlagenpersonal muss mit der durchzuführenden Maßnahme vertraut sein und sie beherrschen. Hierzu kann regelmäßiges Training erforderlich sein.
- Die Durchführung der Maßnahme muss gefahrlos möglich sein.
- Die für die Durchführung der Maßnahme erforderlichen Einrichtungen müssen schnell erreichbar, gut zugänglich, eindeutig identifizierbar und leicht bedienbar sein.
- Alle im ungünstigsten Fall von den Anlagenfahrerinnen und -fahrern gleichzeitig abzuarbeitenden organisatorischen Maßnahmen müssen von den Beschäftigten durchgeführt werden können. Die Anzahl der installierten Alarme soll auf das notwendige Maß beschränkt werden.

Bei PLT-gesteuerten Anlagen ist das sicherheitstechnische Aktionsfeld des Operators bzw. der Operatorin der zulässige Fehlbereich (gelbe Zone in Abbildung 2). Um hier qualifiziert eingreifen zu können, ist ein dem Risiko angemessenes Alarmmanagement von Bedeutung. Eine Belastung des Operators bzw. der Operatorin mit einer Frequenz von zwei optischen oder akustischen Signalen pro Minute mit Spitzen bis einigen Dutzend Alarmen pro Minute führt zu einer Desensibilisierung und schließlich Überforderung, die eine Differenzierung der Dringlichkeit der eingehenden Informationen nicht mehr gestattet. Sinnvoll ist beispielsweise eine Unterscheidung der optischen und akustischen Signale in „Meldungen“ ohne akuten Handlungsbedarf und „Alarme“, die solche Prozesszustände anzeigen, die ein sofortiges Eingreifen des Operators bzw. der Operatorin erfordern, um z. B. durch ein komplettes Abschalten („Shut Down“) der Anlage eine akute Gefährdung von Personen oder Umwelt zu vermeiden.

Damit Alarme unverzüglich abgearbeitet werden können, sollte die Alarmfrequenz bei maximal einem Alarm in zehn Minuten begrenzt bleiben. Das bedingt auch, logische Folgealarme einer Störung (z. B. Druck- und Mengenstromabfall in einer Leitung nach dem Ausfall der Förderpumpe) in ihrer Bedeutung unterzuordnen. Für die organisatorischen Elemente, die zu einer solchen Schutz Einrichtung gehören, sind klare und eindeutige Handlungsanweisungen auszuarbeiten, zu trainieren und in der Leitwarte verfügbar zu halten.

### **Gestaltung optischer und akustischer Gefahrensignale**


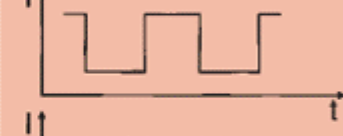
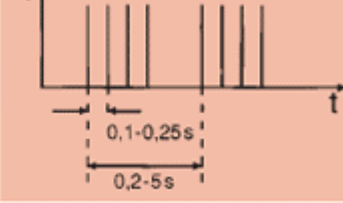
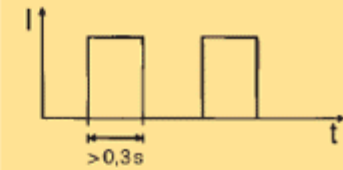
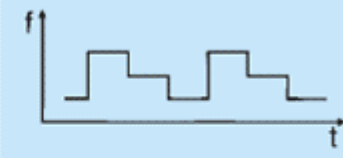
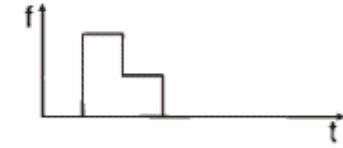
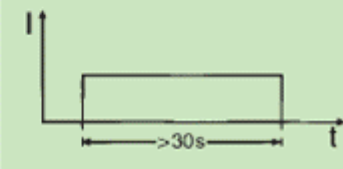
Optische und akustische Signale müssen auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen schnell und sicher erkannt werden<sup>10</sup>. Dies bedeutet:

- Signale müssen wahrnehmbar und identifizierbar sein
- Die Bedeutung des Signals muss erkannt werden können, z. B. durch Beschriftung am Signalgeber
- Das Signal muss eindeutig sein und der Gefahr bzw. der notwendigen Handlung zugeordnet werden können
- Das Signal muss sich von anderen Signalen und Störeinflüssen unterscheiden
- Die Gestaltung der Signale soll den Grad der Dringlichkeit einer Gefahrensituation wiedergeben (siehe auch Abbildung 12).

---

10 Siehe auch Anhang 3, Nr. 29

Abbildung 12: Akustische Gefahrensignale, aufgelistet nach dem Grad der Dringlichkeit (nach ISO 11429/ EN 981)

Bedeutung (Farbe)	Akustisches Signal	
	Merkmale in der on-phase	Zeit Muster
Gefahr (rot)	Gleitend	
	Wechselnd	
	Schallimpulse	
Vorsicht (gelb)	Kurzer Schall mit konstanter Frequenz	
Befehle für vorge- schriebenes Handeln (blau)	Folge von zwei oder drei Schallen mit konstanter Frequenz	
Durchsage Information (-)	Zweiton-Gong (ohne Wiederholung)	
Alles klar (grün)	Dauerton mit konstanter Frequenz	

I = Intensität, f = Frequenz, t = Zeit

### Dokumentation organisatorischer Schutzmaßnahmen

Sicherheitsrelevante Tätigkeiten sollen in knapper und allgemeinverständlicher Form dokumentiert werden. Dies kann beispielsweise nach folgendem Muster erfolgen (siehe Abbildung 13):

- Anweisungsteil mit
  - Möglichkeiten zur Erkennung des Anforderungsfalles (z. B. Benennung der Alarmstelle)
  - Beschreibung der Auswirkungen bei Nichtbeachtung der Anweisungen

- Sofortmaßnahmen zur Vermeidung der Auswirkung
- Hinweisen zum Verhalten bei Versagen der Maßnahmen (Auswirkungsbegrenzung).
- Informationsteil mit
  - Nennung möglicher Ursachen der Störung
  - Maßnahmen zur Beseitigung der Ursachen (in einigen Fällen können diese bereits zur Vermeidung der Auswirkung erforderlich sein)
  - Datum und Unterschrift (Betriebsleitung)

Abbildung 13: Beispielhafte Dokumentation sicherheitsrelevanter Tätigkeiten

Betrieb:	Sicherheitsrelevante Tätigkeit	Nr.
	Verfahren	
<b>Anforderungsfall</b> Alarm der Messstelle B04 T02 (Temperaturmessung im Lagerbehälter B04)		
<b>Auswirkungen bei Nichtbeachtung</b> Temperatur- und Druckanstieg im Behälter B04 (Wasserstoffperoxid 50 %) Bersten des Behälters		
<b>Erforderliche Sofortmaßnahmen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle des pH-Wertes (Sollwert: pH &lt; 5)</li> <li>• Bei pH &gt; 5 Pufferlösung zugeben (Tableau in Messwarte)</li> <li>• Aktivierung der Sprinkleranlage (Tableau in Messwarte)</li> <li>• Bei 45 °C Fluten mit Wasser (Tableau in Messwarte)</li> </ul>		
<b>Verhalten beim Versagen der Maßnahmen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäudealarm auslösen mit Durchsage: „Gebäude A12 unverzüglich räumen und Sammelplatz aufsuchen“.</li> <li>• Notruf an Feuerwehr (Telefon 112 oder Feuermelder)</li> <li>• Betriebsleitung informieren (Handynummer: ...)</li> </ul>		
<b>Mögliche Ursachen der Störung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zu hohe Lagertemperatur</li> <li>• Zu hoher pH-Wert</li> <li>• Eintrag von Rost o. Ä.</li> </ul>		
<b>Weitere Maßnahmen</b>		

<ul style="list-style-type: none"><li>• Temperaturverlauf beobachten</li><li>• Betriebsleitung informieren (Handynummer: ...)</li></ul>	
Datum	Unterschrift

## 4.3 Konstruktive Maßnahmen

Konstruktive Maßnahmen verhindern nicht das Eintreten einer Störung, sondern dienen dazu, unzulässige Auswirkungen auszuschließen.

Konstruktive Maßnahmen können in manchen Fällen so gewählt werden, dass die Anlage inhärent sicher ist (siehe hierzu auch Abschnitt 4.1.4).

Daneben werden in dieser Schrift unter „Konstruktiven Maßnahmen“ auch verstanden:

- Druckentlastungseinrichtungen (z. B. Sicherheitsventile, Berstscheiben)
- Nachbehandlungsanlagen zur Vernichtung bzw. Beseitigung von aus Druckentlastungseinrichtungen freigesetzten Stoffen (z. B. Wäscher, Absorber, Fackeln)
- Rückhaltesysteme für die aus Druckentlastungseinrichtungen freigesetzten Stoffe (z. B. blow-down-Systeme)

An konstruktive Maßnahmen werden seitens der Anlagensicherheit folgende **Grundanforderungen** gestellt:

- Auswahl geeigneter Werkstoffe und Funktionselemente
  - Berücksichtigung mechanischer Beanspruchungen (z. B. Zug, Druck, Biegung, Vibration)
  - Berücksichtigung physikalischer/chemischer Beanspruchungen durch Verfahren und Umwelt (z. B. Temperatur, Korrosion, Versprödung)
  - unkritisches Verhalten im Versagensfall (z. B. „Leck vor Bruch“)
  - Qualitäts- und Funktionsprüfung bei der Herstellung, Montage und vor Inbetriebnahme
- Fehlerverzeihende Gestaltung (z. B. Verwendung von doppelwandigen Rohrleitungen und Behältern, wobei der Zwischenraum auf einen Stoffaustritt überwacht wird)
- Organisatorische Maßnahmen und Kennzeichnung in Analogie zu den PLT-Einrichtungen.

### 4.3.1 Druckentlastungseinrichtungen<sup>11</sup>

Für die Absicherung druckführender Anlageteile gegen eine Überschreitung des maximal zulässigen Druckes für die vorgesehene Betriebsweise sind Druckentlastungseinrichtungen wie Sicherheitsventile und Berstsicherungen alternative Schutzmaßnahmen im Rahmen des Sicherheitskonzeptes. In Ausnahmefällen können statt dieser selbsttätig wirkenden Sicherheitseinrichtungen auch aktiv angesteuerte Entspannungseinrichtungen verwendet werden.

Für die **Einbindung von Druckentlastungseinrichtungen in das Sicherheitskonzept** zur Beherrschung exothermer Reaktionen sind folgende Verfahrensbedingungen einzuhalten:

11 Siehe auch Anhang 3, Nr. 33–35



- ausreichende Menge an verdampfenden Stoffen
- geringe reaktive Masse
- geringe Reaktionsgeschwindigkeit (d. h. geringe Wärmeproduktionsrate, geringe Gasfreisetzungsrate)

**Folgende Stoffeigenschaften sind grundlegende bzw. begünstigende Voraussetzungen für die Anwendung der Druckentlastung:**

- ausreichend hoher Dampfdruck
- große Verdampfungswärme
- geringe Neigung zum Aufschäumen
- niedrige Viskosität
- kein Zupolymerisieren, Verkleben oder Korrodieren der Druckentlastungseinrichtung zu erwarten
- niedrige Schmelztemperatur (kein Erstarren nach der Entspannung).

Die **Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen** kann Probleme bringen bei:

- Mehrzweckanlagen mit unterschiedlichen Verfahren
- Batch-Prozessen mit unterschiedlich hoch komprimierten Inertgasmengen
- kontinuierlich betriebenen, gefluteten Kessel-Kaskaden.

Aus Sicherheitseinrichtungen austretende Gase, Stäube und Flüssigkeiten müssen gefahrlos abgeleitet werden können. Schutzziel ist, gefährliche Auswirkungen, die durch eine störungsbedingte Freisetzung von Gefahrstoffen aus Sicherheitsventilen, Berstscheiben oder anderen Notentspannungseinrichtungen entstehen können, für Beschäftigte und Dritte auszuschließen.

Abbildung 14: Sicherheitsventil



Für die Beurteilung, ob ein Stoff in die Atmosphäre (d. h. in einen Raum oder ins Freie) oder überhaupt nicht freigesetzt werden darf, sind folgende Kriterien maßgebend:

- An ständigen Arbeitsplätzen sind bei Stofffreisetzungen die Forderungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes zu erfüllen.

- In die Atmosphäre dürfen nur Stoffe und Zubereitungen gelangen, die entweder keine Eigenschaftsmerkmale nach Gefahrstoffverordnung<sup>12</sup> aufweisen oder durch die eine Gefährdung von Personen durch Unterschreitung anerkannter Grenzwerte, z. B. UEG, ERPG-2-Wert<sup>13</sup>, ausgeschlossen wird.
- Sonstige Gefährdungen, z. B. durch Brand, Explosion, Hitze, Strömungsimpulse, müssen berücksichtigt werden.

Die Bewertung, ob gefährliche Auswirkungen auftreten, wie sie aufgrund der Stoffeigenschaften zu betrachten sind und wann eine Ableitung in die Atmosphäre zulässig ist, kann gemäß Stoffzuordnung nach Anhang 1 dieser Schrift erfolgen.

Die für ein gefahrloses Ableiten von Stoffen bestehenden Alternativen sind in den Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.5 beschrieben.

### **4.3.2 Betriebliche Entsorgungssysteme**

Beim Einsatz betrieblicher Entsorgungssysteme ist zu beachten:

- ausreichende Kapazität (Mengenstrom, Menge)
- Rückwirkungen auf Druckentlastungseinrichtungen durch Druckverluste in Rohrleitungen und Apparaten
- Unabsperrbarkeit des Weges.

Beim Einsatz von Wäschern sind die Verträglichkeit mit Waschflüssigkeit bzw. anderen betrieblichen Stoffen zu berücksichtigen, die Möglichkeit des Rückströmens und die Abwasserentsorgung zu bedenken.

Bei der Einbindung von Fackeln und thermischen Abluftreinigungsanlagen sind die Gefährdung durch entstehende Verbrennungsgase zu beachten und der Einfluss auf das vorhandene Explosionsschutzkonzept zu prüfen.

12 Siehe Anhang 3, Nr. 5

13 UEG: Untere Explosionsgrenze, ERPG: Emergency Response Planning Guidelines

Abbildung 15: Fackeln dienen der gefahrlosen Ableitung von Stoffen



### 4.3.3 Geschlossene Auffangsysteme mit Tauchvorlagen

Geschlossene Auffangsysteme mit Tauchvorlagen (Rohrverteiler oder Strahlkondensatoren) sind für lösliche, kondensierbare oder chemisch umsetzbare Stoffe geeignet. Der Kondensationsgrad („Wirkungsgrad“) steigt mit der Qualität der Dampfverteilung, der Absenkung der Temperatur des vorgelegten Kühlmittels und der Verringerung der Inertgasmenge. Gegebenenfalls ist eine Beheizung (Frostschutz) oder Kühlung der vorgelegten Flüssigkeit erforderlich.

Ebenfalls zu beachten ist der möglicherweise erhöhte Gegendruck durch das Auffangsystem, der die Funktion der Sicherheitseinrichtung beeinträchtigen kann.

### 4.3.4 Schwerkraftabscheider

Bei einer Zweiphasenströmung wird das aus der Druckentlastungseinrichtung austretende Zweiphasengemisch über die Ausblaseleitung – am Besten tangential – in einen Abscheidebehälter geleitet. Die Phasentrennung von Gas/Dampf und Flüssigkeit erfolgt durch Zentrifugalkraft und Schwerkraft. Die flüssige Phase wird in dem Abscheider aufgefangen und kann entweder durch vorgelegte Flüssigkeit oder durch zusätzliche Kühleinrichtungen abgekühlt werden. Um Nachreaktionen im Abscheider zu vermeiden, wird die vorgelegte Flüssigkeit häufig zusätzlich mit einem Reaktionsstopper versetzt.

### 4.3.5 Direkte Ableitung in die Atmosphäre

Bei einer direkten Ableitung in die Atmosphäre muss eine Einzelfallbewertung der Gefährdung von Personen und der Umwelt erfolgen in Abhängigkeit von

- Stoffeigenschaften,

- Menge der ausgeblasenen Stoffe und
- betrieblichen Rahmenbedingungen.

Hierzu wird mit Hilfe anerkannter Ausbreitungsmodelle (zur Beschreibung z. B. der Freistrahlausbreitung oder der atmosphärischen Ausbreitung) der zeitliche Verlauf der Konzentration der emittierten Stoffe – abhängig von der Entfernung zur Druckentlastungseinrichtung – berechnet.

Als Maßstab für die Bewertung werden stoffspezifische Grenzwerte genutzt, die in erster Linie auf die akute, kurzzeitige Gefährdung Bezug nehmen, oder Dosisbetrachtungen angestellt.

## 4.4 Notmaßnahmen zur Beherrschung durchgehender Reaktionen

Nachfolgend sind verschiedene Maßnahmen genannt, die zur Beherrschung durchgehender chemischer Reaktionen möglicherweise zum Einsatz kommen können. Als reine Notmaßnahmen dienen sie nicht zur Beherrschung des Normalbetriebes, sondern verhindern als Schutzmaßnahmen das Verlassen des bestimmungsgemäßen Betriebs. Die Auslösung der Maßnahme kann je nach Situation technisch oder organisatorisch erfolgen. Allen Maßnahmen ist gemeinsam, dass sie im Vorfeld auf Realisierbarkeit und Wirksamkeit überprüft werden müssen.

### 4.4.1 Notkühlung

Bei einem Ausfall des Kühlsystems kann Kühlwasser (z. B. von einem Hydranten) in das Kühlsystem eingespeist werden. Bei dieser Maßnahme ist allerdings darauf zu achten, dass die Temperatur des Kühlsystems nicht unter die Erstarrungstemperatur der Reaktionsmasse fällt, da sonst durch Krustenbildung der Wärmedurchgang reduziert wird.

### 4.4.2 Notdurchmischung

Größere Massen verhalten sich bei Ausfall der Rührung praktisch adiabatisch, auch wenn sie von außen gekühlt werden. In gewissen Fällen kann die Einleitung von Stickstoff in die Reaktionsmasse als Notrührung dienen.

### 4.4.3 Notstopper

Gewisse Reaktionen können durch Zugabe eines geeigneten Stoffes gestoppt werden. Dies ist z. B. bei katalytischen Reaktionen der Fall, bei denen die Zugabe einer kleinen Menge eines Katalysatorgiftes oder eines Inhibitors genügt, um die Reaktion zu stoppen. Bei der Zugabe einer kleinen Menge eines Stoffes in einen großvolumigen Reaktor ist das Einmischen dieses Stoffes kritisch. In diesem Fall wird der Inhibitor unter Druck vorgelagert und praktisch in die Reaktionsmasse „eingeschossen“.

### 4.4.4 Notverdünnung

Durch die Verdünnung mit einem inerten und kalten Stoff (in der Regel Lösemittel) kann die Reaktionsgeschwindigkeit reduziert oder sogar die Reaktion zum Stillstand gebracht werden. Kritisch sind hier Menge, Temperatur und Zugabegeschwindigkeit des Verdünnungsmittels. Das Einmischen muss sorgfältig

untersucht werden. Das erforderliche Leervolumen im Reaktor und eine Vorlage mit dem Verdünnungsmittel müssen zur Verfügung stehen. Um Spontanverdampfung zu vermeiden, dürfen Lösemittel nicht zugegeben werden, wenn die Temperatur im Reaktor oberhalb des Siedepunktes des Lösemittels liegt.

#### 4.4.5 Nottransfer

Alternativ zur Notverdünnung kann die Reaktionsmasse aus dem Reaktor in einen Auffangkessel mit vorgelegtem Verdünnungsmittel abgelassen werden. Dabei muss beachtet werden, dass eine Verstopfung unvermeidlich zum unerwünschten Ereignis führen würde.

Wichtig ist, dass das Bodenventil und die Transferleitung auch im energielosen Zustand den Weg freigeben. Der Auffangbehälter muss mit vorgelegtem Verdünnungsmittel immer bereitstehen. Diese Maßnahme ist daher besonders dann empfehlenswert, wenn die Reaktionsmasse im bestimmungsgemäßen Betrieb zur Aufarbeitung auf diese Weise abgelassen werden muss. Die Einleitung dieser Maßnahme erfolgt üblicherweise nur organisatorisch.

## 5 Schadensbegrenzende Schutzeinrichtungen

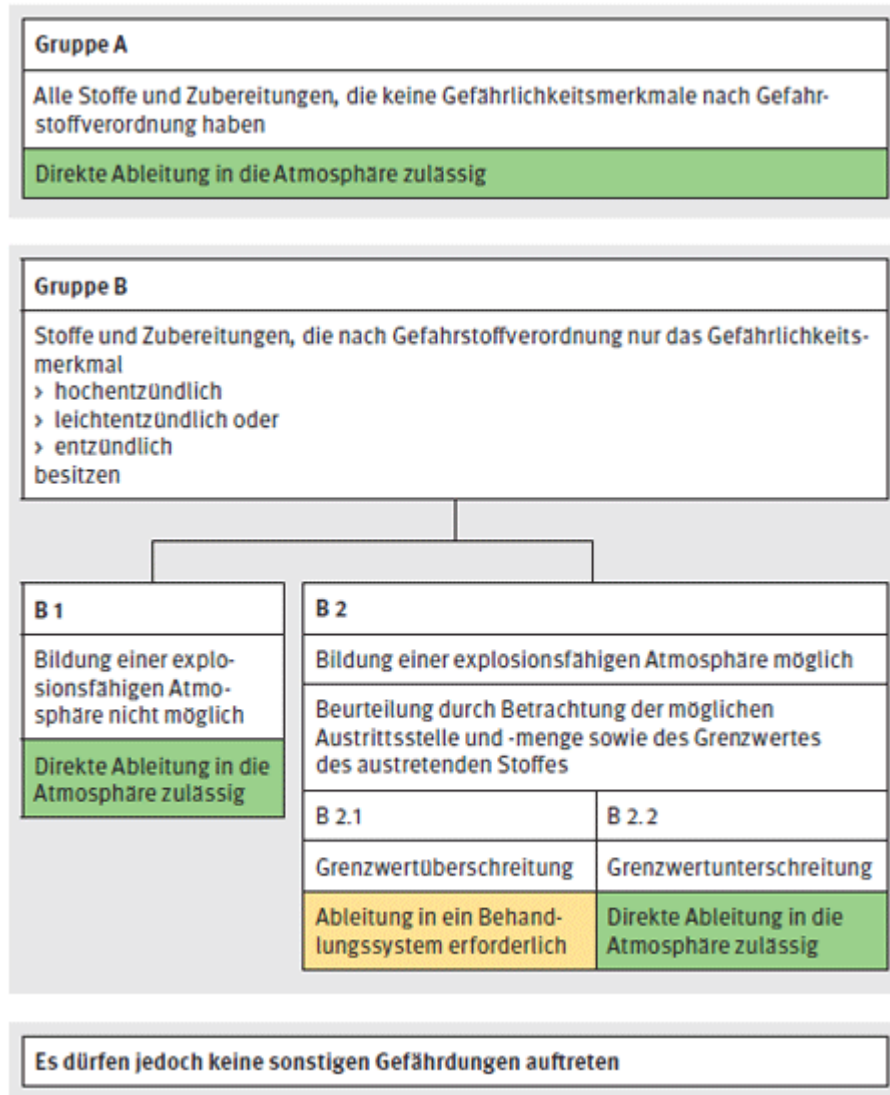
Trotz aller Maßnahmen kann es beim Betrieb einer verfahrenstechnischen Anlage keine hundertprozentige Sicherheit geben. Daher geht z. B. die Störfall-Verordnung von einem Mehrbarrierenprinzip als Sicherheitsstrategie aus. Dies beinhaltet zum einen die Maßnahmen zur Verhinderung einer Stoff- oder Energiefreisetzung (ereignisverhindernde Maßnahmen), zum anderen auch Maßnahmen, welche den Schaden begrenzen (schadensbegrenzende Maßnahmen). Weitergehende schadensbegrenzende Schutzeinrichtungen können gemäß den Vorgaben der Störfall-Verordnung unter anderem Wasserberieselungsanlagen, Wasserschleieranlagen, Schutzmauern, Sicherheitsabstände und Gaswarnanlagen darstellen.

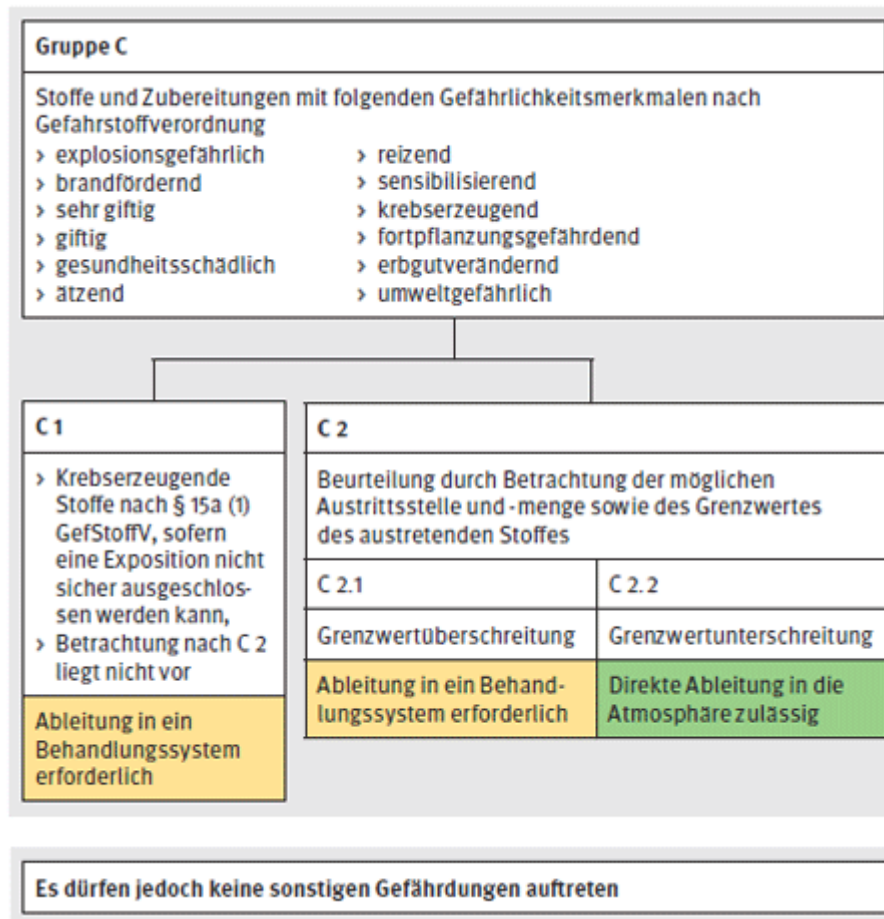
Abbildung 16: Wasserschleier der Feuerwehr dienen der Schadensbegrenzung nach einem Stoffaustritt



## Anhang 1: Schema zur Beurteilung des gefahrlosen Ableitens von Stoffen nach Gefährlichkeitsmerkmalen

Abbildung 17: Schema zur Beurteilung des gefahrlosen Ableitens von Stoffen nach Gefährlichkeitsmerkmalen (entspricht Abschnitt 3.4 der zurückgezogenen TRB 600, Ausgabe 6/98)





## Anhang 2: Beispiele zur Absicherung von Reaktoren

Zur Verdeutlichung der wesentlichen Schritte bei der Beurteilung des Gefahrenpotentials einer exothermen chemischen Reaktion und bei der Entscheidungsfindung über Art und Umfang der erforderlichen Maßnahmen werden im Folgenden drei „didaktische“ Beispiele (Fall 1–3) aus der TRAS 410 dargestellt.

### Prämissen

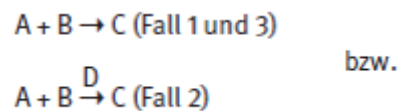
- Die Reaktion verläuft jeweils homogen, einstufig und ohne Nebenreaktionen. Der Reaktionsmechanismus bleibt unverändert. Wechselwirkungen der Stoffe und Reaktionsgemische mit den Apparatewerkstoffen werden ausgeschlossen.
- Relevante Stoffeigenschaften sowie verfahrens- und anlagentechnische Parameter sind für die Beispiele und die angegebenen Lösungen vollständig bekannt, jedoch nur so weit nötig angeführt. Erforderliche Berechnungen erfolgten auf der Grundlage der angegebenen Literatur.
- Es wird für alle Beispiele stets der gleiche, begrenzte Ausschnitt aus dem Spektrum möglicher Störungen betrachtet.
- Die betrachteten Störungen werden als voneinander unabhängig angesehen. Sie beruhen nicht auf einer gemeinsamen vorgelagerten Ursache. Ebenso sollen die getroffenen Maßnahmen unabhängig voneinander wirken.

- Die vorgeschlagenen technischen und organisatorischen Maßnahmen sind ausschließlich präventiver Art und stellen jeweils nur eine Alternative aus verschiedenen möglichen und gleichwertigen Problemlösungen dar. Es wird also nicht ausgeschlossen, dass auch die konstruktiven Maßnahmen druckfeste Bauweise oder Druckentlastung (erforderlichenfalls mit Rückhalte-System) zum Ziel führen können. Dabei sind in der Regel weitergehende Untersuchungen und Erkenntnisse erforderlich.
- Es wird vorausgesetzt, dass die Maßnahmen für die jeweiligen Beispiele realisierbar sind.

Daraus folgt, dass die Beispiele und Lösungen nicht auf jeden Einzelfall der Praxis, bei dem weitaus komplexere Gegebenheiten vorliegen können, unmittelbar und ohne Ergänzung oder Modifikation übertragen werden dürfen. Im Besonderen darf die Störungsbetrachtung nicht auf die für die Beispiele ausgewählten Störungen beschränkt bleiben, und mögliche Abhängigkeiten der Störungen voneinander sind zu ermitteln und angemessen zu berücksichtigen.

## Verfahren und Apparate

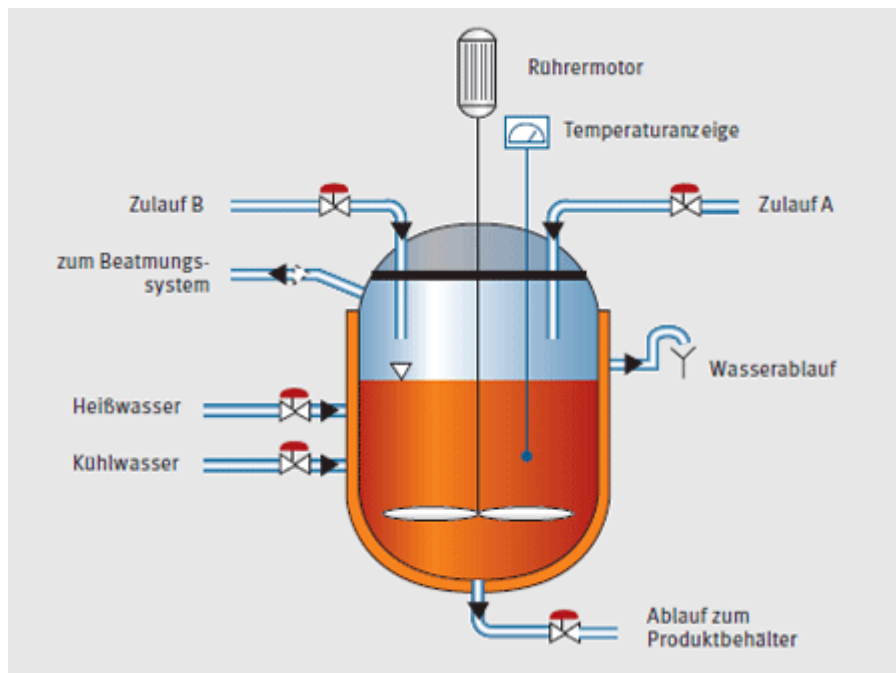
In einem nicht absperrenbaren Reaktionskessel, der über seinen Mantel mit einem offenen Wasserkreislauf beheizt und gekühlt werden kann, erfolgt unter Rührung die Reaktion



Hierzu wird die Komponente B bei Raumtemperatur im Reaktor vorgelegt. Im Fall 2 sei B in einem inerten Lösemittel D gelöst. Anschließend wird auf Solltemperatur geheizt ( $T_{\text{Soll}} = 80 \text{ °C}$ ). Die Komponente A, die kalt (Raumtemperatur) in einer Dosiervorlage bereitgestellt wird, soll dann über einen bestimmten Zeitraum mit konstanter Geschwindigkeit zudosiert werden. Die bei der Reaktion frei werdende Wärme wird über das Heiz-/Kühlwasser abgeführt (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Reaktionskessel (schematisch)



## Gefahrenpotential

Die Reaktion sei in allen Fällen exotherm, die jeweilige Reaktionswärme  $Q_R$  bekannt, der adiabatische Temperaturanstieg betrage jeweils  $\Delta T_{ad} > 50$  K.

Unterhalb von 60 °C beginnt die Reaktion „einzuschlafen“, so dass mit unerwünschter Akkumulation der Reaktanden zu rechnen ist („Depotbildung“). Bei erneutem Anspringen der Reaktion wären hohe Reaktionsleistungen zu erwarten. Aus DTA- und kalorischen Messungen ist bekannt, dass sich das Endprodukt oberhalb der Grenztemperatur  $T_{exo}$  stark exotherm in einem unkontrollierten Reaktionsablauf zersetzt:

C → Zersetzungsprodukte

Dabei findet eine starke Gasentwicklung statt, die die Auslegungsgrenzen des Behälters überschreiten würde:

$$(dM dt^{-1})_{\text{Zersetzung}} > (dM dt^{-1})_{\text{max. Auslegung}}$$

Die jeweiligen Temperaturen  $T_{exo}$  wurden entsprechend den Messergebnissen festgelegt und liegen deutlich oberhalb 100 °C. Wegen der Verknüpfung von  $T_{exo}$  mit der Gasentwicklung muss hier die Auslegungsgrenze hinsichtlich der Temperatur ( $T_{\text{max. Auslegung}}$ ) gleich  $T_{exo}$  gesetzt werden.

## Normalbetrieb

Die Untersuchungen der Ausgangskomponenten A und B zeigen Exothermien und Gasentwicklung erst oberhalb von 300 °C. Diese liegen energetisch bei  $300 \text{ Jg}^{-1}$ , so dass explosive Eigenschaften oder Deflagrationsfähigkeit nicht zu erwarten sind.

Untersuchungen der Reaktionsmischungen zu unterschiedlichen zeitlichen Phasen der Reaktion zeigen keine Notwendigkeit,  $T_{\text{exo}}$  herabzusetzen, und bestätigen die Reaktionswärme des gewünschten Prozesses.

Die Stoffe A und B sowie die Reaktionsgemische haben unterhalb von  $T_{\text{exo}}$  einen vernachlässigbaren Dampfdruck. Das in Fall 2 verwendete Lösemittel D ist für die betrachtete Reaktion chemisch inert, hat einen hohen Siedepunkt  $T_{\text{S}}$  über 180 °C und ist bis über 200 °C thermisch stabil.

Eine signifikante Gasentwicklung ist somit nur in Verbindung mit der Zersetzungsreaktion des Stoffes C zu erwarten; für den Normalbetrieb sind alle möglicherweise entstehenden Dampf-/Gasmengen mit der vorhandenen Ausrüstung beherrschbar.

Aus verfahrenstechnischen Gründen und hier insbesondere wegen des relativ hohen adiabatischen Temperaturanstiegs  $\Delta T_{\text{ad}}$  von mehr als 50 K müssen Wärmeabfuhrleistung und Reaktionsleistung aufeinander abgestimmt sein. Die Kühlleistung ist daher so gewählt, dass die bei der vorgesehenen Dosiergeschwindigkeit frei werdende Reaktionswärme bei der Solltemperatur abgeführt wird.

Der Normalbetrieb kann somit als sicher betrachtet werden.

## Abweichungen (Störungen)

An den drei Beispielen, für die die oben genannten Bedingungen gleichermaßen gelten, die sich aber hinsichtlich einiger Reaktions- und Verfahrensdaten unterscheiden, werden jeweils folgende Störungen betrachtet, die das Temperaturniveau in Richtung  $T_{\text{exo}}$  verschieben können:

- Abweichungen in den Reaktionsbedingungen
  - zu hohe Reaktionstemperatur
  - zu niedrige Reaktionstemperatur (führt zu verzögertem Reaktionsstart und damit zu Akkumulation mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung)
  - nur halbe Einsatzmenge der Komponente D
- Abweichungen im anlagentechnischen Betrieb
  - Ausfall des Rührers (führt zu Akkumulation mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung)
  - Kühlungsausfall zu Beginn der Reaktion

## Daten und Informationen zur Beurteilung

### Fall 1

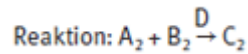
Reaktion:  $A_1 + B_1 \rightarrow C_1$

Stoff/Reaktion	Daten und Informationen
A <sub>1</sub>	Reinstoff; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$
B <sub>1</sub>	Reinstoff; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$

C1	$T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ ; $(dM dt^{-1})_{\text{Zersetzung}} > (dM dt^{-1})_{\text{max. Auslegung}}$
$A_1 + B_1 \rightarrow C_1$	Spontane Reaktion bei $80 \text{ °C}$ ; $T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ ; $\Delta T_{\text{ad}} = 75 \text{ K}$

### Fall 2

Die Komponente B<sub>2</sub> ist in vorgegebener Menge des Lösemittels D gelöst



Stoff/Reaktion	Daten und Informationen
A <sub>2</sub>	Reinstoff; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$
B <sub>2</sub>	Lösung in D; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$
C <sub>2</sub>	$T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ ; $(dM dt^{-1})_{\text{Zersetzung}} > (dM dt^{-1})_{\text{max. Auslegung}}$
D	chemisch inert; $T_s > 180 \text{ °C}$ ; thermisch stabil bis über $200 \text{ °C}$
$A_2 + B_2 \xrightarrow{D} C_2$	Spontane Reaktion bei $80 \text{ °C}$ ; $T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ ; $\Delta T_{\text{ad}} = 75 \text{ K}$

### Fall 3

Reaktion:  $A_3 + B_3 \rightarrow C_3$

Stoff/Reaktion	Daten und Informationen
A <sub>3</sub>	Reinstoff; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$
B <sub>3</sub>	Reinstoff; thermisch stabil bis oberhalb $T_{\text{exo}}$
C <sub>3</sub>	$T_{\text{exo}} = 120 \text{ °C}$ ; $(dM dt^{-1})_{\text{Zersetzung}} > (dM dt^{-1})_{\text{max. Auslegung}}$
$A_3 + B_3 \rightarrow C_3$	Spontane Reaktion bei $80 \text{ °C}$ ; $T_{\text{exo}} = 120 \text{ °C}$ ; $\Delta T_{\text{ad}} = 225 \text{ K}$

## Beurteilung der Störungen

Die Auswirkungen der betrachteten Störungen und ihre daraus resultierende Bewertung sind im Folgenden tabellarisch beschrieben. Den Ausführungen ist zu entnehmen, dass in Fall 1 keine zusätzlichen Maßnahmen, in Fall 2 einfache zusätzliche Maßnahmen und in Fall 3 hoch verfügbare (hier als Beispiel redundante) zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.

**Fall 1** ( $T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ )

Abweichung	Auswirkung	Bewertung	Mögliche Gegenmaßnahmen
Temperatur zu hoch	Die maximal mögliche Heiztemperatur beträgt wegen des offenen Wasserkreislaufs $95 \text{ °C}$ . Durch die äußere Beheizung kann $T_{\text{exo}}$ somit nicht erreicht werden.	Auslegungsgrenzen $T_{\text{max}}$ und $(dM \text{ dt}^{-1})_{\text{max}}$ werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Temperatur zu niedrig	Verzögerter Reaktionsstart, Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ .  Mit $T_p < 80 \text{ °C}$ und $\Delta T_{\text{ad}} = 75 \text{ K}$ bleibt das System jedoch unterhalb $T_{\text{exo}}$ .	Auslegungsgrenzen $T_{\text{max}}$ und $(dM \text{ dt}^{-1})_{\text{max}}$ werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Zu wenig Lösemittel	Die Störung ist nicht relevant, da kein Lösemittel benötigt wird.		
Ausfall des Rührers	Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ .  Mit $T_p = 80 \text{ °C}$ und $\Delta T_{\text{ad}} = 75 \text{ K}$ bleibt das System unterhalb $T_{\text{exo}}$ .	Auslegungsgrenzen $T_{\text{max}}$ und $(dM \text{ dt}^{-1})_{\text{max}}$ werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Ausfall der Kühlung (zu Beginn der Reaktion)	Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ . Mit $T_p < 80 \text{ °C}$ und $\Delta T_{\text{ad}} = 75 \text{ K}$ bleibt das System jedoch unterhalb $T_{\text{exo}}$ .	Auslegungsgrenzen $T_{\text{max}}$ und $(dM \text{ dt}^{-1})_{\text{max}}$ werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.

In Fall 1 ist die in Abbildung 18 dargestellte Ausrüstung des Reaktionskessels sicherheitstechnisch ausreichend.

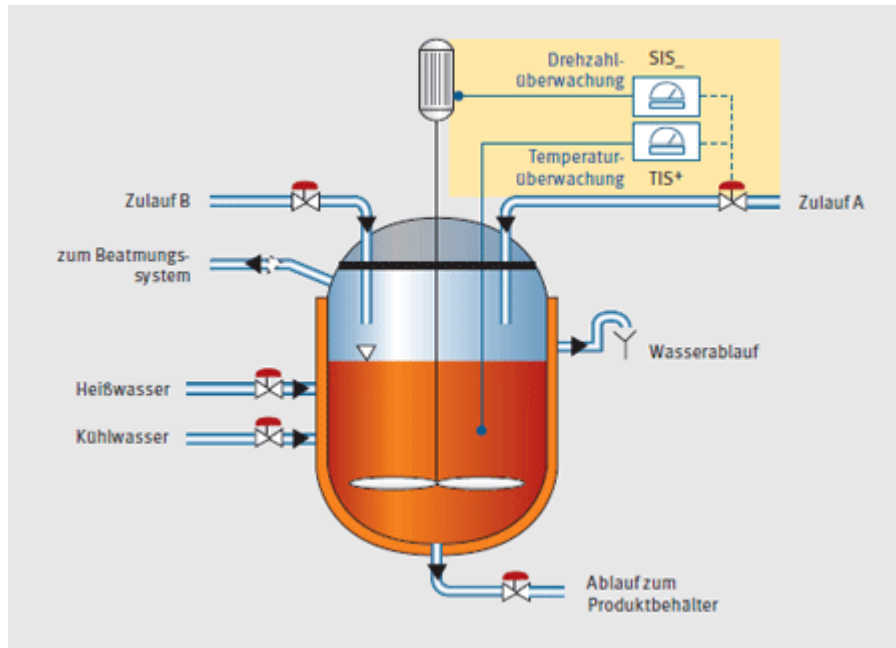
**Fall 2** ( $T_{\text{exo}} = 180 \text{ °C}$ )

Abweichung	Auswirkung	Bewertung	Mögliche Gegenmaßnahmen
Temperatur zu hoch	Die maximal mögliche Heiztemperatur beträgt wegen des offenen Wasserkreislaufs 95 °C. Durch die äußere Beheizung kann $T_{\text{Exo}}$ somit nicht erreicht werden.	Auslegungsgrenzen werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Temperatur zu niedrig	Verzögerter Reaktionsstart, Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ .  Mit $T_p < 80$ °C und $\Delta T_{\text{ad}} = 75$ K bleibt das System jedoch unterhalb $T_{\text{Exo}}$ .	Auslegungsgrenzen werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Zu wenig Lösemittel	Im Falle der nur halben Lösemittelmenge D bleibt $T_{\text{Exo}}$ unverändert bei 180 °C, die adiabatische Temperaturerhöhung steigt jedoch unter Berücksichtigung der verminderten Menge von D und damit der geänderten Gesamtwärmekapazität der Reaktionsmischung auf $\Delta T_{\text{ad}} = 112$ K. Ebenso erhöht sich die Reaktionsleistung, sie kann jedoch immer noch durch die Reaktorkühlung sicher abgeführt werden ( $\Delta T_{\text{Störung}} = \text{ca. } 17$ K). Somit bleibt das System auch im Falle dieser Störung unterhalb $T_{\text{Exo}}$ .	Sicherheitstechnisch nur kritisch bei gleichzeitigem Auftreten eines zweiten unabhängigen Fehlers (z. B. „Ausfall des Rührers“ oder „Ausfall der Kühlung zu Beginn der Reaktion“).	Aus Betrachtung der Fehlerkombinationen: Sicherstellung der korrekten Menge D durch eine geeignete organisatorische Maßnahme (Sicherheitsrelevante Betriebsanweisung).
Ausfall des Rührers	Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ .  Mit $T_p = 80$ °C und $\Delta T_{\text{ad}} = 75$ K bleibt das System unterhalb $T_{\text{Exo}}$ .	Sicherheitstechnisch nur kritisch bei gleichzeitigem Auftreten eines zweiten unabhängigen Fehlers (z. B. „zu wenig Lösemittel“).	Aus Betrachtung der Fehlerkombinationen: Einfache Verriegelung des Einlaufventils der Komponente A2 mit der Rührerfunktion (Ventil schließt bei stehendem Rührer), SIS_
Ausfall der Kühlung (zu Beginn der Reaktion)	Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Maximal erreichbare Temperatur: $T_p + \Delta T_{\text{ad}}$ .	Sicherheitstechnisch nur kritisch bei gleichzeitigem Auftreten eines zweiten unabhängigen Fehlers (z. B. „zu wenig Lösemittel“).	Aus Betrachtung der Fehlerkombinationen: Einfache Verriegelung des Einlaufventils der Komponente A2 mit der Temperaturüberwachung im Reaktor (Ventil schließt bei Erreichen einer

	Mit $T_P$ 80 °C und $\Delta T_{ad} = 75$ K bleibt das System jedoch unterhalb $T_{Exo}$ .		Maximaltemperatur von z. B. 100 °C), TIS <sup>+</sup>
--	---	--	---

Die sich aus dieser Gefahrendiskussion ergebende zusätzliche Ausrüstung des Reaktionskessels ist in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Ausrüstung des Reaktionskessels (schematisch), Fall 2



**Fall 3** ( $T_{Exo} = 120$  °C)

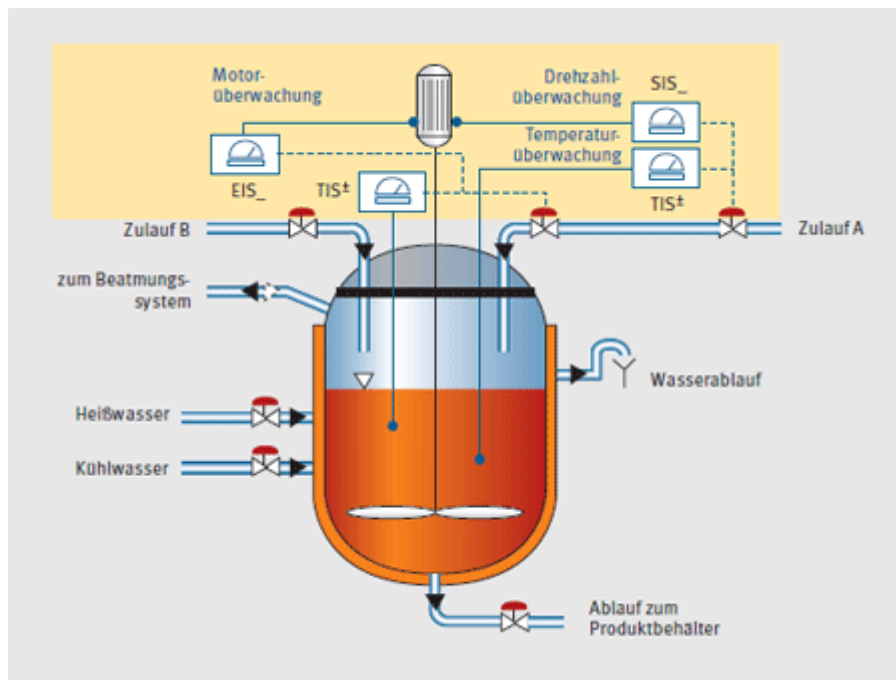
Abweichung	Auswirkung	Bewertung	Mögliche Gegenmaßnahmen
Temperatur zu hoch	Die maximal mögliche Heiztemperatur beträgt wegen des offenen Wasserkreislaufs 95 °C. Durch die äußere Beheizung kann $T_{Exo}$ somit nicht erreicht werden.	Auslegungsgrenzen werden nicht überschritten. Sicherheitstechnisch unkritisch.	Keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
Temperatur zu niedrig	Verzögerter Reaktionsstart, Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Die maximal erreichbare Temperatur kann nun mit $T_P + \Delta T_{ad}$ (auch für $T_P < 80$ °C) $T_{Exo}$ überschreiten. Selbst bei vorhandener Kühlung würden 160 °C erreicht.	Auslegungsgrenzen werden überschritten. Behälterversagen mit Stofffreisetzung möglich.	Temperaturmessung mit Zulaufsperrung (Dosierung der Komponente A <sub>3</sub> ) bei Unterschreiten einer Mindesttemperatur im Kessel, TIS <sub>-</sub> , in redundanter Ausführung

Zu wenig Lösemittel	Die Störung ist nicht relevant, da kein Lösemittel benötigt wird.		
Ausfall des Rührers	Akkumulation der Reaktanden mit nachfolgender erhöhter Reaktionsleistung. Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt.  Mit $T_p = 80 \text{ °C}$ und $\Delta T_{ad} = 225 \text{ K}$ wird $T_{exo}$ überschritten.	Auslegungsgrenzen werden überschritten. Behälterversagen mit Stofffreisetzung möglich.	Drehzahlüberwachung des Rührers mit Zulaufsperrung (Dosierung der Komponente A <sub>3</sub> ), SIS <sub>-</sub> , und Überwachung des Rührmotors mit Zulaufsperrung (Dosierung der Komponente A <sub>3</sub> ), EIS <sub>-</sub> (diversitäre Redundanz)
Ausfall der Kühlung (zu Beginn der Reaktion)	Die Reaktionsleistung kann nicht mehr vollständig durch die Kühlung abgeführt werden, sodass die Temperatur über Solltemperatur steigt. Mit $T_p = 80 \text{ °C}$ und $\Delta T_{ad} = 225 \text{ K}$ wird $T_{exo}$ überschritten.	Auslegungsgrenzen werden überschritten. Behälterversagen mit Stofffreisetzung möglich.	Temperaturmessung mit Zulaufsperrung (Dosierung der Komponente A <sub>3</sub> ) bei Überschreitung einer Maximaltemperatur im Kessel, TIS <sup>+</sup> , in redundanter Ausführung

Die sich aus dieser Gefahrendiskussion ergebende zusätzliche Ausrüstung des Reaktionskessels ist in Abbildung 20 dargestellt.

Die Besonderheit dieses Falles liegt in der relativ hohen Reaktionswärme mit gleichzeitig niedriger Grenztemperatur  $T_{exo}$ . Eine alternative sicherheitstechnische Lösung wäre eine gezielte Einflussnahme auf diese beiden Größen, z. B. durch eine Umstellung auf eine vollkontinuierliche Betriebsweise (Strömungsreaktor mit Umpumpung unter Zuhilfenahme von Lösemittel). Wegen der kurzen Verweilzeiten und des Verdünnungseffektes würde sich sowohl die Grenztemperatur  $T_{exo}$  zu höheren Werten verschieben, als auch die adiabatische Temperaturerhöhung  $\Delta T_{ad}$  verringern. Eine solche Verfahrens- und Anlagenänderung macht in jedem Falle die iterative sicherheitstechnische Bewertung der Reaktion erforderlich; andere Maßnahmen können notwendig werden.

Abbildung 20: Ausrüstung des Reaktionskessels (schematisch), Fall 3



## Anhang 3: Literaturverzeichnis

**Verbindliche Rechtsnormen** sind Gesetze, Verordnungen und der Normtext von Unfallverhütungsvorschriften. Abweichungen sind nur mit einer Genehmigung der zuständigen Behörde bzw. des zuständigen Unfallversicherungsträgers (z. B. Berufsgenossenschaft) erlaubt. Voraussetzung für die Erteilung einer Ausnahmegenehmigung ist, dass die Ersatzmaßnahme ein mindestens ebenso hohes Sicherheitsniveau gewährleistet.

**Keine verbindlichen Rechtsnormen** sind Technische Regeln zu Verordnungen, Durchführungsanweisungen von Unfallverhütungsvorschriften (DGUV Vorschriften), DGUV Regeln, DGUV Informationen, Merkblätter, DIN-/VDE-Normen. Sie gelten als wichtige Bewertungsmaßstäbe und Regeln der Technik, von denen abgewichen werden kann, wenn die gleiche Sicherheit auf andere Weise erreicht wird.

### Fundstellen im Internet

Die Merkblattr Reihen der BG RCI sowie ein umfangreicher Teil des staatlichen und berufsgenossenschaftlichen Vorschriften- und Regelwerkes (rund 1 750 Titel) sind im Kompendium Arbeitsschutz der BG RCI verfügbar. Die Nutzung des Kompendiums im Internet ist kostenpflichtig. Ein kostenfreier, zeitlich begrenzter Probezugang wird angeboten.

Weitere Informationen unter [www.kompendium-as.de](http://www.kompendium-as.de).

Zahlreiche aktuelle Informationen bietet die Homepage der BG RCI unter [www.bgrci.de/praevention](http://www.bgrci.de/praevention).

Detailinformationen zu Schriften und Medien der BG RCI sowie Bestellung unter [medienshop.bgrci.de](http://medienshop.bgrci.de).

Ausgewählte Merkblätter, Anhänge und Vordrucke aus Merkblättern und DGUV Regeln sowie ergänzende Arbeitshilfen werden im Downloadcenter Prävention unter [downloadcenter.bgrci.de](http://downloadcenter.bgrci.de) zur Verfügung gestellt.



Unfallverhütungsvorschriften, DGUV Regeln, DGUV Grundsätze und viele DGUV Informationen sind auf der Homepage der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) unter publikationen.dguv.de zu finden.

**Seit dem 1. Mai 2014 gilt für das Vorschriften- und Regelwerk der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) eine neue Systematik und Nummerierung.**

## 1. Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln

Bezugsquelle: Buchhandel

Freier Download unter [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de) (Gesetze und Verordnungen) bzw. [www.baua.de](http://www.baua.de) (Technische Regeln); TRAS (Technische Regeln Anlagensicherheit) sind zu finden unter [www.kas-bmu.de](http://www.kas-bmu.de).

- (1) Siebtes Buch Sozialgesetzbuch – Gesetzliche Unfallversicherung (SBG VII)
- (2) Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG)
- (3) Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) mit Technischen Regeln Betriebssicherheit (TRBS)
- (4) Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz – ChemG)
- (5) Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) mit Technischen Regeln Gefahrstoffe (TRGS),
- (6) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) mit Technischen Regeln Anlagensicherheit (TRAS), insbesondere:
- (7) TRAS 410: Erkennen und Beherrschen exothermer chemischer Reaktionen
- (8) Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) – 4. BImSchV
- (9) Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall- Verordnung) – 12. BImSchV
- (10) Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz – ProdSG) mit entsprechenden Verordnungen (ProdSV)

## 2. Unfallverhütungsvorschriften (DGUV Vorschriften), DGUV Regeln, DGUV Grundsätze, DGUV Informationen, Merkblätter und sonstige Schriften der Unfallversicherungsträger

Bezugsquellen: Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Postfach 10 14 80, 69004 Heidelberg, [medienshop.bgrci.de](http://medienshop.bgrci.de) oder Jedermann-Verlag GmbH, Postfach 10 31 40, 69021 Heidelberg, [www.jedermann.de](http://www.jedermann.de), [verkauf@jedermann.de](mailto:verkauf@jedermann.de)

Mitgliedsbetriebe der BG RCI können die folgenden Schriften (bis zur nächsten Bezugsquellenangabe) bei der BG RCI in einer der Betriebsgröße angemessenen Anzahl kostenlos beziehen.

- (11) Merkblatt A 001: Verzeichnis von Schriften und Medien zur Arbeitssicherheit
- (12) Merkblatt A 010: Betriebsanweisungen für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen (DGUV Information 213-051, bisher BGI 566)
- (13) Merkblatt R 001: Exotherme chemische Reaktionen – Grundlagen (DGUV Information 213-063, bisher BGI 541)
- (14) Merkblatt R 003: Sicherheitstechnische Kenngrößen – Ermitteln und bewerten (DGUV Information 213-065, bisher BGI 747)
- (15) Merkblatt R 004: Thermische Sicherheit chemischer Prozesse (DGUV Information 213-067, bisher BGI 828)
- (16) Merkblatt R 005: Übertragung chemischer Synthesen vom Labor bis in den Betrieb (DGUV Information 213-068, bisher BGI 5002)
- (17) Merkblatt R 007: Lehren aus Ereignissen – Sicherheitstechnische Erkenntnisse für die Bewertung chemischer Reaktionen und thermisch sensibler Stoffe (bisher BGI/GUV-I 5153)
- (18) Merkblatt R 008: Polyreaktionen und polymerisationsfähige Systeme (DGUV Information 213-097)

## 3. Normen

Bezugsquellen: Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, [www.beuth.de](http://www.beuth.de)  
bzw. VDE Verlag GmbH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, [www.vde-verlag.de](http://www.vde-verlag.de)

- (19) DIN 25419: Ereignisablaufanalyse; Verfahren, graphische Symbole und Auswertung
- (20) DIN 25424: Fehlerbaumanalyse
- (21) DIN EN 981: Sicherheit von Maschinen – System akustischer und optischer Gefahrensignale und Informationssignale
- (22) DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)
- (23)

- IEC 61882: Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung (HAZOP) – Leitfaden
- (24) IEC 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme
- (25) IEC 61511: Funktionale Sicherheit – Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie
- (26) VDI/VDE 2180: Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik (PLT)

#### 4. Andere Schriften und Medien

Bezugsquellen: IVSS-Sektion Chemie, c/o Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Kurfürsten-Anlage 62, 69115 Heidelberg, [www.issa.int/prevention-chemistry](http://www.issa.int/prevention-chemistry) und Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Postfach 10 14 80, 69004 Heidelberg, [medienshop.bgrci.de](http://medienshop.bgrci.de)

- (27) ISSA-01: Das PAAG-Verfahren – Methodik, Anwendung, Beispiele
- (28) ISSA-02: Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung in der Anlagensicherheit – Praxisbewährte Methoden

Bezugsquelle: Buchhandel

- (29) Lazarus, H. : Erkennung von Gefahrensignalen und Beurteilung der sprachlichen Kommunikation, Technische Überwachung – TÜ 34 (1993) 10, 383 ff., ISSN: 0376-1185
- (30) Stoessel, F.: Thermal Safety of Chemical Processes: Risk Assessment and Process Design. 2008. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN: 978-3-527-31712-7
- (31) Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the AIChE: Inherently Safer Chemical Processes – A Life Cycle Approach. 2. Auflage 2009. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN: 978-0-471-77892-9
- (32) Ratgeber Anlagensicherheit. Hrsg: Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit (VDSI) und Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI). ISBN: 978-3-89869-057-7 bzw. [www.ratgeber-anlagensicherheit.de](http://www.ratgeber-anlagensicherheit.de)

Bezugsquelle: Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH (GFI Umwelt), Geschäftsstelle der Kommission für Anlagensicherheit, Postfach 32 01 40, 53204 Bonn, [www.sfk-taa.de](http://www.sfk-taa.de)  
Freier Download unter [www.kas-bmu.de/publikationen/taa\\_pub.htm](http://www.kas-bmu.de/publikationen/taa_pub.htm)

- (33) Leitfaden: Rückhaltung von gefährlichen Stoffen aus Druckentlastungseinrichtungen. TAA-GS-06 (1994)

Bezugsquelle: TÜV Süd AG, Westendstraße 199, 80686 München, [www.tuev-sued.de](http://www.tuev-sued.de)

- (34) Studie: Darstellung von Einrichtungen und Verfahren zum Auffangen von aus Druckentlastungseinrichtungen (z. B. Sicherheitsventilen, Berstscheiben) austretenden Gasen, Dämpfen, Flüssigkeiten oder Stäuben unter besonderer Berücksichtigung der jeweiligen Stoffeigenschaften und der Lager- und Prozessbedingungen
- (35)

Grundsatz-Studie: Anforderungen an technische Einrichtungen an Reaktionsbehältern zur Vermeidung von Emissionen gefährlicher Stoffe über Druckentlastungseinrichtungen – Systematische Darstellung der Notwendigkeit von MSR-technischer Ausstattung an diskontinuierlich betriebenen Reaktionsbehältern, um das Ansprechen von Druckentlastungseinrichtungen zu verhindern

Bildnachweis

Die in dieser Schrift verwendeten Bilder dienen nur der Veranschaulichung. Eine Produktempfehlung seitens der BG RCI wird damit ausdrücklich nicht beabsichtigt.

**Abbildungen wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von:**

Titelbild:

Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co KG  
55216 Ingelheim

Abbildung 11:

Walter Kloos  
Hoechst AG  
65903 Frankfurt

Abbildung 12:

Prof. Dr.-Ing. Lazarus  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Postfach 17 02 02  
44061 Dortmund

Abbildungen 15, 16:

BASF SE  
67056 Ludwigshafen

Die übrigen Abbildungen entstammen Unterlagen der BG RCI.

### **Ausgabe 12/2015**

Diese Schrift können Sie über den Medienshop  
unter [medienshop.bgrci.de](http://medienshop.bgrci.de) beziehen.

Haben Sie zu diesem Merkblatt Fragen, Anregungen, Kritik?

Dann nehmen Sie bitte mit uns Kontakt auf.

- Schriftlich:  
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie,  
Prävention, KC Präventionsprodukte und marketing, Referat Medien  
Postfach 10 14 80, 69004 Heidelberg
- E-Mail: [praeventionsprodukte@bgrci.de](mailto:praeventionsprodukte@bgrci.de)
- [www.bgrci.de/kontakt-schriften](http://www.bgrci.de/kontakt-schriften)