

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Nick Bollfraß

Vorname Nachname

Elektrotechnik, 2009, 4051128

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Selbstparametrierende Steuerung für den
Guss von Sanitärkeramik**

Herr Prof. Dr. Wolfgang Günther

Vorsitzende/r der Bachelorprüfungskommission

Herr Prof. Dr. Wolfgang Günther

1. Prüfer/in

Herr Prof. Dr. Marc Enzmann

2. Prüfer/in

21.03.2014

Abgabe am

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre/n ich/wir, dass die Arbeit selbständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Köthen, 14.03.2014

Ort, Datum

Unterschrift/en der/des Studierenden

Sperrvermerk

Sperrvermerk:

ja

nein

wenn ja:

Der Inhalt der Arbeit darf Dritten ohne Genehmigung der/des (Bezeichnung des Unternehmens) nicht zugänglich gemacht werden. Dieser Sperrvermerk gilt für die Dauer von X Jahren.

Köthen, 14.03.2014

Ort, Datum

Unterschrift/en der/des Studierenden

Angaben zum Unternehmen

Wir schaffen bleibende Werte
KERAMAG
Part of the Sanitec Group



Name des Unternehmens	KERAMAG Keramische Werke Haldensleben GmbH
Abteilung	Gießerei für Waschtische
Name des Betreuers	Dipl.-Ing. Reinhard Gratzke

Kontaktdaten

Anschrift des Standortes, an dem die Arbeit verfasst wurde	KERAMAG Keramische Werke GmbH Industriestr. 10, 39340 Haldensleben
E-Mail-Adresse des Betreuers	Reinhard.Gratzke@keramag.de

Kurzfassung

In der Firma KERAMAG wird für den Guss von Sanitärkeramik das Hohlgussverfahren angewendet. Bei diesem Gießverfahren treten Fehlerbilder auf, die die Qualität negativ beeinflussen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist den Gießprozess zu optimieren, damit sich die komplexen physikalischen Eigenschaften des Schlickers weniger stark auf den technologischen Ablauf des Gießprozesses auswirken. Dazu wird eine intelligente Softwarelösung (automatische Eingießsteuerung) erarbeitet, die die herkömmliche elektromechanische Steuerung ablöst.

Als erstes werden der Aufbau und die Funktionsweise der herkömmlichen Gießanlage analysiert und die Einflüsse auf den technologischen Ablauf des Gießprozess untersucht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Analyse werden Lösungsansätze zur Optimierung des Gießprozesses abgeleitet.

Mit den Anforderungen die sich aus den Lösungsansätzen ergebenen, wird eine geeignete Hardware für die Steuerungskomponenten des Automatisierungssystems ausgewählt.

Auf Grundlage der ermittelten Steuerungsaufgaben wird mit SIMATIC-STEP7 ein Automatisierungsprojekt erstellt. Dabei sind die behandelten Schwerpunkte die „Selbstparametrierung und Optimierung der Eingießkurve“ und die „gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils“.

Die vorgeschlagenen Lösungen werden an einer Gießanlage installiert und es wird der Nachweis erbracht, dass die Aufgabenstellung vollständig umgesetzt werden konnte.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung in die Thematik	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik	2
2.1	Gießanlage	2
2.2	Schlicker	3
2.3	Gießfehler	5
2.3.1	Poren	5
2.3.2	Wölbungen, Dellen und Risse am Massenzusammenschlag	5
2.4	Das Hohlgußverfahren	7
2.4.1	Aufgliederung in einzelne Prozessschritte	7
2.4.2	Fehler in den Prozessschritten	11
2.4.3	Untersuchung der Prozessschritte	12
2.4.4	Lösungsansätze zur Minimierung der Gießfehler	16
2.5	Füllstandsmessung	17
2.5.1	Messung mit Mikrowelle	19
2.5.2	Auswahl des Füllstandsensors	21
2.6	Regelventil	22
2.6.1	Armatür	22
2.6.2	Stellantrieb	23
2.7	Automatisierungssystem	24
2.7.1	Zentralbaugruppe (CPU)	24
2.7.2	Bussystem PROFIBUS-DP	25
2.7.3	Dezentrale Prozessperipherien	25
2.7.4	Bedienterminal (HMI)	26
3	Automatische Eingießsteuerung	27
3.1	Konzept	27
3.1.1	Mechanische Einbindung	28
3.1.2	Elektrische Einbindung	28
3.1.3	Steuerungsaufgaben der Prozessschritte	32
3.2	Regelung	41
3.2.1	Aufgabe und Funktion des Regelkreises	41
3.2.2	Typisierung der Strecke	42
3.2.3	Ermitteln der optimalen Reglereinstellungen	42
3.2.4	Reglerstellgrad als Maß für den Füllstand im Formenpaket	44
3.3	Das Automatisierungsprojekt	45
3.3.1	Hardwarekonfiguration	45
3.3.2	Programmstruktur	47
3.3.3	Selbstparametrierung und Optimierung der Eingießkurve im FB5	51
3.3.4	Gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils im FB4	54
3.4	Erreichte Ergebnisse	56
4	Zusammenfassung und Ausblick	58
	Symbol- und Indexverzeichnis	i
	Abbildungsverzeichnis	ii
	Tabellenverzeichnis	iv

Literaturverzeichnis

Lebenslauf

Danksagung

v

viii

ix

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Einleitung in die Thematik

Für den Guss von Sanitärkeramik gibt es verschiedene Formgebungsverfahren. In der Firma KERAMAG wird das Hohl-gussverfahren angewendet, da dieses Verfahren ein hohes Maß an Homogenität erreicht und die Herstellung komplizierter Geometrien ermöglicht. Hierbei wird eine gießbare wässrige Suspension der Masse (Schlicker) in Gipsformen gegossen. Die Gipsform entzieht durch ihre Porosität dem Schlicker das Wasser, wodurch er sich verfestigt. Der so entstandene Scherben setzt sich an der Oberfläche der Gipsform ab und bleibt nach dem Entleeren der Gipsform an ihr haften. Nach weiterem Stehenlassen trocknet der Formling etwas nach, wobei er von der Gipswandung abschwindet und sich von ihr löst. Danach kann die Form auseinandergenommen und der Rohling zur weiteren Verarbeitung getrocknet werden.

Bei diesem Gießverfahren treten Fehlerbilder auf, die die Qualitätsmerkmale stark mindern. Diese Fehler entstehen durch die komplexen physikalischen Eigenschaften des Schlickers, die sich im technologischen Ablauf des Gießprozesses negativ auswirken.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist den technologischen Ablauf des Gießprozesses so zu optimieren, dass die physikalischen Eigenschaften des Schlickers sich minimal auf die Qualität auswirken. Dadurch ergibt sich eine Einsparung von Arbeitszeit und Fertigungskosten. Dazu soll die herkömmliche elektromechanische Steuerung in der Gießerei für Waschtische ausgiebig untersucht und durch eine intelligente Softwarelösung abgelöst werden. Diese beinhaltet das Ausregeln von materialtechnischen Änderungen zur Gewährleistung konstanter Eingießzeiten unabhängig von Modell, Schlickerparameter und Formqualität, sowie eine einfache Bedienbarkeit des Systems.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel sollen der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise einer herkömmlichen Gießanlage diskutiert werden, um die Einflüsse des technologischen Ablaufs im Gießprozess auf die Eigenschaften des Schlickers hin zu untersuchen. Dazu sollen als erstes die Gießanlage vorgestellt und die Eigenschaften des Schlickers erläutert werden. Nach ausführlicher Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Gießfehler soll der Eingießprozess detailliert untersucht werden, um Lösungsansätze zur Fehlerminimierung zu finden.

Da die Steuerungstechnik der Gießanlagen seit ca. 30 Jahren nicht weiterentwickelt wurde und kaum Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Verfahrenstechnik und Gießfehlern vorliegen, ist eine detailliertere Betrachtung notwendig, um eine intelligente Softwarelösung (Automatisierungssystem) zu entwickeln.

2.1 Gießanlage

Die Gießerei für Waschtische beinhaltet z.Z. 20 Gießanlagen. Das Schema einer einzelnen Gießanlage ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Sie besteht aus einem Formenpaket, das aus bis zu 52 einzelnen Formen besteht, einem komplexen Rohrsystem für die Zu- und Rückführung von Schlicker und Wasser, eine Füllstandsregelung im Ausgleichsbehälter, eine Druckluftversorgung, sowie ein Drehkolbengebläse welches die benötigte große Luftmenge erzeugt. Zusätzlich ist eine Raumheizungsanlage installiert, die einen Rücktrocknungsprozess der Gipsformen und Artikel ermöglicht.

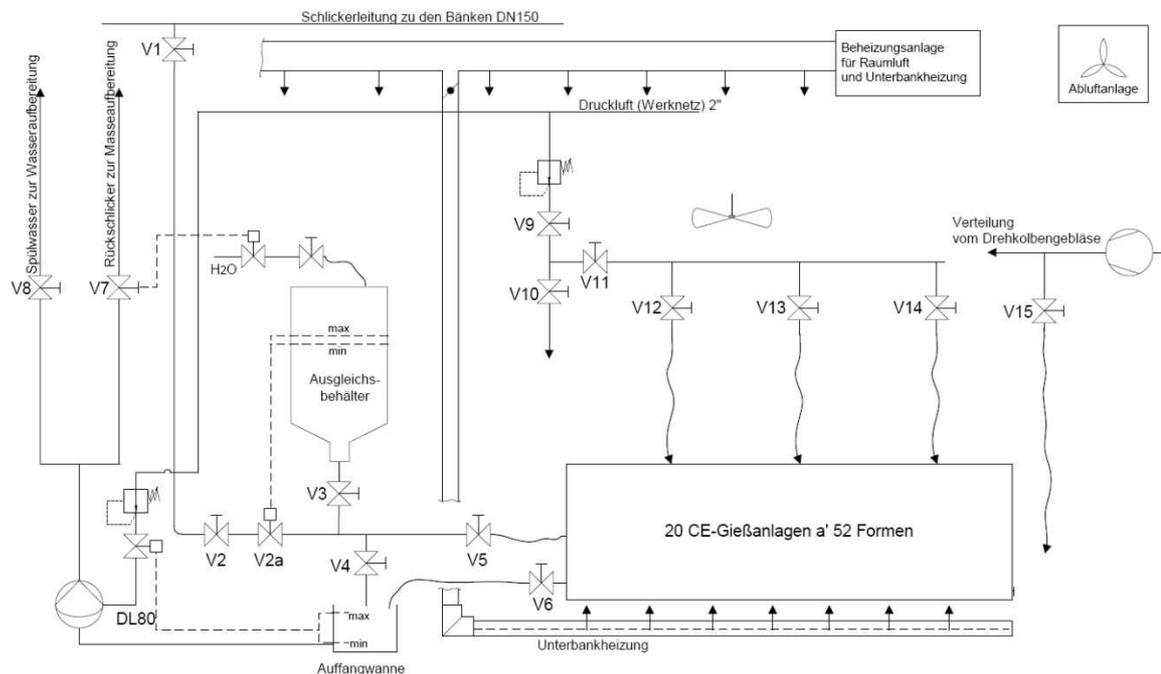


Abbildung 2.1: Anlagenschema einer konventionellen Gießanlage

Das gesamte Gießverfahren wird bis auf eine Ausnahme über manuelles Stellen der Ventile gesteuert. Auf das Automatikventil V2a wirkt eine Zweipunktregelung mit einer sehr kleinen Schalthysterese, die den Füllstand im Ausgleichsbehälter reguliert. Diese Zweipunktregelung wird über ein Niveaurelais realisiert, dessen Elektroden direkt im Ausgleichsbehälter installiert sind. Über manuelles Stellen der Ventile V2 und V5 reguliert das Bedienpersonal (Eingießer) zum einen die Gießgeschwindigkeit und hat zum anderen Einfluss auf das Schaltverhalten der

Zweipunktregelung. Alle anderen Ventile sind während des Eingießprozesses in Ruhestellung und entsprechend komplett geöffnet oder geschlossen. In diesem Prozess bilden sich durch die Eigenschaften des Schlickers Fehler aus, die in Verbindung mit dem technologischen Ablauf und den Anlageneinstellungen stehen.

2.2 Schlicker

[GAU00]: „Schlicker sind kolloid- bis grobdisperse Systeme, die als nicht newton'sche Flüssigkeiten anzusehen sind. Ein typischer Schlicker ist eine strukturviskose Flüssigkeit mit kleiner Fließgrenze ($\tau_f < 5\text{Pa}$) und hoher Viskosität ($< 2\text{Pa}$ bei $D=1$ bis 10s^{-1} , „Sahnekonsistenz“) und hohem Feststoffgehalt ($> 70\text{ Gew.}\%$).“

Der Schlicker ist eine gießbare, wässrige Suspension. Mit ihm kann man in verschiedenen Gießverfahren Formlinge herstellen, die bei hohen Temperaturen, ohne wesentliche Deformation und Aufschmelzen, zu einem dichten Formstück gesintert werden können. Die drei Grundstoffe im Schlicker sind Quarz, Feldspat und Kaolin (Tonmineral). [HS01]

Die im Schlicker enthaltenen Tonminerale liegen in Plättchenform vor und besitzen eine sehr hohe spezifische Oberfläche. Zudem weisen die Flächen und Kanten dieser einzelnen Tonmineralteilchen unterschiedliche elektrische Ladungen auf, was zu Wechselwirkungen zwischen den Teilchenoberflächen führt. Durch diese Ladungsunterschiede können sich die Tonmineralteilchen in eine energiearme Position zueinander ausrichten. Wird der Schlicker bewegt können sich Bereiche ausbilden, in denen sich die Tonmineralteilchen in Strömungsrichtung ausrichten. Dieser Vorgang nennt sich erzwungene Ausrichtung. Kommt der Schlickerfluss zum Stillstand, können sich Kartenhausstrukturen oder Bänderstrukturen ausbilden (Vgl. Abbildung 2.2). Werden diese Strukturen beim Befüllvorgang der Formen durch das Einwirken äußerer Scherkräfte verändert, richten sich die Teilchen während der Ruhephase erneut in eine energiearme Position zueinander aus. Unter gewissen Voraussetzungen verläuft diese Restrukturierung nicht homogen. Es können sich Superpositionen ausbilden, die durch ihre Lage zueinander bei der Trockenschwindung (2-4%) sowie bei der Brennschwindung (10-12%) eine lokal differierende Schwindung zur Folge haben (Vgl. Abbildung 2.3). Die Ursache dafür liegt in der Anisotropie der Tonmineralteilchen, deren Schwindung entlang der Fläche (X-/Y-Achse) einen anderen Betrag als entlang der Kanten (Z-Achse) aufweist. [HIL13]

Bei den durch die Schwindungsdifferenzen auftretenden Fehlerbildern spricht man von Wölbungen, Dellen und Rissen an Massenzusammenschlägen. Diese führen zu geometrischen Verformungen und somit zur Qualitätsminderung und zum Ausschuss der produzierten Ware.

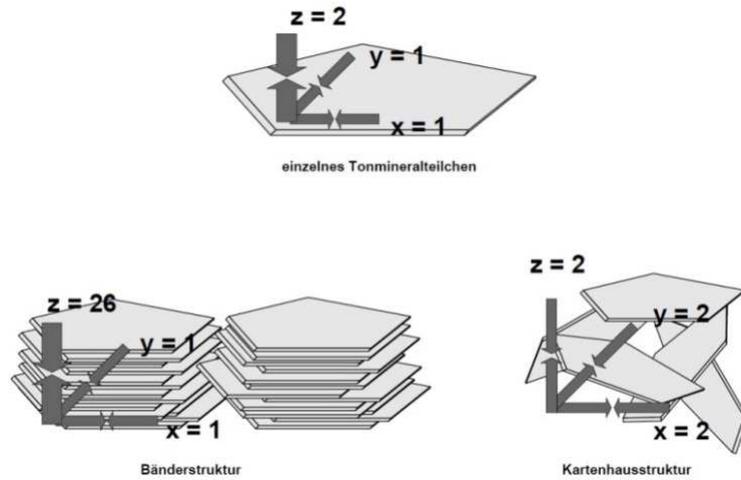


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der anisotropen Schwindungsbeträge verschiedener Strukturen [HIL13]

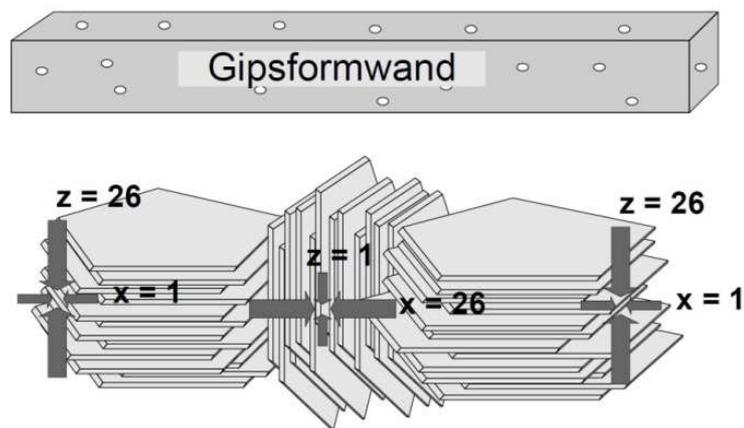


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer lokal differierenden Schwindung [HIL13]

Des Weiteren neigt der Schlicker durch seine thixotropen¹ Eigenschaften dazu Luft aufzunehmen und zurückzuhalten, was bei den weiteren Produktionsschritten Oberflächenfehler (Poren) hervorrufen kann. In den nächsten Abschnitten sollen die möglichen Fehlerbilder ausführlich beschrieben werden.

¹ Thixotropie bezeichnet eine Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften, bei der die Viskosität (Zähflüssigkeit) bei Stillstand zunimmt und in Folge einer mechanischen Beanspruchung reversibel abnimmt.

2.3 Gießfehler

Gießfehler haben vielseitige Ursachen und sind nicht nur an einem Faktor festzumachen. Schlickerparameter, Eigenschaften der Gipsformen, Temperaturunterschiede und Eingießtechnik wirken sich auf die Gießfehler aus. Im Folgenden sollen mögliche Ursachen für die Entstehung von Poren sowie Wölbungen, Dellen und Rissen am Massenzusammenschlag näher erläutert werden.

2.3.1 Poren

Poren sind stecknadelkopfgroße, kraterartige Vertiefungen an der Oberfläche des Formlings. Sie entstehen während des Eingießvorganges, wenn die Luft die der Schlicker mit sich führt keine Möglichkeit hat zu entweichen und sich an der Oberfläche der Gipsform absetzt. Manche dieser Lufteinschlüsse sind nach dem Entformen nur sehr schwer zu erkennen. In seltenen Fällen sieht man ein sehr kleines Loch auf der Oberfläche des Formlings, wo sich die Pore unter einer dünnen Schlickerhaut verbirgt. Wird die Pore nach dem Entformen nicht erkannt und beseitigt, wird die Luft im Brennvorgang durch die aufgebraute Glasur entweichen und es bildet sich ein stecknadelkopfgroßes Loch aus (vgl. Abbildung 2.4).

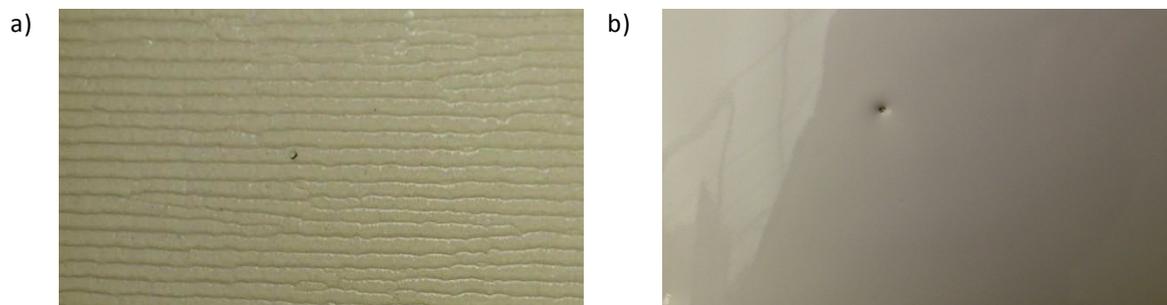


Abbildung 2.4: a) Pore nach der Entformung

b) Pore nach dem Brand

Wie unter Abschnitt 2.2 beschrieben, neigt der Schlicker dazu Luft aufzunehmen und zurückzuhalten. Durch zu schnell laufende, undichte Pumpen kann bereits bei der Beförderung in die einzelnen Tagesbehälter der Gießereien Luft in den Schlicker eingebracht werden. Ebenso kann durch zu schnelles Rühren in den Tagesbehältern, oder durch eine falsche Bedienung der Gießanlage Luft in den Schlicker eingebracht werden. Wird beispielsweise der alte mit Luft durchsetzte Schlicker in der Gießleitung nicht vor dem Guss abgelassen, oder werden durch zu hohe Gießgeschwindigkeiten Turbulenzen in den Formen oder Gießkanälen erzeugt, kann der Anteil an Poren steigen.

2.3.2 Wölbungen, Dellen und Risse am Massenzusammenschlag

[HIL13]: „Der Massenzusammenschlag erfolgt zwangsläufig bei jedem Gießprozess. Er tritt dann auf, wenn beim Befüllen der Form mehrere Schlickerströme zusammenfließen, nachdem sie z.B. in die Form integrierte Einbauteile von zwei Seiten umspült haben oder wenn sie beim Abschluss des Befüllvorganges an der oberen Formenwand aufeinandertreffen. Unmittelbar nach dem Entformen hebt sich der begrenzte Bereich des Schlickerzusammenschlages auf dem feuchten Teil als dunkle Verfärbung vom übrigen Scherben ab. Diese Markierungen verschwinden jedoch allmählich wieder, wenn die Oberfläche des Grünscherbens² zu trocknen beginnt. Die farblichen Unterschiede führen während des Brandes nur sporadisch an vereinzelt Stücken zu einem Fehler. Somit kann man allein anhand der Verfärbung nicht vorhersagen, ob und wann dieser

² Als Grünscherben wird der frisch entformte, noch nicht getrocknete Rohling bezeichnet.

auftritt. Nur in seltenen Fällen kündigt sich der Fehler bereits vor dem Brand in Form einer leichten Deformation oder eines Mikrorisses an.“

Der Massenzusammenschlag kann sich in vielfältiger topographischer Unregelmäßigkeit auswirken. Die Verformungen befinden sich hauptsächlich an der Außenseite des Formlings und charakterisieren sich in verschiedenen Fehlerbildern (vgl. Abbildung 2.5).

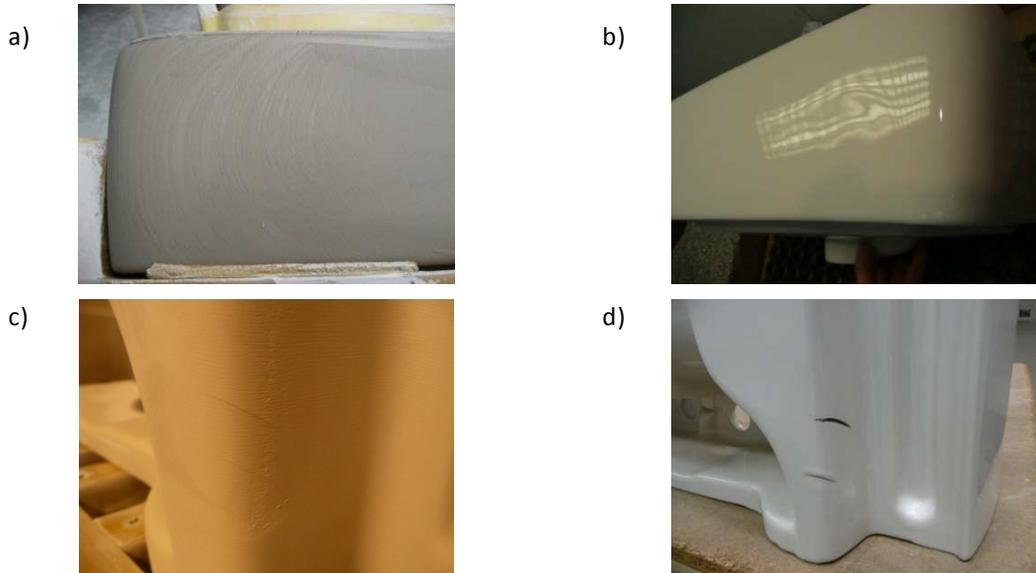


Abbildung 2.5: a) Massenzusammenschlag an der Zarge eines Waschtisches
 b) Wölbung an der Zarge eines Waschtisches nach dem Brand
 c) Gießfleck an der Einfüllöffnung
 d) Gießfleckriss nach dem Brand

Die Ausbildung der Massenzusammenschläge im Rückwandbereich ist vorrangig bei langen Eingießzeiten zu beobachten. Vermutlich verläuft dort die Restrukturierung der Tonmineralteilchen speziell bei langsam strömenden Schlicker inhomogen. Eine mögliche Ursache ist das Einfüllröhrchen in unmittelbarer Nähe, wodurch eine ständige Bewegung des Schlickers in diesem Bereich hervorgerufen wird und durch die andauernden Scherkräfte des einfließenden Schlickers die Ausrichtung der Tonmineralteilchen ständig unterbrochen wird. Im Bereich der Zarge ist die Tendenz zu Massenzusammenschlägen hingegen bei schnellen Gießvorgängen zu beobachten. Vermutlich ist hier die Schlickerströmung in der Form ausschlaggebend. Diese wird durch die Füllstandsunterschiede während des Eingießprozesses in den Gipsformen hervorgerufen (Vgl. Abbildung 2.6).

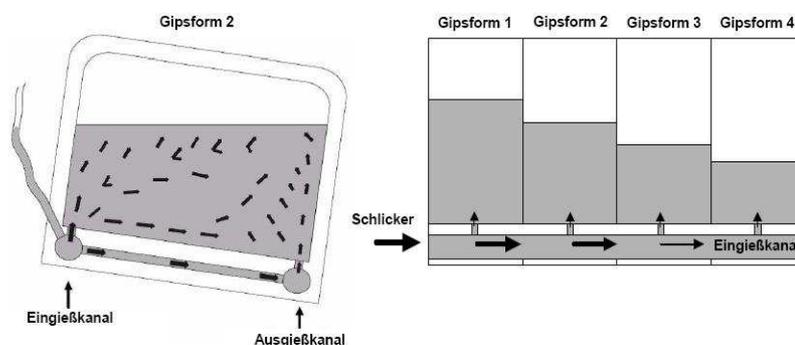


Abbildung 2.6: Strömung im Formeninneren mit Füllstandsunterschied beim Eingießprozess

2.4 Das Hohl-gussverfahren

Im Folgenden soll das gesamte Hohl-gussverfahren betrachtet werden. Dazu wird der Prozess in einzelne Prozessschritte unterteilt, um dann Lösungsansätze zur Optimierung des Eingießprozesses, sowie zur Minimierung der unter Abschnitt 2.3 beschriebenen Fehler (Poren und Massenzusammenschläge) und deren Ursachen herauszuarbeiten. Hierbei werden alle Prozessschritte die mit dem Eingießprozess, der elektromechanischen Steuerung und den Fehlern aus Abschnitt 2.3 in Zusammenhang stehen detailliert betrachtet und die schematischen Darstellungen der Anlage entsprechend der benötigten Bauteile vereinfacht dargestellt.

2.4.1 Aufgliederung in einzelne Prozessschritte

Wie bereits unter Abschnitt 2.1 beschrieben, wird das gesamte konventionelle Gießverfahren bis auf eine Ausnahme über das manuelle Stellen der Ventile gesteuert. Auf das Automatikventil V2a wirkt eine Zweipunktregelung im Ausgleichsbehälter, die durch eine kleine Schalthysterese und einen Ausschaltpunkt von 20cm über Formenoberkante einen konstanten Gießdruck realisieren soll. Diese Zweipunktregelung kann über einen Steuerschalter ausgeschaltet, in Handbetrieb (dauernd geöffnet), oder in Automatik betrieben werden. Im Automatikbetrieb steuert ein Niveaurelais, dessen Füllstandselektroden im Ausgleichsbehälter installiert sind, das Ventil V2a an (Vgl. Abbildung 2.7). Alle anderen Ventile können zwischen 0% und 100% entsprechend der anstehenden Prozesse vom Anlagenbediener gestellt werden (Vgl. Abbildung 2.1).

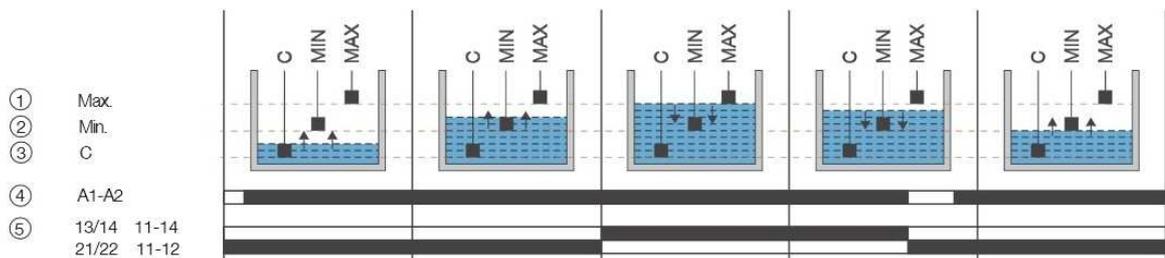


Abbildung 2.7: Funktionsweise der Zweipunktregelung im Ausgleichsbehälter [ABB14]

Schritt 1 Abzapfen

Im ersten Schritt wird der durch die Trocknungsperiode erhitzte, in den Leitungen abgestandene Schlicker in einer definierten Zeit in die Auffangwanne abgelassen. Dieser Vorgang nennt sich Abzapfen. Dazu wird das Ventil V2 ca. 30% geöffnet und die Zweipunktregelung für V2a auf Automatik gestellt. Da sich kein Schlicker im Ausgleichsbehälter befindet, bleibt V2a geöffnet und der Schlicker kann über V4 in die Auffangwanne fließen und über V7 zurück zur Masseaufbereitung gepumpt werden. (vgl. Abbildung 2.8).

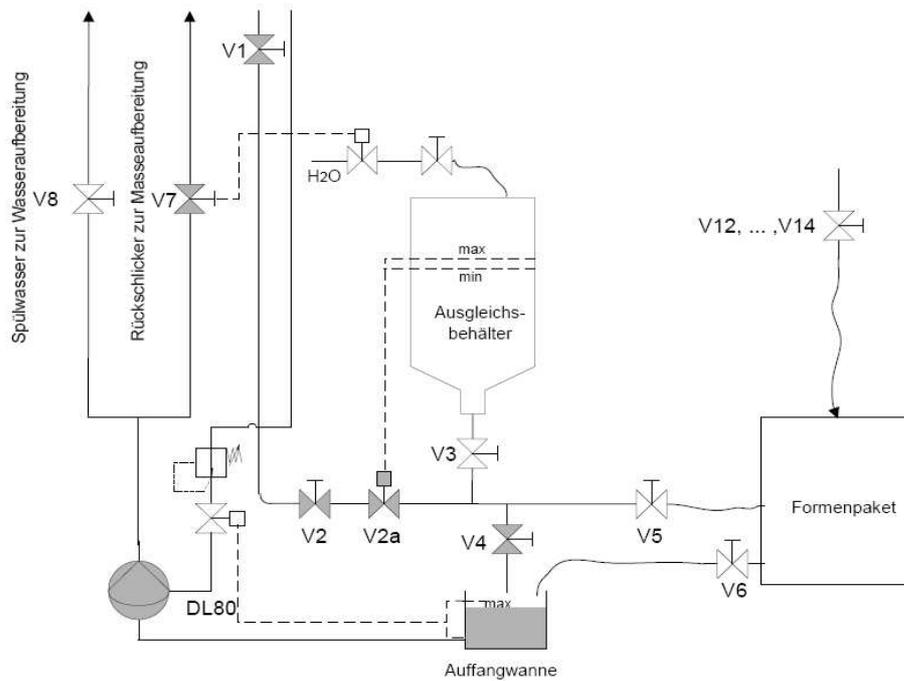


Abbildung 2.8: Ausschnitt aus dem Anlagenschema beim Abzapfen

Schritt 2 Behälterfüllen

Ist der Abzapfvorgang abgeschlossen, wird V2 in Eingießstellung gebracht und V4 langsam geschlossen. Hierbei soll sich der Ausgleichsbehälter langsam füllen. Hat der Füllstand seinen Maximalwert erreicht, schließt sich das Ventil V2a, und der Eingießprozess kann gestartet werden (vgl. Abbildung 2.9).

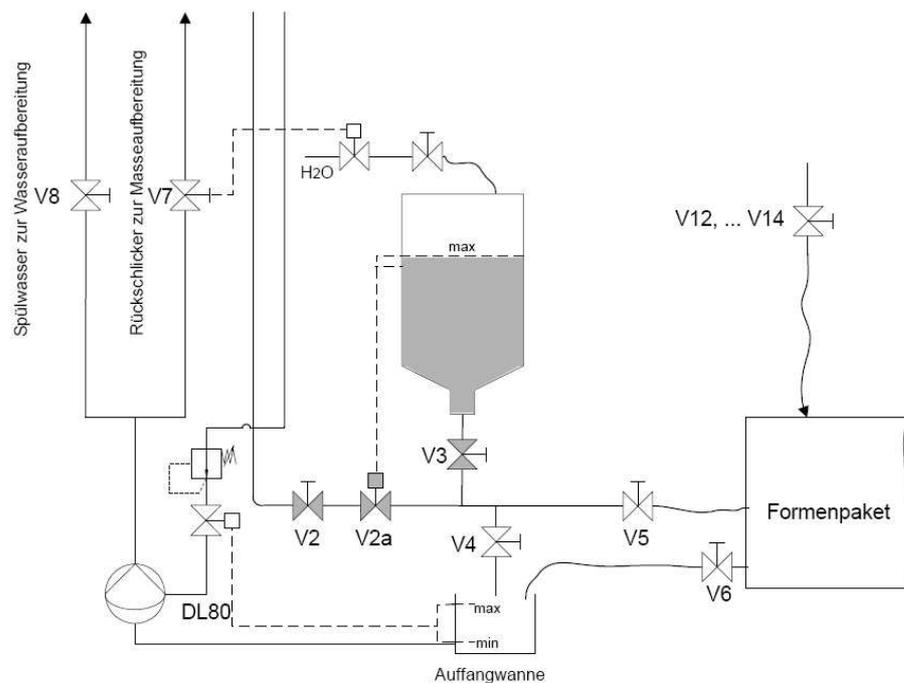


Abbildung 2.9: Ausschnitt aus dem Anlagenschema beim Behälter füllen

Schritt 3 Eingießen

Zum Starten des Eingießprozesses wird V5 geöffnet damit der Schlicker über das Eingießrohr in das Formenpaket fließen kann. Dabei entweicht die durch den einfließenden Schlicker verdrängte Luft im Eingießrohr über die Ventile V12-V14 und die verdrängte Luft im Formeninneren durch den Spalt der beiden Gipsformhälften (vgl. Abbildung 2.10).

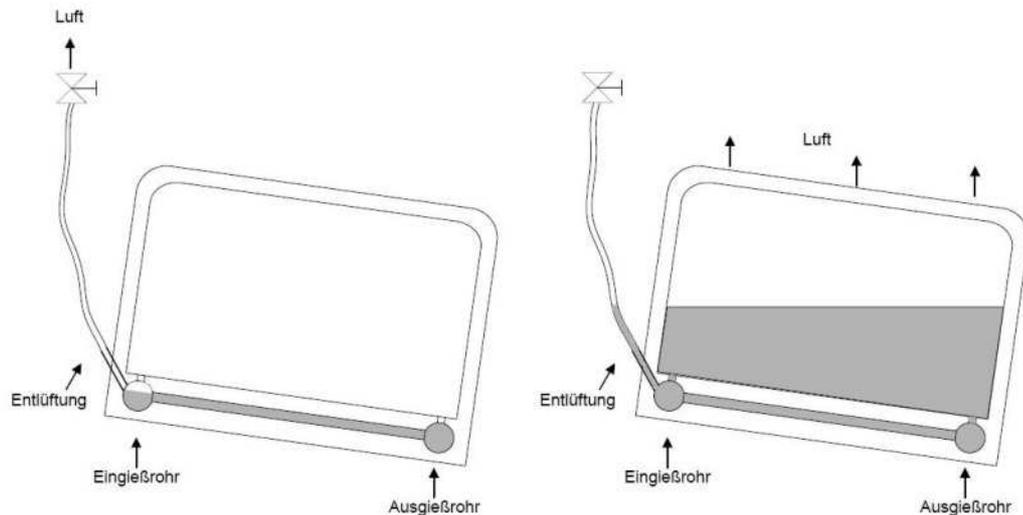


Abbildung 2.10: Querschnitt durch das Formenpaket während des Füllvorganges

Sind die Gipsformen mit Schlicker gefüllt, steigt der Schlicker in den Schläuchen der Ventile V12-V14 weiter an, bis das Niveau des Ausgleichsbehälter erreicht ist (vgl. Abbildung 2.11).

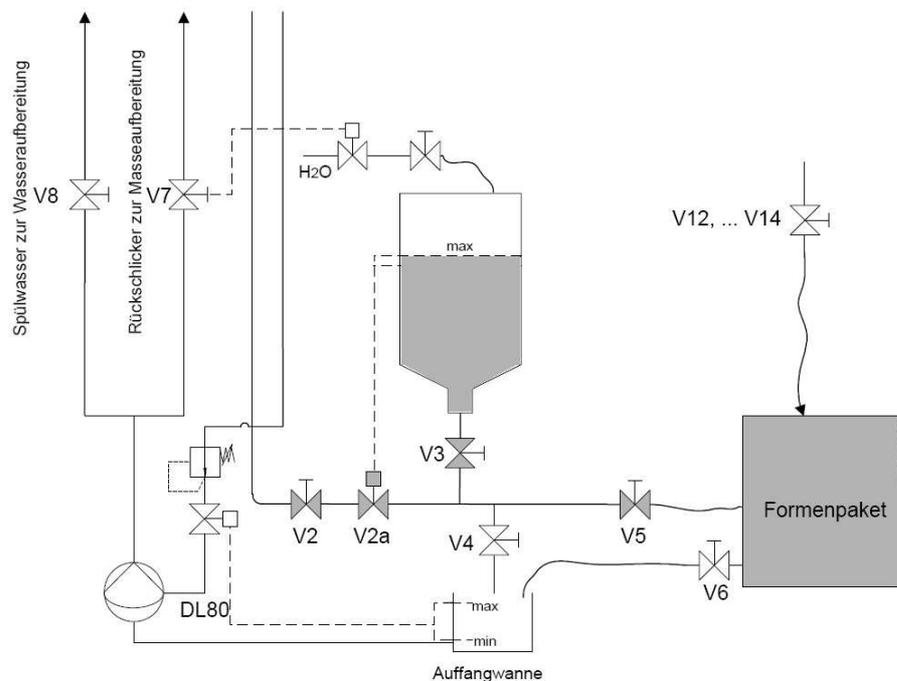


Abbildung 2.11: Ausschnitt aus dem Anlagenschema einer eingegossenen Gießbank

Schritt 4 Scherbenbildung

Ist das Formenpaket vollständig eingegossen, wird es je nach der gewünschten Scherbenstärke eine definierte Zeit stehen gelassen. Bei der Ausbildung des Scherbens wird dem Schlicker in den Gipsformen Flüssigkeit entzogen die in Form von Schlicker wieder zugeführt werden muss. Deshalb bleibt die Ausgleichsbehältersteuerung bis zum Ausgießprozess in Betrieb um ein Absinken des Füllstandes zu verhindern, sowie einen konstanten Druck bei der Scherbenbildung zu gewährleisten.

Eine detaillierte Betrachtung des Ausgießprozesses und den nachfolgenden Prozessschritten soll hier nicht vorgenommen werden, da sie nicht in einem unmittelbaren Zusammenhang mit den unter Abschnitt 2.3 beschriebenen Fehlern (Poren und Massenzusammenschläge) stehen. Sie werden nur zur vollständigen Betrachtung des Hohl-gussverfahrens erwähnt und grob beschrieben.

Schritt 5 Ausgießen

Ist die vorgegebene Standzeit abgelaufen, wird die Füllstandssteuerung ausgeschaltet und der Ausgießprozess gestartet. In diesem Prozessschritt wird der flüssige Schlicker, der sich nicht zu einem Scherben verfestigt hat, mittels Druckluft aus dem Formenpaket gedrückt und zurück zur Masseaufbereitung gepumpt.

Schritt 6 Pressen

Nachdem die Formen leergelaufen sind, wird das gesamte Formenpaket eine definierte Zeit unter Druck gelassen. Dieser Vorgang nennt sich Pressen. Hierbei wird der Formling der durch Schwindung und Unterdruck im Ausgießprozess nicht mehr vollständig an der Formenoberfläche anliegt, durch den Überdruck an die Formenoberfläche gepresst und ermöglicht so eine weitere Entwässerung durch den Kontakt mit der Gipsform.

Schritt 7 Ausblasen

Im letzten Arbeitsschritt muss der restliche flüssige Schlicker aus dem Ein- und Ausgießrohr noch abgeführt werden. Dazu wird Luft durch die Ein- und Ausgießrohre geblasen um den restlichen Schlicker abzuführen. Dazu wird die erforderliche Luftmenge von einem Drehkolbengebläsen bereitgestellt.

2.4.2 Fehler in den Prozessschritten

Aus den Erfahrungen der Gießerei treten in dem zuvor beschriebenen Hohlgußverfahren immer wieder Fehler auf, die sowohl anlagentechnisch als auch bedienungsabhängig sein können.

Im ersten Prozessschritt „Abzapfen“ ist das Ziel, den durch die Formenrücktrocknung stark erwärmten und mit Luft versetzten Schlicker aus der Hauptschlickerleitung abzulassen. Hierbei soll in einer definierten Zeit Schlicker abgelassen und zurück zur Masseaufbereitung gepumpt werden. Wird nicht lange genug, oder mit nicht ausreichender Schlickermenge abgezapft, nimmt das Risiko, dass sich die unter Abschnitt 2.3 beschriebenen Fehler (Poren und Massenzusammenschläge) ausbilden, zu.

Im zweiten Prozessschritt „Behälter füllen“ ist es wichtig, dass dies in einer angemessenen Geschwindigkeit durchgeführt wird. Ist die Einströmgeschwindigkeit in den Ausgleichsbehälter zu hoch, bricht die Schlickeroberfläche auf und es entstehen Turbulenzen. Dadurch kann der Schlicker Luft einschließen, die dann wiederum mit dem Eingießvorgang in die Form gelangt und somit den unter Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Fehler (Poren) hervorrufen kann.

Im dritten Prozessschritt „Eingießen“ ist es wichtig mit einer bestimmten, optimalen Gießgeschwindigkeit (Einströmgeschwindigkeit in die Form) zu gießen. D.h. in bestimmten Bereichen der Form soll mit definierten Einströmgeschwindigkeiten gegossen werden, um den unter Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Fehler (Massenzusammenschlag) entgegenzuwirken. Durch die unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten ergibt sich eine bestimmte Eingießzeit, die innerhalb bestimmter Grenzen eingehalten werden muss, da diese zusammen mit der Standzeit, die sich an den Eingießvorgang anschließt, ein Maß für die Scherbanddicke und damit für das Bedienpersonal zum Starten des Ausgießprozesses ist. Wird unbemerkt zu schnell oder zu langsam eingegossen, entstehen Schwankungen in der Differenz der Scherbenstärke zwischen oberem und unterem Teil der Form. Eine weitere Größe ist das Schaltspiel der Zweipunktregelung zwischen „MAX“ und „MIN“ (vgl. Abbildung 2.7). Die Zeit zwischen dem Ein- und Ausschalten sollte möglichst groß gehalten werden, zum einen um den Ventilverschleiß zu reduzieren, zum anderen vermutet man, dass die Druckschwankungen und die daraus resultierenden Fließgeschwindigkeitsänderungen sich negativ auf die Ausrichtung der Tonmineralteilchen auswirken können (vgl. Abschnitt 2.2).

2.4.3 Untersuchung der Prozessschritte

Im Folgenden sollen die einzelnen Prozessschritte auf Ursachen hin untersucht werden, die zum Auftreten der unter Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Fehlern in den Prozessschritten führen. Dazu werden die Arbeitsschritte und Techniken des Bedienpersonals analysiert und der Eingießprozess messtechnisch aufgenommen. Die 20 Gießanlagen teilen sich zwei Mitarbeiter, die im Weiteren als Eingießer A und Eingießer B benannt werden. Eingießer A bedient die Gießanlagen 1-10, Eingießer B bedient die Anlagen 11-20.

Beim Abzapfen vor dem 1. Guss gehen beide Eingießer unterschiedlich vor. Eingießer A lässt grundsätzlich als erstes Anlage 1 bis Anlage 10 gleichzeitig ablaufen. Bevor diese Prozedur nicht durchgeführt wurde, findet kein Eingießprozess statt. Eingießer B hingegen startet den Abzapfprozess nur an den Anlagen die unmittelbar im Anschluss gegossen werden. Wird beispielsweise Anlage 20 als erstes eingegossen, wird auch nur an dieser Anlage Schlicker abgelassen. Um mit dieser Technik das gleiche Ergebnis zu erzielen wie Eingießer A, müsste allerdings die 10-fache Zeit abgelassen werden, um eine vollständig vom erhitzten Schlicker abgelassene Hauptleitung zu gewährleisten (Vgl. Abbildung 2.12). Des Weiteren wird das Ventil V2 nicht an allen Anlagen gleich weit geöffnet. Aus Zeitgründen wird das Ventil beim Abzapfen gleich in die Eingießstellung gebracht. Diese Stellung ist Sortimentsabhängig und hat somit unterschiedliche Ablassmengen zur Folge.

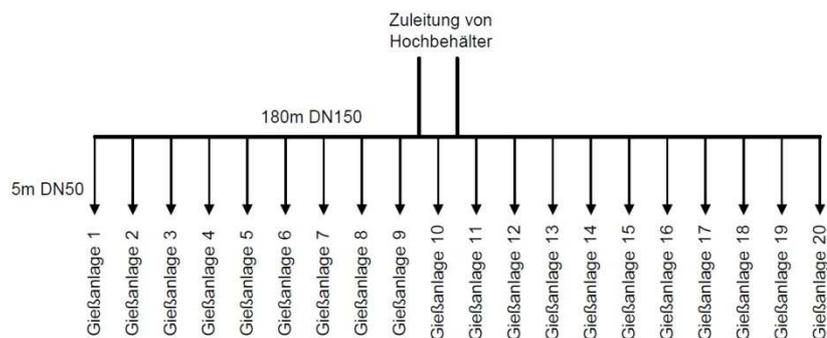


Abbildung 2.12: Aufbau der Hauptschlickerleitungen in der Gießerei

Beim Befüllvorgang der Ausgleichsbehälter ist bei beiden Eingießern kein Aufbrechen der Schlickeroberfläche festzustellen, da die Einströmgeschwindigkeit bereits durch die reduzierte Ventil V2 begrenzt wird. Bei sehr schnellen Eingießvorgängen ist der Öffnungsgrad von V2 größer und ein zu schnelles Befüllen des Behälters nicht auszuschließen.

Die Arbeitsschritte während des Eingießprozesses sind bei beiden Eingießern gleich. Sie öffnen zum Starten des Eingießprozesses, entsprechend der gewünschten Eingießzeit, das Ventil V5 auf einen bestimmten Stellgrad. Dieser basiert auf den Erfahrungen der Eingießer. Als Referenz für den Füllstand im Formenpaket dient der Füllstand in den Belüftungsschläuchen (Vgl. Abbildung 2.6) und die Schaltheufigkeit des Ventils V2a. Sind die Schläuche bis zur Formenoberkante gefüllt und nehmen die Schaltpausen der Zweipunktregelung die auf das Ventil V2a wirkt stark zu, so ist dies das Erkennungsmerkmal für ein vollständig gefülltes Formenpaket. Je nach Eingießgeschwindigkeit (Öffnungswinkel V5) kann es jedoch passieren, dass einzelne Formen noch nicht vollständig gefüllt sind. Somit ist die Feststellung des Füllungsendes fehlerbehaftet. Außerdem kann der Eingießer beim Guss mehrerer Anlagen nicht genau beurteilen, zu welchem Zeitpunkt welche Gießanlage vollständig gefüllt war.

Um im unteren Formendrittel schneller einzugießen als zum Ende der Eingießzeit, verstellen die Eingießer das Ventil V5. Dadurch kommt es zu weiteren Toleranzen bei der Eingießzeit. Weiterhin beeinflussen die variierende Thixotropie, Viskosität und Temperatur des Schlickers die Eingießzeiten. Diese Parameter können ebenfalls nicht durch den Eingießer kontrolliert werden.

Um den zeitlichen Verlauf des Eingießprozesses zu analysieren, wurde die Anlage mit einem Druckmessumformer im Eingießrohr (Vgl. Abbildung 2.13) versehen. Die gemessene Kurve (Vgl. Abbildung 2.14) stellt den hydrostatischen Druck im Eingießrohr dar und verhält sich proportional zum Füllstand des Schlickers im Formenpaket.

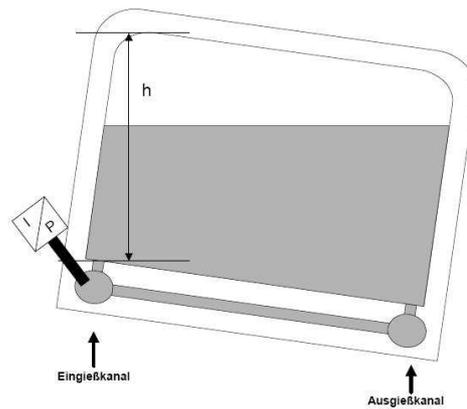


Abbildung 2.13: Anordnung des Sensors bei der Druckmessung

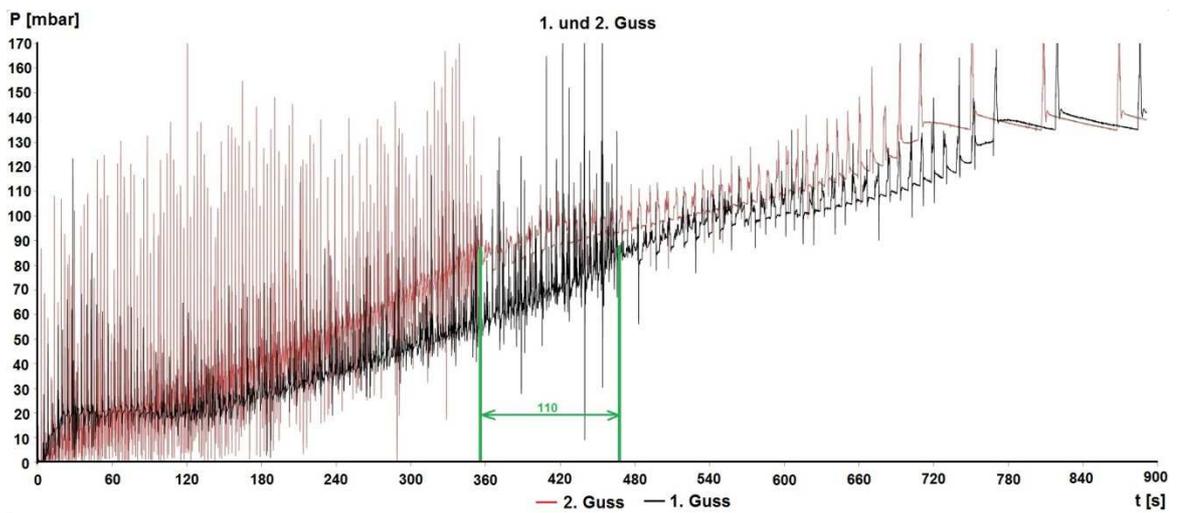
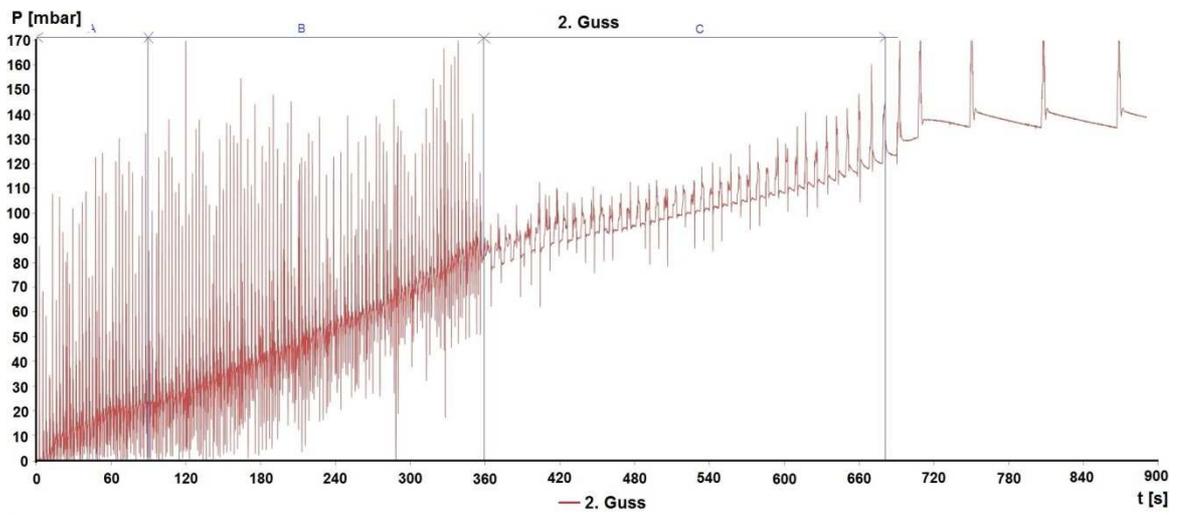
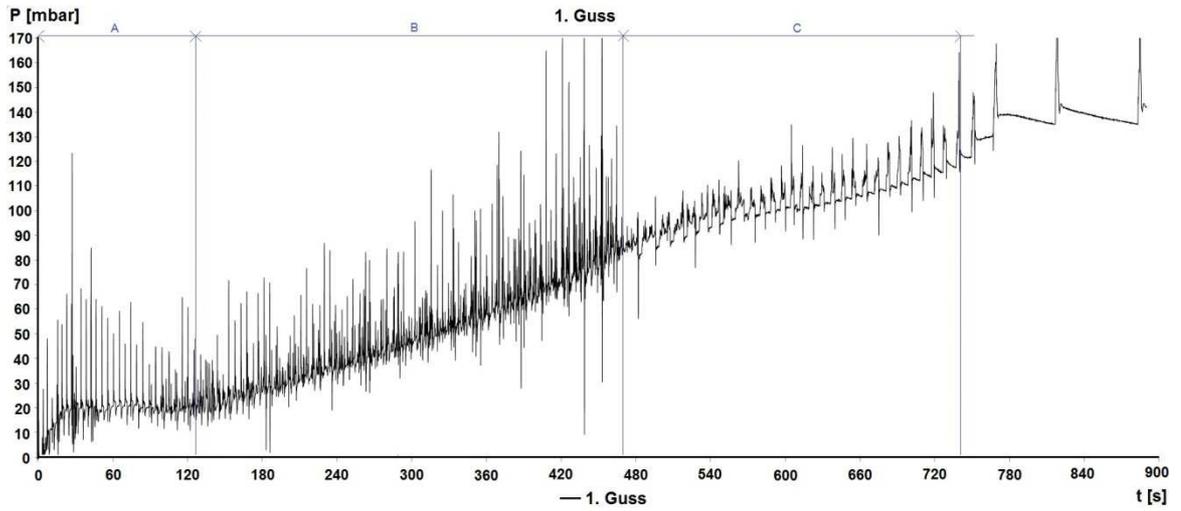


Abbildung 2.14: Zeitlicher Verlauf der Eingießkurven aus 1. und 2. Guss

Bei Betrachtung der aufgenommenen Eingießkurven wird ersichtlich, wie die o. g. Toleranzen sich auf die Eingießgeschwindigkeit auswirken. Die Grafiken haben die gleiche zeitliche Auflösung und zeigen deutlich die Unterschiede zwischen 1. und 2. Guss. Die Kurven sind in 3 Zeitbereiche eingeteilt. Zeitbereich A beginnt beim Starten des Eingießprozesses und zeigt den Füllvorgang des Ein- und Ausgießrohres. Sind beide Rohre vollgelaufen, beginnt Zeitabschnitt B, wobei der Füllstand in der Form anzusteigen beginnt. In diesem Zeitbereich ist das Ventil V5 weiter geöffnet, um schnell Einzugießen und somit den unter 2.3.2 beschriebenen Fehler (Massenzusammenschlag) zu vermeiden. Abschnitt C beginnt mit dem Reduzieren der Eingießgeschwindigkeit durch Verstellen von V5 und endet mit dem vollständig gefüllten Formenpaket, welches gut anhand des hydrostatischen Druckes und der Schaltperiodenänderung des Ventiles V2a zu erkennen ist.

Die unterschiedlichen Einströmgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden zeitlichen Änderungen des Füllstandes in der Form, sind aus Abbildung 2.14 gut zu erkennen.

Die Peaks im Zeitabschnitt A und B sind Druckspitzen, die vermutlich aus den Schaltintervallen benachbarter Gießanlagen resultieren. Die Stellungen der Ventile V2 und V5 werden so gewählt, dass der Zu- und Abfluss in den Ausgleichsbehälter in etwa gleich ist. Dadurch wird ein häufiges Schalten des Automatikventils vermieden. Da aber nicht alle Gießanlagen zum gleichen Zeitpunkt gestartet werden, wirken sich die Schaltspiele der bereits eingegossenen Gießanlagen über die offen stehenden Ventile bis in das Formeninnere aus, wodurch eine zusätzliche Störgröße im Prozess sichtbar wird. Im Zeitabschnitt C wirken sich diese Druckspitzen nur noch wenig bis ins Formeninnere aus, da sich durch die Zweipunktregelung das Ventil V2a nur noch zeitweise öffnet. Die unterschiedliche Ausprägung der Druckspitzen zwischen 1. und 2. Guss könnte aus den unterschiedlichen Eingießreihenfolgen resultieren.

Zusammenfassend können folgende Fehler und Fehlerursachen in Zusammenhang gebracht werden:

Tabelle 2.1: Fehler und Fehlerursachen

Prozessschritt	Fehler	Fehlerursache
Abzapfen	Erhitzter Schlicker in der Hauptgießleitung/Bankgießleitung	Nicht vollständiger Austausch des Schlickers durch unterschiedliche Arbeitsweise
Behälter füllen	Lufteinschlüsse durch Turbulenzen	Zu schnelles Füllen des Ausgleichsbehälters (zu großer Stellgrad von V2)
Eingießen	Nicht optimale Geschwindigkeit beim Einströmen in die Form, keine definierte Eingießzeit	Manuelles Einstellen/Verändern während des Gusses von V2 und V5 Exaktes Feststellen der vollständigen Formenfüllung nicht möglich

2.4.4 Lösungsansätze zur Minimierung der Gießfehler

Ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Gießfehlern ist stark erwärmter Schlicker, da die Eigenschaften von warmen, abgestandenem Schlicker sich stark von denen eines frischen Schlickers unterscheiden. Die Beseitigung dieses Fehlers ist durch eine definierbare Ablassgeschwindigkeit und Ablassdauer möglich.

Beim Behälter füllen können negative Beeinflussungen durch falsche Ventilstellungen nicht ausgeschlossen werden. Hier muss unabhängig von Eingießzeitpunkt und Eingießgeschwindigkeit eine konstante Füllgeschwindigkeit realisiert werden.

Beim Eingießen sind mehrere Ursachen für schwankende Eingießzeiten festgestellt worden (subjektive Beurteilung von Füllständen, gleichzeitige Bedienung mehrerer Anlagen, unterschiedliche Gießgeschwindigkeiten zum Prozessanfang und zum Prozessende).

Eine Verbesserung dieser Prozessschritte kann durch Automatisierung des Füllvorganges inklusive des Abzapfens und des Behälterfüllens realisiert werden. Weiterhin soll eine Schnittstelle zum Eingießsystem installiert werden, um für jede Gießanlage die Eingießzeit, sowie das zu gießende Modell vorzugeben. Anhand dieser Parameter soll sich das Eingießsystem selbst parametrieren. Zur Vermeidung der Druckschläge wird die Zweipunktregelung im Ausgleichsbehälter durch eine stetige Regelung ersetzt.

Somit kann Tabelle 2.1 wie folgt erweitert werden.

Tabelle 2.2: Fehler mit Fehlerursachen und Lösungsansätze

Prozessschritt	Fehler	Fehlerursache	Lösungsansätze
Abzapfen	Erhitzter Schlicker in der Hauptgießleitung/ Bankgießleitung	Nicht vollständiger Austausch des Schlickers durch unterschiedliche Arbeitsweise	Definierte Ablassgeschwindigkeit und Ablassdauer
Behälter füllen	Lufteinschlüsse durch Turbulenzen	Zu schnelles Füllen des Ausgleichsbehälters (zu großer Stellgrad von V2)	Definierte Füllgeschwindigkeit
Eingießen	Nicht optimale Geschwindigkeit beim Einströmen in die Form, keine definierte Eingießzeit, Druckschwankungen durch Zweipunktregelung	Manuelles Einstellen/Verändern während des Gusses von V2 und V5, Exaktes Feststellen der vollständigen Formenfüllung nicht möglich, Schalthysterese der Zweipunktregelung	Selbstregulierung und -optimierung des Prozesses, Ablösung der Zweipunktregelung durch stetige Regelung

Aus dieser Aufstellung ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Hardware des Automatisierungssystems. Es wird ein Füllstandssensor benötigt, der kontinuierlich den Füllstand im Ausgleichsbehälter erfasst. Für definierte Ablass- und Füllgeschwindigkeiten muss ein Regelventil integriert werden, das den Schlickerzufluss in Abhängigkeit von einer Führungsgröße regulieren kann. Zusätzlich wird ein System benötigt, das eine Schnittstelle für die Ein- und Ausgabe der Prozessparameter besitzt, und die Informationen vom Füllstandssensor verarbeiten sowie das Regelventil ansteuern kann.

Die folgenden Kapitel behandeln die Problematik der Füllstandsmessung und Regulierung sowie den Aufbau des Automatisierungssystems.

2.5 Füllstandsmessung

Füllstände können auf sehr vielfältig Art und Weise ermittelt werden. Zunehmende Aspekte bei der Auswahl der Messmethoden ist die Produktunabhängigkeit und Flexibilität. [FRE00]

Eine Übersicht über die möglichen Messmethoden ist in Tabelle 2.3 enthalten.

Tabelle 2.3: Füllstandsmessmethoden [FRE00]

Füllgut/ Messart	Kontinuierliche Messung	Grenzstand
Flüssigkeit	mechanisch Hydrostatisch Wägung kapazitiv konduktiv Ultraschall Mikrowellen radiometrisch	Schwimmer Vibrationsschalter kapazitiv konduktiv Kaltleiter optisch Mikrowellen Ultraschall radiometrisch
Schüttgut	Wägung elektromech. Lotsystem (kapazitiv) Ultraschall Mikrowellen radiometrisch	Vibrationsschalter kapazitiv Mikrowellen Ultraschall radiometrisch

Wegen der schwankenden Temperaturen und Luftfechtigkeiten, bedingt durch die Formenrücktrocknung, einer eventuell auftretenden starken Verschmutzung der Sensoren und einer starken mechanischen Beanspruchung beim Reinigungsvorgang der Behälter, wurde von mir ein Verfahren auf Basis der Laufzeitmessung ausgewählt. [FRE00]

Dieses Messverfahren weist keine beweglichen Bauteile auf, ist unempfindlich gegen Staub und Feuchtigkeit und wird den Anforderungen an Flexibilität und Produktunabhängigkeit gerecht. [FRE00]

Alle Messverfahren auf Basis der Laufzeitmessung haben gemeinsam, dass über einen Geber an der Decke eines Silos oder Tanks ein kurzer Impuls in Richtung Füllgutoberfläche gesendet wird. Dieser Impuls wird reflektiert und von einem Empfänger in ein elektrisches Signal zurückgewandelt (Vgl. Abbildung 2.15). [FRE00]

Bei dem Impuls kann es sich um Ultraschall oder Mikrowellen (Radar) handeln. Auch Laser eignen sich prinzipiell, sie sind allerdings in der Prozesstechnik seltener zu finden. [FRE00]

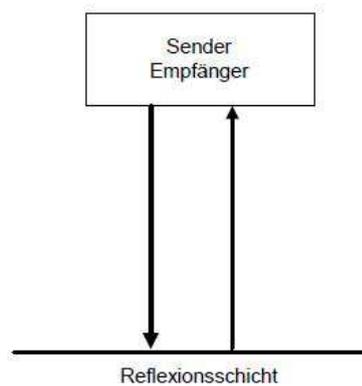


Abbildung 2.15: Berührungslose Füllstandsmessung [FRE00]

Das Ultraschallmessverfahren ist ein berührungslos arbeitendes Verfahren, bei dem die Gasatmosphäre in den Silos und Tanks zur Übertragung der Schwingungsenergie genutzt wird. Nach [FRE00] kann mit der gemessenen Zeit (t) zwischen dem ausgesendeten und dem empfangenen Impuls und der Schallgeschwindigkeit (c) der Abstand zum Füllgut (D) berechnet werden. Nachteilig hierbei sind eine Blockdistanz³ und der starke Einfluss des Raumklimas auf die Messgenauigkeit, da die Schallgeschwindigkeit von Gaszusammensetzung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängig ist. Des Weiteren gestatten nur hohe Frequenzen auch eine hohe Auflösung, welche wiederum in der Atmosphäre stärker gedämpft werden und sich somit nur für kurze Messdistanzen eignen. [FRE00]

Mikrowellen sind für Füllstands-Messaufgaben universell anwendbar. Ihr Einsatzgebiet ist bevorzugt dort, wo Ultraschall seine Grenzen hat. Sie arbeiten unter der Voraussetzung bestimmter Dielektrizitätskonstanten produktunabhängig, sind unempfindlich gegen Anbackungen, Temperatur- und Druckänderungen, Nebel und sogar leichte Schaumbildung wird durchdrungen. Mit Scheiben aus Kunststoff, Glas o.ä. kann die Messeinrichtung vom Tankinneren getrennt werden. Störreflektionen an den Einbauten können mit den gleichen Mitteln wie bei der Ultraschallmessung beherrscht werden. Durch vertretbare Preise der Komponenten am Markt, beginnt sich das Mikrowellen-Messverfahren auf breiter Front in der Verfahrenstechnik durchzusetzen [FRE00].

Aus diesen Gründen kommt ein Mikrowellensensor zum Einsatz. Dieses Messverfahren soll im Folgenden vorgestellt werden.

³ Als Blockdistanz bezeichnet den Mindestabstand zwischen Füllgut und Sensor

2.5.1 Messung mit Mikrowelle

Aufbau und Funktionsweise

Zur Erläuterung der Funktionsweise, ist in Abbildung 2.16 das Schema eines Mikrowellensensors zu sehen, der als Hornantenne ausgeführt ist.

[TO11]: „Der vom HF-System [1] erzeugte kurze Mikrowellenimpuls gelangt durch ein Kabel [2] zu einem Einkoppelstift [3]. Dieser ist durch eine gas- und druckdichte Durchführung vom Prozess getrennt und ist radial in dem Anpassungskegel [4] eingesetzt. Durch ein kombiniertes O-Ringsystem [5,6] geschützt, dient er zur Impedanzwandlung, um eine Optimale Leistungsanpassung an den Wellenwiderstand der Luft von ca. 377Ω zu erreichen. Die am Prozessanschluss angebrachte Hornantenne [7] sorgt für eine Ausrichtung des Linear-polarisierten elektromagnetischen Feldes. Vereinfacht dargestellt bestimmt die Antennengröße gemäß dem „Huygens’schen Prinzip“ die Abstrahlcharakteristik.“

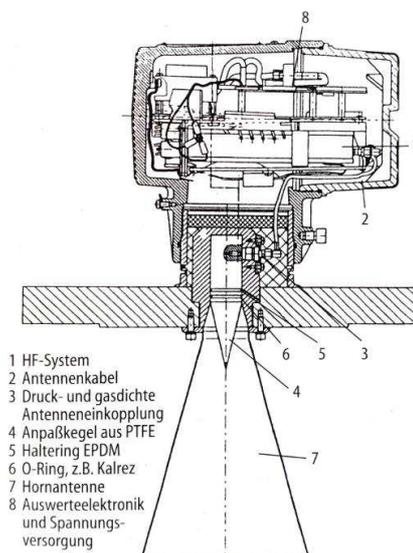


Abbildung 2.16: Mikrowellensensor mit Hornantenne [TO11]

Die an der Füllgutoberfläche reflektierte Mikrowelle wird nach der abstandsproportionalen Laufzeit über dasselbe Sende-/Empfangssystem dem HF-Modul zugeführt. Die folgende Auswerteelektronik [8], kombiniert mit einer praxiserprobten, und auf die besonderen Anforderungen von dynamischen Prozessen angepasste Software, sorgt für die erforderliche Meßsicherheit speziell bei produktions- oder sicherheitsrelevanten Anwendungen.“

Die HF-Laufzeitstrecke gestattet ohne Einschränkungen Messungen ohne Blockdistanz bis an die Antennenkante. [TO11]

Abbildung 2.17 zeigt die verschiedenen Bauformen von Mikrowellensensoren.

- a) Hornantenne
- b) Stabantenne
- c) Unterflanschantenne
- d) Rohrantenne

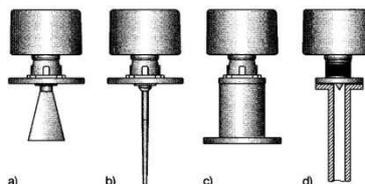


Abbildung 2.17: Bauformen von Mikrowellensensoren [FRE00]

Die klassische Hornantenne (a) bündelt den Strahl gut und die Stabantenne (b) eignet sich gut bei beengten Platzverhältnissen. Die Unterflanschantenne (c) ist eine Hornantenne, eingebaut in einen Stutzen, der unten mit einer Kunststoffplatte verschlossen ist. Dadurch kann der Tank hermetisch abgeschlossen werden, was besonders in der Lebensmitteltechnik von Vorteil ist. Die Rohrantenne (d) dient auf Schwall- oder Bypassrohren zur Messung in Tanks mit sehr heftigen Füllgutbewegungen [FRE00].

Abbildung 2.18 zeigt das Signalmuster eines idealen Mikrowellenimpulses.

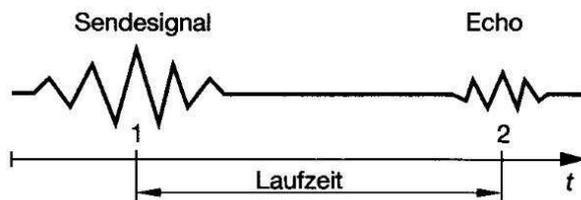


Abbildung 2.18: Mikrowellenimpuls mit Echo [FRE00]

Bei großen Abständen sollte die Dielektrizitätskonstante des Mediums möglichst größer als 5 sein, da sonst die reflektierende Intensität zu gering wird. Die Laufzeitänderung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und dem daraus resultierende Messfehler ist vernachlässigbar klein. Abbildung 2.19 zeigt die Reflexionsdämpfung von Mikrowellen in Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante und die Laufzeitdifferenz in Abhängigkeit der Temperatur [FRE00].

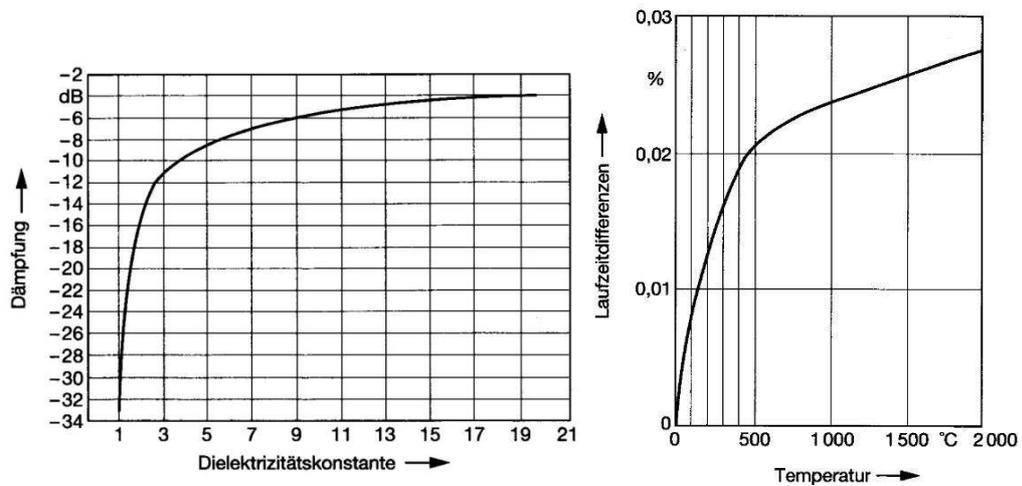
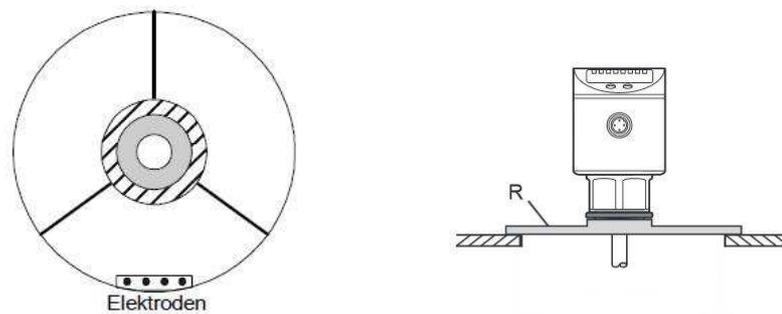


Abbildung 2.19: Reflexionsdämpfung und Laufzeitdifferenz von Mikrowellen [FRE00]

2.5.2 Auswahl des Füllstandssensors

Als Füllstandssensor kommt ein Mikrowellensensor auf Basis der geführten Mikrowelle zum Einsatz. Hierbei wird die Mikrowelle durch einen metallischen Leiter geführt. Im strengen Sinne ist diese Variante zwar produktberührend, doch der Leiter ist ein passives Bauelement und unempfindlich gegen Anhaftungen und mechanische Beanspruchung. Die geführte elektromagnetische Energie bleibt somit eng zusammen und durchdringt selbst nicht allzu starke Dielektrika [FRE00].

Der ausgewählte Mikrowellensensor ist der LR3000 (Firma ifm electronic) und wird zentral an der Oberkante des Ausgleichsbehälters mit einer Einkoppelplatte (R) installiert (Vgl. Abbildung 2.20).



a) Draufsicht auf den Ausgleichsbehälter b) Aufbau Sensor mit Flanschplatte (R) [IFM14]

Abbildung 2.20: Position des Mikrowellensensors im Behälter

2.6 Regelventil

Die Regelarmatur (Regelventil) ist eine Vorrichtung die die Durchflussmenge des Schlickers im Prozesssystem verändert. Sie besteht aus einer Armatur, verbunden mit einem Antrieb, der in der Lage ist, abhängig vom Reglersignal die Stellung eines Drosselkörpers im Ventilkörper zu verändern. [WAG08]

Im Folgenden wird ein Überblick über die Grundbauarten der in der Prozessindustrie eingesetzten Armaturen gegeben.

2.6.1 Armatur

Durch unterschiedliche Anforderungen wie Betriebszustände, Durchflussmedien und Umgebung sind Armaturen in einem breiten Spektrum von konstruktiven Ausführungen verfügbar. [MZ05]

Die Grundbauarten von in der Prozessindustrie eingesetzten Armaturen und deren Eignungen sind auszugsweise in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Stellglieder [MZ05]

Armatur	besondere Eignung	nachteilige Eigenschaften
Ventile	<ul style="list-style-type: none"> bestens geeignet für kritische Betriebsbedingungen genaueste Regelung aufgabenspezifische exakte Ventilkennlinien realisierbar geringe Leckage bis dicht schließend mehrstufiger Druckaufbau möglich sichere Beherrschung hoher Differenzdrücke geräuscharme Einbauten für unterschiedlichste Einsatzfälle unproblematisch für hohen Schaltwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> kleiner Durchfluss großer Raumbedarf hohe Kosten für große Nennweiten
Klappen	<ul style="list-style-type: none"> einfacher konstruktiver Aufbau geringer Raumbedarf geringes Gewicht großer Durchfluss weitgehend tottraumfrei große Nennweite vergleichsweise kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> nur relativ kleine Differenzdrücke zulässig relativ hohe Leckage nicht veränderbare Kennlinie hohe wechselnde Antriebskräfte
Schieber	<ul style="list-style-type: none"> geringer Druckverlust Robust dicht schließend 	<ul style="list-style-type: none"> großer Hub hohe Antriebskräfte große Bauhöhe große Toträume Regelung nur bedingt möglich

Ventile sind nach Tabelle 2.4 für Regelungstechnische Zwecke am besten geeignet. Weitere Informationen zu diesem Thema können in [MZ05], [WAG08] und [KEC94] nachgelesen werden.

Als optimale Lösung für die Schlickermengenregelung im vorliegenden Fall wurde ein Schlauchventil ausgewählt. Bei diesem Ventiltyp ist der absperrende Teil ein Schlauch, der gleichzeitig die Medienabdichtung nach außen hin übernimmt. Beim Absperren wird dieser Schlauch verformt bzw. gequetscht, weswegen es auch Quetscharmatur oder Schlauchquetschventil genannt wird. Diese Ventilart ist schmutzunempfindlich, selbstreinigend

(entleert sich in jeder Einbaulage) und die mechanischen Teile sind vom Fluid getrennt. Der Temperaturbereich in dem diese Ventile eingesetzt werden können liegt bei -60 bis 200 °C mit Betriebsdrücken kleiner 1,6MPa. Die Durchflusskennlinie ist annähernd linear und bietet mit einem auf die Armatur abgestimmten Stellantrieb ein gutes Regelverhalten. [KEC94]

Zum Einsatz kommt ein Schlauchquetschventil mit pneumatischer Ansteuerung, da es sich durch seine Eigenschaften besonders gut zum Regeln und Dosieren abrasiver Medien eignet. [AKO14]

In Abbildung 2.21 ist die Variante des z.Z. markführenden Herstellers für Schlauchventile (Firma AKO) dargestellt.



Abbildung 2.21: Schlauchquetschventilvariante [AKO14]

2.6.2 Stellantrieb

Die Veränderung der Stellung des Schlauches (Drosselkörper) erfolgt indem dieser zusammengequetscht wird. Die Druckluft aus dem Firmennetz stellt dabei die Energie für den Stellantrieb bereit.

Als Stellantrieb kommt ein Proportional-Druckregelventil zum Einsatz, welches die Möglichkeit bietet, den Luftdruck in Abhängigkeit von einer elektrischen Führungsgröße zu verändern. Als Führungsgrößen eignen sich Strom- oder Spannungssignale, die z.B. von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), zur lastabhängigen Gegendruckerzeugung in Zylindern, oder zur Positionierung pneumatischer Stell- und Antriebsglieder, erzeugt werden. [STO99]

Da anders als bei den üblichen Stellventilen das Quetschventil unbetätigt offen ist, wird in dieser Arbeit der Stellgrad des Quetschventils umgekehrt proportional zum Reglerstellgrad betrachtet. (Ventil betätigt = Quetschventil geschlossen = Ventilstellgrad 100%)

Das eingesetzte Proportional-Druckregelventil (Firma FESTO) ist in Abbildung 2.22 zu sehen. Der integrierte Drucksensor nimmt den Druck am Arbeitsanschluss (-W) auf und vergleicht diesen Wert mit dem Sollwert (+W). Bei einer Abweichung wird das Regelventil solange betätigt, bis der Ausgangsdruck den Sollwert erreicht hat. [FES14]

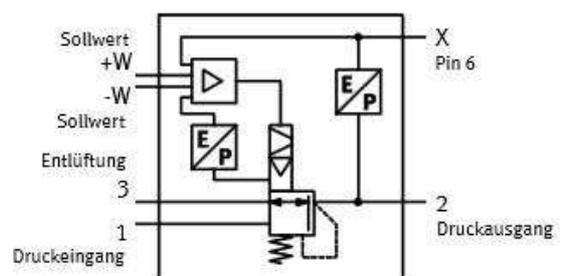
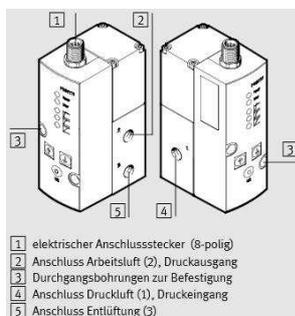


Abbildung 2.22: Proportional-Druckregelventil [FES14]

2.7 Automatisierungssystem

[WZ11]: „SPS-basierte und PC-basierte Steuerungen werden unter Einbeziehung ihrer Kommunikationssysteme als Automatisierungssysteme bezeichnet.“

Ein Automatisierungssystem besteht heutzutage nicht mehr ausschließlich aus einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Vielmehr sind es Mischsysteme in denen die SPS prozessnah und ein PC als übergeordnetes, datenverarbeitendes System genutzt wird. Auch eine Soft-SPS-Lösung, bei der die Funktion einer SPS komplett softwaremäßig in einem PC nachgebildet wird, ist als Sonderlösung denkbar. [WZ11]

Marktführer in der Prozessautomation ist z.Z. Siemens mit dem System SIMATIC. Dieses umfasst eine Vielzahl an Produkten für unterschiedlichste Aufgaben. Für die Eingießsteuerung eignet sich vom Leistungsumfang her das System SIMATIC S7 300, welches sich durch ein vielfältiges Baugruppenspektrum, Anwendungen im zentralen und dezentralen Aufbau, sowie einer kostengünstigen Ersatzteilhaltung auszeichnet. [SIE14a]

Der Aufbau erfolgt auf dem technischen Stand der Entwicklung dezentral durch den Einsatz des Feldbussystems PROFIBUS-DP. Durch dieses System ist eine einfache Ankopplung dezentraler Prozessperipherien an das SPS-Steuerungssystem, eine Kosteneinsparung im Bereich Verdrahtung, Schaltschrankbau, Inbetriebnahme und Wartung möglich. [WZ11]

Das Automatisierungssystem besteht somit im Wesentlichen aus einer Zentralbaugruppe (CPU) die über ein Bussystem mit den dezentralen Prozessperipherien verbunden ist und einem Bedienterminal (HMI) das als Eingabeterminal für die Prozessparameter sowie als Störungsmeldeanzeige benutzt wird. [WZ11]

2.7.1 Zentralbaugruppe (CPU)

Die Entscheidung für die einzusetzende CPU fällt nicht auf eine CPU der Firma SIEMENS, sondern auf eine SPS der Firma VIPA. Das Steuerungssystem VIPA 300S ist eines der weltweit schnellsten und leistungsfähigsten, auf μC basierten Systeme. Der enorme Vorteil dieser Baugruppen ist nicht nur die hohe Geschwindigkeit, sondern ein besseres Preis-Leistungsverhältnis als bei SIEMENS, sowie die problemlose Integration in die SIMATIC-Systeme. Sie besitzen die gleiche Bauform und weisen fast gleiche Eigenschaften wie die S7-300 CPUs auf. Dadurch ist ein Mischbetrieb von Siemens und VIPA in einem System ohne Probleme durchführbar. Die ausgewählte CPU ist in Abbildung 2.23 zu sehen. [VIP14]

- SPEED7-Technologie und SPEED-BUS integriert
- 512kByte Arbeitsspeicher integriert (256kByte Code, 256kByte Daten)
- Speicher erweiterbar bis 2Mbyte
- Profibus-DP-Master integriert (DP-V0, DP-V1)
- Ethernet-PG/OP-Schnittstelle
- MPI-Schnittstelle
- MCC-Slot für externe Speichererweiterung
- Echtzeituhr akkugepuffert
- Schnelle digitale E/As: DI 8..16xDC 24V / DO 8..0xDC 24V, 0,5A
- 4 Zähler (100kHz); 512 Zeiten; 512 Zähler; 8192 Merker-Byte
- E/A-Adressbereich digital/analogue 8191Byte



Abbildung 2.23: VIPA CPU [VIP14]

2.7.2 Bussystem PROFIBUS-DP

Im Fertigungsbereich ist ein hierarchisch gegliedertes Kommunikationssystem üblich (Vgl. Abbildung 2.24). Das hat zum einen technische Gründe, wie Datenmenge und Echtzeitfähigkeit und zum anderen wirtschaftliche Gründe, wie Anlagengröße und Grad der Vernetzung. Die dabei verwendeten Bussysteme sind nach IEC 61158 standardisierte und „offene“ Systeme. Die Offenheit gewährt dabei den Zugang zu den Spezifikationen und Technologien für andere Anbieter. Dadurch ergibt sich der Vorteil, nicht mehr an nur einen Hersteller bei der Auswahl der zu vernetzenden Komponenten gebunden zu sein. [WZ11]

PROFIBUS ist das z.Z. weltweit führende durchgängige, offene, digitale Kommunikationssystem. [SW12]

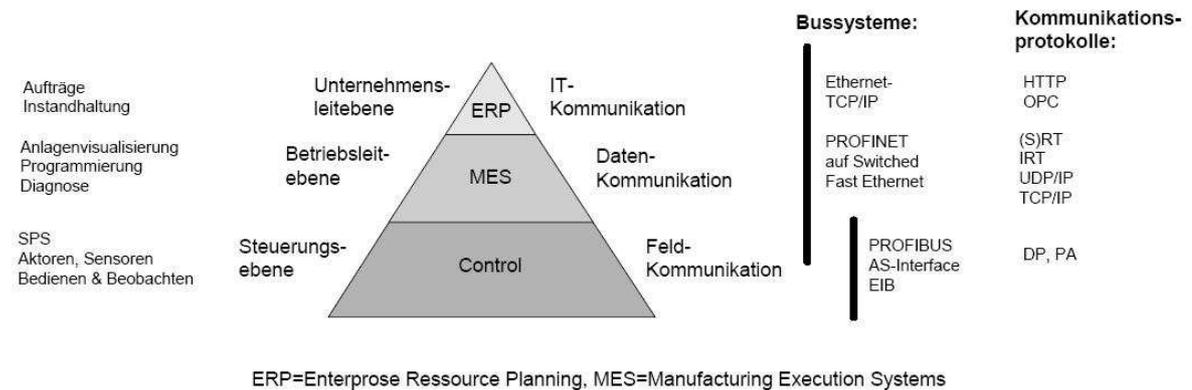


Abbildung 2.24: Hierarchie der Industriellen Kommunikation [WZ11]

2.7.3 Dezentrale Prozessperipherien

Zwei Gießanlagen werden zu jeweils einer PROFIBUS-Station zusammengefasst. Jeder Profibus-Slave wird mit jeweils 8 Digital-Eingängen, 8 Digital-Ausgängen, 2-Analog-Eingängen und 2-Analog-Ausgängen ausgerüstet. Diese Konfiguration stellt für jede Gießanlage einen Analogeingang für den Mikrowellensensor, einen Analogausgang für das Druckregelventil und jeweils 4 Digital-ein- und Ausgänge zur Verfügung. Letztere werden für die Ansteuerung des Automatikventils V2a und für die separaten Anzeige- und Bedienkomponenten benötigt.

Die Baugruppen für die Eingießsteuerung werden von der Firma WAGO bezogen (Vgl. Abbildung 2.25). Diese Baugruppen werden in der KERAMAG vornehmlich für kleinere Dezentralisierungszwecke eingesetzt und zeichnen sich durch ihre Platzsparsamkeit aus. Für jeweils zwei Gießanlagen wird eine Feldbusschnittstelle mit entsprechenden Anschaltbaugruppen vorgesehen.

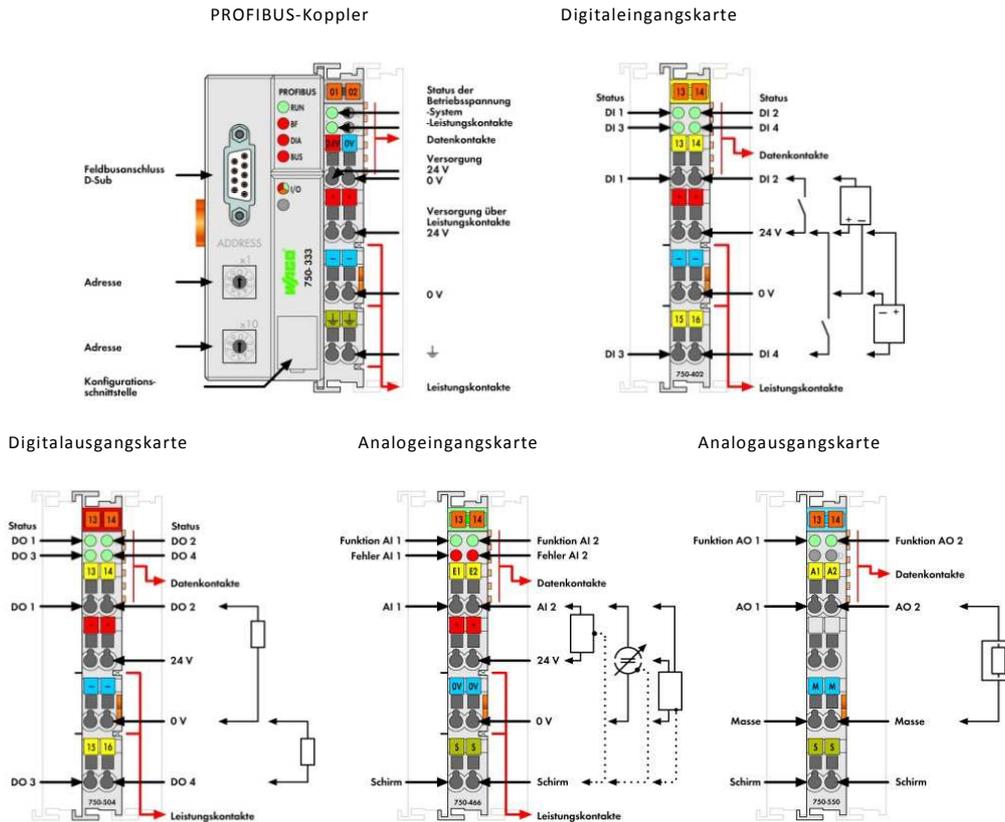


Abbildung 2.25: PROFIBUS-Module [WAG14]

2.7.4 Bedienterminal (HMI)

HMI steht für **H**uman **M**achine **I**nterface. Die SIMATIC HMI-Panel sind perfekt für raue Industrieumgebungen und bieten für fast jede Anwendung die passende Lösung.

In Bezug auf die Eingießsteuerung muss eine HMI ausgewählt werden, dass Störmeldetexte anzeigen, sowie Kurvenverläufe graphisch darstellen kann und über das eine Ein- und Ausgabe der Prozessparameter möglich ist. Auf aktuellem Stand der Technik bietet Siemens für diese Zwecke die Basic Panels an. Sie bilden die ideale Einstiegsserie für einfache HMI-Applikationen. [SIE14b]

Da in der KERAMAG die Vorgängerversion der Basic-Panels noch weit verbreiteten Einsatz finden, wird aus Gründen der Ersatzteilhaltung ein Touch-Panel der Serie TP170B eingesetzt (Vgl. Abbildung 2.26). Diese Serie basiert auf dem Standardbetriebssystem Microsoft Windows CE und bietet eine MPI- und PROFIBUS-Schnittstelle zur Einbindung an. Mit dieser Gerätereihe ist das monochrome Darstellen von Kurvenverläufen und Störmeldetexten, sowie die Ein- und Ausgabe von Prozessparametern möglich. [SIE14c]

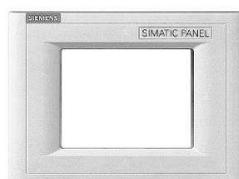


Abbildung 2.26: TP 170B [SIE14c]

3 Automatische Eingießsteuerung

3.1 Konzept

In diesem Kapitel wird aus den Anforderungen der Gießerei und den zuvor erarbeiteten Lösungsansätzen ein Konzept entwickelt, welches als Grundlage für die Eingießsteuerung dient. Das Konzept beschreibt die mechanische und elektrische Einbindung sowie die Steuerungsaufgaben der Eingießsteuerung. Die einzelnen Prozessschritte aus Abschnitt 2.4.1 werden durch Auflösung in Steuerungsaufgaben als Struktogramme dargestellt, wobei die Lösungsansätze aus Abschnitt 2.4.4 und die Anforderungen aus der Gießerei betrachtet werden müssen.

Struktogramme haben das Ziel, den Algorithmus der Steuerungsaufgabe sowie den Ablauf der Operationen grafisch darzustellen. Die Aussage eines Struktogramms erfolgt mit Sinnbildern nach Nassi-Shneiderman sowie erläuternden Texten in den Sinnbildern. Die Auswahl und Schachtelung der Sinnbilder stellt den Steuerungsablauf dar. [WZ11]

Die speziellen Anforderungen aus der Gießerei sind:

- Eine Möglichkeit der Umschaltung im laufenden Betrieb auf das alte System (bei Störungen der automatischen Eingießsteuerung), da durch eine Unterbrechung des Eingießprozesses verschiedene Fehlerbilder entstehen können, die die Formlinge unbrauchbar machen. Somit wird das alte Eingießsystem als Redundanz genutzt.
- Installation einer Überfüllsicherung, um den Anstieg des Schlicker bis in die Verteilerkanäle zu verhindern.
- Zentrale Schnittstelle für die Parametereingabe, um für alle Gießanlagen die notwendigen Parameter zentral eingeben und die gespeicherten Eingießzeiten der letzten Gießvorgänge anzeigen zu können.
- Separate Anzeige- und Bedienkomponenten an jeder Gießanlage, um das Abzapfen/Eingießen vor Ort starten und beenden zu können.

3.1.1 Mechanische Einbindung

Wie in Abschnitt 2.4.4 (Lösungsansätze zur Minimierung der Gießfehler) erarbeitet wurde, muss der Durchsatz des Schlickers in den entsprechenden Prozessschritten reguliert werden können und die Zweipunktregelung durch eine stetige Regelung ersetzt werden. Dazu bedarf es zusätzlicher Komponenten, die in die bestehende Anlage so integriert werden müssen, dass sie die Funktionalität des alten Eingießsystems nicht beeinflussen. Der Regelkreis mit seinen Komponenten wird detailliert in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Das Schlauchquetschventil wird in Reihe zum vorhandenen Automatikventil V2a installiert und arbeitet bei eingeschalteter Eingießsteuerung als Regelventil (Vgl. Abbildung 3.1). Damit ist gewährleistet, dass bei ausgeschalteter Eingießsteuerung (Schlauchquetschventil ist unbetätigt offen) so gearbeitet werden kann, als wenn nur das alte System vorhanden ist.

Der Mikrowellensensor wird im Ausgleichsbehälter neben den bereits vorhandenen Elektroden für die Zweipunktregelung installiert, beide Messsysteme beeinflussen sich nicht gegenseitig.

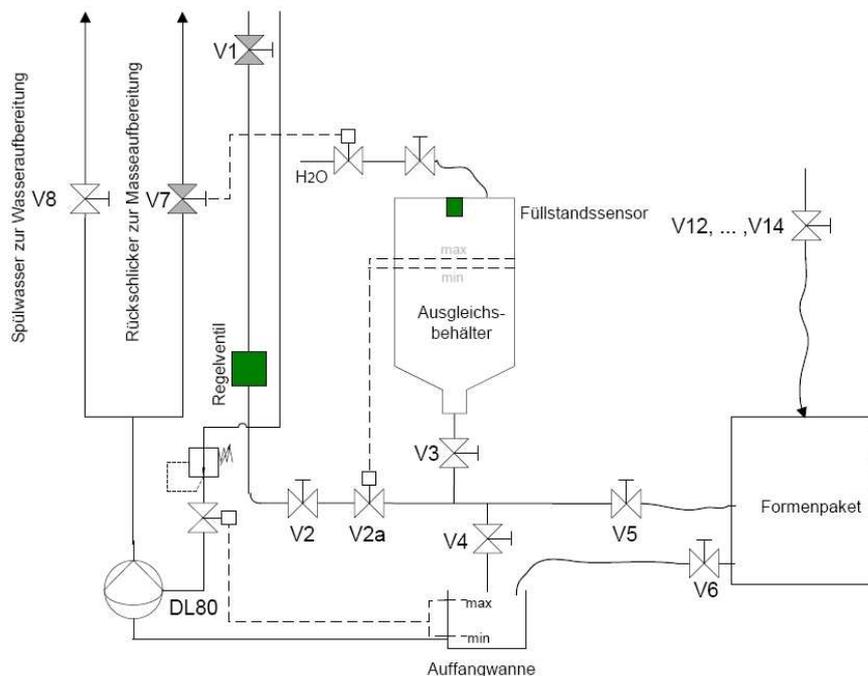


Abbildung 3.1: Anordnung der neuen Regelkomponenten

3.1.2 Elektrische Einbindung

Damit die automatische Eingießsteuerung über das Schlauchquetschventil eine stetige Regelung des Schlickerstromes realisieren kann, muss seitens der Steuerung das Automatikventil V2a ebenfalls auf- oder zugesteuert werden. Für die Überlegungen zur Kopplung der beiden Systeme, soll der Schaltungsaufbau des alten Systems betrachtet und eine Schaltungsanalyse durchgeführt werden.

Um die Zusammenhänge in Schaltungen besser beschreiben zu können, eignen sich Wahrheitstabellen aus der Schaltungsanalyse für eine übersichtliche Darstellung der Zusammenhänge. In diesen Tabellen werden die möglichen Kombinationen der verschiedenen Eingangs- und Ausgangszustände der Schaltung dargestellt. Die Funktionsgleichung der gesamten Schaltung kann aus der Wahrheitstabelle, mit Hilfe der Schaltalgebra, mathematisch ausgedrückt

werden. Mit den Rechenregeln der Schaltalgebra können dann umfangreiche Schaltungen weitestgehend vereinfacht werden. Selbst einfache Schaltungen die sich über Probieren auffinden lassen sind z.T. unnötig umfangreich und somit unwirtschaftlich. [BEU06]

Abbildung 3.2 zeigt den Schaltungsaufbau und die Wahrheitstabelle für den Automatikbetrieb des alten Systems. Die Schalterstellungen S1 „0“ und „Hand“ beeinflussen direkt die Stellung des Ventils V2a, allerdings außerhalb des Automatikbetriebes, weswegen diese Stellungen in den weiteren Betrachtungen ausgeklammert werden.

Der Tabellenkopf besteht somit aus S1 als Schalter für Automatik ein/aus, $\overline{K1}$ dem Öffnerkontakt des Niveaurelais und dem Automatikventil V2a. Die Wahrheitstabelle wird zeilenweise interpretiert. Links stehen die Eingangszustände und rechts die Ausgangszustände der Schaltung. Die Zustände werden mit Hilfe von 1 und 0 dargestellt, wobei die 1 als wahr und die 0 als unwahr zu interpretieren ist.

Aus der Wahrheitstabelle ist zu entnehmen, dass nur bei leerem Behälter und eingeschalteter Automatik das Ventil V2a geöffnet ist. Dies ist nach [BEU06] eine der einfachsten Verknüpfungen und wird Und-Verknüpfung genannt. Die Funktionsgleichung der gesamten Schaltung kann aus der Wahrheitstabelle in Abbildung 3.2 direkt entnommen werden.

$$V2a = \overline{K1} \wedge S1$$

Gl. 3.1

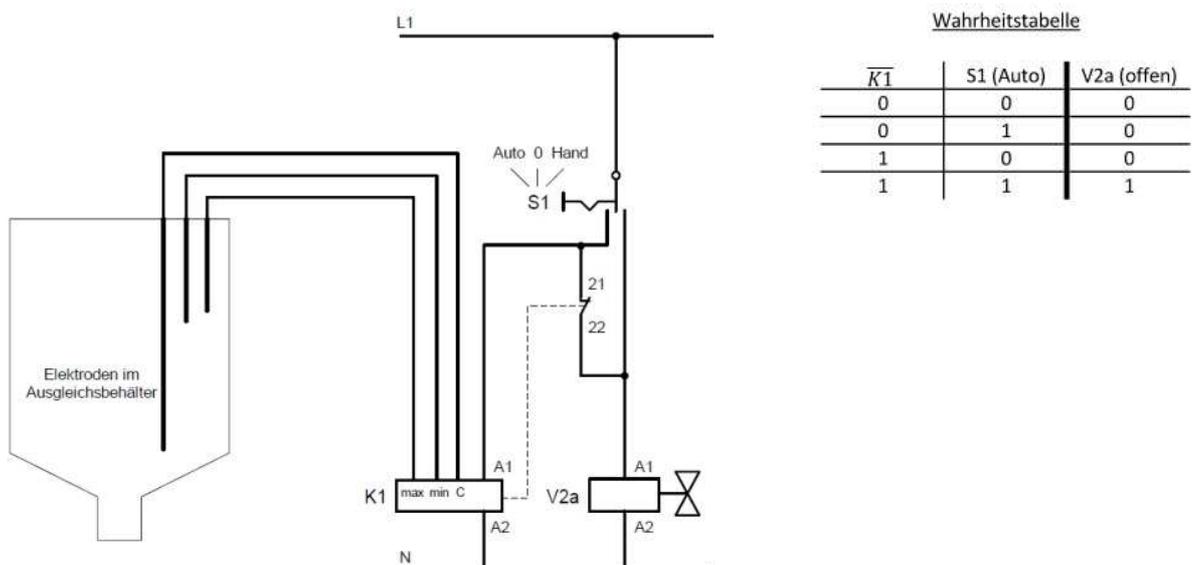


Abbildung 3.2: Schaltungsaufbau und Wahrheitstabelle altes System

Als nächstes soll die automatische Eingießsteuerung in die vorhandene Schaltung integriert werden. Dieser Vorgang nennt sich Schaltungssynthese. Dazu wird als erstes die Aufgabe, die die Schaltung erfüllen soll, vollständig und widerspruchsfrei formuliert. [BEU06]

1. Der vorhandene Schalter S1 („Automatik“ / „0“ / „Hand“) bleibt erhalten und dient der Realisierung einer ausschließlich manuellen Steuerung.
2. Durch Integration eines zusätzlichen Wahlschalters S2 („neues System“ / „altes System“) im Automatikzweig wird zwischen dem alten System (manuelle Eingießsteuerung) und dem neuen System (automatische Eingießsteuerung) umgeschaltet.
3. Ein zusätzlicher Kontakt K2 aus der Steuerung (SPS) signalisiert „automatische Eingießsteuerung EIN“.

Das Ventil V2a ist offen wenn:

Der Schalter (S1) auf „Automatik“ steht und die Eingießsteuerung eingeschaltet (K2) ist und der Wahlschalter S2 auf „neues System“ steht und das Niveaurelais K1 nicht geschaltet hat.

oder

Der Schalter (S1) auf „Automatik“ steht und der Wahlschalter S2 auf „altes System“ geschaltet ist und das Niveaurelais K1 nicht geschaltet hat.

Aus dieser Formulierung heraus ergibt sich folgende neue Wahrheitstabelle.

Wahrheitstabelle

S1 (Auto)	K2	$\overline{K1}$	S2 (alt)	V2a (offen)
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

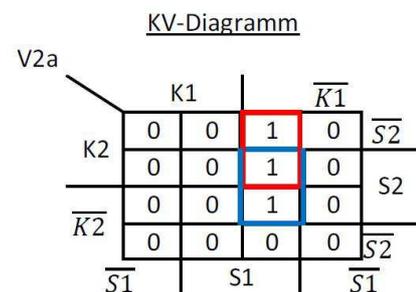


Abbildung 3.3: Wahrheitstabelle und KV-Diagramm mit integrierter Eingießsteuerung

Die Funktionsgleichung kann direkt in disjunktiver Normalform⁴ entnommen werden. Die Anzahl der 1-Zustände in der Ausgangsspalte einer Wahrheitstabelle ist gleich der Anzahl der Vollkonjunktionen der disjunktiven Normalform. [BEU06]

$$V2a = (\overline{K1} \wedge \overline{K2} \wedge S1 \wedge S2) \vee (\overline{K1} \wedge K2 \wedge S1 \wedge \overline{S2}) \vee (\overline{K1} \wedge K2 \wedge S1 \wedge S2) \tag{Gl. 3.2}$$

Diese Gleichung kann mit Hilfe des KV-Diagrammes aus Abbildung 3.3 vereinfacht werden.

[BEU06]: „KV-Diagramme dienen der übersichtlichen Darstellung und der Vereinfachung von ODER-Normalformen. Sie wurden von Karnaugh und Vietch entwickelt und werden auch als Karnaugh-Diagramme bezeichnet.“

Das Vorhandensein einer Vollkonjunktion wird durch eine 1 auf dem entsprechenden Platz gekennzeichnet. Benachbarte Vollkonjunktionen deren Plätze mit einer Seite aneinanderstoßen, können zusammengefasst werden. Die Variablen, die als Koordinate der zusammengefassten Vollkonjunktionen negiert und nichtnegiert auftreten, entfallen. Durch das Entfallen der Variablen wird die disjunktive Normalform aus Gleichung 3.2 vereinfacht in Gleichung 3.3 dargestellt. [BEU 06]

⁴ Eine Gleichung liegt in disjunktiver Normalform (ODER-Normalform) vor wenn sie eine Disjunktion von Konjunktionstermen ist. D.h. wenn die Terme Und-Verknüpfungen sind und alle Terme untereinander Oder-Verknüpft sind.

$$V2a = (\overline{K1} \wedge S1 \wedge S2) \vee (\overline{K1} \wedge S1 \wedge K2) \quad \text{Gl. 3.3}$$

Diese Gleichung kann mittels Umformung noch weiter vereinfacht werden. Dazu wird das Distributivgesetz angewendet. [BEU06]: „Das Distributivgesetz entspricht der Regel über das Ausmultiplizieren und Ausklammern eines Faktors in der normalen Algebra.“ Durch das Ausklammern von $S1$ und $\overline{K1}$ kann Gleichung 3.3 wie folgt vereinfacht werden.

$$V2a = ((\overline{K1} \wedge S1) \wedge S2) \vee ((\overline{K1} \wedge S1) \wedge K2) = \overline{K1} \wedge S1 \wedge (S2 \vee K2) \quad \text{Gl. 3.4}$$

Aus dem Vergleich von Gleichung 3.1 und Gleichung 3.4 geht hervor, dass die Grundschialtung nur mit einer ODER-Verknüpfung von $S2$ und $K2$ erweitert werden muss. In Abbildung 3.4 ist der Schaltungsentwurf mit integrierter Eingießsteuerung dargestellt. Die neuen Komponenten sind hier grün dargestellt. In diesem Schaltungsentwurf wird der zweite Schließerkontakt des vorhandenen Niveaurelais $K1$ als Meldekontakt zur Steuerung vorgesehen. Die vorhandene MAX-Elektrode wird durch eine neue, höher angebrachte Elektrode ergänzt und nur beim alten Eingießsystem eingeschaltet. Somit ist gewährleistet, dass der Schlicker nicht bis in die Ventile und den Verteilerkanal steigt.

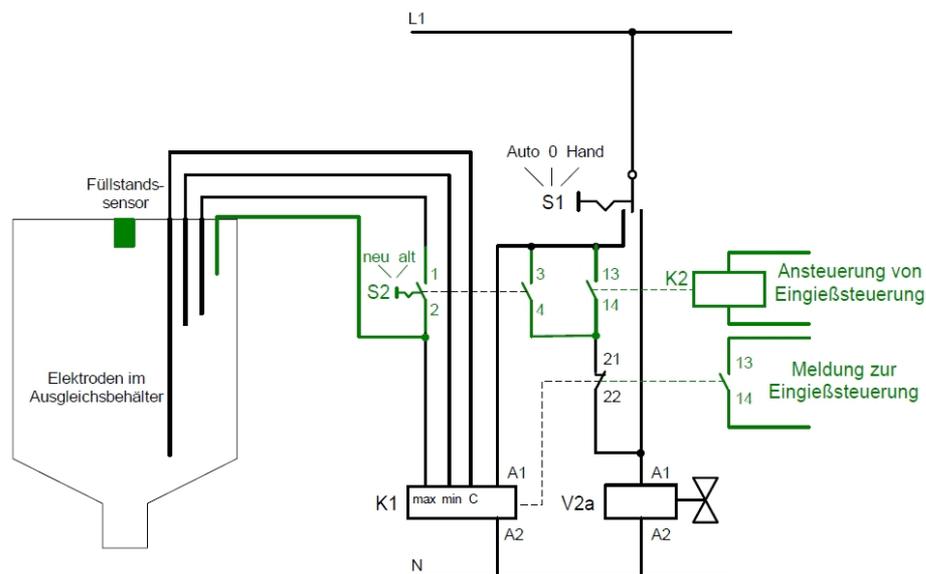


Abbildung 3.4: Schaltungsaufbau mit integrierter Eingießsteuerung

3.1.3 Steuerungsaufgaben der Prozessschritte

Nachdem die Problematik der Einbindung in das bestehende System gelöst ist, werden die Steuerungsaufgaben der einzelnen Prozessschritte unter Beachtung der Untersuchungen der Prozessschritte (Abschnitt 2.4.3) sowie den Lösungsansätzen (Abschnitt 2.4.4) ausgearbeitet. Für die Eingießsteuerung werden die Stellungen der Ventile V2, V3, V4 und V5 (Vgl. Abbildung 3.1) nicht berücksichtigt, da sie in der neuen Eingießsteuerung, je nach Betriebsart, nur noch manuell vollständig geöffnet oder geschlossen werden. Eine Verstellung erfolgt entweder vor oder unmittelbar beim Starten des jeweiligen Prozessschrittes.

Schritt 1 Abzapfen:

Um Fehler (Vgl. Tabelle 2.2) zu vermeiden, werden folgende Steuerungsaufgaben realisiert:

- Durch Drücken des Tasters „Abzapfen“ öffnet sich das Ventil V2a und das Schlauchquetschventil schließt sich auf einen definierten Stellgrad, um die notwendige Ablassmenge einzustellen.
- Der Prozessschritt wird nach Ablauf der vorgegebenen, festeingestellten Laufzeit automatisch beendet.
- Nachdem der Abzapfprozess automatisch beendet wurde, wird eine Freigabe zum Füllen des Ausgleichsbehälters gesetzt, um zu gewährleisten das der Ausgleichsbehälter mit ausschließlich frischem Schlicker gefüllt wird.
- Sollte der Abzapfprozess manuell unterbrochen werden (Drücken des Stopp-Tasters), muss der gesamte Prozessschritt nochmals durchlaufen werden.

Die Überlegungen zum Abzapfprozess sind in Form eines Struktogrammes (Abbildung 3.5) dargestellt.

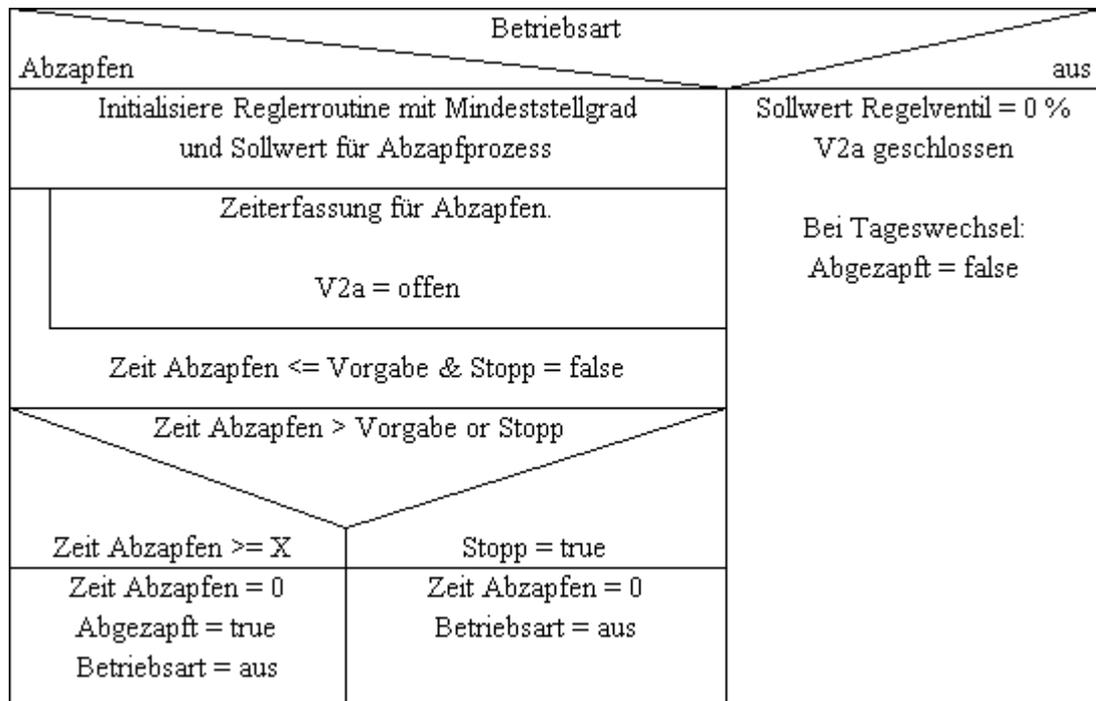


Abbildung 3.5: Struktogramm für den automatisierten Abzapfprozess

Schritt 2 Behälterfüllen:

Unter Berücksichtigung von Tabelle 2.2 werden folgende Steuerungsaufgaben realisiert:

- Wird der Prozessschritt gestartet, schließt sich das Schlauchquetschventil auf einen definierten Mindeststellgrad, um den Behälter definiert und langsam zu füllen. Beim Erreichen des vorgegebenen Füllstandes wird durch die Füllstandregelung das Schlauchquetschventil geschlossen. Diese Stellgradänderung dient als Signal für einen vollständig gefüllten Ausgleichsbehälter.
- Die Füllzeit des Behälters wird überwacht, um Klappenfehlstellungen auszuschließen.
- Wird jetzt durch den Eingießer das Ventil V5 vollständig geöffnet, erkennt die Steuerung durch Abnahme des Füllstandes den Start des Eingießprozesses und geht dadurch in die Betriebsart „Eingießen“.

Die Überlegungen zum Behälterfüllen sind in Form eines Struktogrammes in Abbildung 3.6 dargestellt.

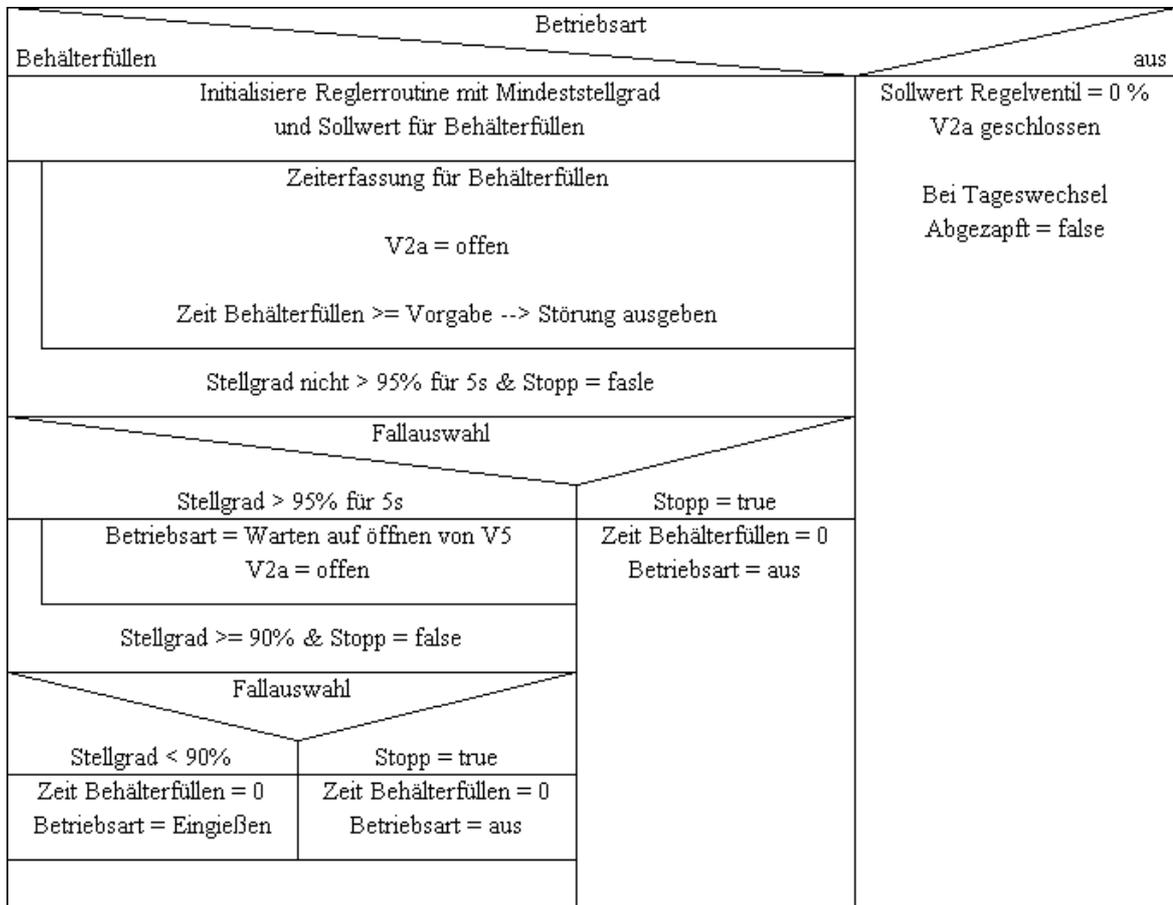


Abbildung 3.6: Struktogramm Behälterfüllen

Schritt 3 Eingießen:

Um Fehler beim Gießen (Vgl. Tabelle 2.2) zu vermeiden und diesen Prozessschritt zu automatisieren werden folgende Steuerungsaufgaben realisiert:

- Druckstoßfreies Eingießen mit optimaler Eingießgeschwindigkeit (Füllstandsänderung/Zeit) durch eine variable Füllstandsregelung im Ausgleichsbehälter
- Selbstparametrierung und Optimierung einer Eingießkurve anhand der Parameter „Modell“ und „Eingießzeit“ nach Feststellung der realen Eingießzeit des letzten Gießzyklusses
- Selbstoptimierung der Ansteuerung des Proportional-Druckreglers

Um eine optimaler Eingießgeschwindigkeit zu erzielen, wird als erstes das Ausfließverhalten des Schlickers in Abhängigkeit vom Behälterfüllstand untersucht.

Die Ausfließgeschwindigkeit aus dem Behälter kann mit der Bernoulli-Gleichung berechnet werden. [SCH07a]: „In Worten besagt die Gleichung, dass die Summe aus statischem Druck, Staudruck und Schweredruck an jeder Stelle einer Strömung konstant ist.“

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = konst = p_{ges} \tag{Gl. 3.5}$$

In den nachfolgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass es zu keiner Reibung zwischen dem strömenden Medium und der Rohrwandung kommt und durch die Füllstandsregelung stets so viel Schlicker nachgeführt wird, dass der Füllstand im Behälter nicht absinkt. Ein vereinfachtes Modell in Abbildung 3.7 dient zur Erläuterung der Zusammenhänge. Wird auf dieses Modell die Bernoulli-Gleichung angewendet so ergibt sich

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 \tag{Gl. 3.6}$$

Dabei ist $p_1 = p_2 = p_0$ (Luftdruck). Somit ergibt sich

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} \tag{Gl. 3.7}$$

Anhand Gleichung 3.7 ist der Zusammenhang zwischen dem Behälterfüllstand und der Ausfließgeschwindigkeit des Schlickers zu erkennen.

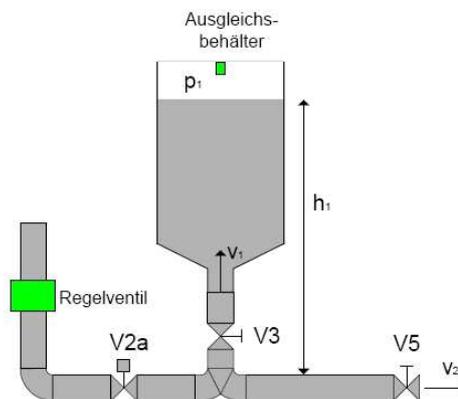


Abbildung 3.7: Vereinfachtes Modell zur Berechnung der Ausfließgeschwindigkeit

Wird das Modell in Abbildung 3.7 erweitert, indem das Formenpaket als großer offener Behälter angenommen wird (Vgl. Abbildung 3.8), ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Ausfließgeschwindigkeit (v_2) in das Formenpaket, der Füllstandshöhe im Ausgleichsbehälter (h_1) und der Füllstandshöhe (h_2) im Formenpaket.

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Gl. 3.8

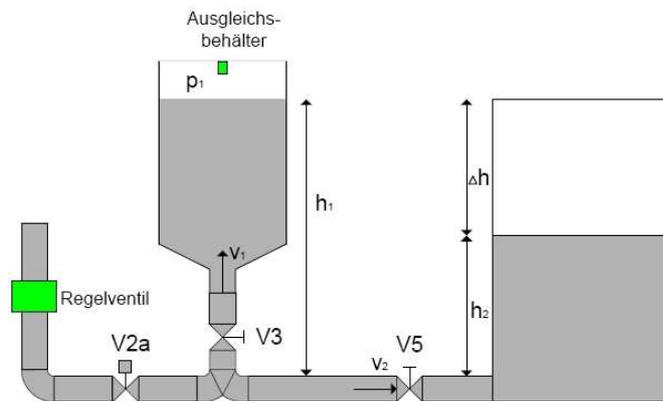


Abbildung 3.8: Vollständiges Modell zur Berechnung der Ausströmungsgeschwindigkeit

Nach Gleichung 3.8 kann die Ausfließgeschwindigkeit (v_2) bei konstantem Füllstand (h_1) im Ausgleichsbehälter als Funktion des Füllstandes im Formeninneren (h_2) dargestellt werden. Somit ergibt sich der Zusammenhang $v_2=f(h_2)$ in Abbildung 3.9.

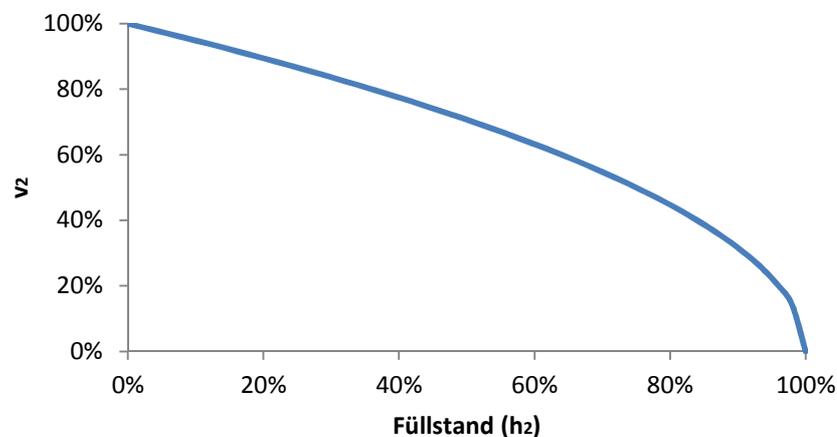


Abbildung 3.9: Ausströmungsgeschwindigkeit als Funktion des Füllstandes

Der Volumenstrom der in das Formenpaket fließt, berechnet sich aus dem Rohrquerschnitt A und der Ausfließgeschwindigkeit v_2 . Zusammen mit Gleichung 3.8 ergibt sich der Volumenstrom:

$$\dot{V} = A \cdot v_2 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Gl. 3.9

Eine spezielle Form der Kontinuitätsgleichung besagt, dass bei inkompressiblen Medien, der Volumenstrom in einem Rohr das Produkt aus der Querschnittsfläche und der Fließgeschwindigkeit ist. [SCH07a]

Daraus folgt mit der Grundfläche des Formenpaketes (A_F) und der Einfließgeschwindigkeit (v_F) des Schlickers:

$$\dot{V} = A \cdot v_2 = A_F \cdot v_F = A_F \cdot \frac{h_2}{t} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad \text{Gl. 3.10}$$

Aus Gleichung 3.10 ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Eingießgeschwindigkeit (h_2/t) und der Differenz zwischen der Füllstandshöhe im Ausgleichsbehälter (h_1) und der Füllstandshöhe im Formenpaket (h_2):

$$\frac{h_2}{t} = \frac{\pi D^2}{4A_F} \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad \text{Gl. 3.11}$$

Demnach ergibt sich zu jedem Füllstand im Formenpaket eine jeweilige Eingießgeschwindigkeit. Betrachten wir einen sehr kleinen Zeitabschnitt (Δt) während des Befüllvorgangs des Formenpaketes, so kann mit hinreichender Genauigkeit festgelegt werden, das sich der Füllstand (Δh) um den Betrag

$$\Delta h_2 = \frac{\pi D^2}{4A_F} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \cdot \Delta t \quad \text{Gl. 3.12}$$

ändert. Eine Aufsummierung dieser Einzelwerte ergibt somit eine Kurve des Füllstandes im Formenpaket in Abhängigkeit von der Zeit.

Aus der Gleichung 3.12 geht hervor, dass unter Berücksichtigung realer Füllhöhen und Eingießzeiten, im unteren Füllhöhenbereich des Formenpaketes die Eingießgeschwindigkeit am größten ist und sich mit zunehmendem Füllstand verringert, woraus sich ein Verlauf nach Abbildung 3.10 ergibt:

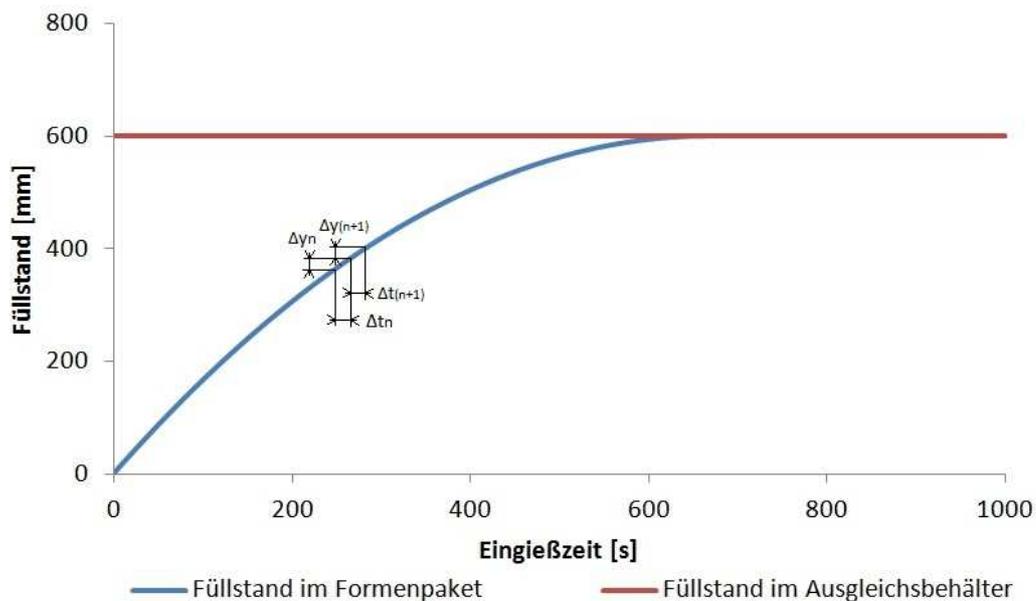


Abbildung 3.10: Füllstandskurve mit festem Füllstand im Ausgleichsbehälter

In der Steuerung ist vorgesehen, für alle Modellnummern spezifische Füllhöhen zu hinterlegen (Vgl. Abbildung 3.11).

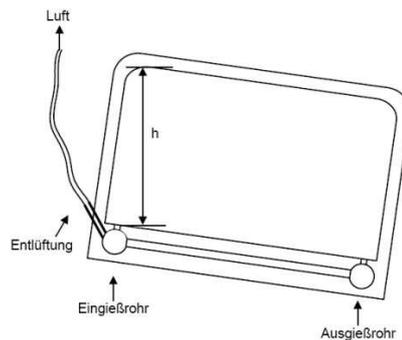


Abbildung 3.11: Querschnitt durch die Form in eingebauter Lage mit der Füllhöhe h

Die resultierende reale Eingießzeit hängt wesentlich vom Fassungsvermögen des Formenpaketes und von der sich einstellenden Fließgeschwindigkeit des Schlickers ab.

Als Führungsgröße für den Prozess wird die Eingießzeit definiert. Da nach dem Ausgleichsbehälter keine regelbare Größe zur Veränderung des Schlickervolumenstroms vorhanden ist, bleibt als Variable nur der Füllstand (h_1) im Ausgleichsbehälter übrig, um die Eingießzeit zu beeinflussen.

Mögliche Füllstandskurven ergeben sich somit nach Abbildung 3.12.

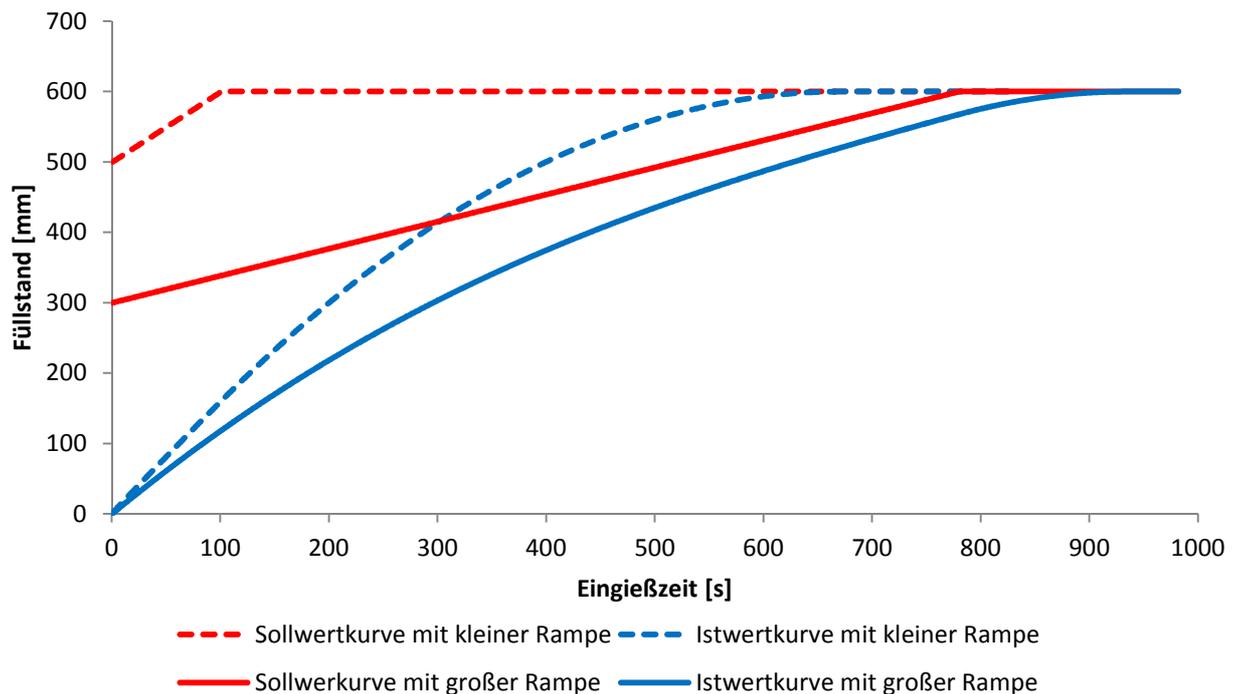


Abbildung 3.12: Füllstandskurve mit Sollwertrampe

Die Grundparametrierung der Eingießkurve wird anhand der Parameter „Füllhöhe der kleinsten Form“ +90mm (h_{1k}), „Füllhöhe der größten Form“ +90mm (h_{1g}) und „Soll-Eingießzeit“ (t_{soll}) vorgenommen. Die Differenz von jeweils 90mm wird vor dem Hintergrund eingefügt, da sonst die „treibende Kraft“ des Prozesses null wird und eine vollständige Füllung der Formen nicht möglich ist. Diese Differenz wurde experimentell ermittelt und erwies sich als optimal.

Die Rampenzeit t_1 errechnet sich aus $t_{\text{soll}} - 120\text{s}$ (dieser Wert wurde empirisch ermittelt). Nachdem die Rampenzeit abgelaufen ist und der Stellgrad der Füllstandsregelung einen definierten Wert überschreitet, wird die gemessene Eingießzeit gespeichert und der Füllstand im Ausgleichsbehälter langsam auf einen vorgegebenen Endwert erhöht. Die Füllstandsregelung bleibt mit konstantem Soll-Füllstand solange aktiv bis die Steuerung ausgeschaltet wird. Einen möglichen Verlauf einer Sollwertkurve zeigt Abbildung 3.13.

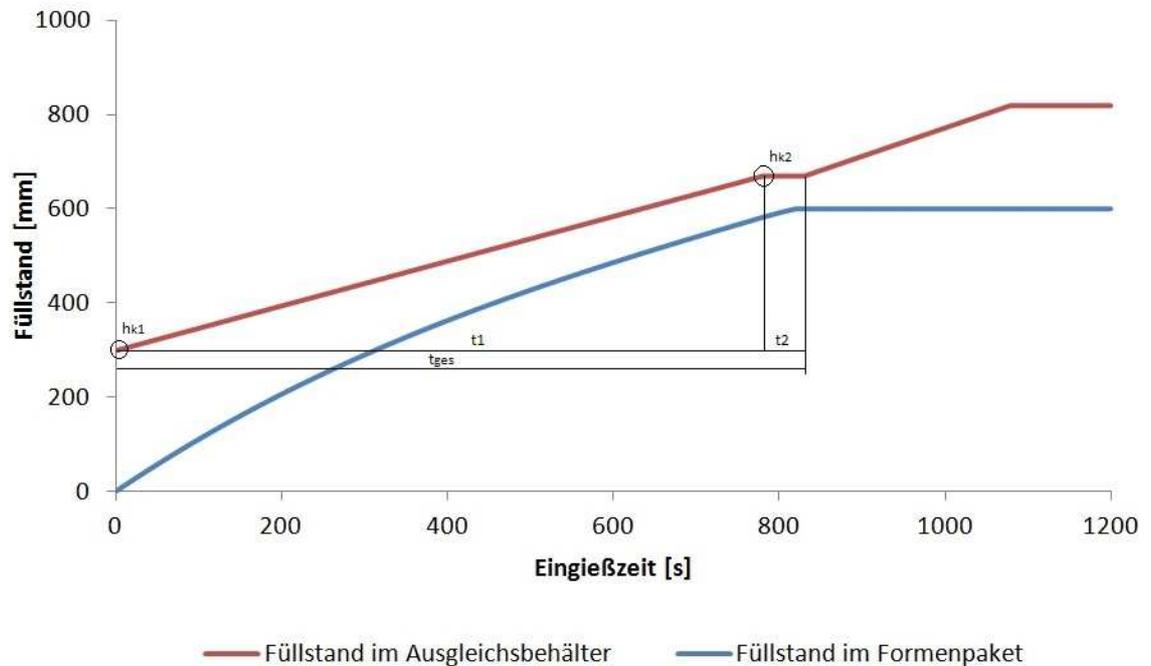


Abbildung 3.13: Verlauf einer vollständigen Sollwertkurve in Abhängigkeit der Vorgabeparameter und der vollständigen Formenfüllung

Durch einen Vergleich der realen, erreichten Eingießzeit und der Soll-Eingießzeit kann die Eingießsteuerung den Verlauf der Soll-Eingießkurve anpassen um beim nächsten Gießzyklus die Soll-eingießzeit zu erreichen (Optimierung der Eingießkurve):

Ist die reale Eingießzeit kleiner als die Soll-Eingießzeit wird h_{k1} um einen bestimmten Betrag erhöht und im umgekehrten Fall verringert. Die Bemessung des Korrekturbetrages errechnet sich nach Gleichung 3.13, wobei der Faktor 0,5 willkürlich festgelegt wurde.

$$\Delta h_{k1} = \sqrt{(t_{\text{soll}} - t_{\text{ges}})^2} \cdot 0,5 \quad \text{Gl. 3.13}$$

Durch das Aneinanderreihen der Formen ist die genaue Bestimmung des Zeitpunktes der vollständigen Formenfüllung nicht möglich, da durch die Füllstandsunterschiede im Formenpaket (Vgl. Abbildung 2.6) jede einzelne Form zu unterschiedlichen Zeiten vollständig gefüllt ist. Dabei verlangsamt sich der Füllstandsanstieg in den Formen desto mehr Formen vollständig gefüllt sind.

Aus diesem Grund ist das Ende der Eingießzeit als Erreichung des Stellgrades 72% der Füllstandsregelung definiert. Dieser Wert wurde empirisch ermittelt und entspricht einem Füllstand im Formenpaket, bei dem etwa die Hälfte der Anzahl an Formen vollständig gefüllt ist.

Eine Messung des Stellgrades des Quetschventils ist technisch nicht möglich, so dass nur eine indirekte Messung über die Steuerdruckluft möglich ist. Da der Stellgrad des Quetschventils gegendruckabhängig ist und die Quetschventile Alterstoleranzen aufweisen, wurde ein

Algorithmus entwickelt der einen Abgleich zwischen Quetschventilstellgrad und Steuerluftdruck durchführt.

Die Wirkungsweise der entsprechenden Bauteile zeigt Abbildung 3.14.

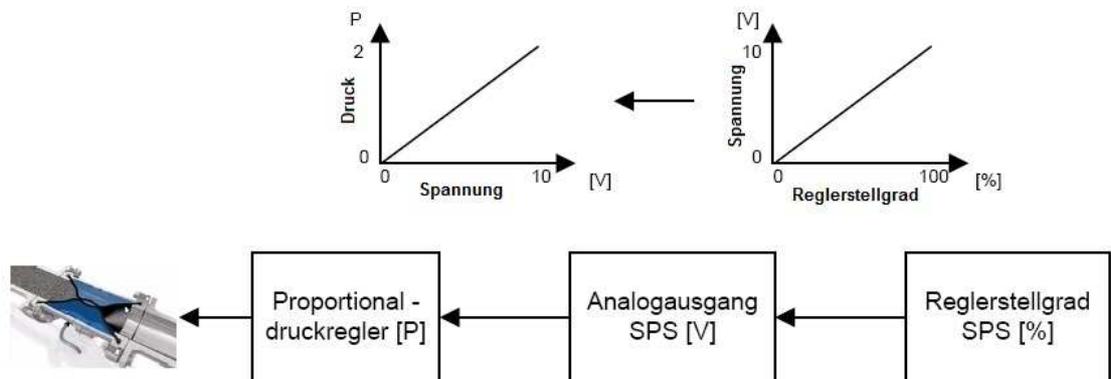


Abbildung 3.14: Wirkungsweise der Regelbaugruppen

Das Quetschventil ist nach Herstellerangabe und unter der Voraussetzung, dass das zu regulierende Medium keinen Druck aufbaut, bei einem Steuerdruck von 2,0bar komplett geschlossen.

Der Druck in der Schlickerleitung, hervorgerufen durch den Füllstand in den Hochbehältern, wirkt dem Steuerluftdruck entgegen und muss entsprechend zu den 2,0bar addiert werden.

Während des Gießzyklusses schwankt der Füllstand in den Hochbehältern durch unterschiedliche Füll- und Abnahmemengen, womit eine feste Skalierung des Proportional-Druckregelventils nicht möglich ist. Dieses Problem wird über eine variable (gleitende) Skalierung der Analogausgangsgröße gelöst.

Diese Anpassung wird für den ersten und zweiten Guss separat vorgenommen. Da die Reihenfolge in der die Anlagen eingegossen werden größtenteils konstant bleibt, ergibt sich somit für jede Gießanlage und jeden Guss eine angepasste Skalierung.

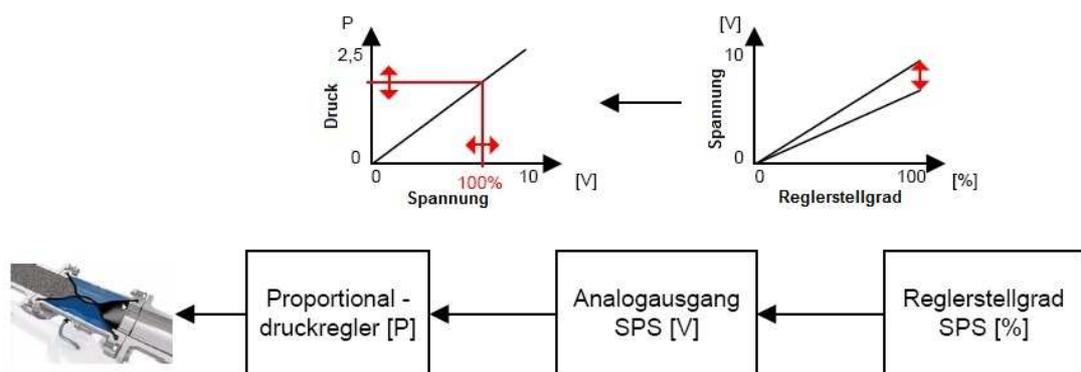


Abbildung 3.15: Einfluss der gleitenden Skalierung auf den Proportional-Druckregler

Eine Zusammenfassung der Steuerungsaufgaben im Eingießprozess sind im Struktogramm (Vgl. Abbildung 3.16) dargestellt.

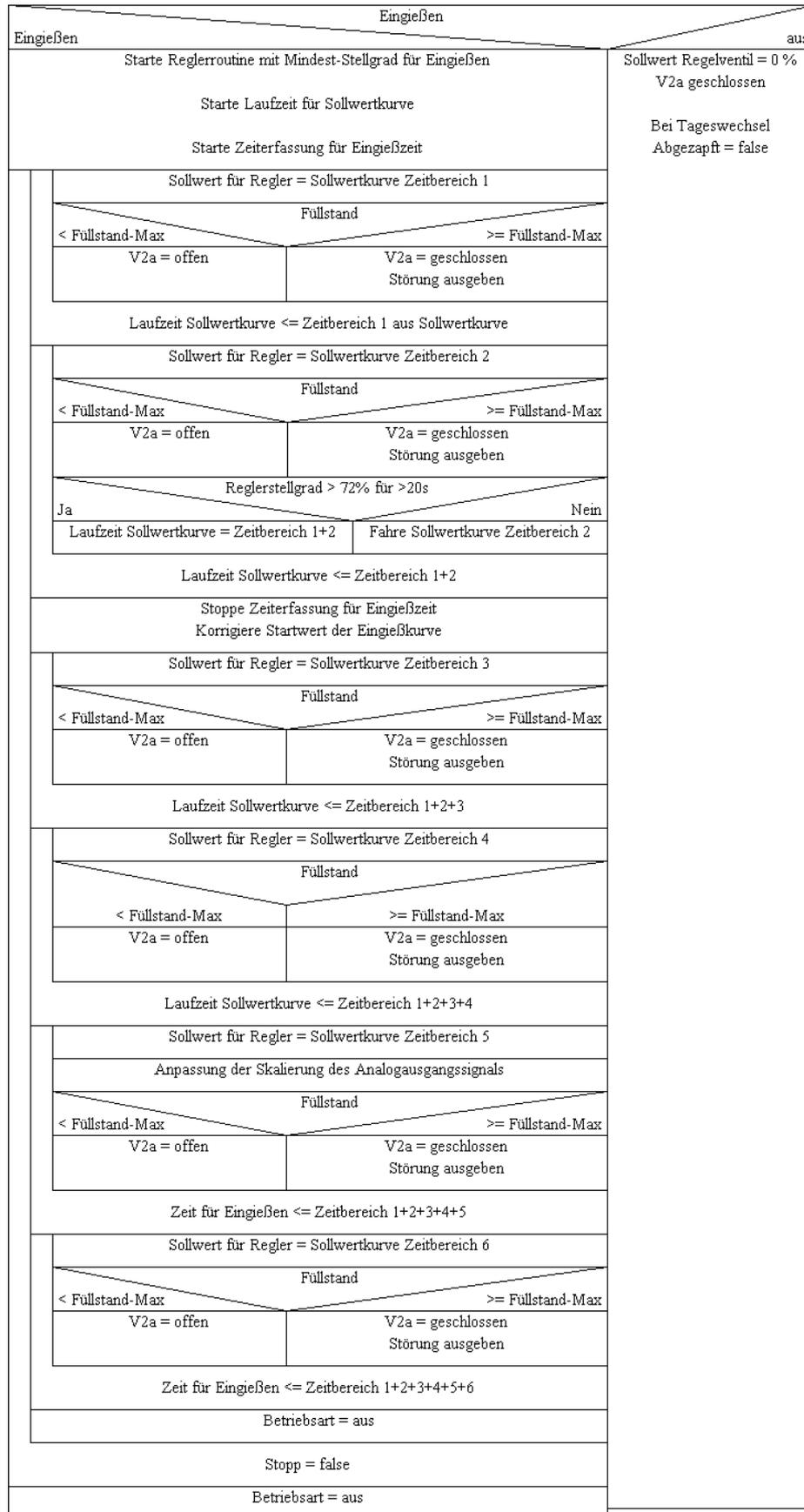


Abbildung 3.16: Struktogramm Eingießprozess

3.2 Regelung

Aus den Überlegungen zu den Steuerungsaufgaben in Abschnitt 3.1.3, dient der Stellgrad des Reglers nicht nur als Stellgröße für das Regelventil, sondern gleichzeitig auch als Umschaltkriterium für die Prozessschritte und auch der Erkennung der realen Eingießzeit.

Um die Zusammenhänge zwischen dem Füllstand des Formenpaketes und dem Stellgrad des Reglers besser zu verstehen, soll der Regelkreis in Abschnitt 3.2.1 im Detail betrachtet werden. Anschließend wird in Abschnitt 3.2.2 die Regelstrecke typisiert um in Abschnitt 3.2.3 die optimalen Reglerparameter zu bestimmen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden in Abschnitt 3.2.4 Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen dem Füllstand im Formenpaket und dem Stellgrad des Reglers gezogen.

3.2.1 Aufgabe und Funktion des Regelkreises

Die Aufgabe der Regelung ist es, den Füllstand im Ausgleichsbehälter auf einen vorgegebenen Sollwert einzuregeln. Die auszuregelnden Störgrößen sind hierbei der Zu- und Abfluss des Schlickers in das Formenpaket, die von vielen Einflussfaktoren abhängig sind. In Abbildung 3.17 ist der Regelkreis dargestellt.

Um die Strecke fortlaufend zu beobachten, wird die Ausgangsgröße (x), die sog. Regelgröße, durch eine Messeinrichtung erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das als Rückführungsgröße (r) bezeichnete Signal enthält Informationen über das unbekannte Verhalten der Störgrößen (z), da es über die Regelgröße (x) von den Störgrößen (z) beeinflusst wird. Die Rückführungsgröße wird nun mit der Führungsgröße (w) verglichen, die von außen vorgegeben wird und im Allgemeinen einen Sollwertverlauf darstellt. Dieser Vergleich erfolgt im Vergleichsglied, das die Regeldifferenz (e) bildet. Ist die Regeldifferenz $\neq 0$, stimmen also Führungsgröße und Rückführgröße nicht überein, muss die Regeldifferenz auf die Strecke einwirken, um die Regelgröße an die Sollvorgabe anzugleichen. Dies geschieht durch eine Änderung der Reglerausgangsgröße (u) die auf den Steller einwirkt. Der Steller beeinflusst über die Stellgröße (y) das Stellglied, welches wiederum Einfluss auf die Strecke hat. [FLÖ09]

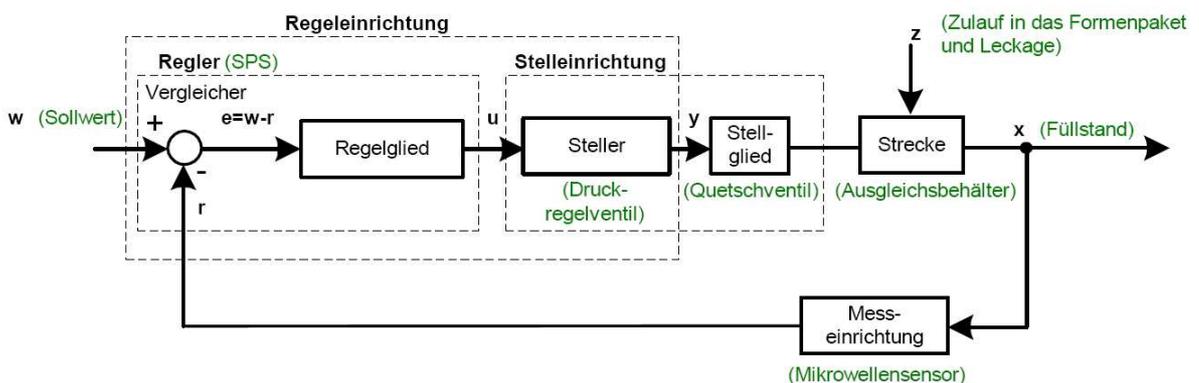


Abbildung 3.17: Regelkreis [FÖL09]

3.2.2 Typisierung der Strecke

Für die folgenden Überlegungen gilt die Annahme, dass der Leitungsdruck der Hauptschlickerleitung zu jedem Zeitpunkt konstant ist.

Wird das Stellglied um einen definierten Wert geöffnet, füllt sich der Ausgleichsbehälter mit konstanter Geschwindigkeit, bis entweder das Stellglied geschlossen wird, oder der Schlicker über den Rand des Behälters läuft. Dieses Verhalten ist das eines I-Gliedes. In der Praxis treten allerdings nur I-Strecken mit zeitlicher Verzögerung auf. Ein Beispiel einer Sprungantwort für eine I-Strecke mit Verzögerung (I-T_n-Strecke) zeigt Abbildung 3.18. Darin ist x_e die sprunghafte Änderung der Eingangsgröße der Strecke und x_a die Sprungantwort der Strecke. [BUS09]

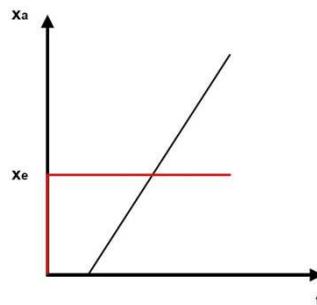


Abbildung 3.18: Sprungantwort einer I-Strecke mit Verzögerung [BUS09]

3.2.3 Ermitteln der optimalen Reglereinstellungen

I-Strecken erreichen keinen Beharrungswert und reagieren langsam. Zum Regeln von I-Strecken bieten sich P- oder PI-Regler an. [BUS09]

Da eine bleibende Regeldifferenz unerwünscht ist, fällt die Wahl auf den PI-Regler. Zur näherungsweise Bestimmung der Reglerparameter soll ein heuristisches⁵ Verfahren herangezogen werden, das ähnlich wie das Wendetangentenverfahren nach *Chien, Hrones* und *Reswick* funktioniert. [BUS09]

Dazu wird die Sprungantwort (x_a) der Regelstrecke mit einem Eingangsgrößensprung der Höhe x_e aufgenommen. Aus dieser Sprungantwort lassen sich die Verzugszeit (T_u) mit dem dazugehörigen Ausgangswert (X_u) und die Integrationszeit (T_{I5}) bestimmen. [BUS09]

In Abbildung 3.19a ist die aufgenommene Sprungantwort mit der Zeit $T_{I5} + T_u$ zu sehen. Abbildung 3.19b zeigt einen Ausschnitt der ersten 5s mit der Zeit T_u .

Mit diesen Werten wird als nächstes der Grad der Verzögerung (n) bestimmt und aus einer Tabelle, entsprechend des gewünschten Regelverhaltens, die Berechnungsformeln für die Verstärkung (K_R) und die Nachstellzeit (T_N) entnommen.

⁵ heuristisch bezeichnet eine analytische Vorgehensweise, bei dem mit begrenztem Wissen über ein System mit Hilfe von Mutmaßungen, Schlussfolgerungen über das System getroffen werden

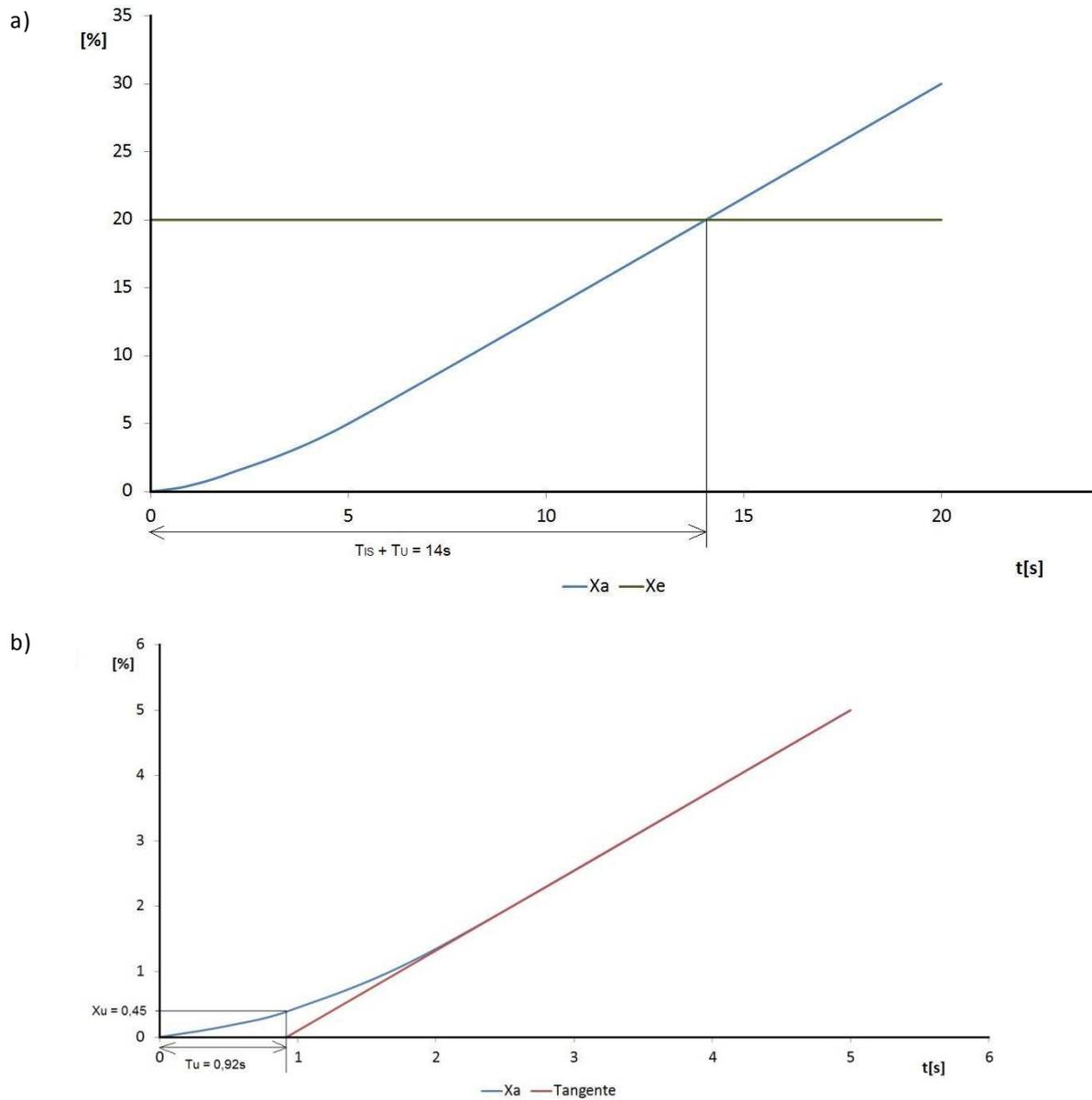


Abbildung 3.19: a) Ermittlung $T_u + T_{is}$ b) Ermittlung T_u

Berechnung der Reglerparameter K_R und T_N [BUS09]

$T_u = 0,92s$, $T_u + T_{is} = 14s$, $X_e = 20\%$, $X_u = 0,45\%$.

$T_{is} = 14s - T_u = 13,08s$

$K_{is} = 1/T_{is} = 0,07645$

$n = \frac{X_u}{K_{is} \cdot T_u \cdot X_e} = 0,64$ entspricht einer I-T₁-Strecke

Die Berechnung für K_R und T_N erfolgt nach den Kriterien „ohne Schwingung“ und „Störverhalten“ nach [BUS09]:

$$K_R = 0,58 \cdot \frac{1}{K_{is} \cdot T_S} = 0,58 \qquad T_n = 4,1 \cdot T_{is} = 53,62s$$

Bei der Aufnahme der Sprungantwort wurde das Quetschventil um 20% geöffnet. Da der Quetschventilstellgrad und der Reglerstellgrad umgekehrt proportional zueinander sind, ist zu beachten dass die Verstärkung negativ sein muss.

Somit ergeben sich die Werte $K_R = -0,58$ und $T_{IS} = 53,62s$.

3.2.4 Reglerstellgrad als Maß für den Füllstand im Formenpaket

Aus dem Aufbau der Regelstrecke in Abbildung 3.17 und den Eigenschaften der Regelstrecke kann nun auf das Verhalten des Reglers in Bezug auf den Füllstand im Formeninneren rückgeschlossen werden.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist ein leeres Formenpaket. Die Ventile V4 und V5 sind geschlossen, der Füllstand im Ausgleichsbehälter ist gleich dem vorgegebenen Sollwert und das Regelventil ist geschlossen ($u = 100\%$) (Vgl. Abbildung 3.20).

Wird nun durch öffnen des Ventils V5 eine Störgröße erzeugt, wird sich durch das Absinken des Füllstandes im Ausgleichsbehälter eine Regeldifferenz (e) ergeben, wodurch der Regler über eine Änderung der Reglerausgangsgröße (u) diese Störgröße kompensiert.

Aus Gleichung 3.9 ist bekannt, dass bei konstantem Füllstand im Ausgleichsbehälter der Volumenstrom in das Formenpaket von der Differenz zwischen dem Füllstand im Ausgleichsbehälter und dem Füllstand im Formenpaket abhängt und mit zunehmendem Formenfüllstand gegen null geht.

Dies bedeutet, dass wenn die Form voll ist, der Volumenstrom in die Form klein wird, was zu einem Ansteigen des Füllstandes im Ausgleichsbehälter führen würde. Dies verhindert der Regler durch Erhöhung des Quetschventilstellgrades.

Die kurzzeitige Veränderung des Quetschventilstellgrades kann somit als Kennzeichen für die komplette Formenfüllung verwendet werden. (Reglerstellgrad $>X\%$ über bestimmten Zeitraum).

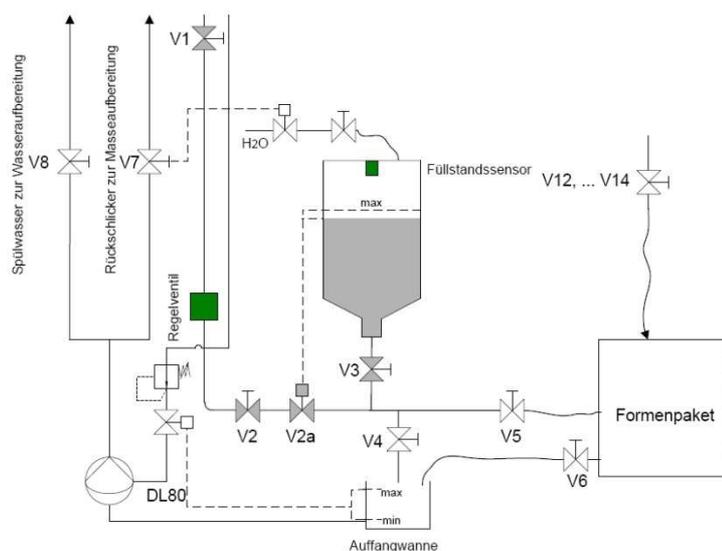


Abbildung 3.20: Anlagenzustand vor Eingießbeginn

3.3 Das Automatisierungsprojekt

Mit den erarbeiteten Steuerungsaufgaben (Abschnitt 3.1.3) und dem Zusammenhang zwischen dem Füllstand im Formenpaket und dem Reglerstellgrad (Abschnitt 3.2.4), kann nun das Automatisierungsprojekt erstellt werden.

Das Standardtool für eine durchgängige Projektierung und Programmierung ist SIMATIC-STEP 7. Der SIMATIC-Manager stellt dabei das zentrale Werkzeug zum Verwalten der Automatisierungsdaten und der dazugehörigen Software-Werkzeuge dar. Mit ihm werden alle Daten in Form eines hierarchisch gegliederten Projektes zusammengehalten. [BER10]

Die folgenden Abschnitte behandeln die Hardwarekonfiguration, die Programmstruktur des Anwenderprogramms, sowie die Umsetzung der zwei Steuerungsaufgaben „Selbstparametrierung und Optimierung der Eingießkurve“ und „gleitenden Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils“.

3.3.1 Hardwarekonfiguration

Mit der Hardwarekonfiguration (HW) im SIMATIC-Manager wird der Aufbau des Automatisierungssystems geplant, sowie die Baugruppen adressiert und parametriert. Der Hardware-Katalog enthält dazu alle verfügbaren Baugruppenträger und Baugruppen die STEP 7 kennt. Baugruppen anderer Hersteller als Siemens müssen über eine GSD-Datei (General Station Description) in den Hardware-Katalog eingepflegt werden. [BER11]

CPU

Die Projektierung der VIPA-CPU 314-ST weist einige Besonderheiten auf. Diese CPU wird als eine entsprechend kompatible Siemens-CPU 318-2 projektiert. Anschließend können über einen virtuellen PROFIBUS, der über einen Kommunikationsprozessor (CP) 342-5 im Hardware-Manager projektiert wird, die SPEEDBUS-Module als Slave eingebunden werden. Analog wird über einen virtuellen CP 343-1 der Ethernet-PG/OP-Kanal konfiguriert. Die Hardware-Konfiguration der CPU mit der Spannungsversorgung auf Steckplatz 1 ist in Abbildung 3.21 dargestellt.

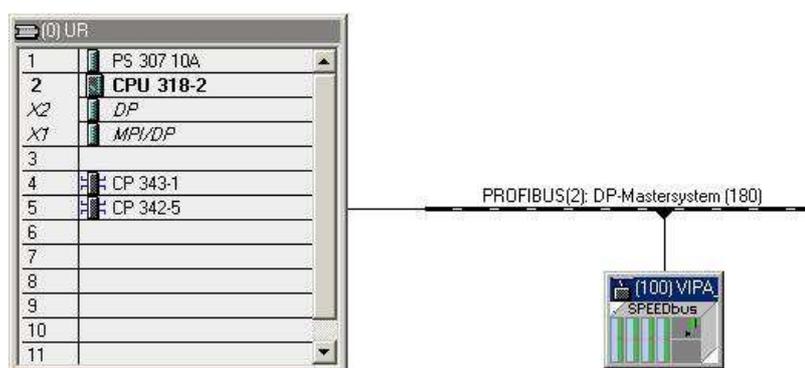


Abbildung 3.21: HW-Konfiguration der CPU mit SPEEDBUS und Ethernet-PG/OP

Kommunikationssystem

Über die integrierte Profibus-DP-Schnittstelle (X2) (Vgl. Abbildung 3.21) der CPU werden die dezentralen Peripherien über ein zusätzliches Mastersystem eingebunden. Somit können maximal 126 Stationen mit je 32 Teilnehmern an einem Segment angeschlossen werden. Die Leitungslänge beträgt ca. 160m, wodurch die Übertragungsrate auf maximal 1,5Mbit/s begrenzt ist. [POP00]

Dezentrale Prozessperipherien

Wie aus Abschnitt 2.7.3 hervorgeht, werden für jede Gießanlage 4 digitale Ein- und Ausgänge, ein Analogeingang, sowie ein Analogausgang benötigt. Zwei Gießanlagen werden über eine PROFIBUS-Station angesteuert. Die Baugruppenkonfiguration für Gießanlage 1 und 2 ist in Abbildung 3.22 dargestellt.

Die Profibuskoppler werden ab der PROFIBUS-Adresse 10 aufwärts projektiert. Mit 2 Gießanlagen an einer PROFIBUS-Station werden somit die PROFIBUS-Adressen 10 bis 19 vergeben. Für die digitalen Ein- und Ausgänge einer Gießanlage wird je ein Eingangsbyte und ein Ausgangsbyte ab der Adresse 10 reserviert. Die Peripheriewörter für die Analogwertverarbeitung sind ab der Adresse 256 aufwärts vergeben.

Steckplatz	DP-Kennung	Bestellnummer / Bezeichnung	E-Adresse	A-Adresse	Kommentar
1	0	750-333 Kein Prozessdatenkanal			
2	8DE	75x-402 4DI/24V DC/3.0ms	10		
3	8DE	75x-402 4DI/24V DC/3.0ms	11		
4	8DA	75x-504 4DO/24V DC/0.5A		10	
5	8DA	75x-504 4DO/24V DC/0.5A		11	
6	2AE	75x-466 2AI/4-20mA/5E	256...259		
7	2AA	75x-550 2AO/0-10V		256...259	
8					
9					
10					
11					

Abbildung 3.22: Auszug aus der HW-Konfiguration des PROFIBUS-Slaves Anlage 1/2

Human Machine Interface (HMI)

Da das HMI für zeitunkritische Operationen, wie z.B. die Anzeigen der Kurvenverläufe und die Eingabe der Prozessparameter dienen soll, genügt die Anbindung über die MPI-Schnittstelle (Multi Point Interface) der CPU. Sie eignet sich für Vernetzungen mit geringen Datenmengen und ermöglicht den Aufbau eines Subnetzes für Zentralbaugruppen, Bedien- und Beobachtungsgeräte sowie Programmiergeräte. [BER10]

Eine komplette Darstellung der Hardware und ihrer Vernetzung die im Tool-NetPro des SIMATIC-Managers erstellt wurde, ist in Abbildung 3.23 zu sehen.

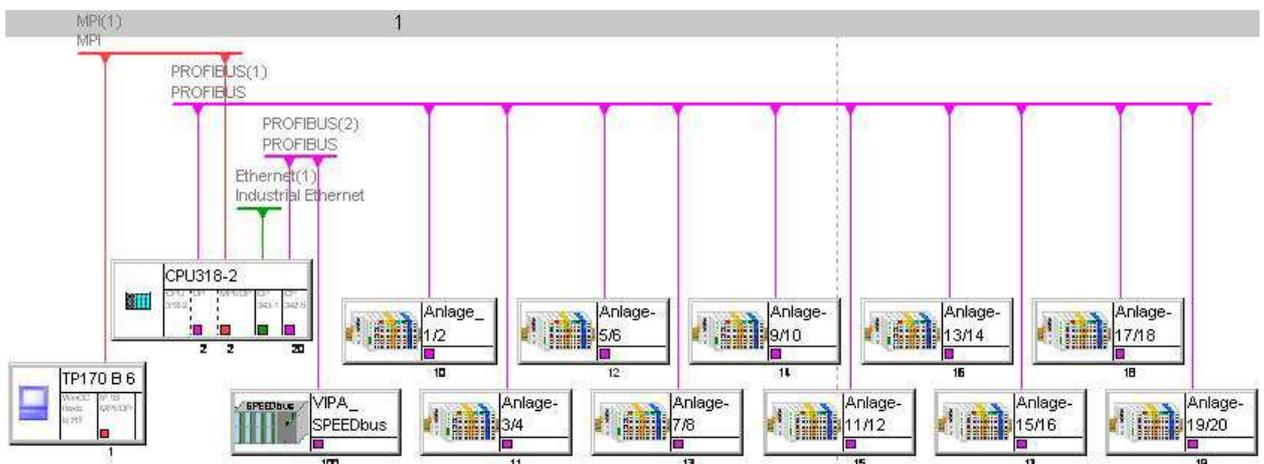


Abbildung 3.23: Vernetzung der HW-Konfiguration in NetPro

3.3.2 Programmstruktur

Damit das Programm in überschaubare Programmeinheiten mit detaillierten Teilaufgaben zergliedert, einzelne Programmbausteine wiederverwendet und somit Entwicklungszeit und -kosten eingespart werden können, kommt ein strukturierter Programmaufbau mit einem Datenaustausch zwischen den einzelnen Programmbausteinen zum Einsatz.

Das Anwenderprogramm besteht aus einem zyklisch abzuarbeitenden Hauptprogramm im Operationsbaustein (OB) 1 (Vgl. Abbildung 3.26) und einem zeitgesteuerten Teil, der Regleroutine im OB35 (Vgl. Abbildung 3.27).

Das Hauptprogramm im OB1 ist folgendermaßen aufgebaut:

Als erstes wird der Funktionsbaustein (FB) 1 aufgerufen. Zu den Funktionen dieses Bausteins zählen:

- das Bereitstellen der Daten (Eingießzeiten, Reglerwerte, Sollwertkurve) aus den Datenbausteinen (DB) 7, 4 und 5 zur Visualisierung und Änderung über das Touch-Panel (HMI)
- die Speicherplatzreservierung der Anlagenparameter im Instanzdatenbaustein DB1 (TP170)

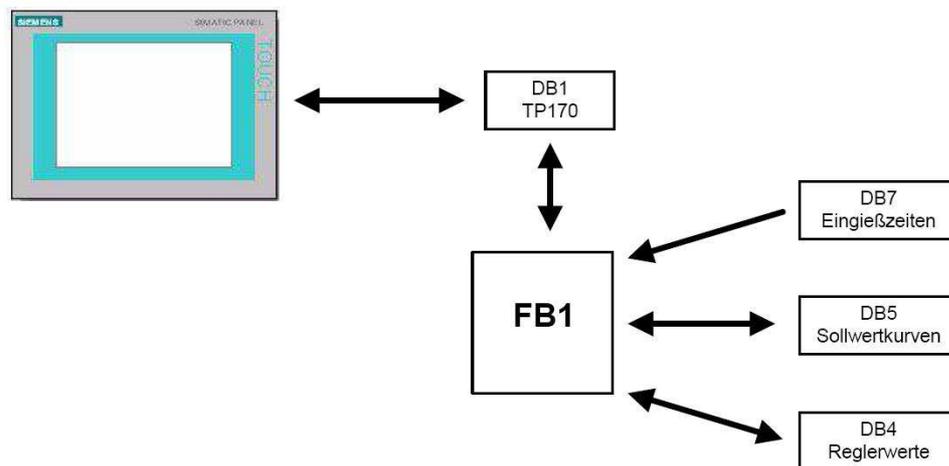


Abbildung 3.24: Funktionsschema FB1

Als nächstes wird der FB2 (Anlagen) durchlaufen. Dieser Baustein organisiert:

- die Zuordnung der Ein- und Ausgänge zu den Multiinstanzbausteinen (FB3)
- den Parameterraustausch zwischen DB1 (Touch-Panel) und den Multiinstanzbausteinen der Gießanlagen (Vgl. Abbildung 3.25)

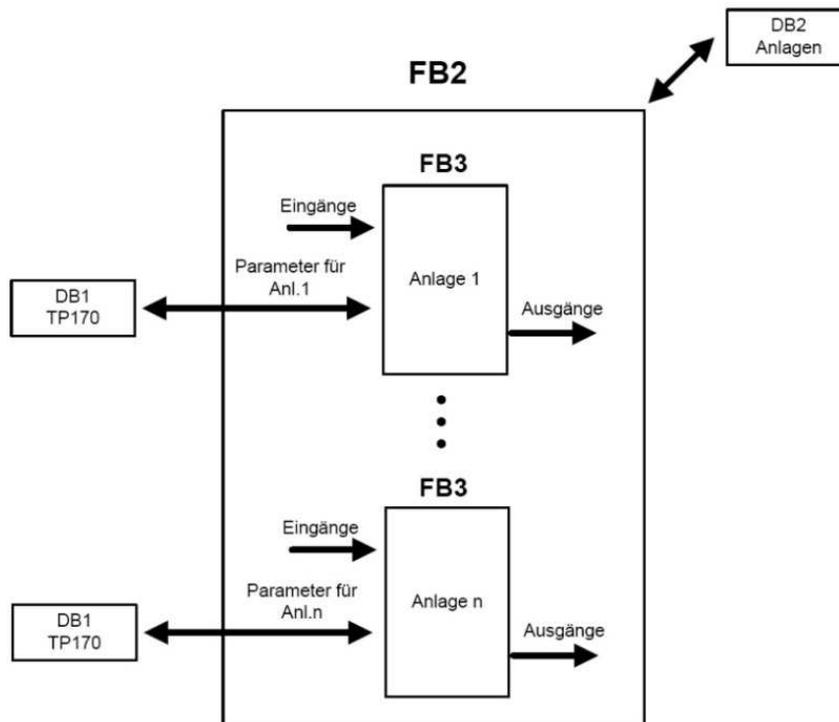


Abbildung 3.25: Funktionsschema FB2

Der FB3 (Anlage) enthält den kompletten Programmcode zur Steuerung einer Gießanlage und ist so konstruiert, dass er für beliebig viele Gießanlagen wiederverwendet werden kann. Er beinhaltet alle Funktionen die zur Umsetzung der in Abschnitt 3.1.3 behandelten Steuerungsaufgaben dienen. Dazu zählen der FC2 zur Ansteuerung des Automatikventils V2a, der FC3 und FC106 zur Skalierung der Analogeingangs- und Analogausgangswerte, der FB4 für die Zuordnung der Reglerwerte und zur gleitenden Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils, der FB5 für die Parametrierung und Optimierung der Sollwertkurve und der FB7 für das Messen und Ablegen der Eingießzeiten.

Um das Programm übersichtlich zu halten und bei einer Schnittstellenänderung FB3 nicht die Aktualwerte aller Eingießzeiten, Reglereinstellungen und Sollwertkurven zu verlieren, sind die Programmbausteine für diese Funktionen als Funktionsbaustein mit eigener Instanz⁶ ausgeführt. Somit liegen diese Daten in einer eigenen Instanz und bleiben bei einer Veränderung der Datenstruktur anderer Bausteine erhalten.

Die Zuordnung dieser Speicherbereiche für die Bearbeitung der jeweiligen Multiinstanz erfolgt über die Eingangsvariable „Anlagennummer“. Die Strukturierung und die Wirkungsweise der Variable „Anlagennummer“ ist in Abbildung 3.26 dargestellt.

⁶ Als Instanz wird der zugeordnete Datenbaustein eines Funktionsbausteins bezeichnet. Dieser beinhaltet die Parameter die an den FB übergeben werden, sowie die statischen Variablen.

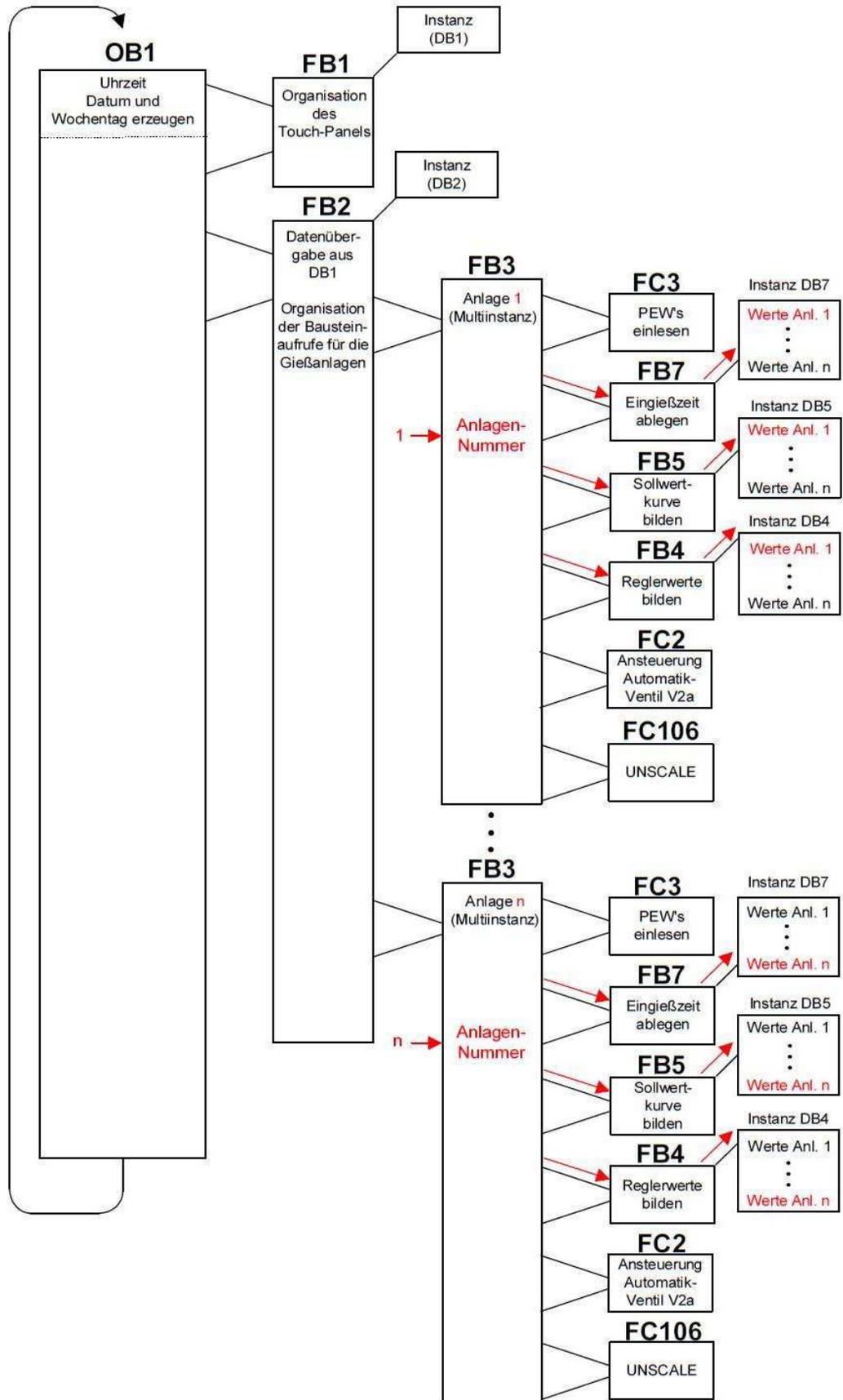


Abbildung 3.26: Programmstruktur

Der zeitgesteuerte Programmteil wird als „Weckalarm“ (OB35) realisiert. Dieser Baustein hat eine höhere Priorität als der OB1 und wird in definierten konstanten Zeitabständen durchlaufen.

In diesem Baustein wird als Füllstandsregler der Funktionsbaustein FB41 (CONT_C) aus der Siemens-Bibliothek aufgerufen. Dieser Funktionsbaustein dient zum Regeln von technischen Prozessen mit kontinuierlichen Ein- und Ausgangsgrößen. Die Voraussetzung für eine genaue Berechnung der Werte ist eine definierte konstante Zeit zwischen den Bausteinaufrufen (Abtastzeit). Diese Zeit wird über die Eingangsvariable „CYCLE“ dem FB zugeführt.

Das Funktionsschema des OB35 ist in Abbildung 3.27 dargestellt.

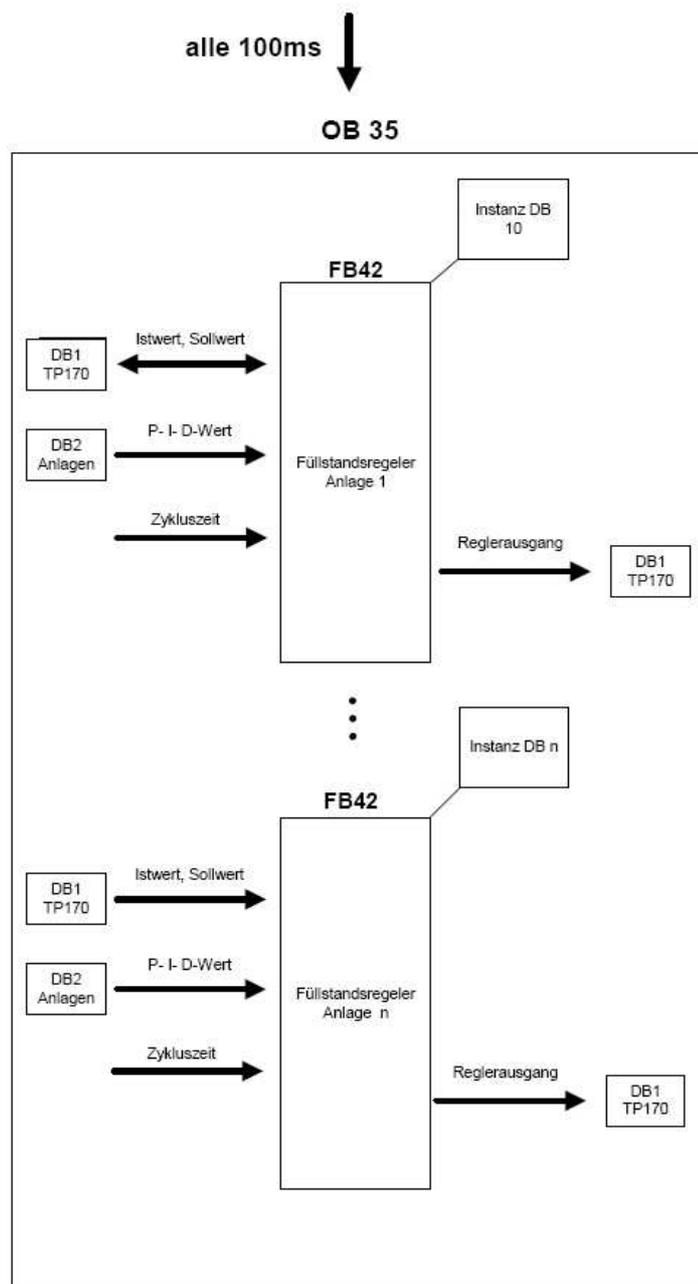


Abbildung 3.27: Funktionsschema OB35

Da in den Operations- und den Funktionsbausteinen FB2 und FB3 vornehmlich Operanden zugewiesen und Bausteine aufgerufen werden, sind diese Bausteine in der gut nachvollziehbaren und übersichtlichen Funktionsbausteinsprache (FBS) (in STEP7 FUP) geschrieben. Für alle anderen Bausteine kommt die Sprache „Structured Control Language“ (SCL) zur Anwendung, da diese Programmiersprache besonders für komplexe Algorithmen, mathematische Funktionen, Daten- bzw. Rezepturverwaltung und zur Prozessoptimierung geeignet ist.

In den folgenden Abschnitten wird auf den Programmcode zur „Selbstparametrierung und Optimierung der Eingießkurve“ im FB5 und zur „gleitenden Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils“ im FB4 eingegangen.

3.3.3 Selbstparametrierung und Optimierung der Eingießkurve im FB5

Die Selbstparametrierung der Eingießkurve wird anhand der Parameter „größte innere Modellhöhe“, „kleinste innere Modellhöhe“ und „Eingießzeit“ (Vgl. Abschnitt 3.1.3) vorgenommen. Diese Parameter werden über das Touch-Panel in einer dafür vorgesehenen Eingabemaske eingegeben (Vgl. Abbildung 3.28) und über den entsprechenden Multiinstanzaufruf dem FB5 als Eingangsparameter übergeben (Vgl. Abbildung 3.26). Mit dem Betätigen der Schaltfläche „Übernehmen“ wird dann die Eingießkurve (Vgl. Abbildung 3.29) parametriert.

Abbildung 3.28: Eingabemaske für Modelle und Eingießzeit

Diese Kurve besteht aus 6 Zeitabschnitten und 7 Kurvenpunkten.

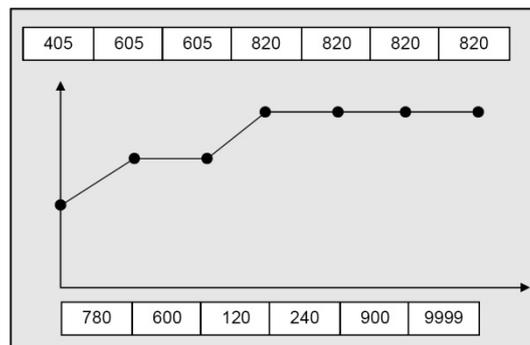


Abbildung 3.29: Solleingießkurve

Einen Ausschnitt aus dem SCL-Quellcode in Abbildung 3.30 dargestellt.

Den Speicherbereich in der Instanz des FB5 ist in Felder (Array's) unterteilt, um die Speicherplatzzuweisung durch indirekte Adressierung vornehmen zu können und dadurch die Anzahl an Programmanweisungen stark zu reduzieren. Als Zeiger dient dabei die Variable „Anlagennummer“ (Vgl. Abbildung 3.26). In dem eindimensionalen Array „Modellhoehe“ (innere Modellhöhe) sind die spezifischen Modellhöhen (Vgl. Abbildung 3.11) fest hinterlegt. Die indirekte Adressierung erfolgt hierbei über die Variablen „Modell_max“ und „Modell_min“ die als Eingangsvariable über den Multiinstanzaufruf zugewiesen werden.

```

FUNCTION_BLOCK FB5

CONST
    Anlagenanzahl := 20;
    Anzahl_Sollwerte := 7;
END_CONST

VAR_INPUT
    Anlagennummer: INT;
    Programm_uebernehmen: BOOL;
    Solleingießzeit: INT;
    Modell_max: INT;
    Modell_min: INT;
END_VAR

VAR
    Wert: ARRAY[1..Anlagenanzahl,1..Anzahl_Sollwerte] OF INT;
    Zeit: ARRAY[1..Anlagenanzahl,1..Anzahl_Sollwerte-1] OF INT;
    Modell_max_gewaehlt: ARRAY[1..Anlagenanzahl] OF INT;
    Modell_min_gewaehlt: ARRAY[1..Anlagenanzahl] OF INT;
    Modellhoehe: ARRAY[1..100] OF INT;
END_VAR

// Parametrierung der Eingießkurve
// (Die Einheit der Werte ist Millimeter, der Zeitabschnitte Sekunden und die der Solleingießzeit Minuten)
IF Programm_uebernehmen = True THEN
    Zeit[Anlagennummer,1] := 60*(Solleingießzeit-2);
    Zeit[Anlagennummer,2] := 600;
    Zeit[Anlagennummer,3] := 120;
    Zeit[Anlagennummer,4] := 240;
    Zeit[Anlagennummer,5] := 900;
    Zeit[Anlagennummer,6] := 9999;
    Eingießzeit_gewaehlt[Anlagennummer] := Solleingießzeit;
IF (Modell_max_gewaehlt <> Modell_max OR Modell_min_gewaehlt <> Modell_min) THEN
    Wert[Anlagennummer,1] := Modellhoehe[Modell_min] + 90;
    Wert[Anlagennummer,2] := Modellhoehe[Modell_max] + 90;
    Wert[Anlagennummer,3] := Modellhoehe[Modell_max] + 90;
    Wert[Anlagennummer,4] := 820;
    Wert[Anlagennummer,5] := 820;
    Wert[Anlagennummer,6] := 820;
    Wert[Anlagennummer,7] := 820;
    Modell_max_gewaehlt[Anlagennummer] := Modell_max;
    Modell_min_gewaehlt[Anlagennummer] := Modell_min;
END_IF;
END_IF;

```

Abbildung 3.30: SCL-Code zur Selbstparametrierung der Eingießkurve

Mit der Schaltfläche „Selbstop Optimierung“ (Vgl. Abbildung 3.28) kann diese optional für jede Gießanlage dazu- oder abgeschaltet werden. Die Selbstop Optimierung der Eingießkurve wird anhand der Differenz zwischen der tatsächlichen (Ist-Eingießzeit des letzten Gusses) und der vorgegebenen Eingießzeit (Soll-Eingießzeit) vorgenommen (Vgl. 3.1.3 Schritt 3 „Eingießen“).

Dem FB5 werden als Eingangsparameter die „Solleingießzeit“, die tatsächliche „Eingießzeit“ und die Information „Selbstop Optimierung“ ein- oder ausgeschaltet übergeben. Erreicht der Stellgrad des Quetschventils länger als 20 Sekunden einen Wert über 72% (d.h. der Eingießprozess ist beendet = die Formen sind gefüllt), wird die Variable „Anlage Voll“ auf „True“ gesetzt.

Unter den Bedingungen, dass die Anlage voll, die Selbstop Optimierung eingeschaltet und die Kurve noch nicht korrigiert ist, wird der erste Kurvenpunkt programmtechnisch wie folgt (Vgl. Abbildung 3.31) verschoben.

```

VAR_TEMP
  Zeitdiff: REAL;
  Zeitdiff_Betrag: REAL;
END_VAR

CONST
  Anlagenanzahl := 20;
  Hysterese := 20;
END_CONST

VAR_INPUT
  Solleingießzeit: INT;
  Eingießzeit: INT;
  Selbstop Optimierung_ein: BOOL;
END_VAR

VAR
  Korrigiert: ARRAY[1..Anlagenanzahl] OF BOOL;
  Anlage_voll: ARRAY[1..Anlagenanzahl] OF BOOL;
END_VAR

IF (Anlage_voll[Anlagennummer] = True AND Korrigiert[Anlagennummer] = false AND Selbstop Optimierung_ein = true) THEN
  Zeitdiff := INT_TO_REAL(Eingießzeit - (Solleingießzeit*60));
  Zeitdiff_Betrag := Sqrt(Sqr(Zeitdiff));
  IF Zeitdiff_Betrag > Hysterese THEN
    Wert[Anlagennummer,1] := Wert[Anlagennummer,1] + REAL_TO_INT(Zeitdiff*0.5);
  END_IF;

  (* Grenzen festlegen *)
  IF Wert[Anlagennummer,1] > Hoehe_max THEN
    Wert[Anlagennummer,1] := Hoehe_max;
  END_IF;

  IF Wert[Anlagennummer,1] < Hoehe_min THEN
    Wert[Anlagennummer,1] := Hoehe_min;
  END_IF;
  Korrigiert[Anlagennummer] := true;
END_IF;

```

Abbildung 3.31: SCL-Code Optimierung der Eingießkurve

3.3.4 Gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportional-Druckregelventils im FB4

Um die unter Abschnitt 3.1.3 beschriebene Funktion der gleitenden Skalierung zu realisieren wird nachfolgende Verfahrensweise angewendet:

Im Zeitabschnitt 5, in dem der Eingießprozess beendet ist, der Volumenstrom in das Formenpaket annähernd konstant ist und der Füllstand im Ausgleichsbehälter nur noch konstant gehalten wird, wird der sich ergebene Stellgrad des Regelventils als 95% definiert.

Der tatsächliche Reglerstellgrad der Steuerung (ebenfalls in %) wird in 30 Sekunden Intervallen in diesem Abschnitt gemittelt.

Durch den Algorithmus wird nun der tatsächliche Reglerstellgrad durch digitales Umskalieren auf 95% angepasst. Dadurch wird der Regelbereich der kompletten Regelkette, bestehend aus Softwareregler in der SPS, Proportional-Druckregelventil und Quetschventil, optimal auf die Gegebenheiten der Anlage angepasst.

Die Berechnungen sind aus dem SCL-Code (Vgl. Abbildung 3.32) zu erkennen. Dabei sind der optimale Druck bei 100% Reglerstellgrad mit „High_Limit“ und der Skalierte Analogwert für die Peripherieausgangsbaugruppe mit „Stellwert_out“ bezeichnet. Die Zahlenwerte 2500 (Druck bei vollständig sicher geschlossenem Quetschventil) und 1500 (Druck bei sicher geöffnetem Quetschventil) entsprechen den Drücken 2,5bar (=2500mbar) und 1,5bar (=1500mbar) des Proportional-Druckregelventils. Der Zahlenwert 32767 ist die Auflösung der Analogausgangskarte.

Die ermittelte Differenz zwischen Stellgrad-Steuerung und 95% (gewollter Stellgrad) wird auf maximal 5% begrenzt, da keine großen Veränderungen der Einflussgrößen zu erwarten sind und größere Schwankungen vermieden werden sollen. Aus dem gleichen Grund wird der Zahlenwert der ermittelten Differenz der Einfachheit halber als Korrekturgröße in die Rechnung eingeführt.

Der sich für den ersten und zweiten Guss jeweils ergebene optimale Druck („High_Limit_Guss1“ und „High_Limit_Guss2“) für die Skalierung des Reglerstellgrades wird in der Instanz des FB5 separat abgelegt und steht somit für den nächsten Guss zur Verfügung.

```

//Speicher für 30 Werte im Sekundentakt auffüllen
IF (Kurvenabschnitt = db5.Bereich_Anlage_voll[Anlagennummer] +3) AND secimp = true THEN
  //Zeiger initialisieren
  IF i[Anlagennummer] <= 0 OR i[Anlagennummer] > 30 THEN
    i[Anlagennummer] := 1;
  END_IF;
  //Speicher für 30 Werte des Reglerstellgrades
  Wert[Anlagennummer,i[Anlagennummer]] := Reglerstellgrad;
  i[Anlagennummer] := i[Anlagennummer] + 1;

  //wenn 30 neue Werte da sind, Mittelwert bilden
  IF i[Anlagennummer] > 30 THEN
    Mittelwert_Regler[Anlagennummer] := 0.0;

    //Werte aufaddieren
    FOR i[Anlagennummer] := 1 TO 30 BY 1 DO
      Mittelwert_Regler[Anlagennummer] := Mittelwert_Regler[Anlagennummer]
        + Wert[Anlagennummer,i[Anlagennummer]];
    END_FOR;
    //Mittelwert bilden
    Mittelwert_Regler[Anlagennummer] := Mittelwert_Regler[Anlagennummer] / 30;
    //Delta zum gewünschten Stellgrad berechnen
    Delta := Mittelwert_Regler[Anlagennummer] - 95.0;
    //Begrenzung für Delta
    IF Delta > 5.0 THEN
      Delta := 5.0;
    ELSIF Delta < -5.0 THEN
      Delta := -5.0;
    END_IF;

    //Oberer Skalierungswert für 1. Guss anpassen
    IF Nummer_Guss <= 1 THEN
      High_Limit_Guss1[Anlagennummer] := High_Limit_Guss1[Anlagennummer] + Delta;
      //Begrenzung der Variable "High_Limit_Guss1"
      IF High_Limit_Guss1[Anlagennummer] > 2500.0 THEN
        High_Limit_Guss1[Anlagennummer] := 2500.0;
      ELSIF High_Limit_Guss1[Anlagennummer] < 1500.0 THEN
        High_Limit_Guss1[Anlagennummer] := 1500.0;
      END_IF;
    ELSE
      //Oberer Skalierungswert für 2. Guss anpassen
      High_Limit_Guss2[Anlagennummer] := High_Limit_Guss2[Anlagennummer] + Delta;
      //Begrenzung der Variable "High_Limit_Guss2"
      IF High_Limit_Guss2[Anlagennummer] > 2500.0 THEN
        High_Limit_Guss2[Anlagennummer] := 2500.0;
      ELSIF High_Limit_Guss2[Anlagennummer] < 1500.0 THEN
        High_Limit_Guss2[Anlagennummer] := 1500.0;
      END_IF;
    END_IF;
  END_IF;
END_IF;

//Stellwert für Servo generieren (0..10V = 0..32767 = 0..2,5bar)
IF Nummer_Guss <=1 THEN
  Stellwert[Anlagennummer] := REAL_TO_INT(High_Limit_Guss1[Anlagennummer] / 2500.0 * 32767.0 );
ELSE
  Stellwert[Anlagennummer] := REAL_TO_INT(High_Limit_Guss2[Anlagennummer] / 2500.0 * 32767.0 );
END_IF;
//Stellwert ausgeben
Stellwert_out := REAL_TO_INT(Stellgrad_Servoventil / 100.0 * Stellwert[Anlagennummer]);

```

Abbildung 3.32: SCL-Code gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße

3.4 Erreichte Ergebnisse

Um das Ergebnis der realisierten automatischen Eingießsteuerung aufzuzeigen, sind mit der Datenaufzeichnungssoftware „ibaPDA-V6“ zwei Gießvorgänge messtechnisch aufgenommen worden. Zusätzlich zu der vorhandenen Messtechnik wurde dazu ein weiterer Druckmessumformer im Eingießrohr (Vgl. Abbildung 2.13) installiert, der der Aufnahme des hydrostatischen Druckes dient.

Abbildung 3.33 zeigt die Prozessschritte „Abzapfen“, „Behälterfüllen“ und „Eingießen“ einer Gießanlage unmittelbar nach einem Besatzwechsel, mit einer selbstparametrierten Sollwertkurve nach vorgegebenen Parametern:

Eingießzeit: 15min; höchstes Modell: 68; kleinstes Modell: 68 (zufällig waren auf der Testgießbank gleich hohe Modelle platziert)

Die Signalkurven in der Abbildung sind wie folgt definiert:

- „Isthöhe_Behälter“ ist das eingelesene und skalierte Analogsignal des Mikrowellensensors
- „Sollhöhe_Behälter“ ist die programmtechnisch vorgegebene Soll-Höhe im Behälter
- „Reglerstellgrad“ ist der in % ausgegebene Stellgrad des Softwarereglers (Vgl. Abbildung 3.27)
- „hydrostatischer_Druck“ ist der gemessene hydrostatische Druck im Eingießrohr, hervorgerufen durch den Füllstand in der Form (Vgl. Abschnitt 2.4.3, Abbildung 2.13, Abbildung 2.14)

Im Abschnitt 1 ist der Prozessschritt „Abzapfen“ zu sehen. Dieser Prozessschritt ist mit 120 Sekunden Laufzeit und einem Mindestquetschventilstellgrad von 60% definiert.

Im Abschnitt 2 ist zwischen den Punkten 1 und 2 der Prozessschritt „Behälterfüllen“ zu sehen. Hierbei wird der Behälter definiert mit einem Mindestquetschventilstellgrad von 50% gefüllt. Beim Erreichen der Sollwertvorgabe am Punkt 2 schließt sich das Quetschventil, bis einige Sekunden später der Eingießer durch manuelles öffnen des Ventils V5 (Vgl. Abbildung 3.20) den Prozessschritt „Eingießen“ startet.

Der Eingießprozess ist zwischen den Punkten 2 und 4 zu sehen. Hierbei ist anhand der Kurve „Hydrostatischer_Druck“ das Füllverhalten wie unter 3.1.3 beschrieben zu erkennen.

Zwischen Punkt 3 und 4 erreicht der Füllstand im Formeninneren seinen maximalen Füllstand, was über die Veränderung des Reglerstellgrad (20 Sekunden >72%) erkannt wird. Anschließend wird der Soll-Füllstand im Ausgleichsbehälter definiert auf 820mm angehoben und bis zum Ausschalten der Anlage konstant gehalten.

In dieser Haltephase ist zu erkennen, dass sich ein Reglerstellgrad von 95% einstellt. Dies ist auf die „gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße des Proportionaldruckregelventils“ (Vgl. Abschnitt 3.3.4) zurückzuführen.

Die tatsächlich ermittelte Eingießzeit des nicht optimierten Gusses (Vgl. Abbildung 3.33 zwischen Punkt 2 und Punkt 4) beträgt 12:21min (741s). Durch die in die in Abschnitt 3.3.3 und Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Algorithmen zur Selbstoptimierung hat sich nach fünf Gießzyklen eine Eingießkurve eingestellt, die eine Eingießzeit von 15:11min (911s) aufweist (Vgl. Abbildung 3.34).

Selbstoptimierende Systeme stehen für handlungsfähige Systeme mit eingebauter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbstständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren. [HNI14]

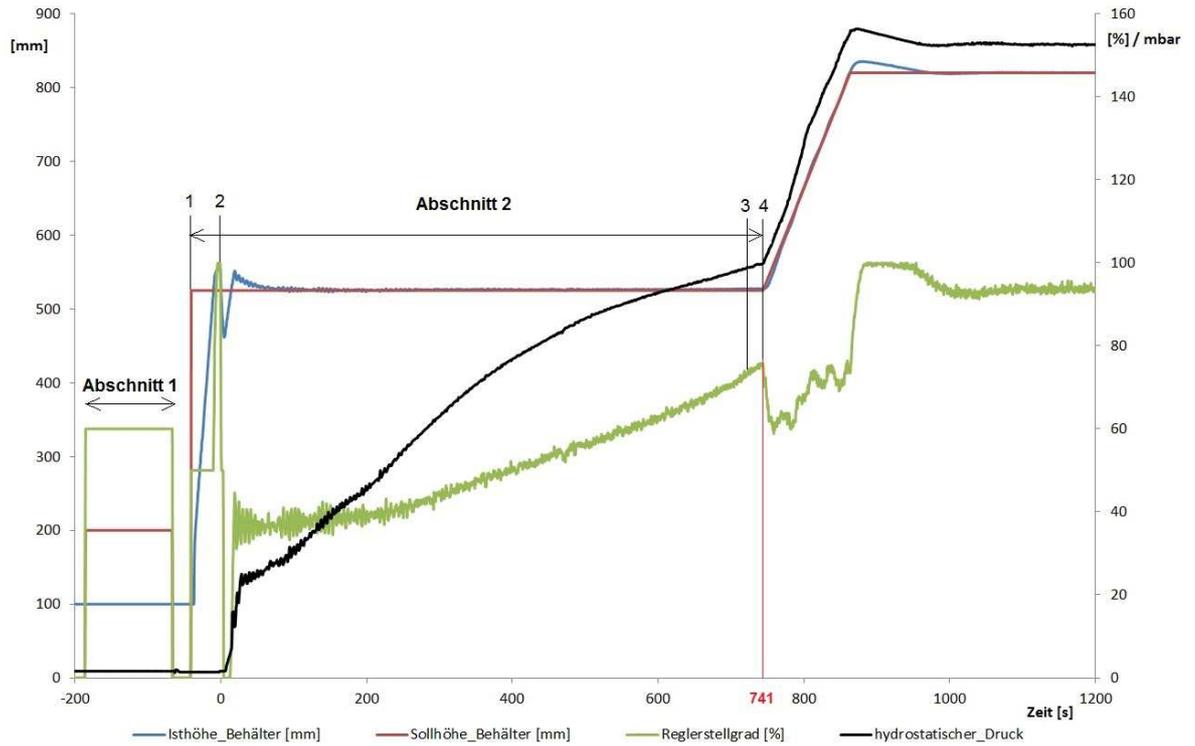


Abbildung 3.33: Aufnahme der Signale beim 1. Guss nach der Selbstparametrierung

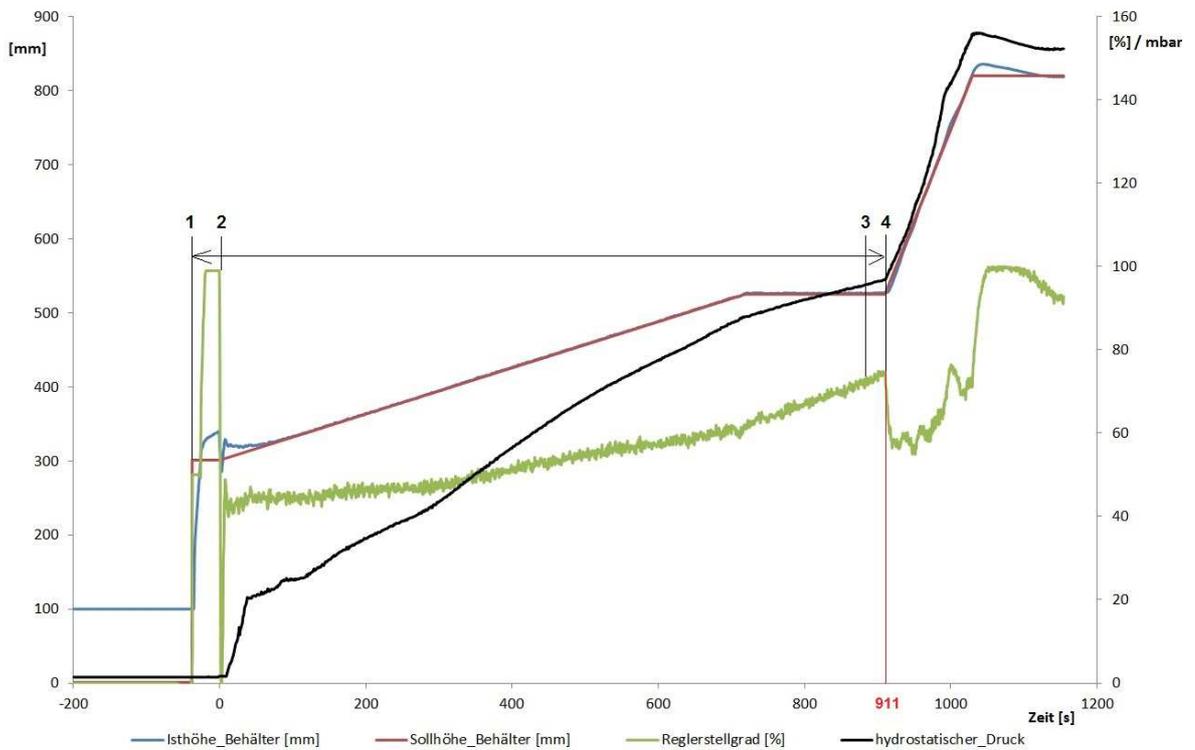


Abbildung 3.34: Aufnahme der Signale mit selbstoptimierter Eingießkurve

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Untersuchungen des Gießverfahrens haben sich mögliche Ursachen für die Entstehung von Gießfehlern bereits in den vorbereitenden Prozessschritten „Abzapfen“ und „Behälterfüllen“ herauskristallisiert. Zur Optimierung der Prozessschritte und Beseitigung der Fehlerursachen sind diese Prozessschritte automatisiert worden.

Der Prozessschritt „Abzapfen“ ist zeitlich definiert und die Ablassgeschwindigkeit des Schlickers über einen definierten Quetschventilstellgrad begrenzt. Dieser vollständig (automatisch) durchgeführte Prozessschritt wird als Freigabebedingung für die folgenden Prozessschritte verwendet.

Im Prozessschritt „Behälterfüllen“ ist die Füllgeschwindigkeit durch einen Mindestquetschventilstellgrad begrenzt worden.

Für die Gewährleistung konstanter Eingießzeiten im Prozessschritt „Eingießen“ wird der Füllvorgang des Formenpaketes durch eine geregelte Füllstands-Sollkurve im Ausgleichsbehälter definiert. Diese Füllstandskurve parametrisiert sich anhand der eingegebenen Parameter „größte innere Modellhöhe“, „kleinste innere Modellhöhe“ und „Eingießzeit“ selbst. Durch den Vergleich der automatisch ermittelten (realen) Eingießzeit mit der vorgegebenen Soll-Eingießzeit, optimiert das System die Eingießkurve solange, bis die reale Eingießzeit der Vorgabe entspricht.

In der Gießerei für Waschtische sind alle Gießanlagen mit der automatischen Eingießsteuerung ausgerüstet worden. Die Zielstellung der Arbeit ist somit vollständig erreicht.

Zur Verbesserung und Optimierung des Systems können nachfolgende Punkte realisiert werden:

Mit der Einbindung eines geeigneten Druckmessumformers im Ausgießrohr (anstelle des temporär verwendeten Druckmessumformers im Eingießrohr (Vgl. Abbildung 2.13)), kann der hydrostatische Druck des Schlickers im Formenpaket gemessen werden. Mit diesem gemessenen Druck und der bekannten „inneren Modellhöhe“ kann die vollständige Formenfüllung besser bestimmt und zusätzlich die Ausgießkurve ermittelt werden.

Mit einem weiteren gesteuerten Quetschventil am Auslass des Ausgießrohres, sowie der Automatisierung der Ventile V9 und V10 (Vgl. Abbildung 2.1), kann die automatische Eingießsteuerung um die Prozessschritte 4 (Scherbenbildungszeit), 5 (Ausgießen/Ablassen) und 6 (Pressen) erweitert werden.

Mit einer anderen Parametrierung ist der Einsatz der automatischen Eingießsteuerung auch für die WC-Gießerei möglich. Erste Versuche sind bereits erfolgt.

Eine weitere Optimierung des Eingießsystems ist durch Anpassung des Korrekturfaktors 0,5 in Gleichung 3.13 möglich, was zu einer schnelleren Erreichung der Solleingießzeit führen könnte.

Durch Veränderung der Korrekturgröße (Differenz zwischen Stellgrad-Steuerung und gewolltem Stellgrad) zur Anpassung der internen Skalierung des Reglerendwertes (Vgl. 3.3.4), könnte eine schnellere Anpassung des Reglerverhaltens an die Gegebenheiten der Anlage erreicht werden.

Symbol- und Indexverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
D	m	Durchmesser
g	$m \cdot s^{-2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
p	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	Druck
t	s	Zeit
v	$m \cdot s^{-1}$	Geschwindigkeit
\dot{V}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Volumenstrom
π	3,14159	Kreiszahl
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte

Indizes für Verzahnungen

Index	Bezeichnung
-------	-------------

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Anlagenschema einer konventionellen Gießanlage	2
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der anisotropen Schwindungsbeträge verschiedener Strukturen [HIL13]	4
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer lokal differierende Schwindung [HIL13].....	4
Abbildung 2.4: a) Pore nach der Entformung b) Pore nach dem Brand	5
Abbildung 2.5: a) Massenzusammenschlag an der Zarge eines Waschtisches b) Wölbung an der Zarge eines Waschtisches nach dem Brand c) Gießfleck an der Einfüllöffnung d) Gießfleckriss nach dem Brand	6
Abbildung 2.6: Strömung im Formeninneren mit Füllstandsunterschied beim Eingießprozess.....	6
Abbildung 2.7: Funktionsweise der Zweipunktregelung im Ausgleichsbehälter [ABB14]	7
Abbildung 2.8: Ausschnitt aus dem Anlagenschema beim Abzapfen	8
Abbildung 2.9: Ausschnitt aus dem Anlagenschema beim Behälter füllen	8
Abbildung 2.10: Querschnitt durch das Formenpaket während des Füllvorganges.....	9
Abbildung 2.11: Ausschnitt aus dem Anlagenschema einer eingegossenen Gießbank.....	9
Abbildung 2.12: Aufbau der Hauptschlickerleitungen in der Gießerei	12
Abbildung 2.13: Anordnung des Sensors bei der Druckmessung	13
Abbildung 2.14: Zeitlicher Verlauf der Eingießkurven aus 1. und 2. Guss	14
Abbildung 2.15: Berührungslose Füllstandsmessung [FRE00]	18
Abbildung 2.16: Mikrowellensensor mit Hornantenne [TO11]	19
Abbildung 2.17: Bauformen von Mikrowellensensoren [FRE00].....	19
Abbildung 2.18: Mikrowellenimpuls mit Echo [FRE00].....	20
Abbildung 2.19: Reflexionsdämpfung und Laufzeitdifferenz von Mikrowellen [FRE00]	20
Abbildung 2.20: Position des Mikrowellensensors im Behälter	21
Abbildung 2.21: Schlauchquetschventilvariante [AKO14]	23
Abbildung 2.22: Proportional-Druckregelventil [FES14].....	23
Abbildung 2.23: VIPA CPU [VIP14]	24
Abbildung 2.24: Hierarchie der Industrielle Kommunikation [WZ11]	25
Abbildung 2.25: PROFIBUS-Module [WAG14]	26
Abbildung 2.26: TP 170B [SIE14c]	26
Abbildung 3.1: Anordnung der neuen Regelkomponenten	28
Abbildung 3.2: Schaltungsaufbau und Wahrheitstabelle altes System	29
Abbildung 3.3: Wahrheitstabelle und KV-Diagramm mit integrierter Eingießsteuerung	30
Abbildung 3.4: Schaltungsaufbau mit integrierter Eingießsteuerung.....	31

Abbildung 3.5: Struktogramm für den automatisierten Abzapfprozess.....	32
Abbildung 3.6: Struktogramm Behälterfüllen.....	33
Abbildung 3.7: Vereinfachtes Modell zur Berechnung der Ausfließgeschwindigkeit.....	34
Abbildung 3.8: Vollständiges Modell zur Berechnung der Ausströmungsgeschwindigkeit.....	35
Abbildung 3.9: Ausströmungsgeschwindigkeit als Funktion des Füllstandes.....	35
Abbildung 3.10: Füllstandskurve mit festem Füllstand im Ausgleichsbehälter.....	36
Abbildung 3.11: Querschnitt durch die Form in eingebauter Lage mit der Füllhöhe h.....	37
Abbildung 3.12: Füllstandskurve mit Sollwertrampe.....	37
Abbildung 3.13: Verlauf einer vollständigen Sollwertkurve in Abhängigkeit der Vorgabeparameter und der vollständigen Formenfüllung.....	38
Abbildung 3.14: Wirkungsweise der Regelbaugruppen.....	39
Abbildung 3.15: Einfluss der gleitender Skalierung auf den Proportional-Druckregler.....	39
Abbildung 3.16: Struktogramm Eingießprozess.....	40
Abbildung 3.17: Regelkreis [FÖL09].....	41
Abbildung 3.18: Sprungantwort einer I-Strecke mit Verzögerung [BUS09].....	42
Abbildung 3.19: a) Ermittlung $T_u + T_{IS}$ b) Ermittlung T_u	43
Abbildung 3.20: Anlagenzustand vor Eingießbeginn.....	44
Abbildung 3.21: HW-Konfiguration der CPU mit SPEEDBUS und Ethernet-PG/OP.....	45
Abbildung 3.22: Auszug aus der HW-Konfiguration des PROFIBUS-Slaves Anlage ½.....	46
Abbildung 3.23: Vernetzung der HW-Konfiguration in NetPro.....	46
Abbildung 3.24: Funktionsschema FB1.....	47
Abbildung 3.25: Funktionsschema FB2.....	48
Abbildung 3.26: Programmstruktur.....	49
Abbildung 3.27: Funktionsschema OB35.....	50
Abbildung 3.28: Eingabemaske für Modelle und Eingießzeit.....	51
Abbildung 3.29: Solleingießkurve.....	51
Abbildung 3.30: SCL-Code zur Selbstparametrierung der Eingießkurve.....	52
Abbildung 3.31: SCL-Code Optimierung der Eingießkurve.....	53
Abbildung 3.32: SCL-Code gleitende Skalierung der Analogausgangsgröße.....	55
Abbildung 3.33: Aufnahme der Signale beim 1. Guss nach der Selbstparametrierung.....	57
Abbildung 3.34: Aufnahme der Signale mit selbstoptimierter Eingießkurve.....	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Fehler und Fehlerursachen	15
Tabelle 2.2: Fehler mit Fehlerursachen und Lösungsansätze	16
Tabelle 2.3: Füllstandsmessmethoden [FRE00]	17
Tabelle 2.4: Stellglieder [MZ05]	22

Literaturverzeichnis

- [ABB14] ABB
Niveauüberwachung und Füllstandsregelung
<http://www.abb.de/product/seitp329/51d65fe7721421c0c1257905003679a9.aspx?tabKey=2&gid=ABB1SVR450059R0000&cid=9AAC132556>
Abfragedatum: 12.01.2014
- [AKO14] AKO
Quetschventile
<http://www.ako-armaturen.de/produkte/quetschventile.html>
Abfragedatum: 08.01.2014
- [BER10] Berger, H.
Automatisieren mit SIMATIC
Publicis Publishing, 4, Erlangen, 2010
- [BER11] Berger, H.
Automatisieren mit STEP7 in AWL und SCL
Publicis Publishing, 7, Erlangen, 2011
- [BEU06] Beuth, K.
Digitaltechnik
Vogel Buchverlag, 13, Würzburg, 2006
- [BUS09] Busch, P.
Elementare Regelungstechnik
Vogel Buchverlag, 7, Würzburg 2009
- [FES14] FESTO
Proportional-Druckregelventil VPPM...(LED)
<http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/166684/754532d6.pdf>
Abfragedatum: 08.01.2014
- [FÖL09] Föllinger, O.
Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung
Hüthing Verlag, 10, Heidelberg, 2009
- [FRE00] Freudenberg, A.
Prozessmesstechnik
Fogel Fachbuch, 1, Würzburg, 2000
- [GAU00] Gauckler, L. J.
Herstellung von Keramik Band 2
Vorlesungsskript, ETH - Zürich, Zürich, 2000

-
- [HNI14] Heinz Nixdorf Institut
SELBSTOPTIMIERENDE MECHATRONISCHE SYSTEME
<http://www.hni.uni-paderborn.de/symposium2008/>
Abfragedatum: 28.03.2014
- [HIL13] Hillebrand, R.
Schlickeroptimierung mittels Additiven am Beispiel einer konventionellen Sanitärmasse
Cfi/Ber. DKG, 2013:1-2, 19-21
- [HS01] Helbig, J.; Schönholzer U.
Grundzüge der Keramik
Vorlesungsskript, ETH - Zürich, Zürich, 2001
- [IFM14] IFM
Elektronischer Füllstandssensor LR3000
<http://www.ifm.com/mounting/706147DE.pdf>
Abfragedatum: 08.01.2014
- [KEC94] Kecke, H.J.
Industrie-Rohrleitungsarmaturen
VDI-Verlag GmbH, 1, Magdeburg, 1994
- [MZ05] Muschet, A.; Ziegert O.
Stoffströme in der Prozessindustrie
Kärntner Druck- und Verlagsgesellschaft m.b.H., Klagenfurt, 1, Klagenfurt, 2005
- [POP00] Popp, M.
PROFIBUS-DP/DPV1
Hütting GmbH, 2, Heidelberg, 2000
- [SCH07a] Schmidt, J.
Kontinuumsmechanik
Studienbrief, Institut für Recycling, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, 2007
- [SIE14a] Siemens
Industrie-Automatisierungssysteme SIMATIC
<http://www.automation.siemens.com/mcms/automation/de/automatisierungssysteme/industrie-automation/Seiten/Default.aspx>
Abfragedatum: 09.01.2014

-
- [SIE14b] Siemens
SIMATIC HMI-Panels
<http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machine-interface/de/hmi-panel/Seiten/Default.aspx>
Abfragedatum: 13.01.2014
- [SIE14c] Siemens
SIEMATIC HMI Touch Panel TP 170A, TP 170B, Operator Panel OP 170B
https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/Dk2NDE1MQAA_1838350_HB/TP170a_d.pdf
Abfragedatum: 13.01.2014
- [STO99] Stoll, K.
Pneumatische Steuerungen: Einführung und Grundlagen
Vogel, 11, Würzburg, 1999
- [SW12] Schnell, G.; Wiedemann B.
Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik
Vogel, 8, Stuttgart/Mannheim, 2012
- [TO11] Tränkler, H.R.; Obermeier, E.
Sensortechnik Handbuch für Praxis und Wissenschaftler
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1, Berlin, 1998
- [VIP14] VIPA
300S Das High-Speed Steuerungssystem
<http://www.vipa.com/de/produkte/steuerungssysteme/300s/>
Abfragedatum: 10.01.2014
- [WAG08] Wagner, W.
Regel- und Sicherheitsarmaturen
Vogel, 1, ????, 2008
- [WAG14] WAGO
Modulares WAGO-I/O-SYSTEM, IP20 (Serie 750/753)
<http://www.wago.de/produkte/produktkatalog/automatisierungskomponenten/modulares-io-system-ip20-serie-750-753/uebersicht/index.jsp>
Abfragedatum: 13.01.2014
- [WZ11] Wellenreuther, G.; Zastrow, D.
Automatisieren mit SPS – Theorie und Praxis
VIEWEG + TEUBNER, 5, Berlin, 2011

Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Nick Bollfraß
Anschrift	Bülstringer Straße 53a, 39340 Haldensleben
Geburtsdatum	21.02.1982
Geburtsort	Haldensleben
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Familienstand	Ledig

Schulbildung

Sep. 1988 – Juli 1998 erweiterter Realschulabschluss
Sekundarschule Samswegen / Hillersleben

Berufsausbildung

Sep. 1998 – Feb. 2002 Energieelektroniker / Betriebstechnik bei der
KERAMAG Keramische Werke Haldensleben

Mär. 2004 – Mär. 2008 Handwerksmeister / Elektrotechnik an der
Handwerkskammer Magdeburg

Okt. 2009 – Mär. 2014 Bachelor of Engineering / Elektrotechnik
Hochschule Anhalt (FH)

Berufliche Erfahrungen

Feb. 2002 – März 2003 Instandhaltungselektriker
KERAMAG Keramische Werke Haldensleben

Apr. 2003 – Dez. 2003 Grundwehrdienst 1./ Fernmeldebataillon 382 in Havelberg

Jan. 2004 – Sept. 2008 Instandhaltungselektriker
KERAMAG Keramische Werke Haldensleben

Seit Okt. 2008 Vorarbeiter für die elektrische Abteilung bei der
KERAMAG Keramische Werke Haldensleben

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Günther, für die Zeit und Mühen bedanken, die er in meine Arbeit investiert hat.

Daneben gilt mein Dank den Kollegen bei der KERAMAG, die mich bei der Umsetzung der Arbeit unterstützt haben und meinem Vorgesetzten Reinhard Gratzke, der es mir überhaupt erst ermöglicht hat diese Arbeit in diesem Umfang durchzuführen zu können.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. Harald Melzer. Nicht nur, dass er immer wieder durch kritisches Hinterfragen wertvolle Hinweise gab, durch sein herausragendes Wissen über die Prozesse in der Keramik konnte er mich immer wieder in meiner Recherche und bei meinen Fragen unterstützen. Er hat mich dazu gebracht, über meine Grenzen hinaus zu denken. Vielen Dank für die Geduld und Mühen.

Auch möchte ich mich bei meiner Freundin Denise Zimmermann bedanken. Sie konnte mich immer wieder motivieren, keramische Zusammenhänge erklären und hat mich während der gesamten Studienzeit unwahrscheinlich unterstützt.

Weiterhin möchte ich mich bei Bianka Liebscher bedanken, die viel Zeit in die Korrektur meiner Arbeit investiert hat und somit zahlreiche Kommata, Satzstellungen und Rechtschreibfehler korrigiert hat.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern Dank, da sie während des Studiums nicht nur finanziell, sondern vor allem auch emotional immer für mich da waren.

