

**Technische Universität Dresden**  
**Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik**  
**Professur für Prozessleittechnik**

**Diplomarbeit**  
**Thema**

vorgelegt von: Marius Müller  
Matrikelnummer: 3661272  
geboren am: 29. September 1989 in Dresden

zum Erlangen des akademischen Grades

**Diplomingenieur**  
(Dipl.-Ing.)

Betreuer:

Dipl.-Ing. Annett Pfeffer (PLT/TUD)

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. Leon Urbas

Tag der Einreichung:

12.07.2017

# Bibliografischer Nachweis

---

Marius Müller

## **Thema der Diplomarbeit**

Diplomarbeit: Anzahl Seiten, Anzahl Abbildungen, Anzahl Literaturangaben

Datum

Technische Universität Dresden

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur für Prozessleittechnik

Autorenreferat:

Zusammenfassung der Arbeit

Bitte ersetzen Sie diese Seite vor dem Binden mit der Aufgabenstellung.

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Person 1
- Person 2

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Diplomabschlusses führen kann.

Dresden, 12. Juli 2017

Marius Müller

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Herausforderungen der deutschen Chemie- und Pharmaindustrie	1
1.2 Beschleunigung des Innovationstempo	3
1.3 Notwendigkeit von Sicherheitstechnik	6
1.4 Problemstellung dieser Arbeit	8
<b>2 Stand der Technik</b>	10
2.1 Modularisierung	10
2.2 Sicherheitsuntersuchung in Form einer Verfahren zur Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (Hazard and Operability Analysis, HAZOP)	12
2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Genehmigung von Chemischen Anlagen	12
2.3.1 Weltweite Regeln	12
2.3.2 Europäische Richtlinien und Gesetze	12
2.3.3 Deutsche Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln und Richtlinien	13
2.4 Risikoanalysemethoden	13
2.4.1 Quantitative Methoden	13
2.4.2 Qualitative Methoden	14
<b>3 Fehlerfortpflanzung</b>	15
3.1 Quantitative Modellbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden	17
3.2 Datenbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden	17
3.3 Qualitative Modellbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden	18
3.4 Übersicht Fehlerfortpflanzung in chemischen Anlagen	18
3.5 Vorstellung ausgewählter Algorithmen	18

3.6 Bewertung der Verwendbarkeit für modulare Anlagen . . . . .	18
<b>4 Literatursichtung</b> . . . . .	20
4.1 Sicherheit . . . . .	20
4.2 HAZOP . . . . .	30
4.3 automatisierte HAZOP . . . . .	32
4.4 Fehlerfortpflanzung . . . . .	33
4.4.1 modellbasiert, quantitativ . . . . .	33
4.4.2 modellbasiert, qualitativ . . . . .	33
4.4.3 datenbasiert . . . . .	35
4.4.4 hybride Methoden . . . . .	39
4.4.5 Rezensionen . . . . .	42
4.4.6 unsortiert . . . . .	43
4.5 Modularisierung . . . . .	44
4.5.1 Moduldarstellung . . . . .	49
4.6 Mini- und Milliplanttechnik . . . . .	50
4.7 Weitere . . . . .	51
4.8 unsortiert . . . . .	51
<b>5 Wichtige Begriffe</b> . . . . .	52
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	i
<b>Anhang</b> . . . . .	A-1

# Abkürzungsverzeichnis

---

<b>EG</b>	Europäische Gemeinschaft
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EWR</b>	Europäische Wirtschaftsraum
<b>HAZOP</b>	Verfahren zur Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (Hazard and Operability Analysis)
<b>FTA</b>	Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis)
<b>FMEA</b>	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis)
<b>DBN</b>	Deep Belief Network
<b>BBN</b>	Bayesian Belief Network
<b>RBN</b>	Restricted Boltzmann Machine
<b>TEB</b>	Tennessee Eastman Benchmark
<b>SDG</b>	Signed Directed Graph
<b>P&amp; ID</b>	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (Piping and instrumentation diagram)
<b>HFPM</b>	hierarchical fault propagation model
<b>IRML</b>	Infrastructure Resilience-Oriented Modeling Language
<b>PCA</b>	Principle component analysis
<b>DTW</b>	Dynamic time warping
<b>DAE</b>	Differential-algebraische Gleichung (Differential Algebraic Equation)

<b>GHS</b>	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
<b>SEVESO III</b>	Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates Text von Bedeutung für den Europäische Wirtschaftsraum (EWR)
<b>CLP</b>	Verordnung Nr. 1272/2008/EG
<b>IED</b>	Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU
<b>DGRL</b>	Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU
<b>MRL</b>	Maschinen-Richtlinie 2006/42/EG
<b>BImSchG</b>	Bundes-Immissionsschutzgesetz
<b>BImSchV</b>	Bundes-Immissionsschutzverordnung
<b>4. BImSchV</b>	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen
<b>12. BImSchV</b>	Störfall-Verordnung
<b>BetrSichV</b>	Betriebssicherheitsverordnung
<b>UVPG</b>	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
<b>GefStoffV</b>	Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen
<b>TRAS</b>	Technische Regeln für Anlagensicherheit
<b>TRBS</b>	Technische Regeln für Betriebssicherheit
<b>TRGS</b>	Technische Regeln für Gefahrstoffe
<b>TRwS</b>	Technische Regeln für wassergefährdende Stoffe
<b>TRBA</b>	Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe



# Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

---

$\alpha$        $\text{m}^2/\text{s}$       Temperaturleitfähigkeit

# Verzeichnis der verwendeten Indizes

---

l            liquid/flüssig

# Symbolverzeichnis

---

Notation	Bedeutung
----------	-----------

# Abbildungsverzeichnis

---

4.1 Erstellung eines Dynamischen Bayesschen Netzes . . . . .	40
--	----

# Tabellenverzeichnis

---

# Thesen der Diplomarbeit

---

1. Erste These

## 1.1 Herausforderungen der deutschen Chemie- und Pharmaindustrie

Das reale Bruttoinlandsprodukt Deutschlands wuchs von 1995 bis 2013 im Mittel weniger als 2% und wurde damit von den teils zweistelligen Wachstumsraten der Schwellenländer und insbesondere China deutlich übertroffen. Um international erfolgreich zu bleiben, sind die schnell wachsende Pharmazeutische Industrie und die exportlastige Chemische Industrie für die deutsche Wirtschaft von besonderer Bedeutung.

Die Chemische Industrie und die Pharmazeutische Industrie sind Schlüsselbranchen der deutschen Wirtschaft. Sie exportierten im Jahr 2013 Waren im Wert von über 150 Milliarden €. Dies entspricht 15% der deutschen Gesamtexporte des verarbeitenden Gewerbes. Der Export von pharmazeutischen Erzeugnissen wuchs in den Jahren 1995 bis 2013 jährlich im Durchschnitt 11,3% und damit schneller, als der jeder anderen Branche. Im gleichen Zeitraum entwickelte sich die Chemische Industrie nur unterdurchschnittlich – im globalen Wettbewerb verlor sie sogar Marktanteile. Als Ursache hierfür wird die besonders hohe Abhängigkeit der Branche von den in diesem Zeitraum in Deutschland stark gestiegenen Energiepreisen angesehen. Es müssen geeignete Maßnahmen entwickelt und angewandt werden, um die Standortnachteile auszugleichen. Nur so kann die Pharmazeutische Industrie ihre Wachstumsdynamik beibehalten und die Chemische Industrie ihre Entwicklungschancen realisieren. Eine wichtige Grundlage für den Erfolg der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie ist die beständige Weiterentwicklung und Erschaffung innovativer Produkte. Die allein im Jahr 2013 über 7500 in Deutschland neu angemeldeten Patente belegen die bereits aufgebrachte Innovationskraft. Die größten deutschen

Industriezweige Maschinen- und Fahrzeugbau meldeten im gleichen Zeitraum in Summe nur circa Dreihundert Patente mehr an. Die Entwicklungsleistung im Chemie- und Pharmabereich ist in Relation zu den übrigen Gewerbezweigen offensichtlich bereits überdurchschnittlich hoch. Es erscheint daher sinnvoll andere Faktoren zu untersuchen, welche die Entwicklung der betrachteten Industriezweige maßgeblich beeinflussen. [10]

Im aktuellen Bericht des Verbands der Chemischen Industrie untersucht Jan Limbers die Lage und Entwicklungsmöglichkeiten der chemisch-pharmazeutischen Industrie und prognostiziert die Entwicklung bis zum Jahr 2030. Durch die schnellere Verbreitung von Technologie und Wissen und den damit verbundenen gesteigerten globalen Wettbewerb ist ein weiter ansteigender Innovationsdruck zu erwarten. Wird die umfangreiche Forschungsarbeit auf die Bereiche Spezialchemikalien und Pharmazeutika fokussiert, so können die Standortnachteile, welche durch hohe Energiekosten entstehen, ausgeglichen werden und ein überdurchschnittliches Wachstum ist möglich. Dies erfordert jedoch insbesondere ein insgesamt höheres Innovationstempo. Der Entwicklungsfaktor Innovationstempo soll daher im Folgenden weiter betrachtet werden. [76]

Das Innovationstempo ist mit der benötigten „Time to market“ eines Produktes gleichzusetzen. Darunter versteht man in diesem Zusammenhang den Zeitraum von der ersten Idee für ein neues Produkt bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Produktionsanlagen im marktangepassten Maßstab. Die dazu erforderlichen Schritte umfassen die notwendige Forschungsarbeit zur Produkt- und Prozessentwicklung, die Planung und den Bau der Produktionsanlagen. Der Zeitraum nach erfolgter Produktentwicklung bis zum Produktionsbeginn umfasst in etwa 5 – 10 Jahre, wobei davon circa die Hälfte der Zeit auf Anlagenplanung und Konstruktion entfallen. [12]

Dieser Zeitraum muss reduziert werden, um die von J. Limbers prognostizierte Entwicklung der chemisch-pharmazeutischen Industrie zu ermöglichen. Die prinzipielle Notwendigkeit einer schnelleren und vor allem auch flexibleren Produktentwicklung beziehungsweise Produktion ist seit langem bekannt. Die Arbeit von I. E. Grossmann zu den Herausforderungen für die Forschung im Bereich der Verfahrens- und Anlagentechnik aus dem Jahr 2000 weist beispielsweise auf diese Herausforderungen hin [47].



Es wurden bereits zahlreiche Untersuchungen unternommen, wie das Ziel einer flexibleren und beschleunigten Produktentwicklung erreicht werden kann. Auf ausgewählte Ansätze wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

Der Übersichtsbeitrag von Wachsen u. a. [130] fasst die genannte Problemstellung mit Hinblick auf die Spezialchemie zusammen und bietet einen geeigneten Einstieg in aktuelle Untersuchungen zu dieser Thematik.

## 1.2 Beschleunigung des Innovationstempo

In Abschnitt 1.1 wurde die Relevanz der chemisch-pharmazeutischen Industrie für die deutsche Wirtschaft dargelegt und die Notwendigkeit eines erhöhten Innovationstempos begründet. In diesem Abschnitt werden Methoden zur Realisierung dieses Ziels vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Idee der Modularisierung von Anlagenkomponenten.

Ein Ansatz zur Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses wurde über ein Jahrzehnt hinweg an der Universität Clausthal untersucht. Anhand eines neu entworfenen Apparates zur Herstellung von Chlorsilanen aus Ferrosilicium und Chlorwasserstoff wurde von P. Dietz and U. Neumann in [36] gezeigt, wie durch eine frühzeitige Parallelisierung von Prozessplanung und dem Entwurf der notwendigen Maschinen die Entwicklungszeit verkürzt werden kann. Die Parallelisierung wird erreicht, indem die zu realisierenden Prozessschritte in Teilsysteme geringer Komplexität so weit zerlegt werden, dass sich deren Funktion durch naturwissenschaftliche Grundoperationen darstellen lässt. Durch die so erhaltene Darstellung wird ein Blick für die mögliche Zusammenfassung von mehreren Teilsystemen in einer einzigen Maschine ermöglicht. Eine derart entworfene Maschine kann auf innovative Weise einen Prozess optimal erfüllen. Prozessschritte wie Zerkleinern, Reagieren und Mischen können beispielsweise in einem Apparat vereint werden. Es wird bei diesem Entwicklungsprozess bewusst auf Standardlösungen verzichtet, was die Wiederverwendbarkeit der erhaltenen Lösungen erschwert. Das Innovationstempo kann jedoch erfolgreich gesteigert werden und es wird eine hocheffiziente Umsetzung für einen Produktionsprozess gefunden.

Neben der Parallelisierung von Prozessplanung und Anlagenentwicklung gibt

es weitere Methoden zur Verkürzung der Entwicklungszeit. Dazu zählen unter anderem der verstärkte Einsatz von mathematischen Modellen beispielsweise in Simulationen, das Verwenden von Mini- und Mikroplants und der Gebrauch von standardisierten Modulen.

Zahlreiche Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft haben sich 2009 zum Tutzing Symposium getroffen. Diskussionsschwerpunkt war die „50% – Idee Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit“. Es sollte analysiert werden, welche Methoden besonders dazu geeignet sind, um die „Time to Market“ auf die Hälfte zu reduzieren. Als Ergebnis wurden unter anderem die Thesen von Tutzing [34], ein Positionspapier [35] und ein Übersichtsvortrag [12] veröffentlicht. Es wurden die notwendigen Forschungsschwerpunkte herausgearbeitet, um das Ziel eines signifikant erhöhten Innovationstempos zu erreichen.

In diesen Arbeiten wurde als Kernthema die Modularisierung von Anlagen und deren Komponenten identifiziert. Durch die Verwendung von Standardlösungen sollen umfangreiche Detailarbeiten entfallen und Anlagenkomponenten durch erneuten Einsatz perfektioniert werden. Dies bedeutet eine bewusste Abkehr von dem in [36] vorgestellten Vorgehen einer parallelisierten Prozess- und Anlagenentwicklung in Verbindung mit einer optimal ausgelegten Anlage. Statt dessen werden wiederverwendbare Module in diskreten Größen erzeugt, welche skalierbar und vielseitig einsetzbar sein sollen. Die Skalierbarkeit ermöglicht dabei eine flexible Veränderung von Produktionsvolumina und damit eine schnelle Anpassbarkeit an Marktveränderungen. Module können dezentral vorgefertigt und am Standort der Gesamtanlage schnell zusammengefügt werden. Dies beschleunigt die Konstruktion der Gesamtanlage.

Die Verwendung von Modulen bedeutet eine signifikante Änderung im Entwicklungsprozess. Es wurden mehrere Themenschwerpunkte identifiziert, welche die notwendigen Anpassungen beschreiben sollen. Die hier aufgeführten Schwerpunkte sind dem bereits aufgeführten Positionspapier zur 50 % – Idee entnommen [35]. Die Reduktion der Entwicklungszeit auf die Hälfte durch den Einsatz von Modulen ist nur möglich, wenn die genannten Themen erfolgreich bearbeitet werden. Ein Themenschwerpunkt ist die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung von Modulen. Module sollen abgeschlossene Funktionseinheiten bilden. Für einzelne Prozessschritte sind Apparate zu entwickeln, welche diese realisieren können. Sie sollen skalierbar und getrennt von anderen Anlagenteilen testbar sein.

Die Funktion eines Moduls und die Dokumentation in verschiedenen Detaillierungsgraden sowie entwickelte Skalierungsvarianten und alle weiteren relevanten Informationen sollen für Anlagenbauer, Zulieferer, Prozessplaner und alle übrigen am Produktentwicklungszyklus Beteiligten abrufbar sein. Dazu sind geeignete Informationsmodelle notwendig. Diese sollten in Verbindung mit bestehenden Softwarelösungen verwendet werden können. Das Konzept der Modularisierung soll in allen Phasen eines Projektes zur Entwicklung neuer Produkte eingesetzt werden. Die Projektplanung muss dazu umstrukturiert werden. Die notwendigen Anpassungen der etablierten Projektabläufe sind zu erarbeiten und zu testen. Um ein durchgängiges Modulkonzept zu etablieren ist die Definition von Standards und Schnittstellen zwischen Modulen unumgänglich. Dazu ist eine firmenübergreifende Kooperation und die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft notwendig.

Weiterhin muss die Automatisierungstechnik an die modulare Bauweise angepasst werden. Insbesondere ist zu erörtern, wie autonom einzelne Module gesteuert werden sollen und wie die Kommunikation zwischen Modulen im Rahmen einer Gesamtanlage konzipiert werden kann.

Diese Themen wurden weitreichend untersucht. Die prinzipielle Anwendbarkeit der modularen Anlagenbauweise konnte anhand mehrerer Fallstudien im Rahmen des Projektes F<sup>3</sup>-Factory gezeigt werden. Die Ergebnisse wurden im Abschlussbericht dieses Projektes [16] veröffentlicht. Weitere Untersuchungen wurden beispielsweise im Projekt CoPIRIDE [115] durchgeführt.

Die Anwendbarkeit von Modulen konnte demnach bereits erfolgreich gezeigt werden. Es sind aber noch einige Forschungsschwerpunkte offen. Insbesondere ein wichtiger Gesichtspunkt wurde bisher noch nicht umfassend betrachtet: die Auswirkung der Modularisierung auf notwendige Sicherheitsbetrachtungen. Bei der Planung und Inbetriebnahme einer neuen prozessleittechnischen Anlage ist die Gewährleistung des sicheren Betriebs von höchster Wichtigkeit. Dazu sind geeignete Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Die Auswirkung der Modularisierung von Anlagen auf Sicherheitsuntersuchungen findet in den direkten Veröffentlichungen zum Tutzing Symposium keine gesonderte Beachtung. Im Abschnitt 1.3 wird auf die prinzipielle Problemstellung von Sicherheitsuntersu-

chungen eingegangen und im daran anschließenden Abschnitt 1.4 das Thema dieser Arbeit herausgearbeitet.

## 1.3 Notwendigkeit von Sicherheitstechnik

Sicherheit ist ein menschliches Grundbedürfnis. Wird dieses Bedürfnis nicht in ausreichendem Maße erfüllt, so hat dies gravierende Auswirkungen. Die massenweise Flucht aus Kriegsgebieten ist beispielsweise ein solcher Extremfall. Unter normalen Umständen können Risiken durch geeignete Mittel reduziert werden. Dazu kann entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensfalles oder dessen schädliche Auswirkung gemindert werden. Um eine dieser Methoden anzuwenden ist jedoch entweder ein Kostenaufwand oder die Einschränkung von möglichem Nutzungsumfang notwendig. Typische Beispiele des Alltags sind die Verwendung von Versicherungen um die Auswirkungen eines Schadens zu reduzieren und die Einschränkung der erlaubten Fahrtgeschwindigkeit in Städten zur Reduktion von Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten. Es gibt offensichtlich einen Interessenkonflikt zwischen Risikominimierung und der Aufwendung von Kapital oder der Einschränkung von Nutzungsumfang. Es ist eine gesellschaftliche Aufgabe, einen Kompromiss zwischen dem Wunsch nach hoher Sicherheit und den notwendigen Maßnahmen zu finden. Diese Aufgabe soll in erster Linie von der Politik gelöst werden.

Ein geeignetes Mittel dieses Ziel zu erreichen ist die Verwendung einer Risikoanalyse. Diese soll Aufschluss über mögliche schadhafte Ereignisse, deren Auswirkungen und mögliche Präventionsmethoden liefern. Die Verwendung von Risikoanalysen ist kein Konstrukt der Neuzeit, sondern existiert bereits seit mehreren hundert Jahren. Das Buch von Peter L. Bernstein „Against the Gods: The Remarkable Story of Risk“ [8] zeigt die geschichtliche Entwicklung von Risikobetrachtungen auf. Die zweite Auflage des Werkes von Bilal M. Ayyub ist eine aktuelle umfassende Referenz zum Thema Risikoanalyse [2].

Im Bereich der chemischen Industrie gab es lange Zeit keine verbindlichen Richtlinien, wie die Sicherheit von Anlagen zu bewerten ist und welches Sicherheitslevel als von der Gesellschaft akzeptiert angesehen werden kann. In Folge einer Reihe schwerer Chemieunfälle wurden die aktuellen Gesetze zum Betrieb sicherheitsrele-

vanter Anlagen entworfen und weiterentwickelt. Maßgeblich für die Forderung und Entwicklung von einheitlichen Regeln waren insbesondere die Unfälle in Seveso – Italien im Jahr 1976, Bhopal – Indien im Jahr 1984, Enschede – Niederlande und Baia Mare – Rumänien im Jahr 2000 sowie Kolontár – Ungarn im Jahr 2010. Diese Unfälle waren allesamt mit gravierenden Humanschäden verbunden. In Folge des Unfalls in Seveso 1976 entstand das erste europaweite Regelwerk – die Seveso I Richtlinie. Dieses wurde weiterentwickelt und gilt heute in Form der Seveso III Richtlinie 2012/18/EU. Die Seveso III Richtlinie wurde in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU) in Form nationaler Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umgesetzt. In Deutschland dient dazu das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der derzeitig aktuellen Fassung vom 05.04.2017.

Entsprechend der aktuellen deutschen Gesetze sind geeignete Methoden anzuwenden, um den sicheren Betrieb von sicherheitstechnisch relevanten Anlagen sicherzustellen. Dazu gehören chemische Anlagen, welche potentiell gefährliche Stoffe verarbeiten und in Modulbauweise entsprechend den im Abschnitt 1.2 dargelegten Konzepten konzipiert werden. Modulare Anlagen müssen daher in geeigneter Weise auf die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen untersucht werden. Dieser gesonderten Problematik wurde bisher wenig Beachtung geschenkt. Die Arbeit von Fleischer et. al. [41] setzt sich als eine der wenigen Veröffentlichungen mit dieser Problematik auseinander. Die Arbeit von Fleischer et. al. konzentriert sich auf die Sicherheitsbetrachtung von Modulen in Containerbauweise, wie sie im Projekt F<sup>3</sup> erfolgreich eingesetzt wurden. Sie weist auf die prinzipiellen Probleme einer Sicherheitsbetrachtung von modularen Anlagen hin. Zum einen ist mit den aktuellen Methoden eine Wiederverwendung von bereits durchgeführten Sicherheitsanalysen beispielsweise derer von einzelnen Modulen nicht möglich. Weiterhin wird die Flexibilität beim Einsatz von Modulen, welche einen der größten Vorteile dieses Konzeptes bildet, stark eingeschränkt. Die Ursache davon liegt darin, dass bei Änderungen an einer genehmigungspflichtigen Anlage eine erneute Sicherheitsüberprüfung der gesamten Anlage durchzuführen ist. Dies ist sehr Kosten- und Zeitintensiv und daher ein Problem, welches gelöst werden sollte. Der Ansatz von Fleischer et. al. sieht eine Zerteilung der Sicherheitsanalyse vor. Die Wechselwirkung zwischen Modulen soll mit Hilfe einer HAZOP analysiert werden. Dies ist aber erst möglich, wenn die Anlagenplanung weit fortgeschritten

ist, und eine konkrete Auswahl der einzubindenden Module stattgefunden hat. Die Untersuchung einzelner Module soll unter Verwendung von Checklisten und Heuristiken durchgeführt werden. Diese Untersuchung liefert dann Aufschluss über die Verwendbarkeit der Module für einen bestimmten Prozess. Um die Einsetzbarkeit prinzipiell bewerten zu können, wird die Definition von Stoffklassen, Reaktionsklassen und zulässigen Betriebsfenstern vorgeschlagen. Einem Modul wird dann anhand seiner Eigenschaften jeweils eine diskrete Stufe dieser Kategorien zugeordnet und durch diese Zuordnung kann die Einsetzbarkeit eines Moduls für einen Prozess schnell und frühzeitig bewertet werden. Auf die konkrete Verwendbarkeit dieser intramodularen Sicherheitsanalyse für eine nachfolgende HAZOP wird nicht im Detail eingegangen. Das Problem der Wiederverwendbarkeit von durchgeführten Sicherheitsbetrachtungen von einzelnen Modulen für eine anschließende Analyse der Gesamtanlage ist Motivation für die vorliegende Arbeit. Das konkrete Thema der Arbeit wird im folgenden Abschnitt 1.4 detailliert formuliert.

## 1.4 Problemstellung dieser Arbeit

Es ist zu beachten, dass eine zeitaufwendige Sicherheitsbetrachtung nach erfolgter Auswahl von Modulen die Zeit bis zur Erteilung der Betriebserlaubnis und damit der Entwicklungszeit maßgeblich verlängern kann. Es ist daher wünschenswert, die Sicherheitsanalyse der geplanten Gesamtanlage so zügig wie möglich durchzuführen.

Ein einzelnes Modul sollte bereits einer Sicherheitsuntersuchung unterzogen werden. Dazu ist die in Abschnitt 1.3 vorgestellte Methode von Fleischer et. al. , welche auf dem Einsatz von Checklisten und Heuristiken basiert, geeignet. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern die Erkenntnisse aus der Sicherheitsbetrachtung eines einzelnen Moduls für die Sicherheitsbetrachtung der Gesamtanlage verwendet werden können.

Ein geeignetes Mittel zur Sicherheitsuntersuchung von Gesamtanlagen ist die Durchführung einer HAZOP. Im Rahmen dieser Analyse wird geprüft, wodurch Anlagenparameter vom Normbetrieb abweichen können und mit welchem Risiko eine solche Abweichung verbunden ist. Dazu werden Fehler identifiziert, welche ungewollte Schwankungen von Prozessparametern zur Folge haben können. Zur

Bewertung des Risikos muss die Auswirkung des Fehlers auf die Gesamtanlage betrachtet werden. Dazu ist eine Analyse der Fehlerfortpflanzung notwendig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu untersuchen, welche Algorithmen geeignet sind, um eine automatisierte Untersuchung der Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen durchzuführen. Als Basis für die Algorithmen sollen die Beschreibung der Module, die HAZOP-Studien der Module und die Beschreibung der modularen Gesamtanlage dienen.

Anhand eines geeigneten Beispiels soll überprüft werden, welche Auswirkungen von Fehlern, die in einem Modul auftreten, mit der vorgegebenen Instrumentierung in den anderen Modulen der Anlage erkannt und beherrscht werden können. Eine solche automatisierte Bewertung der Fehlerfortpflanzung auf Basis der Sicherheitsuntersuchung von Anlagenmodulen kann die HAZOP einer Gesamtanlage maßgeblich beschleunigen und damit das Innovationstempo erhöhen.

## 2.1 Modularisierung

Im Kapitel 1 wurde erläutert, dass die Zukunftsfähigkeit der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie von Flexibilität und Geschwindigkeit bei der Entwicklung und Herstellung von Produkten maßgeblich abhängig ist. Als geeignete Mittel um diese Ziele zu erreichen gelten der Einsatz von Mikro- und Millianlagen sowie die Verwendung von modularen Komponenten. Diese beiden Produktionsbeziehungsweise Planungsansätze sind eng miteinander verbunden und werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Die Entwicklung eines neuen Produktes besteht üblicherweise aus vier Phasen. Zu Beginn wird die Herstellbarkeit eines neuen Produktes in einer Laboranlage in Form eines Batchprozesses untersucht. Darauf aufbauend wird eine Minianlage entworfen. Die Produktionsmengen werden dann durch Konstruktion einer Pilotanlage erhöht und der Produktionsprozess umfassend getestet und verfeinert. Auf Basis der Pilotanlage wird zuletzt die Produktionsanlage geplant und das neue Produkt in industriellen Mengen gefertigt. Je nach prognostiziertem Verkaufsvolumen des entwickelten Produktes geschieht die industrielle Produktion als Kontinuierlicher- oder Batchprozess. [48]

Der Entwicklungsprozess kann stark beschleunigt werden, wenn die Produktionsmengen der Laboranlage ohne großen Konstruktionsaufwand hoch skaliert werden können. Die Konstruktion einer Pilotanlage ist dann nicht notwendig.

Das Hochskalieren eines entwickelten Batchprozesses ist kompliziert und nicht uneingeschränkt möglich. Dies betrifft insbesondere stark exotherme Reaktionen, da die Wärmeabfuhr in einem Reaktor nicht beliebig groß werden kann. [15] Durch den Einsatz von Mikro- und Millireaktoren wird das Hochskalieren von Prozessen jedoch ermöglicht und der Entwicklungsprozess kann stark beschleunigt



werden. [48], [15], [51], [64], [53]

Solche Reaktoren sind durch einen kontinuierlichen Betrieb, Strömungskanäle mit Durchmessern im Mikro- bis Millimeterbereich und Wärmeaustauschflächen pro Volumeneinheit, welche circa um den Faktor 100 im Vergleich zu klassischen Anlagen höher sind, gekennzeichnet. Dies ermöglicht eine hohe Energieableitung, was eine inhärente Sicherheit zur Folge hat. [15], [65] In Folge dessen sind Scale-Up Faktoren von zehntausend und darüber möglich. [7]

Der Einsatz dieser Reaktoren zur Produktentwicklung erfordert die Umwandlung des Batchprozesses der Laboranlage in einen kontinuierlichen Prozess. Diese Problematik ist seit dem Durchbruch der Mikroprozesse zu Beginn der neunziger Jahre bekannt und wurde weitreichend untersucht. [51] Die Arbeit von Hugo und Lopez widmet sich dieser Problematik. [57]

Die wirtschaftlichen Vorteile und die mögliche Zeitersparnis bei der Produktentwicklung wurden anhand zahlreicher Fallbeispiele erfolgreich nachgewiesen. [15], [7], [48] Neben Reaktoren sollen auch andere Prozessschritte als Mikro- und Millianlagen realisiert werden. Insbesondere die Trennung von Stoffen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt [51]. Die aktuelle Arbeit von Yang u. a. gibt den Kenntnisstand zur Verwendung von Mikroanlagen zur Destillation wieder [141].

Mikro- und Millireaktoren sind ein bewährtes Mittel der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie, um Produkte schneller und kostengünstiger zu entwickeln. Insbesondere die Skalierbarkeit durch Parallelisierung von vielen Reaktoren der gleichen Bauart ist ein großer Vorteil. Diese Wiederverwendbarkeit ist ein wichtiger Aspekt der Tutzing Thesen [34]. Mikro- und Millireaktoren können als eine Ausprägung modularer Anlagenkomponenten angesehen werden. Da sie nur einen Spezialfall modularer Komponenten bilden wird auf ihre Besonderheiten im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen. Statt dessen liegt der Fokus im Folgenden auf der allgemeinen Verwendung von modularen Anlagenkomponenten und deren Sicherheitsbetrachtungen.

- Arbeit von Bramsiepe/ Schembecker, Übersichtsbeiträge, offene Fragen
- Arbeiten zur Verwendung von Modulen im Planungsprozess -> notwendige klare Beschreibung von Modulen, automatische Verwendbarkeit

- Arbeiten zur Beschreibung von Modulen (PU, MTP)
- Arbeiten zur Verwendung von Modulen (Beispiele)
- Arbeiten zur Wirtschaftlichkeitsrechnung von Modulen – nicht Milli- Mini-plants
- fortlaufende Relevanz von Modulen anhand von Quellen

Wichtige Papiere sind: [9]

## 2.2 Sicherheitsuntersuchung in Form einer HAZOP

## 2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Genehmigung von Chemischen Anlagen

### 2.3.1 Weltweite Regeln

- Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) **Einstufung von gefährlichen Stoffen** -> in Europa durch Verordnung Nr. 1272/2008/EG (CLP) umgesetzt, Bezug zur BImSchG

### 2.3.2 Europäische Richtlinien und Gesetze

- Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates Text von Bedeutung für den EWR (SEVESO III)
- Maschinen-Richtlinie 2006/42/EG (MRL)
- Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU (IED)
- Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU (DGRL)

### **2.3.3 Deutsche Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln und Richtlinien**

- Arbeitsschutzgesetz
- Produktsicherheitsgesetz
- BImSchG
- Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV)
- Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)
- Störfall-Verordnung (12. BImSchV)
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) -> Prüfung, ob Anlage gefährlich für Umwelt sein könnte
- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
- Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (GefStoffV) -> Explosionsschutz, Gefahrenpotential von Arbeiten,
- Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS)
- Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)
- Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)
- Technische Regeln für wassergefährdende Stoffe (TRwS)
- Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA)

## **2.4 Risikoanalysemethoden**

### **2.4.1 Quantitative Methoden**

- Was macht quantitative Methode aus
- Welche Methoden gibt es
- Vor/ Nachteile der Methoden
- Verweis auf Forschung zur Methode, Verbreitung usw.

### **2.4.2 Qualitative Methoden**

- Was macht qualitative Methode aus
- Welche Methoden gibt es
- Vor/ Nachteile der Methoden
- Verweis auf Forschung zur Methode, Verbreitung usw.

### **HAZOP**

- notwendige Schritte
- Ansätze der Automatisierung

Die Fortpflanzung von Störungen beim Betrieb chemischer Anlagen ist ein intensiv erforschtes Problem. Von Interesse sind Abweichungen von Prozessvariablen von einem definierten Sollwert und Abweichungen des Betriebszustandes von Geräten, Instrumenten und Gewerken vom Optimalzustand und daraus resultierende Auswirkungen auf den Prozess.

Die Abweichung einer Prozessvariable vom Sollwert kann vielfältige, verkettete Ursachen haben. Am Beispiel einer stark exothermen Reaktion zweier flüssiger Stoffe A und B soll dies verdeutlicht werden. Die Reaktion sei dabei noch in der Erprobungsphase, weswegen keine Erfahrungswerte zu der Reaktion in der gegebenen Anlage bestehen.

Ein Reaktionsbehälter mit Rührer habe zwei über Pumpen gesteuerte Zuflüsse. Um die gewünschte Reaktion zu starten wird der Stoff A eindosiert. Durch langsame Zugabe von Stoff B soll unter Vermischung der Reaktanten die Reaktion gestartet werden. Sei nun der Rührer durch Alterung deutlich langsamer als im optimalen Zustand und außerdem der im Reaktor befindliche Temperatursensor defekt. Trotz Zugabe von Stoff B und Einschalten des Rührers findet die Reaktion dann nicht zu dem erwarteten Zeitpunkt statt, da keine ausreichende Vermischung der Stoffe A und B zustande kommt. Eine Ursachenanalyse ist in Folge fehlender Erfahrungswerte sehr kompliziert. Ein mögliches Vorgehen besteht in der vermehrten Zugabe von Stoff B in der Annahme so die Reaktion starten zu können. Durch die vermehrte Zugabe und das langsame Vermischen der Reaktanten beginnt die Reaktion. Dies wird durch den defekten Temperatursensor jedoch nicht bemerkt. Der Stoff B wird daher weiter zudosiert. Die stark exotherme Reaktion geht in Folge dessen durch. Dies wird jedoch erst durch einen Druckanstieg im Behälter erkannt, welcher durch Verdampfen der Reaktanten zustande kommt. Aus Sicht der Anlagenfahrer hat die Reaktion jedoch noch immer nicht begonnen, da die Temperatur im Reaktor nicht gestiegen ist.

Der Druckanstieg könnte also einem fehlerhaften Drucksensor oder einer nicht erkannten Reaktion geschuldet sein. Die Ursachenanalyse für den erhöhten Druck ist zu diesem Zeitpunkt in Folge einer möglichen Verkettung von Fehlfunktionen sehr kompliziert. Eine durchgehende Reaktion ist hochgradig gefährlich. Wird die Gefahr nicht unmittelbar erkannt, so kann dies verheerende Folgen für die Anlage, die Betreiber und die Umwelt haben.

Das Auffinden möglicher Ursachen eines vorliegenden Fehlers ist eine Aufgabe, welche mit Hilfe der Analyse von Fehlerfortpflanzungen gelöst werden soll. Weitere Aufgaben sind die Bewertung und Auslegung von Systemen, welche das Betriebsrisiko einer Anlage auf ein gewünschtes Level bringen sollen. Die Planung optimaler Wartungsintervalle ist eine Aufgabe, welche direkte auf deren Ergebnissen aufbauen kann.

Im Rahmen einer Fehlerfortpflanzungsanalyse wird je nach Verfahren der Einfluss von Prozessgrößen, die räumliche Positionierung von Anlagenteilen, die Alterung von Anlagenkomponenten oder eine Kombination dieser Faktoren betrachtet. Je nach Art der verwendeten Informationen unterscheidet man in

- modellbasierte Verfahren und
- datenbasierte Verfahren.

Die modellbasierten Verfahren sind solche, welche Wissen über die Struktur und Funktion einer Anlage auswerten. Zur Durchführung solcher Verfahren werden meist Experten eingesetzt. Die datenbasierten Verfahren analysieren hingegen Messwerte, welche durch den Betrieb der Anlage oder Simulation der Anlage verfügbar werden. Die Auswertung findet dann beispielsweise mit Hilfe statistischer Methoden oder Verfahren zur Mustererkennung statt.

Als Alternative dazu ist auch eine Einteilung in off-line und on-line Verfahren möglich. Ersteres sind Verfahren, die losgelöst vom Betrieb einer Anlage durchgeführt werden. Ein solches Verfahren kann beispielsweise vor der Erstinbetriebnahme auf Basis von Expertenwissen durchgeführt werden. Dann ist ein solches Verfahren gleichzeitig ein modellbasiertes Verfahren. Off-line Verfahren können aber auch datenbasierte Verfahren sein. Dies ist dann der Fall, wenn Messwerte durch zeitintensive Rechenoperationen ausgewertet werden. Ist dies nicht mehr in Echtzeit möglich, so kann nur eine off-line Analyse durchgeführt werden.

Ist ein Verfahren in Echtzeit berechenbar und basiert es auf aktuellen Messdaten einer Anlage, so wird es als on-line Verfahren kategorisiert. Ein solcher Verfahren kann zwangsläufig frühestens nach der Erstinbetriebnahme einer Anlage durchgeführt werden.

Eine klare Abgrenzung der Einteilung in off-line und on-line Verfahren beziehungsweise in modell- und datenbasierte Verfahren ist offensichtlich kompliziert. Im Rahmen dieser Arbeit liegt ein Augenmerk auf den notwendigen Daten, welche zur Durchführung eines Verfahrens zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen notwendig sind. Die Einteilung, ob es sich um on-line oder off-line Verfahren handelt, ist hingegen nebensächlich. Daher wird im Folgenden nur noch in datenbasierte Verfahren, modellbasierte Verfahren und Hybride zwischen diesen beiden Typen unterschieden.

In Abhängigkeit von der Art der erhaltenen Modelle unterteilt man weiterhin in

1. quantitative Modelle und
2. qualitative Modelle.

[144]

Beischreibung, was die beiden Modelle ausmacht. Übergang zum Rest des Kapitels

Auf diese Analysemethoden wird im Folgenden eingegangen. Es werden wichtige Arbeiten zu den jeweiligen Methoden vorgestellt und es wird auf die Eignung für einen Einsatz in modularen Anlagen eingegangen.

### **3.1 Quantitative Modellbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden**

### **3.2 Datenbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden**

Dies Verfahren beruhen auf der Verwendung von historischen Messdaten konkreter Anlagen. Je nach Verfahren werden Messdaten zum Normalbetrieb oder beziehungsweise und Daten zum Störbetrieb benötigt. Manche Methoden benötigen weiterhin ein Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (Piping and instrumentation diagram, P& ID). Ziel der Verfahren ist es zum einen Störungen

der Anlage frühzeitig zu erkennen und zum anderen deren Ursache oder Ursachen zu ermitteln. Dazu werden Ursache–Effekt Beziehungen zwischen untersuchten Parametern ermittelt.

Die Auswertung historischer Messdaten basiert zumeist auf statistischen Methoden. Die kausalen Zusammenhänge, welche mit Hilfe dieser Methoden ermittelt werden sollen, können dann geeignet als Graphen dargestellt werden. Wie man aus statistischen Größen kausale Zusammenhänge ermitteln kann wird in den frühen Werken Holland [55] und Pearl [99] aufgezeigt. Ein umfassendes Lehrbuch zu dieser Thematik wurde von Pearl veröffentlicht, welches mittlerweile in der zweiten Auflage verfügbar ist [100].

Datenbasierte Methoden sind hervorragend für die Erstellung von quantitativen Modellen geeignet. Eine Erstellung von qualitativen Modellen ist ebenfalls möglich. **Beispiele**

**Nennung von Verfahren** [144], [116]

### **3.3 Qualitative Modellbasierte Fehlerfortpflanzungsmethoden**

### **3.4 Übersicht Fehlerfortpflanzung in chemischen Anlagen**

### **3.5 Vorstellung ausgewählter Algorithmen**

### **3.6 Bewertung der Verwendbarkeit für modulare Anlagen**

Wichtige Gesichtspunkte:

- Welche Daten sind notwendig
- Automatisierbarkeit der Berechnung



- Dokumentationsfähigkeit der Ergebnisse
- Sind die Ergebnisse für eine HAZOP nutzbar

## 4.1 Sicherheit

[105] Erklärungen zu **quantitativen** Risikoanalysen anhand zweier Beispiele.

*Alles nur zitiert!*

Im internationalen Anlagenbau wird in zunehmendem Maße die Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse gefordert. Die Methodik kann nicht nur zum Nachweis der Einhaltung übergeordneter Akzeptanzkriterien dienen, sondern auch als eine qualifizierte Entscheidungsgrundlage z. B. zu Sicherheitsabständen und -barrieren verwendet werden. Dies kann von nicht probabilistischen quantitativen Verfahren (z. B. HAZOP)) nicht geleistet werden. Durch die Identifizierung der Hauptrisikquellen in der Anlage ermöglicht eine quantitative Risikoanalyse (QRA) zudem die Ableitung von Risikominderungsmaßnahmen, deren Wirksamkeit sich mit Hilfe von Sensitivitätsberechnungen analysieren und bewerten lässt. **Quantitative Sicherheitsanalyse**

[14] Probleme bei der Anwendung von LOPA (Layer of Protection Analysis) (vereinfachte quantitative Sicherheitsbetrachtung ausgewählter Probleme, wenn eine HAZOP o. ä zur Identifikation risikoreicher Szenarien bereits durchgeführt wurde)

Ein erstes Zusammenhängendes Buch zur Anwendung von LOPA ist 2001 erschienen. Die Methode hat vielerlei Anwendung in der Industrie gefunden, wurde jedoch häufig auch zweckentfremdet. Die gemachten Erfahrungen und Probleme wurden gesammelt und 2010 eine neue Richtlinie Richtlinie zur Anwendung

der Methode veröffentlicht (zum Zeitpunkt dieses Papers stand dieses 2. Buch noch aus). **Absicht von LOPA:** Risikobewertung eines bekannten Szenarios mit Hilfe unabhängiger Schutzschichten (independent Protection Layers IPL), welche durch strenge Regeln definiert werden, und Auslösungsereignissen (initiating events IEs). Durch korrekte Anwendung der Methode ist eine vereinfachte Risikobewertung eines Ursache-Wirkung Paares (=Szenario) möglich. Das Auffinden von möglicher Störungen ist nicht Teil der Methode, nur die Bewertung von bekannten Szenarien! Die Methode eignet sich besser als eine FMEA für komplexe Probleme, ohne für simple Probleme viel zu aufwendig zu sein (wie es bei einer Fehlerbaumanalyse der Fall wäre). Der aktuelle Nutzen einer LOPA liegt in der Bewertung, ob eine SIF notwendig ist und ob sie die richtige Wahl zur Risikoreduktion darstellt (es existieren auch andere Methoden, welche diesen Zweck erfüllen). Wird eine SIF als Lösung gewählt, so kann LOPA das notwendige SIL liefern. **Vorteile LOPA**

- Konsistente Definition von Schutzschichten, was die Filterung der entscheidenden Schutzeinrichtungen vereinfacht und somit ein umfassendes Sicherheitsmanagement vereinfacht.
- Die Detailbetrachtung mit LOPA kann überflüssige Schutzeinrichtungen identifizieren
- Durch die anhand klarer Regeln definierten Schutzschichten kann ein gefordertes SIL besser auf Erfüllung überprüft werden, eine Übererfüllung durch zu viele SIS wird dadurch weniger wahrscheinlich
- LOPA braucht weniger Aufwand als eine QRA, wodurch insbesondere komplexe, schwerwiegende Risikoszenarien schneller quantifiziert werden können (Arbeitsaufwand von Stunden statt Tagen)
- Durch die konsistenten Bewertungsregeln für Risiken und das vereinfachende Vorgehen können durch verschiedene Expertengruppen gewonnene Analyseergebnisse komplexer Risikoszenarien besser verglichen werden
- LOPA ermöglicht das Festlegen eines geeigneten Vorgehens, wenn Schutzschichten z. B. wegen Wartung deaktiviert werden müssen.

#### **Nachteile/Probleme LOPA**

- Die Regeln der LOPA werden missachtet. Beispiele

- Es wird nicht geprüft, dass Schutzschichten wirklich unabhängig von einander sind (Ein Anlagenfahrer darf beispielsweise nur in max. einer Schicht vorkommen!)
- Die Werte von Ausfallraten und anderen statistischen Größen werden ungefiltert aus der Literatur übernommen und nicht das konkrete Umfeld angepasst (z. B. konkrete Betriebsbedingungen)
- Die Sicherheitswerte (richtiger Begriff?) von Schutzschichten und IEs werden während dem Betrieb einer Anlage nicht aufrecht erhalten, da Wartungen und Tests nicht ausreichend (Umfang und Frequenz) geplant werden. Ursache ist fehlende Erfahrung und der Mangel eines standardisierten Vorgehens bei der Wartungs-/ Testplanung, um konkrete Zahlenwerte von IPLs zu erreichen und zu halten. Die Ergebnisse von Tests/Wartung werden nicht ausreichend dokumentiert, insbesondere wird bei nicht-erreichen und fast-nicht-erreichen geforderter IPLs nicht ausreichend weiterverfolgt, wie dies zustande kam. Solche Untersuchungen sind aber notwendig, um statistische Verfügbarkeit genauer mit Zahlenwerten belegen zu können.
- Die durch IPLs verhinderten Auswirkungen werden zu ungenau spezifiziert. Dadurch kommt es zu Über- und Unterschätzen von Risiken. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Risiken eher überschätzt werden, wodurch unnötig viel Geld für Schutzmaßnahmen ausgegeben wird.
- Überverwendung von LOPA. Angedacht ist die Methode für eine einzige Person im Anschluss an eine HAZOP für 1-5% der gefundenen Szenarien. Die Person sollte Teil des Risikobewertungsteams sein, oder mit diesem einfach kommunizieren können. LOPA wurde teilweise mit dem gesamten Analyseteam im Rahmen der Risikoanalyse gemacht. Dafür ist die Methode nicht ausgelegt. Der Brainstormingprozess des Teams wird durch das analytische Vorgehen einer LOPA gestört. Mögliche Risikoszenarien werden dadurch leicht übersehen. Qualitative und quantitative Betrachtungen sollten zeitlich getrennt ablaufen. Weiterhin ist die Bestimmung der Notwendigkeit und des Grades eines SIL durch das Expertenteam zulässig für SIL-1 und SIL-2. Nur für Szenarien, welche für das Expertenteam zu komplex sind, sollte ei-

ne LOPA unter SIL-3 angewandt werden. LOPA wird aber teilweise prinzipiell zur Bestimmung der Notwendigkeit/ des Grades von SIL genutzt. Insbesondere die Entscheidung über die Notwendigkeit eines SIL sollte aber dem Expertenteam im Rahmen der HAZOP überlassen werden.

- Überverwendung von Software: LOPA soll ein Szenario im Detail erklären, eine IPL definieren/ das Szenario einer IPL zuordnen und die Aufrechterhaltung einer IPL belegen. Dies geschieht in Textform und Software kann daher die Arbeit nur geringfügig unterstützen.

Abschluss: LOPA ist ne dolle Sache zur quantitativen Betrachtung. Aktuelle Richtlinie: [22] **fertig**

**[117]** Supporting the selection of process and plant design options by Inherent Safety KPIs

**[109]** Reliability and safety analysis of the process plant

**[72]** Risk identification and assessment of modular construction utilizing fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and simulation

**[3]** Literaturübersicht zum Thema „Fault Tree Analysis“ . Fehlerbaumanalyse entstammt der Luftfahrtbranche und wurde zunächst auch zur Bewertung der Sicherheit von Atomkraftwerken verwendet. Durch die guten Erfahrungen in Bereich der Stromerzeugung ist dieser Ansatz auch in der chemischen Industrie sehr beliebt geworden. Es handelt sich um eine Top-Down Analyse, bei welcher die Ursachen für einen Fehler ermittelt werden. Insbesondere die Einwirkung von Geräteversagen, menschlichem Versagen und externen Einflüssen wird betrachtet. Ausgehend von einem unerwünschten Ereignis wie beispielsweise einem Unfall werden Ereignisse mit Hilfe logischer Gatter verknüpft, um die Ursache für eben diesen Unfall zu ermitteln. Die Ursachen-Ereignisse werden dabei Stufenweise in Sublevel unterteilt und erhalten je nach Leveltiefe eine andere Symbolik. Eine Fehlerbaumanalyse lässt sich in mehrere Schritte einteilen. Siehe dazu beispielsweise [2].

- Vorteile:
  - sehr effektiv bei der Risikobewertung von System moderater Größe
  - die möglichen Ursachen eines vom Nutzer vorgegebenen Ereignisses lassen sich detailliert ermitteln und darstellen
  - Eine Fehlerbaum kann mit Hilfe von Software erstellt und ausgewertet werden
  - sind empirische Daten vorhanden, so kann eine quantitative Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Ereignis gemacht werden
- Nachteile:
  - Bei großen Systemen ist die Herleitung des Fehlerbaumes sehr zeitaufwendig.
  - Vollständigkeit kann nicht garantiert werden
  - keine Beachtung von Teilausfällen möglich. Ein System ist entweder komplett funktionsfähig oder garnicht.
  - die konkrete Struktur einer Fehlerbaumes hängt vom Entwickler und dessen Erfahrung/ Vorlieben ab. Das Untersuchungsergebnis eines Systems ist also nicht generisch.
  - Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses einer höheren Ebene ist nur möglich, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Elemente der Subebene verfügbar sind, welche einen Pfad zum Ereignis bilden. Diese Unterwahrscheinlichkeiten sind oft nicht konkret bekannt. Dies ist das mit Abstand größte Problem dieser Methode.

Die Arbeit zeigt einige konkrete Anwendungsfälle der Fehlerbaumanalyse auf. Genannte Anwendungsgebiete sind Nuklearreaktoren, schienengebundene Verladestationen für chemische Stoffe (Analyse der Gefahren beim Be- und Entladen), Verhinderungsmaßnahmen von Suiziden im Bahnverkehr und Analysen zur Verhinderung von Arbeitsunfällen durch z. B. Ausrutschen.

Weiterhin listet die Arbeit einige Ansätze auf, mit Hilfe derer die Nachteile der FTA kompensiert werden sollen. Ziel ist zumeist eine vereinfachte Erstellung des Fehlerbaumes durch gezielte Betrachtung von Subproblemen und die Computer gestützte Auswertung. Dadurch wird beispielsweise die Betrachtung der

dynamischen Entwicklung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung durch dynamische Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ursachen möglich (z. B. durch Alterung ändert sich die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Gerätes, durch steigende Erfahrung eines Anlagenbedieners sinkt dessen Fehleranfälligkeit, durch geeignete Wartungsintervalle sinken Ausfallwahrscheinlichkeiten; diese Auswirkungen können bezogen auf eine Zeitskala berücksichtigt werden). Weiterhin wird beschrieben, wie die Wirkung menschlicher Fehler und deren psychologische Ursachen untersucht werden können. Es wird weiterhin auf Arbeiten verwiesen, welche den Umgang mit einer bekannten Schwankungsbreite für eine Ausfallwahrscheinlichkeit darlegen (Nutzung von Fuzzy-Logik).

Fertig.

**[31]** Die Verwendung der aus der Computerwissenschaft bekannten Methode des „model checking“ wird verwendet, um die Anlagensicherheit eines Crackers zu bewerten.

Traditionelle Methoden zur Sicherheitsbetrachtung wie HAZOP betrachten die verwendeten Sicherheitseinrichtungen nicht explizit. Um dieses Problem zu lösen wurde die graphenbasierte Darstellung einer Anlage durch „Process Control Event Diagrams = PCED“ eingeführt. Diese stellt den Informationsfluss zwischen Komponenten eines Systems dar (z. B. Anlagenfahrer, Sensor und Regeleinrichtung). Mit Hilfe dieser Beschreibungsform und einer geeigneten Beschreibung der Regellogik der Anlage kann eine Sicherheitsanalyse im Stile einer HAZOP durchgeführt werden. Dieser Prozess ist jedoch sehr zeitaufwendig. Die Methode des „model checking“ soll nun genutzt werden, um durch Modellverifikation diesen Analyseprozess automatisierbar zu machen. Das System muss dazu als Zustandsgraph mit Transitionen beschrieben werden. Ein solches Modell kann dann durch geeignete Software (z. B. Symbolic Model Verifier = SMV) mit Hilfe symbolischer Operationen automatisch untersucht werden. Verwendet man PCEDs, so kann die Modellstruktur teil-automatisiert in ein von SMV lesbares Format umgewandelt werden. Es existieren aber alternative Ansätze, um eine Anlage in ein von SMV lesbares Format zu bringen, beziehungsweise komplett andere Formalismen (Condition/Event Systems). Weiterhin existieren Methoden, welche statt symbolischer Operationen mit Hilfe mathematischer Programmierung eine Modellbeschreibung vornehmen. Die Analyse geschieht dann mit Hilfe

von „Integer Programming“ . Diese Arbeit zeichnet sich durch die frühe Anwendbarkeit im Entwicklungsprozess aus. PCEDs haben 5 Schichten zur Beschreibung des Informationsflusses. Die PCEDs werden im Detail definiert und die Symbolik wird erläutert. Notwendige Grundlage zur Verwendung ist das ausgearbeitete Fließbild der Anlage. Mit dessen Hilfe kann der Entwurf einer Sicherheitsfunktion auf Erreichen der gewünschten Wirkung untersucht werden. Die referenzierte Beschreibungssprache von SMV ist modular aufgebaut. Sie kann die Wechselwirkung zwischen Modulen abbilden. Es existiert eine Bibliothek zur Beschreibung von PLT Einrichtungen/ Funktionen in SMV. Ein Modulverhalten wird durch diskrete Zustandsvariablen beschrieben. Ein Modul im Sinne von SMV ist aber ziemlich low-level! Beispielsweise beschreibt ein Modul das Verhalten eines Sensor. Das Modul kann Sensordefekte, korrekte Messung und Unter-/Überschreiten von Grenzwerten modellieren. Es ist für Sicherheitsbetrachtungen also durchaus geeignet. Es wird auf weitere Module der Bibliothek eingegangen (Aktoren, Regler/Controller. Die Wechselwirkung zwischen Modulen wird in einem Main-Modul beschrieben. Als „sicher“ angesehene Zustände können gezielt definiert werden (durch SPEC). Die Anwendung der Methode wird anhand der Temperaturregelung eines Crackers dargelegt. Für diesen existiert angeblich eine veröffentlichte Sicherheitsbetrachtung! Verschiedene Szenarien können getestet werden, indem man Modulen konkrete Zustände zuweist. Ob dies automatisch gemacht werden kann wird nicht beleuchtet. Es scheint, als ob Fehlerszenarien manuell vorgegeben werden müssen.

fertig. Wenn SMV verwendet wird, so kann die Modellbildung entsprechend dieser Arbeit hier geschehen. Die auf Seite 3 zitierten Arbeiten mal anschauen! Die Modellierung mit SMV im Detail prüfen.

**[41]** Die wichtigste Arbeit bisher.

Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen

**[102]** Vorstellung verschiedener Architekturen, wie Sicherheitsfunktionen (SIF) erfüllt werden können. Im Hinblick auf Modularisierung ist es von großer Wichtigkeit, wie SIF implementiert werden. Sind SIF in jedem Modul einzeln implementiert, so muss bei Wechsel eines Moduls in erster Linie das Modul



selbst validiert sein/werden. Das gleich gilt bei Einführung oder Änderung einer SIF. Werden SIF durch übergeordnete Sicherheitsregler implementiert, so muss für eine neue/geänderte SIF nicht nur das Modul selbst, sondern auch eben diese übergeordnete Einheit erneut geprüft werden. Der Aufwand steigt also maßgeblich an, wenn SIF nicht direkt im Modul implementiert sind.

**[45]** Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbetrachtung von Chemieanlagen während der Planungsphase

**[46]** Early hazard identification of chemical plants with statechart modelling techniques

**[77]** SDG-based hazop and fault diagnosis analysis to the inversion of synthetic ammonia

**[132]** SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process

**[43]** Risk and Hazard Control the new process control paradigm

**[33]** A preliminary study of thermal hydraulic models for virtual hazard and operability analysis and model-based design of rotating machine packages

**[147]** Hazard rate models for early detection of reliability problems using information from warranty databases and upstream supply chain

**[1]** This book contains the proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on the Reliability and Safety Analysis of Dynamic Process Systems.  
**Ziemlich alt, trotzdem mal reinschauen.**

**[2]** Scheinbar ein Grundlagenbuch zum Thema Risikoanalyse und Reduktion von Risiken

Wird bereits im Text zitiert.

**Auf jeden Fall noch mal reinschauen!.**

[27] Buch, nachlesen

[26] Buch, nachlesen

[28] Buch, nachlesen

[21] Buch, nachlesen

[29] Buch, nachlesen

[19] Buch, nachlesen

[25] Buch, nachlesen

[24] Buch, nachlesen

[20] Buch, nachlesen

[23] Buch, nachlesen

[22] Buch, nachlesen

[84] Safety and Security Review for the Process Industries: Application of Hazop, Pha, What-If and Sva Reviews

[32] Mit Hilfe von Automaten wird durch Anwendung von Erreichbarkeitsanalyse gezeigt, wie durch eine automatisch ermittelte, sichere Folge an Prozessschritten ein gewünschter Modellzustand erreicht werden kann. Fokus dieser und ähnlicher Arbeiten liegt auf Batchprozessen.

Im Rahmen sicherheitstechnisch kritischer Prozesse muss sicher gestellt werden, dass ein geplantes Prozedere zur Beeinflussung einer Prozessvariable keine Sicherheitsbestimmungen verletzt - es muss verifiziert werden. Konkret muss

sichergestellt werden, dass physikalische Größen innerhalb definierter Grenzen verbleiben, maximale Aktorstellgrößen nicht überschritten werden und dass Einschränkungen bezüglich der Verfügbarkeit von benötigten Subsystemen nicht verletzt werden(es werden keine Subsysteme für das Prozedere angefordert, welche nicht verfügbar sind). Folgende Begriffe sind in dieser Arbeit wichtig: **Aktionssequenz:** Führt ein System von einer Istsituation in eine Sollsituation. Die Sollsituation muss durch die Aktionssequenz erreicht werden. Sie besteht aus mehreren, einzelnen Aktionen, welche manuell oder automatisch ausgeführt werden können. Aktionen verändern den Zustand von Equipment und verändern dadurch physikalische Kennwerte. **Situation:** Zustand des Systems und Verfügbarkeit von Komponenten. Diese Arbeit will automatisch generierte Aktionssequenzen auf Sicherheit überprüfen. Dazu wird ein Systemmodell entsprechend **ISA88-Standard** als Kommunikations-Automat entworfen. Dieses Modell wird mit einer Erreichbarkeitsanalyse (mit Hilfe von Modell-überprüfungssoftware) untersucht. An einem Beispiel wird gezeigt, wie auf Basis eines R& I Fließbildes und anhand von zusätzlichen Überlegungen (z.B. Verriegelungen und andere sicherheitsrelevante Funktionen) ein Modell in der geforderten Form entworfen werden kann. Der dazu notwendige Prozess ist nur teilautomatisiert. Das entworfenen Modell kann dann auf Erreichbarkeit von Zuständen geprüft werden. Für erreichbare Zustände kann dann eine Aktionssequenz generiert werden. Die Aktionssequenzen führen zu gewünschten Situationen und halten (die vorher von Hand definierten) Sicherheitsbestimmungen ein. Sie sind jedoch nicht optimal (sinnloses öffnen/ schließen von Ventilen möglich). Weiterhin ist insbesondere für komplexe Systeme der notwendige Automat riesig (die Anzahl notwendiger Zustände wächst exponentiell mit der Anzahl der untersuchten Objekte). Es soll in Zukunft untersucht werden, ob Modelle abstrakter formuliert werden können, welche sich genauso wie die Detailmodelle verhalten. Ziel ist die Reduktion notwendiger Zustände.

Die Arbeit verweist auf andere Ansätze, welche automatisiert eine sichere Aktionssequenz zum Erreichen eines Zustandes ermitteln sollen. Die zitierten Arbeiten sind jedoch alle schon recht alt. Es werden unter anderem grafische Methoden, Petrinetze und Statecharts genannt. Die Methoden liefern jedoch entweder nur nicht-ideale Sequenzen, können Hierarchien nicht gut abbilden, oder sind nicht in der Lage ein Equipment gleichzeitig mehreren Ebenen einer Hierarchie/ mehreren Funktionen zuzuordnen. **Fertig. Der Ansatz hat mit meiner Arbeit nicht viel zu tun,**

zeigt aber die Verwendung von Graphen/Automaten/Zuständen zur Sicherheitsbetrachtung von Systemen. Die Suche nach aktuellen Arbeiten zu diesem Thema könnte noch etwas bringen. die zitierten Ansätze zur Modellbildung könnten noch interessant sein. Diese werden am Ende markiert.

**[110]** Why do verification approaches in automation rarely use HIL-test?

**[52]** A Tool for Hazard Detection in Hybrid Systems

**[30]** Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur und Prozessmodell **Dissertation. Später noch mal anschauen**

**[94]** The focus of this book is the emerging topic of dynamic risk analysis, as opposed to traditional risk analysis. Research on how to dynamically assess risk has been carried out in several chemical and petroleum companies, but no real implementation has been attempted. This book is not aimed to be an exhaustive review of dynamic risk analysis; it is rather a concrete support for the application of new risk analysis techniques.

**[137]** Grundlagenbuch zur Sicherheitsbetrachtung von Chemischen Anlagen

## 4.2 HAZOP

**[39]** HAZOP Literaturübersicht

Die Arbeit liefert eine Übersicht zur Entwicklung der HAZOP von den ersten Arbeiten, welche die Methode konkret beschrieben haben 1974 bis hin zu aktuellen Arbeiten (2007). Die Veröffentlichungen werden in verschiedene Themengebiete eingeteilt. Diese sind:

- Einführung in verschiedene Themen zur Risikoanalyse
- Einführung in HAZOP; konkrete Guidelines und Erfahrungsberichte zur Anwendung der Methode

- Vergleich von HAZOP mit anderen Methoden zur Risikoanalyse; jeweils Stärken und Schwächen der Methoden
- Erweiterungen der HAZOP (Quantifizierung, Einfluss des Menschen, Erfahrungsaustausch mit gemachten HAZOPs welcher immerhin 18% der untersuchten Arbeiten zum Thema hat...)
  - Erweiterung durch Kombination mit FMEA oder LOPA soll die Qualität der HAZOP verbessern, eine Kombination mit FTA liefert zusätzliche, quantitative Aussagen
- HAZOP für programmierbare Steuerungen, SIL - Zuweisung (ungefähr 22% der untersuchten Arbeiten)
- Automatisierung der HAZOP (durch Software); 40% der untersuchten Arbeiten (insgesamt etwas mehr als 160 Stück) zum Thema HAZOP beschäftigen sich mit dieser Thematik
- HAZOP und dynamische Simulationen

Siehe für noch aktuellere Entwicklungen [98]. **Insbesondere der Abschnitt 3.5 verweist auf Arbeiten zur Automatisierbarkeit der HAZOP und ist daher für mich relevant. Die Arbeit noch mal lesen und ausführlicher wiedergeben.**

**[98]** Aktueller Untersuchungen zur Automatisierbarkeit von HAZOP. Wird bereits im Text zitiert

**[104]** Methodology for the generation and evaluation of safety system alternatives based on extended Hazop

**[40]** Combining HAZOP with dynamic simulation — Applications for safety education

**[69]** Model-based HAZOP study of a real MTBE plant

**[38]** New trends for conducting hazard & operability (HAZOP) studies in continuous chemical processes

## 4.3 automatisierte HAZOP

- [123]** Spezielles Verfahren zur HAZOP
- [122]** A semi-quantitative reasoning methodology for filtering and ranking HAZOP results in HAZOPExpert
- [126]**
- [61]** OptHAZOP — an effective and optimum approach for HAZOP study
- [62]** TOPHAZOP: a knowledge-based software tool for conducting HAZOP in a rapid, efficient yet inexpensive manner
- [63]** Towards automation of HAZOP with a new tool EXPERTOP
- [107]** A functional HAZOP methodology
- [103]** ExpHAZOP+: Knowledge-based expert system to conduct automated HAZOP analysis
- [131]** A new intelligent assistant system for HAZOP analysis of complex process plant
- [11]** A systematic formulation for HAZOP analysis based on structural model
- [18]** Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants
- [81]** HAZID, A Computer Aid for Hazard Identification

**[145]** PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part I

**[146]** PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part II

**[93]** An automated system for batch hazard and operability studies

**[5]** An ontology approach to support HAZOP studies

## 4.4 Fehlerfortpflanzung

### 4.4.1 modellbasiert, quantitativ

### 4.4.2 modellbasiert, qualitativ

**[96]**

Eine Computer basierte Methode zur Identifizierung von Gefahren in kontinuierlich betriebenen Anlagen wird vorgestellt. Das Vorgehen der Gefahridentifizierung orientiert sich dabei stark am Vorgehen in einer HAZOP. Die Methode soll bei einer HAZOP als Ergänzung einsetzbar sein.

Als Basis der Gefahridentifikation dient die Menge aller Prozessvariablen – ergänzt um die Menge aller Guide-Wörter (mehr, weniger, zu viel, zu wenig...), die im Rahmen einer HAZOP angewandt werden. Die Gesamtanlage wird in Basis Einheiten zerlegt. Eine Basiseinheit ist durch ihr Verhalten bezüglich der Weiterleitung von Gefahren beschrieben. Gefahren können entstehen, verstärkt, gedämpft, weitergeleitet oder aufgehoben werden. Physisch werden Basis Einheiten in Leitungselemente („lines“ ) (Pumpen, Rohre Ventile...) und Gefäße („vessels“ ) (Tanks, Reaktoren, Kolonnen...) unterschieden. Ob ein Fehler durch eine Einheit weitergereicht wird, oder nicht, wird durch definierte Regeln beschrieben. Die Aufstellung dieser Regeln wird im Detail genannt. Außerdem wird auf die Funktion des erstellten Computer Programms eingegangen.

Die Anwendbarkeit der Methode wird an einem konkreten Beispiel gezeigt: [97]

Methode ist als Grundlage sinnvoll. Weiterentwicklung der Methode suchen!

### [139]

Ziel ist die Fortpflanzung von Fehler zu ermitteln. Einerseits um während der Entwurfsphase die Auswirkungen eines Fehlers besser abschätzen und in Folge dessen Gegenmaßnahmen in geeignetem Umfang entwerfen zu können und andererseits um im Betrieb die genau Ursache bzw. die Verkettung von Ursachen ermitteln zu können, welche zu einem Alarm geführt haben. Dazu werden gerichtete Graphen (Signed Directed Graph (SDG)) verwendet.

Gerichtete Graphen bestehen aus Knoten und gerichteten Kanten, welche die Beziehung zwischen den Knoten darstellen. Die Knoten umfassen bspw. Prozessgrößen, Arbeitspunkte, Stellgrößen und bekannte Störungen. Die Erstellung eines solchen Graphen ist auf Textbasis mit Hilfe von Grapheditoren/ Werkzeugen wie Graphviz (<http://www.graphviz.org/>) möglich. Dies ermöglicht eine Automatisierung.

Die historische Entwicklung von SDG wird kurz benannt. Der Aufbau von SDG kann auf Basis von Differential-algebraische Gleichungen (Differential Algebraic Equations) (DAEs) oder auf Grundlage von Wissen über den Prozess geschehen. Für Standardkomponenten oder Module kann bereits vorab ein SDG erstellt werden. Die Information der Kopplung kann aus dem P&ID gewonnen werden. Wird die Struktur des P&ID z. B. als XML oder als Verbindungs- und Adjazenzmatrix abgebildet, so können Modul-SDGs korrekt gekoppelt werden.

- Vorteile einer wissensbasierten Erstellung von SDGs:
  - teilautomatisiert durch Softwareunterstützung möglich
- Nachteile:
  - Graph wird nicht plausibilisiert, kein Test auf Kausalität
  - Kanten werden nicht gewichtet -> extrem unwahrscheinliche Fehlerfortpflanzungen sind nicht von wahrscheinlichen zu unterscheiden
  - Wechselwirkungen zwischen mehreren Eingangsparametern werden nicht abgebildet



- Zeithorizont wird nicht abgebildet, in Folge dessen sind transiente Vorgänge nicht von Stationären zu unterscheiden

Die Arbeit empfiehlt daher einen Übergang zu datenbasierter Graphenentwicklung. **Dadurch wird das schon wieder Mist..** Durch die Verwendung von Messdaten und den Einsatz gezielter Verzögerungen kann die Korrelation zwischen Größen bestimmt und der Graph konstruiert werden. Die Korrelation muss dabei mit Hilfe geeigneter Verfahren auf Signifikanz untersucht werden.

- Vorteile einer datenbasierten Erstellung von SDGs:
  - Ergebnis ist kausal und enthält Zeitbezug (Verzögerungen)
- Nachteile:
  - nur messbare Größen werden untersucht
  - Verfahren zum Signifikantest von Korrelationen sind nicht eindeutig

Fazit: Kombination der beiden Methoden. Wissensbasierter Ansatz schafft komplettes Netz, datenbasierter Ansatz verfeinert den Graphen. Anhand einer Fallstudie kann wird der Erfolg der Methode gezeigt.

**Fazit: Ansatz der Graphen sieht vielversprechend aus, die Verfeinerung und Verifizierung des SDG mit Messdaten wird aber nicht möglich sein. Weitere Suche in die Richtung lohnt sich.**

### 4.4.3 datenbasiert

[144]

Als datenbasierte Risikoanalyse wird Deep Learning vorgeschlagen. Genau genommen wird die Verwendung eines Deep Belief Network (DBN) vorgeschlagen. Dessen Schichten bestehen aus Restricted Boltzmann Machine (RBN). Ziel ist eine verbesserte Erkennung von Fehlern.

Übersicht über aktuelle Methoden der datenbasierten Risikoanalyse (als Alternative zu quantitativen oder qualitativen modellbasierten Methoden):

1. statistische Methoden
  - principal component analysis (PCA)

- partial least squares (PLS)
- independent component analysis (ICA)
- fisher discriminant analysis (FDA)
- subspace aided approach (SAP)
- correspondence analysis (CA)
- → Vergleich der Methoden anhand des Tennessee Eastman Benchmark (TEB) durch (Yin, et al., 2012)
- Bayesian diagnosis

## 2. Methods based on pattern classification

- artificial neural network (ANN)
- k-nearest neighbor (KNN)
- self-organizing map (SOM)
- support vector machine (SVM)
- artificial immune system (AIS)

Weitere Übersichtsarbeit zum Thema Datenbasierte Fehlerfortpflanzung findet sich in [116].

Die vorgestellte Methode erweist sich bei Anwendung auf den TEB als sehr erfolgreich. Jedoch wird zum Training der Struktur (wie auch bei allen anderen Risikoanalysemethoden, welche auf Daten basieren) eine große Mengen an Messdaten erfordert. Insbesondere eine große Anzahl an Daten zu Fehlfunktionen in der Anlage ist erforderlich um die Fortpflanzung von Fehlern im Netz beschreiben zu können.

Fazit: Methode ist wenig Erfolg versprechend für den Einsatz in modularen Anlagen, bevor die Gesamtanlage bestehen aus Modulen in Betrieb genommen wurde.

## [73]

Der Einfluss von Alterungserscheinungen in Mehrkomponentensystemen wird untersucht. Besteht ein Systemen aus sicherheitsrelevanten und nicht sicher-

heitsrelevanten Systemen, so kann die Alterung/ der Verschleiß der nicht sicherheitsrelevanten Systemen die Alterung der sicherheitsrelevanten Systeme durch Fortpflanzung der Alterungserscheinung beschleunigen/ beeinflussen. Setzt sich durch Alterung beispielsweise ein Filter langsam zu, so muss eine Pumpe immer mehr Druck auf eine Flüssigkeiten aufbauen, um einen konstanten Volumenstrom hinter dem Filter zu gewährleisten. Die Pumpe verschleißt dadurch schneller. Eine solche Wechselwirkung kann geeignet durch Verwendung einer multi-layered vector-valued continuous-time Markov chain abgebildet werden. Dazu werden statistische Daten benötigt.

Fazit: Die Fortpflanzung „normaler“ Fehler in Sinne der HAZOP kann dadurch nicht ohne aufwendige Umformungen/ Adaptionen abgebildet werden.

## [6]

Die vorgestellte Methode verwendet historische Daten um die Fehlerfortpflanzung zu untersuchen. Mit Hilfe von Kreuzkorrelation wird die Zeitverzögerung zwischen Prozessgrößen berechnet und daraus eine Struktur der Abhängigkeiten abgeleitet. Aus der Kreuzkorrelation wird eine kausale Abfolge von Ereignissen konstruiert, dass die Fortpflanzung eines Fehlers in einem Graphen dargestellt werden kann.

Die Methode benötigt Messdaten der Gesamtanlage und kann daher nicht verwendet werden.

## [133]

Die Methode basiert auf der Auswertung von Residuen und einer „contribution plot analysis“. Die Residuen werden durch Identifikation von Paritäts- und Unterräume berechnet. Die optimalen Residuen werden dann genutzt, um ein Fehleridentifikationsschema zu erstellen. Auf Basis des Durchschnitts aktueller und historischer Residuen wird ein Index definiert. Die Fehlerfortpflanzung kann dann anhand dieses Index ermittelt werden. Anhand eines TEB wird die Wirksamkeit des Verfahrens demonstriert.

Die Einleitung gibt einen umfassenden Überblick über datenbasierte Methoden und referenziert zahlreiche Quellen.

Die Methode ist für meine Zwecke nicht geeignet, das Einleitungskapitel lohnt

sich aber wegen der vielen datenbasierten Verfahren noch mal anzusehen.

### [50]

Datenbasierter Ansatz welcher ein qualitatives Modell mit Hilfe statistischer Entropien liefert. Das Verfahren wurde erfolgreich eingesetzt, um einen gerichteten Ursache-Wirkungsgraphen zu erstellen (Quellen werden genannt). Das Verfahren wird derart erweitert, dass einzeln auftretende Fehler, welche eine erkannte Störung verursacht haben, identifiziert werden können.

### [134]

Verwendung von Principle component analysis (PCA) in Verbindung mit einer angepassten Variante von Dynamic time warping (DTW) um insbesondere in der schwierigen Phase des Starts einer verfahrenstechnischen Anlage Fehler erkennen zu können. Die Einleitung liefert zahlreiche Verweise zur Verwendung von PCA. Es kommt die Software „SymCure“ der Firma „GenSym“ zum Einsatz, mit Hilfe derer umfangreiche Entwicklungen zum Thema Fehlererkennung und -behebung möglich sind. Die vorgestellte Methode vergleicht online den aktuellen Signalverlauf mit bekannten Verläufen von Fehlerzuständen und Normverläufen. Auf diese Weise wird das Auftreten bekannter Fehler diagnostiziert. Neue Fehler werden durch die eingesetzte Software „SymCure“ erkannt, deren Ursache bestimmt und der Verlauf anschließend der Signaldatenbank hinzugefügt. Die Methode zeichnet sich vor allem durch hohen Recheneffizienz aus.

Der Verweis auf viele Arbeiten zu PCA und auf die verwendete Software ist hilfreich. Außerdem kann die Arbeit als Beispiel verwendet werden.

### [71]

Komplettes Framework zum Erkennen von Fehlern und Identifikation der zugrunde liegenden Ursachen.

Das erste Kapitel verweist auf viele Arbeiten zum Thema datenbasierte Analyse und benennt bekannte Probleme.

#### 4.4.4 hybride Methoden

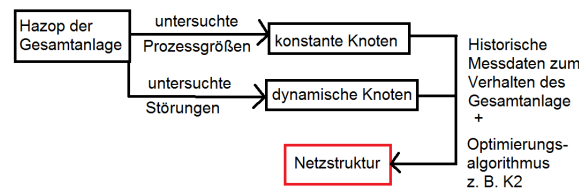
[56]

modellbasiert qualitativ und datenbasiert Fehlerfortpflanzung mit Hilfe von Dynamischen Bayesschen Netzen. Grundlage bietet die HAZOP der Gesamtanlage. Ziel ist es während dem Betrieb einer Anlage bei Auftreten eines Fehlers (eines Alarms) dessen wahrscheinlichste Ursache oder Ursachen schnell zu ermitteln und den Pfad von der Ursache oder den Ursachen zum Fehler/Alarm einfach lesbar (grafisch) darstellbar zu machen. Dem Operator wird so die Wahl, welche Aktion zum Beheben des Fehlers notwendig ist, maßbeglich vereinfacht.

Grundlage des Netzes sind eine Struktur, welche die Entwicklung von Fehlern abbildet und eine Menge von Messdaten, welche das Netz verfeinert. Die statischen Knoten des Netzes werden aus einer voran gegangenen HAZOP ermittelt. Jeder Knoten entspricht dabei einer in der HAZOP untersuchten Prozessvariable. Alternative Verfahren dazu sind die Durchführung einer Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis, FTA) oder die Anwendung der **Bow Tie Methode**. Insbesondere eine FTA würde die Fortpflanzung von Fehlern genauer beschreiben und wäre daher zu bevorzugen. Die Informationen, welche aus einer HAZOP entstehen, werden aber als ausreichend betrachtet. Die statischen Knoten werden um dynamische Knoten ergänzt. Sie repräsentieren (versteckte) Fehler-Modi des Systems. Ihre genauen Werte werden aus Messdaten aus dem Live-Betrieb ermittelt. Neben der Festlegung der Knoten muss die Struktur bestimmt werden. Der Lösungsaufwand dieses Problems wächst exponentiell mit der Anzahl an Knoten. Mit dem Wissen aus der HAZOP (dem Wissen, wie sich ein Fehler fortpflanzt) kann der Lösungsraum bei der Strukturberechnung des Netzes aber stark eingeschränkt werden. Zu beachten ist dabei, dass im Rahmen der HAZOP in der Regel nur direkt benachbarte Bauteile (Knoten, definierte Untersuchungseinheiten) auf Wechselwirkung hin untersucht werden. Weiterführende Fortpflanzungen werden nicht betrachtet. Die Berechnung der optimalen Struktur eines Dynamischen Bayesschen Netzes kann durch verschiedene Algorithmen erfolgen. Eine Variante ist der **K2 Algorithmus** von Cooper und Hersovits, 1992. Dazu werden jedoch Messdaten benötigt, welche die zeitliche Entwicklung eines Fehlers abbilden (aus Simulation gewinnbar?). Die Aufstellung der Conditional probability tables

(CPT) erfordert weiterhin große Mengen an Messdaten. Das erhaltene Netz kann dann aber die Entwicklung von Fehlern über mehrerer Ebenen hinweg ermitteln / untersuchen. Eine Darstellung der Netzentstehung findet sich in Abbildung 4.1.

Fazit: Methode sieht schick aus, Datenbasis ist bei neuer Anlage aber nicht gegeben. Nur eine bestehende (Komplett-!) Anlage mit historischen Messdaten kann mit dieser Methode tiefgreifend analysiert werden. Eine Sicherheitsanalyse kann dann damit verbessert werden.



**Abbildung 4.1:** Erstellung eines Dynamischen Bayesschen Netzes

[17]

Resiliente Systeme, Verwendung eines hierarchical fault propagation model (HFPM) als Erweiterung der Infrastructure Resilience-Oriented Modeling Language (IRML). Ziel des Modells ist die Beschreibung des dynamischen Verhaltens und die dynamische Fortpflanzung von Fehlern. Des neue Modell hat zwei Teile: statische Analyse der Struktur und dynamische Analyse für Fehlerfortpflanzung. Untersucht werden Fehler durch Abweichungen von Stoffparametern und Geräteausfälle. Der Fokus liegt auf der Analyse der Resilienz (Fähigkeit des Systems trotz Fehler in definierten Zustand zu gelangen).

Wird eine HAZOP um ein Strukturmodell ergänzt, so kann eine Fehleranalyse systematisch durchgeführt werden ( Boonthum et al., 2014 ). Eine HAZOP erfasst aber nur die Abhängigkeit von Prozessgrößen und nicht die der Komponenten eines Systems, eine makroskopische Betrachtung von Fehlerfortpflanzungen ist daher nicht möglich. Die folgenden Methoden zur makroskopischen Betrachtung werden genannt:

- Utne et al. (2011): cascade diagram
- Johansson and Hassel (2010): agent based approach  $\mapsto$  benötigt detaillierte

Prozesskenngrößen und Messwerte, quantitativ

- Kjølle et al. (2012) across-sector approach  $\mapsto$  benötigt vielseitiges Wissen und umfangreiche Daten über den Prozess, diese sind oft nicht vorhanden
- Haimes and Jiang (2011) Framework basierend auf Leontief's input-output model  $\mapsto$  ungeeignet für die Analyse von Verknüpfungen auf Komponentenebene
- SDG insbesondere in Verbindung mit HAZOP
- Functional Resonance Analysis Method (FRAM)  $\mapsto$  emphasizes the functional relationship between components and provides a way to describe the fault evolution
- fault semantic network (FSN) using genetic programming (GP) and neural networks (NN)  $\mapsto$  braucht viele Daten und Prozesswissen
- Petrinetze
- hierarchical Bayesian model (HBM)
- Markov network combined with Bayesian theory

Vorteile HFPM:

1. Fehleranalyse auf Systemebene (statt Komponentenebene)
2. durch Simulation können im vorweg geeignete Sicherheitsmaßnahmen ermittelt werden, um gewünschte Sicherheitslevel zu erreichen

Systemaufbau:

- basierend auf IRML
- ein System wird in Subsysteme gegliedert, die Struktur durch ein hierarchisches Framework dargestellt, die Gliederung in mehrere Ebenen von Subsystemen stellt die Prozessstruktur und Fehlerszenarien dar
- statische Analyse: zeigt den Grad der Abhängigkeit von Subsystemen auf, das System wird auf die Teile mit den stärksten Wechselwirkungen reduziert und diese Teilsysteme werden im Detail weiter untersucht
- dynamische Analyse: Anwendung von Testfällen; durch Wenn-dann Analyse werden die Fortpflanzung eines bekannten Fehlers und die Operationen des Systems, welche notwendig sind, um in einen stabilen Zustand zurück zu

kehren, im Modell so eingestellt, dass das Verhalten dem Testfall entspricht, mit Hilfe geeigneter Parameter, welche vor allem das zeitliche Verhalten widerspiegeln, wird das Verhalten gekennzeichnet und darauf aufbauen ein Zustandsgraph ermittelt

Fazit: statische Analyse ist hilfreich, bietet aber keinen besonderen Mehrwert, dynamische Analyse erforderte historische Messdaten, Aufteilung auf Module ist fragwürdig, Analyse der anfälligsten Subsysteme ist hilfreich, Fokus liegt auf Resilienz und Berechnungen zum Sicherheitslevel insbesondere während ein Fehler sich im System verbreitet und das System darauf reagiert, für meine Arbeit eher nicht zu gebrauchen die verwiesenen Methoden zur makroskopischen Betrachtung könnten hilfreich sein.

## [79]

Entwicklung einer echtzeitfähigen Methode zum Erkennen des Vorliegen eines Fehlers und Identifikation der Grundursache. Verwendung von PCA in Kombination mit Bayesian Belief Network (BBN). Aus Daten zum Normalbetrieb wird das PCA aufgebaut. Im laufenden Betrieb kann dann damit das Vorliegen eines Fehlers erkannt werden. Mit Hilfe historischer Daten zur Prozessdynamik oder durch Formulierung von Differentialgleichungen oder durch Expertenwissen wird das BBN aufgestellt. Auf Basis des BBN kann bei Vorliegen eines Fehlers dessen Ursache ermittelt werden. Das initiale BBN wird mit fortschreitender Betriebszeit durch Informationen aus der PCA verbessert um die Ursachenanalyse genauer zu machen.

Schöne Methode, welche statische Verfahren (PCA) mit Prozesswissen (BBN) vereint, die benötigten Daten zum Gesamtprozess, welche für PCA notwendig sind, liegen bei modularen Anlagen aber nicht vor  $\mapsto$  bringt nichts

### 4.4.5 Rezensionen

- Einführung in [144]: Übersicht datenbasierte Methoden
- Einführung in [139]: Entwicklung von Methoden zu SDG
- Einführung in [79]: Verweise auf mehrere Methoden/Anwendungen von SDG



- Einführung in [17] **Methoden zur makroskopischen Fehlerfortpflanzung**  $\mapsto$  **genau das will ich eigentlich**
- Einführung in [133]: Datenbasierte Fehlerfortpflanzung
- [116]: Datenbasierte Fehlerfortpflanzung
- [142]: Datenbasierte Fehlerfortpflanzung
- [124]: Datenbasierte Fehlerfortpflanzung
- [58]: Modellbasierte und stochastische Methoden der Fehlerfortpflanzung; Reglerneueinstellung nach Fehlererkennung
- [127]: **quantitative modellbasierte Methoden**
- [125]: **qualitative modellbasierte Methoden**
- [128]: **datenbasierte Methoden**
- [83]
- [143] **Umfassende Übersicht zum Thema Fehlerfortpflanzung und Fehleridentifikation**
- [140]
- [37]: **Ursachenanalyse von anlagenweiten, schwingenden Fehlern**
- Einführung in [71]: **Übersicht zu datenbasierten Methoden**

#### 4.4.6 unsortiert

**[4]** Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis

**[60]**

Verfahren zur Fehlerbetrachtung werden in off-line und on-line Modelle unterschieden. Off-line sind bspw. HAZOP, FTA, Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA). On-line Verfahren basieren auf statistischen Methoden oder Mustererkennung.

## 4.5 Modularisierung

**[13]** Sichtweisen auf die Modularisierung chem. Produktionsanlagen. Anforderungen an Module. Grundlegende Gedanken und notwendige Schritte zur Verwendung von Modulen.

Verkürzte Lebenszyklen chemischer Produkte und stärker schwankende Absatzmärkte erfordern kürzere Entwicklungszeiten neuer Produkte. Modularisierte Anlagenteile wurden als mögliches Mittel identifiziert, um bereits gewonnenes Wissen wiederverwenden zu können und so Entwicklungszyklen zu beschleunigen. Aus wirtschaftlicher Sicht konnte die Sinnhaftigkeit kleinskaliger Anlagen bereits gezeigt werden (Quellen sie diese Arbeit). Diese erlauben hohe Flexibilität und eine schnelle Anpassung der Produktionskapazität an Marktveränderungen. Mit Hilfe kleinskaliger Anlagen können insbesondere Zwischenprodukte einzeln und örtlich verteilt hergestellt werden. Die Weiterverarbeitung zu einem Endprodukt erfordert dann nur noch den Transport dieser Zwischenprodukte und nicht mehr den Transport aller Ausgangsstoffe. Dadurch sinkt das zur Endproduktgewinnung notwendige Transportvolumen und damit die Kosten. Ein weiterer Vorteil der Modularisierung ist die Möglichkeit einen Großteil der Anlagenmontage an einem beliebigen Ort unter optimalen Bedingungen vornehmen zu können. Am Aufstellungsort der Anlage müssen die Module dann nur noch verbunden werden. Dies ist insbesondere bei klimatisch anspruchsvollen Anlagenstandorten sehr hilfreich. Ein Modul muss derart definiert werden, dass es einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit besitzt und lösgelöst von einer Gesamtanlage getestet werden kann. Module sollten nach ihrem Detaillierungsgrad unterschieden werden. Die Aufteilung in Planungsmodule und Variantenmodule wird als sinnvoll erachtet. Variantenmodule werden in 2D und 3D Varianten unterteilt. Ein 2D Variantenmodul soll Informationen enthalten, welche am Ende des Basic Engineering vorhanden sind. Dies umfasst alle Informationen, welche zum Entwurf eines R&I Fließbildes für ein Modul notwendig sind. Ein 3D Variantemodul ist um Auslegungsgrößen derart erweitert, dass die Modulfertigung möglich ist. Weiterhin sind der Planungs- und Entwicklungsprozess geeignet dokumentiert. Die konkrete Auslegung der 3D Variantenmodule kann direkt durch einen Equipmentlieferanten durchgeführt werden, wenn dieser detaillierte Modulanforderungen und Raumforderungen erhält. Insbesondere eine genaue Definition der Schnittstellen ist hierbei notwendig. Ein Planungsmodul bietet Ansätze zu Aus-

wahl, Funktionsumfang, Auslegung und Dimensionierung von Variantenmodulen. Planungsmodule stellen also in erster Linie einen Wissensspeicher dar und dienen der Darstellung der Vielfalt von Variantenmodulen. Wird durch einen Wissens-/Erfahrungsgewinn ein bestehendes Variantenmodul weiterentwickelt, so müssen die Planungsmodule erweitert und angepasst werden. Im Planungsprozess hat der Detaillierungsgrad der verwendeten Variantenmodule maßgeblichen Einfluss. 2D Module erleichtern die Erzeugung von Fließbildern einer Gesamtanlage. Insbesondere ermöglichen sie den einfachen Vergleich verschiedener Anlagenstrukturen. Es wird auf Literatur verwiesen, welche die zur Erlangung von 2D und 3D Modulen notwendigen Arbeitsschritte darlegen. Mit Hilfe von Simulationen können in Kombination mit Planungsmodulen geeignete 3D Module für einen Prozess ausgewählt werden. Da diese nur in definierten Größen zur Verfügung stehen wird der Prozess aber wahrscheinlich nicht optimal umgesetzt. Dies muss bei der Planung beachtet werden, z. B. indem der Verfahrensprozess an vorhandene Modulgrößen angepasst wird. Auf ein solches Vorgehen wird verwiesen ([111]). Bei der Entwicklung von Regelungs- und Sicherheitskonzepten muss betrachtet werden, welche Aufgaben ein einzelnes Modul losgelöst vom Gesamtsystem erfüllen kann und welche Aufgaben nur im Zusammenspiel mehrerer Module gelöst werden können. Die implementierten Fähigkeiten des Module bestimmen also maßgeblich den Entwicklungsaufwand neuer Sicherheitsfunktionen einer Gesamtanlage. Die einzelnen Schritte der Projektplanung überlappen sich bei der Verwendung von Modulen zwangsläufig. Um eine effiziente und effektive Projektplanung sicherzustellen ist daher die Entwicklung eines geeigneten Datenformates notwendig. Nur so kann eine ständige Weitergabe und Verfügbarkeit notwendiger Information gewährleistet werden. Notwendige Forschungsarbeiten, um Module verwenden zu können:

- Systematischer Entwurf von 2D, 3D Variantenmodulen und Planungsmodulen (Systematik des Modulentwurfs definieren)
- Berechnungsmodelle zum Scale-Up von Modulen
- Simulationsmodelle von Modulen, um deren Variantenauswahl und konkrete Auslegung durchführen zu können
- (Weiter-) Entwicklung von Ansätzen, wie Module konkret in den Planungsprozess integriert werden können

- Entwicklung eines Datenmodell um Datenaustausch und Datenanreicherung zu ermöglichen

Inhaltlich fertig. Arbeiten, welche diesen Artikel zitieren, sind wahrscheinlich hilfreich.

**[59]** Vorstellung eines Rechnerwerkzeugs zur Anlagenplanung  
Modul = Ausrüstungen, welche Teil des gleichen Prozessschrittes sind. Diese Arbeit hilft die verschiedenen Verständnisse vom Modulbegriff darzulegen.

**[49]** Das vorgestellte Konzept umfasst die Definition und Identifizierung von Modulen, deren dreidimensionales Design, die Ablage und Know-how-Sicherung zwecks der Wiederverwendung des Engineering und der Ausrüstungen sowie die Planung und Kostenschätzung mit wiederverwendbaren Modulen. Arbeiten, welche diesen Artikel zitieren, sind wahrscheinlich hilfreich.

**[119]** Übersichtsbeitrag Modularisierung, offene Forschungsfragen

**[75]** Relevanz modularisierter Anlagen

**[86]** Relevanz modularisierter Anlagen

**[91]** Konkretes Beispiel einer Modularen Anlage

**[121], [120]** Ansätze im Paper, Details in der Dissertation  
Die Entwicklung des R&I-Fließbild ist ein wichtiger Schritt eines Anlagenprojektes. In der Arbeit wird gezeigt, wie dieser Prozess durch Unterteilung einer Gesamtanlage in wiederverwendbare Funktionsgruppen (=Module bzw. EQM) und die Verwendung einer wissensbasierten Software geeignet beschleunigt werden kann. Module sollen derart definiert werden, dass sie prozesstechnisch sinnvoll sind und einen möglichst hohen Grad an Wiederverwendbarkeit aufweisen. Ein solches Modul wird als Equipment-Modul (EQM) bezeichnet; gemeint sind damit Standard-Prozesseinheiten wie Pumpen, Verdichter, Wärmeübertrager, Behälter,

Reaktoren, Kolonnen. Ein EQM erfüllt dann eine prozesstechnische Funktion und umfasst einen Apparat/Eine Maschine und weiterhin die notwendigen Elemente der Sicherheitstechnik, Regelungstechnik, Nahverrohrung und Instrumentierung. Für solche EQM wurden R&I-Fließbilder entworfen. Ein EQM kann dabei in Subsysteme zerlegt werden, welche derart definiert werden, dass sie anschlussfertige Elemente für EQM bilden (z. B. Teilmodul, Baugruppe, Unterbaugruppe). Diese Verschachtelung erfordert eine Erweiterung der **NE33 - Datei besorgen**. Der Zusammenbau eines EQM zur Erfüllung einer bestimmten Funktion kann durch Kombination verschiedener Subsystemen geschehen (verschiedene Kombinationen bilden verschiedene EQM zur Erfüllung der gleichen Aufgabe). Dadurch können neue oder abgeänderte Prozesse flexibel realisiert und Variationen eines EQM bezüglich der Kosten verglichen werden. Bereits entworfene EQM bilden die Basis der wissensbasierten SW. Neue EQM und deren Subsysteme erweitern die SW. Neue Anlagen werden dann aus diesem Datenhaushalt - den bereits geplanten Modulen - entworfen, oder die Datenbasis wird zuerst erweitert. Bereits geleistete Entwicklungsarbeit kann so wiederverwendet werden. Durch die Verwendung von Standardbausteinen sinkt die Entwicklungsdauer, wird die Qualität der Planungsarbeit erhöht, erlangtes Wissen nachvollziehbar gespeichert und die Dokumentation von Designentscheidungen erleichtert. Die Struktur der SW und die Handhabung/ der Nutzen der SW im Workflow werden erläutert. Der Planungsgrad ist auf 2-D Level. Die räumliche Anordnung von Komponenten eines EQM wird nicht betrachtet/ modelliert. **fertig**

**[70]** Die aus Standard-Modulen aufgebaute Anlage hat sich bisher noch nicht im großen Ziel durchgesetzt. Im Bereich der Kleinanlagen ist die Entwicklung von Containermodulen jedoch weit voran geschritten. Es existiert bereits wenigstens ein kommerzielles Produkt - der *Evotrainer*. **fertig**

**[108]** Am Beispiel einer Anlage zur Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (welche in der Literatur detailliert beschrieben ist) wird gezeigt, wie der Ansatz der modularisierten Anlage praktisch genutzt werden kann. Der Prozess wird in Module zerlegt, welche in verschiedenen Skalierungsvarianten entworfen werden. Die zusätzlichen Kosten, wenn ein Modul in Zwischengröße benötigt wird, wird dargelegt. Es wird ein Paket an Werkzeugen vorgestellt, mit Hilfe derer die

benötigte Dimensionierung von Modulen für einen Prozess durch Simulation berechnet wird und eine kostenbasierte Empfehlung abgegeben, welche Modulvariante aus einem Katalog definierten Größen gewählt werden sollte.

Ein Ansatz der deutschen Anlagenbauer und -betreiber ist die Entwicklung von High-Tech-Produkten um im globalen Wettbewerb erfolgreich zu bleiben. Dazu ist unter anderem eine stark verkürzte Projektzeit bei der Entwicklung neuer Produkte notwendig. Die Verwendung von Modulen bei der Prozessentwicklung ist ein möglicher Ansatz. Im ersten Schritt ist allerdings ein erhöhter Engineering Aufwand zur Definition und Erstellung/Beschreibung von Modulen notwendig. Dieser Mehraufwand ist gerechtfertigt, wenn ein entworfenes Modul mehrfach verwendet werden kann. Die erbrachte Engineering-Leistung kann damit wiederverwendet werden. Insbesondere die Dokumentation, wie ein Modul entstanden ist (die konkreten Designentscheidungen) ist dafür notwendig.

Das R&I-Fließbild wird so erstellt, dass einzelne Komponenten (die Module) frei ausgetauscht werden können. Module müssen also über definierte Schnittstellen verfügen und klar definierte Verfahrenstechnische Prozessschritte erfüllen. Weiterhin sollten Module einzeln testbar und skalierbar sein. Wurde eine Anlage so geplant, dass Module austauschbar sind, so kann ein erhöhter Bedarf an Produktionsmenge durch Skalierung der Module befriedigt werden. Module sollten daher in definierten Größen entworfen werden. Je nach Anwendungsfall wird dann die am Besten passende Größe ausgewählt. Der Prozess wird dadurch nicht mehr optimal erfüllt (das Modul wird immer etwas überdimensioniert sein, je nach dem wie weit die nächste Modulgröße

von der eigentlich erforderlichen Größe weg ist), dafür läuft die Planung aber deutlich schneller ab. Am Beispiel der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie wird gezeigt, wie ein Verfahren in Module zerlegt werden kann. Die Module werden für verschiedene Produktionsmengen entworfen (also Stufenweise). Die Auswirkung auf die Kosten einer Anlage mit nicht-optimalen Modulen bzgl. der Größe wird dargelegt. Nachteil einer modularen Bauweise ist, dass Sonderwünsche von Kunden nur kompliziert erfüllt werden können. Im Fall von Defekten ist ein Austausch von Geräten dafür wesentlich preiswerter, da eben keine Sonderanfertigungen gemacht werden. Ein Anlagenhersteller gelangt durch die wiederholte Verwendung eines Moduls außerdem zu mehr Erfahrung/Detailwissen und kann damit Bedienbesonderheiten und Anwendungspotential eines Moduls besser ausschöpfen (und dieses Wissen an den Anlagenbetreiber weiter geben). Insbesondere

Schulungen zum Betrieb der Anlage sind frühzeitig im Entwicklungsprozess möglich. Der Prozess wird daher sicherer (lernen aus Erfahrung einfacher, vor allem bzgl. Bedienung und Designfehlern). Zusätzlich werden Module vom Layout her bezüglich Kosten und Funktion optimiert. Man erkaufte sich also durch eine Überdimensionierung der Anlage bezüglich der notwendigen Größe (da Größe nicht optimiert wird) durch eine schnelle Planung und Module, welche ihre Funktion optimal erfüllen, ein optimales Layout haben und durch mehr Erfahrung besonders sicher sind. Liegt eine erforderliche Modulgröße zu weit weg von bereits designten Modulgrößen, so wird das bekannte Modul sinnvollerweise neu skaliert oder der Kunde lebt mit nicht-optimalem Prozess. Bei Neu-Skalierung kann vorhandenes Wissen über Layout des Moduls aber wieder verwendet werden -> ist also nicht sooo schlimm.

**[87]** Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen

**[118]** Automatisierung von Prozessmodulen

**[42]** Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie. Viele Literaturreferenzen, sehr aktueller Text zur Problematik der Verwendung von modularen Anlagen in der Industrie

**[74]** Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast

**[54]** Modules in process industry - A life cycle definition

#### **4.5.1 Moduldarstellung**

**[135]**

**[88]** Beschreibung von Prozessmodulen

**[85]** Package unit integration for process industry – A new description approach

**[136]** Zur Darstellung von Modulen wird ein MTP erstellt. Dies entspricht dem in NAMUR vereinbarten Anforderungen? Der Informationsgehalt des MTP kann automatisiert in das Format von OPC UA transformiert werden. Wie das geht, steht in dieser Arbeit.

**[90]** Integration einer Package Unit in bestehende Anlage. Vergleich von bekannten Technologien und deren Bewertung.

**[89]** Semantic description of process modules

## 4.6 Mini- und Milliplanttechnik

**[112]** *Alles nur zitiert!*

Die Ergebnisse bisheriger vergleichender Kostenanalysen zwischen diskontinuierlich betriebenen chemischen Verfahren und deren mikroverfahrenstechnischem Pendant haben gezeigt, dass letztere nicht pauschal als kosteneffizientere Alternative gesehen werden können. Es bedarf, wie auch bei Batch-Prozessen, einer umfassenden Prozessoptimierung und Effizienzmaximierung. Dann können mikroverfahrenstechnische Prozesse jedoch trotz teilweise höherer Investitionskosten aufgrund geringerer laufender Kosten und einem schnelleren Zugang zum Markt die ökonomisch günstigere Alternative darstellen. **Relevanz von Mikroanlagen**

**[66]** Micro Process Engineering: Fundamentals, Devices, Fabrication, and Applications

**[114]** Micro-scale Distillation and Microplants in Process Development



## 4.7 Weitere

**[111]** Small scale, modular and continuous: A new approach in plant design.  
Wird bisher nur zitiert.

**[82]** Aus einer Reduktion der Planungszeit (welche Ziel der Verwendung von Modulen ist) kann nicht, wie man intuitiv meinen könnte, allgemein auf eine Reduktion des Projektrisikos geschlossen werden. fertig.

**[138]** Characterization model for innovative plant designs in the process industry—An application to transformable plants

**[78]** Modular redesign methodology for improving plant layout

**[106]** Improving Transferability Between Different Engineering Stages in the Development of Automated Material Flow Modules

**[68]** wird nur zitiert

**[101]** hierin eine Quelle ab S. 215 bzw. 199

**[92]** Notwendigkeit von Simulation während dem Lebenszyklus einer Anlage

**[113]** Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie - Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung einer chemischen Anlage

## 4.8 unsortiert

# Wichtige Begriffe

---

# 5

**Package Unit** aus Wikipedia:

Eine Package Unit (aus dem Englischen package und unit entlehnt; wörtlich Paketeinheit[1][2] oder [ab]gepackte sinngemäß auch abgegrenzte Einheit ist eine von einem Fremdunternehmen geplante und gefertigte Anlage. Die Anforderungen und Voraussetzungen für eine Package Unit sind in einem Lastenheft genannt. Spezielle Anforderungen an eine Package unit sind z. B. Leistungsparameter, Abmessungen und der Steuerungsumfang.

**SIF** Safety Integrated Function: Ein Zusammenschluss von Komponenten um das Risiko durch eine bestimmte Gefahrenquelle (Hazard) zu reduzieren.

**SIL** Der Safety Integrity Level bzw. Sicherheitsintegritätslevel, kurz SIL, ist eine Maßeinheit zur Quantifizierung von Risikoreduzierung im Bereich von 1 bis 4. Je größer die Zahl ist, desto mehr muss ein erkanntes Risiko reduziert werden.

**IPL** An independent protection layer (IPL) is a device, system, or action that is capable of preventing a scenario from proceeding to its undesired consequence independent of the initiating event or the action of any other layer of protection associated with the scenario.

**QRA** Quantitative Risk Analysis:

**IEs** initiating events: Zu einem risikobehafteten Zustand führende Ursachen/Ereignisse

**PHA** Process Hazard Analysis: Untersuchung von Prozessrisiken.

**Entropy** Entropies are an information theoretical concept to characterize the amount of information needed to predict the next measurement with a certain precision.

# Literaturverzeichnis

---

- [1] Tunc Aldemir u. a. *Reliability and Safety Assessment of Dynamic Process Systems*. 1. Aufl. NATO ASI Series 120. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [2] Bilal M. Ayyub. *Risk Analysis in Engineering and Economics*. 2. Aufl. Chapman und Hall/CRC, 2014.
- [3] Ahmed Ali Baig, Risza Ruzli und Azizul B. Buang. „Reliability Analysis Using Fault Tree Analysis: A Review“. In: *International Journal of Chemical Engineering and Applications* (2013), S. 169–173.
- [4] V Bartolozzi u. a. „Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 70.1 (2000), S. 49–57.
- [5] Rafael Batres. „An ontology approach to support HAZOP studies“. In: *Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering congress program and abstracts*. The Society of Chemical Engineers, Japan. 2004, S. 466–466.
- [6] Margret Bauer und Nina F. Thornhill. „A practical method for identifying the propagation path of plant-wide disturbances“. In: *Journal of Process Control* 18.7 (2008), S. 707–719.
- [7] Arno Behr, Henning Witte und Michael Zagajewski. „Scale-up durch Miniplant-Technik: Anwendungsbeispiele aus der homogenen Katalyse“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 694–703.
- [8] Peter L. Bernstein. *Against the Gods: The Remarkable Story of Risk*. Wiley, 1998.
- [9] Sanofi-Aventis Bleuel u. a. *NE 148: Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen*. Techn. Ber. NAMUR, 2013.

- [10] Dr. Michael Böhmer u. a. *Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)*. 2016.
- [11] Narapan Boonthum, Unchalee Mulalee und Thongchai Srinophakun. „A systematic formulation for HAZOP analysis based on structural model“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 121 (2014), S. 152–163.
- [12] Thomas Bott und Gerhard Schembecker. *Die 50 % – Idee Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit*. Vortrag zum Jahrestreffen der PAAT-Fachgemeinschaft in Weinheim. 2009. URL: [http://processnet.org/processnet\\_media/die+50prozent\\_idee+vortrag+bott\\_schembecker-p-1158.pdf](http://processnet.org/processnet_media/die+50prozent_idee+vortrag+bott_schembecker-p-1158.pdf) (besucht am 23.04.2017).
- [13] Christian Bramsiepe und Gerhard Schembecker. „Die 50 % – Idee: Modularisierung im Planungsprozess“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 581–587.
- [14] William Bill Bridges und Tony Clark. „Key issues with implementing LOPA“. In: *Process Safety Progress* 29.2 (2010), S. 103–107.
- [15] Andreas Brodhagen u. a. „Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung mit Hilfe modularer und skalierbarer Apparate“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 624–632.
- [16] Dr. Sigurd Buchholz. *The F3 Factory Project – Flexible, Fast and Future Production Processes*. Final Report. 2014. URL: [http://www.f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F3\\_Factory\\_final\\_report\\_to\\_EC.pdf](http://www.f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F3_Factory_final_report_to_EC.pdf) (besucht am 23.04.2017).
- [17] Zhansheng Cai u. a. „Hierarchical fault propagation and control modeling for the resilience analysis of process system“. In: *Chemical Engineering Research and Design* 103 (2015), S. 50–60.
- [18] Catherine A. Catino und Lyle H. Ungar. „Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants“. In: *AIChE Journal* 41.1 (1995), S. 97–109.
- [19] CCPS. *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [20] CCPS. *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2012.

- [21] CCPS. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [22] CCPS. *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*. JOHN WILEY & SONS INC, 2015.
- [23] CCPS. *Guidelines for Managing Process Safety Risks During Organizational Change*. JOHN WILEY & SONS INC, 2013.
- [24] CCPS. *Guidelines for Process Safety Acquisition Evaluation and Post Merger Integration*. JOHN WILEY & SONS INC, 2010.
- [25] CCPS. *Guidelines for Process Safety Metrics*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [26] CCPS. *Guidelines for Risk Based Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [27] CCPS. *Guidelines for Safe and Reliable Instrumented Protective Systems*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [28] CCPS. *Guidelines for the management of change for process safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [29] CCPS. *Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [30] Lars Christiansen. „Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur- und Prozessmodell“. ger. Diss. Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, 2015.
- [31] Paul W.H. Chung und Shuang H. Yang. „Safety Analysis of Process Plant Control Systems Based on Model Checking“. In: *Safety and Reliability* 23.1 (2002), S. 19–34.
- [32] Thomas Cochard, David Gouyon und Jean-Francois Petin. „Generation of safe plant operation sequences using reachability analysis“. In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015, S. 1–8.

- [33] R. Conti u. a. „A preliminary study of thermal hydraulic models for virtual hazard and operability analysis and model-based design of rotating machine packages“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 228.4 (2013), S. 255–271.
- [34] *Die 50 % – Idee Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit*. Thesen Tutzing. 2009. URL: [http://processnet.org/processnet\\_media/die+50prozent\\_idee-p-1159.pdf](http://processnet.org/processnet_media/die+50prozent_idee-p-1159.pdf) (besucht am 23.04.2017).
- [35] *Die 50 % – Idee Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit*. Positionspapier zu bestehendem Forschungsbedarf und Empfehlungen an die Forschungsförderung. 2010. URL: [http://processnet.org/processnet\\_media/Positionspapier+50+\\_+Idee+final-p-1296.pdf](http://processnet.org/processnet_media/Positionspapier+50+_+Idee+final-p-1296.pdf) (besucht am 23.04.2017).
- [36] Peter Dietz und Uwe Neumann. „Verfahrenstechnische Maschinen — Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 72.1-2 (2000), S. 9–16.
- [37] Ping Duan u. a. „Methods for root cause diagnosis of plant-wide oscillations“. In: *AIChE Journal* 60.6 (2014), S. 2019–2034.
- [38] Jordi Dunjó Denti. „New trends for conducting hazard & operability (HAZOP) studies in continuous chemical processes“. Diss. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [39] Jordi Dunjó u. a. „Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review“. In: *Journal of Hazardous Materials* 173.1-3 (2010), S. 19–32.
- [40] Shimon Eizenberg, Mordechai Shacham und Neima Brauner. „Combining HAZOP with dynamic simulation — Applications for safety education“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19.6 (2006), S. 754–761.
- [41] Christoph Fleischer u. a. „Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.9 (2015), S. 1258–1269.
- [42] Christoph Fleischer-Trebes u. a. „Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2016).

- [43] Gheorghe Florea und Radu Dobrescu. „Risk and Hazard Control the new process control paradigm“. In: *Systems, Control, Signal Processing and Informatics II, Prague* (2014).
- [44] Hossam A. Gabbar. „Improved qualitative fault propagation analysis“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20.3 (2007), S. 260–270.
- [45] Holger Graf. „Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbetrachtung von Chemieanlagen während der Planungsphase“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2000.
- [46] Holger Graf und H. Schmidt-Traub. „Early hazard identification of chemical plants with statechart modelling techniques“. In: *Safety Science* 36.1 (2000), S. 49–67.
- [47] Ignacio E. Grossmann und Arthur W. Westerberg. „Research challenges in process systems engineering“. In: *AIChE Journal* 46.9 (2000), S. 1700–1703.
- [48] Laura Grundemann, Martin Schoenitz und Stephan Scholl. „Shorter Time-to-Market with Micro-Conti Processes“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 685–693.
- [49] Łukasz Hady und Günter Wozny. „Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 597–614.
- [50] Payman Hajihosseini, Karim Salahshoor und Behzad Moshiri. „Process fault isolation based on transfer entropy algorithm“. In: *ISA Transactions* 53.2 (2014), S. 230–240.
- [51] Christoph Helling u. a. „Fundamentals towards a Modular Microstructured Production Plant“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 892–904.
- [52] Peter Herrmann und Peter Grannas. „A Tool for Hazard Detection in Hybrid Systems“. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Automation of Mixed Processes: Hybrid Dynamic Systems (ADPM2000)*. 2000, S. 225–230.



- [53] Volker Hessel u. a. „Potenzialanalyse von Milli- und Mikroprozesstechniken für die Verkürzung von Prozessentwicklungszeiten - Chemie und Prozessdesign als Intensivierungsfelder“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 660–684.
- [54] Lukas Hohmann u. a. „Modules in process industry - A life cycle definition“. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 111 (2017), S. 115–126.
- [55] Paul W. Holland. „Statistics and Causal Inference“. In: *Journal of the American Statistical Association* 81.396 (1986), S. 945–960.
- [56] Jinqiu Hu u. a. „Fault propagation behavior study and root cause reasoning with dynamic Bayesian network based framework“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 97 (2015), S. 25–36.
- [57] P. Hugo und F. Lopez. „Umwandlung diskontinuierlicher chemischer Prozesse in eine kontinuierliche Prozessführung unter Verwendung mikrostrukturierter Reaktoren - Reaktionstechnik und Sicherheit“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 81.1-2 (2009), S. 145–152.
- [58] I. Hwang u. a. „A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods“. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18.3 (2010), S. 636–653.
- [59] B. Kampczyk u. a. „Effizientere Anlagenplanung durch Modularisierung?“ In: *Chemie Ingenieur Technik* 75.5 (2003), S. 540–543.
- [60] Mateja Kavčič und Dani Juričić. „CAD for fault tree-based diagnosis of industrial processes“. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 14.2 (2001), S. 203–216.
- [61] Faisal I. Khan und S.A. Abbasi. „OptHAZOP — an effective and optimum approach for HAZOP study“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 10.3 (1997), S. 191–204.
- [62] Faisal I. Khan und S.A. Abbasi. „TOPHAZOP: a knowledge-based software tool for conducting HAZOP in a rapid, efficient yet inexpensive manner“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 10.5-6 (1997), S. 333–343.

- [63] Faisal I. Khan und S.A. Abbasi. „Towards automation of HAZOP with a new tool EXPERTOP“. In: *Environmental Modelling & Software* 15.1 (2000), S. 67–77.
- [64] Norbert Kockmann. „Scale-up-fähiges Equipment für die Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 646–659.
- [65] Norbert Kockmann. „Sicherheitsaspekte bei der Prozessentwicklung und Kleinmengenproduktion mit Mikroreaktoren“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 715–726.
- [66] Norbert Kockmann u. a. *Micro Process Engineering: Fundamentals, Devices, Fabrication, and Applications*. 1. Aufl. Wiley-VCH, 2014.
- [67] Zdravko Kravanja und Miloš Bogataj, Hrsg. *26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Elsevier Science & Technology, 2016.
- [68] Jörg Krekel und Gerd Siekmann. „Die Rolle des Experiments in der Verfahrensentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 57.6 (1985), S. 511–519.
- [69] Juraj Labovský u. a. „Model-based HAZOP study of a real MTBE plant“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20.3 (2007), S. 230–237.
- [70] Jürgen Lang, Frank Stenger und Rüdiger Schütte. „Chemieanlagen der Zukunft - Unikate und/oder Module“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2012), S. 883–884.
- [71] Gang Li, S Joe Qin und Tao Yuan. „Data-driven root cause diagnosis of faults in process industries“. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 159 (2016), S. 1–11.
- [72] Hong Xian Li u. a. „Risk identification and assessment of modular construction utilizing fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and simulation“. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 40.12 (2013), S. 1184–1195.
- [73] Zhenglin Liang u. a. „On fault propagation in deterioration of multi-component systems“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 162 (2017), S. 72–80.

- [74] Stefan Lier, Dominik Wörsdörfer und Marcus Grünewald. „Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast“. In: *ChemBioEng Reviews* 3.1 (2016), S. 16–25.
- [75] Stefan Lier u. a. „Modulare Verfahrenstechnik: Apparateentwicklung für wandlungsfähige Produktionssysteme“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 88.10 (2016), S. 1444–1454.
- [76] Jan Limbers. *AKTUALISIERUNG: DIE DEUTSCHE CHEMISCHE INDUSTRIE 2030*. 2016.
- [77] Ning Lü und Xiong Wang. „SDG-based hazop and fault diagnosis analysis to the inversion of synthetic ammonia“. In: *Tsinghua Science and Technology* 12.1 (2007), S. 30–37.
- [78] Sebastián Lugo-Márquez u. a. „Modular redesign methodology for improving plant layout“. In: *Journal of Engineering Design* 27.1-3 (2015), S. 50–74.
- [79] Md Raihan Mallick und Syed A Imtiaz. „A Hybrid Method for Process Fault Detection and Diagnosis“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46.32 (2013), S. 827–832.
- [80] P.K. Marhavidas, D. Koulouriotis und V. Gemeni. „Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24.5 (2011), S. 477–523.
- [81] S.A. McCoy u. a. „HAZID, A Computer Aid for Hazard Identification“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 77.6 (1999), S. 317–327.
- [82] Peter Meier. „Risikomanagement in Großprojekten“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 727–729.
- [83] Yew Seng Ng und Rajagopalan Srinivasan. „Multi-agent based collaborative fault detection and identification in chemical processes“. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23.6 (2010), S. 934–949.

- [84] Dennis P. Nolan. *Safety and Security Review for the Process Industries: Application of Hazop, Pha, What-If and Sva Reviews*. ELSEVIER LTD, 2014. 192 S.
- [85] M. Obst, A. Hahn und L. Urbas. „Package unit integration for process industry – A new description approach“. In: *Proc. IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. 2014, S. 1–8.
- [86] Michael Obst, Falk Doherr und Leon Urbas. „Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering“. In: *at - Automatisierungstechnik* 61.2 (2013), S. 103–108.
- [87] Michael Obst u. a. „Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 55.01-02 (2013), S. 24.
- [88] Michael Obst u. a. „Beschreibung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 57.01-02 (2015), S. 48.
- [89] Michael Obst u. a. „Semantic description of process modules“. In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- [90] M. Obst u. a. „Integration requirements of package units — A description approach with FDI“. In: *Proc. IEEE 18th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*. 2013, S. 1–8.
- [91] Andrea Ohle u. a. „Modularisierung von Gaswäschern für die CO<sub>2</sub>-Entfernung aus Biogas“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 86.5 (2014), S. 640–648.
- [92] M. Oppelt, G. Wolf und L. Urbas. „Towards an integrated use of simulation within the life-cycle of a process plant“. In: *Proc. IEEE 20th Conf. Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*. 2015, S. 1–8.
- [93] C. Palmer und P.W.H. Chung. „An automated system for batch hazard and operability studies“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 94.6 (2009), S. 1095–1106.
- [94] Nicola Paltrinieri und Faisal Khan. *Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry*. Elsevier Science & Technology, 2016. 284 S.

- [95] Y. Papadopoulos u. a. „Analysis and synthesis of the behaviour of complex programmable electronic systems in conditions of failure“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 71.3 (2001), S. 229–247.
- [96] J.C. Parmar und F.P. Lees. „The propagation of faults in process plants: Hazard identification“. In: *Reliability Engineering* 17.4 (1987), S. 277–302.
- [97] J.C. Parmar und F.P. Lees. „The propagation of faults in process plants: Hazard identification for a water separator system“. In: *Reliability Engineering* 17.4 (1987), S. 303–314.
- [98] Hans J. Pasman und William J. Rogers. „How Can We Improve HAZOP, Our Old Work Horse, and Do More with Its Results? An Overview of Recent Developments“. In: *CHEMICAL ENGINEERING* 48 (2016).
- [99] Judea Pearl. „Causal diagrams for empirical research“. In: *Biometrika* 82.4 (1995), S. 669.
- [100] Judea Pearl. *Causality*. Cambridge University Pr., 2009. 484 S.
- [101] JD Perkins. *Interactions between process design and process control*. Department of Chemical Engineering, Imperial College, 1992.
- [102] Annett Pfeffer und Leon Urbas. „Architectures for integrating functional safety into modular process plants“. In: *IFAC-PapersOnLine* 48.21 (2015), S. 1321–1326.
- [103] Shibly Rahman u. a. „ExpHAZOP+: Knowledge-based expert system to conduct automated HAZOP analysis“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22.4 (2009), S. 373–380.
- [104] Naveed Ramzan, Fred Compant und Werner Witt. „Methodology for the generation and evaluation of safety system alternatives based on extended Hazop“. In: *Process Safety Progress* 26.1 (2007), S. 35–42.
- [105] S. Rath, Ü. Can und E. Leimer. „Quantitative Risikoanalyse (QRA) - Anwendungsbeispiele aus dem Großanlagenbau“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 81.1-2 (2009), S. 53–62.

- [106] Daniel Regulin, Thomas Aicher und Birgit Vogel-Heuser. „Improving Transferability Between Different Engineering Stages in the Development of Automated Material Flow Modules“. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13.4 (2016), S. 1422–1432.
- [107] Netta Liin Rossing u. a. „A functional HAZOP methodology“. In: *Computers & Chemical Engineering* 34.2 (2010), S. 244–253.
- [108] Johannes Rottke u. a. „Efficient Engineering by Modularization into Package Units“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 885–891.
- [109] J Savkovic-Stevanovic. „Reliability and safety analysis of the process plant“. In: *Petroleum & Coal* 52.2 (2010), S. 62–68.
- [110] N. Schetinin u. a. „Why do verification approaches in automation rarely use HIL-test?“ In: *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), 2013, S. 1428–1433.
- [111] Tim Seifert u. a. „Small scale, modular and continuous: A new approach in plant design“. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 52 (2012), S. 140–150.
- [112] Ina Sell, Denise Ott und Dana Kralisch. „Lebenszykluskostenanalyse zur Entscheidungsunterstützung in der chemischen Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 85.4 (2013), S. 447–454.
- [113] Uwe Strauch. „Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie - Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung einer chemischen Anlage“. Diss. Technische Universität Berlin, 2009.
- [114] Aarne Sundberg. „Micro-scale Distillation and Microplants in Process Development“. Diss. Aalto University, 2014.
- [115] *The CoPIRIDE Project*. 2010. URL: <http://www.copiride.eu/> (besucht am 23.04.2017).
- [116] Nina F. Thornhill und Alexander Horch. „ADVANCES AND NEW DIRECTIONS IN PLANT-WIDE CONTROLLER PERFORMANCE ASSESSMENT“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 39.2 (2006). 6th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, S. 29–36.

- [117] Alessandro Tugnoli u. a. „Supporting the selection of process and plant design options by Inherent Safety KPIs“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25.5 (2012), S. 830–842.
- [118] Leon Urbas u. a. „Automatisierung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 54.01-02 (2012), S. 44.
- [119] Leon Urbas u. a. „Modularisierung und Prozessführung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 615–623.
- [120] Hülya Uzuner. „Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von R&I-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2012.
- [121] Hülya Uzuner und Gerhard Schembecker. „Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 747–761.
- [122] Ramesh Vaidhyanathan und Venkat Venkatasubramanian. „A semi-quantitative reasoning methodology for filtering and ranking HAZOP results in HAZOPExpert“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 53.2 (1996), S. 185–203.
- [123] Ramesh Vaidhyanathan und Venkat Venkatasubramanian. „Digraph-based models for automated HAZOP analysis“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 50.1 (1995), S. 33–49.
- [124] Andreas Varga. „New computational paradigms in solving fault detection and isolation problems“. In: *Annual Reviews in Control* 37.1 (2013), S. 25–42.
- [125] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy und Surya N. Kavuri. „A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies“. In: *Computers & Chemical Engineering* 27.3 (2003), S. 313–326.
- [126] Venkat Venkatasubramanian, Jinsong Zhao und Shankar Viswanathan. „Intelligent systems for HAZOP analysis of complex process plants“. In: *Computers & Chemical Engineering* 24.9-10 (2000), S. 2291–2302.
- [127] Venkat Venkatasubramanian u. a. „A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods“. In: *Computers & chemical engineering* 27.3 (2003), S. 293–311.

- [128] Venkat Venkatasubramanian u. a. „A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods“. In: *Computers & chemical engineering* 27.3 (2003), S. 327–346.
- [129] Valeria Villa u. a. „Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry“. In: *Safety Science* 89 (2016), S. 77–93.
- [130] Olaf Wachsen u. a. „Anforderungen der zukunftsorientierten Spezialchemie an die angewandte Reaktionstechnik“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.6 (2015), S. 683–693.
- [131] Feng Wang, Jinji Gao und Huaqing Wang. „A new intelligent assistant system for HAZOP analysis of complex process plant“. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25.3 (2012), S. 636–642.
- [132] Hangzhou Wang u. a. „SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 87.1 (2009), S. 40–46.
- [133] Jing Wang u. a. „Fault isolation based on residual evaluation and contribution analysis“. In: *Journal of the Franklin Institute* (2016).
- [134] Zhenheng Wang, Jinsong Zhao und Helen Shang. „A hybrid fault diagnosis strategy for chemical process startups“. In: *Journal of Process Control* 22.7 (2012), S. 1287–1297.
- [135] Sachari Wassilew u. a. „Abbildung des NAMUR Module Type Package auf OPC UA“. In: *at - Automatisierungstechnik* 65.1 (2017), S. 49–59.
- [136] S. Wassilew u. a. „Transformation of the NAMUR MTP to OPC UA to allow plug and produce for modular process automation“. In: *Proc. IEEE 21st Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2016, S. 1–9.
- [137] Klaus H. Weber. *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer-Verlag GmbH, 2015.
- [138] Dominik Wörsdörfer, Stefan Lier und Marcus Grünewald. „Characterization model for innovative plant designs in the process industry—An application to transformable plants“. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 100 (2016), S. 1–18.



- [139] Fan Yang, Sirish L. Shah und Deyun Xiao. „SDG (Signed Directed Graph) Based Process Description and Fault Propagation Analysis for a Tailings Pumping Process“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43.9 (2010), S. 50–55.
- [140] Fan Yang und Deyun Xiao. „Progress in root cause and fault propagation analysis of large-scale industrial processes“. In: *Journal of Control Science and Engineering* 2012 (2012).
- [141] Ruey-Jen Yang u. a. „A comprehensive review of micro-distillation methods“. In: *Chemical Engineering Journal* 313 (2017), S. 1509–1520.
- [142] S. Yin u. a. „A Review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.11 (2014), S. 6418–6428.
- [143] Youmin Zhang und Jin Jiang. „Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems“. In: *Annual Reviews in Control* 32.2 (2008), S. 229–252.
- [144] Zhanpeng Zhang und Jinsong Zhao. „A deep belief network based fault diagnosis model for complex chemical processes“. In: *Computers & Chemical Engineering* (2017).
- [145] C. Zhao, M. Bhushan und V. Venkatasubramanian. „PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part I“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 83.6 (2005), S. 509–532.
- [146] C. Zhao, M. Bhushan und V. Venkatasubramanian. „PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part II“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 83.6 (2005), S. 533–548.
- [147] Chongwen Zhou, Ratna Babu Chinnam und Alexander Korostelev. „Hazard rate models for early detection of reliability problems using information from warranty databases and upstream supply chain“. In: *International Journal of Production Economics* 139.1 (2012), S. 180–195.

# Anhang

---

<b>A</b>	<b>Anhang von Bildern</b>	. . . . .	A-2
<b>B</b>	<b>Anhang von Tabellen</b>	. . . . .	A-3

# Anhang von Bildern

---



# Anhang von Tabellen

---

B