

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur für Prozessleittechnik

Diplomarbeit
Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen

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 (PLT/TUD)

Prof. Dr. techn. Klaus Janschek (AT/TUD)

Tag der Einreichung:

25.08.2017

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:

- Dipl.-Ing. Annett Pfeffer
- Prof. Dr.-Ing. Leon Urbas

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, 25. August 2017

Marius Müller

Kurzfassung

Deutsche Kurzfassung hier.

Abstract

English abstract here.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen der deutschen Chemie- und Pharmaindustrie	1
1.2 Beschleunigung des Innovationstempos	3
1.3 Notwendigkeit von Sicherheitstechnik	7
1.4 Problemstellung dieser Arbeit	9
2 Stand der Technik	11
2.1 Definition wichtiger Begriffe	11
2.2 Modularisierung	12
2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Genehmigung von Chemischen Anlagen	21
2.4 Sicherheitsuntersuchungen in Form einer HAZOP	24
2.5 Durchführung einer HAZOP	25
2.6 Sicherheitsbetrachtungen modularer Anlagen	26
3 Analyse von Fehlern in prozessleittechnischen Anlagen	30
3.1 Einleitung	30
3.2 Automatisierung einer HAZOP	32
3.3 Fehlererkennung und Fehleridentifikation	40
3.3.1 Modellbasierte Quantitative Fehlerfortpflanzungsmethoden	44
3.3.2 Modellbasierte Qualitative Fehlerfortpflanzungsmethoden	51
3.3.3 auf historischen Messdaten basierende Fehlerfortpflanzungsmethoden	55
4 Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen durch Einsatz von Graphen	58
4.1 Algorithmus zur Erstellung von gerichteten Graphen auf Basis von HAZOP-Studien	60

4.2 Kopplung von Graphen und Fehlerfortpflanzung	63
5 Zusammenfassung und Ausblick	66
Literaturverzeichnis	i
Anhang	A-1

Abkürzungsverzeichnis

BBN	Bayes'sche Netze (Bayesian Belief Network)
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
4. BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen
12. BImSchV	Störfall-Verordnung
CLP	Verordnung Nr. 1272/2008/EG
DAE	Differential-algebraische Gleichung (Differential Algebraic Equation)
DBN	Deep Belief Network
DGRL	Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
EWR	Europäische Wirtschaftsraum
FDI	Fehlererkennung und Fehlerisolation (fault detection and isolation)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis)
FTA	Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis)
GefStoffV	Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen
GHS	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien

HAZOP	Verfahren zur Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (PAAG) (Hazard and Operability Analysis)
IED	Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU
LQM	Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least Squares Method)
MFM	Multilevel Flow Modeling
MRL	Maschinen-Richtlinie 2006/42/EG
MTP	Module Type Package
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PCA	Singulärwertzerlegung (Principle component analysis)
P&ID	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (Piping and instrumentation diagram)
PLS	Regression mit partiellen kleinsten Quadraten (Partial Least Squares)
QSIM	Qualitative Simulation (qualitative simulation)
RBN	Beschränkte Boltzmann-Maschine (Restricted Boltzmann Machine)
SDG	Vorzeichenbehafteter gerichteter Graph (Signed Digraph)
SEVESO III	Richtlinie 2012/18/EU
TEB	Tennessee Eastman Benchmark
TRAS	Technische Regeln für Anlagensicherheit
TRBA	Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TRwS	Technische Regeln für wassergefährdende Stoffe
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz

Abbildungsverzeichnis

3.1	Unterteilung der Methoden zur Fehlerdiagnose und -identifikation	43
3.2	Fehleridentifikation mit Residuen	45
3.3	Beispiel für einen gerichteten Digraphen	52
4.1	Digraph von Modul 1	61
4.2	fehlerhafter Digraph von Modul 2	62
4.3	Digraphen aller Module	63
4.4	Digraph gekoppeltes Gesamtsystems	64
4.5	Fehlerfortpflanzung im Gesamtsystem	65
A.1	PID Modul 1	A-3
A.2	PID Modul 2	A-4
A.3	PID Modul 3	A-5
A.4	Modulare Gesamtanlage	A-6

Tabellenverzeichnis

2.1 Beispiel für eine HAZOP	26
B.1 HAZOP von Modul 1	A-8
B.2 HAZOP von Modul 2 Fehlerbehaftet	A-9
B.3 HAZOP von Modul 3	A-10

Thesen der Diplomarbeit

1. Erste These

1.1 Herausforderungen der deutschen Chemie- und Pharmaindustrie

Das reale Bruttoinlandsprodukt Deutschlands wuchs von 1990 bis 2016 im Mittel weniger als 2% und wurde damit von den teils zweistelligen Wachstumsraten der Schwellenländer und insbesondere China deutlich übertroffen (vgl. [116, S. 6]). Um international erfolgreich zu bleiben, sind die schnell wachsende Pharmazeutische Industrie und die exportlastige Chemische Industrie für die deutsche Wirtschaft von besonderer Bedeutung.

In „*Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)*“ wird der Anteil der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie am deutschen Bruttoinlandsprodukt hervorgehoben sowie eine Prognose der Entwicklungsmöglichkeiten dieser Industriezweige abgegeben [9]. Im Folgenden wird anhand von [9] die Relevanz der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie dargelegt. Darauf aufbauend wird im Abschnitt 1.2 die Modularisierung von verfahrenstechnischen Anlagen motiviert und darauf folgend die zu lösende Problemstellung der vorliegenden Arbeit erläutert.

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. [9]

Im aktuellen Bericht des Verbands der Chemischen Industrie untersucht LIMBERS die Lage und Entwicklungsmöglichkeiten der chemisch-pharmazeutischen Industrie und prognostiziert die Entwicklung bis zum Jahr 2030. Durch die schnellere Verbreitung von Technologie und Wissen und den damit verbundenen gesteigerten globalen Wettbewerb ist ein weiter ansteigender Innovationsdruck zu erwarten. Wird die umfangreiche Forschungsarbeit auf die Bereiche Spezialchemikalien und Pharmazeutika fokussiert, so können die Standortnachteile, welche durch hohe Energiekosten entstehen, ausgeglichen werden und ein überdurchschnittliches Wachstum ist möglich. Dies erfordert jedoch insbesondere ein insgesamt höheres Innovationstempo. Der Entwicklungsfaktor Innovationstempo soll daher im Folgenden weiter betrachtet werden. [66]

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. [11]

Dieser Zeitraum muss reduziert werden, um die von J. Limbers prognostizierte Entwicklung der chemisch-pharmazeutischen Industrie zu ermöglichen.

Die prinzipielle Notwendigkeit einer schnelleren und vor allem auch flexibleren Produktentwicklung beziehungsweise Produktion ist seit langem bekannt. Die Arbeit von I. E. Grossmann zu den Herausforderungen für die Forschung im Bereich der Verfahrens- und Anlagentechnik aus dem Jahr 2000 weist beispielsweise auf diese Herausforderungen hin [43].

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

Der Übersichtsbeitrag von WACHSEN u. a. [110] fasst die genannte Problemstellung mit Hinblick auf die Spezialchemie zusammen und bietet einen geeigneten Einstieg in aktuelle Untersuchungen zu dieser Thematik.

1.2 Beschleunigung des Innovationstempos

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

Ein Ansatz zur Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses wurde über ein Jahrzehnt hinweg an der Universität Clausthal untersucht. Anhand eines neu entworfenen Apparates zur Herstellung von Chlorsilanen aus Ferrosilicium und Chlorwasserstoff wurde von DIETZ und NEUMANN in [33] gezeigt, wie durch eine frühzeitige Parallelisierung von Prozessplanung und dem Entwurf der notwendigen Maschinen die Entwicklungszeit verkürzt werden kann. Die Parallelisierung wird erreicht, indem die zu realisierenden Prozessschritte in Teilsysteme geringer Komplexität so weit zerlegt werden, dass sich deren Funktion durch naturwissenschaftliche Grundoperationen darstellen lässt. Durch die so erhaltene Darstellung wird ein Blick für die mögliche Zusammenfassung von mehreren Teilsystemen in einer einzigen Maschine ermöglicht. Eine derart entworfene Maschine kann auf innovative Weise einen Prozess optimal erfüllen.

Prozessschritte wie Zerkleinern, Reagieren und Mischen können beispielsweise in einem Apparat vereint werden. Es wird bei diesem Entwicklungsprozess bewusst auf Standardlösungen verzichtet, was die Wiederverwendbarkeit der erhaltenen Lösungen erschwert. Das Innovationstempo kann jedoch auf diesem Weg erfolgreich gesteigert werden und es wird eine hocheffiziente Umsetzung für einen Produktionsprozess gefunden.

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

Zahlreiche Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft haben sich 2009 zum 48. 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 [31], ein Positionspapier [32] und ein Übersichtsvortrag [11] 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 [33] vorgestellten Vorgehen einer parallelisierten Prozess- und Anlagenentwicklung in Verbindung mit einer optimal ausgelegten Anlage. Statt dessen werden wiederverwendbare Module in diskreten Größen erzeugt, welche skalierbar und vielseitig einsetzbar sein sollen. Die Skalierbarkeit ermöglicht dabei eine flexible Veränderung von Produktionsvolumina und damit eine schnelle Anpassbarkeit an Marktveränderungen. Module können dezentral vorgefertigt und am Standort der Gesamtanlage schnell zusammengefügt werden. Dies beschleunigt die Konstruktion der Gesamtanlage.

Die Verwendung von Modulen bedeutet eine signifikante Änderung im Entwicklungsprozess. Es wurden mehrere Themenschwerpunkte identifiziert, welche die

notwendigen Anpassungen beschreiben sollen. Die hier aufgeführten Schwerpunkte sind dem bereits aufgeführten Positionspapier zur 50 % – Idee entnommen [32]. Die Reduktion der Entwicklungszeit auf die Hälfte durch den Einsatz von Modulen ist nur möglich, wenn die im Folgenden 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, die 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. [32]

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. [32]

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. [32]

Weiterhin muss die Automatisierungstechnik an die modulare Bauweise angepasst werden. Insbesondere ist zu erörtern, wie einzelne Module autonom gesteuert werden sollen und wie die Kommunikation zwischen Modulen im Rahmen einer Gesamtanlage konzipiert werden kann. [32]

Diese Themen werden weitreichend untersucht, wie im Folgenden anhand ausgewählter Veröffentlichungen dargelegt wird. Die prinzipielle Anwendbarkeit der modularen Anlagenbauweise wird anhand von Sieben Fallstudien im Rahmen des Projektes F³–Factory nachgewiesen. Es wird erfolgreich gezeigt, dass für geringe bis mittlere Stoffströme der Einsatz einer modularen Anlage gegenüber einer kontinuierlichen Großanlage oder mittelgroßen Batchanlage wirtschaftlich lukrativer ist. In den vorgestellten Anlagen werden modulare kontinuierliche

Prozesse durch die Kopplung von Container-Modulen und insbesondere den Einsatz von Mikroreaktoren realisiert. Durch diesen Ansatz wird eine flexible, adaptive und robuste Produktionstechnologie realisiert, welche vielseitig eingesetzt werden kann. Die Technologie zeichnet sich durch die Verwendung einer „plug-and-produce“ Philosophie, sowie den Einsatz einer neu entwickelten flexiblen offenen Backbone-Infrastruktur aus, mit Hilfe derer die standardisierten Equipment Container¹ gekoppelt werden, welche wiederum als Träger für Baugruppen² dienen, die den Prozess realisieren. Das Design der Container, der darin enthaltenen Baugruppen und des modularen, kontinuierlichen Prozesses wird durch einen ganzheitlichen Leitfaden standardisiert. In Folge dieses Ansatzes wird die erforderliche „Time to market“ für ein neues Produkt erfolgreich verkürzt, die notwendige Menge an Ausgangsrohstoffen reduziert und das Anlagenvolumen minimiert. Die detaillierten Ergebnisse des Projektes F³-Factory sind in dessen Abschlussbericht veröffentlicht [14].

Weitere Untersuchungen zum Einsatz modularen Anlagen werden beispielsweise im Projekt CoPIRIDE [94] durchgeführt.

Die Anwendbarkeit von Modulen konnte demnach bereits erfolgreich gezeigt werden. Es sind aber noch einige Forschungsschwerpunkte offen. 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 engl. „Process Equipment Containers“ (PEC)

2 engl. „Process Equipment Assemblies“ (PEA)

1.3 Notwendigkeit von Sicherheitstechnik

Sicherheit ist ein menschliches Grundbedürfnis. Wird dieses Bedürfnis nicht in ausreichendem Maße erfüllt, so hat dies gravierende Auswirkungen. Die massenweise Flucht aus Kriegsgebieten ist beispielsweise ein solcher Extremfall.

Unter normalen Umständen können Risiken durch geeignete Mittel reduziert werden. Dazu kann entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensfalles oder dessen schädliche Auswirkung gemindert werden. Um eine dieser Methoden anzuwenden ist jedoch entweder die Aufwendung von Kapital oder die Einschränkung von möglichem Nutzungsumfang notwendig. Typische Beispiele des Alltags sind die Verwendung von Versicherungen, um die Auswirkungen eines Schadens zu reduzieren oder die Einschränkung der erlaubten Fahrtgeschwindigkeit in Städten zur Reduktion von Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten. Es gibt offensichtlich einen Interessenkonflikt zwischen Risikominimierung und der Aufwendung von Kapital oder der Einschränkung von Nutzungsumfang.

Es ist eine gesellschaftliche Aufgabe, einen Kompromiss zwischen dem Wunsch nach hoher Sicherheit und den notwendigen Maßnahmen zu finden. Diese Aufgabe soll in erster Linie von der Politik gelöst werden.

Ein geeignetes Mittel dieses Ziel zu erreichen ist die Verwendung einer Risikoanalyse. Diese soll Aufschluss über mögliche Schadensereignisse, 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“ [7] zeigt die geschichtliche Entwicklung von Risikobetrachtungen auf. Die zweite Auflage des Werkes von Bilal M. Ayyub ist eine aktuelle umfassende Referenz zum Thema Risikoanalyse [1].

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. In Folge des Unfalls in Seveso 1976 entstand das erste europaweite Regelwerk – die Seveso I Richtlinie. Dieses wurde weiterentwickelt und gilt heute in Form der Seveso III Richtlinie 2012/18/EU. Die Seveso III Richtlinie wurde in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU) in Form nationaler Gesetze, Verordnungen und Richtlinien umgesetzt. In Deutschland dient dazu unter anderem das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der derzeitigen aktuellen Fassung vom 05.04.2017.

Entsprechend der aktuellen deutschen Gesetze sind geeignete Methoden anzuwenden, um den sicheren Betrieb von sicherheitstechnisch relevanten Anlagen zu gewährleisten. Dazu gehören chemische Anlagen, welche potentiell gefährliche Stoffe lagern, verarbeiten, erzeugen oder anderweitig verwenden. Das aktuelle Grundlagenwerk „*Prozess- und Anlagensicherheit*“ von HAUPTMANN gibt einen umfassenden Überblick zu rechtlichen Rahmenbedingungen und wie diese konkret umzusetzen sind [46].

Neben konventionell geplanten Anlagen unterliegen auch Anlagen, welche in Modulbauweise entsprechend den im Abschnitt 1.2 dargelegten Konzepten entworfen werden, diesen gesetzlichen Bestimmungen. Modulare Anlagen müssen daher in geeigneter Weise auf die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen untersucht werden. Dieser gesonderten Problematik wurde bisher wenig Beachtung geschenkt. Die Arbeit von FLEISCHER u. a. [37] setzt sich als eine der wenigen Veröffentlichungen mit dieser Problematik auseinander. Darin konzentrieren sich FLEISCHER u. a. auf die Sicherheitsbetrachtung von Modulen in Containerbauweise, wie sie im Projekt F³ erfolgreich eingesetzt wurden. Sie weisen 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 dafür ist, 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 u. a. sieht eine Zweiteilung der Sicherheitsana-

lyse vor. Die Wechselwirkung zwischen Modulen soll mit dem Verfahren zur Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (PAAG) (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. Diese Untersuchung liefert dann Aufschluss über die Verwendbarkeit der Module für einen bestimmten Prozess. Um die Einsetzbarkeit prinzipiell bewerten zu können, wird die Definition von Stoffklassen, Reaktionsklassen und zulässigen Betriebsfenstern vorgeschlagen. Einem Modul wird dann anhand seiner Eigenschaften jeweils eine diskrete Stufe dieser Kategorien zugeordnet und durch diese Zuordnung kann die Einsetzbarkeit eines Moduls für einen Prozess schnell und frühzeitig bewertet werden. Auf die konkrete Verwendbarkeit dieser intramodularen Sicherheitsanalyse für eine nachfolgende HAZOP wird nicht im Detail eingegangen. Das Problem der Wiederverwendbarkeit von durchgeführten Sicherheitsbetrachtungen von einzelnen Modulen für eine anschließende Analyse der Gesamtanlage ist Motivation für die vorliegende Arbeit. Das konkrete Thema der Arbeit wird im folgenden Abschnitt 1.4 detailliert formuliert.

1.4 Problemstellung dieser Arbeit

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

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

Ein geeignetes Mittel zur Sicherheitsuntersuchung von Gesamtanlagen ist die

Durchführung einer HAZOP. Im Rahmen dieser Analyse wird geprüft, wodurch Anlagenparameter vom Normbetrieb abweichen können und mit welchem Risiko eine solche Abweichung verbunden ist. Dazu werden Fehler identifiziert, welche ungewollte Schwankungen von Prozessparametern zur Folge haben können. Zur Bewertung des Risikos muss die Auswirkung des Fehlers auf die Gesamtanlage betrachtet werden. Dazu ist eine Analyse der Fehlerfortpflanzung notwendig.

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

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

2.1 Definition wichtiger Begriffe

Da Sicherheit ein menschliches Grundbedürfnis ist, wird dieses Thema im Alltag vielfach diskutiert. Um Missverständnisse zu vermeiden, werden im Folgenden einige Begriffe definiert, welche in diesem Zusammenhang häufig nicht entsprechend ihrer genormten Bedeutung verwendet werden.

Definition 1 (Risiko). *Als Risiko bezeichnet man die „Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und des Schweregrades dieses Schadens“ (vgl. [34, Abs. 3.2.64]).*

Definition 2 (Schaden). *Als Schaden bezeichnet man eine „physische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen, entweder direkt oder indirekt als ein Ergebnis von Schäden an Eigentum oder an der Umwelt“ (vgl. [34, Abs. 3.2.20]).*

Definition 3 (Gefährdung). *Eine Gefährdung ist eine „potentielle Schadensquelle“ (vgl. [34, Abs. 3.2.21]).*

Definition 4 (Sicherheit). *Sicherheit liegt vor, wenn die „Freiheit von unvermeidbaren Risiken“ gesichert ist (vgl. [34, Abs. 3.2.67]).*

Definition 5 (Fehler). *Ein Fehler ist ein „anormaler Zustand, der eine Verminderung oder den Verlust der Fähigkeit einer Funktionseinheit verursachen kann, eine geforderte Funktion auszuführen“ (vgl. [34, Abs. 3.2.21]).*

Definition 6 (Ausfall). *Ein Ausfall ist die „Beendigung der Fähigkeit einer Funktionseinheit, eine geforderte Funktion auszuführen“ (vgl. [34, Abs. 3.2.20]).*

2.2 Modularisierung

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

Die Entwicklung eines neuen Produktes besteht üblicherweise aus vier Phasen. Zu Beginn wird die Herstellbarkeit eines neuen Produktes in einer Laboranlage in Form eines Batchprozesses untersucht. Darauf erfolgt der Entwurf einer Minianlage. Die Produktionsmengen werden dann durch Konstruktion einer Pilotanlage erhöht und der Produktionsprozess umfassend getestet und verfeinert. Auf Basis der Pilotanlage wird zuletzt die Produktionsanlage geplant und das neue Produkt in industriellen Mengen gefertigt. Je nach prognostiziertem Verkaufsvolumen des entwickelten Produktes geschieht die industrielle Produktion als kontinuierlicher oder Batchprozess. [44]

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

Das Hochskalieren eines entwickelten Batchprozesses ist kompliziert und nicht uneingeschränkt möglich. Dies betrifft insbesondere stark exotherme Reaktionen, da die Wärmeabfuhr in einem Reaktor begrenzt ist. [13]

Durch den Einsatz von Mikro- und Millireaktoren wird das Hochskalieren von Prozessen jedoch ermöglicht und der Entwicklungsprozess somit stark beschleunigt. [44, 13, 47, 57, 48]

Solche Reaktoren sind durch einen kontinuierlichen Betrieb, Strömungskanäle mit Durchmessern im Mikro- bis Millimeterbereich und Wärmeaustauschflächen pro Volumeneinheit, welche im Vergleich zu klassischen Anlagen etwa um den Faktor 100 höher sind, gekennzeichnet. Dies ermöglicht eine hohe Energieableitung, was inhärente Sicherheit zur Folge hat und Scale-Up Faktoren von zehntausend und darüber ermöglicht. [13, 58, 6]

Der Einsatz dieser Reaktoren zur Produktentwicklung erfordert die Umwandlung

des Batchprozesses der Laboranlage in einen kontinuierlichen Prozess. Diese Problematik ist seit dem Durchbruch der Mikroprozesse zu Beginn der neunziger Jahre bekannt und wurde weitreichend untersucht. [47] Die Arbeit „*Umwandlung diskontinuierlicher chemischer Prozesse in eine kontinuierliche Prozessführung unter Verwendung mikrostrukturierter Reaktoren - Reaktionstechnik und Sicherheit*“ von HUGO und LOPEZ widmet sich dieser Problematik. HUGO und LOPEZ führen darin aus, dass langsame Reaktionen schlechter als schnelle Reaktionen für die Überführung in einen kontinuierlichen Prozess geeignet sind. Als Grund dafür wird vor allem die lange Verweilzeit angegeben, welche bei langsamen Reaktionen in kontinuierlicher Fahrweise notwendig ist. Eine Erhöhung der Prozesstemperatur kann die Verweildauer reduzieren, sie mindert aber gegebenenfalls die Produktqualität und ist daher nicht unbedingt geeignet. Die zu beachtenden Regeln bei der Überführung eines Semi-Batchprozesses in einen kontinuierlichen Prozess werden von den Autoren für schnell ablaufende, stark exotherme Reaktionen allgemein dargelegt und anhand eines Beispiels konkret angewandt. Der Fokus liegt dabei auf der Dimensionierung der Mikroreaktoren mit dem Ziel einer sicheren Anlagenführung.[50]

Die wirtschaftlichen Vorteile und die mögliche Zeitersparnis bei der Produktentwicklung wurden anhand zahlreicher Fallbeispiele erfolgreich nachgewiesen. [13, 6, 44, 93] Neben Reaktoren sollen auch andere Prozessschritte mittels Mikro- und Millianlagen realisiert werden. Insbesondere die Trennung von Stoffen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt [47]. Die aktuelle Arbeit von YANG u. a. gibt den Kenntnisstand zur Verwendung von Mikroanlagen zur Destillation wieder [118]. LIER u. a. führen im Übersichtsbeitrag weitere modulare Apparate auf. Diese realisieren die Prozessschritte Wärmeaustausch, Reaktion, Mischen von Stoffen und Stofftrennung. Die vorgestellten Apparate sind dabei nicht auf Konstruktionen in Mikro- oder Millibauweise beschränkt. [65]

Mikro- und Millireaktoren sind ein bewährtes Mittel der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie, um Produkte schneller und kostengünstiger zu entwickeln. Insbesondere die Skalierbarkeit durch Parallelisierung von vielen Reaktoren der gleichen Bauart ist ein großer Vorteil. Diese Wiederverwendbarkeit ist ein wichtiger Aspekt der Tutzing Thesen [31]. Mikro- und Millireaktoren können als eine Ausprägung modularer Anlagenkomponenten angesehen werden und sind daher geeignete Beispiele, um die erfolgreiche Verwendung von modularen Anlagen zu

belegen. Weitere Beispiele stellen die Modularisierung eines Gaswäschers [80] und die Modularisierung einer Anlage zur Hochleistungsflüssigkeitschromatographie [90] dar.

Da Mikro- und Millireaktoren einen Spezialfall modularer Komponenten bilden wird auf ihre Besonderheiten im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen. Statt dessen liegt der Fokus im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf der allgemeinen Verwendung von modularen Anlagenkomponenten und deren Sicherheitsbetrachtungen.

Im Folgenden werden der Forschungsstand zu modularen Anlagen grob wiedergegeben und die offenen Schwerpunkte benannt. Dazu werden Übersichtsarbeiten zu diesem Thema ausgewertet und die Entwicklung der Forschung wiedergegeben, ohne jedoch eine zu ausgeprägte Detailtiefe zu erreichen.

Das Gebiet der Modularisierung von Anlagenkomponenten ist ein verhältnismäßig junges Forschungsgebiet. In Folge der in Kapitel 1 dargelegten hohen Relevanz wird diese Thematik intensiv untersucht.

Ein Nachweis der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit von kleinskaligen Anlagen wurde von SEIFERT u. a. in „*Small scale, modular and continuous: A new approach in plant design*“ erfolgreich erbracht. [92]

Drei Jahre nach Veröffentlichung der Tutzing Thesen [31] wurde von zwei der Teilnehmern des 48. Tutzing Symposiums eine grundlegende Arbeit zur Verwendung von Modulen im Planungsprozess einer verfahrenstechnischen Anlage veröffentlicht. Die Autoren BRAMSIEPE und SCHEMBECKER betrachten in ihrer Arbeit „*Die 50 % – Idee: Modularisierung im Planungsprozess*“ [12] Sichtweisen auf die Modularisierung, definieren verschiedene Typen von Modulen, erläutern deren Einsatzzweck und -zeitpunkt im Planungsprozess und gehen weiterhin auf offene Forschungsfragen ein.

Als besondere Vorteile der Modularisierung werden die hohe Flexibilität und eine schnelle Anpassung der Produktionskapazität an Marktveränderungen genannt. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit einer räumlichen Trennung der Produktion verschiedener Zwischenprodukte zur Einsparung von Transportkosten und 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, was insbesondere bei klimatisch anspruchsvollen Anlagenstandorten sehr vorteilhaft ist.

BRAMSIEPE und SCHEMBECKER fordern eine Moduldefinition derart, dass ein Modul einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit besitzt und losgelöst von einer Gesamtanlage getestet werden kann. Module sollten außerdem nach ihrem Detaillierungsgrad unterschieden werden. Die Aufteilung in Planungsmodule und Variantenmodule wird daher als sinnvoll erachtet. Planungsmodule stellen in erster Linie einen Wissensspeicher dar und dienen der Darstellung der Vielfalt von Variantenmodulen. Sie bieten Ansätze zu Auswahl, Funktionsumfang, Auslegung und Dimensionierung von Variantenmodulen. Ein Variantenmodul soll als 2D und als 3D Version entwickelt werden. 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, wobei eine genaue Definition der Schnittstellen notwendig ist.

Im Planungsprozess hat der Detaillierungsgrad der verwendeten Variantenmodule maßgeblichen Einfluss. 2D Module erleichtern die Erzeugung von Fließbildern einer Gesamtanlage. Insbesondere ermöglichen sie einen direkten Vergleich verschiedener Anlagenstrukturen. Mit Hilfe von Simulationen können in Kombination mit Planungsmodulen geeignete 3D Module für einen Prozess ausgewählt und die Gesamtanlage entworfen werden. BRAMSIEPE und SCHEMBECKER verweisen auf Literatur, in welcher die zur Erlangung von 2D und 3D Modulen notwendigen Arbeitsschritte dargelegt werden.

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 Moduls bestimmen also maßgeblich den Entwicklungsaufwand neuer Sicherheitsfunktionen einer Gesamtanlage.

Um Module verwenden zu können, nennen BRAMSIEPE und SCHEMBECKER die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- Systematischer Entwurf von 2D, 3D Variantenmodulen und Planungsmodulen, wobei besonders eine Systematik des Modulentwurfs zu definieren ist.
- Die Verbesserung von Ansätzen, wie Module konkret in den Planungsprozess

integriert werden können.

- Entwicklung von Berechnungsmodellen zum Scale-Up von Modulen.
- Erstellung von Simulationsmodellen von Modulen, um deren Variantenauswahl und konkrete Auslegung durchführen zu können.
- Entwicklung eines Datenmodells, um Datenanreicherung und Datenaustausch zu ermöglichen.

Ein weiterer Übersichtsbeitrag zum Thema Modularisierung stammt von URBAS u. a. . Die Autoren legen ihren Fokus dabei auf die Prozessführung mit Hilfe modularer Anlagenkomponenten. Ein besonderer Schwerpunkt stellt die Zusammenarbeit von internen Komponenten eines Moduls, wie der Automatisierung und implementierten Sicherheitsfunktionen, mit den externen Komponenten, wie dem übergeordneten Prozessleitsystem, dar.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Arbeit *„Modularisierung und Prozessführung“* von URBAS u. a. gab es noch keine einheitliche Definition des Begriffs „Modul“ . Die Autoren definieren den Begriff Modul in Anlehnung an die Konstruktionslehre als „abgeschlossene und wiederverwendbare Einheiten zur Erfüllung einer oder mehrerer Prozessfunktionen, die im Prozessführungskontext sinnvoll zusammengefasst werden können.“ [98, S. 2] Die für die Implementierung der Prozessfunktion notwendigen Equipments, Instrumente und Automatisierungsfunktionen sollen im Modul enthalten sein. Weiterhin benötigt ein Modul klar definierte Schnittstellen zu seiner Umgebung. [98, S. 2]. Als Umfang eines Moduls wird eine beliebige Ebene zwischen Teilanlage und Einzeloperation eines Prozesses vorgeschlagen. Der Mangel einer klaren Methodik zur Definition von Modulen hat Forschungsbedarf zur Folge. Als besonderer Schwerpunkt wird die von BRAMSIEPE und SCHEMBECKER ebenfalls geforderte Entwicklung von gewerkeübergreifenden formalen Informationsmodellen empfohlen. [98]

Als dritte Übersichtsarbeit zum Thema Modularisierung soll auf die Arbeit *„Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen“* von HADY und WOZNY [45] verwiesen werden. Diese Arbeit betrachtet zum einen allgemeine Fragestellungen, wie die Definition von Modulen und deren Abgrenzung zum Baukastenprinzip und zum anderen Aspekte der modularen Anlagenplanung. Weiterhin wird ein Modularisierungskonzept im Detail vorgestellt, welches die Beschreibung und Verwendung von Modulen ermöglichen

soll. Die Autoren gehen ebenfalls auf die Anwendbarkeit der Modularisierung für die in diesem Kapitel bereits genannten Minianlagen ein und legen außerdem die Auswirkungen der Modularisierung auf die Kostenschätzung eines Anlagenbaus dar.

HADY und WOZNY bekräftigen die bereits ausgeführte Notwendigkeit und die Vorteile einer modularen Anlagenplanung. Im Rahmen einer Industriebefragung stellen sie jedoch fest, dass die modulare Anlagenplanung nur in geringem Maße eingesetzt wird. HADY und WOZNY erläutern den Begriff der Modularisierung und ziehen Parallelen zur Automobilindustrie und den dort ebenfalls etablierten Baukastensystemen. Ein Modul wird in Abgrenzung zu Bausteinen als eine Einheit charakterisiert, welche eine definierte Funktionalität allgemein abdecken soll. Ein Baustein deckt lediglich in Bezug auf das System, dessen Bestandteil er ist, die gewünschte Funktionalität ab.

Den Vorteil einer möglichen Vormontage von modularen Anlagen belegen die Autoren anhand mehrere Quellen, weisen aber darauf hin, dass die in diesem Zusammenhang verwendeten Module eher als Einzelstücke anzusehen sind, da die konzipierten Anlagen zumeist nur in sehr wenige Einzelmodule zerlegt wurden. An dieser Stelle zeigt sich besonders deutlich, dass die Verwendung von Modulen Kosten reduzieren kann, ohne zwangsläufig einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit zur Folge zu haben. Als besonders wichtig gilt daher die bereits genannte systematische Entwicklung von Modulen und deren Darstellung in einer Form, welche Weiterentwicklungen und Austausch begünstigt.

Zur Ablage von bereits entwickelten Modulen schlagen die Autoren die Verwendung einer Bibliothek von Modulen und Dokumenten vor, welche von allen am Anlagenplanungsprozess beteiligten Personen verwendet werden kann. Eine solche Datenbank wurde entwickelt und wird von HADY und WOZNY entsprechend referenziert. Die entwickelte Datenbank wurde an der TU Berlin erfolgreich eingesetzt und liefert in Kombination mit dem vorgestellten Vorgehen zum Einsatz von Modulen in der Anlagenplanung einen detaillierten Ansatz für die Industrie und weitere Forschungsvorhaben. [45]

Die Auswahl eines geeigneten Moduls sollte besonders bei großen Datenbanken rechnergestützt erfolgen. OBST, DOHERR und URBAS stellen einen Algorithmus vor, mit Hilfe dessen die Eignung eines Moduls für einen gegebenen Einsatzzweck bewertet werden kann. [76]

Ein vergleichbarer Ansatz zum von HADY und WOZNY vorgestellten Vorgehen zur Verwendung von Modulen wurde von UZUNER in [100, 99] erarbeitet. In „*Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von R&I-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes*“ wird gezeigt, wie die Erstellung eines Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas (Piping and instrumentation diagram, P&ID) durch Unterteilung einer Gesamtanlage in wiederverwendbare Funktionsgruppen und die Verwendung einer wissensbasierten Software geeignet beschleunigt werden kann. Module sollen laut UZUNER derart definiert werden, dass sie prozesstechnisch sinnvoll sind und einen möglichst hohen Grad an Wiederverwendbarkeit aufweisen. Der Autor folgt damit dieser etablierten Anforderung an ein Modul. Ein Modul soll Standard-Prozesseinheiten wie Pumpen, Verdichter, Wärmeübertrager, Behälter, Reaktoren oder Kolonnen umfassen und weiterhin die notwendigen Elemente der Sicherheitstechnik, Regelungstechnik, Nahverrohrung und Instrumentierung enthalten. Die damit verbundene Vereinfachung und Beschleunigung der Planungsarbeit wird aufgezeigt und best-practice Lösungen präsentiert.

Eine Weiterentwicklung und Konkretisierung der von BRAMSIEPE und SCHEMBECKER, UZUNER und SCHEMBECKER und HADY und WOZNY [12, 100, 45] vorgestellten modularen Planungsansätze findet sich in der Arbeit „*Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie*“ von FLEISCHER-TREBES u. a. [38]. Die Autoren stützen sich dabei schwerpunktmäßig auf das Projekt F³-Factory [14]. Sie legen ausführlich dar, wie mit Hilfe einer Datenbank bestehend aus Modulen und zugehörigen Planungsdokumenten wie Berechnungen, Fließbildern, Betriebsanleitungen und Apparatelisten während der Planung einer neuen Anlage geeignete Module ausgewählt werden können. Module gelten als geeignet, wenn sie zuvor definierte Prozessparameter und Funktionen direkt erfüllen, oder wenn sie durch geringfügige Modifikationen dazu in die Lage versetzt werden können. Prozessparameter sind dabei beispielsweise geforderte Durchflussmengen, Drücke und Temperaturen; als Funktionen gelten Prozessschritte wie Pumpen oder Rühren. Die Datenbank dient als wachsender Speicher an Engineeringleistung und bietet für alle an der Planung beteiligten Personen eine Planungsgrundlage und Wissensablage.

Der Forschungsschwerpunkt der Simulation ist ein weiterhin intensiv zu untersuchendes Feld. Die Arbeit „*Towards an integrated use of simulation within the*

life-cycle of a process plant“ von OPPELT, WOLF und URBAS betrachtet die bisherige Verwendung von Simulationen bezogen auf den gesamten Lebenszyklus einer prozessleittechnischen Anlage. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Simulationen zwar bereits verwendet werden, die Leistungsfähigkeit von bereits vorhandener Software aber nicht ausgenutzt wird. Die Integration in den Lebenszyklus einer Anlage bedarf weiterer Forschung, wobei besonders der Vereinheitlichung von Schnittstellen eine große Bedeutung beigemessen wird. Eine Bereitstellung von Simulationsmodellen von Komponentenlieferanten wird als sehr nützlich erachtet. [81] Im Rahmen der Modularisierung könnte genau diese Aufgabe erfolgreich gelöst werden. Dazu sind die von BRAMSIEPE und SCHEMBECKER in [12] formulierten Arbeiten zur Erstellung von Simulationsmodellen für Module durchzuführen.

Im Bereich der Darstellung von Daten wurden bereits wichtige Fortschritte erzielt. Für die Beschreibung von Modulen wurde das Module Type Package (MTP) entwickelt, welches in [78] und [79] vorgestellt wird. Es dient als Informationsträger, welcher alle Modulinformationen beinhaltet, die zur Integration eines Moduls benötigt werden [78, S. 2]. Wird dieser Informationsträger erfolgreich verwendet, so kann ein Modullieferant das gesamte Modulengineering durchführen und der Betreiber mit wenig Aufwand ein geliefertes Modul in seine Anlage integrieren, ohne das Modul selbst detailliert zu kennen. Ein wichtiger Schritt zur Integration eines Moduls ist die Transformation des MTP auf ein Modell, welches von der Gesamtanlage genutzt werden kann. Ein solches Informationsmodell kann auf Basis von Open Platform Communications Unified Architecture (OPC-UA) entworfen werden. In [114] beziehungsweise [113] zeigen WASSILEW u. a., wie die in einem MTP gespeicherten Modulinformationen in einem OPC-UA Gesamtmodell abgebildet werden können. Auf einem OPC-UA Server können die Modulinformation dadurch online durchsucht werden, was eine wichtige Grundlage für Plug-and-Produce Lösungen darstellt.

In der aktuellen Arbeit „*Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast*“ [64] wird erneut die Notwendigkeit modularer Anlagen dargelegt und die bereits erprobten Konzepte der Modularisierung bewertet. Es werden die im Abschnitt 1.1 bereits benannten Projekte F³-Factory [14] und CoPIRIDE [94] sowie der daraus hervorgegangene „Evotrainer“ beziehungsweise „EcoTrainer“ [61] betrachtet. Die Autoren stellen fest, dass mit Ausnahme von

Modulen in Containerbauweise der große Durchbruch der modularen Strategie noch immer nicht erfolgt ist. Weiterhin werden Arbeiten zur Wirtschaftlichkeit von modularen Ansätzen ausgewertet (unter anderem [92, 13]). LIER, WÖRSDÖRFER und GRÜNEWALD kommen zu dem Schluss, dass modulare Anlagen in Folge einer deutlich verkürzten Amortisationszeit für wechselnde Marktverhältnisse bestens geeignet sind. Für längere Produktlebenszyklen sind derzeit konventionell geplante Anlagen die wirtschaftlich bessere Wahl. Die Ursache dafür sind geringere Betriebskosten und eine auf den Prozess genauer abgestimmte Anlage. Die in [12] geforderten Berechnungsmodelle für die Skalierung von modularen Anlagen wurden bisher noch nicht entwickelt. Die Arbeiten von BRODHAGEN u. a. [13] und GRUNDEMANN, SCHOENITZ und SCHOLL [44] zeigen aber ein mögliches Vorgehen auf. Die Verfasser bestätigen den von URBAS u. a. in [98] genannten akuten Bedarf nach Forschungsarbeit zur Automatisierung von Modulen und deren Einbindung in ein übergeordnetes Prozessleitsystem. Zusätzlich verweisen sie auf die Notwendigkeit von anpassbaren, modularen Logistiklösungen.

Die ebenfalls aktuelle Arbeit „*Modules in process industry - A life cycle definition*“ von HOHMANN u. a. [49] bestätigt diese Aussagen. Die Autoren geben einen groben Überblick zur Entwicklung der Modularisierung von Anlagen und nennen eine Reihe an Herstellern, welche bereits modulare Anlagen für die Chemische und Pharmazeutische Industrie zum Kauf anbieten.

Sie verdeutlichen die Unterschiede von konventioneller Anlagenplanung und modularen Ansätzen und werten neben den bereits aufgeführten Ansätzen ([12, 100, 45, 38]) noch weitere aus. Sie kommen zu dem Schluss, dass die bisher entwickelten Vorgehen jeweils nur einen Spezialfall oder einen Teil einer kompletten Anlagenplanung bezogen auf den gesamten Lebenszyklus betrachten. Die Konzepte sind laut Aussage von HOHMANN u. a. nicht zu einem Gesamtkonzept kombinierbar, da die Begrifflichkeit eines Moduls im Rahmen der Prozessleittechnik noch immer nicht standardisiert ist und weil einheitliche Arten der Informationsdarstellung nicht vorhanden sind oder zumindest nicht verwendet werden.

Die organisatorischen Konsequenzen der Modularisierung auf den Lebenszyklus wurden bereits von OBST u. a. in [77] betrachtet. Eine Weiterentwicklung dieser Arbeit wurde durch den Namur Arbeitskreis 1.12 in Form der „*NE 148:*

Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen“ [8] veröffentlicht. Darin wird ein prinzipieller Leitfaden für Anlagenbauer, Lieferanten und Betreiber zu Entwicklung und Einsatz von modularen Anlagen präsentiert. Der Fokus liegt dabei auf der Automatisierung von Modulen und deren Einbindung in übergeordnete Systeme.

HOHMANN u. a. präsentieren einen konkreten Planungsansatz, welcher den gesamten Lebenszyklus einer modular aufgebauten Anlage abdeckt. Da für die Automatisierung von Modulen noch kein einheitlicher Standard gefunden wurde gehen sie jedoch nicht im Detail auf die in [8] vorgestellten Methoden ein.

Ein Modul wird in diesem Ansatz definiert als „ein während der Planung und Fertigung von modularen Anlagen unveränderbares Element, welches eine bestimmte Funktion für einen Prozess erfüllt und welches im Rahmen weiterer Entwicklungen im Rahmen der Prozessindustrie wiederverwendbar ist“ [49, S. 2]. Durch Verwendung einer Blockdarstellung („block representation frame“) werden die Entwicklungsstadien einer Anlage abgebildet. Ein Block enthält dabei Felder für Informationen, deren Anzahl und Umfang bei Fortschreiten der Planung zunimmt und welche durch Engineeringleistungen gefüllt werden. Die Felder beschreiben beispielsweise Kostenschätzungen, Massenbilanzen, notwendige Drücke und Temperaturen, entwickelte Simulationsmodelle und konkrete 3D Layouts.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Modularisierung von Anlagen ein intensiv erforschtes Themengebiet darstellt. Der Nachweis der Notwendigkeit von modularen Anlagen und deren erwartete Verwendungsmöglichkeiten ist erbracht. Trotz zahlreicher Studien, die großes Entwicklungspotenzial belegen, gibt es weiterhin großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um eine Steigerung der Akzeptanz und eine umfangreiche Anwendung in der Industrie zu erreichen.

2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Genehmigung von Chemischen Anlagen

Abschnitt 1.3 erläutert, dass in Folge schwerer Unfälle in Industrieanlagen eine Vereinheitlichung von Sicherheitsstandards in der EU angestrebt wird. Dies geschieht durch europäische Richtlinien, welche von den Mitgliedstaaten in

nationales Recht umzusetzen sind.

In diesem Zusammenhang ist vor allem die Richtlinie 2012/18/EU (SEVESO III) relevant. Diese wird in Deutschland in den Regelungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG), des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes (UVPG), und in der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) umgesetzt. Weitere europäische Richtlinien, welche für verfahrenstechnische Anlagen zu beachten sind, sind die Maschinen-Richtlinie 2006/42/EG (MRL), die Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU (IED) und die Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU (DGRL).

Zusätzlich zu den Richtlinien der EU haben sich zahlreiche Nationen auch auf globale Regeln geeinigt. Dazu zählt beispielsweise das Global harmonisierte System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS), welches europaweit durch die Verordnung Nr. 1272/2008/EG (CLP) umgesetzt ist.

Das BImSchG wird durch zahlreiche Verordnungen ergänzt und präzisiert.

Für den Betrieb von verfahrenstechnischen Anlagen ist vor allem die Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) von Interesse, in der geregelt wird, welche Anlagen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedürfen.

Darüber hinaus dient die 12. BImSchV der Verhütung schwerer Unfälle, die durch bestimmte Industrietätigkeiten hervorgerufen werden könnten und der Begrenzung der Unfallfolgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Weiterhin sind die Bestimmungen der Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (GefStoffV) sowie der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) bei Industrieanlagen einzuhalten.

Die genannten Richtlinien, Gesetze und Verordnungen werden durch Technische Regeln und Leitfäden ergänzt. Diese definieren den Stand der Technik und geben Empfehlungen für die Umsetzung von Gesetzen und Verordnungen. Wichtige technische Regeln sind beispielsweise die Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS), die Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS), die Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), die Technische Regeln für wassergefährdende Stoffe (TRwS) und die Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA).

Bei Überschreitung von festgelegten Mengenschwellen für verschiedene gefährliche Stoffe sind die Bestimmungen der 12. BImSchV von Anlagenbetreibern einzuhalten. Es werden Anlagen mit Betriebsbereichen „der unteren“ und „der

oberen Klasse“ (§1 Abs. 1 S. 1 12. BImSchV) definiert. Die Einordnung in eine Klasse basiert auf der vorhandenen Menge von gefährlichen Stoffen, wobei das Über- oder Unterschreiten festgelegter Grenzwerte zu einer Klassifikation führt (§2 Nr. 1 f. 12. BImSchV). Die gefährlichen Stoffe und deren Mengenschwellen sind im Anhang I 12. BImSchV aufgeführt. Entsprechend §3 Abs. 1 HS. 1 12. BImSchV hat der Betreiber „... die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern ...“. Als Störfall gilt nach §2 Nr. 7 12. BImSchV „ein Ereignis, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden ... führt“. Ein „Ereignis“ ist eine „Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem Betriebsbereich unter Beteiligung eines oder mehrerer gefährlicher Stoffe“ (§2 Nr. 6 12. BImSchV). Eine „ernste Gefahr“ ist nach §2 Nr. 8 12. BImSchV definiert als „eine Gefahr, bei der das Leben von Menschen bedroht wird oder schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen von Menschen zu befürchten sind, die Gesundheit einer großen Zahl von Menschen beeinträchtigt werden kann oder die Umwelt, insbesondere Tiere und Pflanzen, der Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur oder sonstige Sachgüter geschädigt werden können, falls durch eine Veränderung ihres Bestandes oder ihrer Nutzbarkeit das Gemeinwohl beeinträchtigt würde.“ Der Anlagenbetreiber, dessen gefährliche Stoffe die Mengenschwellen der Spalte 5 des Anhangs I der 12. BImSchV überschreiten und der damit eine Anlage der „oberen Klasse“ betreibt, hat darüber hinaus die erweiterten Pflichten der 12. BImSchV zu erfüllen. Dazu zählt unter anderem das Verfassen eines Sicherheitsberichtes (§9 Abs. 1 HS. 1 12. BImSchV), in dem dargelegt wird, dass „die Gefahren von Störfällen und mögliche Störfallszenarien ermittelt, sowie alle erforderlichen Maßnahmen zur Verhinderung derartiger Störfälle und zur Begrenzung ihrer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt ergriffen wurden“ (§9 Abs. 1 Nr. 2 12. BImSchV). Der erstellte Sicherheitsbericht muss eine „Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder den Bedingungen für ihr Eintreten ...“ (Anhang II Abschnitt IV S. 1 12. BImSchV) und eine „Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere der Folgen der ermittelten Störfälle ...“ (Anhang II Abschnitt IV Nr. 2 12. BImSchV) enthalten. In Folge dieser Formulierung können deterministische oder probabilistische Methoden zum Einsatz kommen. Eine Reihe akzeptierter Methoden wird in *„Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung – Eine Handlungshilfe für Behörden und*

Betreiber – Stand 01.03.2009“ [30, S. 20 f.] aufgeführt. Akzeptierte Methoden sind unter anderem die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis, FTA) und die HAZOP. Eine umfangreiche Literaturübersicht zur FTA ist in [2] zu finden [2]. Die konkrete Anwendung zahlreicher Methoden wird in „*Safety and Security Review for the Process Industries: Application of Hazop, Pha, What-If and Sva Reviews*“ [75] und den Richtlinien des CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY [23, 24, 25, 18, 26, 16, 22, 21, 17, 20, 19] erläutert. Auf die besonders weit verbreitete Methode HAZOP wird im folgenden Abschnitt 2.4 weiter eingegangen.

2.4 Sicherheitsuntersuchungen in Form einer HAZOP

Die Anwendung eines Verfahrens zur Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (PAAG) (engl. Hazard and Operability Analysis (HAZOP)) ist ein bewährtes Mittel, um die in der 12. BImSchV geforderte Gefahrenanalyse durchzuführen. Die Methode wurde 1973 erstmals von LAWLEY auf dem AIChE Loss Prevention Symposium öffentlich vorgestellt und ein Jahr später publiziert [62]. Seit dem wurde die Methode vielfach angewandt und weiterentwickelt.

KLETZ gibt in „*Hazop—past and future*“ einen kurzen historischen Überblick über die Entstehung und Entwicklung dieser Methode [56]. DUNJÓ u. a. arbeiten in „*Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review*“ [36] 166 Veröffentlichungen zur HAZOP aus dem Zeitraum 1974 bis 2009 auf, fassen die grundlegenden Gedanken der untersuchten Veröffentlichungen zusammen, teilen sie in verschiedene Gruppen ein und ermitteln den Stand der Technik. Sie stellen fest, dass die Anzahl der Veröffentlichungen zur HAZOP vom Jahr ihrer Vorstellung bis zur zweiten Hälfte der neunziger Jahre stark zugenommen hat. Der Themenschwerpunkt hat sich dabei stark verschoben. Die ersten Arbeiten erarbeiten mögliche Anwendungsfälle der HAZOP, analysieren den abgedeckten Anlagenumfang und versuchen diesen durch Anpassungen der Methode zu erweitern. Der größte Teil der Arbeiten untersucht Möglichkeiten eine HAZOP

zu automatisieren. Die aktuellsten Arbeiten versuchen die HAZOP mit anderen Methoden wie beispielsweise Simulationen zu kombinieren (siehe beispielsweise [63]). DUNJÓ u. a. kommen zu dem Schluss, dass HAZOP zwar bereits die am meisten untersuchte Methode zur Analyse von Gefahren in Prozessen ist, dass aber weiterhin Verbesserungen notwendig sind. Der Mensch als Gefahrenquelle für eine Anlage wird noch nicht hinreichend im Rahmen einer HAZOP untersucht, weiterhin wird eine HAZOP in weiten Teilen von Menschen durchgeführt, was zu Ungenauigkeiten und Fehlern führen kann. Darüber hinaus sind Störungen und Ausfälle von speicherprogrammierbaren Steuerungen, welche eine wichtige Rolle bei der Steuerung und Regelung von Anlagen haben, derzeit nur ungenügend durch eine HAZOP abgebildet. Diese Punkte erfordern weitere Forschung.

2.5 Durchführung einer HAZOP

Eine ausführliche Anleitung zur konkreten Durchführung einer HAZOP findet sich beispielsweise in „*HAZOP: Guide to Best Practice*“ [28] und in der Norm „*DIN EN 61882:2017-02, HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) – Anwendungsleitfaden*“ [35].

Eine HAZOP wird von einem interdisziplinären Team in Form einer kreativen Analyse der Anlage durchgeführt. Das Ziel ist es, mögliche Abweichungen eines Prozesses vom Sollverhalten zu untersuchen. Dazu wird die Gesamtanlage zuerst in kleinere Funktionsgruppen die sogenannten „nodes“ untergliedert. Die „nodes“ werden dann nacheinander untersucht. Dazu wird die Sollfunktion beziehungsweise der Sollwert einer betrachteten Variable oder eines Prozesses innerhalb der „node“ definiert. Anschließend wird dafür eine Reihe an Leitworten wie „kein/nicht“ „mehr“ „weniger“ „teilweise“ „Umkehrung“ „anders als“ oder „sowohl als auch“ ausgewählt, mit Hilfe derer eine physikalisch sinnvolle Abweichung vom Sollverhalten beschrieben wird. Darauf folgend werden mögliche Ursachen und Konsequenzen der betrachteten Abweichung abgeschätzt. Ursachen und Auswirkungen können dabei sowohl innerhalb als auch außerhalb der betrachteten „node“ entstehen beziehungsweise wirksam werden. Danach wird das Risiko der ermittelten Auswirkungen unter der Annahme, dass keine Gegenmaßnahmen bestehen, abgeschätzt. Im Anschluss werden die vorhandenen Gegenmaßnahmen ermittelt und bewertet. Dazu wird das sich ergebende Restrisiko ermittelt, wel-

ches bei Vorhandensein der Gegenmaßnahmen zu erwarten ist. Sind ungenügende Schutzeinrichtungen zur Einhaltung des tolerierten Risikos vorgesehen, so soll durch das HAZOP-Team eine zur Senkung des Risikos geeignete Maßnahme vorgeschlagen werden.

Die Ergebnisse einer HAZOP können in Form von Tabellen dargestellt werden. In Tab. 2.1 ist ein Auszug der Analyse eines Moduls zur Vorlage eines Stoffes mit Zwischenspeicher dargestellt. Das P&ID dieses Moduls ist im Anhang in Abbildung A.1 dargestellt. Dargestellt wird eine Betrachtung der Prozessvariablen Zufluss, Abfluss und Füllstand. Für jede Variable wird ein Leitwort angewendet, mit Hilfe dessen die Auswirkung der Abweichung auf den übrigen Prozess und das Modul selbst ermittelt wird. Weiterhin werden mögliche Ursachen für die betrachten Abweichungen identifiziert. Die Ursache „externe Ursache“ stellt eine Besonderheit dar. Sie ist bei konventionellen HAZOPs unüblich, bei Betrachtung von modularen Anlagen wird damit eine mögliche Wechselwirkung mit angeschlossenen Modulen betrachtet. Da die gekoppelten Module zum Durchführungszeitpunkt der HAZOP des einzelnen Moduls nicht bekannt sind, kann die Ursache nicht im Detail beschrieben werden. Statt dessen wird die Möglichkeit einer Wechselwirkung besonders hervorgehoben. Bei der Sicherheitsbetrachtung der Gesamtanlage sind solche Ursachen erneut zu analysieren.

Tabelle 2.1: Auszug der Ergebnisse einer HAZOP für ein Vorlagemodul mit Zwischenspeicher nach [86]

ID	Größe	Leitwort	Ursache	Auswirkung
1	Zufluss	weniger	Ventil defekt ODER Sensor defekt ODER Ansteuerung defekt	Füllstand sinkt
2	Füllstand	mehr	Füllstandssensor defekt ODER ID=3	Druckanstieg im Tank
3	Abfluss	kein	Fehlfunktion der Pumpe	Füllstand steigt

2.6 Sicherheitsbetrachtungen modularer Anlagen

Modulare Anlagen unterliegen ebenso wie konventionelle Anlagen den im Abschnitt 2.3 dargelegten Gesetzen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Sicherheitsuntersuchung, wenn die im Anhang I 12. BImSchV definierten Mengenschwellen an gefährlichen Stoffen überschritten werden und eine modulare Anlage

damit als eine Anlage „der oberen Klasse“ nach §1 Abs. 1 S. 1 12. BImSchV einzustufen ist.

Die Notwendigkeit der Anwendung der MRL und damit die Erstellung einer Europäische Gemeinschaft (EG)-Konformitätserklärung für eine verfahrenstechnische Anlage ist allerdings nicht offensichtlich. Die MRL ist unter anderem für „Maschinen“ (Art. 1 Nr. 1 lit. a MRL) und „unvollständige Maschinen“ (Art. 1 Nr. 1 lit. g MRL) anzuwenden. Eine geeignete Interpretation dieser in Art. 2 lit. a,g MRL definierten Begriffe wird von WEBER in „*Engineering verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*“ gegeben (vgl. [115, S. 589 ff.]).

WEBER beantwortet die Frage, ob eine verfahrenstechnische Anlage eine „Gesamtheit von Maschinen“ darstellt und damit der MRL unterliegt, verneinend. Als Begründung wird angegeben, dass es in der Regel keinen sicherheitstechnischen Zusammenhang entsprechend des *Interpretationspapieres zum Thema „Gesamtheit von Maschinen“ des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales* gibt, da bei einer sicherheitsgerichteten Abschaltung eines gefährdeten Anlagenteils häufig nicht zeitgleich andere Anlagenteile abgeschaltet werden (vgl. [115, S. 591]). Damit ist in der Regel keine Erstellung einer EG-Konformitätserklärung für eine verfahrenstechnische Anlage notwendig.

Für modulare Anlagen gilt dies nach Meinung von WEBER jedoch nicht. Der Autor stellt fest, dass Package-unit-Anlagen als eine Gesamtheit von Maschinen anzusehen sind (vgl. [115, S. 592]). Dieser Anlagentyp ist eine besondere Ausprägung eines Moduls, weswegen davon auszugehen ist, dass diese Aussage auf sämtliche modularen Anlagen anzuwenden ist. Dabei wird jedoch nicht deutlich, ob Package-unit-Anlagen den Zusammenschluss mehrerer Module zu einer Gesamtanlage oder einzelne Module umfassen. KOCKMANN u. a. benennen in „*Safety assessment in development and operation of modular continuous-flow processes*“ einige Rechtsvorschriften, welche für modulare Anlagen einzuhalten sind. Die Anwendung der MRL bringen sie explizit nur mit einzelnen Equipments und nicht mit der Gesamtanlage in Verbindung (vgl. [59, S. 18]). Die Notwendigkeit eines Konformitätsverfahrens für modulare Anlagen kann daher nicht abschließend geklärt werden. Der Gesetzgeber sollte hier beispielsweise durch Veröffentlichung eines aktualisierten Positionspapieres zur Anwendbarkeit der MRL dringend Klarheit schaffen. Für einzelne Module ist die Durchführung eines Konformitätsverfahrens aber empfehlenswert, da dies bei Einhaltung der

relevanten Rechtsvorschriften problemlos möglich ist.

Im Rahmen modularer Konzepte wird teilweise davon ausgegangen, dass Module funktional eigensicher sind und modulinterne Maßnahmen eine Fehlerfortpflanzung verhindern. [97, S. 4] Ob dieser Zustand erfolgreich erreicht wird, kann aber erst geprüft werden, wenn sämtliche Stoff- und Prozessdaten bekannt sind und die Gesamtanlage geplant ist. Daher kann erst nach dem Detailengineering eine Sicherheitsuntersuchung der Gesamtanlage durchgeführt werden. Im Rahmen dieser ist der Nachweis zu erbringen, dass die Module eigensicher sind. Ist dies nicht der Fall, so sind geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu entwickeln, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Die Anzahl veröffentlichter Forschungsarbeiten, welche sich speziell der Sicherheitsuntersuchung von aus Modulen bestehenden Anlagen widmen, ist sehr gering. Im Abschnitt 1.3 wird die Arbeit von FLEISCHER u. a. [37] zusammengefasst. Die Autoren schlagen darin vor, dass die Sicherheit einzelner Module durch Anwendung von Checklisten und Heuristiken durchgeführt wird. Für die Untersuchung der modularen Anlage wird die Durchführung einer HAZOP empfohlen. Wie das bei der Sicherheitsuntersuchung der Module gewonnene Wissen bei der Durchführung der HAZOP genutzt werden kann, bleibt jedoch offen.

Die aktuelle Arbeit „*Safety assessment in development and operation of modular continuous-flow processes*“ von KOCKMANN u. a. [59] widmet sich einer ähnlichen Fragestellung und stellt eine Erweiterung der Arbeit „*Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen*“ [37] dar. Der Fokus von KOCKMANN u. a. liegt speziell auf der Sicherheitsuntersuchung von Mikroreaktoren, welche als Module eingesetzt werden. Die Sicherheitsuntersuchung dieser Module anhand von Checklisten und Heuristiken wird in [59] detaillierter als in [37] dargestellt. KOCKMANN u. a. kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Durchführung einer HAZOP aus den Untersuchungen der Module profitieren kann. Dieses Wissen soll aber lediglich als kreative Anregung bei den durchzuführenden Teamsitzungen eingesetzt werden (vgl. [59, S. 20]). Die Möglichkeit einer automatischen Verwendung des bereits gewonnen Wissens wird nicht betrachtet.

Eine teilweise automatisierte Wiederverwendung dieses Wissens ist aber äußerst erstrebenswert, um die Durchführung der HAZOP zu beschleunigen und die Fehleranzahl in Folge von übersehenen Wechselwirkungen von Prozessvariablen

zu reduzieren. Einen wichtigen Schritt stellt dabei die Analyse der Fortpflanzung von Fehlern in der modularen Anlage dar. Daher wird in der vorliegenden Arbeit überprüft, wie bereits vorhandenes Wissen einzelner Module geeignet bei der Untersuchung von Wechselwirkungen von Prozessvariablen in der modularen Gesamtanlage genutzt werden kann. Als Basis dient dabei die Beschreibung der Gesamtanlage in Form eines P&ID, die Detailbeschreibung der Module und die Ergebnisse der HAZOP jedes Moduls.

Analyse von Fehlern in prozessleitechnischen Anlagen

3

3.1 Einleitung

Die Durchführung einer HAZOP dient der Bewertung des Risikos, welches von einer verfahrenstechnischen Anlage ausgeht. Ein bedeutender Teil des Aufwands bei der Durchführung einer HAZOP besteht in Erkennung und Bewertung möglicher Fehlerfortpflanzungen.

Es existieren zahlreiche Systeme, welche die Durchführung einer HAZOP unterstützen oder sogar teilweise automatisieren sollen. Solche Systeme sind besonders dann kostensparend einsetzbar, wenn sie einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit von bereits erbrachten Ingenieurleistungen aufweisen und den Nutzer durch geeignete Algorithmen bei der Auswirkungsanalyse von in einem System möglicherweise auftretenden Fehlern unterstützen. Die Auswirkungsanalyse sollte dabei die Fortpflanzung von Fehlern über das gesamte System hinweg ermitteln können. Die Überprüfung der Anwendbarkeit dieser Algorithmen für modulare Anlagen soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgen. Deshalb werden Systeme zur Automatisierung von HAZOPs im Abschnitt 3.2 untersucht.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt, bei welchem die Fortpflanzung von Fehlern untersucht wird, ist die Fehlererkennung und Fehlerisolation (fault detection and isolation, FDI). Die zur FDI verwendeten Methoden überschneiden sich zum Großteil mit denen, welche im Rahmen von automatisierten HAZOPs zur Beschreibung von Fehlerfortpflanzungen verwendet werden. Im Abschnitt 3.3 wird das Themengebiet der FDI motiviert, die verwendeten Methoden in drei Klassen eingeteilt und anschließend die Verwendbarkeit im Rahmen modularer Anlagen untersucht. Die Verwendbarkeit der untersuchten Methoden wird anhand der Kriterien

- Anwendbarkeit von Detailwissen über die Funktion und Sicherheit einzelner Module,
- Nutzung der Methode im industriellen Maßstab,
- Wiederverwendbarkeit von Ingenieurleistungen,
- Zeiteinsparung bei Durchführung einer Sicherheitsuntersuchung für eine modulare Gesamtanlage,
- Umfang der zur Durchführung der Methode notwendigen Informationen und
- Beschreibung der Wechselwirkung von Modulen durch Fehlerfortpflanzungsanalyse

bewertet, wobei das vorletzte Kriterium mit den im Kontext dieser Arbeit vorausgesetzten Informationen in direktem Zusammenhang steht. Das zuletzt genannte Kriterium muss zwingend erfüllt sein, damit eine Methode als geeignet zu bewerten ist.

Die Systeme zur automatisierten HAZOP als auch die Methoden der FDI versuchen, auf Basis von vorhandenem Wissen eine vorliegende Situation zu bewerten. Die zu untersuchende Situation wird auf Basis von Messwerten oder durch eine parametrierbare Beschreibung charakterisiert. Zur Bewertung ist das algorithmische Ziehen von Schlussfolgerungen notwendig. Dies basiert in aller Regel auf der Auswertung des vorhandenen Wissens unter der Anwendung von „Inferenzmechanismen“. Diese schließen das Prüfen von bekannten Aussagen auf Erfülltheit durch Analyse eines aktuellen Zustands ebenso wie das Herleiten von neuen Aussagen (Konklusionen) auf Basis von bekannten, wahren Aussagen (Prämissen) ein. Man unterscheidet dabei die drei Inferenzmechanismen

1. deduktives Schließen,
2. abduktives Schließen und
3. induktives Schließen.

Als deduktives Schließen bezeichnet man die Formulierung einer logischen Konsequenz, welche auf Basis von mehreren festgelegten Prämissen formuliert wird. Dabei findet zumeist eine Ableitung vom Allgemeinen auf einen Einzelfall statt. Als Beispiel dienen die Prämissen ein Zufluss erhöht das Volumen im Lagertank

und Flüssigkeit A strömt in den Lagertank. Als Konklusion erhält man die Aussage, dass die Flüssigkeit A das Tankvolumen erhöht.

Beim abduktiven Schließen folgert man aus einer Prämisse und einem beobachteten Resultat die Gültigkeit einer Voraussetzung. Eine Abduktion liefert bei Betrachtung gewisser Effekte eine plausible Ursache für deren Eintreten, die durchgeführte Schlussfolgerung muss jedoch nicht notwendigerweise korrekt sein. Trotzdem ist dieses Vorgehen bei der Suche nach möglichen Erklärungen für einen beobachteten Effekt sehr hilfreich. Der Zusammenhang „das Öffnen des Abflussventils senkt das Tankvolumen“ in Verbindung mit der Beobachtung, dass das Tankvolumen sinkt, lässt den abduktiven Schluss zu, dass das Abflussventil geöffnet ist. Eine alternative Begründung ist aber auch, dass der Tank ein Leck aufweist. Die abduktive Schlussfolgerung ist demnach zwingend auf Gültigkeit zu prüfen.

Die Induktion ist in ihrem Vorgehen in etwa das Gegenteil der Deduktion. Im Rahmen induktiver Schlussfolgerungen wird aus mehreren Beobachtungen eine allgemeine Regel abstrahiert. Deren Gültigkeit ist aber nicht zwangsläufig gegeben. Werden in einem Reaktor zwei Stoffe mit hoher Temperatur zugeführt und zu einer endothermen Reaktion gebracht so könnte man schließen, dass das Zusammenführen von zwei Reaktanten prinzipiell ein Absinken der Temperatur zur Folge hat. Diese Aussage ist für exotherm reagierende Stoffe aber offensichtlich falsch und mit einem hohem Risiko verbunden.

Im Gegensatz zu Induktion und Abduktion ist die Deduktion wahrheitserhaltend und daher die zu bevorzugende Inferenzmethode. Ist Deduktion jedoch nicht möglich oder zu aufwendig, so ist der Einsatz von Induktion oder Abduktion aber möglich, um neue Aussagen zum Systemverhalten zu generieren. (vgl. [29, S. 28 ff.])

3.2 Automatisierung einer HAZOP

Die Durchführung einer HAZOP ist kompliziert, zeitaufwendig und arbeitsintensiv. Außerdem ist die Verlässlichkeit der erarbeiteten Ergebnisse einer HAZOP maßgeblich von der Erfahrung der durchführenden Experten abhängig. Durch den hohen Zeitaufwand und die wiederkehrende Anwendung der gleichen Leitworte stellt sich schnell eine ermüdende Routine ein, welche das Übersehen

wichtiger Zusammenhänge begünstigt. In Folge dieser Tatsachen wurden zahlreiche computergestützte Systeme entwickelt, um die Durchführung einer HAZOP zu unterstützen. Diese Expertensysteme sollen die Wiederverwendbarkeit von gewonnenem Expertenwissen ermöglichen, die Anwendung der Leitworte vereinfachen und die Wahrscheinlichkeit von übersehenen Zusammenhängen reduzieren. Insgesamt sollen also die Kosten der Durchführung einer HAZOP gesenkt und die Qualität der Ergebnisse gesteigert werden.

Eine erste Arbeit zur Automatisierung von HAZOPs wurde von PARMAR und LEES veröffentlicht [84, 85]. Die untersuchte Anlage zur Trennung von Wasser und Kohlenwasserstoffen wird basierend auf dem P&ID in Einheiten unterteilt und durch auslösende und terminierende Ereignisse die Fortpflanzung von Fehlern beschrieben. Mit Hilfe eines regelbasierten Algorithmus können die Ursachen und Auswirkungen der Abweichung von Prozessvariablen ermittelt werden. Die Analyse ist dabei auf jeweils benachbarte Einheiten begrenzt und eine anlagenweite Untersuchung ist nicht möglich, obwohl eine solche Betrachtung wichtiger Teil einer HAZOP ist. Das System ist in den Programmiersprachen Fortran 77 and Prolog umgesetzt. Das implementierte Expertenwissen ist nur ungenügend abstrahiert, was eine Wiederverwendbarkeit erschwert. Die Anwendbarkeit für Anlagen im großindustriellen Maßstab konnte bisher nicht gezeigt werden. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes wird daher als nicht sinnvoll erachtet.

CATINO und UNGAR stellen in „*Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants*“ ein System mit dem Namen „Qualitative Hazard Identification (QHI)“ vor [15]. Die Autoren definieren in einer Bibliothek allgemeine Fehler wie Lecks oder verstopfte Filter und je nach Struktur der untersuchten Anlage werden diese untersucht. Das Vorliegen eines Fehlers wird mit Hilfe automatisch generierter Prozessmodelle simuliert und die Auswirkung der Fehler bewertet. Der dazu notwendige Code ist unabhängig von einer konkreten Anlage formuliert, benötigt zur Simulation aber eine weitere Bibliothek mit Prozessmodellen. QHI ist flexibel einsetzbar, benötigt aber aktualisierte Bibliotheken. In Folge der sehr rechenintensiven Algorithmen konnte sich dieses System nicht in der Industrie etablieren. Im Rahmen modularer Anlagen müssten die Bibliotheken aufwendig aktualisiert werden, weswegen keine weitere Analyse der Möglichkeit einer Weiterentwicklung von QHI für die Sicherheitsuntersuchung modularer Anlagen stattfindet.

KHAN und ABBASI präsentieren in „*OptHAZOP — an effective and optimum approach for HAZOP study*“ eine Adaption des konkreten Vorgehens bei der Durchführung einer HAZOP [53]. Durch Verwendung einer Wissensbasis wollen die Autoren die notwendige Arbeitszeit einer HAZOP halbieren. Die konkrete Implementierung der Wissensbasis bezeichnen die Autoren als TOPHAZOP, welche sie in „*TOPHAZOP: a knowledge-based software tool for conducting HAZOP in a rapid, efficient yet inexpensive manner*“ vorstellen [54]. Als Implementierungsumgebung nutzen KHAN und ABBASI die Software „G2“ der Firma „gensym“. Die Wissensbasis ist in einen allgemeinen Teil und einen prozessspezifischen Teil untergliedert. Der allgemeine Teil enthält generische Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen. Der prozessspezifische Teil umfasst für bestimmte Prozesse ausgewählte Kombinationen aus Ursache und Wirkung, sowie die Fortpflanzung von Auswirkungen auf andere Prozesseinheiten. Die Software wurde durch KHAN und ABBASI weiterentwickelt, zu EXPERTOP umbenannt und in Visual C++ neu implementiert [55]. Die Anwendung von EXPERTOP kann die Durchführung einer HAZOP erfolgreich beschleunigen, wenn die zu untersuchende Anlage durch die vorhandene Wissensbasis adäquat beschrieben werden kann. Das Werkzeug ist jedoch nicht in der Lage, abstrakt definiertes Wissen auf neue Anlagen zu übertragen. Aus diesem Grund wird EXPERTOP im Rahmen der vorliegenden Arbeit als nicht geeignet bewertet.

Eine erneute Weiterentwicklung von EXPERTOP wird von RAHMAN u. a. unter dem Namen ExpHAZOP⁺ vorgestellt [88]. ExpHAZOP⁺ umfasst einen Algorithmus zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen über die gesamte Anlage. Der Nutzer interagiert mit dem Programm über eine grafische Oberfläche, in welcher er gezielt einzelne Abschnitte der Anlage sicherheitstechnisch auswählen und untersuchen lassen kann. Die vorhandene Wissensbasis basiert auf Erfahrungen des Betriebs von Offshore-Bohranlagen, was das mögliche Anwendungsfeld einschränkt. Als Nutzereingabe erfordert ExpHAZOP⁺ ein P&ID, welches von Hand in ExpHAZOP⁺ zu zeichnen ist, da eine Anbindung an andere Softwaresysteme fehlt. Verbesserungen bei der Erweiterbarkeit der Wissensbasis durch den Nutzer im Vergleich zu EXPERTOP werden von RAHMAN u. a. nicht benannt, daher ist auch dieses Werkzeug für modulare Anlagen als ungeeignet einzustufen.

Die besonders umfangreiche Veröffentlichung von MCCOY u. a. beschreibt das computergestützte Werkzeug HAZID [69, 71, 70, 72, 73]. HAZID besteht aus

einer Reihe von Werkzeugen, welche auf Basis von Wissensdatenbanken durch qualitative Fehlerfortpflanzung die Ursachen und Auswirkungen von Prozessfehlern bestimmen. Als Eingangsdaten wird ein P&ID benötigt, welches in der Software „SmartPlant P&ID“ entweder entworfen oder in diese importiert werden muss. Der „Hazard Import Wizard“ erstellt auf Basis des P&ID ein Modell der Anlage. Das Modell wird mit Hilfe von zwei Bibliotheken erweitert, welche Stoffeigenschaften, mögliche Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen sowie Informationen zur Fortpflanzung von Fehlern enthalten. Die „HAZID Analysis Engine“ führt dann eine hochgradig automatisierte Analyse der Anlage durch und liefert einen umfassenden Bericht im XML Format. Dieser kann mit Hilfe des „HViewer Results Browser“ betrachtet werden, wobei der Nutzer vielfältige Einstellmöglichkeiten hat, um die Anzeige anzupassen und den XML Bericht gezielt zu durchsuchen. Zusätzlich wird der Bericht in einem Format generiert, welcher auf die Empfehlungen zur Notation eines HAZOP-Berichts (vgl. [28]) angepasst ist.

Die erste Bibliothek beschreibt „Unit Models“, welche in einer hierarchischen Struktur gespeichert werden, wodurch das Vererben von Eigenschaften unterstützt wird. Unit Models sind wohlunterscheidbare Einheiten, welche Prozessfunktionen erfüllen. Je nach Detaillierungsgrad dieser Einheiten sind die erfüllbaren Funktionen mehr oder weniger umfassend. Die konkrete Definition eines Unit Models kann durch den Nutzer mit Hilfe des „Model Generation Tool“ erfolgen. Ein Unit Model umfasst unter anderem Informationen zu den Ein- und Ausgängen und zu möglichen Fehlerfortpflanzungen, welche mit Hilfe von Vorzeichenbehafteter gerichteter Graph (Signed Digraph, SDG) modelliert werden. (vgl. [71])

Die zweite Bibliothek umfasst Eigenschaften von Flüssigkeiten. Deren Analyse zeigt beispielsweise eine Brandgefahr oder toxische Wirkung auf, welche durch das ungewollte Vermischen zweier Substanzen entsteht. (vgl. [70])

Die HAZID Analysis Engine führt auf Basis der Unit Models und der Eigenschaften der verwendeten Stoffe eine umfassende Fehleranalyse durch. Dazu wird für eine gegebene Prozessabweichung ein SDG konstruiert, welcher die Abweichung mit allen möglichen Auswirkungen verbindet. Die Pfade zu jeder möglichen Auswirkung werden dann mit Hilfe der zuvor definierten Eigenschaften in den Unit Models und den Stoffeigenschaften auf Gültigkeit geprüft und die ungültigen Pfade entfernt. Die verbleibenden Pfade werden abgespeichert und in

den Ergebnisreport übernommen. (vgl. [70, 73])

HAZID wurde seit seiner Veröffentlichung erfolgreich weiter entwickelt und ist kommerziell über die Website <https://www.hazid.com/> zu erwerben. PALMER und CHUNG erweitern das Anwendungsfeld von HAZID erfolgreich von kontinuierlichen Prozessen auf Batchprozesse [82].

Die der Fehlerfortpflanzung zugrunde liegenden Algorithmen werden in den genannten Veröffentlichungen oberflächlich beschrieben. Weiterhin gehen die Autoren davon aus, dass die Bibliothek der Model Units durch einzeln durchgeführte HAZOPs um wichtige Details ergänzt werden kann. Bei der Sicherheitsuntersuchung modularer Anlagen ist davon auszugehen, dass die Durchführung einer HAZOP für einzelne Module sinnvoll ist. Wenn es gelingt einzelne Module in Form von Model Units zu beschreiben, so ist HAZID nach dem aktuellen Forschungsstand ein vielversprechendes Mittel, um die Sicherheitsuntersuchung einer aus Modulen bestehenden Anlage zu beschleunigen. Da der verwendete Code jedoch nicht frei verfügbar ist, wird HAZID im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter im Detail betrachtet.

Ein weiteres Expertensystem wird von VENKATASUBRAMANIAN und VAIDHYANATHAN in „*A knowledge-based framework for automating HAZOP analysis*“ [106] vorgestellt. Das wissensbasierte System HAZOPExpert ist auf Basis der Software „G2“ der Firma „gensym“ implementiert. HAZOPExpert sieht ebenso wie TOPHAZOP eine Aufteilung des Expertenwissens in prozessspezifisches und allgemein gültiges Wissen vor. Das allgemein gültige Wissen wird in einer Datenbank hinterlegt und kann bei jeder neuen HAZOP wiederverwendet werden, wobei die Darstellung nach einem objektorientierten Ansatz erfolgt. Dadurch wird eine Erweiterung der Datenbank vereinfacht. Es werden HAZOP Modelle für verschiedene Prozesseinheiten entworfen, sowie Methoden zur Fehlererkennung, Auswirkungsanalyse und Fehlerfortpflanzung implementiert. Mit Hilfe des prozessspezifischen Wissens wie konkreten Stoffeigenschaften und einem P&ID wird das allgemeine Wissen konkretisiert und spezifiziert und die Durchführung einer HAZOP damit teilweise automatisiert. Insbesondere können Ursachen und Auswirkungen einer betrachteten Abweichung einer Prozessvariablen anlagenweit analysiert werden.

Die Fehleranalyse in HAZOPExpert wurde durch den Einsatz von erweiterten SDGs verbessert [102], die Bewertung von Fehlerauswirkungen durch Wich-

tungsmethoden ergänzt [101], die Anwendbarkeit von kontinuierlichen Prozessen auf Batchprozesse erweitert [107] und die industrielle Nutzbarkeit des Systems anhand von Fallbeispielen verifiziert [106, 103, 107]. Die Nutzung von erweiterten SDGs zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen in modularen Anlagen ist eine Methode, welche im Abschnitt 3.3.2 gesondert untersucht wird.

Die meisten Systeme zur Automatisierung von HAZOPs haben den Nachteil, dass sie nicht an andere Computer-gestützte Werkzeuge gekoppelt werden können. Die Ursache dafür ist die jeweils werkzeugspezifische Art der Informationsdarstellung. Der Einsatz einer Ontologie bietet eine formale Darstellung von Begrifflichkeiten und Beziehungen zwischen diesen und kann daher dieses Problem beheben. BATRES stellt in „*An ontology approach to support HAZOP studies*“ eine Ontologie vor, welche für die Modellierung der Informationen, welche im Rahmen einer HAZOP benötigt werden, genutzt werden kann.

ZHAO, BHUSHAN und VENKATASUBRAMANIAN zeigen in „*PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part I*“ und „*PHASuite: An Automated HAZOP Analysis Tool for Chemical Processes Part II*“, wie die Nutzung einer eigens entwickelten Ontologie im Rahmen des Werkzeugs PHASuite zur automatisierten Durchführung von HAZOPs erfolgen kann [122, 123]. Die Verwendung der Ontologie ermöglicht beispielsweise einen Datenaustausch mit der Software „Batch Plus“ der Firma „aspentech“, welche der Modellierung von Batchprozessen dient und auf der Website <http://www.aspentech.com/products/engineering/aspen-batch-process-developer/> kommerziell sowie als Testversion erhältlich ist. Weiterhin können die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchung beispielsweise mit dem kommerziellen Werkzeug „PHAPro®“ ausgetauscht werden. In PHASuite wird die Beschreibung einzelner Prozesseinheiten und Prozessparameter in Form von Tabellen vorgenommen, deren Beschreibungsmittel auf der Ontologie der Autoren basieren. Die Wechselwirkung zwischen Prozesseinheiten wird, wie in HAZOPEXpert und HAZID, durch SDGs beschrieben. PHASuite enthält ein als Prototyp implementiertes Werkzeug mit dem Namen „Knowledge Builder“, mit welchem der Nutzer über eine grafische Oberfläche die Wissensbasis direkt verändern und erweitern kann. Auf Basis der Datenbank, einem durch den Nutzer vorgegebenen P&ID und den durch SDGs beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Komponenten wird der Gesamtprozess in Form von automatisch generierten „Gefärbten Petri Netzen“

(siehe bspw. [51]) modelliert und analysiert. Die von ZHAO, BHUSHAN und VENKATASUBRAMANIAN entwickelte Datenbank basiert auf Microsoft Access, die Funktionen von PHASuite sind in Visual C++ umgesetzt.

Die Verwendung von PHASuite für modulare Anlagen bedarf weitreichender Erweiterungen der Schnittstellen. Das Einlesen umfangreich modellierter Module ist derzeit noch nicht möglich. Eine Anpassung der verwendeten Ontologie wäre ein geeigneter Weg, um die Implementierung von neuen Schnittstellen zu vereinfachen. Wenn PHASuite und modulare Anlagen die gleichen oder ineinander überführbare Ontologien verwenden, so könnte PHASuite für die Sicherheitsuntersuchung modularer Anlagen erfolgreich eingesetzt werden. Die Verwendung einer objektorientierten Programmierung in Kombination mit der detailliert geplanten Softwarearchitektur von PHASuite und der Verwendung einer Datenbank auf Basis einer Ontologie (vgl. [123]) vereinfachen derartige Erweiterungen maßgeblich. Die vorhandenen Algorithmen zur Fehlerfortpflanzung können nicht ohne großen Aufwand vom Rest der Software getrennt eingesetzt werden. Daher wird PHASuite im Rahmen dieser Arbeit als nicht geeignet bewertet, um die Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen zu beschreiben.

In „*A functional HAZOP methodology*“ zeigen ROSSING u. a. wie durch Einsatz von Multilevel Flow Modeling (MFM) ein Prozess modelliert und eine HAZOP durchgeführt werden können [89]. ROSSING u. a. präsentieren eine Anpassung der Durchführung einer HAZOP. Ihr Ansatz gliedert die zu untersuchende Anlage softwaregestützt derart, dass funktional gleiche Komponenten nicht mehrfach untersucht werden müssen. Ein MFM Modell kann nur in Kombination mit zusätzlich definierten Kausalzusammenhängen die Fehlerfortpflanzung in einem System beschreiben. Zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen ist diese Art der Modellierung daher im Vergleich zu Petri Netzen oder SDG weniger geeignet.

WANG, GAO und WANG stellen mit HELPHAZOP ein weiteres Expertensystem vor, mit dessen Hilfe die Durchführung einer HAZOP verbessert und beschleunigt wird. HELPHAZOP dient dabei als Wissensspeicher vor, während und nach einer HAZOP. Die Autoren adressieren damit das Problem der Informationsübergabe von der Prozessplanung zu dem Team, welches die Sicherheitsuntersuchung durchführen soll. HELPHAZOP vereinfacht durch die Sammlung aller vorhandenen Informationen die konkrete Durchführung einer HAZOP, liefert aber selbstständig keine umfangreichen Analysen. Daher kann dieses System nicht für die

Analyse von Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen verwendet werden.

BOONTHUM, MULALEE und SRINOPHAKUN präsentieren in „*A systematic formulation for HAZOP analysis based on structural model*“ eine Variante zur Automatisierung von HAZOPs, welche durch Einsatz eines Zustandsraummodells den Prozess beschreibt [10]. Auf Basis dieses Modells werden die Beziehungen zwischen Prozessvariablen mit SDGs modelliert und anschließend in eine Ursache-Wirkungsmatrix überführt. Der implementierte Algorithmus erwartet als Eingangsgrößen die Systemmatrizen der Zustandsraumbeschreibung und liefert nach automatischer Analyse die Ursache-Wirkungsmatrix. Der vorgestellte Algorithmus ist in der Lage, die Fortpflanzung von Fehlern systemweit zu beschreiben. Die notwendige Beschreibung des gesamten Prozesses im Zustandsraum erfordert jedoch einen hohen Modellierungsaufwand. Somit bietet dieser Algorithmus gegenüber den bereits vorgestellten Verfahren hinsichtlich der Anwendbarkeit für modulare Anlagen keine offensichtlichen Vorteile und wird daher als ungeeignet bewertet.

Die aktuelle Arbeit von MECHHOUD, ROUAINIA und RODRIGUEZ beschreibt das Werkzeug TORANAS, mit Hilfe dessen eine automatisierte Analyse von petrochemischen Anlagen möglich ist, wobei eine Kombination von HAZOP und FMEA verwendet wird [74]. Die Software ist in Matlab umgesetzt und enthält eine Nutzeroberfläche, Algorithmen zur automatisierten Durchführung von HAZOPs und FMEA sowie Simulationen der Ausbreitung von Explosionen. Die Autoren gehen in „*A new tool for risk analysis and assessment in petrochemical plants*“ in erster Linie auf die Nutzeroberfläche ein und beschreiben, wie der Anwender die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchung visualisieren kann. Die implementierten Algorithmen werden nicht erläutert. In Folge dessen kann die Anwendbarkeit von TORANAS für modulare Anlagen nicht fundiert bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zahlreiche Arbeiten zur Automatisierung von HAZOPs existieren, wobei nur wenige der vorgestellten Systeme eine industrielle Reife erlangt haben. Nach derzeitigem Wissensstand existiert kein System, welches ohne umfangreiche Anpassungen für die Sicherheitsuntersuchung einer modularen Anlagen eingesetzt werden kann, wenn das detaillierte Wissen aus einzelnen Modulen genutzt werden soll.

Die verwendeten Verfahren sind größtenteils in der Lage, die Fortpflanzung von Fehlern zu analysieren. Die dazu verwendeten Methoden umfassen vor allem

SDG und Petri Netze, weiterhin kommen Fehlerbäume und Zustandsgraphen zum Einsatz (vgl. [82, S. 3]). Diese Methoden werden in die Klasse der modellbasierten qualitativen Methoden der Fehlerfortpflanzungsanalyse eingeordnet und daher im Abschnitt 3.3.2 weiter betrachtet.

3.3 Fehlererkennung und Fehleridentifikation

In Verfahrenstechnischen Anlagen kommt es immer wieder zu Abweichungen des Prozesses vom Sollzustand. Es ist Aufgabe der Anlagenfahrer auf diese Abweichungen geeignet zu reagieren, um den Prozess wieder in den sicheren Sollzustand zu überführen. Diesen Vorgang können Menschen nicht allein bewältigen, da sie in Folge des Umfangs moderner Anlagen nicht mehr in der Lage sind, den kompletten Zustand einer Anlage zu erfassen. Zu dem enormen Umfang an Prozessvariablen kommt erschwerend hinzu, dass Abweichungen in Folge von Sensorfehlern und Messungenauigkeiten teilweise erst spät erkannt werden. Dies erschwert das rechtzeitige Initiieren notwendiger Prozesskorrekturen. Durch verspätetes Ergreifen notwendiger Maßnahmen kommt es immer wieder zu Störungen und kleinen Unfällen. Der dadurch entstehende Schaden beträgt jährlich mehrere Milliarden Euro. Es wurden umfangreiche Forschungen durchgeführt, um zu ermitteln wie Abweichungen frühzeitig erkannt und zugrunde liegende Ursachen identifiziert werden können. Dieses Vorgehen nennt man Fehlererkennung und Fehlerisolation (fault detection and isolation, FDI). Zur Ermittlung der Ursachen einer Prozessabweichung werden erfolgreich Methoden der Fehlerfortpflanzung (engl. fault propagation methods) eingesetzt. [108, S. 2] Eine kompakte Einführung in die FDI findet sich im Abschnitt „Fault Detection and Diagnosis“ des Buches „*Encyclopedia of Systems and Control*“ [3, S. 417 ff.].

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

Die Abweichung einer Prozessvariable vom Sollwert kann vielfältige, verkettete Ursachen haben. Am Beispiel einer stark exothermen Reaktion zweier flüssiger

Stoffe A und B soll dies verdeutlicht werden. Die Reaktion sei dabei noch in der Erprobungsphase, weswegen keine Erfahrungswerte in der gegebenen Anlage bestehen.

Ein Reaktionsbehälter mit Rührer habe zwei über Pumpen gesteuerte Zuflüsse. Um die gewünschte Reaktion zu starten, wird der Stoff A eindosiert. Durch langsame Zugabe von Stoff B soll unter Vermischung der Reaktanten die Reaktion gestartet werden. Sei nun der Rührer durch Alterung deutlich langsamer als im optimalen Zustand und außerdem der im Reaktor befindliche Temperatursensor defekt. Trotz Zugabe von Stoff B und Einschalten des Rührers findet die Reaktion dann nicht zu dem erwarteten Zeitpunkt statt, da keine ausreichende Vermischung der Stoffe A und B zustande kommt. Eine Ursachenanalyse ist in Folge fehlender Erfahrungswerte sehr kompliziert. Ein mögliches Vorgehen besteht in der vermehrten Zugabe von Stoff B in der Annahme so die Reaktion starten zu können. Durch die vermehrte Zugabe und das langsame Vermischen der Reaktanten beginnt die Reaktion. Dies wird durch den defekten Temperatursensor jedoch nicht bemerkt. Der Stoff B wird daher weiter zudosiert. Die stark exotherme Reaktion geht in Folge dessen durch. Dies wird jedoch erst durch einen Druckanstieg im Behälter erkannt, welcher durch Verdampfen der Reaktanten zustande kommt. Aus Sicht der Anlagenfahrer hat die Reaktion jedoch noch immer nicht begonnen, da die Temperatur im Reaktor nicht gestiegen ist. Der Druckanstieg könnte also einem fehlerhaften Drucksensor oder einer nicht erkannten Reaktion geschuldet sein. Die Ursachenanalyse für den erhöhten Druck ist zu diesem Zeitpunkt in Folge einer möglichen Verkettung von Fehlfunktionen sehr kompliziert. Eine durchgehende Reaktion ist hochgradig gefährlich. Wird die Gefahr nicht unmittelbar erkannt, so kann dies verheerende Folgen für die Anlage, die Betreiber und die Umwelt haben.

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

Im Rahmen einer Fehlerfortpflanzungsanalyse wird je nach Verfahren der Einfluss von Prozessgrößen, die räumliche Positionierung von Anlagenteilen, die Alterung

von Anlagenkomponenten oder eine Kombination dieser Faktoren betrachtet. Je nach Art der verwendeten Informationen unterscheidet man in

- modellbasierte qualitative Verfahren,
- modellbasierte quantitative Verfahren und
- auf historischen Messdaten basierende Verfahren.

Diese Einteilung der Methoden der FDI wird in Abbildung 3.1 anschaulich dargestellt. Die modellbasierten Verfahren sind solche, welche Wissen über die Struktur und Funktion einer Anlage auswerten. Zur Durchführung eines solchen Verfahrens werden meist Experten eingesetzt. Die datenbasierten Verfahren analysieren hingegen Messwerte, welche durch den Betrieb der Anlage oder Simulation der Anlage verfügbar werden. Die Auswertung findet dann beispielsweise mit Hilfe statistischer Methoden oder Verfahren zur Mustererkennung statt.

In der dreiteiligen Veröffentlichung von VENKATASUBRAMANIAN u. a. ([108, 105, 109]) wird eine umfassende Einordnung der bis zum Jahr 2002 veröffentlichten Methoden zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen in diese drei Kategorien und eine Bewertung der Eignung der Methoden vorgenommen. Für zahlreiche Anwendungsfälle erörtern die Autoren geeignete Methoden, wodurch sie Nicht-Experten der Fehlerfortpflanzungsanalyse ein Hilfsmittel zur Evaluierung der Anwendbarkeit bestimmter Methoden für weitere Fälle bieten. Diese Veröffentlichung ist daher bei der Suche nach einer anwendbaren Methode zur Fehlerfortpflanzungsanalyse ein besonders zweckmäßiger Startpunkt. Es gibt neben den Arbeiten von VENKATASUBRAMANIAN u. a. weitere Literaturanalysen, diese haben aber einen geringeren Umfang und konzentrieren sich zumeist auf eine der drei genannten Kategorien. Eine hervorzuhebende Ausnahme bildet die zweiteilige Arbeit von GAO, CECATI und DING, in welcher ein umfangreicher, aktueller Literaturüberblick zum Thema FDI präsentiert wird [39, 40].

In den folgenden Abschnitten 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 werden die einzelnen Kategorien detailliert betrachtet, weiter untergliedert und anhand von Beispielmethoden wird die Einsetzbarkeit einiger Methoden für modulare Anlagen bewertet.

Als Alternative zu den drei Kategorien nach VENKATASUBRAMANIAN u. a. [108] ist eine Einteilung in off-line und on-line Verfahren möglich [52]. Ersteres sind Verfahren, die losgelöst vom Betrieb einer Anlage durchgeführt werden. Ein solches Verfahren kann beispielsweise vor der Erstinbetriebnahme auf Basis von

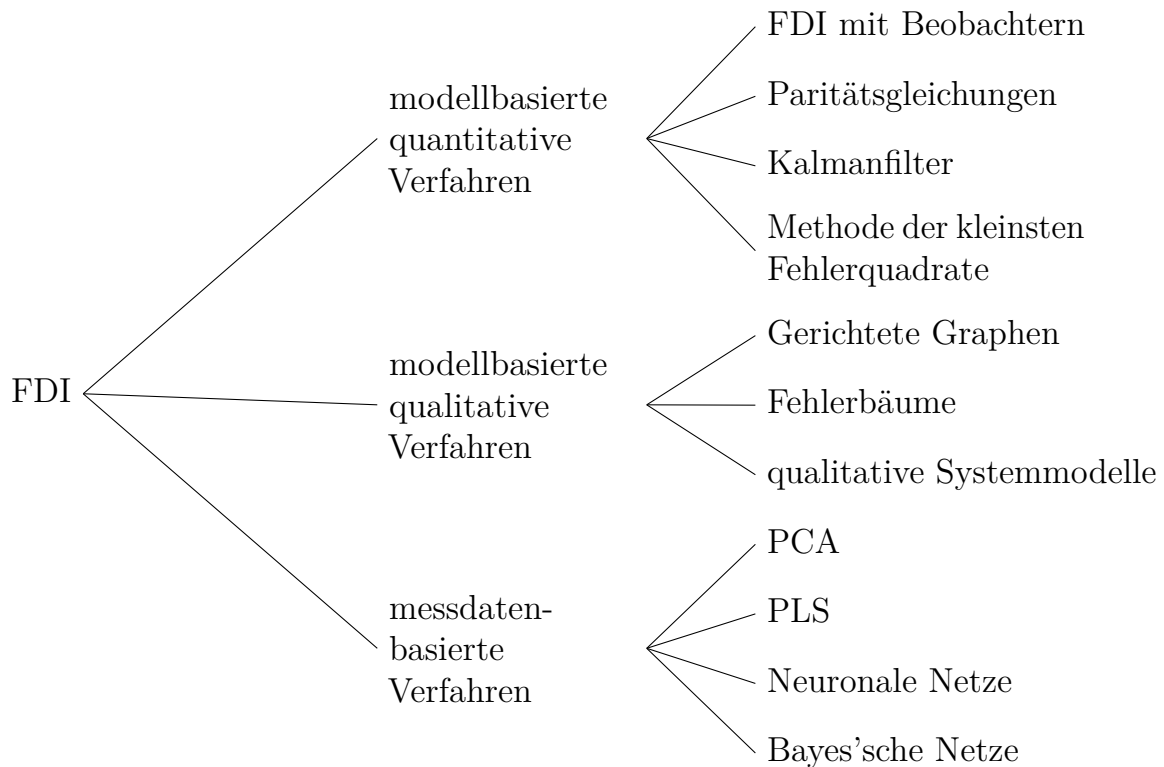


Abbildung 3.1: Einteilung der Methoden der FDI auf Basis der verwendeten Informationen

Expertenwissen durchgeführt werden. Dann ist ein solches Verfahren gleichzeitig ein modellbasiertes Verfahren. Off-line Verfahren können aber auch datenbasierte Verfahren sein. Dies ist dann der Fall, wenn Messwerte durch zeitintensive Rechenoperationen ausgewertet werden. Ist dies nicht mehr in Echtzeit möglich, so kann nur eine off-line Analyse durchgeführt werden.

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

Eine klare Abgrenzung der Einteilung in off-line und on-line Verfahren beziehungsweise in modell- und datenbasierte Verfahren ist offensichtlich kompliziert. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den notwendigen Daten, welche zur Durchführung eines Verfahrens zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen notwendig sind. Die Einteilung, ob es sich um on-line oder off-line Verfahren handelt, ist hingegen nebensächlich. Weiterhin sind Methoden zur Fehlerfortpflanzung zu

untersuchen, die bei der Sicherheitsanalyse genutzt werden können. Eine Sicherheitsanalyse ist vor Inbetriebnahme der Anlage durchzuführen. Als Konsequenz ist die Nutzung von on-line Verfahren nur möglich, wenn die dazu benötigten Daten durch Simulationen zu erzeugen sind. Daher wird im Folgenden nur noch in modellbasierte qualitative, modellbasierte quantitative und auf historischen Messdaten basierende Verfahren unterschieden.

Die Bewertung von Verfahren der FDI basiert häufig auf dem Tennessee Eastman Benchmark (TEB). Mit Hilfe dieses Referenzmodells wird das Auftreten von Fehlern in einem standardisierten Prozess simuliert. Die Methoden der FDI werden dann dahingehend bewertet, wie viele und insbesondere auch welche Fehler durch die betrachtete Methode korrekt identifiziert wurden. Eine Implementierung des TEB ist auf der Website <http://depts.washington.edu/control/LARRY/TE/download.html> kostenfrei verfügbar.

3.3.1 Modellbasierte Quantitative Fehlerfortpflanzungsmethoden

Als modellbasierte quantitative Verfahren zur FDI werden im Rahmen dieser Arbeit Verfahren bezeichnet, welche auf Basis von „analytischer Redundanz“ Residuen generieren, die wiederum zur Fehleridentifikation und Isolation genutzt werden. Die Ausführungen im Abschnitt 3.3.1 basieren in weiten Teilen auf der Arbeit von VENKATASUBRAMANIAN u. a. [108].

Verfahren dieser Art bestehen aus zwei grundlegenden Schritten. Im ersten Schritt werden mit Hilfe eines analytischen Prozessmodells und gemessenen Größen durch Einsatz mathematischer Verfahren Residuen generiert. Diese werden im zweiten Schritt analysiert, um das Vorliegen eines Fehlers zu erkennen und diesen eindeutig zu identifizieren. In Abbildung 3.2 werden diese Schritte anschaulich dargestellt.

Ein analytisches Prozessmodell kann entweder durch einen Satz an Gleichungen oder in Form einer Black Box beschrieben werden. Analysiert man die physikalischen und chemischen Gesetze welchen ein Prozess unterliegt, so kann man Massen-, Energie-, Impuls- und Reaktionsbilanzen formulieren. Diese lassen sich allgemein als Differential-algebraische Gleichungen (Differential Algebraic

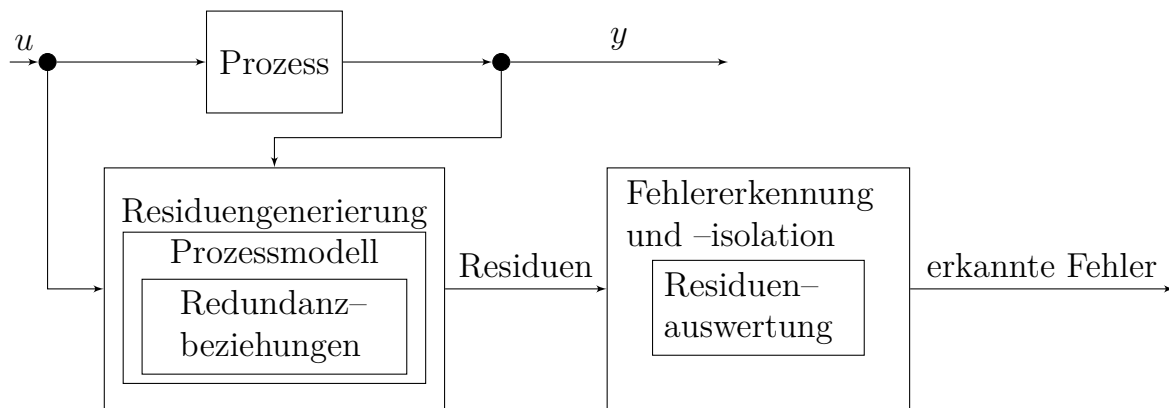


Abbildung 3.2: Diagnose und Identifikation von Fehlern auf Basis von Residuen-generatoren

Equations) (DAEs) darstellen. Betrachtet man hingegen Messwerte der Ein- und Ausgangsgrößen eines Prozesses, so kann man beispielsweise durch den Einsatz stochastischer Methoden ein Ein-Ausgangsmodell für den Prozess erstellen. Diese Art der Modellbildung bezeichnet man als „Systemidentifikation“. Zahlreiche Veröffentlichungen der Regelungstechnik behandeln dieses Thema. UNBEHAUEN bietet in „*Regelungstechnik III: Identifikation, Adaption, Optimierung*“ [96] einen Einstieg in die Systemidentifikation. Fortgeschrittene Verfahren zur Identifikation nicht-linearer Systeme werden beispielsweise von SCHRÖDER in „*Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*“ [91] vorgestellt. Physikalische Modelle zeichnen sich durch die Interpretierbarkeit der Prozessvariablen und eine genau abschätzbare Güte aus, haben aber einen hohen Entwurfs- und Berechnungsaufwand zur Folge.

Es existieren zahlreiche computergestützte Hilfsmittel, welche die Entwicklung eines Black Box Modells unterstützen und damit stark beschleunigen. Ein Beispiel dafür ist die „System Identification Toolbox™“ der Firma „Mathworks“. Black Box Modelle sind daher weniger aufwendig in der Formulierung und der Berechnung als die analytische Beschreibung eines Prozesses. Die Erstellung eines solchen Modells benötigt aber Messdaten, welche alle möglichen Betriebsbedingungen abdecken. Nur so kann ein genaues Modell erstellt werden. Die Erzeugung dieser Daten ist besonders an den Auslegungsgrenzen einer Anlage und für transiente Bedingungen kompliziert und kostspielig eventuell sogar überhaupt nicht möglich.

Ein analytisches Modell lässt sich prinzipiell durch

$$y(t) = f(u(t), w(t), x(t), \theta(t)) \quad (3.1)$$

formulieren, wobei die Systemausgangsgrößen $y(t)$ in Abhängigkeit von den Systemeingangsgrößen $u(t)$, den auf das System wirkenden Störungen $w(t)$, den Zustandsvariablen des Systems $x(t)$ und den Prozessparameter $\theta(t)$ berechnet werden.

Ein vorhandener Prozessfehler wirkt sich bei einer Systembeschreibung nach Gleichung (3.1) direkt auf die Zustandsvariablen und beziehungsweise oder auf die Prozessparameter aus. Diese können aber häufig nicht direkt gemessen werden. Die Systemein- und Systemausgangsgrößen können hingegen in der Regel entweder durch Sensoren direkt erfasst oder mit Hilfe mathematischer Modelle beobachtet werden. Die Zustandsvariablen und Prozessparameter können daher mit Hilfe geeigneter mathematischer Methoden aus Messwerten von $u(t)$ und $y(t)$ geschätzt werden. Typische Methoden der Zustands- beziehungsweise Parameterschätzung sind die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least Squares Method, LQM), die Verwendung von Kalman Filtern, die Formulierung von geeigneten Beobachterstrukturen oder der Einsatz von Paritätsgleichungen.

Die zur Berechnung der Residuen notwendigen Redundanzbeziehungen basieren auf Ein- und Ausgangsgrößen, welche voneinander nicht unabhängig sind. Die Abhängigkeiten können durch zusätzliche Hardware oder analytische Beziehungen erzeugt werden. Lässt sich die Redundanz als Gleichung formulieren und werden die Redundanzbeziehungen mit den Modellgleichungen zu einem Gleichungssystem kombiniert, so ist dieses Gleichungssystem überbestimmt. Der entstehende Freiheitsgrad der Lösung wird zur Entwicklung der Residuen genutzt.

Redundanz durch Hardware entsteht beispielsweise durch mehrere Sensoren, welche die gleiche Größe erfassen. Bei sicherheitstechnisch besonders anspruchsvollen Anwendungen wie der Luft- und Raumfahrt ist dieses Vorgehen trotz der damit verbunden gesteigerten Kosten und dem erhöhten Raumbedarf üblich. Analytische Redundanz wird erreicht, wenn sich bestimmte Sensorwerte algebraisch aus anderen Sensorwerten berechnen lassen, oder wenn es einen zeitlichen Zusammenhang zwischen der Änderung von Messwerten gibt, welcher sich analytisch beschreiben lässt. Ein Beispiel für eine solche Größe ist der Füllstand in einem Tank. Werden der Zufluss und der Abfluss durch Sensoren erfasst, so

kann der Füllstand direkt berechnet werden. Wird trotzdem ein Füllstandssensor verbaut, so führt dies zu nutzbarer Redundanz, da die zeitlichen Änderungen der drei Messwerte zueinander verträglich sein müssen. Ist dies nicht der Fall, so kann auf einen Sensordefekt, ein Leck oder auf einen anderen Fehler geschlossen werden.

Die auf Basis der analytischen Redundanzen ermittelten Residuen sollen zur Fehlerdiagnose eingesetzt werden können. Es ist daher zweckmäßig, wenn die Residuen bei Vorliegen einer Abweichung vom Sollverhalten des Prozesses signifikante Werte annehmen. Liegt keine Störung vor, so sollten die Residuen Werte nahe Null annehmen. Weiterhin ist es günstig, wenn die Residuen robust gegen zufällige Fehler wie Sensorrauschen und systematische Fehler wie Modellungenauigkeiten sind.

Als ersten Verfahrenstyp zur Residuenberechnung stellen VENKATASUBRAMANIAN u. a. die Diagnose mit Beobachtern¹ vor ([108, S. 11 ff.]). Methoden dieser Art entwickeln eine bestimmte Menge an Beobachtern, welche Residuen generieren. Jeder dieser Beobachter wird so definiert, dass er bezüglich einer definierten Menge an Fehlern sensitiv und bezüglich den restlichen Fehlern und unbekannten Größen unempfindlich ist. Die Menge der Beobachter ist derart zu strukturieren, dass jeder Fehler ein eindeutiges Muster an Residuen zur Folge hat. Wird dies erreicht, so kann das Vorliegen eines Fehlers durch stark von null abweichende Werte der Residuen erkannt und mit Hilfe der bekannten Residuenmuster identifiziert werden. Eine wichtige Besonderheit dieses Verfahren ist es, dass die Schätzung der Zustandsvariablen $x(t)$ nicht notwendig ist, statt dessen muss nur der Systemausgang durch Messung oder Schätzung ermittelt werden.

Die Formulierung von Paritätsgleichungen ist ein alternatives Vorgehen zur Generierung von Residuen (vgl. [108, S. 13 f.]). Bei diesem Vorgehen werden die Modellgleichungen geeignet umgestellt, sodass Residuenvektoren entstehen, die orthogonal zueinander sind. Die Residuenvektoren sind dann linear unabhängig und das Auftreten jedes betrachteten Fehlers wird durch genau einen Residuenvektor beschrieben. Voraussetzung zur Einsetzbarkeit dieser Methode ist, dass die Anzahl der Ausgangsgrößen größer als die der Zustandsgrößen ist. Dieser Zusammenhang wird in Definition 7 verdeutlicht.

¹ im englischen spricht man von „diagnostic observer“ oder „unknown input observer“ (UIO)

Definition 7 (Systemredundanz). *Sei ein System nach Gleichung (3.1) beschrieben und gelten die Eigenschaften*

$$\dim(y(t)) = n, \quad \dim(x(t)) = m, \quad n > m, \quad (3.2)$$

dann ist das System redundant mit dem Freiheitsgrad

$$f = n - m, \quad (3.3)$$

da das System mehr erfassbare Ausgangsgrößen als Zustände umfasst.

Mit Hilfe des Freiheitsgrades f kann dann eine Projektionsmatrix \mathbf{V} derart entworfen werden, dass für Abweichungen von jedem redundant vorhandenen Ausgangswert ein Vektor berechenbar ist, der zu den anderen Vektoren dieser Art orthogonal ist.

Paritätsgleichungen und die Verwendung von Beobachtern zur Residuenerzeugung ähneln sich sehr stark. Beide Verfahren sind ohne eine Schätzung von $x(t)$ anwendbar. Man kann sogar zeigen, dass beide Verfahren unter Verwendung der gleichen Designziele zu äquivalenten Residuen für ein fehlerbehaftetes System führen. Die Methoden der Auswertung von Residuen zur Diagnose von Fehlern sind für diese beiden Verfahren ebenfalls gleich. Üblich ist die Definition von Schwellwerten für die Residuen, bei deren Überschreiten ein Fehler als vorliegend erkannt wird.

Es gibt weitere Methoden, welche Residuen auf Basis quantitativer Modelle berechnen um so Fehler zu diagnostizieren und zu isolieren. Dazu zählen Methoden, welche die Zustandsvariablen oder Prozessparameter schätzen, um auf Basis derer Residuen zu generieren. Dies sind beispielsweise Kalman Filter und LQM (vgl. [108, S. 14 f.]). Außerdem gibt es fortgeschrittene Methoden zur Residuenberechnung wie zum Beispiel der Entwurf von gerichteten oder strukturierten Residuen² (vgl. [108, S. 15 f.]).

Bewertung modellbasierter quantitativer Methoden der FDI für modulare Anlagen

Modellbasierte quantitative Methoden bieten den großen Vorteil, dass der Anwender bei der Wahl eines Verfahrens zur Residuengenerierung viele Freiheiten

² engl. directional residuals and structured residuals

hat. Auch die Verfahren selbst bieten Möglichkeiten, um sie hinsichtlich der Erkennung bestimmter Fehler gezielt zu entwerfen. Werden entkoppelte Beobachterstrukturen geeignet entworfen, so kann jeder betrachte Fehler durch einen gesonderten Beobachter gezielt diagnostiziert werden. Dem gegenüber steht der große Nachteil der Notwendigkeit von möglichst genauen Prozessmodellen. Der Entwurf dieser Modelle ist aufwendig und häufig mit Ungenauigkeiten verbunden. Dies gilt für analytische Modelle und Black Box Modelle gleichermaßen. Weiterhin sind Analysemethoden, welche auf quantitativen Modellen basieren, in aller Regel auf die Erkennung von Fehlern, welche additiv auftreten, beschränkt. Die Erkennung von multiplikativ auftretenden Fehlern wie einem Drift von Prozessparametern ist nur in Sonderfällen möglich. Darüber hinaus müssen die Residuen zur Erkennung von Fehlern vorab definiert werden. Das Auftreten von vorab unbekannten Fehlern ist dadurch nur stark eingeschränkt möglich. Auch die Ursachenanalyse ist zumeist nicht möglich – nur das Vorliegen eines Fehlers wird diagnostiziert und der konkrete Fehler ermittelt. [108, S. 17 f.]

In Hinblick auf modular konstruierte Anlagen lässt sich feststellen, dass Methoden dieser Kategorie nicht geeignet sind, um die zur Genehmigung einer aus Modulen bestehenden Anlage notwendige Sicherheitsuntersuchung zu beschleunigen oder anderweitig zu vereinfachen.

Für die Analyse eines einzelnen Moduls könnten jedoch solche Verfahren zum Einsatz kommen. Module sollen entsprechend ihrer Definition einzeln komplett testbar sein. Daher ist die Erstellung von Ein-/Ausgangsdaten und darauf aufbauend die Entwicklung eines Black Box Modells prinzipiell möglich. Die Erstellung eines analytischen Modells durch den Modullieferanten ist ebenfalls möglich und sollte ohnehin ein Ziel des Lieferanten sein, denn auf Basis eines analytischen Modells können die im Abschnitt 2.2 geforderten Simulationsmodelle geeignet entworfen werden. Die notwendige Grundlage für modellbasierte quantitative Verfahren wäre damit zumindest auf Modulebene gegeben, jedoch verbleiben zwei bedeutende Probleme:

- der aufwendige Entwurf eines analytischen Modells der Gesamtanlage ist notwendig und
- nicht erkannte Fehler können nicht verlässlich identifiziert werden.

Zum einen ist zu erwarten, dass die Modelle der einzelnen Module noch keine

ausreichenden Informationen über die möglichen Wechselwirkungen, welche im Rahmen der Gesamtanlage auftreten können, enthalten. Ein Modell der Gesamtanlage müsste daher vor dem Einsatz von Verfahren der betrachteten Kategorie noch erstellt werden. Dies wäre nur durch analytische Ansätze möglich. Die zur Generierung von Black Box Modellen notwendigen Ein-/Ausgangsdaten müssten von der Gesamtanlage stammen, diese ist zum Zeitpunkt der durchzuführenden Sicherheitsbetrachtung aber noch gar nicht betriebsfähig. Die Durchführung praktischer Tests und die Erstellung von Messdaten ist daher keine zur Verfügung stehende Option und die Erstellung von Black Box Modellen nicht möglich. Die Erstellung von analytischen Modellen ist mit den bereits genannten Problemen des hohen Aufwands und der entstehenden Ungenauigkeiten verbunden. Die notwendige Entwicklungsleistung eines analytischen Modells reduziert damit mögliche Zeiteinsparungen bei der Sicherheitsbetrachtung maßgeblich.

Zum anderen werden vorab unbekannte Fehler durch modellbasierte quantitative Verfahren nicht verlässlich identifiziert. Das Auffinden von bisher nicht betrachteten Fehlern wird also bereits auf der Betrachtungsebene einzelner Module durch Methoden dieser Kategorie nicht ermöglicht. Durch das Verbinden von Modulen zu einer Gesamtanlage ist mit neuen Fehlerquellen und für die Anlage spezifischen möglichen Auswirkungen zu rechnen. Die Erkennung dieser neuen Fehler ist nicht möglich. Die durch Kopplung der Module potentiellen neuen Fehler sind aber genau die Fehler, welche durch die Sicherheitsuntersuchung der Gesamtanlage aufgedeckt werden müssen. Eine Vereinfachung dieser Aufgabe durch die Verwendung von modellbasierten quantitativen Verfahren zur Fehlerdiagnose ist damit nicht zu erwarten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll davon ausgegangen werden, dass die vorhandene Datenbasis aus für die einzelnen Module durchgeführten HAZOPs, Beschreibungen der Module und einer Beschreibung der Gesamtanlage besteht.

Auf dieser Basis läßt sich ein analytisches Modell der Gesamtanlage nur mit sehr großem Aufwand formulieren. Quantitative modellbasierte Verfahren der FDI bieten – wie bereits dargelegt – kaum potentielle Einsparungen bei der Sicherheitsbetrachtung der Gesamtanlage. Selbst wenn diese Verfahren der FDI anteilige Einsparungen bieten würden, so wäre die notwendige Datenbasis in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle nicht vorhanden. Daher ergibt sich zwangsläufig, dass der Einsatz modellbasierter quantitativer Verfahren nicht geeignet ist,

um mit Blick auf die Zielstellung dieser Arbeit die Fehlerfortpflanzung innerhalb einer aus Modulen bestehenden Anlage zu untersuchen.

3.3.2 Modellbasierte Qualitative Fehlerfortpflanzungsmethoden

Modellbasierte qualitative Verfahren unterscheiden sich von den modellbasierten quantitativen dadurch, wie das vorab vorhandene Wissen über den betrachteten Prozess formuliert wird. Im Fall der quantitativen Verfahren dienen dazu mathematische Gleichungen, bei den qualitativen Methoden werden die bekannten Beziehungen zwischen Prozessvariablen als relative Aussagen formuliert. Diese relativen Aussagen beschreiben zumeist eine Abhängigkeit der Wertentwicklung von Prozessvariablen zueinander. Ein solche Beziehung besteht beispielsweise zwischen dem Druck und der Temperatur in einem geschlossenen Behälter. Als qualitative Aussage kann formuliert werden, dass ein Ansteigen der Temperatur einen Druckanstieg zur Folge hat. Die Aussage lässt jedoch keinen Schluss über das Ausmaß der Änderung zu und wird daher als qualitativ bezeichnet.

Aufbauend auf qualitativen Aussagen kann ein System entworfen werden, welches zur FDI genutzt werden kann.

Die Formulierung eines qualitativen Modells wird vorwiegend durch Experten vorgenommen. Soll eine Methode zur FDI auf Basis eines qualitativen Modells angewandt werden, so ist eine Untersuchung des Modellverhaltens im Sollzustand und im fehlerbehafteten Zustand notwendig. Die Beschreibung des Sollzustandes wird im Rahmen der Prozessentwicklung durchgeführt. Eine geeignete qualitative Beschreibung des Prozesses bei Vorliegen von Fehlern wird in Folge der im Abschnitt 2.4 beschriebenen HAZOP erlangt. Es sind aber auch andere Methoden wie die im Abschnitt 2.3 benannte FMEA oder die FTA zur qualitativen Beschreibung von Fehlzuständen möglich.

Zur Darstellung einer qualitativen Systembeschreibung gibt es mehrere Möglichkeiten. Ein umfassend untersuchter Ansatz in die Verwendung von wissensbasierten Expertensystemen ³. Im Abschnitt 3.2 werden einige Systeme vorgestellt, welche als wissensbasierte Expertensysteme aufgebaut sind. Ein solches System definiert in einer für einen PC analysierbaren Weise eine vorgegebene Menge

³ engl. knowledge-based expert systems

von Aussagen, welche das Systemverhalten beschreiben. Dies geschieht zumeist durch den Einsatz von verschachtelten wenn–dann–sonst Formulierungen. Das Expertensystem kann auf Basis von vorgegebenen Zuständen die Gültigkeit der zuvor definierten Aussagen prüfen und dadurch Schlussfolgerungen ziehen. Als vorgegebener Zustand kann beispielsweise die Abweichung einer Prozessvariable vom Sollverhalten definiert werden, deren Auswirkung zu untersuchen ist. Das Expertensystem imitiert auf Basis der wenn–dann–sonst Zusammenhänge die Gedankengänge eines Menschen und ermittelt die möglichen Auswirkungen. Ein großer Vorteil des Expertensystems ist es, dass keine zuvor definierten Auswirkungen übersehen werden können. Jedoch ist das Expertensystem stets auf die zuvor definierten Systemeigenschaften beschränkt und kann keine komplett neuen Erkenntnisse entwickeln, da es auf Deduktion basiert.

Eine weitere im Rahmen von automatisierten HAZOPs erfolgreich eingesetzte Methode ist die Verwendung von SDGs. SDGs bestehen aus Knoten und gerichteten Kanten, welche durch ein Vorzeichen spezifiziert sind. Durch das Vorzeichen kann entweder ein positiver also verstärkender oder ein negativer beziehungsweise abschwächender Zusammenhang zwischen den Knoten spezifiziert werden. In Abbildung 3.3 ist ein SDG abgebildet, welcher die Beziehung zwischen den Prozessvariablen „Flow⁴“ (F) und „Level⁵“ (L) für einen Behälter angibt. Der Zufluss F hat offensichtlich eine Auswirkung auf den Füllstand L des Behälters. Eine Zunahme von F bewirkt eine Zunahme von L und eine Abnahme von F hat eine Reduktion von L zur Folge. Dieser Zusammenhang wird durch die gerichtete Kante dargestellt, welche ihren Ursprung im Knoten F hat und deren Pfeilspitze auf den Knoten L zeigt. Die Kante ist also von der Ursache auf die Wirkung gerichtet. Das Vorzeichen w kann die Zeichen \pm annehmen, wodurch die Wirkrichtung von F bezogen auf L symbolisiert wird. Das Pluszeichen beschreibt den Anstieg des Füllvolumens im Behälter und das Negativzeichen die Reduktion des Füllstandes durch den Stoffstrom.

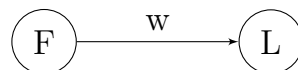


Abbildung 3.3: Darstellung eines gerichteten Digraphen mit zwei Knoten und einer gewichteten Kante

4 Stoffstrom
5 Füllstand

SDGs sind ein Spezialfall der gerichteten Graphen, da die Kanten mit einem Vorzeichen versehen werden. Gerichtete Graphen unterscheiden sich von ungerichteten Graphen dadurch, dass die Kanten eine eindeutige Richtung aufweisen. Ein Sonderfall der gerichteten Graphen sind die orientierten Graphen. Im Gegensatz zu gerichteten Graphen können bei orientierten Graphen zwei Knoten nicht durch mehr als eine Kante miteinander verbunden sein und das Vorkommen von Schleifen ist nicht möglich. Außerdem gibt es gewichtete Graphen, deren Kanten mit einem numerischen Wert „gewichtet“ werden. Durch den Einsatz von Gewichten können beispielsweise Distanzen zwischen Orten, welche als Knoten modelliert werden, geeignet dargestellt werden. Gewichtete Graphen können gerichtet oder ungerichtet sein. Eine Einführung in das Themengebiet der Graphentheorie ist im Buch „*Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*“ von KRUMKE und NOLTEMEIER zu finden [60].

Orientierte Graphen sind ungeeignet zur Darstellung von Wechselwirkungen in Verfahrenstechnischen Anlagen, da eine beidseitige Wechselwirkung zwischen Variablen möglich ist. Ein typisches Beispiel ist das Zusammenwirken von Temperatur und Druck, da die Änderung einer dieser Parameter häufig einen direkten Einfluss auf den jeweils anderen hat. Eine solche Beziehung ist mit orientierten Graphen nicht ohne weiteres darstellbar.

Der Einsatz von SDG zur Darstellung von Wechselwirkungen und der Fortpflanzung von Fehlern hat sich vielfach als geeignet erwiesen. Eine umfangreiche Literaturübersicht dazu ist in [105, S. 3 ff.] zu finden. Die Software HAZID [69, 71, 70, 72, 73] und das Werkzeug HAZOPEXpert [102] nutzen erfolgreich diese Methode. In „*SDG-based hazop and fault diagnosis analysis to the inversion of synthetic ammonia*“ [67] und „*SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process*“ [112] wird die Kopplung von HAZOP und SDG gesondert untersucht und dargelegt, wie durch Verwendung neuer Algorithmen eine effiziente Fehleranalyse möglich ist.

In Folge der Vielzahl an Veröffentlichungen, welche eine Symbiose von SDG und HAZOP nachweisen, wird trotz dessen, dass es bisher keine gesonderten Arbeiten in Bezug auf modulare Anlagen zu diesem Thema gibt, in Kapitel 4 die Einsetzbarkeit von gerichteten Graphen zur Beschreibung von Fehlerfortpflanzungen in modularen Anlagen untersucht.

Neben dem Einsatz von SDG ist auch die Anwendung von FTA als qualitative

Methode zur Beschreibung von Fehlerfortpflanzungen weitreichend untersucht (vgl. [105, S. 6]). Bei der Fehlerbaumanalyse wird mit Hilfe logischer Verknüpfungen eine bekannte Auswirkung hinsichtlich möglicher Ursachen analysiert. Die Ursachen werden durch logische Operationen derart verknüpft, dass die betrachte Auswirkung eintreten kann. Dieses Vorgehen ist dabei fehleranfällig für übersehene Kombinationen von Fehlerursachen, da dieses Verfahren nicht formal auf die vollständige Ermittlung aller Ursachen hin geprüft werden kann. Die effiziente rechnergestützte Auswertung von FTA ist jedoch ein großer Vorteil dieser Methode. Da sich die Wechselwirkungen zwischen Variablen als boolesche Gleichungen darstellen lassen sind die entwickelten Algorithmen zur Fehlerfortpflanzungsanalyse sehr schnell.

Die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Modulen einer Anlage auf Basis von FTA wurde bisher nicht gesondert untersucht. Da sich SDG besser als FTA mit HAZOP kombinieren lässt wird diese Methode nicht weiter untersucht. Eine prinzipielle Anwendbarkeit von FTA zur Beschleunigung von Sicherheitsuntersuchungen modularer Anlagen ist aber zu erwarten.

Durch Nutzung einer quantitativen Systembeschreibung beispielsweise in Form von DAEs können qualitative Systemmodelle erstellt werden, welche die Struktur und das Verhalten des betrachteten Systems beschreiben. Diese Systemmodelle reflektieren das physikalische Verhalten des Prozesses wieder und können durch Verwendung von Qualitative Simulation (qualitative simulation, QSIM) dynamisch simuliert werden. Dazu wird auf Basis von eingeschwungenen Zuständen die Menge aller möglichen Folgezustände ermittelt, welche mit definierten Randbedingungen verträglich sind. (vgl. [105, S. 6 ff.])

Dieses Vorgehen erfordert ähnlich wie die im Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Verfahren ein physikalisches Systemmodell, wodurch sich die gleichen Schwierigkeiten in Hinblick auf eine Anwendbarkeit für modulare Anlagen ergeben. Die Ermittlung der Modelle ist aufwendig und eine Wiederverwendbarkeit von Wissen, welches für die einzelnen Module entwickelt wird, ist gering. Daher werden dieses Verfahren als ungeeignet im Sinne der vorliegenden Arbeit eingestuft.

Bewertung modellbasierter qualitativer Methoden der FDI für modulare Anlagen

Qualitative Methoden der FDI benötigen Wissen über den Prozess, welches die Beziehungen von Prozessvariablen und die Wechselwirkungen zwischen diesen beschreibt. Da keine quantitativen Aussagen notwendig sind können diese Beziehungen auf Basis von weniger detaillierten Untersuchungen ermittelt werden, was den Arbeitsaufwand maßgeblich reduziert. Für die Darstellung der ermittelten Beziehungen gibt es vielfältige Methoden. Besonders hervorzuheben ist die Darstellung mit Hilfe gerichteter Graphen, da diese Methode besonders umfangreich untersucht ist und mit der Durchführung einer HAZOP harmoniert.

Die Sicherheitsanalyse von Modulen ist mit der Generierung von Expertenwissen verbunden. Derzeit gibt es zwar noch keine bekannte modellbasierte qualitative Methode zur Fehlerfortpflanzungsanalyse in modularen Anlagen, jedoch sind diese Verfahren besonders gut geeignet, um Expertenwissen zu nutzen. Deswegen ist eine Wiederverwendbarkeit dieses Wissens durch Verwendung von modellbasierten qualitativen Verfahren als besonders hoch zu bewerten. Im Kapitel 4 wird daher die Einsetzbarkeit eines ausgewählten Verfahrens dieser Kategorie untersucht.

3.3.3 auf historischen Messdaten basierende Fehlerfortpflanzungsmethoden

Die Anwendung von messdatenbasierten Verfahren beruht im Gegensatz zu modellbasierten Verfahren nicht auf der Auswertung von a priori vorhandenem Prozesswissen, sondern auf einer möglichst großen Menge an Messdaten. Diese Messdaten sind durch Versuche, den regulären Anlagenbetrieb oder Simulationen zu erzeugen. Die im Anlagenbetrieb aufgezeichneten Daten müssen je nach Verfahren Messdaten zum Normalbetrieb oder beziehungsweise und Daten zum Störbetrieb beinhalten. Das Ziel dieser Verfahren ist es zum einen vorliegende Störungen in der Anlage frühzeitig zu erkennen und zum anderen deren teilweise verkettete Ursachen zu ermitteln. Zu diesem Zweck werden Ursache-Effekt Beziehungen zwischen den Anlagenparametern ermittelt. Eine umfassende Referenz zu diesen Methoden ist in „*Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry*“ [83] zu finden. Weitere Rezensionen datenbasierter Verfahren sind in

[109, 95, 104, 120, 121] enthalten.

Die Notwendigkeit von umfangreichen Prozessdaten schließt den Einsatz von messdatenbasierten Verfahren für eine Betrachtung von Fehlerfortpflanzungen in modularen Anlagen, welche ausschließlich über eine Beschreibung der verwendeten Module und der Anordnung der Module verfügen, aus. Im Rahmen dieser Arbeit wird von diesem Datenbestand ausgegangen, weswegen diese Methoden nicht im Detail untersucht werden.

Eine prinzipielle Verwendung zur Beschleunigung der Sicherheitsuntersuchung einer modularen Anlage ist möglich, wenn detaillierte Simulationsmodelle der Gesamtanlage existieren. Im Abschnitt 2.2 wird die Notwendigkeit von Simulationsmodellen für einzelne Module dargelegt und auf Forschungsarbeit zur Lösung dieser Problematik verwiesen. In Zukunft ist daher das Vorhandensein solcher Modelle anzunehmen. Die Zusammenführung dieser Modelle zu einem Gesamtmodell für eine aus Modulen bestehende Anlage ist nichtsdestotrotz mit hohem zusätzlichem Aufwand verbunden. Diese Problemstellung bedarf daher gesonderter Forschungsarbeit.

Da den Methoden der in diesem Abschnitt betrachteten Kategorie besonders in den letzten Jahren umfangreiche Forschungsarbeit gewidmet wurde, wird die prinzipielle Funktionsweise von Methoden dieser Kategorie im Folgenden erläutert.

Messdatenbasierte Verfahren der FDI können in quantitative und qualitative Verfahren gegliedert werden. Qualitative Verfahren werden in „*A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods*“ umfassend beschrieben [109, S. 2 ff.]. Die quantitativen Methoden basieren auf der Anwendung statistischer Verfahren oder von Lernalgorithmen die Neuronale Netzen. Sie verwenden Algorithmen zur Erkennung von Mustern in Messdaten. Diese Muster werden vorab definierten Klassen zugeordnet und auf Basis dieser Klassen erfolgt eine Interpretation der Messdaten.

Durch den Einsatz von Kreuzkorrelation kann beispielsweise die Zeitverzögerung zwischen Prozessgrößenänderungen berechnet und daraus eine Struktur der Abhängigkeiten abgeleitet werden. Die so entstehende kausale Abfolge von Ereignissen lässt sich als Graph darstellen und dient der Diagnose von Fehlerfortpflanzungen. [5]

In der aktuellen Arbeit „*A deep belief network based fault diagnosis model for*

complex chemical processes“ ist eine umfassende Übersicht zu datenbasierten Verfahren zu finden [121]. Besonders weit verbreitete statistische Verfahren sind die

- Singulärwertzerlegung (Principle component analysis, PCA) und die
- Regression mit partiellen kleinsten Quadraten (Partial Least Squares, PLS).

PCA ist ein Verfahren der multivariaten Statistik, mit Hilfe dessen die Korrelation in einer großen Datenmenge effizient durch eine geringe Anzahl an Variablen beschrieben werden kann. PLS ist eine Methode der multivariaten linearen Regression, welche besonders flexibel einsetzbar ist. Eine Bewertung von PCA und PLS gegenüber anderen statistischen Methoden wird anhand des TEB von YIN u. a. in „*A comparison study of basic data-driven fault diagnosis and process monitoring methods on the benchmark Tennessee Eastman process*“ vorgestellt [119].

Weiterhin wird in [121] eine datenbasierte Risikoanalyse auf Basis von Deep Learning vorgeschlagen. Dazu wird ein Deep Belief Network (DBN) eingesetzt, dessen Schichten aus Beschränkte Boltzmann-Maschinen (Restricted Boltzmann Machines) (RBNs) bestehen. Diese Kombination hat eine verbesserte Identifikation von Fehlern zur Folge, wie anhand des TEB nachgewiesen wird. Die vorgestellte Methode benötigt zum Training der Struktur eine große Mengen an Messdaten, welche insbesondere eine große Anzahl an Daten zu Fehlfunktionen in der Anlage enthalten sollen.

Die Kombination von statistischen Verfahren mit denen der Mustererkennung kann die Identifikation von Fehlern ebenfalls verbessern. In „*A Hybrid Method for Process Fault Detection and Diagnosis*“ zeigen MALLICK und IMTIAZ, wie durch eine Kombination von PCA mit Bayes'sche Netze (Bayesian Belief Network, BBN) Fehler in Anlagen diagnostiziert werden können [68]. Mit Hilfe historischer Daten zur Prozessdynamik, durch Formulierung von Differentialgleichungen oder durch Expertenwissen wird ein initiales BBN aufgestellt. Aus Messdaten des Normalbetriebs wird das PCA aufgebaut und das BBN verbessert. Im Betrieb der Anlage kann dann in Echtzeit das Vorliegen eines Fehlers und dessen Ursache erfolgreich erkannt werden.

Fehlerfortpflanzung in modularen Anlagen durch Einsatz von Graphen

4

Im Kapitel 3 werden verschiedene Methoden der Fehlererkennung und Fehlerisolation (fault detection and isolation, FDI) hinsichtlich einer Verwendbarkeit für die Untersuchung von modularen Anlagen bewertet. Die vorgestellten Methoden werden dazu in drei Kategorien eingeteilt, welche sich maßgeblich hinsichtlich der Informationen unterscheiden, welche zur Anwendung der Methoden notwendig sind. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Beschreibung einzelner Module, die HAZOP-Studien der Module und eine Beschreibung der modularen Gesamtanlage vorliegt. Das vorhandene Wissen besteht also aus Expertenwissen und Informationen über die Kopplung der Module. Das vorhandene Wissen umfasst also keinerlei Messdaten, weswegen die im Abschnitt 3.3.3 vorgestellten datenbasierten Verfahren der FDI als ungeeignet bewertet werden.

Die im Abschnitt 3.3.1 vorgestellten quantitativen modellbasierten Verfahren benötigen ein geeignetes quantitatives Modell der Gesamtanlage. Die Erstellung dieser Modelle ist aufwendig und mögliche Zeiteinsparungen daher gering, die Wiederverwendbarkeit limitiert und die Nutzung von vorhandenem Wissen über die einzelnen Module kompliziert. Daher werden auch diese Methoden als nicht geeignet eingestuft.

Im Abschnitt 3.3.2 werden die modellbasierten qualitativen Verfahren vorgestellt. Diese nutzen a priori vorhandenes Wissen über den betrachteten Prozess und entwickeln darauf aufbauend ein Modell des Systemverhaltens. Diese Art von Wissen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als vorhanden angenommen. Die erfolgreiche Nutzung von Expertenwissen zur Analyse von Fehlerfortpflanzungen wird im Abschnitt 3.2 anhand zahlreicher Verfahren zur Automatisierung von

HAZOPs dargelegt. Die vorgestellten Methoden der qualitativen modellbasierten FDI werden als prinzipiell geeignet bewertet, um die Fehlerfortpflanzung von Prozessabweichungen innerhalb modularer Anlagen zu untersuchen, da diese Methoden im industriellen Maßstab durch Einsatz von wiederverwendbarem Detailwissen erfolgreich für Fehlerfortpflanzungsbetrachtungen eingesetzt wurden. Derzeit existieren noch keine bekannten Verfahren, welche direkt für aus Modulen bestehende Anlagen eingesetzt werden können. Problematisch ist die Beschreibung des Auswirkungen einer Kopplung der Module und die konkrete Verwendung des über die einzelnen Module vorhandenen Wissens. In diesem Kapitel wird die Anwendung von gerichteten Graphen skizziert, um dieses Problem zu lösen. Die Anwendung anderer modellbasierter qualitativer Verfahren ist möglich und sollte gezielt untersucht werden. Gerichtete Graphen sind die allgemeine Form von Vorzeichenbehafteter gerichteter Graph (Signed Digraph, SDG). Deren Verwendung ist besonders weit verbreitet und es existieren zahlreiche Softwares zur Computer-gestützten Implementierung. Ein kostenloses Werkzeug ist auf der Website <http://www.graphviz.org/> zu beziehen. Hier wird jedoch eine Implementierung mit Hilfe von Matlab Simulink[®] durchgeführt, da dieses Werkzeug besonders weit in der Industrie verbreitet ist.

Die Verwendung von Graphen bietet die Möglichkeit einer teil automatisierten Erstellung, allerdings wird das Ergebnis weder plausibilisiert noch bildet es zeitliche Zusammenhänge ab (vgl. [117]). Der Einsatz von Gewichten macht eine Bewertung der Wahrscheinlichkeiten von Fehlerfortpflanzungen möglich, diese Möglichkeit bleibt in der vorliegenden Arbeit aber ungenutzt, da kein Wissen über konkrete Wahrscheinlichkeiten vorhanden ist. Statt dessen wird im folgenden Abschnit 4.1 gezeigt, wie auf Basis von HAZOP-Studien einzelner Modelle Graphen erzeugt werden können, welche die bereits analysierten Wechselwirkungen abbilden. Anschließend wird im Abschnitt 4.2 dargelegt, wie die bekannte Kopplung der Module zu einer Gesamtanlage zum Verbinden dieser Graphen genutzt werden kann. Der so entstehende Gesamtgraph wird dann auf die Beschreibung von modulübergreifenden Wechselwirkungen hin untersucht.

4.1 Algorithmus zur Erstellung von gerichteten Graphen auf Basis von HAZOP-Studien

Die Auswertung von textbasierten Informationen durch Software ist besonders gut geeignet, wenn diese Informationen strukturiert sind. Dazu ist die Verwendung einer Ontologie sinnvoll. Hier wird die Analyse einer modularisierten Ethylacetatanlage nach [87, 86] genutzt, welche nicht derart strukturiert ist. Im Folgenden wird ein Modul bestehend aus Zulauf, Tank mit Rührer und Pumpe im Ablauf betrachtet, welches in Abbildung A.1 abgebildet ist. Die dazu vorliegende HAZOP ist in Tab. B.1 zu finden. Betrachtet werden die physikalischen Größen Fluss und Füllstand. Deren Wechselwirkung soll durch einen Graphen basierend auf der vorhandenen HAZOP dargestellt werden.

Da der zu konstruierende Graph auf der HAZOP basieren soll, müssen die vorhandenen Informationen geeignet verarbeitet werden. Dazu dient die Funktion „buildGraphForModule“. Sie liest aus einem bestimmten Bereich eines wählbaren Arbeitsblattes einer spezifizierten Excel Datei die Daten aus. Die Daten werden anschließend analysiert.

Im ersten Schritt werden die Variablen Füllstand und Fluss durch die Buchstaben L und F respektive ersetzt und mit einer Zahl kombiniert, welche die Nummer des analysierten Moduls widerspiegelt. Weiterhin wird diese Abkürzung mit dem in der Spalte „unit“ definierten Text kombiniert. Das Ergebnis wird im Graphen als Knoten dargestellt. Der Eingangsstrom wird durch den Knoten *in1F1*, der Ausgangsstrom durch den Knoten *out1F1* und der Füllstand im Tank mit Hilfe des Knotens *tankL1* abgebildet.

Im zweiten Schritt werden die Auswirkungen von Abweichungen betrachtet. Diese können entweder auf Prozessvariablen im Modul, auf externe Variablen oder auf Equipment wirken. Da in der Implementierung nur Durchfluss und Füllstand betrachtet werden, ist eine Wirkung auf andere als diese Größen in der Verarbeitung gleichbedeutend mit einer Wirkung auf Equipment. Solche Auswirkungen werden durch spezielle Knoten dargestellt, welche durch den Buchstaben *C* und eine Zahlenkette identifiziert werden. In Abbildung 4.1 wird das Ergebnis der Graphenbildung für das Tankmodul 1 dargestellt.

In Abbildung 4.1 ist beispielsweise die Auswirkung vom Eingangsstrom auf das Tankvolumen und dessen Wirkung auf den Rest des Moduls dargestellt.

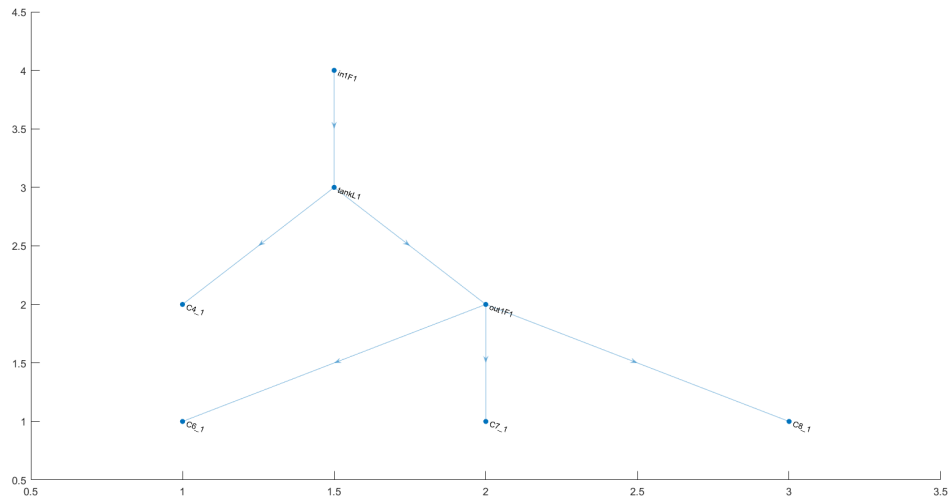


Abbildung 4.1: Digraph von Tankmodul 1 auf Basis der HAZOP

Entsprechend der in Tab. B.1 dargestellten HAZOP hat der Stoffstrom vom Eingang je nach betrachteter Abweichung verschiedene Auswirkungen auf das Tankvolumen. Diese möglichen Auswirkungen können mit Hilfe der Funktion „findConsequenceOfDeviation“ ermittelt werden. Diese Funktion liefert alle Auswirkungen auf einen betrachteten Knoten, welche durch Abweichungen von benachbarten Knoten entstehen können. Für den Knoten *tankL1* liefert die Funktion daher die möglichen Auswirkungen *less_tankL1*, *more_tankL1*, *less_tankL1*. Dies entspricht den in Tab. B.1 untersuchten Fehlerfällen mit der ID 1 – 3.

Der Knoten *C4_1* repräsentiert eine Auswirkung auf ein Equipment. Die Anwendung der Funktion „findConsequenceOfDeviation“ auf diesen Knoten liefert die Information, dass es sich um die Auswirkung „more pressure“ handelt. Durch Anwendung der Funktion „findDeviationforConsequence“ ergibt sich, dass die Abweichung, welche zu dieser Auswirkung geführt hat, „more tankL1“ ist. Als Ursache für diese Abweichung kann mit Hilfe von „findCauseForDeviation“ die Information „ID=2“ ermittelt werden. Die Möglichkeit eines Sensorfehlers als Ursache für die Abweichung „more tankL1“, welche die Auswirkung „more pressure“ erzeugt, wird nicht angegeben. Der Grund dafür ist der limitierte Algorithmus, welcher die HAZOP-Studie automatisiert in einen gerichteten Graphen übersetzt.

In Abb. 4.2 ist dargestellt was passiert, wenn die Syntax in der verarbeiteten HAZOP nicht der erwarteten Syntax entspricht. Das in Abb. A.2 dargestellte Modul 2 sollte erwartungsgemäß das gleiche Verhalten wie Modul 1 aufweisen,

wenn der zweite Eingang von Modul 2 nicht betrachtet wird. Die verwendete HAZOP für Modul 2 ist in Tab. B.2 zu finden. Im Vergleich zu Tab. B.1 zeigen sich vor allem Unterschiede in der Beschreibung der Auswirkungen von Abweichungen. Statt *less tanklevel* ist der Fehlerfall 1 in Tab. B.2 durch *less level* beschrieben. Durch diese syntaktische Abweichung scheitert der Algorithmus bei der Zuordnung dieser Auswirkung zur Prozessvariable *tankL2*. In Folge dessen wird ein neuer Knoten *L2* generiert, welcher die betrachtete Auswirkung eines sinkenden Füllstandes symbolisiert. Die Information der in der HAZOP identifizierten Wechselwirkung geht dabei verloren.

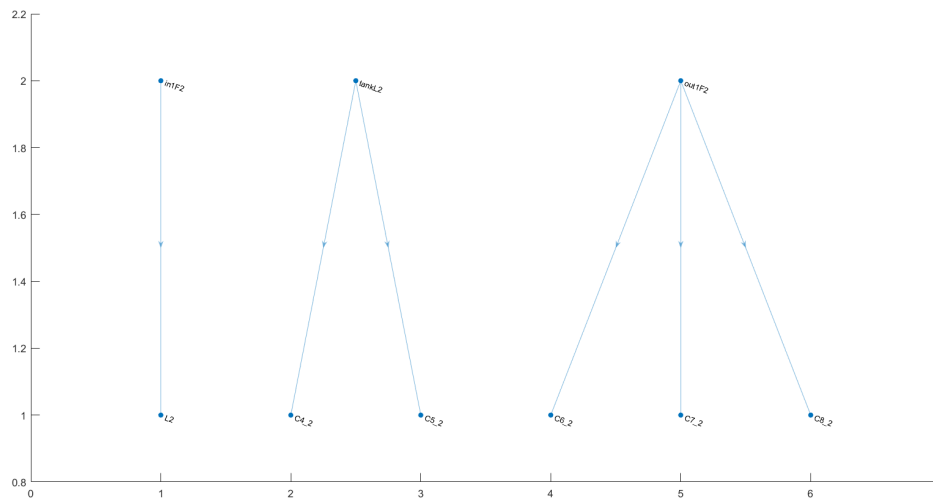


Abbildung 4.2: Digraph von Modul 2 auf Basis der HAZOP mit syntaktischen Abweichungen

Entspricht die Syntax aller drei Module den Erwartungen, so kann ein Graph mit drei Subgraphen generiert werden, welcher in Abb. 4.3 abgebildet ist. Die Module 1 und 2 weisen in diesem Fall jeweils eine Kopplung vom Eingangsstrom über das Tankvolumen zum Ausgangsstrom auf. Das in Abb. A.3 dargestellte dritte Modul besteht aus drei Teilgraphen. Es weist entsprechend der in Tab. B.3 dargestellten HAZOP keine Wechselwirkung zwischen den betrachteten Prozessgrößen auf. Die Kopplung der drei Module wird im folgenden Abschnitt 4.2 erläutert.

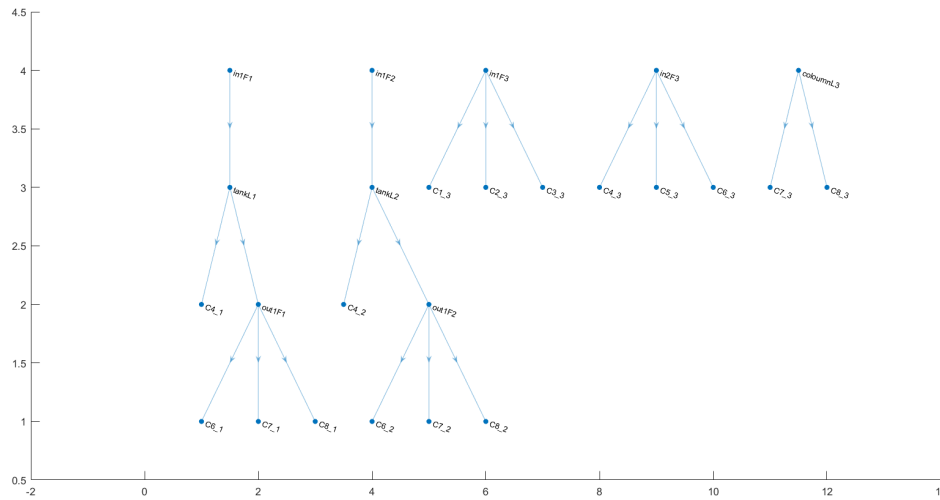


Abbildung 4.3: Digraph vom Gesamtsystem mit korrekter Syntax der HAZOP

4.2 Kopplung von Graphen und Fehlerfortpflanzung

Anhand der HAZOP von einzelnen Modulen können entsprechend dem im Abschnitt 4.1 beschriebenen Algorithmus gerichtete Graphen erzeugt werden, welche die in der HAZOP enthaltenen Informationen widerspiegeln. Wird eine Anlage aus Modulen zu einer Gesamtanlage kombiniert, so enthält das P&ID der Gesamtanlage die notwendigen Informationen, um die Kopplung der Module zu beschreiben. Diese Informationen sind Abb. A.4 zu entnehmen.

Die physische Kopplung von Modulen erfolgt durch Einsatz von Rohren. Die Funktion „connectPipe“ ist daher der Funktionsweise eines Rohres nachempfunden. Innerhalb eines Rohres kann es bezüglich des Durchflusses zu Abweichungen kommen. Ursache dafür können Lecks oder Hindernisse im Rohr sein. Weiterhin kann ein Rohr als passive Komponente keine Abweichungen kompensieren sondern es leitet diese an angrenzende Module weiter. Die Verbindung von zwei Modulen wird durch Einführung eines neuen Knoten symbolisiert, welcher Abweichungen bezüglich eines Stoffstromes vom Vorgängermodul an das Nachfolgemodul weiterleitet. In Abb. 4.4 ist die Gesamtanlage dargestellt. Die Module 1 und 2 wurden dabei mit Hilfe der beschriebenen Funktion „connectPipe“ unter expliziter Angabe der Knoten verbunden.

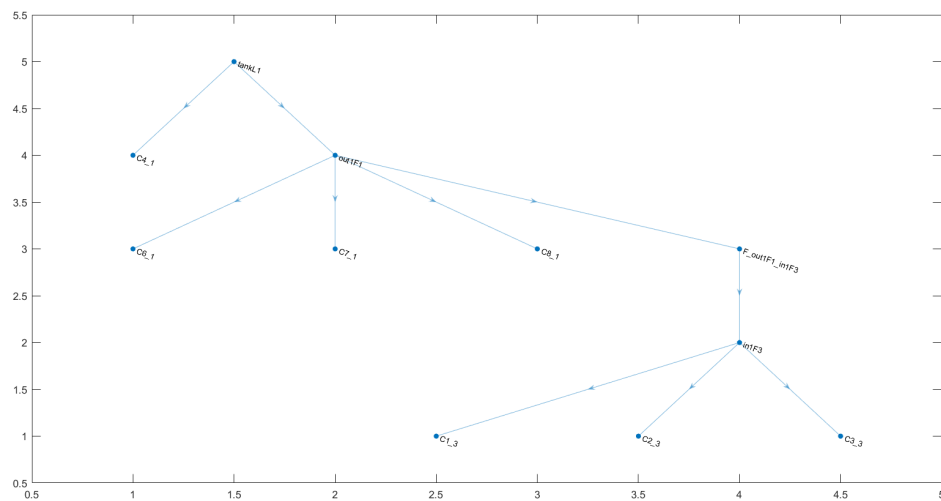


Abbildung 4.5: Auswirkung einer Abweichung des Füllstandes im Tank von Modul 1 auf das Gesamtsystem

die Fortpflanzung von Fehlern untersuchen kann. Aussagen darüber, ob die derart ermittelten Fehler in einem Modul erkannt und beherrscht werden können sind derzeit nicht möglich, da zum entwickeln eines geeigneten Algorithmus die Festlegung einer Ontologie erforderlich ist. Ohne Festlegung einer Ontologie müsste eine Syntax definiert werden, mit Hilfe derer die notwendigen Informationen dargestellt werden. Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt wird ist dieses Vorgehen bei komplexen, textuell basierten Informationen jedoch sehr fehleranfällig. Weiterhin ist die Datenbasis um derartige komplexe Untersuchungen durchzuführen derzeit zu gering.

Methoden der funktionalen und strukturellen Zerlegung von Prozessen wurden nicht gesondert betrachtet (vgl. [105, S. 9 ff.])

Weitere Methoden zur Darstellung von Wechselwirkungen:

- Verwendung von Zustandsautomaten [41, 42]: Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbetrachtung von Chemieanlagen während der Planungsphase wird vorgestellt. Die Modellierung des Systems als Zustandsautomat erweist sich als sehr aufwendig und ist damit ohne Computer-gestützte Methoden nicht empfehlenswert.
- Verwendung von Automaten [27]: 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.

Literaturverzeichnis

- [1] Bilal M. Ayyub. *Risk Analysis in Engineering and Economics*. 2. Aufl. Chapman und Hall/CRC, 2014.
- [2] 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.
- [3] John Baillieul und Tariq Samad, Hrsg. *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer London, 2015.
- [4] 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.
- [5] Margret Bauer und Nina F. Thornhill. „A practical method for identifying the propagation path of plant-wide disturbances“. In: *Journal of Process Control* 18.7 (2008), S. 707–719.
- [6] 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.
- [7] Peter L. Bernstein. *Against the Gods: The Remarkable Story of Risk*. Wiley, 1998.
- [8] Sanofi-Aventis Bleuel u. a. *NE 148: Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen*. Techn. Ber. NAMUR, 2013.
- [9] Dr. Michael Böhmer u. a. *Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)*. 2016.

- [10] 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.
- [11] 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).
- [12] Christian Bramsiepe und Gerhard Schembecker. „Die 50 % – Idee: Modularisierung im Planungsprozess“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 581–587.
- [13] 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.
- [14] 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).
- [15] Catherine A. Catino und Lyle H. Ungar. „Model-based approach to automated hazard identification of chemical plants“. In: *AIChE Journal* 41.1 (1995), S. 97–109.
- [16] CCPS. *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [17] CCPS. *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2012.
- [18] CCPS. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [19] CCPS. *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis*. JOHN WILEY & SONS INC, 2015.
- [20] CCPS. *Guidelines for Managing Process Safety Risks During Organizational Change*. JOHN WILEY & SONS INC, 2013.

- [21] CCPS. *Guidelines for Process Safety Acquisition Evaluation and Post Merger Integration*. JOHN WILEY & SONS INC, 2010.
- [22] CCPS. *Guidelines for Process Safety Metrics*. 1. Aufl. JOHN WILEY & SONS INC, 2009.
- [23] CCPS. *Guidelines for Risk Based Process Safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [24] CCPS. *Guidelines for Safe and Reliable Instrumented Protective Systems*. JOHN WILEY & SONS INC, 2007.
- [25] CCPS. *Guidelines for the management of change for process safety*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [26] CCPS. *Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach*. JOHN WILEY & SONS INC, 2008.
- [27] 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.
- [28] Frank Crawley und Brian J. Tyler. *HAZOP: Guide to Best Practice*. Elsevier - Health Sciences Division, 2015. 168 S.
- [29] Andreas Dengel. *Semantische Technologien*. Springer Spektrum, 2012.
- [30] *Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung – Eine Handlungshilfe für Behörden und Betreiber – Stand 01.03.2009*. 2009.
- [31] *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).
- [32] *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).

- [33] Peter Dietz und Uwe Neumann. „Verfahrenstechnische Maschinen — Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 72.1-2 (2000), S. 9–16.
- [34] *DIN EN 61511-1:2005-05, Funktionale Sicherheit–Sicherheitstechnische Systeme für die Prozess-industrie–Teil 1: Allgemeines*. 2005.
- [35] *DIN EN 61882:2017-02, HAZOP–Verfahren (HAZOP-Studien) – Anwendungsleitfaden*. 2017.
- [36] Jordi Dunjó u. a. „Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review“. In: *Journal of Hazardous Materials* 173.1-3 (2010), S. 19–32.
- [37] Christoph Fleischer u. a. „Sicherheitstechnische Aspekte bei Planung und Bau modularer Produktionsanlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.9 (2015), S. 1258–1269.
- [38] Christoph Fleischer-Trebes u. a. „Planungsansatz für modulare Anlagen in der chemischen Industrie“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2016).
- [39] Zhiwei Gao, Carlo Cecati und Steven X Ding. „A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62.6 (2015), S. 3757–3767.
- [40] Zhiwei Gao, Carlo Cecati und Steven X Ding. „A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques–Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62.6 (2015), S. 3768–3774.
- [41] Holger Graf. „Ein modellbasierter Ansatz zur rechnergestützten Sicherheitsbetrachtung von Chemieanlagen während der Planungsphase“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2000.
- [42] 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.
- [43] Ignacio E. Grossmann und Arthur W. Westerberg. „Research challenges in process systems engineering“. In: *AIChE Journal* 46.9 (2000), S. 1700–1703.

- [44] 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.
- [45] Łukasz Hady und Günter Wozny. „Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 597–614.
- [46] Ulrich Hauptmanns. *Prozess- und Anlagensicherheit*. Springer, 2013.
- [47] Christoph Helling u. a. „Fundamentals towards a Modular Microstructured Production Plant“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 892–904.
- [48] 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.
- [49] Lukas Hohmann u. a. „Modules in process industry - A life cycle definition“. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 111 (2017), S. 115–126.
- [50] 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.
- [51] Kurt Jensen. *Coloured Petri Nets Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Hrsg. von Wilfried Brauer, Grzegorz Rozenberg und Arto Salomaa. Bd. 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
- [52] Mateja Kavčič und Dani Juričić. „CAD for fault tree-based diagnosis of industrial processes“. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 14.2 (2001), S. 203–216.
- [53] 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.

- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Trevor A Kletz. „Hazop—past and future“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 55.3 (1997), S. 263–266.
- [57] Norbert Kockmann. „Scale-up-fähiges Equipment für die Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 646–659.
- [58] Norbert Kockmann. „Sicherheitsaspekte bei der Prozessentwicklung und Kleinmengenproduktion mit Mikroreaktoren“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 715–726.
- [59] Norbert Kockmann u. a. „Safety assessment in development and operation of modular continuous-flow processes“. In: *Reaction Chemistry & Engineering* (2017).
- [60] Sven Krumke und Hartmut Noltemeier. *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. Springer-Verlag, 2012.
- [61] Jürgen Lang, Frank Stenger und Rüdiger Schütte. „Chemieanlagen der Zukunft - Unikate und/oder Module“. In: *Chemie Ingenieur Technik* (2012), S. 883–884.
- [62] H. G. Lawley. „Operability studies and hazard analysis“. In: *Chemical Engineering Progress* 70 (1974), S. 45–56.
- [63] 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.
- [64] Stefan Lier, Dominik Wörsdörfer und Marcus Grünewald. „Transformable Production Concepts: Flexible, Mobile, Decentralized, Modular, Fast“. In: *ChemBioEng Reviews* 3.1 (2016), S. 16–25.

- [65] Stefan Lier u. a. „Modulare Verfahrenstechnik: Apparateentwicklung für wandlungsfähige Produktionssysteme“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 88.10 (2016), S. 1444–1454.
- [66] Jan Limbers. *AKTUALISIERUNG: DIE DEUTSCHE CHEMISCHE INDUSTRIE 2030*. 2016.
- [67] 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.
- [68] Md Raihan Mallick und Syed A Imtiaz. „A Hybrid Method for Process Fault Detection and Diagnosis“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46.32 (2013), S. 827–832.
- [69] S.A. McCoy u. a. „HAZID, a computer aid for hazard identification: 1. The STOPHAZ Package and the HAZID Code: An Overview, the Issues and the Structure“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 77.6 (1999), S. 317–327.
- [70] SA McCoy u. a. „HAZID, a computer aid for hazard identification: 2. Unit model system“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 77.6 (1999), S. 328–334.
- [71] SA McCoy u. a. „HAZID, a computer aid for hazard identification: 3. The fluid model and consequence evaluation systems“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 77.6 (1999), S. 335–353.
- [72] SA McCoy u. a. „HAZID, a computer aid for hazard identification: 4. Learning set, main study system, output quality and validation trials“. In: *Process Safety and Environmental Protection* 78.2 (2000), S. 91–119.
- [73] SA McCoy u. a. „HAZID, a computer aid for hazard identification: 5. future development topics and conclusions“. In: *Process safety and environmental protection* 78.2 (2000), S. 120–142.
- [74] El-Arkam Mechhoud, Mounira Rouainia und Manuel Rodriguez. „A new tool for risk analysis and assessment in petrochemical plants“. In: *Alexandria Engineering Journal* 55.3 (2016), S. 2919–2931.
- [75] 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.

- [76] Michael Obst, Falk Doherr und Leon Urbas. „Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering“. In: *at - Automatisierungstechnik* 61.2 (2013), S. 103–108.
- [77] Michael Obst u. a. „Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 55.01-02 (2013), S. 24.
- [78] Michael Obst u. a. „Beschreibung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 57.01-02 (2015), S. 48.
- [79] Michael Obst u. a. „Semantic description of process modules“. In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- [80] Andrea Ohle u. a. „Modularisierung von Gaswäschern für die CO₂-Entfernung aus Biogas“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 86.5 (2014), S. 640–648.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] Nicola Paltrinieri und Faisal Khan. *Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry*. Elsevier Science & Technology, 2016. 284 S.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] Annett Pfeffer. „HAZOP studies for engineering safe modular process plants“. accepted.

- [87] Annett Pfeffer. „Modularisierung Der Ethylacetatanlage“. PLT-BERICHT 2016-05-B.
- [88] 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.
- [89] Netta Liin Rossing u. a. „A functional HAZOP methodology“. In: *Computers & Chemical Engineering* 34.2 (2010), S. 244–253.
- [90] Johannes Rottke u. a. „Efficient Engineering by Modularization into Package Units“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.6 (2012), S. 885–891.
- [91] Dierk Schröder. *Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*. Springer-Verlag, 2010.
- [92] 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.
- [93] Ina Sell, Denise Ott und Dana Kralisch. „Lebenszykluskostenanalyse zur Entscheidungsunterstützung in der chemischen Prozessentwicklung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 85.4 (2013), S. 447–454.
- [94] *The CoPIRIDE Project*. 2010. URL: <http://www.copiride.eu/> (besucht am 23.04.2017).
- [95] Nina F. Thornhill und Alexander Horch. „ADVANCES AND NEW DIRECTIONS IN PLANT-WIDE CONTROLLER PERFORMANCE ASSESSMENT“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 39.2 (2006). 6th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, S. 29–36.
- [96] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik III: Identifikation, Adaption, Optimierung*. 6. Aufl. Vieweg +Teubner Verlag, 2010.
- [97] Leon Urbas u. a. „Automatisierung von Prozessmodulen“. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 54.01-02 (2012), S. 44.
- [98] Leon Urbas u. a. „Modularisierung und Prozessführung“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 615–623.
- [99] Hülya Uzuner. „Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von R&I-Fließbild Designprozessen auf der Grundlage eines modulbasierten Ansatzes“. Diss. Technische Universität Dortmund, 2012.

- [100] Hülya Uzuner und Gerhard Schembecker. „Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84.5 (2012), S. 747–761.
- [101] 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.
- [102] Ramesh Vaidhyanathan und Venkat Venkatasubramanian. „Digraph-based models for automated HAZOP analysis“. In: *Reliability Engineering & System Safety* 50.1 (1995), S. 33–49.
- [103] Ramesh Vaidhyanathan, Venkat Venkatasubramanian und Frederick T Dyke. „HAZOPExpert: An expert system for automating HAZOP analysis“. In: *Process Safety Progress* 15.2 (1996), S. 80–88.
- [104] Andreas Varga. „New computational paradigms in solving fault detection and isolation problems“. In: *Annual Reviews in Control* 37.1 (2013), S. 25–42.
- [105] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy und Surya N. Kavuri. „A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies“. In: *Computers & Chemical Engineering* 27.3 (2003), S. 313–326.
- [106] Venkat Venkatasubramanian und Ramesh Vaidhyanathan. „A knowledge-based framework for automating HAZOP analysis“. In: *AIChE Journal* 40.3 (1994), S. 496–505.
- [107] Venkat Venkatasubramanian, Jinsong Zhao und Shankar Viswanathan. „Intelligent systems for HAZOP analysis of complex process plants“. In: *Computers & Chemical Engineering* 24.9-10 (2000), S. 2291–2302.
- [108] Venkat Venkatasubramanian u. a. „A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods“. In: *Computers & chemical engineering* 27.3 (2003), S. 293–311.
- [109] Venkat Venkatasubramanian u. a. „A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods“. In: *Computers & chemical engineering* 27.3 (2003), S. 327–346.

- [110] Olaf Wachsen u. a. „Anforderungen der zukunftsorientierten Spezialchemie an die angewandte Reaktionstechnik“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87.6 (2015), S. 683–693.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] Sachari Wassilew u. a. „Abbildung des NAMUR Module Type Package auf OPC UA“. In: *at - Automatisierungstechnik* 65.1 (2017), S. 49–59.
- [114] 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.
- [115] Klaus H Weber. *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen: Praxis-handbuch mit Checklisten und Beispielen*. 2. Aufl. Springer-Verlag, 2016.
- [116] Statistisches Bundesamt Wiesbaden. *Bruttoinlands-Produkt 2016 Für Deutschland*. 2017.
- [117] Fan Yang, Sirish L. Shah und Deyun Xiao. „SDG (Signed Directed Graph) Based Process Description and Fault Propagation Analysis for a Tailings Pumping Process“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43.9 (2010), S. 50–55.
- [118] Ruey-Jen Yang u. a. „A comprehensive review of micro-distillation methods“. In: *Chemical Engineering Journal* 313 (2017), S. 1509–1520.
- [119] Shen Yin u. a. „A comparison study of basic data-driven fault diagnosis and process monitoring methods on the benchmark Tennessee Eastman process“. In: *Journal of Process Control* 22.9 (2012), S. 1567–1581.
- [120] S. Yin u. a. „A Review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.11 (2014), S. 6418–6428.

- [121] Zhanpeng Zhang und Jinsong Zhao. „A deep belief network based fault diagnosis model for complex chemical processes“. In: *Computers & Chemical Engineering* (2017).
- [122] 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.
- [123] 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.

Anhang

A	Anhang von Bildern	A-2
B	Anhang von Tabellen	A-7

Anhang von Bildern



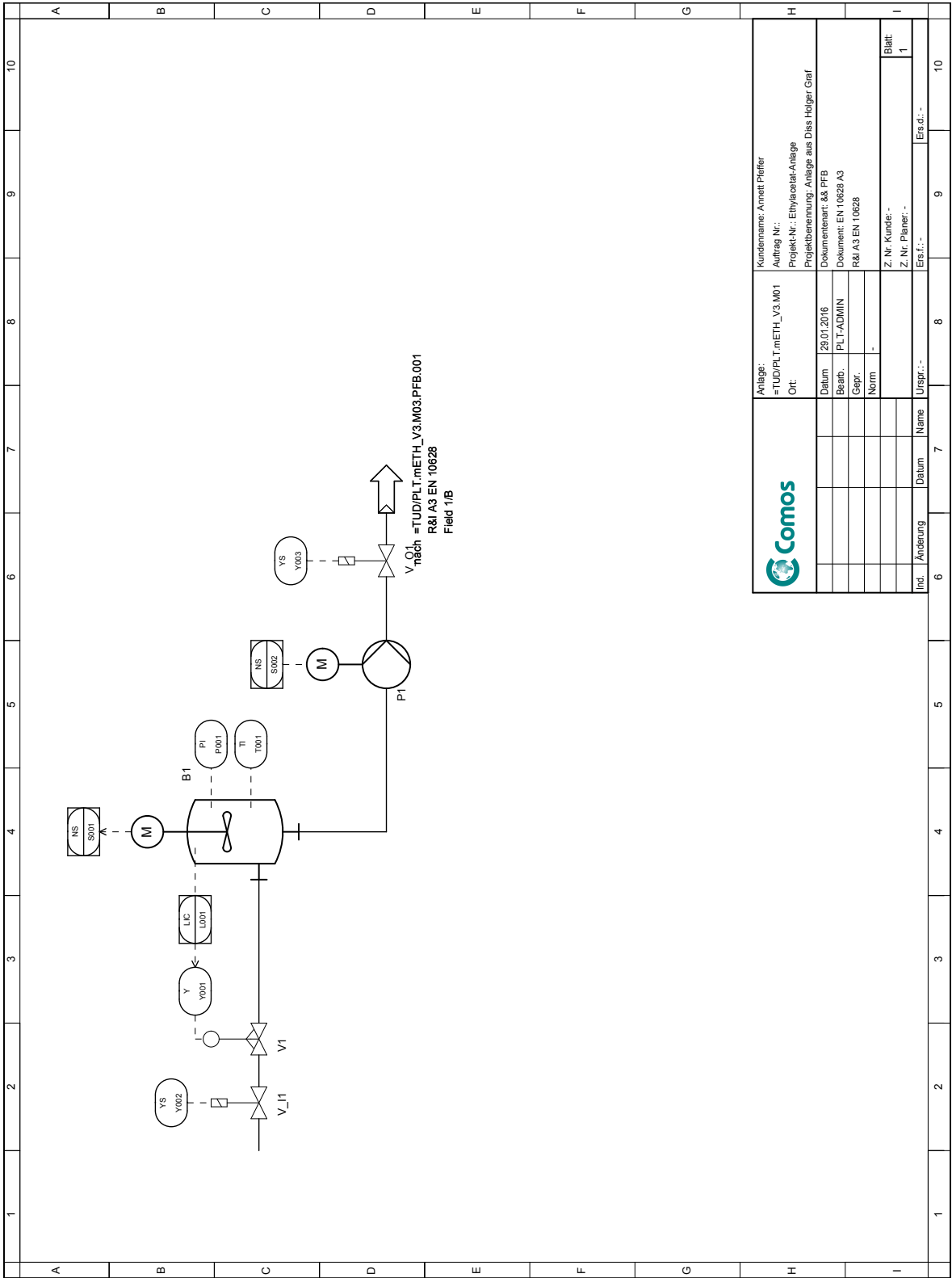
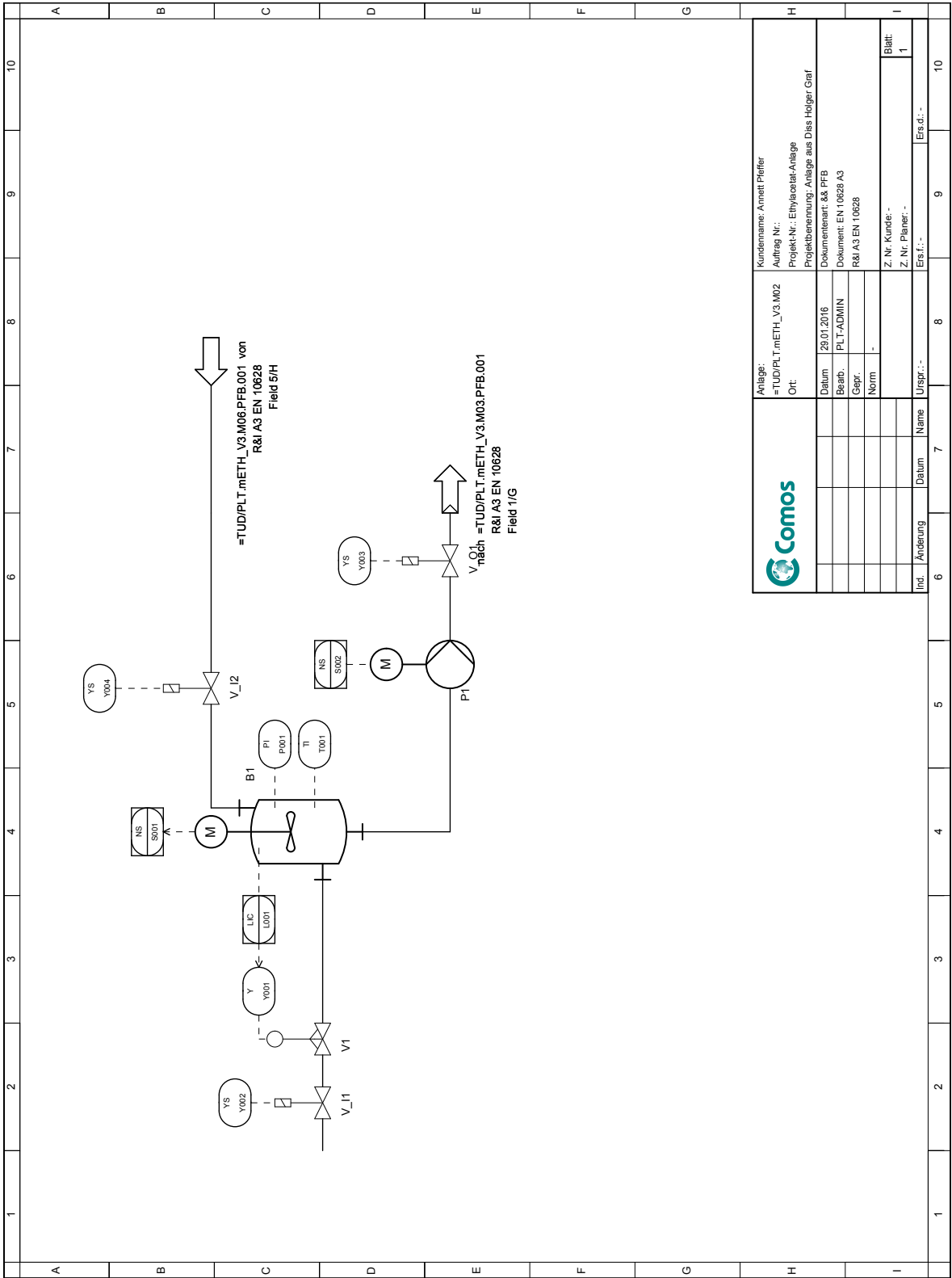
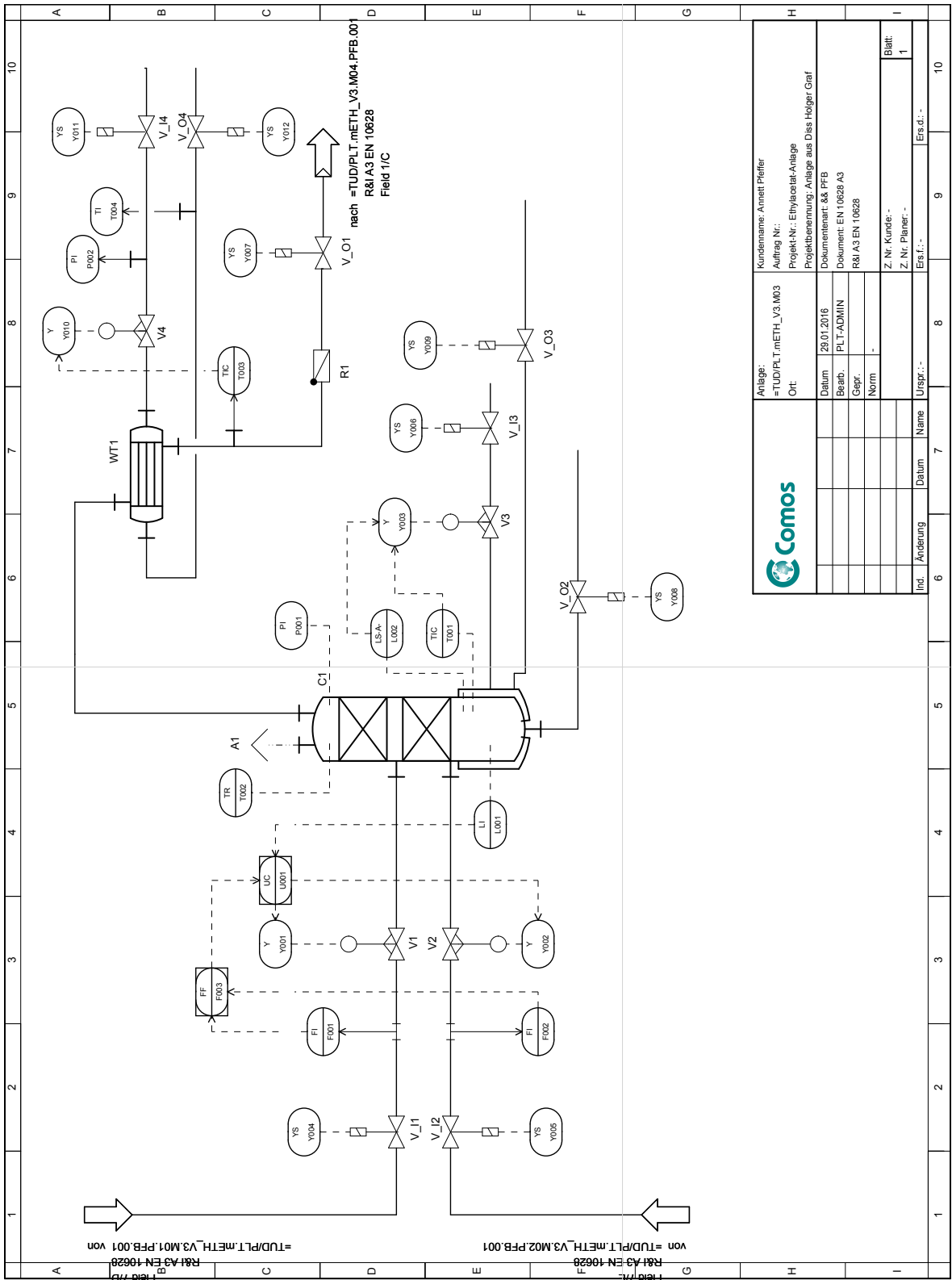


Abbildung A.1: Vorlagemodul 1 nach [87]



Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt
Jede Veröffentlichung, auch auszugsweise, ist untersagt

Abbildung A.2: Vorlagemodul 2 nach [87]



Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt
Jede Veröffentlichung, auch auszugsweise, ist untersagt

Abbildung A.3: Kolonne mit Wärmetauscher als Modul 3 nach [87]

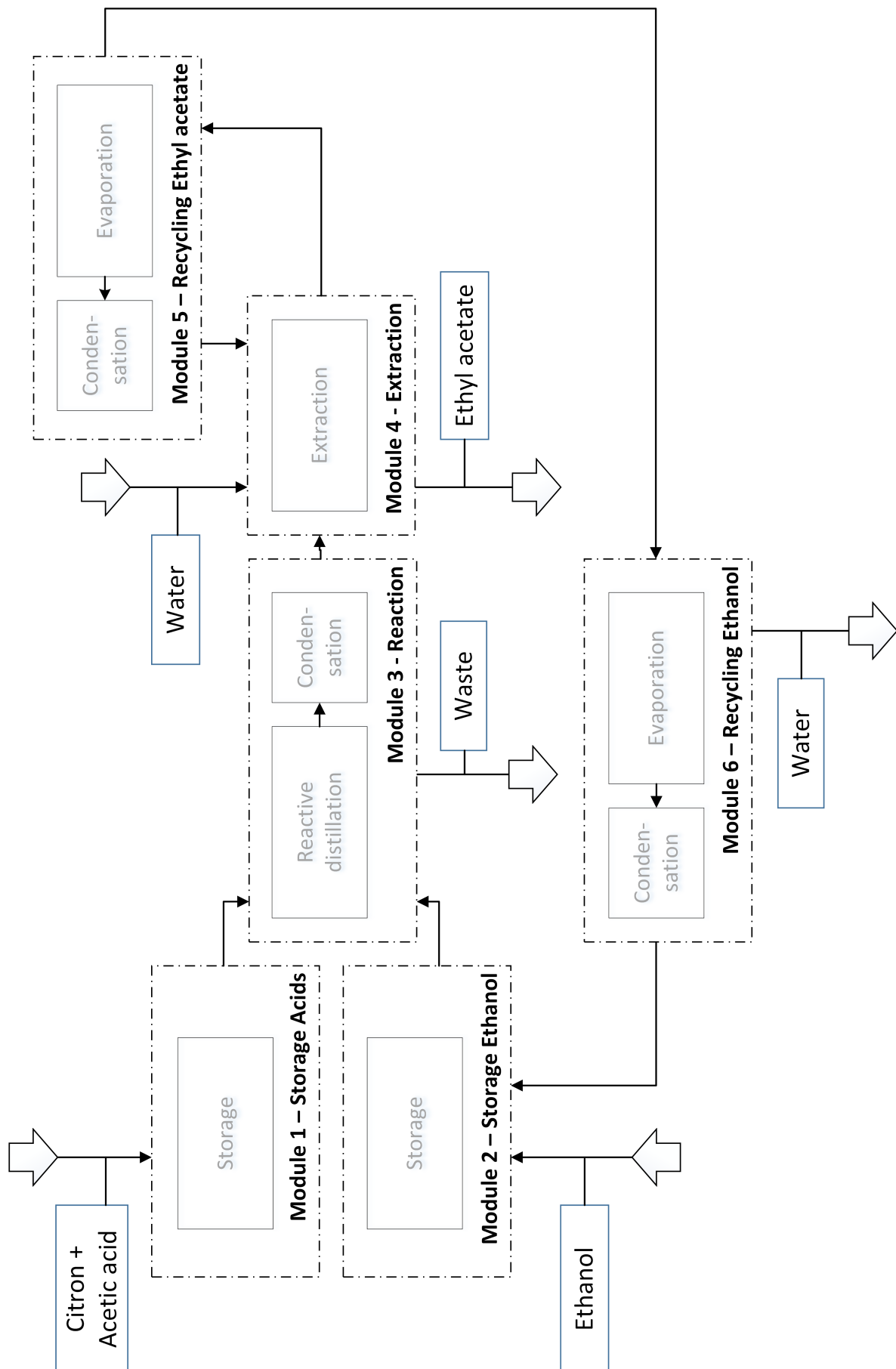


Abbildung A.4: Darstellung der Ethylacetatanlage als modulare Anlage nach [87] **A-6**

Anhang von Tabellen

B

Tabelle B.1: Ergebnisse der HAZOP für das Tankmodul bezogen auf Durchfluss und Füllstand nach [86]

ID	unit	Guide word	Physical property	consequences	causes	mechanisms for identification of deviation	recommendation
1	in1	no	flow	less tanklevel	valve(s) faulty OR control faulty OR externalcauses	-	-
2	in1	more	flow	more tanklevel	valve faulty OR control faulty OR externalcauses	-	-
3	in1	less	flow	less tanklevel	valve(s) faulty OR control faulty OR externalcauses	-	-
4	tank	more	level	more pressure	ID=2 OR level sensor faulty	measure level	-
5	tank	no	level	no reactant AND damage pump OR less out1flow	ID=1 OR ID=3 OR level sensor faulty OR leakage	measure level	-
6	out1	no/less	flow	damage pump OR external consequences	pump faulty OR valve faulty OR ID=5	-	-
7	out1	more	flow	damage pump OR external consequences	pump faulty OR ID=4 OR ID=6	-	-
8	out1	reverse	flow	pollution of reactant	pump faulty OR externalcauses	-	-

Tabelle B.2: Ergebnisse der HAZOP für das Tankmodul 2 bezogen auf Durchfluss und Füllstand mit syntaktischen Abweichungen nach [86]

ID	unit	Guide word	Physical property	consequences	causes	mechanisms for identification of deviation	recommendation
1	in1	no	flow	less level	valve(s) faulty OR control faulty OR externalcauses	-	
2	in1	more	flow	more level	valve faulty OR control faulty OR externalcauses	-	
3	in1	less	flow	less level	valve(s) faulty OR control faulty OR externalcauses	-	
4	tank	more	level	more pressure (see ID=6)	ID=2 OR level sensor faulty	measure level	
5	tank	no/less	level	no reactant → damage pump	ID=1 OR ID=3 OR level sensor faulty OR leakage	measure level	
6	out1	no/less	flow	damage pump OR external consequences	pump faulty OR valve faulty OR ID=5	-	
7	out1	more	flow	damage pump OR external consequences	pump faulty OR ID=4 OR ID=6	-	
8	out1	reverse	flow	pollution of reactant	pump faulty OR externalcauses	-	

Tabelle B.3: Ergebnisse der HAZOP für das Modul 3 bestehend aus Kolonne und Wärmetauscher bezogen auf Durchfluss und Füllstand nach [86]

ID	unit	Guide word	Physical property	consequences	causes	mechanisms for identification of deviation	recommendation
1	in1	no	flow	unknown (no reaction?)	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
2	in1	more	flow	changed reaction balance	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
3	in1	less	flow	changed reaction balance	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
4	in2	no	flow	no reaction	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
5	in2	more	flow	changed reaction balance	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
6	in2	less	flow	changed reaction balance	valve(s) faulty OR flow/level control faulty OR external causes	measure flow	-
7	coloumn	more	level	changed reaction balance	ID=2 OR ID=5	measure level	-
8	coloumn	less	level	changed reaction balance	ID=1 OR ID=3 OR ID=4 OR ID=6 OR leakage	measure level	-