

**Masterarbeit**

# **BEDIENERSCHULUNG IN DER PROZESSTECHNIK ANHAND EINES DIGITALEN ZWILLINGS**

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang  
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

**Ing. Christoph Ulreich, BSc.**

2010322021

betreut und begutachtet von

DI Johannes Fritz, BSc.

Graz, im Januar 2022



.....  
Unterschrift

## EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Weid', is written over a horizontal dotted line.

Unterschrift

## DANKSAGUNG

Zuerst gebührt mein Dank Herrn DI Johannes Fritz, BSc., der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die konstruktive Kritik sowie die hilfreichen Anregungen, die dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt. Seine motivierenden Worte und die fachliche Kompetenz waren eine gute Stütze beim Erstellen dieser Arbeit.

Ein ganz herzliches Dankeschön gilt meiner Frau Bianca, dafür dass sie mir im Alltag den Rücken freigehalten hat und mit ihrer fröhlichen Natur und viel Verständnis mitverantwortlich am Gelingen dieser Arbeit und der erfolgreichen Absolvierung des Studiums ist. Ohne ihre Kraft spendenden Worte und die Fürsorge, wäre es nach so manchem Rückschlag nicht einfach gewesen wieder nach vorne zu blicken und das Studium positiv abzuschließen.

Des Weiteren möchte ich mich auch bei meinen Eltern und Schwiegereltern bedanken, die mich während des Studiums unterstützt haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten. Es macht mich stolz in dieser Familie leben zu dürfen.

Abschließend bedanke ich mich auch bei meinem Dienstgeber, der Kanzler Verfahrenstechnik GmbH, für die Bereitstellung der nötigen Hard- und Software, sowie bei meinem Abteilungsleiter in der Automatisierung für die Hilfestellung bei der Realisierung des digitalen Zwillinges.

## KURZFASSUNG

Das Thema *Digitaler Zwilling* ist heutzutage aus keinem Industriezweig mehr wegzudenken. Die steigenden Rechner- und Netzwerkkapazitäten ermöglichen immer umfangreichere und realitätsnähere Simulationen von Prozessen und Anlagen. Ebenso steigt die Komplexität verfahrenstechnischer Anlagen und deren Steuerungen. Um mit dieser Entwicklung Schritt zu halten ist es notwendig, die Schulung der Anlagenbedienenden an diese Gegebenheiten anzupassen. Die Kanzler Verfahrenstechnik GmbH entwickelt und errichtet prozesstechnische Anlagen auf der ganzen Welt und ist dabei auch für die Ausbildung der Anlagenbediener\*innen verantwortlich. Der bisherige Prozess sieht vor, auf Basis eines Frontalvortrags und Erklärens einzelner Anlagenfunktionen, den Bedienenden ein möglichst genaues Bild der Anlage und der damit verbundenen Gefährdungen, stofflicher oder physikalischer Natur, zu vermitteln. Die Sprachbarriere sowie die nur eingeschränkt vorhandenen Möglichkeiten, diese Gefährdungen im realen Betrieb zu zeigen, veranlassen das Unternehmen dazu, einen alternativen Schulungsprozess zu suchen. Die Integration eines digitalen Zwillings als Schulungsobjekt ist daher eine naheliegende Lösung, die im Lauf dieser Arbeit auf ihre Anwendbarkeit im Unternehmensumfeld überprüft wird. Die Imitation einzelner Komponenten als virtuelles Funktionsmodell einer Anlage soll den Anlagenbediener\*innen ein besseres Situationsbewusstsein verschaffen, um die unzähligen Funktionen und Zustände jederzeit verstehen und nachvollziehen zu können und im Falle des Falles eine Gefahrensituation bereits in der Entstehung zu unterbinden. Um einen digitalen Zwilling erfolgreich in die Unternehmenstätigkeit zu integrieren, werden am Ende dieser Arbeit einige Rahmenbedingungen definiert, die es zu beachten gilt. Ebenso sind weitere Anwendungsgebiete die einen Mehrwert für das Unternehmen bieten in den abschließenden Betrachtungen nachzulesen.

## ABSTRACT

Nowadays, the topic *digital twin* is omnipresent in nearly every industry branch. The increasing computer and network capacities facilitate more complex and realistic simulations than ever. The complexity of process plants and their control systems is also steadily increasing. To keep pace with this development, it is necessary to adapt the training of plant operators to these conditions. Kanzler Verfahrenstechnik GmbH develop and build process plants all over the world and is also responsible for the training of plant operators. The current method is based on frontal lectures and explanation of individual plant functions to provide the best possible training in terms of plant features and the associated hazards with materials and physical conditions. The language barrier as well as the limited possibilities to demonstrate these hazards in real operation encourage the company to look for an alternative training process. The integration of a digital twin as a training device is therefore an obvious solution that will be examined in the course of this work for its usability in the corporate environment. The imitation of individual components as a virtual working model of a plant is intended to provide plant operators with better situational awareness to be able to understand and comprehend the countless functions and states at any time and, in case of an emergency, to prevent a hazardous situation from causing any injury. In order to successfully integrate a digital twin into the company's activities, a number of framework conditions are defined at the end of this paper that need to be taken into account. Other fields of application that offer added value for the company are also discussed in the concluding considerations.

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Firmenvorstellung .....	1
1.2	Motivation.....	2
1.3	Ausgangslage .....	2
1.4	Ziel .....	3
1.5	Aufbau der Arbeit.....	4
2	Grundlagen.....	5
2.1	Verfahrenstechnik.....	5
2.1.1	Thermodynamik .....	7
2.1.2	Strömungslehre.....	10
2.1.3	Chemische Reaktionstechnik .....	13
2.2	Steuerung und Regelung.....	14
2.3	Anlagendarstellung .....	17
2.3.1	Stoffmengenbilanz .....	17
2.3.2	Grundfließbild.....	18
2.3.3	Verfahrensfließbild .....	20
2.3.4	R&I-Schema.....	21
3	Modellierung.....	22
3.1	Der Modellbegriff .....	22
3.2	Modellbildung.....	24
3.3	Verifizierung und Validierung.....	27
3.4	Digitaler Zwilling.....	28
4	Schulung .....	31
4.1	Berufsbild .....	31
4.2	Schulungsablauf .....	33
4.3	Verbesserungspotenzial .....	34
5	Das Original.....	37
5.1	Anlagenauswahl .....	37
5.2	Anlagenfunktion .....	38
5.3	Anlagenbeschreibung .....	40
5.3.1	Prozessleittechnik .....	40
5.3.2	Reaktor .....	43
5.3.3	Instrumente und Armaturen .....	48
6	Der digitale Zwilling .....	57
6.1	Simulationsumgebung .....	57
6.1.1	Model-in-the-Loop.....	58
6.1.2	Software-in-the-Loop .....	58
6.1.3	Hardware-in-the-Loop.....	59
6.1.4	Simulationstool SIMIT .....	60

6.2	Modellierung .....	64
6.2.1	Materialfluss .....	65
6.2.2	Durchflussregelung .....	67
6.2.3	Reaktor .....	70
6.2.4	Heiz- und Kühlsystem .....	72
6.2.5	Rohrleitungen und sonstige Komponenten .....	73
6.3	Simulation .....	74
7	Ergebnisse und Ausblick .....	86
7.1	Ergebnisse .....	86
7.2	Fazit .....	87
7.3	Verbesserungspotential .....	87
	Literaturverzeichnis .....	89
	Abbildungsverzeichnis .....	93
	Tabellenverzeichnis .....	96
	Abkürzungsverzeichnis .....	97

# 1 EINLEITUNG

Einleitend wird in diesem Kapitel der Kooperationspartner und Auftraggeber dieser Arbeit vorgestellt, sowie die Ausgangssituation, aus der die Intention zum Verfassen dieser Arbeit entstand, beschrieben. Das beabsichtigte Ergebnis und ein kurzer Absatz zum Aufbau dieser Arbeit leiten in das eigentliche Thema über.

## 1.1 Firmenvorstellung

Die Firma Kanzler Verfahrenstechnik GmbH (KVT) mit Sitz in Graz ist ein international agierendes Unternehmen, das sich auf die Entwicklung, Planung und Realisierung von innovativen verfahrenstechnischen Anlagen spezialisiert hat. Die Ingenieurleistungen konzentrieren sich auf die Maximierung der Wirtschaftlichkeit im Kontext von Nachhaltigkeit, Umweltschutz und verantwortungsvollem Umgang mit Ressourcen. Als internationales, in der Verfahrenstechnik tätiges Unternehmen, das einen umfassenden Service vom ersten Konzept bis zur schlüsselfertigen Industrieanlage anbietet, werden die Arbeiten im Unternehmen in enger Zusammenarbeit mit den Kund\*innen durchgeführt, immer mit dem Ziel, innovative und maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln. Die Verfahren von KVT werden in den Bereichen der oleochemischen, umwelttechnischen und schwefelhaltigen Industrieanlagen eingesetzt.



Abb. 1: Firmenlogo KVT, Quelle: Kanzler Verfahrenstechnik GmbH (2021)

Seit mehr als 25 Jahren werden neue Lösungen gefunden, innovative Verfahren entwickelt und das Leistungsspektrum kontinuierlich erweitert. Das Portfolio umfasst technische Lösungen für Abfallverwertungstechnologien und Produktionstechnologien. Neben etablierten KVT-eigenen Verfahren werden auch maßgeschneiderte Lösungen für kundenspezifische Probleme und Anforderungen umgesetzt. Spezialist\*innen aus den Bereichen Verfahrens-, Chemie-, Elektro-, Maschinen- und Anlagentechnik sowie Projektmanagement vereinen ein umfassendes Know-How unter einem Dach.

Das Familienunternehmen begann Anfang der 1990er Jahre mit der Entwicklung von Abgasreinigungsanlagen auf Basis der thermischen und katalytischen Oxidation. Die erste Anlage wurde 1992 für ein Chemieunternehmen in Österreich gebaut. Um den wachsenden Anforderungen und der steigenden Nachfrage des Marktes gerecht zu werden, wurden stetig neue Technologien entwickelt. Das Verfahren wurde 1993 erstmals in der Textilindustrie zur Behandlung von nassem Sauergas zur Rückgewinnung von schwefeliger Säure eingesetzt.

Das Anlagen- und Technologieportfolio reicht von der Abwasserbehandlung, der Abgasreinigung, der Energiegewinnung aus Abfällen, der Herstellung von Schwefelsäure aus Abgasen und der Produktion verschiedener Chemikalien auf Basis von Glycerin bis hin zur Wiederverwendung von Nebenprodukten und Abfallströmen aus industriellen Prozessen.

Zusätzlich zu den etablierten KVT-Verfahren entwickelt das Unternehmen maßgeschneiderte Lösungen entsprechend den Herausforderungen und individuellen Anforderungen der Kund\*innen. Dabei konzentriert sich das Leistungsspektrum auf Engineering und Projektmanagement von der Konzeption bis zur Inbetriebnahme in folgenden Geschäftsbereichen:

- RENEWABLE Chemicals - umfassendes Technologieportfolio für die Produktion nachhaltiger Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen wie Pflanzenöl, Zucker oder Holz auf Basis umweltfreundlicher Kreislaufkonzepte. Der Bereich *Erneuerbare Energien* umfasst die nachhaltige und innovative Produktion von Glycerin, Glycerinderivaten, Epichlorhydrin, Epoxidharzen und Weichmachern.
- ENVIRONMENTAL Solutions - dazu gehören firmeneigene Technologien für den Umweltschutz, für die Schließung von Stoffkreisläufen, für die Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfallströmen und für die Einsparung von Rohstoffen und Energie. Der Schwerpunkt der Umweltabteilung liegt auf der Bereitstellung innovativer Technologien für die Behandlung kritischer Abwässer, die Reinigung verschiedener Rauchgase oder die Behandlung von Schlämmen.
- WET SULFURIC ACID Solutions - nasskatalytische Prozesstechnologie für die Rückgewinnung von Schwefelsäure aus verschiedenen Arten von Abgasen, verbrauchter Säure oder Schwefel. Der Geschäftsbereich OXYSULF bietet ein innovatives Nassverfahren zur Herstellung von Schwefelsäure aus Abgasen, die schwefelhaltige Verbindungen enthalten. Diese Technologie verbindet Nachhaltigkeit mit niedrigen Emissionen.

## 1.2 Motivation

Seit der großtechnischen Nutzung der Verfahrenstechnik kam es immer wieder zu katastrophalen Unfällen, die tausenden Menschen das Leben kosteten und noch viele mehr verletzten und gesundheitlich beeinträchtigten. Leider war menschliches Versagen oft ein mitbestimmender Faktor, der zu diesen Katastrophen geführt hat. Bhopal, Seveso und Tschernobyl sind nur einige dieser Orte, die stellvertretend dafür stehen, dass jedes automatisierte System nur so gut ist, wie die Person, die es bedient. *Schlamperei* und dem *Druck von oben*, möglichst kostenschonend zu arbeiten, können nur mit der persönlichen Einstellung und Courage jedes einzelnen begegnet werden. Bedienungsfehlern und Fehleinschätzungen kann jedoch mit einer gezielten Aus- und Weiterbildung vorgebeugt werden. In Zeiten von Virtual Reality, Industrie 4.0 und globaler Vernetzung sollte man diese Möglichkeiten auch bestmöglich nutzen, um Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Verfahrenstechnik zu fördern. Digitale Zwillinge werden bereits in diversen Lebensphasen einer Maschine oder Anlage genutzt, nun soll dieses Werkzeug auch für den Einsatz in der Bedienschulung adaptiert und evaluiert werden. Im Anlagenbau ist aber immer noch der Preis einer Anlage der bestimmende Faktor, ob ein Unternehmen ein Projekt realisieren darf. Daher soll auch der wirtschaftliche Aspekt erwähnt werden, der sich durch die Einbindung eines digitalen Zwillings ergibt, ob im positiven oder negativen Sinn.

## 1.3 Ausgangslage

Wie bereits in der Firmenvorstellung erwähnt, beschäftigt sich die Firma Kanzler Verfahrenstechnik, im weiteren Verlauf der Arbeit kurz KVT genannt, mit der Planung und Umsetzung von prozesstechnischen

Anlagen. Der überwiegende Teil sind sogenannte EPCM-Projekte, bei denen von der verfahrenstechnischen Auslegung über die steuerungstechnische Ausrüstung sowie den Stahl- und Maschinenbau bis zur Integration der Prozessleittechnik, Montagebegleitung und Inbetriebnahme von den entsprechenden Fachabteilungen durchgeführt werden. EPCM steht konkret für *Engineering, Procurement and Construction Management*, was so viel bedeutet, als dass Planung, Beschaffung und Montageüberwachung im Auftragsumfang liegen. Die Implementierung des Prozessleitsystems und die Inbetriebnahme erfolgen dabei ausschließlich vor Ort an der fertig errichteten Anlage, da aufgrund der Dimensionen und notwendigen Montagearbeiten ein provisorischer Zusammenbau wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Das hat zur Folge, dass auch die Einschulung der Anlagenbediener\*innen auf das Prozessleitsystem erst nach Fertigstellung der Montagearbeiten durchgeführt werden kann. Die sequenzielle Abfolge dieser Arbeitspakete muss von Projektbeginn an berücksichtigt werden und nimmt durchaus einige Wochen in Anspruch. Die Schulung selbst wird auf Basis von Präsentationen abgehalten, in denen die Anlagenbediener\*innen die Kennzahlen und Funktionen der Anlage erklärt bekommen. Für eine sichere Betriebsführung ist aber auch der routinierte Umgang mit dem Steuerungssystem vonnöten. An der Anlage ist dies nur schwer durchführbar, da es fahrlässig wäre, kritische oder gefährdende Situationen zu verursachen. Ein digitaler Zwilling soll es ermöglichen, diese beide Aufgabenstellungen zu erfüllen und den bestehenden Prozess zu verbessern.

### 1.4 Ziel

Die Bedienendenschulung ist ein wesentlicher Teil bei der Umsetzung eines Projekts, vor allem in Bezug auf die Anlagensicherheit. Im bis dato üblichen Projektablauf der Firma Kanzler Verfahrenstechnik markiert die Schulung gemeinsam mit der Abnahme den Schlusspunkt in einem Projekt. Es gibt bereits Überlegungen, die Inbetriebnahme der Prozessleittechnik parallel zur Montage zu beginnen. Dazu ist im Unternehmen ein Baukastensystem in Entwicklung, damit aus immer wiederkehrenden Funktionen in Modulbauweise durch geringfügige Anpassungen in kurzer Zeit ein Grundgerüst des Prozessleitsystems erstellt werden kann. Um diese Idee des parallelen Systems Engineering noch weiter zu verfolgen, soll die Bedienendenschulung parallel zur Inbetriebnahme durchgeführt, und beides bis zum Zeitpunkt der Anlagenübergabe abgeschlossen sein. Der zweite Aspekt, der betrachtet werden soll, ist eine Verbesserung des Schulungsprozesses in Bezug auf den Umgang der Bedienenden mit der Anlage und das Situationsbewusstsein, anormale Zustände zu erkennen, bevor daraus eine Gefährdung entstehen kann. Computergesteuerte Sicherheitssysteme sprechen meist nur dann an, wenn eine unmittelbare Gefahr für den Menschen droht.

Dieses Ergebnis soll erreicht werden, indem ein digitaler Zwilling einer Anlage erstellt wird, der alle prozesstechnisch relevanten Stoffe, Geräte und deren Wirkungsweise im Prozess darstellt. Darüber hinaus werden Testfälle definiert, die am digitalen Zwilling Zustände und Parameter einzelner Komponenten darstellen oder hervorrufen, die im realen Betrieb entweder Schäden an der Maschine oder der Umwelt verursachen würden.

Am Ende erfolgt eine Evaluierung des gesamten Prozesses von der Modellierung bis zur Abarbeitung und Validierung der Testfälle, ob der digitale Zwilling als Anschauungs- und vor allem als Schulungsmittel für den Einsatz im operativen Unternehmensbetrieb geeignet ist und ob die Modellierung parallel zur Anlagenplanung erfolgen kann.



## 1.5 Aufbau der Arbeit

Um das oben beschriebene Ziel zu erreichen, müssen zuerst einige grundlegende Themen erläutert werden. Damit ein Verständnis für die zugrundeliegenden Prozesse und wissenschaftlichen Teilbereiche geschaffen werden kann, beschreibt das zweite Kapitel die notwendigen verfahrenstechnischen und automatisierungstechnischen Begriffe, die in dieser Arbeit zur Anwendung kommen. Im Anschluss wird erklärt, was es mit den Themen *Modellierung* und *digitaler Zwilling* auf sich hat. Wie die Schulung aktuell im Unternehmen abläuft, welche Anforderungen an die Bedienenden einer Anlage gestellt werden und welches Potenzial der Einsatz eines digitalen Zwillings in der Bedienerschulung birgt, ist im Kapitel *Schulung* beschrieben. Dazu wird ein kurzer Exkurs in die Geschichte der Anlagenführung erfolgen, wie sich die technische Ausrüstung, und auch das Berufsbild eines Bedienenden im Lauf der Zeit geändert haben. Anschließend folgt ein Themenwechsel, wobei die Anlage sowie ihre Bestandteile und Funktionen beschrieben werden, die als Vorlage für den digitalen Zwilling dient. Auf Basis dieser Ausführungen wird in einer Simulationsumgebung ein Anlagenmodell erstellt, das das Verhalten der Prozesse hinreichend genau imitiert, um als Schulungstool angewendet werden zu können. Es werden einige Szenarien, die im laufenden Betrieb auftreten können, nachgestellt, um anschließend evaluiert zu werden. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Simulation sowie dem gesamten Entstehungsprozess dieser Arbeit zusammengefasst, und zukünftige Entwicklungspotentiale aufgezeigt.

## 2 GRUNDLAGEN

Dieses Kapitel beschreibt die speziellen technischen Grundlagen, die für das Verständnis einer prozesstechnischen Anlage notwendig sind. Die physikalischen und chemischen Prozesse werden auf Basis der Verfahrenstechnik sowie technischen Chemie erläutert, und die erforderlichen automatisierungstechnischen Aspekte sind im Abschnitt Steuerung und Regelung beschrieben. Als dritter Punkt schließt die Beschreibung der diversen Darstellungsmöglichkeiten einer Anlage das Kapitel ab.

### 2.1 Verfahrenstechnik

Wie man aus dem Firmenwortlaut ersehen kann, ist das Kerngebiet der KVT die Verfahrenstechnik. Eine allgemeine Definition beschreibt die Verfahrenstechnik als die technische Disziplin, die sich mit der Umwandlung von Stoffen beschäftigt. Rohstoffe werden durch Behandlung in verschiedensten Prozessen in Zwischenprodukte oder gebrauchsfertige Güter veredelt. Die Verfahrenstechnik bietet dazu das notwendige Knowhow, um diese Prozesse in einem großtechnischen Maßstab durchzuführen.<sup>1</sup>

In Abb. 2 sind die vier Möglichkeiten dargestellt, die die Verfahrenstechnik bietet, um Stoffe zu behandeln.

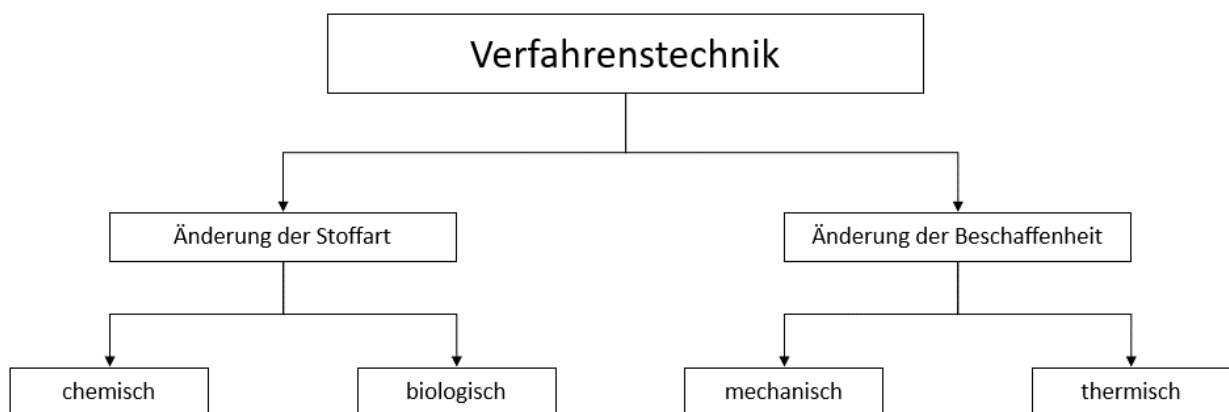


Abb. 2: Übersicht Verfahrenstechnik, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Anlage, die als Vorlage für diese Masterarbeit dient, bedient sich der chemischen Verfahrenstechnik, um durch Reaktion verschiedener Stoffe ein Endprodukt herzustellen. Zunächst folgt aber ein kurzer Auszug der Geschichte der Verfahrenstechnik.

Obwohl der Begriff *Verfahrenstechnik* nicht ganz treffend ist, wurden verfahrenstechnische Methoden bereits in der Steinzeit vor über 6000 Jahren angewandt. Das Gerben von Leder zur Herstellung von Kleidung ist einer der ersten überlieferten Prozesse, den man der chemischen und biologischen Verfahrenstechnik zurechnen kann und der heute noch genauso aktuell ist. 1000 Jahre später wurden die Grundlagen für die mechanische und thermische Verfahrenstechnik durch die Verhüttung von Metallerzen gelegt. Über die Jahrtausende hat der Mensch immer mehr Umwandlungsprozesse entdeckt, bis im 19. Jahrhundert die industrielle Nutzung verfahrenstechnischer Prozesse begann.

<sup>1</sup> Vgl. Christen (2010), S. 3.

Kernthema der Verfahrenstechnik ist, wie zuvor beschrieben, die Stoffumwandlung. Dazu ist es nötig, hinreichend Kenntnis über die chemischen und physikalischen Eigenschaften der beteiligten Stoffe zu haben. Des Weiteren muss ihr Verhalten in jedem der drei Aggregatzustände, fest, flüssig und gasförmig, sowie die aufgenommene oder abgegebene Energie beim jeweiligen Phasenübergang bekannt sein.<sup>2</sup>

Abb. 3 veranschaulicht beispielhaft die Phasenübergänge von Wasser mit dem Wärmestrom.

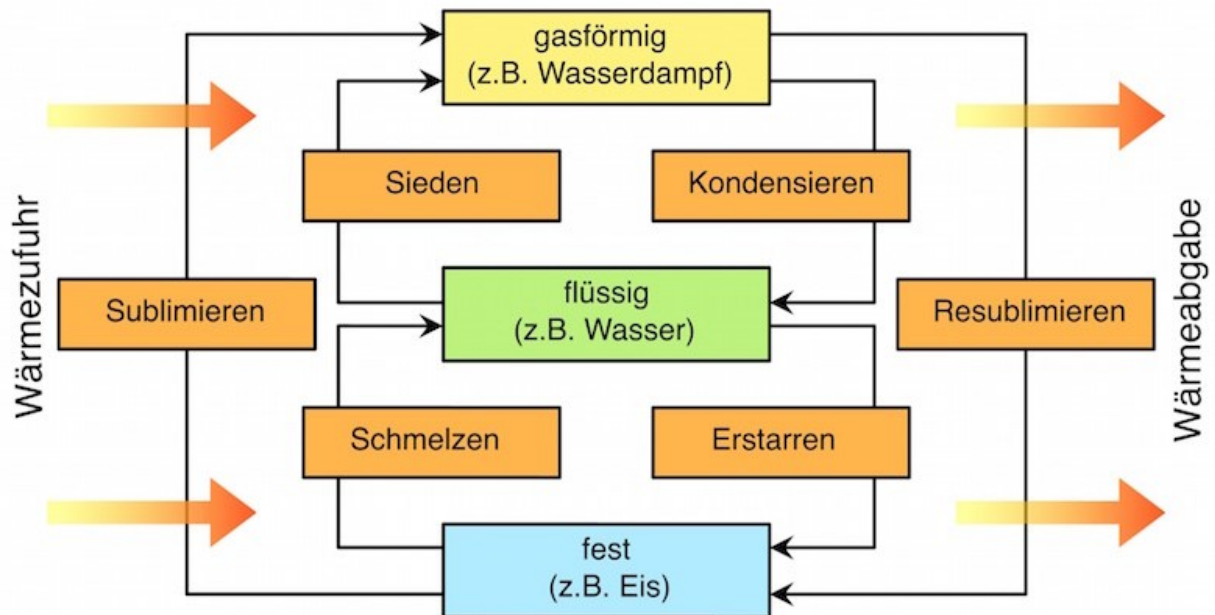


Abb. 3: Phasen des Wassers, Quelle: Physikunterricht Online (2021), Online-Quelle [25.August.2021].

In der modernen Verfahrenstechnik ist es üblich, die komplexen Prozesse, die in einer Anlage ablaufen in Grundoperationen oder Basisverfahren zu zerlegen. Das sind Grundprozesse, die aneinandergereiht und miteinander kombiniert am Ende aus den Rohstoffen ein veredeltes Produkt entstehen lassen.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 20.

<sup>3</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 20 f.

In Tab. 1 sind beispielhaft einige dieser Basisverfahren angeführt.

Reagieren	Vereinigen	Trennen	Zerteilen	Wärmeübertragen
Chemisch:	Mechanisch:	Thermisch:	Mechanisch:	Thermisch:
- Rührreaktor	- Rührer	- Destillation	- Brecher	- Rekuperator
- Rohrreaktor	- Knetter	- Rektifikation	- Mühle	- Dampferzeuger
- Katalysator	- Mischer	- Extraktion	- Schneiden	- Trocknung
- Verbrennung		- Absorption		- Absorptionskälteanlage
Biologisch:		Mechanisch:		
- Gärung		- Filtration		
- Fermentation		- Sedimentation		
- Abwasserreinigung		- Zentrifugieren		

Tab. 1: Auswahl an verfahrenstechnischen Grundoperationen, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie bereits erwähnt, dreht sich in der Verfahrenstechnik alles um die Umwandlung von Stoffen. Daraus lässt sich schließen, dass die wissenschaftlichen Disziplinen Chemie und Physik auch eng mit der Verfahrenstechnik verwoben sind. Da die Chemie nicht Teil dieser Masterarbeit ist, werden im Kapitel 2.1.3 nur die Grundlagen der chemischen Reaktionstechnik erläutert. Die nächsten Kapitel befassen sich ausschließlich mit den physikalischen Grundlagen, die später im digitalen Zwilling zur Anwendung kommen.

### 2.1.1 Thermodynamik

Ein wichtiger Teil der Verfahrenstechnik ist die Thermodynamik. Aus dem Wort Thermodynamik lässt sich auch direkt auf das Grundprinzip schließen, das diese Wissenschaftsdisziplin behandelt. Ursprünglich wurde damit die Umwandlung von Wärmeenergie in Bewegungsenergie beschrieben, aber im Laufe der Zeit kamen auch noch andere Anwendungsgebiete hinzu. Alle Vorgänge, die in das Feld der Thermodynamik fallen, unterliegen den vier Hauptsätzen.<sup>4</sup>

Die sonderbare Nummerierung rührt daher, dass der nullte Hauptsatz als letzter der vier Hauptsätze entdeckt wurde, aber für die Prinzipien der drei anderen von fundamentaler Bedeutung ist, und deswegen in der Zählreihenfolge davorgesetzt wurde.

Nullter Hauptsatz:

“Zwei geschlossene Systeme, die jedes für sich mit einem dritten im thermischen Gleichgewicht sind, stehen auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

<sup>4</sup> Vgl. Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 1 f.

Zwei geschlossene Systeme sind im thermischen Gleichgewicht miteinander, wenn beide die gleiche Temperatur haben.”<sup>5</sup>

Um zu verstehen, warum dieser Satz so elementar ist, müssen zuerst die Begriffe *System* und *Gleichgewicht* erläutert werden. Ein thermodynamisches System kann ein Gegenstand oder ein Verbund von Komponenten sein, der für sich genommen betrachtet werden soll.

“Als System bezeichnet man eine Gesamtheit von Teilen, die zueinander, zum Ganzen und in der Regel auch zur Umwelt in irgendeiner Beziehung stehen, aufeinander wirken und sich gegenseitig beeinflussen.”<sup>6</sup>

Diese Beeinflussung findet wie in Abb. 4 dargestellt, durch Austausch von Energie oder Masse statt.

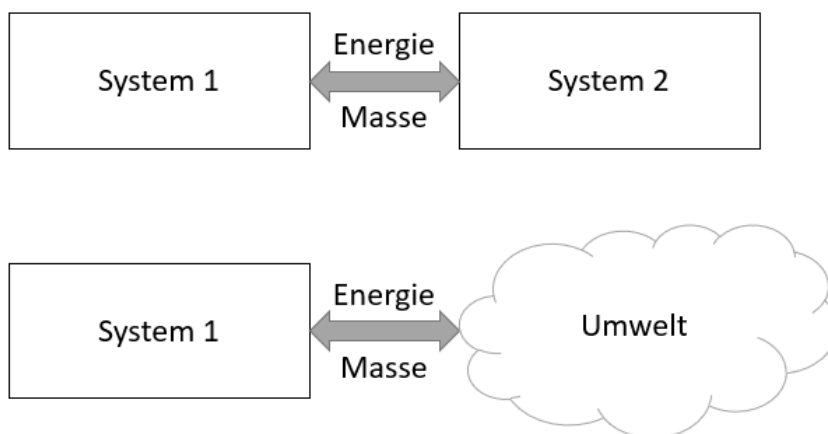


Abb. 4: Beeinflussung von Systemen, Quelle: Eigene Darstellung.

In der Technik werden grundsätzlich drei Arten von Systemen unterschieden. Ein *offenes System* ist wie zuvor beschrieben, in ständigem Energie- oder Stoffaustausch mit der Umgebung. Dieses ist auch in technischen Anlagen am öftesten anzutreffen. Die zweite Variante ist das *abgeschlossene System*, bei dem kein Austausch mit der Umwelt möglich ist, wie beispielsweise bei einem geschlossenen, und wärmeisolierten Behälter. Ein *geschlossenes System* wiederum ist die dritte Möglichkeit und ermöglicht den Austausch von Energie, aber nicht von Stoffströmen und wird meist nur für theoretische Überlegungen verwendet.<sup>7</sup>

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik lautet in der allgemeinen Fassung folgendermaßen:

“Jedes geschlossene System besitzt eine extensive Zustandsgröße Energie.

Die Energie eines Systems kann sich nur durch Transport von Energie über die Grenze des Systems ändern.

---

<sup>5</sup> Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 22.

<sup>6</sup> Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 13.

<sup>7</sup> Vgl. Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 14 f.

Die Energie eines abgeschlossenen Systems bleibt unverändert.”<sup>8</sup>

Aus diesem Satz lässt sich in weiterer Folge auch die Definition für den Begriff Energie ableiten:

“Energie ist die in Systemen speicherbare und zwischen Systemen übertragbare Mengengröße, deren Übertragung Zustandsänderungen im abgebenden und im aufnehmenden System bewirkt.”<sup>9</sup>

Etwas einfacher ausgedrückt, bedeutet das, dass ein System nur durch die Zugabe oder Entnahme von Energie seinen Zustand ändert. Die Zustandsänderung ist auch Thema im zweiten Hauptsatz, welcher besagt:

„Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel. Ideale Prozesse sind reversibel gedachte Grenzfälle irreversibler Prozesse.”<sup>10</sup>

Irreversibel bedeutet in diesem Kontext, dass der Ursprungszustand eines Systems nicht wiederherstellbar ist. Diese Idealisierung ist in der Praxis nicht erreichbar. In der Theorie wird dieser Umstand jedoch genutzt, indem beispielsweise geringwertige Einflussfaktoren zugunsten einer Vereinfachung von Berechnungen vernachlässigt werden.<sup>11</sup>

Vernachlässigt werden kann in dieser Arbeit auch der dritte Hauptsatz, der besagt, dass der absolute Nullpunkt von 0 K oder -273,15 °C nicht erreicht werden kann.

Die zugrundeliegenden Effekte sind zwei Prinzipien der Thermodynamik, die Wärmeleitung sowie der konvektive Wärmeübergang. Abb. 5 zeigt eine Übersicht der drei Arten der Wärmeübertragung, welche im Anschluss beschrieben werden.

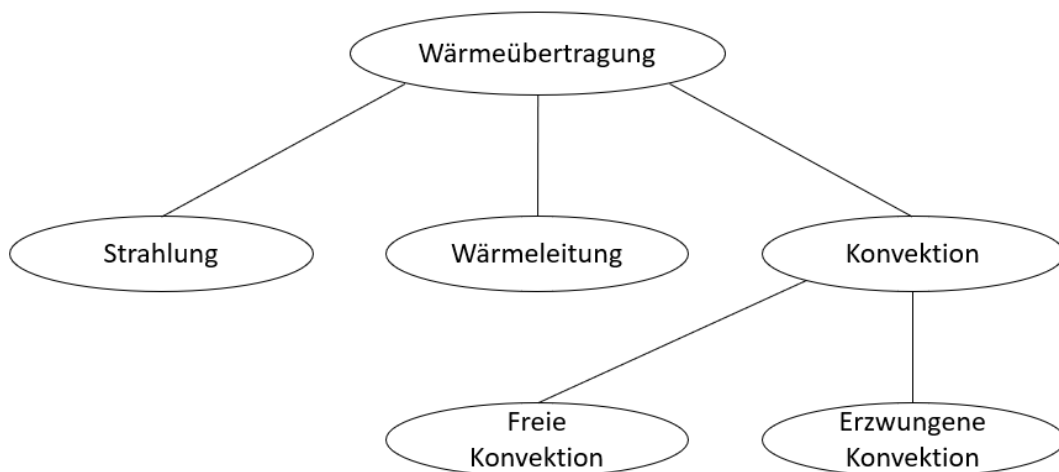


Abb. 5: Arten der Wärmeübertragung, Quelle: Christen (2010), S. 202 (leicht modifiziert).

---

<sup>8</sup> Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 92.

<sup>9</sup> Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 92.

<sup>10</sup> Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 38.

<sup>11</sup> Vgl. Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 39.

Wärmeleitung wird verursacht durch Schwingungen auf molekularer oder atomarer Ebene. Teilchen stoßen dadurch aneinander und übertragen dadurch einen Teil der Energie an benachbarte Teilchen. Wesentlich ist, dass dieser Vorgang nur innerhalb eines Mediums auftritt und dabei kein Stofftransport stattfindet. Der zweite Effekt ist die konvektive Wärmeübertragung. Dabei werden Gas- oder Flüssigkeitsbezirke mit unterschiedlichen Temperaturen bewegt. Wird diese Bewegung ausschließlich durch innere Kräfte wie beispielsweise einen Dichteunterschied verursacht, wird die Bewegung *freie Konvektion* genannt. Wirken zusätzlich noch äußere Kräfte auf das Fluid ein, handelt es sich um *erzwungene Konvektion*. Diese beiden Arten der Wärmeübertragung treten in der Praxis meist kombiniert auf. Für gewöhnlich überwiegt aber einer der beiden Fälle, sodass der andere zur vereinfachten Betrachtung vernachlässigt werden kann. Als Letztes bleibt noch die Wärmestrahlung zu erwähnen. Diese entsteht durch elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich, die beim Auftreffen auf Materie Wärme erzeugt. Für diese Masterarbeit ist diese Form der Wärmeübertragung nicht relevant, daher wird auch nicht näher darauf eingegangen.<sup>12</sup>

Der für diese Arbeit relevante thermodynamische Vorgang ist der konvektive Wärmeübergang. Dieser beschreibt den Energie- beziehungsweise Wärmetransport zwischen zwei Fluiden durch einen Stoffstrom. Davon zu unterscheiden sind die Wärmeleitung, die innerhalb eines Stoffes auf molekularer Ebene auftritt, und die Wärmestrahlung, die durch elektromagnetische Strahlung und ohne stoffliche Bindung erfolgt.<sup>13</sup>

Welche Rolle der konvektive Wärmeübergang in der Anlage spielt, wird bei der Beschreibung der einzelnen Komponenten genauer erläutert. Im nächsten Abschnitt folgt der Überblick über eine weitere Wissenschaftsdisziplin, die für die Anlage von Bedeutung ist.

### 2.1.2 Strömungslehre

Wie die Thermodynamik so ist auch die Strömungslehre ein essenzieller Teil der Verfahrenstechnik. Sie behandelt das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen unter physikalischen Einflüssen. Die Tatsache, dass Flüssigkeiten, im Gegensatz zu Gasen inkompressibel sind, spielt in der Strömungslehre nur bedingt eine Rolle. Das ist dem Umstand geschuldet, dass die Dichte von Gasen bei Fließgeschwindigkeiten weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit, wie sie meistens in verfahrenstechnischen Anlagen vorherrschen, nur unwesentlich ändert. Somit können Gase wie Flüssigkeiten für Berechnungen als inkompressibel betrachtet werden.<sup>14</sup>

Anwendung finden die Gesetze der Strömungslehre hauptsächlich zur Berechnung von Druckverlusten in Behältern und Rohrleitungen. Ein Grundprinzip der Strömungslehre ist die Kontinuitätsgleichung:

“Tritt ein Fluid (Flüssigkeit oder Gas) in ein System mit starren Wänden und variablem Querschnitt ein und verlässt es wieder, so ist der Massenstrom durch einen beliebigen Strömungsquerschnitt des Systems stets gleich groß”<sup>15</sup>.

---

<sup>12</sup> Vgl. Christen (2010), S. 202 f.

<sup>13</sup> Vgl. Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 335.

<sup>14</sup> Vgl. Christen (2010), S. 163.

<sup>15</sup> Christen (2010), S. 163.

Das bedeutet, dass am Ende einer Rohrleitung exakt derselbe Massenstrom fließt, der am Beginn in die Rohrleitung eintritt. Abb. 6 zeigt diesen Zusammenhang anhand von Massenstrom  $\dot{m}$ , Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , Volumenstrom  $\Delta V$ , Querschnittsfläche  $A$  und der zurückgelegten Strecke  $s$ .

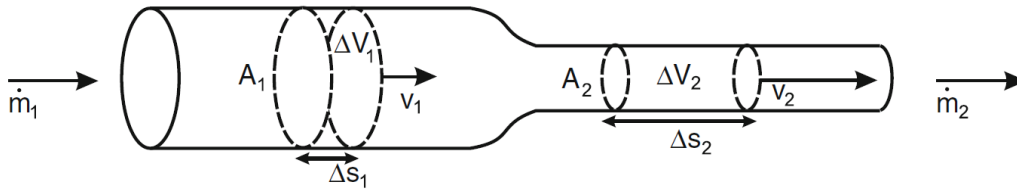


Abb. 6 Massenstrom in einem Körper mit starren Wänden, Quelle: Christen (2010), S. 164.

Der Massenstrom entspricht dem Produkt von Fluiddichte  $\rho$  und Volumenstrom  $V$  und der Volumenstrom stellt in weiterer Folge das Produkt aus Querschnittsfläche  $A$  und Fließgeschwindigkeit  $c$  dar:

$$\rho_1 A_1 c_1 = \rho_2 A_2 c_2 = \text{konst.} \quad (2.1)$$

$\rho / \text{kg s}^{-3}$	Fluiddichte
$A / \text{m}^2$	Strömungsquerschnittsfläche
$c / \text{m s}^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit

Da, wie schon zuvor beschrieben, ein Fluid für verfahrenstechnische Berechnungen als inkompressibel angenommen werden kann, bedeutet das für Formel (2.1), dass die Dichte konstant ist, und dadurch für die Berechnung nicht relevant ist. Damit lässt sich folgender Zusammenhang darstellen:

$$A_1 c_1 = A_2 c_2 = \text{konst.} \quad \text{oder} \quad \frac{c_2}{c_1} = \frac{A_1}{A_2} = \text{konst.} \quad (2.2)$$

$A / \text{m}^2$	Strömungsquerschnittsfläche
$c / \text{m s}^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit

Daraus lässt sich ableiten, dass die Strömungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche ist.<sup>16</sup>

Mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in einem Bereich mit geringerem Strömungsquerschnitt erhöht sich auch die kinetische Energie des Fluids. Da in einer geschlossenen Rohrleitung aber keine Energie von außerhalb zugeführt wird, muss innerhalb des Fluids eine Energieumwandlung stattfinden. Dies geschieht durch Änderung des Drucks, wobei dieser im Bereich höherer Fließgeschwindigkeit sinkt. Gibt es im System einen Höhenunterschied, muss auch noch der statische Druck beziehungsweise die geodätische Energie des Fluids berücksichtigt werden. Beschrieben wird dieser Zusammenhang im Gesetz von Bernoulli, mit der Einschränkung, nur für ein ideales System ohne Reibung.<sup>17</sup>

Ist es notwendig das Verhalten eines realen Fluids zu berechnen, müssen Faktoren wie die innere Reibung oder der Wirbelwiderstand berücksichtigt werden. Die innere Reibung oder Viskosität ist ein Maß für den

<sup>16</sup> Vgl. Christen (2010), S. 164.

<sup>17</sup> Vgl. Christen (2010), S. 164 f.



Widerstand des Fluids gegen Formänderung. Der Wirbelwiderstand kommt bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten zum Tragen und gibt die Wirbelbildung im Inneren eines Fluids an.<sup>18</sup>

In einem Rohr treten abhängig von Strömungsgeschwindigkeit, Rohrleitungslänge und kinematischer Viskosität des Fluids zwei Arten von Strömung auf. Die laminare oder geschichtete Strömung ist bei niedrigen Geschwindigkeiten vorherrschend, und je höher die Strömungsgeschwindigkeit steigt, desto mehr neigt ein Fluid dazu, Verwirbelungen zu bilden, und in die sogenannte turbulente Strömung überzugehen.<sup>19</sup>

Ausgedrückt wird dieser Strömungszustand, wobei der Übergang von laminar auf turbulent fließend ist, mit der Reynolds-Zahl.

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (2.3)$$

$Re$  / – Reynolds-Zahl

$c$  /  $\text{ms}^{-1}$  Strömungsgeschwindigkeit

$d$  / m Rohrleitungslänge

$\nu$  /  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  kinematische Viskosität

Ab einer Reynolds-Zahl von ungefähr 2300 beginnt die Wirbelbildung, die laminare Strömung wird zunehmend turbulent und der Druckverlust über die Länge des Rohres steigt.<sup>20</sup>

Der Druckabfall in einem Rohr, wie in Formel (2.4) ausgedrückt, ist in der Verfahrenstechnik maßgeblich für die Auslegung von Pumpen.

$$\Delta p = \xi \frac{l}{d} \frac{\rho \bar{v}^2}{2} \quad (2.4)$$

$\Delta p$  /  $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$  Druckabfall im Rohr

$\xi$  / – Rohrreibungszahl

$\rho$  /  $\text{kg m}^{-3}$  Dichte des Fluids

$l$  / m Rohrleitungslänge

$d$  / m Rohrinne Durchmesser

$\bar{v}$  /  $\text{ms}^{-1}$  mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Zusätzlich beeinflussen die Einbauten in einer Rohrleitung diesen Druckabfall. Solche Einbauten sind unter anderem Biegungen, Stutzen, Blenden oder Absperrorgane wie Ventile und Schieber. Für Formteile lässt sich dieser Staudruck aus Tabellen ablesen, bei Armaturen ist dieser Wert vom Hersteller im teilebezogenen Datenblatt angegeben.<sup>21</sup>

Alle vorher beschriebenen Zusammenhänge und Faktoren spielen eine große Rolle bei der Anlagenplanung und können auch entsprechend modelliert und simuliert werden. Für den Zweck dieser Masterarbeit

---

<sup>18</sup> Vgl. Christen (2010), S. 167 ff.

<sup>19</sup> Vgl. Christen (2010), S. 171.

<sup>20</sup> Vgl. Watter (2017), S. 59.

<sup>21</sup> Vgl. Watter (2017), S. 62.



allmählich die Reaktion, bis alle Edukte so weit umgewandelt sind oder sich auch hier ein Gleichgewicht der Stoffe einstellt. Danach wird entleert und der Ablauf startet von Neuem.<sup>24</sup>

Zuletzt gibt es noch Reaktionen, die einen halbkontinuierlichen Prozess erfordern. Dieser ist eine Kombination der beiden vorgenannten Betriebsarten und dadurch charakterisiert, dass entweder eine Komponente erst während der laufenden Reaktion dazugegeben oder ein Produkt noch vor Abschluss der vollständigen Umsetzung aus dem Reaktor entfernt wird. Dieser Modus wird üblicherweise dann eingesetzt, wenn Stoffkonzentrationen unerwünschte Nebenreaktionen auslösen können, oder die Hauptreaktion so stark exotherm ist, dass die Reaktortemperatur über einen kritischen Punkt steigen würde.<sup>25</sup>

Nachdem die für diese Arbeit relevanten verfahrenstechnischen Begriffe und Prozesse erläutert wurden, widmet sich der nächste Abschnitt dem Thema *Steuern und Regeln* und damit den automatisierungstechnischen Grundlagen.

## 2.2 Steuerung und Regelung

In der Prozessautomatisierung existieren, wie in der Systemtheorie allgemein, zwei Methoden, wie ein Prozess beeinflusst werden kann. Die erste, weniger komplexe Methode ist die *Steuerung*, die zweite ist die technisch aufwändigere *Regelung*.

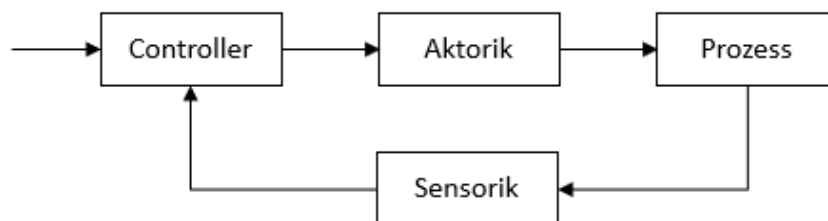


Abb. 8: Zeitveränderliches rückgekoppeltes System, Quelle: Litz (2013), S. 9 (leicht modifiziert).

In der grundlegenden Funktion sind sich beide Systeme sehr ähnlich. Beides sind rückgekoppelte Systeme mit einem Informationsfluss wie in Abb. 8 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Bedeutung des Begriffs der *Steuerung* in der Systemtheorie nicht mit demselben Begriff aus dem Kontext der speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) verwechselt werden darf. Der Controller veranlasst mit den ihm zur Verfügung stehenden Informationen aus Bedieneringabe und Sensorik, die im Steuerungsprogramm vorgesehenen Aktorbefehle um den technischen Prozess im gewünschten Maß zu manipulieren, wobei sich dieser Kreislauf in der SPS-Welt zyklisch wiederholt. Ein Unterschied zwischen beiden Methoden besteht darin, wie diese Informationen verarbeitet werden. Steuerungen arbeiten hauptsächlich mit diskreten Zuständen und logischen Verknüpfungen, wohingegen eine Regelung auf kontinuierlichen Werten und der mathematischen Berechnung anhand einer Übertragungsfunktion basiert.<sup>26</sup>

<sup>24</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 318 f.

<sup>25</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 345 f.

<sup>26</sup> Vgl. Litz (2013), S. 9 f.

Steuerungen können weiter unterteilt werden in Verknüpfungssteuerungen, die die Signalverarbeitung zu einem bestimmten, diskreten Zeitpunkt durchführen, und sequenziellen Steuerungen, die bei der Verarbeitung auch auf gespeicherte Zustände zurückgreifen. Ein Befehl folgt jedoch immer erst, wenn ein auslösendes Ereignis eintritt, wie zum Beispiel das Betätigen eines Schalters, durch Erreichen eines Grenzwerts oder einer bestimmten Position.<sup>27</sup>

Regelungen sind dadurch charakterisiert, dass der Steuerbefehl kontinuierlich an einen oder mehrere Prozessparameter angepasst wird. Dieser Verbund aus Steuerung, Prozess und Rückkopplung wird im Fachjargon Regelkreis genannt. Abb. 9 zeigt ein Blockschaltbild wie ein einfacher Regelkreis aufgebaut ist.

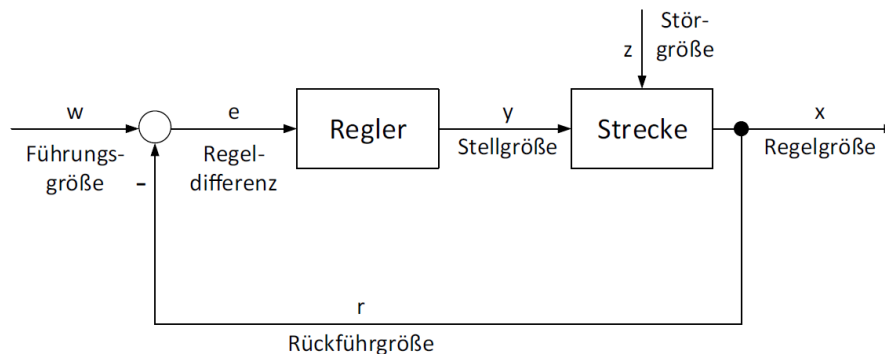


Abb. 9: Struktur eines Regelkreises, Quelle: Plenk (2019), S. 46 (leicht modifiziert).

Ein Regelkreis besteht aus Regler, Strecke und dem Rückführpfad. Der Regler führt die notwendigen Berechnungen und Vergleiche durch und gibt die Stellgröße für die Regelstrecke vor. Die Strecke ist das abstrahierte physische Objekt, dessen Zustand beeinflusst werden soll. Dies kann beispielsweise ein Füllstand, eine Temperatur, eine Drehzahl oder eine bestimmte Position sein.<sup>28</sup>

Die vier charakteristischen Größen eines Regelkreises sind die Führungsgröße, umgangssprachlich auch als Sollwert bezeichnet, die Regelgröße, auch unter dem Begriff Istwert bekannt, die Störgröße sowie die Regeldifferenz, die den Unterschied zwischen Führungs- und Regelgröße ausdrückt. Die Führungsgröße ist der von dem\*der Bedienenden oder PLS (Prozessleitsystem) vorgegebene Parameter, der kontinuierlich gehalten werden soll. Am Beispiel einer Raumtemperaturregelung wäre dies die gewünschte Raumtemperatur. Von diesem Vorgabewert wird der tatsächliche Wert, die Regelgröße abgezogen. Diese Differenz wird anhand der Übertragungsfunktion des Reglers in eine Stellgröße umgerechnet. Ein Stellglied, das Teil der Strecke ist, führt diesen Steuerbefehl aus. Die Auswirkungen dieses Befehls sowie der Einfluss der externen Störgrößen auf die Regelstrecke haben, wird wiederum vom Regler ausgewertet.<sup>29</sup>

Reglertypen die häufig in der Prozessindustrie zur Anwendung kommen, sind der Zweipunktregler, der Split-Range-Regler und der PID-Regler.

<sup>27</sup> Vgl. Plenk (2019), S. 16.

<sup>28</sup> Vgl. Plenk (2019), S. 45.

<sup>29</sup> Vgl. Plenk (2019), S. 45 f.

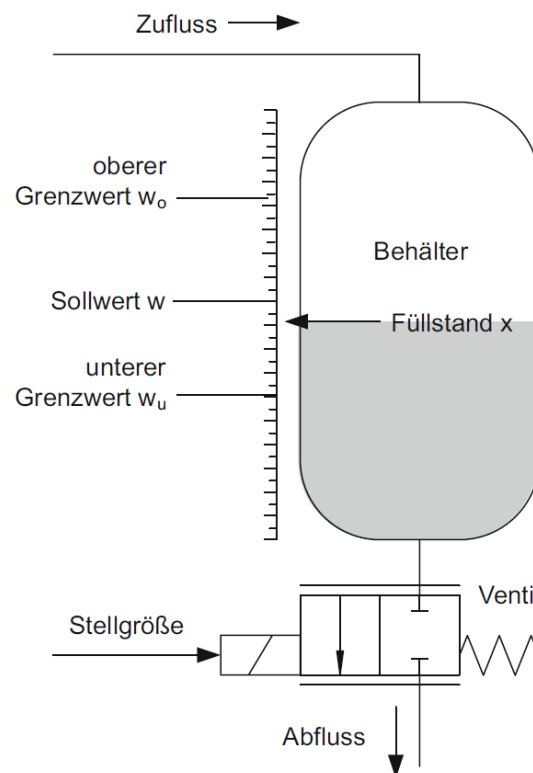


Abb. 10: Füllstandsregelung mit Zweipunktregler, Quelle: Heinrich et al. (2020), S. 204.

Charakteristisch für Zweipunktregler ist, dass die Stellgröße nur die Zustände *Aus* und *Ein* annehmen kann. In Abb. 10 ist eine Füllstandsregelung mit einem Zweipunktregler dargestellt. Die Bezeichnung des Reglers rührt daher, dass die Messung der Regelgröße auf zwei Grenzwerte reduziert ist. Anhand dieser beiden Werte wird das Stellglied aus- respektive eingeschaltet und die Regelgröße pendelt zwischen den Grenzwerten hin und her. Dieser Typ Regler wird für einfache Aufgaben eingesetzt, wo die Güte der Regelung nachrangig ist.<sup>30</sup>

Der PID-Regler wird hingegen dann verwendet, wenn eine schnelle oder genaue Regelung erforderlich ist. Ein PID-Regler ist aus drei Faktoren zusammengesetzt, die jeder eine gewisse Eigenschaft der Regelung beeinflusst.

<sup>30</sup> Vgl. Heinrich/Glückler/Linke (2020), S. 203 f.

Das Blockschaltbild eines solchen Reglers in Parallelschaltung ist in Abb. 11 dargestellt.

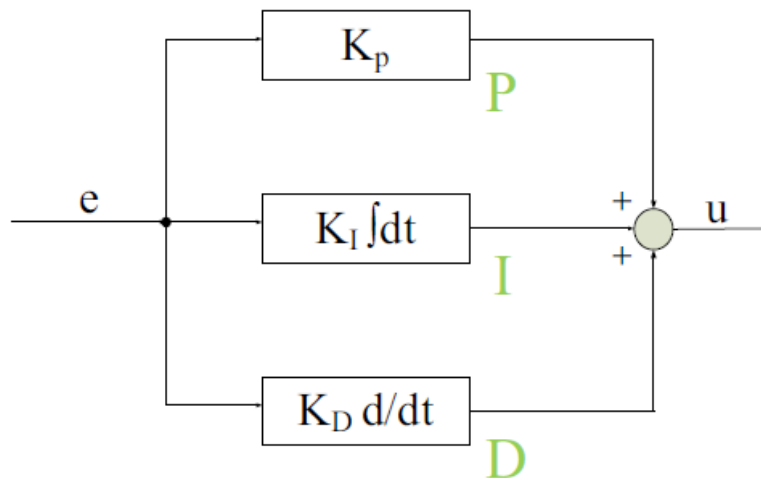


Abb. 11: Struktur eines PID-Reglers, Quelle: Plenk (2019), S. 71.

Der P-Anteil ist die Verstärkung des Reglers und multipliziert die Regeldifferenz mit dem Faktor  $k_p$ . Je größer die Regelabweichung, desto größer wird auch die Stellgröße. Der I-Anteil ist für die langfristige Stabilität der Regelung ausschlaggebend. Dazu wird die Regeldifferenz über die Zeit summiert, und erhöht den I-Anteil der Stellgröße, wenn die Regelabweichung positiv ist und verringert den I-Anteil, wenn die Regelabweichung negativ ist. Wird die Regeldifferenz null, ist auch der Faktor  $k_I \int dt$  null. Mit diesem Teil des Reglers ist es möglich, dass die bleibende Regelabweichung null wird, also die Regelgröße den Wert der Führungsgröße hält. Als dritter Teil eines PID-Reglers ist der D-Anteil verantwortlich dafür, auf schnelle und sprunghafte Änderungen der Regeldifferenz zu reagieren.<sup>31</sup>

Somit wurden die wichtigsten technischen Grundlagen erläutert. Wie diese Informationen im Anlagenkontext übersichtlich dargestellt werden, beschreibt das nächste Kapitel.

## 2.3 Anlagendarstellung

Um die umfassenden technischen Aspekte einer verfahrenstechnischen Anlage anschaulich darzustellen, gibt es mehrere Möglichkeiten. In diesem Kapitel werden die drei meistverwendeten erläutert und ihre Anwendungsgebiete abgegrenzt. Bevor allerdings mit der graphischen Darstellung begonnen werden kann, muss eine Stoffmengenbilanz erstellt werden. Warum diese Bilanz essenziell für den gesamten Entstehungsprozess ist, wird im anschließenden Kapitel erörtert.

### 2.3.1 Stoffmengenbilanz

Ausgangspunkt für die Umsetzung einer prozesstechnischen Anlage ist das Erstellen einer Stoffmengenbilanz. Zweck dieser Bilanz ist die Bestimmung der erforderlichen Anlagendimensionen und im Speziellen des Reaktors, in dem die bestimmungsgemäße Reaktion der Anlage abläuft. Eine detaillierte Beschreibung dieses Apparats erfolgt im Kapitel 5.3.

<sup>31</sup> Vgl. Plenk (2019), S. 71.

Ähnlich zum betriebswirtschaftlichen Kontext einer Bilanz werden in der Stoffmengenbilanz auf der einen Seite die Edukte aufgelistet, und auf der anderen Seite die gewünschten Produkte sowie etwaige Nebenprodukte, die im Bilanzraum entstehen. Dasselbe Prozedere wird auch für den Energieumsatz verwendet. Über die chemischen Reaktionsgleichungen, die die Überführung der Edukte in das Endprodukt beschreiben, werden die erforderlichen Eduktmengen errechnet. Dazu wird eine Bilanzgleichung aufgestellt, aus der sich die notwendigen Volumenströme und Konzentrationen der Eingangsstoffe aus der Menge des geforderten Produkts ableiten lassen.<sup>32</sup>

In Abb. 12 ist die allgemeine Form einer Bilanzgleichung dargestellt.

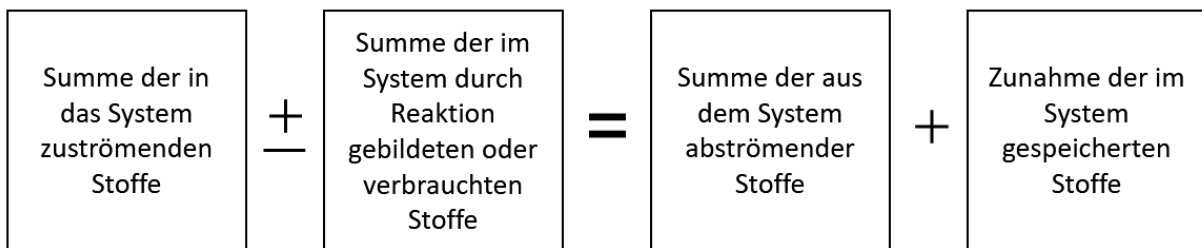


Abb. 12: Allgemeine Bilanzgleichung, Quelle: Eigene Darstellung.

Ein weiterer Parameter, der speziell die Auswahl des Reaktortyps beeinflusst ist die Geschwindigkeit, mit der die Reaktion abläuft. Dieser in der Literatur einfach *Reaktionsgeschwindigkeit* bezeichnete Parameter ist definiert durch die Änderung der Eduktkonzentration im Verhältnis zum gesamten Reaktionsvolumen.<sup>33</sup>

Weitere Faktoren, die Einfluss auf das Layout eines Reaktors haben, sind unter anderem die Betriebsweise, ob kontinuierlich oder im Batchbetrieb, die Wärmeentwicklung der Reaktion und das Produktionsvolumen.<sup>34</sup>

Wie die oben genannten Daten und alle notwendigen Peripheriekomponenten des Reaktors dargestellt werden können, erläutert das nächste Kapitel.

### 2.3.2 Grundfließbild

Um über die Laufzeit eines Projekts eine einheitliche Verständigungsbasis über alle beteiligten Gewerke zu haben, bedarf es einer Darstellung der betreffenden Anlage, die alle notwendigen Technologien, Komponenten und Zusammenhänge hinreichend genau darstellt.

<sup>32</sup> Vgl. Christen (2010), S. 145 f.

<sup>33</sup> Vgl. Christen (2010), S. 146 f.

<sup>34</sup> Vgl. Christen (2010), S. 149 f.

Die erste Form der Anlagendarstellung ist das Grundfließbild wie in Abb. 13 angedeutet. Darin werden die Edukte und Zusatzstoffe sowie die Grundverfahrensschritte, die im letzten Kapitel bereits erwähnt wurden, und die Endprodukte ähnlich einem Flussdiagramm dargestellt.

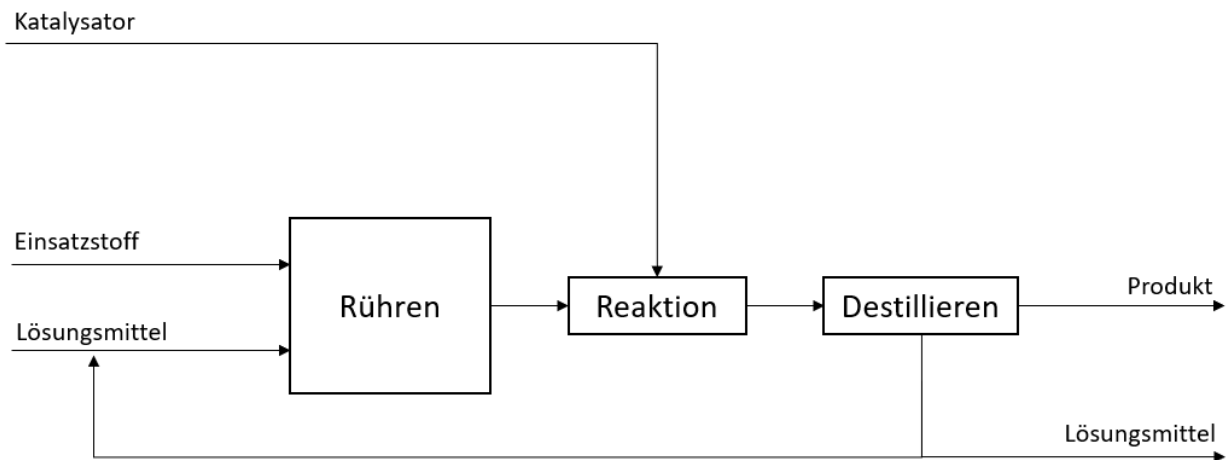


Abb. 13: Beispiel Grundfließbild, Quelle: Eigene Darstellung.

Ein Grund- oder Einsatzstoff wird mit einem Lösungsmittel vermischt und unter Zugabe eines Katalysators zur Reaktion gebracht. Durch Destillation des Reaktionsprodukts wird das Lösungsmittel abgetrennt und dem Prozessbeginn wieder zugeführt. Das Endprodukt wird für eine weitere Verarbeitung abtransportiert oder zwischengelagert. Als Ergänzung können im Grundfließbild zusätzlich die Massenströme der Produkte sowie etwaige Prozessparameter ergänzend angeführt werden.<sup>35</sup>

---

<sup>35</sup> Vgl. Bindel/Hofmann (2016), S. 11.



### 2.3.3 Verfahrensfliessbild

Aus dem Grundflussbild wird in der grundlegenden Planung, dem Basic Engineering, ein Verfahrensfliessbild erarbeitet, wie in Abb. 14 auszugsweise dargestellt.

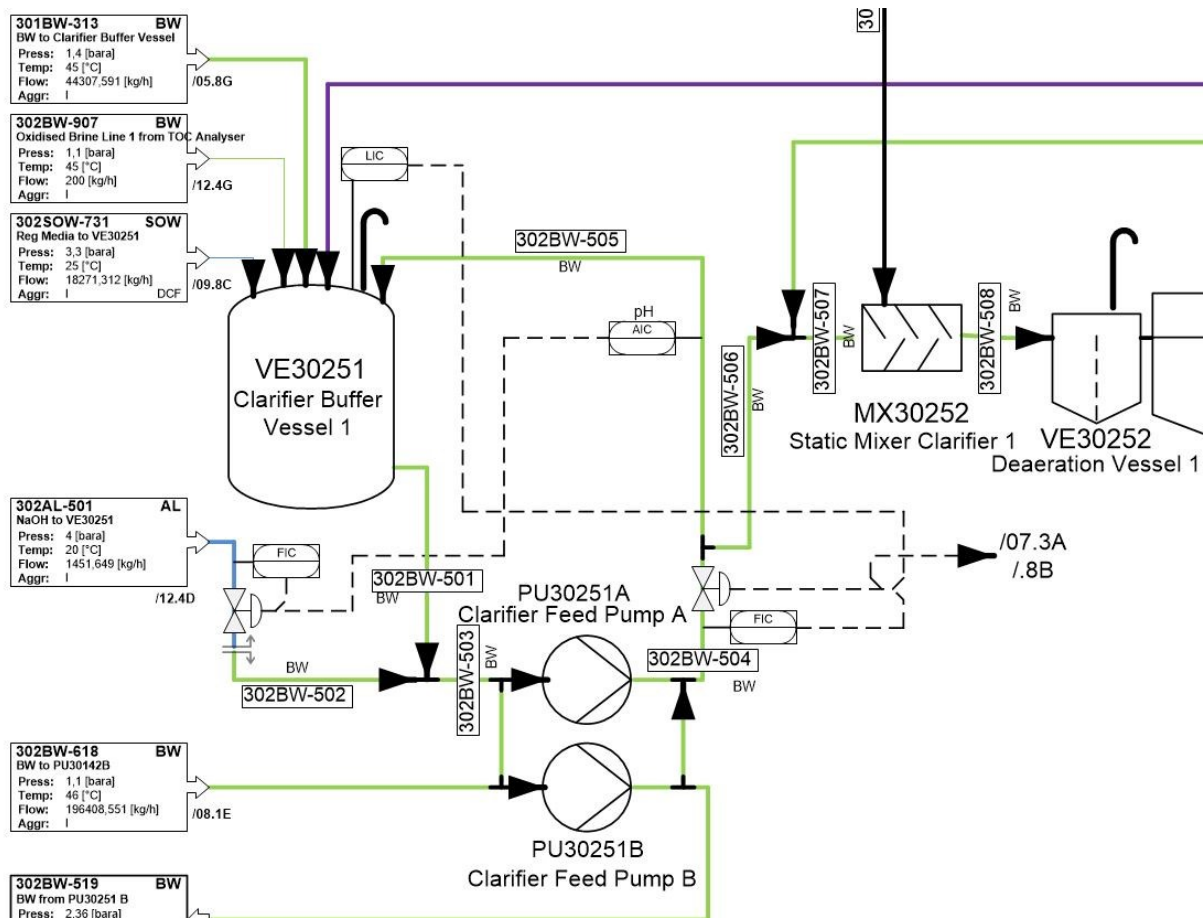


Abb. 14: Verfahrensfliessbild, Quelle: Eigene Darstellung.

Darin sind bereits die Hauptkomponenten einer Anlage wie zum Beispiel Behälter, Reaktoren, Pumpen sowie die Produktströme mit den notwendigen Temperaturen, Drücken oder Stoffdaten dargestellt. Vergleichbar ist ein Verfahrensfliessbild mit einem Blockschaltbild aus der Elektrotechnik. Je nach Art der Anlage werden unterschiedliche prozessrelevante Größen angegeben wie zum Beispiel Konzentration und ph-Wert bei Säuren oder Laugen, Temperatur und Druck bei Dampfleitungen oder Volumenströme. Ebenso werden alle Medien angegeben, die in die Anlage befördert werden und diese am Ende des Prozesses wieder verlassen.<sup>36</sup>

<sup>36</sup> Vgl. Bindel/Hofmann (2016) S. 11 f.

### 2.3.4 R&I-Schema

Die dritte Darstellungsweise im Planungsprozess ist das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema, in abgekürzter Form mit R&I-Schema oder international mit P&ID für *Piping & Instrumentation Diagram* bezeichnet. In Abb. 15 ist ein Ausschnitt aus einem R&I-Schema dargestellt.

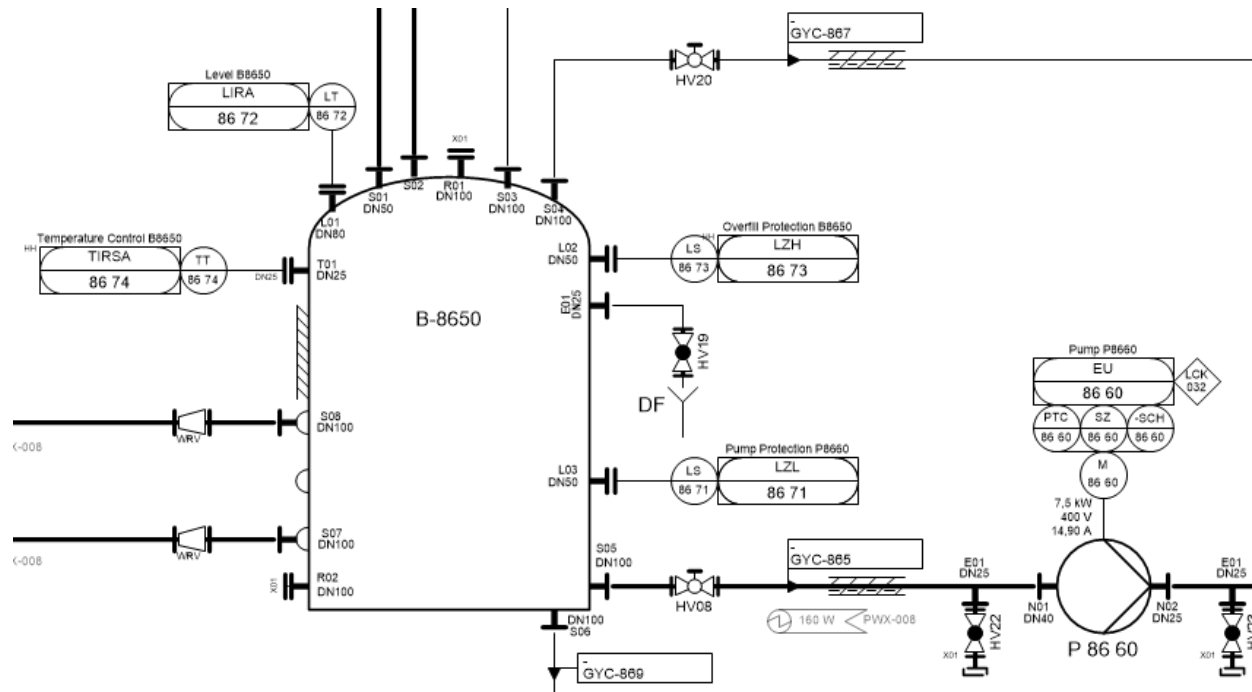


Abb. 15: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Unterschied zum Verfahrensbild sind hier bereits alle Messgeräte und Stellglieder abgebildet, sowie jede einzelne Rohrleitung der Anlage. Des Weiteren sind auch die Rohrleitungsspezifikationen, Regelkreise und Leistungsdaten festgelegt. Rohrleitungen werden meist über den Nenndurchmesser und Nenndruck sowie das Rohrleitungsmaterial definiert. Das Eintragen der Regelkreise soll alle beteiligten Komponenten an einer Regelung auf einen Blick ersichtlich machen. Ein einheitliches Kennzeichnungssystem aus Ziffern- und Buchstabenkombinationen erleichtert das Identifizieren von einzelnen Komponenten im Schema oder im Feld. Dabei wird auch darauf geachtet, welcher MSR-Funktion das jeweilige Gerät zugeordnet ist, und die Kennbuchstaben entsprechend gewählt. Das R&I-Schema stellt bereits die fertige Anlage dar und soll als Grundlage für die Modellierung dienen.<sup>37</sup>

Auf die Eigenschaften der einzelnen Geräte und deren Funktionsweise wird im Kapitel 5.3 noch genauer eingegangen. Im nächsten Kapitel wird der Prozess der Virtualisierung, der in diesem Kapitel beschriebenen Themen erläutert, und die notwendigen Methoden, um ein digitales Abbild einer realen Anlage zu erstellen, betrachtet.

<sup>37</sup> Vgl. Bindel/Hofmann (2016) S. 21 f.

### 3 MODELLIERUNG

In diesem Kapitel werden die Begriffe Modell, Modellbildung und digitaler Zwilling erläutert, sowie deren Anwendungsgebiete in der Technik und speziell in der Verfahrenstechnik betrachtet.

#### 3.1 Der Modellbegriff

Der Ursprung des Wortes *Modell* kommt vom lateinischen Wort *Modus* beziehungsweise dessen Diminutiv *Modulus*. *Modus* bedeutet übersetzt so viel wie *Maß* oder *Maßstab*, folglich steht der Begriff *Modell* für *etwas in kleinerem Maßstab*. Im Duden sind zum Terminus *Modell* zwei Definitionen angeführt, die das Wort im technischen Kontext beschreiben:

“1.a) Form, Beschaffenheit, Maßverhältnisse veranschaulichende Ausführung eines vorhandenen oder noch zu schaffenden Gegenstandes in bestimmtem (besonders verkleinerndem) Maßstab

c) Objekt, Gebilde, das die inneren Beziehungen und Funktionen von etwas abbildet bzw. [schematisch] veranschaulicht [und vereinfacht, idealisiert]”<sup>38</sup>

Eine andere Definition des Begriffs *Modell* ist bei *Herbert Stachowiak* zu finden, der ein Modell mit wissenschaftlichem Kontext durch drei Eigenschaften charakterisiert, Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal.<sup>39</sup> In Abb. 16 wird veranschaulicht, wie sich diese drei Merkmale zu einem Modell zusammenfügen.

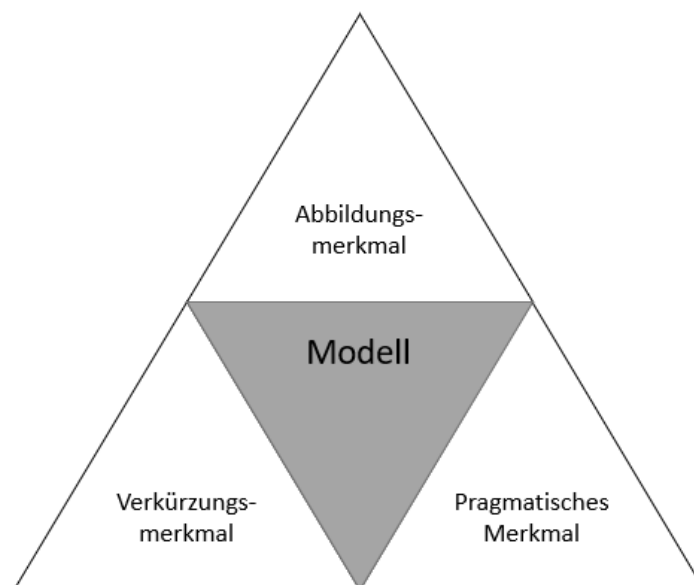


Abb. 16: Hauptmerkmale eines Modells, Quelle: Bandow (2010), S.9 (leicht modifiziert).

<sup>38</sup> Bibliographisches Institut GmbH (2021), Online-Quelle [12.Juni.2021].

<sup>39</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 131.

Das Abbildungsmerkmal besagt, dass ein Modell einerseits die Repräsentation eines realen Systems mit technischem, biologischem oder sozialem Hintergrund ist. Auf der anderen Seite kann ein Modell das Abbild eines anderen Modells sein. Für ein Abbildungsmerkmal kann analog auch der Begriff *Attribut* verwendet werden. Das Verkürzungsmerkmal, auch als Reduktion oder Vereinfachung bezeichnet, beschreibt die Tatsache, dass nicht alle Attribute eines Originals in einem Modell abgebildet werden. Im Zuge der Modellbildung wird so festgelegt, welche Eigenschaften für den Ersteller des Modells sowie dessen Anwender relevant sind, und welche Attribute für den Zweck des Modells vernachlässigt werden können. Das Pragmatische Merkmal ist nach Stachowiak so definiert, dass ein Modell nicht ausschließlich einem Original zugehörig ist. Die Funktion, die das Modell innerhalb eines Zeitintervalls zu erfüllen hat, kann durch Beantwortung von vier Fragen bestimmt werden: Wovon? - Für wen? - Wann? - Wozu?<sup>40</sup>

In der Wissenschaft kann die Erstellung eines Modells aus unterschiedlichen Beweggründen erfolgen. In Abb. 17 sind die häufigsten Anwendungen dargestellt. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird diese Liste um den Zweck *Schulung* erweitert. Darauf, wie ein Schulungsmodell aufgebaut sein muss, wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

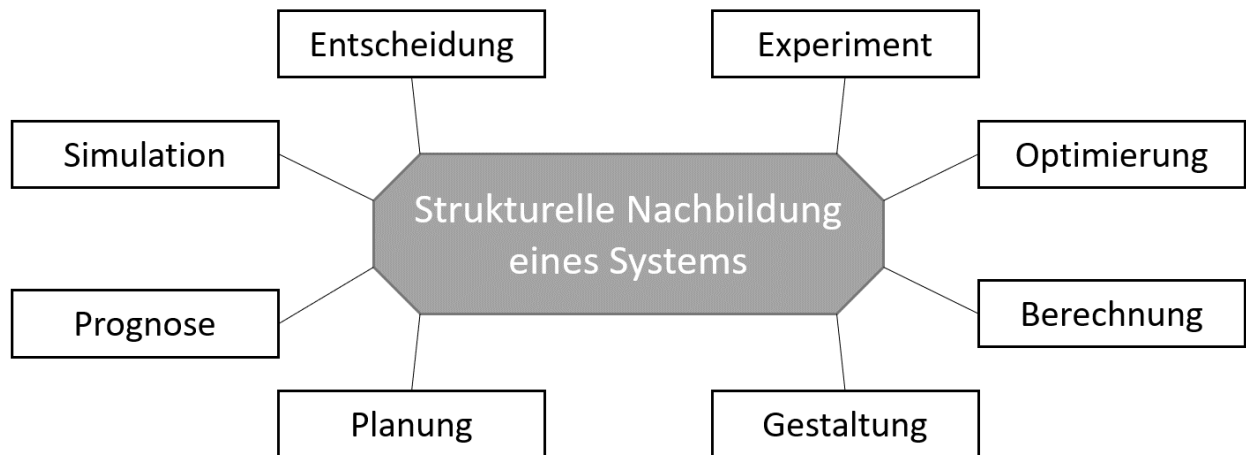


Abb. 17: Modellzwecke, Quelle: Bandow (2010), S.16 (leicht modifiziert).

Aus der Aufgabe, die ein Modell erfüllen soll, lässt sich anschließend ableiten, wie das Modell aufgebaut sein muss.

---

<sup>40</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S.131 ff.

In Abb. 18 sind auszugsweise einige Modellkategorien dargestellt. Diese Klassifikationen sind nicht erschöpfend und in der Literatur finden sich unterschiedlichste Einteilungen, je nachdem in welcher wissenschaftlichen Disziplin, oder welchen Zweck das Modell erfüllen soll. Allerdings sei angemerkt, dass ein Modell selten in genau eine dieser Klassifikationen passt und oft Mischformen anzutreffen sind.<sup>41</sup>

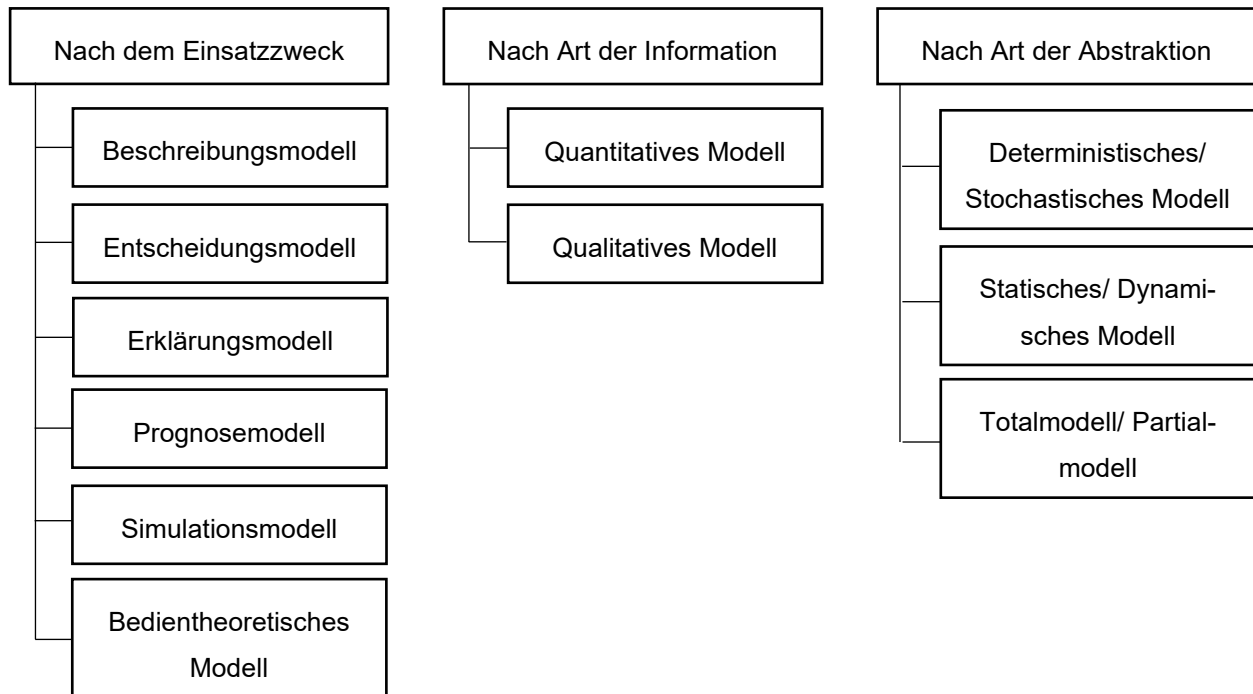


Abb. 18: Beispiel Unterteilung verschiedener Modellarten, Quelle: Bandow (2010), S.38 (leicht modifiziert).

Ein Simulationsmodell, wie es in der gegenständlichen Masterarbeit zur Anwendung kommen soll, ist demnach in folgenden Kategorien angesiedelt: bedientheoretisch, kontinuierlich, partiell, deterministisch und graphisch-deskriptiv. Im nächsten Kapitel wird darauf eingegangen, wie aus einem Zweck und der richtigen Modellart ein gebrauchsfertiges Modell entsteht.

### 3.2 Modellbildung

Die Modellbildung wird auch häufig mit dem Begriff *Transformation* beschrieben, wobei das Original durch Abbildung seiner Attribute in ein Modell übergeführt wird. Je nach Verwendungszweck (vgl. vier Fragen Wovon? Wie? Wozu? Für wen? aus Kapitel 3.1) werden nicht relevante Eigenschaften des Originals vernachlässigt und die erforderlichen Attribute und Funktionen herausgearbeitet.<sup>42</sup>

Ein wesentlicher Prozess bei der Modellbildung ist die Abstraktion. In der Richtlinie 3633 vom Verein Deutscher Ingenieure, kurz VDI, ist die Abstraktion folgendermaßen beschrieben:

<sup>41</sup> Vgl. Bandow (2010), S. 34.

<sup>42</sup> Vgl. Stachowiak (1973), S. 130 f.

“Verfahren zur Reduzierung der Komplexität eines Problems durch Trennung der für bestimmte Aspekte der Problemlösung wichtigen und unwichtigen Details”.<sup>43</sup>

Das bedeutet, dass zu Beginn der Modellbildung festzulegen ist, welche Attribute wesentlich für den Zweck des Modells, und welche vernachlässigbar sind. Ähnliche oder sich wiederholende Aspekte des Originals, werden so weit heruntergebrochen, dass für eigentlich unterschiedliche Prozesse, derselbe Algorithmus im Modell verwendet werden kann.

Eine zweite Methode der Modellbildung ist die Idealisierung. Vorgänge oder Einflussgrößen, die nur eine geringe Auswirkung auf einen Prozess haben, werden pauschaliert oder nicht berücksichtigt. Eine Anwendungsmöglichkeit ist die Verwendung des idealen Gases bei thermodynamischen Vorgängen oder die Vernachlässigung innerer Verluste bei Antrieben. Damit soll in erster Linie die Komplexität eines Modells beschränkt werden, was gleichbedeutend mit der Reduktion des Entwicklungsaufwands für das Modell ist. Der im Vorhinein bestimmte Zweck des Modells sollte dabei aber immer im Auge behalten werden. Wie die Modellierung letztlich erfolgt und mit welchen Tools und Hilfsmitteln gearbeitet wird, bleibt dem\*der Ersteller\*in selbst überlassen. Der gesamte Modellierungsprozess sollte jedenfalls auf die Anzahl der Mitwirkenden abgestimmt sein.<sup>44</sup>

In Abb. 19 sind die Beziehungen und Wirkungen zwischen Modell, Ersteller\*in und Benutzer\*in und dem Original veranschaulicht.

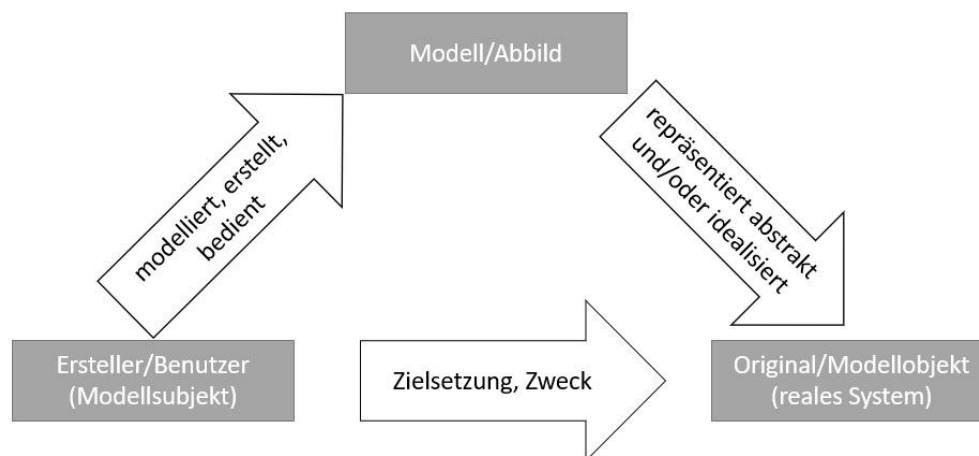


Abb. 19: Beziehungen der Modellbildung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Modellierung kann grundsätzlich nach drei Prinzipien erfolgen:

- Black Box
- White Box
- Grey Box

---

<sup>43</sup> Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2018), S. 3.

<sup>44</sup> Vgl. Bandow (2010), S. 18 f.

Das Unterscheidungskriterium, in welche Kategorie ein Modell fällt, ist die Kenntnis der Anwendenden um die internen Abläufe und Zusammenhänge in dem jeweiligen Modell.<sup>45</sup>

Das Black Box-Modell ist dadurch charakterisiert, dass die internen Vorgänge wie Berechnungen oder Entscheidungen dem Benutzer verborgen bleiben. Datenauswertung und Statistik sind die beiden zentralen Methoden bei der Black Box-Modellierung und das Knowhow liegt allein bei dem\*der Modellerstellenden, der\*die die Regeln der Berechnungen erstellt. Das Ergebnis, das das Modell liefert, lässt keine direkten oder einfach nachvollziehbaren Rückschlüsse auf die internen Gestaltungsregeln zu. Vorteil hiervon ist, dass man sich als Anwender\*in keine Gedanken über die Gesetzmäßigkeiten innerhalb der Box machen muss. Einzig die richtige Form der Eingangsparameter muss gewährleistet sein.

Beim White Box-Modell sind im Gegensatz zur Black Box die internen Vorgänge transparent und das Resultat kann jederzeit nachgeprüft und verglichen werden. Das setzt allerdings voraus, dass der\*die Anwender\*in auch die zu Grunde liegenden Prinzipien und Zusammenhänge verstehen muss, die das Modell ausmachen, um das Modell innerhalb der vorgesehenen Grenzen zu nutzen und valide Ergebnisse zu generieren.<sup>46</sup>

Die dritte Möglichkeit der Modellierung ist das Grey Box Modell, das die Eigenschaften von schwarz und weiß kombiniert. Die Transparenz des Modells geht nur so weit wie nötig, um bei Anwendenden nicht zu viel Detailwissen voraussetzen zu müssen. Andererseits geht die Kapselung der Vorgänge so weit wie möglich, um eine einfache Bedienbarkeit zu gewährleisten. Abb. 20 veranschaulicht den Zusammenhang der drei Modellarten und die Grundlagen, auf denen die jeweilige Modellierung basiert.<sup>47</sup>

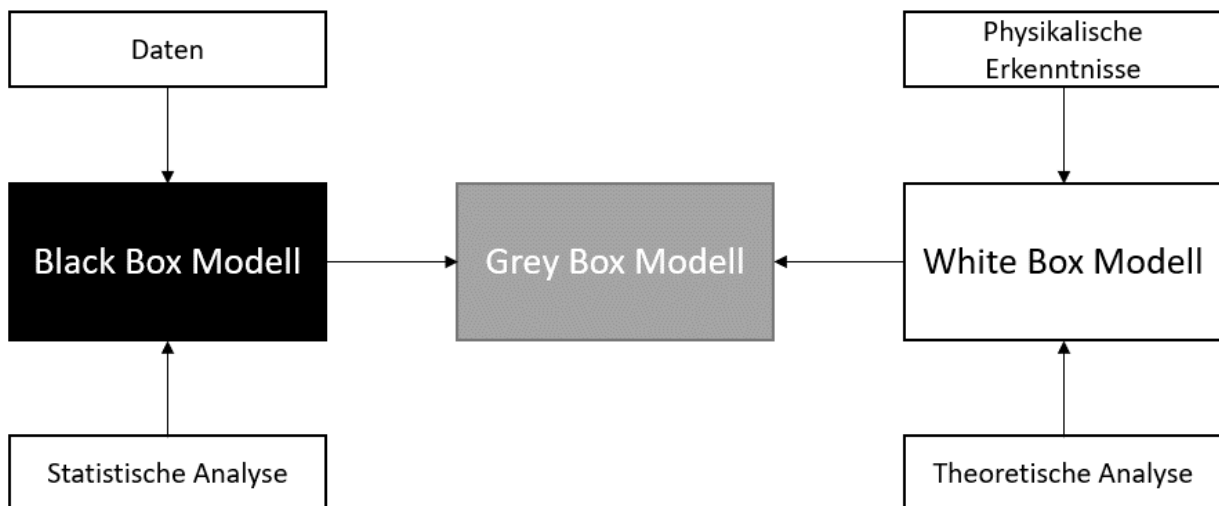


Abb. 20: Zusammenhang der drei Modellarten, Quelle: Yang/Eddy/Krishnamurty/Grosse (2017), S.3 (leicht modifiziert).

<sup>45</sup> Vgl. Bohn/Unbehauen (2016), S. 236.

<sup>46</sup> Vgl. Bohn/Unbehauen (2016), S. 242.

<sup>47</sup> Vgl. Yang/Eddy/Krishnamurty/Grosse (2017), S. 3 f.

Aus dem Aufbau der Modelle lässt sich somit schließen, dass ein Black Box Modell durch Verarbeitung experimentell gewonnener Daten, und ein White Box Modell durch bekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten definiert sind.

Die Auswahl der Struktur und des Modellzwecks ist ein notwendiges Kriterium, um ein Modell zu erstellen, aber kein hinreichendes. Unabhängig davon, ob die Modellierung vom eigenen Unternehmen durchgeführt oder an einen externen Dienstleister vergeben wird, ist die Erstellung eines Pflichtenhefts oder einer Produktspezifikation empfehlenswert. Darin werden alle Schnittstellen, Funktionen und sonstigen Anforderungen an das Modell und den Informationsaustausch mit der Umwelt definiert. Ob ein Modell seinen Zweck erfüllt und das vorgesehene Verhalten widerspiegelt, wird durch Verifizierung und Validierung überprüft und im nächsten Kapitel beschrieben.

### 3.3 Verifizierung und Validierung

Wie schon im letzten Kapitel kurz angedeutet, ist ein Modell nur so gut wie die Vorgaben, die zur Erstellung gemacht wurden. Die Feststellung, ob diese Richtlinien umgesetzt wurden, wird durch den Prozess der Verifizierung und Validierung getroffen. In der VDI-Richtlinie 2206 wird diese Methode auch unter dem Begriff *Eigenschaftsabsicherung* zusammengefasst. Bei der Verifizierung wird geprüft, ob die Umsetzung des Modells den Anforderungen der Benutzer\*innen oder Kund\*innen entspricht, die, wie schon im Abschnitt Modellbildung erwähnt, im Pflichtenheft oder in den Produktspezifikationen festgehalten sind. Der Prüfungsrahmen beschränkt sich jedoch nur darauf, ob die formalen Kriterien erfüllt wurden.<sup>48</sup>

Für das Modell, das im Zuge dieser Masterarbeit erstellt wird, sind solche Kriterien zum Beispiel die Schnittstellenkompatibilität zum Prozessleitsystem oder die Bezeichnungen der einzelnen Komponenten, die mit dem vorgegebenen R&I-Schema übereinstimmen muss. Anzumerken ist hier, dass bei der Verifizierung kein Funktionstest durchgeführt wird. Ein fehlerhaftes Verhalten oder ein Abweichen von der gewünschten Funktionalität lässt sich erst durch die Validierung feststellen. Dabei handelt es sich um einen Test- oder Probetrieb, bei dem wie schon erwähnt, die Funktionen des Modells auf das gewünschte Verhalten geprüft werden. Beide Prozesse können in ihrem Rahmen erfolgreich sein, aber am Ende der Modellierung müssen beide Prüfungen positiv absolviert werden, um das Modell auch zweckgemäß einsetzen zu können.

Wie es sich aus der Beschreibung schon erahnen lässt, sind die Verifizierung und Validierung Methoden, die ihren Ursprung in der Qualitätssicherung haben. Um diese qualitätssichernden Maßnahmen auch möglichst effizient zu nutzen, wird deren Anwendung bereits während der Modellerstellung empfohlen.

---

<sup>48</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2004), S. 38 f.



Eine Möglichkeit, den Gesamtprozess dahingehend umzusetzen bietet die VDI-Richtlinie 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* mit dem V-Modell, wie in Abb. 21 dargestellt.

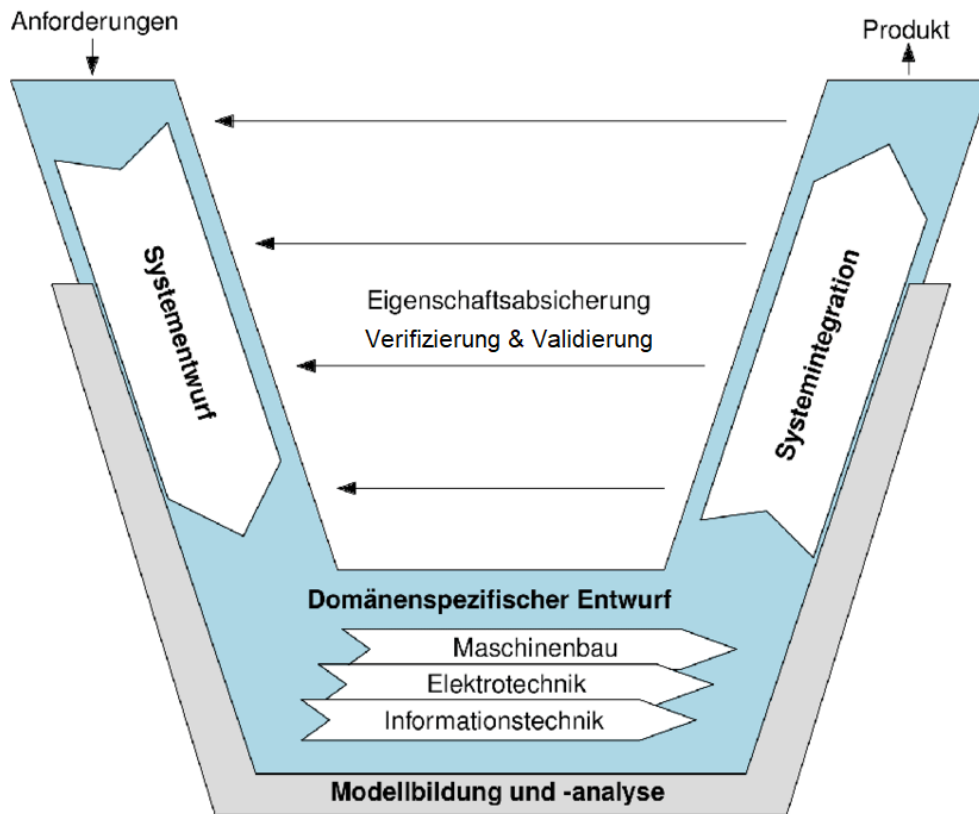


Abb. 21: V-Modell im Systems Engineering, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2004), S. 29 (leicht modifiziert).

Die Richtlinie bezieht sich, wie sich dem Titel entnehmen lässt, auf mechatronische Systeme, der Prozess als solches kann jedoch auch auf die Sparte Verfahrenstechnik ausgeweitet werden. Das V-Modell selbst hat den Ursprung in der Software-Entwicklung und beschreibt den Entstehungsprozess von der Festlegung der Anforderungen bis zur Finalisierung des Produkts. Unterteilt ist das Konzept in die drei Phasen *Systementwurf*, *Modellbildung und -analyse* und *Systemintegration*, sowie der Eigenschaftensicherung wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, als begleitendes Element der Qualitätssicherung.<sup>49</sup>

Wie aus einem validierten Modell ein digitaler Zwilling wird, soll das nächste Unterkapitel klären.

### 3.4 Digitaler Zwilling

Im Lexikon der Gesellschaft für Informatik e.V. ist der digitale Zwilling folgendermaßen definiert:

“Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge wie zum Beispiel Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mittels einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für

<sup>49</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2004), S. 29 f.

den digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird.”<sup>50</sup>

*Digitaler Zwilling* ist ein Begriff, der seinen Ursprung in der Modelltheorie hat, und beschreibt wie oben angeführt, ein virtuelles Abbild einer real existierenden Vorlage. Es wird ein digitales Modell geschaffen, das das Verhalten eines Systems imitiert.<sup>51</sup>

Die ursprüngliche Intention hinter der Erstellung und Nutzung eines digitalen Zwillings ist, das Ergebnis einzelner Produktionsschritte einer Fertigungsanlage bereits vor deren Errichtung zu kennen und optimieren zu können. Dabei ist der digitale Zwilling jedoch nicht ausschließlich auf die Produktionsmaschine beschränkt. Auch die Werkstoffe und das Werkstück selbst können durch einen digitalen Zwilling repräsentiert werden. Der digitale Zwilling besteht somit aus einzelnen Elementen, die Eigenschaften und Funktionen eines Systems widerspiegeln. Dieses System kann unterschiedlichster Natur sein und ist nicht auf Fertigungsanlagen beschränkt. Biologische Prozesse können ebenso in Modellen abgebildet werden wie wirtschaftliche Vorgänge. Von einem digitalen Zwilling wird hauptsächlich im Maschinen- und Anlagenbau gesprochen, wo auch der Überbegriff *digitale Fabrik* seinen Ursprung hat.<sup>52</sup>

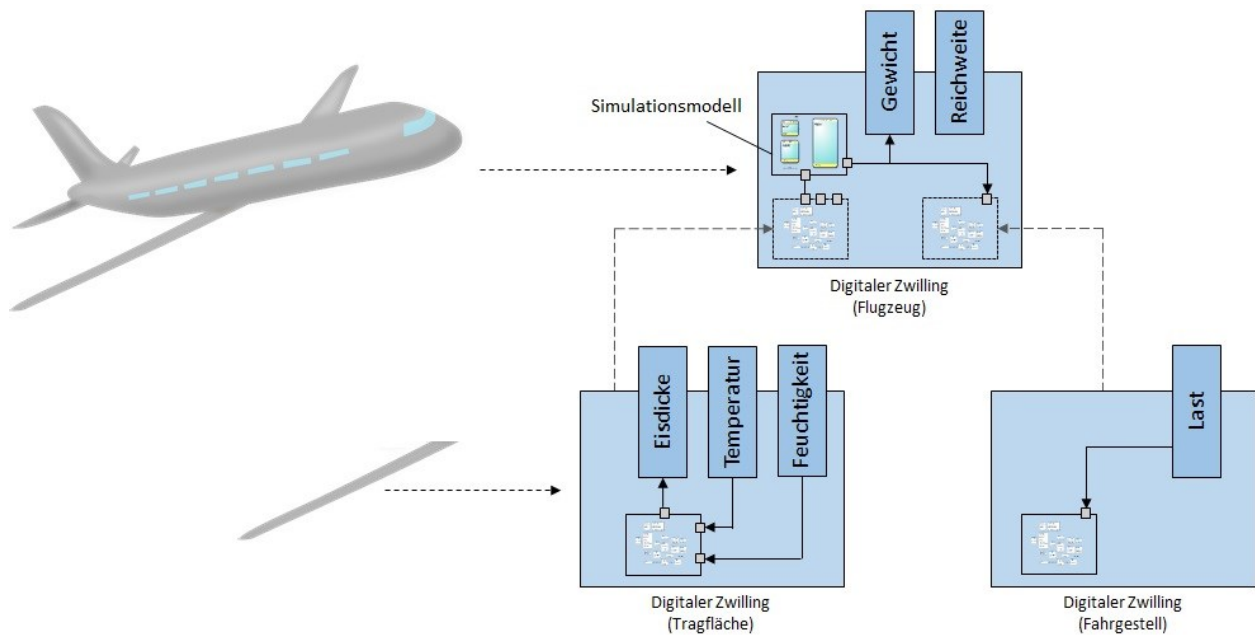


Abb. 22: Verschachtelung von digitalen Zwillingen in einem Gesamtsystem, Quelle: Kuhn (2017), Online-Quelle [03.Juli.2021]

Ein wesentlicher Punkt ist die Definition einheitlicher Schnittstellen, die den Datenaustausch zwischen den Teilmodellen regeln. In Abb. 22 ist beispielhaft der digitale Zwilling eines Flugzeugs dargestellt. Das Gesamtsystem *Flugzeug* ist aus einzelnen Teilsystemen zusammengesetzt, die die Funktionsbaugruppen des Flugzeugs digital abbilden. Das Flugzeugmodell ist dabei beispielsweise auf die Simulationsdaten des

<sup>50</sup> Kuhn (2017), Online-Quelle [03.Juli.2021].

<sup>51</sup> Vgl. Grösser (2018), Online-Quelle [12.Juli.2021].

<sup>52</sup> Vgl. Kritzingler/Henjes/Karner/Sihn/Traar (2018), S. 1 ff.

Tragflächenmodells angewiesen. Diese müssen entsprechend aufbereitet sein, damit die Algorithmen der Gesamtsimulation auch ein valides Ergebnis liefern.<sup>53</sup>

Die Schnittstellen des digitalen Zwillings, der im Rahmen dieser Masterarbeit erstellt wird, sind zum einen die Maschine-Maschine-Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und Prozessleitsystem und zum anderen die Mensch-Maschine-Schnittstelle mit der Bedienoberfläche des Simulationstools sowie der Prozessvisualisierung. Die Signale, die vom Prozessleitsystem zur Steuerung des Modells ausgegeben und wieder eingelesen werden, müssen deckungsgleich mit den in den einzelnen Modellobjekten projizierten Anschlusspunkten sein. Dies trifft auch für die Bedienelemente der Visualisierung zu, die in weiterer Folge vom Prozessleitsystem in Befehle ans Modell umgewandelt werden. Zusätzlich muss aus der Visualisierung klar erkennbar sein, welches Prozessobjekt genau vom Bediener aktuell gesteuert wird.

Für die Bedienschulung sind die oben angeführten Kopplungen ausreichend. Je nach Verwendungszweck des Modells können jedoch noch weitere Schnittstellen erforderlich werden. Die Verbindung zu einem übergeordneten MES- oder SCADA-System wäre eine solche Möglichkeit, um die Anlage in einen bestehenden Betrieb bestmöglich zu integrieren. Wie eine Bedienschulung aktuell durchgeführt wird, welche Themen beachtenswert sind und wie ein digitaler Zwilling die Qualität einer Schulung verbessern kann, steht im Fokus des nächsten Kapitels.

---

<sup>53</sup> Vgl. Kuhn (2017), Online-Quelle [03.Juli.2021].

## 4 SCHULUNG

Das Kernthema dieser Arbeit ist, wie auch im Titel festgehalten, die Schulung der anlagenbedienenden Personen. In diesem Kapitel soll ein Überblick über das Berufsbild und die Anforderungen gegeben, sowie die Unterschiede zwischen herkömmlicher Unterweisung und Schulung am digitalen Zwilling herausgearbeitet werden.

### 4.1 Berufsbild

Über die Jahrzehnte hat das Berufsbild des\*der Anlagenbediener\*in eine starke Wandlung durchgemacht. War der Beruf früher mit viel Schweiß und Schmutz verbunden, wurde mit dem Einfluss der Automatisierung immer mehr ein Schreibtischjob daraus. Um die notwendigen Geräteeinstellungen und die optimalen Prozessparameter aufrecht zu erhalten, war eine ganze Gruppe an Facharbeiter\*innen notwendig, die koordiniert zu Werke gehen musste, um den Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Die Erfindung von Relais, Elektronik und letztlich der speicherprogrammierbaren Steuerung ließen die körperlich anstrengenden Tätigkeiten weniger und weniger werden. In den 1980er Jahren ging der Trend in Richtung vollautomatisierter Anlagen, die gänzlich ohne Bedieneingriffe arbeiteten. Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass diese Lösung nicht das Optimum darstellt, und der Mensch wurde wieder stärker in das Gesamtkonzept integriert. Allerdings änderten sich die Bereiche, die einen manuellen Eingriff erforderten. Die Zustände in der Anlage werden größtenteils vollautomatisch von einem Prozessleitsystem geregelt. Der\*die Anlagenbediener\*in rückt mehr in die Position eines\*einer *Managers\*Managerin*, mit der Aufgabe, den Betriebsablauf der Anlage zu überwachen und optimieren sowie Fehler zu beseitigen. Dazu ist es auch von Vorteil, nicht nur zu wissen, wie eine Anlage funktioniert, sondern auch warum. Das bedeutet, ein gewisses Maß an Ausbildung muss Voraussetzung sein. Handwerkliches Geschick und Grundwissen in Physik sowie in Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik sollte ebenso vorhanden sein.<sup>54</sup>

---

<sup>54</sup> Vgl. Kroll/Nußko (2005), Online-Quelle [8.August.2021], S.125 f.

Wie sich die technische Ausrüstung einer Leitwarte zur Anlagenüberwachung und -bedienung im Lauf der Zeit verändert hat, soll Abb. 23 zeigen.



Abb. 23: Leitwarte eines Versuchskernreaktors früher und heute, Quelle: Technische Universität Wien (2021), Online-Quelle [10.November.2021].

Die linke Seite zeigt den Leitstand des Forschungsatomreaktors der TU Wien zum Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme in den frühen 1960er Jahren. Rechts daneben ist derselbe Leitstand abgebildet, wie er aktuell ausgestattet ist. Mit der Weiterentwicklung der technischen Möglichkeiten haben sich auch die Anforderungen an die Bedienenden geändert. Mit Beginn der Automatisierung konnten in der Leitwarte selbst nur die wichtigsten Prozessparameter verfolgt werden. Darüber hinaus mussten diese Werte erst aus den angezeigten Strom- oder Spannungssignalen in die entsprechende physikalische Größe umgerechnet werden. Dabei lag die Schwierigkeit darin, sich aus den wenigen zur Verfügung stehenden Informationen, ein hinreichend genaues Bild vom gesamten Anlagenzustand zu machen, um im Falle eines Fehlers früh genug reagieren zu können. Durch die Evolution der technischen Möglichkeiten haben sich auch neue Herausforderungen für Anlagenbediener\*innen ergeben. Die kleinen monochromen Displays sind großen Computerbildschirmen gewichen, die alle eine Vielzahl an Signalen einer Anlage auswerten und in einer nicht enden wollenden Auswahl an Farben und Formen darstellen. Die richtigen und wichtigen Informationen aus dieser Datenflut zu filtern ist die Aufgabe, die es für Anlagenbediener\*innen zu meistern gilt. Analog zu den Leitständen sind die Simulationstechniken derselben Weiterentwicklung unterworfen. Textbasierte Simulationen auf einem Großrechner wurden allmählich mit grafischen Elementen erweitert und aktuelle Simulationstools bieten eine Benutzerschnittstelle, die eine ähnlich niedrige Einstiegsschwelle wie ein Textverarbeitungs- oder Tabellenkalkulationsprogramm hat. Der Kern der Sache jedoch, das Schaffen eines Situationsbewusstseins für den Anlagenzustand, ist früher wie heute das Ziel das es in der Bedienerschulung zu erreichen und zu erhalten gilt. Ein möglicher Weg dahin wird im folgenden Abschnitt beschreiben.

## 4.2 Schulungsablauf

Bisher konnte das Verständnis für die verfahrenstechnischen und automatisierungstechnischen Prozesse nur durch Schulungen im herkömmlichen Sinn geschaffen werden. Frontalvorträge und Demonstrationen an der realen Anlage decken zwar ein breites Spektrum der Möglichkeiten ab, Wissen und Einblick über die Vorgänge zu schaffen, allerdings können nicht alle Eigenschaften und Prozesse dargestellt werden.

In prozesstechnischen Anlagen werden häufig umwelt- oder gesundheitsgefährdende Stoffe verarbeitet und stellen in Kombination mit den notwendigen Temperaturen oder Drücken in einigen Anlagenteilen im Fehlerfall ein erhebliches Verletzungspotential für die Beschäftigten im nahen Umfeld dar. Ein gänzlicher Fehlerausschluss ist so gut wie unerreichbar, jedoch kann man durch entsprechende Schulung und Unterweisung Fehler durch den *Faktor Mensch* dabei wesentlich reduzieren. Die Theorie, wie jeder einzelne Anlagenteil, sowie das große Ganze funktioniert, kann sowohl durch Vortrag als auch durch Bedienung der realen Anlage erfolgen. Die praxisorientierte Schulung an der Anlage kann auf zwei Arten vorgenommen werden.

Die eine Variante kann im Zuge der Inbetriebnahme des Prozessleitsystems durchgeführt werden, wobei inerte und nicht gesundheitsgefährdende Stoffe wie Wasser, die im realen Betrieb vorgesehenen Edukte ersetzen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Fehlerfälle nachgestellt werden können, die ansonsten Schäden an Menschen oder Material verursachen. Fehlerzustände beziehungsweise Gefährdungen, die etwa durch hohe Temperatur oder Druck entstehen, sollten jedoch tunlichst vermieden werden. Nachteilig ist hier, dass Funktionen, die auf bestimmten Stoffeigenschaften oder Zuständen basieren, nicht wie gewünscht arbeiten und so im Rahmen einer Schulung nicht gezeigt werden können.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Unterweisung an der betriebsbereiten Anlage mit allen für die Produktion erforderlichen Medien zu absolvieren. Im Gegensatz zur ersten Methode sind hier medienspezifische Anlagenteile voll funktionsfähig. Zu Schulungszwecken hervorgerufene Zustände können durch die mangelnde Vertrautheit mit der Anlage und der Prozessleittechnik eskalieren und Situationen verursachen, die potenziell gefährlich sind.

Die Kanzler Verfahrenstechnik GmbH setzt bisweilen in der Bedienerschulung auf eine Kombination der beiden vorgestellten Methoden, um ein möglichst breites Verständnis für das Prozessleitsystem und die Funktionsweise einer Anlage zu erwirken. Obwohl viele Möglichkeiten durch diese Art des Trainings abgedeckt werden, ist man zur Erklärung bei gewissen kritischen Szenarien immer noch auf verbale und bildbehaftete Darstellung beschränkt.

Das für die Erkennung von sich anbahnenden Störfällen wichtige Situationsbewusstsein, um in kritischen Momenten die richtigen Handlungen zu setzen, kann mit den oben angeführten Methoden nur bedingt geschaffen werden. Schulungen, die von der Kanzler Verfahrenstechnik GmbH im Zuge ihrer Anlagenerichtung durchgeführt werden, orientieren sich stark an dem oben beschriebenen Ablauf, wie die Agenda einer Anlagenschulung in Abb. 24 zeigt.

kvt renewables



### Agenda Schwefelsäurerückgewinnungsanlage

- Schwefelsäure allgemein
- Handhabung von Schwefelsäure
- Verfahrensbeschreibung
- Hauptaggregate
- Control Loops
- Anlagenbilder Prozessleitsystem

renewable feedstocks. closed loops. clean emissions.

Abb. 24: Beispielhafter Schulungsablauf der KVT GmbH, Quelle: Eigene Darstellung

In einem Frontalvortrag werden die grundlegenden Daten und Prozesse der jeweiligen Anlage beschrieben. Fehlerzustände und stoffliche Gefahren werden explizit erwähnt. Während der Einschulung am Prozessleitsystem wird auch explizit auf diese Risiken hingewiesen. Das Nachstellen kritischer Zustände kann aber aus den zuvor in diesem Kapitel beschriebenen Einschränkungen im realen Betrieb nicht erfolgen. Das ganzheitliche Verständnis der ablaufenden Prozesse und die richtige Anwendung dieses Wissens in Gefahrensituationen kann so nur eingeschränkt geschaffen, und noch weniger vertieft werden. Welche Verbesserungen die Verwendung eines digitalen Zwillings aus Sicht des Autors dieser Arbeit mit sich bringen können, wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

## 4.3 Verbesserungspotenzial

Durch den Einsatz eines digitalen Zwillings sollen alle anlagenbezogenen Prozesse und Betriebsphasen in die Bedienerschulung am Prozessleitsystem eingebunden werden und eine ganzheitliche Ausbildung ermöglichen. Explosionsschutz, Überdruck oder ein falsches Mischungsverhältnis gefährlicher Stoffe haben am digitalen Abbild keine Auswirkung auf die Umwelt. Ebenso können Prozeduren wie die Befüllung, Hoch- und Niederfahren und natürlich auch der Automatikbetrieb nachgestellt werden, und geben dem\*der Anlagenbediener\*in aber die Möglichkeit, ein Situationsbewusstsein zu schaffen, um anormale Anlagenzustände bereits vor deren Entstehung zu erkennen, oder deren Auswirkungen darzustellen.<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> Vgl. Schreck (2002), S. 79 ff.

In der Flugsicherheit gibt es drei Kategorien, in die Fehler durch menschliches Versagen eingeteilt werden. Die erste Gruppe sind Fehler, die durch Unkenntnis der Situation entstehen. Fehlende oder falsche Informationen, oder Anzeigen, die sich nicht im Wahrnehmungsfenster des Bedieners befinden, lassen die Identifizierung einer Gefahrensituation nicht zu und verhindern das Treffen von Gegenmaßnahmen.<sup>56</sup>

Der Unfall im Atomkraftwerk *Three Mile Island* in Harrisburg, Pennsylvania im Jahr 1979 wurde dadurch mitverschuldet, dass die Bedienenden durch fehlende Informationen den Zustand des Reaktors sowie des Kühlmittelkreislaufs nicht erkannten und es zu einer teilweisen Kernschmelze sowie Freisetzung von Radioaktivität kam.<sup>57</sup>

Die zweite Kategorie beschreibt Fehler, die durch Fehleinschätzung einer Situation entstehen. Auslöser können beispielsweise eine falsche Interpretation der vorliegenden Informationen sein oder das Verlassen auf ein automatisiertes System aus Gewohnheit.<sup>58</sup>

Ein Beispiel, welche katastrophalen Auswirkungen ein solcher Fehler haben kann, ist die Atomkatastrophe von Tschernobyl. Ein grundsätzlich unkritischer Test des Notstromsystems eskalierte unter anderem durch eine Reihe von Fehlbedienungen infolge von Unwissenheit über die Betriebsbedingungen und physikalischen Grundlagen des Kernreaktors. Die Betriebsparameter bewegten sich durch Manipulation im Sicherheitssystem in einen kritischen Bereich, wodurch die Maßnahme der manuellen Schnellabschaltung unwirksam wurde und dessen Auslösung erst zu der nuklearen Explosion führten.<sup>59</sup>

In die dritte Kategorie fallen Fehler, die durch falsche Schlussfolgerungen aus einer Gefahrensituation entstehen oder durch Handlungen die man in guter Praxis als unvernünftig bezeichnen würde.<sup>60</sup>

Diese vorher genannten Fehler gilt es so gut wie möglich, durch Schulung des Situationsbewusstseins der Anlagenbediener\*innen, zu vermeiden. In der Luftfahrt oder der Kerntechnik werden bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts Simulatoren zum Zwecke der Ausbildung eingesetzt. Diese Vorgehensweise zielt darauf ab, Kompetenzen für unerwartete oder sicherheitstechnisch gefährliche Situationen aufzubauen, indem spezifische Situationen nachgestellt werden. Die zu Schulenden können so den Umgang mit einer Anlage abseits der schon erwähnten Frontalschulung lernen, um in Gefahrensituationen die richtigen Handlungen zu setzen.<sup>61</sup>

Ein anderer Ansatz des modellbasierten Lernens ist das Verhaltensmodellierungstraining, wie es *P. J. Taylor et al. (2005)* in einer Analyse von über 100 Studien beschreibt.<sup>62</sup>

---

<sup>56</sup> Vgl. Endsley (1995), S. 289 f.

<sup>57</sup> Vgl. United States Nuclear Regulatory Commission (2018), Online-Quelle [2.September.2021].

<sup>58</sup> Vgl. Endsley (1995), S. 290 f.

<sup>59</sup> Vgl. Czakainski (1996), S. 6 ff.

<sup>60</sup> Vgl. Endsley (1995), S. 291.

<sup>61</sup> Vgl. Ritz (2013), S. 1 f.

<sup>62</sup> Vgl. Taylor/Chan/Russ-Eft (2005)



Erweitert wurde dieses Verfahren von Ritz et al. (2013) um die PUMA-Methode, wobei PUMA für *Problem-Ursache-Maßnahmen-Ausführung* steht. Der Unterschied zur herkömmlichen Schulung besteht darin, dass moderierte Gespräche über Verhaltensweisen in gewissen Situationen die Kompetenzen des Teams als Ganzes fördern.<sup>63</sup>

Ein Synergieeffekt, der durch Nutzung eines digitalen Zwillings erzielt werden kann, ist die Verkürzung der Durchlaufzeit eines Projekts. Anlagenplaner\*innen haben bei der begleitenden Erstellung einer Simulation für Schulungszwecke den Vorteil, alle Prozesse und Parameter, die das Schulungsmodell darstellen soll, zu kennen. So kann ein Schulungsprogramm umgesetzt werden, das zielgerichtet auf die verfahrens- und sicherheitstechnischen Aspekte einer Anlage ausgerichtet ist. Darüber hinaus kann der digitale Zwilling an Modifikationen der realen Anlage angepasst und geänderte Betriebsbedingungen vorab dem Bedienteam vermittelt werden.<sup>64</sup>

Der *Design-Freeze* ist der Meilenstein, mit dem die Planung größtenteils abgeschlossen, und in die Ausführung übergegangen wird. Ab diesem Zeitpunkt sind keine Änderungen mehr vorgesehen.<sup>65</sup> Es beginnt damit auch die Entwicklung der Steuerungssoftware für das Prozessleitsystems. Ebenso wird für die Bedienung der Anlage die Visualisierung erstellt. Im Kapitel 5.3.1 werden diese Themen noch ausführlich erläutert. Wie schon zu Beginn dieser Arbeit festgehalten, soll es das Ziel sein zu untersuchen, inwieweit sich das oben erwähnte Verbesserungspotential durch virtuelle Schulung in einer Simulationsumgebung umsetzen lässt. Der Fokus liegt hier auf dem Simulationstool SIMIT, entwickelt und veröffentlicht von der Siemens AG. Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Auswahl einer für den Zeitrahmen dieser Arbeit angemessenen Anlage und deren funktionaler Beschreibung.

Für jedes Betriebsmittel, das in der Anlage verplant wird, findet sich in der Modellierungssoftware ein digitales Abbild, ein sogenanntes *Diagramm*, das die notwendigen Funktionen des Originalbauteils nachbildet. Wie die Erstellung des Modells im Detail vonstattengeht, wird in einem späteren Kapitel ausführlich beschrieben.

---

<sup>63</sup> Vgl. Ritz (2013), S. 7 f.

<sup>64</sup> Vgl. Schreck (2002), S. 82 f.

<sup>65</sup> Vgl. TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management GmbH & Co. KG (2021), Online-Quelle [3.August.2021].

## 5 DAS ORIGINAL

Dieses Kapitel beschreibt die reale Anlage, die im Kapitel 5.3.1 als digitaler Zwilling nachmodelliert wird. Zuerst werden die ausschlaggebenden Faktoren, warum diese konkrete Anlage ausgewählt wurde, erörtert. Anschließend wird auf die Funktionen sowie den Aufbau und einzelne Komponenten eingegangen.

### 5.1 Anlagenauswahl

Wie bereits in der Firmenbeschreibung erwähnt, ist die Kanzler Verfahrenstechnik GmbH spezialisiert auf Produktionsanlagen für Glycerin, Glycerinderivate und Epichlorhydrin sowie auf Abfallbehandlungstechnologien. Der Planungsaufwand der Steuerungstechnik wird firmenintern unter anderem an der Anzahl der Prozessobjekte gemessen. Jedes Signal, das von einem Sensor eingelesen oder mit dem ein Aktor gesteuert wird, zählt als ein Prozessobjekt, unabhängig davon, ob es ein analoges oder binäres Signal ist. Anlagen, die für ein bestimmtes Kundenprojekt entwickelt werden, liegen im Bereich von einigen 100 bis über 1000 Prozessobjekten. Um den Arbeitsaufwand in einem für diese Masterarbeit angemessenen Rahmen zu halten, kommen diese Anlagen aus den Kundenprojekten aufgrund der Vielzahl an Prozessobjekten nicht in Frage. Eine Alternative dazu ist die Betrachtung einer Pilotanlage. Größenordnungsmäßig stellt solch eine Pilotanlage den Zwischenschritt vom Laborversuch zur großtechnischen Produktion dar. Der Unterschied zur Produktionsanlage besteht darin, dass für den verfahrenstechnischen Kernprozess nicht benötigte Anlagenteile entfallen, um einerseits die Komplexität der Planung und auch die Kosten für den physischen Aufbau so gering wie nötig zu halten. Teilanlagen wie die Rohstoffaufbereitung, Eduktkonditionierung oder die Lagerhaltung der eingesetzten Stoffe müssen dennoch ausgeführt werden, um die erforderlichen Betriebsbedingungen zu erfüllen. Daher wird eine Pilotanlage, die mit möglichst wenig Peripherie zum Reaktionsbehälter auskommt, präferiert.

Als Vorlage für den digitalen Zwilling wurde daher eine Versuchsanlage zur Herstellung eines Glycerinderivats im kontinuierlichen Reaktorbetrieb ausgewählt. Die Funktion sowie der Grundaufbau der Anlage werden im nächsten Kapitel beschrieben.

## 5.2 Anlagenfunktion

Die Pilotanlage setzt sich zusammen aus einem Reaktor, der mit vier Ausgangsstoffen in einem beliebigen Verhältnis beschickt und über einen Mantel beheizt oder gekühlt wird. In Abb. 25 ist das R&I-Schema der Pilotanlage dargestellt, die als Realvorlage in dieser Arbeit dient.

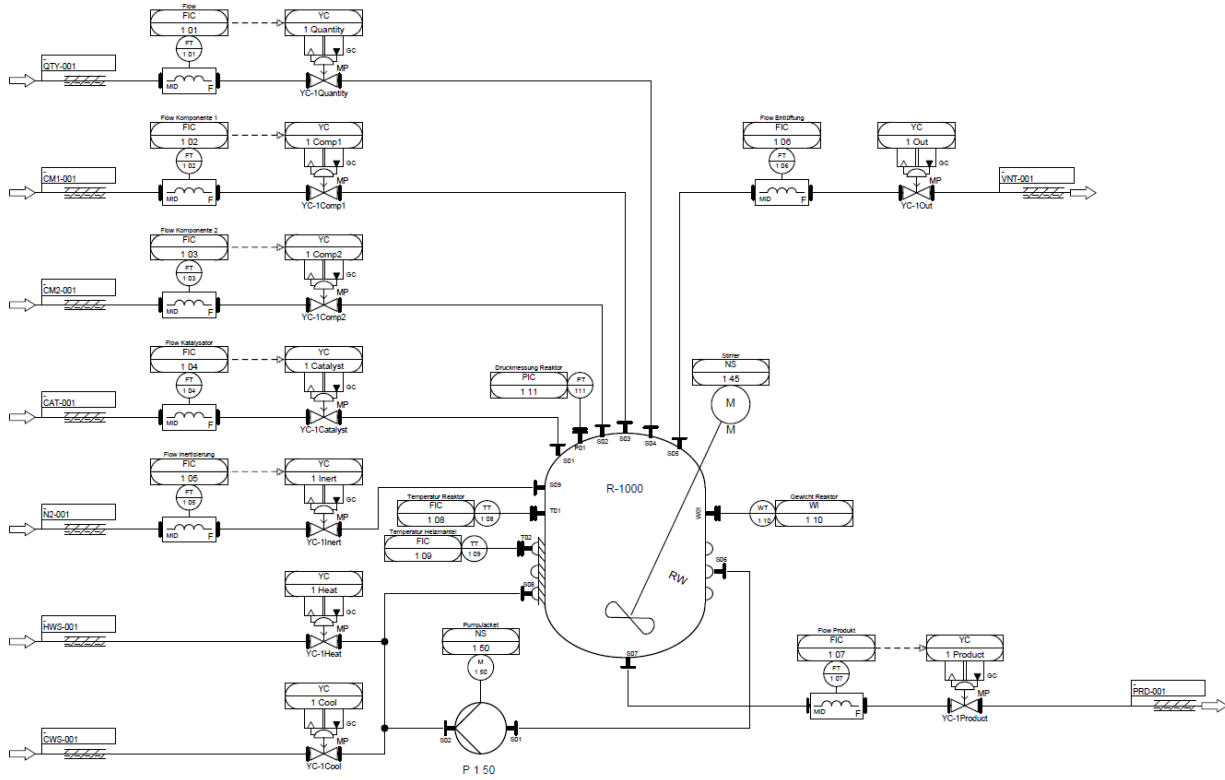


Abb. 25: R&I-Schema der realen Pilotanlage, Quelle: Eigene Darstellung

Im Reaktor befindet sich ein Rührwerk, das für eine vollständige Durchmischung der Ausgangsstoffe sowie für eine gleichmäßige Temperaturverteilung des Reaktorinhalts sorgt. Für Befüllung, Entleerung und die Installation von Messgeräten verfügt der Reaktor über diverse Rohrstopfen. Der Füllgrad des Reaktors wird durch die Masse der zu- und abfließenden Stoffe bestimmt.

Des Weiteren ist der Reaktor mit Rohrwendeln umgeben, die ein Erwärmen oder Kühlen des Behälters mit einer temperierten Flüssigkeit ermöglichen. Zur Umgebung ist dieser Mantel mit Steinwolle isoliert, um Wärmeverluste zu verringern. Abb. 26 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Reaktors.

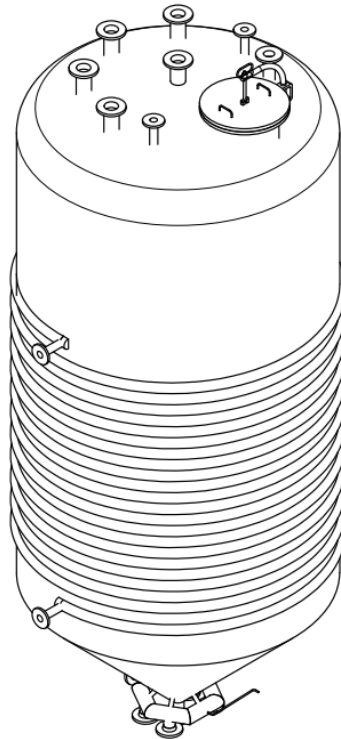


Abb. 26: Isometrische Ansicht eines chemischen Reaktors, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Basis bildet ein Ausgangsstoff, der mittels Durchflussregelung in den Reaktor dosiert wird, sowie zwei Zusatzstoffe, die in einem einstellbaren Verhältnis dazu gemischt werden. Die vierte Komponente ist ein Katalysator, der die Reaktion in Gang setzt. Der Druck im Reaktor wird über eine Druckregelung auf einem konstanten Niveau gehalten, entweder unter Einblasen von inertem Gas oder durch Entlüften des Reaktors. Das durch die Reaktion entstandene Produkt wird über einen Ablaufstutzen und ein Stellventil geregelt entleert.

Die Heizung erfolgt mit 90 °C heißem Wasser, das mittels Zirkulationspumpe durch die Rohrwendeln befördert wird, für die Kühlung hingegen wird 4 °C kaltes Wasser verwendet. Die Dosierung der Edukte erfolgt über jeweils ein Regelventil. Anhand des Massendurchflusses jedes Zulaufs und der Vorgabe im Steuerungssystem wird die Öffnungsweite des Ventils angepasst, um die gewünschte Stoffmenge einzufüllen. Ebenso verfügt der Reaktor über ein Druckregelsystem, das durch Einblasen von inertem Gas den Innendruck im Reaktor erhöht. Mit einem Entlüftungsventil kann hingegen der Innendruck gesenkt werden, wenn der Reaktor befüllt wird. Der Produktablauf erfolgt einstellbar über eine Durchflussmessung mit einem Regelventil, ausschließlich durch den hydrostatischen Druck des Reaktorinhalts. Mit welchen Komponenten diese hier beschriebenen Funktionen in der Anlage umgesetzt werden, ist Thema des nächsten Kapitels.

## 5.3 Anlagenbeschreibung

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Anlagenkomponenten genauer beschrieben, sowie deren Funktionsweise und die Aufgabe im Gesamtprozess erläutert. Im Mittelpunkt stehen dabei der Reaktor, in dem der eigentliche Produktionsprozess kontinuierlich abläuft, sowie die Prozessleittechnik, welche für die automatische Steuerung und Regelung der Feldgeräte verantwortlich ist.

### 5.3.1 Prozessleittechnik

Durch die hohe Komplexität und die vielen verschiedenen wissenschaftlichen Teilbereiche, die eine prozesstechnische Anlage abdeckt, ist es nicht mehr möglich, eine manuelle Betriebsführung umzusetzen. Daher ist es notwendig einen gewissen Grad an Automatisierung zu erreichen. Was Automatisierung genau bedeutet, gibt folgende Definition wieder:

“Durch *Automatisierung* werden dynamische Prozesse *erfasst* und derart *gezielt beeinflusst*, dass sie vorgegebene Aufgaben und Funktionen *selbsttätig* erfüllen.”<sup>66</sup>

Um das zu erreichen, müssen einerseits Messgeräte an den richtigen Stellen in der Anlage verbaut sein, und andererseits Stellglieder, die den Materialstrom und die notwendigen Hilfsanlagen steuern. Die Masse an Informationen, die in der Anlage erfasst und verarbeitet werden, erfolgt durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die SPS liest die Zustände der Messgeräte laufend ein und berechnet anhand des Steuerungsprogramms die Befehle für die Stellglieder. Diese Art der Programmabarbeitung nennt man im Fachjargon einen *zyklischen Programmablauf*. Nicht nur das SPS-Programm wird zyklisch durchlaufen, auch das Prinzip der Informationserfassung und -verarbeitung ist ein Kreisprozess, wie Abb. 27 schematisch darstellt.<sup>67</sup>

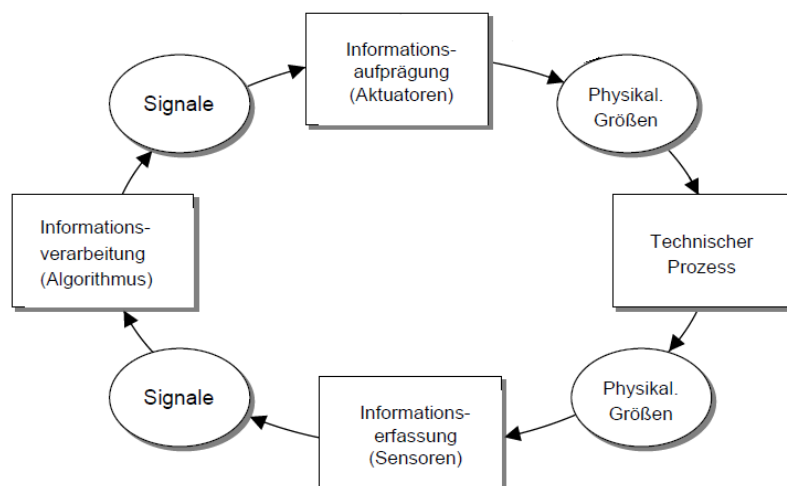


Abb. 27: Zyklische Informationsbearbeitung einer Prozessanlage, Quelle: Litz (2013), S. 5 (leicht modifiziert).

<sup>66</sup> Litz (2013), S. 3.

<sup>67</sup> Vgl. Litz (2013), S. 4 f.

Die Überwachung der gesamten Steuerung obliegt bei aller Automatisierung dem Menschen. Zuerst wurden die wichtigsten Prozesswerte mit analogen Anzeigen und Lämpchen in einer Leitwarte angezeigt. Selbst bei einer kleinen Anlage musste ein ganzes Team an Bedienenden die Anzeigen überwachen, und es war ein gewissen Maß an Knowhow erforderlich, um aus den einzelnen Werten Zusammenhänge für die sichere Betriebsführung abzuleiten. Ein wichtiger Entwicklungsschritt in der Anlagenbedienung war die Einführung der Prozessleittechnik. Wie es der Name vermuten lässt, ist die Prozessleittechnik dazu da, den Prozess im Sinne der Automatisierung zu führen. Die Prozessdaten werden wie bei einer herkömmlichen Leitwarte visualisiert, die Anlage wird jedoch in Funktionsgruppen unterteilt, auf mehreren Monitoren dargestellt. Jedes dieser *Bilder* kann den jeweiligen Gegebenheiten des Prozesses angepasst werden, indem die für die Steuerung und Regelung relevanten Prozesswerte und Führungsgrößen der Feldgeräte angezeigt werden.<sup>68</sup> Abb. 28 zeigt den schematischen Aufbau eines Prozessleitsystems innerhalb eines Betriebs. Die Betriebsleitebene ist die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine.

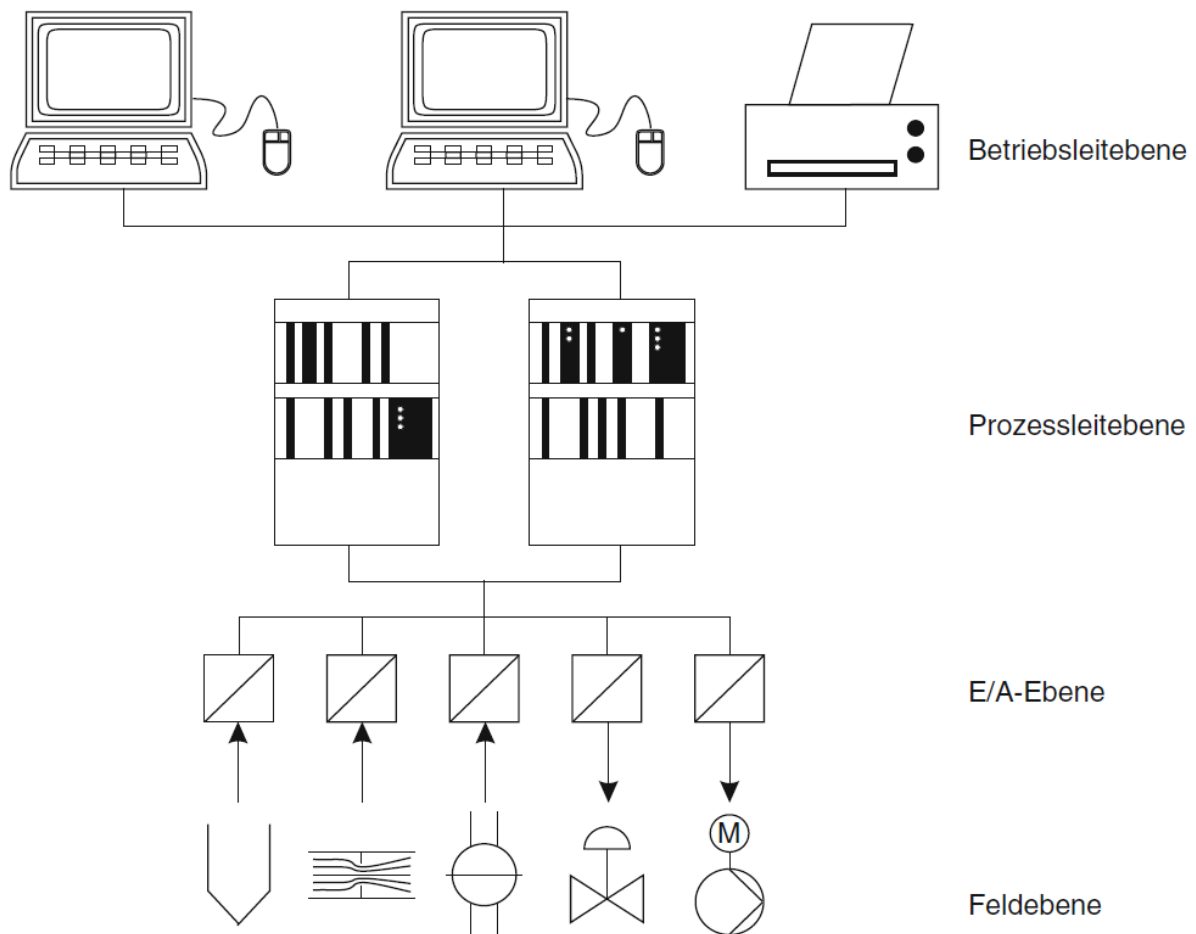


Abb. 28: Schematischer Aufbau eines Prozessleitsystems, Quelle: Christen (2010), S. 583.

Hier werden von der Produktionsleitung die Zielvorgaben für den Prozess eingestellt, der gesamte Produktionsablauf überwacht und Prozessdaten analysiert und archiviert. Die Prozessleitebene ist für die eigentliche Prozessführung verantwortlich und besteht aus mindestens einer SPS, die die Steuerungs- und

<sup>68</sup> Vgl. Christen (2010), S. 581 f.

Regelungsaufgaben durchführt. Über einen Feldbus sind in der Anlage verteilte Baugruppen an die SPS angeschlossen, die für den Signalaustausch mit den Feldgeräten verbunden sind. Diese Baugruppen werden der E/A-Ebene zugeordnet und übersetzen die analogen Strom- und Spannungssignale der Mess- und Stellgeräte in digitale Datentypen, die von der SPS verarbeitet werden können. Die Feldebene wiederum repräsentiert die Gesamtheit der Mess- und Stellgeräte, die den Materialfluss und den Anlagenzustand erfassen und beeinflussen.<sup>69</sup>

Als Schnittstelle zwischen den Bedienenden und dem Prozessleitsystem fungiert die Visualisierung. Über diese grafische Benutzeroberfläche werden alle wichtigen Anlagenparameter überwacht und gesteuert. Funktional ist dieses Bediensystem ein Teil des Prozessleitsystems. Die Visualisierung ist auch das zentrale Element der Bedienschulung. In Abb. 29 ist die aktuelle Benutzeroberfläche dargestellt.

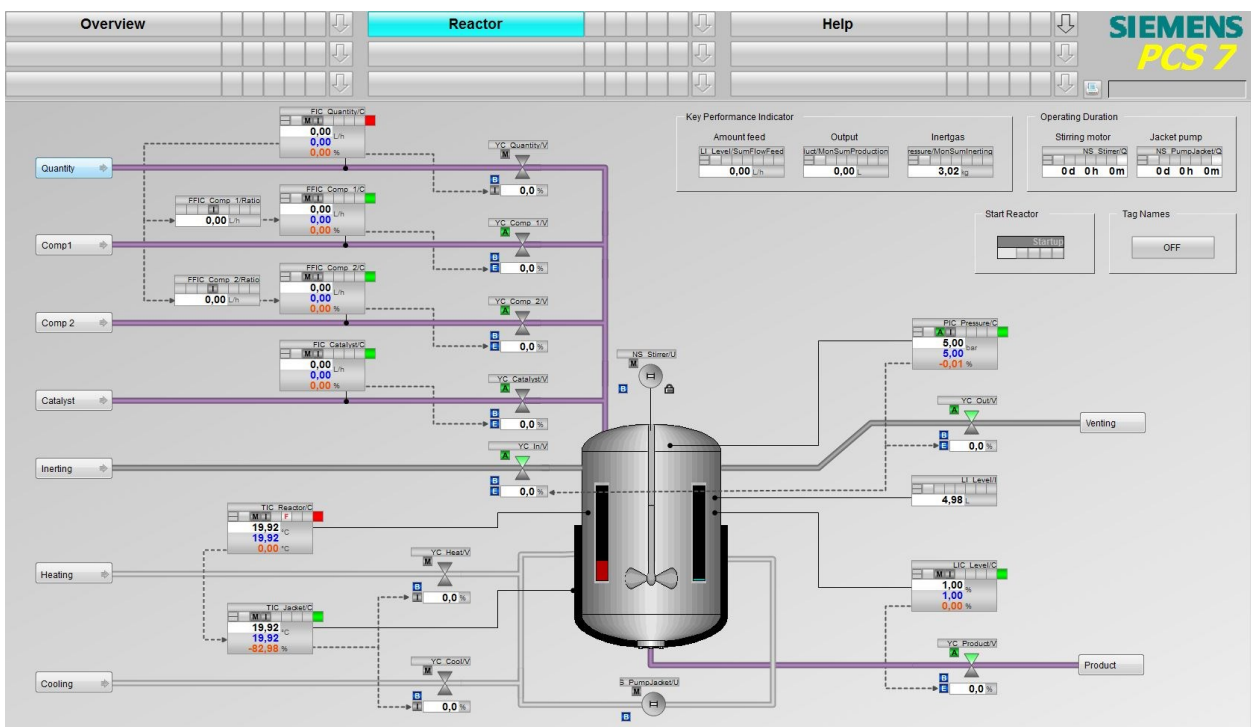


Abb. 29: Visualisierung einer prozesstechnischen Anlage mit WinCC, Quelle: Eigene Darstellung

Offensichtlich ist die Ähnlichkeit der Bedienoberfläche mit dem bereits zuvor beschriebenen R&I-Schema. Die Absicht dahinter ist klar die Veranschaulichung der verfahrenstechnischen Abläufe und Rohführungen der Anlage. Man kann sich so einerseits schnell einen Überblick verschaffen und andererseits auch sehr einfach detaillierte Informationen zu einem bestimmten Betriebsmittel abrufen. Die Visualisierung der realen Anlage erfolgte mit dem Softwaretool WinCC und soll auch für den digitalen Zwilling so übernommen werden.

<sup>69</sup> Vgl. Christen (2010), S. 584.

### 5.3.2 Reaktor

Zentrales Objekt einer verfahrenstechnischen Anlage ist ein Behälter, in dem eine chemische Reaktion abläuft. Abhängig vom zugrundeliegenden Prozess gibt es einige Grundformen, die dieser Reaktor annehmen kann. Faktoren, die die Auswahl des Grundtypus beeinflussen, sind zum Beispiel die Art der Reaktion, notwendige Betriebsbedingungen oder der Aggregatzustand der verwendeten Stoffe. Die am häufigsten verwendeten Typen sind der Rührkessel, der Rohrreaktor und die Kolonne.<sup>70</sup>

In der Pilotanlage wird ein Reaktor vom Typ Rührkessel eingesetzt, der im kontinuierlichen Betrieb läuft. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass die zugeführten Stoffe durch ein Rührwerk vermischt werden, und so eine homogene Reaktionsmasse gegeben ist. Ein weiterer wünschenswerter Effekt, der durch den Mischer gefördert wird, ist die gleichmäßige Temperaturverteilung des Reaktorinhalts. Über die Zeit kann so ein homogenes Gemisch gewährleistet werden. Die Temperatur ist auch ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung eines Reaktors.<sup>71</sup>

Da im Gegensatz zu einem idealen Reaktor, bei dem die Temperatur der Reaktion konstant, also isotherm angenommen wird, eine Änderung der Wärmeenergie auftritt, muss diese Energie bei der Auslegung berücksichtigt werden. Je nach Art der Reaktion kann dabei Energie in Form von Wärme freigesetzt oder der Umgebung entzogen werden. Ersteres wird exotherm genannt, die zweite Art ist seltener anzutreffen und wird als endotherm bezeichnet. Allgemein wird dieser Zustand als polytrope Reaktion bezeichnet. Um diesen Betriebszustand zu erreichen, muss die Wärme von außen zugeführt, oder aus dem Reaktor abgeführt werden. Findet diese Wärmeübertragung mit der Umgebung nicht statt, beispielsweise wenn der Reaktor vollständig thermisch isoliert ist, hat das eine Verschiebung der Reaktionsparameter zur Folge. Ungefährlich, aber wirtschaftlich nachteilig, kann sich die Reaktionsgeschwindigkeit verlangsamen und so den Produktausstoß reduzieren. Schwerwiegender ist eine Erwärmung des Reaktorinhalts, wobei auch die Reaktionsgeschwindigkeit ansteigt, die wiederum zu mehr Wärmeentwicklung führt und die Reaktorkonstruktion über das Auslegungsdesign belastet und dauerhaft beschädigt.<sup>72</sup>

Daher ist es für die Erhaltung eines optimalen Betriebspunktes notwendig, die Wärmeübertragung mit der Umgebung aufrecht zu erhalten. Der Reaktor ist dazu mit einem Heiz- und Kühlmantel ausgestattet, der von einer temperierten Flüssigkeit durchflossen wird.

---

<sup>70</sup> Vgl. Christen (2010), S. 135 f.

<sup>71</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 320.

<sup>72</sup> Vgl. Dietzsch/Domke/Fleischhauer/Leven/Müller/Ohling/Schön/Tarján/Schwister (2010), S. 361.



Jean Baptiste Joseph Fourier hat zu Beginn des 19. Jahrhunderts experimentell bewiesen, dass die Wärmeleitung immer vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur auftritt und den Effekt im Fourierschen Gesetz beschrieben:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{l} \quad (5.1)$$

$\dot{Q} / \text{W}$	Wärmestrom
$Q / \text{J}$	übertragene Wärmemenge
$t / \text{s}$	Dauer der Wärmeleitung
$T_1, T_2 / \text{K}$	Temperatur
$\lambda / \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$A / \text{m}^2$	Querschnittsfläche senkrecht zur Wärmeleitung

Abb. 30 stellt die oben angeführte Formel (5.1) für einen stabförmigen Körper grafisch dar.

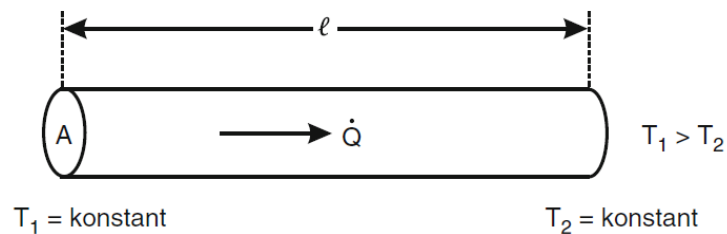


Abb. 30: Wärmeleitung in einem stabförmigen Körper, Quelle: Christen (2010), S. 212.

In Worten bedeutet das, dass die Wärmeleitung proportional zur Temperaturdifferenz sowie zur Querschnittsfläche ist, aber indirekt proportional zur Länge des Stabes. Außerdem hat das Material des Körpers Einfluss auf die Güte der Wärmeleitung, was durch die spezifische Wärmeleitfähigkeit ausgedrückt wird.

In Tab. 2 sind einige dieser Materialkonstanten angeführt, die häufig in der Verfahrenstechnik zur Anwendung kommen.

Stoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda / \text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 20 °C
Stickstoff (p = 1 bar)	0,0256
Luft (p = 1 bar)	0,0257
Wasserdampf	0,0186
Wasser	0,598
Ethylenglykol	0,25
Aluminium 99,75 %	225
Kupfer, elektrolytisch rein	395
Chrom-Nickel-Stahl 18-8	15 bis 17
Kohlenstoffstahl	36 bis 54
Titan	20
Isolierstoffe	0,01 bis 0,10

Tab. 2: Wärmeleitfähigkeit von in der Verfahrenstechnik genutzten Stoffen, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Tabelle kann man entnehmen, dass Gase eine niedrige Wärmeleitung haben, feste Stoffe hingegen sind sehr gute Wärmeleiter. Was man am Beispiel von Kupfer und Aluminium erkennen kann ist, dass gute elektrische Leiter auch gute Wärmeleiter sind. Beide Eigenschaften sind in Metallen dem Elektronengas geschuldet, das Elektronen nahezu ohne Ablenkung passieren lässt.<sup>73</sup>

Um die Wärmeleitfähigkeit einer Reaktorhülle zu berechnen, braucht es allerdings eine andere Herangehensweise, da der Reaktor ein zylindrischer Körper mit ebenen Stirnflächen ist. Die Seitenwände können wie ein Rohr mit großem Innendurchmesser betrachtet werden.

<sup>73</sup> Vgl. Christen (2010), S. 213.

Abb. 31 zeigt die Wärmeleitung eines Rohres über die Wandstärke.

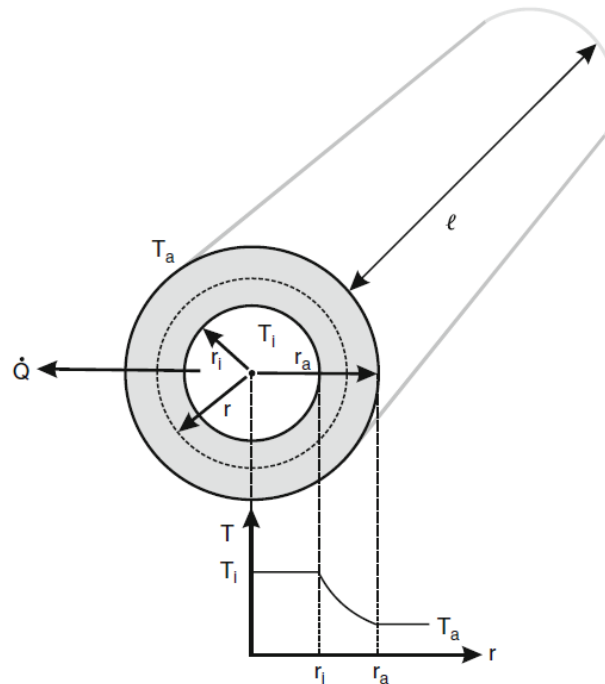


Abb. 31: Verlauf der Wärmeleitung in einem Rohr, Quelle: Christen (2010), S. 222.

Da die Wärmeübertragungsfläche mit zunehmendem Radius des Rohres nach außen steigt, ist der Temperaturverlauf nicht mehr linear, sondern logarithmisch. Mit Formel (5.2) lässt sich die Wärmeleitung für einen Hohlzylinder berechnen.

$$\dot{Q}_r \approx -\lambda A_r \frac{dT}{dr} = -\lambda 2\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (5.2)$$

$\dot{Q}_r / W$	Wärmestrom durch Hohlzylinder
$A_r / m^2$	übertragene Wärmemenge
$l / m$	Länge des Rohrs
$T / K$	Temperatur
$\lambda / W m^{-1}K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit des Rohrs

Ändern sich die Temperaturen innen sowie außen nicht, spricht man vom stationären Zustand. Für diesen gilt folgender Zusammenhang:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda l(T_i - T_a)}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (5.3)$$

$\dot{Q} / W$	Wärmestrom durch Rohrwand
$r_a, r_i / m$	Innen-/Außenradius des Rohrs
$l / m$	Länge des Rohrs
$T_i / K$	Temperatur Rohrinnenwand
$T_a / K$	Temperatur Rohraußenwand
$\lambda / W m^{-1}K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit des Rohrs

Für den Reaktorboden, der die Form eines nach oben offenem Konus hat, kann die Wärmeübertragungsfläche ebenso mit Formel (5.3) angenähert werden, indem der mittlere Radius des Konus als Radius des geraden Rohres und die Höhe des Kegels als Rohrlänge für die Berechnung herangezogen werden. Im Falle der Pilotanlage ist der Reaktor aus nichtrostendem austenitischen Stahl mit der Spezifikation 1.4571 (V4A) aufgebaut und einer Wärmeleitfähigkeit von  $15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Die zweite Form der Wärmeübertragung, die zum Betrieb des Reaktors notwendig ist, ist wie schon erwähnt, die konvektive Wärmeübertragung. Diese beschreibt die Abgabe der Wärmeenergie aus dem Heiz- oder Kühlmedium an die Reaktorwand. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen ist der Reaktor mit einem nach außen isolierten Heizmantel umschlossen. Eine Umwälzpumpe sorgt dafür, dass das Heizmedium mit konstanter Geschwindigkeit und Temperatur an der Reaktorwand entlang fließt. An der Oberfläche der Reaktorwand treten Schubspannungen auf, die zusammen mit der dynamischen Viskosität des Heizmediums Verwirbelungen verursachen. Dadurch reduziert sich die Fließgeschwindigkeit zur Reaktorwand hin bis auf null für die Teilchen, die in Kontakt mit der Wand stehen. Der Bereich, in dem diese Geschwindigkeitsreduktion stattfindet, wird laminare Grenzschicht genannt, wie in Abb. 32 dargestellt.

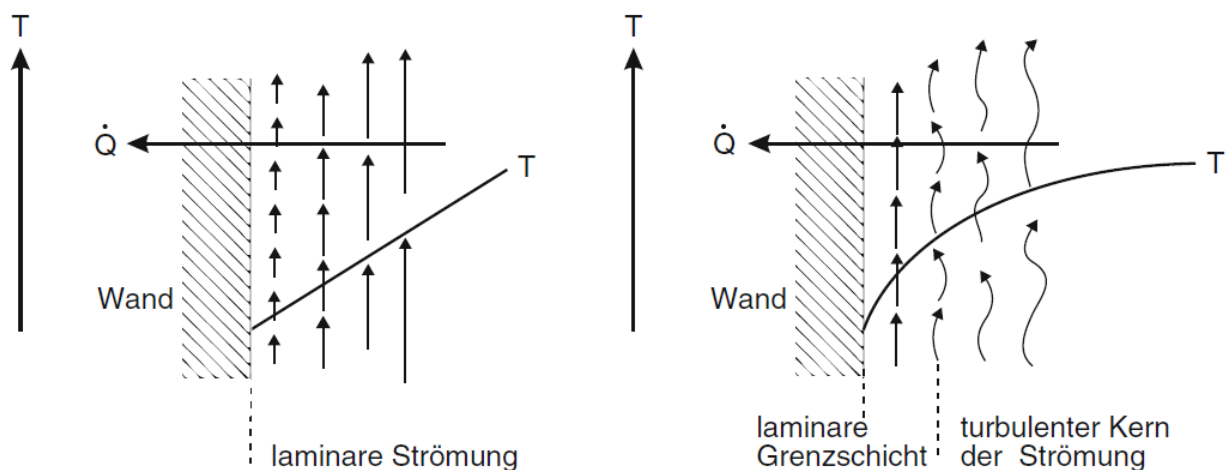


Abb. 32: Strömungsverhalten in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit einer Wand, Quelle: Christen (2010), S. 227.

Diese Grenzschicht hat aber nicht nur Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit, sondern auch auf die Wärmeübertragung. Da in dieser Schicht wie schon erwähnt, keine Bewegung stattfindet, geht auch die Wärmeübertragung von Konvektion in Wärmeleitung über. Die Bildung dieser turbulenten Grenzschicht ist, wie in der Strömungslehre, abhängig von der Reynolds-Zahl.<sup>74</sup>

Wie diese Zusammenhänge und Prinzipien in weiterer Folge im Modell umgesetzt werden, beschreibt das Kapitel 6.2.

<sup>74</sup> Vgl. Langeheinecke/Kaufmann/Langeheinecke/Thieleke (2017), S. 356 ff.

### 5.3.3 Instrumente und Armaturen

Außer dem Reaktor sind auch noch andere Geräte notwendig, um den Produktionsbetrieb zu ermöglichen. Dieses Kapitel widmet sich den Messgeräten, Stellgliedern und Armaturen, die in der Peripherie zum Reaktor verbaut sind.

#### Durchflussmessung

Die zum Betrieb der Anlage wichtigste Funktion ist die Dosierung der einzelnen Edukte. Die Menge jedes Eduktes und jedes Hilfsstoffes wird mit einem Durchflussmessgerät gemessen. Dabei gelangen zwei unterschiedliche Messprinzipien zur Anwendung. Auf welchem der beiden Prinzipien die jeweilige Messung beruht, ist von den physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Fluids abhängig. Leitfähige Flüssigkeiten werden in der Anlage mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) gemessen. Dieses Messgerät bestimmt den Volumenstrom durch eine Rohrleitung und stellt diese Information dem Prozessleitsystem als elektrisches Signal zur Verfügung. Das Messprinzip beruht auf der elektromagnetischen Induktion. Das Instrument wird direkt in die Rohrleitung montiert, wie in Abb. 33 ersichtlich.

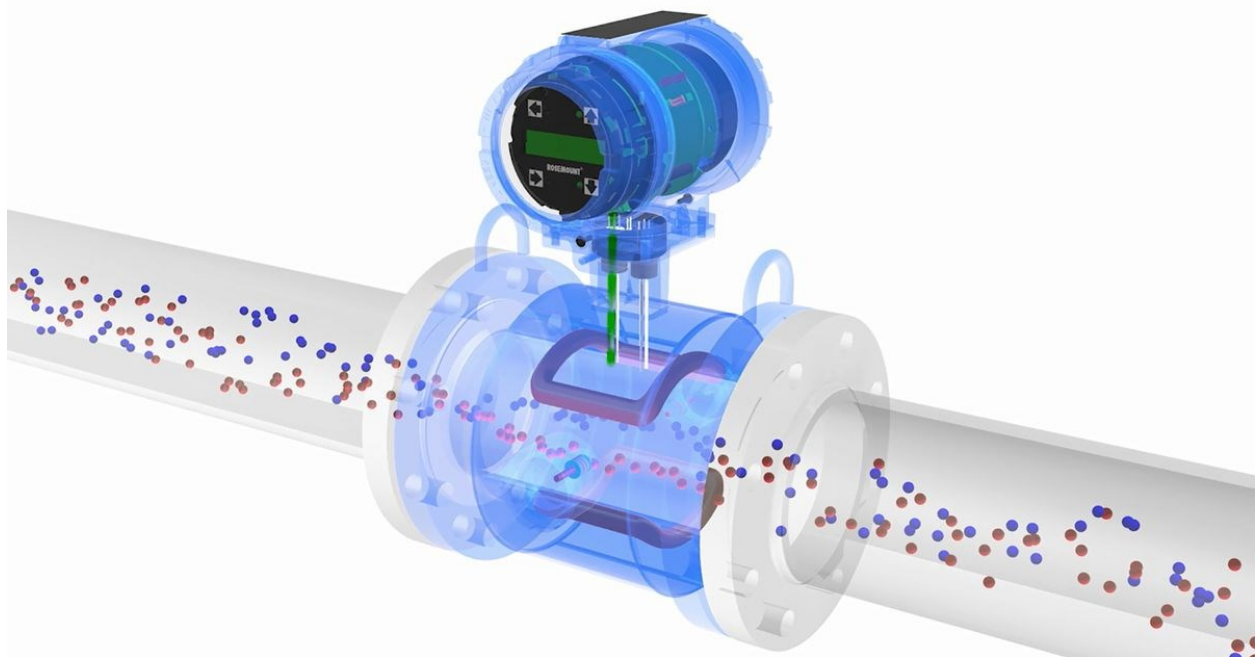


Abb. 33: Schematischer Aufbau eines MID, Quelle: Emerson Electric (2021), Online-Quelle [03.11.2021].

Die Messeinheit besteht aus zwei Spulen, die sich gegenüberliegen und senkrecht zum Produktstrom stehen, sowie zwei Messelektroden jeweils um  $90^\circ$  versetzt. Die beiden Spulen erzeugen ein magnetisches Feld in der Rohrleitung, das senkrecht zur Flussrichtung ist. Fließt im Rohr eine leitfähige Flüssigkeit, werden die darin befindlichen positiv und negativ geladenen Teilchen getrennt und durch den Hall-Effekt auf eine Seite des Rohres gedrückt. Durch das Trennen der Ladungsträger in positiv und negativ wird in zwei Messelektroden, die um  $90^\circ$  versetzt zu den Spulen angeordnet sind, eine elektrische Spannung induziert. Diese Induktionsspannung wird gemessen und durch die Beziehung (5.4) im Messumformer des Messgeräts in eine Strömungsgeschwindigkeit und in weiterer Folge über den Rohrquerschnitt in einem

Massenstrom umgerechnet. Am Ende wird ein analoges Signal erzeugt, das vom PLS eingelesen und ausgewertet werden kann.<sup>75</sup>

$$U = kBDv \quad (5.4)$$

$U / V$	Induzierte Spannung
$k / -$	Proportionalitätsfaktor
$B / H$	magnetische Feldstärke
$D / m$	Elektrodenabstand
$v / \text{ms}^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit

Für Messungen von nicht leitfähigen Flüssigkeiten und Gasen muss ein alternatives Messverfahren verwendet werden. Dazu sind in der Anlage Messinstrumente verbaut, die mittels Coriolis-Effekt den Massenstrom und in weiterer Folge den Massenstrom in einer Rohrleitung bestimmen. Die Messeinheit besteht aus einem Rohrbogen, wie in Abb. 34 abgebildet.

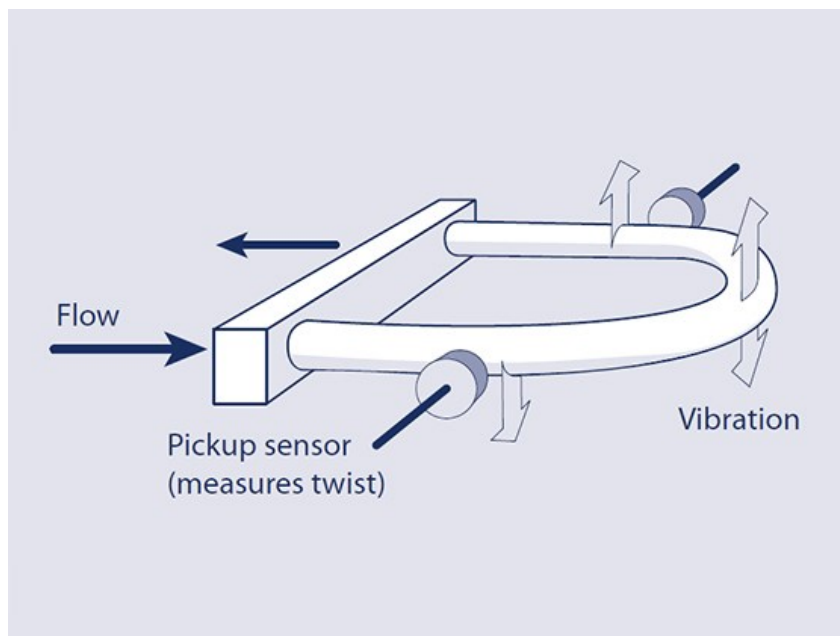


Abb. 34: Messprinzip eines Coriolis-Durchflussmessgeräts, Quelle: Bronkhorst (2021), Online-Quelle [2.November.2021].

Das Rohr wird mittels Aktors im Scheitelpunkt des Bogens zu einer Schwingung angeregt, die der Eigenfrequenz des leeren Rohres entspricht. Messaufnehmer an der Einlass- und Auslassseite messen die Frequenz und Amplitude der Schwingung. Ist das Messgerät nicht mit einem Produktstrom beaufschlagt, schwingen beide Seiten mit derselben Amplitude und ohne Phasenverschiebung. Fließt ein Medium durch das Messgerät, erfährt der Rohrbogen ein Torsionsmoment durch die Corioliskraft. Die Massenträgheit des Fluids wirkt dabei der Schwingung entgegen und verursacht an der Einlassseite eine nachteilende Phasenverschiebung gegenüber der Auslassseite. Diese Phasenverschiebung ist direkt proportional zum Massenstrom im Rohr. In weiterer Folge lässt sich auch der Volumenstrom bestimmen, da die Frequenz, mit der der Bogen schwingt, direkt proportional zur Dichte des gemessenen Mediums ist. Dieses Verhalten

<sup>75</sup> Vgl. Emerson Electric Co. (2021), Online-Quelle [4.November.2021].

lässt sich nicht nur für Volumenmessung einsetzen, es kann gleichzeitig auch als Qualitätsmessung für ein Fluid dienen, da Dichteunterschiede ein Hinweis auf Verunreinigungen oder ungewünschte Inhaltsstoffe sein können.<sup>76</sup>

### Temperaturmessung

Zum sicheren Betrieb der Anlage muss auch die Temperatur des Reaktorinhalts ständig überwacht werden. Einerseits zum Aufrechterhalten der optimalen Prozessparameter und andererseits zum sicheren Betrieb des Reaktors. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Widerstandsthermometer. Dessen Eigenschaft, die Temperaturabhängigkeit des Widerstands wird genutzt, um die Temperatur des Reaktorinhalts zu bestimmen. In der Pilotanlage wird dazu ein Pt100 eingesetzt. Dieser besteht aus einem Widerstandsdraht aus Platin, dessen Widerstandswert bei 0 °C genau 100 Ω beträgt. Zum Schutz des Messfühlers vor Beschädigung ist dieser in ein Rohr aus rostfreiem Stahl eingesetzt, welches an einen Stutzen oder Flansch in eine Rohrleitung oder einen Behälter montiert wird. Der Vorteil eines Pt100 gegenüber anderen Temperatursensoren wie beispielsweise Thermoelementen ist, dass die Messung passiv ist, und die Temperatur direkt über den Widerstand gemessen werden kann. Der Verlauf der Widerstandskennlinie ist, wie in Abb. 35 dargestellt, annähernd linear.<sup>77</sup>

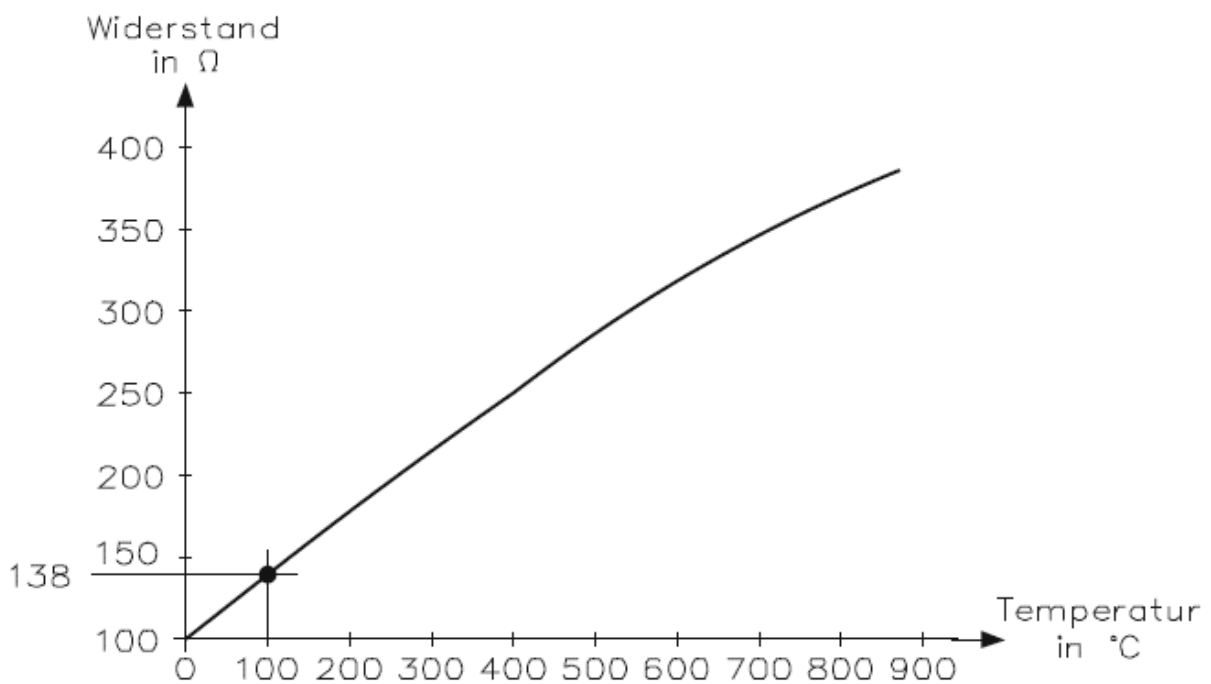


Abb. 35: Kennlinie eines Pt100-Widerstandsthermometers, Quelle: Bernstein (2014), S. 235.

Diese Eigenschaft kann man sich bei der Auswertung der Temperatur im Prozessleitsystem zunutze machen. In dem Temperaturbereich, in dem der Prozess unter Normalbedingungen abläuft, kann der Widerstandswert linear angenommen werden. Dadurch wird die Berechnung der Prozesswerte auf eine Geradengleichung reduziert und so wesentlich vereinfacht.

<sup>76</sup> Vgl. Bronkhorst (2021), Online-Quelle [2.November.2021].

<sup>77</sup> Vgl. Bernstein (2014), S. 233 ff.

## Druckmessung

Ein weiterer Faktor der Betriebssicherheit der Pilotanlage ist der Reaktordruck. Eine Druckregelung sorgt dafür, dass der Innendruck immer in einem sicheren Bereich liegt. Über der Reaktionsmasse befindet sich eine Luftblase, und je höher der Füllstand im Reaktor wird, desto kleiner wird das Volumen dieser Blase. Dadurch steigt der Innendruck und lässt im schlimmsten Fall den Behälter explodieren. Um dem vorzubeugen, ist eine Druckregelung vorgesehen, die durch Öffnen eines Druckausgleichsventils einen konstanten Druck beim Füllen des Reaktors gewährleistet. Beim Entleeren des Reaktors wiederum steigt das Volumen der Luftblase und der Innendruck sinkt ab. Je nach Aufbau und Material des Reaktors könnte das zu einer Implosion führen, wenn der Innendruck zu weit sinkt und der Behälter unter der Einwirkung des äußeren Luftdrucks kollabiert. Der Reaktor ist mit einem Druckmessgerät ausgestattet, das den Absolutdruck der im Reaktor befindlichen Luftblase misst. Das Messgerät ist in einem Stutzen im Reaktor montiert und besteht aus einem Druckmittler und einem Messumformer. Abb. 36 zeigt eine Variante wie ein Druckmessgerät aufgebaut sein kann.

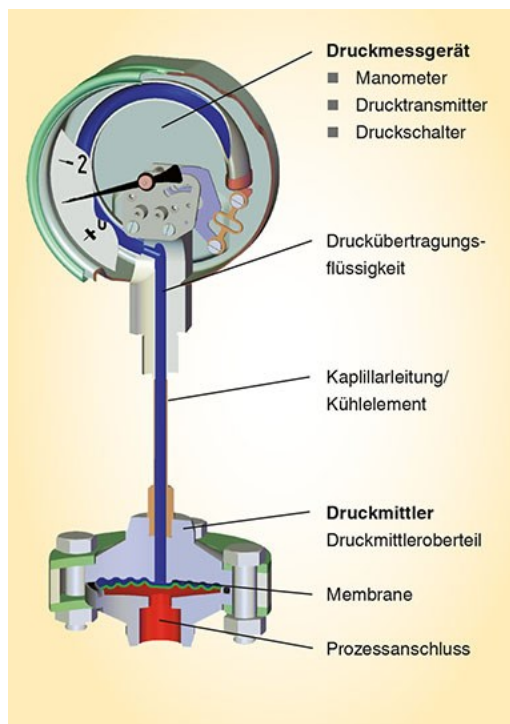


Abb. 36: Aufbau eines Druckmessgeräts mit Druckmittler, Quelle: Breunig (2015), Online-Quelle [28.September.2021].

Der Druckmittler besteht aus einer Membran aus nichtrostendem Stahl, Nickelbasislegierungen oder Refraktärmetallen wie zum Beispiel Titan, die zwischen zwei Flanschplatten gespannt ist und schützt so die eigentliche Messeinheit vor aggressiven oder toxischen Medien sowie hohen Temperaturen. Zwischen dem Druckmittler und dem Messumformer befindet sich eine Flüssigkeit, die den Druck, der auf den Druckmittler wirkt, in den Messumformer überträgt. Die Anbindung kann entweder direkt an den Druckmittler erfolgen oder über eine Kapillarleitung, wenn der Messumformer nicht direkt an der Rohrleitung montiert wird. Als



Druckübertragungsfluid kommen üblicherweise verschiedene Öle zum Einsatz, deren Siedepunkt und Viskosität den jeweiligen Umgebungstemperaturen angepasst ist.<sup>78</sup>

Die eigentliche Messeinheit ist ein piezoresistiver Siliziumsensor. Dieser besteht aus einer Siliziumschicht, die durch eine Krafteinwirkung, wie beispielsweise eine Druckbeaufschlagung, verformt wird und dadurch ihren elektrischen Widerstand ändert. Der Sensorchip ist auf einem Glassockel montiert und über Drähte zu den Anschlusspins nach außen geführt. In der Grafik ist auch zu erkennen, dass der Drucksensor durch das Übertragungsfluid und die Membran von der Prozessseite getrennt und somit vor chemischen oder thermischen Einflüssen geschützt ist. Bei besonders aggressiven Stoffen wird zusätzlich der vorhin beschriebene Druckmittler als zusätzlicher Schutz verwendet.<sup>79</sup>

Das Messsignal wird über die vorhin erwähnte Änderung des elektrischen Widerstands, den piezoresistiven Effekt, erzeugt. Über eine *Wheatstone-Messbrücke*, wie in Abb. 37 dargestellt, wird die Änderung des Widerstands anhand der Brückenspannung  $U_B$  gemessen und von der Messelektronik in ein analoges PLS-Signal umgewandelt.

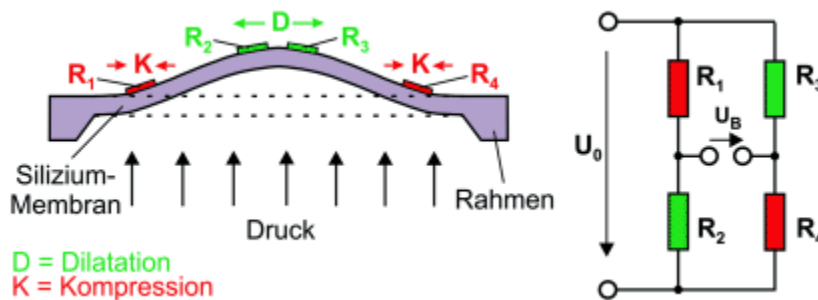


Abb. 37: Schematischer Aufbau und Schaltbild eines piezoresistiven Drucksensors, Quelle: Büttgenbach (2016), S. 38.

Bei Druckbeaufschlagung des Sensors werden die in der Grafik rot dargestellten Widerstände gestaucht, was mit einer Abnahme des elektrischen Widerstands einhergeht. Die grün markierten Widerstände werden dagegen gedehnt, was den elektrischen Widerstand erhöht.<sup>80</sup>

Diese Änderung der Widerstände wird mittels der bereits erwähnten Wheatstone-Messbrücke erfasst. Diese Messschaltung ist aus zwei Spannungsteilern aufgebaut, den Widerstandspaaren  $R_1$  und  $R_2$  sowie  $R_3$  und  $R_4$ . Wird die Messschaltung mit einer konstanten Spannung  $U_0$  versorgt, stehen die Spannungen an den einzelnen Widerständen im selben Verhältnis wie die Widerstände zueinander.

<sup>78</sup> Vgl. WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG (2013), Online-Quelle [28.September.2021].

<sup>79</sup> Vgl. Bräutigam (2017), S. 26 ff.

<sup>80</sup> Vgl. Kistler GmbH (2021), Online-Quelle [12.Oktober.2021].

Sind alle Widerstände gleich groß, kann man gemäß der Formel für Spannungsteiler (5.5) ableiten, dass die Brückenspannung  $U_B$  gleich null ist.<sup>81</sup>

$$U_B = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (5.5)$$

$U_B / \text{V}$	Brückenspannung
$U_0 / \text{V}$	Versorgungsspannung
$R_1, R_2, R_3, R_4 / \Omega$	Messwiderstände

Bei einem Absolutdruckmessgerät ist dies im Vakuum der Fall, da der Referenzdruck 0 bar beträgt. Im nicht eingebauten Zustand gibt dieses Messgerät daher den aktuellen Luftdruck aus.

### Füllstandsmessung

Für die Messung des Füllstands im Reaktor ist kein Messgerät installiert. Der aktuelle Flüssigkeitspegel wird durch das Prozessleitsystem aus den zu- und abfließenden Volumenströmen rechnerisch ermittelt. In weiterer Folge wird über die Dichte jedes Stoffes die Masse des Reaktorinhalts berechnet.

### Regelventil

Für die Regulierung der Stoffströme in den Rohrleitungen sind in der Anlage Regelventile verbaut. In der Pilotanlage sind diese als Stellventil mit elektropneumatischem Positionierantrieb ausgeführt. Abb. 38 zeigt beispielhaft ein Stellventil mit ähnlicher Bauform wie in der Pilotanlage.



Abb. 38: Beispielhafter Aufbau eines Stellventils, Quelle: Konradin-Verlag Robert Kohlhammer (2017), Online-Quelle [10.Oktober.2021].

---

<sup>81</sup> Vgl. Mühl (2014), S. 122 f.

Die drei Hauptkomponenten eines Stellventils sind der Ventiltrieb, in Abb. 38 blau dargestellt, der elektronische Positionierer im schwarzen Gehäuse sowie das eigentliche Ventil in silbergrau. Der Antrieb des Stellventils erfolgt pneumatisch mittels werkseitig bereitgestellter Druckluft. In Abb. 39 ist eine Schnittzeichnung des Antriebsprinzips abgebildet.

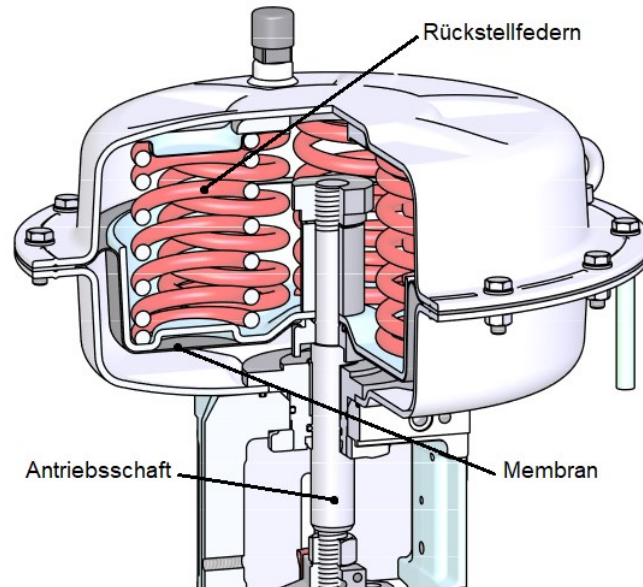


Abb. 39: Schnittzeichnung eines Membranantriebs mit Federrückstellung, Quelle: Flowserve Control Valves GmbH (2014), Online-Quelle [10.Oktober.2021].

Der Raum zwischen dem Gehäuse und der Membran, in der Abbildung grau dargestellt, wird mit Druckluft gefüllt und drückt den Antriebsschaft gegen die Rückstellfedern nach oben. Der Schaft ist mechanisch mit dem Ventilschaft des Stellventils verbunden und betätigt den Ventilkegel.

Gesteuert beziehungsweise geregelt wird die Ventilstellung durch einen elektropneumatischen Positionierer. Dieser bildet mit dem Stellventil einen Regelkreis, der eine exakte Durchflussregelung ermöglicht. Die Vorgabe des Sollwerts erfolgt durch das Prozessleitsystem in Form eines gewünschten Durchflusswerts. Der im Positionierer integrierte Mikrocontroller errechnet aus dem Sollwert sowie der aktuellen Stellung des Ventils die notwendige Korrektur der Durchflussmenge. Die Überwachung der Ventilstellung und somit des Istwerts ist mit einem Potentiometer realisiert, das stellungsabhängig seinen Widerstand ändert. Der Vergleich von Soll- und Istwert führt zu der Regelabweichung, die mit der Änderung der Ventilstellung kompensiert werden muss, um den gewünschten Durchfluss zu erhalten. Eine Drossel in der Druckluftzufuhr passt den Druck im Pneumatiksystem dahingehend an, dass die entsprechende Kraft auf die Membran im Stellantrieb wirkt, um die Ventilstellung in die erforderliche Position zu bewegen, damit die Regelabweichung null wird.<sup>82</sup>

---

<sup>82</sup> Vgl. Siemens AG Digital Industries (2020), Online-Quelle [14.September.2021].

Die Schnittzeichnung eines Stellventils zeigt Abb. 40, wobei der rote Pfeil die Flussrichtung angibt. Das Ventil wird mittels Flanschanschluss in eine Rohrleitung montiert. Die Veränderung des Volumenstroms erfolgt durch Verstellung des Ventilkegels, wobei der Ventilschaft mit dem Antriebsschaft des Pneumatiktriebs verbunden ist.

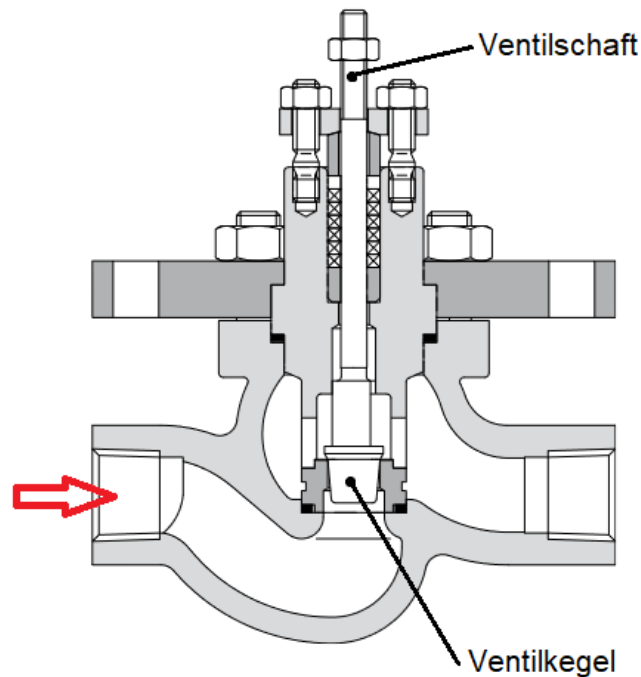


Abb. 40: Querschnitt eines Stellventils, Quelle: Flowserve Control Valves GmbH (2014), Online-Quelle [10.Oktober.2021].

### Pumpe

Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Heizmantel zu gewährleisten, wird eine Umwälzpumpe in einer Zirkulationsleitung verwendet. Diese Pumpe soll sicherstellen, dass das zugeführte Heiß- beziehungsweise Kaltwasser über die ganze Wärmeübertragungsfläche des Heizmantels Wärme in den Reaktor zuführen oder aus dem Reaktor abführen kann.

Pumpen sind Verdrängermaschinen, die ein Fluid oder Gas in einer Leitung in Bewegung versetzen und so einen Volumenstrom initiieren. Dies hat ebenso eine Drucksteigerung zur Folge. Je nach Einsatzzweck werden unterschiedliche Bauweisen verwendet, abhängig davon, ob ein großer Volumenstrom oder eine höhere Drucksteigerung gewünscht ist.<sup>83</sup>

---

<sup>83</sup> Vgl. Watter (2017), S. 96 f.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Auslegung der Pumpe ist die Pumpenkennlinie, wie in Abb. 41 dargestellt. Dieses Diagramm ist für jede Pumpe unterschiedlich und gibt an, welchen Nenndruck und welche Nennleistung die Pumpe fördern kann.

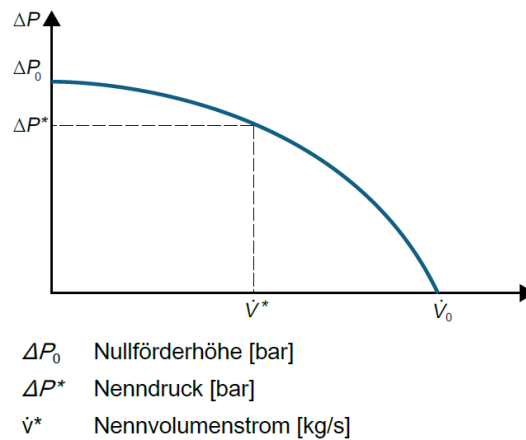


Abb. 41: Schematische Darstellung einer Pumpenkennlinie, Quelle: Siemens AG Digital IndustriesSiemens AG (Hrsg.) (2020), S. 707.

In der Pilotanlage ist eine Kreiselpumpe verbaut, die einen Nenndruck von 4 bar und einen Massenstrom von  $2 \text{ kg s}^{-1}$  leisten kann. Abb. 42 zeigt ein Schnittmodell einer solchen Pumpe. Links im Bild ist der antreibende Elektromotor zu sehen, rechts der Anschlussflansch der Saugseite, das Pumpenlaufrad in silbergrau und nach oben hin der Flansch der Druckseite.

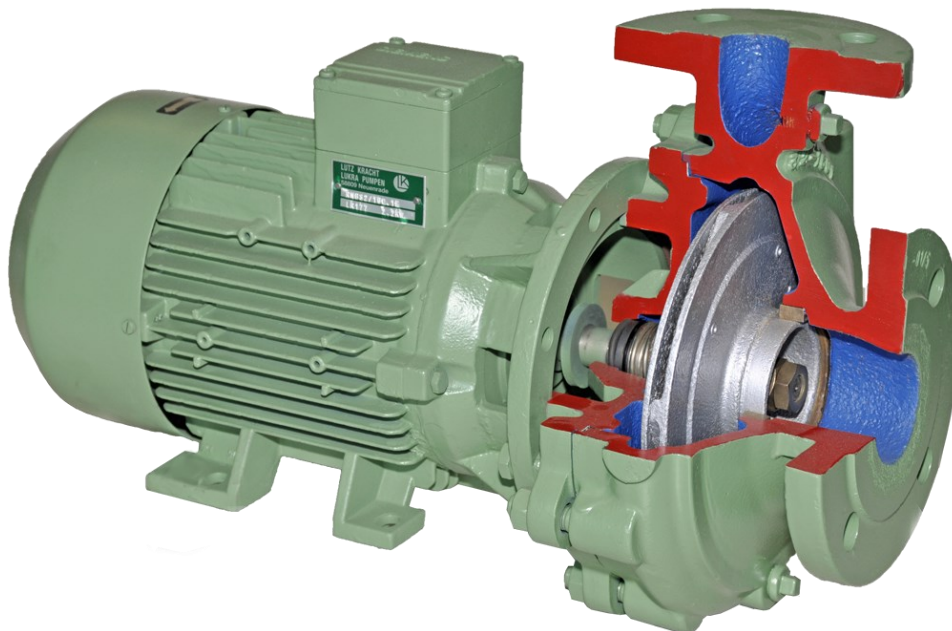


Abb. 42: Schnittmodell einer elektrisch angetriebenen Kreiselpumpe, Quelle: LUKRA Pumpen e.K. (2017), Online-Quelle [02.November.2021].

Nach Beschreibung aller beteiligten Komponenten beschäftigt sich das folgende Kapitel damit, die realen Bauteile und Funktionen in ein Modell überzuführen, das die Anlagenzustände hinreichend genau virtuell reproduzieren kann.

## 6 DER DIGITALE ZWILLING

Dieses Kapitel befasst sich mit der Erstellung des Anlagenmodells, der Kopplung an das Prozessleit- und Automatisierungssystem sowie den Tests des digitalen Zwillings zur Eignung als Schulungstool. In der Industrie ist der Einsatz eines digitalen Zwillings zur virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) einer Anlage bereits Stand der Technik, daher wird im Rahmen dieses Kapitels auf bewährte Prozesse und Methoden der VIBN zurückgegriffen.

### 6.1 Simulationsumgebung

Zur Erstellung des digitalen Zwillings sind drei Softwarepakete notwendig. Das Prozessleitsystem ist für die Steuerung und Regelung der Anlage verantwortlich und wird mit dem Softwaretool *Siemens PCS7* erstellt. Die Bedienung erfolgt über die Visualisierung wobei das Layout der einzelnen Bilder mit *WinCC* entworfen wird. Zur Modellierung der Anlage und deren Komponenten wird die Simulationsumgebung *SIMIT* von Siemens verwendet. Das Prozessleitsystem und die Visualisierung wurden bereits im Kapitel 5.3.1 grundlegend beschrieben, daher liegt hier das Hauptaugenmerk auf der Simulationsumgebung und dessen für diese Masterarbeit relevanten Funktionalitäten.

Die Simulationssoftware ist dazu da, um ein virtuelles Abbild der Anlage zu erstellen. Dieses Modell soll durch Anwendung der entsprechenden mathematischen und physikalischen Zusammenhänge das Verhalten der Anlage in Bezug auf die thermodynamischen, strömungs- und steuerungstechnischen Eigenschaften imitieren. Wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, soll auf bereits existierende und praxistaugliche Prozesse der Modellerstellung aufgebaut werden.

Der Verband Deutscher Ingenieure (VDI) hat 2016 die Richtlinie 3693 zum Thema *virtuelle Inbetriebnahme* veröffentlicht, die drei Stufen zur Erstellung und Testung eines digitalen Zwillings beschreibt. Die sogenannten *In-the-Loop-Prozesse* sind iterative Zyklen, die den jeweiligen Teil auf die gewünschte Funktionalität überprüfen. Der zugrunde liegende Prozess ist die Validierung und wurde bereits im Kapitel 3.3 beschrieben.

### 6.1.1 Model-in-the-Loop

Die Model-in-the-Loop-Simulation (MIL) stellt die erste Teststufe dar. Steuerungs- und Prozessalgorithmen werden dabei in einer grafischen Simulationsumgebung auf Basis einer Modellierungssprache abgebildet. Bedingungen aus dem Steuerungsmodell werden anhand von vereinfachten Sensorik- und Aktorikmodellen auf die geforderten Bedingungen hin geprüft und die Steuerungsalgorithmen gegebenenfalls angepasst. Durch die Abstrahierung komplexer Prozesse zur Darstellung in einer Modellierungssprache, wird das Anlagenmodell einfach gehalten.<sup>84</sup>

Abb. 43 stellt den Ablauf des Model-in-the-Loop-Prozess grafisch dar.

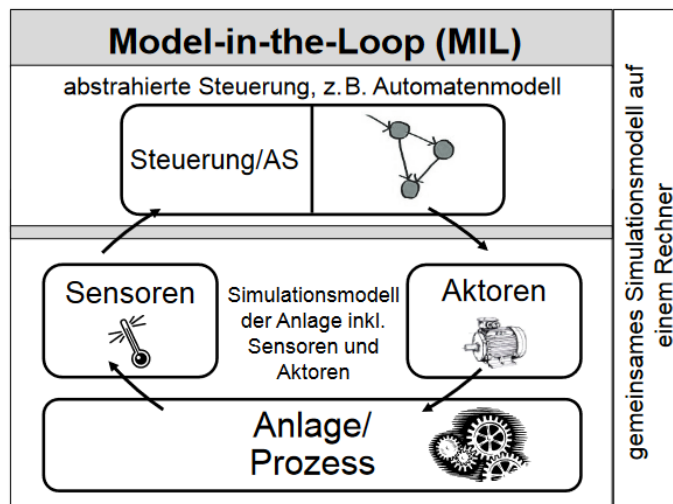


Abb. 43: Model-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 8.

### 6.1.2 Software-in-the-Loop

Wurden die Steuerungsalgorithmen mithilfe der MIL-Simulation erfolgreich umgesetzt, ist der zweite Testzyklus die Software-in-the-Loop-Simulation (SIL). Dabei wird das Steuerungsprogramm, das in dieser Phase bereits in einer der DIN EN 61131-3 konformen Sprache vorliegt, auf die erforderliche Funktionalität überprüft. Das Programm wird dabei von einem emulierten SPS-Controller ausgeführt. Die Prozessparameter können dazu entweder durch ein Simulationsmodell der Anlage dargestellt werden oder wie in Richtlinie VDI 4499 Blatt 1 – *Digitale Fabrik* beschrieben, durch Anbindung an die reale Anlage.<sup>85</sup>

<sup>84</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2016), S. 8.

<sup>85</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2016), S. 8.

In Abb. 44 ist der SIL-Prozess unter Verwendung eines Anlagenmodells abgebildet.

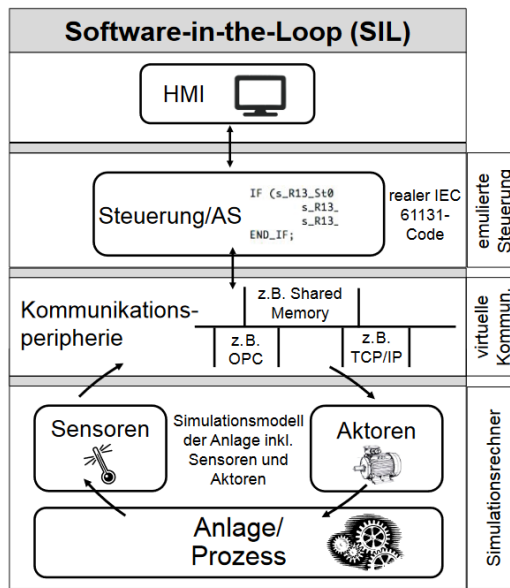


Abb. 44: Software-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 9.

### 6.1.3 Hardware-in-the-Loop

Eine weitere Methode der Validierung ist die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL), bei der das SPS-Programm in der realen Steuerungshardware getestet wird, wie in Abb. 45 dargestellt. Sensorik und Aktorik werden wiederum durch ein Simulationsmodell abgebildet. Die VDI 3693 Blatt 1 unterscheidet drei Herangehensweisen, wie die Anlage oder einzelne Komponenten simuliert werden können.<sup>86</sup>

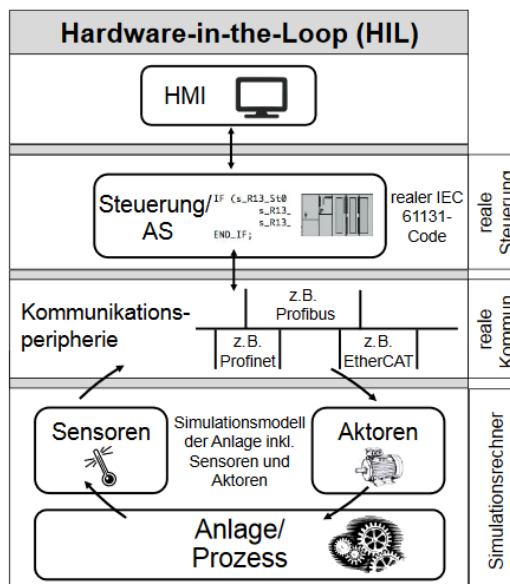


Abb. 45: Hardware-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 10.

<sup>86</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2016), S. 9.



Die einfachste Methode ist die manuelle Signalmanipulation, die auch unter dem Begriff *forcen* bekannt ist. Dabei werden einzelne Signale gezielt geschaltet und auf korrekte Verdrahtung und Verarbeitung im SPS-Programm geprüft. Die zweite Methode ist die Modellierung innerhalb des SPS-Programms, wobei Anlagenfunktionen über SPS-interne Funktionsblöcke und Variablen dargestellt werden. Als letztes besteht auch die Möglichkeit, die Anlage in einem eigenen Simulationstool zu modellieren, das über eine Schnittstelle mit dem SPS-Programm kommuniziert und das Verhalten der realen Anlage simuliert. Diese Methode ist die Einzige, die das gesamte Prozessverhalten abbilden kann, daher stellt diese Art der Modellerstellung auch diejenige mit der aufwändigsten Umsetzung in Bezug auf Knowhow und Zeit dar.<sup>87</sup>

Da das SPS-Programm für die in dieser Arbeit betrachtete Anlage bereits fertig und getestet ist, jedoch das Anlagenmodell noch erstellt werden muss, erfolgt die Modellierung in Anlehnung an den oben beschriebenen Model-in-the-Loop-Prozess. Das Anlagenmodell wird grafisch modelliert, die Funktionen werden aber hinreichend detailliert umgesetzt, damit sich ein realitätsgetreuer Prozessablauf darstellen lässt.

### 6.1.4 Simulationstool SIMIT

Um ein Modell zu erstellen, das die Prozesse einer Anlage hinreichend genau abbilden kann, muss die Modellierungsumgebung einige Anforderungen erfüllen. Um mit der vorhandenen SPS-Steuerung einwandfrei und ohne Drittprogramme kommunizieren zu können, muss eine Kompatibilität auf der Signalebene gegeben sein. Die elektrischen Eigenschaften der Signale können vernachlässigt werden, da sowohl das Simulationsmodell rechnerbasiert ist als auch der SPS-Controller durch ein Emulationsprogramm am selben Rechner dargestellt wird. Der Informationsgehalt der Signale muss jedoch für Modell und Controller gleichermaßen verständlich sein. Darüber hinaus sollte es möglich sein, Signale und Anlagenparameter während der Simulation manuell zu verändern. Die vorsätzliche Verschiebung der Rahmenbedingungen in einen an sich unzulässigen Bereich ist der größte Vorteil, den eine virtuelle Schulung bietet und so gegenüber dem herkömmlichen Ablauf einen erheblichen Mehrwert generiert.

Eine weitere Anforderung ist die grafische Darstellung des Modells. Für die Schulung ist dies unerheblich, da die Anlagenbediener\*innen im Real- sowie im Schulungsbetrieb den Anlagenzustand nur in der Visualisierung dargestellt bekommen. Für die Erstellung des Modells und die Manipulation der Zustände im Rahmen der Schulung ist es jedoch vorteilhaft, wenn die Darstellung an bekannte Formen, wie zum Beispiel das R&I oder die Visualisierung selbst, angelehnt ist. Des Weiteren ist es notwendig, dass die Simulation und die Anlagensvisualisierung nicht auf demselben Rechner ausgeführt werden. Im Idealfall sitzen die Schulungsteilnehmer\*innen bereits in der betriebsfertig ausgestatteten Leitwarte, um das Schulungsumfeld so gut wie möglich an die Gegebenheiten im Realbetrieb anzupassen. Das Anlagenmodell sollte daher für die Teilnehmer\*innen nicht einsehbar sein, der\*die Trainer\*in jedoch sollte die Handlungen der zu Schulenden trotzdem immer verfolgen können, um situativ Rückmeldung und Unterstützung geben zu können.

Das zentrale Element zur Verwendung als Schulungstool ist jedoch die Notwendigkeit, in der laufenden Simulation Zustände bewusst zu manipulieren und Szenarien darzustellen, die im Normalbetrieb zu einer

---

<sup>87</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2016), S. 10 ff.

Abschaltung der Anlage oder einer Gefährdung der Umgebung führen. Das Simulationsmodell soll es zu- lassen, einzelne Parameter oder Anlagenteile durch gezielte Veränderung der Prozesswerte in einen sonst unzulässigen Bereich zu ändern, um die Reaktion und das Verhalten der zu Schulenden festzustellen und anhand der Simulation ein Situationsbewusstsein für kritische Zustände zu schaffen. SIMIT bietet einerseits die Möglichkeit über Taster und Eingabefelder Zustände und Prozesswerte zu verändern, sowie mittels Scripts ganze Parametersätze auf Knopfdruck zu manipulieren. Wie diese Testszenarien genau aussehen können und im Modell umgesetzt werden, ist im Kapitel 6.2 beschrieben.

Die Pilotanlage wird von einer SPS der Type SIEMENS S7-400 gesteuert, daher fiel die Auswahl des Si- mulationstools auf ein Programm desselben Herstellers, da so die Kompatibilität zwischen Steuerung und Simulation gegeben ist und die Schnittstellen aufeinander abgestimmt sind. SIMIT kann sowohl für die Simulation von diskreten Maschinen als auch prozess- und verfahrenstechnischen Anlagen verwendet wer- den. Abb. 46 stellt den Aufbau einer realen und einer simulierten Anlage mit den entsprechenden Komponenten gegenüber.

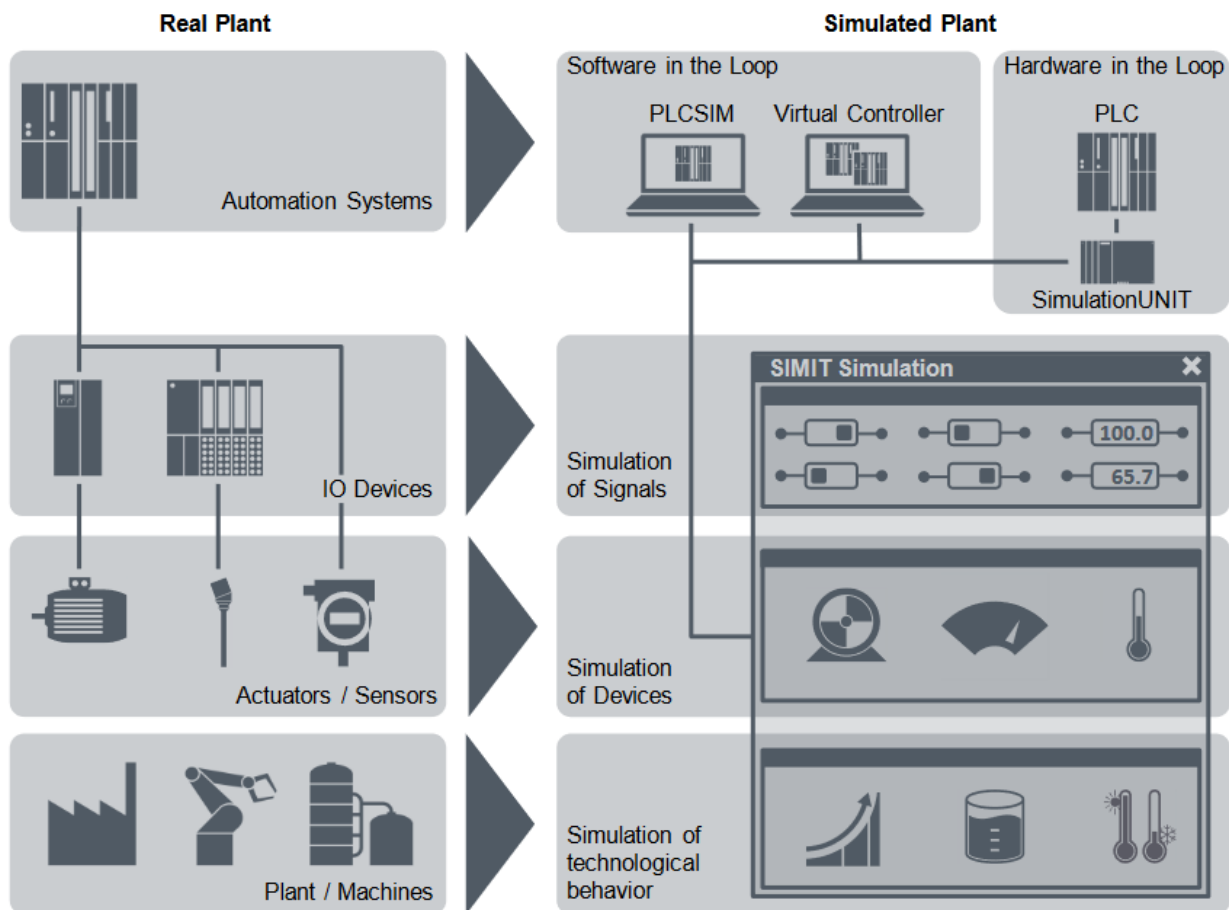


Abb. 46: Gegenüberstellung Aufbau Reale/Simulierte Anlage, Quelle: Siemens AG (2017), Online-Quelle [26.Juni.2021].

Die SPS kann einerseits in der Simulationsumgebung emuliert werden, um einen Software-in-the-Loop- Ansatz zu verfolgen, oder die reale SPS übernimmt die Steuerung, um den Hardware-in-the-Loop-Prozess zu durchlaufen. Ein- und Ausgangsbaugruppen der SPS werden sowie die gesamte Sensorik und Aktorik vom Simulationsmodell dargestellt und zur Modellierung des Anlagenverhaltens steht eine Auswahl an

verschiedenen Funktionsgruppen zur Verfügung. Damit ist es möglich, elektrische, pneumatische und hydraulische Antriebe zu simulieren, Ablaufketten wie Fördertechnik- beziehungsweise Logistikanlagen abzubilden und Flussnetze unter Berücksichtigung von Druck, Temperatur und Aggregatzustand zu modellieren.

SIMIT unterteilt dazu das Simulationsmodell in drei Ebenen:

### Signalebene

Wie sich aus dem Begriff *Signal* ableiten lässt, stellt die Signalebene den Signalaustausch zwischen dem virtuellen oder realen SPS-Controller und dem Simulationsmodell dar. In der Anlage sind dies die elektrischen Signale die zwischen SPS, Visualisierung und den Feldgeräten die Informationen und Befehle transportieren, sowie die projizierten Variablen im SPS-Programm und dem Simulationsmodell.

### Geräteebene

Die Geräteebene ermöglicht, jedes Feldgerät mitsamt seinen Eigenschaften in der Simulation darzustellen. Dazu stellt SIMIT diverse Gerätebibliotheken zur Verfügung, aus denen bereits vordefinierte Aktoren und Sensoren mit ihren Funktionsalgorithmen ausgewählt und in das Modell eingefügt werden können. Eigenschaften wie Anlaufzeiten für Antriebe, Stellzeiten für Ventile oder die Füllstandsermittlung eines Behälters können nach eigenen Vorstellungen oder anhand realer Vorgaben angepasst werden.

### Prozessebene

Um einen Bezug zwischen den einzelnen Komponenten herzustellen, müssen diese wie auch in der realen Anlage miteinander verbunden und verknüpft werden. Dazu dient in SIMIT die Prozessebene, die den Aufbau des Modells in Abbildung der physischen Leitungen, Förderbänder und Rohre ermöglicht. Einerseits kann auf bereits vorhandene Bibliotheken zurückgegriffen werden, andererseits besteht aber auch die Möglichkeit, komplexe physikalische Zusammenhänge in einem Bauteil textuell mit einer Programmiersprache angelehnt an C# oder in einer gleichungsbasierten mathematischen Formulierung zu beschreiben.

Alle drei Ebenen werden in einem grafischen Editor vereint, mit dem sich die physischen Zusammenhänge leicht überschaubar, ähnlich einem R&I-Schema, darstellen lassen. Abb. 47 zeigt die Benutzeroberfläche von SIMIT mit der Projektstruktur auf der linken und der Komponentenauswahl auf der rechten Bildschirmseite.

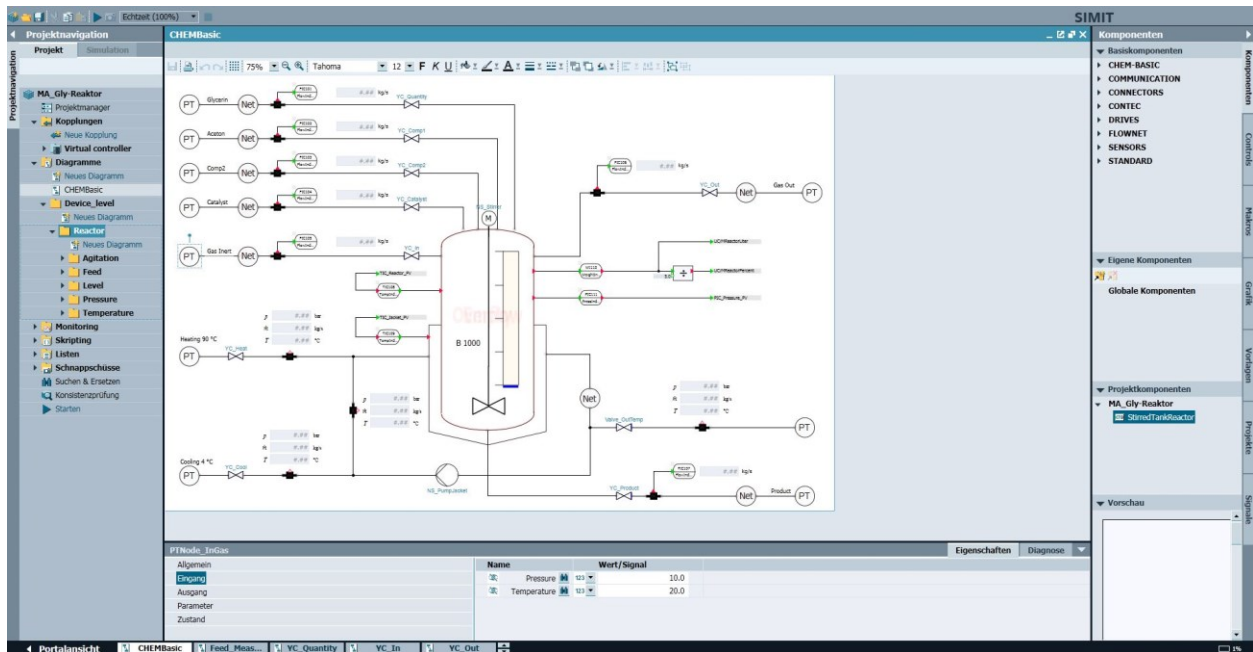


Abb. 47: Benutzeroberfläche SIEMENS SIMIT, Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgebaut wird das Modell aus mehreren *Diagrammen*, die einerseits einzelne Komponenten als auch die Anlagenübersicht und die Bedienschnittstelle beinhalten können. Die Funktionen der verfügbaren Blöcke werden im Kapitel Modellierung bei den jeweiligen Komponenten beschrieben. Zur Bedienung und Visualisierung der Modellparameter stehen Eingabekomponenten wie Schalter, Textfelder und Schieberegler zur Verfügung, um während der Simulation den Anlagenzustand zu ändern. Ebenso können die Parameter mit Anzeigefeldern, Balken und grafischen Animationen dargestellt werden.

Die Kopplung von Simulationsmodell und Prozessleitsystem kann auf zwei Arten erfolgen. Das SPS-Programm wird auf den realen SPS-Controller übertragen und die Bedienung erfolgt über die Leitwarte, wie im realen Betrieb. Wird die Schulung, wie in der Aufgabenstellung dieser Arbeit beschrieben, bereits vor der Inbetriebnahme der Anlage durchgeführt, ist die Verfügbarkeit der realen SPS womöglich noch nicht gegeben. Daher besteht die Möglichkeit, einen SPS-Controller auf einem Rechner zu emulieren. Dieser bearbeitet das SPS-Programm und ist über eine Netzwerkverbindung mit dem Simulationsmodell verbunden. Wie das Simulationsmodell erstellt wird, und welche Parameter und Funktionen für einen Schulungseinsatz erforderlich sind, wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 6.2 Modellierung

Als Grundlage des Simulationsmodells dient das R&I-Schema der Pilotanlage, wie in Abb. 48 ersichtlich, sowie das bestehende SPS-Programm. Die Grundlagen und Basisfunktionen des Simulationstools wurden bereits im vorigen Kapitel erläutert, daher liegt der Fokus in diesem Abschnitt auf der Verknüpfung von SPS und Modell, der Erstellung der einzelnen Komponentenbausteine, deren Funktionsweise und der virtuellen Verknüpfung der physischen Zusammenhänge.

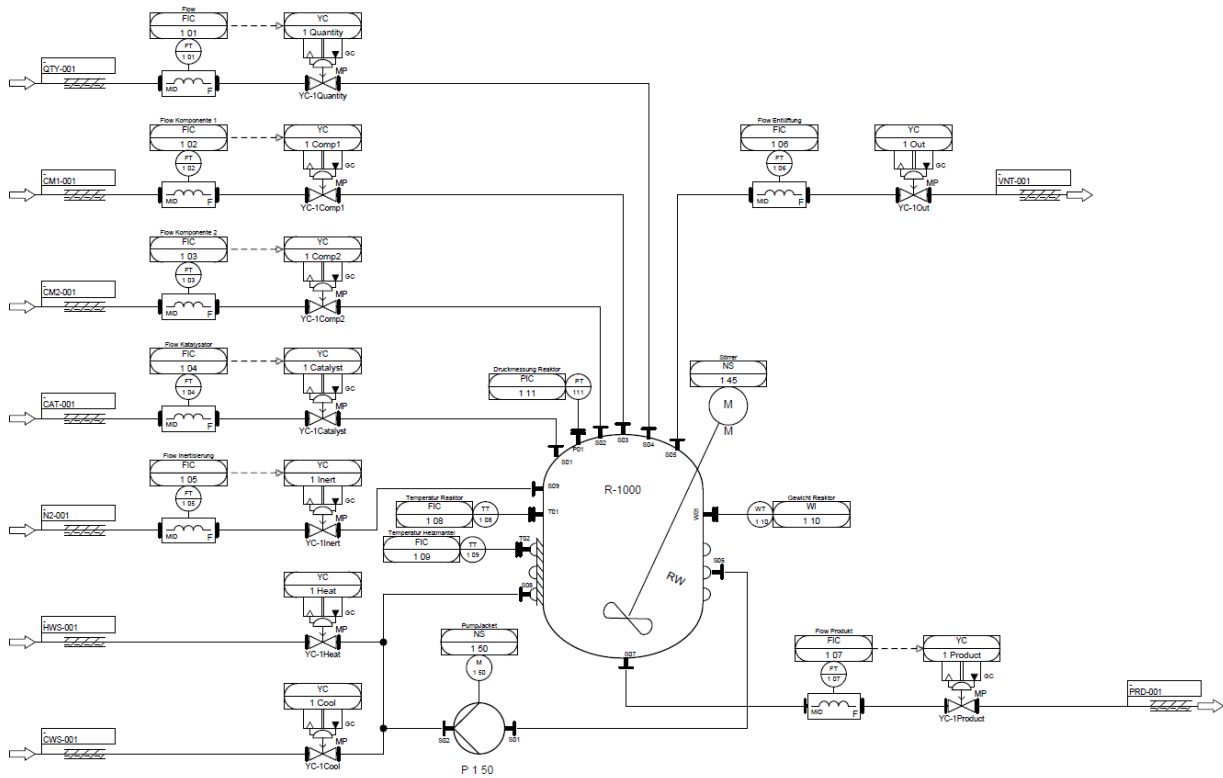


Abb. 48: R&I-Schema der Pilotanlage als Basis für die Modellerstellung: Quelle: Eigene Darstellung.

Um ein neues Modell zu erstellen, wird im Simulationstool zuerst ein neues Projekt angelegt. Der erste Schritt ist die Einrichtung einer funktionsfähigen Verbindung zwischen Prozessleitsystem und Anlagenmodell. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein virtueller SPS-Controller verwendet. Die Einstellungen und die Hardwaretype des Controllers werden aus dem Projekt im Prozessleitsystem übernommen.

Dazu muss die entsprechende Verbindung im Simulationsprojekt erstellt werden, wie in Abb. 49 dargestellt, das Gegenstück im Prozessleitsystem sowie die IP-Adressen der jeweiligen Verbindungspartner eingestellt.

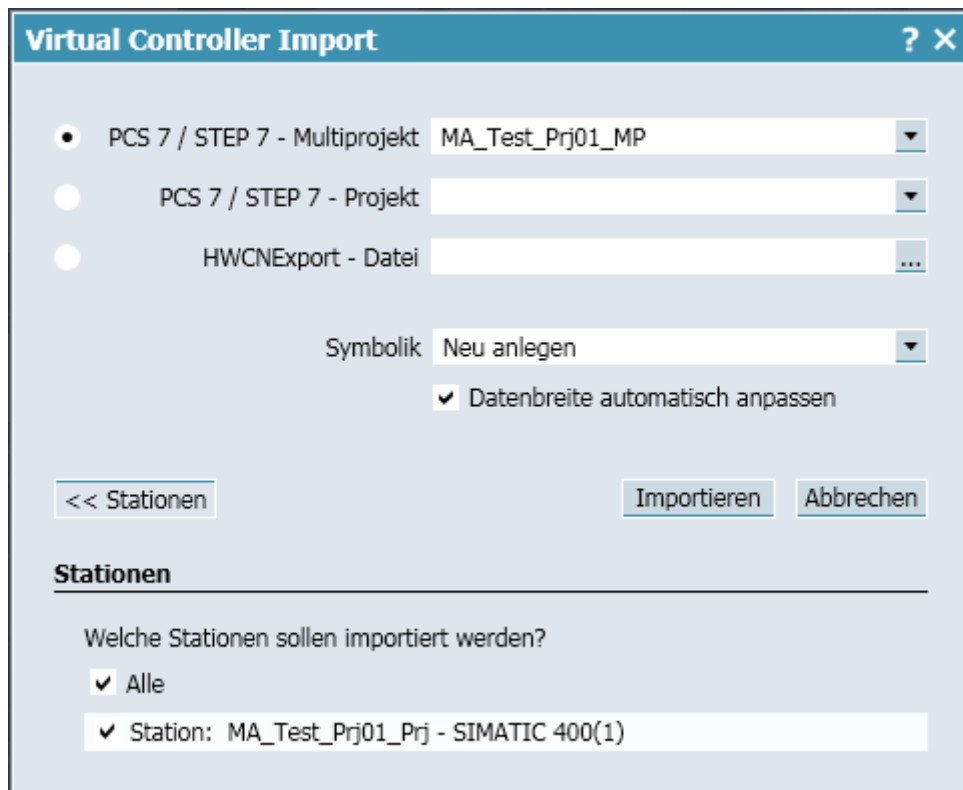


Abb. 49: Hardware-Kopplungseditor PLS-Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Schnittstelle zwischen SPS und dem eigentlichen Modell erfolgt über die Ein- und Ausgabesignale, die im Prozessleitsystem in der Symboltabelle definiert sind. In der realen Anlage sind diese Signale von den Ein- und Ausgabebaugruppen, die in der Anlage platziert sind, über Kabelverbindungen an das entsprechende Feldgerät angebunden. Im digitalen Zwilling dienen diese Signale dem Informationsaustausch zwischen SPS und Modell und sind nur virtuell als Variablen, wie in einer Programmierumgebung, vorhanden. Um einen einwandfreien Signalaustausch sicherzustellen, müssen diese Variablennamen in beiden Systemen identisch sein oder in einer Symboltabelle eindeutig dem jeweiligen Pendant in SPS und Modell zugeordnet. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Funktionsgruppen des Simulationsmodells nach Aufbau und Funktionsalgorithmen beschrieben. Begonnen wird bei den Komponenten, die am Hauptmaterialstrom beteiligt sind.

### 6.2.1 Materialfluss

Der Prozess beginnt damit, dass die Ausgangsstoffe in der richtigen Menge in die Anlage gefördert werden. Die Lagerung und Bereitstellung dieser Stoffe erfolgt durch mobile Behälter, sogenannte Intermediate Bulk Container (IBC) mit einer vormontierten Tauchpumpe. Diese wird durch die SPS beim Anlagenstart eingeschaltet und sorgt für eine kontinuierliche Stoffbereitstellung.

Im Modell ist diese Lagerhaltung als Stoffquelle mit konstantem Druck und Temperatur dargestellt, wie Abb. 50 zeigt. Der Block *PTNode\_Quant* bildet die Stoffquelle mit den in der Abbildung gezeigten Werten für Druck und Temperatur. Im Initialzustand sind diese mit 8 bar und 20 °C vorgegeben. Weitere Stoffeigenschaften werden in der Flussnetzdefinition *NetParam#1* hinterlegt.

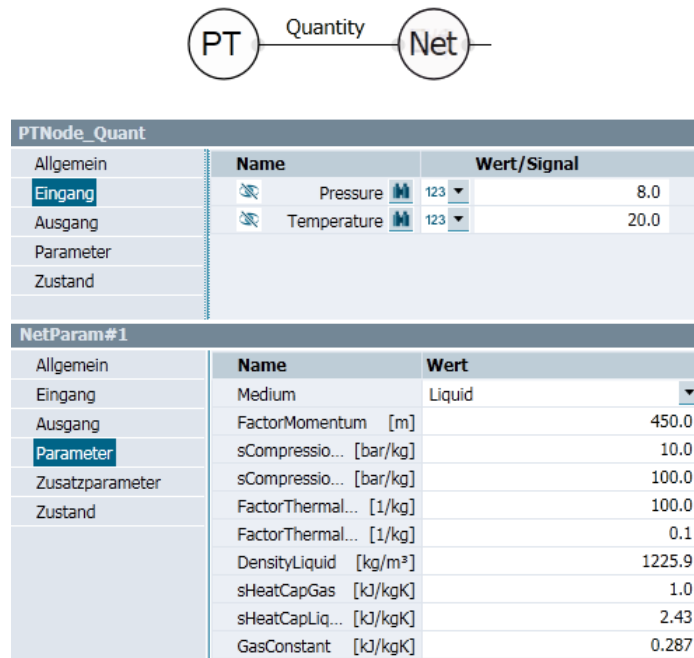


Abb. 50: Stoffquelle und Flussnetzdefinition, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Eigenschaften sind zuoberst die Auswahl, ob der definierte Stoff Wasser oder Wasserdampf, eine andere Flüssigkeit oder ein ideales Gas sein soll. Des Weiteren können Eigenschaften wie die Dichte, Wärmekapazität, Kompressibilität und die Gaskonstante hinterlegt werden. Darüber hinaus können diese Werte während der Simulation über ein Bedienfenster, wie im oberen Teil von Abb. 51 abgebildet, manuell verändert werden. Im unteren Feld sind die aktuellen Werte des mittleren Massenstroms, Dichte, Temperatur und der spezifischen Energie des Stoffes angegeben.

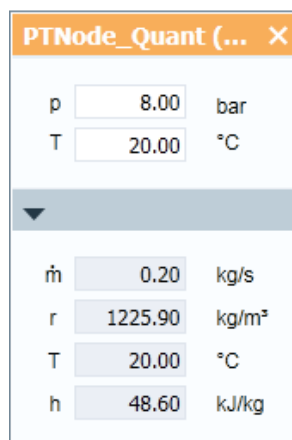


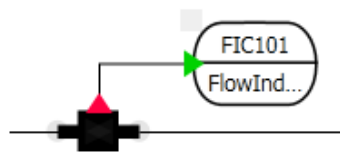
Abb. 51: Manuelles Bedienfenster einer Materialquelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, über den Blocknamen und den jeweiligen Blockparameter in einem vorgefertigten Skript die Initialwerte anzupassen.

Die stoffspezifischen Werte im Modell wurden auf Basis der Stoffe Glycerin, Aceton, Salzsäure und Natronlauge, in der Reihenfolge der Zuläufe von oben nach unten, angenommen. Diese Eigenschaften werden in die jeweilige Stoffquelle sowie die Flussnetzdefinition hinterlegt. Auf die Materialquelle folgt als nächstes Instrument die Durchflussmessung.

### 6.2.2 Durchflussregelung

Die Dosierung der Edukte erfolgt mittels einer separaten Durchflussregelung für jeden Ausgangsstoff. Diese Regelung besteht aus einem Durchflussmessgerät, einem Stellventil und einem PID-Regler.



Meas_Quant		Name	Wert/Signal
Allgemein			
Eingang			
<b>Ausgang</b>	▼ Measure		...
Parameter	<input type="checkbox"/> Temperature	▼	FlowInd_Quant Measure
Zustand	<input type="checkbox"/> Pressure	▼	FlowInd_Quant Measure
	<input type="checkbox"/> Level	▼	FlowInd_Quant Measure
	<input type="checkbox"/> Weight	▼	FlowInd_Quant Measure
	<input type="checkbox"/> Flow	▼	FlowInd_Quant Measure

Abb. 52: Funktionsdiagramm und Parameterliste einer Messstelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Abb. 52 zeigt das grafische Symbol der Messstelle *FIC101* für das Hauptedukt sowie das dazugehörige Eigenschaftenmenü. Der Funktionsblock Messung kann die physikalischen Größen Temperatur, Druck, Füllstand, Masse und Durchfluss messen und für die weitere Verarbeitung in der Simulation zur Verfügung stellen. Aus Gründen der Vereinheitlichung existiert nur ein Baustein für alle in der Simulationsumgebung messbaren Größen. Jede Größe wird mit dem physikalischen Wert als Gleitkommazahl gespeichert. Mit dem Namen des Blocks und der Bezeichnung in der Spalte *Wert/Signal* kann in der Simulationsumgebung auf den entsprechenden Parameter zugegriffen werden.



Um während der Simulation die aktuellen Messwerte verfolgen zu können, hat jede Mesststelle ein entsprechendes Kontextmenü das die Werte für Druck, Massenstrom, Temperatur, Enthalpie und Dichte des gemessenen Stoffes anzeigt, wie in Abb. 53 ersichtlich.



Abb. 53: Anzeigewerte einer Mesststelle während einer Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Die eigentliche Dosierung der Stoffe erfolgt durch ein Stellventil. Der Name des Funktionsblocks muss mit dem Namen des Diagramms übereinstimmen, das die Funktionsdefinition des jeweiligen Regelventils enthält. In Abb. 54 ist das Funktionsdiagramm eines Stellventils dargestellt.

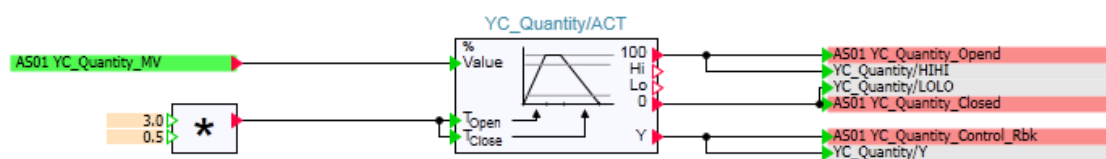


Abb. 54: Funktionsdiagramm Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Symbol mit grünem Hintergrund ist das Ausgangssignal der SPS, das die Ventilstellung vorgibt. Im Simulationsmodell wird dieses Signal eingelesen und der Block *YC-Quantity/ACT* initiiert das Verhalten des realen Ventils bei der entsprechenden Positionsvorgabe. Die in rot markierten Texten sind die Rückgabewerte des Ventils an die SPS, ob das Ventil ganz offen oder geschlossen ist, und die genaue Stellung in Prozent. Die in grau gehaltenen Symbolen sind interne Signale, die im Modell selbst weiterverarbeitet werden können.

Ebenso wie an der Stoffquelle, müssen auch am Regelventil einige Einstellungen getroffen werden, um ein ähnliches Verhalten wie in der Pilotanlage zu gewährleisten. Die physischen Kennwerte, die zur Simulation des Ventilhaltens dienen, werden wiederum über das Eigenschaftsfenster vorgegeben, wie in Abb. 55 dargestellt.

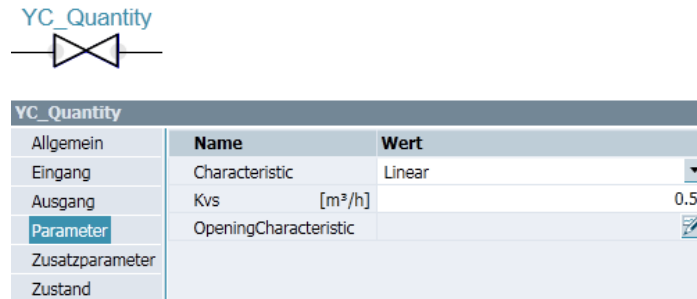


Abb. 55: Eigenschaftsfenster eines Stellventils, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Parameter *Characteristic* gibt die Öffnungskennlinie des Ventils vor. Damit ist der Verlauf des Durchlassquerschnitts beim Öffnen des Ventils beschreiben. Ein linearer Verlauf wie er im Modell verwendet wird, bedeutet, dass die Öffnung zwischen null und 100% gleichförmig erfolgt. Andere Charakteristiken, die ausgewählt werden können, sind gleichprozentig, quadratisch oder polygonal. Der  $K_{vs}$ -Wert oder Durchflusskoeffizient beschreibt den maximal möglichen Volumenstrom bei vollständiger Öffnung des Ventils und ist im jeweiligen Datenblatt zu finden.

Während der Simulation wird das Ventil automatisch durch Befehle der SPS gesteuert, es besteht allerdings die Möglichkeit, über ein Bedienfenster wie in Abb. 56, auf manuelle Kontrolle umzuschalten und die Ventilstellung fix vorzugeben. Dies kann entweder über einen Schieberegler oder durch Eingabe eines Prozentwerts der Öffnungsweite des Ventils geschehen. Das Eingabefenster zeigt außerdem den Druckverlust in der Rohrleitung durch das Ventil sowie den aktuellen Massenstrom an.

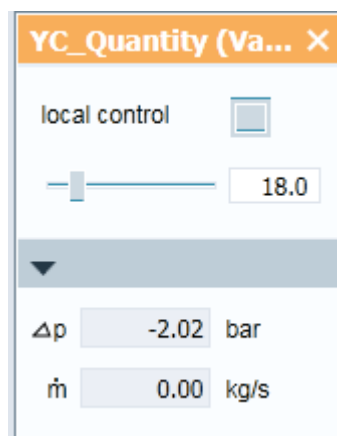


Abb. 56: Manuelles Bedienfenster eines Regelventils in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Schulung ist dies insofern nützlich, da so Anlagenzustände imitiert werden können, die ansonsten nur durch Manipulation des Feldgeräts möglich sind. Beispielsweise kann so eine feststehende Absperrarmatur dargestellt werden, die ganz offen oder geschlossen ist, oder durch Verschleiß, Korrosion oder andere Umstände in einer bestimmten Position verharret und keine Steuerungsbefehle ausführen kann. Alle

Ventile im Simulationsmodell basieren auf dem zuvor beschriebenen Funktionsblock und können in der gleichen Weise eingestellt werden, lediglich die Ventileigenschaften variieren abhängig vom Einsatzort in der Anlage.

Der PID-Regler, der die jeweilige Ventilstellung vorgibt, wird durch das Prozessleitsystem realisiert. Die Reglerparameter sind bereits vorgegeben und werden als ausreichend genau für die Verwendung im Schulungsmodell angesehen. Die optimale Einstellung kann erst im Zuge der Inbetriebnahme einer Anlage erfolgen.

### 6.2.3 Reaktor

Das Kernstück der Anlage ist der Reaktor. Darin werden, wie im Kapitel 5.3.2 beschrieben, die Ausgangsstoffe unter möglichst konstanter Temperatur zum Endprodukt reagiert. Im Gegensatz zu einem Ventil sind im Funktionsblock des Reaktors bereits alle für die Simulation erforderlichen Berechnungsalgorithmen hinterlegt. Lediglich die Prozesswerte, die an die SPS zurückgegeben werden müssen, wie zum Beispiel der Füllstand in Liter und Prozent sowie die Masse des Reaktionsprodukts, berechnet die Simulation in einem eigenen Funktionsdiagramm, wie in Abb. 57.

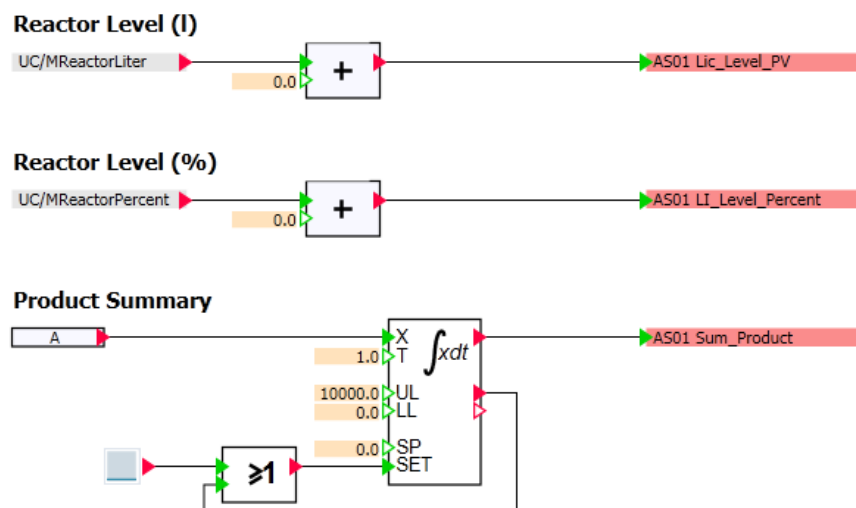


Abb. 57: Funktionsdiagramm zur Berechnung des Reaktorfüllstands, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Baustein, der den Reaktor repräsentiert, wird nur mit den notwendigen Parametern und Messpunkten definiert und initialisiert. Dazu müssen die Höhe und das Volumen des Behälters vorgegeben werden sowie die Anzahl der Medienanschlüsse und der Messstellen. Ebenso kann man die Umgebungsbedingungen wie Luftdruck und Temperatur variieren.

Abb. 58 zeigt die Visualisierung des Reaktors innerhalb der Simulation sowie eine Liste mit den Einstellwerten.

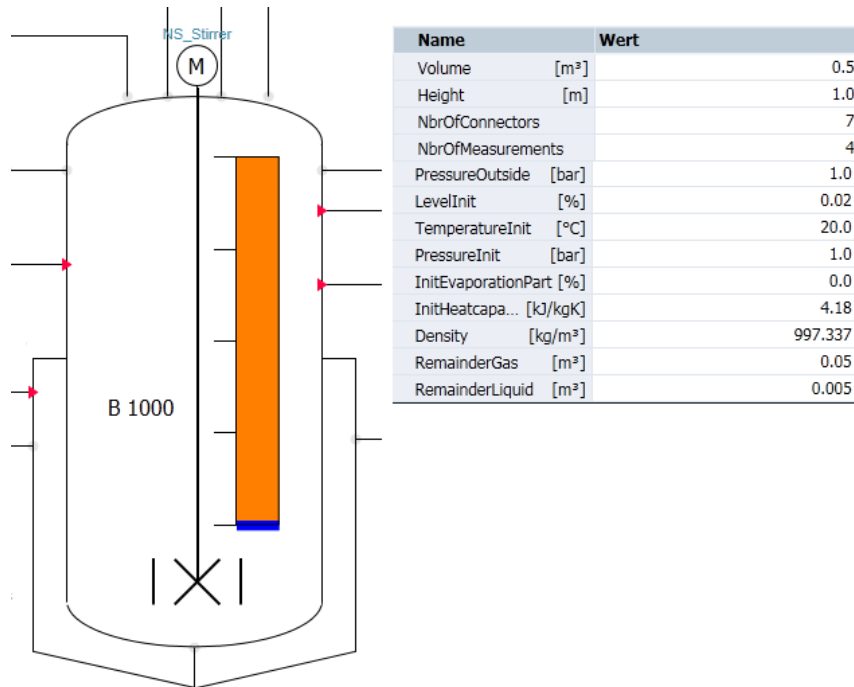


Abb. 58: Reaktordarstellung und Einstellwerte in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Funktionsblock ist in der Lage, Druck und Temperatur der zugeführten Medien zu bilanzieren sowie die Gesamtfüllmasse aus den zuströmenden Stoffen zu berechnen. In der Bilanzierung wird noch zwischen flüssigen und gasförmigen Medien unterschieden. Dazu werden die Kennwerte der einzelnen Stoffquellen sowie die Temperatur des Heizmantels verwendet. Stoffspezifisch kann auch der Anteil und der Phasenübergang von leichtsiedenden Stoffen berücksichtigt werden, was sich auf den Druck im Reaktor auswirkt. Auch am Reaktor können einige Messwerte händisch geändert werden, wie Abb. 59 zeigt. Der erste veränderbare Parameter passt den Füllstand im Reaktor auf den eingegebenen Pegel an,  $T_L$  gibt eine andere Temperatur des Reaktorinhalts vor,  $M$  ändert die Masse des Reaktionsgemisches und mit dem Parameter  $w$  kann der Anteil an leichtsiedenden Stoffen im Reaktor verändert werden. Speziell das Ändern der Temperatur kann im Rahmen der Schulung gut genutzt werden, um kritische Zustände zu simulieren.

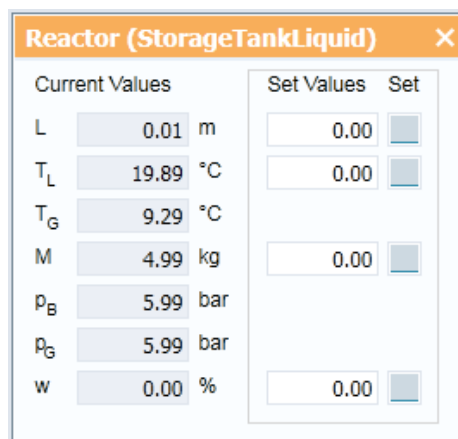


Abb. 59: Manuelles Bedienfenster des Reaktors in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Rührwerk wird füllstandsgesteuert ein- oder ausgeschaltet, auf die Simulation des Reaktors hat es keinen Einfluss, da die Berechnung der Reaktorparameter eine ideale Durchmischung und somit auch eine ideale Temperaturverteilung im Behälter annimmt.

## 6.2.4 Heiz- und Kühlsystem

Der Heizmantel dient dazu, die Temperatur des Reaktorinhalts zu regeln. Das gesamte Heiz- und Kühlsystem besteht aus zwei Zuflüssen, die heißes sowie kaltes Wasser bereitstellen, jeweils einem Stellventil im Heiß- und Kaltwasserzufluss, einer Umwälzpumpe sowie dem Heizmantel selbst. Wie alle anderen Funktionsblöcke hat auch der Heizmantel ein Anzeigefenster mit den aktuellen Prozessparametern, wie in Abb. 60 gezeigt.

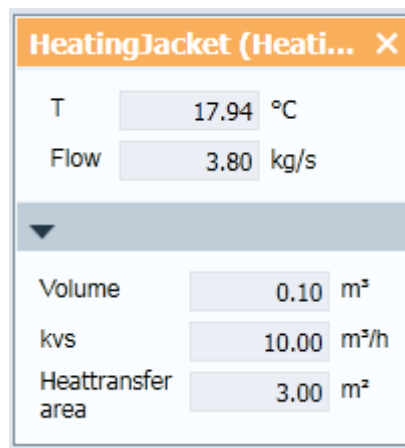


Abb. 60: Anzeigewerte des Heizmantels während einer Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Temperatur und Massenstrom werden laufend in der Simulation berechnet. Das Volumen, der kvs-Wert und die Wärmeübertragungsfläche sind Werte, die durch die Konstruktion des Heizmantels vorgegeben sind. Eine übliche Form eines Heizmantels sind halbrunde Rohre die direkt am Reaktor angeschweißt sind und spiralförmig um die Seitenwände verlaufen. Das Volumen ergibt sich aus der Länge sowie dem Durchmesser der Rohre und die Wärmeübertragungsfläche ist diejenige Fläche der Reaktorwand, die vom Wasser umspült ist. Als Isolierung nach außen dient Steinwolle, die mit einem Falzblech als Witterungsschutz umgeben ist. Die Temperaturregelung erfolgt mit zwei kaskadierten Reglern. Die Regeldifferenz der Reaktortemperatur dient als Führungsgröße für den zweiten Regler, über eine Split-Range-Regelung die Stellventile für Heiß- und Kaltwasser regelt. Split-Range bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Regler zwei Stellventile mit unterschiedlicher Funktion ansteuert. Mit einem positiven Signal wird das Ventil für Heißwasser geöffnet und das Kaltwasserventil geschlossen, mit einem negativen Signal verhalten sie die Ventile umgekehrt und Kaltwasser strömt in den Mantel. Eine konstante Durchströmung des Heizmantels wird mit der Umwälzpumpe sichergestellt, die automatisch beim Anlagenstart eingeschaltet wird und mit konstanter Drehzahl läuft.

Den entsprechenden Funktionsblock dazu zeigt Abb. 61. Der grüne Verbinder steht für das Start-Signal von der SPS, der rote Verbinder liefert der SPS die Information zurück, dass die Pumpe läuft.

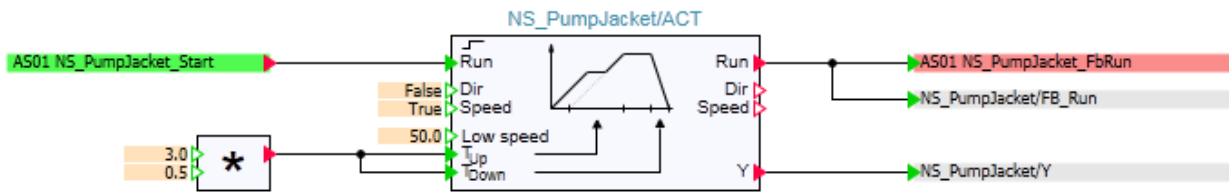


Abb. 61: Funktionsdiagramm der Umwälzpumpe, Quelle: Eigene Darstellung.

Obwohl es für die Simulation der Anlage nicht relevant ist, lässt sich auch die Pumpe manuell übersteuern, wie in Abb. 62 dargestellt. Mit dem Schieberegler kann die Drehzahlvorgabe in Prozent variiert werden, der untere Abschnitt zeigt anhand der Pumpenkennlinie den Druckabfall und den Volumenstrom im aktuellen Betriebspunkt an. Einstellungen, die beim Parametrieren jedoch immer gemacht werden müssen, sind die Nullförderhöhe, die Nenndruckerhöhung und den Nennmassenstrom.

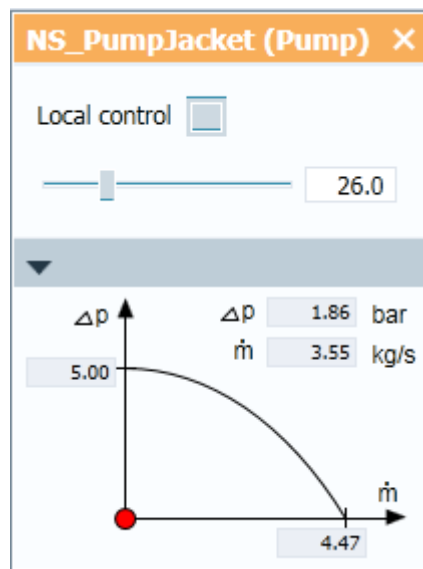


Abb. 62: Manuelles Bedienfenster der Umwälzpumpe in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ventil *Valve\_OutTemp* ist am Prozess nicht beteiligt, es dient nur als Abfluss des Heizmantels und ist während der Simulation immer zu 100 % geöffnet.

### 6.2.5 Rohrleitungen und sonstige Komponenten

Das Simulationstool bietet auch die Möglichkeit, Rohrleitungen in zwei Varianten zu modellieren. Zum einen können für jede Rohrleitung über einen Funktionsblock Eigenschaften der realen Rohrleitung parametrierbar werden, wie beispielsweise Länge, Durchmesser, Rauigkeit der Wandung, Viskosität des transportierten Mediums und noch einige mehr. Aus diesen Werten berechnet die Simulation den Druckverlust in der Rohrleitung und berücksichtigt dessen Einfluss in den nachfolgenden Komponenten. Eine ähnliche Funktion steht auch für Abzweigungen, Blenden und Stutzen zur Verfügung, womit man Rohrleitungsnetze sehr

nah an das reale Verhalten angleichen kann. Andererseits sind diese Funktionen nicht obligatorisch und können zugunsten eines einfacheren Modellaufbaus weggelassen werden. Sollte dies der Fall sein, wie im digitalen Zwilling, der für diese Arbeit erstellt wird, nimmt die Simulation diese Rohrleitungen als ideal und somit ohne Druckverlust an. Mit der Parametrierung der Funktionsblocks ist die Modellierung abgeschlossen. Als nächster Schritt folgt die Simulation, Auswahl der Testfälle sowie deren Ausführung.

### 6.3 Simulation

Nach Erstellung und Parametrierung aller erforderlichen Funktionen und Kopplung an das Prozessleitsystem kann die Simulation gestartet werden. Das SPS-Programm wird in den virtuellen Controller geladen und die Visualisierung am Rechner des\*der zu Schulenden aufgerufen. Abb. 63 zeigt das Anlagenmodell im Ausgangszustand, nach dem Starten der Simulation, aber bevor die Initialisierung durch die SPS erfolgt ist. Der Reaktor ist noch leer und die Temperatur im Heizmantel beträgt ungefähr 24 °C. Alle Stellventile sind geschlossen, das Rührwerk ist nicht in Bewegung und die Umwälzpumpe des Heizmantels steht still.

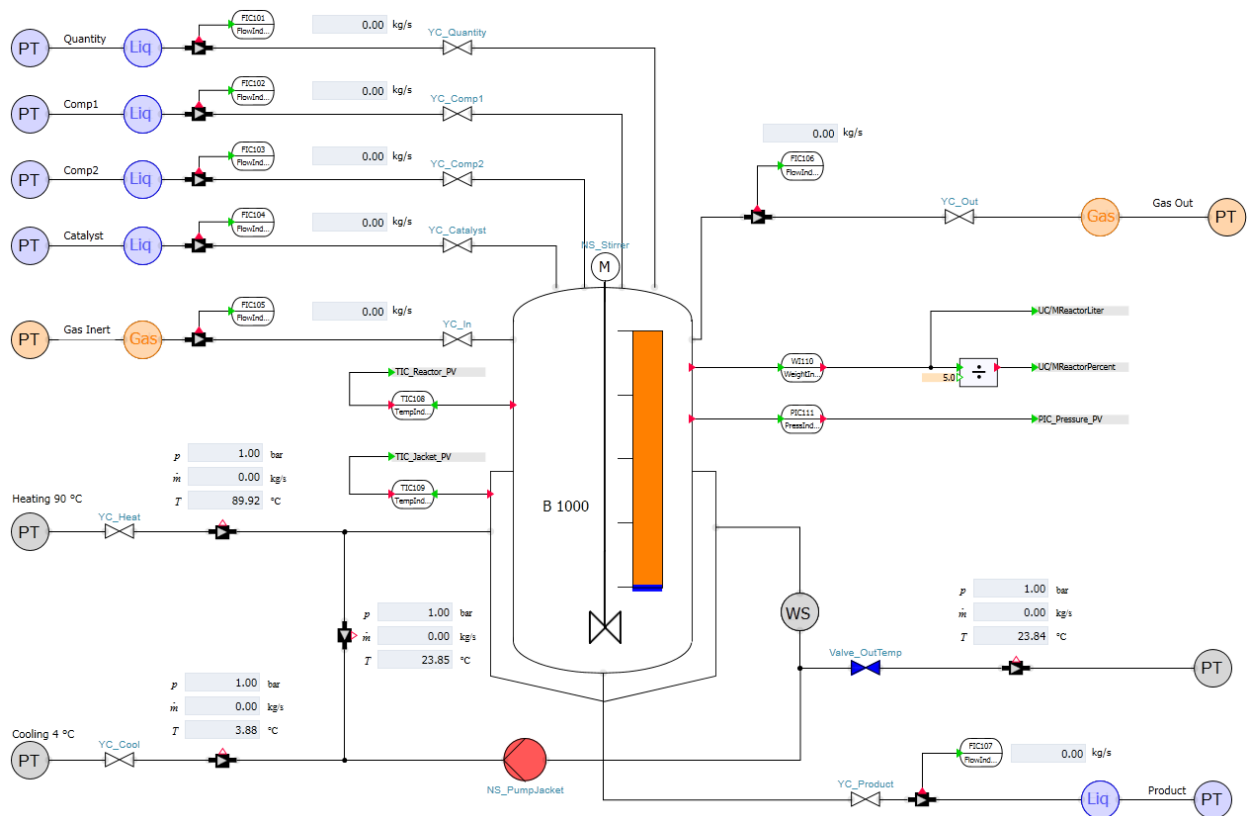


Abb. 63: Simulationsmodell im Initialzustand, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abb. 64 ist das Gegenstück dazu, die Visualisierung des Prozessleitsystems im selben Zustand abgebildet.

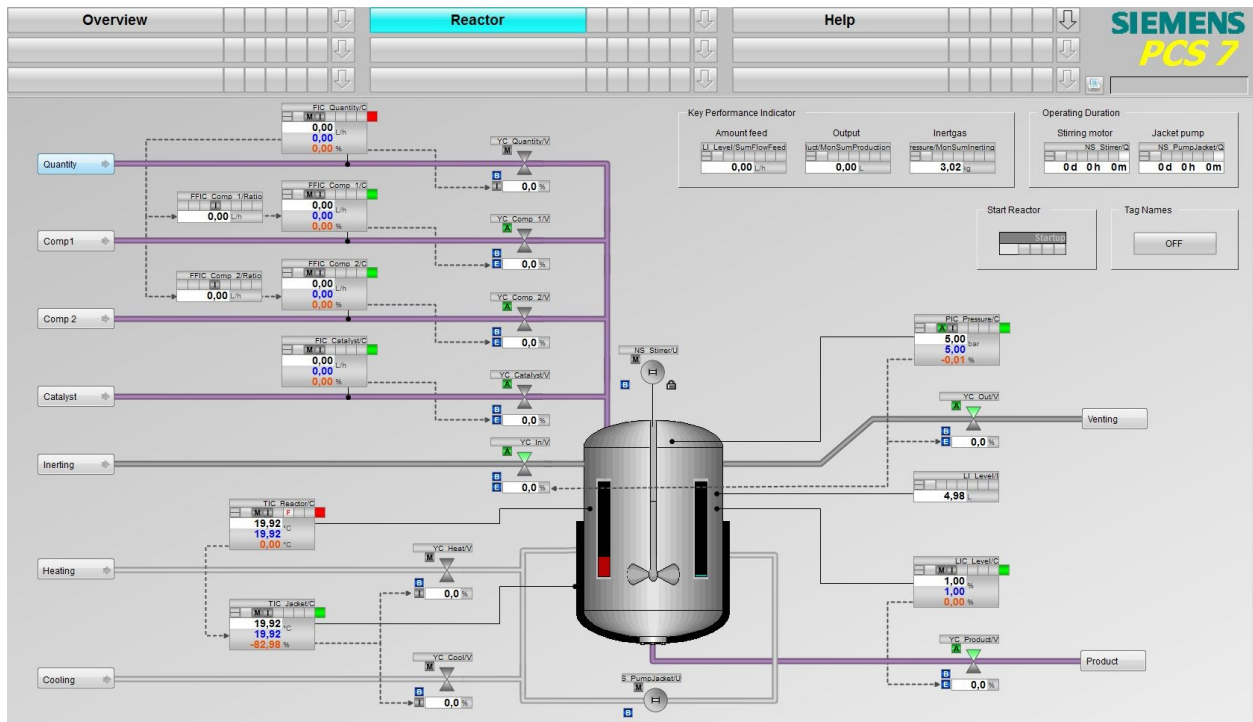


Abb. 64: Visualisierung im Initialzustand, Quelle Eigene Darstellung.

Über die Visualisierung muss anschließend die Anlage initialisiert werden. Das bedeutet, dass die Sollwerte für alle Regelkreise auf den im SPS-Programm definierten Wert gesetzt werden, Ventile entsprechend der jeweiligen Stellgröße positioniert und die Umwälzpumpe des Heizmantels eingeschaltet werden.



Im Simulationstool kann man anschließend die aktuellen Anlagenparameter wie den Reaktorfüllstand verfolgen, wie in Abb. 65 zu sehen. In den Textfeldern über den jeweiligen Verbindungen können die Massenströme, Temperaturen und Drücke des entsprechenden Anlagenteils verfolgt werden.

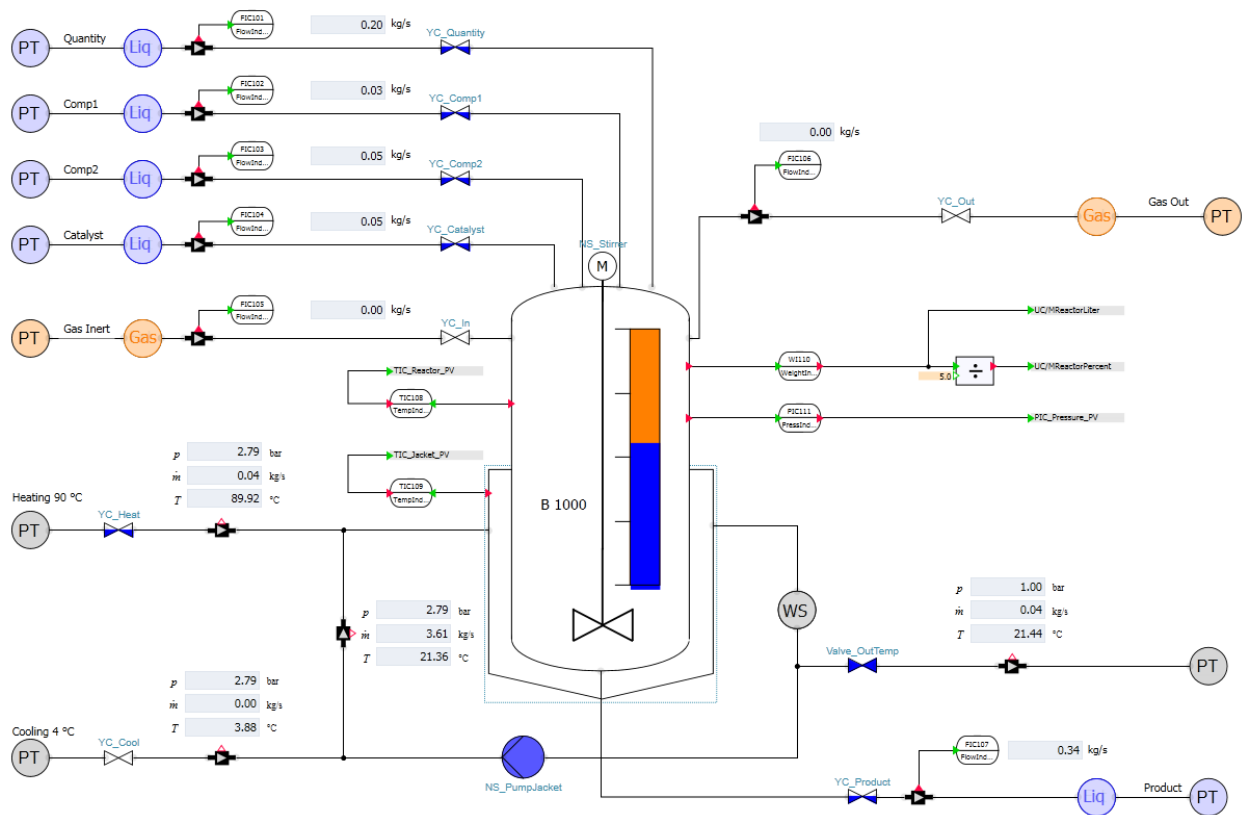


Abb. 65: Anlagenmodell während der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.

### Testszenerien

Im Zuge der Planung einer verfahrenstechnischen Anlage ist es notwendig, eine Beurteilung aller möglichen auftretenden Gefährdungen im Lebenszyklus der Anlage durchzuführen. In der Prozessindustrie hat sich dafür das Erstellen einer Hazards and Operability-Studie (HAZOP) bewährt. Ein Team aus Spezialist\*innen aller wissenschaftlichen Disziplinen, die in der Planung beteiligt sind, versucht, alle Gefährdungsquellen zu identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen zu definieren.

Alle Gefährdungen werden in jeweils fünf Stufen nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Gefährdungspotential für die Menschen in der Umgebung beurteilt und in eine Risikomatrix, wie in Abb. 66 dargestellt, übertragen. Gefährdungen im grünen Bereich stellen ein geringes Risiko dar, wohingegen Gefährdungen im roten Bereich ein hohes Risikopotential bergen, das mit entsprechenden Gegenmaßnahmen reduziert werden muss.

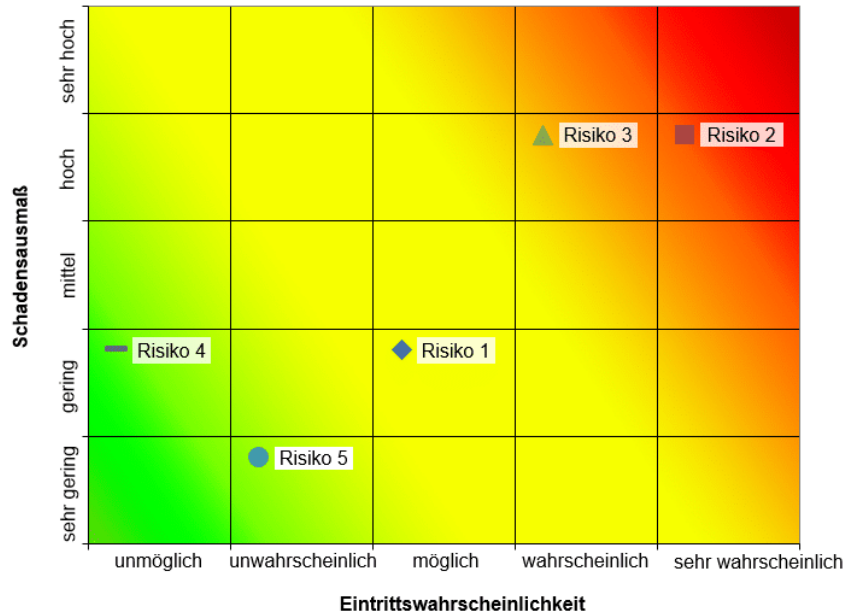


Abb. 66: Risikomatrix zur Beurteilung einer Gefährdung, Quelle: microTOOL GmbH (2021), Online-Quelle [21.Oktober.2021].

Im Rahmen einer HAZOP-Studie werden nicht nur Risikopotentiale aufgezeigt, auch die Erhaltung der Verfügbarkeit ist ein Ziel davon. Beide Aspekte, Sicherheit und Verfügbarkeit, auf ein gleich hohes Niveau bringen, ist die Schwierigkeit, die diesem Prozess innewohnt. Sichere Anlagen sind für gewöhnlich weniger verfügbar, bei hoch verfügbaren Anlagen dagegen wird, wissentlich oder unwissentlich, die Betriebssicherheit geringer.<sup>88</sup> Eine Balance aus beiden zu finden, ist nicht leicht und erfordert ein hohes Maß an Erfahrung des HAZOP-Teams und auch Out-of-the-Box-Denken. Anhand der möglichen sicherheitskritischen Zustände werden einige Szenarien abgeleitet, die in der Simulation als Test für die Eignung des Modells zur Schulung dienen.

<sup>88</sup> Vgl. Festo Gesellschaft m.b.H. (2017), Online-Quelle [12.Januar.2022]

In Tab. 3 sind einige Zustände aufgelistet, die in der Anlage auftreten können. Die erste Spalte *Deviation* beschreibt die Abweichung vom Normalzustand, *Cause* gibt die Quelle der Abweichung an, in der Spalte *Consequence* werden die Auswirkungen beschrieben, die als Folge der Abweichung auftreten und in der Spalte *Action Item* ist die entsprechende Gegenmaßnahme festgelegt.

Deviation	Cause	Consequence	Action item
Reaktor Überdruck	Entlüftungsventil geschlossen	Austritt der Reaktionsmedien	Stoffzufuhr stoppen Inertisierung schließen
Reaktor Unterdruck	Inertisierung geschlossen	Implosion des Reaktors Austritt der Reaktionsmedien	Produktentnahme stoppen
Reaktor Übertemperatur	Exotherme Reaktion Ausfall der Kühlung	Austritt der Reaktionsmedien	Stoffzufuhr stoppen

Tab. 3: HAZOP-Studie des Reaktors, Quelle: Eigene Darstellung.

Die HAZOP-Studie für eine Produktionsanlage kann je nach Größe der Anlage über hundert Punkte umfassen, um alle Szenarien abzudecken. Für den digitalen Zwilling und die Schulung sind die *Deviations* so beschrieben, dass darauf mit den Mitteln, die die Visualisierung zur Verfügung stellt, reagiert werden kann. Im realen Umfeld sind automatische Sicherheitsfunktionen vorgesehen, die für einen sicheren Zustand der Anlage sorgen. Im Rahmen einer Schulung, die auf das Erkennen von Gefahrensituationen und das Situationsbewusstsein an sich ausgerichtet ist, sind diese Überwachungsfunktionen kontraproduktiv und werden daher bewusst nicht umgesetzt.

Aus den oben angeführten *Action Items* werden nun Zustände abgeleitet, die während der Simulation auftreten sollen, und von den zu Schulenden eine Handlung verlangen. Das erste Szenario, das in der Simulation nachgestellt und behoben werden soll, ist ein Überdruck im Reaktor. Dies kann hervorgerufen werden, durch stetigen Zufluss der Edukte, wobei das Entlüftungsventil nicht, oder zu wenig geöffnet ist, um den Druck zu regulieren.

In Abb. 67 ist im roten Rahmen ersichtlich, dass das Entlüftungsventil in der Simulationsumgebung manuell geschlossen wurde.

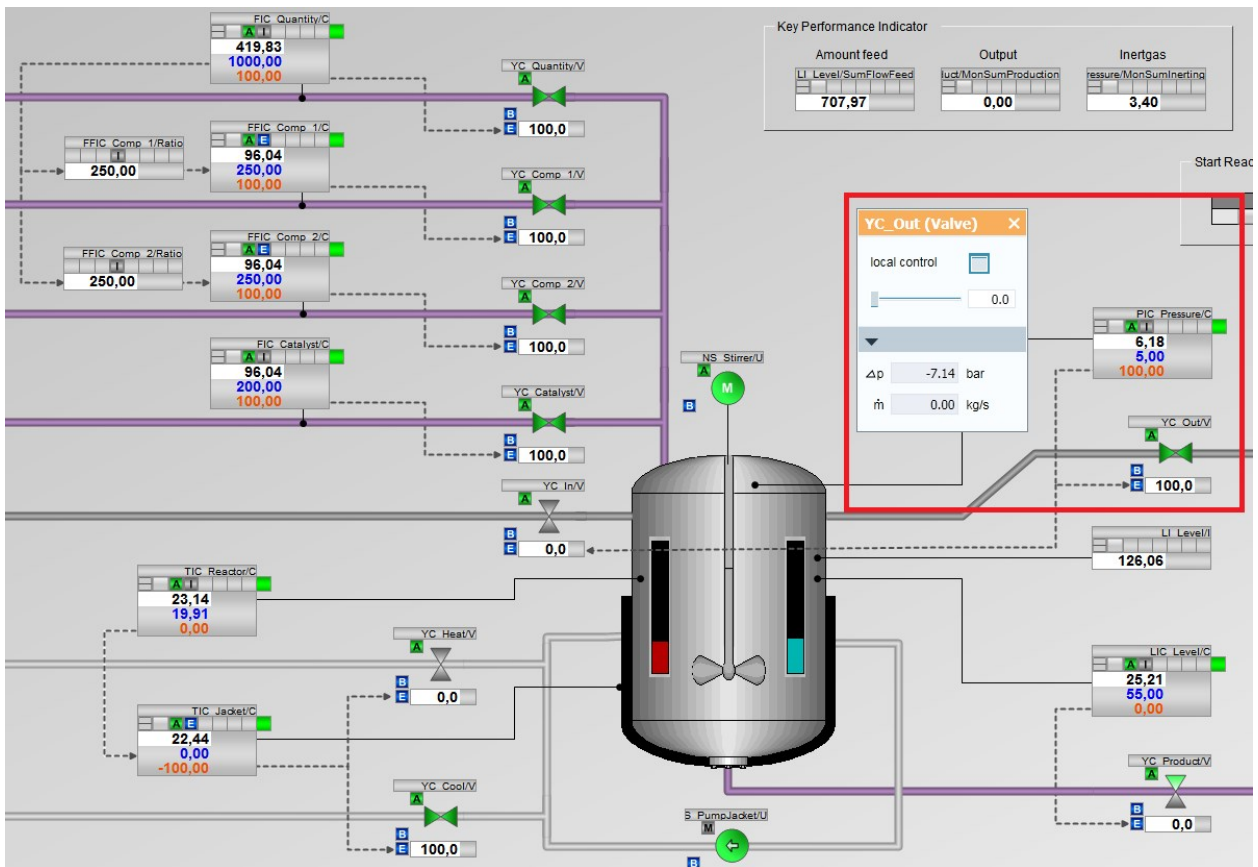


Abb. 67: Manipulation des Entlüftungsventils, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Schalter *local control* ist aktiv und die Ventilstellung wird mit 0.0 % vorgegeben. Die schwarze Zahl im Feld der Druckmessung *PIC/Pressure* gibt den aktuellen Druck im Reaktor an, die blaue steht für den eingestellten Sollwert und die rote Zahl ist die Vorgabe der Ventilöffnung der SPS in Prozent. An dem kleinen grünen Quadrat lässt sich erkennen, dass für die SPS augenscheinlich alles in Ordnung ist. Die erhebliche Abweichung von Soll- und Istwert sollte einem geschulten Auge jedoch sofort signalisieren, dass ein anormaler Zustand im Reaktor herrscht.

Eine Möglichkeit, wie die Situation zu lösen wäre zeigt Abb. 68. Im roten Rahmen kann man erkennen, dass das Ablaufventil im Gegensatz zur vorigen Abbildung vollständig geöffnet ist.

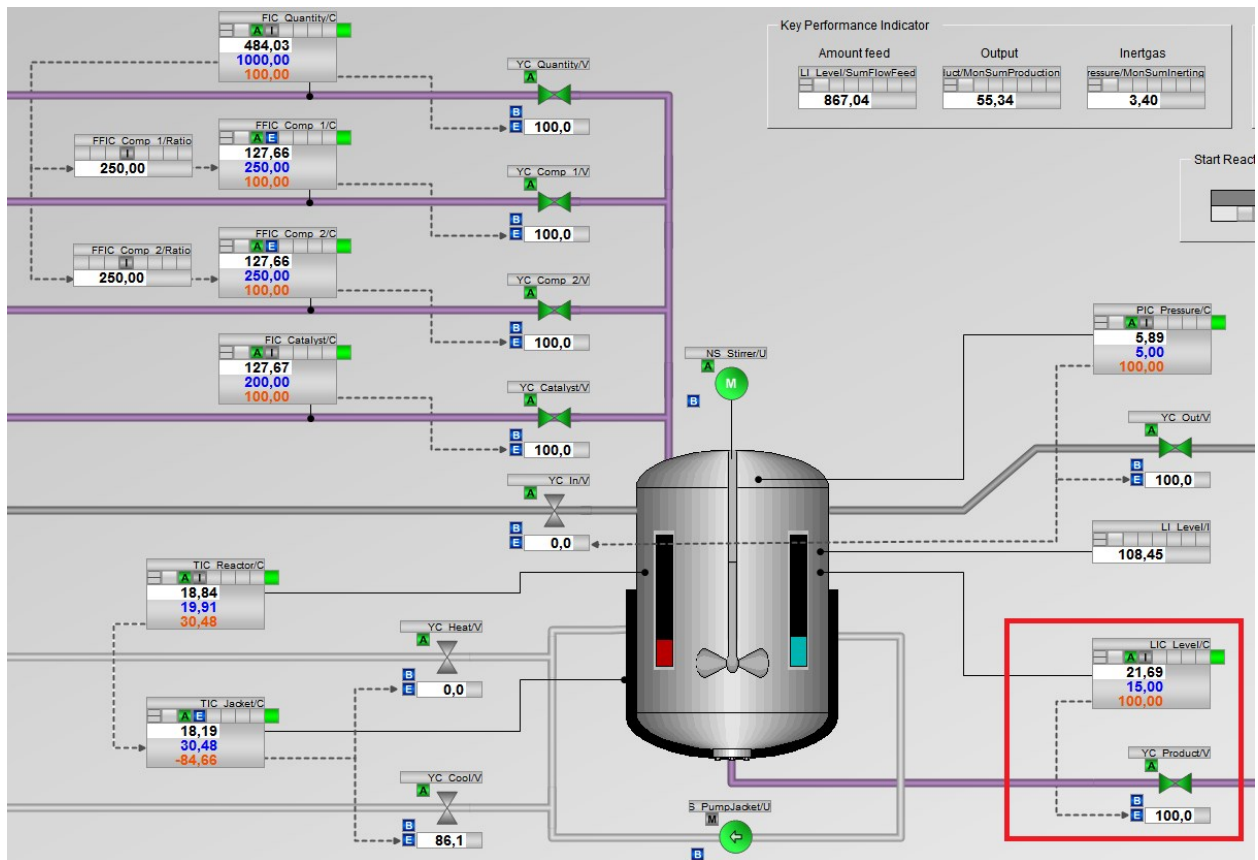


Abb. 68: Normalisierung des Zustandes durch öffnen des Ablaufventils, Quelle: Eigene Darstellung.

Im normalen Betrieb würde der Reaktor zuerst bis zu einem Füllstand von 55 % des Gesamtvolumens gefüllt, bevor das Produkt entleert wird. Durch das Reduzieren dieser Vorgabe, auf einen niedrigeren Wert (15 % in der Abbildung) wird dem Druckanstieg als erste Maßnahme entgegengewirkt, um eine kritische Situation zu verhindern. Anschließend kann der Fehler durch eine\*n Instandhalter\*in lokalisiert und behoben werden.

Das zweite Szenario, das zu einer Gefährdung führen kann, ist eine Übertemperatur im Reaktor. Dieser Fall könnte eintreten, wenn die Wärme, die bei der Reaktion entsteht, nicht oder nicht ausreichend abgeführt wird. Abb. 69 zeigt wiederum den Ausgangszustand der Anlage im normalen Betrieb mit funktionierender Kühlung. Im roten Rahmen lässt sich erkennen, dass die aktuelle Reaktortemperatur annähernd den Sollwert von 20 °C hat.

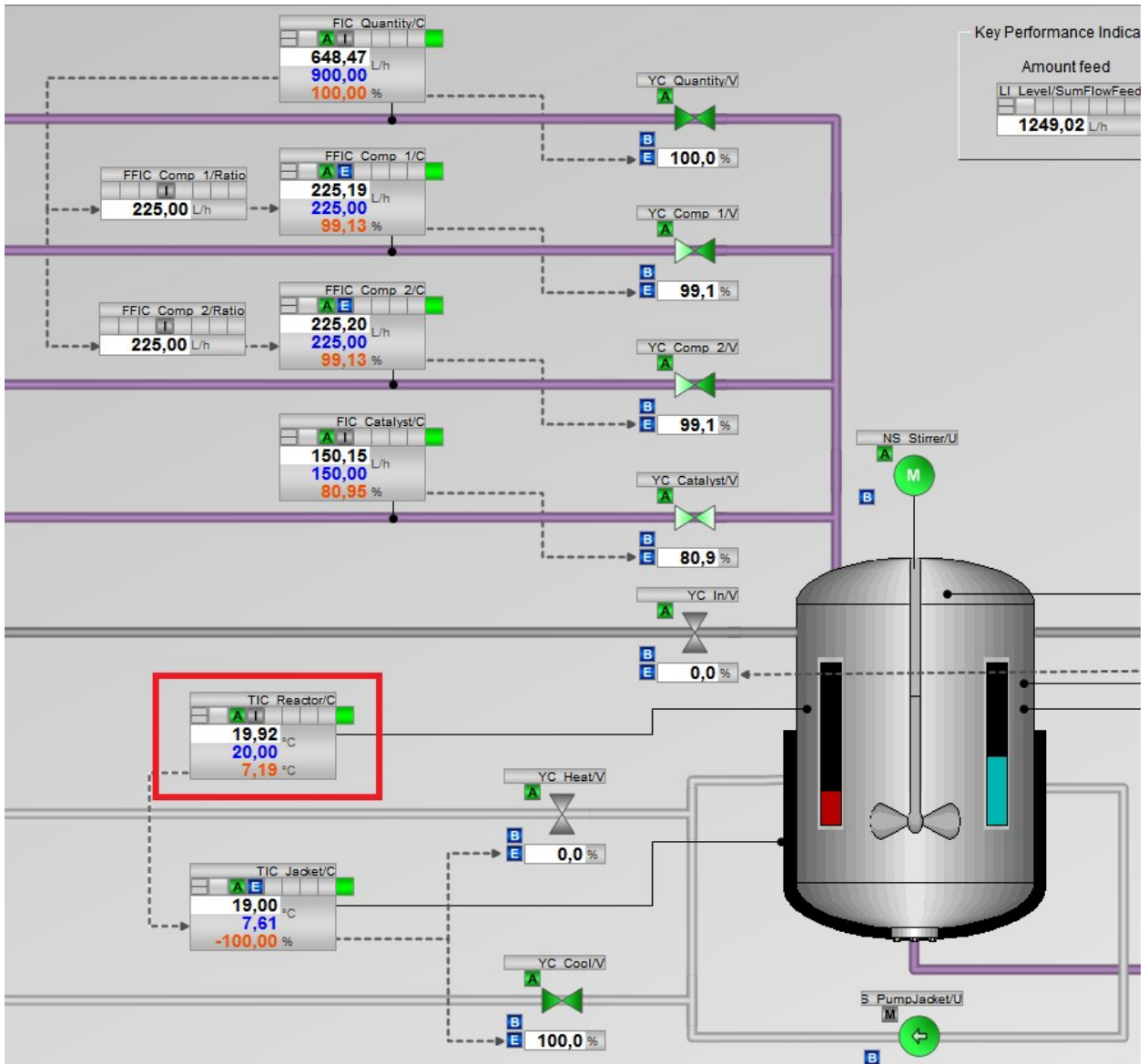


Abb. 69: Soll-Zustand der Reaktortemperierung, Quelle: Eigene Darstellung.

Schließt man nun in der Simulation manuell das Zulaufventil des Kaltwassers, sollte die Temperatur zu steigen beginnen, sowohl im Reaktor als auch im Heizmantel.

Wie man aber in Abb. 70 sieht, steigt die Temperatur nicht signifikant an, obwohl das Stellventil der Kühlung manuell geschlossen wurde.

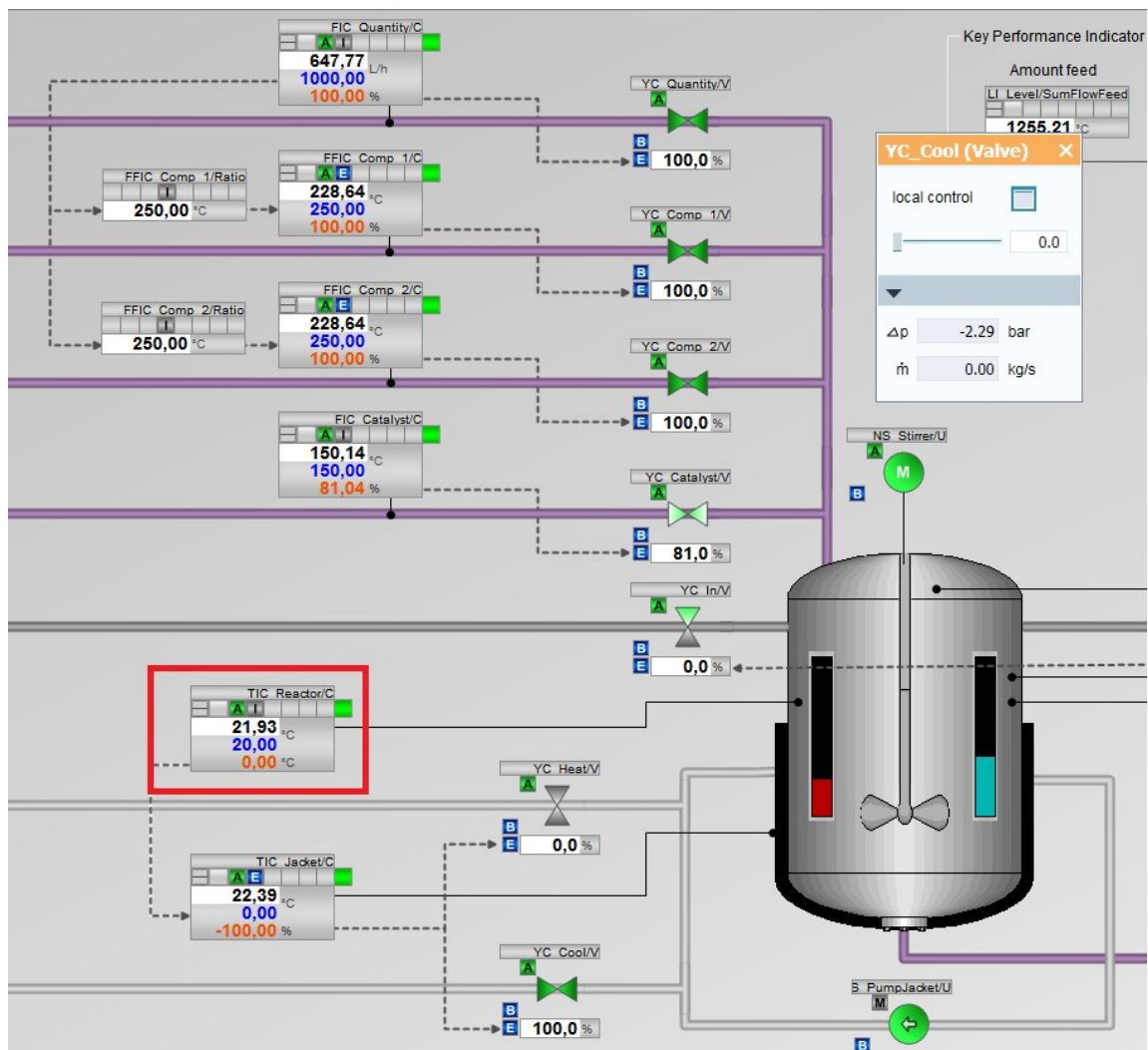


Abb. 70: Veränderung der Reaktortemperatur ohne Kühlung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Recherche in der Dokumentation des Simulationstools hat ergeben, dass zwar die Temperatur der zugeführten Stoffe bilanziert wird, es wird vom verwendeten Funktionsblock darüber hinaus aber keine Reaktionsberechnung durchgeführt, die eine Erhöhung oder Senkung zur Folge haben könnte. Die Stoffdaten werden nur für die Simulation der Wärmeübertragung aus dem Heizmantel verwendet. Um dieses fehlende Feature zu umgehen, ist es möglich, die Temperatur eines Ausgangsstoffes im Simulationsmodell zu erhöhen. Dadurch kann die Freisetzung von Wärme im Reaktor simuliert werden. Da in der Visualisierung keine Anzeige der Stofftemperatur vorhanden ist, ist dieser Trick für die zu Schulenden nicht wahrnehmbar. Für den Einsatz im betrieblichen Umfeld stellt das Fehlen dieser Funktion jedoch einen gravierenden Nachteil in Bezug auf die Imitation von gefährdenden Zuständen dar.



In Abb. 71 ist der Temperaturanstieg bei manuell geschlossenem Kaltwasserventil erkennbar. Im roten Rahmen kann man die Temperatur des Reaktors und des Heizmantels, jeweils in schwarzer Schrift, ablesen, die weit über dem eingestellten Sollwert liegt.

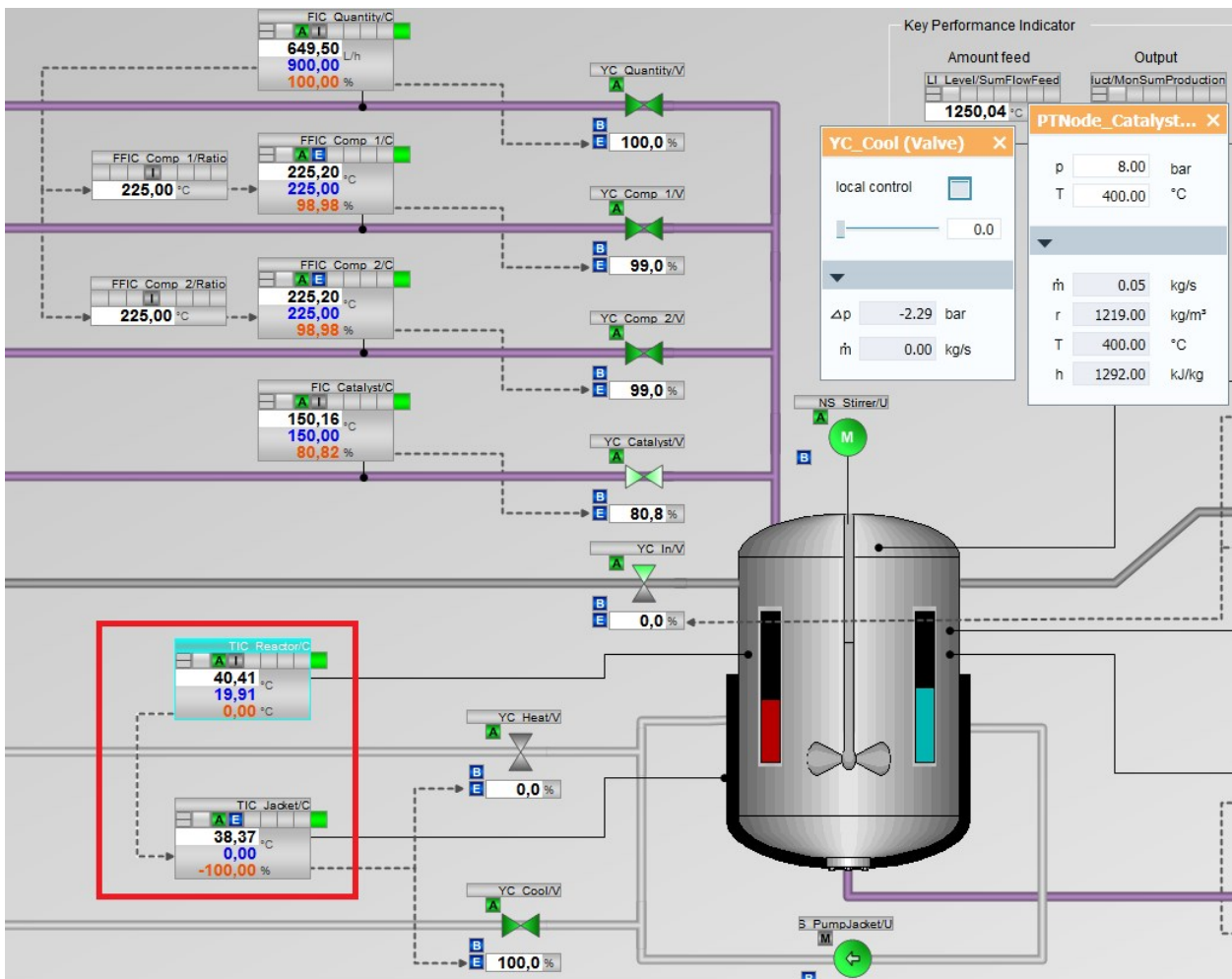


Abb. 71: Temperaturanstieg im Reaktor bei geschlossener Kaltwasserzufuhr, Quelle: Eigene Darstellung.

Als Handlung der zu Schulenden, um der steigenden Temperatur entgegenzuwirken, bleibt wegen des geschlossenen Kühlkreislaufs nur die Unterbindung der weiteren Stoffzufuhr durch Setzen der Sollwerte der Ausgangsstoffe auf null.



Abb. 72 zeigt das Eingabefenster des Durchflussreglers des Hauptdukts, der Parameter *Setpoint* ist der Vorgabewert für den gewünschten Volumenstrom in Litern pro Stunde.

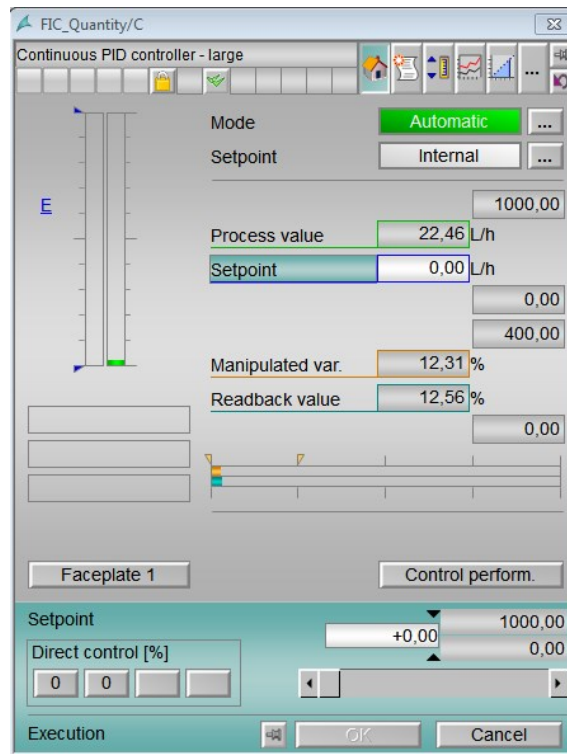


Abb. 72: Eingabefenster Sollwertvorgabe in der Visualisierung, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie bereits im Kapitel 6.2 bei den jeweiligen Funktionen beschrieben, lassen sich viele Komponentenparameter zu Beginn und während der Simulation manipulieren. Um den Überblick über die Initialparameter nicht zu verlieren, wurde für das Modell ein Skript erstellt, das bei dessen Ausführung die Temperaturen und Drücke der Ausgangsstoffe wieder auf die in den Blöcken voreingestellten Werte zurücksetzt. Abb. 73 zeigt die Anweisungen, die dafür notwendig sind. Die Möglichkeiten, die diese Skripte bieten gehen weit über das einfache Ändern von Blockeigenschaften hinaus.

```

1 |
2 | //Start Level
3 |
4 | //Feed Nodes
5 | "PTNode_Quant/Pressure"=8.0
6 | "PTNode_Quant/Temperature"=20.0
7 |
8 | "PTNode_Comp1/Pressure"=8.0
9 | "PTNode_Comp1/Temperature"=20.0
10 |
11 | "PTNode_Comp2/Pressure"=8.0
12 | "PTNode_Comp2/Temperature"=20.0
13 |
14 | "PTNode_Catalyst/Pressure"=8.0
15 | "PTNode_Catalyst/Temperature"=20.0
16 |
17 | "PTNode_InGas/Pressure"=8.0
18 | "PTNode_InGas/Temperature"=5.0
19 |
20 | "PTNode_Heat/Pressure"=5.0
21 | "PTNode_Heat/Temperature"=90.0
22 |
23 | "PTNode_Cool/Pressure"=5.0
24 | "PTNode_Cool/Temperature"=4.0

```

Abb. 73: Skript zur Wiederherstellung der Stoffdaten-Startwerte: Quelle: Eigene Darstellung.

Skripte können so erstellt werden, dass sie zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt Anweisungen durchführen, sie können Bedingungen enthalten und auch den zeitlichen Verlauf von Signalen aufzeichnen und in einer Textdatei speichern.

Die Praxistauglichkeit sowie Optimierungspotential und das Erreichen des Schulungsziels sollte durch eine Evaluierung mit den an der Schulung beteiligten Personen sichergestellt werden. Zum einen sollen die Bedienbarkeit des Modells und der Anlagenvisualisierung sowie der Übungsszenarien besser an die tatsächlichen Erfordernisse angepasst werden. Andererseits soll die Methodik zur Schaffung des Situationsbewusstseins im Umgang mit der Anlage stetig verbessert werden.

Mit einigen Einschränkungen konnten die Simulationsumgebung und der digitale Zwilling einer prozesstechnischen Anlage auf die zu Beginn dieser Arbeit gesetzten Ziele getestet und validiert werden. Die konkreten Ergebnisse des gesamten Modellierungsprozesses, eine abschließende Conclusio und Chancen, die sich für die weitere Nutzung ergeben, werden im abschließenden Kapitel 7 zusammengefasst.

## 7 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Umsetzung und Anwendung des digitalen Zwillings zusammengefasst und ein abschließendes Fazit zur Umsetzbarkeit als Schulungsmittel gezogen. Ebenso werden Möglichkeiten für weitere Anwendungsbereiche eines digitalen Zwillings im Unternehmensumfeld aufgezeigt.

### 7.1 Ergebnisse

Die Erstellung des Modells und der Funktionstest anhand der HAZOP-Studie haben gezeigt, dass eine Schulung anhand eines Simulationsmodells machbar und sinnvoll ist. Aus dem Blickwinkel des\*der Anlagenbediener\*in lässt sich in Bezug auf das Situationsbewusstsein und die Anlagenfunktion im Allgemeinen, ein Mehrwert gegenüber einer Schulung durch Frontalvortrag feststellen. Durch die unmittelbare Reaktion des Modells auf Steuerungseingaben sind die Auswirkungen an der Visualisierung direkt erkennbar. Auch die aus der Simulationsumgebung herbeigeführten Zustände lassen sich in der Visualisierung erkennen und ermöglichen ein gefahrloses Erlernen der richtigen Gegenmaßnahmen. Der zeitliche Rahmen dieser Arbeit hat nur die Umsetzung einer geringen Anzahl an Funktionen des Simulationstools zugelassen und dennoch wurden einige Grenzen des Programms erreicht. Eine davon ist die fehlende Implementierung von chemischen Stoffen. Es lassen sich zwar die thermodynamischen Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen simulieren, die Funktionalität Stoffzusammensetzungen in Form von Summenformeln oder Reaktionsgleichungen zu verwenden, ist nicht vorhanden. Für die Verwendung in der Prozessindustrie ist das nachteilig, da diese Verfahren einen gewichtigen Teil der Anlagen ausmachen.

Zum Umgang mit dem Simulationstool sind einige Punkte aufgefallen, die den positiven Eindruck trüben. Die Bedienbarkeit ist generell verbesserungswürdig, da eine Navigationsfunktion fehlt, was insbesondere bei umfangreicheren Modellen hilfreich wäre. Ebenso wäre ein direkter Zugriff auf die Hilfebibliothek von einem Funktionsblock aus, oder eine Mouseover-Hilfe bei Textfeldern und sonstigen Eingabemöglichkeiten wünschenswert, da die Vielzahl an Eigenschaften auch nach einer Weile noch eine Herausforderung darstellt.

Durch die Möglichkeit, Parameter während der laufenden Simulation zu ändern, lassen sich die Auswirkungen der verschiedenen Einstellungen im Modell sehr gut veranschaulichen und nachvollziehen. Diese Funktion ermöglicht auch andere Einsatzbereiche für einen digitalen Zwillings.

Zur zweiten Zielsetzung, der parallelen Modellierung konnten sowohl positive als auch negative Erkenntnisse gewonnen werden. Ein Vorteil der begleitenden Modellierung ist die Funktion des Simulationstools, generische Bausteine für einzelne Komponenten zu erstellen, die bei der Modellerstellung für jedes reale Pendant instanziiert und mit den entsprechenden Signalen beschalten werden. Das bringt jedoch schon den ersten Nachteil mit sich, denn Namensänderungen im Prozessleitsystem müssen per Hand auch im Modell nachgeführt werden, da ansonsten die verknüpfenden Beziehungen zwischen SPS und Modell fehlen. Um dem entgegenzuwirken, muss eine einheitliche Nomenklatur für die Signale festgelegt werden, was aber bei der Menge an Komponenten und Bezeichnungen nicht mehr praktikabel ist. Findet eine enge Zusammenarbeit zwischen Modellersteller\*in, Steuerungstechniker\*in und Verfahrenstechniker\*in statt, ist

es dennoch möglich, die Modellerstellung zu einem gewissen Maß parallel zur Anlagenentwicklung durchzuführen.

## 7.2 Fazit

Wie schon zuvor kurz erwähnt, ist der Funktionsumfang des Simulationstools nicht nur für die Schulung anwendbar. Werden die einmaligen sowie die laufenden Kosten, die die Einführung dieses Simulationstools mit sich bringen aufsummiert, ergibt sich aus den Aufwänden für Lizenzen, der SPS-Hardware sowie der Ausbildungskosten ein mittlerer fünfstelliger Betrag, der vor dem erstmaligen Einsatz in der Projektumgebung aufzubringen ist. Dies, sowie der zusätzliche Aufwand zur Modellerstellung und Modellpflege, führt zu höheren Planungskosten, die auch vom Kunden angenommen und getragen werden müssen. Dem Preisnachteil, der so zum Wettbewerb entstehen könnte, muss mit einer guten Marketingstrategie entgegen gewirkt werden, um die Kunden für den Mehrwert zu sensibilisieren.

Die Möglichkeiten, die sich bieten, können und sollten auch in anderen Phasen der Projektabwicklung eingesetzt werden. Zum einen können bereits in der Planungsphase Funktionsmodelle erstellt werden, anhand dieser die Wirkungsweise und Effektivität eines Prozesses getestet und verbessert werden können, ohne auf den physischen Aufbau der Anlage angewiesen zu sein. Damit verbunden ist eine Kosteneinsparung hinsichtlich Beschaffung und Montage der Komponenten, sowie eine Zeitersparnis, da das Modell bereits parallel zum Engineering entstehen kann. Ein Faktor, der jedoch berücksichtigt werden muss, ist die Tatsache, dass mit dem Modell auch das Prozessleitsystem programmiert werden muss, um eine Anlagensimulation zu ermöglichen. Wie die Integration in den aktuellen Projektablauf sinnvoll gelingen kann, wäre anhand des aktuellen Planungsprozesses und den gewünschten Anwendungsbereichen der Simulation noch zu evaluieren. Der Einsatz des Modells als Schulungshilfsmittel sollte bei der Erstellung des Prozessleitsystems berücksichtigt werden, etwa mit einem eigenen Betriebsmodus für die Schulung, der nach Passwortfreigabe durch einen\*eine Berechtigte\*n Warnungen und Sicherheitsfunktionen außer Kraft setzt, und den zu Schulenden die gesamte Bandbreite an Anlagenzuständen erfahren lässt. Im nächsten Abschnitt erfolgt ein kurzer Ausblick darauf, wie die Ergebnisse und das Resümee aus dieser Arbeit im Unternehmensumfeld umgesetzt und zielbringend eingebunden werden können.

## 7.3 Verbesserungspotential

Für die Modellerstellung erscheint es nach dem Durchführen dieser Arbeit sinnvoll, Techniker\*innen aller Fachdisziplinen an der Modellerstellung zu beteiligen. Die Modellierung der verfahrenstechnischen Funktionen für eine Kundenanlage ist für einen Automatisierungstechniker mit Basiskenntnissen der Verfahrenstechnik eine große Herausforderung, wie es umgekehrt für einen Verfahrenstechniker die Erstellung des Prozessleitsystems sein kann. Daher gilt es in diesem Bereich die Synergien einer engen disziplinenübergreifenden Zusammenarbeit zu nutzen.

Darüber hinaus hat man mit dem Modell die Möglichkeit, Schulungen wiederkehrend anzubieten und abzuhalten. Schwankungen in der Belegschaft oder Änderungen in der Anlage erfordern eine Neu- oder Nachschulung, die im laufenden Betrieb an der Anlage nicht oder nur schwierig durchführbar ist. Die Simulation dahingehend anzupassen ist kein großer Aufwand, und das Prozessleitsystem muss ohnehin auf jede Veränderung auf Feldebene angepasst werden. Daher ist auch in dem Bereich der fortwährenden

Schulung Potential vorhanden, die Betriebssicherheit der Anlage zu gewährleisten und einen unternehmerischen Vorteil zu erwirken.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des digitalen Zwillings im Unternehmen wäre im Rahmen der Produktentwicklung. Das Hochskalieren eines Prozesses von der Technikumsanlage über eine Pilotanlage zum Kundenprojekt ließe sich um den Zwischenschritt über die Pilotanlage reduzieren, indem der Prozess in einem sogenannten Miniplant getestet und parallel dazu mit einem Simulationsmodell für die großtechnische Anwendung validiert wird. Dabei wird der Prozess im kleinstmöglichen Umfang erprobt, der auf die gewünschte Funktion im technischen Maßstab schließen lässt.

## LITERATURVERZEICHNIS

### Gedruckte Werke (20)

- Bandow, Gerhard (2010): *"Das ist gar kein Modell"*, 1. Auflage, Gabler Research, Wiesbaden
- Bernstein, Herbert (2014): *Messelektronik und Sensorik*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Bindel, Thomas; Hofmann, Dieter (2016): *R&I-Fließschema*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Bohn, Christian; Unbehauen, Heinz (2016): *Identifikation dynamischer Systeme*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Bräutigam, Marcell (2017): *Elektronische Druckmesstechnik*, JUMO GmbH & Co. KG, Fulda
- Büttgenbach, Stephanus (2016): *Mikrosystemtechnik*, 1. Auflage, Springer-Verlag Deutschland, Heidelberg
- Christen, Daniel (2010): *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik*, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg
- Czakainski, Martin (1996): *Tschernobyl - Der Reaktorunfall*, INFORUM Verlags- und Verwaltungs GmbH, Bonn
- Dietzsch, Barbara; Domke, Regina; Fleischhauer, Wiljo; Leven, Volker; Müller, Walter; Ohling, Weerd; Schön, Irmgard; Tarján, Iván; Schwister, Karl (2010): *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*, 4. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, Düsseldorf
- Endsley, Mica (1995): *A Taxonomy of Situation Awareness Errors*, in: Avebury Aviation (Hrsg.): *Human Factors in Aviation Operation*, Ashgate Publishing Ltd., Adershot, S. 300
- Heinrich, Berthold; Glöckler, Michael; Linke, Petra (2020): *Grundlagen Automatisierung Erfassen-Steuern-Regeln*, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Langeheinecke, Klaus; Kaufmann, André; Langeheinecke, Kay; Thieleke, Gerd (2017): *Thermodynamik für Ingenieure*, 10. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Litz, Lothar (2013): *Grundlagen der Automatisierung*, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München
- Mühl, Thomas (2014): *Einführung in die elektrische Messtechnik*, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Plenk, Valentin (2019): *Grundlagen der Automatisierungstechnik kompakt*, 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Ritz, Frank (2013): *Teamtraining zur erfolgreichen Bewältigung unerwarteter und unbekannter sicherheitskritischer Situationen in Leitwarten*, in: Grandt, Morten; Schmerwitz, Sven (Hrsg.): *Ausbildung und Training in der Fahrzeug- und Prozessführung*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, S. 182
- Schreck, Gerhard (2002): *Simulation Services for Training of Plant Operators*, in: (Hrsg.): *Knowledge and Technology Integration in Production and Services*, Springer, Boston, S. 79-86

Siemens AG Digital Industries/Siemens AG (Hrsg.) (2020): *Elektropneumatische Stellungsregler SIPART PS2 mit 4 bis 20 mA/HART*, 1. Auflage, Nürnberg

Stachowiak, Herbert (1973): *Allgemeine Modelltheorie*, 1. Auflage, Springer Verlag, Wien

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2004): *VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2016): *VDI/VDE 3693 Blatt 1 - Virtuelle Inbetriebnahme*, 1. Auflage, Beuth Verlag, Düsseldorf

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2018): *VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

Watter, Holger (2017): *Hydraulik und Pneumatik*, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

### **Wissenschaftliche Artikel (1)**

Taylor, Paul; Chan, Daniel; Russ-Eft, Darlene (2005): *A Meta-Analytic Review of Behavior Modeling Training*, in: *Journal of Applied Psychology*, American Psychological Association, S. 692–709

### **Konferenzbeiträge (2)**

Kritzinger, Werner; Henjes, Jan; Karner, Matthias; Sihn, Wilfried; Traar, Georg (2018): *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*, in: Fraunhofer Austria Research GmbH (Hrsg.): *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*, Elsevier, Bergamo, S. 7

Yang, Zhuo; Eddy, Douglas; Krishnamurty, Sundar; Grosse, Ian (2017): *Investigating grey-box modeling for predictive analytics in smart manufacturing*, in: American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Cleveland, Ohio, S. 10

### **Online-Quellen (21)**

Bibliographisches Institut GmbH (2021): *Duden Online*  
<https://www.duden.de/rechtschreibung/Modell> [Stand: 12.Juni.2021]

Breunig, Jennifer (2015): *WIKA|Wie funktioniert ein Druckmittler?*  
<https://blog.wika.de/produkte/druck-produkte/wie-funktioniert-ein-druckmittler/> [Stand: 28.September.2021]

Bronkhorst (2021): *Coriolis Massendurchfluss-Messprinzip*  
<https://www.bronkhorst.com/de-de/service-und-support/theorien-und-technologien/coriolis-massendurchfluss-messprinzip/> [Stand: 2.November.2021]

Emerson Electric Co. (2021): *Funktionstheorie von magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten*  
<https://www.emerson.com/de-de/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-magnetic> [Stand: 4.November.2021]

Festo Gesellschaft m.b.H. (2017): *FESTO|Funktionale Sicherheit in der*  
[https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/448241/Broschuere\\_Safety\\_PA\\_de\\_V18\\_M.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/448241/Broschuere_Safety_PA_de_V18_M.pdf) [Stand: 12.Januar.2022]

Flowserve Control Valves GmbH (2014): *Flowserve*

[https://www.flowserve.de/fileadmin/user\\_upload/Armaturen\\_Villach/Technische\\_Broschuere/FlowAct\\_SA\\_ENTBFACT\\_EN.pdf](https://www.flowserve.de/fileadmin/user_upload/Armaturen_Villach/Technische_Broschuere/FlowAct_SA_ENTBFACT_EN.pdf) [Stand: 10.Oktober.2021]

Grösser, Stefan (2018): *Gabler Wirtschaftslexikon*

<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371/version-277410> [Stand: 12.Juli.2021]

Kanzler Verfahrenstechnik GmbH (2021): *Firmenlogo*

<https://www.kvt.technology/en/> [Stand:

Kistler GmbH (2021): *KISTLER | Piezoresistiver Drucksensor*

<https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/piezoresistiver-drucksensor/> [Stand: 12.Oktober.2021]

Konradin-Verlag Robert Kohlhammer (2017): *www.prozesstechnik.industrie.de*

<https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/regelventil-mit-erweitertem-einsatzbereich/> [Stand: 10.Oktober.2021]

Kroll, Andreas; Nußko, Marina (2005): *Zur computerbasierten Schulung von Anlagenfahrern in der Chemischen Industrie*

<https://www-degruyter-com.elibrary-campus02.at/document/doi/10.1524/auto.53.3.125.60271/html> [Stand: 8.August.2021]

Kuhn, Thomas (2017): *Gesellschaft für Informatik - Informatiklexikon*

<https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling> [Stand: 03.Juli.2021]

LUKRA Pumpen e.K. (2017): *Lutz Kracht | LUKRA Pumpen*

<https://lukra-pumpen.de/produkt/rn-rnb-einstufige-normalansaugende-kreiselpumpe/> [Stand: 02.November.2021]

microTOOL GmbH (2021): *microTool|Risikomatrix*

<https://www.microtool.de/wissen-online/was-ist-eine-risikomatrix/> [Stand: 21.Oktober.2021]

Physikunterricht Online (2021):

<https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/schmelzwaerme-verdampfungswaerme/phasenuebergaenge-aggregatzustaende/> [Stand: 25.August.2021]

Siemens AG (2017): *Dokumentation SIMIT Getting Started*

[https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109746485/109746485\\_PCS7\\_SIMIT\\_V90\\_GS\\_DO\\_CU\\_de.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109746485/109746485_PCS7_SIMIT_V90_GS_DO_CU_de.pdf) [Stand: 26.Juni.2021]

Siemens AG Digital Industries (2020): *Industry Support Siemens*

[https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109782419/A5E00074630-AFde\\_PS2HART\\_OI\\_de-DE.pdf?download=true](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109782419/A5E00074630-AFde_PS2HART_OI_de-DE.pdf?download=true) [Stand: 14.September.2021]

TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management GmbH & Co. KG (2021): *TCW Consulting Blog*

<https://www.tcw.de/news/implementierung-eines-design-freezes-im-auftragsabwicklungsprozess-zur-reduzierung-externer-stoerquellen-552> [Stand: 3.August.2021]



Technische Universität Wien (2021): *TRIGA Reaktor | TU Wien*

<https://www.tuwien.at/trigacenter/trigareaktor/fotos> [Stand: 10.November.2021]

United States Nuclear Regulatory Commission (2018): *Backgrounder on the Three Mile Island Accident*

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html#summary> [Stand: 2.September.2021]

WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG (2013): *WIKA Alexander Wiegand*

[https://www.wika.com/media/30\\_\\_technical\\_information/german\\_6/ds\\_in0006\\_de\\_de.pdf](https://www.wika.com/media/30__technical_information/german_6/ds_in0006_de_de.pdf) [Stand: 28.September.2021]

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1: Firmenlogo KVT, Quelle: Kanzler Verfahrenstechnik GmbH (2021) .....	1
Abb. 2: Übersicht Verfahrenstechnik, Quelle: Eigene Darstellung.....	5
Abb. 3: Phasen des Wassers, Quelle: Physikunterricht Online (2021), Online-Quelle [25.August.2021]. ...	6
Abb. 4: Beeinflussung von Systemen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	8
Abb. 5: Arten der Wärmeübertragung, Quelle: Christen (2010), S. 202 (leicht modifiziert).....	9
Abb. 6 Massenstrom in einem Körper mit starren Wänden, Quelle: Christen (2010), S.164. ....	11
Abb. 7: Schematische Darstellung eines chemischen Prozesses, Quelle: Dietzsch et al. (2010) S. 279 (leicht modifiziert). ....	13
Abb. 8: Zeitveränderliches rückgekoppeltes System, Quelle: Litz (2013), S. 9 (leicht modifiziert).....	14
Abb. 9: Struktur eines Regelkreises, Quelle: Plenk (2019), S. 46 (leicht modifiziert). ....	15
Abb. 10: Füllstandsregelung mit Zweipunktregler, Quelle: Heinrich et al. (2020), S. 204. ....	16
Abb. 11: Struktur eines PID-Reglers, Quelle: Plenk (2019), S. 71.....	17
Abb. 12: Allgemeine Bilanzgleichung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	18
Abb. 13: Beispiel Grundfließbild, Quelle: Eigene Darstellung. ....	19
Abb. 14: Verfahrensfließbild, Quelle: Eigene Darstellung. ....	20
Abb. 15: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema, Quelle: Eigene Darstellung. ....	21
Abb. 16: Hauptmerkmale eines Modells, Quelle: Bandow (2010), S.9 (leicht modifiziert).....	22
Abb. 17: Modellzwecke, Quelle: Bandow (2010), S.16 (leicht modifiziert).....	23
Abb. 18: Beispiel Unterteilung verschiedener Modellarten, Quelle: Bandow (2010), S.38 (leicht modifiziert). ....	24
Abb. 19: Beziehungen der Modellbildung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	25
Abb. 20: Zusammenhang der drei Modellarten, Quelle: Yang/Eddy/Krishnamurty/Grosse (2017), S.3 (leicht modifiziert). ....	26
Abb. 21: V-Modell im Systems Engineering, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.) (2004), S. 29 (leicht modifiziert). ....	28
Abb. 22: Verschachtelung von digitalen Zwillingen in einem Gesamtsystem, Quelle: Kuhn (2017), Online- Quelle [03.Juli.2021].....	29
Abb. 23: Leitwarte eines Versuchskernreaktors früher und heute, Quelle: Technische Universität Wien (2021), Online-Quelle [10.November.2021]. ....	32
Abb. 24: Beispielhafter Schulungsablauf der KVT GmbH, Quelle: Eigene Darstellung.....	34
Abb. 25: R&I-Schema der realen Pilotanlage, Quelle: Eigene Darstellung .....	38

Abb. 26: Isometrische Ansicht eines chemischen Reaktors, Quelle: Eigene Darstellung. ....	39
Abb. 27: Zyklische Informationsbearbeitung einer Prozessanlage, Quelle: Litz (2013), S. 5 (leicht modifiziert). ....	40
Abb. 28: Schematischer Aufbau eines Prozessleitsystems, Quelle: Christen (2010), S. 583. ....	41
Abb. 29: Visualisierung einer prozesstechnischen Anlage mit WinCC, Quelle: Eigene Darstellung .....	42
Abb. 30: Wärmeleitung in einem stabförmigen Körper, Quelle: Christen (2010), S. 212. ....	44
Abb. 31: Verlauf der Wärmeleitung in einem Rohr, Quelle: Christen (2010), S. 222.....	46
Abb. 32: Strömungsverhalten in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit einer Wand, Quelle: Christen (2010), S. 227. ....	47
Abb. 33: Schematischer Aufbau eines MID, Quelle: Emerson Electric (2021), Online-Quelle [03.11.2021]. ....	48
Abb. 34: Messprinzip eines Coriolis-Durchflussmessgeräts, Quelle: Bronkhorst (2021), Online-Quelle [2.November.2021]. ....	49
Abb. 35: Kennlinie eines Pt100-Widerstandsthemometers, Quelle: Bernstein (2014), S. 235.....	50
Abb. 36: Aufbau eines Druckmessgeräts mit Druckmittler, Quelle: Breunig (2015), Online-Quelle [28.September.2021]. ....	51
Abb. 37: Schematischer Aufbau und Schaltbild eines piezoresistiven Drucksensors, Quelle: Büttgenbach (2016), S. 38. ....	52
Abb. 38: Beispielhafter Aufbau eines Stellventils, Quelle: Konradin-Verlag Robert Kohlhammer (2017), Online-Quelle [10.Oktober.2021]. ....	53
Abb. 39: Schnittzeichnung eines Membranantriebs mit Federrückstellung, Quelle: Flowserve Control Valves GmbH (2014), Online-Quelle [10.Oktober.2021]. ....	54
Abb. 40: Querschnitt eines Stellventils, Quelle: Flowserve Control Valves GmbH (2014), Online-Quelle [10.Oktober.2021]. ....	55
Abb. 41: Schematische Darstellung einer Pumpenkennlinie, Quelle: Siemens AG Digital IndustriesSiemens AG (Hrsg.) (2020), S. 707.....	56
Abb. 42: Schnittmodell einer elektrisch angetriebenen Kreiselpumpe, Quelle: LUKRA Pumpen e.K. (2017), Online-Quelle [02.November.2021]. ....	56
Abb. 43: Model-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 8. ....	58
Abb. 44: Software-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 9.....	59
Abb. 45: Hardware-in-the-Loop-Prozess, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (2016), S. 10. ....	59
Abb. 46: Gegenüberstellung Aufbau Reale/Simulierte Anlage, Quelle: Siemens AG (2017), Online-Quelle [26.Juni.2021]. ....	61
Abb. 47: Benutzeroberfläche SIEMENS SIMIT, Quelle: Eigene Darstellung. ....	63

Abb. 48: R&I-Schema der Pilotanlage als Basis für die Modellerstellung: Quelle: Eigene Darstellung.....	64
Abb. 49: Hardware-Kopplungseditor PLS-Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	65
Abb. 50: Stoffquelle und Flussnetzdefinition, Quelle: Eigene Darstellung. ....	66
Abb. 51: Manuelles Bedienfenster einer Materialquelle, Quelle: Eigene Darstellung. ....	66
Abb. 52: Funktionsdiagramm und Parameterliste einer Messstelle, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Abb. 53: Anzeigewerte einer Messstelle während einer Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	68
Abb. 54: Funktionsdiagramm Regelventil, Quelle: Eigene Darstellung. ....	68
Abb. 55: Eigenschaftsfenster eines Stellventils, Quelle: Eigene Darstellung. ....	69
Abb. 56: Manuelles Bedienfenster eines Regelventils in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	69
Abb. 57: Funktionsdiagramm zur Berechnung des Reaktorfüllstands, Quelle: Eigene Darstellung. ....	70
Abb. 58: Reaktordarstellung und Einstellwerte in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	71
Abb. 59: Manuelles Bedienfenster des Reaktors in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	71
Abb. 60: Anzeigewerte des Heizmantels während einer Simulation, Quelle: Eigene Darstellung.....	72
Abb. 61: Funktionsdiagramm der Umwälzpumpe, Quelle: Eigene Darstellung. ....	73
Abb. 62: Manuelles Bedienfenster der Umwälzpumpe in der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	73
Abb. 63: Simulationsmodell im Initialzustand, Quelle: Eigene Darstellung. ....	74
Abb. 64: Visualisierung im Initialzustand, Quelle Eigene Darstellung.....	75
Abb. 65: Anlagenmodell während der Simulation, Quelle: Eigene Darstellung. ....	76
Abb. 66: Risikomatrix zur Beurteilung einer Gefährdung, Quelle: microTOOL GmbH (2021), Online-Quelle [21.Oktober.2021]. ....	77
Abb. 67: Manipulation des Entlüftungsventils, Quelle: Eigene Darstellung. ....	79
Abb. 68: Normalisierung des Zustandes durch öffnen des Ablaufventils, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abb. 69: Soll-Zustand der Reaktortemperierung, Quelle: Eigene Darstellung.....	81
Abb. 70: Veränderung der Reaktortemperatur ohne Kühlung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	82
Abb. 71: Temperaturanstieg im Reaktor bei geschlossener Kaltwasserzufuhr, Quelle: Eigene Darstellung. ....	83
Abb. 72: Eingabefenster Sollwertvorgabe in der Visualisierung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	84
Abb. 73: Skript zur Wiederherstellung der Stoffdaten-Startwerte: Quelle: Eigene Darstellung. ....	84

## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 1: Auswahl an verfahrenstechnischen Grundoperationen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	7
Tab. 2: Wärmeleitfähigkeit von in der Verfahrenstechnik genutzten Stoffen, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Tab. 3: HAZOP-Studie des Reaktors, Quelle: Eigene Darstellung. ....	78

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

BP – Before present

EPCM – Engineering, Procurement and Construction Management (Planung, Beschaffung und Montageüberwachung)

HAZOP – Hazards and Operability

HIL – Hardware-in-the-Loop

IBC – Intermediate Bulk Container (Gittertank)

MES – Manufacturing Execution System (Produktionsleitsystem)

MSR – Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

MIL – Model-in-the-Loop

PLS – Prozessleitsystem

SIL – Software-in-the-Loop

SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Überwachung, Steuerung und Datenerfassung)

VIBN – Virtuelle Inbetriebnahme