

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

1 Einleitung	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
2 Stand der Technik	10
2.1 Übersicht Risikoanalysemethoden	10
2.2 Fehlerfortpflanzung in Verfahrenstechnischen Anlagen	10
2.3 Gesetze und Vorschriften in Deutschland	10
3 Literatursichtung	11
3.1 Einleitungsliteratur	11
3.2 Sicherheit	13
3.3 HAZOP	23
3.4 automatisierte HAZOP	24
3.5 Fehlerfortpflanzung	26
3.6 Modularisierung	26
3.6.1 Moduldarstellung	33
3.7 Mini- und Milliplanttechnik	34
3.8 Weitere	37
3.9 unsortiert	38
4 Wichtige Begriffe	39
Literaturverzeichnis	i
Anhang	A-1

Abkürzungsverzeichnis

HAZOP Hazard and Operability Analysis

BImSchG Bundes-Immissionsschutzgesetz

EU Europäische Union

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

α m^2/s Temperaturleitfähigkeit

Verzeichnis der verwendeten Indizes

l liquid/flüssig

Symbolverzeichnis

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

Abbildungsverzeichnis

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. [BKSS16]

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 wird ein weiter ansteigender Innovationsdruck erwartet. 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. [Lim16]

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. [BS09]

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 Be-

reich der Verfahrens- und Anlagentechnik aus dem Jahr 2000 weist beispielsweise auf diese Herausforderungen hin. [GW00]

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

1.2 Beschleunigung des Innovationstempo

Im Abschnitt 1.1 wurde die Relevanz der chemisch-pharmazeutischen Industrie für die deutsche Wirtschaft dargelegt und die Notwendigkeit eines erhöhten Innovationstempo begründet. In diesem Abschnitt werden Methoden vorgestellt, welche dieses Ziel realisieren sollen.

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 und U. Neumann in [DN00] 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 zumindest 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.

Hier ist noch ein Abschnitt zum Einsatz von Millireaktoren möglich.

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 [09], ein Positionspapier [10a] und ein Übersichtsvortrag [BS09] 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 [DN00] 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 und montiert 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 Schwerpunk-

te sind dem bereits aufgeführten Positionspapier zur 50 % – Idee entnommen [10a]. 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 Projektablaufe 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 F³–Factory gezeigt werden. Die Ergebnisse wurden im Abschlussbericht dieses Projektes [Buc14] veröffentlicht.

Weitere Untersuchungen wurden beispielsweise im Projekt CoPIRIDE [10b] durchgeführt.

Die Anwendbarkeit von Modulen konnte 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 Sicherheitsuntersuchungen eingegangen und im daran anschließenden Abschnitt 1.4 das Thema dieser Arbeit herausgearbeitet.

1.3 Notwendigkeit von Sicherheitstechnik

Das Bedürfnis nach 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 Risi-

koanalyse. 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“ [Ber98] zeigt die geschichtliche Entwicklung von Risikobetrachtungen auf. Die zweite Auflage des Werkes von Bilal M. Ayyub ist eine aktuelle umfassende Referenz zum Thema Risikoanalyse [Ayy14].

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 sicherheitsrelevanter 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. Sie führten vom ersten europaweiten Regelwerk – der Seveso I Richtlinie 1982 – bis hin zur aktuellen Seveso III Richtlinie 2012/18/EU. Diese europäische Richtlinie wurde in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU) in Form nationaler Gesetzte, Verordnungen und Richtlinien umgesetzt. In Deutschland dient dazu das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der 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 also chemische Anlagen, welche potentiell gefährliche Stoffe verarbeiten und in Modulbauweise entsprechend den im Abschnitt 1.2 dargelegten Konzepten konzipiert werden. Modulare Anlagen müssen also in geeigneter Weise auf die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen untersucht werden. Dieser gesonderten Problematik wurde bisher wenig Beachtung geschenkt. Die Arbeit von Fleischer et. al. [FWKB15] 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 Container-

bauweise, wie sie im Projekt F³ 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 Zweiteilung der Sicherheitsanalyse vor. Die Wechselwirkung zwischen Modulen soll mit Hilfe einer Hazard and Operability Analysis (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. Die Untersuchung einzelner Module liefert dann Aufschluss über deren Verwendbarkeit 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 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.

Ein 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 Übersicht Risikoanalysemethoden

ganz wichtig: siehe [FWKB15, S. 4]: Aus dem Stand der Technik sind zahlreiche industriell etablierten Methoden der Risikoanalyse für die Anlagen der Prozessindustrie bekannt. Eine Aufführung unterschiedlicher Methoden findet sich im Buch von Preiss [14], im DGQ-Band 17-10-Zuverlässigkeitsmanagement [15] oder in den Anhängen der DIN EN 60300-3-1 [16] sowie der VDI 4003 Zuverlässigkeitsmanagement [17].

2.2 Fehlerfortpflanzung in Verfahrenstechnischen Anlagen

2.3 Gesetze und Vorschriften in Deutschland

Bei den MKPCs (Container - Modul - Anlagen) handelt es sich wie bei klassischen Anlagen um ein Arbeitsmittel, das im Sinne des Arbeitsschutzgesetzes [10] oder des Produktsicherheitsgesetzes [11] vor dem Einsatz hinsichtlich der sicheren Benutzung geprüft werden muss. Sie unterliegen der Betriebssicherheitsverordnung [12] und den darin hinterlegten Sicherheitsvorschriften und gesetzlichen Regelungen.

3.1 Einleitungsliteratur

[WBGA15] Relevanz der Spezialchemie und deren erwartetes Wachstum. Abschnitt 5 fokussiert auf die Rolle modularer Anlagen.

[DN00] Diese Arbeit der Universität Clausthal zeigt ein alternatives Vorgehen bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Der Fokus liegt dabei auf die Einbindung der Maschinenkonstruktion in die Verfahrensplanung. Als Ziel sollen innovative Maschinen entstehen, welche Prozesse optimal erfüllen können. Dieser Ansatz ist das Gegenteil der Verwendung von Modulen im Sinne meiner Arbeit. Hier werden optimierte Sondermaschinen entwickelt und bewusst auf Standardslösungen verzichtet.

Es ist ein wünschenswertes Ziel, bei der Entwicklung von **neuen Verfahren bzw. Prozessen** die Prozessplanung (was wird mit dem Stoff gemacht: Zerkleinern, Reagieren, Mischen, Trennen usw. damit z. B. ein neuer chem. Stoff gewonnen wird \mapsto R u. I Fließbild) und die konkrete Planung und den Entwurf der notwendigen Maschinen (die konkrete Konstruktion der Maschine) zu parallelisieren, um so innovative Lösungen zu finden (Beispiel innovativer Lsg: die Ausführung mehrerer Prozessschritte wie Zerkleinern und Reagieren von Stoffen in einem einzigen, neu entworfenen Apparat bei der Herstellung von Chlorsilanen aus Ferrosilicium und Chlorwasserstoff), welche einen Prozess **optimal** realisieren. Die Richtlinien VDI 2221 und VDI 2222 reichen dazu nicht aus, da sie zu branchenspezifisch ausgelegt sind (der Wunsch ist ja eine branchenübergreifende, parallele Entwicklung). Eine Prozessentwicklung mittels Fließbildern wird als Lösung vorgeschlagen. Dazu wird eine zu lösende Aufgabenstellung in Teilsysteme geringer Komplexität so weit zerlegt, dass sich deren Funktion

durch naturwissenschaftliche Grundoperationen darstellen lässt. Die gesamte Lösung der Aufgabe wird dann als Fließbild solcher Teilsysteme dargestellt. Die Formulierung einer Funktion ist dabei losgelöst von einer konkreten technischen Umsetzung durch bereits existierende Maschinen bzw. Apparate. Durch diese Darstellung wird ein Blick für die mögliche Zusammenfassung von mehreren Teilsystemen in einer einzigen Maschine ermöglicht. Diese muss dann aber neu konstruiert werden; der Prozess wird aber optimal realisiert. Weiterhin kann die Notwendigkeit jedes Prozessschrittes besser beurteilt werden. Die Wiederverwendbarkeit einer so entwickelten Maschine ist eher gering, da sie ja als optimale Lösung von genau diesem einen Prozess entwickelt wurde. Es wird bewusst eine Abkehr von vorfabrizierten Lösungen gefordert (und damit die Verwendung vorgefertigter Module zumindest erschwert, wenn nicht gar unterbunden) um zu innovativen Lösungen zu gelangen. **Fertig. Alternative zu modularisierter Verfahrensplanung.**

[GW00] Research challenges in process systems engineering

[BKSS16] Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)

[Lim16] AKTUALISIERUNG: DIE DEUTSCHE CHEMISCHE INDUSTRIE
2030

[BS09] 50 % Idee

[10a] 50 % Idee

[09] 50 % Idee

[Buc14] F3 Factory

[10b]

3.2 Sicherheit

[RCL09] 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**

[BC10] 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 eine 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 tolle Sache zur quantitativen Betrachtung. Aktuelle Richtlinie: [CCP15] [fertig](#)

[TLSC12] Supporting the selection of process and plant design options by Inherent Safety KPIs

[Sav10] Reliability and safety analysis of the process plant

[LALA13] Risk identification and assessment of modular construction utilizing fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and simulation

[BRB13] 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 [Ayy14].

- 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.

[CY02] 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. PCED 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 Wechselwir-

kung 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.

[FWKB15] Die wichtigste Arbeit bisher.

Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen

[PU15] 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.

[Gra00] Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbeurteilung von Chemieanlagen während der Planungsphase

[GS00] Early hazard identification of chemical plants with statechart modelling techniques

[LW07] SDG-based hazop and fault diagnosis analysis to the inversion of synthetic ammonia

[WCHT09] SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process

[FD14] Risk and Hazard Control the new process control paradigm

[CPPQ13] A preliminary study of thermal hydraulic models for virtual hazard and operability analysis and model-based design of rotating machine packages

[ZCK12] Hazard rate models for early detection of reliability problems using information from warranty databases and upstream supply chain

[ASMC94] 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.

[Ayy14] Scheinbar ein Grundlagenbuch zum Thema Risikoanalyse und Reduktion von Risiken

Wird bereits im Text zitiert.

Auf jeden Fall noch mal reinschauen!.

[CCP07b] Buch, nachlesen

[CCP07a] Buch, nachlesen

[CCP08b] Buch, nachlesen

[CCP08a] Buch, nachlesen

[CCP08c] Buch, nachlesen

[CCP09a] Buch, nachlesen

[CCP09b] Buch, nachlesen

[CCP10] Buch, nachlesen

[CCP12] Buch, nachlesen

[CCP13] Buch, nachlesen

[CCP15] Buch, nachlesen

[NoI14] Safety and Security Review for the Process Industries: Application of Hazop, Pha, What-If and Sva Reviews

[CGP15] 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 entworfene 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 Sicherheits-

betrachtung 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.

[SMKM13] Why do verification approaches in automation rarely use HIL-test?

[HG00] A Tool for Hazard Detection in Hybrid Systems

[Chr15] Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur und Prozessmodell **Dissertation. Später noch mal anschauen**

[Web15] Grundlagenbuch zur Sicherheitsbetrachtung von Chemischen Anlagen

3.3 HAZOP

[DFVA10] 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 [PR16]. **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.**

[PR16] Aktueller Untersuchungen zur Automatisierbarkeit von HAZOP.
Wird bereits im Text zitiert

[RCW07] Methodology for the generation and evaluation of safety system alternatives based on extended Hazop

[ESB06] Combining HAZOP with dynamic simulation — Applications for safety education

[LŠMJ07] Model-based HAZOP study of a real MTBE plant

[Dun10] New trends for conducting hazard & operability (HAZOP) studies in continuous chemical processes

3.4 automatisierte HAZOP

[VV95] Spezielles Verfahren zur HAZOP

[VV96] A semi-quantitative reasoning methodology for filtering and ranking HAZOP results in HAZOPExpert

[KA97a] OptHAZOP — an effective and optimum approach for HAZOP study

[KA97b] TOPHAZOP: a knowledge-based software tool for conducting HAZOP in a rapid, efficient yet inexpensive manner

[KA00] Towards automation of HAZOP with a new tool EXPERTOP

[RLJJ10] A functional HAZOP methodology

[RKVA09] ExpHAZOP+: Knowledge-based expert system to conduct automated HAZOP analysis

[WGW12] A new intelligent assistant system for HAZOP analysis of complex process plant

[BMS14] A systematic formulation for HAZOP analysis based on structural model

[CU95] Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants

[MWLJ99] HAZID, A Computer Aid for Hazard Identification

[ZBV05a] PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part I

[ZBV05b] PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part II

[PC09] An automated system for batch hazard and operability studies

[Bat04] An ontology approach to support HAZOP studies

3.5 Fehlerfortpflanzung

[PL87a] wichtig!

[PL87b] wichtig!

[BCPG00] Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis

3.6 Modularisierung

[BS12] 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 losgelöst 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 Variantenmodul 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 genau Definition der Schnittstellen ist hierbei notwendig. Ein Planungsmodul bietet Ansätze zu Auswahl, 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 ([SSBS12]). 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.

[KBHS03] Vorstellung eines Rechnerwerkzeugs zur Anlagenplanung
Modul = Ausrüstungen, welche Teil des gleichen Prozessschrittes sind. Diese Arbeit hilft die verschiedenen Verständnisse vom Modulbegriff darzulegen.

[HW12] 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.

[UDKO12] Übersichtsbeitrag Modularisierung, offene Forschungsfragen

[LPFG16] Relevanz modularisierter Anlagen

[ODU13] Relevanz modularisierter Anlagen**[OOMU14]** Konkretes Beispiel einer Modularen Anlage

paragraph*[BGKL12] Kostenvorteil durch Modularisierung von Anlagen, insbesondere bei Verwendung von Mikroreaktoren anhand einer Fallstudie.

Es gibt einen Trend zu kundenspezifischen Produkten, welche die Massenprodukte zunehmend ersetzen. Der Umfang umfasst nur bis zu wenigen tausend Tonnen pro Jahr. Die Lebenszyklen solcher Produkte betragen außerdem nur wenige Jahre. Eine kurze Entwicklungszeit ist daher von hoher Wichtigkeit, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Weiterhin ist die Flexibilität einer Anlage ausschlaggebend. Batchprozesse haben folgenden Nachteile:

- Scale-Up ist schwierig, da insbesondere die Wärmeabfuhr bei großen Reaktoren wesentlich schlechter als im Labormaßstab ist. Dies führt bei stark exothermen Reaktionen zu Sicherheitsproblemen und vergrößertem Planungsaufwand
- Batchanlagen sind nicht sehr flexibel. Durch feste Chargengrößen müssen bei geringen Absatzmengen Zielstoffe und Ausgangsstoffe in großen Mengen zwischengelagert werden, um verschiedene Produkte herstellen zu können und die Anlage voll auszulasten.

Milli-Reaktoren bieten eine Alternative. Sie sind gekennzeichnet durch einen kontinuierlichen Betrieb, Strömungskanäle mit Durchmessern im Millimeterbereich und sehr hohen Wärmeaustauschflächen pro Volumeneinheit (ca. Faktor 100 zu klassischen Anlagen), wodurch die Wärme bei stark exothermen Reaktionen gut abgeführt werden kann, was eine inhärente Sicherheit zur Folge hat. Um ein einfaches Scale-Up von neuen Prozessen zu ermöglichen müssen Anlagen im Produktionsmaßstab möglichst die gleichen Eigenschaften wie solche in Laborgröße aufweisen. Entwickelte Prozesse müssen dann nicht aufwendig angepasst werden und der Entwicklungsprozess wird stark beschleunigt. Milli-Reaktoren bieten diese Eigenschaft. Außerdem können mit ihnen hohe Raum-Zeit Ausbeuten erreicht werden. Milli-Reaktoren können flexibel eingesetzt werden und sind besonders für einen modularen Aufbau geeignet. Durch Parallelisierung mehrerer Milli-Reaktoren können Produktionskapazitäten flexibel angepasst werden und damit auf Marktveränderungen effizient reagiert werden. Mit Hilfe einer Kapitalwertana-

lyse wird an einem Fallbeispiel das Potential von Milli-Reaktoren nachgewiesen. Es wird ein linear wachsender Markt für ein neu entwickeltes Produkt angenommen. Es wird gezeigt, dass eine Aufteilung von Produktionskapazitäten durch die Verwendung von Modulen insbesondere bei kurzen Produktlebenszeiten (bis 10 Jahre) sinnvoll ist. Die höheren Betriebskosten mehrerer Module werden dabei durch optimierte Produktionsmengen ausgeglichen. Der Bau von Großanlagen rentiert sich erst bei längeren Produktlebenszyklen oder bei extrem schnell wachsender Produktnachfrage. Weiterhin wird gezeigt, dass eine Zeiteinsparung bei der Produktentwicklung höhere Entwicklungs- und Investitionskosten durch die Verwendung von Milli-Reaktoren rechtfertigt und zu einem wirtschaftlich besseren Ergebnis als die Verwendung von Batch-Prozessen führt. fertig

[US12], [Uzu12] 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

[LSS12] 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

[RGFK12] 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 erkauft 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.

[OHBC13] Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen

[UBJS12] Automatisierung von Prozessmodulen

[FKBK16] Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie. Viele Literaturreferenzen, sehr aktueller Text zur Problematik der Verwendung von modularen Anlagen in der Industrie

[LWG16] Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast

[HKKS17] Modules in process industry - A life cycle definition

3.6.1 Moduldarstellung

[WOIU17]

[OHUF15a] Beschreibung von Prozessmodulen

[OHU14] Package unit integration for process industry – A new description approach

[WULF16] Zur Darstellung von Modulen wird ein MTP erstellt. Dies entspricht den 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.

[ORWU13] Integration einer Package Unit in bestehende Anlage. Vergleich von bekannten Technologien und deren Bewertung.

[OHUF15b] Semantic description of process modules

3.7 Mini- und Milliplanttechnik

[Koc12a] Hochskalieren von Anlagen mit Hilfe modularer Konzepte und Mikroreaktoren.

Basierend auf Kennzahlen für die Reaktionskinetik und -enthalpie wird eine **Korrelation** abgeleitet und mit der konvektiven Wärmeübertragung als ein Kriterium des **sicheren Reaktorbetriebs** gekoppelt.

[SOK13] *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**

[HGWN12] Potenzialanalyse von Milli- und Mikroprozesstechniken

[GSS12] Relevanz von Mikroreaktoren und deren Beziehung zur 50 Prozent These anhand zweier Beispiele.

[BWZ12] Vorteile der Miniplant-Technik im Hinblick auf eine effiziente Verfahrensentwicklung anhand von Beispielen homogen katalysierter Verfahren. Literaturverweise auf alle genannten Vorteile und Eigenschaften von Miniplants. Experimentelle Untersuchungen in unterschiedlichen Maßstäben nehmen den größten Teil der Zeit während der Prozessentwicklung ein. Zum Beginn der Prozessentwicklung wird meist mit Batchprozessen gearbeitet, um die Einflüsse von Z. B. Katalysatoren, Aktivatoren, Druck, Temperatur usw. untersuchen zu können. Eine Vielzahl industrieller Prozesse wird jedoch kontinuierlich durchgeführt. Ein reines Scale-Up einer Batchanlage reicht daher nicht aus. Statt dessen muss im Laufe der Prozessentwicklung eine kontinuierliche Pilotanlage entworfen werden und der Prozess teilweise neu untersucht werden. Statt diesem

Entwicklungsprozess kann eine hochflexible Miniplant im Labormaßstab mit Hilfe von standardisiertem Laborequipment in kurzer Zeit und mit geringen Kosten entworfen werden. Diese wird bereits kontinuierlich betrieben und an ihr kann der Prozess entwickelt und in Echtzeit untersucht werden. Miniplants existieren mit Scale-Up Faktoren von bis zu 10000 und mehr. Apparate Volumina liegen im Bereich weniger Liter, Durchsatzmengen bis zu $1 \frac{kg}{h}$. Die Prozessentwicklung mit Hilfe kontinuierlicher Reaktoren erlaubt insbesondere eine genaue Betrachtung der Einflüsse verschiedener Prozessparameter, da stationäre Arbeitspunkte und Schwankungen um diese gezielt untersucht werden können. Außerdem kann die wirtschaftlich höchst relevante Rückgewinnung von Katalysatoren und die Rückführung von Stoffen - z. B. die Rückführung von Nebenprodukten zur Steigerung der Ausbeute gewünschter Stoffe - geeignet untersucht werden. Auf geeignete Literatur zu dieser Thematik wird in der Arbeit verwiesen. Weiterhin sind Miniplants zur Personalschulung und der Überprüfung der Einhaltung von Industriestandards nutzbar. Die Korrektur von Fehlern im Prozess ist im Rahmen einer Miniplant wesentlich preiswerter als bei Verwendung einer Pilotanlage. [KS85] Mit Hilfe komplexer Simulationen ist ein Scale-Up der Miniplant auf Produktionsniveau bei vielen Prozessen direkt möglich. Nur noch kritische Prozesseinheiten müssen im Pilotmaßstab gesondert untersucht werden. Die Umgehung einer kompletten Pilotanlage spart mehrere Jahre Entwicklungszeit. Außerdem werden hohe Kosten bei Planung und Betrieb einer Pilotanlage eingespart. Die erfolgreiche Untersuchung und Entwicklung von Prozessen mit Hilfe einer Miniplant wird an vier Beispielen ausgeführt. Der Fokus liegt dabei auf der Rückgewinnung eingesetzter Katalysatoren.

fertig

[HFES12] Die Verwendung von Mikroprozessen ist eine relativ neue und weiterhin wachsende Technologie. Ihren Durchbruch hatte diese Technologie in den frühen und mittleren neunziger Jahren. Die Forschung konzentriert sich derzeit auf die Umwandlung von Batch-Prozessen in Kontinuierliche durch Verwendung modularer Mikro- und Minireaktoren, mit Hilfe derer die Entwicklungszeit neuer Anlagen drastisch gesenkt werden soll. Vorteile sind ein erhöhter Stoffaustausch und eine verbesserte Wärmeübertragung. Durch die geringen Stoffvolumina in Mini- bzw. Mikoreaktoren steigt automatisch die Sicherheit besonders von exo-

thermen Reaktionen. Dadurch werden Verfahren möglich, die in konventionellen Reaktoren nur durch hohen Aufwand oder garnicht durchführbar wären. Mini- und Mikroanlagen mit gleicher Funktion können prinzipiell aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt werden. Typisch sind Glas, Keramiken und Edelstahl. Einige Typen sind Wärmetauscher (welche die ersten Mikroanlagen waren), Fallfilmreaktoren, mäanderförmige Reaktoren und Photoreaktoren.

Bestehende Probleme sind das Design und die konkrete innere Geometrie von Mini- Mikroanlagen. Derzeit werden diese durch Versuch/ Fehler Verfahren in Kombination mit Erfahrungen aus bereits entwickelten Anlagen ermittelt. Eine exakte Reproduzierbarkeit der inneren Strukturen ist schwierig. Module vom gleichen Typ sind daher nicht unbedingt identisch im Verhalten. Soll durch die Verwendung mehrerer Module ein Hochskalieren von Stoffmengen umgesetzt werden, so ist dies daher kompliziert und oft nur bis zu gewissen Grenzen realisierbar.

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit war insbesondere die Stofftrennung mit Hilfe von Mikroanlagen ein noch nicht komplett gelöstes Problem und daher Gegenstand aktueller Forschung. Die aktuelle Arbeit [YLWH17] gibt eine umfangreiche Übersicht über Entwicklungen zum Trennen von Stoffen durch Destillation mit Hilfe von Mikroanlagen.

[Koc12b] Sicherheitsaspekte bei der Prozessentwicklung und Kleinmengenproduktion mit Mikroreaktoren

[SSBS12] Small scale, modular and continuous: A new approach in plant design. Wird bisher nur zitiert.

[KBFH14] Micro Process Engineering: Fundamentals, Devices, Fabrication, and Applications

[Sun14] Micro-scale Distillation and Microplants in Process Development

[HL09] *Alles nur zitiert!*

Reaktions- und sicherheitstechnische Aspekte der Umwandlung eines diskontinuierlichen chemischen Prozesses in ein kontinuierliches Verfahren unter Verwen-

derung von Mikroreaktoren werden untersucht. Betrachtet man Mikroreaktoren als Module, so könnte diese Arbeit interessant werden \mapsto **das sollte ich daher fragen.**

3.8 Weitere

[Mei12] 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.**

[YLWH17] wird im Text direkt zitiert, keine weitere Analyse notwendig.

[WLG16] Characterization model for innovative plant designs in the process industry—An application to transformable plants

[LGRE15] Modular redesign methodology for improving plant layout

[RAV16] Improving Transferability Between Different Engineering Stages in the Development of Automated Material Flow Modules

[KS85] **wird nur zitiert**

[Per92] **hierin eine Quelle ab S. 215 bzw. 199**

[OWU15] Notwendigkeit von Simulation während dem Lebenszyklus einer Anlage

[Str09] Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie - Konzept eines integrierten Systems zur Abschätzung und Bewertung des Kapitalbedarfes für die Errichtung einer chemischen Anlage

3.9 unsortiert

Wichtige Begriffe

4

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.

Literaturverzeichnis

- [09] *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 (besucht am 23.04.2017).
- [10a] *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 (besucht am 23.04.2017).
- [10b] *The CoPIRIDE Project.* 2010. URL: <http://www.copiride.eu/> (besucht am 23.04.2017).
- [ASMC94] Tunc Aldemir u. a. *Reliability and Safety Assessment of Dynamic Process Systems.* 1. Aufl. NATO ASI Series 120. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [Ayy14] Bilal M. Ayyub. *Risk Analysis in Engineering and Economics.* 2. Aufl. Chapman und Hall/CRC, 2014.
- [Bat04] 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.
- [BC10] William Bill Bridges und Tony Clark. „Key issues with implementing LOPA“. In: *Process Safety Progress* 29.2 (2010), S. 103–107.
- [BCPG00] 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.

- [Ber98] Peter L. Bernstein. *Against the Gods: The Remarkable Story of Risk*. Wiley, 1998.
- [BGKL12] 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.
- [BKSS16] Dr. Michael Böhmer u. a. *Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)*. 2016.
- [BMS14] 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.
- [BRB13] 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.
- [BS09] 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 (besucht am 23.04.2017).
- [BS12] Christian Bramsiepe und Gerhard Schembecker. „Die 50 %-Idee: Modularisierung im Planungsprozess“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 581–587.
- [Buc14] 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 (besucht am 23.04.2017).
- [BWZ12] 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.

- [CCP07a] CCPS. *Guidelines for Risk Based Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [CCP07b] CCPS. *Guidelines for Safe and Reliable Instrumented Protective Systems*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [CCP08a] CCPS. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [CCP08b] CCPS. *Guidelines for the management of change for process safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [CCP08c] CCPS. *Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [CCP09a] CCPS. *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [CCP09b] CCPS. *Guidelines for Process Safety Metrics*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [CCP10] CCPS. *Guidelines for Process Safety Acquisition Evaluation and Post Merger Integration*. JOHN WILEY & SONS INC, 2010.
- [CCP12] CCPS. *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2012.
- [CCP13] CCPS. *Guidelines for Managing Process Safety Risks During Organizational Change*. JOHN WILEY & SONS INC, 2013.
- [CCP15] CCPS. *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*. JOHN WILEY & SONS INC, 2015.
- [CGP15] 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.
- [Chr15] Lars Christiansen. „Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur- und Prozessmodell“. ger. Diss. Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, 2015.

- [CPPQ13] 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.
- [CU95] Catherine A. Catino und Lyle H. Ungar. „Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants“. In: *AI-ChE Journal* 41.1 (1995), S. 97–109.
- [CY02] 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.
- [DFVA10] Jordi Dunjó u. a. „Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review“. In: *Journal of Hazardous Materials* 173.1-3 (2010), S. 19–32.
- [DN00] Peter Dietz und Uwe Neumann. „Verfahrenstechnische Maschinen — Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 72.1-2 (2000), S. 9–16.
- [Dun10] Jordi Dunjó Denti. „New trends for conducting hazard & operability (HAZOP) studies in continuous chemical processes“. Diss. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [ESB06] 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.
- [FD14] Gheorghe Florea und Radu Dobrescu. „Risk and Hazard Control the new process control paradigm“. In: *Systems, Control, Signal Processing and Informatics II, Prague* (2014).
- [FKBK16] Christoph Fleischer-Trebes u. a. „Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2016).

- [FWKB15] Christoph Fleischer u. a. „Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.9 (2015), S. 1258–1269.
- [Gra00] Holger Graf. „Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbetrachtung von Chemieanlagen während der Planungsphase“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2000.
- [GS00] 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.
- [GSS12] 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.
- [GW00] Ignacio E. Grossmann und Arthur W. Westerberg. „Research challenges in process systems engineering“. In: *AIChE Journal* 46.9 (2000), S. 1700–1703.
- [HFES12] Christoph Helling u. a. „Fundamentals towards a Modular Microstructured Production Plant“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 892–904.
- [HG00] 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.
- [HGWN12] 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.
- [HKKS17] Lukas Hohmann u. a. „Modules in process industry - A life cycle definition“. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 111 (2017), S. 115–126.

- [HL09] 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.
- [HW12] Łukasz Hady und Günter Wozny. „Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 597–614.
- [KA00] 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.
- [KA97a] 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.
- [KA97b] 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.
- [KBFH14] Norbert Kockmann u. a. *Micro Process Engineering: Fundamentals, Devices, Fabrication, and Applications*. 1. Aufl. Wiley-VCH, 2014.
- [KBHS03] B. Kampczyk u. a. „Effizientere Anlagenplanung durch Modularisierung?“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 75.5 (2003), S. 540–543.
- [Koc12a] Norbert Kockmann. „Scale-up-fähiges Equipment für die Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 646–659.
- [Koc12b] Norbert Kockmann. „Sicherheitsaspekte bei der Prozessentwicklung und Kleinmengenproduktion mit Mikroreaktoren“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 715–726.
- [KS85] Jörg Krekel und Gerd Siekmann. „Die Rolle des Experiments in der Verfahrensentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 57.6 (1985), S. 511–519.

- [LALA13] 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.
- [LGRE15] Sebastián Lugo-Márquez u. a. „Modular redesign methodology for improving plant layout“. In: *Journal of Engineering Design* 27.1-3 (2015), S. 50–74.
- [Lim16] Jan Limbers. *AKTUALISIERUNG: DIE DEUTSCHE CHEMISCHE INDUSTRIE 2030*. 2016.
- [LPFG16] Stefan Lier u. a. „Modulare Verfahrenstechnik: Apparateentwicklung für wandlungsfähige Produktionssysteme“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 88.10 (2016), S. 1444–1454.
- [LŠMJ07] 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.
- [LSS12] Jürgen Lang, Frank Stenger und Rüdiger Schütte. „Chemieanlagen der Zukunft - Unikate und/oder Module“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2012), S. 883–884.
- [LW07] 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.
- [LWG16] Stefan Lier, Dominik Wörsdörfer und Marcus Grünewald. „Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast“. In: *ChemBioEng Reviews* 3.1 (2016), S. 16–25.
- [Mei12] Peter Meier. „Risikomanagement in Großprojekten“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 727–729.
- [MWLJ99] S.A. McCoy u. a. „HAZID, A Computer Aid for Hazard Identification“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 77.6 (1999), S. 317–327.
- [Nol14] 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.

- [ODU13] Michael Obst, Falk Doherr und Leon Urbas. „Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering“. In: *at - Automatisierungstechnik* 61.2 (2013), S. 103–108.
- [OHBC13] Michael Obst u. a. „Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 55.01-02 (2013), S. 24.
- [OHU14] 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.
- [OHUF15a] Michael Obst u. a. „Beschreibung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 57.01-02 (2015), S. 48.
- [OHUF15b] 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.
- [OOMU14] Andrea Ohle u. a. „Modularisierung von Gaswäschern für die CO₂-Entfernung aus Biogas“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 86.5 (2014), S. 640–648.
- [ORWU13] 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.
- [OWU15] 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.
- [PC09] 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.

- [Per92] JD Perkins. *Interactions between process design and process control*. Department of Chemical Engineering, Imperial College, 1992.
- [PL87a] 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.
- [PL87b] 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.
- [PR16] 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).
- [PU15] Annett Pfeffer und Leon Urbas. „Architectures for integrating functional safety into modular process plants“. In: *IFAC-PapersOnLine* 48.21 (2015), S. 1321–1326.
- [RAV16] Daniel Regulín, 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.
- [RCL09] 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.
- [RCW07] 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.
- [RGFK12] Johannes Rottke u. a. „Efficient Engineering by Modularization into Package Units“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 885–891.

- [RKVA09] 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.
- [RLJJ10] Netta Liin Rossing u. a. „A functional HAZOP methodology“. In: *Computers & Chemical Engineering* 34.2 (2010), S. 244–253.
- [Sav10] J Savkovic-Stevanovic. „Reliability and safety analysis of the process plant“. In: *Petroleum & Coal* 52.2 (2010), S. 62–68.
- [SMKM13] 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 and Electronics Engineers (IEEE), 2013, S. 1428–1433.
- [SOK13] Ina Sell, Denise Ott und Dana Kralisch. „Lebenszykluskostenanalyse zur Entscheidungsunterstützung in der chemischen Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 85.4 (2013), S. 447–454.
- [SSBS12] 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.
- [Str09] 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.
- [Sun14] Aarne Sundberg. „Micro-scale Distillation and Microplants in Process Development“. Diss. Aalto University, 2014.
- [TLSC12] 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.
- [UBJS12] Leon Urbas u. a. „Automatisierung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 54.01-02 (2012), S. 44.

- [UDKO12] Leon Urbas u. a. „Modularisierung und Prozessführung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 615–623.
- [US12] Hülya Uzuner und Gerhard Schembecker. „Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 747–761.
- [Uzu12] Hülya Uzuner. „Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von R&I-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2012.
- [VV95] Ramesh Vaidhyanathan und Venkat Venkatasubramanian. „Digraph-based models for automated HAZOP analysis“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 50.1 (1995), S. 33–49.
- [VV96] 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.
- [WBGA15] Olaf Wachsen u. a. „Anforderungen der zukunftsorientierten Spezialchemie an die angewandte Reaktionstechnik“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.6 (2015), S. 683–693.
- [WCHT09] 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.
- [Web15] Klaus H. Weber. *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer-Verlag GmbH, 2015.
- [WGW12] 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.
- [WLG16] 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.

- [WOIU17] Sachari Wassilew u. a. „Abbildung des NAMUR Module Type Package auf OPC UA“. In: *at - Automatisierungstechnik* 65.1 (2017), S. 49–59.
- [WULF16] 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.
- [YLWH17] Ruey-Jen Yang u. a. „A comprehensive review of micro-distillation methods“. In: *Chemical Engineering Journal* 313 (2017), S. 1509–1520.
- [ZBV05a] 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.
- [ZBV05b] 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.
- [ZCK12] 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

A	Anhang von Bildern	A-2
B	Anhang von Tabellen	A-3

Anhang von Bildern



Anhang von Tabellen

B