

Erarbeitung sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge zur Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen

Bönig, S.

Neben der Durchführung von Sicherheitsanalysen lässt sich die Anlagensicherheit durch Anwendung sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge effizient erhöhen. Im Rahmen des Teilprojektes A2 des Sonderforschungsbereiches 180 wird das Wissen aus Fehler- und Störfallanalysen für den Entwicklungsingenieur aufbereitet und in Abhängigkeit der Entwicklungsschritte in Katalogen systematisiert.

In addition to failure and hazard analysis the safety in plant design can be improved efficiently by using safety catalogues. Within the framework of the project A2 in the Sonderforschungsbereich 180 (Special Reserach Area) the knowledge of failure and hazard analysis has been made applicable to the development engineer in form of safety catalogues for each design phase.

1 Einleitung

Bedingt durch die hohe Komplexität einer Anlage können in allen Lebensphasen, von der Anlagenplanung über die Fertigung und Montage bis hin zum Produktionsbetrieb und schließlich der Stilllegung der Anlage Fehler auftreten. Die Fehler während des Anlagenbetriebes, die trotz aufwendiger Sicherheitstechnik zu meldepflichtigen Störfällen (wie Brand, Explosion, Stofffreisetzung) eskalieren können, haben ihren Ursprung (Störungsursache) nicht ausschließlich zu diesem Zeitpunkt. Oft schleichen sich Fehler während der Anlagenentwicklung ein, die unbemerkt weitere Entwicklungsschritte passieren und schließlich beim Zusammenwirken der Komponenten (siehe **Bild 1**) unter Prozessbedingungen oder aber auch bei unerwünschten Prozessabweichungen zum Vorschein kommen. Ein Beheben dieser Fehler ist z.T. nur unter erheblichem finanziellen Aufwand (Produktionsausfall) wenn überhaupt möglich (Zerstörung der Anlage).

Fehler während der Entwicklung können nur vermieden werden, wenn diese im Voraus bekannt sind oder im realistischen Maße vorausgesehen werden können. Gerade aber bei Neuanlagen lie-

gen nur unzureichende Erfahrungen über die Anlage und deren Komponenten – und folglich auch über ihre Schwachstellen vor. Trotz umfangreicher experimenteller Simulationen vor dem eigentlichen Produktionsbeginn verbleibt aufgrund der Vielzahl von Einflußparametern ein Restrisiko beim Betrieb einer Anlage.

Ein frühzeitiger und entwicklungsbegleitender Einsatz von bewährten sicherheitserhöhenden Maßnahmen kann den Entwicklungsingenieuren helfen, den Sicherheitsgrad der Anlage zu steigern, ohne dabei die wirtschaftlichen Aspekte neben der potentiell machbaren Prozess- und Maschinentechnik außer Acht zu lassen.

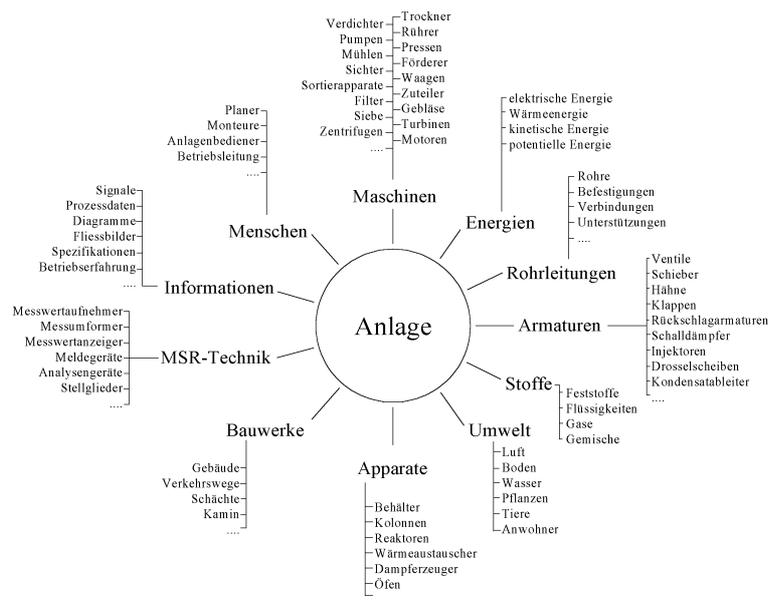


Bild 1: Komponenten einer verfahrenst. Anlage

2 Entwicklungsschritte bei der Anlagenplanung

Bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen ist grundsätzlich zwischen den Phasen Verfahrensentwicklung und Maschinenentwicklung zu unterscheiden. Beide Phasen werden zum Teil nacheinander, zum Teil parallel abgewickelt.

Unter Verfahrensentwicklung versteht man die Entwicklung eines Prozesses, mit dem Ziel, ausgehend von bestimmten Einsatzstoffen und den geforderten Ausgangsprodukten, eine „gewünschte

Anlagenplanung

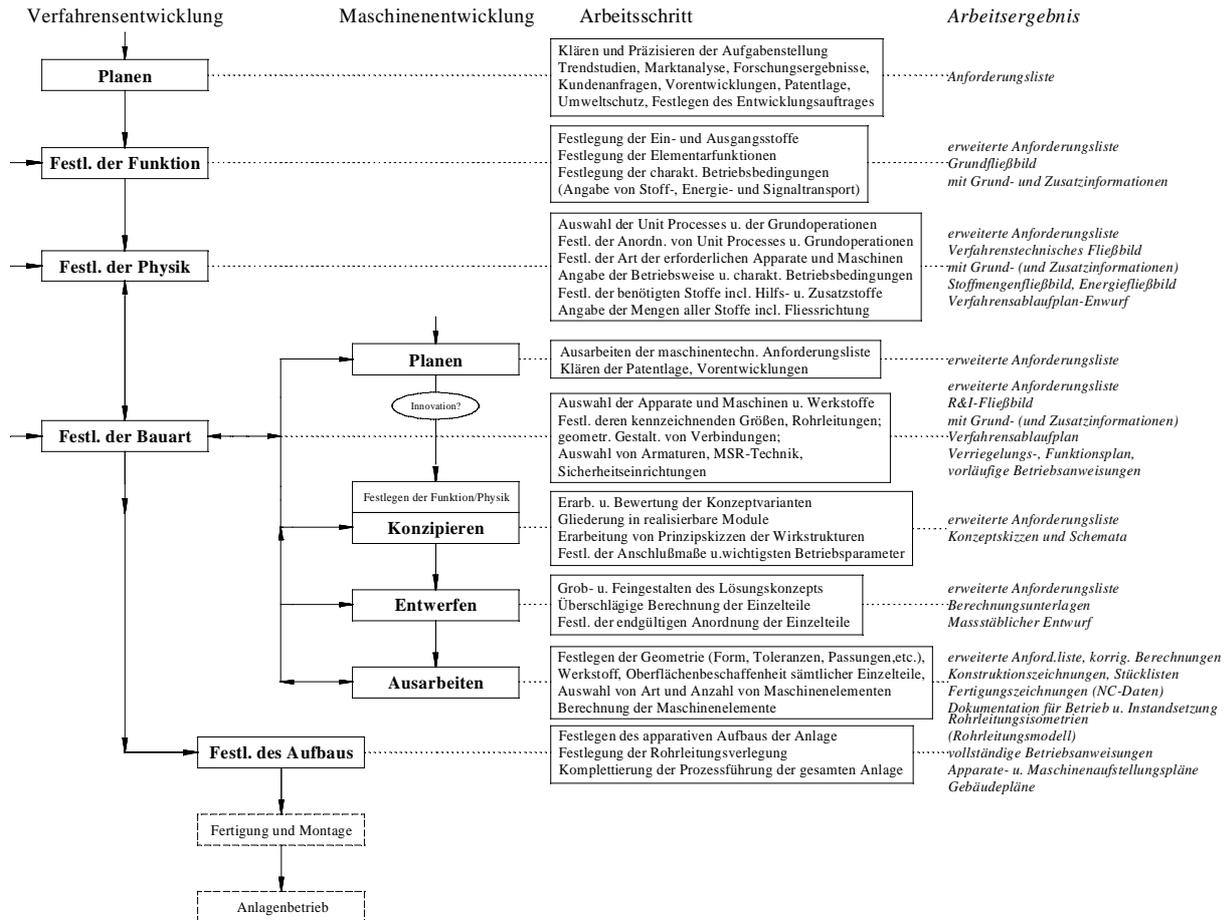


Bild 2: Entwicklungsschritte der Anlagenplanung

Stoffänderung auf einem neuen, technisch machbaren, wirtschaftlich und industriell auswertbaren Weg“ zu realisieren /1/. Die konstruktive Umsetzung des Prozesses durch maschinen- bzw. apparatetechnische Komponenten wird als Maschinenentwicklung definiert.

Obwohl in Deutschland jährlich ca. 250 neue chemische Stoffe (ca. 1000 weltweit) hergestellt und vermarktet werden /2/ ist die Verfahrensverbesserung bzw. -modifizierung zahlenmäßig bedeutender als die Entwicklung tatsächlich innovativer Verfahren. Bei der Auswahl der für den Prozess benötigten Apparate und Maschinen wird in der Regel auf bewährte Standardkomponenten zurückgegriffen; Neuentwicklungen sind die Ausnahme. Aber auch gerade eine Anpassung der Maschinen an veränderte Stoff- bzw. Prozessparameter und vor allem das Zusammenspiel aller Anlagenkomponenten untereinander erfordert z.T. aufwendige Entwicklungsarbeit und kann mitunter zu Neukonstruktionen mit innovativen Wirkstrukturen führen.

Eine Möglichkeit, die Entwicklungsschritte der Anlagenplanung von der Aufgabenstellung bis hin zur

Freigabe für die Fertigung und Montage anlagenunabhängig und zielorientiert darzustellen, zeigt **Bild 2**. Hierzu wurden die Vorschläge von Blaß /1/ zur Verfahrensentwicklung sowie die in der VDI Richtlinie 2222 /3/ beschriebene methodische Vorgehensweise zur Konstruktion technischer Produkte auf die Weise kombiniert, dass ein paralleles Entwickeln der beiden Aufgabenstellungen Verfahrensentwicklung und Maschinenentwicklung bereits auf hohem Abstraktionsniveau (und damit zu einem frühen Zeitpunkt) möglich ist.

Allerdings sollte beim Lesen dieses Ablaufschemas bedacht werden, dass jeder Entwicklungsprozess auch schon aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung und des Vorwissens (z.B. Erfahrung mit den Einsatzstoffen) sich thematisch und zeitlich individuell gestaltet. Nicht jeder Entwicklungsschritt kann und wird aus diesem Grund in der gleichen Intensität durchgeführt. Nur eine iterative Vorgehensweise kann zur optimalen Lösungsfindung bei der Auswahl von Prozess- oder Konstruktionsparametern, Hilfsstoffen oder beispielsweise der Reihenfolge von Prozessfunktionen führen. Bevor im einzelnen auf die Planungsschritte und deren Er-

gebnisse eingegangen wird, werden zunächst mögliche Faktoren vorgestellt, die den zeitlichen aber auch den thematischen Ablauf beeinflussen können.

2.1 Anlagenplanung- ein individueller Entwicklungsprozess

Bei der Verfahrensentwicklung ist es üblich, eine gewisse Reihenfolge einzuhalten, die unter dem Namen „Zwiebelmodellentwicklung“ bekannt ist: Es wird mit der Entwicklung derjenigen Prozesse begonnen, die aufgrund ihrer Betriebsbedingungen die geringste Flexibilität aufweisen, wie die chemischen Prozesse („Unit Prozesses“ wie z.B. Oxydieren, Neutralisieren, Polymerisieren) und Stoffaustauschprozesse (Rektifizieren, Absorbieren, etc.). Erst danach werden die anpassungsfähigeren Prozesse behandelt, zunächst die Wärmeaustauschprozesse, dann die mechanischen Prozesse (wie z.B. Mischen, Zerkleinern, Sichten). Zum Abschluß erfolgt die Behandlung der Förderung und der Lagerung von Feststoffen bzw. Fluiden /3/. Inwieweit bei der Entwicklung die individuelle Behandlung der einzelnen Prozesse voranschreitet (konkretisiert wird) ist nicht nur aufgabenspezifisch sondern auch abhängig von der Erfahrung der Entwicklungsingenieure sowie der Arbeitsorganisation im Betrieb.

Vor allem bei neuen Verfahren werden Prozesse in unterschiedlichen Maßstäben realisiert, um so die Risiken der Betriebsleitung (Entwicklungsstopp) zu minimieren und ggf. unbekannte Parameter wie physikalisch-chemische Stoffdaten zu erarbeiten. Bei der Entwicklung der Laborversuche, der halotechnischen Anlagen und großtechnischen Produktionsanlagen unterscheiden sich aber nicht nur Stoff-, Energie- und Informationsströme voneinander. Abweichungen in Art, Größe, Anzahl und Anordnung der zu entwickelnden Komponenten und ggf. die Übertragung auf eine andere Betriebsweise erfordern zusätzliche Entwicklungsarbeit, auch durch die Integration bisher nicht betrachteter Verfahrensschritte (Lagerung, Transport, Speicherung, etc.).

Im Laufe der Anlagenentwicklung sind zu verschiedenen Zeitpunkten immer wieder Stellungnahmen und Genehmigungen sowohl von betriebseigenen als auch externen Fachleuten einzuholen. Neben den zu bewilligenden Investitions- und Betriebskosten mit Hilfe von Wirtschaftlichkeitsabschätzungen /-berechnungen bestimmen die „Planungskosten“ nicht selten den weiteren Entwicklungsablauf. Auch

sind Genehmigungen für die gesamte Anlage (z.B. im Rahmen der Störfallverordnung oder der Umweltverträglichkeitsprüfung), für einzelne Komponenten (z.B. nach der Maschinenrichtlinie) oder für die dort zu beschäftigenden Personen (Arbeitsschutzgesetz, etc.) von den entsprechenden Behörden zu beantragen, bevor es zur Realisierung der Anlage bzw. zur Inbetriebnahme kommt. Um Verzögerungen zu vermeiden und bei Bedarf Auflagen seitens der Behörde in die Problemlösung einbeziehen zu können, ist es für den Anlagenbetreiber sinnvoll, diese Anträge zu einem frühen Zeitpunkt und parallel zur weiterer Entwicklungsarbeit zu erstellen. Es kann aus diesem Grund erforderlich sein, bereits zu Beginn der Entwicklung in bestimmten Bereichen über Detailwissen zu verfügen (oder über entsprechend abgesicherte Annahmen), wobei die Richtigkeit des Sachverhaltes allerdings im Laufe der Entwicklung und im ganzheitlichen Zusammenwirken immer wieder bestätigt werden muss. Die Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen wird somit neben den oben genannten Einflussfaktoren auch durch die erforderlichen Genehmigungsanträge geprägt.

Der in **Bild 2** dargestellte Ablauf zur Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen ist demzufolge ein starke Vereinfachung der tatsächlichen Problematik. Die einzelnen Entwicklungsschritte sollen im folgenden kurz erläutert werden.

2.2 Beschreibung der Arbeitsschritte und Ergebnisse

2.2.1 Planen

Zu Beginn der Entwicklung einer neuen Anlage steht die Planungsphase des Verfahrens. Hier werden Verfahrensideen in der Aufgabenstellung konkretisiert und der Arbeitsumfang festgelegt. Forderungen und Wünsche des Kunden, wenn Anlagenbauer und -betreiber nicht identisch sind, sowie Ergebnisse der Analyse des Anwendungspotentials werden in einer ersten Anforderungsliste dokumentiert. Ausführliche Recherchen über den Stand der Technik wie z.B. Patentliteratur, Fachbücher, Konkurrenzprojekte, etc. sind notwendig, um die Entwicklungszeit zu reduzieren oder den Einsatz verbotener Substanzen auszuschließen.

2.2.2 Festlegen der Funktion

Nach Festlegung der Aufgabenstellung wird der Gesamtprozess auf der sog. Funktionsebene, als

oberste Abstraktionsebene, in die erforderlichen Elementarfunktionen für Stoff-, Energie- und Signalumsatz aufgeteilt (siehe **Tab. 1**).

Elementarfunktionen
1. Stoff umwandeln
2. Stoff trennen
3. Stoff vereinigen
4. Phasenzustand einstellen
5. Stoff leiten
6. Stoff speichern

Tab.1: Elementarfunktionen, Stoffumsatz

Es wird entschieden, auf welche Weise und in welcher Reihenfolge die in Menge und Art angegebenen Stoffe behandelt werden. Die so erarbeiteten neuen Anforderungen werden mit den erforderlichen charakteristischen Betriebsbedingungen und Energien in der erweiterten Anforderungsliste aufgenommen. Liegt die Funktionsstruktur des Prozesses fest, so wird sie mit den zu diesem Zeitpunkt bekannten Informationen im Grundfließbild dokumentiert, siehe **Bild 3**. In den Rechtecken werden die Elementarfunktionen angegeben, die Pfeillinien zwischen den Rechtecken symbolisieren den Stoffein- bzw. austritt.

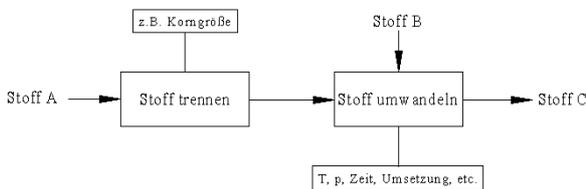


Bild 3: Beispiel eines Grundfließbildes

(In der Praxis differiert der Informationsgehalt von Grundfließbildern erheblich, z.B. weil bei einer Anlage nicht alle (Teil-) Prozesse neu konzipiert werden müssen. So können die Rechtecke der „Grundfließbilder“ neben den Elementarfunktionen ganze Verfahren (z.B. „Gasentstaubung“) oder bereits festgelegte Operationen (z.B. „Mahltrocknung“) beinhalten.)

2.2.3 Festlegen der Physik

Auf der Grundlage der Informationen des Grundfließbildes werden die einzelnen Schritte des Verfahrens konkretisiert, indem die physikalischen Wirkzusammenhänge festgelegt werden. Zur Erfüllung der Elementarfunktionen werden systematisch geeignete chemische Reaktionen (Unit

Processes) sowie Grundoperationen (Unit Operations wie z.B. Klassieren, Absorbieren, Elektroabscheiden) ausgewählt und deren Verknüpfung untereinander festgelegt. Hilfsstoffe (wie Transportluft) oder Zusatzstoffe (Lösungsmittel, Katalysatoren) können erforderlich werden, die z.T. eine gesonderte Behandlung im System benötigen (neues Teilsystem) und bei der Berechnung der Stoffmengen- und Energiebilanzen zusätzlich zu den bereits bekannten Ein- und Ausgangsstoffen Berücksichtigung finden müssen. Ebenso muss die Betriebsweise (kontinuierlich, diskontinuierlich oder halbkontinuierlich) des Prozesses bzw. der Teilprozesse festgelegt werden. Bei diskontinuierlichen Prozessen unterliegen die einzelnen Stufen zeitlich veränderten Betriebsbedingungen während des Prozessablaufes. Somit ist es erforderlich, dass mehrere Funktionen/ Operationen in einem Bauteil nacheinander realisiert werden müssen (z.B. Einfüllen, Aufheizen/Rühren, Entleeren). Zusätzlich zum Stoffmengen- und Energiefließbild ist bei diskontinuierlichen und halb-kontinuierlichen Prozessen zusätzlich ein Verfahrensablaufplanentwurf zu entwickeln, der die Reihenfolge der erforderlichen Arbeitsgänge der betroffenen Teilsysteme enthält. Diskontinuierliche Prozesse (Chargenprozesse) werden beispielsweise bei geringen Stoffdurchsätzen oder häufigem Produktwechsel vorgesehen.

Für Stoff- und Wärmeaustauschprozesse muss die Art der Stromführung festgelegt werden. Ob eine Gegenstrom-, Gleichstrom oder Kreuzstromführung gewählt wird, hängt neben dem erforderlichen Austauschgrad auch von der konstruktiven Realisierung oder aber von prozessspez. Anforderungen, wie z.B. schonende Gutbehandlung oder große Triebkräfte zu Prozessbeginn, ab /1/.

Als wichtigstes Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes steht das verfahrenstechnische Fließbild (VT-Fließbild), das die bisherigen Informationen mit den in DIN 28004, Teil 3 genormten Bildzeichen dokumentiert, siehe **Bild 4**.

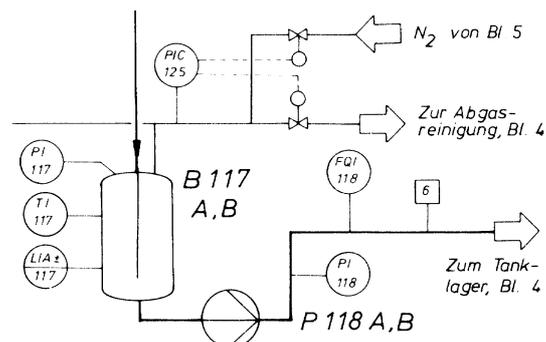


Bild 4: Ausschnitt eines VT-Fließbildes /4/

Diese erste Anordnung von den Komponenten der geplanten Anlage, die die erforderlichen Operationen durchführen sollen, ist mit dem entsprechenden Stofffluß und dessen Richtungsangabe (z.T. auch Energie- und Signalfuß) in dem Fließbild bereits zu diesem Zeitpunkt möglich. Denn aufgrund der Wahl der Grundoperationen mit den zugehörigen physikalischen Zuständen der Stoffe, die sich entweder aus den Anforderungen ergeben (Aufgabenstellung) oder im Zuge der Entwicklung erarbeitet werden, und der gewählten Betriebsweise kann bereits die Art der erforderlichen Apparate und Maschinen prinzipiell festliegen.

Zum Teil ergibt sich schon hier die Möglichkeit, die wesentlichen Armaturen im System zu platzieren sowie die Aufgabenstellung und den Ort für die Technik zum Messen, Steuern und Regeln des Prozesses festzuhalten.

Die Angabe von Zusatzinformationen im Fließbild, wie z.B. kennzeichnende Größen sowie die Höhenlage von wesentlichen Apparaten und Maschinen sind in der Praxis ebenfalls üblich und ergibt sich zumeist aus den (Fest-) Anforderungen aus der Aufgabenstellung, oder sie ist in diesem Entwicklungsschritt noch nicht möglich.

2.2.4 Festlegen der Bauart

In dieser Phase findet die detaillierte Auswahl und Berechnung aller für das Verfahren benötigten Komponenten statt. Sie ist die Schnittstelle zwischen der Verfahrens- und der Maschinenentwicklung und erfordert demnach einen hohen Informationsaustausch zwischen den Ablaufschritten aber auch zwischen den beteiligten Fachgebieten.

Hier werden auch sämtliche Armaturen, Rohrleitungen, die meß- und regelungstechnische Ausstattung und Sicherheitseinrichtungen (auch redundante Komponenten) festgelegt. Für die Rohrleitungen müssen die Nennweiten, Druckstufen und Werkstoffe bestimmt sowie alle Verbindungen und Unterstüütungen erarbeitet werden. Nach Auswahl der Bauformen müssen die kennzeichnenden Größen der Maschinen und Apparate (wie beispielsweise Fördervolumen, Trenngrenze) ebenso festgelegt werden wie deren wesentlichen Werkstoffe.

Sind alle benötigten Bauteile zur Verwirklichung des Prozesses verfügbar, lassen sich die nun vorliegenden Informationen wiederum grafisch im sog. Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (R&I-Fließbild, **Bild 5**) darstellen. Das VT-Fließbild wird somit weiter konkretisiert und insbesondere um die

Bildzeichen der MSR-Technik erweitert (DIN 19227 Blatt 1).

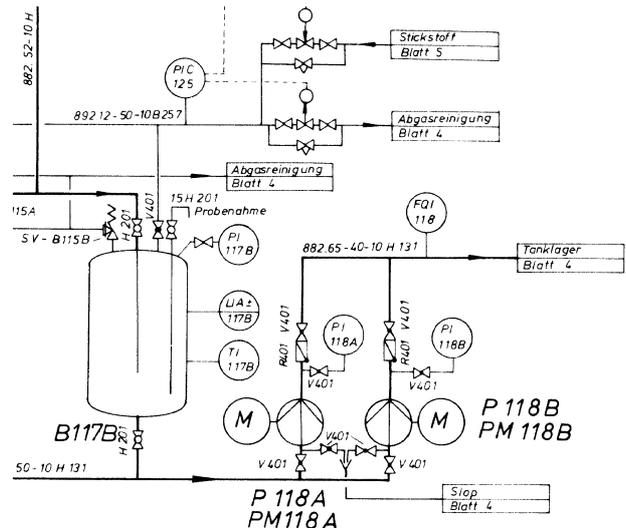


Bild 5: Ausschnitt eines R&I-Fließbildes /4/

Informationen, die im R&I-Fließbild nicht erkennbar werden, aber für die Betriebsvorbereitungen, die Inbetriebnahme oder bei Betriebsstörungen bekannt sein müssen, sind in weiteren Plänen wie Verriegelungsplan oder Funktionsplan zu erarbeiten sowie in vorläufigen Betriebsanweisungen zu dokumentieren. In Rohrleitungslisten werden alle Rohrleitungen mit den zugehörigen Daten eingetragen (Bezeichnung, Verlauf, Druck, Temperatur, Isolation, Begleitheizung, Korrosionszuschlag) /5/.

2.2.5 Maschinenentwicklung

Bei neuartigen oder modifizierten Verfahren kann und soll z.T. nicht auf bekannte (bewährte) Bauarten zurückgegriffen werden. Sollen Wirkstrukturen auf innovative Weise maschinell umgesetzt werden, muss auf hohem Abstraktionsniveau in den Konstruktionsprozess eingestiegen werden, der sich in die vier Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten unterteilt, siehe VDI Richtlinie 2222. Nicht immer müssen alle Phasen mit der gleichen Intensität durchgeführt werden. Zur Anpassung der Apparate und Maschinen an veränderte Stoff- oder Prozessparameter (Temperatur, Druck) reicht es z.B. aus, bei der Dimensionierung einzelner Bauteile beim Entwerfen und Ausarbeiten Konstruktionsparameter oder Werkstoffkenngrößen zu variieren und zu optimieren.

Der Einstieg in den Konstruktionsprozess kann demnach vor, während oder nach der Festlegung der Bauart erfolgen.

Ebenso ist es denkbar und z.T. auch erforderlich, nach der Entwicklung einer neuartigen Maschine

rückwirkend in die Verfahrensentwicklung einzugreifen. Massenbilanzen müssen ggf. korrigiert oder Komponenten hinzugefügt bzw. weggelassen werden.

2.2.6 Festlegen des Aufbaus

Auf der Grundlage der zuvor erfolgten Detailplanung kann nun der apparative Aufbau der Anlage in Maschinen- und Apparateaufstellungsplänen dokumentiert werden. Diese enthalten den räumlichen Aufbau, die Aufstellung und die Abstände zwischen den einzelnen Komponenten. Anhand dieser Informationen können die Gebäudepläne und anschließend die Rohrleitungsverlegung (Rohrleitungsisometrien, Bild 6) erarbeitet werden.

Heute ersetzen z.T. maßstäbliche 3D-Computer-Modelle der Anlage die früher aufwendig gestalteten Rohrleitungsmodelle zur Überprüfung der Konformität. Zum Ende des letzten Entwicklungsschrittes müssen sämtliche Informationen zur Bestellaufgabe sowie zur Fertigung und Montage vorliegen. Auch müssen die Arbeiten zur Erstellung von Betriebsanweisungen abgeschlossen sein.

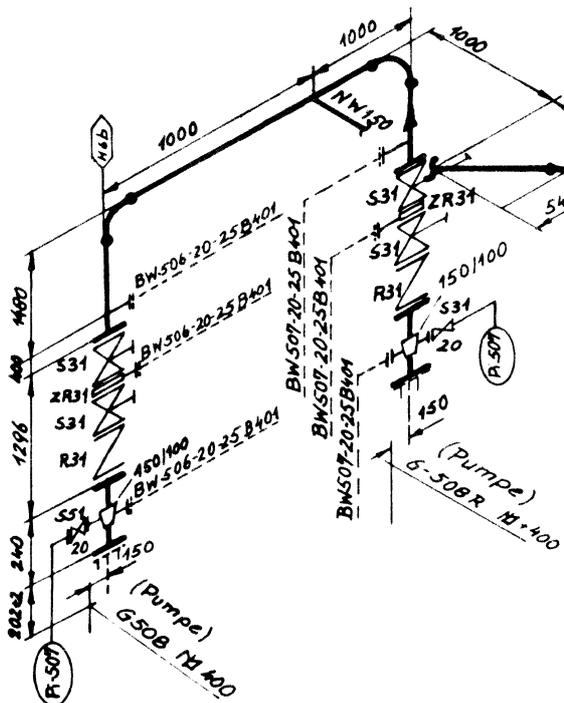


Bild 6: Ausschnitt einer Rohrleitungsisometrie /4/

3 Konkretisierung der Maßnahmen zur sicheren Entwicklung von Anlagen

Um nachhaltig sicher zu planen, ist es erforderlich, die Arbeitsergebnisse jedes einzelnen Entwicklungsschrittes einerseits auf Vollständigkeit, andererseits auf Schwachstellen/Fehler zu überprüfen. Beispiele der zu überprüfenden Punkte sind in Bild 7 aufgeführt.

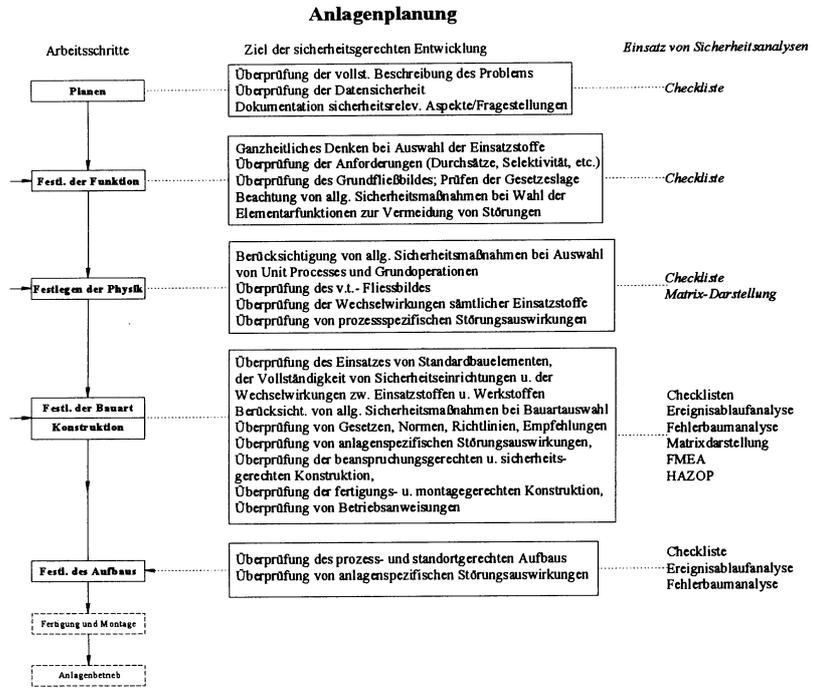


Bild 7: Entwicklungsbegleitende Maßnahmen zur Anlagenplanung

In Abhängigkeit des Konkretisierungsgrades bieten sich hierzu verschiedene prospektive Analysemethoden, sog. Sicherheitsanalysen, an, wie z.B. Checklisten, Matrix-Darstellungen, HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren), FMEA's, Fehlerbaumanalysen, Ereignisablaufanalysen oder Entscheidungstabellen, siehe /6/.

Die Methoden unterscheiden sich u.a.:

- in ihrem Leistungsspektrum (*Untersuchung binärer/nicht binärer Ursache-Wirkung-Beziehungen, qualitative/quantitative Auswertung, Erarbeitung von Gegenmaßnahmen, etc.*)
- in ihrer Vorgehensweise (*induktiv/deduktiv*)
- in ihrem Informationsbedarf (*Betriebsverhalten, Unfall-/Störfallauswertung, aktuelle Gesetzeslage, Ausfallraten, etc.*) und
- in ihrer Darstellungsweise (*Formblatt, log. Diagramme, Matrix, Fragestellungen*).

Welche Analyse zu welchem Zeitpunkt (Konkretisierungsgrad) nutzbringend eingesetzt wird, bzw. welche Analysen miteinander / nacheinander har-

monieren, ist u.a. abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationen sowie vom Zweck der Analyse (Überprüfung bekannter Sachverhalte, der Vollständigkeit, Ermittlung des Systemverhaltens, unbekannter Strukturen, etc.) sowie der Komplexität der Anlage.

In **Bild 7** (rechter Teil) ist eine Möglichkeit eines entwicklungsbegleitenden Einsatzes unterschiedlicher sicherheitsanalytischer Methoden aufgeführt. Der optimale Einsatzzeitpunkt der in der Praxis mit Erfolg angewendeten Sicherheitsanalysen bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen wird zur Zeit vom IMW untersucht.

Die Anwendung von Sicherheitsanalysen während der Anlagenplanung ist im Allgemeinen sehr zeitaufwendig, personalintensiv und bedarf zur effizienten Durchführung neben einem interdisziplinären Wissen ebenso Detailwissen, Vorstellungsvermögen sowie einer gewissen Analysenerfahrung. Vor allem das Erarbeiten von Schwachstellen und deren Ursachen der einzelnen (insbesondere innovativer und/oder sicherheitsrelevanter) Komponenten in Verbindung mit den festgelegten Stoff- und Prozessparametern aber auch angrenzenden Komponenten kann den Analysten Schwierigkeiten aufgrund fehlender Betriebserfahrung bereiten.

Es ist demnach unzumutbar, jeden Entwicklungsingenieur oder Konstrukteur eine umfangreiche Analyse „seines“ Systems durchführen zu lassen. Allerdings können die Arbeiten unterstützt werden, indem eine systematisch angelegte und erweiterbare sicherheitstechnische Datenbasis für die Entwicklungsarbeit zur Verfügung steht (**Bild 8**). Die Datenbasis muss nicht nur imstande sein, mögliche realistische und bereits bei ähnlichen oder gleichen Systemen aufgetretene Störungen mit deren Ursachen (evtl. auch Auswirkungen) sowie konkreten Vorschlägen für Gegenmaßnahmen zu dokumentieren. Sie muss ebenso ihre Informationen sinnvoll miteinander verknüpfen können, damit eindeutige Zuordnungen möglich sind.

In /7/ wurde beispielsweise gezeigt, dass die am IMW entwickelte KOMB-Analyse, als modifiziertes HAZOP-Verfahren, geeignet ist, Fehler an Anlagenkomponenten während der Planung eines verfahrenstechnischen Systems (Pilotanlage) zu erkennen und diese komponentenweise so zu systematisieren, dass Informationen für eine Datenbasis geliefert werden können.

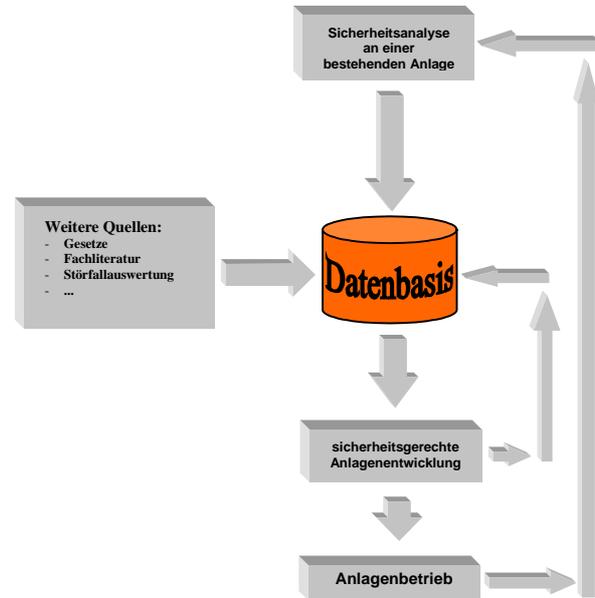


Bild 8: Aufbau und Nutzen der Datenbasis

Damit die Informationen der Datenbasis dem Konstrukteur frühzeitig zur Verfügung stehen können, sind sämtliche Planungsschritte, also nicht nur auf der Bauart-, sondern bereits auf der Funktions- und Physikebene zu berücksichtigen. Der Nutzen dieser Informationen für die Entwicklungsingenieure umfasst folgende Punkte:

- Vermeiden von Wiederholungsfehlern,
- Erkennen von Risiken beim Einsatz von Verfahren, Stoffen, Komponenten,
- Frühzeitige Integration von Sicherheitsanforderungen in die Verfahrens- und Maschinenentwicklung,
- Entwickeln der Kreativität zur Beseitigung von Störungsursachen,
- Einsatz in der Praxis bewährter Verfahren, Komponenten,
- Reduzierung der Anzahl von Entwicklungsänderungen,
- Bereitstellung maschinen- und anlagenunabhängiger Daten,
- Vorhandensein personenungebundenes Wissens,
- Zugänglichkeit interdisziplinärer Informationen,
- Reduzierung des Leistungsumfanges, Aufwandes von gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsanalysen.

Ebenso kann dieses Wissen bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen an bestehenden Anlagen die Vollständigkeit aber auch die Kreativität beim Auffinden von Gefahrenquellen und der anlagenweiten Ursache-Wirkungskette unterstützen.

3.1 Beispiel eines sicherheitstechnischen Maßnahmenkataloges

In Anlehnung an die oben beschriebenen Entwicklungsschritte ist beispielhaft eine Datenbasis für die Funktions-, Physik- und Bauartebene in Form eines sicherheitstechnischen Maßnahmenkataloges erarbeitet worden (**Tab. 2, 3** und **4** im Anhang). Der Katalog beinhaltet Maßnahmen zur Verhinderung von Störungen unter Angabe möglicher Ursachen für Elementarfunktionen, Grundoperationen und Bauteile. Zur Erarbeitung der Daten wurde zum einen auf Fachliteratur, zum anderen aber auch auf Störfallauswertungen und die Ergebnisse aus der durchgeführten Sicherheitsanalyse an einer Pilotanlage [7] zurückgegriffen.

Zunächst wurden 5 **Störungsarten** festgelegt, die einzeln oder gemeinsam bei einer Anlage zu einem (meldepflichtigen) Störfall führen können:

1. Keine oder unvollständige Funktionserfüllung,
2. Unerwünschte chemische Reaktionen, Effekte (*durchgehende Reaktion, Brand, Explosion*),
3. Unerwünschte physikalische Effekte (*Staubexplosion*),
4. Unerwünschte thermische Effekte (*Wärmeproduktion*),
5. Stofffreisetzen.

Anschließend wurden die **Ursachen** der Störungen, für die Gegenmaßnahmen erarbeitet werden mußten, wie folgt systematisiert:

1. Unzulässige Wahl der Funktion: (*Art, Position im Gesamtsystem*),
2. Unzulässige Stoffparameter der Eingangsstoffe: (*Konzentration, Aggregatzustand, Anzahl der Phasen, Partikelgröße, Verunreinigungen, etc.*),
3. Unzulässige Prozeßparameter: (*Temperatur, Druck, Verweilzeit (Stoffakkumulation, etc.) incl. unzulässiger Schwankungen, unsicherer Betriebspunkt*),
4. Unzulässige Energiezufuhr/-abfuhr: (*Vorhandensein einer unzulässigen Drucksenke/Druckquelle, Vorhandensein einer unzulässigen Temperatursenke/Temperaturquelle*),
5. Energieausfall,
6. Signalausfall,
7. Unzureichende Stoffkenntnis,
8. Fehlbedienung der Funktion: (*unzulässige Zugabe der Einsatzstoffe bzw. Entnahme der*

Ausgangsstoffe, Menge, Mengenverhältnisse, Zeitpunkt, Ort, Stoffverwechslungen),

9. Unzulässiger Wechselwirkungen zwischen Einsatzstoffen und anderen Stoffen im System: (*z.B. Hilfsmittel-, Lufteinbruch, Selbsterhitzung, Empfindlichkeit der Stoffe gegenüber Betriebsbedingungen (z.B. Druck, Temp., Verweilzeit) oder Unverträglichkeiten gegenüber Hilfsstoffen; Zusammentreffen von Zündquelle, Luft-sauerstoff und brennbarem Stoff, Verluste (Wärme, Druck, Reibung), unerwünschte Sedimentation, Korrosion*)
10. Unerwünschte äußere Einwirkungen auf System: (*z.B. Druck, Wärme, Wind, Niederschlag*)

Diese Einteilung nach bestimmten Störungs- bzw. Ursachenarten erweist sich als sinnvoll, da sie ein systematisches und damit vollständiges Auffinden der Störungen und ihrer Ursachen unterstützt. Zudem wird verhindert, dass neben der eigentlichen Basisursache Folgeereignisse in großer Anzahl aufgelistet werden, durch die die Anwendung der Maßnahmenkataloge für den Entwicklungsingenieur aufgrund der Informationsfülle ohne zusätzlichen Nutzen erschwert werden würde.

Beispielhaft sind in **Tab. 2, 3** und **4** (siehe Anhang) Auszüge aus den sicherheitstechnischen Maßnahmenkatalogen für die drei Abstraktionsebenen aufgeführt.

4 Zusammenfassung

Eine methodische Vorgehensweise der Anlagenplanung wird vorgestellt und anhand der durchzuführenden Arbeiten sicherheitstechnische Zielsetzungen der einzelnen Entwicklungsschritte abgeleitet. Die Notwendigkeit aber auch die Problematik der entwicklungsbegleitenden Durchführung prospektiver Sicherheitsanalysen zur frühzeitigen Identifizierung und Behebung von Gefahrenquellen und deren Ursachen wird erläutert. Eine systematische Wissensintegration in den Entwicklungsprozess vor allem aus Sicherheitsanalysen, die komponentenabhängige Störungen ermitteln können, wie beispielsweise die KOMB-Analyse, wird im Rahmen beispielhaft erarbeiteter sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge vorgestellt und deren Vorteile für den Entwicklungsingenieur und die Anlagensicherheit aufgezeigt.

5 Literatur

/1/ Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Methode- Zielsuche- Lösungssuche- Lösungsauswahl, Otto Salle Verlag, Frankfurt /Main, 1989

/2/ Mayer, P.: Gefahrstoffe 1, Fernstudienunterlagen Sicherheitstechnik/Umweltschutz, TFH Berlin, 1995

/3/ VDI Richtlinie 2222; Konstruktionsmethodik; Konzipieren technischer Produkte; VDI Handbuch Konstruktion 1977

/4/ Bernecker, G.: Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen: Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen, 3. Aufl., Düsseldorf, VDI-Verlag 1984

/5/ Mevenkamp, P.; Krux P.: Sicherheitsfragen bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen; Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage; Band 6 Umweltschutz

und Arbeitssicherheit; Verlag Chemie, Weinheim 1981

/6/ Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design; 1st Internet Conference on Process Safety; <http://www.prosicht.com/conference>, 1998

/7/ Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: Die KOMB-Analyse am Beispiel einer Niedertemperaturschwefelungsanlage; Institutsmittellung Nr. 23 (1998)

6 Anhang

- Tab. 2:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Funktionsebene
- Tab. 3:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Physikebene
- Tab. 4:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Bauartebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Funktionsebene
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 Stoff wird nicht o. nicht vollständig getrennt	U1 unzul. Wahl der Funktion	M 1 Suche nach alternativer Elementarfunktion	
		M 2 Überprüfung der Stellung und Schaltung der Elementarfunktion im System	
	U2 unzul. Stoffparameter	M 3 andere Elementarfunktion voranstellen	
		M 4 Fremdphasen vermeiden	
		M 5 Wahl eines sicheren Betriebspunktes in Abhängigkeit des Stoffes	
		M 6 extreme Betriebsbedingungen vermeiden	
	U3 unzul. Prozessparameter	M 7 schwierige Trennungen vermeiden, große Trennfaktoren anstreben	
M 8 grobe Körnung disperser Feststoffe bevorzugen			
U4 Fehlbedienung	M 9 fluide Phasen gegenüber festen Phasen bevorzugen		
S2 Brand	U5 unzur. Stoffkenntnis	M10 Anstreben eines hohen Automatisierungsgrades	
	U4 Fehlbedienung	M11 ausreichende Bestimmung der Sicherheitskennwerte der Stoffe (wie Explosionsgrenzen, Flammpunkt, Brennbarkeit, exotherme Zersetzung)	
	U6 Zusammentreffen Zündquelle, Sauerstoff u. brennbarer Stoff	M12 Betriebsanweisungen bei Abweichungen des bestimmungsgemäßen Betriebes (Löschmittel, Verhaltensregeln, etc.)	
		M13 Prüfung der Notwendigkeit von Explosionsschutzmaßnahmen	

Tab. 2: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Funktionsebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Physikebene
Grundoperation:		Klassieren	
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Phasen: fest-gasförmig, fest-flüssig			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 Klassierung mit unerw. Ergebnis, schwankend	U1 unerw. Partikelgrößenvert. des Gutes	M 1 Dispergierung des Aufgabegutes	
		M 2 Optimierung des Zugabeortes des Aufgabegutes	
		M 3 Vorabscheidung erforderlich	
	U2 zu hohe Feuchtigkeit	M 4 Trocknung der Partikel vor Klassierung	
		M 5 Bei Umluftbetrieb: ausreichende Frischlufterneuerung	
U3 zu hohe Durchsätze	M 6 Nachsichtung, Parallelschaltung erforderlich		
U4 Verunreinigungen (Abrieb, Fremdstoffe)	M 3 Vorabscheidung erforderlich		
	M 7 Verschleißfeste Ausführung des Sichters		
S2 Brand	U5 Verunreinigungen	M 8 Brandschutzmaßnahmen	
		M 3 Vorabscheidung erforderlich	
	U6 Aufheizung der Sichtluft	M 5 Bei Umluftbetrieb: ausreichende Frischlufterneuerung	
S3 instabiles Betriebsverhalten (Verstopfung)	U7 Betriebsbedingungen wechselnd	M 9 Bypassschaltung bei An- und Abfahrvorgängen	

Tab. 3: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Physikebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Bauebene
Bauart:		Abreinigungsfilter	
Grundoperation: filtrieren fest - gasförmig			
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 instabiles Betriebsverhalten (Verstopfung)	U1 zu hohe Filterflächenbelastung	M 1 Schwankungen der Betriebsbedingungen bei Auslegung berücksichtigen	
	U2 Stoff nicht kontin. förderbar	M 2 Trocknen des Feststoffs in Filterkammer	
	U3 unzur. Abreinigung des Filtermediums	M 3 pneumatische Abreinigungsverfahren mechanischen bei problematischen Stoffen bevorzugen	
		M 4 Geometrie des Filtermediums hinsichtlich Stoffeigenschaften und Abreinigungsverfahren auswählen	
		M 5 Beschichtung des Filtermediums	
		M 6 bei Druckluftabreinigung: Impulsdauer u/o Stärke im Versuch optimieren	
S2 Stofffreisetzung aus Filterkammer	U4 Filtermedium ungeeignet	M 7 verschleißfestes Filtermedium wählen	
		M 8 schonendes Abreinigungsverfahren wählen	
		M 6 bei Druckluftabreinigung: Impulsdauer u/o Stärke im Versuch optimieren	
	U5 Montage fehlerhaft	M 9 reingasseitige Montage in Konstruktion vorsehen	
		M10 Durchströmungsrichtung vom Filterhersteller beachten	
	U6 Wartung fehlerhaft	M11 Wartungsintervalle Standzeiten des Filtermediums anpassen	
M12 kein Öffnung der Filterkammer während des Betriebes (Betriebsanweisung)			
M13 Schutzkleidung vorschreiben (Betriebsanweisung)			

Tab. 4: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Bauteilebene