



Diplomarbeit

Implementierung der MSR- Technik einer 100 kW DUAL FLUID Versuchsanlage zur Vergasung von Festbrennstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und
Technische Biowissenschaften

Betreuung

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Müller
Dipl.-Ing.(FH) Johannes Christian Schmid

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen
und Betriebswissenschaften**

von

Mario Schmalzl
Matr.Nr.: 0826521
Schweglerstraße 52/8
1150 Wien

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert und mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Vorwort

Das Thema "Erneuerbare Energie" ist in aller Munde. Weniger Verbrauch, mehr Bioenergie: So lauten die Vorgaben. Doch in Wahrheit hängen wir immer stärker an Öl und Gas. Dabei treten die ökologischen und sozialen Probleme aufgrund der Nutzung von fossilen Energieträgern mehr und mehr zu Tage. Hinzu kommt die steigende Umweltbelastung durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Durch die Emission von Treibhausgasen wird der natürliche Treibhauseffekt verstärkt, was wesentlich zur globalen Erderwärmung beiträgt. Um den Klimawandel auf ein erträgliches Maß zu begrenzen, muss der Einsatz von fossilen Energieträgern stark reduziert werden.

Auf der Suche nach einem Thema für meine Diplomarbeit stellte ich mir die Frage, wie Technologien vorangetrieben werden können, die einerseits positiv zur Energiewende beitragen, andererseits auch wettbewerbsfähig sind. Im Zuge meines Studiums stieß ich auf die Arbeitsgruppe von Univ.Prof. Hermann Hofbauer, die sich seit vielen Jahren mit nachhaltigen Energiesystemen auseinandersetzt. Das zu diesem Zeitpunkt eine neuartige Versuchsanlage zur Vergasung von biogenen Festbrennstoffen entwickelt wurde, war für mich ein glücklicher Zufall. Da ich mich für die Themen Regelungstechnik und Messtechnik interessiere und die Arbeitsgruppe in diesem Bereich einen Diplomanden suchte, fiel mir die Entscheidung sehr einfach. Dass mir schlussendlich die Möglichkeit geboten wurde, im Rahmen einer Diplomarbeit an dem Thema zu arbeiten, habe ich einigen wichtigen Personen zu verdanken.

An erster Stelle bedanke ich mich beim Studiendekan für Verfahrenstechnik und Arbeitsgruppenleiter, Herrn Univ.Prof. Hermann Hofbauer, der mir die Möglichkeit und die Rahmenbedingungen gegeben hat, eine Diplomarbeit durchzuführen. Besonders dankend erwähnen möchte ich Stefan Müller, der sich für die Betreuung meiner Diplomarbeit bereit erklärt hat. Durch seine zahlreichen wissenschaftlichen Anregungen hat er entscheidend zur Verbesserung der Arbeit beigetragen. Für technische Fragestellungen hatte Johannes Schmid immer ein offenes Ohr für mich und ließ kaum eine Frage ungeklärt. Seine fachliche Kompetenz war eine große Hilfe für das Gelingen dieser Arbeit. Für die Zeit, die sie sich für mich genommen hat, danke ich allen genannten Personen recht herzlich.

Für die gemeinsamen Lernstunden gilt ein ganz besonderer Dank meinen Studienkollegen Andreas, Herbert und Sebastian. Sie haben mich einen Großteil meines Studiums begleitet und unterstützt.

Meiner Familie und Freunden, die weniger fachlichen, dafür aber viel mehr persönlichen Beitrag leisteten und mir Rückhalt in manchen Situationen gaben, bin ich ebenfalls sehr dankbar.

Kurzfassung

Am Institut für Verfahrenstechnik wurde in den vergangenen Jahren ein verbessertes Reaktorkonzept für die Zweibettwirbelschichtdampfvergasung, kurz DUAL FLUID Technologie genannt, entwickelt. Mit Hilfe dieser Technologie kann ein stickstofffreies Produktgas erzeugt werden, das anschließend zur Strom- und Wärmeerzeugung, oder für unterschiedliche Synthesen verwendet werden kann. Durch viele Jahre praktische Erfahrung konnte ein umfangreiches und fundiertes Fachwissen erarbeitet und das Verfahren dadurch immer weiter verbessert werden. Das technische Know-How wurde genutzt, um eine neue Versuchsanlage mit einem innovativen Reaktorkonzept zu bauen. Ziele der Adaptionen sind eine Effizienzsteigerung im Vergleich zu bestehenden Anlagen, eine höhere Produktgasqualität und mehr Brennstoffflexibilität. Um wissenschaftliche Erkenntnisse im Rahmen von Versuchen treffen zu können, ist eine umfangreiche Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für die Erfassung der Prozessdaten notwendig. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Implementierung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik und der Kaltinbetriebnahme einer neuen Versuchsanlage. In Kapitel 2 wird die DUAL FLUID Technologie vorgestellt, ein Überblick der eingesetzten Messverfahren gegeben und Vorgehensweisen bei Inbetriebnahmen von verfahrenstechnischen Anlagen behandelt. In Kapitel 3 und 4 wird der Aufbau der 100 kW-Versuchsanlage vorgestellt und die Umsetzung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik erläutert. Kapitel 5 präsentiert erste Ergebnisse des Kaltversuchs und fluiddynamische Untersuchungen der Versuchsanlage. Die Auswertungen zeigen, dass die implementierte Messtechnik funktioniert und die Erwartungen des neu entwickelten Reaktordesigns hinsichtlich der Fluidodynamik erfüllt werden.

Abstract

At the Institute of Chemical Engineering an improved reactor concept for a dual fluidized bed steam gasification, also called DUAL FLUID technology, has been developed in recent years. Using this technology, a nitrogen-free product gas can be produced. The product gas is used to generate electricity and heat, or for different syntheses. Due to intensive research in the field of gasification technology over several years, a novel reactor design for a dual fluidized bed steam gasifier with 100 kW capacity could be realized. The main objectives of the adaptations are an increased efficiency compared to existing plants, a higher product gas quality and more fuel flexibility. On the basis of different tests, future potentials of the adapted technologies shall be pointed out. In order to make scientific propositions, a comprehensive measurement and control system for the data collection process is necessary. The present work deals with the implementation of measurement and control technology, as well as the cold commissioning of the novel test facility. In chapter 2 the DUAL FLUID technology is presented and an overview of the measurement methods used in the test facility are presented. In chapter 3 and 4 the layout of the 100 kW test facility and the implementation of measurement and control technology is explained. Chapter 5 presents the first results of the cold commissioning and fluid dynamic studies of the test facility. The evaluations show that the implemented measurement equipment works and the expectations of the newly developed reactor designs are met.

Publikationen

Schmalzl, Mario and Müller, Stefan and Hofbauer, Hermann. *Start-Up of the Automation Control System of a New Dual Fluid Test Plant for the Gasification of Solid Fuels*. Accepted for oral presentation: 4th International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-4), 2–5 Sept. 2014, Vienna, Austria.

Danksagung Förderer und Firmenpartner

Die vorliegende Arbeit ist Teil der Projekte G-volution I, G-volution II und ERBA. Diese Projekte werden aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert, im Rahmen des Programms "Neue Energien 2020" durchgeführt und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit Tecon Engineering GmbH, voestalpine Stahl GmbH und voestalpine Stahl Donawitz GmbH. Der Autor möchte allen Industriepartnern und dem Team der Forschungsplattform "Future Energy Technology" am Institut für Chemische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Wien danken.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Nachhaltige Entwicklung	1
1.2	Ausgangssituation	2
1.3	Aufgabenstellung	3
2	Theoretischer Hintergrund	4
2.1	Vergasungstechnologie und Wirbelschichttechnik	4
2.1.1	Entwicklung des Reaktordesigns der DUAL FLUID Vergasung	7
2.1.2	Reaktordesign der neuen Versuchsanlage	8
2.2	Automatisierungstechnik - MSRT	11
2.2.1	Feldebene	12
2.2.2	Prozessleitebene	19
2.3	Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen	27
2.3.1	Aufgaben der Inbetriebnahme	27
2.3.2	Inbetriebnahmemanagement	29
2.3.3	Sicherheit bei Inbetriebnahmen	30
2.3.4	Vorbereitung der Inbetriebnahme der Versuchsanlage	31
2.3.5	Erstinbetriebnahme	34
2.4	Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen	36
2.4.1	Bestandteile der Dokumentation	37
3	Aufbau der Versuchsanlage	39
3.1	Anlagentechnik	40
3.1.1	Wirbelschichtreaktorsystem	40
3.1.2	Versorgungseinrichtungen	45
3.1.3	Gaskühlung	49
3.1.4	Gasverwertung	51
3.2	Zusammenfassung	52
4	Implementierung der MSR-Technik	55
4.1	Einbindung der Gasanalyse	55
4.2	Implementierung der Messtechnik	56
4.2.1	Erstellung der MSR-Liste	61
4.2.2	Durchflussmessung mittels Druckmessblende	62
4.3	Implementierung der Prozessleittechnik	68
4.3.1	Verfahrenstechnische Vorgaben	68
4.3.2	Planung der Prozessleittechnik	79
4.3.3	Ankopplung der Feldebene an das PLS	79

4.3.4	Evaluierung der Prozessleittechnik-Software	83
4.3.5	Bedienung der Versuchsanlage	84
5	Kaltinbetriebnahme der Versuchsanlage	93
5.1	Überprüfung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	93
5.2	Umsetzung der Kaltinbetriebnahme	94
5.3	Ergebnisse der Erstinbetriebnahme	95
5.3.1	Analyse des Bettmaterials	95
5.3.2	Versuchsergebnisse der Kaltinbetriebnahme	97
5.3.3	Durchflussmessung Druckmessblende	101
5.4	Diskussion der Ergebnisse	102
5.4.1	Auswertung der Druckprofile	102
5.4.2	Auswertung der Durchflussmessungen	104
6	Zusammenfassung und Ausblick	106
6.1	Ausblick auf den Versuchsbetrieb	107
	Abbildungsverzeichnis	109
	Tabellenverzeichnis	110
	Literaturverzeichnis	114
	Abkürzungsverzeichnis	115
	Symbolverzeichnis	117
	Anhang	119

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Nachhaltige Entwicklung

Selten hat ein Begriff so schnell Karriere gemacht, wie der Begriff der "Nachhaltigkeit". In relativ kurzer Zeit ist er zu einer vieldeutigen Metapher bei aktuellen Problembeschreibungen geworden. Durch die Diskussion über globale Umweltprobleme wie steigender Energiebedarf, sinkende Ressourcen und klimatische Veränderungen wurde dieser Trend noch verstärkt [1].

Der Begriff kam erstmals im 18. Jahrhundert auf. Hans Carl von Carlowitz, sächsischer Oberberghauptmann, formulierte verschiedene Grundsätze um dauerhaft ausreichende Holzmen gen für den Bau von Silberminen zur Verfügung zu haben und gilt als Schöpfer des forstlichen Nachhaltigkeitsbegriffs [2]. Im Zusammenhang mit dem "Brundtland-Report" wurde der Begriff Nachhaltigkeit neu formuliert. Er sprach erstmalig von einem "dauerhaften Gleichgewichtszustand", der "den Bedürfnissen der heutigen Generation" entsprechen soll, "ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden" [3]. Dieser Leitgedanke wurde 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung niedergeschrieben. Ziel ist es, in möglichst vielen Bereichen des Lebens nachhaltig zu arbeiten. Das Drei-Säulen-Modell aus [4] zeigt die Bereiche auf, die durch den Begriff Nachhaltigkeit abgedeckt werden:

- Ökologische Nachhaltigkeit
- Ökonomische Nachhaltigkeit
- Soziale Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit wird heute in unterschiedlichen Bereichen genutzt. Bezug nehmend auf den Energiesektor zeigt ein Bericht der U.S. Energy Information Administration des Jahres 2013, dass am weltweiten Energiemarkt ein wesentlicher Anteil der Energieproduktion auf fossilen Brennstoffen beruht [5]. Um jedoch nachhaltig zu handeln, sollte das Ziel sein, den gegenwärtigen Energiebedarf zu decken, ohne zukünftige Generationen in ihrem Handeln und ihrer Lebensqualität durch veränderte klimatische Bedingungen einzuschränken [6]. Daher sind Maßnahmen notwendig, die ein Umdenken in der Gesellschaft bewirken. Die Europäische Union setzt sich als Ziel, bis 2030 den Anteil der erneuerbaren Energien auf 27 % zu erhöhen und die Treibhausgase unter 40 % zu senken, ausgehend vom Wert von 1990. Dies geht aus einem Bericht der Europäischen Kommission vom Januar 2014 hervor [7]. Das Europäische Parlament schreibt in der Richtlinie 2009/28/EG Österreich einen Anstieg

von erneuerbaren Energien von 34 % bis zum Jahr 2020 vor. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und dem Ausbau der erneuerbaren Energie werden dabei ebenfalls genannt. Hervorgehoben wird der Energieträger Biomasse, der in Zukunft verstärkt in Österreich, aber auch europaweit zum Einsatz kommen soll.

1.2 Ausgangssituation

Am Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Wien ist das Thema erneuerbare Energie und Energieerzeugung aus Biomasse schon lange in die Forschungsarbeit integriert. Dabei liegt ein wissenschaftlicher Schwerpunkt im Bereich Energietechnik unter anderem auf der Vergasungstechnologie. Ziel ist es, Erdöl- und Erdgassubstituenten aus biogenen Brennstoffen zu erzeugen. Unterschiedliche Forschungsergebnisse zeigen, dass die Wirbelschichttechnik als grundlegendes Verfahren eine gute Basis bietet, die Idee der nachhaltigen Energieerzeugung mit Biomasse auch umzusetzen [8]. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurde die klassische DUAL FLUID Vergasung maßgeblich an der TU Wien mitentwickelt [9]. Dies führte zur Inbetriebnahme einiger Großanlagen basierend auf diesem innovativen Verfahren zur Umwandlung von Biomasse, in Form von Holzhackschnitzel. Die realisierten Großanlagen befinden sich in Güssing (8 MW), Oberwart (9 MW), Villach (15 MW) innerhalb Österreichs und Senden/Neu-Ulm (14 MW) in Deutschland. Die bisher größte Anlage basierend auf der DUAL FLUID Vergasung mit 32 MW Brennstoffleistung wird derzeit in Göteborg in Schweden in Betrieb genommen. Die Entwicklung der klassischen Biomasse-Dampfvergasung basiert seit 1993 auf Untersuchungen mit unterschiedlichen Generationen von 100 kW Heißversuchsanlagen. [9]

Seit Anfang 2013 wird eine neuartige DUAL FLUID Versuchsanlage im Technikum der Technischen Universität Wien aufgebaut, um grundlegende Mechanismen des neuen Wirbelschichtkonzeptes zu untersuchen. Die neue Versuchsanlage soll wesentliche Fortschritte in der DUAL FLUID Vergasung ermöglichen. Durch die Adaptionen sollen die im Produktgas unerwünschten Nebenprodukte minimiert und die Ausbeute gesteigert werden. Eine zusätzliche Erhöhung der Brennstoffflexibilität führt zu erweiterten Einsatzbereichen in der Industrie [10]. Für die Entwicklung wurden die Erfahrungen der bisher bestehenden Versuchsanlagen und Großanlagen gesammelt. Ein Kaltmodell aus Acrylglas mit dem neu entwickelten Reaktordesign wurde errichtet, um wirbelschichttechnische Untersuchungen durchzuführen. Dadurch war es möglich, angedachte Modifikationen der Versuchsanlage schon im Vorhinein strömungsmechanisch zu überprüfen. Im nächsten Schritt wurde eine 100 kW Versuchsanlage im Technikumsmaßstab gebaut, um umfassendes Verständnis über ablaufende Prozesse und Reaktionen zu erhalten. Experimentelle Versuche sind von besonderer Bedeutung, um eine Anlage dieses Typs im großtechnischen Maßstab bauen zu können. Umfangreiche Messsysteme liefern Daten über ablaufende Vorgänge in den Reaktoren und sind die Grundlage für ein besseres Prozessverständnis. Um Echtzeit-Daten erfassen, speichern und auswerten zu können, ist eine effiziente und ausgeklügelte Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSRT) notwendig und ist ein wichtiger Baustein der neuen Versuchsanlage.

1.3 Aufgabenstellung

Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit soll die MSRT einer neuen Versuchsanlage implementiert werden. Die Inbetriebnahme soll unterstützt, methodisch begleitet und erste Versuchsergebnisse der Kaltinbetriebnahme dokumentiert und interpretiert werden. Im Rahmen der Diplomarbeit sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

In welcher Form soll die in der Konzeptionierungsphase ausgearbeitete Messtechnik in die Versuchsanlage implementiert werden, um aussagekräftige Forschungsergebnisse und einen sicheren Anlagenbetrieb zu gewährleisten? Welche technischen Aspekte bezüglich der Mess-, Steuer- & Regelungstechnik stellen den kritischen Pfad zu einer zeitgerechten Fertigstellung der Anlage dar? Welche Methoden und Werkzeuge helfen bei der Inbetriebnahme?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage soll das bestehende Know-How im Bereich der Automatisierungstechnik eingesetzt werden, um die Projektmitarbeiter zu schulen, zu unterstützen und zu beraten. Wichtige Aspekte der Inbetriebnahme der MSRT sind als wesentlicher Teil der Inbetriebnahme zu berücksichtigen.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

Um die Versuchsanlage der TU Wien besser verstehen zu können, werden zunächst wissenschaftliche Einblicke in grundlegende Prinzipien gegeben. Dabei werden die Themen Vergasung und Wirbelschichttechnik erläutert und auf das Verfahren der DUAL FLUID Vergasung näher eingegangen. Da sich ein wesentlicher Teil der Arbeit mit der MSRT beschäftigt, sind im Weiteren theoretische Grundlagen dazu beschrieben. Zum Abschluss des Kapitels wird der Ablauf einer ordnungsgemäßen Inbetriebnahme beschrieben und die Inhalte einer vollständigen Anlagendokumentation dargestellt.

2.1 Vergasungstechnologie und Wirbelschichttechnik

Vergasung: Sie ist ein thermochemischer Vorgang, bei dem ein fester Brennstoff in einen gasförmigen Sekundärenergieträger (Produktgas) übergeführt wird. Dies geschieht bei hohen Temperaturen (800 °C bis 1100 °C) und mit der Zugabe eines Vergasungsmittels (Luft, Wasserdampf). Das erzeugte Produktgas ist brennbar.

Die thermochemische Umwandlung kann in drei Phasen unterteilt werden (siehe Abb. 2.1):

Trocknung: Dieser Vorgang ist ein endothermer Prozess und findet bei Temperaturen bis zu 150 °C statt. Dabei wird das im Brennstoff gebundene Wasser verdampft. Die Struktur des Brennstoffes bleibt während der Trocknungsphase weitgehend erhalten. [8]

Pyrolyse/Entgasung: Bei Temperaturen zwischen 200 °C und 650 °C werden erste Makromoleküle des Brennstoffs aufgebrochen und in gasförmige Produkte umgewandelt. Dieser Vorgang findet fast immer unter Ausschluss von Sauerstoff (Luftüberschusszahl $\lambda = 0$) statt. Dabei können, abhängig vom Brennstoff, bis zu 85 % des organischen Materials durch die pyrolytische Zersetzung in gasförmige Produkte umgewandelt werden. [8]

Vergasung: Der von der Pyrolyse übrig gebliebene Feststoff besteht größtenteils aus Kohlenstoff (Koks) und Asche. Bei wesentlich höheren Temperaturen (bis zu 1000 °C) und einer Luftüberschusszahl $\lambda < 1$ werden die Rückstände zur Reaktion gebracht. Wesentlich bei der Vergasung ist die möglichst vollständige Umwandlung des bei der Pyrolyse übrig gebliebenen Restkohlenstoffs. [8]

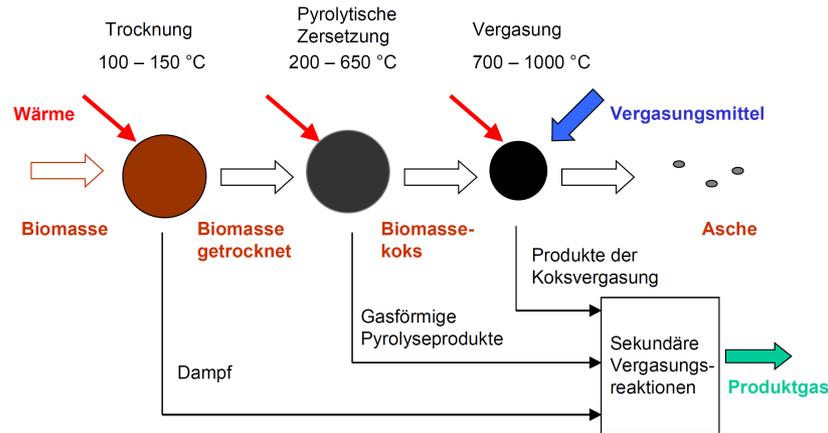


Abb. 2.1: Phasen der Biomassevergasung [8]

Die Hauptbestandteile des Produktgases bei der Biomassevergasung sind Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Wasserdampf (H_2O). Als unerwünschte Nebenprodukte entstehen Teer, Asche und Staub. In weiteren Schritten kann das gewonnene Gas gereinigt und aufbereitet werden. Das Produktgas ist somit als Ausgangsstoff für Synthesen geeignet, um weitere Produkte herstellen zu können. [11]

Wirbelschichttechnik: Sie beschreibt jenes mechanische Verfahren, bei dem eine aufwärtsgerichtete Strömung eines Fluides eine Feststoffschüttung in einen fluidisierenden Zustand versetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Fluides muss dabei so hoch sein, dass Feststoffpartikel im Reaktor angehoben werden und sich dadurch frei bewegen können. Man spricht nun von einer Wirbelschicht. Es stellen sich unterschiedliche Fluidisierungszustände ein, diese sind abhängig von verschiedenen Faktoren wie Fluidvolumenstrom, Körnung des Bettmaterials, Dichte und Viskosität des Fluides. In blasenbildenden Wirbelschichten wird das Bettmaterial gelockert und in Schwebelage versetzt. Es kommt zur Bettexpansion. Die Partikel werden jedoch nicht ausgetragen, sie verlassen den Reaktor nicht. Bei der zirkulierenden Wirbelschicht hingegen wird die Fluidisierungsgeschwindigkeit so weit erhöht, dass Partikel aus dem Bett und anschließend aus dem Reaktor ausgetragen werden. Vorteile der zirkulierenden Wirbelschicht im Vergleich zur blasenbildenden Wirbelschicht sind bessere Durchmischung und erhöhter Kontakt zwischen Feststoff und Fluid. Zusätzlich sind kleinere Reaktorquerschnittsflächen bei gleich bleibenden Anlagenleistungen möglich. Dadurch können wesentlich größere Anlagen mit Brennstoffleistungen bis zu $970 MW_{th}$ gebaut werden. [8, 12, 13]

Wirbelschichtvergasung: Sie kombiniert die beiden zuvor beschriebenen Technologien. Das Bettmaterial wird vom Trägergas (Vergasungsmittel) aufgewirbelt und umströmt dabei den in den Wirbelschichtreaktor eingebrachten, festen Brennstoff. Durch die im Reaktor hohen Temperaturen ($700^\circ C$ bis $900^\circ C$) wird der Brennstoff erhitzt und beginnt zu trocknen, zu pyrolysieren und zu vergasen. Die Teilreaktionen der thermo-chemischen Prozesse laufen gleichzeitig ab. Die gute Durchmischung des Bettmaterials, des Festbrennstoffs und des Vergasungsmittels und die gleichmäßige Temperaturverteilung im Reaktor sind zwei wesentliche Vorteile der Wirbelschichtvergasung. Durch die gute Wärmeübertragungseigenschaften des Bettmaterials eignen sich Wirbelschichtvergasungen ausgezeichnet für die allotherme Vergasung. [8, 14]

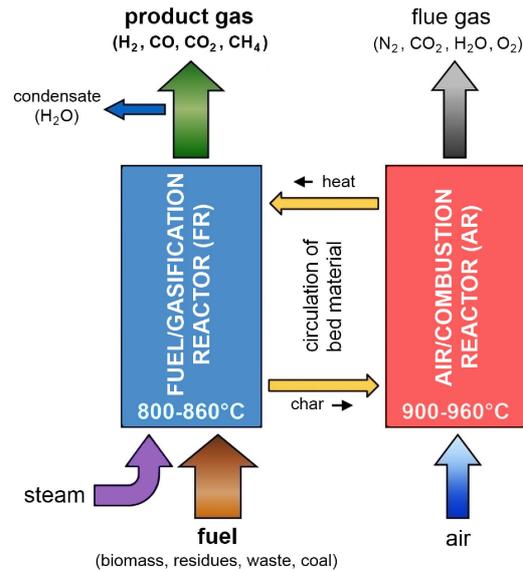


Abb. 2.2: Prinzip der DUAL FLUID Vergasung [10]

Zweibettwirbelschichtdampfvergasung (DUAL FLUID Vergasung): Dieses Verfahren besteht aus zwei getrennten Wirbelschichtreaktoren mit zwei unterschiedlichen Fluidisierungsmitteln. Zwei getrennt voneinander austretende Gasströme werden erzeugt. Das Verfahrensprinzip ist in Abb. 2.2 dargestellt. Hier sind die beiden Wirbelschichtreaktoren eckig dargestellt. Die zu- und abfließenden Stoffströme der Reaktoren sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Der blaue Wirbelschichtreaktor wird als Dampfvergaser betrieben. Die für die Vergasungsreaktionen benötigte Energie wird in einer parallel betriebenen Verbrennungswirbelschicht (roter Reaktor) erzeugt. Als Energieträger fungiert Bettmaterial, das zwischen den beiden Wirbelschichten zirkuliert und die Wärme für die Dampfvergasung bereitstellt. Der Brennstoff wird in die Vergasungswirbelschicht eingebracht und mittels Wasserdampf vergast. Dadurch entsteht ein weitgehend stickstoffreies Produktgas. Die Hauptbestandteile sind H_2 , CO , CO_2 und CH_4 . Typische Gaszusammensetzungen sind in Tab. 2.1 angeführt. In der Verbrennungswirbelschicht wird mit Luft als Oxidationsmittel der übriggebliebene Restkoks aus der Vergasung verbrannt. Das entstehende Abgas wird getrennt vom Produktgas abgezogen. Die Verbrennungswirbelschicht arbeitet typischerweise bei höheren Temperaturen (900 °C bis 960 °C) als die Vergasungswirbelschicht (800 °C bis 860 °C). [8, 10, 11]

Tab. 2.1: Typische Produktgaszusammensetzung bei Holzbrennstoffen [11]

Gaskomponente	Einheit	Anteil
Wasserstoff (H_2)	Vol.%	35 – 45
Kohlenmonoxid (CO)	Vol.%	20 – 30
Kohlendioxid (CO_2)	Vol.%	18 – 25
Methan (CH_4)	Vol.%	8 – 12
höherwertige Kohlenwasserstoffe (C_xH_y)	Vol.%	2 – 3
Stickstoff (N_2)	Vol.%	< 3
Staubpartikel	g/Nm^3	60 – 100
Teer	g/Nm^3	1 – 10

Das Verfahren bietet die Möglichkeit, neben Strom und Wärme auch verschiedene Treibstoffe wie synthetischen Diesel oder Wasserstoff in einer der Vergasung und Gasreinigung nachgeschalteten Anlage zu erzeugen. In den letzten Jahren wurden großtechnische Projekte umgesetzt (Güssing, Oberwart, Villach,...), die das DUAL FLUID Verfahren zur Strom und Wärmeproduktion einsetzen. Auch die neuartige 100 kW Versuchsanlage basiert auf diesem innovativen Grundprinzip.

2.1.1 Entwicklung des Reaktordesigns der DUAL FLUID Vergasung

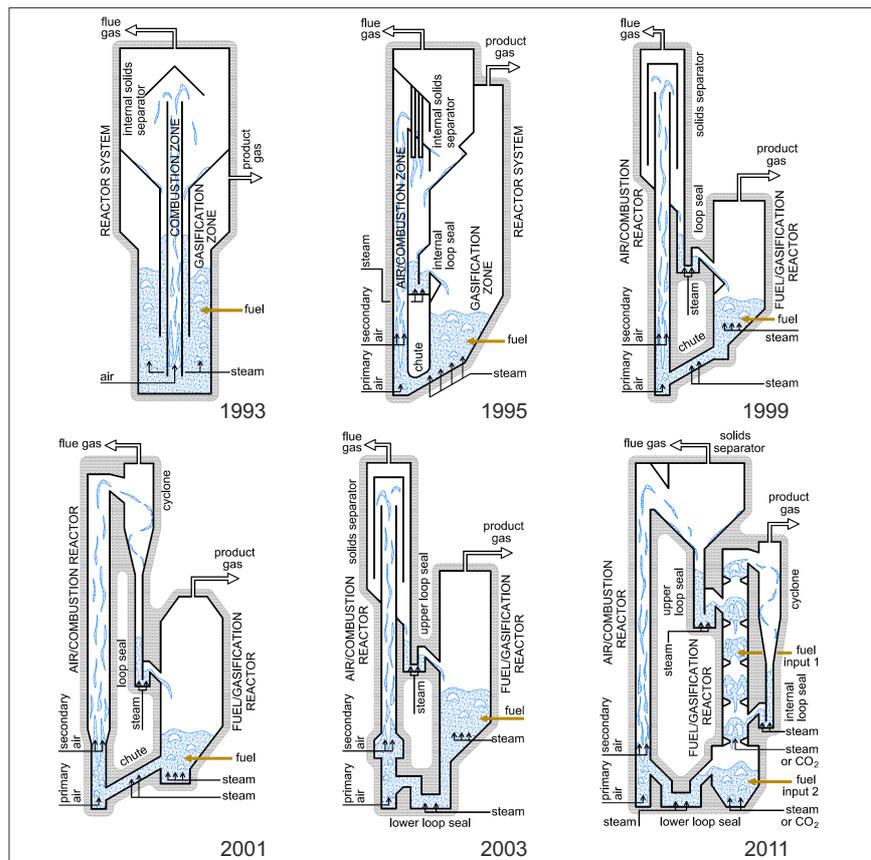


Abb. 2.3: Entwicklung der Wirbelschichtvergasung [9]

Am Institut für chemische Verfahrenstechnik der TU Wien wird seit den 1970er Jahren erfolgreich an neuen Wirbelschichttechnologiekonzepten und -ideen geforscht. Ziel war und ist es, das Gas/Feststoffkontaktverhalten in der Wirbelschicht zu verbessern und die Verweilzeiten der Festbrennstoffteilchen, der Gase und des Bettmaterials zu erhöhen. Daher wurden die Reaktordesigns im Laufe der Zeit adaptiert und weiterentwickelt, wie Abb. 2.3 zeigt. Im Jahr 1993 wurde erstmals ein Reaktorsystem mit zwei unterschiedlichen Fluidisierungsmitteln entworfen und eine 10 kW Versuchsanlage im Technikum der TU Wien gebaut. Die DUAL FLUID Technologie war geboren. Während zwischen 1995 und 1999 Erfahrungen mit dieser Technologie in 100 kW Versuchsanlagen gesammelt wurden, ist 2001 erstmals eine 8 MW_{th} Pilotanlage in Güssing großtechnisch gebaut und in Betrieb genommen worden. Weitere Entwicklungsstufen und neue Erkenntnisse führten schlussendlich zum Design des Jahres 2011, auf dem die neu entwickelte Versuchsanlage basiert. [9]

2.1.2 Reaktordesign der neuen Versuchsanlage

Zum Unterschied zu vergangenen DUAL FLUID Konzepten ist der Vergasungsreaktor, oder auch Fuel-Reaktor (FR) genannt, komplett neu entwickelt worden. Er ist als Gegenstromreaktor ausgeführt, in dem heiße Bettmaterialpartikel vom oberen Siphon (Upper Loop Seal) in den Reaktor geleitet werden. Über den unteren Siphon (Lower Loop Seal) verlassen die Partikel den Vergasungsreaktor Richtung Verbrennungsreaktor, oder auch Air-Reaktor (AR) genannt. Durch den Gegenstromeffekt und zusätzlich eingebauten Zonen mit Taillierungen wird der Gas/Feststoff-Kontakt signifikant erhöht. Über eine intern zirkulierende Wirbelschicht im FR wird das aus dem FR austretende Bettmaterial durch einen Abscheider im System gehalten. Der verbesserte Kontakt zwischen Bettmaterial, Brennstoff und Dampf durch die Taillierungen soll eine Reduktion des Teergehalts bewirken. Des Weiteren wird eine Reduktion der Steam-to-Fuel-Ratio (Verhältnis zwischen Brennstoffeinsatz und Dampfeinsatz) angestrebt, um den Wirkungsgrad zu steigern. Ein geringerer H_2O -Gehalt im Produktgas ist die Folge. Dies sind nur zwei Vorteile des neuen Reaktordesigns. Weitere positive Auswirkungen können aus [10] entnommen werden. Auf das neuartige Zweibettwirbelschichtreaktorsystem sind drei Patente angemeldet [15, 16, 17]. Näheres zum Wirbelschichtreaktordesign kann in Kap. 3.1.1 nachgelesen werden. Der schematische Aufbau des Reaktordesigns ist in Abb. 2.4 (rechts) dargestellt.

In der Planungsphase der Versuchsanlage wurde ein Kaltmodell gebaut und verschiedenste Versuche durchgeführt. Aus den Erkenntnissen der Versuche konnte das Basic Engineering umgesetzt werden, das die Basis für die Entwicklung der MSRT bildete. Im Weiteren wird das Kaltmodell und die Versuchsanlage vorgestellt. [18, 19]

Das Kaltmodell der Versuchsanlage

Um Vorhersagen zu strömungstechnischen Fragestellungen der neuen Versuchsanlage treffen zu können, ist ein Kaltmodell nötig. Der Aufbau des Kaltmodells (siehe Abb. 2.4 links) beinhaltet das neu überarbeitete Reaktordesign mit AR und FR inklusive Siphons und doppelten Abscheidersystemen. Verschiedene Faktoren wie z.B. die Taillierungen entlang des FR beeinflussen die Wirbelschichtausbildung. Durch unterschiedliche Versuche wurden die Zusammenhänge zwischen Fluidisierungsmenge, Druckverlauf und Betriebsbereich messtechnisch erfasst und ausgewertet. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Wirbelschichtverhalten zeigt Tab. 2.5. [18, 19, 20]

Als Bettmaterial wurden Bronzepartikel eingesetzt, um ähnliche Kennzahlen (Archimedeszahl, Dichteverhältnisse zwischen Fluid und Feststoff) zwischen Kaltmodell und Versuchsanlage zu erhalten und dadurch die Möglichkeit von fluiddynamischen Vergleichen anzustellen. Aufgrund der Adaptionen des Reaktordesigns wurden in den unterschiedlichen Reaktorzonen verschiedene Ausbildungen von Wirbelschichten festgestellt:

- blasenbildende Wirbelschicht im unteren Teil des FR
- turbulente Wirbelschicht in den Kammern des FR
- Übergang in eine schnelle Wirbelschicht in den Taillierungen des FR
- Übergangsbereich zur schnellen Wirbelschicht im AR

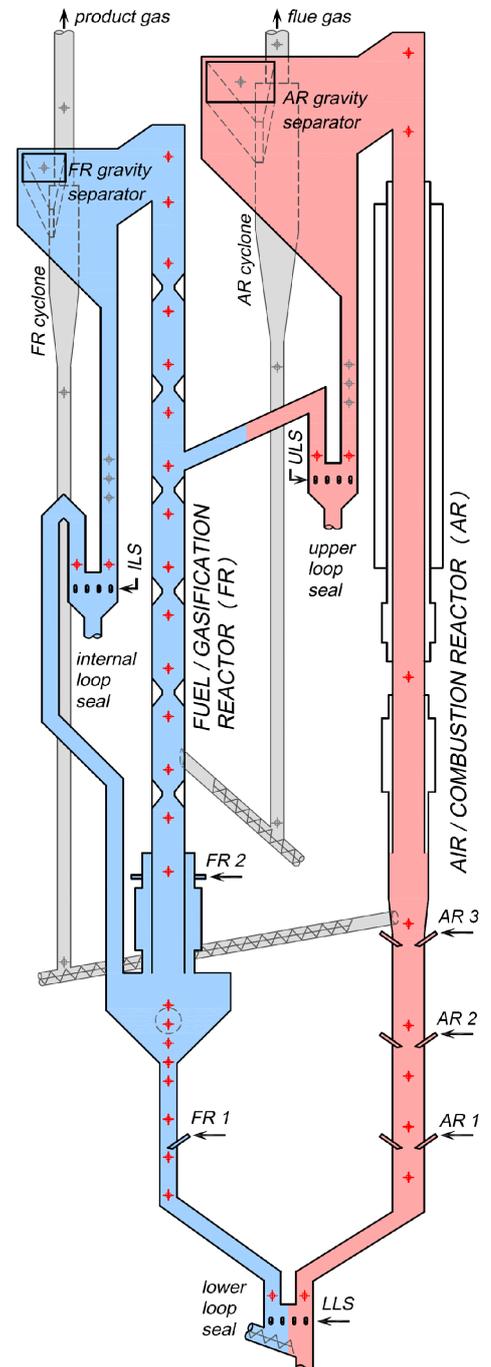
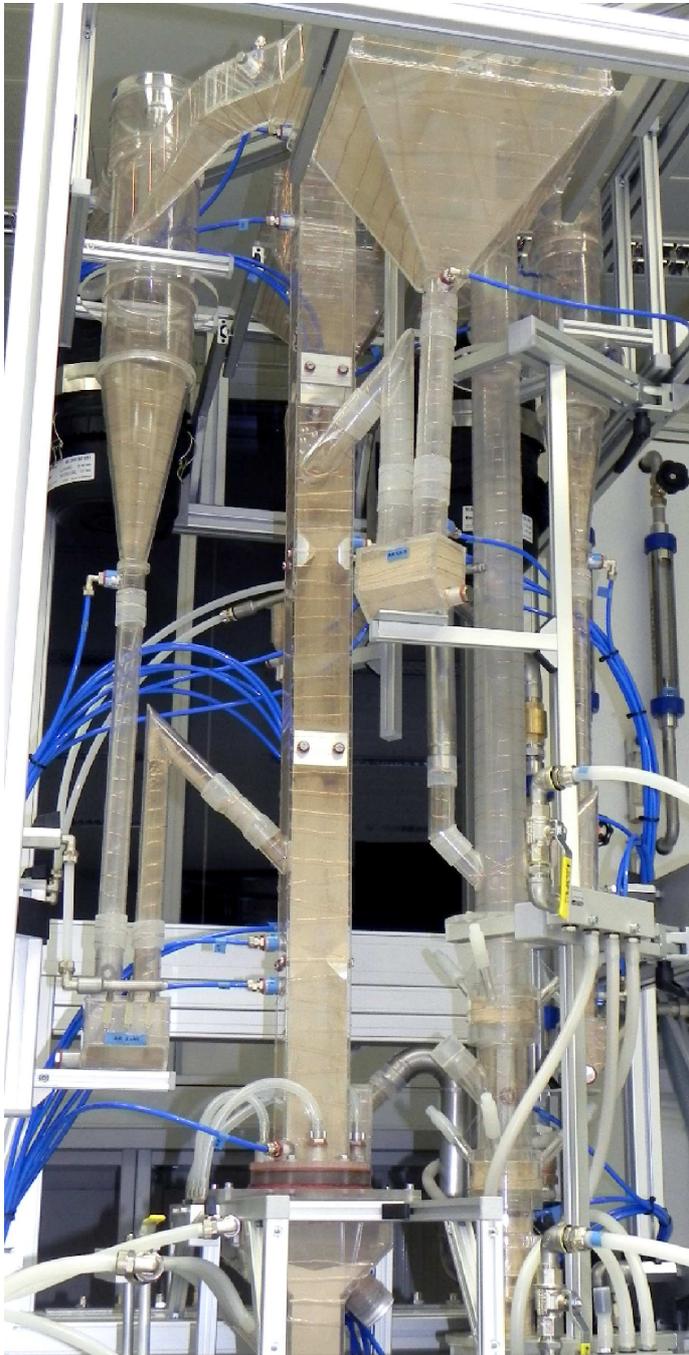


Abb. 2.4: links: Foto des Kaltmodell, rechts: Schematischer Aufbau der Reaktoren der Versuchsanlage

Parameter	Änderung des Zustandes durch die Parametervariation				
	Wirbelschichtzustand im Vergasungsreaktor	Globale Feststoffumlauf	Interne Feststoffumlauf	Annäherung zum Flutungspunkt	Leistung
Fluidisierung-Vergasungsreaktor	●●●	-	●●●	●●●	-
Fluidisierung-Verbrennungsreaktor	●	●●●	-	●●	
Fluidisierung-unterer Siphon	●	●●	-	-	-
Taillierung	●●●	-	-	●●●	-
Brennstoffförderung	●●	-	-	●●	●●●
Dichte (Produktgas-zusammensetzung, Temperatur)	●	-	●	●	●

Abb. 2.5: Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Wirbelschichtverhalten [18]

Die 100 kW Versuchsanlage

Die neue 100 kW Heianlage ist als Versuchsanlage im Technikumsmaßstab wesentlich komplexer als ein Kaltmodell. Um einen Überblick der unterschiedlichen Anlagenbereiche zu bekommen wird die Versuchsanlage in fünf Abschnitte gegliedert, welche in Kap. 3 näher erläutert sind:

- Brennstoffbereitstellung
- Gaserzeugung
- Gaskühlung, -reinigung & -nutzung
- Versorgungseinrichtungen
- Mess-, Steuer- & Regelungstechnik (Leitwarte)

Im Unterschied zum Kaltmodell sind in der Versuchsanlage die Taillierungen entlang des FR variabel verstellbar. Eine gezielte Einflussnahme auf die fluiddynamischen Verhältnisse ist somit möglich [18]. Der Feststoffanteil in den einzelnen Kammern kann dadurch reguliert werden. Die Auswirkungen des neu entwickelten Reaktordesigns auf ablaufende Reaktionen in den Reaktoren ist das Hauptthema der zukünftigen Forschungsarbeit.

Aus Erfahrungen vorangegangener Versuchsanlagen wurde die MSRT neu konzipiert und wesentlich umfangreicher gestaltet. Dadurch sind mehr Daten verfügbar, durch die neue Erkenntnisse im Bereich der Wirbelschichttechnik und der Vergasung gewonnen werden können. Der Aufwand ist durchaus gerechtfertigt, da sich zeigte, dass die Übertragung der Messergebnisse einer 100 kW Versuchsanlage auf Anlagen mit 10 MW-20 MW Brennstoffwärmeleistung

möglich ist [21]. Mit Hilfe der Messtechnik können nun detaillierte Bilanzen erstellt werden. Damit sind qualitative und quantitative Aussagen in Hinsicht auf Leistungsangaben und Wirkungsgradbestimmungen möglich.

Bis zum Bau der Versuchsanlage waren unterschiedliche Projektphasen notwendig. Im Basic Engineering wurden die Versuchsanlage ausgelegt, Messdaten definiert und Sicherheitskriterien berücksichtigt. Während der Planung wurde auf eine möglichst industriennahe Ausführung geachtet, um ein eventuelles Scale-Up zu höheren Anlagenleistungen zu erleichtern. Außerdem wurde ein Rohrleitungs- & Instrumentenfließschema (R&I-Schema) entworfen, auf dem die entwickelte MSRT aufbaut [22]. Im Detail-Engineering wurde ein MSR-Konzept ausgearbeitet, welches in [18] enthalten ist. Die Implementierung des Konzepts ist Teil dieser Arbeit und ist in Kap. 4 genauer erläutert.

2.2 Automatisierungstechnik - MSRT

Die Automatisierungstechnik behandelt Themen wie Messen, Steuern, Regeln, Kommunikation zwischen Mensch und Maschine und vieles mehr. In IEC 62264 wird der viel umfassende Begriff Automatisierungstechnik, in Teilbereiche gegliedert (Abb. 2.6). Dabei wird jeder Ebene eine Aufgabe zugeordnet. In der untersten Ebene befindet sich die Steuerung- und Feldebene, die für die Datenerfassung und Aufbereitung zuständig ist. Darüber liegt die Prozessleittechnik-Ebene (PLT), die Aufgaben der Datenverarbeitung, -speicherung und -visualisierung übernimmt, aber auch Rezeptverwaltung, wenn Anlagen beispielsweise unterschiedliche Produkte herstellen können. Aus der Produktionsleitebene (Manufacturing Execution System (MES)) werden Wirkungsgrade bestimmt, Bilanzen ermittelt und Produktqualitäten kontrolliert. Darüber ist die Enterprise-Resource-Planning-Ebene (ERP) oder auch Unternehmensebene genannt, die Aufgaben der Produktionsplanung, Beschaffung, Lagerverwaltung, etc. übernimmt. [23, 24]

In den folgenden Kapiteln wird auf die Feld- und Prozessleitebene näher eingegangen.

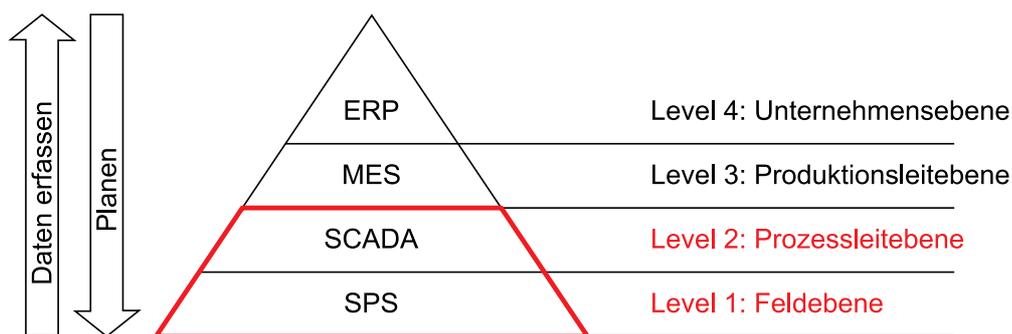


Abb. 2.6: Automatisierungspyramide (IEC 62264)

Hinsichtlich der Sicherheitstechnik trägt die Automatisierungstechnik eine große Verantwortung. Internationale Verbände publizieren laufend neue Empfehlungen und Arbeitsblätter, um einheitliche Standards im Bereich der Automatisierungstechnik festzulegen und erhöhte Sicherheit an Geräten und Systemen zu erzielen. Eine wichtige Interessenvertretung in Europa ist die Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie (NAMUR),

ein Verband bestehend aus über 130 Mitgliedsfirmen der Prozessindustrie. Einige, in der Versuchsanlage umgesetzte Standards, wurden daraus entnommen.

2.2.1 Feldebene

Die Feldebene ist hauptsächlich für die Datenerfassung, das Messen zuständig. Dazu zählt auch die Versorgung der Messeinrichtung durch elektrische und pneumatische Hilfsenergie und die Übertragung der Signale zur Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). DIN 1319 beschäftigt sich mit der Messtechnik und ist wie folgt definiert:

Beim Messen wird eine physikalische Größe (Druck, Temperatur) durch Vergleich mit ihrer Einheitsgröße gleicher Dimension, dem Messnormal, experimentell mit Hilfe einer Messeinrichtung bestimmt. [25]

Komponenten zur Messgrößenerfassung sind der Messgrößenaufnehmer (Sensor), Messgrößennumformer (Transmitter), Signalanpasser (Filter, Verstärker,...) und eventuell Analog/Digital-Wandler, zur Digitalisierung der Messgröße.

Messgrößenerfassung

Um die Messung zentral in einem Prozessleitsystem (PLS) anzuzeigen, muss diese in eine elektrische Größe umgewandelt werden. Dafür gibt es genormte Signalspannen. Übliche Übertragungssignale sind 0-20 mA, 4-20 mA, 0-10 V. Um das elektrische Signal wieder in die tatsächliche Messgröße umzuwandeln, muss ein Messbereich definiert werden, auf den die Messeinrichtung geeicht wurde. Die Umwandlung in die gewünschte Messeinheit erfolgt durch die Formel:

$$x_y = \frac{\Delta x}{\Delta y} y_{Me} + x_\alpha \quad (2.1)$$

mit x_y als elektrisches Signal, y_{Me} als Messgröße, Δx als Signalspanne, Δy als Messbereich und dem Offset des elektrischen Signals x_α . [26]

Eine andere Möglichkeit der Signalübertragung sind Bussysteme. Dabei ist das wichtigste Kriterium die "Echtzeitfähigkeit", d.h. die Signalübertragung muss in jedem Fall in einer gewissen Zeitspanne abgearbeitet werden. Typische Zykluszeiten für die Signalabarbeitung liegen zwischen 1 ms und 10 ms. Gängige Bussysteme sind Profibus, Controller Area Network (CAN) und Modbus. Die Vorteile bei Bussystemen liegen im geringeren Verkabelungsaufwand, der Eigendiagnose des Systems, der höheren Zuverlässigkeit und der besseren Verfügbarkeit (Möglichkeit der redundanten Signalübertragung). Im Gegenzug dazu sind feldbustaugliche Geräte teuer und komplex beim Einbinden in das PLS. Bussysteme und Spezifikationen sind in DIN EN 61158 genormt.

Ein weiteres wichtiges Thema ist die Messgenauigkeit. Es ist nicht möglich, völlig exakt zu messen. Die Abweichung des gemessenen Wertes vom wahren Wert wird als Messabweichung bezeichnet. Dabei wird zwischen absoluter und relativer Abweichung unterschieden. Es gibt systematische und zufällige Abweichungen, wobei erstere zu einer ungenauen Messung und zweitere zu einer unsicheren Messung führen. Bei jedem Messgerät muss die Messtoleranz angegeben sein, um qualitative Aussagen über den gemessenen Wert machen zu können. Bei teuren Geräten kann auch eine Fehlerkurve angegeben werden, die in Abhängigkeit des

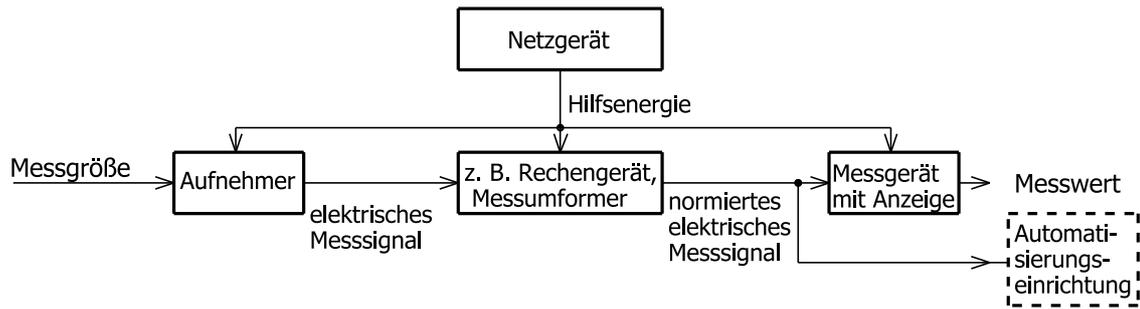


Abb. 2.7: Typische Anordnung einer Messkette (DIN 1319)

absoluten Messwerts die Abweichung angibt. Die Messungenauigkeit muss bei jeder Auswertung berücksichtigt werden und ist wichtiger Bestandteil, um qualitative Aussagen zu Messergebnissen treffen zu können. [24, 26, 27]

Sensortechnik

Im Folgenden werden nun spezielle Sensoren und Aktoren näher erläutert, die in der Anlage verbaut sind. Die wichtigsten verwendeten Sensoren dabei sind Temperatur- und Drucksensoren. Es sind aber auch Durchflusssensoren, Kraftmessdosen, Füllstandsensoren und Sensoren zur Bestimmung der Gaszusammensetzung in Verwendung. Im Weiteren werden die einzelnen Messprinzipien näher erläutert. Weitere Empfehlungen hinsichtlich Diagnose und Überwachung von Feldinstrumenten sind der Richtlinie VDI/VDE 2650 zu entnehmen. [24]

Temperatursensoren liefern eine der sieben Grundgrößen des internationalen Einheitensystems und werden besonders in der Thermodynamik häufig verwendet, da sie neben Druck und Volumen den thermodynamischen Zustand eines Systems beschreiben. Dabei werden unterschiedliche Temperaturskalen verwendet. Im europäischen Raum sind die häufigsten Skalen die Celsius- und die Kelvin-Temperaturskala. Um Temperaturen messen zu können, werden meist Widerstandsthermometer, Thermoelemente, Strahlungsthermometer und Ausdehnungsthermometer verwendet. [24]

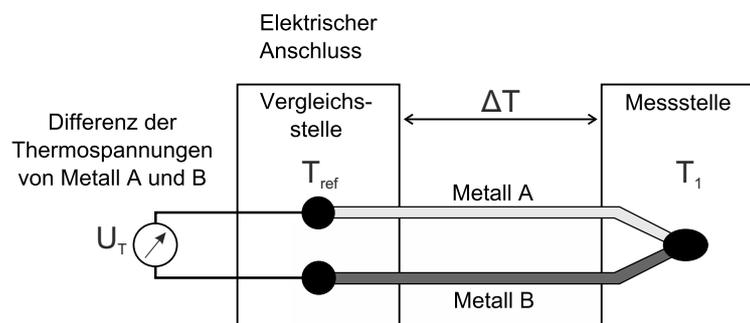


Abb. 2.8: Messprinzip eines Thermoelements [24]

Aufgrund der Robustheit, der preiswerten Anschaffung und einem großen Temperaturbereich, sind in der Versuchsanlage in erster Linie Thermoelemente verbaut. Abb. 2.8 zeigt

den Aufbau eines Thermoelements. Es besteht aus zwei unterschiedlichen Metallegierungen, die an den Enden miteinander verbunden sind. Infolge von Energieunterschieden treten kleine elektrische Spannungen (Thermospannung) auf. Die Größe der Thermospannung ist proportional zur Temperatur der Verbindungsstelle. Diese kann jedoch nicht direkt gemessen werden, da die Messeinrichtung mit der SPS verbunden werden muss. Dafür werden spezielle Leitermaterialien eingesetzt, die aus günstigeren Speziallegierungen bestehen, als die Metalle der Thermoelemente. Diese weisen keine Thermospannung gegenüber den Thermoelementen auf. Daher wird das Messergebnis durch die Übertragung nicht verfälscht. Herrscht eine Temperaturdifferenz zwischen einer Vergleichsstelle (T_{ref}) und dem Messpunkt (T_1), so entsteht ein Potentialunterschied zwischen den elektrischen Anschlüssen und somit eine messbare Spannung U_T . Diese ist ein Maß für die Temperaturdifferenz. Es ist darauf zu achten, dass die Vergleichstemperatur T_{ref} während der Messaufzeichnung auf einen konstanten Wert gehalten wird. [24, 27]

Da im Betrieb der Versuchsanlage jedoch die Spreizung zwischen T_1 und T_{ref} in der Regel sehr groß ist, bleibt der Fehler minimal. Die in der Anlage verwendeten Thermoelemente sind vom Typ K (siehe DIN EN 60584-1), das sind Nickel/Chrom-Legierungen mit einem Messbereich von -270 °C bis 1273 °C . Dieser Messbereich ist notwendig, da in den Reaktoren Temperaturen über 900 °C auftreten und in der Brennkammer bis zu 1100 °C gemessen werden. Insgesamt sind über 100 Temperatursensoren an das PLS angebunden. Entlang des FR sind 24 Messstellen installiert, um Vorgänge im Reaktor möglichst genau analysieren zu können. Die restliche Sensoranordnung kann der MSR-Liste im Anhang entnommen werden.

B.2.3

Drucksensoren charakterisieren den Zustand der Wirbelschicht und sind daher von essentieller Bedeutung. Da in den Reaktoren durch die Stahlummantelung im Gegensatz zum Kaltmodell kein direkter Blick in die Anlage möglich ist, kann der Wirbelschichtzustand nur indirekt anhand von Messungen ermittelt werden. Drucksensoren bieten hierfür eine gute Basis, um die Bettmaterialmenge in unterschiedlichen Abschnitten des Reaktors bestimmen zu können. Aus diesem Grund sind entlang des FRs und ARs besonders viele Drucksensoren installiert.

Druckmessungen werden meist über Wirkdruckleitungen angeschlossen. Diese zweigen vom Messstutzen der Anlage ab und verlaufen zur Druckmessdose, dem Transmitter. Dabei ist bei der Verlegung darauf zu achten, dass die Leitung komplett trocken ist (keine Flüssigkeitseinschlüsse bei Gasmessung), bzw. vollständig mit Flüssigkeit gefüllt ist (kein Einschluss von Gasblasen bei Flüssigkeitsmessung). Das Messergebnis würde sonst verfälscht werden. DIN EN 837-2 empfiehlt daher, Wirkdruckleitungen mit einer Steigung oder einem Gefälle von mindestens 2% zu verlegen. Für die neue Versuchsanlage wurden Differenzdruckmesszellen mit piezoresistiven Sensoren und keramische Drucksensoren mit kapazitiver Auswertung vorgesehen. Diese werden nun näher erläutert.

Differenzdruckmesszellen mit piezoresistiven Sensoren sind in der Lage, bereits sehr kleine Differenzdrücke zu messen. In Bild 2.9 links ist der schematische Aufbau dargestellt. Dabei wirkt der Differenzdruck ($p_1 - p_2$) auf eine Trennmembrane, auf der verformungsabhängige Widerstände aufgebracht sind, so genannte Dehnmessstreifen (DMS). Durch das Durchbiegen der Membrane ändert sich die Länge, welche mit dem DMS ermittelt und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. [24]

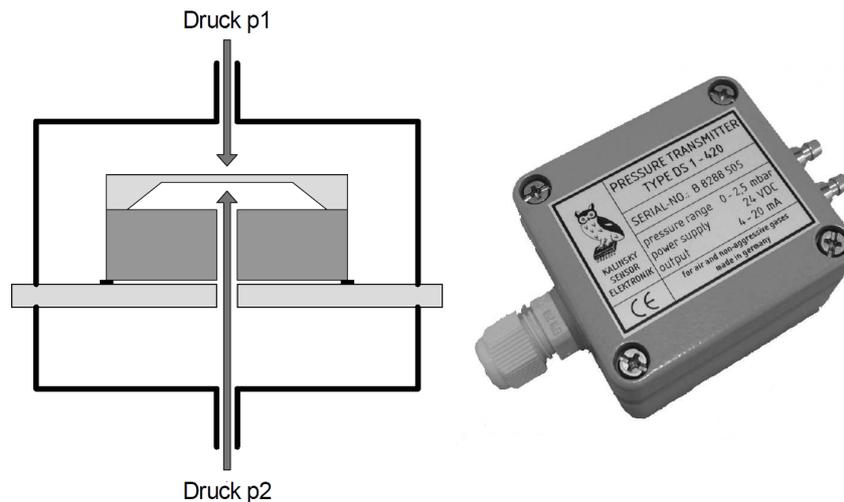


Abb. 2.9: links: Aufbau des piezoresistiven Drucksensors [24], rechts: Kalinsky Druckmessdose

Die Versuchsanlage verwendet 62 Drucksensoren der Firma Kalinsky (siehe Bild 2.9 rechts). Aufgrund der feinen Auflösung dürfen die Sensoren nicht mit starkem Überdruck belastet werden [28]. Zusätzlich werden die Wirkdruckleitungen in der Versuchsanlage kontinuierlich mit Stickstoff bzw. Luft gespült, damit Ablagerungen von Feststoff und Ansammlungen von Flüssigkeiten vermieden werden. Ferner bietet die Spülung einen Schutz der Membrane, da diese empfindlich auf aggressive Medien (Produktgas, Abgas) ist. Aufgrund der minimalen Durchflussgeschwindigkeiten der Gasspülung (ca. 0,11/min) kann davon ausgegangen werden, dass es zu keiner signifikanten Beeinflussung des Messwertes kommt. Die Messergebnisse bei der Inbetriebnahme bestätigen dies.

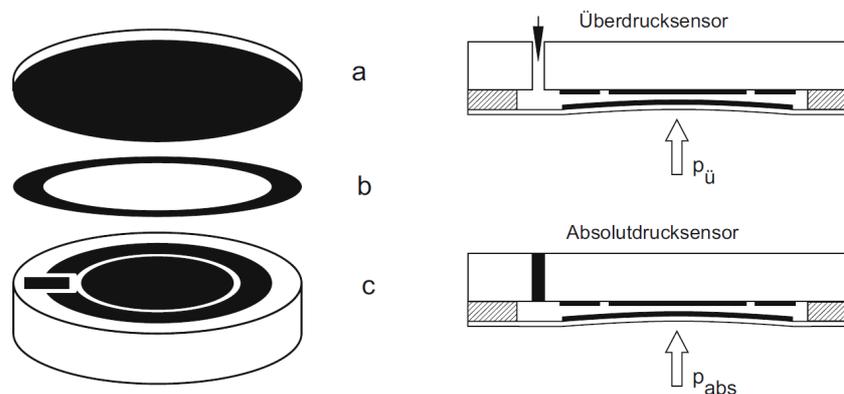


Abb. 2.10: links: Elemente des Drucksensors aus Keramik, rechts: Unterschied Überdruck- und Absolutdrucksensoren [24]

Keramische Drucksensoren mit kapazitiver Auswertung bieten den Vorteil der Langzeitstabilität und Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit. Der Aufbau ist in Bild 2.10 links gezeigt. Der Aktiv-Lotring (b) verbindet die Membrane (a) mit dem Grundkörper (c). Dadurch entsteht ein Abstand zwischen Membrane und Grundkörper. Durch die Druckeinwirkung wird eine Durchbiegung der Membrane provoziert, der Abstand zum Grundkörper wird dort am meisten reduziert. Das bewirkt eine Änderung der Kapazität, welche von der Referenzkapazität am Rand abweicht. Durch die Differenz der beiden Kapazitäten wird ein linearer

Zusammenhang zum Druck hergestellt. Diese Sensoren sind unter anderem bei den Strahlungskühlern verbaut und dienen zur Ermittlung des Kühlwasserfüllstands im Mantel.

Bild 2.10 rechts zeigt den Unterschied zwischen Überdruck- und Absolutdrucksensoren. Dabei unterscheiden sich diese nur durch ein kleines Belüftungsloch an der Rückseite der Membrane, das zum Druckausgleich dient. Bei Absolutdruckmessungen ist dieses verschlossen, als Bezugsdruck wird Vakuum verwendet. Somit können Drücke gemessen werden, die kleiner als der Atmosphärendruck sind. Man spricht dann von einem Unterdruck. [24]

Durchflussmessungen gehören neben Temperatur und Druck zu den gängigsten Messungen im industriellen Anlagenbau. Dabei muss speziell bei dieser Art der Messung auf das Messprinzip geachtet werden, da sonst entweder keine Messergebnisse möglich sind, oder diese stark verfälscht werden. Grundsätzlich muss zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden. Eine maßgebliche Kenngröße dafür ist die Reynoldszahl. Als Faustregel kann angenommen werden, dass Flüssigkeiten mit $Re > 2300$ eine turbulente Strömung und ein kolbenförmiges Strömungsprofil aufweisen, laminare Strömungen hingegen ein parabolisches Profil aufweisen. Dies wirkt sich bei einer "Ein-Punkt-Messung" maßgeblich auf die Messergebnisse aus, da das Strömungsprofil bekannt sein muss, um Aussagen über Strömungsgeschwindigkeiten treffen zu können. In der Industrie hingegen liegen bei Strömungsmessungen meistens turbulente Strömungsprofile vor. Beim Einbau einer Durchflussmessung sind im Zuge des Rohrleitungsbaus Ein- und Auslaufstrecken zu berücksichtigen, da durch Krümmungen das Strömungsprofil wesentlich beeinflusst wird. Weitere Faktoren wie Art und Viskosität des Mediums und Einbaulage des Messgeräts spielen ebenfalls eine Rolle. [24]

In Bild 2.11 rechts ist das Prinzip des Magnetisch-Induktive Durchflussmesser (MID) dargestellt welcher in der Industrie sehr häufig Anwendung findet. Der MID misst die Geschwindigkeit gleichzeitig über den gesamten Strömungsquerschnitt, wodurch Ein- und Auslaufstrecken verkürzt werden und eine hohe Messgenauigkeit erreicht wird [29]. Das durchströmte Medium muss jedoch gewisse Kriterien, wie beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit, erfüllen. Dieses Messprinzip kommt in der Versuchsanlage nicht zum Einsatz, ist hier jedoch aufgrund der Häufigkeit in industriellen Anlagen angeführt.

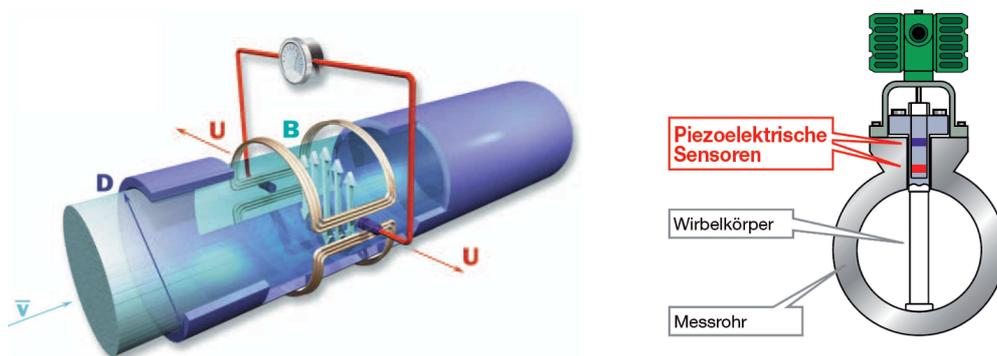


Abb. 2.11: links: Prinzip eines MIDs [29], rechts: VORTEX-Messung [30]

In der Versuchsanlage sind Schwebekörperdurchflussmessgeräte installiert und dienen zur Ermittlung der Luft- und Dampfvolumentströme in die Reaktoren. Sie arbeiten nach dem Wirkdruckprinzip. Dabei umströmt das Fluid einen auf ihn wirkenden Störkörper, der dadurch in Schwebelage versetzt wird. Auf einer geeichten Skala wird der entsprechende Durchfluss

entnommen. Vorteile der Messung sind die Robustheit und der Einsatz unter extremen Bedingungen, ein Nachteil dabei ist der entstehende Druckverlust. [24]

Ebenfalls eingesetzt werden Wirbelzähler-Durchflussmessungen, welche nach dem VORTEX-Prinzip arbeiten. Ein Staukörper erzeugt in der Leitung einen Wirbel, der sich ablöst (Kármánsche Wirbelstraße). Die Frequenz der Wirbelablösung ist direkt proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit und damit zum Volumenstrom. Zum Nachweis der Wirbel sind meist piezoelektrische oder thermische Sensoren eingebaut (Bild 2.11 links). Zweitere geben gleichzeitig zum Durchfluss auch die Temperatur an. Vorteile dieser Messung sind die universelle Einsetzbarkeit (bei Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen), hohe Genauigkeit und Langzeitstabilität. Aufgrund der Verwirbelung sind jedoch große Reynoldszahlen notwendig und damit nicht geeignet für geringe Durchflussgeschwindigkeiten. Für Messfehler unter 1 % müssen Reynoldszahlen jenseits von 20000 vorliegen. Wirbelzähler-Durchflussmessungen kommen in der Kühlwasserversorgung zum Einsatz. Es werden die Kühlwassermengen zur Kühlung des oberen Siphons und des AR gemessen. [24, 30]

Der Volumenstrom des Produktgas- und Abgasstroms der Versuchsanlage wird mit Hilfe von Messblenden bestimmt. Die Druckdifferenz über die Messblende, gemeinsam mit der Blendegeometrie, der Gastemperatur und den Gaseigenschaften (Viskosität, Dichte, Isentropenkoeffizient) sind ausreichend, um den Durchfluss zu berechnen. Die dazu notwendigen Gleichungen sind in den Berechnungsnormen DIN EN ISO 5167-2 und VDI/VDE 2041 bereitgestellt. Form, Abmessung und Einbaurichtlinien der Blenden sind ebenfalls genormt. Die Auslegung der Produkt- und Abgasmessblenden und Berechnung der Volumenströme sind in Kap. 4.2.2 enthalten.

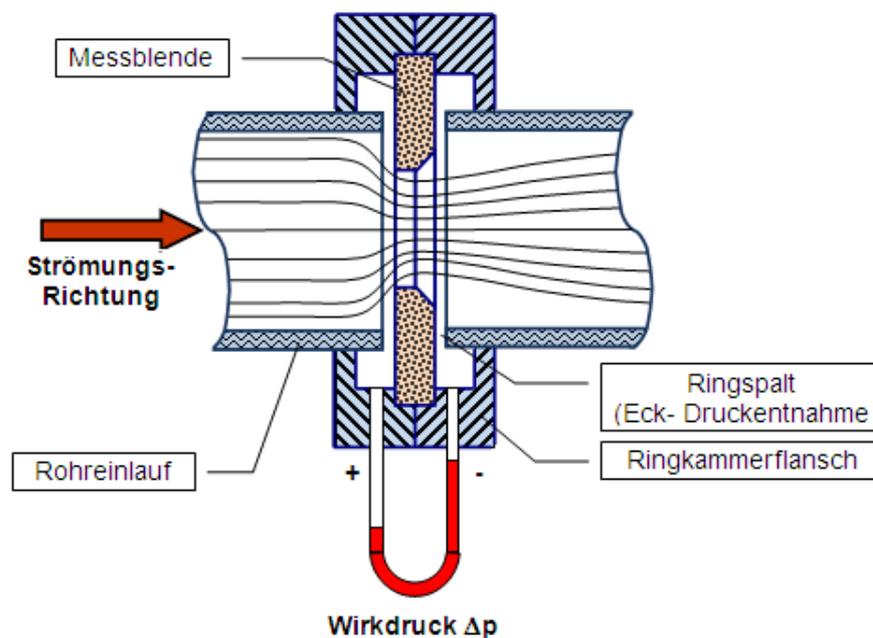


Abb. 2.12: Messblende nach DIN EN ISO 5167-2 mit Eckdruckentnahme [31]

Füllstandsmessungen kommen in unterschiedlichen Varianten zum Einsatz. Es gibt Messungen, die den Füllstand kontinuierlich messen (Schallemissionsmessung, optische Messung) oder wie Grenzschalter wirken und ein Signal bei Unter-/Überschreitung eines bestimmten

Levels ausgeben. In der Versuchsanlage sind Füllstandsgrenzschalter vorgesehen, die nach einem kapazitiven Messprinzip arbeiten. Dabei ändert sich bei Überschreitung des Füllstandes die Dielektrizitätskonstante des Kondensators zwischen den Kondensatorplatten. Dies bewirkt eine Änderung des Schaltsignals und detektiert somit den Füllstand. Grenzschalter sind in der Versuchsanlage zur Überwachung des Füllstandes der Dampftrommel und der Strahlungskühler eingesetzt. [24]

Wägezellen bestimmen das Gewicht einer Last. Dabei kommt das bewährte DMS-Prinzip zur Anwendung. Der Widerstand des DMS ändert je nach Längs- oder Querkontraktion seinen Wert. Dies wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und die Krafteinwirkung, respektive das Gewicht, kann ermittelt werden. In der Versuchsanlage erfolgt mit Hilfe von Wägezellen die Dosierung der Brennstoffmenge. Zwei Waagenbausätze der Firma Bosche sind für beide Brennstoffbunker verbaut. Ein Bausatz beinhaltet jeweils vier Scherstab Wägezellen des Typs K30S. Die Wägezellen werden im Anschlusskasten miteinander verbunden und das Signal über einen Analog/Digital-Wandler an die Steuerung übertragen [24, 27, 32].

Softsensoren sind mit Hilfe von anderen Sensoren berechnete Daten und werden dann eingesetzt, wenn die gewünschte Messgröße nicht mit einem direkten physikalischen Messverfahren zugänglich ist. Die Herausforderung bei der Entwicklung von Softsensoren liegt in der Ermittlung von mathematischen Beziehungen. Um geeignete Modelle zu entwerfen sind verschiedene Schritte notwendig, angefangen bei der Datenerhebungen, der Datenauswertung, der Auswahl geeigneter Modelle, dem Modelltraining über die Modellvalidierung, bis zum fertigen Modell. Ziel des Modells ist eine möglichst genaue Abbildung der Realität zu schaffen. Im Gegenzug soll das Modell gleichzeitig auch robust, d.h. nicht sensibel auf Ausreißer reagieren. Die Modellergebnisse liefern immer nur errechnete Werte und bilden die Realität nie genau ab. Softsensoren kommen in der Versuchsanlage beispielsweise bei Berechnungen von Dichten und Viskositäten der Produkt- und Abgase zum Einsatz. Hier bilden vordefinierte Formeln aus der Literatur die Basis. Eine Modellerstellung ist daher nicht notwendig, jedoch müssen auch hier die Ergebnisse validiert und auf Robustheit und Gültigkeit überprüft werden. [33, 34]

Die Gasanalyse ist ein Teilgebiet der analytischen Chemie und spielt bei chemischen Anlagen eine bedeutende Rolle. Dabei werden quantitative und qualitative Zusammensetzung von Gasgemischen gemessen und ausgewertet. Die Schwierigkeit dabei ist die kontinuierliche Auswertung der Messungen [35]. Um die Produkt- und Abgaszusammensetzung ermitteln zu können, werden bestehende Gaschromatographen (GC) (Clarus 500) und Gasanalytoren (NGA2000, Binos 1004, Oxynos 100) verwendet. Die Messergebnisse werden an das PLS übertragen und gespeichert. Gassensoren (Lambda-Sonde) dienen zur Ermittlung des Sauerstoffgehalts im Abgas nach der Brennkammer.

Aktortechnik

Unter einem Aktor versteht man die Umwandlung von elektrischen Signalen in eine mechanische Bewegung oder andere physikalische Größen. Aktoren wirken somit direkt auf den Prozess ein und verändern ihn. Die wichtigsten Aktoren sind Motoren und Ventile. Bei

Ventilen wird grundsätzlich zwischen elektrischen, pneumatischen, mechanischen und hydraulischen Ventilen, bzw. Regel- und Schaltventilen unterschieden. Bei Pneumatikventilen wird die Position des Stellhubs mit Hilfe von Druckluft verstellt, bei elektrischen Ventilen hingegen mit Strom. Hydraulische Ventile ändern die Position mit Hydrauliköl und sind aufwendiger in Aufbau und Wartung. Regelventile können alle Positionen (0 % bis 100 %) anfahren, wobei Schaltventile nur die Stellungen "Offen" und "Geschlossen" anfahren. [24]

Eine Problematik, die sich bei Regelventilen stellt, ist die Nichtlinearität. Jedes Ventil hat eine Ventilkennlinie, bei der der Durchfluss in Abhängigkeit von der aktuellen Stellung aufgetragen wird. Zusätzlich tritt Totraumverhalten auf, wo trotz Änderung der Ventilstellung, der Volumenstrom konstant bleibt. Beide Phänomene haben Einfluss auf die Regelparameter und sind daher bei regelungstechnischen Problemstellungen zu berücksichtigen. [36]

Beim Auslegen von Ventilen spielt der K_v -Wert eine wichtige Rolle. Er entspricht dem Durchfluss durch ein Ventil bei einer Druckdifferenz von etwa 1 bar (genau: 0,98 bar) und einer Wassertemperatur von 5 °C bis 30 °C (siehe VDI/VDE 2173). Daher muss vor der Ventilauswahl der K_v -Wert mit Gl. (2.2.1) bestimmt werden.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{\Delta p} \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \quad (2.2)$$

Ventile kommen speziell bei den Versorgungsmedien wie Wasserkreisläufen, Druckluftverteilern und Stickstoffverteilern zum Einsatz.

Sicherheitstechnik in der Feldebene

Bei Feldgeräten ist Sicherheit und Verfügbarkeit besonders wichtig. Daher werden hohe Anforderungen an Messinstrumente gefordert. Hohe Einsatztemperaturbereiche, Robustheit gegen Vibrationen und Einsätze von Feldgeräten in explosionsgeschützten Bereichen sind keine Seltenheit. Durch den Ausfall von Sensoren können wichtige Informationen verloren gehen, die bis zu einem Anlagenstillstand führen und hohe Kosten verursachen. Häufig werden kritische Geräte auch redundant ausgeführt, um die Verfügbarkeit zu erhöhen. Die Sicherheitsanforderungen an das Feldgerät ist abhängig vom Einsatzort. Mit Hilfe des Sicherheitsintegritätslevels (SIL) kann bestimmt werden, wie robust das Feldgerät ausgeführt sein muss (siehe auch Kap. 2.2.2). [37, 38]

2.2.2 Prozessleitebene

Die Prozessleitebene ist Teil der Automatisierungspyramide (Bild 2.6), welche die unterschiedlichen Ebenen der Informationsverarbeitung bei Prozessen widerspiegelt. Typische Aufgaben der Prozessleitebene in der Verfahrenstechnik sind Prozesse zu überwachen, zu sichern, zu stabilisieren und zu optimieren. Messungen werden aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei sind dies erfahrungsgemäß hauptsächlich Temperaturen (ca. 35 %), Durchflüsse (ca. 15 %), Drücke (ca. 20 %), Mengen (ca. 5 %) und On-Line-Analysen (ca. 10 %) wie Konzentrationsmessungen, pH-Messungen, etc. In der Versuchsanlage werden vorwiegend Druck- und Temperaturmessungen verwendet. Das aus den Messungen resultierende Temperatur-

und Druckprofil liefert anschauliche Daten und gibt Informationen bezüglich des Betriebszustandes des Vergasersystems wieder.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Protokollierung von Betriebsabläufen und der Bedieneinrichtungen, damit nachvollzogen werden kann, welche Handlungen ein bestimmtes Ereignis ausgelöst hat. Beheben von Störungen oder Noteingriffe bei Grenzwertüberschreitungen sind bei komplexen, verfahrenstechnischen Anlagen ohne der PLT nicht vorstellbar. Auch die immer wichtigere Vorgabe, ein Produkt mit konstanter Qualität, unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Faktoren herzustellen ist oft nur mit Hilfe einer ausgeklügelten Leit- und Regelungstechnik realisierbar. Hierzu zählt auch die Gewährleistung einer sicheren Anlagenfahrweise mit möglichst geringem, personellem Aufwand, die anfallende Wartungen, Reparaturen und Überwachungen durchführen, um dadurch einen hohen Zuverlässigkeitsgrad der Anlage zu erreichen. Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine muss reibungslos funktionieren, sodass ein effizienter Informationsfluss entsteht. In DIN IEC 60050-351 und DIN EN 60027-6 sind wichtige Definitionen und Hinweise zu diesen Themen enthalten. Grafische Symbole und Kennbuchstaben für die Visualisierung der Leittechnik sind in DIN 19227-2 aufgelistet.

Regelungstechnik

Nach DIN IEC 60050-351 ist Regeln ein

Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

Ein typischer Regelkreis besteht aus Regler, Stellglied, Regelstrecke und Messeinrichtung. Das Blockschaltbild eines Regelkreises ist in Abb. 2.13 dargestellt, aus dem folgende Beziehung hervorgeht:

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (2.3)$$

Die Regelgröße $y(t)$ hat der Führungsgröße $w(t)$ durch Veränderung des Stellglieds so gut wie möglich zu folgen, sodass die Regelabweichung $e(t)$ gegen 0 geht: $e \rightarrow 0$. Die Anforderungen an einen Regelkreis lauten:

- Der Regelkreis muss stabil sein
- Der Regelkreis muss gutes Führungs- und Störverhalten aufweisen
- Der Regelkreis muss sich robust verhalten

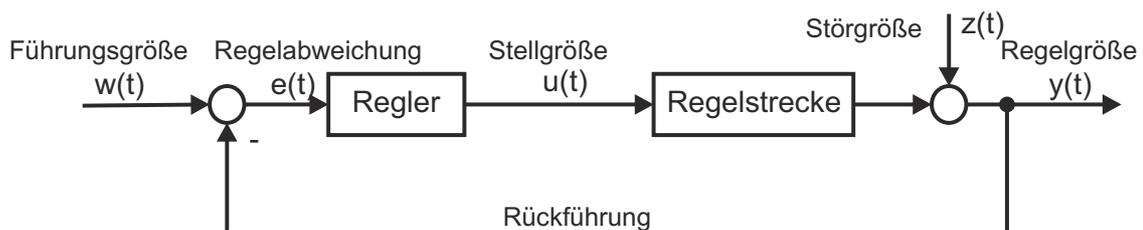


Abb. 2.13: Blockschaltbild eines Regelkreises [39]

In der Prozessindustrie hat sich der PID-Regler als geeignetes Werkzeug zur Regelung von unterschiedlichen Prozessen bewährt. Dieser Reglertyp besteht aus einem proportionalem Anteil (K_p), einem integralem Anteil (T_n) und einem differentialem Anteil (T_v). Abb. 2.13 zeigt einen einschleifigen Regelkreis mit einer Stellgröße und einer Regelgröße (SISO-Systeme). Um eine möglichst optimale Regelung zu realisieren gibt es neben dem einschleifigen Regelkreis, auch erweiterte Regelkreise. Dazu zählen Kaskadenregelungen, Verhältnisregelungen (Split-Range) und Auswahlregelungen, die alle Einsatz in der Versuchsanlage finden. Neben den SISO-Systemen gibt es auch Mehrgrößenregelungen. Diese haben Strecken mit mehreren Stell- und Regelgrößen (MIMO-Systeme). Mehrgrößenregler kommen in der Versuchsanlage nicht zum Einsatz. [39]

Bei der Reglerparametrierung von chemischen Anlagen wird nach wie vor das Sprichwort "Probieren geht über Studieren" angewendet, da in der chemischen Industrie das Ausprobieren von unterschiedlichen Reglerparametern oft problemlos möglich ist. Diese Methode führt häufig schneller zum Erfolg, als die Anwendung theoretischer Auslegungsmethoden. Für gewisse Regelstrecken gibt es typische Anhaltspunkte für Reglereinstellungen. Tab. 2.2 zeigt Einstellwerte für Regler in Chemiebetrieben, welche als grobe Richtlinie dienen. Diese Einstellwerte sind sehr konservativ gewählt (hohe Dämpfungen) und werden meist für Inbetriebnahmezwecke herangezogen, um nicht durch zusätzliche, regelungstechnische Problemstellungen aufgehalten zu werden. Später, wenn mehr Zeit ist, erfolgt das "Tuning" dieser Parameter. Dabei werden P- und I-Anteil getrennt voneinander langsam verringert. Wird die Regelgröße unruhig, stoppt man die Reduzierung und multipliziert die gewählte Größe mit dem Faktor 2, um wieder in den stabilen Bereich zu kommen und Schwingungen sicher ausschließen zu können. Zum Schluss kann die Vorhaltezeit (T_v) erhöht werden, um schneller auf Abweichungen zwischen Soll- und Istwert einzuwirken. In der Versuchsanlage wurden während der Inbetriebnahmephase die Regler nach dieser Vorgehensweise parametrieren. [23]

Tab. 2.2: Typische Einstellwerte für Regler im Chemiebetrieb [23]

Streckentyp	Reglertyp	K_p	T_n
Durchfluss, Druck schnell	PI	100 ... 500	5 ... 30sec
Druck langsam	PID	10 ... 50	1 ... 10min
Temperatur	PID	10 ... 100	1 ... 20min
Füllstand	P	10 ... 50	—
alternativ	PI	10 ... 1000	1 ... 20min

Neben den groben Einstellwerten aus Tab. 2.2 existieren auch unterschiedliche Strategien, die bei der Reglerauslegung angewendet werden können, um geeignete Reglerparameter zu erhalten. Bei komplexeren Regelstrecken sind experimentelle Einstellmöglichkeiten verfügbar, wie das Ziegler/Nichols-Verfahren oder Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick. Die Modellbildung der Strecke und anschließende Simulation (z.B. in Matlab) ist eine weitere Möglichkeit, geeignete Reglerparameter zu finden. [39]

Da Regelungstechnik ein immer wichtigerer Teil der Automatisierungstechnik wird, bieten verschiedene Hersteller Softwarepakete für die Optimierung von Regelungen an. Hier steckt viel Optimierungspotential in industriellen Anlagen, ohne teure Umbauten notwendig zu machen. In letzter Zeit hat das Thema Advanced Process Control (APC) immer mehr an Bedeutung gewonnen und ist in vielen Unternehmen bereits Stand der Technik. Damit gemeint

sind gehobene Regelungsalgorithmen, wie z.B. der modellbasierte prädiktive Regler oder der Fuzzy-Regler. Speziell der Model Predictive Controller (MPC) gewinnt bei komplexen Prozessen immer mehr an Bedeutung, da dieser eine Reihe von praktischen Anforderungen und Gegebenheiten gerecht wird. Hier sind nur einige Vorteile des MPC aufgelistet:

- Umgang mit Mehrgrößensystemen (Multi-Input, Multi-Output)
- Umgang mit Beschränkungen (Constraints)
- Vorausschauender Algorithmus, der einen größeren Zeithorizont vorhersagt und dementsprechend reagiert
- Veränderlicher Arbeitspunkt
- Robuste Regelung und hohe Flexibilität

Voraussetzungen, die für diesen Regler gelten, sind ein hoher Grad an Basisautomatisierung (Einsatz eines PLS) und eine mögliche Integration des MPCs in die PLT. Des Weiteren ist ausreichend geschultes Personal notwendig, da teilweise komplexe Mathematik in den Regelalgorithmen eingesetzt wird. Außerdem ist der Einsatz bis dato nur für lineare Prozessmodelle geeignet. Die nichtlinearen prädiktiven Regler befinden sich zurzeit noch in der Entwicklung und sind Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Generell kann jedoch gesagt werden, dass in der verfahrenstechnischen Industrie der PID-Regler noch immer die häufigste Art der Regelung ist. [40, 41, 42]

Für die in der vorliegenden Arbeit behandelte Versuchsanlage wurden nur wenige Regelkreise festgelegt. Speziell in Nebenanlagen wie Gaskühlung, Kühlwasserbereitstellung und Versorgungseinrichtungen sind Regelungskonzepte entwickelt worden. Der Kernprozess - die Gaserzeugung - kommt derzeit ohne Regelungen aus und wird nur gesteuert. Auf einige Regelungsschemata wird in Kap. 4.3.1 näher eingegangen. Regelschaubilder sind im Anhang B.1 aufgelistet.

Steuerungstechnik

Nach DIN IEC 60050-351 ist Steuern ein

Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.

Es tritt somit keine Rückführung auf. Die Ausgangsgröße wirkt demzufolge nicht über die Eingangsgröße auf sich selbst. Aufgabe der Steuerung ist es, einen konkreten Ablauf zu realisieren, bestimmte Verknüpfungen auszuwerten oder Stellungen an Aktoren vorzugeben. Die festgelegten Programmabläufe werden üblicherweise in einer SPS programmiert. Vorteile der SPS sind die einfache Programmänderung, Vervielfältigung gleicher Programmteile (durch Anlegen einer Bibliothek), hohe Verfügbarkeit und Robustheit, niedrige Schaltzeiten und viele mehr. Gemeinsam mit der Visualisierung bildet die SPS das Herzstück des PLS. Für die Programmierung der Steuerung vorgesehene Werkzeuge sind boolesche Operatoren wie UND-, ODER-Blöcke, Arithmetikbausteine, in denen Berechnungen durchgeführt werden, Schrittketten, in denen Abläufe definiert werden und viele mehr. Dafür sind eigene Programmiersprachen entwickelt worden [23]:

Continuous Function Chart (CFC): Der CFC ist eine für die SPS entwickelte, grafische Programmiersprache. Komplexe Steuerungsaufgaben lassen sich dadurch sehr gut abbilden und sind einfach zu verstehen. Dabei werden Funktionsblöcke durch Linien miteinander verschalten.

Sequential Function Chart (SFC): Ein SFC-Netzwerk besteht aus einer Kette von Schritten, welche durch Übergangsbedingungen (Transitionen) miteinander verbunden sind. Ein Schritt ist entweder aktiv oder inaktiv. Wird ein Schritt aktiv, werden Befehle ausgeführt, wie z.B. ein Ausgang gesetzt oder ein Programmcode ausgeführt. Wann der Schritt inaktiv geschaltet wird, entscheidet eine Transition am Ausgang des Schritts.

Ablaufschrittketten sind in der Versuchsanlage speziell in der Brennstoffbereitstellung (Bunkerspülungen) und der Gasanalyse (Spülung der Druckmessblenden) implementiert. Des Weiteren ist das An- und Abfahrprozedere in unterschiedliche Betriebsphasen unterteilt und in Schrittketten festgelegt. Nähere Erklärungen zu den Betriebsphasen sind in Kap. 4.3.1 zu finden.

Prozessleittechnik

Die Anforderungen an die PLT steigen stetig. Wichtige Grundvoraussetzungen sind die Echtzeitfähigkeit, hohe Verfügbarkeit, Integrierbarkeit und Kommunikationsfähigkeit mit anderen Ebenen der Automatisierungspyramide (MES), Anbindung von diversen Bussystemen und viele andere. Ein PLS besteht aus prozessnahen Komponenten (SPS), Anzeige- und Bedienkomponenten und Engineeringkomponenten. Üblicherweise sind Alarmsysteme, Visualisierungssysteme und Trendsysteme integriert. [43]

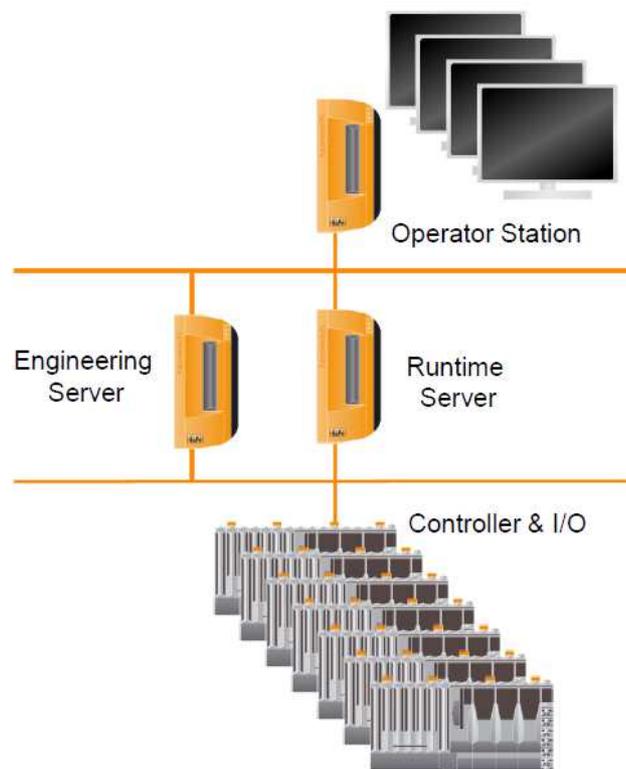


Abb. 2.14: Aufbau eines Prozessleitsystems [44]

Der typische Aufbau eines PLS zeigt Bild 2.14. Die SPS spiegelt dabei die unterste Ebene wider. Diese ist modular aufgebaut und besteht generell aus:

- Rückwandmodul (Backplane)
- Stromversorgungsmodul
- Prozessoreinheit zur Abwicklung der Programmteile und die Datenverarbeitung
- Kommunikationsschnittstellen für andere Steuerungen, Visualisierungssysteme und Buskopplungen
- Ein- und Ausgabebaugruppen zur Anbindung von Aktoren und Sensoren

Ein- und Ausgabebaugruppen lassen sich aufgrund des modularen Aufbaus erweitern. Über der SPS befindet sich der Leitreechner (Runtime Server), in dem alle aufzuzeichnenden und auswertbaren Daten aus der SPS gelesen, intern aufbereitet und in Datenbanken abgespeichert werden. Die SPS und der Runtime Server sind mit einer Busleitung (Ethernetkabel) verbunden. Am Engineering-Server werden Logik und Prozessbilder erstellt und dann in die SPS, auf den Runtime-Server und die Operator-Station übertragen. Die Operator-Station ist die Schnittstelle zwischen Anlagenfahrer und PLS. Die Visualisierung des aktuellen Prozessgeschehens und der Messdaten, Schalthandlungen, Trendmonitoring und Alarmmonitoring sind Teile davon. Führende Hersteller von PLS sind Siemens (SIMATIC PCS 7), Emerson (DeltaV) und Bernecker und Rainer (APROL). Eine Evaluierung der unterschiedlichen PLS soll zeigen, welches Tool für die Umsetzung der PLT der Versuchsanlage am besten geeignet ist. Das Ergebnis der Evaluierung ist in Kap. 4.3.4 näher erläutert. [43, 45]

Um PLT-Projekte möglichst effizient, kostengünstig und mit hoher Qualität abzuwickeln, ist eine eingehende Planung und Konzeptionierung durchzuführen. Eine Hilfestellung dafür kann aus den Arbeitsblättern NAMUR NA035 und NAMUR NA062 entnommen werden, wo Konzepte und Leitfäden zum Erstellen eines Lastenheftes vorgestellt werden. Diese Unterlagen wurden für die Ausarbeitung der PLT herangezogen.

Sicherheitstechnik in der Prozesselebene

Betreffend Sicherheitstechnik wurden in den vergangenen Jahren für den Einsatz von Prozessleitsystemen Vorschriften und Richtlinien definiert. Im Speziellen ist die VDI/VDE 2180 zu erwähnen. Darin sind angefangen von der Konzeptionierung über die Planung bis zum Betrieb von Anlagen Richtlinien und Vorgehensweisen angegeben, die bei der Erstellung des Sicherheitskonzeptes unterstützend beitragen. Speziell auf die PLT eingehend, werden in der Richtlinie drei Bereiche definiert: Der Gutbereich, der zulässige Fehlbereich und der unzulässige Fehlbereich. In der Abbildung 2.15 sind drei Kurvenverläufe erkennbar, die zeigen, ob neben der Prozessgröße noch weitere sicherheitsrelevante Einbauten (Berstscheibe, Sicherheitsventil, etc.) notwendig sind, um einen unzulässigen Fehlbereich zu vermeiden.

In der PLT wird zwischen

Basic Process Control Systems (BPCS): Realisierung von Betriebs- und Überwachungsfunktionen notwendigen Systemen

Safety Instrumented System (SIS): Systeme zur Realisierung von Schutzfunktionen

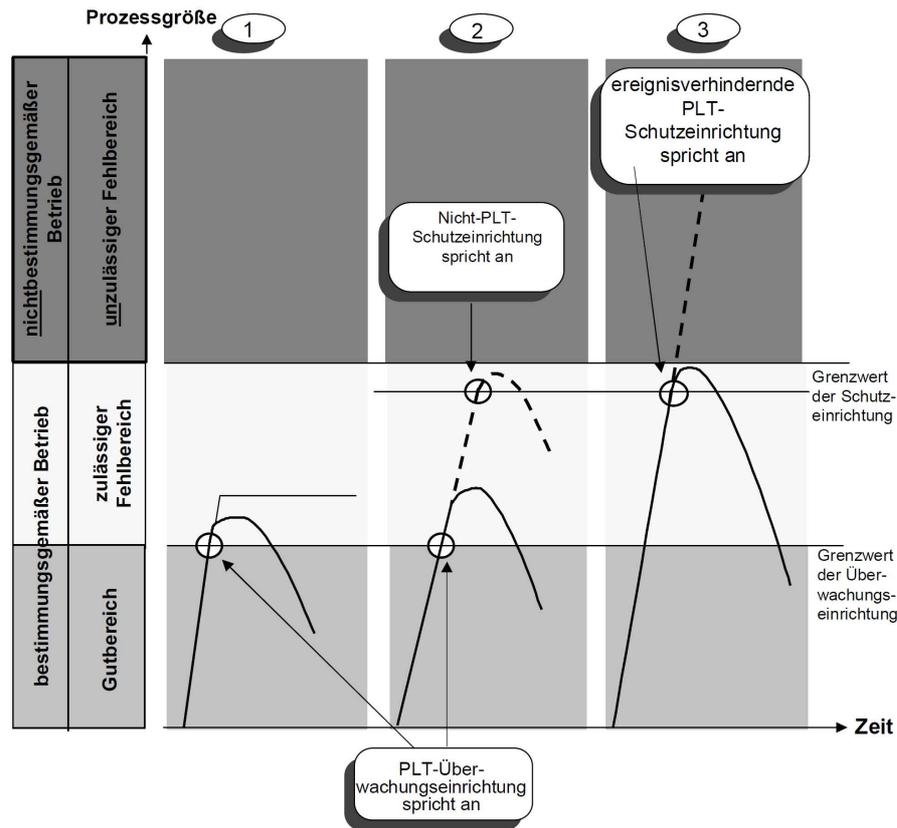


Abb. 2.15: Darstellung der Wirkungsweise von PLT-Einrichtungen (VDI/VDE 2180)

unterschieden. Aufgabe des SIS ist es, das Risiko auf ein vertretbares Restrisiko zu minimieren. Ein unzulässiger Fehlzustand der Anlage soll durch geeignete Konzepte verhindert werden. Es muss nach der Umsetzung des Anlagenschutzkonzeptes eine genaue Dokumentation dafür angefertigt werden (DIN EN 61508, DIN EN 61511, DIN EN 61511).

Unter dem Begriff Safety Instrumented Function (SIF) wird eine Schutzfunktion verstanden, die Parameter überwacht und ggf. im Störfall eingreift. Ein einfaches Beispiel stellt eine Behälterüberwachung dar, die bei der Erreichung des "Hoch"-Niveaus den Zulauf in den Behälter stoppt, sodass ein Überlauf verhindert wird. Anforderungen an die Sicherheitsfunktion müssen genau definiert werden. Dies beinhaltet die Beschreibung der sicherheitstechnischen Funktionen, die Definition des "Sicheren Zustandes" (z.B. ob ein Ventil im Fehlerfall offen oder geschlossen sein soll), erforderliche Zykluszeiten, bis der sichere Zustand erreicht ist, Beschreibung von Grenzwerten, und andere. In diesem Zuge wird auch der Begriff Fail-Safe erwähnt: Geräte mit einer Fail-Safe-Wirkung steuern in einen sicheren Zustand, wenn die Hilfsenergie ausfällt. Ein Beispiel hierfür ist ein Ventil, das im Falle eines Stromausfalls schließt und somit in eine sichere, definierte Position fährt. [23]

Zur Vollständigkeit des Kapitels Sicherheitstechnik wird auch das SIL nach DIN EN 61511 vorgestellt. Dabei handelt es sich um Ausfallgrenzwerte für eine Sicherheitsfunktion, die in vier Bereiche gegliedert wird: SIL1 bis SIL4. SIL4 stellt die höchste Stufe dar, d.h. die Anforderung an die SIF ist am höchsten. Durch unterschiedliche technische Maßnahmen versuchen Anlagenbetreiber, das Risiko und Gefahrenpotential der Anlage so gering wie möglich zu halten und dadurch das SIL-Level zu reduzieren. [38]

In der Entwicklungsphase der Versuchsanlage wurde die Methode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) nach DIN EN 60812 eingesetzt. Es wurden unterschiedliche risikorelevante Szenarien durchgespielt und deren Fehlerursachen und Schadensausmaße ermittelt. Gegen- und Erkennungsmaßnahmen wurden dabei analysiert und bewertet. Dadurch floss bereits in der Entwicklungsphase eine frühzeitige Fehlerverhütung und -behebung mit ein. Des Weiteren wurden in einer Risikoanalyse die Gefahren, die bei der Bedienung der Anlage und dem Aufenthalt in der Nähe der Anlage auftreten können, näher untersucht. In einer Risikoanalyse wurden die ausgearbeiteten Gefahren einer Risikobewertung unterzogen und in einer Risikomatrix dargestellt (siehe Abb. 2.16). Dadurch konnte festgestellt werden, ob das Restrisiko akzeptabel war bzw. weitere sicherheitstechnische Maßnahmen getroffen werden mussten. [18, 46]

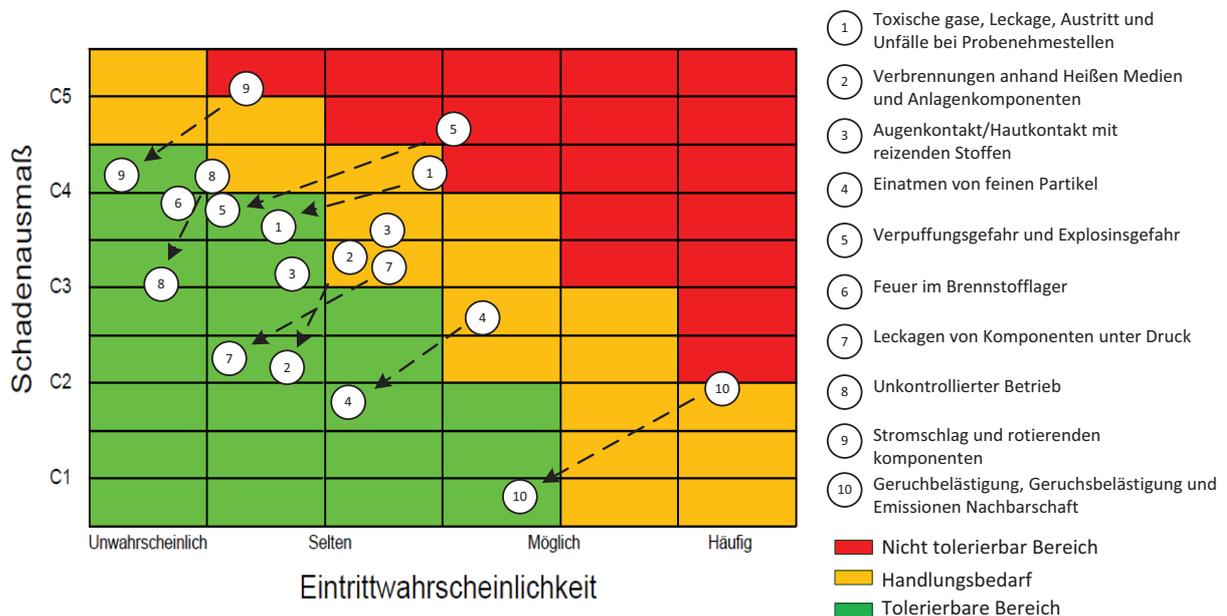


Abb. 2.16: Darstellung der möglichen Gefahren in einer Risikomatrix [18]

Ablauf der automatisierungstechnischen Abwicklung

Bei der Abwicklung von leittechnischen Aufgabenstellungen wird ein Grundkonzept entwickelt. Prozessingenieure sind gemeinsam mit Automatisierungs- und MSR-Technikern daran beteiligt und erstellen das Lastenheft. Das R&I-Schema dient als Grundlage für die Erstellung von Fließbildern für die PLT. Anschließend werden Lösungsvorschläge im Bezug auf das Lastenheft ausgearbeitet. Prozessgrafiken, Funktionspläne und Programmabläufe werden festgelegt. In DIN EN 62424 sind entsprechende Symbole betreffend der Errichtung von prozessleittechnischen Visualisierungen enthalten. Auf Basis des Lastenhefts wird ein Pflichtenheft erstellt (VDI/VDE 3694). Es berücksichtigt die Anbindung der Feldeinrichtungen, sicherheitsrelevante Funktionen, die Infrastruktur und beinhaltet die Ausarbeitung des PLT-Konzepts und eine grobe Kostenabschätzung. Im Basic Engineering der Versuchsanlage wurde bereits das Grundkonzept und R&I-Schema festgelegt. Anhand dieser Unterlagen und in Anlehnung an die Forschungsfrage sind im Zuge dieser Arbeit folgende Punkte umgesetzt:

1. Ausarbeitung des Pflichtenhefts

2. Erstellung einer MSR-Liste auf Basis des R&I-Schemas
3. Auswahl und Bestellung des Prozessleitsystems
4. Festlegung und Bestellung von Sensoren/Aktoren
5. Erstellung und Umsetzung des Automatisierungskonzepts
6. Erstellung und Umsetzung des Regelungs- und Verriegelungskonzepts
7. Erstellung und Umsetzung der Visualisierung

Ein Zeitplan hilft für eine termingerechte Fertigstellung und ist im Anhang unter B.3.1 zu finden. Nach Abschluss der automatisierungstechnischen Abwicklung kann mit der Inbetriebnahme fortgefahren werden. Im folgenden Kapitel sind Grundlagen und Abläufe zur Inbetriebnahme näher erläutert. [22]

2.3 Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen

Inbetriebnahmekosten belaufen sich auf bis zu 20 % der Gesamtprojektkosten und sind somit ein wesentlicher Kostenfaktor. Ein gutes Inbetriebnahmemanagement bewirkt einerseits einen reibungslosen Ablauf und hilft Kosten einzusparen. Im Weiteren werden Aufgaben, notwendige Vorbereitungen zur Inbetriebnahme und die eigentliche Inbetriebnahmephase näher erläutert. [47]

2.3.1 Aufgaben der Inbetriebnahme

Da diese Phase des Anlagenbaus oft zu Missverständnissen bei Fachausdrücken führt, werden hier einige grundlegende Begriffsdefinition zu dem Thema näher erklärt. Oft spricht man bei einer Inbetriebnahme irrtümlicherweise von der Erstinbetriebnahme einer Anlage. Dabei wird aber grundsätzlich von drei unterschiedlichen Inbetriebnahmen gesprochen. Generell beschreibt der Begriff Inbetriebnahme die Überführung einer Anlage *vom Ruhezustand in den Dauerbetrieb*. Der Begriff *Erstinbetriebnahme* wird dann verwendet, wenn eine Anlage erstmalig, nach mechanischer Fertigstellung, in den Dauerbetriebszustand übergeführt wird. Vor Projektbeginn muss im Anlagenvertrag Zeitpunkt und Inhalt der mechanischen Fertigstellung festgelegt sein und durch ein Abnahmeprotokoll bestätigt werden. Es muss klar definiert sein, welche Arbeiten zur Anlagenmontage bzw. zur Inbetriebnahme gehören. Die mechanische Fertigstellung ist ein wichtiger Meilenstein im Projektplan. Die *Wiederinbetriebnahme* erfolgt dann, wenn die Anlage aus dem Ruhezustand nach einer Abstellung in den Dauerbetrieb übergeführt wird. Die Anlage war vor dem Ruhezustand bereits in Betrieb. [47, 48]

Aus den Begriffsdefinitionen lässt sich bereits ableiten, dass eine Erstinbetriebnahme wesentlich aufwändiger und umfangreicher ist, als eine Wiederinbetriebnahme. Die Hauptaufgabe besteht darin, die Anlage in den Dauerbetrieb überführen zu können und den Betreiber gezielt einzuarbeiten, um dadurch den Umgang mit der Anlage zu erlernen. Oft stellen verfahrenstechnische Anlagen ein Risikopotential dar, daher ist in diesen Bereichen die Einschulungsphase besonders zu beachten. Der Betreiber muss über Risiken und Gefahren der Anlage Bescheid wissen und muss hinsichtlich sicherheitsrelevanter Bereiche intensiv geschult

werden. Die Schulung erfolgt mit Hilfe von Simulatoren, bei denen dem Anlagenpersonal verschiedene Anlagenszenarien simuliert werden, oder durch theoretische Schulungen und durch praktische Ausbildungen in ähnlichen Anlagen. [48]

Die Inbetriebnahme ist die letzte Phase der Projektabwicklung. Ziel ist es daher, die Inbetriebnahmephase möglichst kurz zu gestalten, da die Anlage aus theoretischer Sicht bereits produzieren könnte und somit Profit abwerfen würde. Die Anlage arbeitet längere Zeit nicht bei Nennlast, bzw. bei unwirtschaftlichen Bedingungen. Die erzeugten Produkte haben mindere Qualität und müssen teilweise sogar entsorgt werden. Folglich wird auf Inbetriebnahmetechniker starker Druck vom Anlagenbetreiber ausgeübt. Aber auch der Anlagenbauer drängt auf einen raschen Abschluss, da meistens erst nach der Inbetriebnahmephase Rechnungen an den Kunden gestellt werden dürfen. Daher ist eine strenge Abgrenzung zwischen dem Beginn und Abschluss einer Inbetriebnahme notwendig. Aufgrund von vertraglichen und rechtskonformen Grundlagen ist der Übergang zwischen der Inbetriebnahmephase und dem Betrieb genau definiert. Werden die Inbetriebnahmekosten näher betrachtet, so zeigt sich, dass bei bewährten Verfahren mit ca. 5 % bis 10 % der Gesamtkosten zu rechnen ist, bei neuen Verfahren liegen die Kosten bei ca. 15 % bis 20 %. [47]

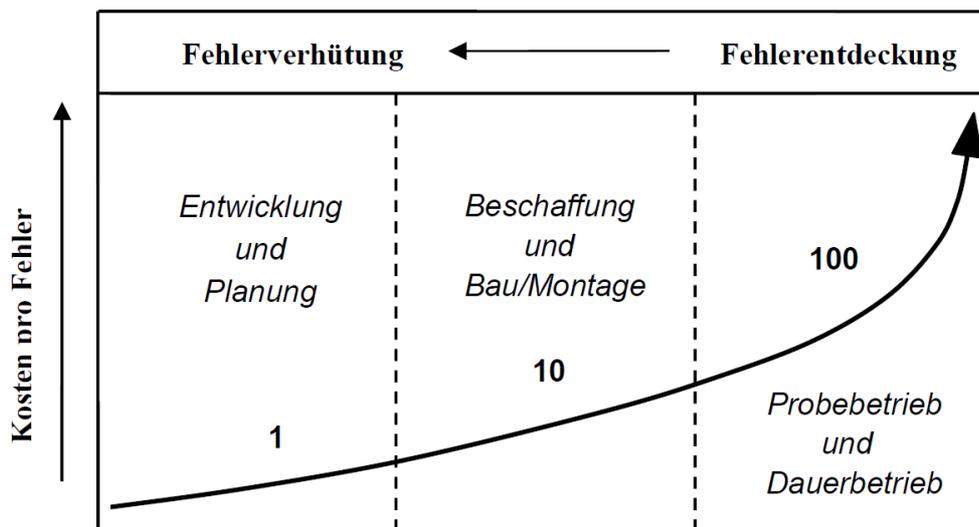


Abb. 2.17: Abhängigkeit der Fehlerbeseitigungskosten [47]

Aus der Sicht des Technikers ist diese Phase die wichtigste im gesamten Projekt. Hier werden Fehler in der Auslegung und der Montage sofort sichtbar. Erfahrungsgemäß sind 20 % bis 30 % durch Auslegungsfehler und 50 % bis 60 % durch Versagen von Anlagenkomponenten verursacht. Deshalb darf Qualitätsmanagement im Anlagenbau nicht vernachlässigt werden und ist ein wesentlicher Bestandteil, der leider häufig vernachlässigt wird. Bild 2.17 zeigt die Kostenentwicklung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Fehlerentdeckung. Können Fehler in der Inbetriebnahmephase nicht beseitigt werden, ist mit deutlich höheren Kosten und längeren Anlagenstillständen zu rechnen. Hinzu kommt, dass häufig weiterentwickelte Technologien und neue Verfahren eingesetzt werden, wo wenige Erfahrungswerte existieren. Bereits im Prozessdesign muss auf etwaige Schwierigkeiten der Inbetriebnahme Rücksicht genommen werden. Jeder Fehler, der im Anfangsstadium der Entwicklung beseitigt werden kann, ist um ein Vielfaches günstiger, als eine Fehlerbeseitigung im Probetrieb bzw. bei der Inbetriebnahme. [48, 49]

In der Industrie werden häufig Inbetriebnahmekonzepte erstellt, die den genauen Ablauf der Inbetriebnahme dokumentieren. Diese Konzepte werden bereits im Basic Engineering berücksichtigt. Folgende Punkte sind dabei wesentlich:

- Gestaltung einer effizienten Reihenfolge der Inbetriebnahme von Anlagenteilen
- Vermeidung von Behinderungen von, sich im Betrieb befindlichen vor- und nachgeschalteten Anlagen
- Verringerung des Risikos, dass sensible Anlagenteile beschädigt werden
- Umweltbelastende Betriebszustände bei der Inbetriebnahme vermeiden
- Berücksichtigung von instabilen Betriebszuständen von Anlagenteilen
- Bewertung und Minimierung von technischen Risiken und Verfahrensrisiken

Bereits im Basic Engineering der Versuchsanlage wurde auf obige Punkte Rücksicht genommen und die Anlagenplanung dementsprechend gestaltet, um eine möglichst schnelle und risikoarme Inbetriebnahme zu gewährleisten. [22] Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage ist in zwei Phasen gegliedert:

Kaltinbetriebnahme: In dieser Phase wird ein Konzept für die Versuchsanlage entworfen und implementiert, um möglichst viele Anlagenteile inklusive Sensoren und Aktoren im "kalten" Zustand zu testen. Fluidodynamische Untersuchungen sollen anhand von Druck- und Druckgradientenverläufen zeigen, dass das Design des Wirbelschichtreaktorsystems funktioniert. Etwaige Mängel sollen aufgezeigt werden. Des Weiteren ist in dieser Arbeit die Funktionstüchtigkeit der eingebauten Messblenden zur Ermittlung der Produktgas- und Abgasvolumenströme zu testen und die auftretenden Messfehler zu ermitteln.

Heißinbetriebnahme: Diese Phase ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit, wird jedoch zur Vollständigkeit erwähnt. In dieser Phase sind alle noch nicht getesteten Bauteile zu überprüfen. Die im PLS festgelegten Betriebsphasen der Anlage sind zu überprüfen. Die Anlage muss vollständig angefahren, ein stabiler Betrieb ermöglicht und wieder abgefahren werden.

2.3.2 Inbetriebnahmemanagement

Inbetriebnahmekosten liegen wie eingangs erwähnt bei 5 % bis 20 % der Projektkosten, abhängig von der Art und dem Neuheitsgrad der Anlage. Durch Verzögerungen und Störungen während der Inbetriebnahme kommt es häufig zu erhöhten Kosten. Daher macht es durchaus Sinn, Gedanken über das Inbetriebnahme-Management zu investieren. Wichtige Maßnahmen, die zu Einsparungen von Inbetriebnahmekosten führen, sind folgende:

1. Minimierung des Risikos der Anlage bereits in der Planungsphase
2. Qualitätsmanagement in allen Phasen der Auftragsabwicklung
3. Die Inbetriebnahme in jeder Phase des Projektes beachten (beginnend bei der Entwicklung)
4. Erarbeitung einer projektbezogenen Inbetriebnahmedokumentation

5. Effektives Inbetriebnahmemanagement realisieren
6. Erfahrene und belastbare Inbetriebnahmetechniker einsetzen
7. Einbeziehung des Betriebspersonals in die Inbetriebnahme

Dabei ist es - wie bereits erwähnt - von essentieller Wichtigkeit, dass bereits in der Planungsphase die Inbetriebnahme berücksichtigt wird. Das Verfahrensrisiko sinkt, die Inbetriebnahmedauer wird reduziert und ein rasches Anfahren der Anlage wird dadurch ermöglicht. [25, 47] Um die Inbetriebnahmekosten möglichst gering zu halten, werden in dieser Arbeit Methoden für eine rasche Inbetriebnahme erarbeitet und umgesetzt.

2.3.3 Sicherheit bei Inbetriebnahmen

Bei Inbetriebnahmen von verfahrenstechnischen Anlagen herrscht ein erhöhtes Sicherheitsrisiko. Fehler und Mängel von vorhergehenden Arbeiten sind immer vorhanden und können zu gefährlichen Anlagenzuständen führen. Deswegen existieren Normen und Regeln, die zu berücksichtigen sind. Speziell für Österreich ist das Bundesumweltgesetz (BGBl I 55/2009) und die Industrieunfallverordnung (BGBl II 354/2002) zu erwähnen.

Prüfberichte nach Abschluss von Meilensteinen (Anlagenentwicklung, Entwurf, Ausführung, Montage, Inbetriebnahme) führen zu erhöhter Sicherheit der Anlage. Dabei sind einige sicherheitsrelevante Dokumente Pflicht bei der Betreuung von Anlagen, z.B. die CE-Konformitätserklärung aus der Druckgeräte-Richtlinie 97/23/EG. Ein Betriebshandbuch, in dem alle relevanten Anlagenkenndaten und sicherheitstechnische Anweisungen für das Betriebspersonal angeführt sind, erhöht die Sicherheit der Inbetriebnahmephase enorm und ist daher unerlässlich. Im Weiteren kann diese auch für Schulungszwecke und Beschreibung von verschiedenen Betriebsvarianten verwendet werden. Wichtige Dokumente, die das Thema Anlagensicherheit betreffen, sind in Bild 2.18 dargestellt. Hier sind, von der Entwicklung bis zur fertigen Anlage, alle Projektphasen einbezogen. [47]

Zum Punkt finanzielle Sicherheit wird hier ergänzend auch ein Versicherungskonzept für verfahrenstechnische Anlagen angeführt. Da bei verfahrenstechnischen Anlagen im Allgemeinen mit hohen Investitionen zu rechnen ist, besteht auch ein finanzielles Risiko, das durch zusätzliche Versicherungen abgedeckt werden kann. Dafür gibt es unterschiedliche Versicherungsmöglichkeiten, im Rahmen des Anlagenprojektes. [47]

Als Vorbereitung der Inbetriebnahme der Versuchsanlage und zur Erhöhung der Sicherheit sind alle am Projekt mitwirkenden Personen in die Funktionsweise des PLS einzuweisen. Spezielle Einschulungen erfolgen in folgenden Bereichen:

- Umgang und Handhabung mit dem PLS der Versuchsanlage
- Einführung in die automatisierten Objekte der Sensoren und Aktoren
- Alarmmanagement und Trendaufzeichnung
- Anfahr- und Abstellprozeduren der Versuchsanlage
- Funktionsweise der Regelungskonzepte

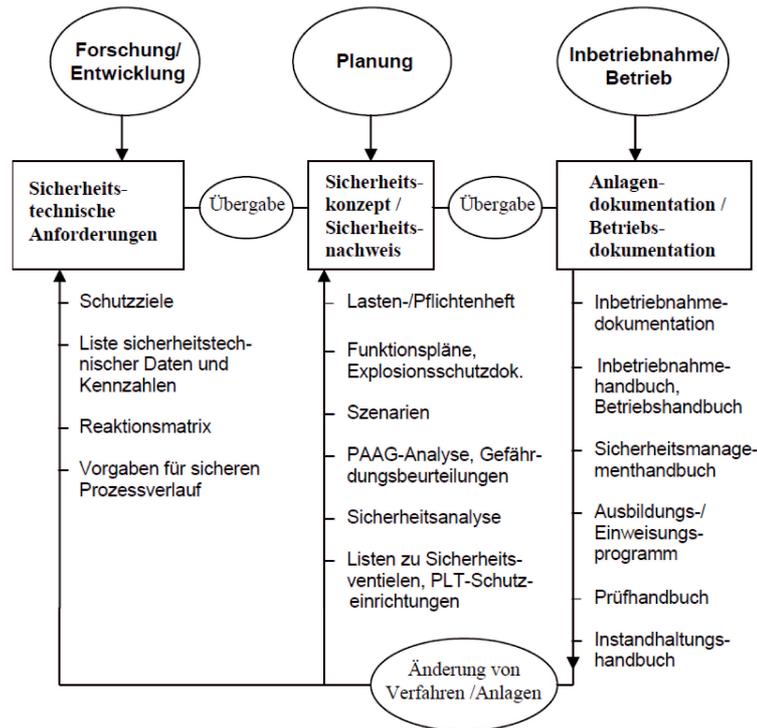


Abb. 2.18: Dokumente zur Anlagensicherheit [47]

2.3.4 Vorbereitung der Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Damit die Inbetriebnahmephase so kurz wie möglich dauert, muss diese zuvor genau durchgeplant werden. Dazu zählen unterschiedliche Phasen (siehe Bild 2.19) die im Folgenden näher erläutert werden. Die aufgelisteten Punkte dienen gleichzeitig auch als Leitfaden für die Inbetriebnahme der Versuchsanlage.

Qualitätskontrolle der Versuchsanlage

Zu Beginn ist eine Qualitäts- und Montagekontrolle der Versuchsanlage durchzuführen. Temporäre Einrichtungen sind abzubauen und alle sicherheitstechnischen Einrichtungen werden auf ihre Funktion überprüft. Eine Montageendinspektion ist vorzunehmen. [47]

Reinigung und Spülung der Versuchsanlage

Eine Reinigung der Versuchsanlage ist gegebenenfalls durchzuführen, damit Anlagenteile keinen Schaden durch vergessene Bauteile, Schrauben, etc. nehmen. Durch das darauffolgende Ausblasen mit Luft oder Dampf und Spülen mit Flüssigkeit (ggf. auch Beizen der Anlage bei anorganischen Verunreinigungen an der Oberfläche) wird gewährleistet, dass die komplette Anlage frei von Verunreinigungen wie Fetten, Ölen und Feststoffen ist. Anschließend ist die Versuchsanlage auf ihre Dichtheit zu überprüfen. [47]

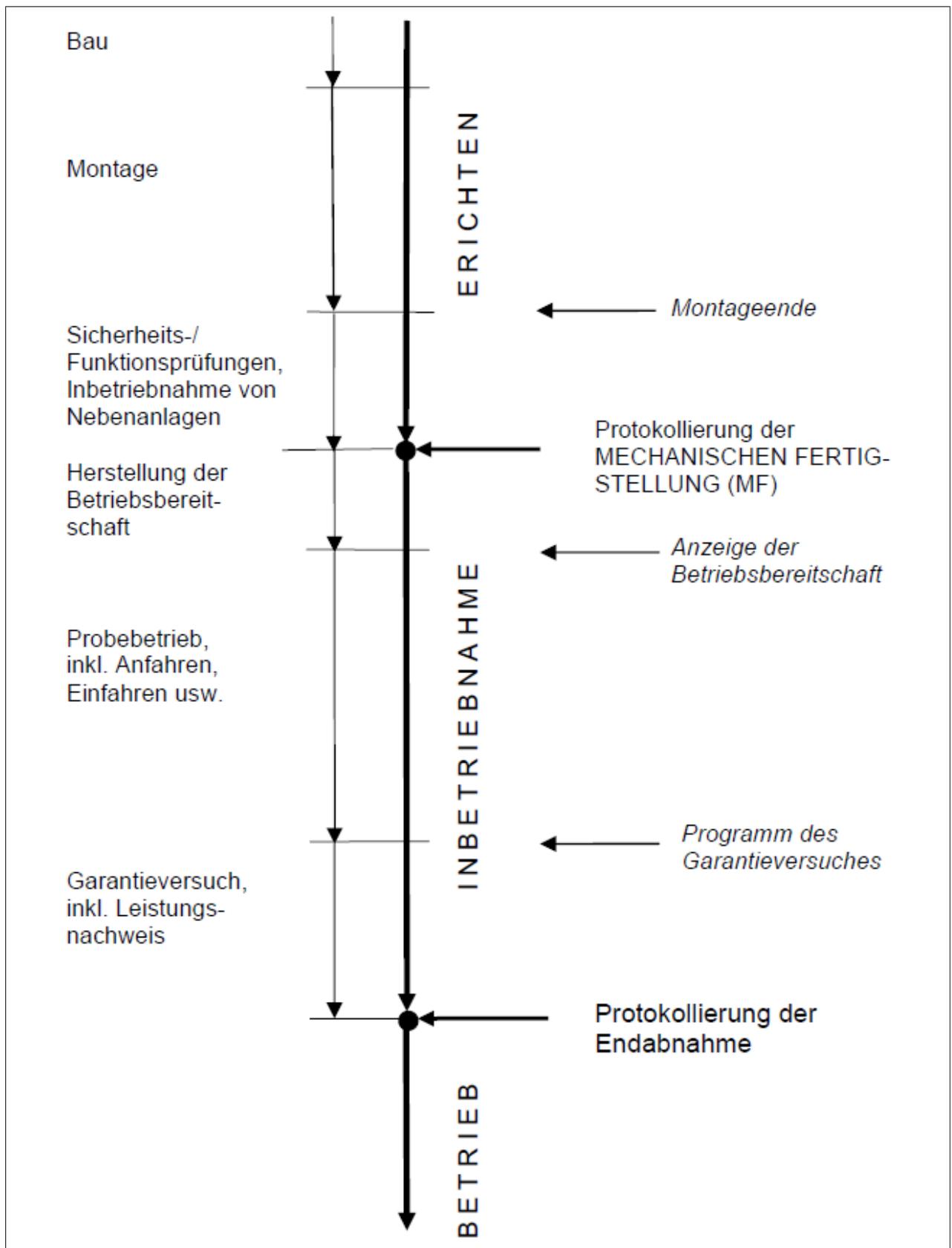


Abb. 2.19: Hauptphasen der Inbetriebnahme [47]

Abnahmeprüfung

Nun erfolgt die Abnahmeprüfung der sicherheitsrelevanten Anlagenbauteile. Dabei sind die jeweils geltenden Normen und Richtlinien zu beachten. Hier erfolgen auch behördliche Kontrollen. Vor der Inbetriebnahme müssen alle notwendigen Dokumente (Freigabe-, Prüfbescheinigungen, CE-Konformitätserklärungen) vorliegen. Da die Versuchsanlage nicht unter die Druckgeräterichtlinie (DGRL) fällt, muss diese von der Behörde nicht geprüft und abgenommen werden. Als Druckgeräte im Sinne der Richtlinie gelten nur Teile mit einem inneren Überdruck von mehr als 0,5 bar. Einzig der Dampferzeuger fällt unter die DGRL und braucht daher ein Abnahmezeugnis von einer benannten Stelle. Der Dampferzeuger muss in regelmäßigen Abständen inspiziert werden. [47]

Loop-Check und Factory Acceptance Test der Versuchsanlage

Zur Überprüfung der MSRT der Versuchsanlage muss ein IO-Check (Loop-Check) durchgeführt werden, der sicherstellt, dass alle Messdaten, Stellarmaturen, Motoren, Pumpen und andere elektrische Bauteile einwandfrei funktionieren und im PLS richtig angezeigt werden. Eine Kalibrierung und Eichung aller Messstellen ist durchzuführen. Mit Hilfe von Stromlaufplänen ist die Signalübertragung von den Feldgeräten zum PLS zu prüfen. Dazu zählt auch das Testen von Alarmen, wie z.B. die Drahtbruchüberwachung, die bei Unterbrechung der Signalleitung einen Alarm absetzt. Anschließend wird umgekehrt der Signalweg vom PLS zu den Motoren und Armaturen geprüft, indem Stellsignale vorgegeben werden und im Feld die Ausführung der Schalthandlungen überprüft wird. Im Anschluss an den IO-Check ist ein umfangreicher Factory Acceptance Test (FAT) durchzuführen, um Programmteile auf ihre richtige Funktionsweise zu überprüfen. Dies ist zugleich der Abnahmetest für das PLS. Außerdem gilt es, die funktionsgerechte Montage der Hard- und Software zu überprüfen. [43]

Nach Abschluss dieser Tätigkeiten ist die Versuchsanlage elektrisch und mechanisch überprüft und das Programm im PLS getestet. Nun kann mit der Dichtheitsprüfung der Anlage begonnen werden.

Dichtheitsprüfung und Inertisieren der Anlage

Die Dichtheitsprüfung gewährleistet die vollkommene Dichtheit der Anlage. Diese wird durch eine Druckprobe von Apparaten, Behältern und Rohrleitungssystemen (meist mit Luft oder Stickstoff) bei einem Überdruck von 0,3 bar bis 1 bar durchgeführt. Anschließend wird die Anlage auf Leckagen überprüft und der Druckabfall über die Zeit beobachtet. Nach Sicherstellung der Dichtheit wird bei verfahrenstechnischen Anlagen häufig eine Inertisierung durchgeführt, damit unerwünschte Nebenreaktionen (z.B. mit Sauerstoff) ausbleiben. Hierzu wird meist N_2 oder CO_2 verwendet [50]. Dies ist bei der Versuchsanlage nicht notwendig. [47, 48]

Zum Abschluss wird das Prüfhandbuch zusammengestellt, indem alle gesetzlichen und behördlichen Prüfdokumente enthalten sind. Eine Anlagendokumentation enthält detaillierte Anlagenpläne, Abnahmeprotokolle, MSR-Listen, PLT-Dokumentationen, Schaltpläne, R&I-Fließbilder, Ausrüstungslisten, Datenblätter usw. Nun gilt die Anlage als *mechanisch fertiggestellt*. Es folgt das abschließende Protokoll "Mechanische Fertigstellung", das beim Anla-

genbauer sehr beliebt ist, da dadurch meist eine weitere Zahlungsstranche erfolgt. Die Anlage wird von der Montageleitung an die Inbetriebnahmeleitung übergeben. Das Montageteam bleibt jedoch meist an der Anlage, um für anfallende Reparaturen zur Verfügung zu stehen. Es beginnt die Erstinbetriebnahme. [47, 48]

2.3.5 Erstinbetriebnahme

Bei der Erstinbetriebnahme wird die Anlage vom Ruhezustand in den Betriebszustand übergeführt. Dieser Teil wird als "Anfahren" bezeichnet und ist einer der heikelsten Phasen des Projektes. Dabei wird in drei Phasen unterteilt: Herstellung der Betriebsbereitschaft, Probebetrieb und Garantiversuch. [47]

Herstellung der Betriebsbereitschaft

Zu Beginn wird ggf. die Anlage erneut gereinigt und Ausbildungsmaßnahmen, die noch fehlen am Betriebspersonal fortgeführt. Das Inbetriebnahmeteam macht sich mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut. Bei komplexen Anlagen wird eine Wasserfahrt durchgeführt und dabei die Funktionstüchtigkeit der Gesamtanlage mit Wasser und Luft/Stickstoff getestet und spezielles Augenmerk auf verfahrenstechnische Funktionen gelegt. Auf eine Wasserfahrt wird bei der Versuchsanlage jedoch verzichtet. Ist die Anlage vollständig funktionstüchtig, wird das Protokoll "Anzeige der Betriebsbereitschaft" angefertigt und mit dem schrittweisen Anfahren begonnen. Wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, wird bei der Versuchsanlage in Kaltinbetriebnahme und Heißinbetriebnahme unterteilt. [47]

Kaltinbetriebnahme der Versuchsanlage

Die Kaltinbetriebnahme zeigt, dass die individuell getesteten Komponenten auch im Kollektiv funktionieren. Dazu gilt es, die Messtechnik und Aktorik auch unter Last zu überprüfen. Hier ist speziell die Drucksensorik mit den Splleitungen zu erwähnen. Anschließend werden nach Möglichkeit die ausgearbeiteten Regelungskonzepte getestet. Funktionieren die für die Kaltinbetriebnahme relevanten Bereiche, kann mit dem ersten Anfahrvorgang begonnen werden. Die Darstellungen der Druck- und Druckgradientenprofile entlang der Reaktoren zeigen erste Ergebnisse des Verhaltens der Wirbelschichten. Diese sind in Kap. 5.3 dargestellt. Nach erfolgreichem Abschluss des Kaltversuchs sind noch fehlende Bauteile wie Heizstäbe, Begleitheizungen, etc. nachzurüsten und aufgetretene Probleme zu beseitigen. Alle weiteren Tätigkeiten bis zur "heißen" Inbetriebnahme sind nicht Teil dieser Arbeit. Sie werden hier jedoch als Anleitung für die Heißinbetriebnahme der Versuchsanlage angeführt.

Heißinbetriebnahme der Versuchsanlage

Im Allgemeinen kann keine Anfahrstrategie festgelegt werden, da dies stark vom Verfahren abhängt. Prinzipiell werden zu Beginn Teilanlagen getrennt angefahren und nach Erreichen eines stabilen Zustandes miteinander gekoppelt. Rückkopplungen sind so spät wie möglich in Betrieb zu nehmen, um Instabilitäten zu vermeiden. Für die Versuchsanlage ist ein ein

Anfahrprozedere und Abstellprozedere entwickelt und in das PLS implementiert worden. Dies kann in Kap. 4.3.1 nachgeschlagen werden.

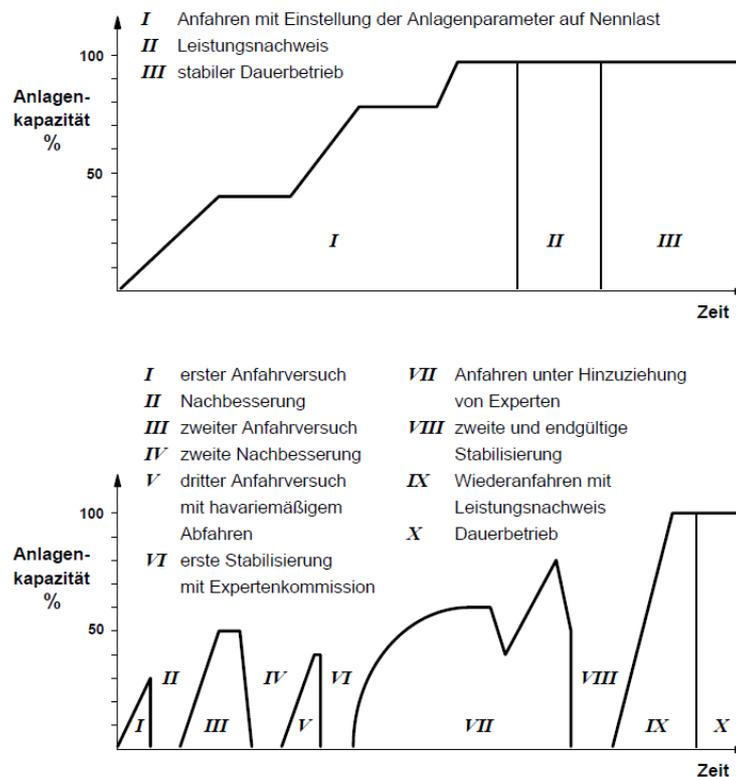


Abb. 2.20: Beispiele für Lastverläufe im Probetrieb [47] oben: ideal, unten: real

Während des Anfahrprozesses wird das PLS genau beobachtet, da hier alle Daten und Kennwerte der Anlage zusammenlaufen. Schwachstellen und Fehler sind möglichst im Betrieb zu beheben. Falls das Anfahrprozedere erfolgreich funktioniert und ein stabiler Arbeitsbetrieb erreicht wird, kann die Anlage auf eine Leistung von ca. 60 % hochgefahren werden. Dies gewährleistet noch einen halbwegs wirtschaftlichen und gleichzeitig schonenden Betrieb. Im Anschluss werden Inspektionen durchgeführt, die auf Undichtheiten, akustische Signale, Laufunruhe von Motoren, etc. achten. Laufen alle Funktionen ordnungsgemäß ab, wird die Anlage auf Probetrieb hochgefahren. Das erfolgt stufenweise, in 10 %-Schritten, bis die Nennlast erreicht ist. Bis hier wird die Anlage groÙteils per Hand gefahren, d.h. alle Regelungen und Schrittketten sind auÙer Betrieb, Motoren und Armaturen auf Hand geschaltet. Bild 2.20 zeigt Beispiele, wie Lastverläufe im Probetrieb ablaufen können. Dabei kann gesagt werden, dass für den Fall a) das Inbetriebnahmepersonal erfahren sein muss und die Anlage kaum Schwachstellen aufweist, sei es auf dem Gebiet der PLT, der MSRT oder dem Anlagenbau. Nun wird langsam auf automatische Fahrweise umgestellt und dabei die Auswirkungen genau beobachtet. Regelungen werden aktiv und müssen parametrieren. Schrittketten, die Abläufe abarbeiten sind genau zu kontrollieren. Besondere Fahrweisen wie zulässige Lastschwankungen und verfahrenstechnische Sonderfahrweisen werden getestet, um Fehler und Gefahren zu erkennen und zu beseitigen. [47]

Das nächste Ziel ist das Erreichen von vorgegebenen Produktmengen und Qualitäten, indem die Anlage weiter optimiert wird. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf den Regelkreisen. Mit Hilfe von unterschiedlichen Werkzeugen kann das Feintuning der Regler durchgeführt

werden (siehe Kap. 2.2.2). Während des Probetriebs sind fortlaufend Leistungsdaten zu protokollieren, Analysen und Bilanzen zu berechnen und in ein Betriebshandbuch einzutragen, das zum Abschluss dem Anlagenbetreiber übergeben wird, aber auch dem Anlagenbauer als Dokumentation dient. Dies führt z.B. zu Erleichterungen beim Scale-Up und bei Weiterentwicklungen von Folgeanlagen. Nach erfolgreichem Probetrieb wird die Anlage heruntergefahren - das so genannte Abfahrprozedere beginnt. Die Anlage wird vom Dauerzustand in den (temporären) Aussetzbetrieb übergeführt. Das Risiko beim Abfahren ist wesentlich geringer, da das Inbetriebnahmeteam bereits Erfahrung mit der Anlage während des Probelaufs gesammelt hat. [47]

Die Außerbetriebnahme führt, im Unterschied zum Abfahren, die Anlage in einen längeren Stillstand - die Anlage wird kalt gefahren, drucklos gemacht und entleert (z.B. für Wartungsarbeiten). Beide Betriebsarten finden planmäßig statt. Die Not-Aus-Schaltung ist eine ungeplante Überführung der Anlage in den gefahrlosen Zustand, welche automatisch oder per Hand ausgelöst wird. Auf jeden Fall müssen alle drei Betriebsarten während der Inbetriebnahmephase getestet werden. [47]

Garantiever such

Im anschließenden Garantielauf wird überprüft, ob die vertraglich vereinbarten Leistungen erfüllt sind. Dieser ist bei kontinuierlich betriebenen Anlagen meist auf 72 Stunden begrenzt. In diesem Zeitraum werden alle Fahrweisen und Funktionen der Anlage auf ihre Übereinkunft mit dem Pflichtenheft verglichen. Der Leistungsnachweis stellt eine Abnahmeprüfung der Gesamtanlage dar. Dabei sind Menge und Qualität des Produktes, der Energieverbrauch und andere im Vertrag vereinbarte Leistungen entscheidend. Bei erfolgreicher Abnahme erfolgt die Anlagenübergabe an den Betreiber - die Inbetriebnahmephase ist abgeschlossen. Das Übernahmeprotokoll, welches im Allgemeinen einen Auswertungsbericht des Garantielaufes und etwaige Beanstandungen enthält, wird ausgestellt. Bei der technischen Gewährleistung garantiert der Auftragnehmer für eine funktionierende Anlage (Materialgarantie), welche generell eine Laufzeit über 12 bzw. 42 Monate hat. [47]

Da es sich bei dieser Anlage um eine Versuchsanlage handelt, ist kein Garantielauf notwendig.

2.4 Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen

Aufgrund von gesetzlichen Auflagen, erhöhten Anforderungen der Sicherheit, Gesundheit, Umwelt, hohem Termin- und Kostendruck und Qualitätssicherung, ist die Dokumentation von Anlagen unerlässlich. In den nächsten Unterkapiteln werden Bestandteile, Strukturierung und Inhalt von Anlagendokumentationen näher erläutert und auf rechtliche Aspekte eingegangen. In DIN EN 61355-1, DIN EN 82045 sind Definitionen und Erläuterungen zum Thema Dokumentation enthalten. Dieser Abschnitt der Arbeit soll helfen, die Versuchsanlage möglichst umfangreich zu dokumentieren, sodass wichtige Informationen schriftlich festgehalten und weitergegeben werden können.

2.4.1 Bestandteile der Dokumentation

Die Anlagendokumentation beinhaltet alle Dokumente, die die Anlage beschreiben. Bezüglich Aufbau und Funktion wird in folgende Unterpunkte gegliedert:

1. Verfahrenstechnik
2. Bau/Stahlbau
3. Apparate/Behälter/Maschinen
4. Rohrleitungen
5. Prozessleittechnik und Elektrotechnik
6. Technische Gebäudeausrüstung
7. Inbetriebnahme
8. Teilanlagen (package units)
9. Allgemeines/Sonstiges

Dies umfasst jedoch nur die technische Dokumentation. Zusätzlich wird eine Betriebsdokumentation angelegt, in der die sichere und wirtschaftliche Betriebsführung, die Gewährleistung des Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutzes und die Sicherung der Produktqualität enthalten ist. Die Erläuterung aller Dokumententeile würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In [51] findet man nähere Details zum Thema Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen. Die wichtigsten Inhalte der Dokumentation werden nun näher erläutert.

Teildokumentation Verfahrenstechnik

Die Teildokumentation Verfahrenstechnik beinhaltet Informationen über das Verfahren und eingesetzte Technologien. Die wichtigsten Inhalte sind Fließbilder (Grundfließbild, Verfahrensfließbild und R&I-Schema nach DIN EN ISO 10628), Lagepläne, Ausrüstungslisten (Apparate, Behälter, Motoren, Ventile, etc.) und Explosionsschutzdokumente. [51]

Teildokumentation Prozessleittechnik und Elektrotechnik

Der Inhalt der Dokumentation für Prozessleittechnik und Elektrotechnik ist in Bild 2.21 dargestellt. Die MSR-Liste liefert Details zu Gerätedaten, Einbauort, Funktionsbeschreibung und Verweise auf Datenblätter der Hersteller. Teil der MSR-Liste ist die Alarm- und Verriegelungsliste, die sicherheitsrelevante Daten beinhaltet (z.B. bei welchen Bedingungen das Ventil öffnen darf, Grenzwerte für Messungen, etc.). Detaillierte Beschreibungen von PLS-Schränken, Kabelbezeichnungen, Anschlussbelegungen sind ebenfalls Teil der Dokumentation. Programmtechnische Funktionen des PLT-Systems werden in einem Funktionsplan durch grafische Symbole dargestellt (meist beinhalten PLT-Systeme ein Tool, mit dem automatisch Funktionspläne graphisch exportiert werden können). Regelungen sind im Regelungsschema festgehalten, Ablaufschrittketten können in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm veranschaulicht werden. Softwarestellenpläne beschreiben Programmabläufe und

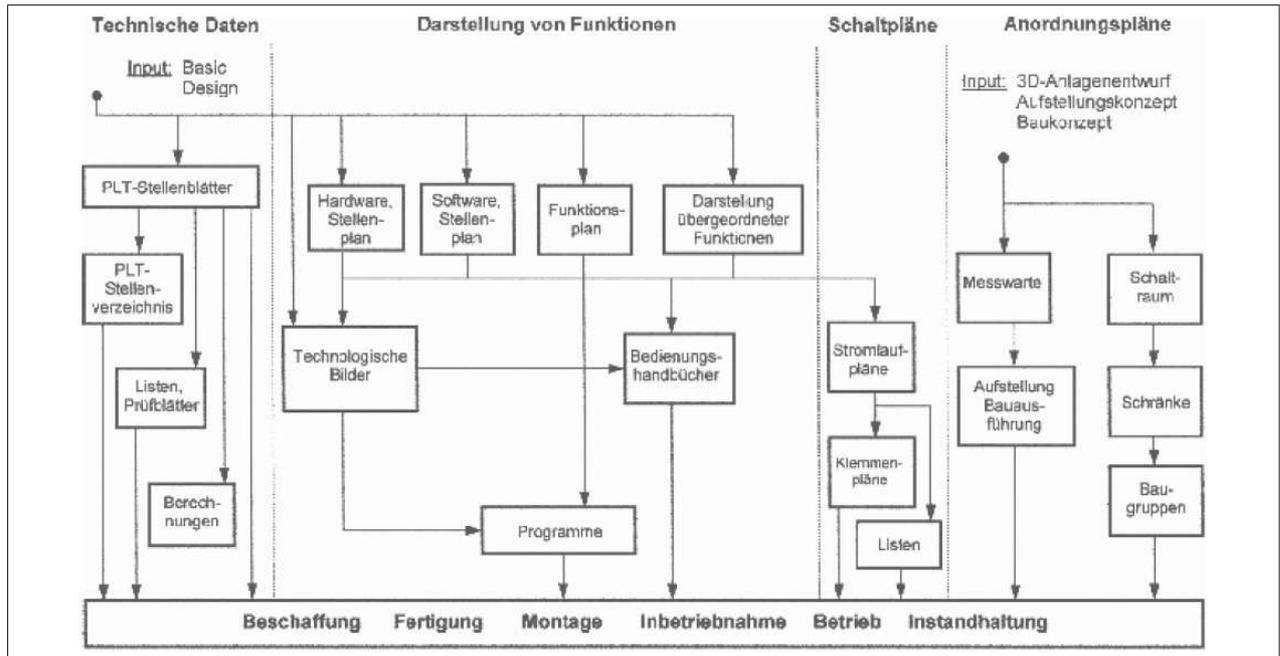


Abb. 2.21: Inhalt der Teildokumentation Prozessleittechnik und Elektrotechnik [51]

Programmanweisungen. Ebenfalls Teile der PLT-Dokumentation sind Pflichtenheft, Bedienungshandbuch der PLT und Beschreibungen aller PLT-Funktionen (Schalthandlungen von Armaturen, Betriebsmodi, etc.). [51]

Im Bereich der Elektrotechnik werden Übersichtspläne (vereinfachte Darstellung einer Schaltung), Stromlaufpläne (detaillierte Darstellung einer Schaltung), Klemmenlisten (Anschlusspunkte der MSRT an die SPS) und Aufstellungspläne für Leitwarten und Schaltschränke angeführt. Weitere Protokolle sind in den Normen DIN EN 60617 und DIN EN 61082-1 und in [51] angeführt.

Teildokumentation Inbetriebnahme

Die Teildokumentation der Inbetriebnahme ist sehr umfangreich. Die wichtigsten Inhalte sind die Protokolle zur mechanischen Fertigstellung, zur Anzeige der Betriebsbereitschaft und ein Leistungsnachweisprotokoll, da diese Meilensteine den Projektplan abbilden. Eine detaillierte Auflistung des Inhalts der "Teildokumentation Inbetriebnahme" ist in [51] angegeben. In die Betriebsdokumentation fließen Erkenntnisse aus der Inbetriebnahmephase, in welcher Arbeits- und Betriebsanweisungen an das Bedienungspersonal hinterlegt werden, ein.

Kapitel 3

Aufbau der Versuchsanlage

In den folgenden Kapiteln wird die an der TU Wien entwickelte Versuchsanlage näher vorgestellt. Einzelne Teilbereiche werden hervorgehoben und ihre Funktionen hinsichtlich der MSRT näher erläutert. Als Einstieg zeigt Bild 3.1 einen schematischen Aufbau der Versuchsanlage, mit den wichtigsten Baugruppen.

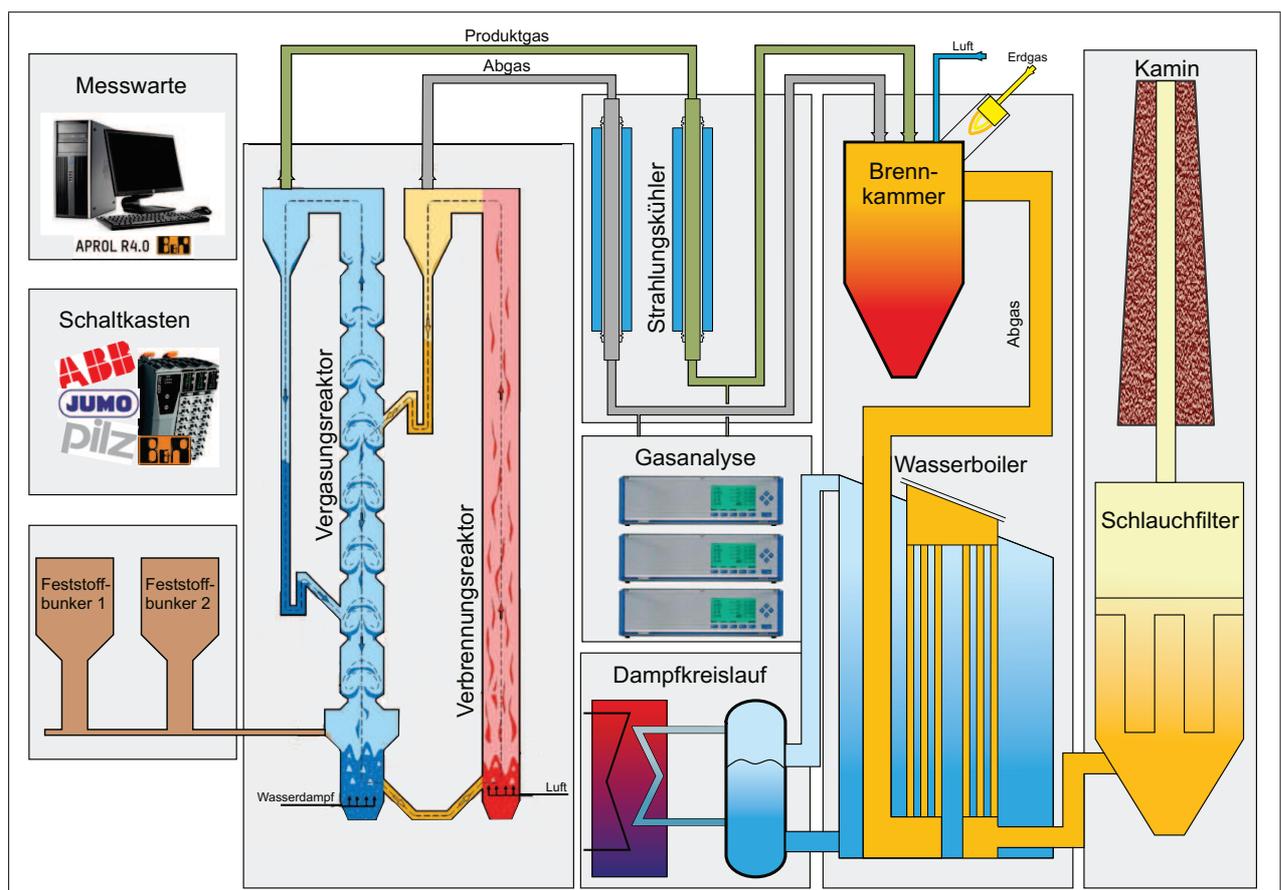


Abb. 3.1: Anlagenschema der neuen DUAL FLUID Versuchsanlage

3.1 Anlagentechnik

3.1.1 Wirbelschichtreaktorsystem

Das Wirbelschichtreaktorsystem mit dem Vergasungsreaktor (FR) und dem Verbrennungsreaktor (AR) bilden das Herzstück der Versuchsanlage. Hier finden die erforderlichen Reaktionen zur Produktgaserzeugung statt. Abb. 3.2 zeigt den schematischen Aufbau der Reaktoren. Die geometrischen Modifikationen im FR garantieren eine erhöhte Gas/Feststoff-Interaktion im Vergleich zu anderen Reaktorkonzepten.

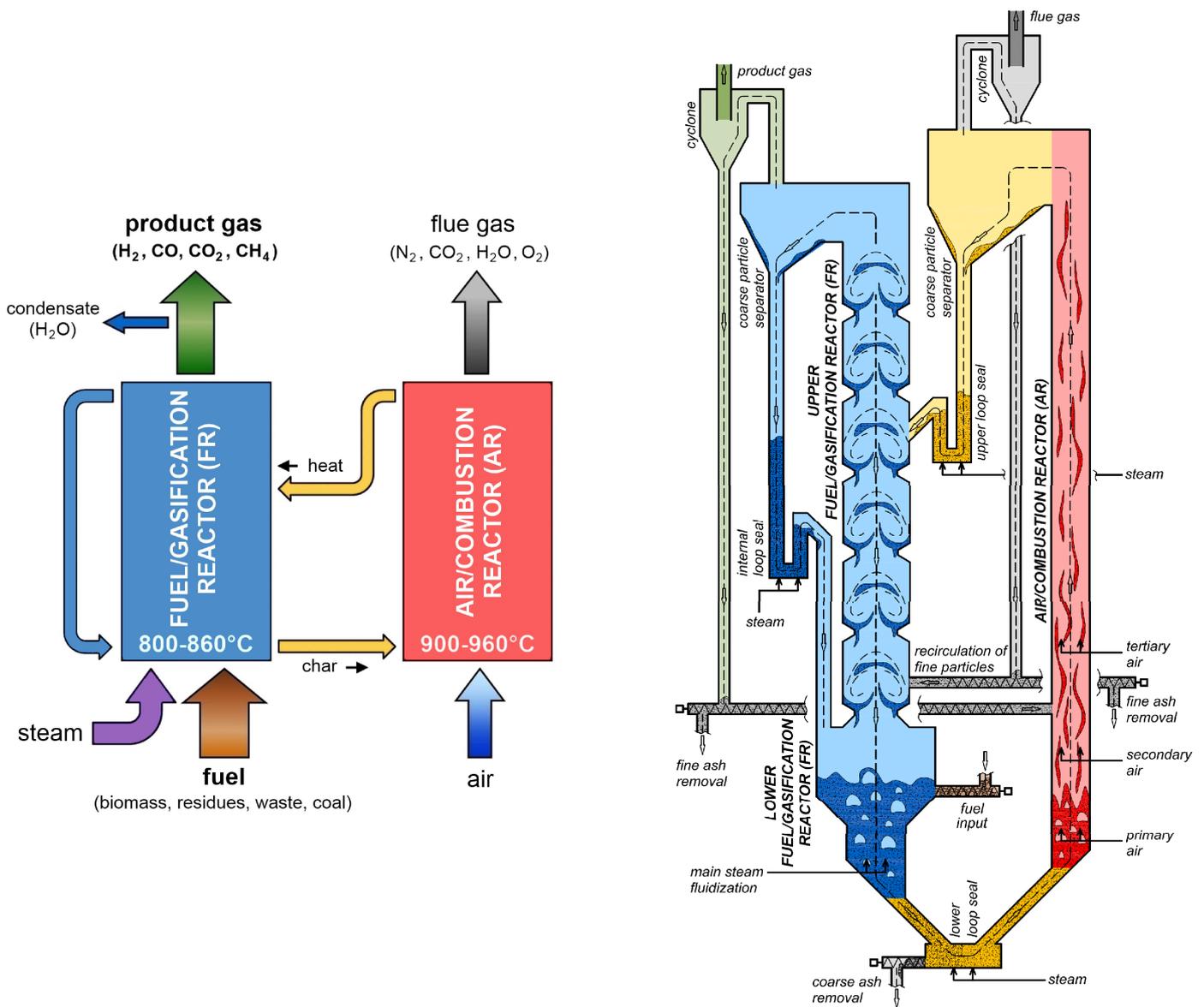


Abb. 3.2: links: Prinzip der DUAL FLUID Vergasungstechnologie, rechts: Reaktordesign der neuen Versuchsanlage [10]

Der FR ist eckig ausgeführt und mit dem Internal Loop Seal (ILS) erweitert worden. Der AR ist als runder Reaktor ausgeführt. Beide Reaktoren sind durch den Lower Loop Seal (LLS) und den Upper Loop Seal (ULS) miteinander verbunden. Das System besteht aus

zwei Feststoffumläufen, die weitestgehend von einander entkoppelt sind. Deshalb sind beide Reaktoren prinzipiell als zirkulierende Wirbelschichten ausgeführt. Es wird angestrebt, dass ein Großteil des Bettmaterials vom ULS im FR kaskadenweise nach unten fällt. Somit wird ein Gegenstrom zwischen heißem Bettmaterial und aufsteigenden Produktgasen gewährleistet. Wasserdampf dient im FR als Vergasungsmittel, damit wird der Festbrennstoff in ein Gas umgewandelt. Die notwendige Energie für die Vergasung wird durch das Erwärmen des Bettmaterials im AR bereitgestellt und über den ULS dem FR zugeführt. Der AR wird mit Luft fluidisiert. Im AR findet die Aufheizung des Bettmaterials durch die Verbrennung von Restkoks statt. Dieser rutscht mit dem Bettmaterial über den untenliegenden LLS vom FR in den AR. Der Restkoks entsteht durch unvollständige Vergasung im FR. Genauere Vorgänge können im Kap. 2.1 nachgelesen werden.

Der FR besteht aus zwei Teilen:

unterer Bereich des FR: In diesem Bereich ist der Reaktor stark mit Brennstoff beaufschlagt. Es bildet sich eine blasenbildende Wirbelschicht aus. Üblicherweise wird im unteren FR der feste Brennstoff über Pyrolyse/Entgasungs- und Vergasungsreaktionen in ein Produktgas umgewandelt. Die Rückstände (Koks) wandern über den LLS in den AR. [22]

oberer Bereich des FR: Dieser Teil ist als Gegenstromkaskade ausgeführt. Das Produktgas strömt von unten nach oben. Im Gegenzug strömt das Bettmaterial aus dem ULS überwiegend in den unteren Bereich. Hier befinden sich spezielle Kammern/Taillierungen die die Gas-Feststoffinteraktion fördern. [22]

In Tab. 3.1 sind die Abmessungen der Reaktoren dargestellt. A_c/A gibt dabei das Öffnungsverhältnis wieder und beschreibt das Verhältnis zwischen der offenen Fläche und der Gesamtfläche in den Taillierungen des oberen FR. Bild 3.3 zeigt dazu die geometrisch korrekt dargestellten Abmessungen der Reaktoren (Innenmaße).

Tab. 3.1: Abmessung (Innenmaße) der Reaktoren

	Höhe	Reaktorquerschnitt	A_c/A
Fuelreaktor	4,92 m	□ 128 mm	20-36 %
Airreaktor	5,29 m	Ø 125 mm	-

Am Gasaustritt der jeweiligen Reaktoren findet die Trennung zwischen Feststoffen und Gas durch zwei Abscheiderstufen statt. In der ersten Abscheiderstufe wird grobes Bettmaterial mittels Schwerkraft abgeschieden, welches zu den jeweiligen Siphons (ULS, ILS) geführt wird. Danach folgt die zweite Abscheiderstufe, die jeweils als Zyklon ausgeführt ist und für die Abscheidung von feinen Partikel aus dem Gas sorgt. Diese Partikel werden mit Hilfe einer Schnecke wieder zurück in die Reaktoren gefördert. Durch die neu entworfenen doppelten Abscheidersysteme werden geringere Staubbeladungen im Produktgas und im Abgas erwartet. Ferner sorgen die Absetzkammern für eine schonende Abscheidung der Bettmaterialpartikel. Der Abrieb wird reduziert und es entsteht ein geringerer Bettmaterialverlust. Durch die doppelte Abscheidung kann auch Bettmaterial mit geringerer Korngröße im Reaktorsystem gehalten werden. Die Vorteile die daraus entstehen sind eine einfachere Fluidisierung des Bettmaterials, geringere Druckverluste in den Reaktoren und eine höhere katalytisch wirksame Bettmaterialoberfläche. Es können dadurch auch weichere Bettmaterialien verwendet werden, die üblicherweise durch Abriebeffekte beansprucht werden. [22]

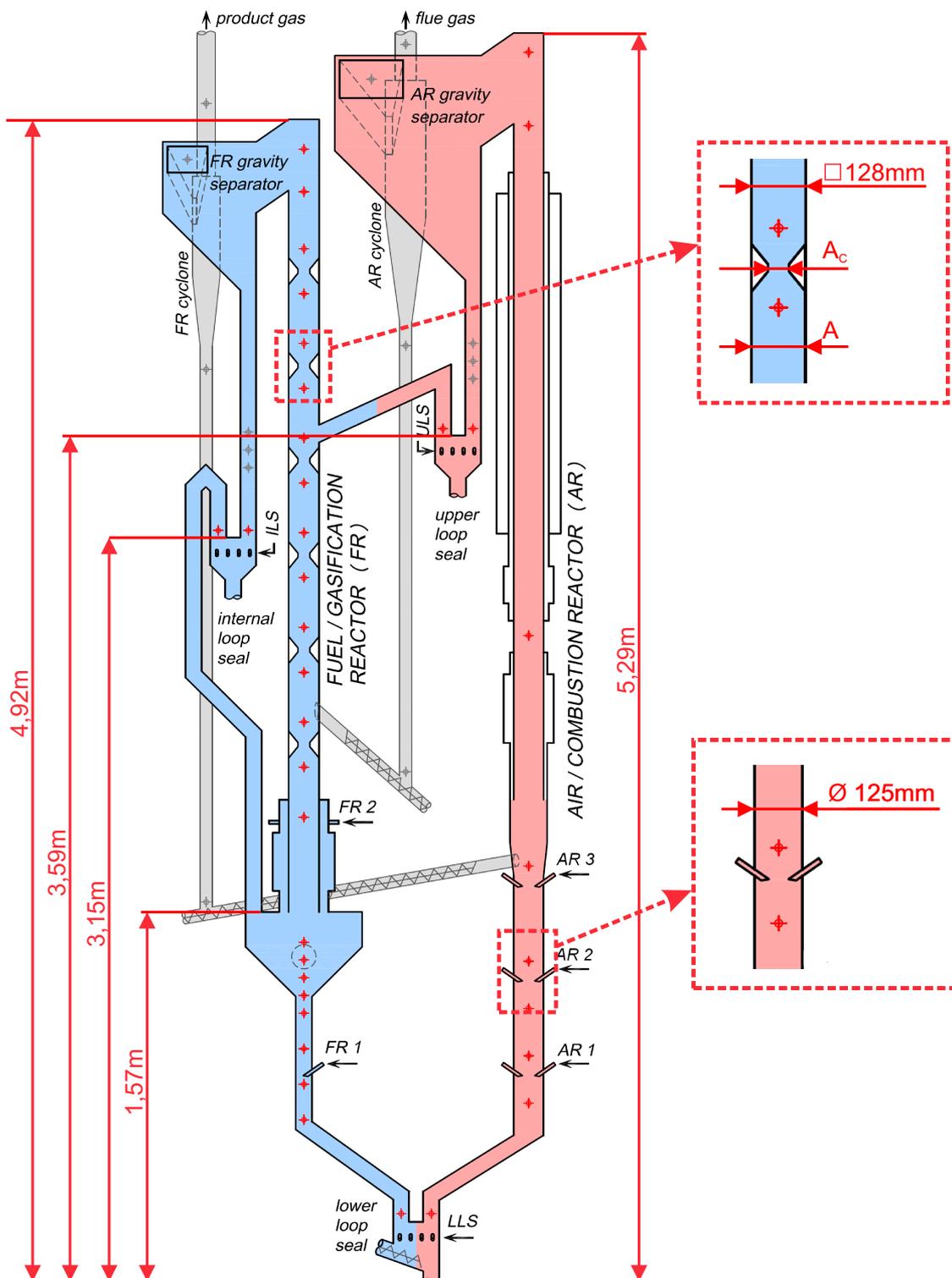


Abb. 3.3: Abmessungen der Reaktoren inkl. Darstellung der Messpunkte

Im Vergleich zu vergangenen Versuchsanlagen konnte durch Anpassungen und die gezielt gewählten Positionierungen der Siphons eine bessere Trennung zwischen AR und FR erreicht werden. Dadurch wird eine Vermischung zwischen Produkt- und Abgas weitgehend verhindert. Weitere Ziele des neuen Reaktordesigns sind:

- Einsetzbarkeit einer breiten Brennstoffpalette
- Geringerer Teergehalt im Produktgas
- Erhöhung der Gesamteffizienz durch niedrigeren Dampfbedarf
- Höhere spezifische Anlagenleistungen

Diese gehen aus dem Endbericht G-volution I [52] hervor. Weitere Details zum Aufbau und der Funktionsweise sind in [10, 22, 53] enthalten.

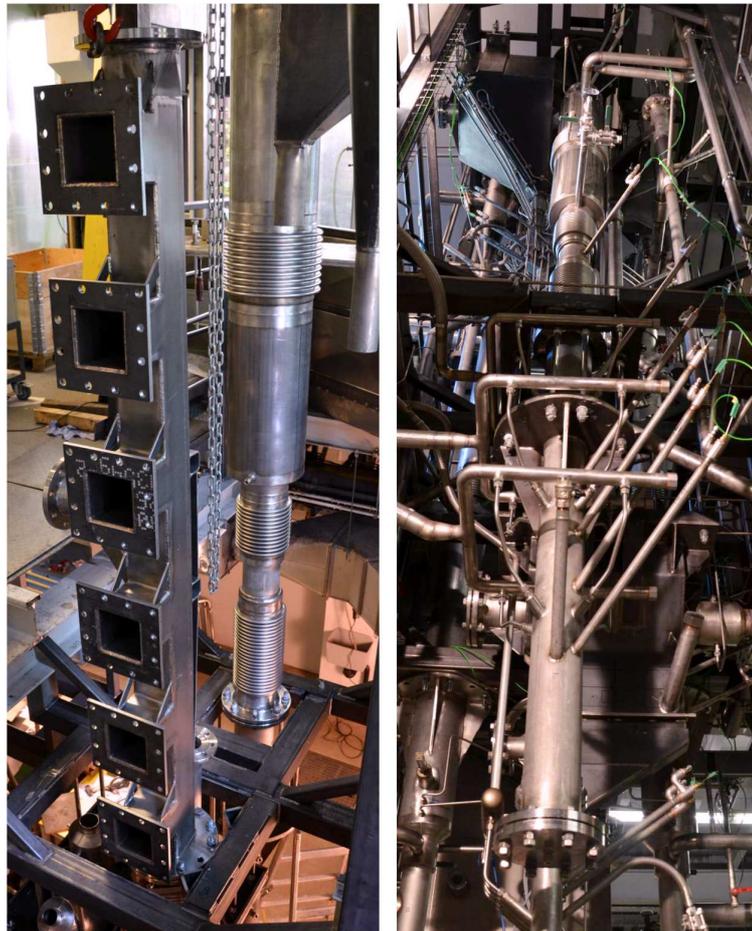


Abb. 3.4: links: oberer FR (vorne) und AR (hinten) beim Einbau, rechts: AR inkl. Messstellen und Verrohrung der Luftdüsen

Neben den Taillierungen im FR ist erstmals auch eine dreistufige Luftversorgung entlang des AR umgesetzt. Ziel ist es, die globale Bettmaterialumlaufzeit über diese Luftstufung (primär, sekundär, tertiär) einstellen zu können, ohne dabei die Verbrennungsstöchiometrie im AR verändern zu müssen. Somit sind im AR die chemischen Abläufe der Verbrennungsreaktionen unabhängig von den nötigen hydrodynamischen Wirbelschichtvorgängen einstellbar [19]. Variationen der eingebrachten Luftmenge werden im Rahmen von zukünftigen Versuchen zeigen, wie die Verteilung der Luftzufuhr idealerweise zu erfolgen hat. Neben der

Luftzufuhr kann auch zusätzlich Brennstoff in den AR eingebracht werden. Dies beeinflusst die Temperatur im Verbrennungsteil und ermöglicht eine Temperaturregelung während des Betriebs. Diese Temperaturregelung ist notwendig, da bei einer Versuchsanlage mit relativ hohen spezifischen Wärmeverlusten zu rechnen ist. Des Weiteren kann damit auch das Temperatur-Betriebsfenster für den Versuchsbetrieb auf einfache Weise eingestellt werden. Aus Abb. 3.5 sind die wichtigsten Auslegungsdaten der Massen- und Energieströme zu entnehmen, die Berechnungen mit Simulationsprogrammen (IPSEpro) ergaben. [52, 54]

Um die thermochemischen und hydrodynamischen Vorgänge im überarbeiteten Reaktordesign so genau wie möglich analysieren zu können, sind umfangreiche Messstellen (Temperatur, Druck) in diesen Bereichen angebracht. 50 Temperaturmessungen, die an den Reaktoren und Abscheidern verteilt sind, geben Auskunft über die für die Reaktionen wesentlichen Temperaturen in den Reaktoren. Vor allem die Temperaturen im FR haben einen wichtigen Einfluss auf die Produktgaszusammensetzung. Durch die Verbrennungsvorgänge im AR und durch Variationen der Brennstoffmenge und des Dampfeintrages in den FR kann die Temperatur und dadurch die Produktgaszusammensetzung gezielt verändert werden. 48 Druckmessungen im Bereich der Reaktoren sind Indikatoren für den Zustand der Wirbelschicht. Anhand des entstehenden Druckprofils entlang des FRs und des ARs können die angestrebten Betriebspunkte bestimmt werden [19]. Mit installierten Druck- und Temperaturmessungen wird in Zukunft auch versucht, Bettumlaufzeiten zu ermitteln. Die Verteilung der Druck- und Temperatursensoren entlang der Reaktoren ist im Bild 3.3 dargestellt.

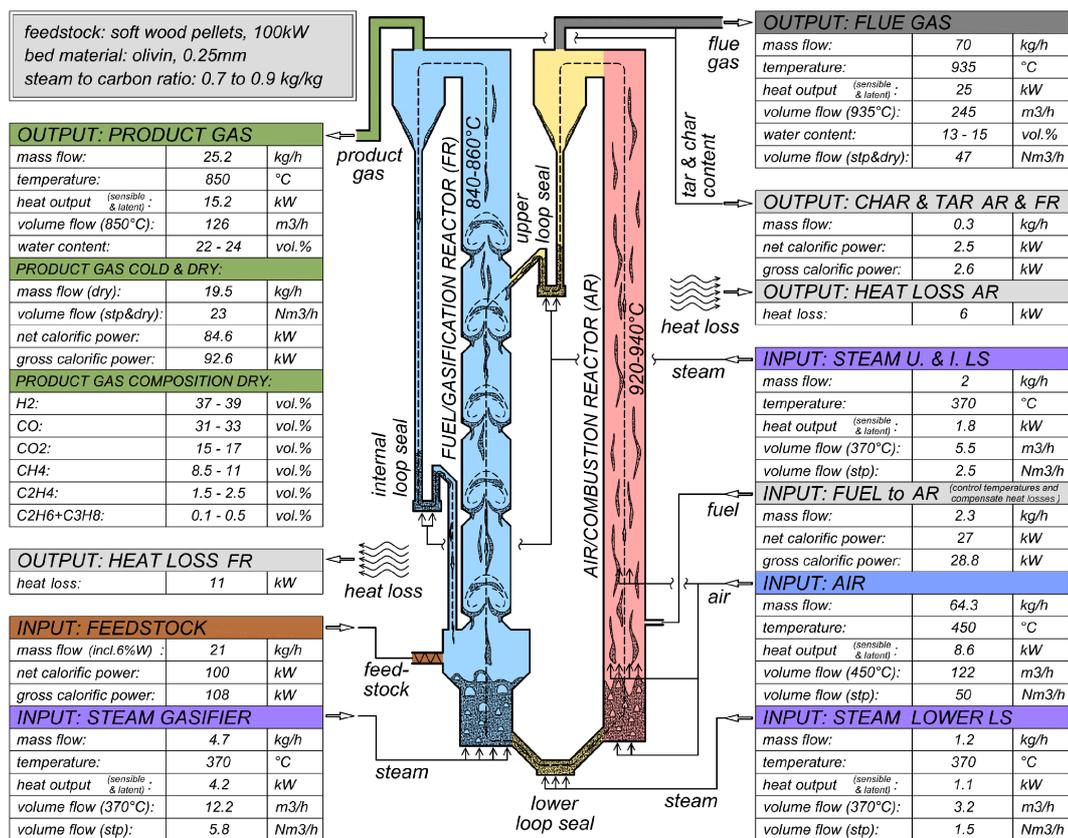


Abb. 3.5: Massen- und Energiebilanzen für die Planung des neuen Reaktorsystems [10]

3.1.2 Versorgungseinrichtungen

Um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erhalten und interpretieren zu können, ist es erforderlich, für konstante Eingangsparameter zu sorgen. Aus diesem Grund werden relevante Messdaten aufgezeichnet, um Variationen und Abweichungen von festgelegten Sollwerten während der Versuchsdauer feststellen zu können. Hier sind insbesondere die wichtigsten Versorgungsströme Brennstoff, Luft und Dampf zu erwähnen, die in die Reaktoren führen. Außerdem werden mit den gemessenen Daten verschiedene Bilanzierungen und Leistungskennziffern ermittelt und mit dem vorhandenen Simulationsmodell verglichen. Insgesamt werden 10 Versorgungsströme im PLS angezeigt und mitgeloggt.

Brennstoff

Wie die Vergangenheit zeigt, ist die richtige Dosierung der Brennstoffmenge ein wichtiges Kriterium für den Versuchsbetrieb. Ziel ist es, den Brennstoff während des Versuchslaufs möglichst konstant einzubringen. Variationen der Brennstoffförderung über eine Versuchsperiode treten unter anderem durch Abnahme des Bunkerfüllstandes auf. Eine weitere Herausforderung stellt die Verstopfung der Förderschnecke dar. Mit Hilfe eines Frequenzumformers (FU) (siehe Kap. 4.3.3) kann die Stromaufnahme, und somit auch die Leistungsaufnahme des Motors ausgelesen und dadurch Verstopfungen in der Schnecke festgestellt werden. Zusätzlich ist im PLS eine Sicherheitsabschaltung realisiert, die bei zu hoher Leistungsaufnahme den Motor aus Sicherheitsgründen stoppt. Der Einsatz eines FUs bietet auch die Möglichkeit, gezielte Variationen der Brennstoffförderung vorzunehmen, um die Auswirkungen auf den Prozess feststellen zu können. [18]

Prozessdampf

Ein weiteres wichtiges Versorgungsmedium ist der Prozessdampf. Dieser dient einerseits als Fluidisierungsmittel für den FR, andererseits als Vergasungsmittel. Der Dampferzeuger, welcher als autarkes System betrieben wird, produziert die notwendige Menge Dampf mit einem Überdruck von ca. 5 bar. Dieser wird über ein Druckminderventil auf 1 bar gedrosselt und dem FR, LLS, ULS und ILS zugeführt. Alle Prozessdampfleitungen sind mit Begleitheizungen ausgestattet, um den Dampf konstant auf einer Temperatur von 150 °C zu halten und Kondensation zu vermeiden. Jede Dampfleitung in den FR und den Siphons ist mit Durchfluss- und Temperaturmessungen ausgestattet und wird im PLS registriert. Während der Versuchsphase können die Dampfströme beliebig variiert werden. Durchflussmengen werden automatisch mit dem aktuellen Zeitstempel mitgeloggt, was später bei der Auswertung des Versuchs hilft. Ferner kann mit Hilfe der Dampffluidisierung im FR Einfluss auf das Wirbelschichtverhalten und den internen Feststoffumlauf genommen werden. Variationen der Fluidisierung des LLS wirken sich auf den globalen Feststoffumlauf aus. [18]

Luftversorgung

Als dritte Versorgungseinrichtung wird die Luftversorgung angeführt. Der Verbrennungsteil des Reaktors ist mit einer dreistufigen Luftzuführung ausgerüstet. Sie dient zur Oxidation des

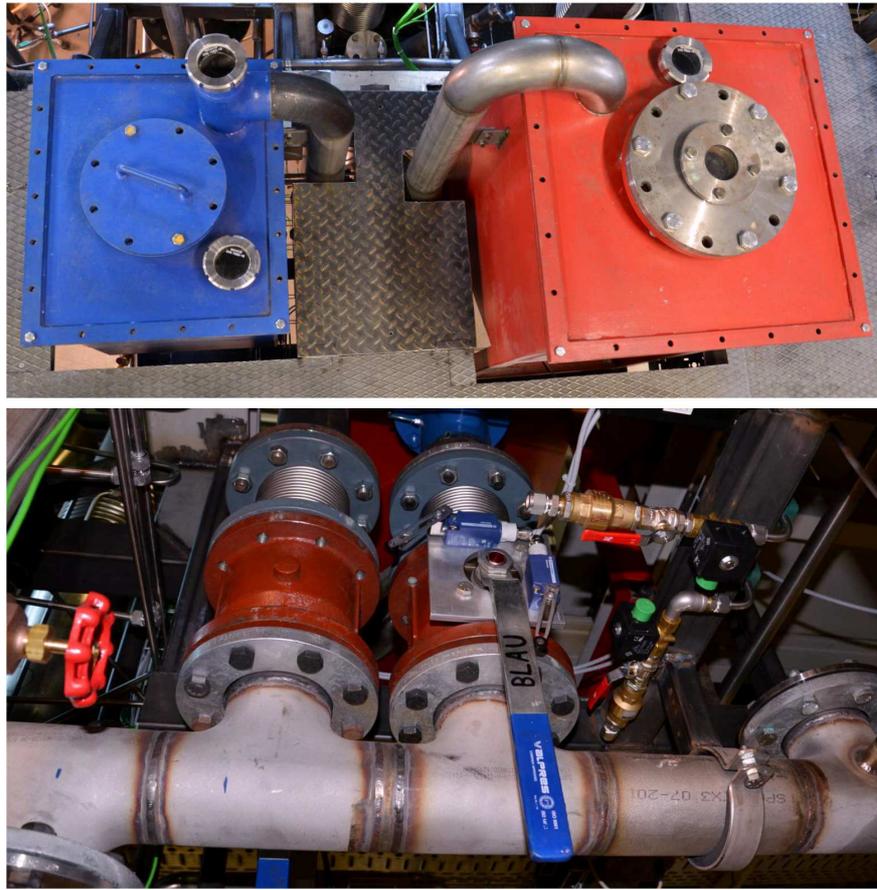


Abb. 3.6: oben: Brennstoffbunker blau/rot, unten: Brennstoffklappe zu Reaktor



Abb. 3.7: links: Dampferzeuger, rechts: Dampf-Volumenstrommessung

verbliebenen Brennstoffes (Restkoks) und zur Fluidisierung des AR. Auch für die Vorwärmphase der Reaktoren und Strahlungskühler ist die Luftversorgung notwendig. Die Luftströme werden mittels Luftvorwärmer bzw. Heizschalen aufgeheizt. Temperatur und Durchfluss der drei Luftströme für den AR werden gemessen und im PLS registriert. Durch Variationen der Fluidisierung im AR wird Einfluss auf den globalen Feststoffumlauf genommen. [18]



Abb. 3.8: Dreistufige Luftversorgung für AR

Eine Gasmessblende ermittelt den Durchfluss für die in der Brennkammer notwendige Verbrennungsluft. Eine Lambdasonde im Abgas ermittelt den vorhandenen O_2 -Gehalt und dient als Regelgröße für das Verbrennungsluftgebläse. Der Schlauchfilter der Firma SEKO benötigt zur Reinigung des Abgases ebenfalls Druckluft. Ein internes Steuergerät steuert die Druckluftventile, die zur Reinigung des Filters notwendig sind. Eine detaillierte Beschreibung des Filters ist in Kap. 3.1.4 zu finden.

Stickstoffversorgung

Die Stickstoffversorgung dient vor allem als sicherheitstechnische Einrichtung und wird über ein Stickstoffflaschenbündel bereitgestellt. Die Brennstoffbunker sind mit "Flush-Spülungen" ausgestattet, um potentiell gefährliche Gase vor dem Öffnen der Bunkerdeckel zu entfernen. Die Flush-Spülung ist als Schrittkette im PLS realisiert und startet, nachdem der Operator das entsprechende Kommando absetzt. Das genaue Ablaufschema der Schrittkette kann dem Anhang B.3.2 entnommen werden. Neben der Flush-Spülung ist eine stetige Stickstoffspülung der Bunker während des Normalbetriebs ausgeführt. Diese Spülung soll das Zurückströmen von brennbaren Gasen in den Bunker während des Vergasungsbetriebs verhindern. Die Messung des Durchflusses findet vor Ort statt. Der Druck wird über einen Druckminderer auf ca. 0,4 bar Überdruck reduziert. Als weitere sicherheitstechnische Einrichtung kann Stickstoff in das gesamte Reaktorsystem eingeleitet werden. Dies dient zur Notabschaltung der Anlage und wird entweder vom Operator durchgeführt, oder von der Software automatisch nach einem Störfall (z.B. Stromausfall) ausgelöst. Tritt so ein Fall ein, wird der Stickstoff an verschiedenen Stellen in die Reaktoren eingeleitet.

Da die Messgeräte zur Ermittlung der Drücke in allen Teilen der Anlage ebenfalls durch Ablagerungen verunreinigt werden können, sind auch hier Stickstoffspülungen vorgesehen. Wie in Kap. 2.2.1 näher erläutert, sind die verwendeten Druckmessdosen empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Durch die Spülung wird verhindert, dass unerwünschte Partikel bis zur Druckmessdose dringt. Auch die Messblenden, die zur Messung des Produkt- und Abgasvolumenstroms notwendig sind, werden mit Stickstoff gespült, um Verunreinigungen an den Blenden durch die durchströmenden Gase zu vermeiden. Des Weiteren werden die Schaugläser im Reaktorbereich ebenfalls mit Stickstoff gespült. Um eine Stickstoffbilanz für die Vergasungsversuche zu ermöglichen, werden alle Stickstoffvolumenströme mittels Schwabekörperdurchflussmessungen ermittelt.

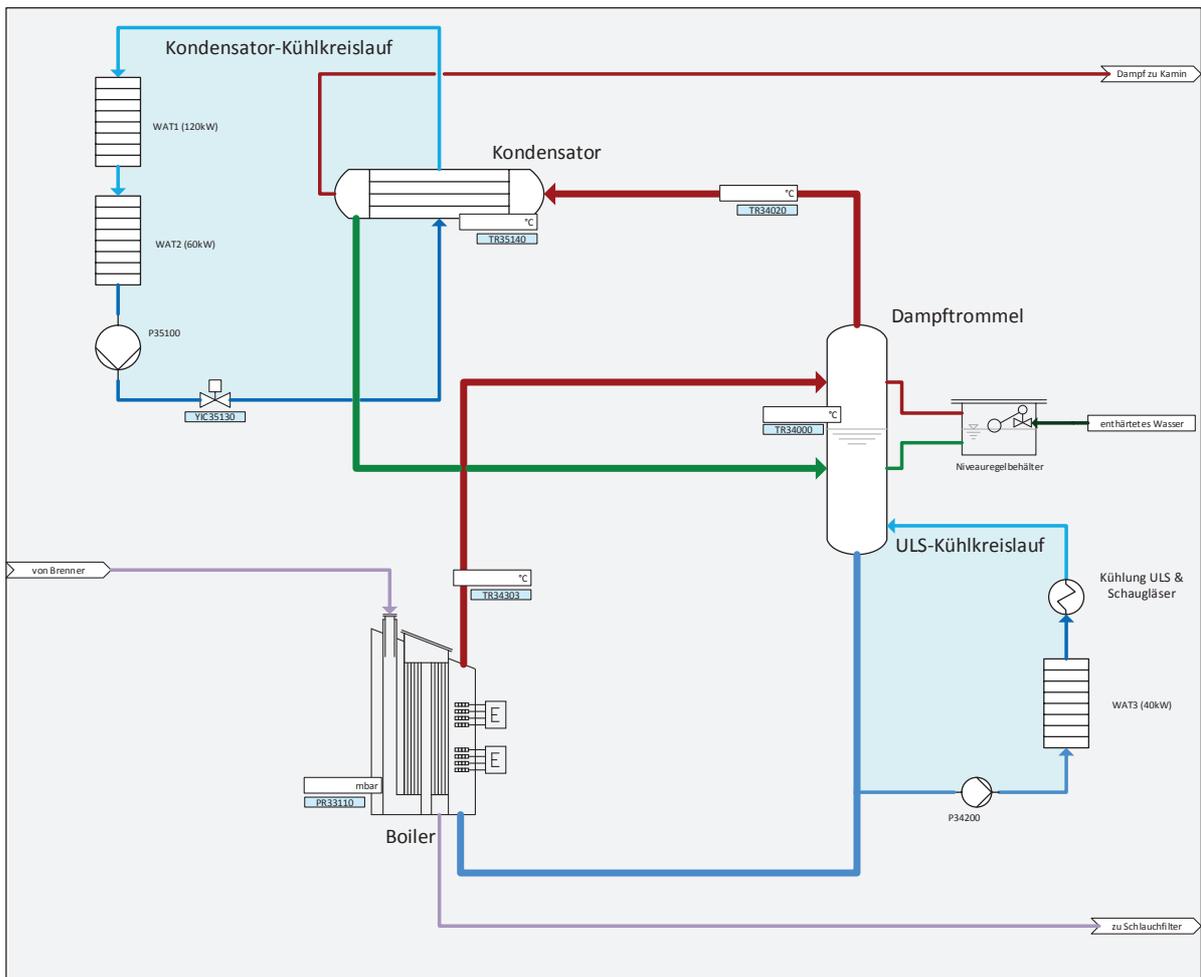


Abb. 3.9: Wasser/Dampfkreislauf

Kühlwasserversorgung

Das bei der Verbrennung des Produktgases in der Brennkammer entstehende heiße Abgas durchströmt den Boiler und wird dabei abgekühlt (siehe Abb. 3.9). Die übertragene Energie wird zur Verdampfung von Wasser genutzt. Der dadurch erzeugte Wasserdampf kondensiert in einem nachgeschalteten Kondensator. Auf der Sekundärseite des Kondensators wird

Kühlwasser im Kreislauf gepumpt. Das Kühlwasser wird über zwei in Serie geschaltete Wärmetauscher (60 kW und 120 kW) geleitet, welche für stetige Wärmeabfuhr aus dem System sorgen. Mit einem Regelventil ist es möglich, den Durchfluss über den Kondensator zu ändern und somit die übertragene Wärme zu variieren. Über Temperaturmessungen vor und nach den Wärmetauschern wird die Wärmeabfuhr im tertiären Kreislauf geregelt. Der 60 kW Wärmetauscher ist an den Kühlkreislauf der Gebäudetechnik angeschlossen. Der 120 kW Wärmetauscher führt mittels Brauchwasserkühlung die restliche Energie ab und kann bei einem Ausfall des 60 kW Wärmetauschers die gesamte anfallende Wärme aufnehmen und abführen. Er ist als Notkühlung vorgesehen. Die Kühlung des Kondensators ist somit redundant ausgeführt. Die Kühlung des 120 kW Wärmetauschers mittels Brauchwasser funktioniert auch stromlos.

Als weitere Kühleinrichtung wird Wasser direkt aus dem Naturumlauf des Boilers und der Dampftrommel entnommen und über einen 40 kW Wärmetauscher geleitet. Dieser Kühlkreislauf stellt unter anderem enthärtetes Kühlwasser für die ULS Kühlung zur Verfügung. Die genaue Beschreibung des gesamten Regelungsschemas der Kühlwasserversorgung kann im Kapitel 4.3.1 nachgelesen werden.

Ölversorgung

Die Ölversorgung dient zur schnelleren Aufwärmung der Anlage. Dabei wird Heizöl in den AR geleitet und verbrannt, um die gesamte Anlage aufzuheizen. Da die Versuchsanlage eine wesentlich höhere spezifische Oberfläche hat als industrielle Großanlagen, sind die Wärmeverluste ebenfalls wesentlich größer. Deshalb dient Heizöl während des Betriebes als zusätzlicher Brennstoff, um die Wärmeverluste zu kompensieren. Die eingeleitete Menge wird über eine Waage gemessen. Die Drehzahl der Förderpumpe kann variabel verändert und über das PLS gesteuert werden.

Erdgasversorgung

Erdgas dient zur Versorgung des Stützbrenners in der Brennkammer. Dadurch wird gewährleistet, dass jegliche brennbaren Gase in der Brennkammer verbrennen und die Anlage nicht unverbrannt über den Kamin verlassen. Die Regelung der Gasversorgung für den Brenner erfolgt autark und ist daher nicht Teil der PLT. Die Brennkammer inklusive Brenner stellt eine kritische Teilanlage dar und wird daher sicherheitstechnisch separat betrachtet. Nähere Erklärungen dazu folgen im Kap. 3.1.4

3.1.3 Gaskühlung

Um die Zusammensetzung von Produktgas und Abgas messen zu können, müssen beide Gasströme zuvor gekühlt werden. In der Versuchsanlage erfolgt dies mit Hilfe von Strahlungskühlern. Der Strahlungskühler besteht aus einem zweifach ummantelten Zylinder. Das zu kühlende Gas wird durch den Zylinder geleitet, der äußere Mantel wird von Wasser durchströmt. Zwischen diesem Wassermantel und dem Abgas bzw. Produktgas führenden inneren Rohr befindet sich ein ringförmiger Hohlraum der mit Kühlluft durchströmt werden kann, wenn nötig. Darin findet der Wärmeaustausch fast ausschließlich durch Strahlung statt. Im



Abb. 3.10: Strahlungskühler für Produktgas und Abgas

äußersten Wassermantel wird die Verdampfungsenthalpie des Wassers zur Kühlung ausgenutzt. Im unteren Bereich des Strahlungskühlers nimmt das Wasser die Wärme direkt auf. Es kommt zu einer Erwärmung des Kühlwassers und zur Phasenumwandlung in Wasserdampf. Im oberen Bereich des Strahlungskühlers findet anschließend eine Überhitzung des Dampfes statt. Dadurch ist es möglich, über die Höhe des Wasserstandes die Kühlleistung einzustellen.

Ein wesentlicher Vorteil des Strahlungskühlers ist die Selbstregelung. Das zu kühlende Produktgas hat vor dem Strahlungskühlereintritt etwa $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe Massen- und Energiebilanzen aus Abb. 3.5) und emittiert Strahlung. Bei der Abkühlung wird die Strahlung und somit auch der Kühleffekt automatisch reduziert ($P = f(T^4)$). Dies ist wichtig, da eine Abkühlung des Gases unter $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ unbedingt verhindert werden muss. Unter $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ beginnen die im Produktgas befindlichen Teere zu kondensieren. Da jedoch eine Analyse des Teers nach dem Strahlungskühler durchgeführt wird, ist es von besonderer Wichtigkeit, der Gasanalytik alle im Gas befindlichen Bestandteile (inkl. Teer) vollständig zuzuführen. Gleichzeitig würde eine Teerkondensation zu Ablagerungen im Strahlungskühler führen und die Oberflächenwände verschmutzen. Bei der Teeranalyse müssen die standardisierten Richtlinien der Tar-Guidelines CEN/TS 15439 berücksichtigt werden. Näheres zur Teermessung kann auch in [55] nachgelesen werden.

Neben der Selbstregelung durch die emittierende Strahlung findet auch noch eine automationsgestützte Regelung über den Füllstand im Wasserrohr statt. Diese gewährleistet, dass die Energiemenge auch tatsächlich abgeführt wird. Das Regelungskonzept ist in Kap. 4.3.1 genauer erläutert.

3.1.4 Gasverwertung

Alle nachgeschalteten Teilanlagen sind notwendig, um eine sichere Verbrennung der erzeugten Gase zu gewährleisten und die Abgase nach entsprechenden Kühl- und Reinigungsschritten über den Kamin an die Umgebung abzugeben.

Brennkammer

In der Brennkammer wird das gekühlte Produkt- und Abgas zusammengeführt und unter Luftzufuhr verbrannt. Eine erdgasbefeuerte Stützflamme stellt sicher, dass die Verbrennung der Gase zu jedem Zeitpunkt stattfindet. Es ist zu verhindern, dass das Produktgas unverbrannt in den Kamin strömt, da sonst akute Explosionsgefahr besteht, bzw. toxische Gase in die Umgebung gelangen könnten. Der Brenner sorgt für eine Stützflamme in der Brennkammer, um einen Ausfall der Verbrennung zu verhindern. Eine Lambdasonde überwacht die Verbrennungsstöchiometrie und gibt ein Signal an die Steuerung ab, wenn die Flamme erlischt. Zusätzlich wird das stetig arbeitende Zündfunkengerät überwacht. Falls dies ausfällt wird ein Alarm an das PLS abgesetzt. Außerdem werden nochmals separat/redundant der O_2 - und der CO -Gehalt im Abgas gemessen. Untersuchungen und Studien (FMEA, Risikoanalyse) zeigten unterschiedliche Risikopotentiale auf. Entsprechende bauliche Vorkehrungen wurden eingeleitet, um das Risiko zu reduzieren. Eine Maßnahme war die redundante Ausführung der Luftzufuhr zur Brennkammer. Einerseits sorgt ein Gebläse für ausreichende Luftzufuhr in der Brennkammer, andererseits führt eine weitere Druckluftleitung zur Brennkammer, die als Sicherheitseinrichtung vorgesehen ist, falls das Gebläse ausfällt. Weitere sicherheitstechnische Maßnahmen können in [18] nachgeschlagen werden.

Kühlkreislauf

Durch die Verbrennung der Gase in der Brennkammer kann sich das Abgas, je nach vorgegebener Verbrennungsstöchiometrie, auf 1000°C erwärmen. Um nachgeschaltete Anlagen wie den Schlauchfilter nicht zu beschädigen, muss das Gas zuvor abgekühlt werden. Dies erfolgt im Boiler, welcher vom Abgas durchströmt wird und das Gas auf etwa 130°C abkühlt. Auf der Sekundärseite wird der Boiler von enthärtetem Kühlwasser durchflossen, das die abzuführende Energie aufnimmt. Dem Boiler ist ein Wasser-Dampfkreislauf nachgeschaltet, der nach dem Prinzip des Naturumlaufs arbeitet. Aufgrund von Dichteunterschieden zwischen dem Wasser in den Fallrohren und der Wasser-Dampfphase in den Steigrohren wird eine Zirkulation erreicht und dem Gas die Energie entzogen. Der Boiler ist als Dreizug-Rauchrohrkessel ausgeführt. Die Rauchrohre sind für eine etwaige leicht durchzuführende Reinigung senkrecht ausgeführt. Der entstandene Wasserdampf wird in die Dampftrommel geleitet und anschließend im Kondensator gekühlt. Das kondensierte Wasser strömt über die Dampftrommel zurück in den Boiler. Zusätzlich wird enthärtetes Wasser aus der Dampftrommel entnommen, mittels 40 kW Wärmetauscher abgekühlt und zur Kühlung der Brennstoffschneckenlager, der Schaugläser und des ULS verwendet. Die Kühlung des Kondensators übernimmt ein Tertiärkühlkreislauf, der mit Kühlwasser durchströmt wird. Die anfallende Energie wird über zwei in Serie geschaltete Wärmetauscher mit 60 kW und 120 kW Kühlleistung abtransportiert (siehe 3.1.2).

Schlauchfilter

Nach der Gaskühlung findet die Gasreinigung statt, die das Gas von Staub bzw. Feinpartikel wie Bettmaterial, Asche und Flugkoks befreit. Als Partikelabscheider kommt ein Schlauchfilter zum Einsatz, da dieser für die vorherrschenden Gegebenheiten und Anforderungen am besten geeignet ist. Auch bei sehr feinen Partikel werden hohe Abscheidegrade erreicht. Zusätzlich kann das Gas mit bis zu 260 °C in den Schlauchfilter geleitet werden, ohne dass das Filtermaterial (Polytetrafluorethylen) Beschädigungen davonträgt. Auch bei einem kurzfristigen Abfall der Kühlleistung im Wasser-Dampfkreislauf ist noch genug Reserve vorhanden.

Die Reinigung des Schlauchfilters erfolgt pneumatisch. Durch zyklische Luftdruckstöße wird der Schlauch von Partikel befreit, die anfallende Asche wird am Boden gesammelt und mit Hilfe einer Schnecke aus dem Filter gefördert. Hier kann bei späteren Versuchen der Aschegehalt bzw. die Zusammensetzung der Asche ermittelt werden. Der Druckabfall über den Filter wird im PLS aufgezeichnet. Das Sammelalarm-Relais ist mit dem PLS verbunden und gibt im Fehlerfall eine Störmeldung ab.

Kamin

Nach der Abkühlung und Reinigung des Abgases, wird das Gas in den Kamin geleitet und an die Umgebung abgegeben. Im Kamin sorgt ein Gebläse für konstanten Unterdruck. Zusätzlich sorgt eine Abgaskonzentrationsmessung (CO_2 , CO , O_2) für höhere Sicherheit. Bei Überschreitung des CO -Gehalts wird ein Alarm im PLS abgesetzt, um den Operator auf eine unvollständige Verbrennung in der Brennkammer hinzuweisen.

3.2 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde auf die Aufgaben der einzelnen Anlagenabschnitte näher eingegangen und ein Einblick der verfahrenstechnischen Abläufe in der Versuchsanlage gewährt. Abb. 3.11 zeigt das Grundfließbild der gesamten Versuchsanlage. Die in diesem Kapitel erläuterten Bereiche

- Brennstoffbereitstellung (rot)
- Gaserzeugung (grau)
- Gaskühlung und Verwertung (blau)
- Versorgungseinrichtungen (grün)
- MSRT, Leitwarte, Sicherheitstechnik (grün)

finden sich dort wieder. Das Grundfließbild stellt die wichtigsten Anlagenbauteile und Komponenten schematisch dar. Eine detaillierte Darstellung kann aus dem R&I-Schema entnommen werden, indem unter anderem die Verknüpfungen der einzelnen Apparate, Messstellen und Aktoren enthalten sind (Anm.: Das R&I-Schema ist vertraulich und nur projektintern verfügbar). Im Endbericht des Basic Engineerings sind weitere Informationen zum Anlagenbau und zu einzelnen Teilanlagen enthalten. [22]

Um mit der Anlage Versuche durchführen und qualitativ hochwertige Ergebnisse auswerten zu können, muss die Versuchsanlage messtechnisch erfasst und gesteuert werden. Daher ist auch im Grundfließbild die Messtechnik, Steuerungstechnik und Regelungstechnik angeführt. In der Leitwarte werden die Prozesse überwacht und die Versuchsanlage gesteuert. Tab. 3.2 schafft einen Überblick über den Umfang der MSRT, welche in den nächsten Kapiteln näher erläutert werden.

Tab. 3.2: Überblick der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

Messtechnik	
digitale Eingänge	22
analoge Eingänge	209
digitale Ausgänge	51
analoge Ausgänge	22
Regelungstechnik	
Regelkreise	22
Steuerungstechnik	
Schrittketten	5

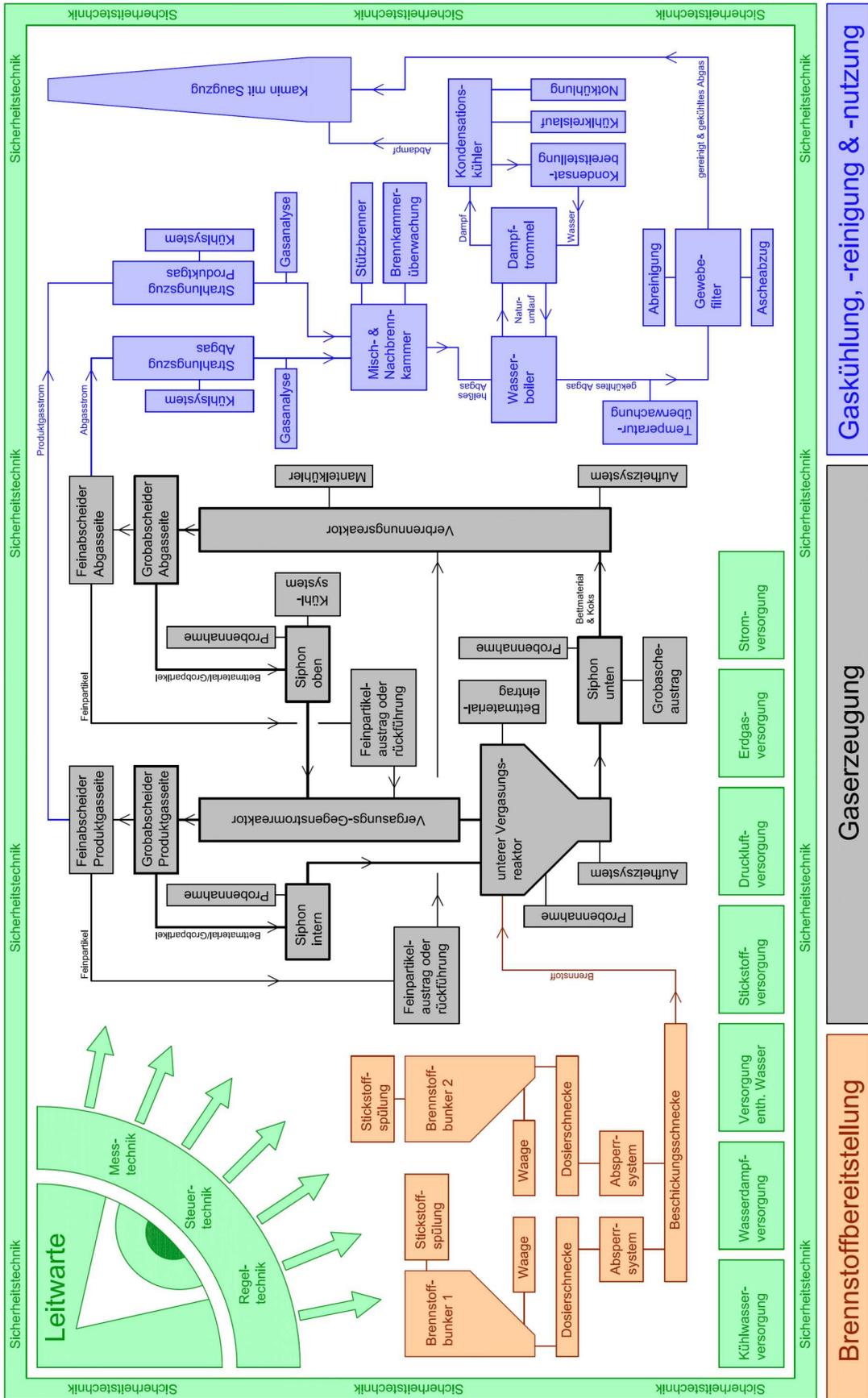


Abb. 3.11: Grundfließschema der Versuchsanlage [54]

Kapitel 4

Implementierung der MSR-Technik

Wie in Kap. 2.2 beschrieben, ist die MSRT ein wesentlicher Teil des Anlagenbaus, ohne die ein Betrieb von verfahrenstechnischen Anlagen nicht möglich wäre. Generell kann gesagt werden, dass bei einer Versuchsanlage die Messtechnik einen besonderen Stellenwert hat. Nur durch präzise Messungen und Aufzeichnungen, ist eine gute Versuchsauswertung gewährleistet. Das Anlagenverständnis kann dadurch ebenfalls gesteigert werden. Es sind gezielte Anpassungen und Modifikationen durchführbar. All das sind gute Gründe, die neue DUAL FLUID Versuchsanlage mit einem ausgeklügelten MSRT-Konzept auszurüsten.

4.1 Einbindung der Gasanalyse

Um während des Versuchs die Anlage im optimalen Arbeitsbereich betreiben und qualitative Aussagen über das Anlageverhalten treffen zu können, ist die Messung der Zusammensetzung des Produktgases und des Abgases von grundlegender Bedeutung. Anhand dieser Messergebnisse kann in den Prozess eingegriffen werden und die Anlagenfahrweise verändert werden. Die Konzentrationsmessungen der einzelnen Gaskomponenten erfolgen online. Dazu bedarf es der Einbindung der Messgeräte ins PLS. Eine schematische Darstellung der Anbindung zeigt die Abb. 4.1. Für die Onlinemessungen der Produktgaszusammensetzung werden Messgeräte der Firma Rosemount/Emerson und Bartec verwendet. Offline werden höhere Kohlenwasserstoffe mit einem GC der Firma Perkin Elmer gemessen. Die Abgaszusammensetzung wird von 2 Rosemount/Emerson-Messgeräten durchgeführt.

Alle gemessenen Werte werden im PLS mit Zeitstempel in eine Datenbank gespeichert, der zeitliche Verlauf kann mit dem integrierten Trendtool beobachtet werden. Vom Prüflabor werden Brennstoffanalysen und Teeranalysen durchgeführt, welche offline erfolgen. Bei der Teeranalyse werden Staubgehalt, Flugkoks, H_2O -Gehalt, pH-Wert und die Hauptkomponenten im Teer ausgewertet. Mit Hilfe der Brennstoffanalyse werden die elementaren Bestandteile und der Heizwert des verwendeten Brennstoffes bestimmt. Liegen alle Ergebnisse vor, kann eine Gesamtbilanzierung und eine Wirkungsgradbestimmung der Anlage durchgeführt werden.

Die Problematik bei den Analysegeräten ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen, Temperaturen und Feuchtigkeit. Das zugeführte Gas muss bestimmte Kriterien erfüllen, um gemessen werden zu können. Die Temperatur und der Druck des Gases dürfen

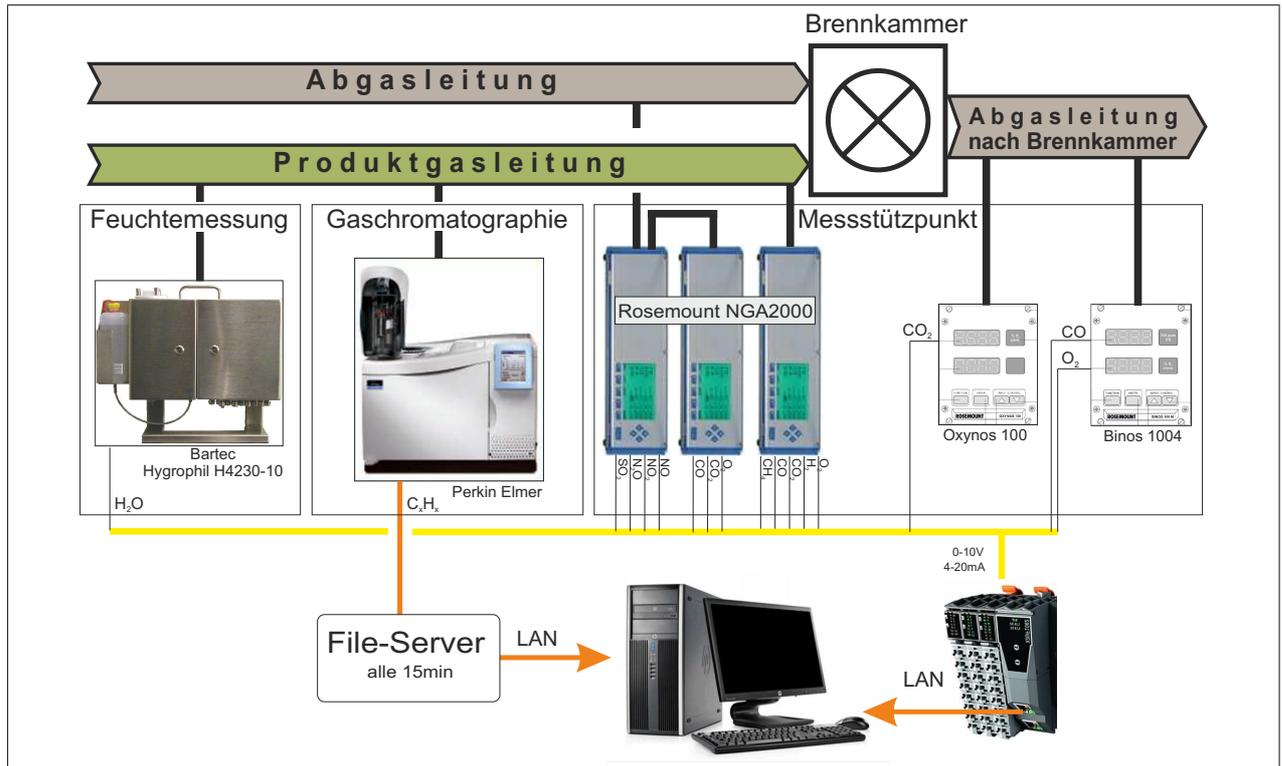


Abb. 4.1: Aufbau der Messanalytik

bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten ($T < 60^\circ\text{C}$ und $P \sim P_{ath}$). Daher wird Produkt- und Abgas zuvor in den jeweiligen Strahlungskühler abgekühlt. Über Filtereinrichtungen werden Partikel aus dem Gas entfernt. Das Gas wird durch Gaswaschflaschen geführt, um Teere in den Gasen zu kondensieren und zu entfernen. Nach der Teereinigung ist die Temperatur des Gases unter den Grenzwerten der Analysegeräte. Vor der Messeinrichtung sorgt eine Wasserfalle für die Abtrennung von Wasserteilchen und eine hydrophobe Schutzmembrane für die Entfernung von noch übriggebliebenen Verschmutzungen. Das Gas erfüllt nach der Gasaufbereitungsstrecke alle Kriterien und kann zu den jeweiligen Analytikgeräten geleitet werden. Der Durchfluss kann über ein Drosselventil variiert werden und wird konstant zwischen 0,2-1,5 l/min eingestellt.

4.2 Implementierung der Messtechnik

Um den großen Umfang der Messdaten zu bewältigen war es erforderlich, vor der Umsetzung der Elektrotechnik ein Konzept für den Hauptschaltschrank mit allen Bauelementen vorzulegen, um eine übersichtliche und platzsparende Anordnung zu gewährleisten. Das Ergebnis kann in [18] nachgeschlagen werden.

Um die Schwerpunkte der implementierten Messtechnik zu verdeutlichen, sind in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 der online verfügbare Messumfang und die Aufteilung der Messungen in den einzelnen Bereichen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass im Bereich der Gaserzeugung besonders viele Messstellen angebracht sind, um - wie anfangs erwähnt - neue Erkenntnisse im Bereich der Wirbelschicht- und Vergasungstechnik zu gewinnen.

Tab. 4.1: Vergleich der verfügbaren Onlinewerte

Messart	Baujahr alte Anlage 2001 [56]	Baujahr neue Anlage 2014
Temperatur	32	105
Druck	14	70
Durchfluss	3	13
Füllstand	-	4
Gasanalytik	22	22
Motordrehzahl	2	5
Gewicht	1	2

Tab. 4.2: Messaufwand nach Anlagenbereichen der neuen Versuchsanlage

Anlagenbereich	Temperatur	Druck	Durchfluss
Versorgungseinrichtungen	31	4	11
Gaserzeugung	50	48	0
Gaskühlung, -reinigung, -nutzung	24	18	2
Gesamt	105	70	13

Des Weiteren sind in einem separaten Druckmessdosenschrank 60 Druckmessungen, inklusive der Spüleinrichtungen zur Verhinderung von Verunreinigungen der Druckmessdosen zusammengefasst. Fast alle Druckmessungen der Versuchsanlage sind darin gesammelt angeordnet. Die Messwerte werden von dort an die SPS weitergeleitet. Aufgrund der örtlich unterschiedlichen Anordnung der Schalt- und Messschränke, wird auch der Aufbau der SPS dezentral gestaltet (siehe Bild 4.2). Im Untergeschoss des Technikums der TU Wien befindet sich der Hauptschaltschrank mit der SPS und einem Erweiterungsrack für alle Temperatursensoren. Im Obergeschoss ist der Druckmessdosenschrank angebracht, der ebenfalls ein Erweiterungsrack beinhaltet. Zudem befinden sich in einem zusätzlichen Heizungsregelschrank Schütze für die Begleitheizungen und Luftvorwärmer. Die Trennung in vier unterschiedliche Subgruppen sorgt für eine übersichtliche Verkabelung in den jeweiligen Schaltkästen und eine effiziente Platzgestaltung. Die Datenübertragung der dezentralen Ein/Ausgabebaugruppen erfolgt über das Echtzeit-Ethernetprotokoll Powerlink, das speziell für die Übertragung von Prozessdaten der Automatisierungstechnik entwickelt wurde. Die dafür notwendigen Hardwarebauteile der SPS sind im Anhang unter Kap. B.2.1 aufgelistet.

Hauptschaltschrank der Versuchsanlage

Der Hauptschaltschrank der Versuchsanlage bildet das Herzstück der Datenerfassung. Er übernimmt die Versorgung und Absicherung der Anlagenkomponenten. Die SPS ist der wichtigste Teil im Hauptschaltschrank. Sie hat die Aufgabe der Messdatenerfassung und ist verantwortlich für die Steuerung und Regelung der Anlage. Über Ein- und Ausgangsmodule kommuniziert der Prozessor der SPS mit den Messeinrichtungen, wandelt elektrische Signale in Messgrößen um und leitet diese an die Messwarte weiter. Im Hauptschaltschrank sind alle elektrotechnischen Bauteile untergebracht, die zur Ansteuerung der Aktoren und

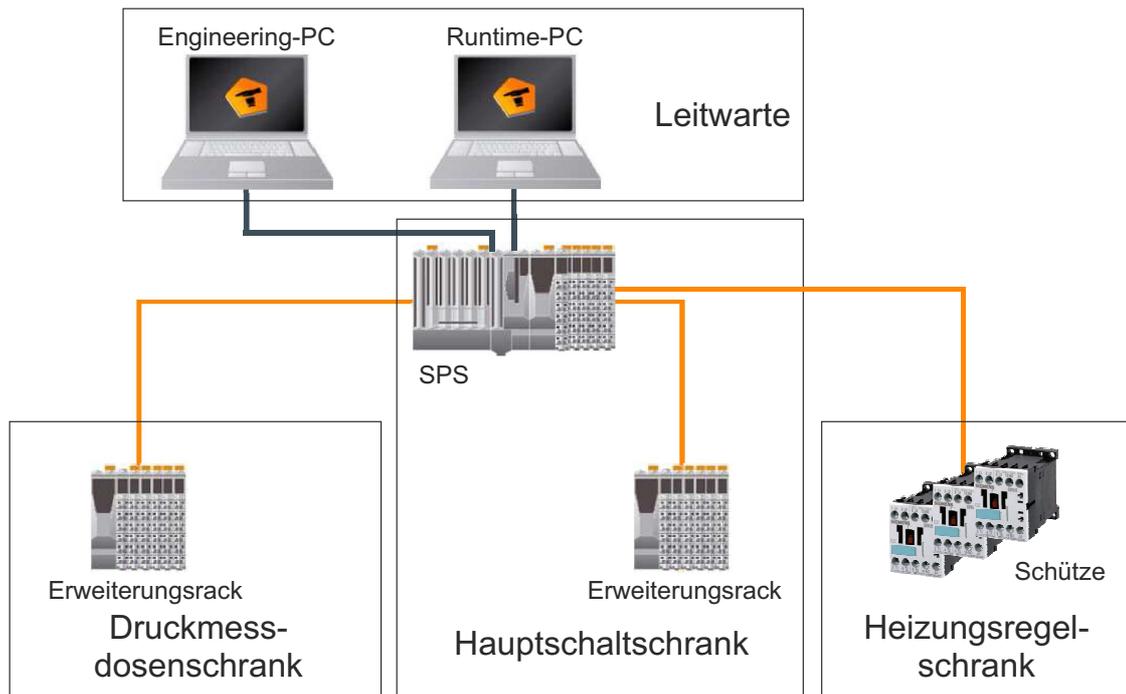
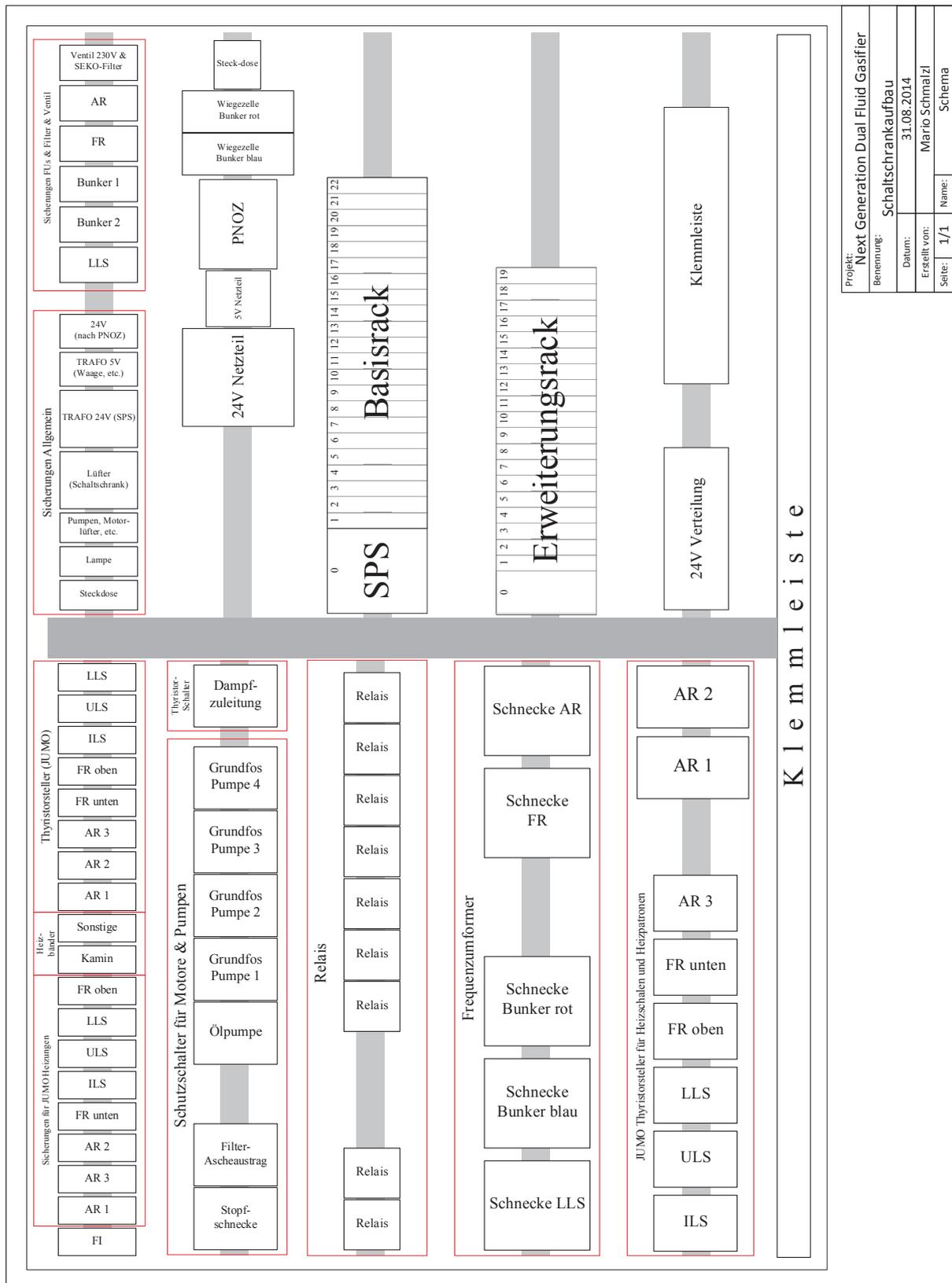


Abb. 4.2: Aufbau der SPS

Messungen der Sensoren notwendig sind. Sicherungen, Motorschutzschalter, FUs für Motoransteuerungen und Thyristoren für Heizungen sind darin integriert. Um eine ausreichende Spannungsversorgung für den Schrank zu gewährleisten und entsprechende Leitungen mit notwendigen Querschnitten zu verlegen, ist die maximale Leistungsaufnahme der Bauteile berechnet worden. Dies galt auch für die Absicherung der Komponenten. Die genaue Planung für die Unterbringung der Bauteile sorgte für eine effiziente Raumausnutzung. Das Schema und ein Foto des Hauptschaltschranks sind in Abb. 4.3 und Abb. 4.4 dargestellt.



Projekt:	Next Generation Dual Fluid Gasifier
Benennung:	Schaltschranksaufbau
Datum:	31.08.2014
Erstellt von:	Mario Schmalzl
Seite:	1/1
Name:	Schema

Abb. 4.3: Schematischer Aufbau des Hauptschaltschranks



Abb. 4.4: Hauptschaltschrank (Foto)

Druckmessdosenschrank

Im Druckmessdosenschrank werden alle Druckmessungen zusammengeführt und an die SPS weitergegeben. Dafür sind insgesamt 60 Druckmessdosen der Firma Kalinsky verbaut. Mithilfe von Schläuchen sind diese direkt mit den Druckmesspunkten der Anlage verbunden. Zur Vermeidung von Verunreinigungen der Druckmessdosen durch Partikel, Teere, etc., werden die Schläuche ständig mit Luft bzw. Inertgas (N_2 , Argon (Ar)) gespült - je nachdem,

wo die Messstellen örtlich liegen. Aufgrund des geringen Volumenstroms der Spülung treten keine wesentlichen Messabweichungen auf. Die Messbereiche der jeweiligen Druckmessdosen richten sich nach den vorherrschenden Drücken am Messort. Dadurch kann eine möglichst hohe Messauflösung erreicht werden, was für genauere Messergebnisse sorgt. Ein Foto des Druckmessdosenschrank ist in Abb. 4.5 dargestellt.

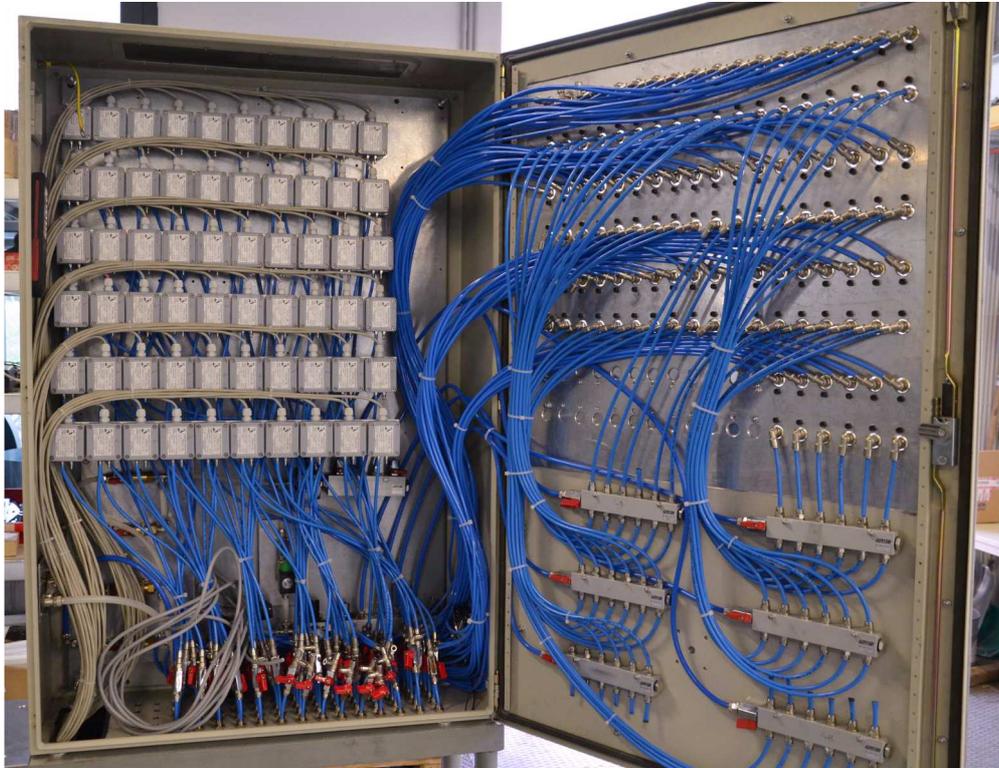


Abb. 4.5: Druckmessdosenschrank

4.2.1 Erstellung der MSR-Liste

Alle Messungen und Aktoren, die in der SPS verarbeitet werden, sind in der MSR-Liste erfasst (siehe Anh. B.2.3). Zusätzliche Eigenschaften wie Messbereiche, Adressen der Ein- und Ausgänge sowie Herstellerangaben sind in der Liste eingetragen. Für jeden Sensor und Aktor ist eine eindeutige Nummer vergeben. Durch die Einführung eines durchgängigen Nummerierungssystem kann anhand der Messstellenummer die Messstelle dem jeweiligen Anlagenbereich zugeordnet werden. Die Messstellenummer besteht aus einer Buchstabenkombination mit einer darauffolgenden fünfstelligen Zahl. Die Buchstaben beschreiben die Art der Messung (Druck, Temperatur, Durchfluss,...) bzw. des Aktors (Regelventil, Schaltventil, Motor,...). Aus den Buchstaben können außerdem zusätzliche Informationen entnommen werden, ob beispielsweise die Registrierung im PLS erfolgt und ob der Messwert eine regelungstechnische Aufgabe hat. Die Zahlenkombination weist der Messstelle einen zugehörigen Anlagenbereich zu. Die erste Ziffer beschreibt die Örtlichkeit der Messstelle. Die Folgeziffer bezieht sich auf den jeweiligen Bereich der Teilanlage. Dabei ist die Anlage in acht Bereiche unterteilt (siehe Tab. 4.3). Im Anhang ist die detaillierte Beschreibung der Messstellenummerierung aufgelistet (Kap. B.2.2).

Tab. 4.3: MSR-Nummernzuordnung nach Anlagenbereichen

Bereich	Ziffer
Brennstoffbeschickung	1xxxx
Gaserzeugung, Wirbelschichtreaktorsystem	2xxxx
Gasverwertung, -kühlung, -reinigung	3xxxx
Wasserdampfversorgung	4xxxx
Druckluftversorgung	5xxxx
Stickstoffversorgung	6xxxx
Kühlwasserversorgung	7xxxx
Versorgungsleitungen	8xxxx

4.2.2 Durchflussmessung mittels Druckmessblende

Um die Volumenströme des Produkt- und Abgases mit den Simulationsergebnissen aus IP-SEpro vergleichen zu können, sind ebenfalls Messungen erforderlich. Aufgrund der extremen Bedingungen wie hohe Temperaturen ($T_{Gas} \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$), verunreinigte Gase (Teere, Stäube, Flugasche, etc.) und variable Gaszusammensetzungen werden hohe Anforderungen an die Messeinrichtungen gestellt. Eine mögliche Methode zur Bestimmung des Volumenstroms, die die Bedingungen erfüllen, sind Drosselgeräte (siehe Kap. 2.2.1). Das Messprinzip beruht auf dem Einbau einer Blende in einer voll durchströmten Rohrleitung. Das Vorhandensein der Blende erzeugt eine Differenz der statischen Drücke zwischen Blendeneinlauf und -auslauf. Aus der gemessenen Druckdifferenz wird der Volumenstrom berechnet.

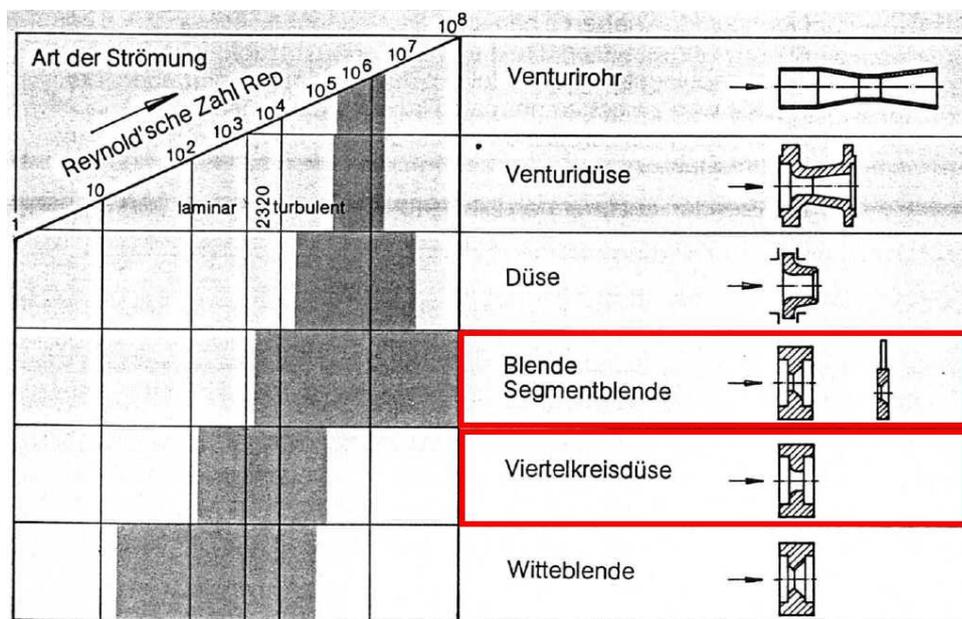


Abb. 4.6: Einsatzbereiche von Druckmessblenden in Abhängigkeit der Reynoldszahl

Aufgrund der unterschiedlichen Messblendenbauarten und den eingeschränkten Arbeitsbereichen der Messblenden, können verschiedene Kriterien herangezogen werden, um den richtigen Messblendentypen auszuwählen. Die für die Versuchsanlage wichtigsten Kriterien sind:

- geringe Druckverluste über die Druckmessblende
- möglichst kurze Einlaufstrecken
- preiswert

Speziell durch die Einschränkung der Reynoldszahlbereiche ist jedoch die Auswahl stark eingeschränkt. Anhand von Simulationsergebnissen der Versuchsanlage konnten die Volumenströme von Produkt- und Abgas und daraus resultierende Reynoldszahlbereiche ermittelt und eine geeignete Auswahl getroffen werden. Für die Bestimmung des Volumenstroms kommt beim Produktgas eine Viertelkreisdüse und beim Abgas eine Blende mit Eckdruckentnahme zum Einsatz. Beide Bauarten sind nach Normen gefertigt, daher kann der Durchfluss nach den vorgegebenen Normen ermittelt werden.

Annahmen für das Berechnungsverfahren

Als bekannte Größen gelten die Messblendenspezifikationen, Gaszusammensetzungen, Temperaturen und Drücke. Es müssen jedoch einige Vereinfachungen angenommen werden, um die Berechnungen durchführen zu können:

1. Es wird angenommen, dass das Abgas nur die Gaskomponenten N_2 , CO_2 , CO , O_2 und H_2O enthält und das Produktgas nur die Komponenten H_2 , CO , H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2 und O_2 enthält. Die übrigen Gaskomponenten werden aufgrund des geringen Volumenanteils vernachlässigt und in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Diese Vereinfachung ist zulässig, da vergangene Versuche zeigten, dass der Anteil von höheren C_xH_y im Produktgas kleiner 3% und sonstige Gaskomponenten üblicherweise vernachlässigbar klein sind (siehe auch Tab. 2.1). Außerdem ist die exakte Gaszusammensetzung unbekannt und kann daher in die Berechnungen nicht einfließen.
2. Die Berechnung der Gaseigenschaften wie Dichte (ρ), Viskosität (η) und spezifische Wärmekapazität (c_p) erfolgt nach empirischen Gleichungen und weicht daher von den realen Werten ab.
3. Der Einfluss von Realgasfaktoren wird vernachlässigt. Dies ist durchaus zulässig, da die Arbeitspunkte bei niedrigen Drücken und hohen Temperaturen liegen. Außerdem haben Berechnungsblätter der Firma Barthel gezeigt, dass der Realgasfaktor z bei einer typisch auftretenden Stoffzusammensetzung nahe 1 ist (Abgas: $z = 0,99997$, Produktgas: $z = 1,0001$ siehe Anh. B.2.5).
4. Um alle angeführten Formeln anwenden zu dürfen, wird von einem idealen Gas ausgegangen

Der Hersteller der Druckmessblenden garantiert, die Voraussetzungen zur Anwendung der Norm zu erfüllen. Daher ist keine explizite Überprüfung der Anwendungsgrenzen notwendig. Der Durchfluss von Produkt- und Abgas wird in Abhängigkeit von Temperatur, Differenzdruck und Gaszusammensetzung im PLS online berechnet und mitgeloggt. Dazu sind die unten angeführten Gleichungen in das Programm implementiert. Ziel der Berechnung ist die Verfügbarkeit des aktuellen Durchflusses zu jedem Zeitpunkt der Versuchsphase.

Druckmessblende - Berechnung Produktgasvolumenstrom

Bei der Bauform der Produktgasmessblende handelte es sich um eine Viertelkreisdüse und wird nach VDI/VDE 2041 berechnet. Die jeweiligen Formeln zur Berechnung des Durchflusses und Voraussetzungen für die Anwendung wurden aus der VDI/VDE-Richtlinie entnommen.

Die grundlegende Formel zur Berechnung des Volumenstroms lautet:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\epsilon \pi}{\rho} \frac{d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (4.1)$$

Dabei ist β das Durchmesser Verhältnis und ϵ die Expansionszahl. Ist die Reynoldszahl innerhalb eines gewissen Bereichs, sind die Durchflusskoeffizienten C von Viertelkreisdüsen nur vom Durchmesser Verhältnis β abhängig (siehe Tab. 4.4 und Gl.(4.2)). Dies vereinfacht die Berechnung.

Der Durchflusskoeffizient C und die Expansionszahl ϵ werden durch folgende Gleichungen ermittelt:

$$C = 0,769 + 0,527\beta^4 + 0,423\beta^8 \quad (4.2)$$

$$\epsilon = 1 - \left(0,484 + 1,54\beta^4\right) \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (4.3)$$

Tab. 4.4: Beschreibung der vorkommenden Variablen der Produktgasmessblende

Variable	Formel	Wert	Beschreibung
C	$f(\beta)$	-	Durchflusskoeffizient (gültig für: $500 \leq Re_D \leq 7 \cdot 10^4$)
ϵ	$f(\beta, \Delta p, \kappa, p_1)$	-	Expansionszahl (gültig für $p_2/p_1 \geq 0,85$)
Δp	$p_1 - p_2$	-	Druckdifferenz vor/nach der Druckmessblende
Abmessungen der eingesetzten Produktgasmessblende			
β	$\frac{d}{D}$	0,29073	Durchmesser Verhältnis Drosselöffnung zu Rohrrinnendurchmesser

Um alle benötigten Größen für Gl.(4.1) berechnen zu können, sind zusätzliche Gleichungen notwendig und werden hier angeführt:

ρ_1 - Dichte des Gasgemisches

ρ_1 ist die Dichte des Gases vor der Messblende bei Betriebsbedingungen. Wird von einem idealen Gas mit idealer Durchmischung und geringen Drücken ausgegangen, kann die Dichte über die ideale Gasgleichung durch Gl.(4.4) mit R als universelle Gaskonstante und \bar{M} als

mittlere molare Masse bestimmt werden ($x_i \dots$ Stoffmengenanteil, $M_i \dots$ molare Masse der N Einzelkomponenten).

$$\bar{\rho}(T) = \frac{p\bar{M}}{RT} \quad (4.4)$$

$$\bar{M} = \sum_i^N x_i M_i \quad (4.5)$$

Bei den weiteren Berechnungen wurde $\rho_1 = \rho$ gesetzt, die Dichte bezog sich somit auf den Volumenstrom vor der Messblende.

κ - Isentropenexponent

Der Isentropenexponent beschreibt, wie sich Druck und Temperatur eines Systems relativ zueinander verändern müssen, damit es sich um eine adiabate, reversible Zustandsänderung handelt. Er wird daher auch häufig als Adiabatenkoeffizient bezeichnet. Der Isentropenexponent des Gasgemisches $\bar{\kappa}$ ergibt sich aus den Isentropenexponenten κ_i und Stoffmengenanteilen x_i der einzelnen Komponenten:

$$\bar{\kappa} = \frac{\sum_i \frac{x_i \kappa_i}{\kappa_i - 1}}{\sum_i \frac{x_i}{\kappa_i - 1}} \quad (4.6)$$

Die Isentropenexponenten der Reingase können einerseits aus Tabellen entnommen werden (bei festgelegter Temperatur und festgelegtem Druck), andererseits bei der Annahme eines idealen Gases über die Gl.(4.7) berechnet werden (mit R als spezifische Gaskonstante). Für c_p gilt wiederum die Näherungsgleichung (4.8). Somit geht die Temperatur in die Berechnung ein, der Fehler reduziert sich dadurch.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R} \quad (4.7)$$

c_p - Spezifische isobare Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist ein Maß für die Speicherfähigkeit von Energie eines Stoffes. Er beschreibt, wie viel Energie pro Mengeneinheit zugeführt werden muss, um den Stoff bei konstantem Druck um 1°C zu erwärmen. In der Verfahrenstechnik hat sich die Gl.(4.8) für die temperaturabhängige Berechnung von c_p von Gasen bewährt. Der Fehler steigt mit abnehmender Temperatur. Da in diesem Anwendungsfall jedoch die Temperaturen hoch sind, sind die Abweichungen zum tatsächlichen c_p gering und die Qualität der Gleichung daher ausreichend.

$$\frac{c_p}{J/kgK} = A + B\frac{T}{K} + C\left(\frac{T}{K}\right)^2 + D\left(\frac{T}{K}\right)^3 + E\left(\frac{T}{K}\right)^{-2} \quad (4.8)$$

Die Koeffizienten A bis E können wiederum aus Tabellenwerken ([57]) entnommen werden.

Berechnung Abgasvolumenstrom

Für die Abgasmessung ist eine Blende mit Eck-Druckentnahme verbaut. Die dafür anwendbare Norm lautet DIN EN ISO 5167-2. Die Formeln sind ähnlich die der Produktgasmessblende. Die grundlegende Gleichung zur Berechnung des Volumenstroms ist gleich. Die Bestimmung des Durchflusskoeffizienten C und der Expansionszahl ϵ weichen jedoch ab. Da in Gl.(4.9) die Reynoldszahl eingeht, erfolgt die Berechnung für den Durchfluss iterativ.

$$\begin{aligned}
 C = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A) \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} \\
 & + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1}) (1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\
 & - 0,031 \left(M_2' - 0,8M_2'^{1,1} \right) \beta^{1,3}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\epsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \tag{4.10}$$

Gl.(4.10) gilt für $p_2/p_1 \geq 0,75$. Unsicherheiten für die Berechnungen von C und ϵ können der Norm entnommen werden. Kenngrößen und Abmessungen der Abgasmessblende sind in Tab. 4.5 aufgelistet.

Um Gl.(4.9) zu lösen, werden dieselben Gleichungen wie bei der Produktgasmessblende angewendet. Fehlende Größen wie Re_D und η werden im Weiteren angegeben.

Re_D - Reynoldszahl

Die Reynoldszahl Re_D wird auf den Innendurchmesser des Rohres bezogen und nach Gl.(4.11) berechnet. Da die Gasgeschwindigkeit, die in die Berechnung der Reynoldszahl eingeht, unbekannt ist, muss Re_D iterativ ermittelt werden. Ein Leitfaden für die Wahl des Iterationsverfahrens und einer ersten Abschätzung kann der Norm DIN EN ISO 5167-2 entnommen werden. Die für die Berechnung der Reynoldszahl erforderliche dynamische Viskosität wird im nächsten Unterpunkt erläutert.

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\eta} \tag{4.11}$$

η - Dynamische Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluides und insbesondere zur Bestimmung des Druckverlusts zu berücksichtigen. Außerdem geht sie in die Berechnung der Reynoldszahl ein. Die dynamische Viskosität eines idealen Gases ist nach der kinetischen Gastheorie unabhängig von der Dichte, es besteht jedoch eine starke Abhängigkeit von der

Tab. 4.5: Beschreibung der vorkommenden Variablen der Abgasmessblende

Variable	Formel	Wert	Beschreibung
C	$f(\beta, Re_D, A, L_1, M_2')$	-	Durchflusskoeffizient (gültig für: $500 \leq Re_D \leq 7 \cdot 10^4$)
ϵ	$f(\beta, p_1, p_2, \kappa)$	-	Expansionszahl (gültig für $p_2/p_1 \geq 0,85$)
Re_D	$f(\rho, v, D, \eta)$	-	Reynoldszahl bezogen auf Innendurchmesser des Rohres
A	$\frac{19000\beta^{0,8}}{Re_D}$	-	Faktor, abhängig von der Reynoldszahl
Abmessungen der eingesetzten Abgasmessblende			
β	$\frac{d}{D}$	0,46823	Durchmesser Verhältnis Drosselöffnung zu Rohrinne Durchmesser
L_1	$\frac{l_1}{D}$	0	Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Einlauf von der Stirnseite der Blende zum Rohrdurchmesser (bei Blende mit Eckdruckentnahme $L_1 = 0$)
L_2'	$\frac{l_2'}{D}$	0	Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Auslauf von der Rückseite der Blende zum Rohrdurchmesser (bei Blende mit Eckdruckentnahme $L_1 = 0$)
M_2'	$\frac{2L_2'}{1-\beta}$	0	konstanter Faktor

Temperatur. Diese muss daher in den Gleichungen berücksichtigt werden. Für die Prozessrechnung gibt es empirische Formeln, um die Viskosität eines reinen Gases abschätzen zu können. [57]

$$\frac{\eta}{\mu Pas} = A + B \frac{T}{K} + C \left(\frac{T}{K} \right)^2 + D \left(\frac{T}{K} \right)^3 + E \left(\frac{T}{K} \right)^4 \quad (4.12)$$

Die Koeffizienten A, B, C, D, E können aus Tabellenwerken ([57]) entnommen werden und sind im Anhang unter C aufgelistet. Die Viskosität eines Gasgemisches wird nach folgender Näherungsformel berechnet:

$$\frac{\bar{M}}{\bar{\eta}} = \sum_i^N \frac{x_i M_i}{\eta_i} \quad (4.13)$$

mit M als molare Masse der Einzelkomponenten bzw. der Mischung, η der dynamischen Viskosität der Einzelkomponenten und x_i der Stoffmengenanteile der Komponenten. [58]

4.3 Implementierung der Prozessleittechnik

Bei der Ausarbeitung der Prozessleittechnik (PLT) wurde mit Hilfe des NAMUR NA035-Arbeitsblattes ein Zeitplan erstellt, welcher den Ablauf und die Methodik der Planung eines leittechnischen Projektes verdeutlichte. Hauptaugenmerk war dabei auf Projektierung, Qualitätsmanagement und Projektmanagement gelegt. Auf eine einfache Bedienung der Anlage und gute Dokumentation bei der Umsetzung der PLT wurde besonders viel Wert gelegt. Eine rasche Einarbeitung in die Anlagenfahrweise und den Anlagenbetrieb in möglichst kurzer Zeit konnte dadurch erleichtert werden. Der detaillierte Projektplan für die Automatisierung kann dem Anhang entnommen werden (B.3). Die bei der Planung zu berücksichtigende Punkte waren

- Verfahrenstechnische Vorgaben
- Planung der Prozessleittechnik und sicherheitstechnischen Einrichtungen
- Evaluierung der PLT-Software
- Schnittstellen mit anderen Systemen
- Funktionsumfang des Bedienkonzepts
- Vorgaben zur Datenverarbeitung
- Einhaltung von Gesetzen und Normen
- Einrichtungen zur Bedienung
- Vorzusehende Erweiterungen

Im folgenden Teil wird auf einige Punkte näher eingegangen.

4.3.1 Verfahrenstechnische Vorgaben

Hier wurden die für die Automatisierungstechnik relevante Vorgaben aus dem Basic Engineering der Anlage festgelegt. Dazu zählten Produktvorgaben (Menge, Qualität), Betriebsparsparameter und Ausrüstungsteile der Anlage (siehe auch Bild 3.5). Regelungskonzepte, Sicherheitskonzepte und Verriegelungskonzepte wurden erarbeitet und Betriebsweisen definiert. Unterstützt wurde die Arbeit dabei vom Arbeitsblatt NAMUR NA062.

Da sich diese Arbeit speziell mit dem Thema der Implementierung der MSRT auseinandersetzt, wird im Weiteren auf die grundlegende Bedienung der Anlage näher eingegangen. Die ausgearbeiteten Betriebsphasen, Regelungs- und Sicherheitskonzepte der Versuchsanlage sind hier angeführt.

Betriebsphasen der Versuchsanlage

Aus Erfahrungen von vergangenen Versuchsanlagen wurden An- und Abfahrprozeduren definiert, die für die Durchführung eines Versuches notwendig sind. Dabei wurde in folgende fünf Phasen unterteilt:

- Vorbereitungen vor Versuchsbeginn

- Aufheizphase der Versuchsanlage
- Umstellung auf Dampfvergasung
- Betriebsphase - stationäre Phase
- Abkühl- & Abstellphase

Eine Versuchsauswertung mit der Anlage aus dem Jahr 2001 zeigt die groben Phasen (siehe Bild 4.7).

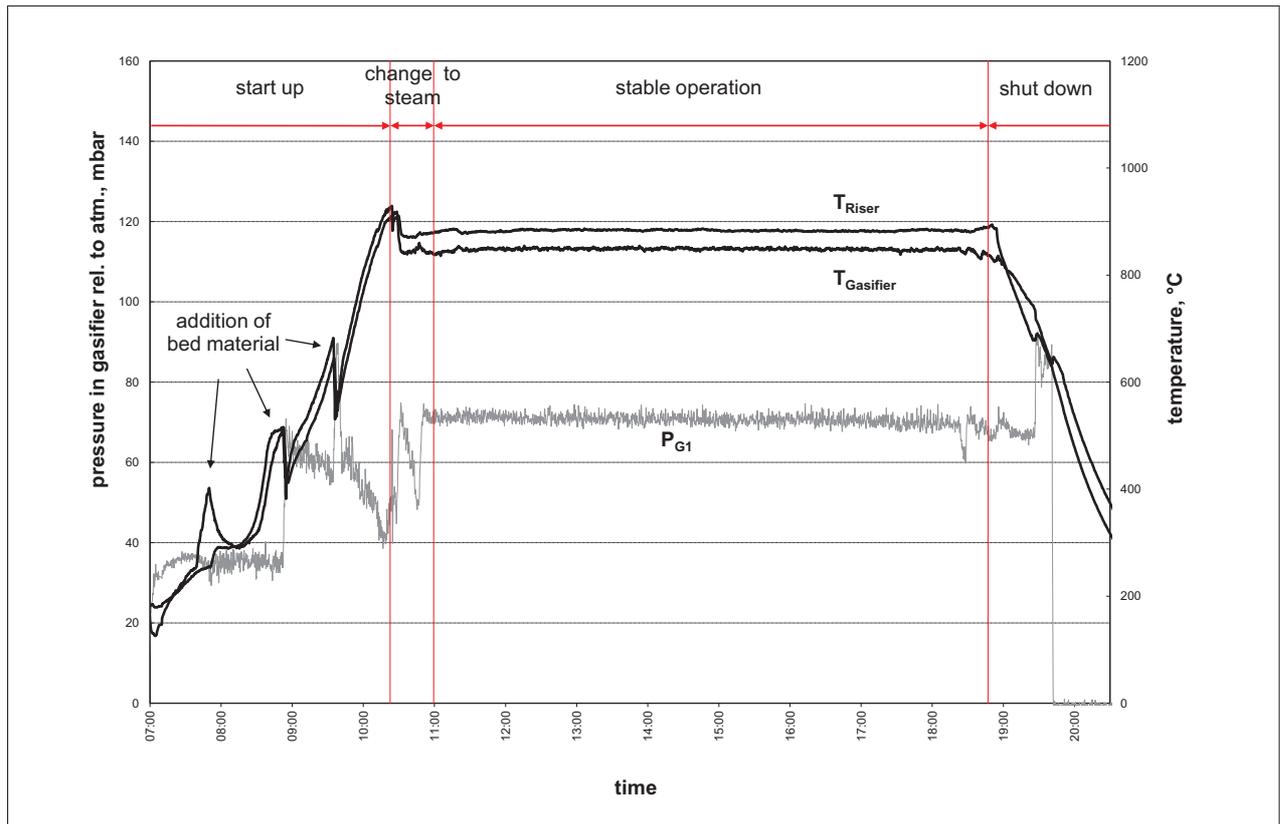


Abb. 4.7: Betriebsweisen der Anlage [59]

Im PLS sind die angeführten Phasen als Schrittkette umgesetzt. In jeder Phase sind unterschiedliche Aktionen durchzuführen um definierte Weiterschaltbedingungen zu erreichen. Grenzwerte (Temperaturen, Durchflüsse, etc.) die erreicht werden müssen, um Weiterschaltbedingungen zu erfüllen, können im PLS innerhalb von definierten Schranken verstellt werden. Erst wenn alle Weiterschaltbedingungen erfüllt sind, wird die nächste Versuchsphase aktiv. Entsprechend wurde in einem Verriegelungskonzept festgelegt, welche Motoren, Ventile und Heizungen in der jeweiligen Phase gestartet werden dürfen. In allen anderen Phasen wird vom PLS das Einschalten der jeweiligen Aktoren verhindert.

Aktionen und Weiterschaltbedingungen sind im Folgenden angeführt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die folgenden Punkte nicht vollständig sind und auch gegebenenfalls angepasst werden müssen. Auch Temperatur und andere Grenzwerte sind auf zukünftig festgelegte Anforderungen bzw. Festlegungen anzupassen.

Vorbereitungen vor Versuchsbeginn:

Um einen reibungslosen Versuch gewährleisten zu können, sind wichtige Vorbereitungen zu erledigen. Auch sicherheitstechnische Überprüfungen sind unerlässlich. Folgende Aktionen (A) und Weiterschaltbedingungen (W) sind nun beispielhaft angeführt:

A: Überprüfung des allgemeinen Anlagenzustandes

A: Überprüfung der Sensorik und Aktorik (dazu zählen Temperatur- und Druckmessungen, Schnecken, Ventile, Analysegeräte, etc.)

A: Versorgungseinrichtungen (Ventile, Kugelhähne) öffnen

A: Durchführung der Flushspülungen der jeweiligen Brennstoffbunker

W: Rückmeldung Flushspülungen durchgeführt

A: Befüllen der Brennstoffbunker

A: Überprüfung des Kamingebläses

W: Kamingebläse läuft

A: Öffnen der Klappen, die zum Kamin führen

W: Rückmeldung Kaminklappen offen

Aufheizphase der Versuchsanlage:

Nachdem die Versuchsanlage überprüft und alle Vorbereitungen abgeschlossen sind, beginnt die Aufheizphase. In dieser Phase wird die Anlage auf ca. 450 °C aufgeheizt. Durchzuführende Aktionen und Weiterschaltbedingungen sind wieder beispielhaft angeführt:

A: Externe Schlauchfiltersteuerung einschalten

W: Rückmeldung Schlauchfilter gestartet

A: Starten der Luftfluidisierung

A: Spülung der Anlage mit Luft (dient zur Entfernung von Verunreinigungen, Staubpartikel und sonstige Stoffe aus Vorversuchen)

A: Brennkammergebläse starten

W: Rückmeldung Brennkammergebläse ein

A: Aktivierung des Brenners

W: Rückmeldung Brenner gestartet

A: Begleitheizungen der Dampfleitungen aktivieren (verhindert Auskondensieren des Dampfes)

A: Dampferzeuger einschalten

A: Luftfluidisierung in FR und AR starten

A: Heizschalen einschalten

- A: Vorwärmen der Reaktoren und Strahlungskühler mit elektrischen Heizungen
- A: Aktivierung des Kühlkreislaufes (Pumpen starten, Ventile öffnen)
- A: Wasser in Dampftrommel und Boiler vorwärmen
- W: Temperaturen in den Reaktoren über Grenzwert (ca. 300 °C)
- W: Temperaturen in Dampftrommel und Boiler über Grenzwert (ca. 60 °C)
- A: Beginn der Feuerung mit Heizöl im AR (Beschleunigung der Aufheizphase)
- A: Starten der Brennstoffbeschickung und Verbrennung im FR
- W: Rückmeldung Brennstoffbeschickungsschnecken aktiv
- A: Regelung des Wasserstandes der Strahlungskühler auf minimale Kühlleistung
- W: Temperatur in Strahlungskühler über Grenzwert
- A: Regelung des Wasserstandes der Strahlungskühler auf Sollniveau (Abkühlung der austretenden Gase aus den Reaktoren)
- W: Temperatur im gesamten Reaktorraum über Grenzwert (ca. 850 °C)

Umstellen auf Dampfvergasung:

Nachdem die Temperaturen in der Versuchsanlage erreicht sind, beginnt die Anfahrphase. Durch die Zuführung von Bettmaterial beginnt sich erstmals eine Wirbelschicht auszubilden. Die hier beispielhaft angeführten Aktionen und Weichschaltbedingungen sind durchzuführen:

- A: Überprüfen der Regelungen und korrekte Funktionsweisen der Anlagenteile
- A: Feinascheschnecken nach Zyklon einschalten
- W: Rückmeldung Feinascheschnecken aktiv
- A: Befüllen der Reaktoren mit Bettmaterial → Temperaturen in den Reaktoren sinken
- W: Temperatur in Reaktoren über Grenzwert (ca. 850 °C)
- A: Steigerung der Brennstoffzufuhr
- A: Dampfzufuhr in den FR starten, bei gleichzeitiger Reduktion der Luftzufuhr
- W: Luftzufuhr in den FR gestoppt
- W: Temperatur in Reaktoren über Grenzwert (ca. 850 °C)
- A: Deaktivierung der Zusatzheizungen

Betriebsphase - stationäre Phase:

Die Betriebsphase zeichnet sich durch einen stabilen Anlagenbetrieb aus. Es kann mit den gewünschten Versuchen begonnen werden. Hier sind keine Aktionen und Weichschaltbedingungen, da sich jeder Versuch im Anlagenverhalten unterscheidet.

Abkühl- & Abstellphase:

Nachdem die gewünschten Versuche durchgeführt wurden, beginnt das Herunterfahren der Anlage. Diese Phase beinhaltet das Abkühlen der Versuchsanlage und Stoppen der Versorgungseinrichtungen. Durchzuführende Aktionen und Weiterschaltbedingungen sind beispielhaft angeführt:

A: Stoppen der Brennstoffzufuhren (Heizöl, Festbrennstoff)

W: Rückmeldung Brennstoffbeschickungsschnecken gestoppt

A: Reduzierung der Dampfmenge, Starten der Luftfluidisierung im FR (zur Aufrechterhaltung der Bettzirkulation)

A: Regelung des Wasserstandes der Strahlungskühler auf maximale Kühlleistung, um eine rasche Abkühlung der Versuchsanlage zu erreichen

W: Dampffluidisierung gestoppt: $\dot{V}_{Dampf} = 0$

A: Dampferzeuger ausschalten

W: Rückmeldung Dampferzeuger aus

A: Begleitheizungen der Dampfleitungen deaktivieren

W: Temperaturen in den Reaktoren unter kritischem Grenzwert

A: Ablassen des Bettmaterials

A: Reduzierung der Luftfluidisierung auf Minimum reduzieren

W: Bettmaterial vollständig abgelassen

A: Stoppen der Feinascheschnecken nach den Zyklonen

W: Rückmeldung Feinascheschnecken gestoppt

A: alle noch aktivierten Zusatz-/Begleitheizungen deaktivieren

A: Brenner stoppen

A: Brennerkammergebläse stoppen

W: Temperaturen im gesamten Anlagebereich unter kritischem Grenzwert

A: Stoppen der Luftfluidisierung

A: Externe Schlauchfiltersteuerung ausschalten

W: Rückmeldung Schlauchfilter gestoppt

A: Deaktivierung des Kühlkreislaufes (Pumpen stoppen, Ventile schließen)

A: Versorgungseinrichtungen (Ventile, Kugelhähne) schließen

A: Schließen der Klappen, die zum Kamin führen

W: Rückmeldung Kaminklappen geschlossen

A: Überprüfung des allgemeinen Anlagenzustandes

Sicherheitskonzept

Da bei Vergasungsversuchen mit brennbaren und toxischen Gasen, hohen Temperaturen und überhitzten Wasserdampf hantiert wird, sind zusätzlich zu den Betriebsmodi Maßnahmen für die Sicherheitstechnik und eine entsprechende Regelung unerlässlich. Speziell dazu wurde in vergangenen Arbeiten Risikoanalysen durchgeführt (siehe auch [18]), um etwaige Gefahrenpotentiale zu erkennen und Risiken zu minimieren. Ziel ist es, den Menschen und die Umgebung zu schützen, dies hat oberste Priorität. Ebenso erforderlich ist der Schutz der Anlage. Für die Automatisierungstechnik bilden Sicherheitskonzepte die Basis. Generell kann die Sicherheitstechnik in vier Levels kategorisiert werden, um eine Anlage in einem sicheren Zustand zu betreiben. Diese werden nun näher vorgestellt.

Ebene 1: Regelkreise

Als Grundlage für einen sicheren Anlagenbetrieb sorgen Regelkreise. Diese sind für einen ordnungsgemäßen Betrieb im, bzw. nahe dem vorgegebenen Arbeitspunkt zuständig. Arbeiten alle Regelungen wie gewünscht, befindet sich die Anlage meist auch in einem sicheren Betrieb.

Ebene 2: Verriegelungen

Weichen Regelungen vom Arbeitspunkt aus unterschiedlichen Gründen ab, sorgen Verriegelungen für die Korrektur für eventuelle Fehlverhalten von Anlagenkomponenten oder eine falsche Anlagenbedienung durch Operatoren. Im schlimmsten Fall fallen dadurch nur kleine Anlagenteile aus. So kann der Schaden möglichst gering gehalten werden. Teil dieser Arbeit war die Umsetzung des Verriegelungskonzepts. Es wurde die Logik festgelegt, in welchen Situationen Aktoren einen definierten Zustand einnehmen müssen. Dazu zählten beispielsweise das Schließen von Ventilen, Stoppen von Motoren und Pumpen oder Ausschalten von Heizungen. Damit wird sichergestellt, dass es zu keiner Notabschaltung kommt.

Ebene 3: Notabschaltung

Kann die Anlage mit Hilfe von Regelkreisen und Verriegelungen nicht stabilisiert werden, führt das Softwareprogramm eine Abschaltung herbei. Dabei werden alle Brennstoffzufuhren in die Reaktoren gestoppt, und die Anlage mit Stickstoff (Inertgas) geflutet. Im Sicherheitskonzept wurde das zugehörige Prozedere ausgearbeitet [18]. Es kann einerseits vom Operator, andererseits von einem Notabschaltprogramm initiiert werden. Dieses überwacht verschiedene kritische Gefahrenpotentiale und löst die Notabschaltung nach Bedarf automatisch aus. Das Not-Aus-Konzept ist nicht Teil dieser Arbeit und muss noch festgelegt werden.

Ebene 4: Einrichtungen zur Druckentlastung

Als letzte Ebene greifen hardwaretechnische Baumaßnahmen wie Berstscheiben und Sicherheitsventile, die dafür sorgen, dass das Bedienpersonal geschützt ist und sich Schäden an der Anlage in Grenzen halten. Diese wurden beim Basic Engineering festgelegt und durch eine FMEA-Studie erweitert [18]. Die festgelegten, sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Überdruckventile, Berstscheiben oder Überströmventile wurden in die Versuchsanlage eingebaut.

Regelungskonzept

Da die Versuchsanlage und ihre Sensorik und Aktorik umfangreich ist, können Operatoren die Anlage ohne automatische Vorgänge und Schalthandlungen nur mit hohem Aufwand betreiben. Daher wurden Regelungskonzepte entworfen und in das PLS implementiert, um Teilanlagen möglichst automatisch betreiben zu können, ohne dass Operatoren sich eingehend damit beschäftigen müssen. Der Automatisierungsgrad im Bereich der Gaserzeugung ist jedoch auf ein Minimum reduziert, damit der Operator sich intensiv mit den ablaufenden Vorgängen auseinandersetzen muss. Das Hauptaugenmerk der Versuchsanlage bezieht sich schließlich auf das wissenschaftliche Arbeiten im Bereich des neuen Wirbelschichtreaktorsystems und der Gaserzeugung.

Insgesamt wurden 14 Regelungs- und Prozessschaubilder für die oben erwähnten Nebenanlagen entwickelt und im PLS implementiert. Im Folgenden werden die wichtigsten kurz präsentiert, im Anhang unter B.1 sind alle Regelschaubilder abgebildet.

Brennstoffbeschickung: Die Motoren für die Brennstoffbunkerschnecken (N11000 und N12000) werden mittels FU angesteuert und sind somit regelbar. Als Sollwert wird die Motorleistung (0-100 %) vorgegeben. Als Rückmeldung wird die Momentenaufnahme des Motors an das PLS übertragen. Dadurch können Verstopfungen bzw. ungleichmäßige Drehzahlen vorzeitig erkannt werden und ggf. Maßnahmen eingeleitet werden (siehe auch 3.1.2). Die Brennstoffzufuhr wird entweder mit konstanter Motordrehzahl vorgegeben, oder über konstante Gewichtsabnahme geregelt - je nach Schalterstellung im PLS. Der Motor der Stopfschnecke (N10000) läuft mit konstanter Drehzahl, da dieser direkt über ein Motorschütz angesteuert wird.

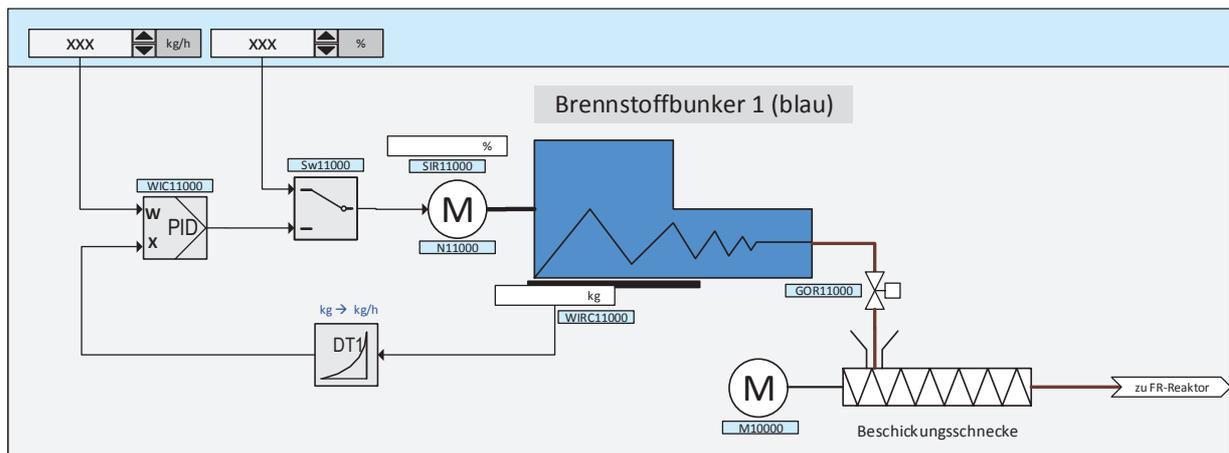


Abb. 4.8: Brennstoffregelung für einen Bunker

Reaktoren: Generell findet die Luft- und Dampffluidisierung mit Hilfe von per Hand verstellbaren Ventilen statt, welche sich in der Warte befinden. Es findet keine Regelung statt. Alle einstellbaren Durchflüsse, so wie Temperaturen und Drücke werden vom PLS mitgeloggt. Die Leistung der Motoren für den Bettmaterialtransport nach den Zyklonen wird ebenfalls vom Operator per Einstellwert im PLS vorgegeben.

vorgegeben werden. Der PID-Regler übernimmt etwaige Korrekturen, die bei der idealisierten Berechnung entstehen. Der Vorteil, der dadurch entstehen würde, wäre eine raschere Annäherung der Temperatur an die gewünschte Vorgabe, da bereits frühzeitig eine Änderung der Gaseintrittstemperatur erkannt wird. Dem PID-Regler könnten wesentlich schnellere Reglerparameter eingestellt werden, da dieser nur mehr als Korrekturregler fungiert. Die Regelung behält trotzdem ihre Robustheit. Da jedoch die Verweilzeit des Gases im Strahlungskühler sehr gering ist, kann der Vorteil der frühzeitigen Einwirkung in die Regelung nicht genutzt werden. Berechnungen ergaben lediglich eine Verweilzeit des Produktgases im Strahlungskühler von 1,44 Sekunden (Abgas: 0,76 Sekunden). Daher war es nicht sinnvoll, die PID-Regelung inkl. Vorsteuerung (siehe Bild 4.10) umzusetzen.

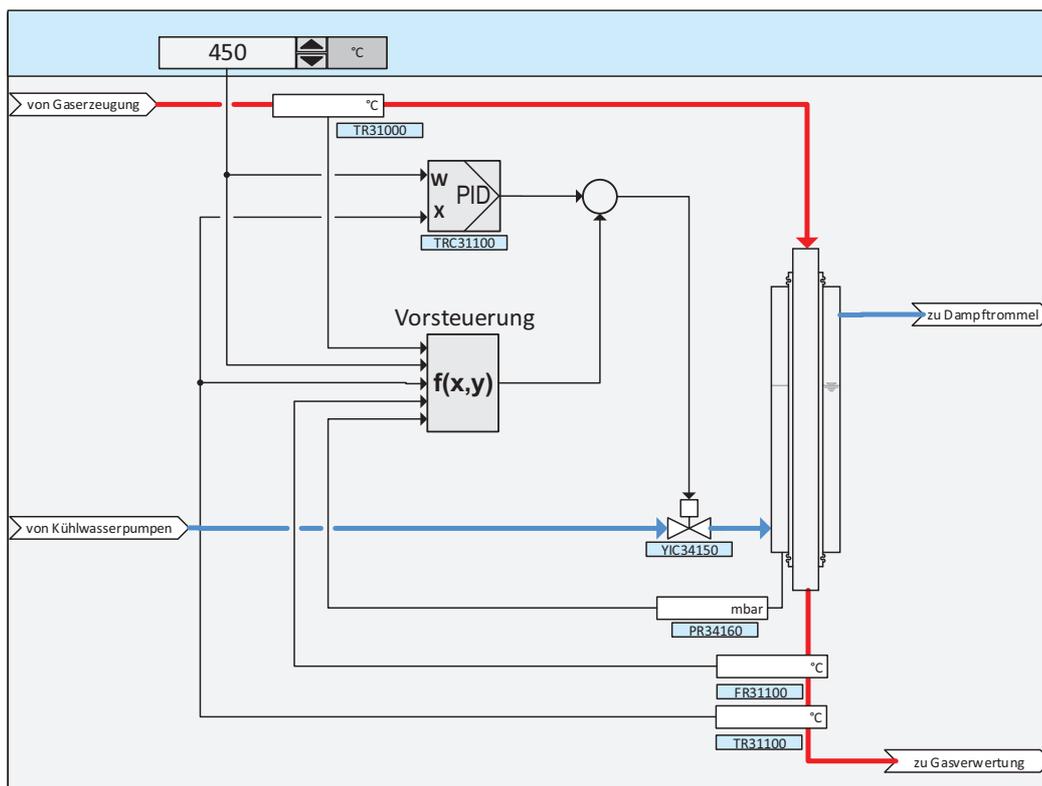


Abb. 4.10: Kühlerregelung mit Vorsteuerung

Luftgebläse für die Brennkammer: Ein einschleifiger PID-Regelkreis regelt die Luftmenge in die Brennkammer, um eine optimale Verbrennung in der Brennkammer zu gewährleisten. Als Regelgröße dient der O_2 -Gehalt, der über eine Lambdasonde im Abgas ermittelt wurde. Die Umsetzung dieser Regelung war wichtig, da es sich dabei um einen sicherheitskritischen Anlagenbereich handelt. Es muss zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden, dass genug Verbrennungsluft in die Brennkammer geleitet wird, um eine vollständige Verbrennung herbeizuführen.

Dampfleitung zum Verteiler: Die für die Aufwärmung verwendete Heizpatrone wird mittels Thyristorschalter angesteuert. Hier wird daher ein 2-Punktregler eingesetzt. Als Regelgröße dient die Temperatur nach der Heizeinrichtung. (Anh. B.1) Wichtig dabei ist die

Einhaltung der vorgegebenen Solltemperatur, da bei Abweichungen die geeichten Durchflussmessungen einen falschen Wert liefern.

Dampfüberhitzung: Dabei handelt sich um einschleifige PID-Regelkreise. Die untere Vergaserfluidisierung ist mit einer Heizschale (max. 1,5 kW Heizleistung) ausgerüstet. Für die Siphon-Fluidisierungen und obere Vergaserfluidisierung werden Heizpatronen mit einer Heizleistung von max. 0,4 kW verwendet. Die Regelung der Heizungen übernehmen Thyristorsteller der Firma Jumo. Als Regelgröße dient die Temperatur nach der Heizeinrichtung. (Anh. B.1) Verriegelungen an den Heizeinrichtungen sorgen für den Schutz vor Überhitzung.

Luftvorwärmung: Primär-, Sekundär- und Tertiärluft sind mit Heizschalen (2 x max. 6 kW & 1 x max. 3 kW Heizleistung) ausgerüstet und sind ebenfalls über Thyristorsteller mit einschleifigen PID-Regelkreisen geregelt. (Anh. B.1) Sie dienen hauptsächlich für die Aufheizphase (siehe Kap. 4.3.1).

Strahlungskühlervorwärmung: Für die Vorwärmung der Strahlungskühler kommen Luftvorwärmer (max. 7,5 kW Heizleistung) zum Einsatz, die über 2-Punktregelkreise geregelt werden. (Anh. B.1) Die Vorwärmung dient für eine raschere Aufheizphase der Versuchsanlage.

Kühlkreislauf: Die Regelung des Kühlkreislaufes ist aufwendiger, da zwei Kreisläufe dafür sorgen, den Dampf, der bei der Abkühlung des Abgases nach der Brennkammer entsteht, im Kondensator zu kondensieren. Eine schematische Zeichnung inklusivem Regelungsschema ist in Abb. 4.11 dargestellt. Auf der Sekundärseite des Kühlkreislaufes ist ein PID-Regelkreis ins PLS integriert. Über eine Maximalauswahl wird selektiert, ob entweder der Regler, der die Temperatur des Kühlwassers nach dem Kondensator regelt oder der Regler, der die Temperatur des Dampfes, der zum Kamin führt, geregelt wird. Öffnet das angesteuerte Ventil YIC35130, steigt der Kühlwasservolumenstrom. Dadurch wird mehr Energie abtransportiert. Als Mindeststellung wird eine Ventilöffnung von 10 % vorgegeben.

Auf der Tertiärseite wird das durch den Kondensator geleitete Kühlwasser über zwei Wärmetauscher (60 kW & 120 kW) abgekühlt. Das dafür notwendige Tertiärkühlwasser wird über das Ventil YIC72020 geregelt. Sollte dieser Wärmetauscher zur Energieabfuhr nicht ausreichen, bzw. dieser ausfallen, erfolgt die Abkühlung über den 120 kW Wärmetauscher, welcher Brauchwasser zur Kühlung verwendet und über das Ventil YIC71200 regelt. Eine Split-Range-Regelung (TIC35110) sorgt für die Ansteuerung der beiden Ventile. Diese Art der Regelung wird dann eingesetzt, wenn mehrere Aktoren auf eine Stellgröße wirken. Dabei wird der Arbeitsbereich des Reglers in zwei Teilbereiche aufgeteilt und anschließend die jeweiligen Ventile angesprochen. Ziel ist es, die Regelung so zu gestalten, dass der Primärkühlkreis mit dem Ventil YIC72020 die Wärme abführt und erst bei nicht ausreichender Wärmeabfuhr der zweite Kühlkreis aktiviert wird. Ein 2-Punktregler öffnet zusätzlich das Steuerventil GOS71220, wenn die Temperatur des Kühlwassers des 120 kW Wärmetauschers einen Grenzwert übersteigt. Dadurch fließt zusätzliches kaltes Brauchwasser in die Rücklaufleitung, um das abfließende Wasser abzukühlen.

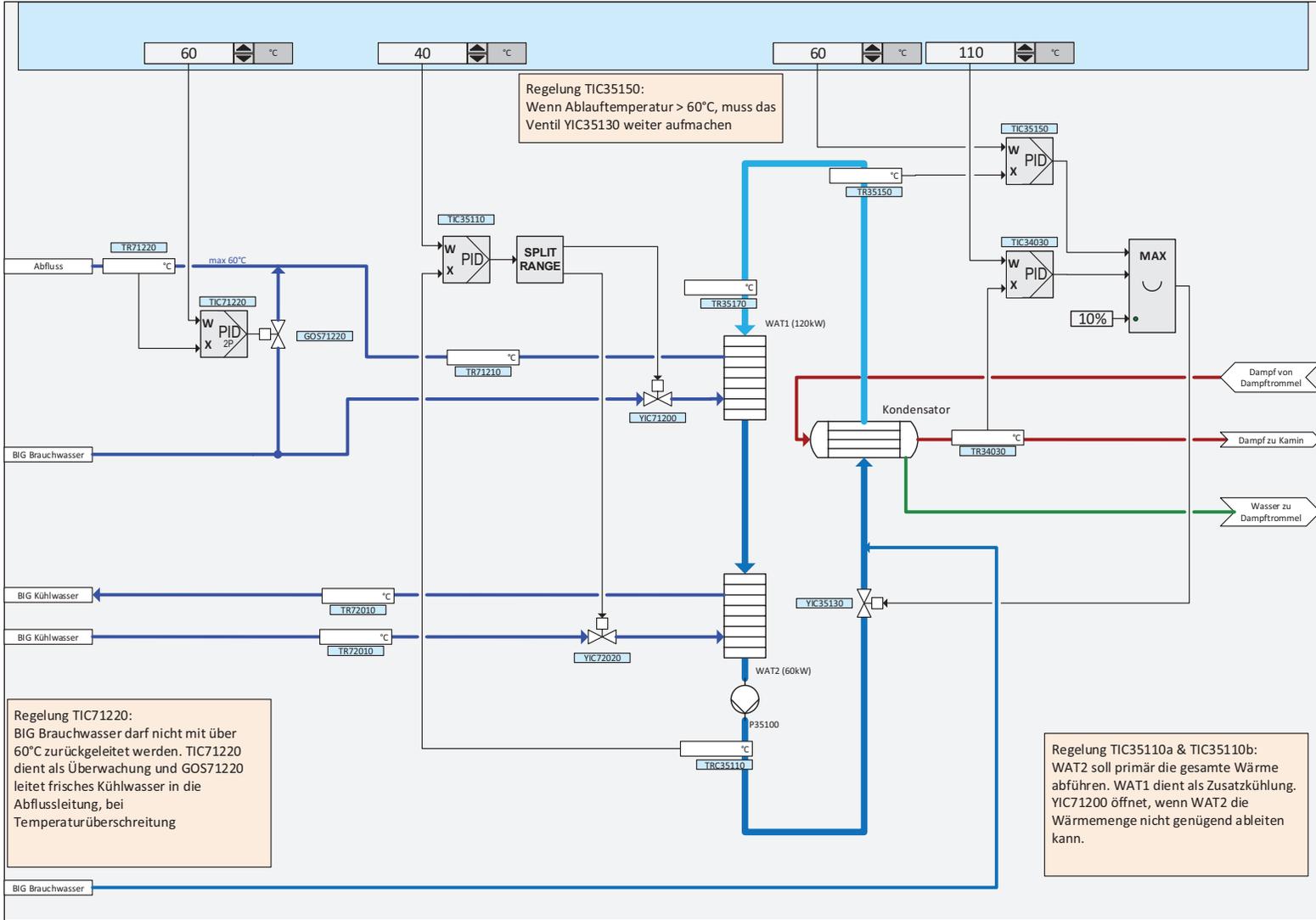


Abb. 4.11: Regelungskonzept des Kühlkreislaufs

Kühlung Dampftrommel: Zur Bereitstellung des Kühlwassers für den ULS steht ein weiterer Regelkreis zur Verfügung. Hier kommt ein 40 kW Wärmetauscher zum Einsatz, der auf der Sekundärseite Brauchwasser zur Kühlung verwendet. Der PID-Regler steuert das Regelventil YIC71300 an. Dieser Regelkreis wird nur bei bestimmten Versuchen benötigt.

4.3.2 Planung der Prozessleittechnik

Das NAMUR NA062-Arbeitsblatt lieferte Hilfestellungen zur konzeptionellen Festlegung von PLT-Funktionen. Dabei wurden folgende Punkte berücksichtigt und umgesetzt:

- Analyse der sicherheitsrelevanten Anlagenteile in der Versuchsanlage
- Berücksichtigung von verfahrenstechnischen Vorgaben
- Erstellung eines Harmonogramms und Darstellung im Gantt-Diagramm (siehe Bild im Anhang B.3.1)
- Ausarbeitung des kritischen Pfades um eine zeitgerecht Umsetzung zu gewährleisten (siehe Aufgabenstellung)

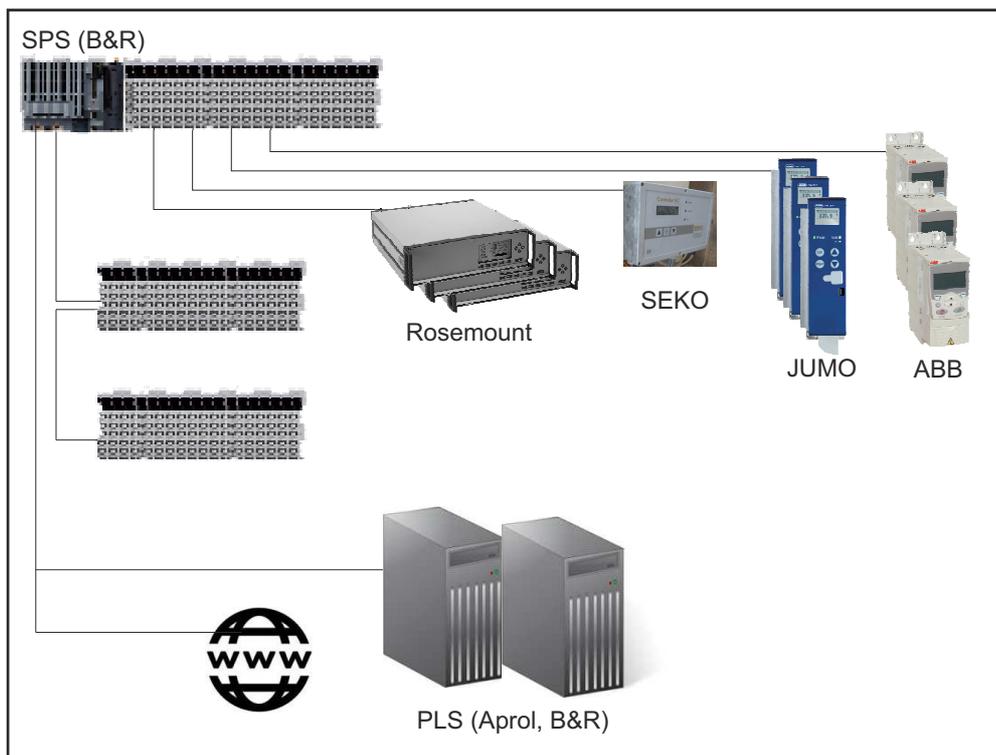


Abb. 4.12: Übersicht der Geräteanbindung an die SPS

4.3.3 Ankopplung der Feldebene an das PLS

In der Feldebene gilt es zu Beginn den Umfang und die Art der Instrumentierung zu ermitteln. Welche Prozessgrößen müssen gemessen werden? Wie erfolgt die Signalverarbeitung? Welche Messanalytik ist notwendig? Existieren bereits geeignete Messverfahren, bzw. müssen neue Messverfahren entwickelt werden? Dies sind nur einige Punkte, die es abzuklären

gilt. Zu berücksichtigen sind auch die jeweiligen Einsatzbereiche der Messungen (Temperatur und Druck in der Anlage, korrosive Medien, etc.). Hier helfen Erfahrungen aus bereits im Einsatz befindlichen Anlagen enorm weiter. Anschließend kann der Einbau der ausgewählten Stellgeräte festgelegt und die Geräte an das PLS angekoppelt werden.

Oft reicht es nicht aus, Messkomponenten via 2-Leitertechnik miteinander zu verbinden. Motoren werden beispielsweise frequenzabhängig geregelt und Heizungen via Thyristoren angesteuert. Daher müssen Bauteile wie Frequenzumformer und Thyristorsteller zwischengeschaltet, verkabelt und entsprechend parametrieren werden. Abb. 4.12 zeigt, welche Feldgeräte an die SPS angekoppelt sind. Im Weiteren werden die wichtigsten vorgestellt.

Motorenansteuerung mittels Frequenzumformer (FU)

FUs wandeln eine Wechselspannung in eine Spannung variabler Amplitude und Frequenz um. Mit Hilfe von FUs werden Motoren, Pumpen und Servoantriebe gesteuert. FUs haben eine Vielzahl an Parametern, die eingestellt werden können. Die Firma ABB liefert FUs mit bereits vordefinierten Makros aus, um die Parametrierung zu erleichtern. Bei der Versuchsanlage werden 6 Motoransteuerungen eingesetzt (siehe Tab. 4.6). Die Parametrierung der FUs ist abhängig vom eingesetzten Motor. Nähere Informationen können aus dem Handbuch entnommen werden. [60]

Tab. 4.6: Verwendete Frequenzumformer inkl. Leistungsangaben

MSR-Nr.	Einsatzort	FU-Typ	Leistungsbereich
N11000	Motor Schnecke Bunker 1	ABB ACS 355	0,37...4,0 kW
N12000	Motor Schnecke Bunker 2	ABB ACS 355	0,37...4,0 kW
N21900	Motor Schnecke LLS	ABB ACS 355	0,37...4,0 kW
N21800	Motor Schnecke Bettmaterial in AR	ABB ACS 140	0,37...2,2 kW
N22800	Motor Schnecke Bettmaterial in FR	ABB ACS 140	0,37...2,2 kW
N53000	Motor Luftgebläse Brennkammer	ABB ACS 150	0,37...4,0 kW

Als Grundeinstellung wird das Makro Hand/Auto in allen FUs eingesetzt. Es bietet die Möglichkeit den Motor vor Ort per Hand zu bedienen und von der SPS anzusteuern. Dazu sind Informationen wie Start/Stop, Vorgabe der Motordrehzahl als Analogwert (4-20 mA) und ggf. Drehrichtungsvorgabe für das Makro entscheidend. Alle drei Signale sind an die SPS angeschlossen. Zusätzlich liefert das Makro je nach Konfiguration den aktuellen Drehzahlwert oder den gemessenen Motorstrom an die SPS zurück. Die Hand-Funktion, die das Schalten des Motors vor Ort übernimmt wird überbrückt, wenn diese nicht benötigt wird. Folgende Einstellungen sind bei den in der Anlage eingesetzten FUs unbedingt notwendig:

- Motor-Nennspannung
- Motor-Nennstrom
- Motor-Nennfrequenz
- Motor-Nenndrehzahl
- Motor-Nennleistung

Diese Daten sind dem Typenschild des jeweiligen Motors zu entnehmen und im FU parametrisiert. Ohne die richtige Konfiguration dieser Parameter kann der Motor schwerwiegende Schäden davontragen.

Heizungssteuerung mittels Thyristorsteller

Generell werden Thyristor- oder Leistungssteller zur Regelung der Leistungsaufnahme von elektrischen Verbrauchern verwendet. Dies gelingt durch Anschneiden des sinusförmigen Verlaufes der Netzspannung. Daraus resultiert eine Senkung des Effektivwerts, je nach Stärke des Phasenanschnitts. Man nennt diese Regelung auch Pulsweiten-Modulation. Bei der Versuchsanlage kommen 8 Thyristorsteller des Typs TYA 201 der Firma Jumo zur Heizungsregelung zum Einsatz (siehe Tab. 4.7).

Tab. 4.7: Verwendete Heizelemente inkl. Leistungsangaben

MSR-Nr.	Einsatzort	Heizelemente	Lastbereich
J41000	Dampfüberhitzung ILS	Heizpatrone	0,0...0,4 kW
J42000	Dampfüberhitzung ULS	Heizpatrone	0,0...0,4 kW
J43000	Dampfüberhitzung FR unten	Heizschale	0,0...1,5 kW
J44000	Dampfüberhitzung FR oben	Heizpatrone	0,0...0,4 kW
J45000	Dampfüberhitzung LLS	Heizpatrone	0,0...0,4 kW
J51210	Luftvorwärmung AR 1	Heizschale	0,0...6,0 kW
J51220	Luftvorwärmung AR 2	Heizschale	0,0...6,0 kW
J51230	Luftvorwärmung AR 3	Heizschale	0,0...3,0 kW

Zur Kommunikation mit der SPS wird als Sollwertvorgabe ein Stromsignal (4-20 mA) verwendet. Der Betrieb der zugehörigen Heizeinrichtung erfolgt einphasig. Als Betriebsart wird der Impulsgruppenbetrieb ausgewählt, eine spezielle Art der Pulsweitenmodulation. Dieser sorgt für gezieltes Schalten einzelner Vollwellen des Netzes mit dem Ziel, lange Ein- oder Ausphasen zu vermeiden. Es findet kein Phasenanschnitt statt, sondern komplette Sinuszüge der Netzspannung werden durchgeschaltet bzw. gesperrt. Die Leistung wird über das Taktverhältnis dosiert. Der Impulsgruppenbetrieb ist speziell für träge Regelstrecken, die auch bei der Versuchsanlage auftreten, geeignet.

Als unterlagerte Regelung kommt die U^2 -Regelung zum Einsatz, um Leistungsschwankungen bei variierender Netzspannung zu verhindern und Nichtlinearitäten im Temperaturverhalten der Heizelemente zu kompensieren. Der elektrische Widerstand des Heizelements ist temperaturabhängig, er wird mit steigender Temperatur größer. Der Thyristorsteller schaltet erst bei Überschreitung der Schwellgrenze von 10 % ein. Beim Anfahrvorgang benötigt der Leistungssteller eine Strombegrenzung, da sonst die Drähte in den Heizelementen durchglühen würden. Die zugeführte Leistung steigt proportional zum Widerstand.

$$P_{Last} = I^2 R_{Last} \quad (4.14)$$

Nachdem der Strom den eingestellten Grenzwert unterschreitet, tritt die Strombegrenzung außer Kraft und der Thyristorsteller arbeitet mit der unterlagerten U^2 -Regelung, d.h. mit zu-

nehmendem Widerstand wird bei konstanter Spannung die zugeführte Leistung automatisch verringert.

$$P_{Last} = \frac{U^2}{R_{Last}} \quad (4.15)$$

Dieser Effekt wirkt unterstützend auf den Gesamtregelkreis. Je mehr sich die Temperatur dem eingestellten Sollwert annähert, desto geringer wird die dem Heizelement zugeführte Leistung. Ein Überschwingen der Temperatur wird somit gedämpft. Eine zusätzliche Funktion des Thyristorstellers ist die Erkennung von Kurzschluss bzw. Lastbruch, indem die Stromänderung pro Zeiteinheit überwacht wird. Beim Auftreten einer der beiden Fehler ist das Gerät so konfiguriert, dass das Heizelement sofort spannungslos geschaltet wird. [61]

Filteranlage

Die Schlauchfilteranlage der Firma SEKO beinhaltet auch eine Filtersteuerung (RM-208 C). Die Steuereinheit ist ein vollständig autarkes System, die den Schlauchfilter automatisch abreinigt, indem sie an drei verschiedenen Stellen (Schlauchfilterreihen) Druckstöße in die Filterkammer leitet und anfallende Staubpartikel vom Filter entfernt. Dazu werden von der Steuereinheit drei Ventile geschaltet und so konfiguriert, dass diese zyklisch oder nach einem bestimmten Druckabfall für eine Zeitdauer von 60 ms öffnen. Zusätzlich wird der Filter überwacht und im Falle eines Alarms (Überschreitung Grenzwert des Differenzdrucks) die Informationen an das PLS weitergeleitet. Die Differenz der Drücke vor und nach dem Filter wird ebenfalls ans PLS übertragen. [62]

Ölpumpe

Zur Förderung von Heizöl in die Anlage wird eine Schlauchquetschpumpe der Firma Ismatec verwendet. Die Verkabelung und Programmierung ermöglicht das Ein- und Ausschalten der Pumpe über das PLS und die Vorgabe der gewünschten Motorleistung (0-100%). Über eine im PLS festgelegte Kennlinie wird der geförderte Heizölmassenstrom online berechnet und mitgeloggt. Für die Gewichtserfassung des Heizöls kommt eine Waage der Firma Kern zum Einsatz. Die Messanzeige ist in der Leitwarte platziert und dient zur Kontrolle des geförderten Stromes. Es muss beachtet werden, dass bei längerem Betrieb die Flexibilität der Silikonschläuche nachlässt und dadurch die eingestellte Pumpenkennlinie im PLS korrigiert werden oder die Schläuche getauscht werden müssen. [63]

Wägezellen

Zur Bestimmung des Gewichts des Brennstoffbunkerinhalts kommen zwei Waagenbausätze mit je vier Scherstabwägezellen (K30S) der Firma Bosche zum Einsatz. Jede Wägezelle kann ein Gesamtgewicht von 1000 kg aufnehmen. Als Messwertumformer (24 bit A/D-Wandler) dient der Transmitter WTB, ebenfalls von der Firma Bosche. Dabei sind für den jeweiligen Transmitter Messbereiche, Empfindlichkeit und Auflösung parametrisiert. Das Tarieren der Wägezellen erfolgt ebenfalls mit Hilfe des Transmitters. Die Übertragung des aktuellen Bunkergewichts erfolgt an das PLS mittels Analogsignal (4-20 mA). [32]

Analysegeräte

Wie im Kapitel 4.1 näher beschrieben, werden alle analytischen Messungen von hochpräzisen Messinstrumenten durchgeführt. Die Datenübertragung an das PLS erfolgt mit Analogsignalen, wobei Kabel mit parallelen Schnittstellen für die Datenübertragung der Gasanalysegeräte (NGA2000) und der Abgasmessungen im Kamin (Oxynos 100, Binos 1004) dienen. Die Feuchtemessung im Produktgas (Bartec) verwendet eine analoge Schnittstelle (2-Drahtleitung). Die Ergebnisse der GC-Analysen werden zyklisch in eine Datei geschrieben, welche anschließend an das PLS übertragen und ausgelesen wird.

4.3.4 Evaluierung der Prozessleittechnik-Software

In der Vergangenheit wurde bei Versuchsanlagen die Programmierung der SPS und Visualisierung mit unterschiedlichen Programmen von verschiedenen Herstellern realisiert. Das Zusammenspiel zwischen beiden funktionierte nur teilweise. Außerdem war das vorhandene Trend- und Alarmtool nur bedingt für die gewünschten Anforderungen geeignet. Zusätzlich war der Umfang der Messtechnik aus vergangenen Versuchsanlagen im Vergleich zur neuen Anlage wesentlich geringer. Daher war das Handling der MSRT einfacher als bei der aktuellen Versuchsanlage. Bei der Auswahl des PLS wurde auch die Möglichkeit der Ankopplung aller aufgelisteten Geräte im Kapitel 4.3.3 und das Erfüllen von erwähnten Sicherheitskriterien berücksichtigt. Die einfache und übersichtliche Bedienung und Handhabung der Anlage war ein wesentliches Kriterium, auf das geachtet wurde. Anhand der ausgearbeiteten Anforderungen an die Anlage und nach eingehenden Untersuchungen von Prozessleitsystemen unterschiedlichster Hersteller, konnte eine geeignete Prozessleitsoftware evaluiert werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.8 dargestellt. Darin sind die Vor- und Nachteile verschiedener Kriterien aufgelistet.

Tab. 4.8: Evaluierung unterschiedlicher Automatisierungssysteme

	Automation Studio	LabVIEW	APROL	S7/WinCC
Visualisierung	–	+	+	+
Alarmtool	–	~	+	+
Trendtool	–	~	+	+
Engineering-Aufwand	~	+	~	–
Programmkomplexität	+	+	~	–
Anlagenbedienung	–	~	+	+
Vorhandene Bibliotheken	–	–	+	+
Support des Herstellers	+	~	+	–
Preis inkl. Steuerung (SPS)	+	~	~	–

Aufgrund der Untersuchungen fiel die Wahl auf das PLS APROL der Firma Bernecker und Rainer (B&R). Die neue Software integriert sowohl SPS als auch Visualisierung in einem Produkt. Die Kommunikation zwischen SPS und Leitsystem funktioniert vollautomatisch

und braucht beim Engineering nicht berücksichtigt werden. Zusätzlich kommt eine standardisierte Symbolbibliothek für verfahrenstechnische Anlagen zum Einsatz, die von B&R entwickelt wurde und alle gängigen Bedienbausteine für Motoren, Ventile, Messwerte, etc. beinhaltet. Eine komplette Systemüberwachung der Soft- und Hardware ist ebenfalls Teil des Produktes. Weitere Vorteile eines voll integrierten Systems sind:

- Alarmdatenbank mit Speicherung aller Alarme und Meldungen
- Trendtool mit vielen unterschiedlichen Funktionen
- Rechtevergabe auf verschiedene Schalthandlungen von Objekten
- Logging aller Bedienerhandlungen
- Multiscreening-Unterstützung
- Redundanz (sowohl Server, als auch SPS) möglich
- Integriertes Schichtbuch
- Process Automation Library (PAL) für gängige Objektvisualisierungen in der Verfahrenstechnik
- APC-Bibliotheken für komplexe Regelungen, wie z.B. MPC
- Schnellere Umsetzung der Automatisierung, weniger Aufwand in der Programmierung
- Rasche Programmänderungen, höhere Flexibilität, einfache Erweiterung
- Zugriff auf Anlagenbedienung von beliebigen Rechnern via VNC
- Gleichzeitiges Engineering von mehreren User möglich



Abb. 4.13: links: Operatorstationen, rechts: Handventile der Reaktorfluidisierungen

4.3.5 Bedienung der Versuchsanlage

Abb. 4.13 zeigt den Leitstand, wo der Prozess kontinuierlich überwacht und gesteuert wird. Unterschiedliche Schalthandlungen wie:

- Öffnen/Schließen von Ventilen

- Starten/Stoppen von Motoren
- Verstellen von Sollwerten und Reglerparametern
- Änderungen von Alarmgrenzwerten
- Hand/Automatikbetrieb von Aktoren
- Änderungen von Signalfilterzeiten
- etc.

können dort über das PLS vorgenommen werden. Details zu den wichtigsten Bedienmöglichkeiten sind im Kap. 4.3.5 vorgestellt. Das PLS wurde so konfiguriert, dass jede durchgeführte Schalthandlung bzw. Sollwertveränderung im AuditTrail mit entsprechendem Zeitstempel mitgeloggt wird. So kann nachträglich nachvollzogen werden, welcher Anlagenbediener beispielsweise welches Ventil zu welchem Zeitpunkt geöffnet hat.

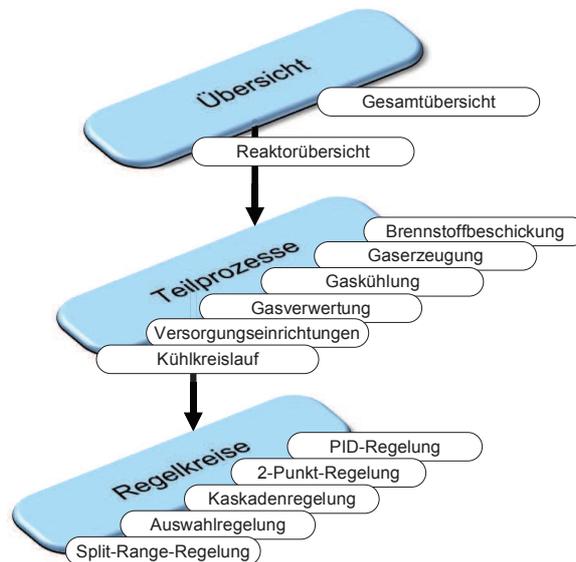


Abb. 4.14: Ebenendarstellung des Bedienkonzepts

Um die Versuchsanlage im PLS strukturiert darzustellen, ist diese in Teilbereiche aufgeteilt. Anhand der Unterteilung sind die Anzahl der Bedienplätze und entsprechend die Anzahl der Anzeigen/Bildschirme festgelegt. Eine geeignete Darstellung der Prozessbilder hilft den Operatoren, durch die virtuelle Anlage zu navigieren. Dazu ist das Bedienkonzept in eine hierarchische Unterteilung mit drei Ebenen gegliedert (siehe Bild 4.14), um Zusammenhänge möglichst einfach und übersichtlich darzustellen.

Ebene 1: Teilanlagen und wichtige Aktoren und Sensoren sind in dieser Ebene dargestellt, um einen Überblick über den Gesamtzustand der Anlage zu erhalten. Abb. 4.16 zeigt den Gesamtprozess der Versuchsanlage. Aus dem Übersichtsbild kann anschließend in verschiedene Teilanlagen gezoomt werden, um nähere Informationen über die jeweiligen Teilprozesse zu erhalten.

Ebene 2: In dieser Ebene wird die Versuchsanlage in 5 Bereiche untergliedert, wie im Bild 4.14 ersichtlich. Alle Aktoren und die meisten Sensoren sind auf dieser Ebene dargestellt. Sollwert-Vorgaben für Regelungskreise können hier ebenfalls verändert werden.

Ebene 3: Hier sind detaillierte Regelungen dargestellt. Es kann direkt in Regelkreise eingegriffen werden.

Für die Bedienung der Versuchsanlage sind zwei Arbeitsplätze mit insgesamt drei Bildschirmen eingerichtet (siehe Abb. 4.13 links). Zwei Bildschirme bilden im Hochformat die Reaktoren inkl. Abscheider und Rückführungen ab. Es kann zwischen den Bildern

1. Druck/Druckgradientenverlauf (siehe Abb. 4.15)
2. Temperaturverlauf
3. Temperatur/Druckmesswertanzeigen

entlang der Reaktoren umgeschaltet werden. Damit sind die Vorgänge in den Reaktoren immer gut einzusehen. Der dritte Bildschirm ist für die Übersicht des Gesamtprozesses (siehe Abb. 4.16) und der Visualisierung der Teilanlagen zu verwenden. Für die Gestaltung der Leitwarte wurde das Arbeitsblatt der NAMUR NA076 herangezogen, welches Hilfestellungen dazu beinhaltet.

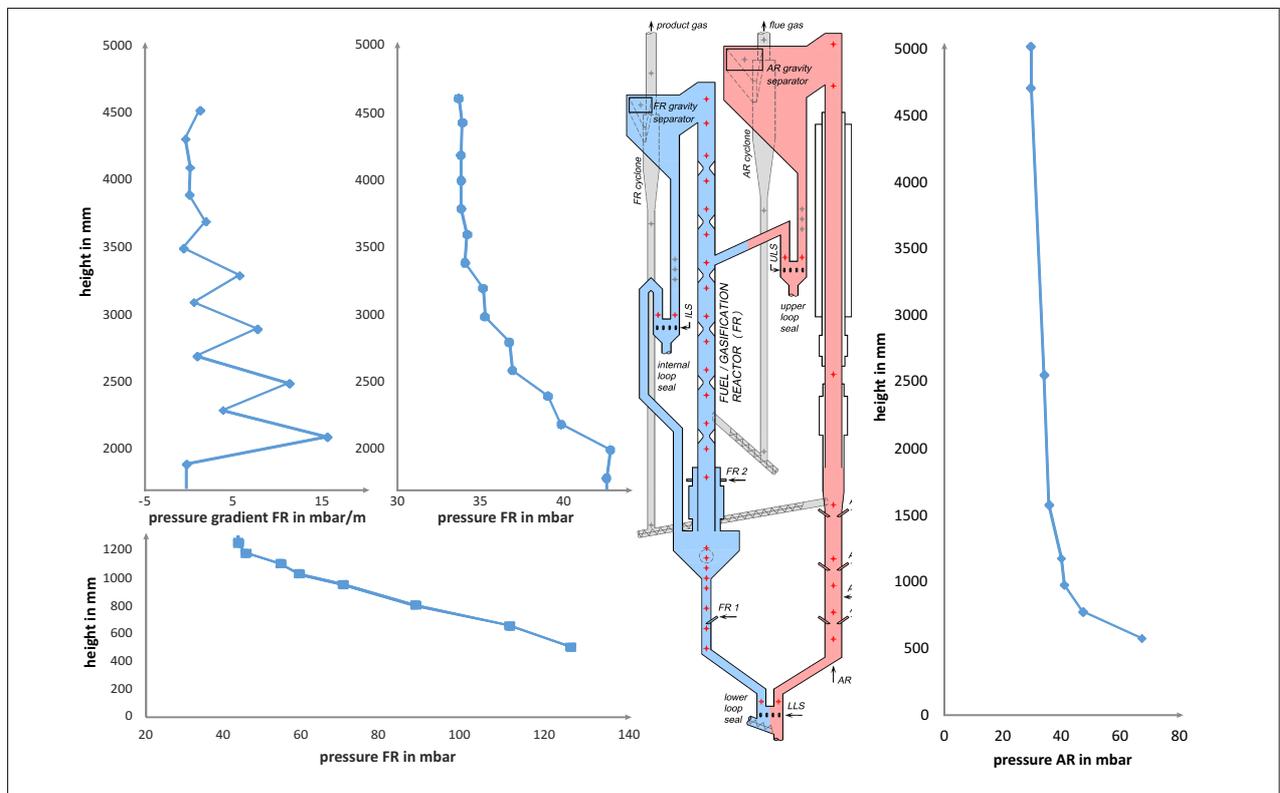


Abb. 4.15: Darstellung der Druck- & Druckgradientenverläufe im PLS

Alarmmanagement der Versuchsanlage

Im PLS sind Alarmer so konfiguriert, dass diese im Störfall ein Alarmsignal absetzen und die Störung am Bildschirm erscheint. Ein Alarmintrag besteht aus Alarmtext, MSR-Nummer des auslösenden Objekts, Alarmgruppe und Alarmpriorität.

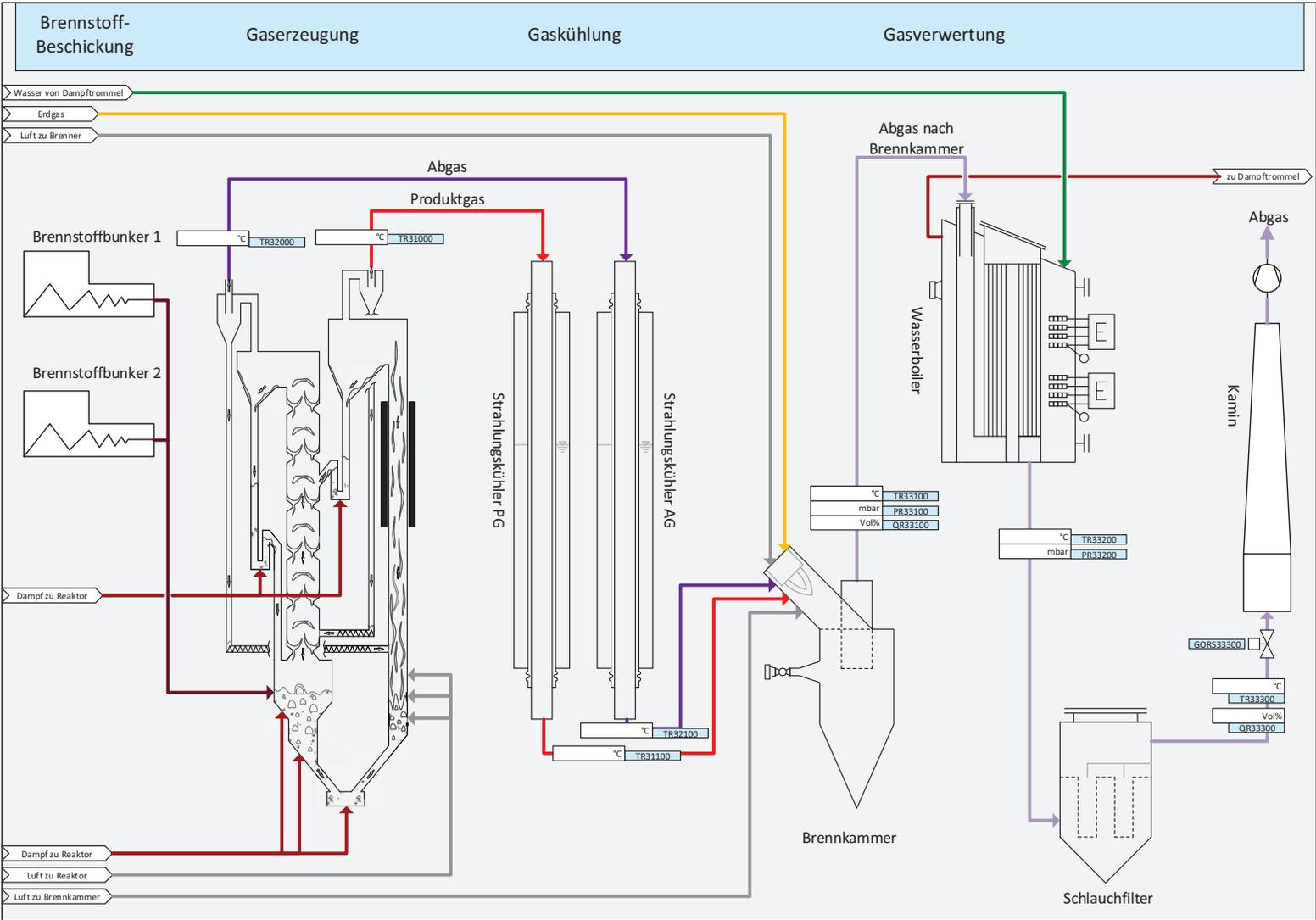


Abb. 4.16: Gesamtübersicht des Prozesses

Die Alarmer werden in Gruppen unterteilt, um sie besser zuordnen zu können. Die Alarmgruppen sind in Tab. 4.9 dargestellt. Für die jeweiligen Alarmer sind Alarmprioritäten zwischen 0 und 255 vergeben, wobei 0 die höchste Priorität darstellt. Höher priorisierte Alarmer verdeutlichen dem Operator die Wichtigkeit des Alarms und weisen ihn auf unmittelbaren Handlungsbedarf hin.

Tab. 4.9: Konfigurierte Alarmgruppen im PLS

Brennstoffbeschickung	Druckluftversorgung
Gaserzeugung	Stickstoffversorgung
Gasverwertung	Kühlwasserversorgung
Wasserdampfversorgung	restl. Versorgungseinrichtungen

Implementierung der Objekte in das PLS

Anhand der MSR-Liste sind über 300 Objekte - dazu zählen Messstellen, Motoren, Ventile, Endschalter - in der so genannten grafischen Funktionsbaustein-Sprache CFC im PLS angelegt (nach DIN EN 61131-3). Die Abarbeitung des programmierten Codes übernehmen Tasks, welche zyklisch in einer definierten Zeit ausgeführt werden. Ein Auszug aus der Programmdokumentation ist im Anhang enthalten. Dort sind ausgewählte Funktionspläne mit den gängigsten Objekten dargestellt (Anh. B.3.2). Im Folgenden ist die Bedienungsweise der wichtigsten Objekte näher erläutert.

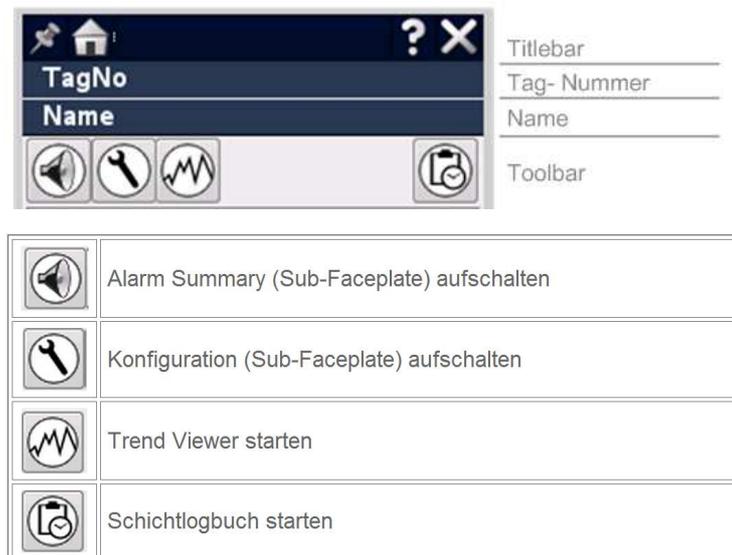


Abb. 4.17: Kopfzeile eines Objektes aus der PAL-Bibliothek

Jedes Objekt aus der mitgelieferten PAL-Bibliothek hat den gleichen Aufbau (siehe Bild 4.17). Dadurch ist eine einheitliche Bedienung der einzelnen Objekte gewährleistet. Mit Hilfe der Titlebar kann das Fenster (auch Faceplate genannt) geschlossen bzw. angeheftet werden, oder die zugehörige Hilfe aufgerufen werden. Darunter wird die MSR-Nummer eingeblendet. Im Feld Name wird die Messstellenbeschreibung eingeblendet. Die Toolbar

enthält unterschiedliche Funktionen, in der der Operator Einstellungen vornehmen und zusätzliche Informationen auslesen kann. Die Alarm Summary zeigt aktuell anstehende Alarmer dieses Objekts auf. Im Konfigurationsfenster können Einstellungen zum jeweiligen Objekt angezeigt und verändert werden. Sollen aktuelle Trenddaten zu dem Objekt aufgeschaltet werden, wählt man den Trendviewer aus. Im Schichtlogbuch können Vermerke und Notizen zu Versuchen gemacht werden. Manche Objekte besitzen zusätzliche Einstellmöglichkeiten. Erklärungen dazu können der PAL-Dokumentation im APROL entnommen werden. [64]

Im Folgenden wird die Bedienoberfläche der wichtigsten Objekte näher erläutert.

Messwert: Das Objekt "Messwert" dient zur Überwachung von Messgrößen (Bild 4.18). Insgesamt sind im PLS der Versuchsanlage über 230 Analogobjekte angelegt, dazu zählen jegliche Messungen, wie Temperaturen, Drücke, etc.

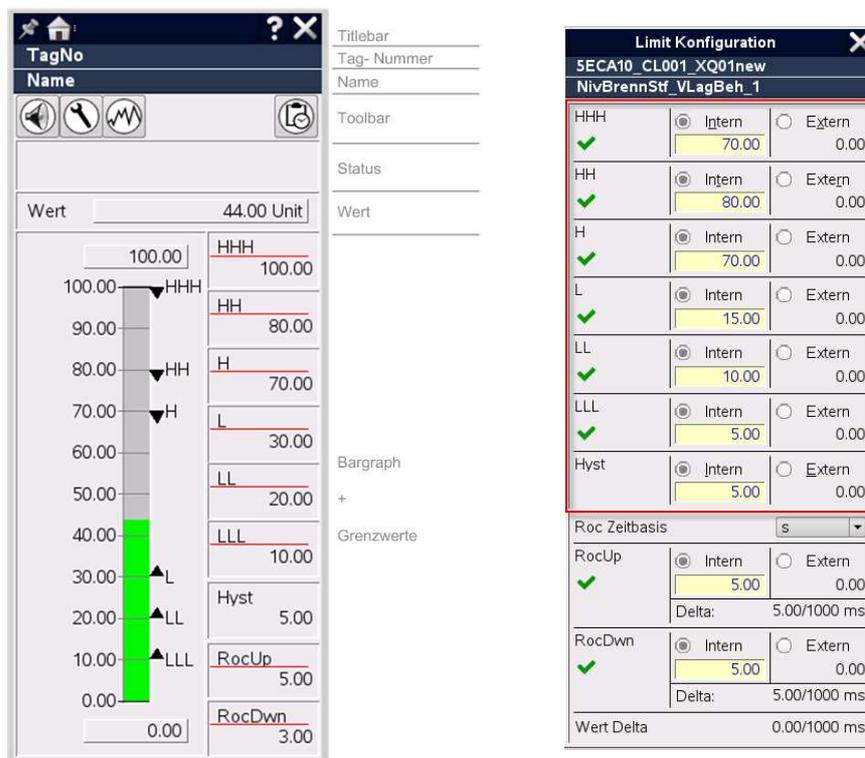


Abb. 4.18: links: Darstellung des Messwerts, rechts: Parameterfenster [64]

Das Messwert-Makro inkludiert verschieden Funktionen wie

- Trendaufzeichnungen
- Alarmierungen bei Über/Unterschreitung von Grenzwerten
- Überwachung des Feldgerätes auf Funktionstüchtigkeit (Drahtbruchererkennung, Defekt des Messgerätes,...)
- Skalierung des Messbereichs der Messwerte
- Signalfilter & Mittelwertfilter

Mit Ratio- und Bias-Vorgaben kann der Messwert manipuliert werden. Diese Funktionen dienen zur Korrektur von systematischen Messabweichungen und finden Anwendung bei der Kalibrierung der Druckmessungen. Des Weiteren bietet das Makro die Möglichkeit, Messwerte zu simulieren. Diese Funktion wurde beim Programmtest benötigt. Konfigurierbare Mittelwertfilter glätten das Messsignal, falls die Unterdrückung von Rauscheffekten gewünscht ist. Dabei ist die Filterzeit variabel, abhängig von einem Maximalwert, zu verstellen. Beispielsweise wurde für die Gewichtsänderung der beiden Bunker eine Mittelwertfilterung vorgegeben, um Messungenauigkeiten auszugleichen.

Neben der Mittelwertfilterung kommt auch die Signalfilterung der Messwerte zum Einsatz. Ziel der Filter ist es, die aufzuzeichnende Datenmenge zu reduzieren und dadurch die Speichereffizienz zu erhöhen und die CPU-Last zu verringern. Als Filtertyp wird der Totbandfilter ausgewählt. Der Algorithmus des Totbandfilters garantiert, dass weggelassene Messwerte innerhalb eines horizontalen Toleranzbandes um die aufgezeichneten Punkte liegen. Es muss beachtet werden, dass bei aktivierten Filtern die Gefahr besteht, dass Regelkreise eine nicht zufriedenstellende Performance aufweisen. Daher ist diese Einstellung mit Vorsicht zu genießen. Ob die Regelungen zur ausreichenden Zufriedenheit arbeiten, zeigen erste Heißversuche.

Motor: Dieses Objekt ist für die Ansteuerung eines Motors/Pumpe/Ventilator ausgewählt und in das PLS implementiert. Generell ist bei Aktoren zwischen Hand- und Automatikbetrieb zu unterscheiden. Im Handbetrieb kann der Bediener den Motor über das PLS ein-/ausschalten. Im Automatikbetrieb steuert die programmierte Logik in der SPS den Motor. Der Operator kann in diesem Betriebsmodus den Motor nicht bedienen. Sicherheitseinstellungen wie Einschaltverzögerungen und Betriebsstundenzähler sorgen für den Schutz des Motors. Diese stellen sicher, dass der Motor erst nach Ablauf einer konfigurierbaren Zeit wieder gestartet werden darf. Zur Sicherheit sind im Hauptschaltschrank zusätzlich Motorschutzschalter implementiert, die die Motoren auf thermische Überlastung schützen. Löst ein Schutzmechanismus aus, wird der Fehler sofort ausgewertet und der Operator alarmiert.



Abb. 4.19: links: Darstellung des Motor-Faceplate, rechts: Parameterfenster [64]

Im PLS sind 13 Motorobjekte angelegt:

- 2 Stopfschnecken und eine Dosierschnecke für die Brennstoffeinbringung in die Reaktoren (N10000, N11000, N12000)

- 2 Feinascheschnecken für AR und FR (N21800, N22800)
- 1 Schnecke für den Austrag von groben Partikel (N21900)
- 1 Schnecke für den Ascheaustrag im Filter (N33200)
- 4 Kühlwasserpumpen für die jeweiligen Kühlkreisläufe (N34100, N43200, N43300, N35100)
- 1 Gebläse für die Brennkammer (N53000)
- 1 Pumpe für die Heizölförderung in den AR (N83000)

Ventil: Das Objekt Ventil ist mit dem Motorobjekt vergleichbar. Es können ähnliche Schalthandlungen durchgeführt werden, wie beim Motor. Außerdem gibt es die Möglichkeit der Überwachung der Ventilstellung. Nimmt das Ventil innerhalb einer einstellbaren Zeit die gewählte Position nicht ein, wird der Operator auf eine Fehlstellung des Ventils durch einen Alarm hingewiesen. Diese Funktion kommt bei den Brennstoffbunkerklappen und den Abgasklappen zum Einsatz, da hier die aktuellen Klappenstellungen wichtige sicherheitstechnische Auswirkungen haben.

Insgesamt sind 34 Steuer- und Regelventile für die Bedienung der Versuchsanlage notwendig. Der Einsatzbereich der jeweiligen Ventile ist in Tab. 4.10 dargestellt.

Tab. 4.10: Auflistung der Ventile nach Einsatzbereich

Ventiltyp	Steuerventile	Regelventile	Handklappen mit Rückmeldung
Brennstoffbeschickung	0	0	2
Gaserzeugung	0	0	0
Gasverwertung	3	0	0
Versorgungseinrichtungen	21	8	0

PID-Regler: Der PID-Regler bietet sehr viele Einstellparameter, von denen häufig nur ein Bruchteil verwendet wird. Abb. 4.20 zeigt den Aufbau eines Reglers im PLS. Am Faceplate kann zwischen internen und externen Sollwert ausgewählt werden. Der Hand-Betrieb überbrückt den Regelalgorithmus. Die Stellgröße kann dann vom Operator direkt vorgegeben werden. Für die Reglerparametrierung sind die Einstellungen von Proportionalverstärkung K_p , Nachstellzeit T_n und Vorhaltezeit T_v von grundlegender Bedeutung und sind Vorgaben für das Regelverhalten. Durch weiterführende Parameter wie Windup, Totband, etc. kann die Regelung entsprechend der vorhandenen Bedingungen ideal angepasst werden. Für alle Regelungskonzepte ist entweder der hier vorgestellte PID-Regler oder ein 2-Punkt-Regler eingesetzt. Die beiden Typen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ausgabesignale. Der PID-Regler liefert ein analoges Stellgrößensignal (z.B. 0-100%). Der 2-Punkt-Regler überträgt ein boolesches Signal ("0" oder "1") an die Stellgröße. In Tab. 4.11 sind die Einsatzbereiche der unterschiedlichen Typen aufgelistet.

Interlocks: Für das wesentlich zur Sicherheit beitragende Verriegelungskonzept sind ebenfalls Bausteine in der PAL-Bibliothek vorhanden. Diese werden mit dem Namen Interlock

Tab. 4.11: Auflistung der Regler nach Einsatzbereich

Reglertyp	PID-Regler	2-Punkt-Regler
Brennstoffbeschickung	2	0
Gaserzeugung	3	0
Gasverwertung	7	0
Versorgungseinrichtungen	12	4

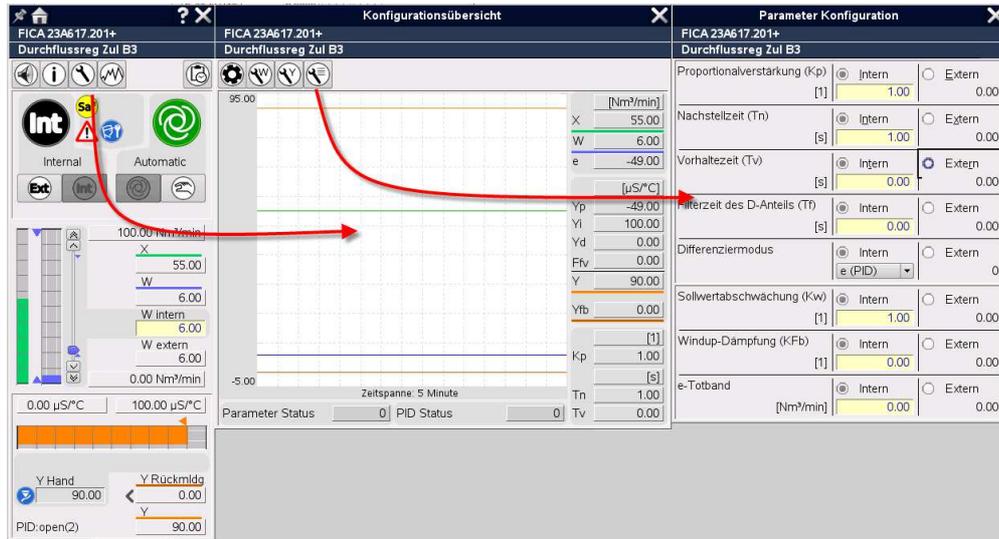


Abb. 4.20: links: Regler-Faceplate, mitte: Trenddarstellung, rechts: Parameterfenster [64]

bezeichnet. Damit können logische Schaltungen visualisiert werden. Lässt sich z.B. ein Motor aufgrund einer Verriegelung nicht starten, kann mit den Interlock-Objekten schnell die Ursache festgestellt werden. Der Bediener braucht nicht im Programmcode Nachforschungen anstellen, warum etwaige Verriegelungen aktiv sind. Jeder Aktor ist im PLS mit einem Interlockbaustein verknüpft. Primär kommt dieser bei den unterschiedlichen Betriebsweisen zum Einsatz. Er verhindert das Schalten von Aktoren, wenn diese im jeweiligen Betriebsmodus nicht aktiviert werden dürfen (siehe Kap. 4.3.1).

Schrittketten: Wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, können mit Schrittketten komplexe sequentielle Abläufe modelliert und programmiert werden. Durch ein eigenes Schrittketten-Objekt sind im PLS alle eingesetzten Schrittketten in der Versuchsanlage online bedienbar. Auch bei diesem Objekt gibt es die Betriebsmodi Automatik und Hand. Im Automatik-Modus werden die Schritte je nach Programmcode abgearbeitet. Dazu kann die Kette gestartet, pausiert und rückgesetzt/initialisiert werden. Der Hand-Modus (oder auch Tipp-Modus genannt) bietet die Möglichkeit, beliebige Schritte zu aktivieren, Transitionen zu überspringen und mehr. Durch vorgegebene Abläufe bei den Stickstoffspülungen der Messblenden und den Bunkern bietet sich der Einsatz von SFC-Programmen in der Versuchsanlage an (siehe Kap. 2.2.2). Das Programm der Ablaufketten ist dem Anhang zu entnehmen (Anh. B.3.2). Auch die Betriebsweisen sind in einem SFC erstellt und mit dem Schrittkettenobjekt bedienbar gemacht.

Kapitel 5

Kaltinbetriebnahme der Versuchsanlage

In diesem Kapitel werden die durchgeführte Kaltinbetriebnahme und die zu berücksichtigenden Schritte bei der Inbetriebnahme näher erläutert.

5.1 Überprüfung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

Vor der Inbetriebnahme ist eine Überprüfung der MSRT obligatorisch (siehe auch Kap. 2.3.4) und ist daher auch bei der Versuchsanlage durchgeführt worden. Im Zuge der Parametrierung der Messwerte wurden Alarmgrenzen festgelegt, Signalfilterzeiten vorgegeben, und Messbereiche eingestellt. Während des Programmtests wurden sicherheitstechnische Programmteile, wie Temperaturüberwachungen bei Heizschalen und Verriegelungen von Aktoren überprüft. Die Schrittkette für die unterschiedlichen Betriebsweisen (siehe Kap. 4.3.1) wurde auf korrekte Funktion kontrolliert. Bei der anschließenden Kaltinbetriebnahme wurden Überprüfungen von Anlagenteilen durchgeführt. Alle Bereiche, die bei der Kaltinbetriebnahme nicht getestet wurden, sind in Listen vermerkt, um bei der Heißinbetriebnahme speziell auf die Funktionsfähigkeit dieser Schalthandlungen zu achten.

Im Zuge des IO-Checks war die Überprüfung aller Ein- und Ausgänge der SPS notwendig. Dazu wurde jede Messung vom Ort der Messstelle bis zur Visualisierung im PLS überprüft und in der MSR-Liste (siehe 4.2.1) vermerkt. Aktoren wie Ventile, Motoren und Pumpen wurden auf Stellung bzw. Drehrichtung überprüft und ebenfalls in der Liste bestätigt. Die Kommunikation zwischen extern angekoppelten Geräten und der SPS wurden einem Funktionstest unterzogen. Die Inbetriebnahme der Messtechnik war umfangreich, da aufgrund der zahlreichen Messungen unterschiedliche Fehlerquellen in der Verkabelung und der Automatisierungstechnik vorhanden waren. Der IO-Check etablierte sich jedoch als geeignetes Werkzeug zur Überprüfung der Messungen und Aktoren. Bis auf einige wenige Messstellen, die wiederum erst bei der Heißinbetriebnahme getestet werden können, konnte der Großteil der Inbetriebnahme der Messtechnik abgeschlossen werden. Die Verkabelung der Mess- und Steuertechnik des Brenners und Implementierung in den Hauptschaltschrank erfolgt nach der Kaltinbetriebnahme und ist deshalb noch nicht in dieser Arbeit angeführt.

Im Zuge der Kaltinbetriebnahme wurde auch ein Teil der Regelungstechnik getestet. Als vorgezogener Inbetriebnahmeschritt fand ein Test der Heizschalen und Luftvorwärmer statt. Hier wurden erste Regelparameter festgelegt, die für die Heißinbetriebnahme geeignet sind. Einige Funktionen können jedoch erst in der Heiinbetriebnahmephase vollständig überprüft werden. Die Inbetriebnahme der Regelungstechnik des Kühlkreislaufs und der Brennstoffbeschickung erfolgt während der Heißinbetriebnahme.

5.2 Umsetzung der Kaltinbetriebnahme

Im Rahmen der Kaltinbetriebnahme wurde die Versuchsanlage in unterschiedliche zu überprüfende Bereiche eingeteilt:

- Überprüfung der Dichtheit (Druckproben)
- Luftversorgungseinrichtungen und zugehörige Messstellen
- Spülungen der Druckmessdosen mit Luft
- Flushspülungen der Bunker (Schrittketten)
- Reaktorfluidisierungen inkl. Messstellen entlang der Reaktoren
- Abgasklappen, Feinascheaustragschnecken
- Filteranlage
- Online-Gasanalyse
- Durchflussmessungen der Produkt- und Abgasvolumenströme
- Spülungen der Druckmessblenden (Schrittketten)

Der Dampferzeuger war nicht Teil der Kaltinbetriebnahme und wurde daher nicht in Betrieb genommen. Für den Kaltbetrieb und die Aufheizphase sind Leitungen für den FR und die Siphons eingebaut, mit denen der Fluidisierungsdampf durch Fluidisierungsluft ersetzt werden kann. Eine zusätzliche Fluidisierung des ARs war notwendig, um höhere Luftvolumenströme einleiten zu können. Aber auch in den FR wurde ein zusätzlicher Lufteintrag ausgeführt. Bild 5.1 stellt die Luftinputs im Kaltbetrieb dar. In hellgrau dargestellte Linien sind zusätzliche, speziell für den Kaltversuch vorgesehene Fluidisierungen.

Nach dem Test der Luftversorgungseinrichtungen wurden noch nicht fertig montierte Einbauteile (Taillierungen), Stutzen, Schaugläser und Verschlussstopfen verbaut. Danach konnte eine definierte Menge an Bettmaterial in die Reaktoren eingefüllt werden. Anschließend wurde der Luftvolumenstrom in den Reaktoren und Siphons kontinuierlich erhöht und der Druck- und Druckgradientenverlauf in den Reaktoren beobachtet und im PLS aufgezeichnet. Somit wurde auch zugleich die Datenerfassung über das PLS getestet. Da der Luftvolumenstrom, der in die Anlage geleitet wurde, von Durchflussmessern bestimmt und somit bekannt war, konnten die Durchflussberechnungen mit Hilfe der Druckmessblenden (siehe Kap. 4.2.2) und die Kalibrierungen der Druckmessblenden durchgeführt werden.

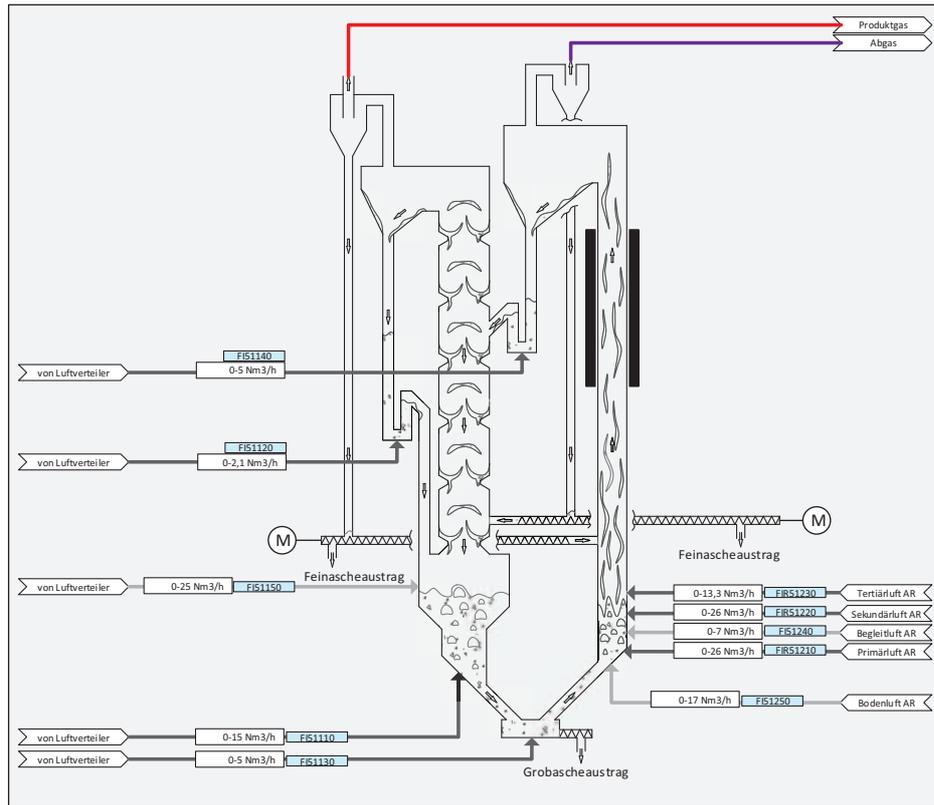


Abb. 5.1: Fluidisierungsluft-Inputs während der Kaltinbetriebnahme

5.3 Ergebnisse der Erstinbetriebnahme

Die Resultate des ersten Kaltversuchs werden auf den nächsten Seiten dargestellt. Zu Beginn wird eine Bettmaterialanalyse vorgestellt und der charakteristische Partikeldurchmesser bestimmt. Für fluiddynamische Aussagen ist dafür der Sauterdurchmesser d_{SV} zu bestimmen. Anschließend zeigen Druck- und Druckgradientenverläufe erste fluiddynamische Ergebnisse über den Zustand der Wirbelschicht in den Reaktoren der Versuchsanlage. Es werden drei Versuche mit unterschiedlichen Fluidisierungsströmen und Bettmaterialmengen ausgewertet. Des Weiteren werden die Berechnungen der Druckmessblenden mit dem gemessenen Input-Volumenströmen verglichen, um Aussagen zur Qualität der Messung treffen zu können.

5.3.1 Analyse des Bettmaterials

Bei den Experimenten wurde als Bettmaterial Olivin der Firma Magnolithe der Siebfraction von $100\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$ verwendet. Die Eigenschaften von Olivin sind im Anhang unter Kap. D.1 zu finden. Um die Partikelgrößenverteilung zu charakterisieren, wurden zwei unabhängige Verfahren verwendet:

- Laserbeugungsverfahren der Firma Malvern (Mastersizer 2000 [65])
- Abbildendes Verfahren mittels Lichtmikroskop

Das abbildende Verfahren liefert eine Anzahlverteilung, das Laserbeugungsverfahren eine Volumenverteilung (Massenverteilung). Für das abbildende Verfahren mittels Lichtmikro-

skop wurde die Messmethode der einzelnen Partikel so gewählt, dass die bestimmten Maße möglichst den volumenbezogenen Einzeldurchmessern der Partikel entsprechen. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, muss die Anzahlverteilung Q_0 des abbildenden Verfahrens in eine Volumenverteilung Q_3 umgerechnet werden [12]:

$$Q_{3j} = \frac{\sum_{i=1}^j \Delta N_i}{\sum_{i=1}^n \Delta N_i} \quad (5.1)$$

Aus der Summenverteilung des abbildenden Verfahrens kann der volumenbezogene, mittlere Partikeldurchmesser \bar{d}_V errechnet werden:

$$\bar{d}_V = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad \bar{d}_V = 157 \mu m \quad (5.2)$$

Mit Hilfe eines Formfaktors Φ kann der volumenbezogene Partikeldurchmesser \bar{d}_V in einen oberflächen/volumenbezogenen Durchmesser (Sauterdurchmesser) d_{SV} umgerechnet werden. Φ spiegelt die Abweichung der Form eines Partikels von einer Kugel wider und ist über Gl.(5.3) definiert:

$$\Phi = \left(\frac{d_V}{d_S} \right)^2 \quad \Phi \leq 1 \quad (5.3)$$

Ermittlung des volumenbezogenen Durchmessers d_V :

$$d_V = \left(\frac{6V_P}{\pi} \right)^{1/3} \quad (5.4)$$

Ermittlung des oberflächenbezogenen Durchmessers d_S :

$$d_S = \left(\frac{A_P}{\pi} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

Zur Bestimmung des Sauterdurchmessers wird Gl.(5.6) herangezogen:

$$d_{SV} = d_{32} = 6 \frac{V_P}{A_P} = \frac{d_V^3}{d_S^2} \quad (5.6)$$

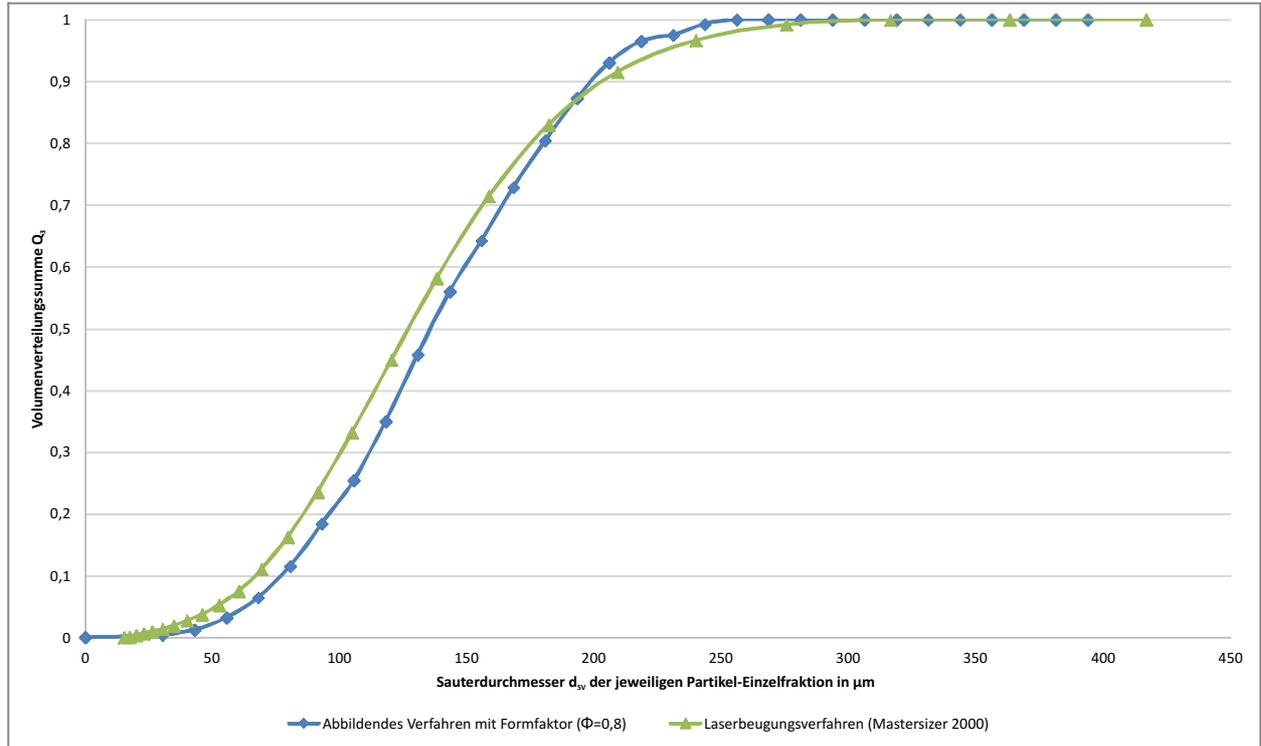
$$d_{SV} = \Phi \bar{d}_V = 0,8 \cdot 157 \mu m = 126 \mu m \quad (5.7)$$

Für gebrochenen Sand, wie in diesem Fall vorliegt, wird in der Literatur ein Formfaktor von $0,70 \leq \Phi \leq 0,85$ angegeben [12]. Für die weiteren Berechnungen wird ein Formfaktor von $\Phi = 0,8$ angenommen. Aus Gl.(5.7) kann für das abbildende Verfahren der Sauterdurchmesser ermittelt werden. Das Laserbeugungsverfahren liefert als Ergebnis direkt den Sauterdurchmesser. In Tab.5.1 sind die Ergebnisse der beiden Analysen dargestellt.

Die Analyseergebnisse der Volumenverteilungssumme des verwendeten Bettmaterials ist in Abb. 5.2 dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die Ergebnisse des abbildenden Verfahrens. Dabei wurde die Anzahlverteilung auf eine Volums- bzw. Massenverteilung umgerechnet. Zudem wurde der Formfaktor für jede der bestimmten Einzelfraktionen berücksichtigt. Die Volumen- bzw. Massenverteilung des Laserbeugungsverfahrens mit dem Mastersizer 2000 ist im Diagramm grün dargestellt. Bei beiden Darstellungen wird auf der Abszisse der Sauterdurchmesser der jeweiligen Einzelfraktionen dargestellt. Der Analysereport des Mastersizers ist im Anhang unter Kap. D.1 zu finden.

Tab. 5.1: Ergebnisse der Bettmaterialanalyse

	d_{SV} in μm
abbildendes Verfahren	126
Laserbeugungsverfahren (siehe Anh. Kap. D.1)	121

Abb. 5.2: Ergebnisse der Volumenverteilungssumme Q_3 von Olivin

5.3.2 Versuchsergebnisse der Kaltinbetriebnahme

In diesem Kapitel sind die Versuchsergebnisse inklusive des Druck- und Druckgradientenverlaufs dargestellt. Damit können erste qualitative Aussagen über die vorherrschenden fluidodynamischen Vorgänge in den Reaktoren der Versuchsanlage getroffen werden. Die Auswirkungen der Taillierungen im FR sind anhand des Druckgradientenverlaufs deutlich erkennbar. Tab. 5.2 listet die vorherrschenden Versuchsbedingungen auf. Bei den Versuchsreihen 1 bis 3 sind die Bettmaterialmengen variiert worden. Zusätzlich wurden Variationen der Luftfluidisierungen im AR, FR und den Siphons und Änderungen der Taillierungen im FR vorgenommen. Die zugehörigen MSR-Nummern und Positionen der Lufteinbringung können aus Abb. 5.1 entnommen werden.

Für die Auswertung des Druckprofils wird das arithmetische Mittel der Messungen aus einer stabilen Versuchsperiode berechnet und über die Höhe dargestellt. Der Druckgradient wird mit der Näherungsgleichung (5.8) berechnet [18]. Abb. 5.3 und 5.4 zeigen den Druckverlauf der Versuche 2 und 3 im gesamten Reaktorsystem.

Tab. 5.2: Versuchsbedingungen in den Reaktoren & Siphons

Bettmaterialeigenschaften			
Partikeldurchmesser d_{SV} in μm (Laserbeugungsverfahren)		121	
Partikeldichte ρ_p in kg/m^3		2850	
Gaseigenschaften (Luft)			
Gasdichte ρ_g in kg/m^3		1,19	
dynamische Viskosität η in μPas		18,23	
Umgebungsbedingungen			
Temperatur T in $^{\circ}C$		20-25	
Druck p in bar		1,01	
Versuchsbedingungen	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Bettmaterialmenge			
Olivin	75 kg	100 kg	125 kg
Fluidisierungsmenge			
FI51250 (BA)	0,0 Nm^3/h	15,0 Nm^3/h	15,0 Nm^3/h
FIR51210 (AR1)	40,0 Nm^3/h	47,0 Nm^3/h	49,6 Nm^3/h
FI51240 (AR1.1)	10,0 Nm^3/h	10,0 Nm^3/h	10,0 Nm^3/h
FIR51220 (AR2)	40,0 Nm^3/h	48,7 Nm^3/h	49,4 Nm^3/h
FIR51230 (AR3)	20,0 Nm^3/h	0,0 Nm^3/h	0,0 Nm^3/h
FI51110 (FR1)	10,0 Nm^3/h	10,0 Nm^3/h	12,0 Nm^3/h
FI51150 (FR2)	0,0 Nm^3/h	25,0 Nm^3/h	25,0 Nm^3/h
FI51120 (ILS)	1,2 Nm^3/h	1,2 Nm^3/h	1,2 Nm^3/h
FI51130 (LLS)	5,0 Nm^3/h	4,0 Nm^3/h	4,0 Nm^3/h
FI51140 (ULS)	6,0 Nm^3/h	4,0 Nm^3/h	4,0 Nm^3/h
Variation der Taillierungen (A_c/A , von unten beginnend)			
Taillierung 1	20 %	24 %	24 %
Taillierung 2	20 %	26 %	26 %
Taillierung 3	20 %	26 %	26 %
Taillierung 4	20 %	20 %	20 %
Taillierung 5	20 %	20 %	20 %
Taillierung 6	20 %	20 %	20 %

$$\frac{dp}{dH}(H_j) \approx \frac{p(H_i) - p(H_{i+1})}{H_i - H_{i+1}} \tag{5.8}$$

$$H_j = H_i + \frac{H_{i+1} - H_i}{2} \tag{5.9}$$

In Abb. 5.5 sind Druck- und Druckgradientenverlauf im oberen Teil des FR (Gegenstrom-Effekt) dargestellt. Die Gesamtfluidisierung ($FR1 + FR2 + 0,5LLS$) in der Gegenstromkolonne des FR kann für den Versuch 2 mit $37 Nm^3/h$ und für den Versuch 3 mit $39 Nm^3/h$ angegeben werden.

Abb. 5.6 zeigt den Druckverlauf der Versuche 1, 2 und 3 im unteren Teil des FRs. Eine Übersicht zu den Inputströmen der Luftfluidisierungen der drei Versuche im unteren Teil des FR kann aus Tab. 5.3 entnommen werden.

Tab. 5.3: Luftvolumenstrom im unteren Teil des FR

	Fluidisierungsmenge (FR1+0,5LLS)
Versuch 1	12,5 Nm ³ /h
Versuch 2	12,0 Nm ³ /h
Versuch 3	14,0 Nm ³ /h

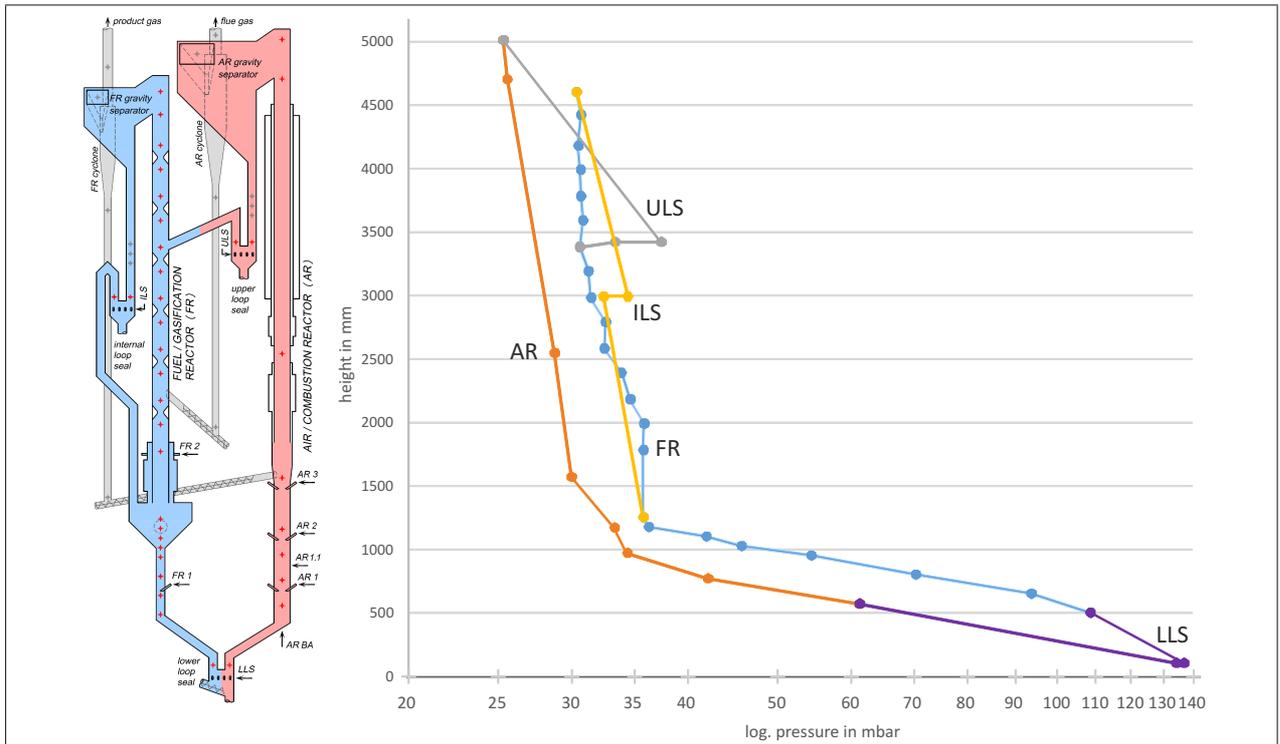


Abb. 5.3: Druckverlauf in den Reaktoren (Versuch 2)

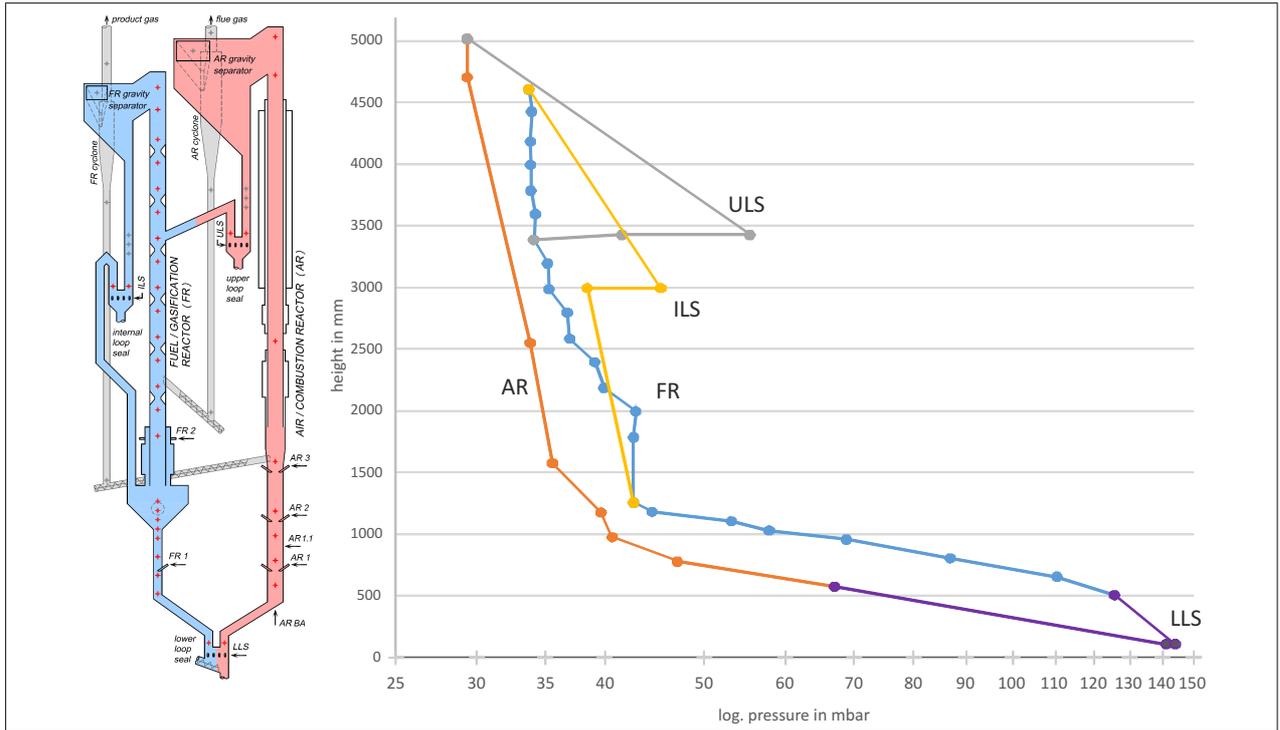


Abb. 5.4: Druckverlauf in den Reaktoren (Versuch 3)

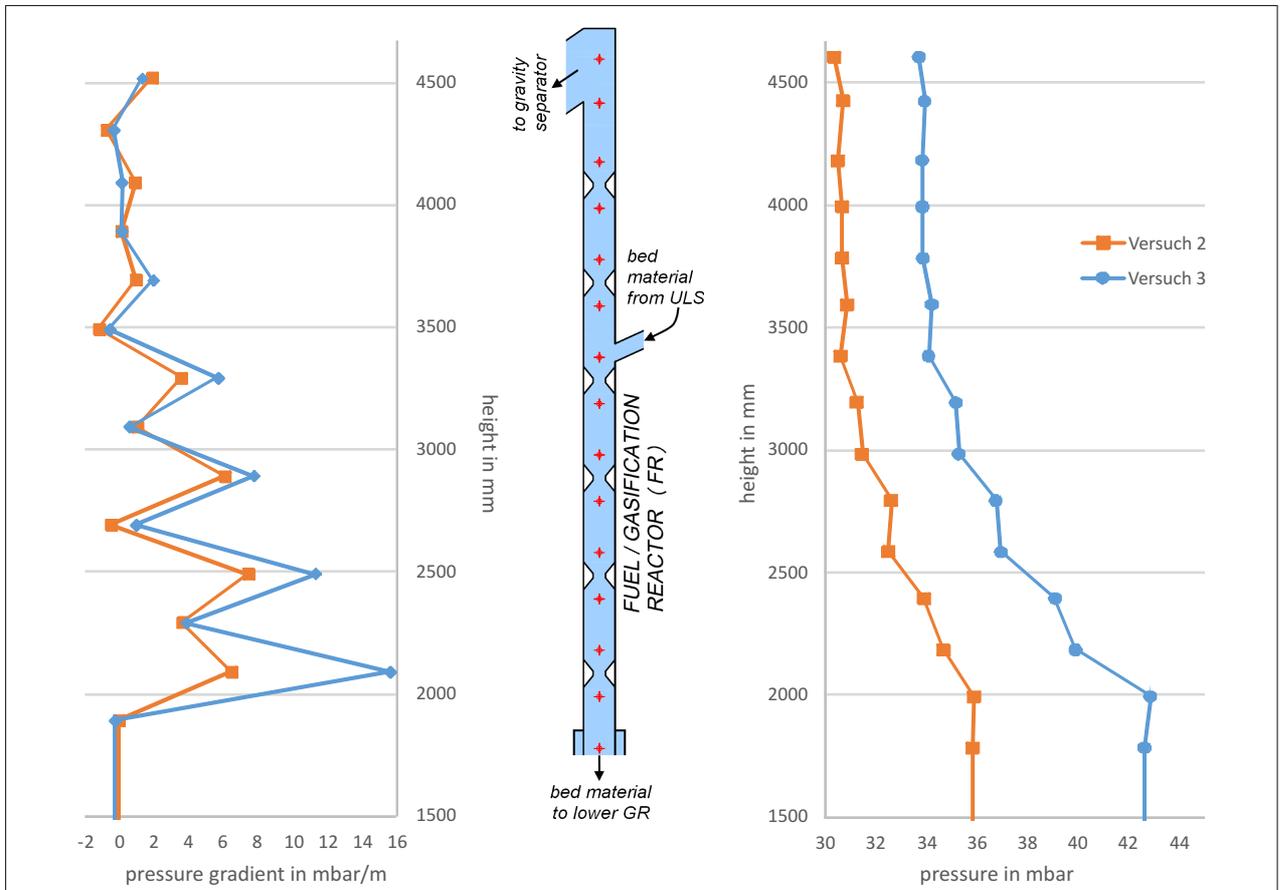


Abb. 5.5: Druck-/Druckgradientenverlauf im oberen Teil des FR (Versuch 2, 3)

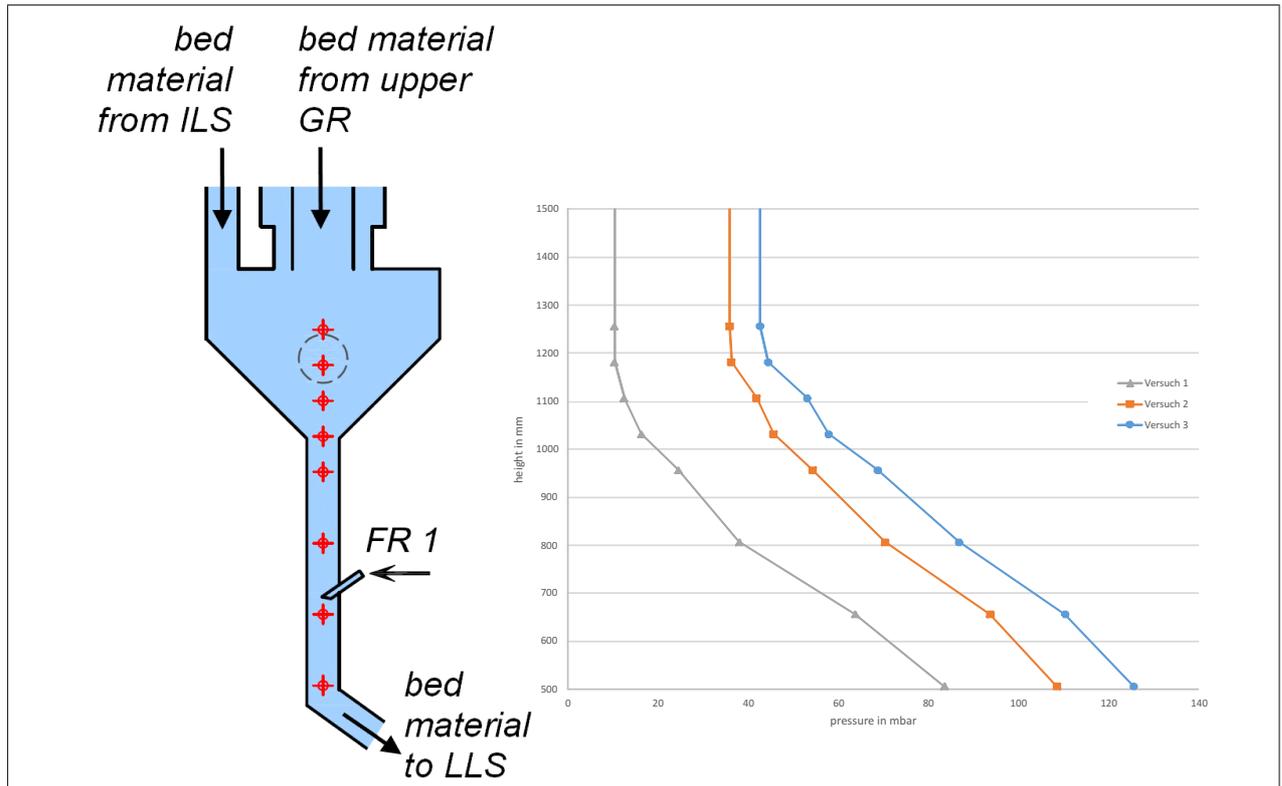


Abb. 5.6: Druckverlauf im unteren Teil des FR (Versuch 1, 2, 3)

5.3.3 Durchflussmessung Druckmessblende

Bei der Kaltinbetriebnahme wurden die eingebauten Wirkdruckblenden als Messinstrumente (Druckmessblenden) von Luft, anstatt von Produktgas bzw. Abgas durchströmt. Da die Zusammensetzung und der thermodynamische Zustand der strömenden Luft an der Druckmessblende bekannt sind ($N_2 \sim 78\%$, $O_2 \sim 21\%$, $Ar \sim 1\%$ [66], Temperatur, Druck) und die Gleichungen zur Berechnung des Durchflusses die anteilmäßig relevanten Gaskomponenten berücksichtigt, konnte die Kalkulation und anschließende Kalibrierung mit diesem Medium durchgeführt werden. Um zu gewährleisten, dass die in die Reaktoren geleiteten Volumenströme nicht vermischt werden und nur die dafür vorgesehenen Druckmessblenden durchströmen, mussten die Siphons abgedichtet werden. Dies wurde mit Hilfe von Bettmaterial erreicht, das in die Siphons ULS und ILS eingefüllt wurde. Anhand der bekannten/gemessenen Eingangsvolumenströme der Luft und der Druckauswertung und Berechnung zu den jeweiligen Messblenden, können quantitative Aussagen zu den Messergebnissen getroffen werden.

Das Ergebnis des Volumenstroms der Abgasmessblende über die Zeit kann aus dem Diagramm 5.7 entnommen werden. Es zeigt sich, dass beim Versuch eine Gesamtabweichung zwischen gemessenen und berechneten Volumenströmen von ca. 7% auftritt. Wird der berechnete Druckverlauf mit einem Korrekturfaktor multipliziert und im Diagramm dargestellt, decken sich die gemessenen mit den korrigierten berechneten Daten sehr gut (siehe strichlierte Linie im Diagramm). Gründe für die Abweichungen werden in der anschließenden Diskussion erläutert.

Die in den FR geleiteten Luftströme wurden mit Hilfe der fix verbauten Volumenstrommes-

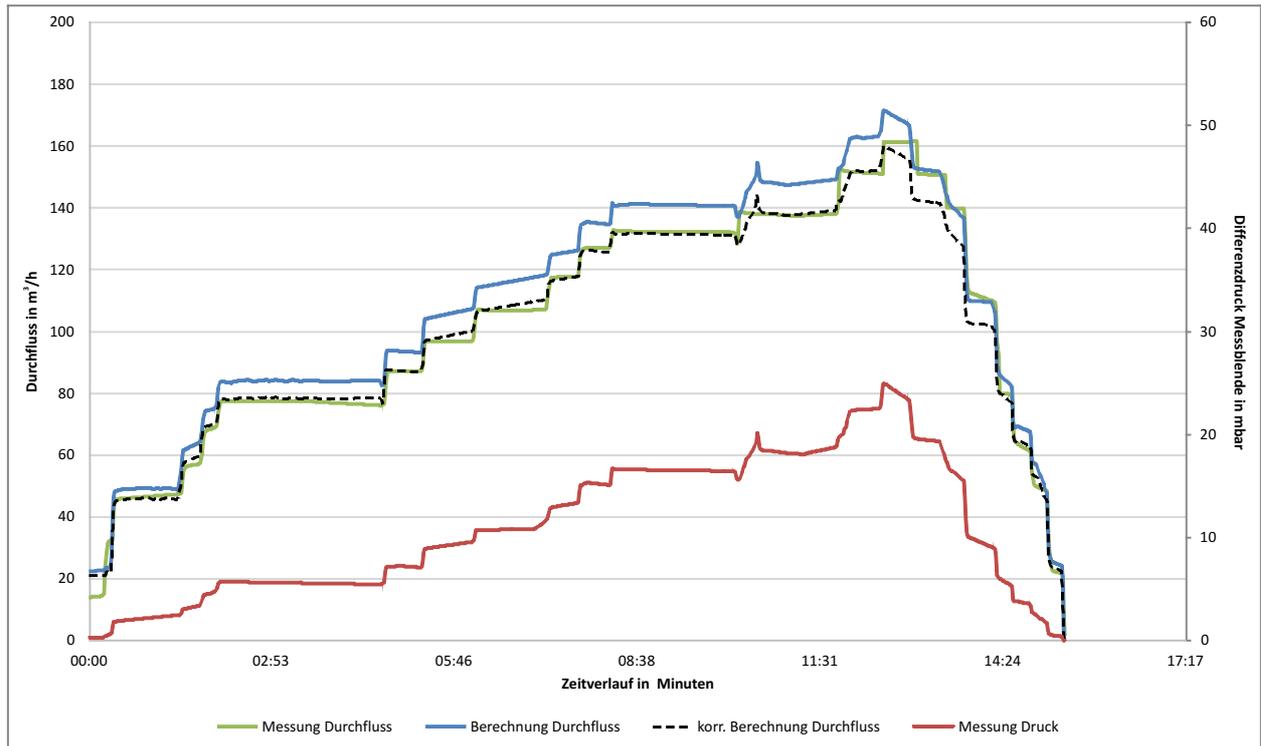


Abb. 5.7: Vergleich Volumenstrom Messung/Berechnung Abgasmessblende

sungen in der Leitwarte und den zusätzlichen Volumenstrommessungen vor Ort abgelesen. Diagramm 5.8 zeigt das Ergebnis für die Druckmessblende des Produktgases. Wenn auch hier der berechnete Volumenstrom mit einem Korrekturfaktor von 7% versehen wird, decken sich die gemessenen und berechneten Werte relativ gut.

5.4 Diskussion der Ergebnisse

5.4.1 Auswertung der Druckprofile

Aus dem Druckverlauf des zweiten und dritten Versuchs (Abb. 5.3 und 5.4) ist zu erkennen, dass der Druck mit zunehmender Höhe in den beiden Reaktoren wie erwartet abnimmt. Auch der treppenförmige Verlauf im oberen Teil des FRs ist zu erkennen. Die Funktionsweise der Siphons kann ebenfalls aus dem Druckverlauf abgeleitet werden. Der Druckverlauf des ULS (graue Kurve) zeigt, dass die Druckmessstelle auf der rechten Seite des Siphons (Messpunkt zum AR) einen höheren Wert anzeigt als die Messstelle zum FR. Der Grund dafür ist die höhere Aufstauung des Bettmaterials im rechten Teil des Siphons, da der betreffende Druck im FR, im Vergleich zum Druck im Abscheider des AR höher ist und die schnelle Wirbelschicht des AR Bettmaterial in den ULS fördert. Aufgrund der, relativ gesehen, hohen gemessenen Drücke direkt im ULS, kann auf eine gute Gasabdichtung zwischen den Reaktoren geschlossen werden. Das Gleiche gilt auch für LLS und ILS.

In Versuch 3 wurden die Bettmaterialmenge und die Luftfluidisierungen weiter erhöht. Vergleicht man den Druckverlauf der Versuche 2 und 3, ist zu erkennen, dass der Druck vor und nach dem ULS bei Versuch 3 deutlich höher ist als bei Versuch 2. Es wird angenommen, dass

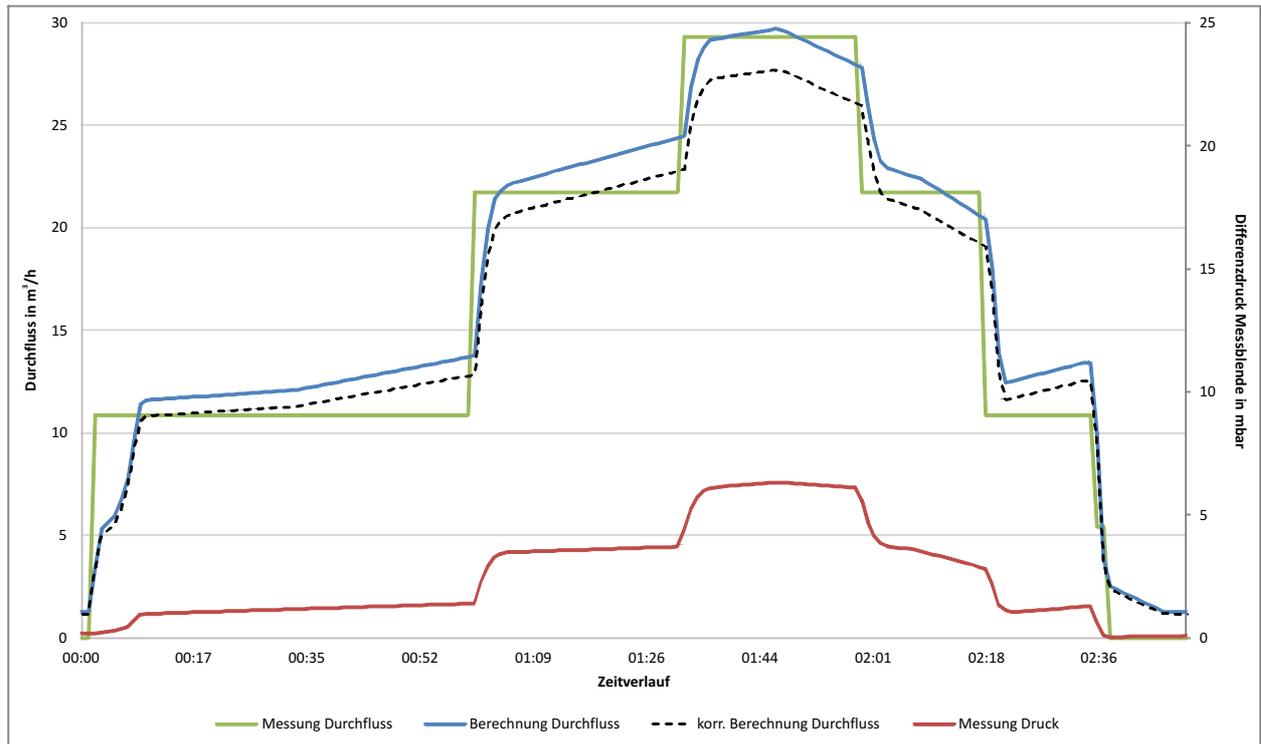


Abb. 5.8: Vergleich Volumenstrom Messung/Berechnung Produktgasmessblende

durch die zusätzlich eingefüllte Bettmaterialmenge (+25 kg) und die leicht erhöhte Gesamtfluidisierung im AR mehr Bettmaterial vom AR in den ULS befördert wird und dadurch die Druckdifferenz des ULS ansteigt. Daraus kann geschlossen werden, dass der globale Bettmaterialumlauf höher ist, als bei Versuch 2. Der ILS weist eine ähnliche Tendenz auf. Auch hier wird angenommen, dass der interne Umlauf bei Versuch 3 etwas höher sein wird als bei Versuch 2. Vor allem da auch die FR-Gesamtfluidisierung erhöht wurde. Insgesamt zeigt Versuch 3 außerdem auch ausgeprägte Treppenverläufe im Druckverlauf und deutlichere Spitzen im Druckgradientenverlauf bei gleicher Einschubtiefe der Taillierungen (siehe Abb. 5.5). Der Druckverlauf und Druckgradientenverlauf zeigen, dass eine höhere Akkumulation von Bettmaterial in Versuch 3 stattfindet, als in Versuch 2. Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit Untersuchungen am Kaltmodell [18, 19].

Anhand Abb. 5.6 ist zu erkennen, dass bei höherer Fluidisierung und steigender Bettmaterialmenge in den Reaktoren, der Druck im untersten Bereich des Wirbelschichtsystems steigt. Speziell die steigenden Fluidisierungsströme im FR bei Versuch 2 und 3 bewirken einen deutlichen Druckanstieg. Daher sind die Drücke aus Versuchen 2 und 3 wesentlich höher, als bei Versuch 1. Der Grund dafür ist unter anderem der höhere Druckverlust über die Druckmessblenden bei steigenden Fluidisierungsströmen. Die Auswertungen des Kaltversuchs zeigen im oberen Bereich des FR einen Gegendruck von lediglich 9 mbar bei Versuch 1, jedoch etwa 30 mbar beim zweiten Versuch bzw. 35 mbar beim dritten Versuch. Dieses Verhalten spiegelt sich auch bei näherer Betrachtung des Differenzdrucks der Druckmessblende wieder (siehe Tab. 5.4).

Tab. 5.4: Druckabfall über die Druckmessblenden

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Δp Produktgasmessblende in <i>mbar</i>	2,3 - 3,9	12,5 - 13,2	13,3 - 14,2
Δp Abgasmessblende in <i>mbar</i>	14,0 - 15,7	13,8 - 15,1	17,2 - 17,6

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die ersten Versuchsergebnisse aus der Kaltinbetriebnahme zeigten, dass die fluiddynamische Funktionstüchtigkeit und die Erwartungen des neu entwickelten Reaktordesigns erfüllt werden. Wie im Kaltmodell vorhergesagt, beeinflussen die Taillierungen im FR den Wirbelschichtzustand wie gewünscht. Bei den Versuchen der Kaltinbetriebnahme stellten sich vergleichbare Wirbelschichtzustände wie in den Kaltmodellversuchen ein [18, 19]. Es bildeten sich im oberen FR Zonen mit erhöhtem Gas-Feststoffkontakt aus. Somit konnte die Ähnlichkeit des Verhaltens der Versuchsanlage im Vergleich zum Kaltmodell nachgewiesen werden. Durch Variationen der Luftfluidisierungen und der Taillierungen wurde ein Betriebspunkt für den Kaltbetrieb gefunden, in dem ein erhöhter Gas-Feststoffkontakt im oberen Teil des FR gewährleistet werden konnte. Es zeigte sich, dass die Kammern unterschiedlichen Einflüssen unterliegen und es daher zu unterschiedlichen Ausbildungen der Druckgradientenverläufe in den einzelnen Kammern kam. Deshalb wurden manche Taillierungen mittels Einschübe angepasst. Bei Annäherung an die Flutungsgrenze durch Erhöhung des Luftvolumenstroms war eine Steigerung der Druckgradienten ähnlich wie beim Kaltmodell ersichtlich. Durch die variable Verstellung der Taillierungen war es möglich, die Feststoffakkumulation in den einzelnen Kammern zu beeinflussen, indem die Einschubtiefen in den jeweiligen Taillierungen verstellt wurden. Es wird jedoch vermutet, dass im unteren Bereich des FR Gas in das Fallrohr des Feinaschezyklons strömen könnte. Die Feinascheschnecken dichteten wahrscheinlich nicht vollständig ab. Dieser Leckagestrom könnte das Druckprofil im unteren Bereich des FR beeinflussen. Ähnliches gilt für den AR. Die genauen Einflüsse auf den Druckverlauf gilt es in zusätzlichen Versuchen noch näher festzustellen.

Eine zusätzliche Abweichung zum Kaltmodell zeigte der Druckverlauf über die Reaktoren. Durch die verbauten Druckmessblenden stellte sich ein erhöhter Gegendruck am Ausgang der Reaktoren ein. Daher verschob sich bei steigenden Fluidisierungsströmen der gesamte Druckverlauf im Diagramm nach rechts, zu höheren Drücken. Dieser Effekt hatte Auswirkungen auf das Wirbelschichtverhalten, da das Gas nun stärker komprimiert wurde. Daher wird vermutet, dass ein etwas höherer Gasvolumenstrom in die Reaktoren geleitet werden musste, um die gewünschten Wirbelschichtzustände zu erreichen. Bei der Heißenbetriebnahme wird der Gegendruck in den Reaktoren jedoch deutlich kleiner sein, da die strömenden Gase zwischen den Reaktoren und den Druckmessblenden abgekühlt werden und daher gemäß der idealen Gasgleichung die Volumenströme abnehmen. Die Differenzdruckmessblenden erzeugen somit im Heißbetrieb geringere Druckverluste.

5.4.2 Auswertung der Durchflussmessungen

Prinzipiell sind die Ergebnisse aus den Volumenstromberechnungen der Druckmessblenden zufriedenstellend. Es wurden jedoch Abweichungen zu den Sollwerten festgestellt. Im Folgenden werden Ursachen für die Abweichungen diskutiert, die die Einführung des Korrekturfak-

tors notwendig machten. Für die Messung zur Produktgas-Messblende wird ein nochmaliger längerer Kalibrierungsversuch empfohlen, da die Druckmesswerte sich oft nicht stationär genug ausgebildet haben.

Die Messabweichungen werden vor allem durch den Fehler der Differenzdruckmessung bestimmt, da der Durchfluss proportional der Quadratwurzel aus dem Differenzdruck berechnet wird (siehe Gl.(4.1)). Zusätzlich haben Temperatur- und Dichteänderungen des Gases Einfluss auf das Ergebnis. Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus den Berechnungen der Stoffwerte des Gases. Die Berechnung der Viskosität und der Wärmekapazität ist abhängig von der Gaszusammensetzung und der Temperatur. Für die Berechnung dieser Größen sind empirische Gleichungen hinterlegt, die zwar näherungsweise den tatsächlichen Größen entsprechen, aber nicht immer 100 %ig stimmen. Außerdem wird für alle Berechnungen vorausgesetzt, dass es sich um eine ideale Gasmischung handelt. Darüber hinaus wurden die Druckmessblenden für heiße Gase mit 450 °C und geringen Dichten (entsprechend Produkt- und Abgaseigenschaften) ausgelegt. Die Versuche wurden jedoch, wie bereits erwähnt, mit Luft bei Raumtemperatur durchgeführt. Dies kann ebenfalls zu erhöhten Abweichungen führen. Auch die Druckmessblende führt aufgrund von fertigungstechnischen Toleranzen zu Messabweichungen. Diese sind jedoch aufgrund der hohen geforderten Genauigkeiten gering im Vergleich zu den anderen Faktoren. Ferner sind auch vorgegebene Ein- und Auslaufstrecken zu beachten. Diese Vorgaben sind den jeweiligen Normen der Messblenden zu entnehmen. Die geforderten Strecken wurden bei der Versuchsanlage berücksichtigt. Daher sind diesbezüglich nur geringe Messabweichungen zu erwarten. Erste Heißversuche werden zeigen, wie sich die Berechnungen auf die vorherrschenden Bedingungen (verunreinigtes Gas bei hohen Temperaturen) auswirken und ob sich diese Messmethoden als zuverlässig erweisen.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Eine neuartige DUAL FLUID Versuchsanlage wurde in den vergangenen Jahren an der TU Wien entwickelt. Der Vorteil des überarbeiteten Reaktordesigns mit den Taillierungen im oberen Bereich des Vergasungsreaktors sind im Wesentlichen ein besserer Gas-Feststoffkontakt und Wärmeaustausch. Dadurch entsteht ein qualitativ höherwertiges Produktgas. Des Weiteren ermöglicht die entwickelte Versuchsanlage den Einsatz einer erweiterten Bandbreite von Festbrennstoffen und zusätzliche Einsparungen in den Betriebsmitteln.

Mit Hilfe der im Zuge dieser Arbeit entwickelten und umgesetzten Mess-, Steuer- und Regelungstechnik wird die Versuchsanlage bedient und überwacht. Durch die Implementierung der umfangreichen Messtechnik können neue Erkenntnisse der fluiddynamischen Eigenschaften des Reaktorkonzepts gewonnen werden. Zusätzlich sind bessere Vergleiche zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen aus IPSEpro und präzise Aussagen zur Effizienz der Anlage möglich. Der hohe Mess- Steuer- und Regelungsaufwand macht den Einsatz eines Prozessleitsystems unabdingbar. Nur dadurch kann die Komplexität der Anlage auf eine überschaubare Art und Weise reduziert werden. Der Einsatz des Prozessleitsystems ermöglicht eine sinnvolle Handhabung der Versuchsanlage. Dadurch wird eine bessere Steuerung und Regelung gewährleistet. Auch aus sicherheitstechnischen Gründen ist der Einsatz eines industriell bewährten Prozessleitsystems sinnvoll, da während der Versuchsphase mit brennbaren Gasen hantiert wird und hohe Temperaturen vorherrschen.

Im Zuge dieser Arbeit sind über 200 Sensoren und über 60 Aktoren in der Versuchsanlage installiert und in das Prozessleitsystem implementiert worden. Des Weiteren wurde ein Programm zur Anlagensteuerung entwickelt. Die ausgearbeitete, prozessleittechnisch geführte Sicherheitstechnik konnte einfach und überschaubar in das Prozessleitsystem integriert werden. Zur leichteren Handhabung der Versuchsanlage wurden übersichtliche Regelungskonzepte ausgearbeitet und 22 Regelkreise in das Prozessleitsystem implementiert. Besonders Teilanlagen, die für den Versuch nur wenig von Bedeutung sind, arbeiten dadurch möglichst automatisch, ohne dass der Anlagenbediener sich eingehend damit beschäftigen muss. Eine intensivere Auseinandersetzung mit dem Vergasungsprozess und dem neuen Reaktorsystem ist somit möglich.

Ein Teil dieser Arbeit umfasste auch die Inbetriebnahme der Versuchsanlage. Mit Hilfe der Literatur konnte ein Konzept für die Kaltinbetriebnahme ausgearbeitet werden. Umfangreiche Tests zeigten, dass ein Großteil der Messtechnik und Regelungstechnik wie gewünscht funktionieren. Einrichtungen, die für die Heißinbetriebnahme relevant sind, werden nach den

Kaltversuchen in Betrieb genommen.

Zum Abschluss der Arbeit wurden erste Kaltversuche durchgeführt und Druck- und Druckgradientenprofile der Reaktoren aufgezeichnet. Es zeigte sich, dass das neu entwickelte Reaktorkonzept aus der fluiddynamischen Sichtweise funktioniert. Die Taillierungen beeinflussen den Wirbelschichtzustand, wie im Kaltmodell vorhergesagt. Des Weiteren wurden im Kaltversuch die Ergebnisse der Durchflussmessungen mittels Druckmessblenden ausgewertet. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Durchflüssen blieben im erwarteten Rahmen. Jedoch ist anzumerken, dass im heißen Versuchsbetrieb andere Bedingungen vorherrschen. Auswirkungen der Gaszusammensetzung und der Ergebnisse der Durchflussmessungen im Betrieb zeigen erste Heißversuche. Ferner stehen weitere Kaltversuche wie z.B. Variation der Fluidisierungen, Verstellung der Einschübe der Taillierungen, Bettmaterial- und Bettumlaufvariationen, Bestimmung des Abscheidegrades der Zyklone, etc. noch aus.

6.1 Ausblick auf den Versuchsbetrieb

Nach der erfolgreichen Kaltinbetriebnahme ist die noch fehlende Mess- und Steuertechnik des Brenners zu implementieren, Heizelemente für Aufheizphasen zu installieren und die Anlage für den Heißbetrieb zu isolieren. Des Weiteren wird ein Not-Aus-Konzept erstellt, bei dem die Anlage bei Fehlverhalten in einen sicheren Zustand gebracht wird. Dies ist von essentieller Bedeutung, bevor die Anlage in den Normalbetrieb übergehen kann.

Zu Beginn der anfallenden Heißinbetriebnahme sind alle in das Prozessleitsystem implementierten sicherheitstechnischen Einrichtungen zu testen und fehlende Regler zu parametrieren. Hier wird angemerkt, dass auch die Möglichkeit des Auto-Tunings eines Reglers besteht. Dazu muss das Programm im Prozessleitsystem geringfügig modifiziert werden. Nachdem die Regelkreise der einzelnen Teilbereiche zur Zufriedenheit arbeiten, gilt es die Gesamtanlage in Betrieb zu nehmen, bis ein stationärer Arbeitspunkt erreicht wird.

Bewährt sich die neue Versuchsanlage und sind erste Versuche erfolgreich abgearbeitet, kann überlegt werden, den Automatisierungsgrad weiter zu steigern und höhere Regelungstechniken zu implementieren. Durch den modularen Aufbau der Steuerung kann die MSR-Technik ggf. erweitert werden, sollten Bauteile, messtechnisches Equipment oder ähnliches ergänzt werden. Die Visualisierung kann ohne spezielles Hintergrundwissen adaptiert werden. Als weitere Empfehlung wird hier der Einsatz von höheren Regelungstechniken (siehe Kap. 2.2.2) vorgeschlagen. Sie bieten leistungsfähige Alternativen zur konventionellen PID-Regelung. Diese Methoden können auch in das vorhandene Prozessleitsystem implementiert werden. So könnten dem Anlagenbediener beispielsweise Vorschläge gemacht werden, wie die Fluidisierungen der Reaktoren verbessert werden können, um das Betriebsfenster zu optimieren und die Effizienz der Anlage dadurch zu steigern. Es besteht auch die Möglichkeit der Integrierung von MATLAB/Simulink-Codes. Dadurch können komplexe Prozesse in MATLAB modelliert, exportiert und im Prozessleitsystem anschließend importiert werden. Dieses Tool bietet auch die Möglichkeit der Entwicklung von komfortablen Regelalgorithmen, die speziell auf die vorhandenen Prozessbedingungen eingehen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Phasen der Biomassevergasung [8]	5
2.2	Prinzip der DUAL FLUID Vergasung [10]	6
2.3	Entwicklung der Wirbelschichtvergasung [9]	7
2.4	links: Foto des Kaltmodell, rechts: Schematischer Aufbau der Reaktoren der Versuchsanlage	9
2.5	Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Wirbelschichtverhalten [18]	10
2.6	Automatisierungspyramide (IEC 62264)	11
2.7	Typische Anordnung einer Messkette (DIN 1319)	13
2.8	Messprinzip eines Thermoelements [24]	13
2.9	links: Aufbau des piezoresistiven Drucksensors [24], rechts: Kalinsky Druckmessdose	15
2.10	links: Elemente des Drucksensors aus Keramik, rechts: Unterschied Überdruck- und Absolutdrucksensoren [24]	15
2.11	links: Prinzip eines MIDs [29], rechts: VORTEX-Messung [30]	16
2.12	Messblende nach DIN EN ISO 5167-2 mit Eckdruckentnahme [31]	17
2.13	Blockschaltbild eines Regelkreises [39]	20
2.14	Aufbau eines Prozessleitsystems [44]	23
2.15	Darstellung der Wirkungsweise von PLT-Einrichtungen (VDI/VDE 2180)	25
2.16	Darstellung der möglichen Gefahren in einer Risikomatrix [18]	26
2.17	Abhängigkeit der Fehlerbeseitigungskosten [47]	28
2.18	Dokumente zur Anlagensicherheit [47]	31
2.19	Hauptphasen der Inbetriebnahme [47]	32
2.20	Beispiele für Lastverläufe im Probebetrieb [47] oben: ideal, unten: real	35
2.21	Inhalt der Teildokumentation Prozessleittechnik und Elektrotechnik [51]	38
3.1	Anlagenschema der neuen DUAL FLUID Versuchsanlage	39
3.2	links: Prinzip der DUAL FLUID Vergasungstechnologie, rechts: Reaktordesign der neuen Versuchsanlage [10]	40
3.3	Abmessungen der Reaktoren inkl. Darstellung der Messpunkte	42
3.4	links: oberer FR (vorne) und AR (hinten) beim Einbau, rechts: AR inkl. Messstellen und Verrohrung der Luftdüsen	43
3.5	Massen- und Energiebilanzen für die Planung des neuen Reaktorsystems [10]	44
3.6	oben: Brennstoffbunker blau/rot, unten: Brennstoffklappe zu Reaktor	46
3.7	links: Dampferzeuger, rechts: Dampf-Volumenstrommessung	46
3.8	Dreistufige Luftversorgung für AR	47
3.9	Wasser/Dampfkreislauf	48
3.10	Strahlungskühler für Produktgas und Abgas	50
3.11	Grundfließschema der Versuchsanlage [54]	54

4.1	Aufbau der Messanalytik	56
4.2	Aufbau der SPS	58
4.3	Schematischer Aufbau des Hauptschaltschranks	59
4.4	Hauptschaltschrank (Foto)	60
4.5	Druckmessdosenschrank	61
4.6	Einsatzbereiche von Druckmessblenden in Abhängigkeit der Reynoldszahl . .	62
4.7	Betriebsweisen der Anlage [59]	69
4.8	Brennstoffregelung für einen Bunker	74
4.9	Regelungskonzept der Kühlerregelung	75
4.10	Kühlerrregelung mit Vorsteuerung	76
4.11	Regelungskonzept des Kühlkreislaufs	78
4.12	Übersicht der Geräteankopplung an die SPS	79
4.13	links: Operatorstationen, rechts: Handventile der Reaktorfluidisierungen . . .	84
4.14	Ebenendarstellung des Bedienkonzepts	85
4.15	Darstellung der Druck- & Druckgradientenverläufe im PLS	86
4.16	Gesamtübersicht des Prozesses	87
4.17	Kopfzeile eines Objektes aus der PAL-Bibliothek	88
4.18	links: Darstellung des Messwerts, rechts: Parameterfenster [64]	89
4.19	links: Darstellung des Motor-Faceplate, rechts: Parameterfenster [64]	90
4.20	links: Regler-Faceplate, mitte: Trenddarstellung, rechts: Parameterfenster [64]	92
5.1	Fluidisierungsluft-Inputs während der Kaltinbetriebnahme	95
5.2	Ergebnisse der Volumenverteilungssumme Q_3 von Olivin	97
5.3	Druckverlauf in den Reaktoren (Versuch 2)	99
5.4	Druckverlauf in den Reaktoren (Versuch 3)	100
5.5	Druck-/Druckgradientenverlauf im oberen Teil des FR (Versuch 2, 3)	100
5.6	Druckverlauf im unteren Teil des FR (Versuch 1, 2, 3)	101
5.7	Vergleich Volumenstrom Messung/Berechnung Abgasmessblende	102
5.8	Vergleich Volumenstrom Messung/Berechnung Produktgasmessblende	103

Tabellenverzeichnis

2.1	Typische Produktgaszusammensetzung bei Holzbrennstoffen [11]	6
2.2	Typische Einstellwerte für Regler im Chemiebetrieb [23]	21
3.1	Abmessung (Innenmaße) der Reaktoren	41
3.2	Überblick der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	53
4.1	Vergleich der verfügbaren Onlinewerte	57
4.2	Messaufwand nach Anlagenbereichen der neuen Versuchsanlage	57
4.3	MSR-Nummernzuordnung nach Anlagenbereichen	62
4.4	Beschreibung der vorkommenden Variablen der Produktgasmessblende	64
4.5	Beschreibung der vorkommenden Variablen der Abgasmessblende	67
4.6	Verwendete Frequenzumformer inkl. Leistungsangaben	80
4.7	Verwendete Heizelemente inkl. Leistungsangaben	81
4.8	Evaluierung unterschiedlicher Automatisierungssysteme	83
4.9	Konfigurierte Alarmgruppen im PLS	88
4.10	Auflistung der Ventile nach Einsatzbereich	91
4.11	Auflistung der Regler nach Einsatzbereich	92
5.1	Ergebnisse der Bettmaterialanalyse	97
5.2	Versuchsbedingungen in den Reaktoren & Siphons	98
5.3	Luftvolumenstrom im unteren Teil des FR	99
5.4	Druckabfall über die Druckmessblenden	104

Literaturverzeichnis

- [1] Pamela S. Chasek, David L. Downie, and Janet Welsh Brown. *Handbuch Globale Umweltpolitik*. Parthas, 2006.
- [2] Sächsische Hans-Carl von Carlowitz-Gesellschaft. *Die Erfindung der Nachhaltigkeit: Leben, Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz*. oekom verlag, 2013.
- [3] Volker Hauf. *Unsere gemeinsame Zukunft*. Eggenkamp Verlag, 1987.
- [4] Enquete-Kommission. *Abschlussbericht "Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung"*. Deutsche Bundeskommission, 1998.
- [5] U.S. Energy Information Administration. *Annual Energy Outlook 2014*. EIA, 2014.
- [6] IPCC Working Group II. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, 2014.
- [7] Europäische Kommission. *Klima- und energiepolitische Ziele für eine wettbewerbsfähige, sichere und CO₂-arme EU-Wirtschaft bis 2030*. EU, 2014.
- [8] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, and Hermann Hofbauer. *Energie aus Biomasse*. Springer, 2001.
- [9] Stefan Koppatz, Michael Fuchs, Stefan Müller, and Johannes C. Schmid. *Join the research platform FUTURE ENERGY TECHNOLOGY to bring visions to life*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2012.
- [10] Johannes C. Schmid. *Development of a novel dual fluidized bed gasification system for increased fuel flexibility*. PhD thesis, Technical University of Vienna, 08 2014.
- [11] Stefan Müller. *Hydrogen from Biomass for Industry - Industrial Application of Hydrogen Production Based on Dual Fluid Gasification*. PhD thesis, Technical University of Vienna, 04 2013.
- [12] Hermann Hofbauer. *Unterlagen zur Vorlesung Wirbelschichttechnik*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 1995.
- [13] Rafael Psik and Ziemowit Slomczynski. *Final Stage of First Supercritical 460 MWe CFB Boiler Construction – Project Update*. Foster Wheeler, 2008.
- [14] Hermann Hofbauer. *Unterlagen zur Vorlesung Brennstoff- und Energietechnologie*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2007.

- [15] Tobias Pröll, Johannes C. Schmid, Christoph Pfeiffer, and Hermann Hofbauer. *Verbessertes Wirbelschichtreaktorsystem*. Patent, AT 509586B8, 10.2011.
- [16] Johannes C. Schmid, Christoph Pfeiffer, Tobias Pröll, Kitzler Hannes, and Hermann Hofbauer. *Wirbelschichtreaktorsystem*. Patent, AT 510228A1, 02.2012.
- [17] Johannes C. Schmid, Tobias Pröll, and Hermann Hofbauer. *Wirbelschichtreaktorsystem*. Patent, AT 513490B1, 05.2014.
- [18] Dalibor Martinovic. *Kaltmodellversuche und MSR-Konzept einer Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage*. Diplomarbeit, Techn. Univ. Wien - Inst. f. Verfahrenstechnik, 2013.
- [19] Josef Fuchs. *Ermittlung des Betriebskennfeldes einer innovativen Zweibett-wirbelschicht anhand von Kaltmodelluntersuchungen*. Diplomarbeit, Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2013.
- [20] Michael Stollhof. *Detailed fluid dynamic investigations of the fuel reactor of a novel DUAL FLUID reactor concept for Chemical Looping Combustion for solid fuels*. Master's thesis, Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2014.
- [21] Tobias Pröll. *Potenziale der Wirbelschichtdampferzeugung fester Biomasse – Modellierung und Simulation auf Basis der Betriebserfahrungen am Biomassekraftwerk Güssing*. PhD thesis, Technical University of Vienna, 2004.
- [22] Johannes C. Schmid, Roland Diem, and Müller Stefan. *Endbericht Basic Engineering - Bau der G-volution Versuchsanlage (interner Bericht)*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2012.
- [23] Günther Strohrmann. *Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse*. Oldenburg, 2002.
- [24] Hans-Jürgen Gevatter. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer, 2006.
- [25] Klaus Sattler and Werner Kasper. *Verfahrenstechnische Anlagen*. Wiley-VCH, 2000.
- [26] Fernando Puente León and Uwe Kiencke. *Messtechnik*. Springer Vieweg, 2012.
- [27] Rainer Parthier. *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008.
- [28] Kalinsky. *Datenblatt Drucksensor DS 2 (Rev. 07-13)*. Kalinsky Sensor Elektronik GmbH & Co.KG, 2013.
- [29] Friedrich Hofmann. *Grundlagen Magnetisch-Induktive Durchflussmessung*. KROHNE Messtechnik GmbH und Co. KG, 2003.
- [30] Yokogawa. *Digitaler Wirbeldurchflussmesser digitalYEWFL0*. Yokogawa GesmbH, 2003.
- [31] Institut für Luft-und Kältetechnik. Dokumentation Volumenstromberechnung für Drosselgeräte. Website: <http://www.ilkdresden.de/leistungen/softwareentwicklung/detail/durchflussberechnung-nach-iso-5167>, 2014.

- [32] BOSCHE Wägetechnik. Transmitter WTB Bedienungsanleitung. Website: http://www.bosche.eu/sites/default/files/prospekte/Messverstaerker_WTB.pdf.
- [33] Luigi Fortuna, Salvatore Graziani, Alessandro Rizzo, and Maria G. Xibilia. *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*. Springer, 2007.
- [34] Martin Kozek. *Unterlagen zur Vorlesung Identifikation - Experimentelle Modellbildung*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Mechanik und Mechatronik, 2013.
- [35] Daniel C. Harris. *Lehrbuch der Quantitativen Analyse*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [36] Wolfgang Schneider. *Praktische Regelungstechnik - Ein Lehr- und Übungsbuch für Nicht-Elektrotechniker*. Vieweg+Teubner, 2008.
- [37] Ulrich Hauptmanns. *Prozess- und Anlagensicherheit*. Springer Vieweg, 2013.
- [38] Andy Ingrej, Patrick Lerévérénd, and Andreas Hildebrandt. *Safety integrity level*. Pepperl+Fuchs, 2007.
- [39] Jan Lunze. *Regelungstechnik 1*. Springer, 2010.
- [40] Jan Lunze. *Regelungstechnik 2*. Springer, 2010.
- [41] Rainer Dittmar and Bernd-Markus Pfeiffer. *Modellbasierte prädiktive Regelung*. Oldenbourg, 2004.
- [42] Piotr Tatjewski. *Advanced Control of Industrial Processes*. Springer, 2007.
- [43] K. F. Früh, Uwe Maier, and Dieter Schaudel. *Handbuch der Prozessautomatisierung*. Ouldenburg Industrieverlag, 2004.
- [44] Bernecker und Rainer. *Produktfolder Aproz R4.0-06*. Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H., 2014.
- [45] Bernecker und Rainer. *Aproz Dokumentationshandbuch R4.0-06*. Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H., 2014.
- [46] Reinhard Preiss. *Methoden der Risikoanalyse in der Technik*. TÜV AUSTRIA Akademie GmbH, 2009.
- [47] Klaus H. Weber. *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer, 2006.
- [48] Gerhard Bernecker. *Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer, 2001.
- [49] H.W. Adams. *Erhöhung der Sicherheit durch Qualitätssicherung bei Planung, Bau und Betrieb von chemischen Produktionsanlagen: Forschungsbericht 104 09 221*. Umweltbundesamt, 1993.
- [50] Messer Industriegase GmbH. Weniger Sauerstoff, mehr Sicherheit und Qualität. Website: http://www.messergroup.com/de/Info_Download/Fachbroschueren/Umwelt/.
- [51] Klaus H. Weber. *Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer, 2008.
- [52] Johannes C. Schmid, Tobias Pröll, and Ignacio Diaz. *G-Volution, Biomasse-Dampfvergaser der zweiten Generation*. Neue Energien, 2020, 2011.

- [53] Christoph Pfeifer, Johannes C. Schmid, Tobias Pröll, and Hermann Hofbauer. *Next Generation Biomass Gasifier*. 19th European Biomass Conference and Exhibition, 2011.
- [54] Johannes C. Schmid, Stefan Müller, and Hermann Hofbauer. *Eine neue Generation der DUAL FLUID Dampfergasung als Versuchsanlage an der TU Wien*. Techn. Univ. Wien, Inst. f. Verfahrenstechnik, 2014.
- [55] Johannes C. Schmid, Ute Wolfesberger, Stefan Koppatz, Christoph Pfeiffer, and Hermann Hofbauer. *Variation of feedstock in a dual fluidized bed steam gasifier - Influence on product gas, tar content and composition*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2012.
- [56] Erich Höftberger. *In-situ CO₂-Adsorption in a Dual Fluidised Bed Biomass Steam Gasifier to Produce a Hydrogen Rich Gas*. PhD thesis, Technical University of Vienna, 2004.
- [57] VDI e.V. *VDI-Wärmeatlas*. Springer, 2013.
- [58] Karl Schwister and Volker Leven. *Verfahrenstechnik für Ingenieure*. Hanser, 2013.
- [59] Veronika Wilk, Hannes Kitzler, Stefan Koppatz, Christoph Pfeiffer, and Hermann Hofbauer. *Grafik aus Vortrag zu Publikation Gasification of residues and waste wood in a dual fluidised bed gasifier*. Bioenergy2020+ GmbH, 2010.
- [60] ABB AG. Benutzerhandbuch ACS355 Frequenzumrichter. Website: <http://www.abb.com/product/seitp322/eca98f96425efdd2c125795d00498c06.aspx>, 2012.
- [61] JUMO GmbH & Co. KG. JUMO TYA 201 Einphasen-Thyristor-Leistungssteller Betriebsanleitung. Website: <http://www.jumo.at/produkte/automatisieren/leistungssteller/709061/jumo-tya-201-einphasen-leistungssteller-709061.html>, 2014.
- [62] SEKO. *Betriebsanleitung SEKO Controller EC 8*. SEKO Staubtechnik GmbH, ohne Jahr.
- [63] ISMATEC Laboratoriumstechnik GmbH. Betriebsanleitung ecoline VC-280. Website: http://www.ismatec.com/ch_d/pumpen/s_ecoline/eco_vc280.htm, 2007.
- [64] Bernecker und Rainer. *PAL Dokumentationshandbuch R4.0-06*. Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H., 2014.
- [65] Malvern. Bedienungsanleitung Mastersizer. Website: <http://www.malvern.de/labger/products/mastersizer/MS2000/mastersizer2000.htm>.
- [66] Hans Dieter Baehr and Stephan Kabelac. *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer, 2012.

Abkürzungsverzeichnis

APC	Advanced Process Control
AR	Air-Reactor (Verbrennungsreaktor)
B&R	Bernecker und Rainer
BPCS	Basic Process Control Systems
CAN	Controller Area Network
CFC	Continuous Function Chart
DGRL	Druckgeräterichtlinie
DMS	Dehnmessstreifen
ERP	Enterprise Ressource Planning
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FR	Fuel-Reactor (Vergasungsreaktor)
FU	Frequenzumformer
GC	Gaschromatograph
ILS	innerer Siphon (Internal Loop Seal)
IPSE _{pro}	Simulationsprogramm von Simtech Simulation Technology
LLS	unterer Siphon (Lower Loop Seal)
MBA	Messbereichsanfang
MBE	Messbereichsende
MES	Manufacturing Execution System

MID	Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPC	Model Predictive Control
MSRT	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
NAMUR	Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie
PAL	Process Automation Library
PID-Regler	proportional–integral–derivative controller
PLS	Prozessleitsystem
PLT	Prozessleittechnik
R&I-Schema	Rohrleitungs & Instrumentenfließschema
SFC	Sequential Function Chart
SIF	Safety Instrumented Function
SIL	Sicherheitsintegritätslevel
SIS	Safety Instrumented System
SISO	Single Input Single Output
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ULS	oberer Siphon (Upper Loop Seal)
VNC	Virtual Network Computing

Symbolverzeichnis

$\bar{\eta}, \eta$	dynamische Viskosität Gasgemisch	[Pas]
$\bar{\kappa}$	Isentropenexponent Gasgemisch	[-]
$\bar{\rho}$	Dichte Gasgemisch	[kg/m ³]
\bar{d}_V	volumenbezogener, mittlerer Partikeldurchmesser	[μ m]
\bar{M}	molare Masse Gasgemisch	[g/mol]
β	Durchmesser Verhältnis d/D	[-]
Δp	Druckdifferenz	[bar]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /h]
ϵ	Expansionszahl	[-]
η_i	dynamische Viskosität Gaskomponente i	[Pas]
κ_i	Isentropenexponent Gaskomponente i	[-]
λ	Luftüberschusszahl	[-]
Φ	Partikelformfaktor	[-]
ρ, ρ_g	Dichte des Gases	[kg/m ³]
ρ_1	Dichte des Gases vor Messblende	[kg/m ³]
ρ_p	Partikeldichte	[kg/m ³]
A	Faktor $\left(\frac{19000\beta^{0,8}}{Re_D}\right)$	[-]
A_c/A	Öffnungsverhältnis	[-]
Ar	Archimedes-Zahl	[-]
C	Durchflusskoeffizient	[-]
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	[kJ/kgK]
c_v	spezifische isochore Wärmekapazität	[kJ/kgK]
D	Rohrinnendurchmesser	[m]
d	Bohrungsdurchmesser	[m]
d_i	Durchmesser der i-ten Gewichtsfraktion	[μ m]
d_P	Siebdurchmesser	[μ m]
d_S	oberflächenbezogener Partikeldurchmesser	[μ m]
d_V	volumenbezogener Partikeldurchmesser	[μ m]
d_{SV}, d_{32}	oberflächen-/volumenbezogene Durchmesser	[μ m]
dp/dH	Druckgradient	[mbar/mm]
$e(t)$	Regelabweichung	[-]
g	Gravitationskonstante	[m/s ²]
H_i	Höhe der Messstelle i	[m]
H_j	berechnete Höhe	[m]
I	Stromstärke	[A]
i	Gaskomponente i	[-]
K_p	Verstärkung	[-]

K_v	Durchflusskoeffizient	[–]
L_1	Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Einlauf $\frac{l_1}{D}$	[–]
l_1	Abstand der Druckentnahme im Einlauf	[m]
L'_2	Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Auslauf $\frac{l'_2}{D}$	[–]
M_i	molare Masse Einzelkomponente	[g/mol]
M'_2	Faktor $\left(\frac{2L'_2}{1-\beta}\right)$	[–]
N	Anzahl der Gaskomponenten	[–]
P	Leistung	[W]
$p(H_i)$	Druck der Messstelle bei der Höhe i	[mbar]
p_1	Druck vor Druckmessblende	[bar]
p_2	Druck nach Druckmessblende	[bar]
$P_{\ddot{u}}$	Überdruck	[bar]
P_{abs}	Absolutdruck	[bar]
P_{ath}	Athmosphärendruck	[bar]
P_{G1}	Druck im Fuelreaktor	[mbar]
P_{Last}	Leistung	[W]
Q_0	Anzahlsummenverteilung	[–]
Q_3	Volumen-/Massensummenverteilung	[–]
R	universelle Gaskonstante	[J/molK]
R_{Last}	Lastwiderstand	[Ω]
Re_D	Reynoldszahl bezogen auf Rohrrinnendurchmesser	[–]
T	Temperatur	[K]
T_1	Temperatur am Messpunkt	[$^{\circ}$ C]
T_1, T_2	Temperaturen	[K]
T_n	Nachstellzeit	[–]
T_v	Vorhaltezeit	[–]
$T_{Gasifizier}$	Temperatur im Fuelreaktor	[$^{\circ}$ C]
T_{ref}	Referenztemperatur	[$^{\circ}$ C]
T_{Riser}	Temperatur im Airreaktor	[$^{\circ}$ C]
U	Spannung	[V]
$u(t)$	Stellgröße	[–]
U_T	Thermospannung	[V]
$w(t)$	Führungsgröße	[–]
x_i	Gewichtsfraction der i -ten Siebklasse	[–]
x_i	Stoffmengenanteil Gaskomponente i	[mol/mol]
$y(t)$	Regelgröße	[–]
z	Realgasfaktor	[–]
$z(t)$	Störgröße	[–]

Anhang

Anhangsverzeichnis

A	Normen, Richtlinien, Empfehlungen	121
B	Ergänzende Dokumentation zur Implementierung der MSRT	123
B.1	Regelungs- & Prozessschaubilder	124
B.2	Messtechnik	138
B.2.1	Verbaute SPS-Module	138
B.2.2	MSR-Bezeichnungen in der MSR-Liste	139
B.2.3	IO-Belegung in der MSR-Liste	141
B.2.4	Höhenkoten und Messbereiche der Druckmessungen	147
B.2.5	Datenblätter der Druckmessblenden	149
B.3	Prozessleittechnik	158
B.3.1	Entwicklung der PLT	158
B.3.2	MSR-Pläne aus APROL	159
C	Stoffdaten der Gaskomponenten	177
C.1	M -Molmasse	177
C.2	ρ Dichte	177
C.3	η Dynamische Viskosität	177
C.4	c_p spez. isobare Wärmekapazität	178
D	Weiterführende Dokumentation zur Kalteinbetriebnahme	179
D.1	Bettmaterial für Kaltversuch	179

Anhang A

Normen, Richtlinien, Empfehlungen

DIN 1319	Grundlagen der Messtechnik
DIN EN 837-2	Druckmessgeräte - Teil 2: Auswahl- und Einbauempfehlungen für Druckmessgeräte
DIN EN ISO 10628	Fließschemata für verfahrenstechnische Anlagen - Allgemeine Regeln
DIN 19227-2	Leittechnik; Graphische Symbole und Kennbuchstaben für die Prozessleittechnik
DIN EN ISO 5167-2	Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 2: Blenden
DIN EN 60027-6	Formelzeichen für die Elektrotechnik - Teil 6: Steuerungs- und Regelungstechnik
DIN IEC 60050-351	Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik
DIN EN 60584-1	Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen
DIN EN 60617	Graphische Symbole für Schaltpläne
DIN EN 60812	Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)
DIN EN 61082-1	Dokumente der Elektrotechnik - Teil 1: Regeln
DIN EN 61131-3	Grundlagen Speicherprogrammierbarer Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen
DIN EN 61158	Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse
DIN EN 61355-1	Klassifikation und Kennzeichnung von Dokumenten für Anlagen, Systeme und Ausrüstungen - Teil 1: Regeln und Tabellen zur Klassifikation

DIN EN 61508	Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme
DIN EN 61511	Funktionale Sicherheit - Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie
DIN EN 62424	Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik
DIN EN 82045	Dokumentenmanagement
IEC 62264	Integration von Unternehmens-EDV und Leitsystemen
BGBI I 55/2009	Gesamte Rechtsvorschrift für Bundes-Umwelthaftungsgesetz
BGBI II 354/2002	Gesamte Rechtsvorschrift für Industrieunfallverordnung
VDI/VDE 2041	Durchflussmessung mit Drosselgeräten; Blenden und Düsen für besondere Anwendungen
VDI/VDE 2173	Strömungstechnische Kenngrößen von Stellventilen und deren Bestimmung
VDI/VDE 2180	Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik (PLT)
VDI/VDE 2650	Anforderungen an Selbstüberwachung und Diagnose in der Feldinstrumentierung
VDI/VDE 3694	Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen
Richtlinie 97/23/EG	Druckgeräte-Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates v. 29.05.1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Druckgeräte
Richtlinie 2009/28/EG	Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Erneuerbarer Energie
CEN/TS 15439	Biomassevergasung - Teer und Staub in Produktgasen - Probenahme und analytische Bestimmung
NAMUR NA035	Abwicklung von PLT-Projekten
NAMUR NA062	PLT-Konzept
NAMUR NA076	NAMUR-Checkliste für Messwarten und Leitstände

Anhang B

Ergänzende Dokumentation zur Implementierung der MSRT

B.1 Regelungs- & Prozessschaubilder

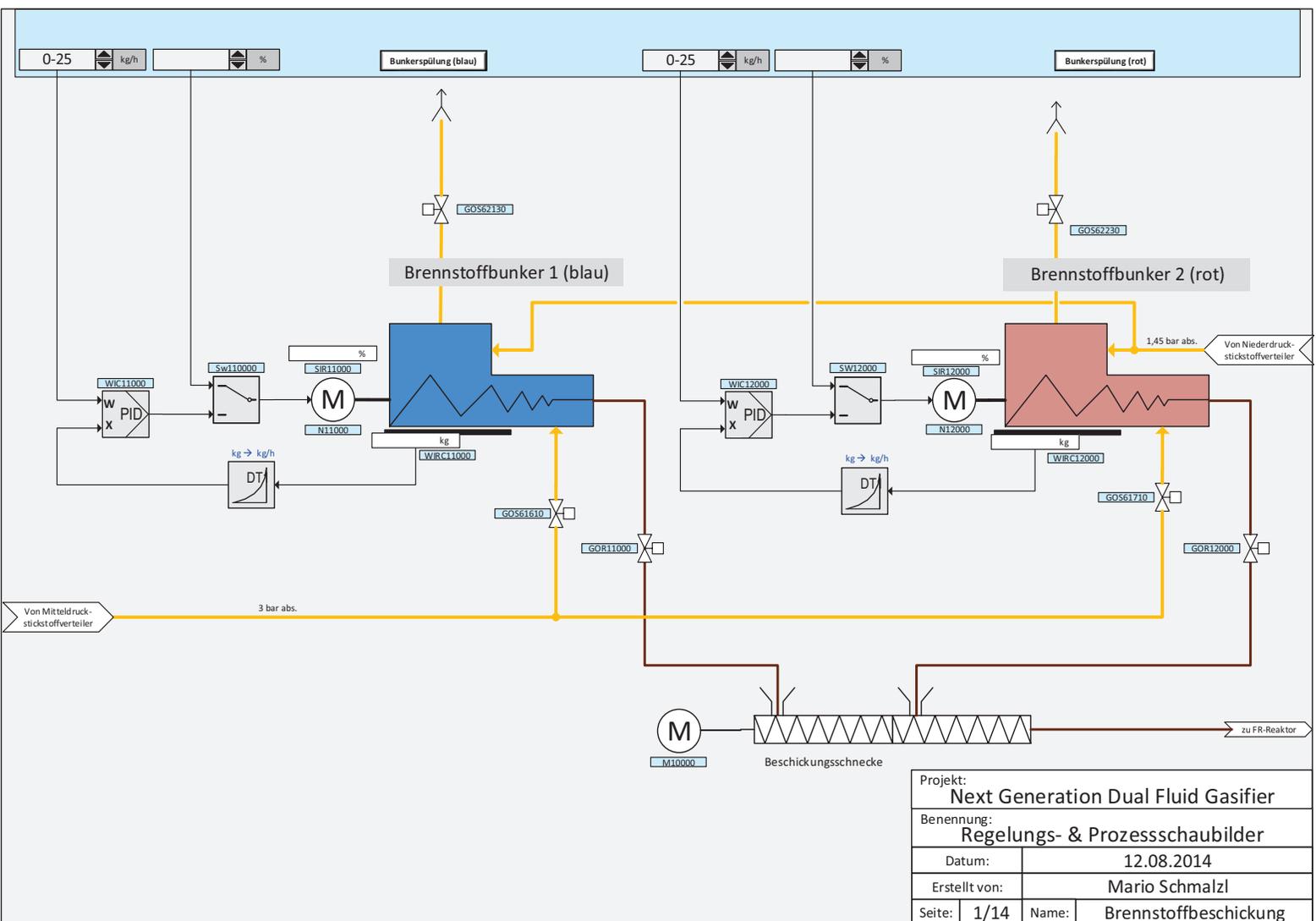


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 1/14

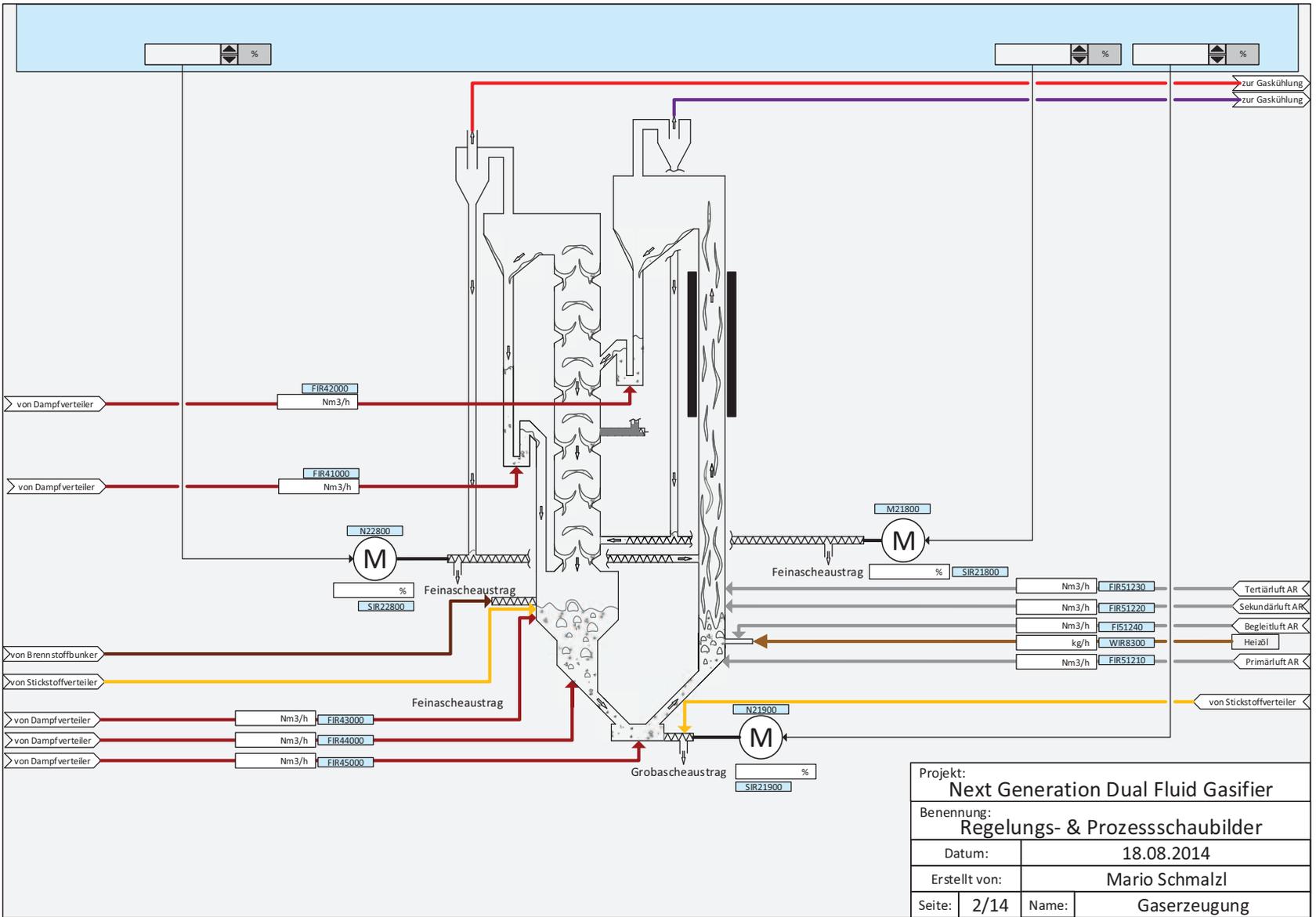


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 2/14

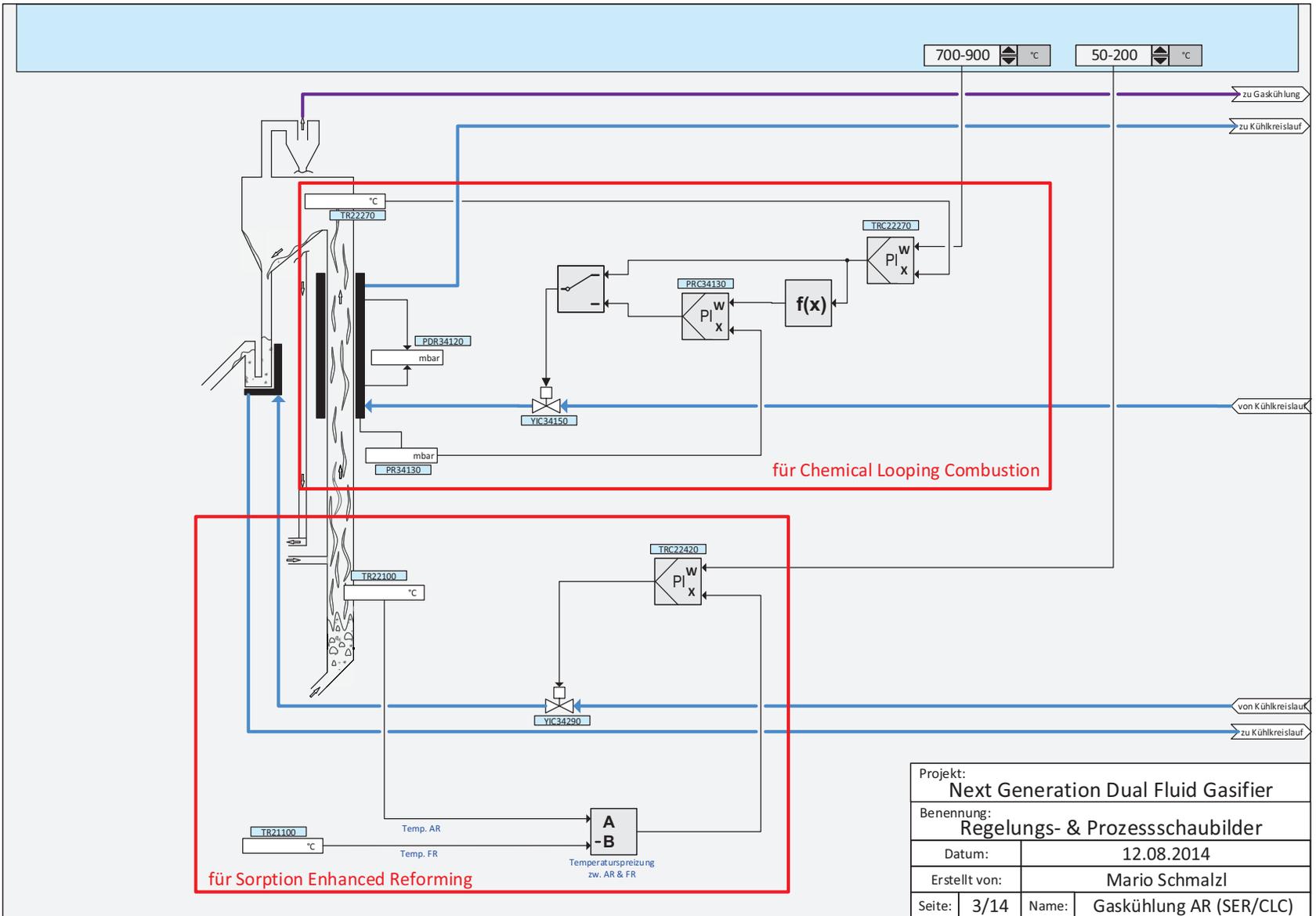


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 3/14

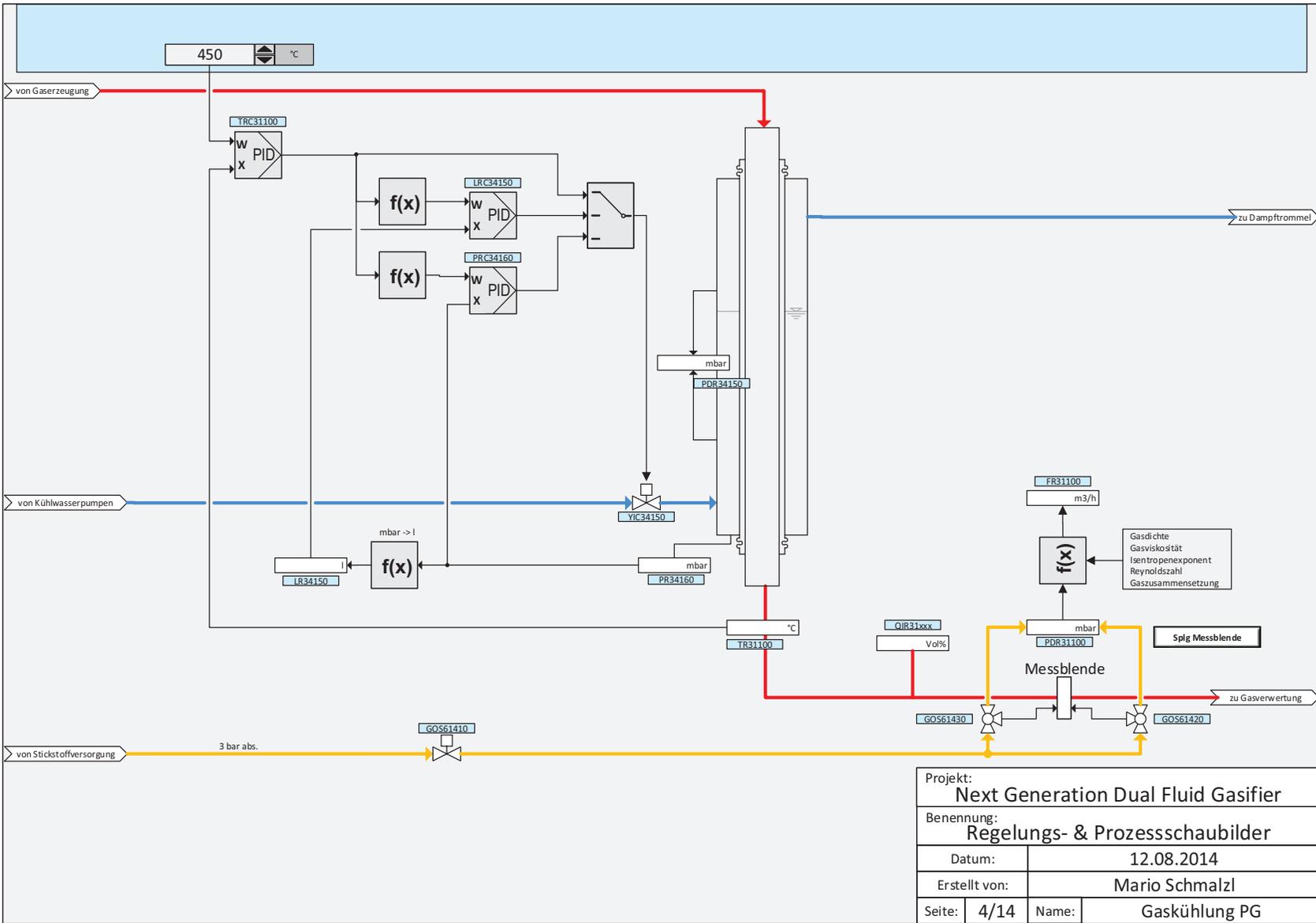


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 4/14

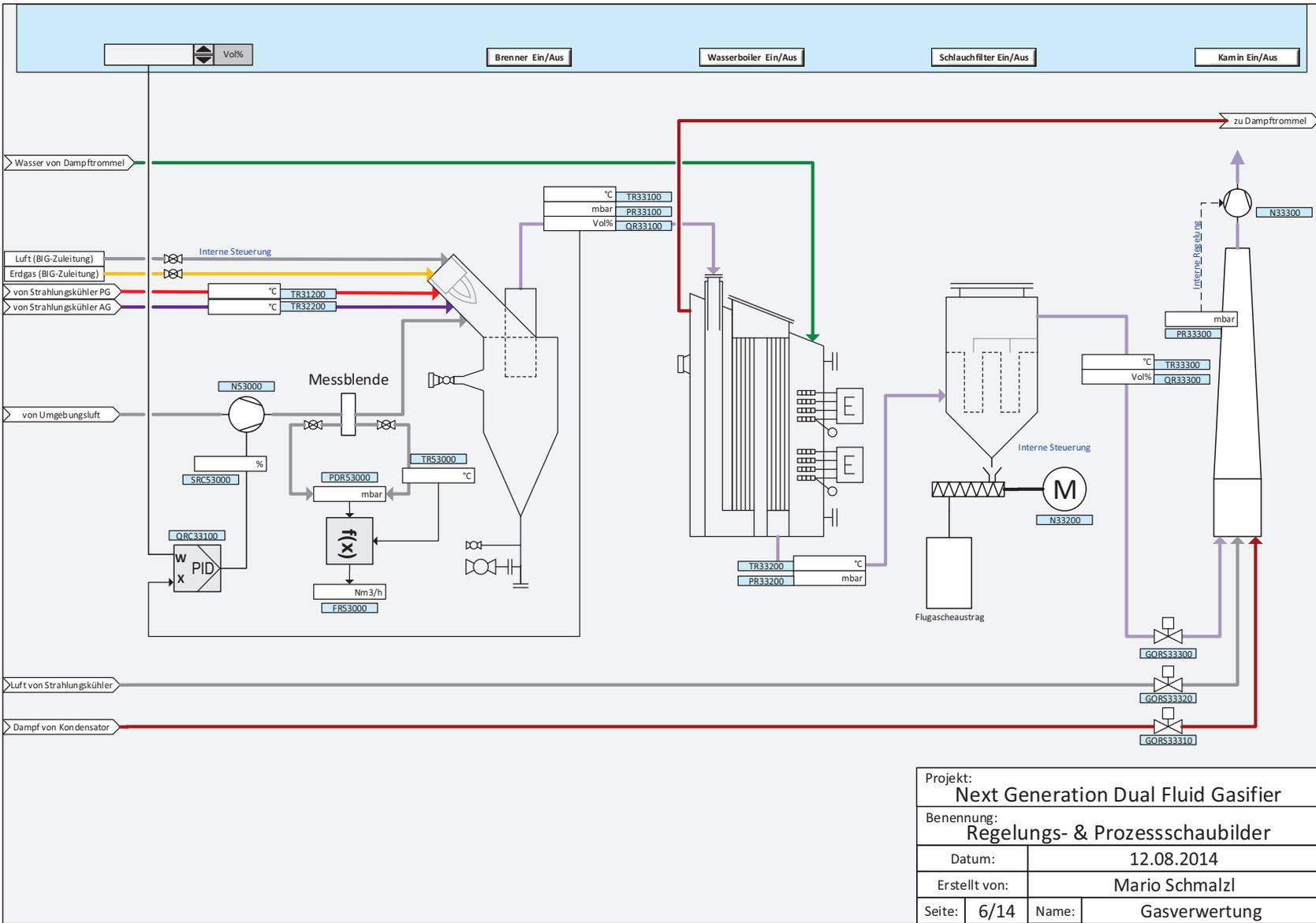


Abb. B.1.: Regelungs- und Prozessschaubilder 6/14

Projekt:		Next Generation Dual Fluid Gasifier	
Benennung:		Regelungs- & Prozessschaubilder	
Datum:	12.08.2014		
Erstellt von:	Mario Schmalzl		
Seite:	6/14	Name:	Gasverwertung

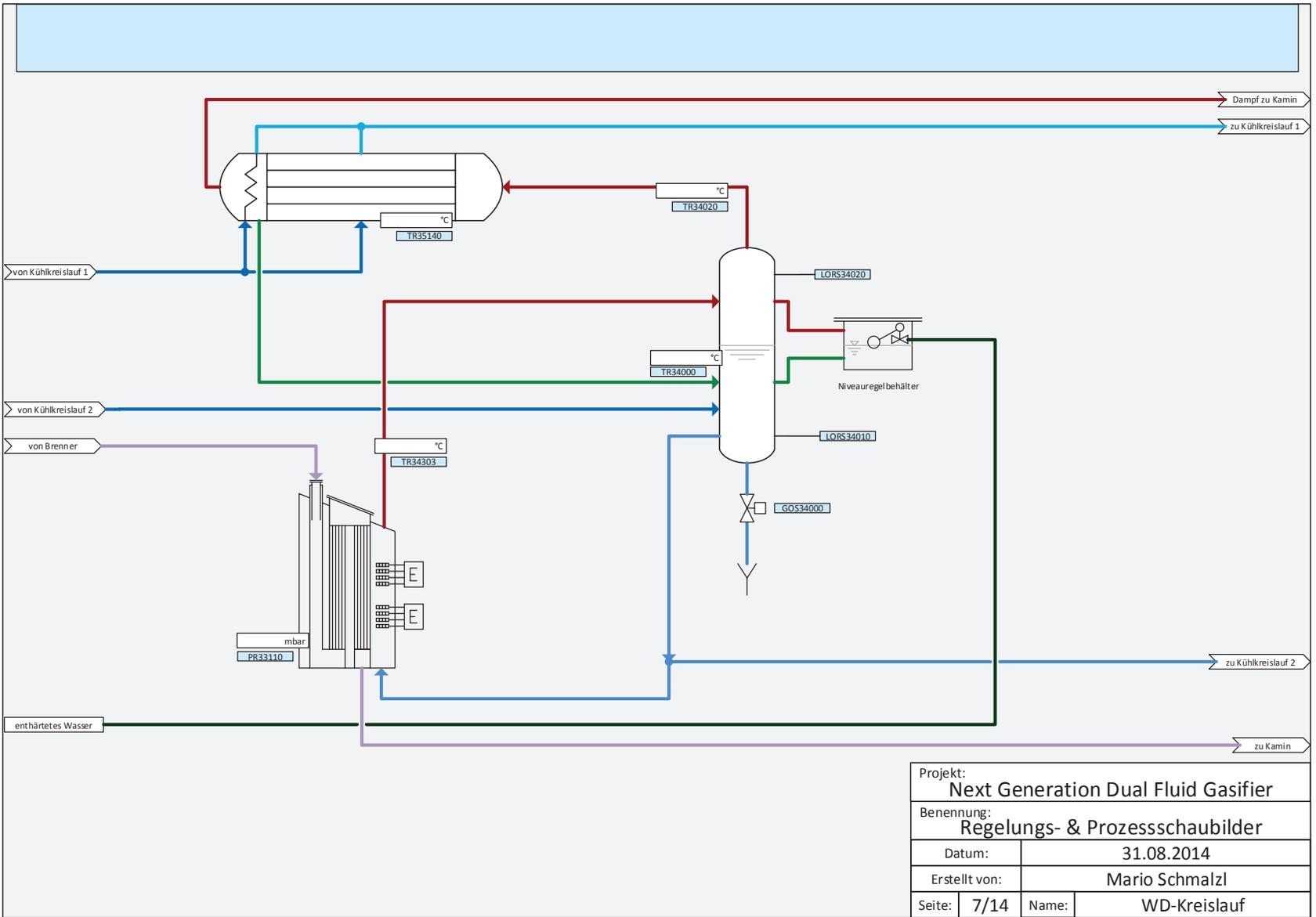


Abb. B.1.: Regelungs- und Prozessschaubilder 7/14

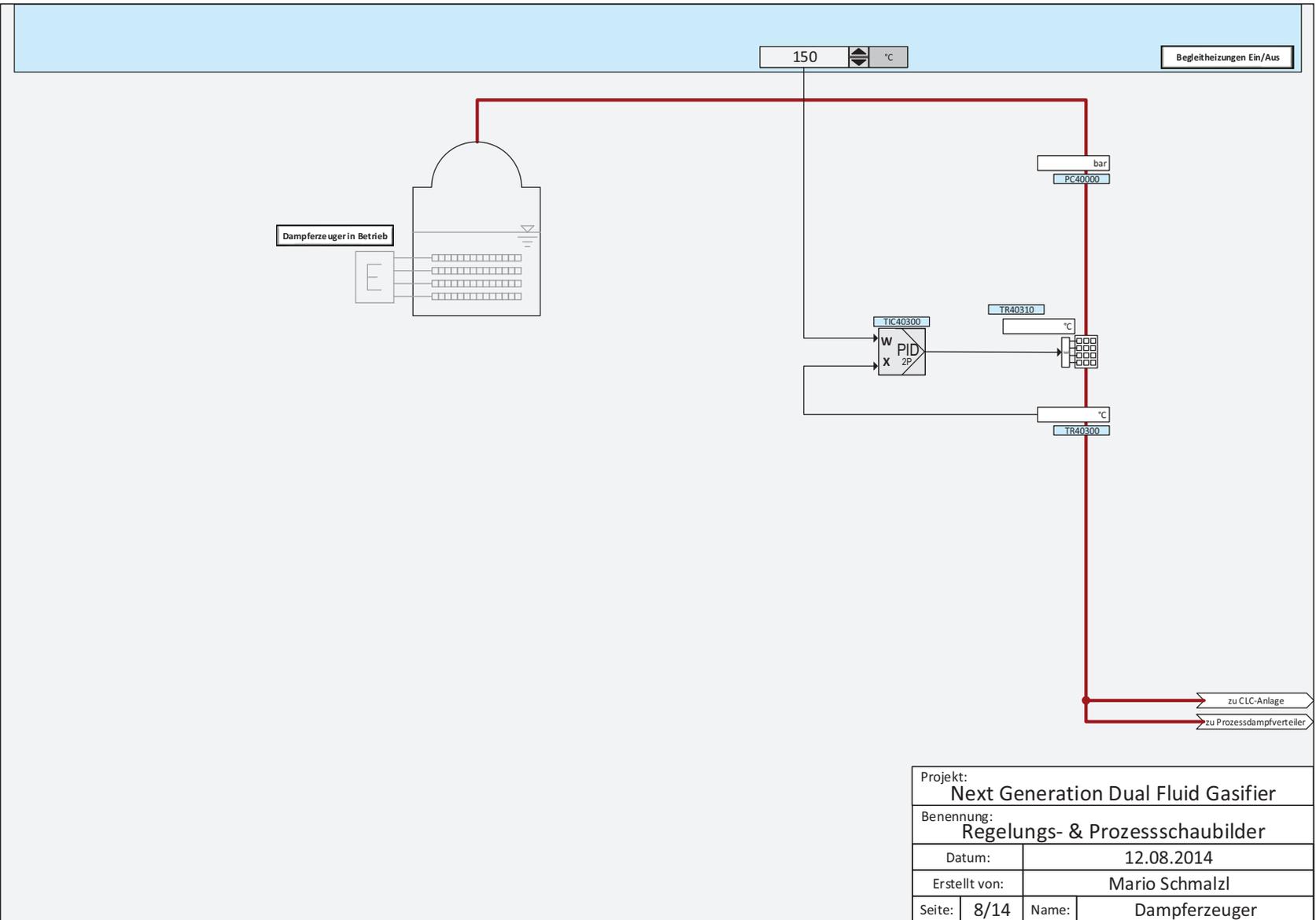


Abb. B.1.: Regelungs- und Prozessschaubilder 8/14

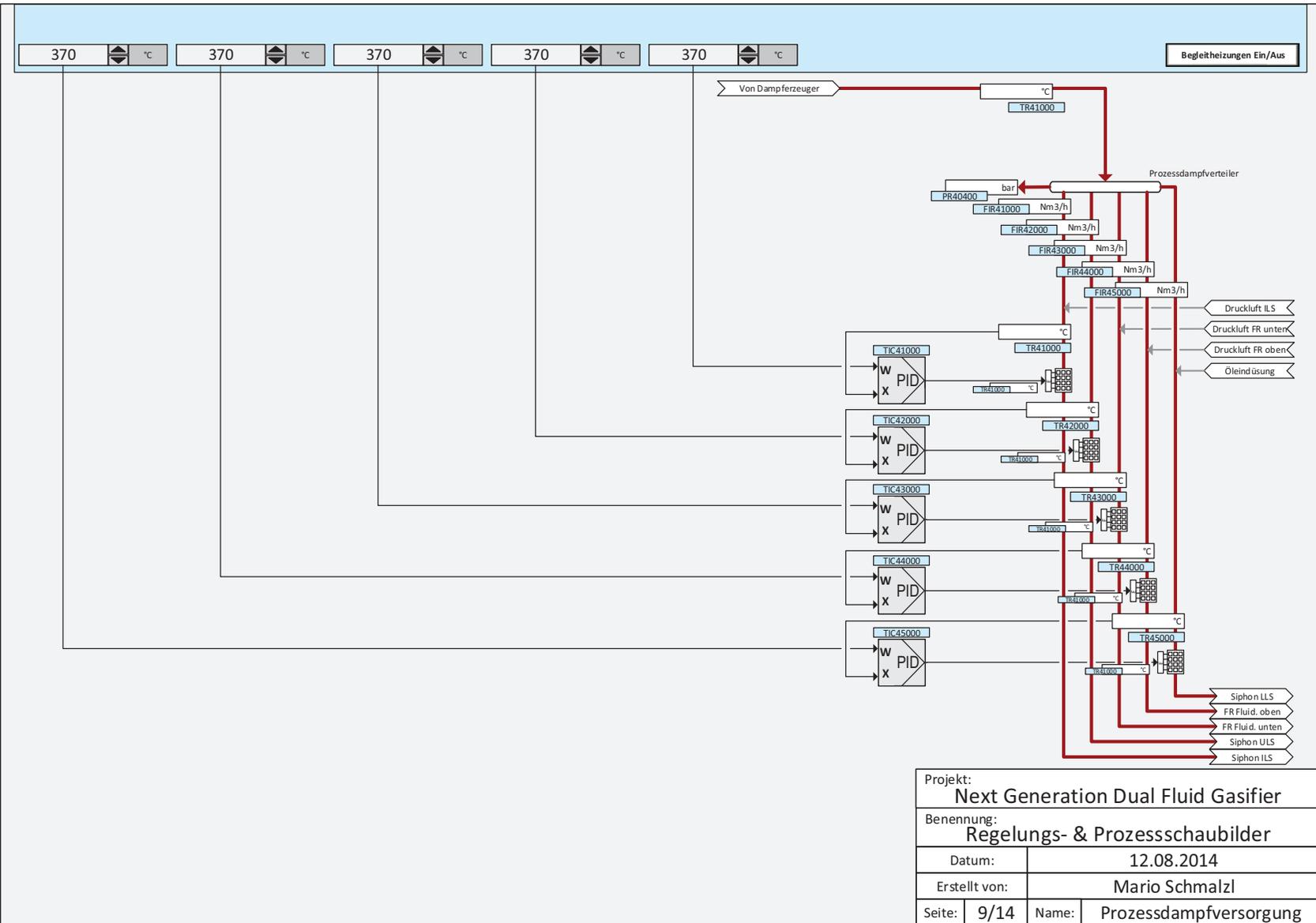


Abb. B.1.: Regelungs- und Prozessschaubilder 9/14

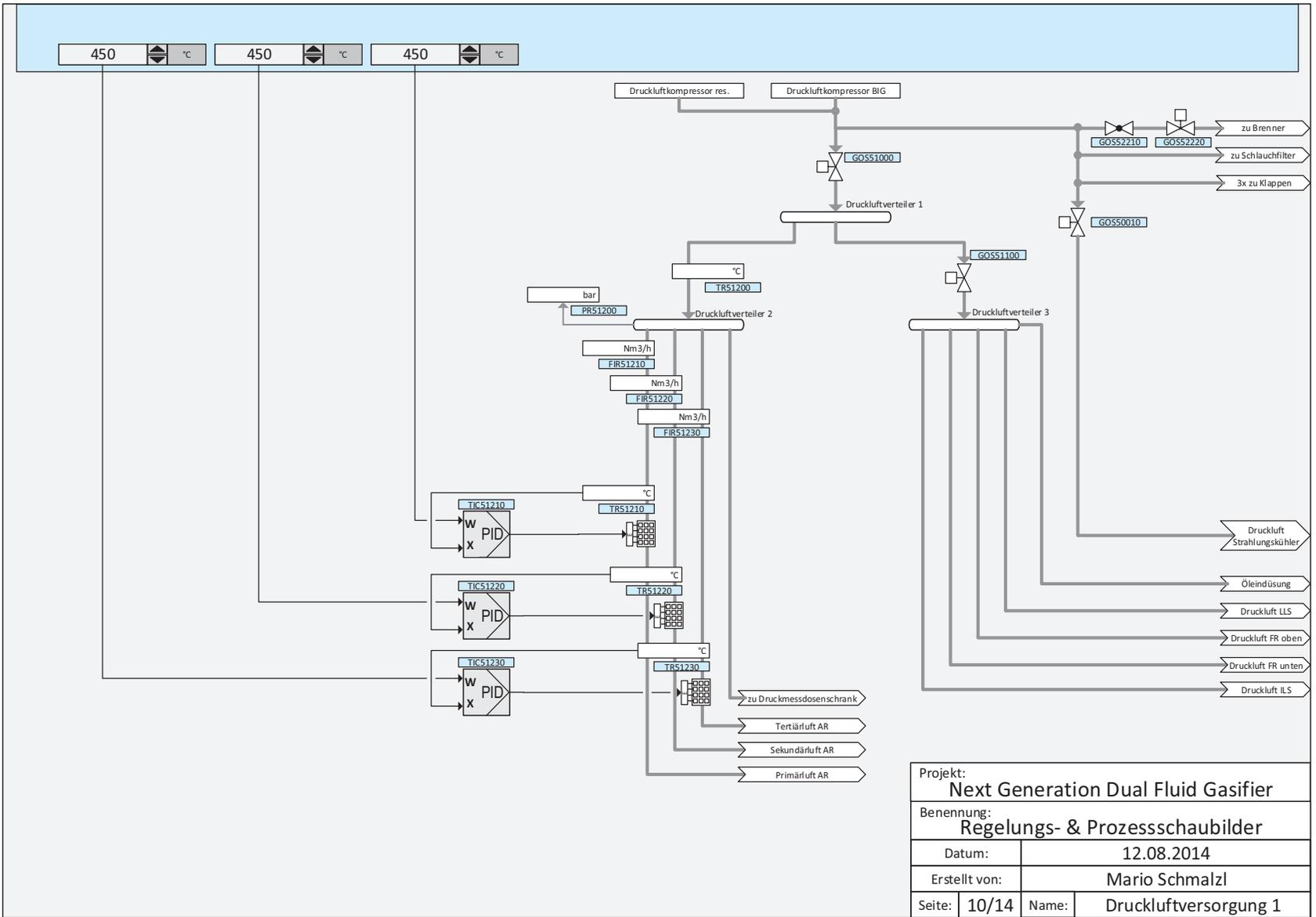


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 10/14

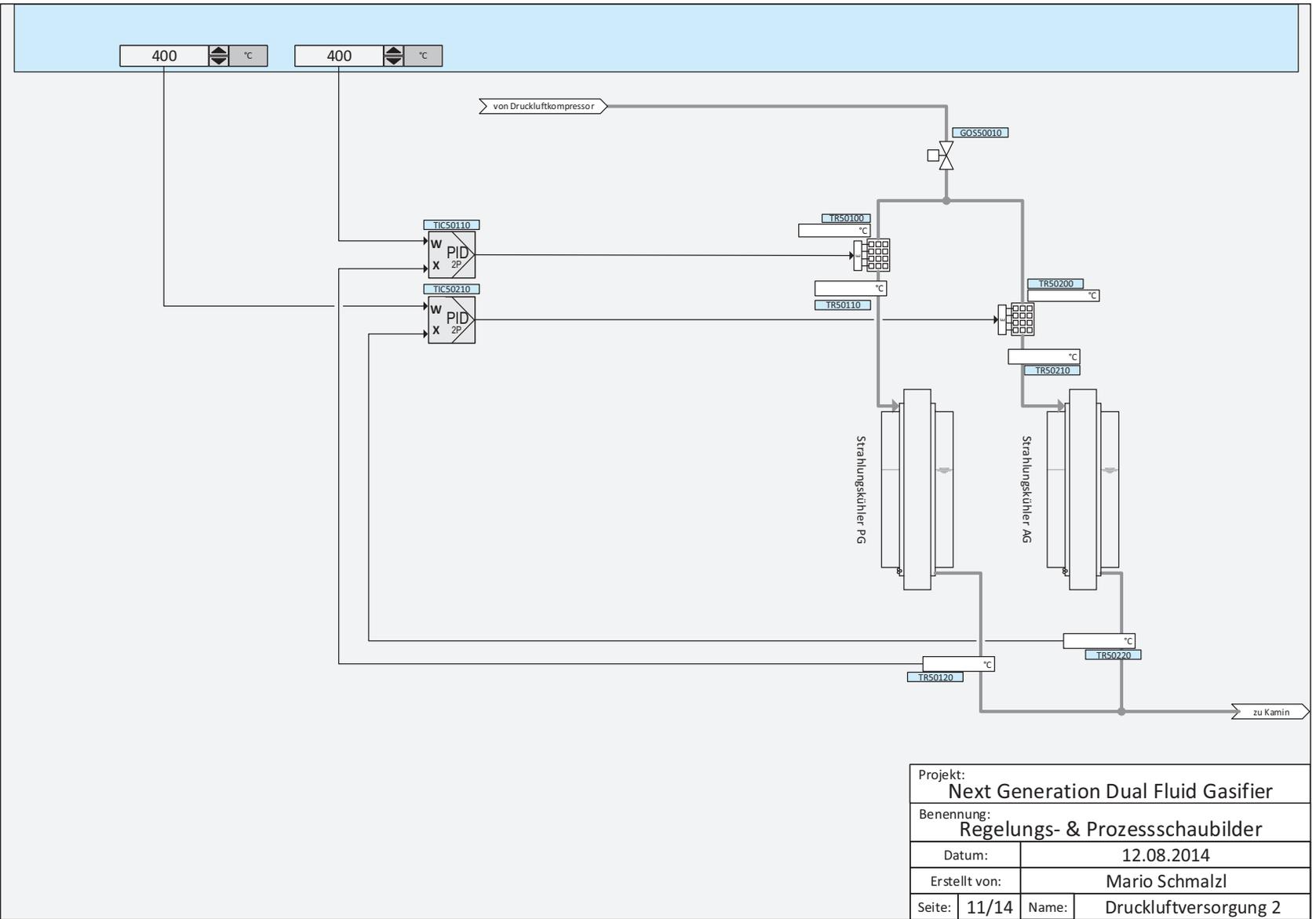


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 11/14

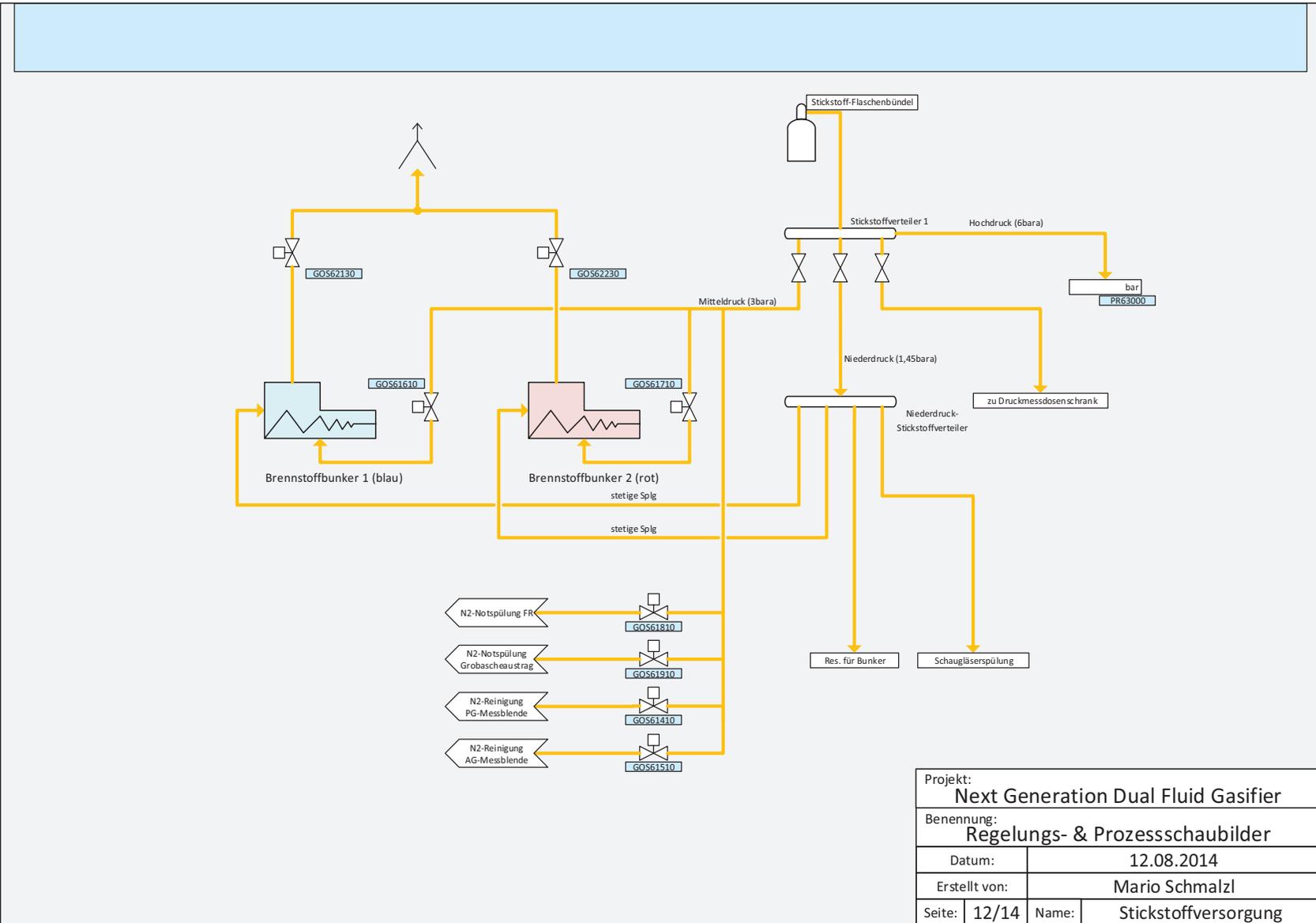


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 12/14

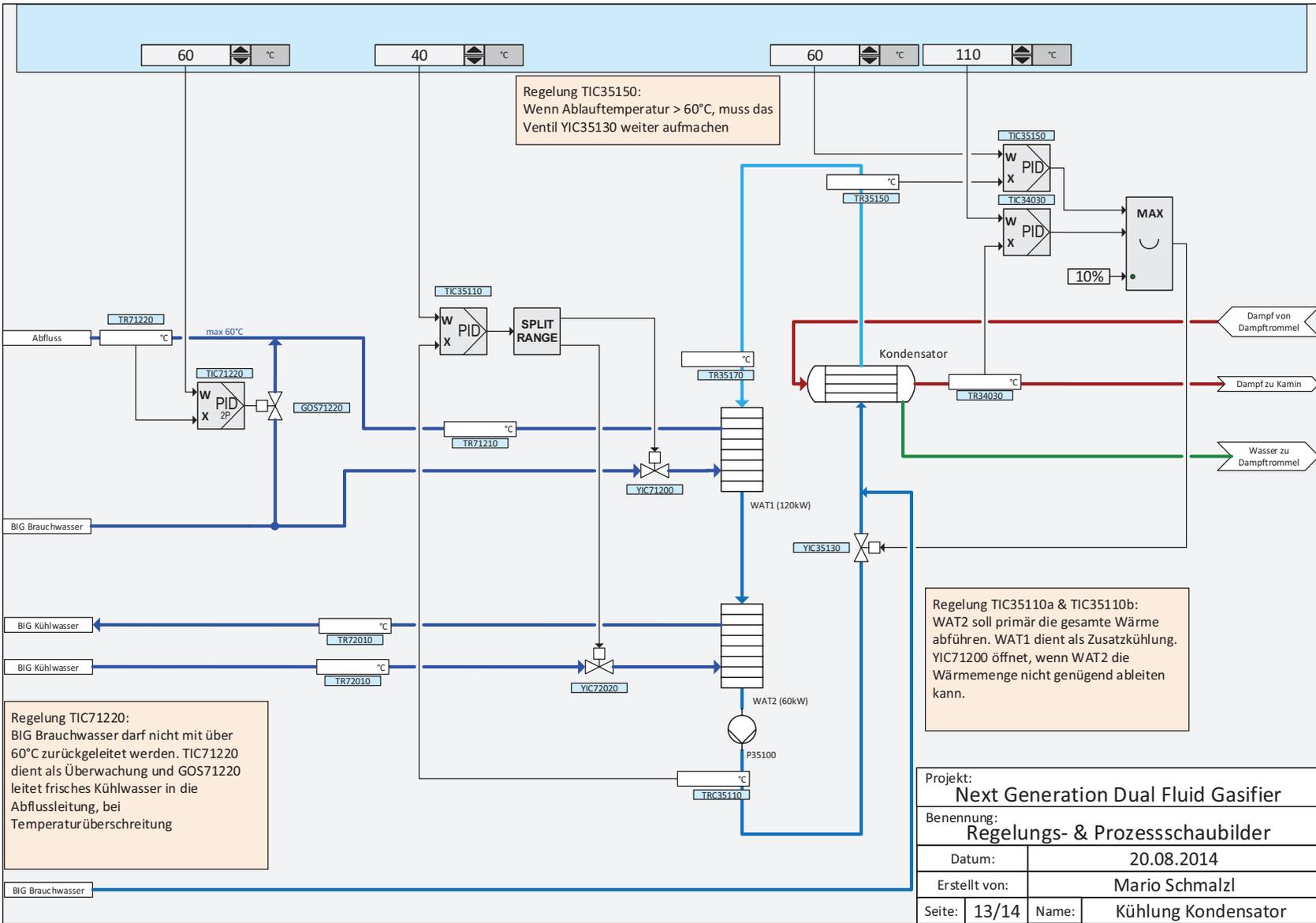


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 13/14

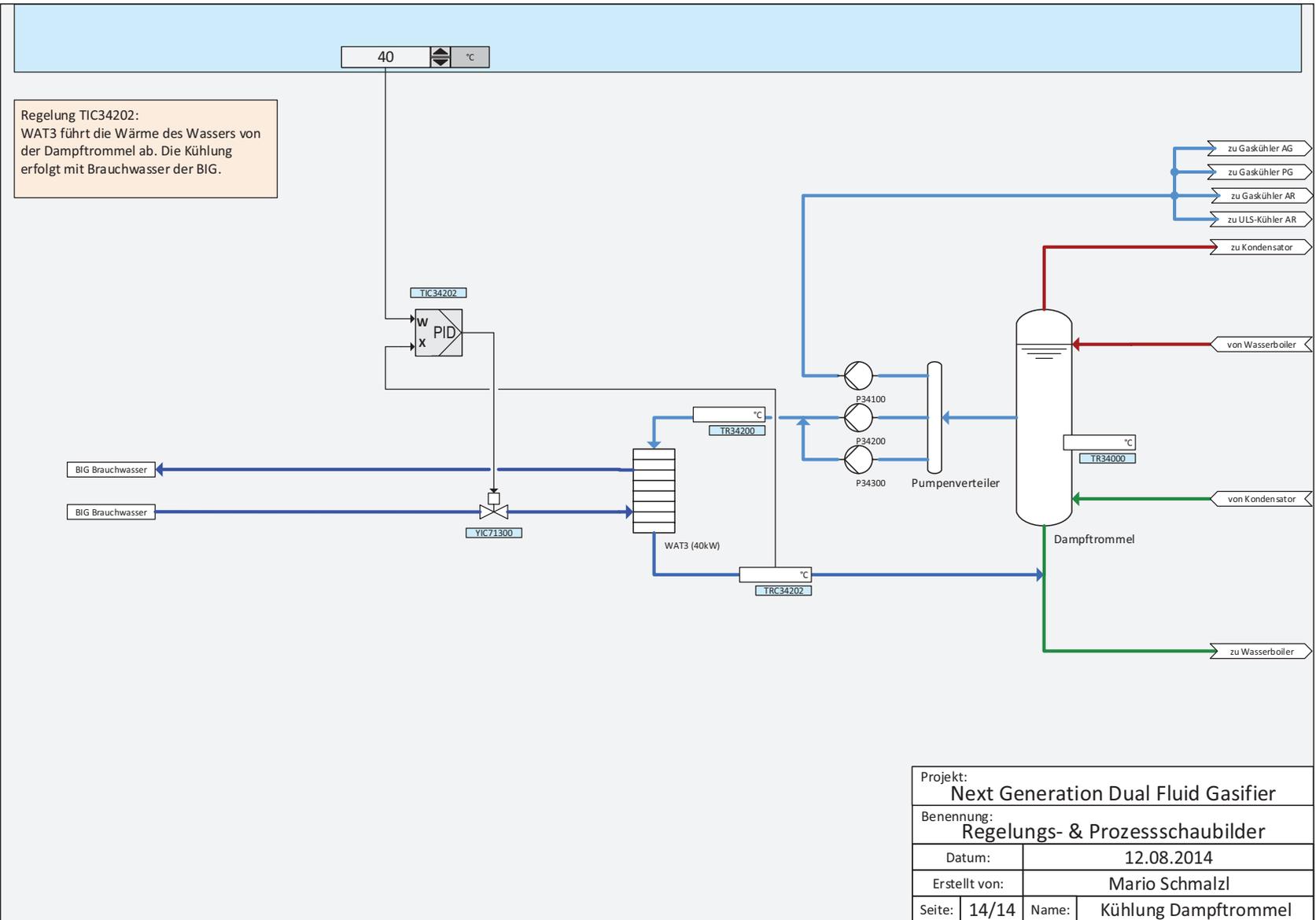


Abb. B.1: Regelungs- und Prozessschaubilder 14/14

B.2 Messtechnik

B.2.1 Verbaute SPS-Module

In Tab. B.1 sind alle verbauten Module (CPU, Versorgungsmodule, Ein- und Ausgabebaugruppen) je nach Rackzuordnung aufgelistet. Zusätzlich ist der Modultyp angegeben. Dokumentationen zum jeweiligen Hardwaretyp stehen auf der Website <http://www.br-automation.com> zum Download bereit.

Tab. B.1: Verbaute SPS-Module

Hauptschaltschrank		
Rack 1		
1x CPU	CP1586	
3x Digitale Eingänge	DI9371	
5x Digitale Ausgänge	DO9322	
1x Digitaler Ausgang	DO8332	
3x Analoge Eingänge	AI8321	
1x Analoger Eingang	AI4622	
6x Analoge Ausgänge	AO4622	
2x Analoge Eingänge	AI8321	
Rack 2		
1x Erweiterungskarte	BC0083	
1x Einspeisemodul	PS9400	
17x Temperaturmodule	AT6402	
Druckmessdosenschrank		
Rack 3		
1x Erweiterungskarte	BC0083	
1x Einspeisemodul	PS9400	
10x Analoge Eingänge	AI8321	

B.2.2 MSR-Bezeichnungen in der MSR-Liste

Tab. B.2: MSR-Buchstabenzuordnung

Beschreibung	Kürzel
Erstbuchstabe	
Durchfluss	F
Schaltventil	G
Füllstand	L
Motor	M
Druck	P
Konzentration	Q
Drehzahl	S
Temperatur	T
Gewicht	W
Ventil	Y
Folgebuchstabe	
Regelungsgröße	C
Differenz	D
Analoganzeige	I
Sichtzeichen	O
Registrierung	R
Binäre Steuerungsfunktion	S
Sonstiges	
Equipment	EQ

Tab. B.3: MSR-Nummernzuordnung

Bereich	Ziffer
Brennstoffbeschickung	1xxxx
Brennstoffbunker 1	11xxx
Brennstoffbunker 2	12xxx
Gaserzeugung, Wirbelschichtreaktorsystem	2xxxx
FR-Reaktor	21xxx
AR-Reaktor	22xxx
Gasverwertung, -kühlung, -reinigung	3xxxx
Strahlungskühler Produktgas	31xxx
Strahlungskühler Abgas	32xxx
Brennkammer, Schlauchfilter, Kamin	33xxx
Dampftrommel, Wasserkreislauf	34xxx
Kondensator Wasserkreislauf	35xxx
Wasserdampfversorgung	4xxxx
Speisewasserpumpe	40xxx
Prozessdampf ILS	41xxx
Prozessdampf FR-Reaktor oben	42xxx
Prozessdampf FR-Reaktor unten	43xxx
Prozessdampf ULS	44xxx
Prozessdampf LLS	45xxx
Druckluftversorgung	5xxxx
Druckluft zu Strahlungskühler	50xxx
Druckluft zu Reaktoren	51xxx
Druckluft zu Brennkammer + Schlauchfilter	52xxx
Stickstoffversorgung	6xxxx
Stickstoff zu Verteiler	60xxx
Stickstoff Mitteldruck	61xxx
Stickstoff Niederdruck	62xxx
Kühlwasserversorgung	7xxxx
Kühlwasser WAT1, WAT2 (Primärseite)	71xxx
Kühlwasser WAT3 (Primärseite)	72xxx
Versorgungsleitungen	8xxxx
Erdgasversorgung	81xxx
Wasser zu Dampftrommel	82xxx
Ölversorgung	83xxx

B.2.3 IO-Belegung in der MSR-Liste

Im Weiteren sind alle an das PLS angebundnen Messstellen und Aktoren tabellarisch aufgelistet (MBA=Messbereichsanfang, MBE=Messbereichsende).

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 1 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
N10000	Motor Stopfschnecke Brennstoffbeschickung AR				ABB FU	-	-	-	1	4	7
GOR11000	Klappe Brennstoff 1 zu Beschickungsschnecke					1	1	3(offen);4 (gesch)	-	-	-
N11000	Dosierschnecke Brennstoffbunker 1				ABB FU	-	-	-	1	4	9
S1R11000	Drehzahl Schnecke Brennstoffbunker 1	%	0	100	ABB FU	1	12	1	1	14	2
W1RC11000	Gewicht Brennstoff Bunker 1	kg	0	4000	Bosche Waagezelle	1	10	2	-	-	-
GOR12000	Klappe Brennstoff 2 zu Beschickungsschnecke					1	1	1(offen);2 (gesch)	-	-	-
N12000	Schnecke Brennstoffbunker 2				ABB FU	-	-	-	1	4	8
S1R12000	Drehzahl Schnecke Brennstoffbunker 2	%	0	100	ABB FU	1	12	2	1	14	1
W1RC12000	Gewicht Brennstoff Bunker 2	kg	0	4000	Bosche Waagezelle	1	10	1	-	-	-
J21000	Begleitheizung FR + Zyklon					-	-	-	1	7	11
J21050	Begleitheizung Feinascheustrag nach FR-Zyklon					-	-	-	1	9	1
PR21200	Druck 1 Gas FR	mbar	0	250	Kalinsky	3	2	1	-	-	-
TR21200	Temp 1 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	1	-	-	-
PR21210	Druck 2a Gas FR	mbar	0	250	Kalinsky	3	2	0	-	-	-
TR21210	Temp 2a Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	2	-	-	-
PR21211	Druck 2b Gas FR	mbar	0	250	Kalinsky	3	2	3	-	-	-
TR21211	Temp 2b Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	3	-	-	-
PR21220	Druck 3 Gas FR	mbar	0	250	Kalinsky	3	2	4	-	-	-
TR21220	Temp 3 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	4	-	-	-
PR21230	Druck 4 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	2	5	-	-	-
TR21230	Temp 4 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	5	-	-	-
PR21240	Druck 5 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	2	6	-	-	-
TR21240	Temp 5 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	2	6	-	-	-
PR21250	Druck 6 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	2	7	-	-	-
TR21250	Temp 6 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	1	-	-	-
PR21260	Druck 7 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	2	8	-	-	-
TR21260	Temp 7 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	2	-	-	-
PR21270	Druck 8 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	1	-	-	-
TR21270	Temp 8 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	3	-	-	-
PR21280	Druck 9 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	2	-	-	-
TR21280	Temp 9 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	4	-	-	-
PR21290	Druck 10 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	3	-	-	-
TR21290	Temp 10 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	5	-	-	-
PR21300	Druck 11 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	4	-	-	-
TR21300	Temp 11 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	3	6	-	-	-
PR21310	Druck 12 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	5	-	-	-
TR21310	Temp 12 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	1	-	-	-
PR21320	Druck 13 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	6	-	-	-
TR21320	Temp 13 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	2	-	-	-
PR21330	Druck 14 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	7	-	-	-
TR21330	Temp 14 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	3	-	-	-
PR21340	Druck 15 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	3	8	-	-	-
TR21340	Temp 15 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	4	-	-	-
PR21350	Druck 16 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	4	1	-	-	-
TR21350	Temp 16 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	5	-	-	-
PR21360	Druck 17 Gas FR	mbar	0	100	Kalinsky	3	4	2	-	-	-
TR21360	Temp 17 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	4	6	-	-	-
PR21370	Druck 18 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	3	-	-	-
TR21370	Temp 18 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	1	-	-	-
PR21380	Druck 19 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	4	-	-	-

Tab. B.4: MSR-Liste 1/6

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 2 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
TR21380	Temp 19 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	2	-	-	-
PR21390	Druck 20 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	5	-	-	-
TR21390	Temp 20 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	3	-	-	-
PR21400	Druck 21 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	6	-	-	-
TR21400	Temp 22 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	4	-	-	-
PR21410	Druck 22 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	7	-	-	-
TR21410	Temp 23 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	5	-	-	-
PR21420	Druck 23 Gas FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	4	8	-	-	-
TR21420	Temp 24 Gas FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	5	6	-	-	-
PR21430	Druck Bettmaterial vor ULS	mbar	0	100	Kalinsky	3	5	1	-	-	-
TR21430	Temp Bettmaterial vor ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	3	-	-	-
PR21440	Druck Bettmaterial nach ULS	mbar	0	100	Kalinsky	3	5	2	-	-	-
TR21440	Temp Bettmaterial nach ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	4	-	-	-
PR21500	Druck Produktgas nach Grobabscheider FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	8	3	-	-	-
TR21500	Temp Produktgas nach Grobabscheider FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	6	-	-	-
PDR21600	Differenzdruck Umlaufmessung Bettmaterial FR	mbar	0	25	Kalinsky	3	5	3	-	-	-
TR21600	Temp 1 Bettmaterial nach Grobabscheider FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	3	-	-	-
PDR21610	Differenzdruck Umlaufmessung Bettmaterial FR	mbar	0	25	Kalinsky	3	5	4	-	-	-
TR21610	Temp 2 Bettmaterial nach Grobabscheider FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	4	-	-	-
TR21620	Temp 3 Bettmaterial nach Grobabscheider FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	5	-	-	-
PR21630	Druck Bettmaterial vor ILS	mbar	0	100	Kalinsky	3	5	5	-	-	-
TR21630	Temp Bettmaterial vor ILS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	1	-	-	-
PR21640	Druck Bettmaterial nach ILS	mbar	0	100	Kalinsky	3	5	6	-	-	-
TR21640	Temp Bettmaterial nach ILS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	9	2	-	-	-
N21800	Motor Schnecke Feinascheustrag nach Zyklon FR				ABB FU	-	-	-	1	4	10=LL;12=RL
PR21800	Druck 1 Feinasche nach Zyklon FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	9	1	-	-	-
SIR21800	Drehzahl Schnecke Feinascheustrag nach Zyklon FR	%	0	100	ABB FU	1	12	3	1	14	3
TR21800	Temp 1 Feinasche nach Zyklon FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	1	-	-	-
XRS21800	Probenahme Feinasche nach FR-Zyklon					1	2	4	-	-	-
PR21810	Druck 2 Feinasche nach Zyklon FR	mbar	0	50	Kalinsky	3	9	2	-	-	-
TR21810	Temp 2 Feinasche nach Zyklon FR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	2	-	-	-
N21900	Motor Schnecke Grobascheustrag LLS				ABB FU	-	-	-	1	5	6
PR21900	Druck Bettmaterial vor LLS	mbar	0	500	Kalinsky	3	5	7	-	-	-
SIR21900	Drehzahl Schnecke Grobascheustrag LLS	%	0	100	ABB FU	1	12	4	1	15	4
TR21900	Temp Bettmaterial vor LLS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	8	2	-	-	-
PR21910	Druck Bettmaterial nach LLS	mbar	0	500	Kalinsky	3	5	8	-	-	-
TR21910	Temp Bettmaterial nach LLS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	8	3	-	-	-
XRS21910	Probeentnahme Grobasche					1	1	7	-	-	-
J22000	Begleitheizung AR + Zyklon					-	-	-	1	7	12
J22050	Begleitheizung Feinascheustrag nach AR-Zyklon					-	-	-	1	9	1
PR22200	Druck 1 Gas AR	mbar	0	250	Kalinsky	3	6	1	-	-	-
TR22200	Temp 1 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	1	-	-	-
PR22210	Druck 2 Gas AR	mbar	0	250	Kalinsky	3	6	2	-	-	-
TRC22210	Temp 2 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	2	-	-	-
PR22220	Druck 3 Gas AR	mbar	0	250	Kalinsky	3	6	3	-	-	-
TR22220	Temp 3 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	3	-	-	-
PR22230	Druck 4 Gas AR	mbar	0	100	Kalinsky	3	6	4	-	-	-
TR22230	Temp 4 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	4	-	-	-
PR22240	Druck 5 Gas AR	mbar	0	100	Kalinsky	3	6	5	-	-	-
TR22240	Temp 5 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	5	-	-	-

Tab. B.4: MSR-Liste 2/6

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 3 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
PR22250	Druck 6 Gas AR	mbar	0	100	Kalinsky	3	6	6	-	-	-
TR22250	Temp 6 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	6	6	-	-	-
PR22260	Druck 7 Gas AR	mbar	0	50	Kalinsky	3	6	7	-	-	-
TR22260	Temp 7 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	1	-	-	-
PR22270	Druck 8 Gas AR	mbar	0	50	Kalinsky	3	6	8	-	-	-
TR22270	Temp 8 Gas AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	2	-	-	-
PR22300	Druck Abgas nach Grobabscheider AR	mbar	0	50	Kalinsky	3	8	5	-	-	-
TR22300	Temp Abgas nach Grobabscheider AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	3	-	-	-
PDR22400	Differenzdruck Umlaufmessung Bettmaterial AR/ULS	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	1	-	-	-
TR22400	Temp 1 Bettmaterial nach Grobabscheider AR/ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	5	-	-	-
PDR22410	Differenzdruck Umlaufmessung Bettmaterial AR/ULS	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	2	-	-	-
TR22410	Temp 2 Bettmaterial nach Grobabscheider AR/ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	7	6	-	-	-
TR22420	Temp 3 Bettmaterial nach Grobabscheider AR/ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	8	1	-	-	-
N22800	Motor Schnecke Feinascheastrag nach Zyklon AR				ABB FU	-	-	-	1	4;5	11=LL;1=RL
PR22800	Druck 1 Feinasche nach Zyklon AR	mbar	0	50	Kalinsky	3	8	7	-	-	-
SIR22800	Drehzahl Schnecke Feinascheastrag nach Zyklon AR	%	0	100	ABB FU	1	12	5	1	14	4
TR22800	Temp 1 Feinasche nach Zyklon AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	4	-	-	-
XRS22800	Probenahme Feinasche nach AR-Zyklon					1	1	8	-	-	-
PR22810	Druck 2 Feinasche nach Zyklon AR	mbar	0	50	Kalinsky	3	8	8	-	-	-
TR22810	Temp 2 Feinasche nach Zyklon AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	5	-	-	-
PR31000	Druck Produktgas vor Strahlungskühler	mbar	0	25	Kalinsky	3	8	4	-	-	-
TR31000	Temp vor Strahlungskühler Produktgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	10	6	-	-	-
FR31100	Durchfluss nach Strahlungskühler Produktgas	kg/h	0	50	Barthel Messblende	-	-	-	-	-	-
PDR31100	Differenzdruck nach Strahlungskühler Produktgas	mbar	0	25	Kalinsky	3	11	1	-	-	-
QIRC31100	Konzentration Produktgas H2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	20	1	-	-	-
TR31100	Temp nach Strahlungskühler Produktgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	1	-	-	-
QIRC31101	Konzentration Produktgas CO	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	20	2	-	-	-
QIRC31102	Konzentration Produktgas CO2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	20	3	-	-	-
QIRC31103	Konzentration Produktgas CH4	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	20	4	-	-	-
QIRC31104	Konzentration Produktgas O2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	20	5	-	-	-
QIRC31109	Wassergehalt Produktgas	Vol%	0	100	Barthel	1	10	4	-	-	-
PR31110	Druck nach Strahlungskühler Produktgas	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	3	-	-	-
PR31200	Druck PG vor Brennkammer	mbar	0	100	Kalinsky						
TR31200	Temp nach Differenzdruckmessblende Produktgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	1	-	-	-
PR32000	Druck Abgas vor Strahlungskühler	mbar	0	25	Kalinsky	3	8	6	-	-	-
TR32000	Temp vor Strahlungskühler Abgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	2	-	-	-
FR32100	Durchfluss nach Strahlungskühler Abgas	kg/h	0	100	Barthel Messblende	-	-	-	-	-	-
PDR32100	Differenzdruck nach Strahlungskühler Abgas	mbar	0	25	Kalinsky	3	11	2	-	-	-
QIRC32100	Konzentration Abgas O2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	21	1	-	-	-
TR32100	Temp nach Strahlungskühler Abgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	3	-	-	-
QIRC32101	Konzentration Abgas CO	ppm (Vol)	0	1000	Rosemount NGA2000	1	21	2	-	-	-
QIRC32102	Konzentration Abgas CO2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	1	21	3	-	-	-
QIRC32103	Konzentration Abgas NO	ppm (Vol)	0	1000	Rosemount NGA2000	1	21	4	-	-	-
QIRC32104	Konzentration Abgas SO2	ppm (Vol)	0	1000	Rosemount NGA2000	1	21	5	-	-	-
QIRC32105	Konzentration Abgas NO2	ppm (Vol)	0	1000	Rosemount NGA2000	1	21	6	-	-	-
QIRC32106	Konzentration Abgas N2O	ppm (Vol)	0	1000	Rosemount NGA2000	1	21	7	-	-	-
QIRC32107	Konzentration Abgas N2	Vol%	0	100	Rosemount NGA2000	-	-	-	-	-	-
PR32110	Druck nach Strahlungskühler Abgas	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	4	-	-	-
PR32200	Druck AG vor Brennkammer	mbar	0	250	Kalinsky						
TR32200	Temp nach Differenzdruckmessblende Abgas	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	2	-	-	-

Tab. B.4: MSR-Liste 3/6

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 4 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
TR33000	Temp Brennkammer Brenner	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	4	-	-	-
J33010	Begleitheizung Dampfleitung zu Kamin					-	-	-	1	9	2
TR33010	Temp Brennkammer Brennraum	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	5	-	-	-
J33100	Vorheizung Wasserboiler					-	-	-	1	7	8
PR33100	Druck vor Wasserboiler	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	5	-	-	-
QRC33100	Konzentration Abgas O2 nach Brennkammer	Vol%	0	100	Lambda-Sonde	1	10	5	-	-	-
TR33100	Temp Abgas nach Brennkammer	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	11	6	-	-	-
J33110	Vorheizung Wasserboiler					-	-	-	1	7	7
PR33110	Druck Wasserboiler	bar	0	1	Endress Hauser	3	10	1	-	-	-
N33200	Motor Schnecke Ascheustrag Filter					-	-	-	1	6	8
PR33200	Druck Abgas nach Wasserboiler	mbar	0	25	Kalinsky	3	7	6	-	-	-
TR33200	Temp Abgas nach Wasserboiler	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	5	-	-	-
XRS33200	Schlauchfilter ein				SEKO	1	1	9	-	-	-
PDR33210	Differenzdruck Schlauchfilter	mbar	0	500	SEKO	1	10	6	-	-	-
TR33220	Temp Abgas nach Filter	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	6	-	-	-
XRS33220	Auscheustrag Schlauchfilter					1	1	6	-	-	-
XRZ33220	Schlauchfilter Alarm aktiv				SEKO	1	2	3	-	-	-
GORS33300	Schaltklappe Abgas zu Kamin (nach Schlauchfilter)				AGS Stellantriebe	1	2	10(offen);9(gesch)	1	5	8
QIRC33300	Konzentration Abgas Kamin O2	Vol%	0	100	Oxynos 100	1	21	8	-	-	-
XRS33300	Kamin in Betrieb					1	2	7	-	-	-
QIRC33301	Konzentration Abgas Kamin CO	Vol%	0	100	Binos 1004	1	10	7	-	-	-
QIRC33302	Konzentration Abgas Kamin CO2	Vol%	0	100	Binos 1004	1	10	8	-	-	-
GORS33310	Schaltklappe Wasserdampf zu Kamin (nach Kondensator)				AGS Stellantriebe	1	2	12(offen);11 (gesch)	1	5	9
GORS33320	Schaltklappe Druckluft zu Kamin (nach Strahlungs-WAT)				AGS Stellantriebe	1	2	6(offen);5 (gesch)	1	5	7
GOS34000	Schaltventil Dampftrommel				Belimo	-	-	-	1	7	3(öff.);4(schl.)
J34000	Vorheizung Dampftrommel					-	-	-	1	7	6
LRC34000	Füllstand Dampftrommel	%	0	100	Krohne Optiswitch 4000C	-	-	-	-	-	-
TR34000	Temp Dampftrommel	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	1	-	-	-
LORS34010	Füllstand LL Dampftrommel				Krohne Optiswitch 4000C	1	1	12	-	-	-
LORS34020	Füllstand HL Dampftrommel				Krohne Optiswitch 4000C	1	1	11	-	-	-
TR34020	Temp Wasserdampf nach Dampftrommel	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	2	-	-	-
TR34030	Temp Wasserdampf nach Kondensator	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	6	-	-	-
N34100	Pumpe Kühlwasser zu Apparate				Grundfos	-	-	-	1	5	10
FRC34110	Durchfluss Kühlwasser zu WAT AR	l/min	1	12	Tacosetter Tronic	1	13	1	-	-	-
TR34110	Temp Kühlwasser zu WAT AR	°C	0	100	Tacosetter Tronic	1	13	2	-	-	-
LRC34120	Füllstand Kühlwasser WAT AR	%	0	100		-	-	-	-	-	-
PDR34120	Differenzdruck Kühlwasser WAT AR	mbar	0	250	Kalinsky	3	7	8	-	-	-
YIC34120	Regelventil Kühlwasser zu WAT AR	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	16	1
PR34130	Druck Kühlwasser WAT AR	mbar	0	400	Endress Hauser	3	10	2	-	-	-
TRC34130	Temp Kühlwasser nach WAT AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	12	5	-	-	-
LORS34150	Füllstand LL Strahlungskühler PG				Krohne Optiswitch 4000C	1	2	1	-	-	-
LRC34150	Füllstand Kühlwasser Strahlungskühler PG	%	0	100		-	-	-	-	-	-
PDR34150	Differenzdruck Kühlwasser Strahlungskühler PG	mbar	0	500	Kalinsky	3	8	1	-	-	-
YIC34150	Regelventil Kühlwasser zu Strahlungskühler PG	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	15	3
PR34160	Druck Kühlwasser Strahlungskühler PG	mbar	0	400	Endress Hauser	3	10	3	-	-	-
TRC34160	Temp Kühlwasser nach Strahlungskühler PG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	12	3	-	-	-
LORS34180	Füllstand LL Strahlungskühler AG				Krohne Optiswitch 4000C	1	2	2	-	-	-
LRC34180	Füllstand Kühlwasser Strahlungskühler AG	%	0	100		-	-	-	-	-	-
PDR34180	Differenzdruck Kühlwasser Strahlungskühler AG	mbar	0	500	Kalinsky	3	8	2	-	-	-
TRC34180	Temp Kühlwasser nach Strahlungskühler AG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	12	4	-	-	-

Tab. B.4: MSR-Liste 4/6

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 5 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
YIC34180	Regelventil Kühlwasser zu Strahlungskühler AG	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	15	2
PR34190	Druck Kühlwasser Strahlungskühler AG	mbar	0	400	Endress Hauser	3	10	4	-	-	-
N34200	Pumpe Kühlwasser zu WAT3				Grundfos	-	-	-	1	5	11
TRC34200	Temp Kühlwasser VOR WAT3	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	12	1	-	-	-
TRC34202	Temp Kühlwasser nach WAT3	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	12	2	-	-	-
FR34290	Durchfluss Kühlwasser ULS	l/min	1	12	Tacosegger Tronic	1	13	3	-	-	-
TR34290	Temp Kühlwasser vor ULS	°C	0	100	Tacosegger Tronic	1	13	4	-	-	-
YIC34290	Regelventil Kühlwasser ULS	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	15	1
N34300	Pumpe Kühlwasser zu WAT3 res.				Grundfos	-	-	-	1	5	12
N35100	Kühlwasserpumpe nach WAT2					-	-	-	1	6	5
TRC35110	Temp Kühlwasser nach WAT2 Nach Pumpe	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	3	-	-	-
YIC35130	Regelventil Kühlwasser vor Kondensator	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	19	1
TRC35150	Temp Kühlwasser nach Kondensator	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	13	4	-	-	-
TR35170	Temp Kühlwasser vor WAT1 (120KW)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	1	-	-	-
TR40300	Temp Prozessdampf	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	16	5	-	-	-
J40310	Heizung Dampf nach Dampferzeuger					-	-	-	1	7	5
TR40310	Temp. Heizpatrone Dampfleitung	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	16	4	-	-	-
PR40400	Druck Prozessdampfverteiler	bar	0	6	Endress Hauser	3	10	5	-	-	-
FIR41000	Durchfluss Dampf ILS	Nm3/h	0	1	Krohne H250	1	11	5	-	-	-
J41000	Heizung Dampf ILS	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	18	2
TRC41000	Temp Dampf ILS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	5	-	-	-
TR41100	Temp. Heizpatrone ILS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	16	3	-	-	-
FIR42000	Durchfluss Dampf ULS	Nm3/h	0	1,6	Krohne H250	1	11	3	-	-	-
J42000	Heizung Dampf ULS	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	18	1
TRC42000	Temp Dampf ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	5	-	-	-
TR42100	Temp. Heizpatrone ULS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	6	-	-	-
FIR43000	Durchfluss Dampf FR (unten)	Nm3/h	0	7,5	Krohne H250	1	11	2	-	-	-
J43000	Heizung Dampf FR unten	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	17	1
TRC43000	Temp Dampf FR (unten)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	4	-	-	-
TR43100	Temp Dampf FR (unten) bei Heizschale	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	19	1	-	-	-
FIR44000	Durchfluss Dampf FR (oben)	Nm3/h	0	2,4	Krohne H250	1	11	4	-	-	-
J44000	Heizung Dampf FR oben	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	18	3
TRC44000	Temp Dampf FR (oben)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	4	-	-	-
TR44100	Temp. Heizpatrone FR oben	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	16	2	-	-	-
FIR45000	Durchfluss Dampf LLS	Nm3/h	0	2,4	Krohne H250	1	11	1	-	-	-
J45000	Heizung Dampf LLS	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	18	4
TRC45000	Temp Dampf LLS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	3	-	-	-
J45100	Begleitheizung Dampleitungen					-	-	-	1	9	1
TR45100	Temp. Heizpatrone LLS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	16	1	-	-	-
GOS50010	Schaltventil Druckluft zu Strahlungskühler PG+AG				Belimo	-	-	-	1	7	1(öff.);2(schl.)
J50100	LUVO Strahlungskühler PG					-	-	-	1	7	9
TR50100	Temp Druckluft vor Strahlungskühler PG (Lufterhitzer)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	5	-	-	-
TR50110	Temp Druckluft vor Strahlungskühler PG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	1	-	-	-
TR50120	Temp Druckluft nach Strahlungskühler PG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	2	-	-	-
J50200	LUVO Strahlungskühler AG					-	-	-	1	7	10
TR50200	Temp Druckluft vor Strahlungskühler AG (Lufterhitzer)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	6	-	-	-
TR50210	Temp Druckluft vor Strahlungskühler AG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	3	-	-	-
TR50220	Temp Druckluft nach Strahlungskühler AG	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	17	4	-	-	-
TR50320	Temp. AR Strahlungswärmetauscher LUFT ab	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	3	-	-	-
GOS51000	Schaltventil Druckluft zu Verteiler 1				Belimo	-	-	-	1	6	11(öff.);12(schl.)

Tab. B.4: MSR-Liste 5/6

Mario Schmalzl

MSR-Liste

Seite 6 von 6

MSR-Nr.	Messstellenbeschreibung	Einheit	MBA	MBE	Hersteller	Eingänge			Ausgänge		
						PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal	PLS Rack	PLS Steckplatz	PLS Kanal
GOS51100	Schaltventil Druckluft zu Verteiler 3				Belimo	-	-	-	1	6	9(öff.);10(schl.)
PRS1200	Druck Druckluft Verteiler 2	bar	0	6	Endress Hauser	3	10	6	-	-	-
TR51200	Temp Druckluft Hauptversorgung	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	8	4	-	-	-
FIR51210	Durchfluss Primärluft AR	Nm3/h	0	26	Krohne H250	1	11	6	-	-	-
J51210	Heizung Primärluft AR	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	17	2
TRCS1210	Temp Primärluft AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	6	-	-	-
FIR51220	Durchfluss Sekundärluft AR	Nm3/h	0	26	Krohne H250	1	11	7	-	-	-
J51220	Heizung Sekundärluft AR	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	17	3
TRCS1220	Temp Sekundärluft AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	1	-	-	-
FIR51230	Durchfluss Tertiärluft AR	Nm3/h	0	13,3	Krohne H250	1	11	8	-	-	-
J51230	Heizung Tertiärluft AR	%	0	100	JUMO	-	-	-	1	17	4
TRCS1230	Temp Tertiärluft AR	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	15	2	-	-	-
GOS52210	Schaltventil Druckluft zu Brennkammer				Belimo	-	-	-	1	8	3(öff.);4(schl.)
GOS52220	Schaltventil Druckluft zu Brennkammer				Belimo	-	-	-	1	6	6
FR53000	Durchfluss Luftgebläse zu Brennkammer	Nm3/h	0	150	Barthel Messblende	-	-	-	-	-	-
N53000	Luftgebläse zu Brennkammer				ABB FU	-	-	-	1	6	7
PDR53000	Differenzdruck Luftgebläse zu Brennkammer	bar	0	1		3	11	3	-	-	-
SIR53000	Drehzahl Luftgebläse zu Brennkammer	%	0	100		1	12	6	1	19	2
TR53000	Temp Druckluft vor Brennkammer	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	8	5	-	-	-
GOS55000	Schaltventil Druckluft zu Druckmessdosenschrank				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	9	3
GOS61410	Schaltventil Stickstoff zu Messblende PG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	8	1
GOS61420	Schaltventil Stickstoff zu Messblende PG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	6	2
GOS61430	Schaltventil Stickstoff zu Messblende PG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	6	1
GOS61510	Schaltventil Stickstoff zu Messblende AG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	8	2
GOS61520	Schaltventil Stickstoff zu Messblende AG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	6	4
GOS61530	Schaltventil Stickstoff zu Messblende AG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	6	3
GOS61610	Ventil Mitteldruck Stickstoff zu Brennstoffleitung 1				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	4	5
GOS61710	Ventil Mitteldruck Stickstoff zu Brennstoffleitung 2				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	4	6
GOS61810	Ventil Mitteldruck Stickstoff zu FR-Reaktor				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	5	3
GOS61910	Ventil Mitteldruck Stickstoff zu LLS				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	5	4
GOS62130	Schaltventil Stickstoff nach Brennstoffbunker 1				Belimo	-	-	-	1	4	1(öff.);2(schl.)
GOS62230	Schaltventil Stickstoffleitung nach Brennstoffbunker 2				Belimo	-	-	-	1	4	3(öff.);4(schl.)
PR63000	Druck Stickstoff	bar	0	6	Endress Hauser	3	10	7	-	-	-
GOS65000	Schaltventil Stickstoff zu Druckmessdosenschrank				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	9	4
YIC71200	Regelventil Kühlwasserversorgung WAT1	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	16	3
TR71210	Temp Brauchwasser BIG nach WAT1 (120KW)	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	2	-	-	-
GOS71220	Schaltventil Brauchwasser BIG				Stasto Magnetventil	-	-	-	1	9	8
TRC71220	Temp Brauchwasser BIG nach WAT1 (120KW) vor Kanal	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	14	3	-	-	-
YIC71300	Regelventil Kühlwasserversorgung WAT3	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	16	4
TR72010	Temp Kühlwasser BIG zu WAT2 60KW EIN	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	4	-	-	-
TR72020	Temp Kühlwasser BIG nach WAT2 60KW AUS	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	18	5	-	-	-
YIC72020	Regelventil Kühlwasser BIG zu WAT2	%	0	100	Belimo	-	-	-	1	16	2
N83000	Motor Pumpe Heizölbehälter				Ismatec	-	-	-	1	5	2
XRS90000	Start Analytik (Offline)					1	1	10	-	-	-
XRZ91000	Motorschutz ausgelöst Sammelmeldung					1	1	5	-	-	-
XRS91100	NotAus					1	3	4	1	8	5
XRS92000	Analytik in Betrieb					-	-	-	1	8	12
TR51210a	Temp Primärluft AR bei Heizschale	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	19	2	-	-	-
TR51220a	Temp Sekundärluft AR bei Heizschale	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	19	3	-	-	-
TR51230a	Temp Tertiärluft AR bei Heizschale	°C	-270	1273	TC Direct, Typ K	2	19	4	-	-	-

Tab. B.4: MSR-Liste 6/6

B.2.4 Höhenkoten und Messbereiche der Druckmessungen

Tab. B.5: Drucksensoren entlang der Höhe (1/2)

Beschreibung	MSR-Nummer	Höhe in mm	Messbereich in mbar
Dampfeinbringung LLS		0	
FR-Reaktor			
FR1	PR21200	506	0 - 250
FR2a	PR21210	656	0 - 250
FR2b	PR21211	656	0 - 250
FR3	PR21220	806	0 - 250
FR4	PR21230	881	0 - 100
FR5	PR21240	956	0 - 100
FR6	PR21250	1031	0 - 100
FR7	PR21260	1106	0 - 100
FR8	PR21270	1181	0 - 100
FR9	PR21280	1256	0 - 100
FR10	PR21290	1996	0 - 100
FR11	PR21300	2186	0 - 100
FR12	PR21310	2396	0 - 100
FR13	PR21320	2586	0 - 100
FR14	PR21330	2796	0 - 100
FR15	PR21340	2986	0 - 100
FR16	PR21350	3196	0 - 100
FR17	PR21360	3386	0 - 100
FR18	PR21370	3596	0 - 50
FR19	PR21380	3786	0 - 50
FR20	PR21390	3996	0 - 50
FR21	PR21400	4186	0 - 50
FR22	21410	4427	0 - 50
FR23	21420	4607	0 - 50
Grobabscheider FR			
nach Grobabscheider	PR21500	4563	0 - 50
Zyklon FR			
Feinasche 1 nach Zyklon	PR21800	3676	0 - 50
Feinasche 2 nach Zyklon	PR21810	1426	0 - 50
Gas vor Strahlungskühler	PR31000	4800	0 - 25

Tab. B.5: Drucksensoren entlang der Höhe (2/2)

Beschreibung	MSR-Nummer	Höhe in mm	Messbereich in mbar
ILS			
nach Grobabscheider ILS_A	PR21600	3411	nicht verwendet
nach Grobabscheider ILS_B	PR21610	3336	nicht verwendet
nach Grobabscheider ILS_C	PR21620	3261	nicht verwendet
vor ILS	PR21630	2996	0 - 100
nach ILS	PR21640	2996	0 - 100
LLS			
vor LLS	PR21900	109	0 - 500
nach LLS	PR21910	109	0 - 500
ULS			
nach Grobabscheider ULS_A	PR22400	3786	nicht verwendet
nach Grobabscheider ULS_B	PR22410	3711	nicht verwendet
nach Grobabscheider ULS_C	PR22420	3636	nicht verwendet
vor ULS	PR21430	3426	0 - 100
nach ULS	PR21440	3426	0 - 100
AR-Reaktor			
AR1	PR22200	576	0 - 250
AR2	PR22210	776	0 - 250
AR3	PR22220	976	0 - 250
AR4	PR22230	1176	0 - 100
AR5	PR22240	1576	0 - 100
AR6	PR22250	2552	0 - 100
AR7	PR22260	4706	0 - 50
AR8	PR22270	5016	0 - 50
Grobabscheider AR			
nach Grobabscheider	PR22300	4902	0 - 50
Zyklon AR			
Feinasche 1 nach Zyklon	PR22800	3776	0 - 50
Feinasche 2 nach Zyklon	PR22810	1976	0 - 50
Gas vor Strahlungskühler	PR32000	5050	0 - 25

B.2.5 Datenblätter der Druckmessblenden

Anbei sind die Datenblätter der Druckmessblenden für Produktgas und Abgas aufgelistet.

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.4)

Wirkdruckgeber: 080813 TU WIEN (Viertelkreis) 04.06.2014 16:46:39



Produktgasmessblende - Viertelkreisdüse

Berechnungskopf

Kennung		080813 TU WIEN (Viertelkreis)
Autor	DIEM	08.08.2013 14:13:53
Bearbeiter	jacobi	15.08.2013 10:32:00

Benutzerdefinierte Daten:

Tag No.		
Fabrikations Nr.	:	F20352
Durchflußmedium		GAS
Auslegungsfluid gem. DGRL	Gruppe	?
Nennweite	DN	65
Auslegungsdruck gem. DGRL	PS (bar)	1,013
Auslegungstemperatur gem. DGRL	TS (°C)	450
Bei Flüssigkeiten Dampfdruck bei TS	PD	
DGRL Einstufung gem.	Diagramm	?
Einstufung gem. DGRL	DGRL	?

Auswahl und Zustand des Mediums

Medium		Stoffgemisch (Gas)
Stoffzusammensetzung		UNI WIEN 2

Wasserstoff: 28,9 %, Kohlenmonoxid: 24,3 %, Wasser: 24 %, Kohlendioxid: 12,2 %, Methan: 7,6 %, Stickstoff: 1,5 %, Ethan: 1,5 %

Zustand		Gasförmig
Gas		Gas, trocken (Betriebsbedingungen)
Normbedingungen		0°C, 1013.25 mbar
Realgasfaktor (Normbedingungen)	Zn	-
<input type="radio"/> Dichte (Normbedingungen, trockenes Gas)	ρN	0,85538 kg/m ³
<input type="radio"/> Spezifische Gaskonstante	R	433,67 J/(kg K)
<input checked="" type="radio"/> Molare Masse	M	19,172 kg/kmol
<input type="radio"/> Spezifische Dichte	Sg	0,66196 -
Kritische Temperatur	tc	-17,911 °C
Kritischer Druck	pc	77,146 bar(a)
<input checked="" type="checkbox"/> Phase automatisch		

080813 TU WIEN (Viertelkreis).CFM 1(5)

Freigegeben zur Fertigung:

(Name/Datum)

Abb. B.2: Datenblatt Produktgasmessblende 1/5

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.4)

Wirkdruckgeber:
080813 TU WIEN (Viertelkreis)**Barthel**
ARMATUREN

04.06.2014 16:46:39

Stoffdaten im Betriebspunkt

Betriebstemperatur	t1	450,0	°C
Betriebsdruck	p1	1,1	bar(a)
Siededruck (t1)	pv1		bar(a)
Siedetemperatur (p1)	tv1		°C
Realgasfaktor (t1, p1)	Z1	0,99997	-
Betriebsdichte (t1, p1)	ρ1	0,35077	kg/m ³
Isentropenexponent (t1, p1)	κ	1,2877	-
Schallgeschwindigkeit	cF1	635,48	m/s
<input checked="" type="radio"/> Dynamische Viskosität (t1, p1)	η1	0,025034	mPa s
<input type="radio"/> Kinematische Viskosität (t1, p1)	ν1	71,37	mm ² /s

Rohrleitung

Werkstoffnummer		1.4571c	
Werkstoffkurzname		X6CrNiMoTi17-12-2 (kaltgefertigt)	
Beschaffenheit		neu, nahtlos, kalt gezogen	
Rohrquerschnitt		Kreisförmig	
<input checked="" type="radio"/> Rohrklasse		Metrisch	
Nennweite	DN	DN 65	
Nenndruck	PN	PN 40	
Linearer Ausdehnungskoeffizient	αlin	18,75 E-6	1/K
Rohrrauheit	k	0,02	mm

Wirkdruckgeber - Spezifizierung

Drosselgerätetyp	ISO-Element
Drosselgeräteart	Viertelkreisdüse

Wirkdruckgeber - Betriebsdaten

Berechnungsnorm		VDI/VDE 2041	
Berechnungsbezug		Auslegung: C und ε mit 2/3 qm	
Berechneter Wert		qm	
Drosselöffnung (20°C)	d	20,438	mm
Wirkdruck	Δp	15,0	mbar
<input checked="" type="radio"/> Massendurchfluss	qm	30,126	kg/h
<input type="radio"/> Volumendurchfluss (Betriebsbedingungen)	qv	85,884	m ³ /h

080813 TU WIEN (Viertelkreis).CFM

2(5)

Abb. B.2: Datenblatt Produktgasmessblende 2/5

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.4)

Wirkdruckgeber:
080813 TU WIEN (Viertelkreis)**Barthel**
ARMATUREN

04.06.2014 16:46:39

Wirkdruckgeber - Material

Werkstoffnummer	Drossel	1.4571c
Werkstoffkurzname	Drossel	X6CrNiMoTi17-12-2 (kaltgefertigt)
Linearer Ausdehnungskoeffizient	$\alpha_{lin,D}$	18,75 E-6 1/K

Wertetabelle Durchflusswertetabelle

Schrittweite für die Wertetabelle n %

Berechnete Nebenwerte

<input type="checkbox"/> Durchflusskoeffizient (*)	C	0,7728	-
Radius des Einlaufprofils (20°C)	r	2,1345	mm
Bleibender Druckverlust	$\Delta\omega$	13,158	mbar
Verlustleistung	$P\Delta\omega$	0,03158	kW
Mechanische Strahlleistung	$P\Delta p$	0,036031	kW
Geschwindigkeit im Rohr	uP	6,0483	m/s
Geschwindigkeit im Wirkdruckgeber	uF	71,559	m/s
Reynoldszahl (*)	ReD	4.003,8	-
Reynoldszahl im Wirkdruckgeber (*)	Red	13.772,0	-
Rohrinnendurchmesser (t1)	Di,t1	70,867	mm
Drosselöffnung (t1)	d,t1	20,603	mm
Durchmesserverhältnis	β	0,29073	-
Relative Rohrrauheit	kr	2,8222	-
Berichtigungsfaktor für Rohrrauheit	br	1,0	-
Expansionszahl (*)	ε	0,99767	-
Druckverhältnis (*)	τ	0,99394	-

Ein- und Auslauflängen Angabe als Faktoren

Darstellung 0% Zusatzunsicherheit

Erforderliche gerade Einlauflängen

Ein 90°-Krümmer oder T-Stück		708,67	mm
Mehrere 90°-Krümmer, gleiche Ebene		1.133,9	mm
Mehrere 90°-Krümmer, verschiedene Ebenen		2.409,5	mm
Reduzierstück		354,33	mm
Diffusor		1.133,9	mm
Ventil, voll geöffnet		1.275,6	mm

080813 TU WIEN (Viertelkreis).CFM

3(5)

Abb. B.2: Datenblatt Produktgasmessblende 3/5

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.4)

Wirkdruckgeber:
080813 TU WIEN (Viertelkreis)**Barthel**
ARMATUREN

04.06.2014 16:46:39

Erforderliche gerade Einlaufängen (Fortsetzung)

Schieber, voll geöffnet		850,4	mm
Abrupte Durchmessererringerung		2.126,0	mm
Thermometertasche, $\varnothing \leq 0,03 D_i$		354,33	mm
Thermometertasche, $\varnothing > 0,03 D_i$		1.417,3	mm

Erforderliche gerade Auslaufänge

Erforderliche gerade Auslaufänge		354,33	mm
----------------------------------	---	--------	----

Unsicherheiten

Uns. der Betriebstemperatur	e,t1 	1,0	%
Uns. des absoluten Drucks	e,p1 	0,6	%
Uns. des Rohrnenddurchmessers	e,D _i 	0,4	%
Uns. der Drosselöffnung	e,d 	0,1	%
Uns. des Wirkdrucks	e,Δp 	0,8	%
Uns. der Betriebsdichte	e,ρ1 	5,0	%
Uns. durch Unrundheit der Rohrleitung	e,CiP 	0,0	%
Uns. des Berichtigungsfaktors br	e,br 	0,0	%
Uns. der Expansionszahl (*)	e,ε 	0,030303	%
Uns. des Durchflusskoeffizienten	e,C 	1,0	%
Uns. des berichtigten Durchflusskoeffizienten	e,C _b 	1,0	%
Uns. des Massendurchflusses	e,q _m 	2,7297	%
Zusatzunsicherheit	e,ad 	0,0	%

Warnung:

 Der Wert für Stoffzusammensetzung wurde nicht in der Datenbank gefunden.

Bestätigung:

 Die Berechnung entspricht der VDI/VDE 2041.

Abb. B.2: Datenblatt Produktgasmessblende 4/5

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.4)

Wirkdruckgeber:
080813 TU WIEN (Viertelkreis)

Barthel
ARMATUREN

04.06.2014 16:46:39

Legende

-  Berechneter Wert
-  Nachgeschlagener Wert
-  Überschriebener nachgeschlagener Wert
-  Warnung
-  Bestätigung

080813 TU WIEN (Viertelkreis).CFM

5(5)

Abb. B.2: Datenblatt Produktgasmessblende 5/5

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.2)

Wirkdruckgeber:
080813 TU Wien**Barthel**
ARMATUREN

15.08.2013 10:39:16

Abgasmessblende - Blende mit Eckdruckentnahme**Berechnungskopf**

Kennung		080813 TU Wien
Autor		Hr. Diem 08.08.2013 13:30:37
Bearbeiter		jacobi 15.08.2013 10:38:48
Tag No.		
Fabrikations Nr.	:	F20353
Durchflußmedium		Abgas
Auslegungsfluid gem. DGRL	Gruppe	?
Nennweite	DN	80
Auslegungsdruck gem. DGRL	PS (bar)	1,013 ?
Auslegungstemperatur gem. DGRL	TS (°C)	450
Bei Flüssigkeiten Dampfdruck bei TS	PD	
DGRL Einstufung gem.	Diagramm	?
Einstufung gem. DGRL	DGRL	

Auswahl und Zustand des Mediums

Medium		Stoffgemisch (Gas)
Stoffzusammensetzung		UNI Wien

Stickstoff: 64 %, Wasser: 18 %, Kohlendioxid: 14,7 %, Sauerstoff: 3,3 %

Zustand		Gasförmig
Gas		Gas, trocken (Betriebsbedingungen)
Kritische Temperatur	tc	-26,101 °C
Kritischer Druck	pc	67,969 bar(a)
<input checked="" type="checkbox"/> Phase automatisch		

Stoffdaten im Betriebspunkt

Betriebstemperatur	t1	450,0	°C
Betriebsdruck	p1	1,1	bar(a)
Realgasfaktor (t1, p1)	Z1	1,0001	-
Betriebsdichte (t1, p1)	ρ1	0,52495	kg/m³
Isentropenexponent (t1, p1)	κ	1,319	-
Schallgeschwindigkeit	cF1	525,73	m/s
<input checked="" type="radio"/> Dynamische Viskosität (t1, p1)	η1	22,843 E-6	Pa s
<input type="radio"/> Kinematische Viskosität (t1, p1)	ν1	43,515 E-6	m²/s

Rohrleitung

Werkstoffnummer		1.4571c
Werkstoffkurzname		X6CrNiMoTi17-12-2 (kaltgefertigt)
Beschaffenheit		neu, nahtlos, kalt gezogen
Rohrquerschnitt		Kreisförmig
<input checked="" type="radio"/> Rohrklasse		ANSI
Nennweite	DN	3"
Nenndruck	PN	Schedule 10s
Linearer Ausdehnungskoeffizient	αlin	18,75 E-6 1/K

080813 TU Wien.CFM

1(4)

Abb. B.3: Datenblatt Abgasmessblende 1/4

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.2)			
Wirkdruckgeber: 080813 TU Wien		Barthel ARMATUREN	
		15.08.2013 10:39:16	
Rohrrauheit	k	0,02	mm
Wirkdruckgeber - Spezifizierung			
Drosselgerätetyp		ISO-Element	
Drosselgeräteart		Blende mit Eck-Druckentnahme	
Wirkdruckgeber - Betriebsdaten			
Berechnungsnorm		✓ EN ISO 5167:2003	
Berechnungsbezug		Auslegung: C und ε mit 2/3 qm	
Berechneter Wert		d	
Drosselöffnung (20°C)	d	38,771	mm
Wirkdruck	Δp	15,0	mbar
<input type="radio"/> Massendurchfluss	qm	107,62	kg/h
<input checked="" type="radio"/> Volumendurchfluss (Betriebsbedingungen)	qv	205,0	m³/h
Wirkdruckgeber - Material			
Werkstoffnummer	Drossel	1.4571c	
Werkstoffkurzname	Drossel	X6CrNiMoTi17-12-2 (kaltgefertigt)	
Linearer Ausdehnungskoeffizient	αlin,D	18,75 E-6	1/K
Kantenradius (20°C)	rk	0,011631	mm
Wertetabelle			
<input type="checkbox"/> Durchflusswertetabelle			
Berechnete Nebenwerte			
<input type="checkbox"/> Durchflusskoeffizient (*)	C	0,61362	-
Bleibender Druckverlust	Δω	11,395	mbar
Verlustleistung	PΔω	0,065225	kW
Mechanische Strahlleistung	PΔp	0,086004	kW
Geschwindigkeit im Rohr	uP	10,406	m/s
Geschwindigkeit im Wirkdruckgeber	uF	47,464	m/s
Reynoldszahl (*)	ReD	13.307,0	-
Reynoldszahl im Wirkdruckgeber (*)	Red	28.421,0	-
Rohrinnendurchmesser (t1)	Di,t1	83,472	mm
Drosselöffnung (t1)	d,t1	39,084	mm
Durchmesser Verhältnis	β	0,46823	-
Relative Rohrrauheit	kr	2,396	-
Berichtigungsfaktor für Rohrrauheit	br	1,0	-
Berichtigungsfaktor für Kantenradius	bk	1,0	-
Expansionszahl (*)	ε	0,99832	-
Druckverhältnis (*)	τ	0,99394	-
Ein- und Auslauflängen			
<input type="checkbox"/> Angabe als Faktoren			
Darstellung	0% Zusatzunsicherheit		
080813 TU Wien.CFM		2(4)	

Abb. B.3: Datenblatt Abgasmessblende 2/4

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.2)

Wirkdruckgeber:
080813 TU Wien**Barthel**
ARMATUREN

15.08.2013 10:39:16

Erforderliche gerade Einlaufängen

Ein oder zwei 90°-Krümmer, $S \geq 30D$		1.836,4	mm
Zwei 90°-Krümmer, $30D \geq S \geq 5D$, gleiche Ebene		1.502,5	mm
Zwei 90°-Krümmer, $5D > S$, gleiche Ebene		1.836,4	mm
Zwei 90°-Krümmer, $30D \geq S \geq 5D$, senkrechte Ebenen		3.672,8	mm
Zwei 90°-Krümmer, $5D > S$, senkrechte Ebenen		6.260,4	mm
Einfaches 90°-T-Stück		1.586,0	mm
Ein oder zwei 45°-Krümmer, $S \geq 2D$		2.504,1	mm
Reduzierstück		667,77	mm
Diffusor		1.669,4	mm
Schieber, voll geöffnet		1.001,7	mm
Abrupte Durchmessererringerung		2.504,1	mm
Thermometertasche, $\varnothing \leq 0,03 D_i$		417,36	mm
Thermometertasche, $\varnothing > 0,03 D_i$		1.669,4	mm

Erforderliche gerade Auslaufänge

Erforderliche gerade Auslaufänge		500,83	mm
----------------------------------	--	--------	----

Unsicherheiten

Uns. der Betriebstemperatur	e,t1	0,0	%
Uns. des absoluten Drucks	e,p1	0,0	%
Uns. des Rohrendurchmessers	e,D _i	0,4	%
Uns. der Drosselöffnung	e,d	0,1	%
Uns. des Wirkdrucks	e, Δp	0,0	%
Uns. der Betriebsdichte	e, ρ_1	0,0	%
Uns. durch Unrundheit der Rohrleitung	e,CiP	0,0	%
Uns. des Berichtigungsfaktors br	e,br	0,0	%
Uns. des Berichtigungsfaktors bk	e,bk	0,0	%
Uns. der Expansionszahl (*)	e, ϵ	0,016082	%
Uns. des Durchflusskoeffizienten	e,C	0,5	%
Uns. des berichtigten Durchflusskoeffizienten	e,Cb	0,5	%
Uns. des Massendurchflusses	e,qm	0,54409	%
Zusatzunsicherheit	e,ad	0,0	%

Bestätigung:

Die Berechnung entspricht der EN ISO 5167:2003.

080813 TU Wien.CFM

3(4)

Abb. B.3: Datenblatt Abgasmessblende 3/4

CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 9.0 (Build 9.0.2)

Wirkdruckgeber:
080813 TU Wien

Barthel
ARMATUREN

15.08.2013 10:39:16

Legende

-  Berechneter Wert
-  Nachgeschlagener Wert
-  Überschriebener nachgeschlagener Wert
-  Bestätigung

080813 TU Wien.CFM

4(4)

Abb. B.3: Datenblatt Abgasmessblende 4/4

B.3 Prozessleittechnik

B.3.1 Entwicklung der PLT

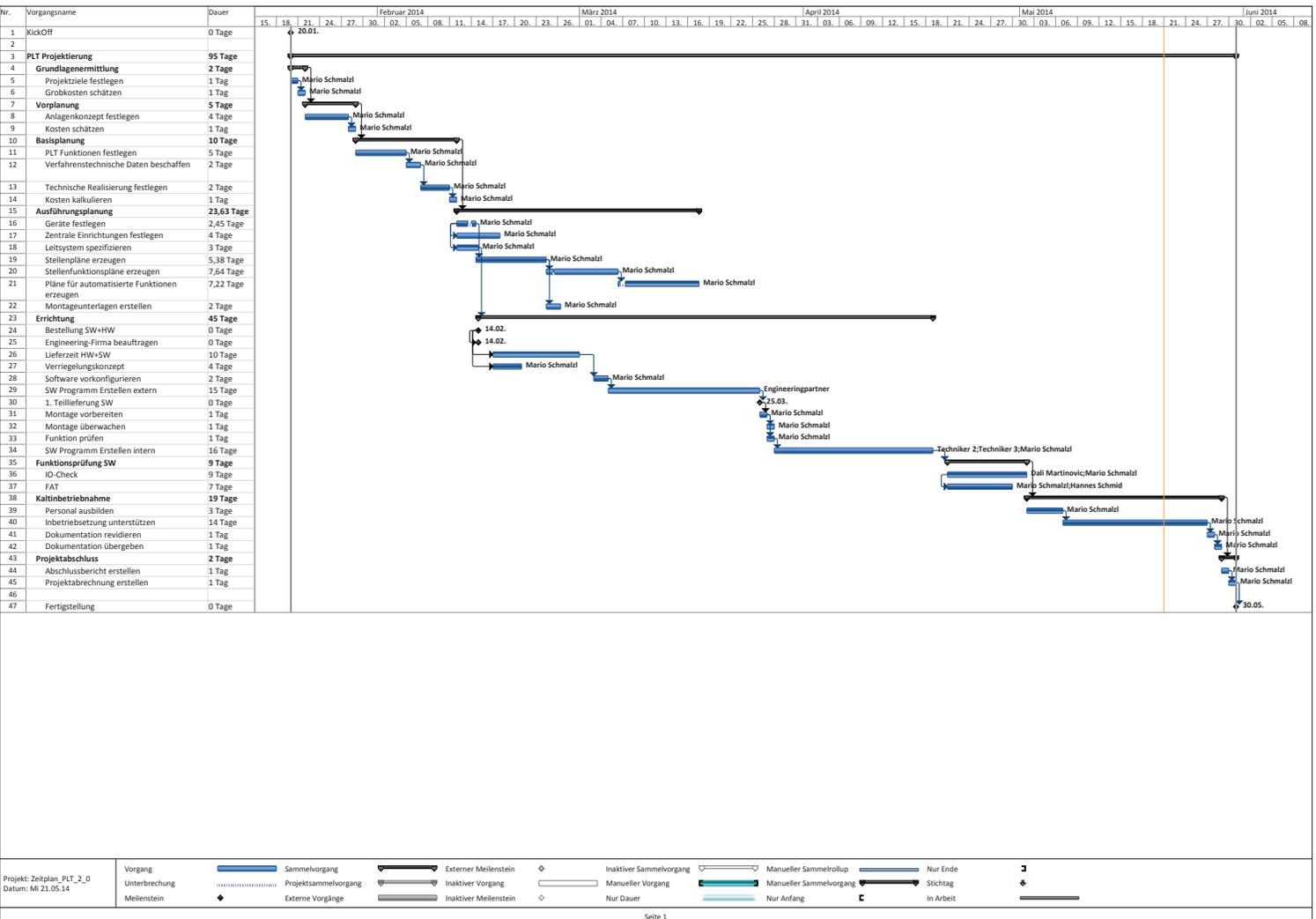


Abb. B.4: Projektplan für die Implementierung der MSRT

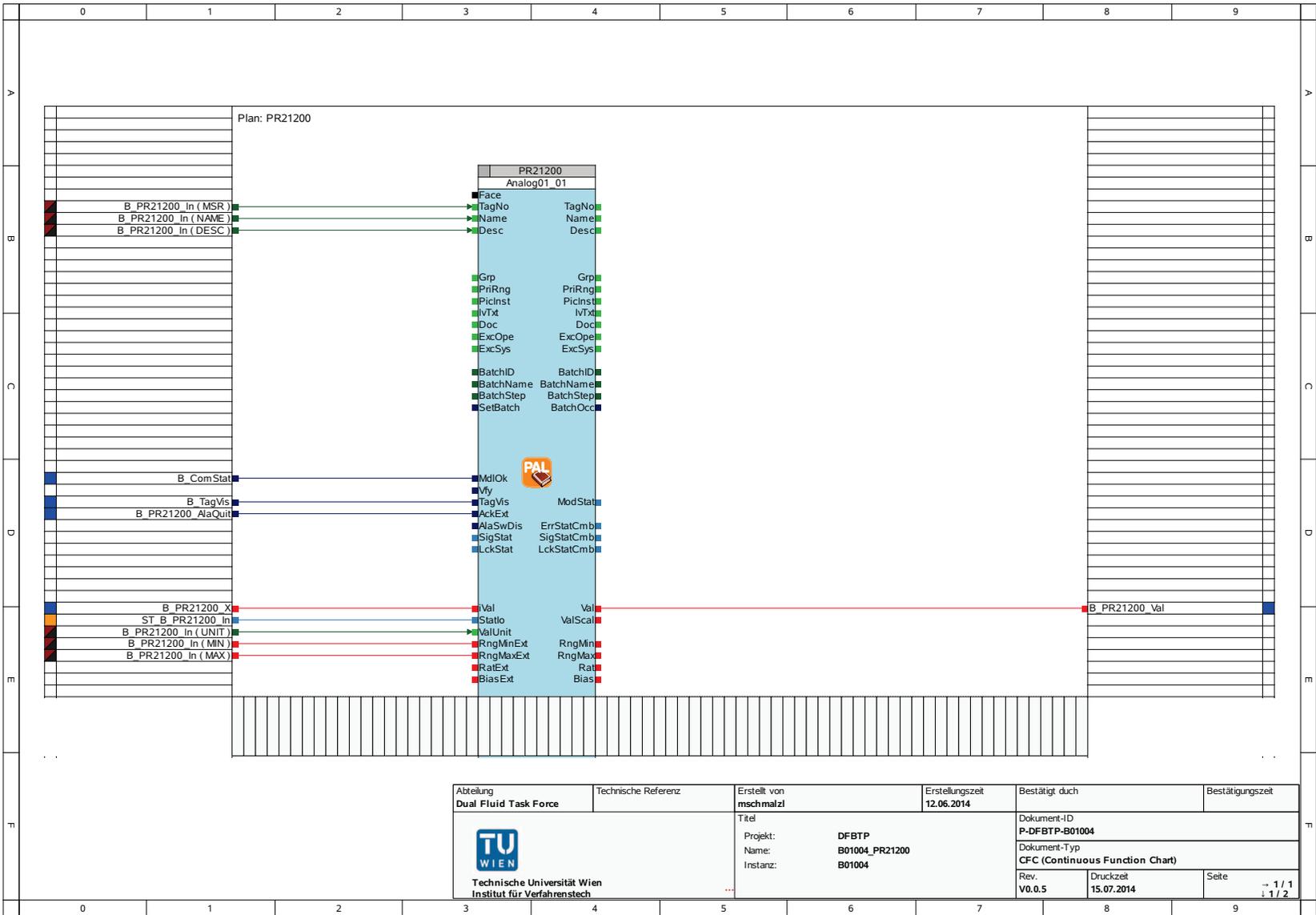


Abb. B.5: Funktionsplan PR21200 1/2

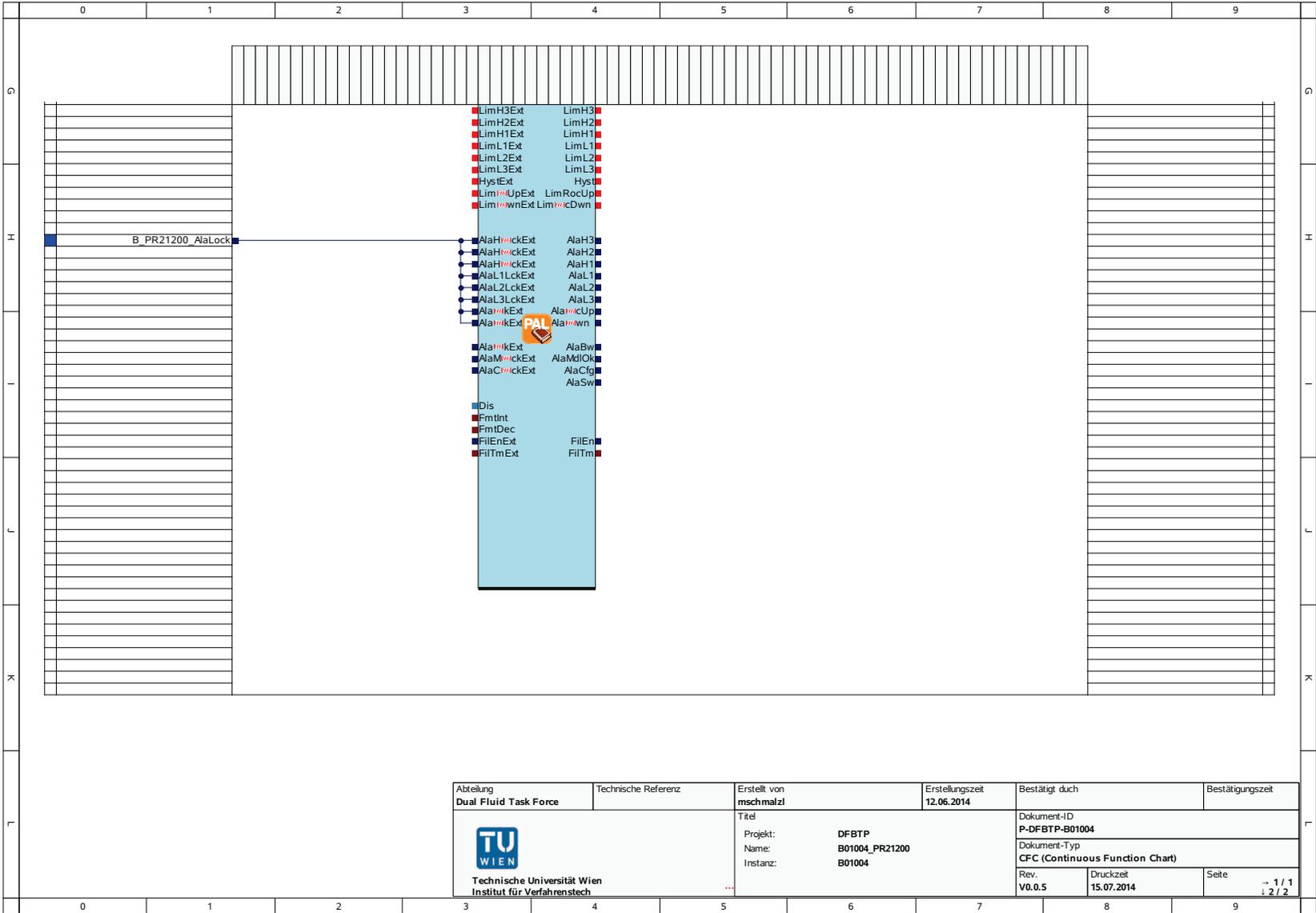
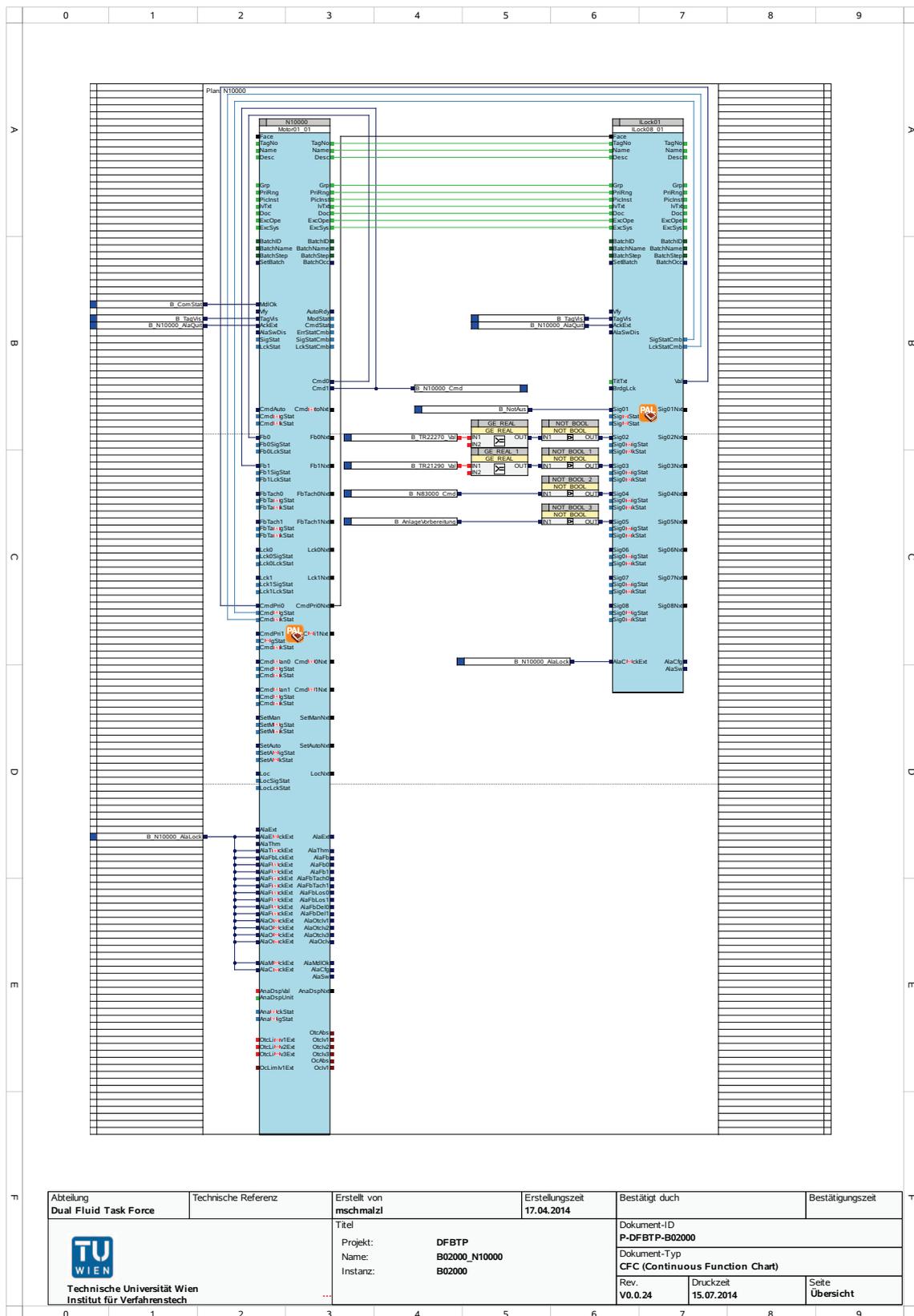


Abb. B.5: Funktionsplan PR21200 2/2



Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalz	Erstellungszeit 17.04.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstechnik	Titel Projekt: DFFTP Name: B02000_N10000 Instanz: B02000		Dokument-ID P-DFBTP-B02000 Dokument-Typ CFC (Continuous Function Chart)		
	Rev. V0.0.24		Druckzeit 15.07.2014		Seite Übersicht

Abb. B.6: Funktionsplan N10000 Übersicht

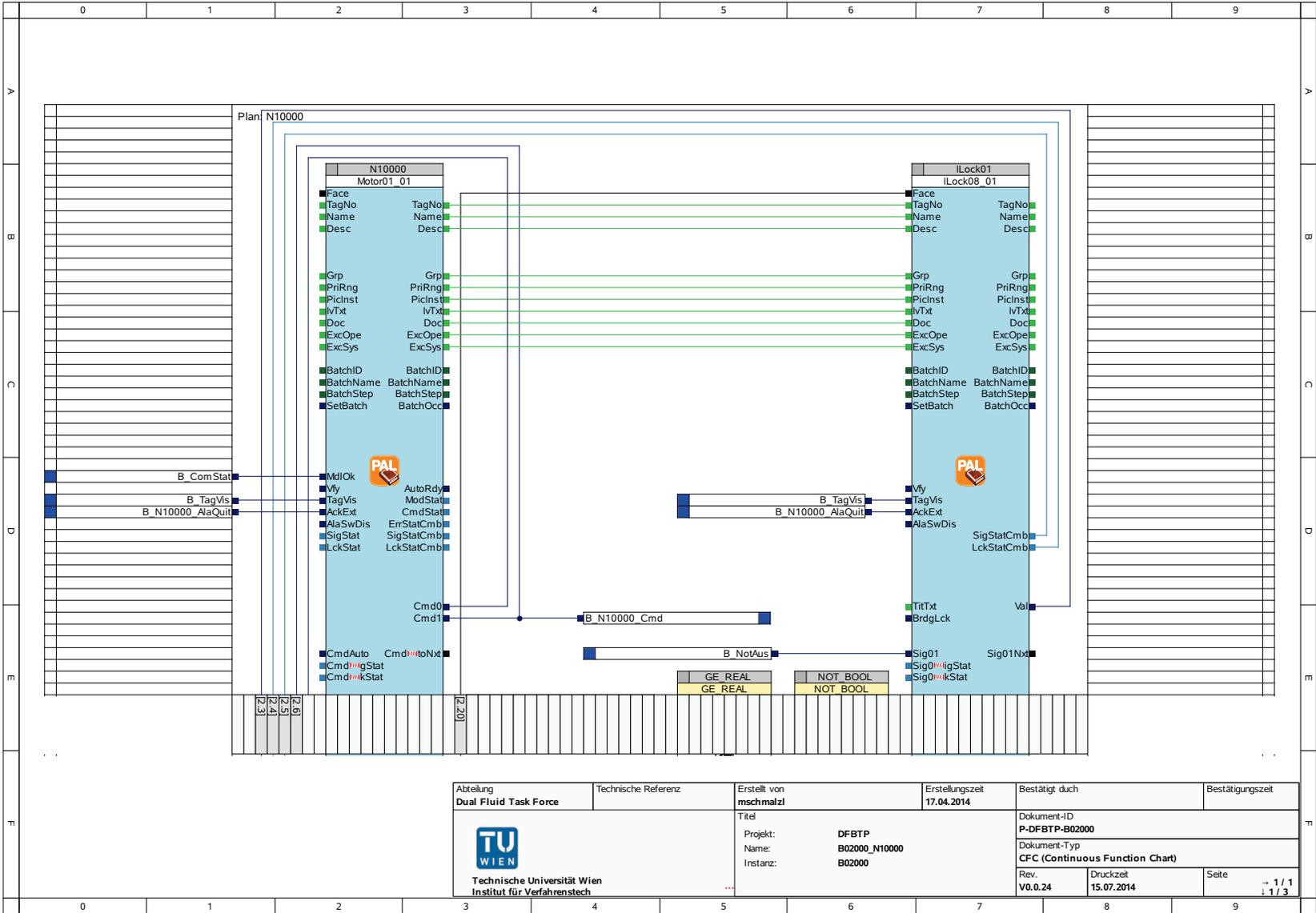


Abb. B.6: Funktionsplan N10000 1/3

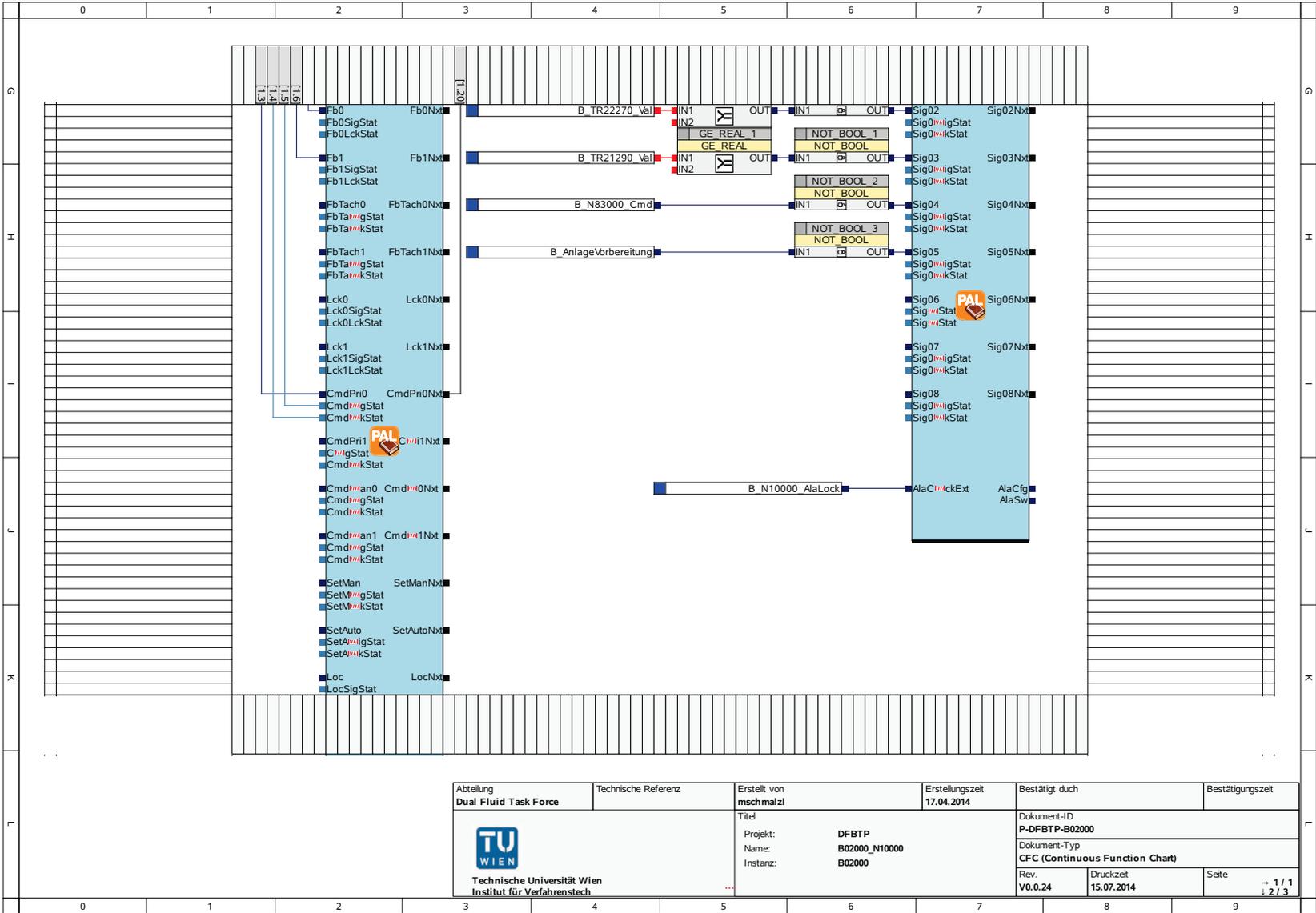


Abb. B.6: Funktionsplan N10000 2/3

Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalzl	Erstellungszeit 17.04.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstechnik		Titel Projekt: DFBTP Name: B02000_N10000 Instanz: B02000		Dokument-ID P-DFBTP-B02000 Dokument-Typ CFC (Continuous Function Chart)	
		Rev. V0.0.24	Druckzeit 15.07.2014	Seite → 1 / 1 ↓ 2 / 3	

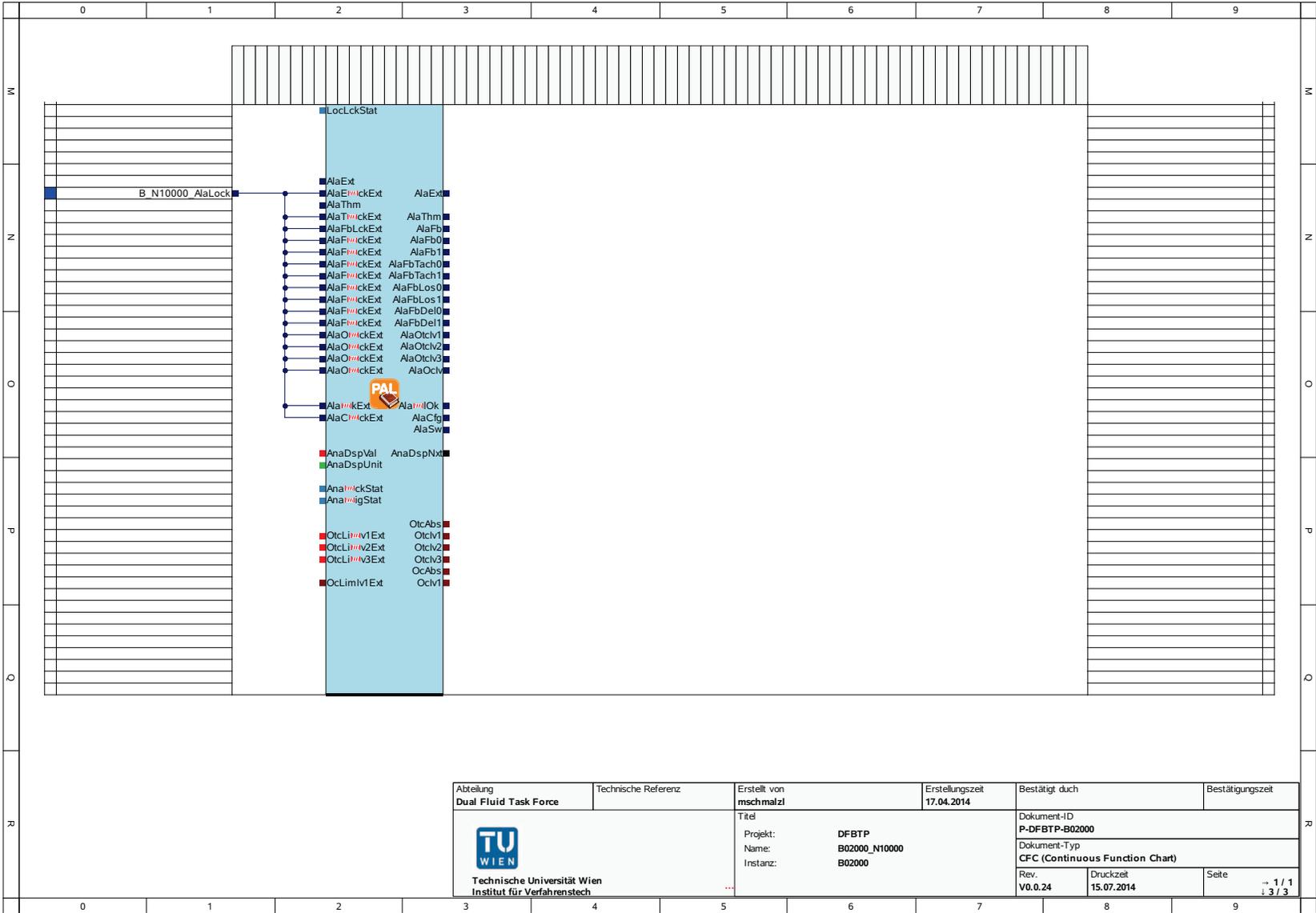


Abb. B.6: Funktionsplan N10000 3/3

Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalzl	Erstellungszeit 17.04.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstechnik	Titel Projekt: DFBTP Name: B02000_N10000 Instanz: B02000		Dokument-ID P-DFBTP-B02000 Dokument-Typ CFC (Continuous Function Chart)		
	Rev. V0.0.24	Druckzeit 15.07.2014	Seite → 1 / 1 ↓ 3 / 3		

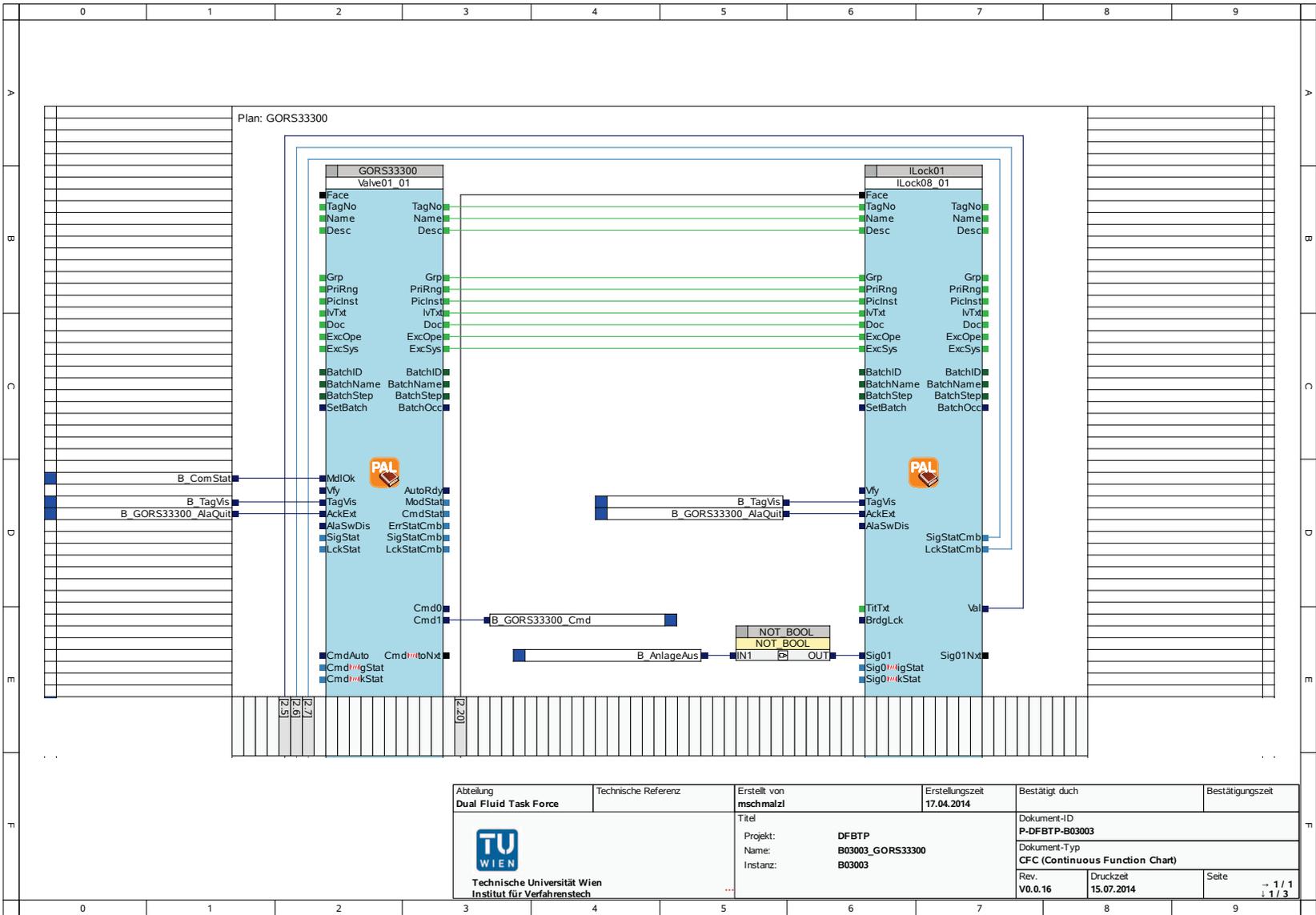


Abb. B.7: Funktionsplan GORS33300 1/3

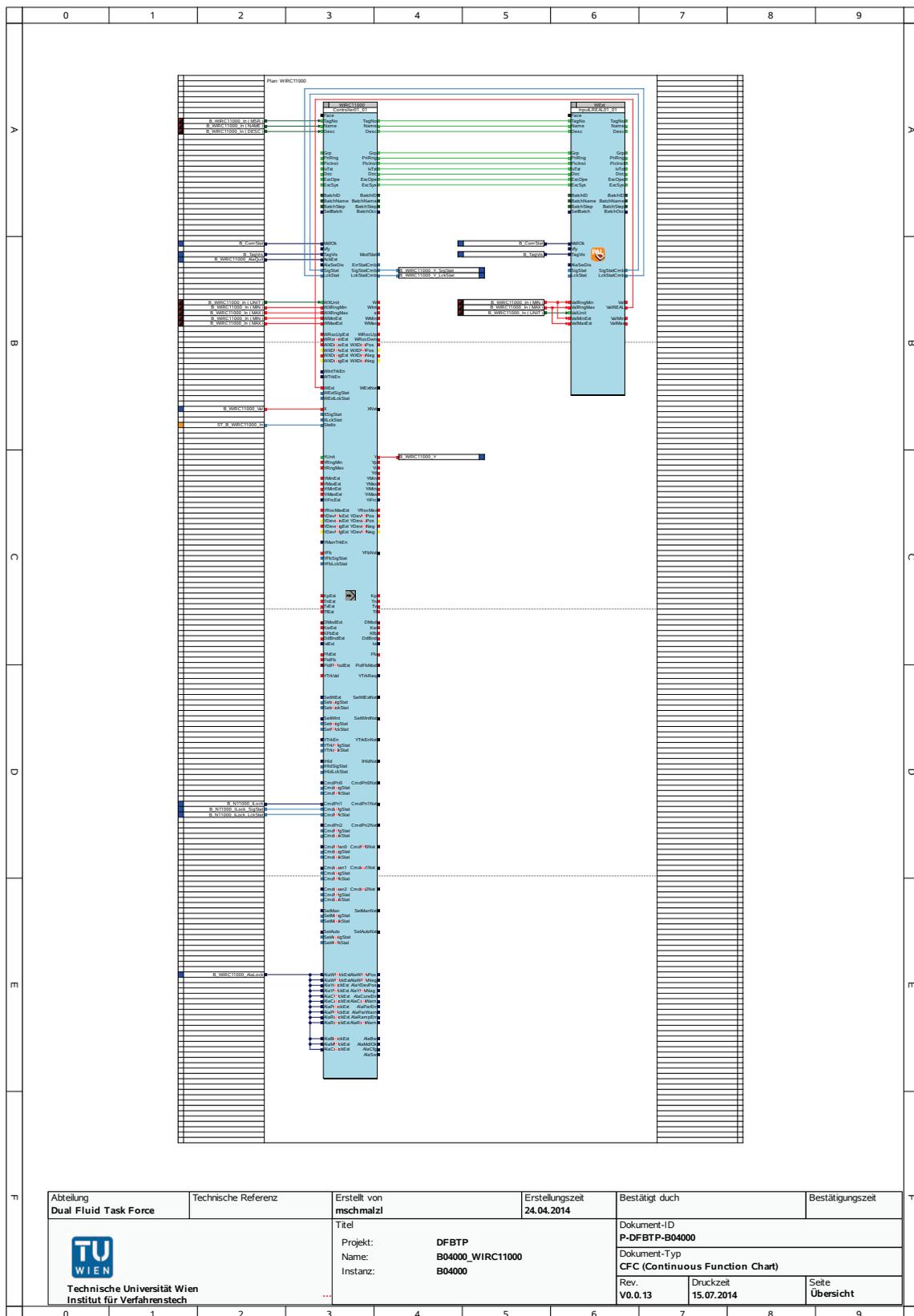


Abb. B.8: Funktionsplan WIRC11000 Übersicht

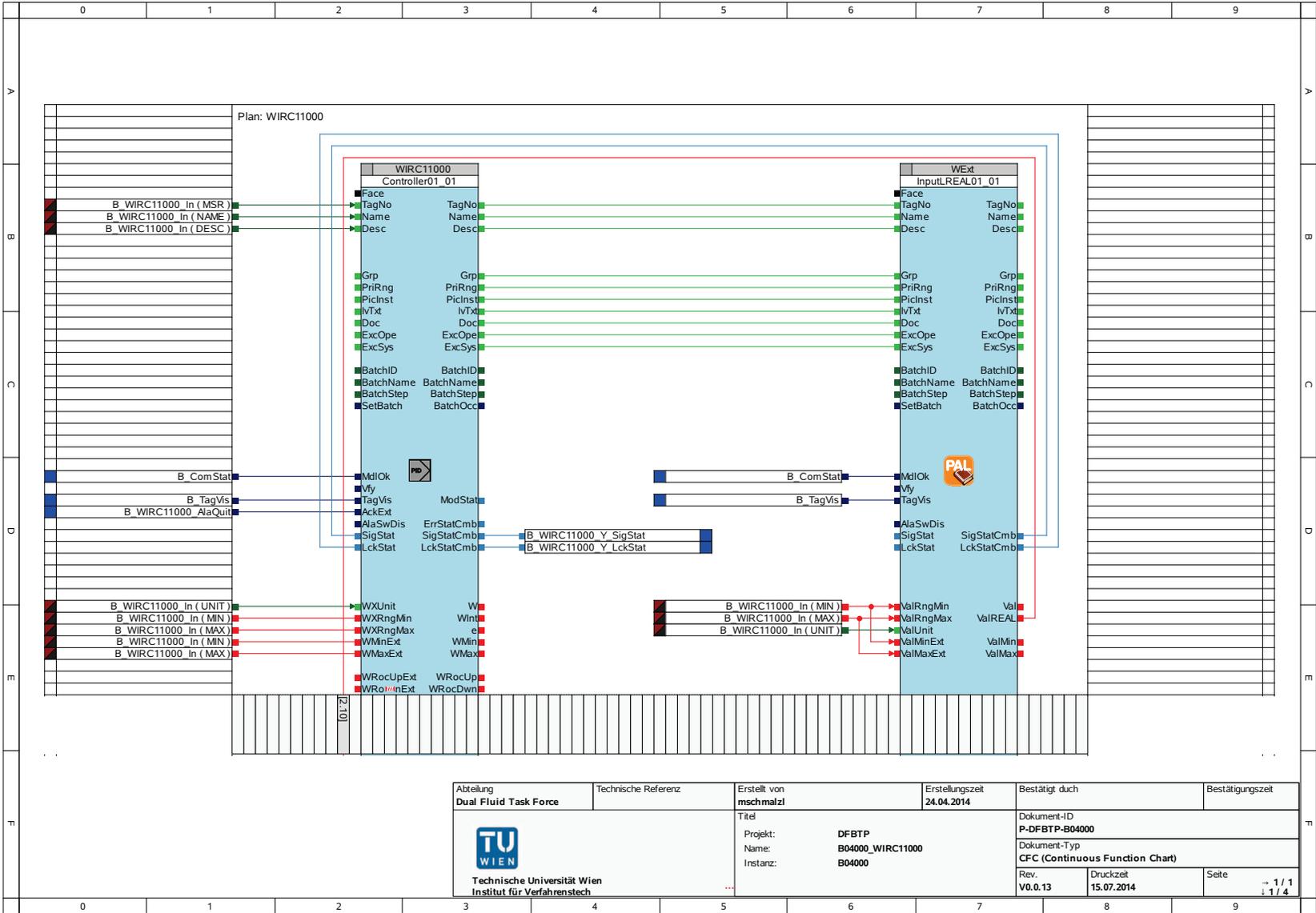


Abb. B.8: Funktionsplan WIRC11000 1/4

Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalzl	Erstellungszeit 24.04.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstechnik		Dokument-ID P-DFBTP-B04000		Dokument-Typ CFC (Continuous Function Chart)	
		Projekt: DFBTP Name: B04000_WIRC11000 Instanz: B04000	Rev. V0.0.13 Druckzeit 15.07.2014	Seite 1 / 1 1 / 4	

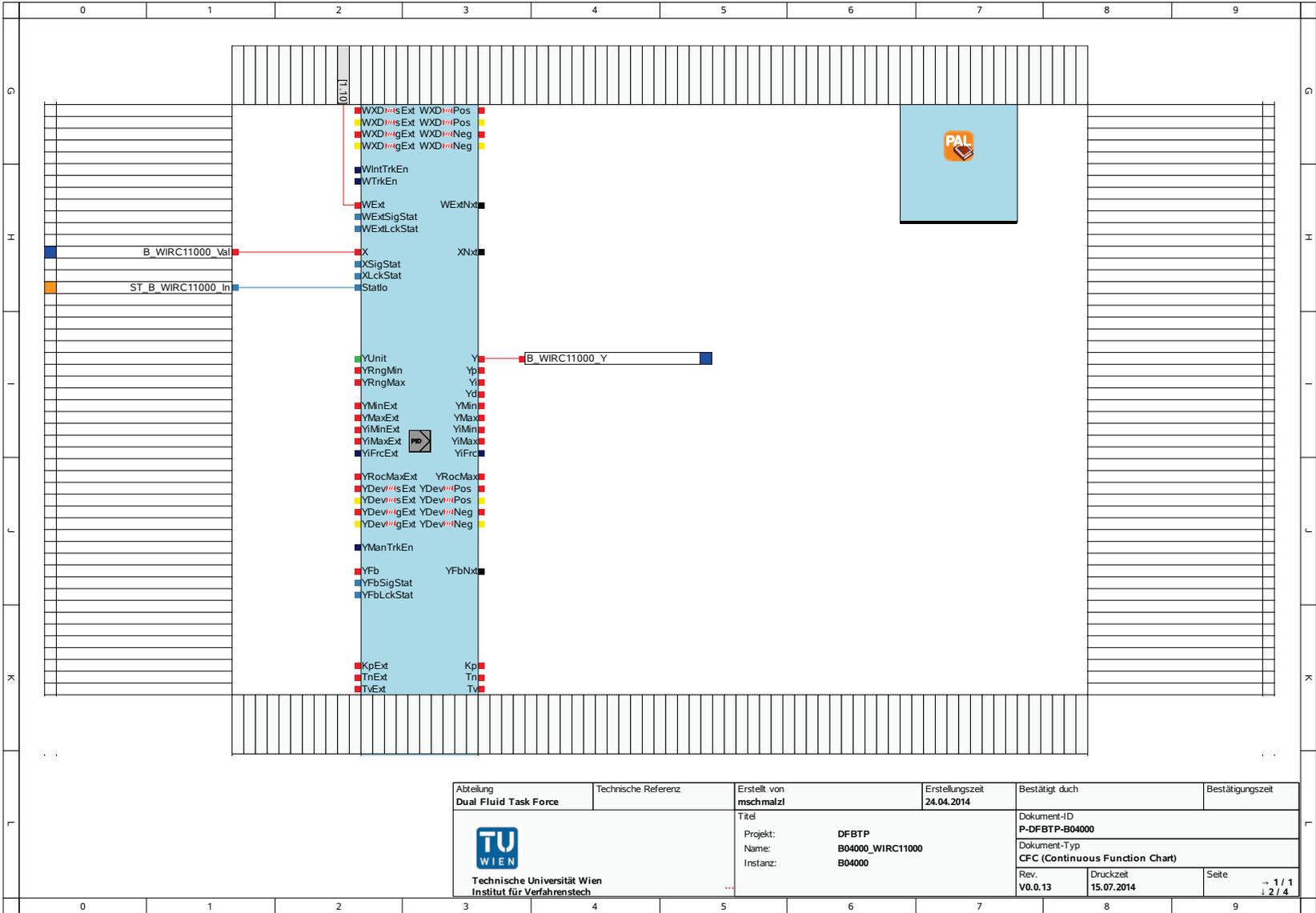


Abb. B.8: Funktionsplan WIRC11000 2/4

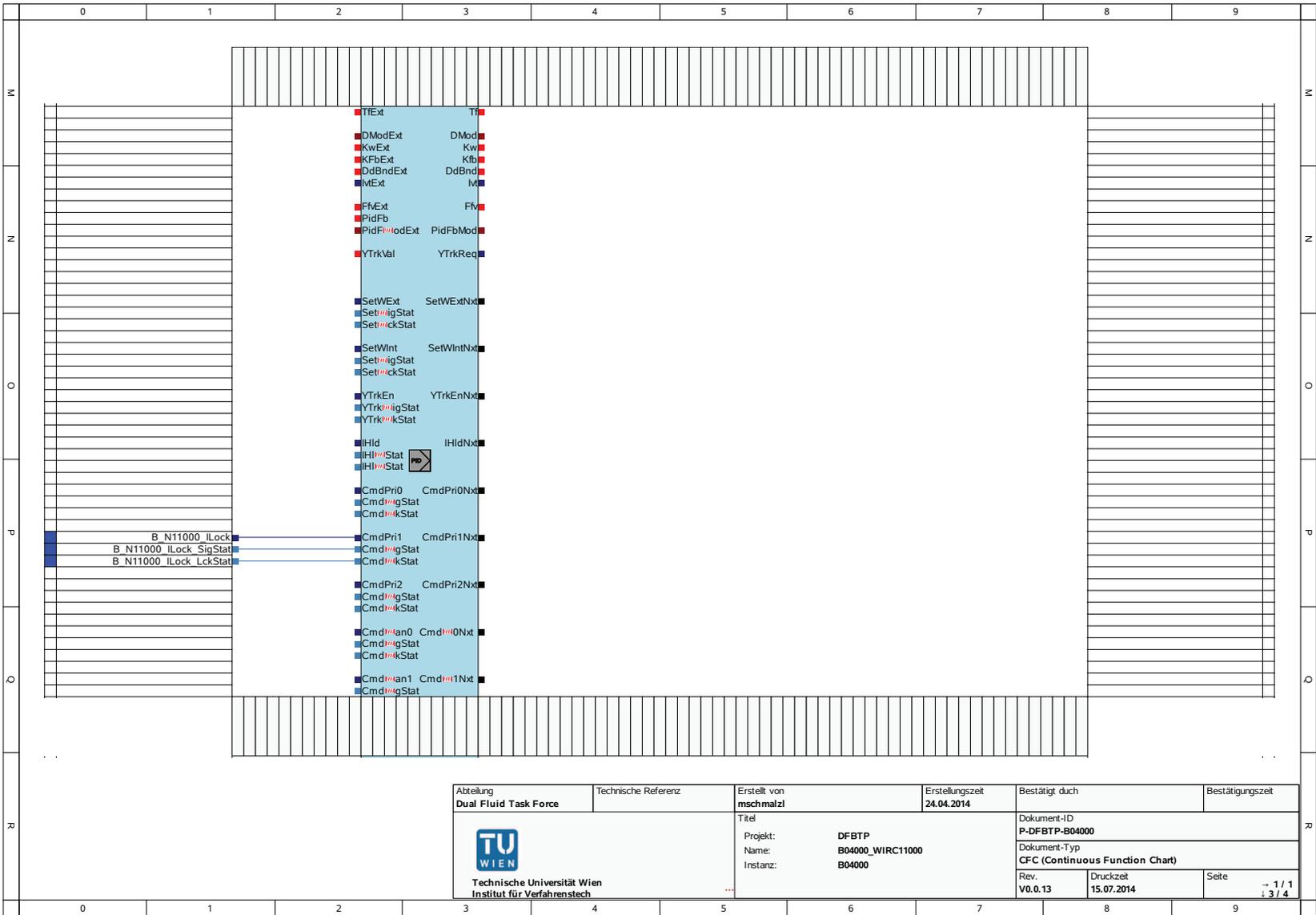


Abb. B.8: Funktionsplan WIRC11000 3/4

Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalzl	Erstellungszeit 24.04.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstech		Titel Projekt: DFBTP Name: B04000_WIRC11000 Instanz: B04000		Dokument-ID P-DFBTP-B04000 Dokument-Typ CFC (Continuous Function Chart)	
		Rev. V0.0.13	Druckzeit 15.07.2014	Seite → 1 / 1 ↓ 3 / 4	

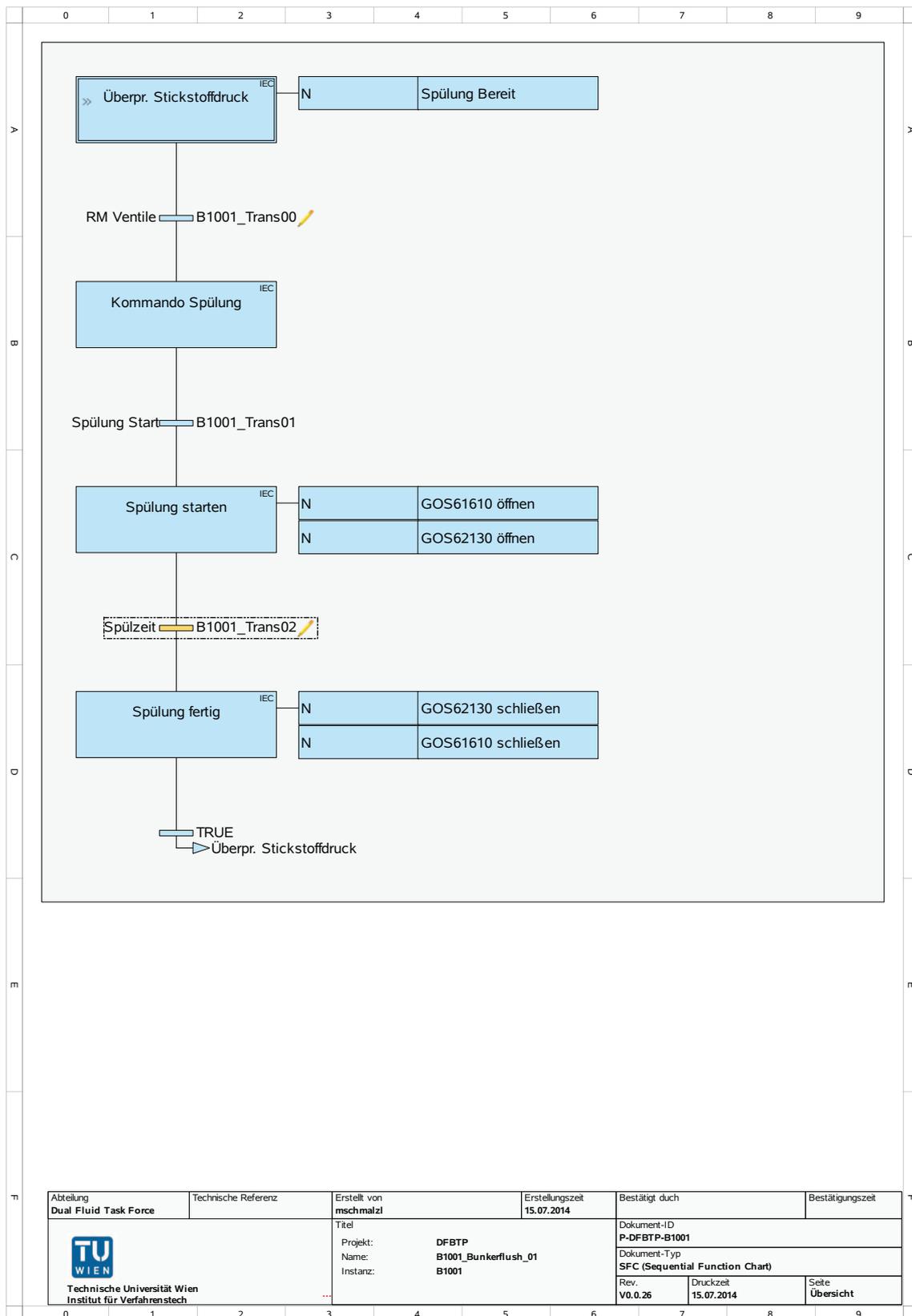
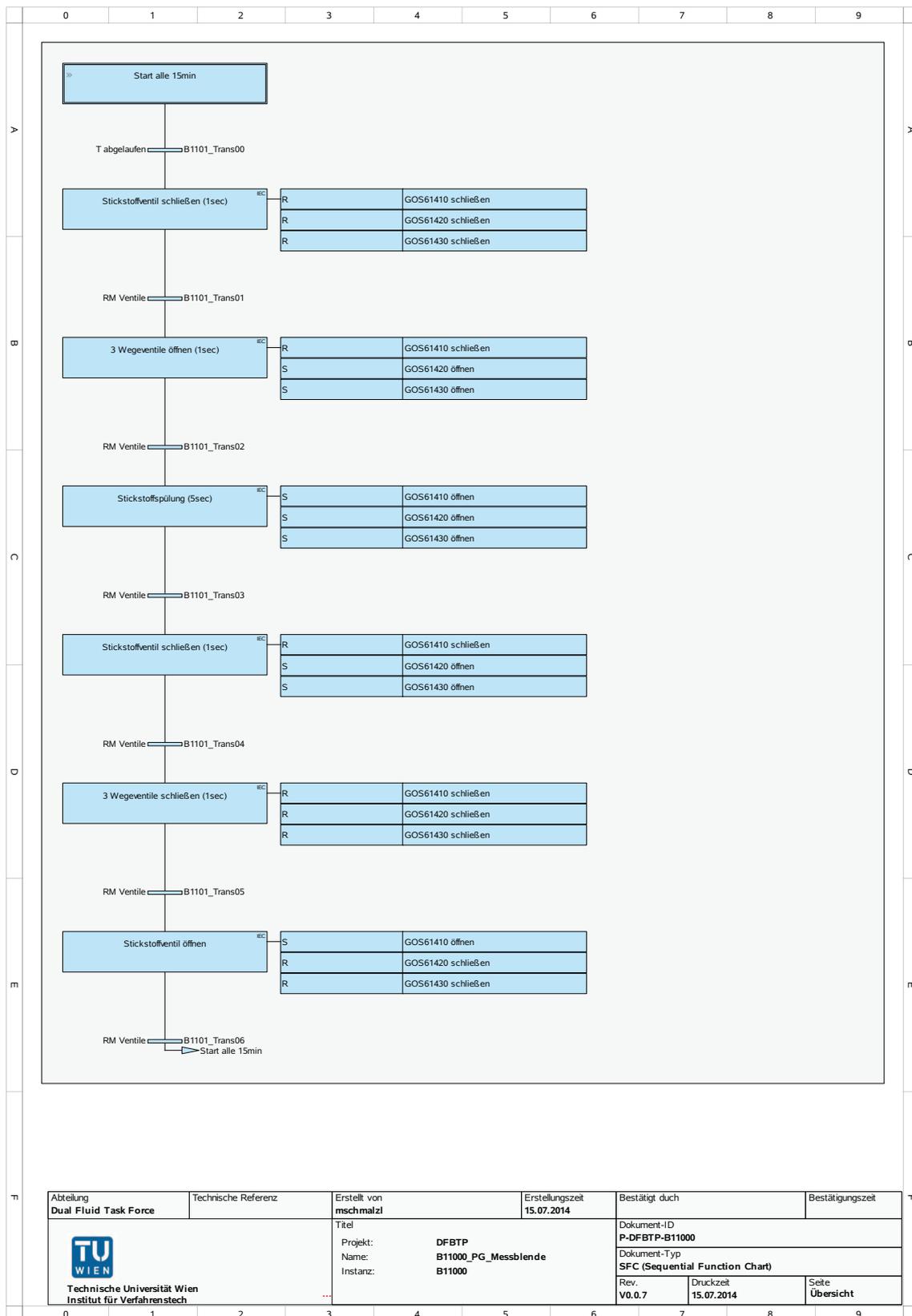


Abb. B.9: Schrittfolgen der Flushschneidung für Brennstoffbunker 1



Abteilung Dual Fluid Task Force	Technische Referenz	Erstellt von mschmalzl	Erstellungszeit 15.07.2014	Bestätigt durch	Bestätigungszeit
 Technische Universität Wien Institut für Verfahrenstechnik	Titel Projekt: DFBTP Name: B11000_PG_Messblende Instanz: B11000			Dokument-ID P-DFBTP-B11000	
	Dokument-Typ SFC (Sequential Function Chart)				
	Rev. V0.0.7	Druckzeit 15.07.2014	Seite Übersicht		

Abb. B.10: Schrittfolgen der Spülung für Produktgasmessblende

Anhang C

Stoffdaten der Gaskomponenten

C.1 M -Molmasse

Die Molmassen in Tabelle C.1 sind der NIST-Datenbank (NIST Chemistry WebBook) entnommen.

Tab. C.1: Normdichten ausgewählter Komponenten

<i>M in g/mol</i>	<i>N₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>CO₂</i>	<i>O₂</i>	<i>H₂</i>	<i>CO</i>	<i>CH₄</i>	<i>C₂H₆</i>
	28,0134	18,0153	44,0095	31,9988	2,01588	28,0101	16,0425	30,0690

C.2 ρ Dichte

Die Dichten in Tabelle C.2 beziehen sich auf Normalbedingungen (1013mbar, 273,15K) sofern nicht anders angegeben und sind der NIST-Datenbank entnommen.

Tab. C.2: Normdichten ausgewählter Komponenten

ρ in <i>kg/m³</i>	<i>N₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>CO₂</i>	<i>O₂</i>	<i>H₂</i>	<i>CO</i>	<i>CH₄</i>
	1,2501	0,5975	1,9763	1,4103	0,0899	1,2502	0,7173

C.3 η Dynamische Viskosität

Die Viskosität wird nach Gleichung C.3 berechnet. Die Koeffizienten A,B,C,D,E sind in Tabelle C.3 aufgelistet und sind aus [57] entnommen.

$$\frac{\eta}{\mu Pas} = A + B \frac{T}{K} + C \left(\frac{T}{K} \right)^2 + D \left(\frac{T}{K} \right)^3 + E \left(\frac{T}{K} \right)^4 \quad (C.1)$$

Tab. C.3: Koeffizienten zur Berechnung der dynamischen Viskosität

η in μPas	N_2	H_2O	CO_2	O_2	H_2	CO	CH_4
$10^5 A$	-0,0102	-0,10718	-0,18024	-0,10257	0,18024	0,01384	-0,07759
$10^7 B$	0,74785	0,35248	0,65989	0,92625	0,27174	0,74306	0,50484
$10^{10} C$	-0,59037	0,03575	-0,37108	-0,80657	-0,13395	-0,62996	-0,43101
$10^{12} D$	0,0323	0	0,01586	0,05113	0,00585	0,03948	0,03118
$10^{15} E$	-0,00673	0	-0,003	-0,01295	-0,00104	-0,01032	-0,00981

C.4 c_p spez. isobare Wärmekapazität

Die spezifische isobare Wärmekapazität wird nach Gleichung C.4 berechnet. Die Koeffizienten A,B,C,D,E sind in Tabelle C.4 aufgelistet und sind aus [57] entnommen.

$$\frac{c_p}{J/kgK} = A + B\frac{T}{K} + C\left(\frac{T}{K}\right)^2 + D\left(\frac{T}{K}\right)^3 + E\left(\frac{T}{K}\right)^{-2} \quad (\text{C.2})$$

Tab. C.4: Koeffizienten zur Berechnung der spezifischen isobaren Wärmekapazität

c_p in J/kgK	N_2	H_2O	CO_2	O_2	H_2	CO	CH_4
A	1049,9	1833,1	617,3	885,4	13973,4	1048,4	1282,5
B	-0,158	-0,035	0,95	0,071	1,256	-0,152	2,828
$10^3 C$	0,439	0,696	-0,388	0,277	-0,892	0,477	1,308
$10^6 D$	-0,166	-0,215	0,05	-0,143	-0,66	-0,19	-0,879
$10^6 E$	-0,016	-0,026	0,189	-0,004	-0,229	-0,022	-0,074

Anhang D

Weiterführende Dokumentation zur Kaltinbetriebnahme

D.1 Bettmaterial für Kaltversuch

Das Bettmaterial Olivin inklusive Datenblätter wurden von der Firma Magnolithe GmbH geliefert. Die Eigenschaften des Bettmaterials und der Analysereport des Laserbeugungsverfahrens der Firma Malvern (Mastersizer 2000 [65]) sind hier dargestellt.

Tab. D.1: Eigenschaften des Bettmaterials Olivin, eingesetzt bei Versuchen

chemische Analyse	
<i>MgO</i>	47,5 – 50,0%
<i>SiO₂</i>	39,0 – 42,0%
<i>CaO</i>	max. 0,4%
<i>Fe₂O₃</i>	8,0 – 10,5%
Glühverlust	0,20%
Schüttgewicht	1,40 – 1,55 kg/dm ³
Raumgewicht	2,8 – 2,9 kg/dm ³
Gesamtporosität	13,0 – 14,0%
Scheinbare Porosität	8,5 – 9,5%
Wasseraufnahme	2,9 – 3,5%



Analyse Report

Probenname: Gemittelttes Ergebnis **SOP Name:** Olivin Bett Mikrorinne **Gemessen:** Dienstag, 05. August 2014 16:18:14
Probenherkunft: Factory = WS **Operator:** gmausch **Berechnet:** Dienstag, 05. August 2014 16:18:14
Probenreferenz: A **Datenursprung:** Gemittelt

Probenmaterial: Aluminium silicate **Dispergiemodul:** Scirocco 2000 (B) **Abschattung:** 3.01 %
Partikel RI: 1.650 **Absorption:** 0.1 **Analysemodell:** Monomodale Verteilung
Dispergiertfluid: **Meßbereich:** 0.020 to 2000.000 um **Fit(gewichtet):** 0.804 %
Fluid RI: 1.000 **Emulation:** Aus

Konzentration: 0.0123 %Vol **Vol. Mittelwert D[4,3]:** 151.110 um **Spezifische Oberfläche:** 0.0496 m²/g
Breite : 1.071 **Gleichförmigkeit:** 0.335 **D[3,2]:** 121.088 um
Verteilungsart: Volumen

d(0.1): 76.620 um **d(0.5):** 145.738 um **d(0.9):** 232.743 um



Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)	Größen-	Häufigkeit (%)						
0.010	0.00	0.105	0.00	1.095	0.00	11.482	0.00	120.225	11.76	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	138.038	13.20	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	158.489	13.23	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	13.23	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.853	0.08	208.930	11.60	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.28	239.883	8.53	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.30	275.423	5.13	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.30	318.228	2.57	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.38	363.078	0.77	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.58	416.889	0.04	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	0.79	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	1.04	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	1.49	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	2.29	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	3.52	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	5.20	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	7.28	1095.478	0.00		
0.105	0.00	1.095	0.00	11.482	0.00	120.225	9.61	1258.925	0.00		

Kommentar: Mittelwert der 5-Messungen aus Kieselgur_Feinfraktion_V7_12000

Abb. D.1: Analysereport der Volumenverteilung des Bettmaterials Olivin