



Universität Karlsruhe (TH)



AK Automation und
Kommunikationstechnik

Ein Beitrag zu ganzheitlicher Automatisierung von Stranggiessanlagen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe

vorgelegte

Dissertation

von

Dipl. Ing. Bujor Dumitriu

aus Riesa

Tag der Einreichung:

30.04.2002

Hauptreferent:

Prof. Dr.- Ing. habil Georg Bretthauer

Korreferent:

Prof. Dr.- Ing. habil Jürgen Wernstedt

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	5
1.1. Bedeutung der Arbeit	5
1.2. Darstellung des Entwicklungsstandes	6
1.2.1. Fuzzy-Regler	7
1.2.2. Fuzzy-Regelungsstrukturen	10
1.2.2.1. Fuzzy-PID-Regler	11
1.2.2.2. Hybride Fuzzy-Regelungssysteme	13
1.2.2.2.1. Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler	13
1.2.2.2.2. Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente	14
1.2.2.2.3. Adaptive PID/Fuzzy-Regler	15
1.2.3. Fuzzy Anwendungen in Stranggiessanlagen	17
1.3 Ziele der Arbeit	19
2. Beschreibung einer Stranggiessanlage	22
2.1. Komponenten der Stranggiessanlage	22
2.1.1. Prozessübersicht.	
2.1.2. Beschreibung der Komponenten der Stranggiessanlage	24
2.1.2.1. Messung der Stahlmenge	25
2.1.2.2. Temperaturmessungen des Stahls	25
2.1.2.3. Kühlung in der Kokille	25
2.1.2.4. Kokillenoszillation	26
2.1.2.5. Kokillenfüllstandsmessung.	27
2.1.2.6. Giessspiegelregelung	28
2.1.2.7. Verteilerfüllstandsregelung	29
2.1.2.8. Sekundärkühlungssystem	30
2.1.2.9. Messen der Strangoberflächentemperatur	32
2.1.2.10. Ausziehrichtmaschine	32
2.2. Automatisierungstechnische Probleme	33
2.2.1. Giessspiegelregelung	36
2.2.2. Positionierung des Stopfens	
2.2.2.1. Elektromechanisches Stellsystem	36
2.2.2.2. Elektrohydraulisches Stellsystem	36
2.2.3. Strangabzugsregelung	37
2.2.3.1. Statik und Kompensation	39
2.2.3.2. Übersteuerung und Begrenzung	40
2.3. Havariefälle	41
2.3.1. Überlauf	41
2.3.2. Durchbruch	42

2.4. Automatisches Angiessen	43
2.4.1. Automatisches Angiessen für kleinere Giessformate	43
2.4.2. Automatisches Angiessen für grössere Giessformate	46
3. Einsatz neuer Methoden für Giessspiegelregelung	48
3.1. Fuzzy-PI-Regler	48
3.2. PI / Fuzzy-PD-Regler parallel geschaltet	50
3.3. PID-Regler mit Fuzzy Adaption	54
3.3.1. Fuzzy – Block Adaption	57
3.3.2. Fuzzy – Block Plausibilität	59
3.4. Digitaler Filter für Kokillenoszillationsstörungen	62
4. Integration der Steuerungen und Regelungen in Prozessleitsysteme	67
4.1. Hierarchie und Anordnung der Module in Prozessleitsystemen	67
4.1.1. Software Regler in der CPU der Strang SPS	70
4.1.2. Software Regler in CPU 2 der Strang SPS	71
4.1.3. Software Regler in separater SPS	71
4.2. Kompakte Lösung für Giessspiegelregelung, Stopfenpositionierung, Kokillenoszillation und Durchbruchüberwachung	72
4.3. Bedienkomponenten und Visualisierung	74
4.3.1. Anlagenübersichtsbilder	75
4.3.2. Gruppenbilder/Messkreisbilder	75
4.3.3. Kurvendarstellung	76
4.3.3.1. Kurzzeittrendkurven	76
4.3.3.2. Langzeittrendkurven	77
4.3.4. Meldesystem	78
5. Implementierung und experimentelle Untersuchungen	79
5.1. Strangiessanlagen in Baotou	79
5.1.1. Implementierung der Fuzzy-Komponenten	79
5.1.2. Erprobung	81
5.2. Kombianlage in Taiwan	85
5.2.1. Prinzip	85
5.2.2. Implementierung in das ABB Prozessleitsystem	87
5.2.3. Erprobung	90
5.2.4. Stopfenkennlinien Identifizierung und Anpassung des Fuzzy-Sets	94
5.3. Strangiessanlage in Hunedoara	95
6. Allgemeine Hinweise zur Inbetriebnahme	99

6.1. Inbetriebnahme des Automatisierungssystems	100
6.2. Inbetriebnahme der Einzelantriebe	101
6.3. Inbetriebnahme der Gruppenantriebe	101
6.4. Inbetriebnahme der Messungen	102
6.5. Inbetriebnahme der Regelungen	103
6.5.1. Geregelte Antriebe	104
6.5.2. Wasserdurchfluss in Sekundärkühlung und Kokillenkühlung	104
6.5.3. Inbetriebnahme und Optimierung der Stopfenpositionsregler	104
6.5.4. Positionierungsaufgaben	108
6.5.5. Giessspiegelregelung	109
6.6. Sequenzen und Teilautomatisierung	114
6.7. Gesamtanlagentest	115
6.8. Bedeutung der Inbetriebnahme	116
7. Zusammenfassung	118
8. Literatur	121

1. Einleitung

1.1. Bedeutung der Arbeit

Die Anlagen der Stahlindustrie sind durch die hohen Ansprüche an Produktqualität, Produktivität sowie durch die Sicherheit für Menschen und Maschinen gekennzeichnet. Die Anforderungen haben stets die Integration der neuesten Methoden für Antriebe, Steuerungen und Regelungen sowie Bedienungs- und Beobachtungssysteme gefördert und beschleunigt.

In der Anlagenkette vom Metallgewinnungsprozess aus Erz bis zur Umformung haben die Stranggiessanlagen die wichtige Aufgabe der Umwandlung von flüssigem Metall in die gewünschte erstarrte primäre Form. Der komplizierte physikalische Prozess des Giessens und der kontrollierten Erstarrung der verschiedenen Metalle (Kupfer, Blei, Stahl, Silber, Aluminium, etc.) haben seit der Erfindung der Stranggiessanlagen¹ grosse technische Anforderungen an die Komponenten der Mechanik, Hydraulik und Elektrotechnik in den Anlagen gestellt [53], [54].

Mit der Einführung der Stranggiessanlagen wurde der bis dahin vorherrschende Blockguss als Voraussetzung für die effektive und fehlerfreie Erzeugung von Produkten der Stahlindustrie Schritt für Schritt ersetzt.

Eine wichtige Forderung an die Anlagen ist die Erzeugung bester Qualität, nicht nur hinsichtlich Analysengenauigkeit und extrem gutem Reinheitsgrad und Oberflächengüte, sondern auch hinsichtlich der Gleichmässigkeit sowohl von Schmelze zu Schmelze, als auch von Stranganfang bis Strangende bezüglich Seigerungsverhalten, Erstarrungsstruktur, technologischer Eigenschaften und Verarbeitungsverhalten.

Mit dem Ziel, diese Forderung besser und effektiver zu erfüllen, wurden in die Anlagen weltweit seit Ende der sechziger bis Anfang der siebziger Jahre die **Speicher Programmierbaren Steuerungen (SPS)**, geregelte Antriebe, elektronische Messungen und Regelungen, elektrohydraulische Servosysteme sowie rechnerbasierte Anlagenautomatisierungs- und Leitsysteme implementiert.

An die Automatisierungsspezialisten für Stranggiessanlagen werden durch eine umfangreiche Palette von Problemen die folgenden Anforderungen gestellt [41]:

- Auswahl und Berechnung von geregelten Mehrmotorenantrieben mit Momentenausgleich
- Festlegung und Optimierung schneller elektrohydraulischer Servoantriebe (Positionierung, Stellungsgeber)
- Auslegung von Durchfluss-, Druck- und Temperaturregelungen für verschiedene Medien
- Planung von Füllstandsmessungen und -regelungen unter schweren Bedingungen
- Früherkennung von Havariefällen
- Untersuchung linearer, nichtlinearer und zeitvarianter Prozesse
- Synchronisation interaktiver Prozesskreise
- Programmierung automatischer Ablaufketten (z.B. Automatisches Angiessen und automatischer Maschinenstart)
- Erstellen integrierter Gesamtlösungen – Hardware und Software
- Integration harmonischer bedienfreundlicher Oberflächen in die Leitsysteme
- Integration der Anlage in die Stahlwerks-Produktions-Strategie und Kommunikation mit anderen Anlagen (Öfen, Walzwerk,...)

¹ 1840 G.Sellers - Blei, 1846 H. Bessemer – Stahl, 1935 S. Junghaus – Aluminium

Für mehrere der aufgelisteten Probleme wurden durch die Weiterentwicklung der Hardware (SPS, Leitsysteme, Antriebe) entsprechenden Lösungen gefunden. Für andere Probleme wurden Hardware- oder Softwarelösungen, die für die meisten Produktionssituationen befriedigend sind, erarbeitet (z.B. Früherkennung von Havariefällen oder Zeitvarianz der Stopfenkennlinie).

Eines der am meisten untersuchten Probleme der Forschungsgruppen bei den Anlagenherstellern ist das Verhalten der Giessspiegelregelung.

Von grosser Bedeutung für die Oberflächengüte und das Kristallisationsgefüge der vergossenen Stränge, sowie für die Durchbruchhäufigkeit der vergossenen Stränge ist die Güte der Giessspiegelregelung [53], [54].

Die Giessspiegelregelung in den Kokillen moderner Stranggiessanlagen wird konventionell weltweit als PID Regelungssystem, oder PID adaptives Regelungssystem entworfen.

Die zum Einsatz kommenden Stellglieder (Stopfen oder Schieber mit hydraulischem Antrieb) sind sowohl stark nichtlinear als auch zeitvariant.

Die hohen Anforderungen an die Einhaltung geringer Regelabweichungen sind bei den konventionellen Lösungen nur schwer und sehr begrenzt erfüllbar.

Bei den konventionellen Lösungen oder bei adaptiven Regelungskonzepten ohne Fuzzy-Komponenten sind aufwendige Parameteridentifikationen erforderlich.

Es sind hochausgebildete Inbetriebnehmer erforderlich und es wird eine relativ lange Inbetriebnahmezeit benötigt.

Der klassische Weg, über eine mathematische Modellierung des zu regelnden Systems einen Regler zu berechnen, funktioniert bei linearen Modellen und linearen Reglern. Auch für bestimmte Klassen von nichtlinearen Systemen (z.B. in der Robotik) sind die Modelle bekannt, und spezielle Entwurfsalgorithmen für nichtlineare Regler sichern die Güte und die Stabilität der Regelkreise.

Problematischer ist die Situation, wenn für nichtlineare oder zeitvariante Systeme nur qualitative Modelle vorliegen, eine Vielzahl von Ein- und Ausgangsgrössen existieren, die Modelle in ihren Strukturen bzw. in ihren Parametern erhebliche Unsicherheiten aufweisen und zudem nur eine beschränkte Modellgüte liefern. Solche Systeme und die zugehörigen Prozesse werden als komplex bezeichnet.

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Verbesserung der existierenden Automatisierungslösungen für Stranggiessanlagen vorgestellt, das auf Basis der Theorie von unscharfen Mengen [62] beruht.

1.2. Darstellung des Entwicklungsstandes

In diesem Abschnitt wird der Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Giessspiegelregelung dargestellt und davon ausgehend werden die in dieser Arbeit zu lösenden Probleme abgeleitet.

Übertragungselemente sind linear, wenn sie das Verstärkungsprinzip und das Überlagerungs- oder Superpositionsprinzip erfüllen und damit das Systemverhalten bezüglich eines einzigen Arbeitspunktes zu betrachten möglich ist.

Die Modellierung linearer Systeme führt zu linearen Gleichungen bzw. Differentialgleichungen. Viele leistungsfähige Untersuchungsverfahren der Regelungstechnik - beispielsweise die Laplace-Transformation, oder lineare Algebra - lassen sich nur bei linearen Regelkreiselementen anwenden. Auch für die Modellbildung selbst existiert eine Vielzahl von Verfahren, beginnend bei einfachen Modellansätzen, deren Parameter per Hand ermittelt werden können, bis hin zu aufwendigen, numerischen Parameterschätzverfahren, mit deren Hilfe auch Modelle höherer Ordnung bestimmt werden können.

Für die Synthese linearer Regelkreise steht eine umfangreiche Sammlung von Entwurfsverfahren zur Verfügung, beginnend beim einschleifigen Standardregelkreis über Kaskadenregelungen bis hin zu Zustandsregelkreisen mit oder ohne Beobachter [15], [26], [31], [51].

Die Frage nach der Stabilität eines linearen Regelkreises kann anhand verschiedener numerischer oder grafischer Kriterien, wie sie beispielsweise von Routh oder Nyquist angegeben wurden, eindeutig und in der Regel auch ohne allzu grossen Aufwand geklärt werden.

Für nichtlineare Systeme existiert keine geschlossene Theorie [23]. Die Nichtlinearitäten können so unterschiedlich sein, dass mathematische Modelle, Entwurfsverfahren oder Stabilitätsaussagen nur für eine begrenzte Klasse von speziellen Nichtlinearitäten brauchbar sind.

Innerhalb eines Regelungssystems können Nichtlinearitäten an vielen Stellen auftreten: in der Regelstrecke, in den Sensoren, im Regler oder im Stellglied. Nichtlinearitäten verschlechtern die Systemdynamik und so lange sie nicht gezielt eingesetzt werden, um andere Nichtlinearitäten zu kompensieren, sind sie auch nicht gewünscht. Die realen Systeme sind nichtlinear. Die allgemein als linear bezeichneten Systeme sind also genaugenommen nichts anderes als nichtlineare Systeme mit vernachlässigbaren Nichtlinearitäten [30], [38]. Der Zusammenhang zwischen der Eingangsgrösse und der Ausgangsgrösse eines Regelungssystems wird im allgemeinen durch eine nichtlineare Differentialgleichung angegeben, deren Lösung meist aufwendig ist. Die Untersuchung beschränkt sich daher auf das System im Arbeitspunkt, so dass die Differentialgleichung linearisiert werden kann [30], [39].

Die realen Systeme sind häufig auch zeitvariant und/oder weisen verteilte Parameter auf.

Bei nichtlinearen Systemen oder Parametervariationen im Betrieb wird jedoch ein für einen bestimmten Arbeitspunkt entworfener linearer Regler nur eine ungenügende Regelgüte liefern. In solchen Fällen wird eine Parameteradaption oder der Einsatz eines nichtlinearen Reglers die Situation verbessern.

Für diese Systeme ist es interessant Fuzzy-Regler einzusetzen. Die von Zadeh eingeführte Fuzzy-Logik versucht, insbesondere das regelgeleitete menschliche Vorgehen nachzubilden und qualitatives Prozesswissen in Form von unscharfen Regeln zu verarbeiten [62], [63].

Der Fuzzy-Regler stellt einen äusserst flexiblen, in linguistischer Form parametrierbaren nichtlinearen Regler dar, der optimal an die Prozessdynamik angepasst werden kann. In Kombination mit konventionellen Reglern ergeben sich darüber hinaus vielfältige Möglichkeiten zum Aufbau hybrider und adaptiver Regelungssysteme [7], [29], [30].

1.2.1. Fuzzy-Regler

Ein Fuzzy Regler kann zunächst einmal ganz unabhängig von seiner Wirkungsweise als ein Übertragungssystem mit Eingängen und Ausgängen interpretiert werden [29], [30]. Der strukturelle Aufbau eines solchen Fuzzy-Regler ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Er besteht demnach aus drei Bestandteilen, nämlich:

- die Fuzzifizierung
- die Inferenzeinheit
- die Defuzzifizierung

Der Fuzzy-Regler ermittelt aus einer oder mehreren Eingangsgrössen Stellgrössen, die als Eingangsgrössen der Regelstrecke das Regelungsverhalten bestimmen.

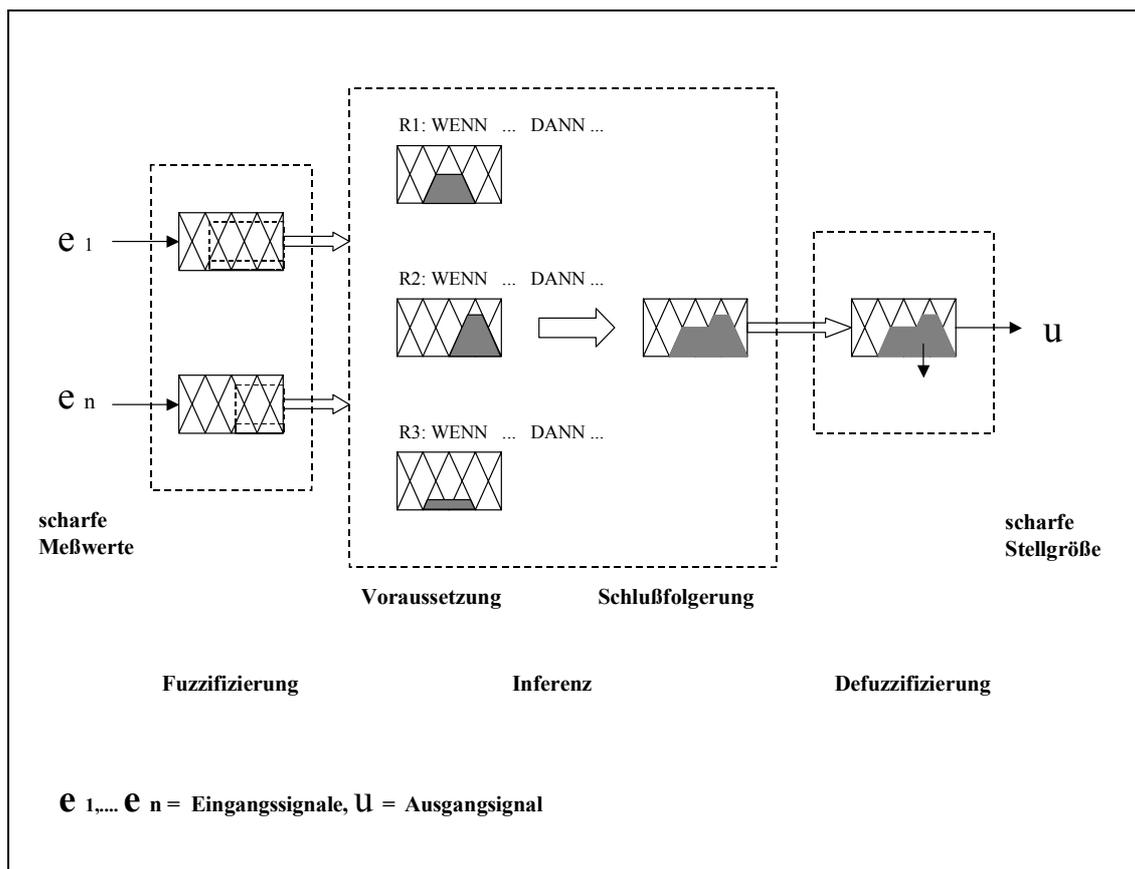


Abbildung 1.1: Struktureller Aufbau des Fuzzy Reglers.

Die **Fuzzifizierung** übersetzt die scharfen Werte von Eingangsgrößen in Zugehörigkeitsgrade von linguistischen Werten. Für jeden linguistischen Wert (Zugehörigkeitsfunktion) wird der Zugehörigkeitsgrad (Werte zwischen Null und Eins) ermittelt, den der scharfe Wert der Eingangsgröße erzeugt. Damit erfolgt eine Transformation von scharfen Werten zu einer natürlichsprachlichen Situationseinschätzung (z.B. größer – kleiner, langsamer – schneller, sehr schnell).

Die **Inferenzeinheit** von Fuzzy-Reglern bildet mit den fuzzifizierten Werten der Eingangsgrößen und den linguistischen Regeln der Regelbasis die linguistische Schlussfolgerung. Für regelungstechnische Anwendungen werden Schlussfolgerungen in Form von Handlungsanweisungen ermittelt. Ist z.B. die Regeldifferenz kleiner, so wird die Handlungsanweisung abgeleitet, die Stellgröße zu verringern.

Der Inferenzmechanismus hat drei Teile [3], [30], [39], [42], [64]:

- Auswertung der Prämissen (Ermittlung der Wahrheitswerte der Regelvoraussetzungen),
- Regelaktivierung (Ermittlung der Wahrheitswerte der Regelschlussfolgerungen)
- Akkumulation oder Aggregation (Ermittlung der Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße durch Überlagerung der Zugehörigkeitsfunktionen)

Dazu sind fünf Operatoren erforderlich [5], [30], [39], [42], [45]:

1. UND-Verknüpfung der Terme in der Voraussetzung einer Regel (Prämissenauswertung)
2. UND-Verknüpfung von Erfüllung der Regelvoraussetzung und Glaubwürdigkeit der Regel (Aktivierung)
3. ODER-Verknüpfung von gleichen Handlungsanweisungen aus verschiedenen

Regeln (1. Schritt der Akkumulation)

4. UND-Verknüpfung der Ergebnisse aus 3. mit den Zugehörigkeitsfunktionen dieser Handlungsanweisungen (2. Schritt der Akkumulation)
5. ODER-Verknüpfung der Zugehörigkeitsfunktionen von unterschiedlichen Handlungsanweisungen aus verschiedenen Regeln (3. Schritt der Akkumulation)

die hier als Inferenzschema bezeichnet werden.

Bei der Auswertung der Regelprämissen (WENN-Teil) sind unscharfe UND- und ODER-Verknüpfungen zu operationalisieren. Prinzipiell können für UND (Durchschnitt) t-Norm- und für ODER (Vereinigung) t-Konorm eingesetzt werden. Einfach zu realisieren sind der MIN-Operator (t-Norm) und der MAX-Operator (t-Konorm). Die wichtigsten Inferenzmethoden für automatisierungstechnische Anwendungen sind die MAX-MIN-, MAX-PROD-, SUM-MIN-, SUM-PROD-Strategien. Die zweite Bezeichnung gibt an, wie die Aktivierung ausgeführt wurde, die erste, auf welche Art die Akkumulation realisiert wird.

Das **Defuzzifizierungsverfahren** erzeugt aus einer unscharfen Menge einen scharfen Wert. Die Handlungsanweisung als Ergebnis der Inferenz wird in einen scharfen Stellwert transformiert, der auf das Stellglied aufgeschaltet wird. Dabei wird der Kompromisswert gesucht, der am besten zur natürlichsprachlichen Handlungsanweisung passt.

Zur Defuzzifizierung werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Für regelungstechnische Anwendungen sind die Schwerpunktverfahren von Bedeutung. Für den Entwurf von Fuzzy-Reglern existieren unterschiedliche Entwurfswege und Strategien. Die wesentlichen Unterschiede bestehen darin, ob [46].

- nur das Wissen über das Regeln des Prozesses erfasst wird oder ob zunächst der Prozess selbst modelliert wird (Wissen über das Prozessverhalten),
- der Entwurf heuristisch oder (zumindest teilweise) systematisch erfolgt,
- nur Regeln oder auch Parameter (z.B. Stützpunkte der Zugehörigkeitsfunktionen) ermittelt werden,
- nur Wissen von Prozessexperten oder auch regelungstechnisches Wissen eingebracht werden.

Die Entwurfsstrategien lassen sich grob in drei Hauptwege einteilen, wobei auch eine Vielzahl hybrider Strategien existiert:

- Befragung des Experten bzw. Prozessbedieners über sein Wissen zur Regelung des Prozesses und Entwurf des Fuzzy-Reglers durch Nachbildung dieses Verhaltens,
- Erstellung eines mathematischen (Teil-) Modells der Regelstrecke und (teilweise) systematischer oder simulativer Entwurf des Fuzzy-Reglers.
- Erstellung eines qualitativen Modells der Regelstrecke und systematischer Entwurf des Fuzzy-Reglers.

Übertragungsverhalten des Fuzzy Reglers

Die Charakterisierung technischer Systeme erfolgt anhand ihres Übertragungsverhaltens, d. h. des Zusammenhangs zwischen dem zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße des Systems und dem zeitlichen Verlauf der Eingangsgröße.

Die interne Struktur eines Fuzzy-Regler besteht aus den oben beschriebenen Komponenten (Fuzzifizierung, Inferenz, Defuzzifizierung).

Das Übertragungsverhalten der scharfen Eingangsgrößen auf die scharfen Ausgangsgrößen wird durch diese Komponenten festgelegt, und ist im allgemeinen nichtlinear. Weiterhin ist die Übertragungsfunktion statisch: Nur die aktuellen Eingangswerte bestimmen über algebraische Gleichungen die Ausgangswerte.

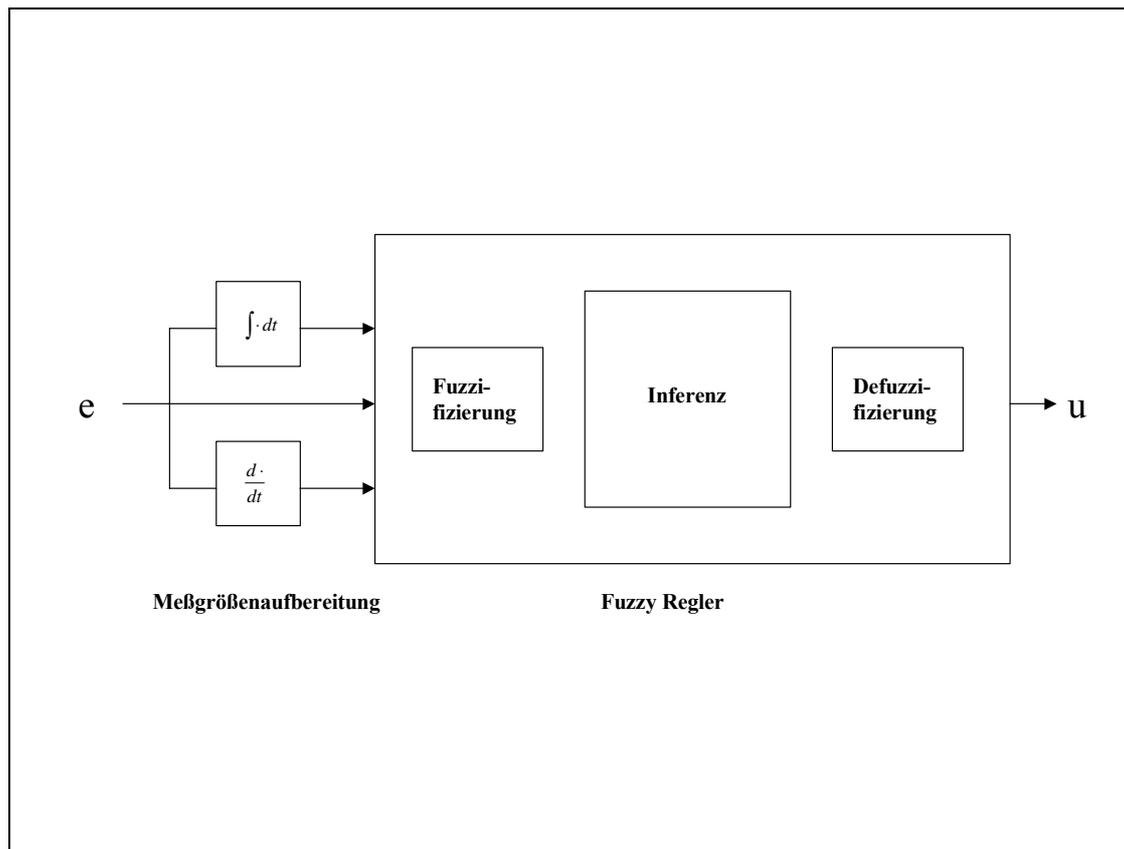


Abbildung 1.2: Fuzzy- Regler mit dynamischen Funktionen

Der Stellgrößenwert u zum Zeitpunkt t (Abbildung 1.2) ist vollständig und eindeutig bestimmt durch die Eingangsgrößenwerte zu diesem Zeitpunkt; zeitlich weiter zurückliegende Eingangsgrößenwerte werden zu seiner Berechnung nicht benötigt. Dynamische Eigenschaften von Fuzzy-Reglern können nur durch zusätzliche dynamische Funktionen erzeugt werden (Abbildung 1.2). Bei Fuzzy-PID-Reglern werden Differentiale oder Differenzen von Eingangsgrößen gebildet und Integrationen oder Summierungen von Ausgangsgrößen ausgeführt.

Das Übertragungsverhalten eines Fuzzy-Reglers lässt sich durch die Wahl der linguistischen Werte der Eingangsgrößen (Fuzzifizierung), der Inferenzmethode und der linguistischen Werte der Ausgangsgrößen einstellen. Durch geeignete Modifikationen kann dem Fuzzy-Regler im Prinzip beliebiges Übertragungsverhalten verliehen werden.

1.2.2. Fuzzy-Regelungsstrukturen

Das grundlegende Prinzip von Fuzzy-Regelungen führt dazu, dass die Schwerpunkte der Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik sich in folgende Richtungen orientieren [29], [35]:

- Fuzzy-Regelungen in der unteren Ebene für Prozesse mit nur quantitativer Kenntnis des Verhaltens und ausgeprägt nichtlinearem Verhalten
- Nachbildung des Menschen als Regler
- Ergänzung klassischer Regelungen durch Fuzzy-Komponenten (Kaskaden-Regelung, Störgrößenaufschaltung, strukturvariable Regler)
- Einstellung und Adaption klassischer Regler mit Fuzzy-Logik
- Fuzzy-Regelung und Steuerung für nichtmessbare Größen, Qualitäts- oder Komfort-Kenngrößen
- Fuzzy-Regelung für besondere Betriebsbedingungen

Nach diesen Anwendungsklassen haben sich die Fuzzy-Regelungsstrukturen in der Praxis entwickelt.

1.2.2.1. Fuzzy-PID-Regler

Aufbauend auf den Erfahrungen von PID-Regler-Anwendungen kann durch Erweiterung mit Fuzzy-Logik das Regelverhalten verbessert werden.

PID –ähnliches Verhalten liegt vor, wenn der Fuzzy-Regler die Stellgröße jeweils bei Vergrößerung von Regeldifferenz, Regeldifferenzintegral und Regeldifferenzdifferential erhöht. Der lineare PID-Regler (analoger PID-Regler, PID-Stellungsregler in Parallelform) wird beschrieben durch die Differentialgleichung:

$$u = K_R \cdot \left(e + \frac{1}{T_N} \int_0^t e \cdot dt + T_V \cdot \frac{de}{dt} \right) \quad (1.1)$$

und für PID-Regler, PID-Geschwindigkeitsalgorithmus:

$$\dot{u} = K_R \cdot \left(\dot{e} + \frac{1}{T_N} \cdot e + T_V \cdot \frac{d^2 e}{dt^2} \right) \quad (1.2)$$

K_R ist der Verstärkungsfaktor des Reglers, T_N die Nachstellzeit des I-Anteils und T_V die Vorhaltezeit des D-Anteils. Durch Diskretisierung der obigen Form entsteht der digitale PID-Stellungsalgorithmus

$$u_k = K_R \cdot \left(e_k + \frac{1}{T_N} \cdot \sum_1^k e_i \cdot T + T_V \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right) \quad (1.3)$$

T ist die Abtastzeit.

Bei der Übertragung des PID-Reglerkonzepts auf Fuzzy-PID-Regler müssen Differentiationen oder Differenzen und Integrationen oder Summationen extern ausgeführt werden, da Fuzzy-Regler keine dynamischen Eigenschaften besitzen [64].

Als Beispiel wird ein PI-Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus) in Fuzzy-Form beschrieben. Die Fuzzifizierung wird mit Dreieckszugehörigkeitsfunktionen realisiert, die sich optimal überlappen sollen. Dabei ist entweder nur eine Regel mit dem Erfüllungsgrade 1 aktiviert oder zwei aufeinanderfolgende Regeln haben als Summe den Erfüllungsgrad 1. Für Inferenz wird die MAX-MIN-Methode eingesetzt.

Der Ähnlichkeitsgrad zwischen dem Fuzzy-PID-Regler und einem linearen PID-Regler hängt insbesondere von der Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis ab. Die Regelbasis ist so ausgelegt, dass sich bei steigenden Werten für e oder de/dt auch steigende Werte für du/dt ergeben. Es ist also, bei Defuzzifizierung z. B. nach der randerweiterten Schwerpunktmethode, ein Übertragungsverhalten ähnlich dem des linearen PI-Reglers zu erwarten. In der Abbildung 1.3 sind mit rot die linguistischen Terme der Ausgangsgröße u als Singletons dargestellt. Enthält eine unscharfe Menge nur ein Wertpaar $u_i, \mu_A(u_i)$ mit dem Zugehörigkeitswert

$\mu_A(u_i) = 1$, so wird u_i als Singleton bezeichnet. A entspricht dann gleichzeitig eine scharfe Menge mit einem Element u_i . Mit Singletons werden häufig, bei akzeptablem Rechenaufwand, Fuzzy-Mengen der Ausgangsgröße, in der Regelungstechnik der Stellgröße des Reglers, modelliert. Beim Verwendung des Singletons wird die Höhenmethode (Schwerpunktmethode für Singletons) für Defuzzifizierung eingesetzt.

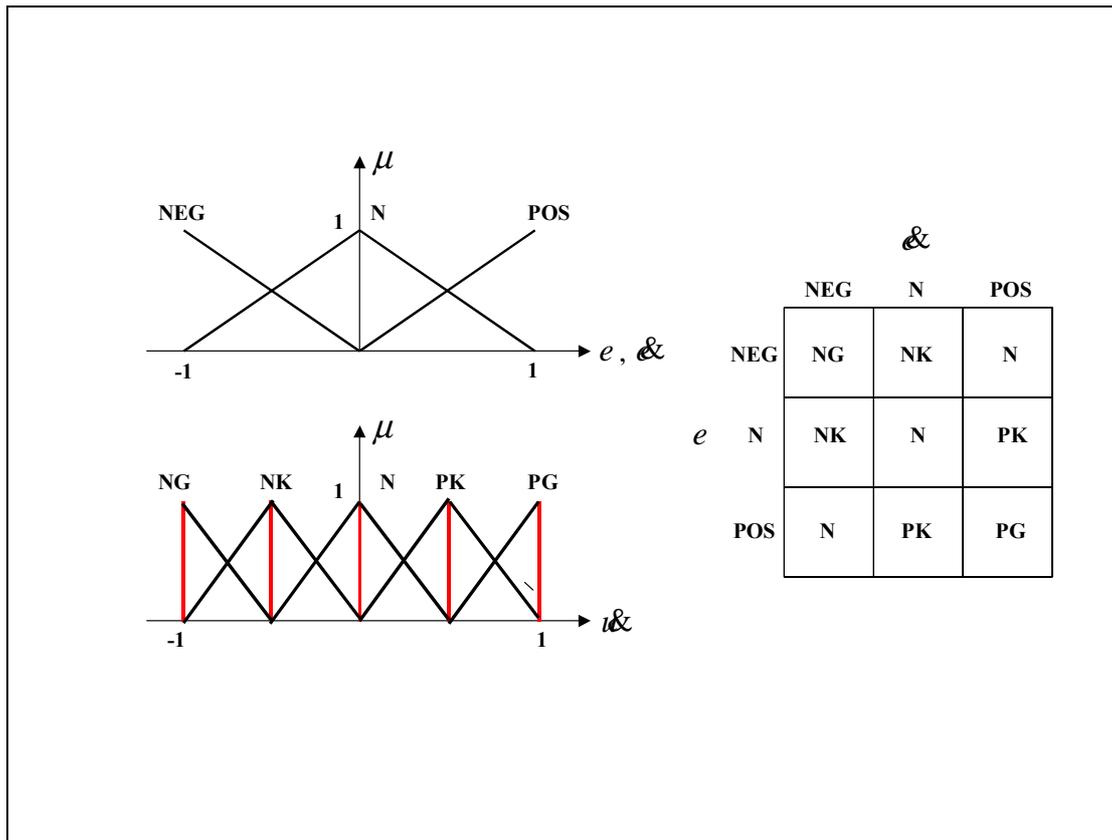


Abbildung 1.3: Zugehörigkeitsfunktionen und Regelbasis für Fuzzy-PI-Regler

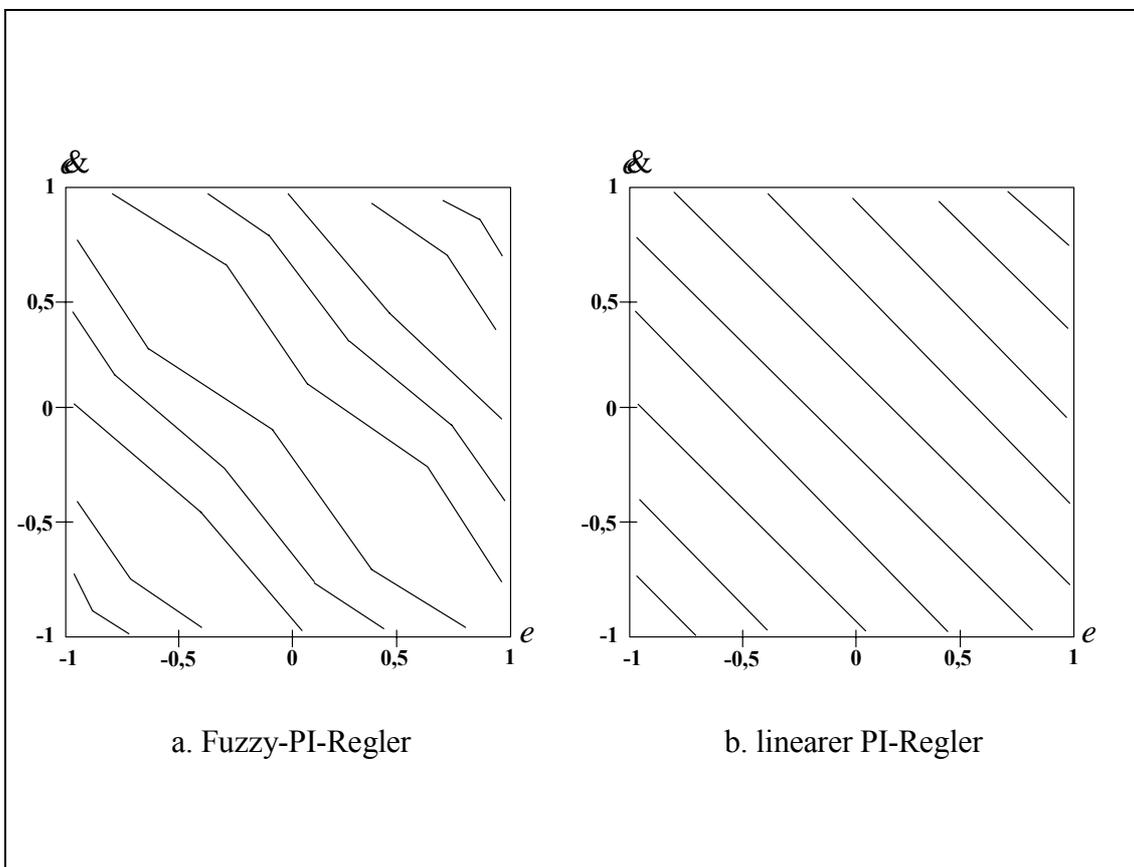


Abbildung 1.4: Übertragungsverhalten des Fuzzy-PI Regler (a), lineare PI-Regler (b)

Abbildung 1.4.a. zeigt die Übertragungscharakteristik des Fuzzy-Reglers, bzw. Abbildung 1.4.b. des linearen PI-Reglers, als Höhenliniendarstellung über der $e - de/dt$ -Ebene. Es ist ein nahezu identisches Übertragungsverhalten zu erkennen (es lassen sich auch exakt lineare Fuzzy-PI-Regler entwerfen; dazu können dann nicht mehr MAX- bzw. MIN-Operatoren für die Verknüpfung der Teilprämissen benutzt werden, es sei denn, es werden unendlich viele linguistische Terme für die Ein- und Ausgangsgrößen benutzt).

Durch Anwendung der Fuzzy-Technologie erweitern sich die Einstellmöglichkeiten, so dass die Dynamik des Regelverhaltens gegenüber dem linearen PID-Regler verbessert werden kann.

1.2.2.2. Hybride Fuzzy-Regelungssysteme

Als hybride Fuzzy-Regelungssysteme werden gewöhnlich solche Systeme bezeichnet, die neben einer Fuzzy-Komponente auch einen konventionellen Part besitzen. Werden die Parameter des Reglers selbst während des Betriebs automatisch angepasst (beispielsweise bei Parametervariationen der Regelstrecke), so wird von einem adaptiven Regelungssystem gesprochen [17], [24], [49], [50]. Derartige Regelungssysteme gelten, auch ohne dass sie Fuzzy-Komponenten aufweisen, als besonders "intelligent" und somit auch besonders leistungsfähig; verbunden damit ist jedoch in der Regel ein erhöhter (mathematischer) Aufwand für ihren Entwurf [8], [9], [30].

Hybride Regelungssysteme sind häufig adaptive Systeme. Ein anderer Sonderfall sind strukturvariable Regelungskonzepte bzw. Umschaltregler, bei denen während des Betriebs nicht die Parameter eines Reglers adaptiert werden, sondern zwischen mehreren Reglern gleichen Typs (mit unterschiedlichen Parametern), oder auch unterschiedlichen Typs, umgeschaltet wird. [29], [30], [32]

Entscheidend für die Akzeptanz des Fuzzy-Reglers ist die Tatsache, dass die vorhandene konventionelle Reglerstruktur (PID z.B.) erhalten bleibt und alle ausgeführten Fuzzy-Komponenten modular aufgebaut sind. Damit besteht sowohl in der Inbetriebnahmephase als auch während des Normalbetriebes die Möglichkeit, die Anlage in verschiedenen Betriebsmodi zu betreiben, so dass eine zusätzliche Redundanz zur Verfügung steht. [11], [46]

In der Praxis sind die hybriden Fuzzy-Regelungssysteme in drei grossen Klassen zu finden: [29], [30]

- I. Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler
- II. Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponenten
- III. Fuzzy-adaptiver PID-Regler

1.2.2.2.1. Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler

- **Regelkreis mit Fuzzy-Vorfilter**

Einsatz einer Fuzzy-Komponente zur Sollwertbearbeitung. Die Fuzzy-Komponente ermittelt dabei aus ihren aktuellen Eingangsgrößen einen geeigneten Sollwert für den nachfolgenden Regelkreis. [29], [39]

- **Regelkreis mit Erzeugung einer additiven Stellgröße**

Die Fuzzy-Komponente kann auch dazu benutzt werden, der Regelstrecke eine zusätzliche, additive Stellgröße aufzuprägen. Diese Struktur eignet sich auch dafür, die Regelkreisdynamik beispielsweise bei sprungförmigen Führungsgrößenänderungen zu verbessern. [29], [39]

1.2.2.2. Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente

- **Fuzzy-basierte Umschaltregelung PID-Fuzzy**

Als Umschaltregelungen werden Systeme bezeichnet, bei denen in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Strecke, ihren Parametern oder beispielsweise auch Störgrößen zwischen verschiedenen Reglern (z. B. - " stärkeren" und „schwächeren" Reglern) umgeschaltet wird. [29], [30]

Die Umschaltstrategie ist regelbasiert in der Fuzzy-Komponente realisiert. Im Gegensatz zu echt adaptiven Reglern werden hier die Parameter also nicht gleitend variiert, sondern es findet eine harte Umschaltung statt.

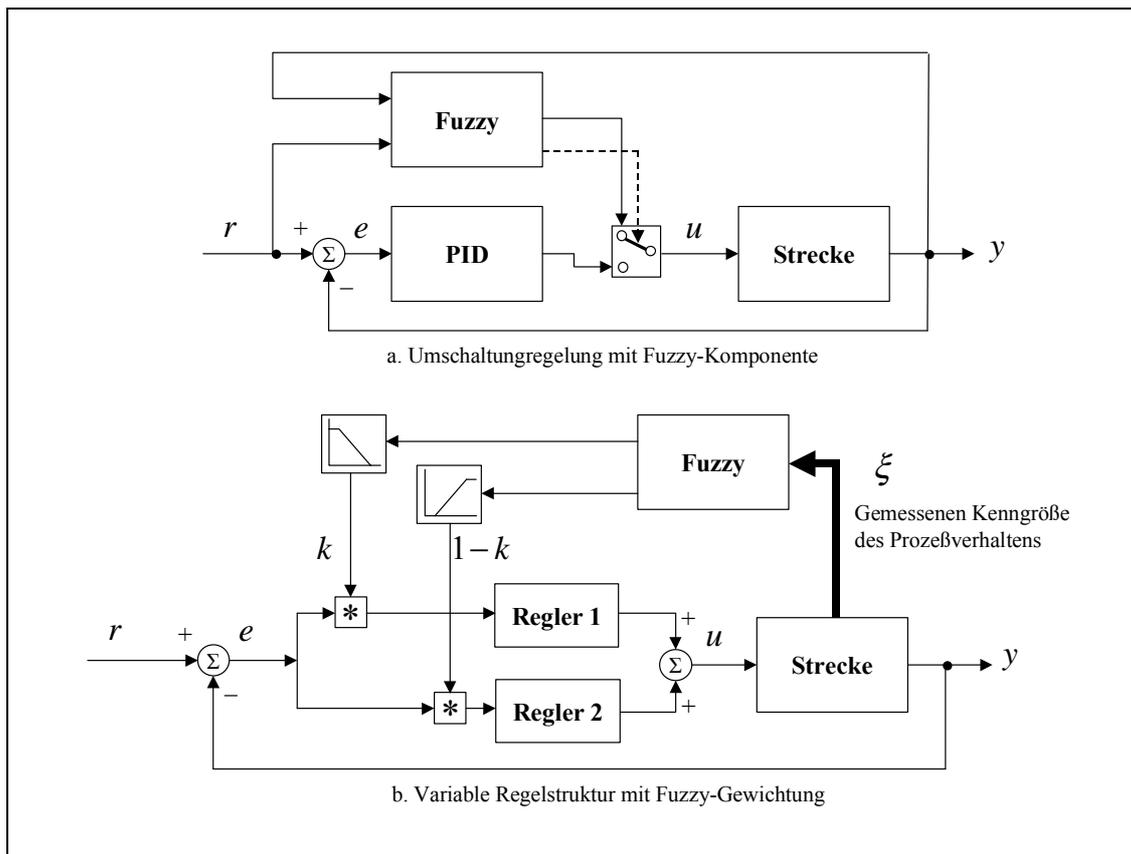


Abbildung 1.5: Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente

In vielen Fällen ist das Prozessverhalten nicht gut bekannt, da physikalische Gesetze des Normalbetriebes nicht mehr gelten und mehr oder weniger unbekannt sind. (z.B. Wechsel von turbulenter zu laminarer Strömung in Wasserleitungen, unruhige Drehzahl bei langsam laufenden Antrieben, Regelventile unter 20% bis über 80% Öffnung). Hier ergibt sich die Notwendigkeit einer Regelung mit ungewissem, stark veränderlichem Prozessverhalten. Üblicherweise wird der Prozess bei besonderen Betriebsbedingungen durch erfahrene Bediener von Hand geregelt und in einen normalen oder sicheren Betriebszustand zurückgeführt. Für besondere Betriebsfälle wird eine Fuzzy-Regelung oder Steuerung vorgesehen, die aufgrund von Regeln des erfahrenen Bediener entworfen worden ist (Abbildung 1.5.a.). Regelung für normale Betriebsbedingungen mit PID-Regler. Regelung für besondere Betriebsbedingungen mit einem Fuzzy-Regler

- **Variable Regelungsstrukturen mit Fuzzy-Gewichtung**

Die Auswahl klassischer Regler hängt unter anderem von Prozesseigenschaften, wie z.B. dem Prozessübertragungsverhalten oder der Größe und Art der Störsignale ab.

Deshalb sollte der Reglertyp und seine Parameter geändert werden, wenn sich diese Eigenschaften ändern. Dies ist z.B. der Fall, wenn der Prozess in einem grossen Betriebsbereich betrieben wird, oder sich der Frequenzbereich der Störsignale wesentlich ändert. Üblicherweise wird nur ein Reglertyp mit festen Parametern und robuster Auslegung verwendet, oder aber zwei Reglertypen, zwischen denen (scharf) umgeschaltet wird. (siehe Abbildung 1.5.a.)

Ein Fuzzy-Regel basierter Ansatz bietet hier die Möglichkeit eines graduellen Wechsels von einem zum anderen Reglertyp, in dem die Regeldifferenz e mit k für den Regler 1 und mit $(1-k)$ für den Regler 2 aufgrund von gemessenen Kenngrössen ξ des Prozessverhaltens gewichtet wird (Abbildung 1.5.b.). In Abhängigkeit des Prozessverhaltens können Regeln aufgestellt werden, die den Stelleingriff verschiedener Regler gewichten. [29]

1.2.2.3. Adaptive PID/Fuzzy-Regler

Adaptive Konzepte mit einer kontinuierlichen Anpassung der Reglerparameter sind prädestiniert für Prozesse, bei denen eine starke Abhängigkeit zwischen Prozessparametern und Arbeitspunkt besteht oder einzelne Parameter sogar unabhängig vom Arbeitspunkt zeitlich schwanken können (zeitvariante Prozesse). Voraussetzung einer jeden adaptiven Regelung ist daher die qualitative Erkennung und quantitative Abschätzung dieser Parametervariationen, um sie dann durch geeignete Modifikation der Reglerparameter möglichst optimal kompensieren zu können.

Kommt ein PID-Regler zum Einsatz, stehen die Reglerverstärkung K_R , die Nachstellzeit T_N , und die Vorhaltezeit T_V zur Disposition. In einfachen Fällen wird es auf die Adaption der Reglerverstärkung beschränkt, um damit die Gesamtverstärkung des Regelkreises bei Variationen der Streckenverstärkung konstant zu halten [10], [11], [21]. Reicht das nicht aus, kann versucht werden, parallel dazu auch die Nachstell- und/oder Vorhaltezeit zu variieren [25]. Wesentlich mehr Eingriffsmöglichkeiten bietet ein Fuzzy-Regler. Hier stehen neben den Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme der Ein- und Ausgangsgrössen des Reglers, auch die Regelbasis und die verschiedenen Verknüpfungsoperatoren, sowie Inferenz- und Defuzzifizierungsmechanismen zur Auswahl. Dabei sind Modifikationen der Operatoren von gänzlich anderer Natur als solche der Regelbasis, welche sich wiederum von denen der Zugehörigkeitsfunktionen unterscheiden. Wird beispielsweise während des Betriebes die Defuzzifizierungsmethode gewechselt, ändert sich das Übertragungsverhalten des Reglers schlagartig und global. Die Änderung einer Regel hat eine mehr lokale Auswirkung, kann aber ebenfalls nur in diskreten Schritten erfolgen. Änderungen einzelner Parameter von Zugehörigkeitsfunktionen können in beliebigen kleinen Schritten erfolgen, oder aber global durch Umskalierung einer Variablen. Fuzzy-Regler, bei denen eine Adaption der Zugehörigkeitsfunktionen vorgenommen wird, werden häufig auch als selbsteinstellender Fuzzy-Regler bezeichnet, während solche, bei denen ein Eingriff über die Regelbasis erfolgt, selbstorganisierender Fuzzy-Regler genannt wird [30]. Eine Adaption von Operatoren oder Inferenz- bzw. Defuzzifizierungsmechanismen werden in der Praxis hingegen nicht vorgenommen. Die Erkennung von Parametervariationen kann, unabhängig davon, ob ein konventioneller Regler oder ein Fuzzy-Regler adaptiert werden soll, prinzipiell auf zwei Arten erfolgen:

- In direkter Weise durch eine ständige on line - Schätzung der Prozessparameter. Diese kann durch Messung des Eingangs-/Ausgangsverhaltens der Strecke in

Verbindung mit einem geeigneten Parameterschätzverfahren erfolgen. Voraussetzung dafür ist, dass die Struktur des Prozessmodells (z. B. "P-T1 mit Totzeit") bekannt ist. Gegebenenfalls kann das Modell auch ein Fuzzy-Modell sein, also in Form von WENN... DANN...-Regeln bzw. als Relationsmatrix vorliegen. (Abbildung 1.6.a.)

- Indirekt, durch eine on-line - Gütebewertung der aktuellen Regelkreisdynamik. Verschlechtert sich die Güte, so deutet dies auf Parametervariationen hin. Als Gütekriterien können Kennwerte im Zeitbereich wie Überschwingweite, Ausregelzeit oder Anstiegszeit, ebenso wie Frequenzbereichskriterien (Bandbreite, Resonanzüberhöhung) benutzt werden. Ebenso denkbar sind (Abbildung 1.6.b.) Integralkriterien (ITAE usw.).

Der Abbildung 1.6 stellt die beiden Grundstrukturen einander gegenüber. In beiden Fällen existiert eine Reihe von Strukturvarianten, insbesondere bezüglich der im Parameterschätzer bzw. Güteindex verarbeiteten Eingangsinformationen; auch eine Kombination beider Vorgehensweisen ist denkbar.

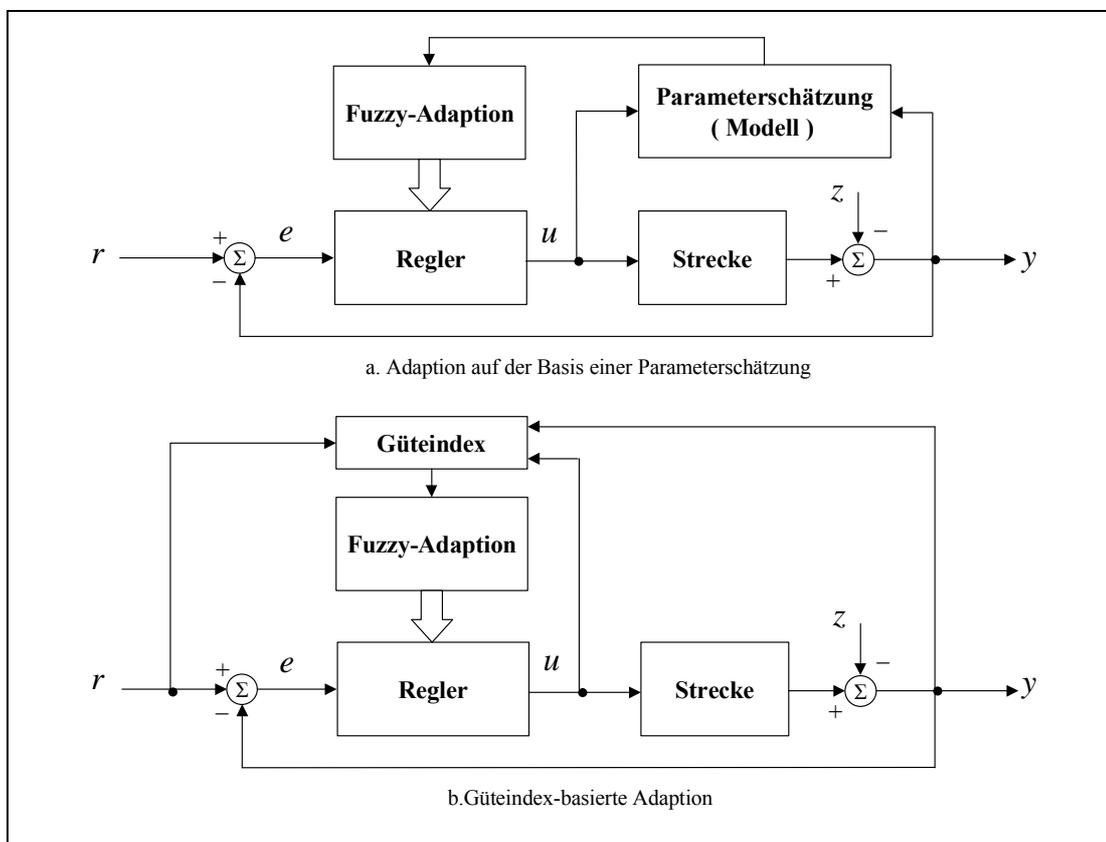


Abbildung 1.6: Adaptive Regler mit Fuzzy-Komponenten

Eine einfache, aber für die Praxis ausserordentlich interessante Variante der auf einer Parameterschätzung gestützten Adaption stellt die fuzzy-gesteuerte Adaption eines PID-Reglers dar. Die Grundidee besteht darin, vorab, also off-line, für einen hinreichend grossen Satz von typischen Arbeitspunkten des Prozesses einen optimalen PID-Regler zu entwerfen. Im Gegensatz zur Umschaltstrategie wird hier jedoch nicht hart zwischen den Einzelreglern umgeschaltet, sondern gleitend interpoliert. Dazu muss im Betrieb zunächst der aktuelle Arbeitspunkt der Strecke ermittelt werden. Dies kann beispielsweise auf der Basis von Führungs- und Regelgrösse oder auch ihren zeitlichen Ableitungen erfolgen. Die Fuzzy-Komponente bildet dann für jeden zu adaptierenden Reglerparameter ein Kennfeld, das den Reglerparameter in Abhängigkeit z. B. von Führungs- und Regelgrösse darstellt.

Die Regelbasis kann statt der Absolutwerte für die Reglerparameter auch Skalierungsfaktoren enthalten, mit denen zuvor festgelegte Nennwerte multipliziert werden.

Die Abbildung 1.7 zeigt eine weitere Struktur eines Regelkreises mit Überwachungs- und Adaptionsebene [9], [46].

Das Verhalten eines Basisregelkreises mit einem Regler (z.B. Fuzzy-Regler, PID-Regler) wird durch eine übergeordnete Reglerebene (Modell der Regelstrecke, Überwachungs- und Adaptionsebene) überwacht und an die entsprechende Betriebssituation angepasst.

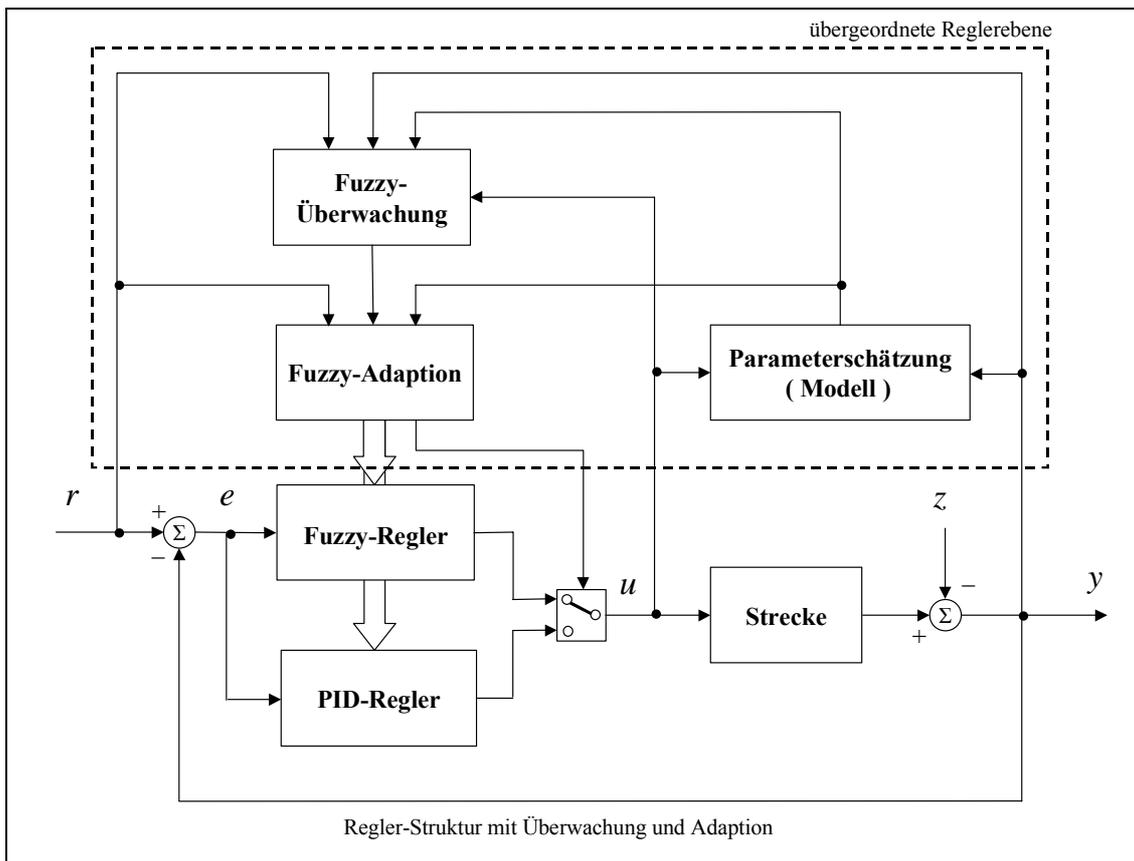


Abbildung 1.7: Regler-Struktur mit Überwachung und Adaption

Die Überwachungsebene beurteilt unter Nutzung aller zur Verfügung stehenden Informationen das Prozessverhalten und versucht, das für den Menschen so typische „Gefühl“ über die Tolerierbarkeit einer Situation so gut wie möglich nachzubilden. Die Überwachungsebene basiert auf unscharfen Ljapunov-Funktionen. Die Eingangsgrösse der Überwachungsebene sind Führungs-, Regel- und Stellgrösse, sowie verfügbare Modellinformationen über die Regelstrecke bzw. die Störgrösse. Die Ausgangsgrösse ist ein unscharfer Stabilitätsgrad. Eine Betrachtung dieser Struktur mit übergeordneter Reglerebene ist in [46] zu finden.

1.2.3. Fuzzy Anwendungen in Stranggiessanlagen

In klassischen Giessspiegelregelungen (Stranggiessanlagen weltweit), werden häufig PI- oder PID-Regler eingesetzt, kombiniert mit P- oder PD-Reglern für die Stopfenposition. Die Entwicklung der Multiprozessor basierten Rechnersysteme hat die Digitalisierung der Regler und Implementierung in die SPS ermöglicht, jedoch sind die entwickelten Strukturen in der Analogtechnik geblieben.

Die Giessspiegelmeßsysteme, radiometrische oder elektromagnetische Systeme, erreichen heute Genauigkeiten von 2-3%, und Abtastzeiten von 50-100 msec. Damit können kleine Formate (130 mm) in Hochgeschwindigkeitsanlagen (4-6 m/min) gegossen werden [6], [28], [52].

Das Hauptproblem, die Zeitvarianz der Stopfengeometrieänderungen durch Abnutzung und Verbärungen, ist weiter geblieben.

Als Beispiel wird der Brief eines Kunden aus Shanghai zitiert, der seit einem Jahr eine Stranggiessanlage produktionsmässig betreibt: (Übersetzung aus dem Englischen)

„...Wir haben bemerkt, dass die Regelung manchmal nicht stabil ist, der Giessspiegel schwingt. Der optimierte Regler (PID) mit seinen konstanten Parametern ist nicht geeignet für die Fälle, wenn der Stopfen sich durch Abnutzung ändert. Es ist aber möglich per Hand zu Giessen.....Die Giessspiegelregelung läuft stundenlang, dann fängt sie an inakzeptabel zu schwingen und nach Umstellung des Parameters per Hand, ist es möglich, weiter zu giessen.“ (27.02.1999)

Der Brief stellt in kurzer Form die Problematik der Giessspiegelregelung in Stranggiessanlagen dar.

In existierenden Anlagen wurde versucht, einen adaptiven PID-Regler (in analoger oder in digitaler Form) zu implementieren. Die Adaptionstrategie basiert auf einer Beobachtung der Schwingungen der Ausgangsgrösse. Die Reglerverstärkung wird angepasst, um bei Änderungen der Streckenverstärkung, die Gesamtverstärkung des Regelkreises konstant (optimal) zu halten.

Eine verbesserte Lösung bietet die Implementierung eines Zustandsreglers mit Beobachter an [49], [50]. Im Giessspiegelregelungskreis ist der Stahlzufluss (m^3 / min) in die Kokille durch das Tauchrohr eine zur Zeit nicht messbare, wichtige Variable. Ein Zustandsregler mit Beobachter ist eine Lösung für Strecken mit nicht messbaren Variablen. Der Regler zeigt sich bei Giessgeschwindigkeitsänderungen robust und stabil.

In [32] ist ein Giessspiegelregler mit Fuzzy-Komponenten für eine Stranggiessanlage bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg beschrieben und dargestellt. Die erste Lösung, Parallel-Fuzzy-PD- Regler beruht auf der Idee, den Standard-PI-Regler nur bei grossen bzw. extremen Abweichungen zu unterstützen.

Die Differenzierung der Regelabweichung wird ausserhalb des Fuzzy-Reglers durchgeführt und dementsprechend zugeführt. Diese Reglerstruktur ist als erste Fuzzy-Regler Implementation in mehreren Anwendungen zu finden. [32], [37]

Der Parallel-Fuzzy-Regler wird aber nur im Störfall dem konventionellen Regler zugeschaltet.

Ein verbessertes Konzept in der obengenannten Literaturstelle [24] ist, einen Fuzzy-Regler zu implementieren (der parallele PI-Regler wird entfernt), der adaptiv die Verstärkung und die Integrationszeitkonstante eines PI-Regler verändert (siehe Abbildung 1.8). Das Verhalten des Integrators wird durch den Fuzzy-Regler mit einer Kennlinienform im Sinne des Parallel-Fuzzy-Reglers verbessert.

Ein anderer Giessspiegelregler der Fa. Siemens mit Fuzzy-Komponenten ist bei Thyssen Stahl AG in Duisburg erprobt worden, beschrieben in [49], [50].

Dieser Regler ist modular aus einzelnen Funktionsmodulen aufgebaut.

Die Funktionsmodule versuchen die verschiedenen Probleme des Giessens mit einem Stopfen zu lösen: Reibungen und Lose, Abnutzung des Stopfen, Ablagerungen, Schwingungen des Giessspiegels.

Kern der Regelung ist ein PID –Regler. Die Fuzzy-Logik wird als On-line Adaption benutzt. Interessant an dem Entwurf ist die Zusammenführung des Beobachters (Modell) und der Fuzzy-Logik in der Regelstruktur.

Der Giessprozessbeobachter enthält ein vereinfachtes Modell des Giessprozesses (einen Integrator für die Kokille mit nachgeschaltetem PT1-Glied für das Giessspiegel-messgerät). Der Störbeobachter berechnet einen Schätzwert für die Schwingung des Füllstands in Abhängigkeit von der Giessgeschwindigkeit. Mit der so berechneten Störgrössenaufschaltung ist es möglich, die Schwingungen grösstenteils zu kompensieren.

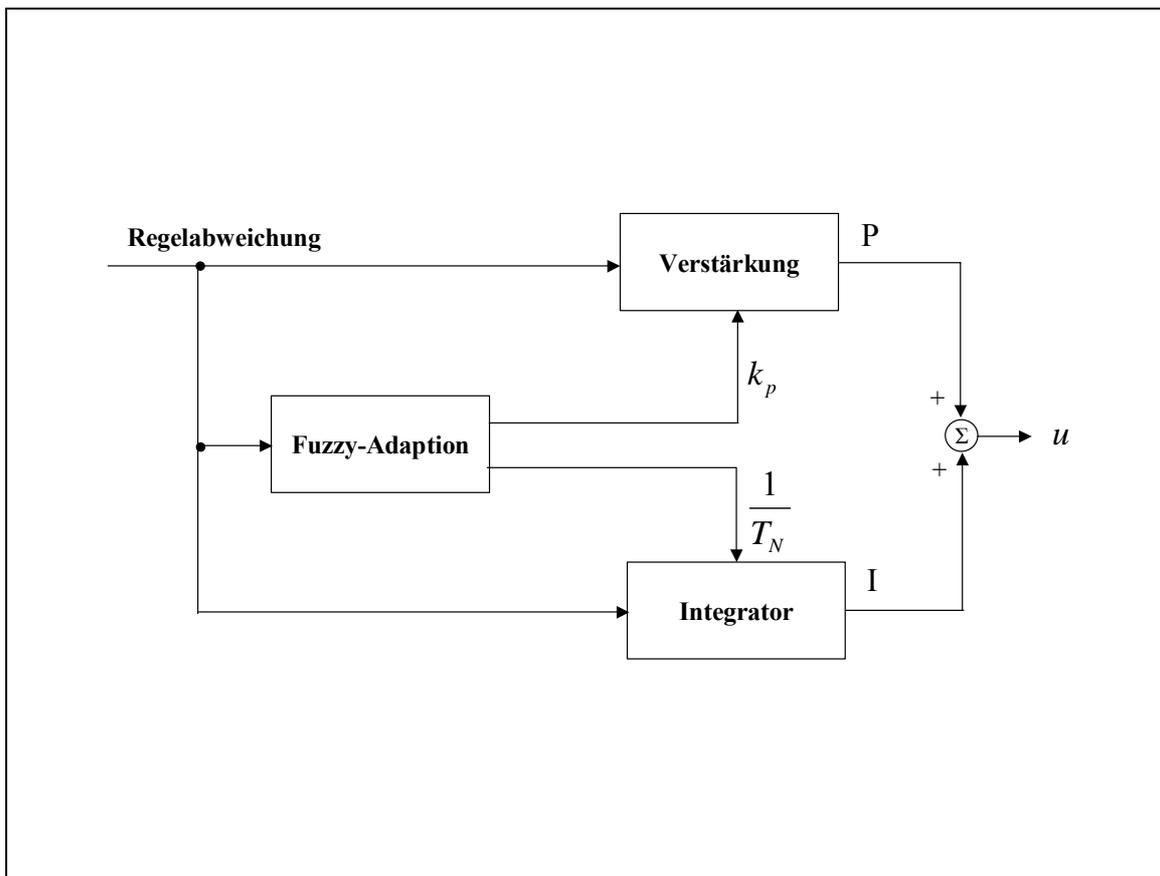


Abbildung 1.8: Fuzzy-Adaption für P- und I-Anteil eines PID-Reglers

Um Verbesserungen zu erreichen, werden unterschiedliche Regelkonzepte für die Giessspiegelregelung eingesetzt: Fuzzy-Regler, prozessabhängige Regler Einstellung, prädiktive Regler, oder Expertensysteme.

1.3 Ziele der Arbeit

Durch die Einführung des Stranggiessens wurde die Wirtschaftlichkeit der Stahlherstellung deutlich gesteigert [53],[54].

Entscheidend für die Güte des entstehenden Stahls ist neben dem Kühlregime die genaue Einhaltung des Füllstandes in der Kokille (Giessspiegel). Bisher wird dieser Giessspiegel mittels eines PID-Reglers, der aber nur nahe eines Arbeitspunktes befriedigend arbeitet, auf einem gewünschten Niveau gehalten.

Die während des Giessprozesses einsetzenden Änderungen der nichtlinearen Stopfencharakteristik stellen ein wesentliches Problem der Giessspiegelregelung dar. Weiterhin bewirken schnelle Änderungen der Durchflusscharakteristik, die durch das plötzliche Ablösen von Verbärungen hervorgerufen werden, ebenfalls Qualitätseinbussen.

Bei verspäteter Erkennung der Effekte kommt es zu schwerwiegenden Anlagenschäden, die einen Stillstand der Stranggiessanlage verursachen. Der qualitative Verlauf der Veränderungen ist dem Experten bekannt und kann durch Regeln beschrieben werden.

Hauptziel der Arbeit ist es, eine Regelung zu entwickeln, mit der der Stahlfluss in einer Kokille optimiert werden kann, die Qualität des Produktes erhöht wird, eine hohe Zuverlässigkeit erreicht wird und die Bedienbarkeit der Anlage vereinfacht wird.

Um Veränderungen der Stopfen- und Durchflusscharakteristik (Abnutzungen, Anlagerungen von Stahl, Aluminiumoxid und Schlacke, Viskositätsänderungen) zu beherrschen, bieten sich Fuzzy- Strukturen zur Lösung an.

Die Reglerstruktur soll mit minimalen Anpassungen eine hohe Regelgüte gewährleisten und für ein breites Spektrum von Stahlqualitäten und Giessformaten geeignet sein.

Der entworfene Fuzzy- Regler basiert auf vorhandenen Hardware- und Softwarekomponenten und Leitsystemen verschiedener Firmen (Siemens Simatic S5, S7, WinnCC, ABB ADVANT Controller, u.s.w.).

Damit können vorhandene Systemstrukturen (Standard Funktionsbausteine, Projektierungs- und Diagnosewerkzeuge) benutzt und für den Anwender (Stahlwerk, Instandhaltung, Bedienungspersonal) in benutzerfreundliche Systeme integriert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Systeme durch die Hersteller einen technischen Support erfahren, also Update fähig sind.

Die Teilziele der Arbeit sind somit:

- Erarbeitung eines Fuzzy-Konzeptes zur Verbesserung der Regelgüte der konventionellen Regelungsstrategie.
- Implementierung der Fuzzy-Regler (Füllstandsregler und Stopfenpositionsregler) in mehreren Prozessleitsystemen bzw. speicherprogrammierbaren Steuerungen.
- Nachweis der Effizienz der modularen Fuzzy-Komponenten anhand einer simulativen Erprobung und Bewertung der Prozessdaten einer bestehenden Anlage.
- Diskussion über die zukünftigen Entwicklungstrends bei der Erfassung der Prozesssituation in Stranggiessanlagen.

Zur Umsetzung dieser Ziele sind die folgenden Teilaufgaben zu lösen:

1. Analyse des Giessprozesses und der Giessanlage, Auswertung aller verfügbaren Informationen über die Regelstrecke (Messgrößen, Störgrößen, Modelle, Beschreibung des Sollverhaltens und tolerierbare Abweichungen)
2. Festlegung der automatisierungstechnischen Probleme und der interaktiven Prozessteile. Überwachungen und Prozesssequenzen.
3. Analyse der Havariefälle und Entwurf einer passenden Steuerungs/Regelungsstrategie.
4. Entwurf einer Fuzzy- Struktur für die Giesspiegelregelung.
5. Realisierung des so gewonnenen modularen Fuzzy-Reglers in einem Standard-Simulationssystem.
6. Implementierung in verschiedene Steuerungen und Leitsysteme mit verschiedenen Hardware- und Softwarekomponenten.
7. Experimentelle Untersuchung und Auswertung der Hauptparameter und der Regelgüte während der Produktion.
8. Hinweise für die Inbetriebnahme der Fuzzy- Regelstrukturen.

Die Lösung dieser Teilaufgaben sollte dazu führen, einen industrietauglichen Regler mit Fuzzy- Komponenten als moderne Alternative zu den klassisch existierenden Algorithmen zu realisieren. Alle technologischen Funktionen sollten analytisch dokumentiert, praktisch erprobt und mit Hinweisen für die Inbetriebsetzung unteretzt werden (einschliesslich einer verständlichen Schulung des Anwenderpersonals).

Die Hardwarekomponenten sollen sich in das Leitsystem der Gesamtanlage harmonisch integrieren, um die vorhandenen Systemmöglichkeiten wie „Bedienen und Beobachten“, „Diagnose“, „Kurvendarstellung“, „Alarm- und Meldesystem“ und „Archivierung“ optimal zu nutzen.

Der Datenverkehr mit anderen Prozess- und Steuerungskomponenten ist so aufzubauen, dass auch die schnelleren Prozessteile (kleinere Zeitkonstante) ohne Informationsverluste bearbeitet werden können.

Optimal anzuwenden sind Feldbuskomponenten nur einer Steuerungsfamilie (z.B. PROFIBUS DP für Siemens, Advant Feldbus 100 für ABB oder schnelle serielle Schnittstellen für Temposonic Positionserfassung im Stopfenzylinder).

Zur Realisierung der Zielstellungen wird zunächst die Beschreibung einer Strangiessanlage (Kapitel 2) gegeben. Die Beschreibung erläutert den Prozess des kontinuierlichen Giessens, die Anordnung und Notwendigkeit der Anlagenteile, die Verfahrens- und automatisierungstechnischen Aufgaben, sowie die Abhängigkeiten der interaktiven Prozesse als Teile eines ganzheitlichen Automatisierungssystems.

2. Beschreibung einer Stranggiessanlage

Stranggiessen ist ein kontinuierlicher Prozess, flüssigen Stahl in einer vorgegebenen Form erstarren zu lassen, um Vorprodukte für Walzvorgänge herzustellen.

Die Stranggiessanlage ist ein Zwischenglied zwischen Stahlerzeugung (Konverter oder Schrottschmelze) und verschiedenen Arten von Walzwerken (Profil-, Blech- oder Rohrwalzwerken).

Die Beschreibung der Anlage und deren Komponenten im Kapitel 2 dient zum besseren Verständnis der Problematik der nachfolgenden Untersuchungen zum Schwerpunkt Verbesserungen von Giessspiegelregelungen mit Unterstützung von Fuzzy-Logik.

Eine Stranggiessmaschine (siehe Abbildung 2.1) besteht im Prinzip aus einer oder mehreren Kokillen, die als Formgebungs- und Kühlelement dienen. Eine Kokille besteht aus einem Kupferrohr oder Kupferblock mit einem offenen Querschnitt entsprechend den Abmessungen des herzustellenden Stahlformats. Das Kupferformteil der Kokille ist in einen Wasserkasten eingesetzt, der von Kühlwasser durchströmt wird. Vor Giessbeginn wird die Kokille unten durch einen Kaltstrang (Dummy bar) verschlossen.

Der Stahl wird in einer Giesspfanne angeliefert und in einen Verteiler oberhalb der Kokille abgelassen und dann auf eine oder mehre Kokillen verteilt. An diesem Verteiler befindet sich häufig ein Stopfen oder Schieber, der den Stahlzufluss in die Kokille drosseln kann.

Der flüssige Stahl fliesst aus der Pfanne in den Verteiler und von dort in bis zu sechs nebeneinander angeordnete Kokillen. Innerhalb der 700 bis 900 mm langen Kokille kühlt der Stahl so weit ab, dass sich eine äussere, feste Schale bildet. Der noch rotglühende Stahlstrang verlässt die Kokille unten und wird in der anschliessenden Sekundärkühlstrecke mit Druckwasser oder einer Wasser-Luft-Mischung besprüht. Dadurch verfestigen sich nach kurzer Zeit auch die inneren Zonen.

Damit der Stahl an den Wänden der Kokille nicht kleben kann, oszilliert die Kokille mit einer Frequenz von 30 bis 250 Hüben in der Minute bei einem Hub von ca. 2 bis 10 mm.

In der kritischen Phase des Angiessens steigt der Giessspiegel in der Kokille über dem Kaltstrang schnell an und im richtigen Augenblick müssen die Ausziehtriebe eingeschaltet werden, die erst den Kaltstrang und dann den glühenden Stahl über ein Rollensystem nach unten herausziehen. Gleichzeitig muss die zufließende Stahlmenge so gedrosselt werden, dass ein Überlauf verhindert wird. Die Giessgeschwindigkeit ist abhängig vom Giessquerschnitt und kann zwischen 0,15 bis 6 m/min liegen.

2.1. Komponenten der Stranggiessanlage

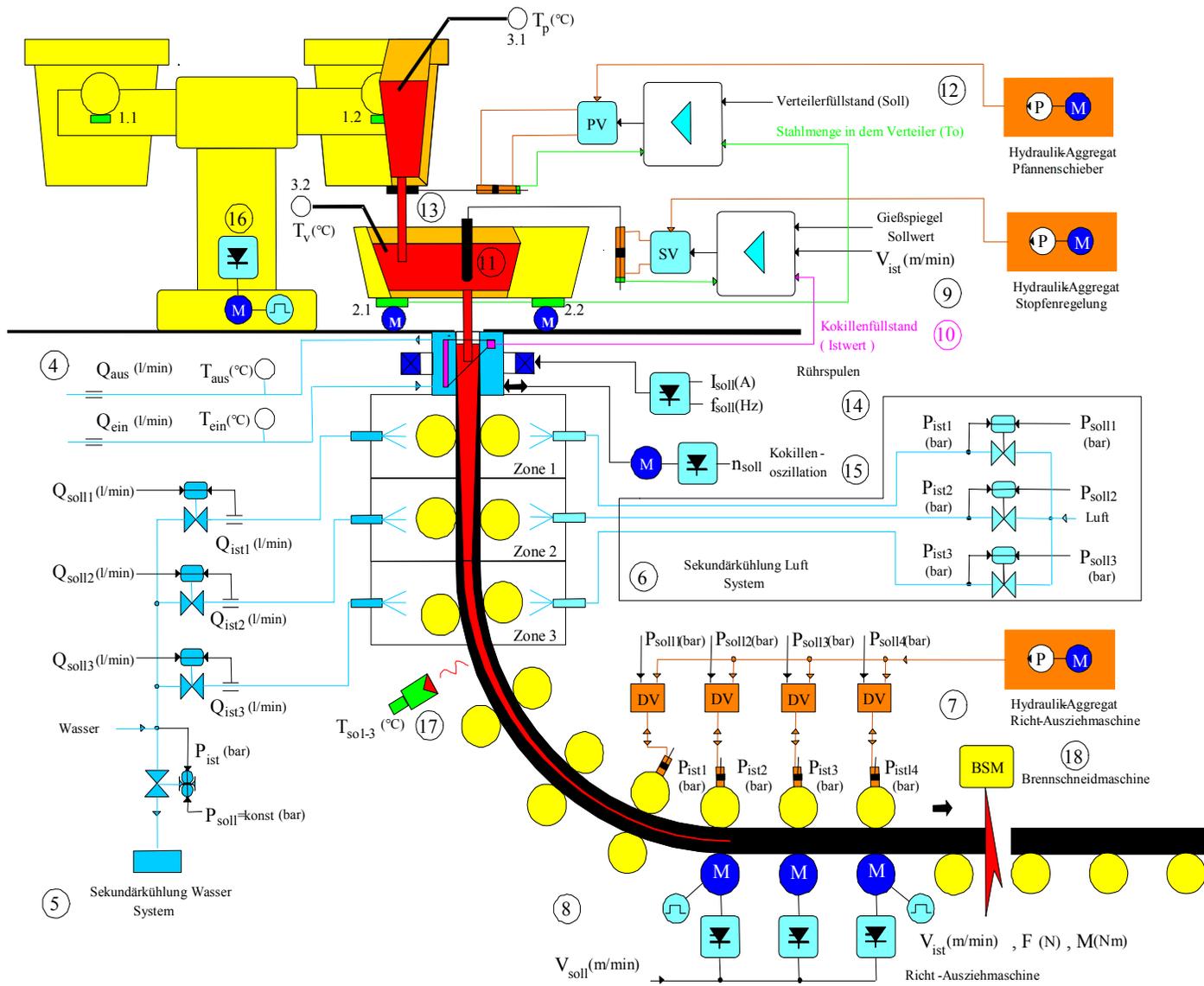
Die Abbildung 2.1 zeigt eine Stranggiessanlage als Blockbild mit den entsprechenden Hauptkomponenten. Die dargestellte Anlage ist typisch für Brammen-, Vorblock- (Rund, Quadratisch) und Profildiessen [41], [53], [54].

2.1.1. Prozessübersicht.

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten zusammenfassend aufgeführt (Legende zur Abbildung 2.1):

1. Messung der Stahlmenge (t) in der Pfanne (Drehturm):
 - 1.1 Messdose Arm 1 (Drehturmarm in Ladeposition)
 - 1.2 Messdose Arm 2 (Drehturmarm in Giessposition)

Abbildung 2.1: Prozess Blockbild einer Stranggiessanlage



2. Messung der Stahlmenge (t) im Verteiler (Verteilerfüllstand):
 - 1.1 Messdose linke Seite.
 - 1.2 Messdose rechte Seite.
3. Temperaturmessungen des Stahls:
 - 3.1 Temperaturmessung des Stahls in der Pfanne T_p (°C):
 - 3.2 Temperaturmessung des Stahls im Verteiler T_v (°C):
4. Kühlung in der Kokille:
 - 4.1 Volumenstrom des Kühlwassers: Q_{ein}, Q_{aus} (l/min)
 - 4.2 Temperaturmessung des zugeführten Kühlwassers: T_{ein}, T_{aus} (°C)
5. Wasser Sekundärkühlungssystem (3 - 5 Zonen):
 - 5.1 Druckregelung des zugeführten Kühlwasser (Systemeinlauf):
 $P_{soll} = \text{Konst. (8 - 12 bar)}, P_{ist}$ (bar)
 - 5.2 Volumenstromregelung des Kühlwasser pro Zone:
 $Q_{soll-1,2,3}, Q_{ist-1,2,3}$ (l/min).
6. Luft Sekundärkühlungssystem (3 - 5 Zonen). Luftdruckregelung.
 Eintritt Spritzdüse pro Zone : $P_{soll-1,2,3}, P_{ist-1,2,3}$ (bar)
7. Hydrauliksystem des Richt -Ausziehtreibers. Anpressdruckregelung :
 DV = Druckregelventil; $P_{soll-1,2,3,4}, P_{ist-1,2,3,4}$ (bar).
8. Richt- Ausziehtreiberantrieb (DC oder AC geregelte Antriebe) .
 - 8.1 Geschwindigkeitsregelung - Giessgeschwindigkeit : v_{soll}, v_{ist} (m/min)
 - 8.2 Ausziekraft , - Moment Regelung und/oder Begrenzung : M (Nm)
 - 8.3 Wegmesssystem mit inkremental Impulsgeber (2 Stk.)
9. Giessspiegelregelung (Kokillenfüllstandsregelung). SV = Servoventil
10. Kokillenfüllstandsmessung. Radiometrische Messung (Co60 oder Cs137)
11. Stopfen.
12. Verteilerfüllstandsregelung. PV = Proportionalventil.
13. Giesspfanne Schieber.
14. Elektromagnetisches Rühren in der Kokille:
 I_{soll} (A), f_{soll} (Hz), Abstand zum Strang (mm)
15. Kokillenoszillation. Elektromechanisches System (Exzentrik) mit DC oder AC
 geregelter Antrieb : n_{soll} (1/min)
16. Drehturmantrieb. AC oder DC geregelter Antrieb mit Positionierung für Normal-
 betrieb. Pneumatischer Antrieb für Havariebetrieb.
17. Pyrometer. (1 - 5 , eine pro Zone) Temperaturmessungen der Oberfläche des
 Stahlblocks. $T_{so-1,5}$ (°C)
18. Brennschneidmaschine

2.1.2. Beschreibung der Komponenten der Strangiessanlage

In nachfolgenden Text sind die Funktionen der Komponenten im Giessprozess beschrieben, ebenso wie ihre Einflussnahme auf die Produktqualität. Weiterhin werden Überwachungsfunktionen für Anlage, Prozess und Produkt angesprochen, die einen hohen Grad an Zuverlässigkeit garantieren.

Eine Analyse des Materialflusses beim Strangiessen, ergibt die erste Klassifizierung der Hauptfunktionen einer Strangiessanlage [53], [54]:

Stahlzufuhr

Die Giessspiegelregelung mit ihren Stellelementen und die Systeme zur Giessstrahlabschirmung sind verantwortlich für die Stahlzufuhr. Unter anderem, sind

hier die Verteileröffnung, der Schlackemitfluss (zeitvariant und nichtlinear), die Reoxidation des flüssigen Stahls kritisch.

Strangschalenbildung

Für die gleichmässige Strangschalenbildung und damit für die Oberflächengüte des Stranges sind die Bedingungen in der Kokille von Bedeutung. Das sind eine gleichmässige Wärmeabfuhr, konstante Badspiegelhöhe, gleichmässige Giesspulververteilung, reproduzierbare und genaue Oszillationsbewegung der Kokille.

Erstarrung, Strangunterstützung, Ausförderung

Die Strangführung dient der Strangunterstützung und dem Ausfördern. In ihr findet auch die Erstarrung statt. Sie hat damit grossen Einfluss auf Innen- und Oberflächengüte des Stranges. Eine gleichmässige, gezielte Wärmeabfuhr und ein optimaler Spannungszustand in der erstarrten Strangschale müssen dabei gewährleistet sein. Daraus leiten sich die Anforderungen an das Sekundärkühlungssystem (genaue Wasser-, Luft-, Druck- und Durchflussregelungen, richtige Anpassung der Giessgeschwindigkeit, richtige Wassermengen pro Zone), die Strangführungsrollen (Anpressdruck) und die Abstimmung der Strangantriebe (genaue Geschwindigkeit und Momentenregelung) für die Güte der Stahlqualität ab.

2.1.2.1. Messung der Stahlmenge

Die Stahlmenge wird in der Pfanne und im Verteiler kontinuierlich während der Giessprozess gemessen. Die Stahlmenge im Verteiler wird für die Verteilerfüllstandsregelung verwendet.

Die Gewichtsmessungen werden in den Produktionsberichten dokumentiert. Als Überwachungsfunktionen kann die zeitliche Änderung der Stahlmenge verwendet werden.

2.1.2.2. Temperaturmessungen des Stahls

Die Stahltemperatur wird diskontinuierlich, mittels einer Handlanze in der Startphase der Giessequenz und mehrere mal im Verteiler während des Giessprozesses gemessen. Die optimale Giestemperatur des Stahls in der Kokille ist [27]:

$$T_g = 1536 - [80 \cdot a(\%C) + 4 \cdot b(\%Mn)] \quad (2.1)$$

Um die Wärmeverluste zu kompensieren wird die Temperatur des Stahls im Verteiler [27]:

$$T_v = T_g + (10 - 20) \quad (2.2)$$

Während des Giessprozesses wird die Giessgeschwindigkeit der Stahltemperatur angepasst um eine optimale Erstarrung des Stahles zu gewährleisten.

2.1.2.3. Kühlung in der Kokille

Für eine korrekte Kühlung in der Kokille sind drei Parameter wichtig:

- Der Volumenstrom des Kühlwassers Q_{ein} (l/min) ist eine Maschinenkonstante. Er wird häufig mittels eines Regelventils konstant gehalten. Der PI-Regler wird in die SPS implementiert.
- Temperatur des zugeführten Kühlwassers T_{ein} (°C)
- Auslauftemperatur des Kühlwassers T_{aus} (°C)

Als wichtige Überwachungsfunktion wird die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{ein}} - T_{\text{aus}}$ ($^{\circ}\text{C}$) des Kühlwassers verwendet. Bei einer Temperaturdifferenz grösser als 10°C wird wegen Explosionsgefahr der Giessprozess sofort unterbrochen (Strangweise).

2.1.2.4. Kokillenoszillation

Die Kokillenoszillation ist grundsätzlich wichtig für Stranggiessanlagen. Die ab-auf Oszillationsbewegung vermeidet, dass die frisch gebildete Stahlschale an der Kokille klebt und verbessert die gegossene Stahlqualität.

Bei Stranggiessanlagen bewegt sich die Kokille meist sinusförmig mit einer Hubhöhe h und einer Hubfrequenz f um eine Nulllage [22]. (siehe Abbildung 2.2)

Der Giessstrang wird mit der Stranggeschwindigkeit $v_S(t)$ aus der Kokille gezogen.

Die mittlere Stranggeschwindigkeit entspricht der betrieblich genutzten

Prozessgrösse Giessgeschwindigkeit $v_g(t)$. Die Relativgeschwindigkeit zwischen

Strang und Kokille $v_R(t)$ ist die Differenz von Stranggeschwindigkeit $v_S(t)$ und

Kokillengeschwindigkeit $v_K(t)$, wobei die Kokillengeschwindigkeit $v_K(t)$ der zeitlichen Ableitung des Kokillenweges x_k entspricht.

$$v_R(t) = v_S(t) - v_K(t) = v_S(t) - \frac{dx_k}{dt} \quad (2.3)$$

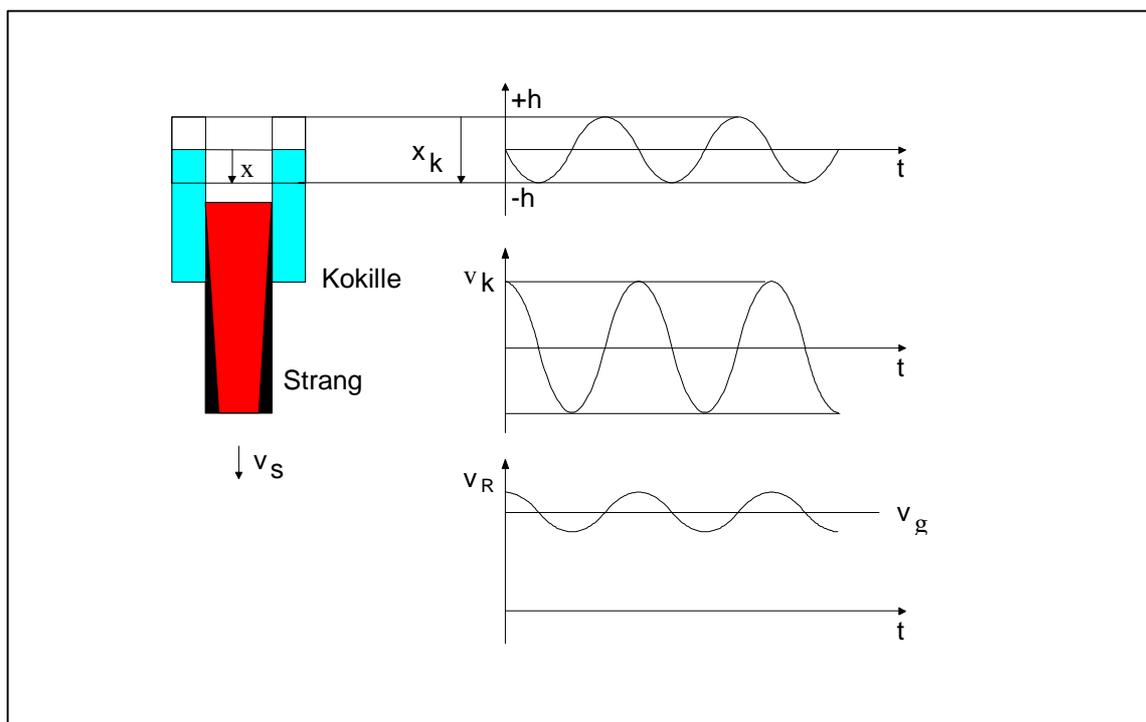


Abbildung 2.2: Grundbild Kokillenoszillation [22]

Zur Beschreibung der Fahrweise der Kokillenoszillation soll hier die Kennzahl K , das Amplitudenverhältnis von maximaler Kokillengeschwindigkeit und maximaler Giessgeschwindigkeit, dienen.

$$K = \frac{v_{k.\max}}{v_{g.\max}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot h}{v_{g.\max}} \quad (2.4)$$

Bei einer Fahrweise mit $K > 1$ wird die Strangschale auf Zug und Druck belastet. Bei positiver Relativgeschwindigkeit zieht die Kokille am Strang, bei negativer Relativge-

schwindigkeit drückt die Kokille auf den Strang , bei $v_R = 0$ ist der Strang entlastet. Praktisch muss die Fahrweise der Kokillenoszillation so eingestellt sein, dass K gerade kleiner „Eins“ ist. In diesem Fall liegt ein Reibungskraftverlauf vor, der keine Haftreibungsimpulse aufweist, aber durch die minimalen Reibungskräfte nahe „Null“ die Strangschale entlastet, dadurch wird das erwähnte Einschnüren des Stranges verhindert [22].

Die Abbildung 2.3 zeigt die implementierte Abhängigkeit während des Giessens zwischen Kokillenoszillationsfrequenz und Giessgeschwindigkeit für alle fünf Gießformate und den entsprechenden Voreilfaktoren ($F_V = \frac{1}{K}$) [41].

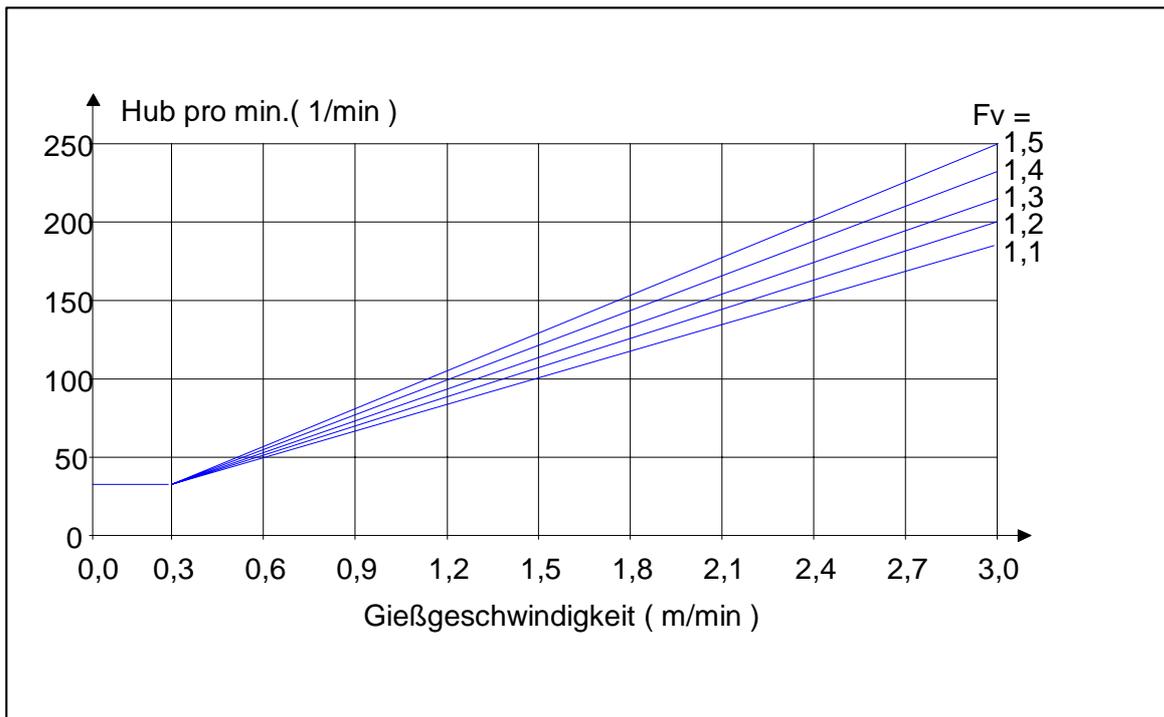


Abbildung 2.3: Kokillenoszillations-Frequenzspektrum Rund Format, Baotou/China

Die Kennlinien sind im Leitsystem hintergelegt und werden beim Formatwechsel automatisch angewählt.

In der Abbildung 2.1 ist ein elektromechanisches System (Exzentrik) mit Gleichstrom (GS) oder Drehstrom (DS) geregeltm Antrieb dargestellt. Der maximale Oszillationshubwert und die Oszillationsform (sinus) sind das Ergebnis der exentrischen Konstruktion. Die Änderung des Hubes oder der Oszillationsform bedeutet einen aufwendigen mechanischen Umbau. In den letzten Jahren wird immer häufiger ein hydraulischer Servoantrieb für die Kokillenoszillation eingesetzt. Ein Lageregelkreis mit zwei hydraulischen Zylindern und ein Servoventil erlauben beliebige Oszillationsformen (symmetrischer oder asymmetrischer Sinus oder Sägezahn) mit einfach änderbarer Amplitude.

2.1.2.5. Kokillenfüllstandsmessung

Erste Voraussetzung für die Regelung des Kokillenfüllstandes ist die Messung der Giessspiegelhöhe. Hierzu hat sich heute das Isotopen - Messverfahren durchgesetzt. Ein Stabstrahler und ein Szintillationszähler werden so an der Kokillenkonstruktion angeordnet, dass ein Messbereich in der gewünschten Größe erfasst wird. Aufgrund

theoretischer Überlegungen und praktischer Versuche hat sich herausgestellt, dass je nach Kokillenkonstruktion, Giessquerschnitt und Regelungskonzept sowie Art des Stellglieds Messbereiche zwischen 100 bis 200 mm ausreichen, um mögliche Störgrößen auszuregulieren und auch ein automatisches Angiessen zu gestatten. Die Nichtlinearitäten der Kennlinie ergeben sich aus der Messgeometrie, da in den unterschiedlichen Höhen die partiellen Abstände unterschiedlich lang sind und die jeweiligen Absorptionen der Behälterwände durch die sich ändernden Durchstrahlungswinkel ebenfalls unterschiedlich gross werden. Da die Abstände quadratisch und die Absorptionen exponentiell die Dosisleistung am Detektor beeinflussen, wird die Kennlinie dementsprechend nichtlinear verlaufen [6]. Es müssen deshalb elektronische Linearisierungen für das Ausgangssignal vorgesehen werden.

Aus Sicherheitsgründen muss die Strahleraktivität begrenzt bleiben beim ca. 5mCi (je nach Landesvorschriften) [6].

Hierdurch ergeben sich starke Verzögerungen des Messsignals und Überlagerungen durch ein Rauschsignal. (Für die Giessspiegelregelung muss eine Totzeit berechnet werden - min. 100 msec zwischen zwei neu gemessenen Werten).

Es wird dennoch in ausgeführten Regelungen eine Giessspiegelkonstanz von ± 3 mm erreicht.

Andere Messverfahren wie elektromagnetische Systeme (Wirbelstrom) oder optische Systeme sind wegen des grossen Konstruktionsaufwands und der höheren Kosten selten eingesetzt (Kühlung und mechanischer Schutz des Messkopfs).

2.1.2.6. Giessspiegelregelung (Kokillenfüllstandsregelung)

Für die Regelung des Kokillenfüllstands gibt es zwei Stellgrößen (siehe Abbildung 2.4):

- die Abzugsgeschwindigkeit und,
- den Stahlzufluss zur Kokille.

Metallurgische Gesichtspunkte führen dazu, die Giessgeschwindigkeit während eines Gusses möglichst unverändert beizubehalten und dafür den Stahlzufluss zu regeln. Wird der Kühlwasserdurchfluss ebenfalls konstant gehalten, dann ergeben sich in der Primär- und Sekundärkühlzone Kühlverhältnisse, die eine gleich bleibende Qualität des Strangs gewährleisten. Ein ganz wichtiger Punkt sind insbesondere bei hochwertigen Stählen die metallurgischen Zusammenhänge bei einer gleichmässigen Kühlung und die damit verbundene Qualität der Kristallisation und das beim Erstarren des Stahls entstehende Gefüge.

Stellglied ist der Stopfen des Zwischenbehälters (Verteiler). Der wirksame Stellbereich - darunter ist der Bereich zu verstehen, in dem sich der Stahlzufluss bei Stopfenverstellungen ändert - beträgt bei Verwendung von Rundkopfstopfen etwa 20% des gesamten Stellweges. Auswaschen und Zuwachsen des Ausflusstons und des Stopfens sowie andere Einflüsse verschieben und verändern den wirksamen Stellbereich, den Arbeitspunkt und die Schliesslage. Diese regelungstechnisch äusserst ungünstige Charakteristik des Stellgliedes (nichtlinear und zeitvariant) kann auch noch durch die Antriebsmechanik verschlechtert werden (Lose und Hysterese im Stopfengestänge).

In der Abbildung 2.4 wird der schematische Anlageaufbau einer Stranggiessanlage verdeutlicht. Die geforderte Einhaltung des Giessspiegels in der Kokille wird durch die Positionierung des Stopfens bzw. für kleinere Giessformate durch die Änderung der Strangabzugsgeschwindigkeit erreicht.

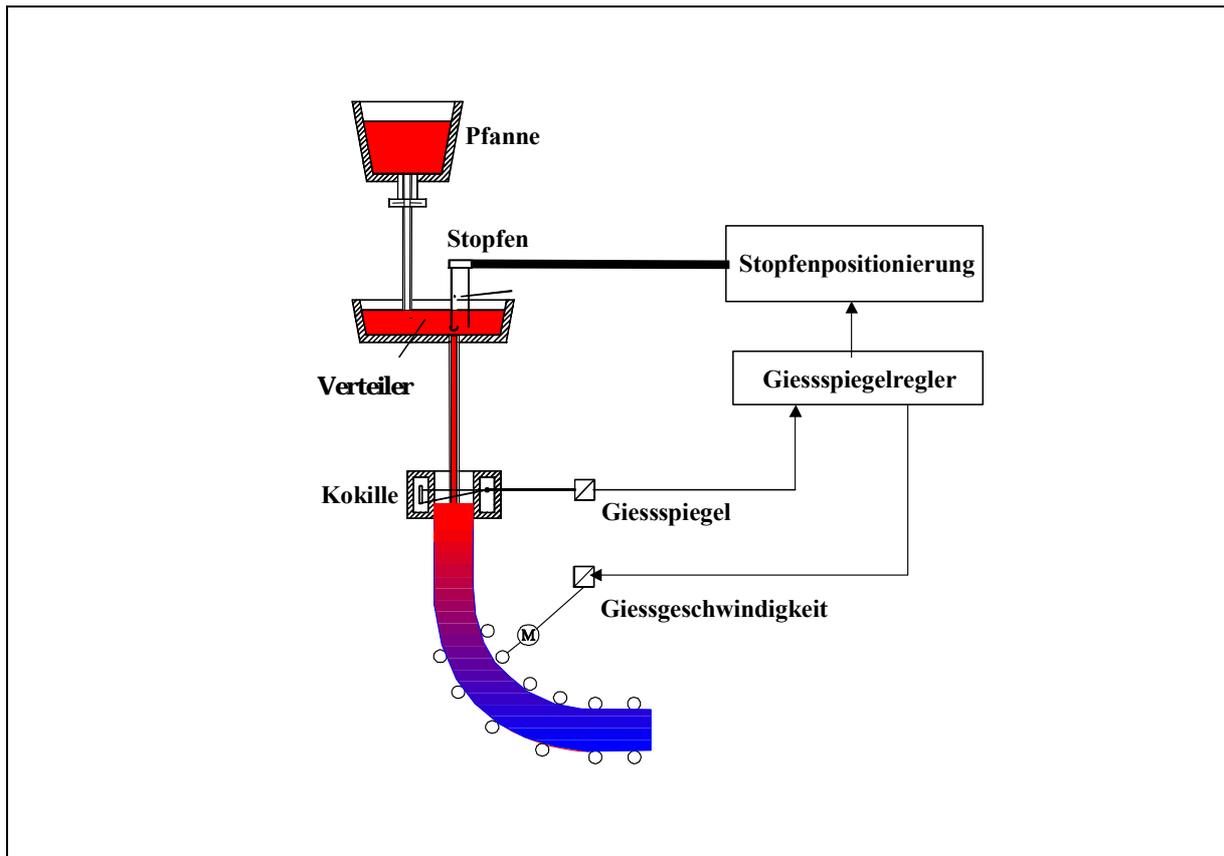


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau der Stranggiessanlage

2.1.2.7. Verteilerfüllstandsregelung

Die zeitlich aus dem Auslauf des Verteilergefässes austretende Menge von flüssigem Stahl ist jedoch nicht konstant, da der Querschnitt des keramischen Auslaufs (Ausgussfläche) durch Ansätze von Schlacke oder Tonerde verändert werden kann. Ausserdem wird der Stahldurchfluss durch den schwankenden ferrostatischen Druck infolge von Füllhöhenänderungen im Verteiler beeinflusst.

$$Q = k_1 \cdot F_{\text{ausguß}} \cdot \sqrt{(k_2 + k_3 \cdot h_v)} \quad (2.5)$$

$F_{\text{ausguß}}$ = Effektive Ausgussfläche

k_1, k_3 = Konstruktionskonstante

k_2 = Länge der Tauchrohre in der Kokille

h_v = Füllstand in der Zwischenpfanne

Um die Beeinflussung durch den ferrostatischen Druck zu kompensieren, und die Aufgabe für den Kokillenfüllstandsregler zu erleichtern, wird eine separate Regelung für die Füllhöhe im Verteiler vorgesehen. Ein konstantes Gewicht im Verteiler gewährleistet eine gleichmässige Stahltemperatur während des Giessens. Der Verteilerwagen ist auf Druckmessdosen gesetzt, so dass die Füllstandsmessung auf eine Gewichtsmessung zurück zu führen ist. Die Stahzufuhr in den Verteiler wird durch einen verstellbaren Schieber variiert.

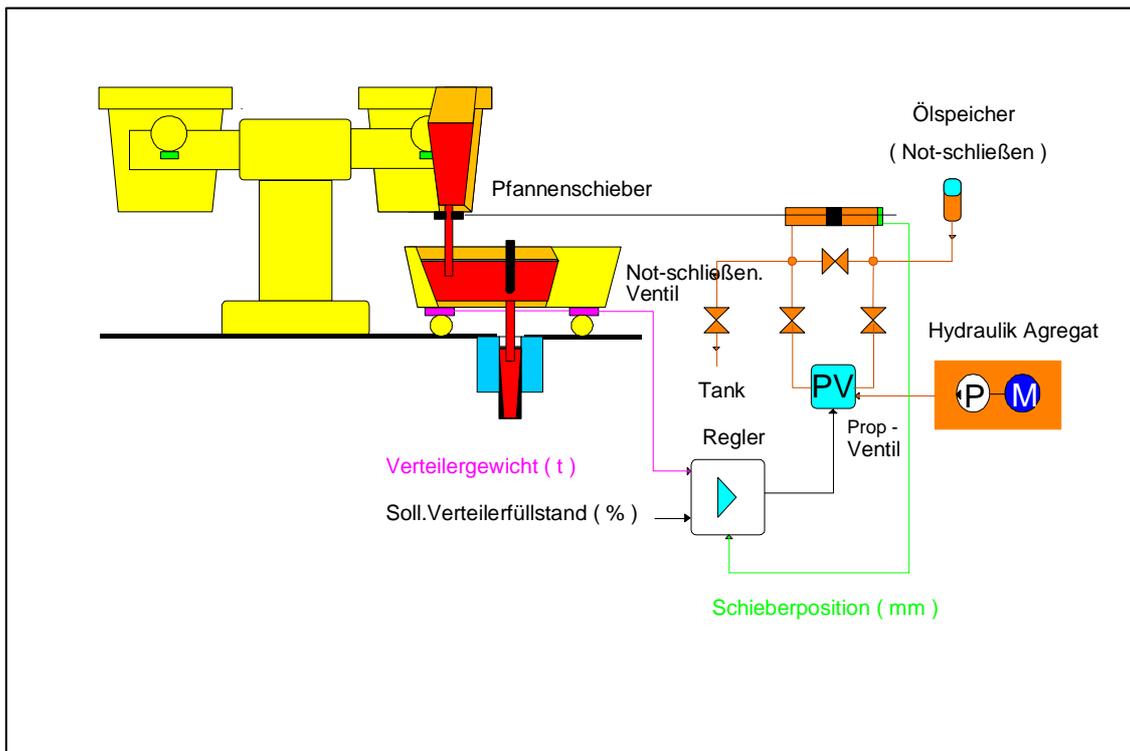


Abbildung 2.5: Prinzipblockbild der Füllstandsregelung im Verteiler

Die Regelung ist eine Kaskaden-Regelung. Der innere Kreis ist ein Lageregelkreis für den hydraulische Zylinder mit einem Servo- oder Proportionalventil, ein anderer Regler ist der Verteilergewichtsregler. Der Gewichtsregler ist im Leitsystem implementiert. (Abbildung 2.5)

2.1.2.8. Wasser-Luft-Sekundärkühlungssystem

Die meisten Stranggiessanlagen sind mit einer Zweistoffkühlung ausgerüstet. Nach dem Kristallisationsprozess in der Kokille beendet die Sekundärkühlung die Stahlwandlung von flüssigem zum soliden Status. Am Ende der progressiven Sekundärkühlung ist die Oberflächentemperatur des Stahls zwischen 800 - 900 ° C (je nach Stahlqualität).

Der Wärmetransport im Stranginneren erfolgt durch Leitung und aufgrund der Strangbewegung in Abzugsrichtung zusätzlich durch Konvektion [27].

Die grossen Stranggiessanlagenhersteller haben mathematische Methoden entwickelt, um die Probleme der Sekundärwasserkühlung zu beschreiben und die mechanische Konstruktion zu berechnen [53],[54].

Die Sekundärwasserkühlung und im Endeffekt die Wasserdurchflusssollwerte pro Zone sind von drei Faktoren abhängig:

- Konstruktion, Giessformate.
- Stahlqualität.
- Giessgeschwindigkeit.

Der Konstrukteur der Stranggiessanlage gibt für jedes Giessformat, für jede Stahlqualität und pro Kühlzone, die Tabellen mit den Wassermengen abhängig von der Giessgeschwindigkeit vorläufig an. Die Tabellen sind im Prozessleitsystem implementiert und während des Giessens bekommt jeder Zonenregler automatisch seinen richtigen Wasserdurchflusssollwert. Die gesamte Wassermenge (alle Zonen) und die Verteilung pro Zone (% von total) müssen respektiert werden. Die Tabellen werden während der Inbetriebnahmezeit festgelegt und nach dem ersten Giessen

geändert, bis die Wasserkühlung optimal läuft. Der Bediener der Stranggiessanlage kann den Giessgeschwindigkeitsfaktor on-line korrigieren ($\pm 25\%$) oder nach Erfahrung neue Tabellen erstellen.

Die Druckregelung des zugeführten Kühlwassers (Systemeinlauf) ist für die Liniarisierung der Wasserdurchflussregelung notwendig. Es ist bekannt, dass zwischen Druck und Durchfluss eine nichtlineare Abhängigkeit besteht, die durch das Bernoulli Gesetz beschrieben wird:

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta P}$$

$$P_{soll} = \text{Konst.} (8 - 12 \text{ bar}), \text{ mit } P_{\text{Wasserversorgung}} \geq P_{soll-\text{max}}$$

Volumenstromregelung des Kühlwassers pro Zone

Die Durchflussregelungen als einzelne Kreise (pro Zone) und die Druckregelung sind als Software PI-Regelungen mit Vorsteuerung im Leitsystem integriert.

Die Durchfluss-Istwerte werden mit IDM (Induktiv elektromagnetisch) Traduktoren gemessen. Die Stellelemente sind proportionale Stellventile.

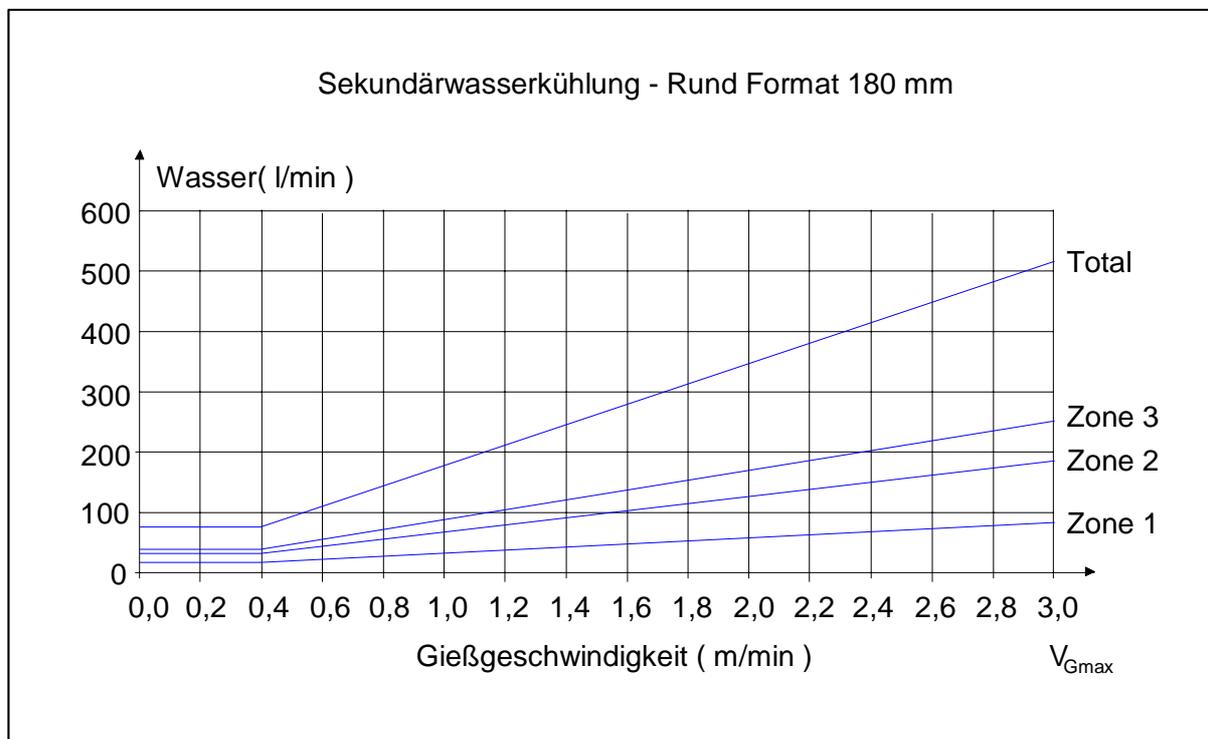


Abbildung 2.6: Sekundärwasserkühlung – Rund 180 mm

Abbildung 2.6 zeigt den Wasserverbrauch in den einzelnen Kühlzonen und der Gesamtwasserverbrauch in Abhängigkeit von der Giessgeschwindigkeit [41].

Luftkühlungssystem

Ausser der Wasserkühlung je Zone ist eine Luftkühlung vorhanden. Der Luftdrucksollwert ist von der Giessgeschwindigkeit unabhängig. Die Regelungen sind PI-Druckregelungen mit konstanten Sollwerten, die vom Konstrukteur vorgegeben werden.

2.1.2.9. Messen der Strangoberflächentemperatur

Die Temperatur der Strangoberflächen kann aufgrund der Betriebsverhältnisse nur optisch gemessen werden. Die optischen Pyrometer werden bei allen Stranggiessanlagen für die Strangoberflächentemperaturmessung benutzt. Für die Messpositionen werden möglichst die Enden der einzelnen Zonen gewählt, weil sich auf diese Weise die Änderungen der Wassermengen in den verschiedenen Zonen am deutlichsten in den Messwerten widerspiegeln. Mit Hilfe des mathematischen Modells des Sekundärwasserkühlungssystems ist eine Berechnung der zeitlichen Entwicklung der Temperatur in jeder Strangzone möglich [27].

Aus einem Vergleich der an bestimmten Punkten gemessenen Oberflächentemperaturen mit den entsprechend berechneten Werten kann dann die Güte der Parameterwahl abgeschätzt/korrigiert werden. Zu bestimmen sind die Parameter für die Abweichung zwischen Messung und Rechnung.

Die Oberflächentemperaturmessung kann – on-line - als Korrekturfaktor für das Sekundärwasserkühlungssystem als unscharfe Regelungskomponente benutzt werden (z.B. Wenn Temperatur zu hoch dann Wassermenge erhöhen ,u.s.w.)

2.1.2.10. Ausziehrichtmaschine

Der wichtigste Antrieb für das Ausziehen des Stranges ist die Ausziehrichtmaschine. Sie zieht sowohl den zum Anfahren der Anlage benötigten Kaltstrang (Dummy bar) nach oben wie auch den Warmstrang aus der Kokille nach unten ab.

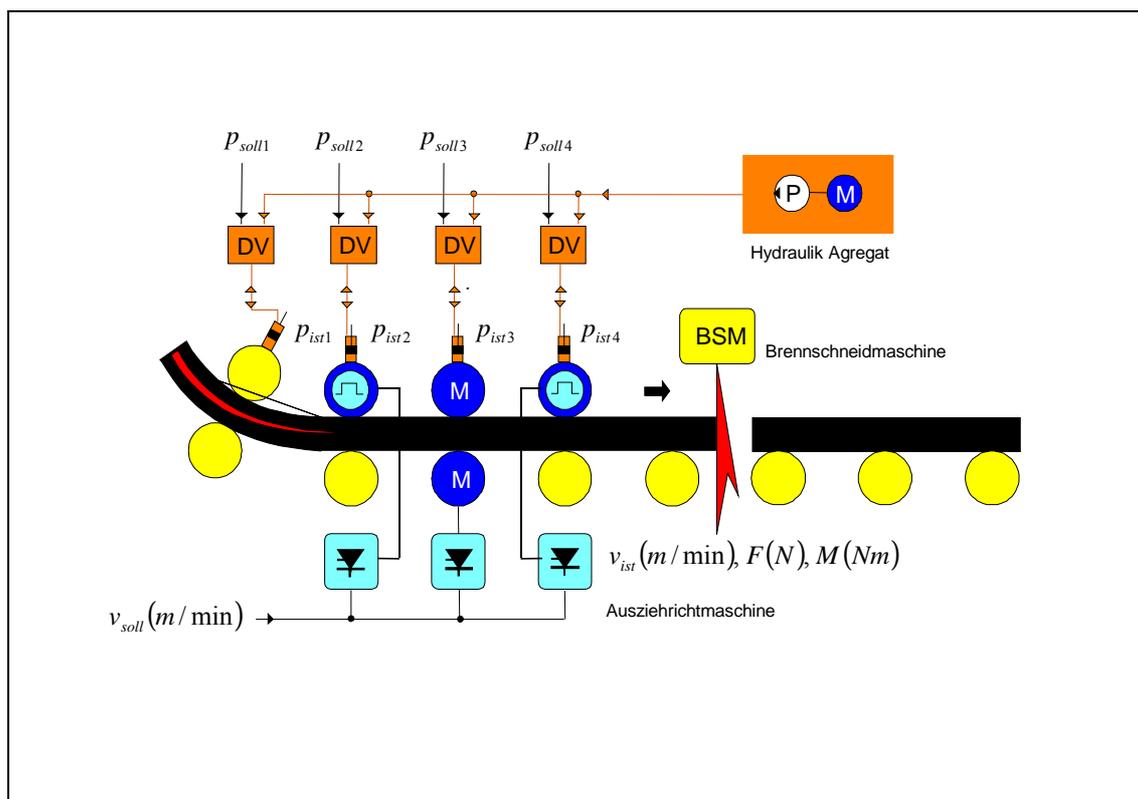


Abbildung 2.7: Blockbild Ausziehrichtmaschine

Es werden Gleichstrom- (GS) oder Drehstrommotoren (DS) als geregelte 4 - Quadrantenantriebe, Gleichstromrichter (GS-Motoren) oder F - Umrichter (DS-Motoren) eingesetzt, da verschiedene Geschwindigkeiten gefahren werden müssen. Zwei Inkrementalimpulsgeber sind die Basis für das Materialverfolgungssystem, das die gesamten Automatisierungssequenzen steuert (Kaltstrang Einfahren, Giessen,

Giessende). Abhängig von der Position des Kalt - Warmstrangs in der Giessmaschine, die mit den Impulsgebern erfasst wird, werden die Schaltpunkte erzeugt, z.B. Rollen Auf - Ab, Wasserzonen Ein - Ausschalten, Warmstrang in der Kokille, usw. Die Impulsgeber werden auch für die Erfassung der aktuellen Geschwindigkeit benutzt. In Abbildung 2.7 sind die Hydraulikkreise für die Ausziehrichtmaschine schematisiert dargestellt. Die Druckregelventile werden von der SPS gesteuert (4 - 20 mA), um die richtigen Anpressdrücke zu erreichen. Die Kaltpressdrücke werden benötigt, wenn der Kaltstrang gefahren wird. Die Warmanpressdrücke sind vom Giessformat und der Strangtemperatur abhängig. Sie werden automatisch in der SPS angewählt und als Sollwerte den Ventilen vorgegeben. Die Warmanpressdrücke für verschiedene Giessformate sind in tabellarischer Form in der SPS gespeichert.

2.2. Automatisierungstechnische Probleme

2.2.1. Giessspiegelregelung

Beim Stranggiessen von Stahl ist die Güte der Giessspiegelregelung mitentscheidend für die Qualität des Stahls. Bisher wird der Giessspiegel in vielen Anlagen mittels eines klassischen PI-Reglers auf dem gewünschten Niveau gehalten. Dieses Konzept ist allerdings nicht in der Lage, auf Veränderungen der Stopfen- und Durchflusscharakteristik (Abnutzungen, Anlagerungen von Stahl, Aluminiumoxid und Schlacke, Viskositätsänderungen des Stahls) während des Giessprozesses zu reagieren. Beim Auftreten solcher Probleme muss ein manuelles Eingreifen erfolgen.

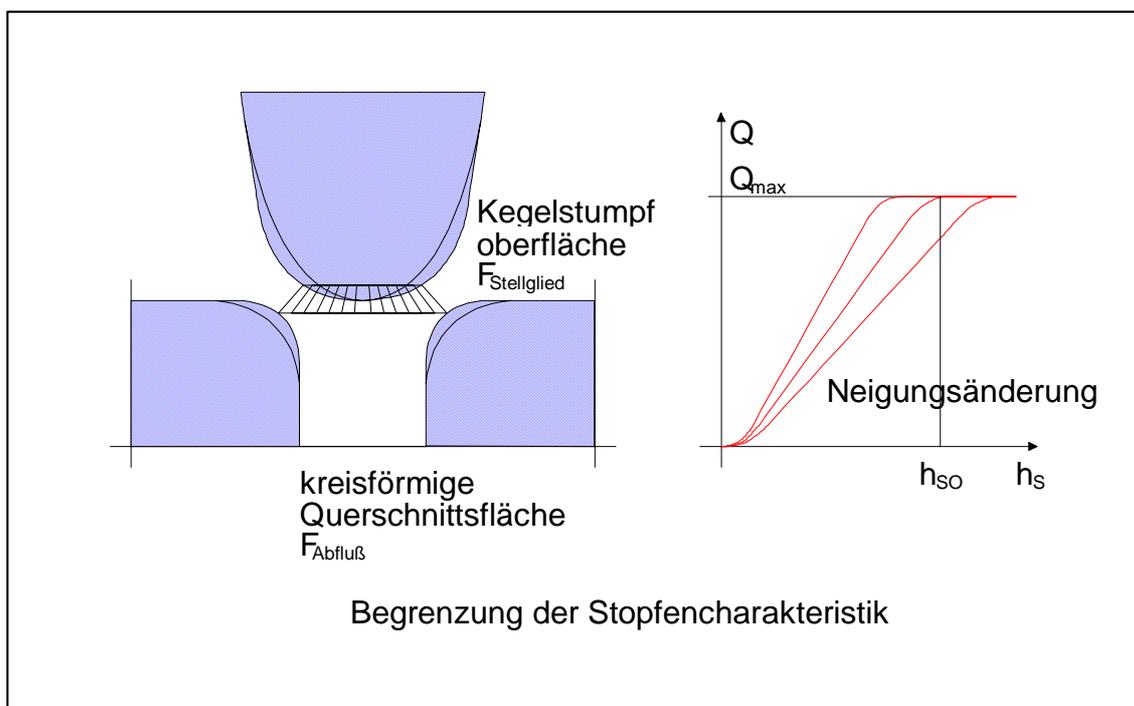


Abbildung 2.8: Stopfenausguss, Stopfenkennlinie

Bei einer zu späten Reaktion kommt es zu schwerwiegenden Anlagenschäden, die einen Stillstand der Stranggiessanlage verursachen.

Die Begrenzung der Stellcharakteristik wird bereits bei sehr kleinen Stellhöhen von 10 - 20 mm erreicht. Nach Erreichen eines bestimmten Stellhubes h_{so} wird eine

Steigerung h_s keine weitere Zunahme der abfließenden Stahlmenge Q mehr bewirken (siehe Abbildung 2.8). Der maximale Durchfluss Q_{\max} wird dann erreicht, wenn:

$$F_{\text{Stellglied}} = F_{\text{Abfluß}}$$

Q_{\max} wird im Wesentlichen von der kreisförmigen Abflussöffnung bestimmt.

Während des Giessens sinkt der Füllstand der Pfanne kontinuierlich; dadurch nimmt auch der ferrostatische Druck auf die Ausflussöffnung ständig ab. Der gleiche Effekt tritt bei sinkender Stahltemperatur und Qualitätsänderungen auf.

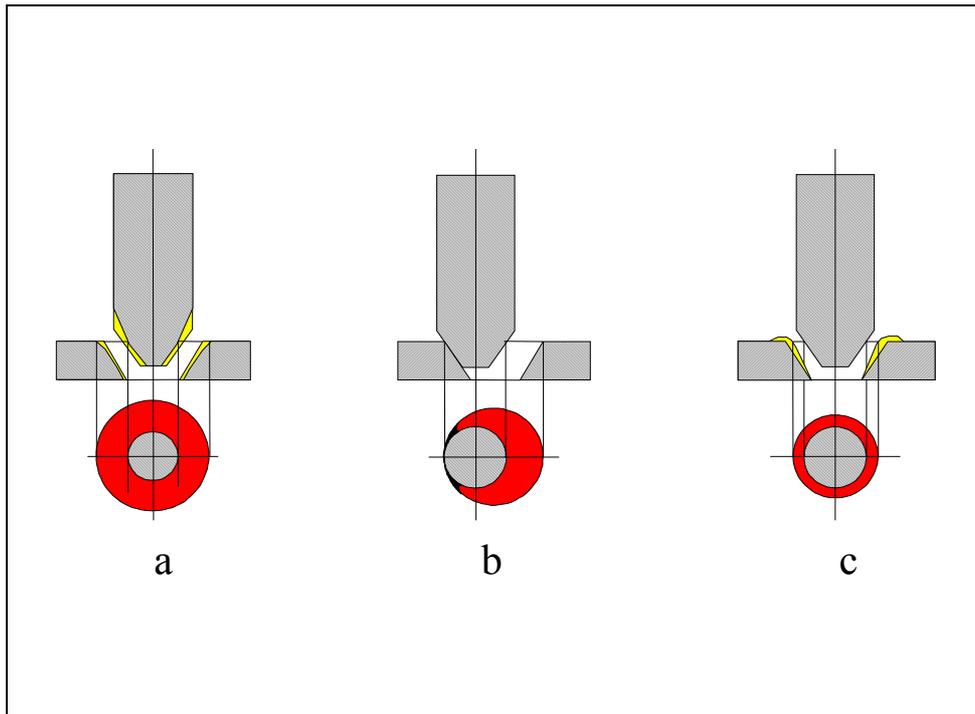


Abbildung 2.9: Änderung der Durchflusscharakteristik

- a. Abnutzung des Stopfens (links) \Rightarrow Kennlinie 3 in Abbildung 2.10
- b. Exzentrizität der Stopfenposition (Mitte) \Rightarrow Kennlinie 2 in Abbildung 2.10
- c. Ablagerungen (sehr stark bei Aluminium-berührtem Stahl) (rechts) \Rightarrow Kennlinie 3 in Abbildung 2.10

Mit fortschreitender Abnutzung (Abbildung 2.9. a) wird die Kennlinie des Stahlzufflusses zur Kokille in Abhängigkeit von der Stopfenposition steiler (Kennlinie 3 in Abbildung 2.10). Exzentrizitäten in der Stopfenposition und Anlagerungen am Stopfen wirken entgegengesetzt (Kennlinie 2 in Abbildung 2.10).

Die klassischen Reglerkonzepte sind nur für die Regelung linearer nicht zeitvarianter Systeme (hier: Kennlinien mit konstantem Anstieg, die sich zeitlich nicht verändern) optimal. Durch die unterschiedlichen Kennlinienanstiege an verschiedenen Arbeitspunkten und deren zeitliche Änderung handelt es sich aber um ein nichtlineares und zeitvariantes System. Eine vorsichtige und robuste Einstellung eines PID-Reglers führt zu einem unbefriedigenden Ausregeln von Störungen bei einer normalen Stopfenkennlinie. Eine schnellere Auslegung garantiert in diesem Fall zwar ein gutes Verhalten bei Störungen, kann aber bei stark abgenutztem Stopfen Oszillationen bis hin zu Stabilitätsproblemen verursachen [46].

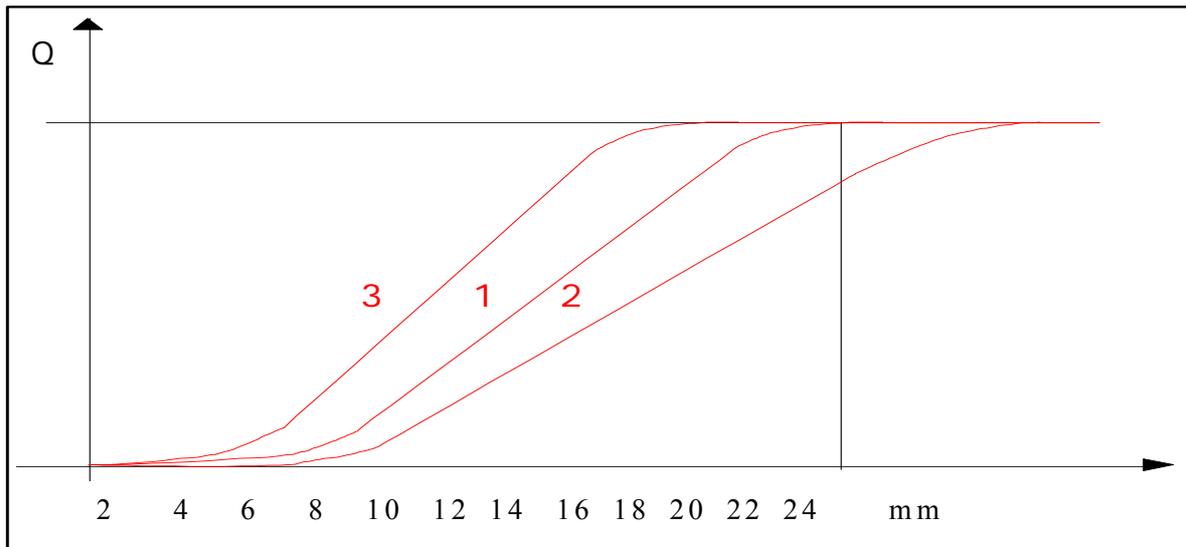


Abbildung 2.10: gemessene Kennlinie des Stahlzuflusses zur Kokille in Abhängigkeit der Stopfenposition (1 – normal, 2 – flach, 3- steil)

Aufgrund dieser Zeitvarianzen der Stopfenkennlinie kann in der Praxis das vorgegebene Toleranzband des Füllstandes mit einem klassischen Regelungskonzept nicht mehr garantiert werden. Die hervorgerufenen Regelabweichungen für eine konkrete Anlage sind in Abbildung 2.11 verdeutlicht.

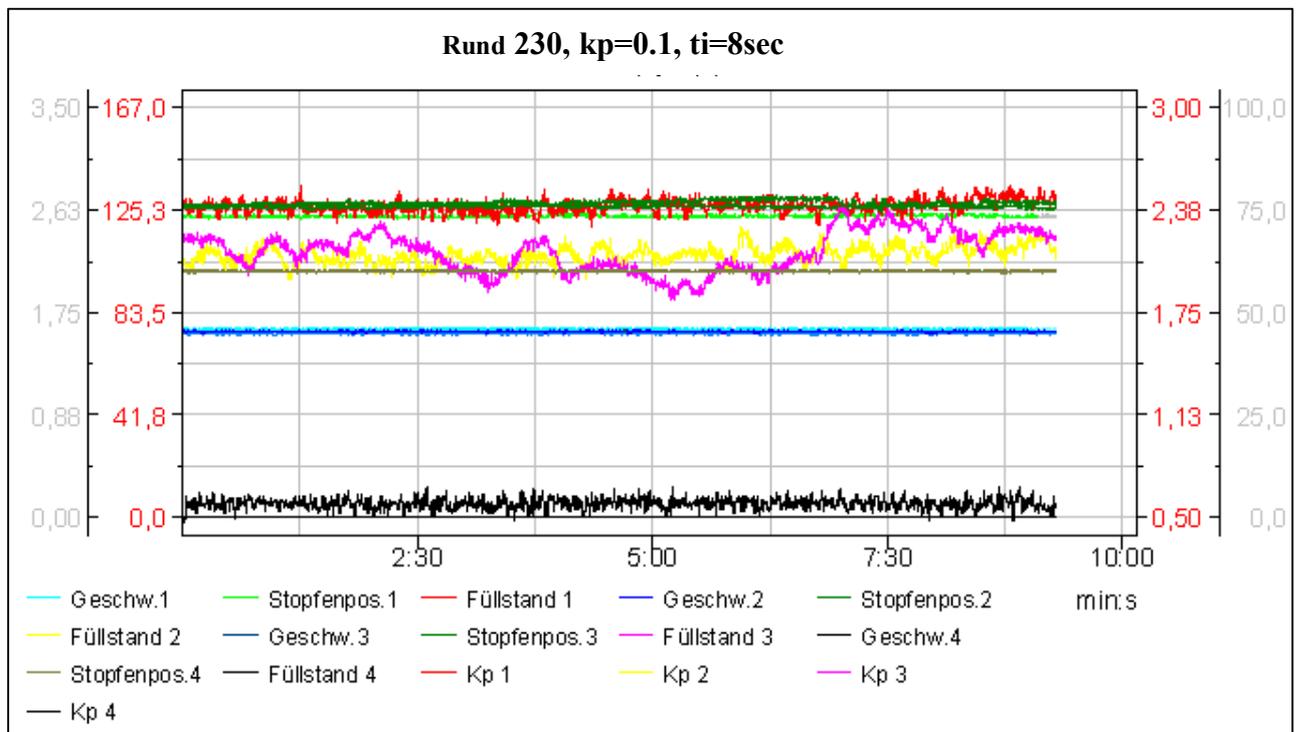


Abbildung 2.11: Parameteraufzeichnung des Gießverlaufes, PID-Regler

Alle dargestellten vier Stränge arbeiten mit identischen Parametersätzen. Der beim 3. Strang (violett in Abbildung 2.11) auftretende stark oszillatorische Füllstand ist auf die oben genannte zeitvariante Problematik zurückzuführen.

Bei der Auslegung einer Regelung müssen weitere Störgrößen in die Betrachtungen einbezogen werden:

- Oszillation der Kokille
Die Kokillenoszillation beeinflusst die Giessspiegelmessung, so dass im Giessspiegelmesswert Schwingungen mit der Kokillenhubfrequenz enthalten sind, die die Giessspiegelregelung beeinträchtigen können.
- Änderungen in der Strangabzugsgeschwindigkeit
- Mechanische Schwingungen des Stopfens
In der mechanischen Konstruktion können Reibungen und Lose enthalten sein, die nicht oder nur ungenau ermittelbar sind. Sie verschlechtern das Verhalten der Regelstrecke im Hinblick auf eine genaue Einstellung der Stopfenposition.

- Bulgingeffekt

In der Abzugsvorrichtung unterhalb der Kokille wird der noch weiche Strang durch Leitrollen geführt. Exzentrizitäten der Rollen führen zu periodischen Abstandsänderungen der Rollenpaare. Durch dieses periodische Zusammendrücken auf den nicht komplett erstarrten Strang wird der flüssige Kern nach oben und unten gepumpt. Somit entstehen die Bulging-Schwingungen des Giessspiegels. Die Frequenz der Schwingungen ist von der Giessgeschwindigkeit und von den vertikalen Rollenabstand abhängig.

2.2.2. Positionierung des Stopfens

Angetrieben wird das Stopfengestänge von einem Stellzylinder der entweder elektromechanisch oder elektrohydraulisch betrieben werden kann.

Für die Giessspiegelregelung ist entscheidend, dass der Vorgang der Verstellung möglichst spiellos, mit hoher Geschwindigkeit und hoher Positionierungsgenauigkeit durchgeführt wird. Die dazu verwendeten Stellsysteme werden nachfolgend kurz beschrieben.

2.2.2.1. Elektromechanisches Stellsystem

Das Stellsystem zum Antrieb des Stopfengestänges besteht aus einem kompakten elektromechanischen Zylinder. Dieser Zylinder besteht aus:

- einem Gleichstrommotor oder Drehstrommotor mit niedrigem Trägheitsmoment.
- einer elektrischen eingegliederten Kupplung
- einer Stellungsrückmeldung

Das Ausgangssignal des Reglers wird dem Regelverstärker des Zylinders zugeführt und somit die Stopfenposition über den Zylinder und das Stopfengestänge verstellt. Damit verändert sich der Stahlzufluss entsprechend der Regelabweichung.

Mit Hilfe eines Notschalters am Zylinder kann der Stellantrieb entkoppelt werden und ermöglicht so den Handeingriff des Giessers.

2.2.2.2. Elektrohydraulisches Stellsystem

Das hydraulische Stellsystem zum Antrieb des Stopfenstellzylinders besteht aus einem kompakten Hydraulikaggregat und Servoventilen. (Abbildung 2.12)

Die Ausgangsspannung des Reglers wird dem Servoventil zugeführt und somit der Ölzufluss zum Zylinder verändert. Der Zylinder verstellt über das Stopfengestänge den Stopfen und damit den Stahlzufluss entsprechend der Reglerabweichung.

Als Stellzylinder wird ein Gleichgangszylinder (die Ringfläche auf beiden Seiten des Kolbens ist gleich gross) mit durchgehender Kolbenstange und angebautem Kugelhahn als Kurzschlussvorrichtung mit Schwenkzapfenbefestigung eingesetzt.

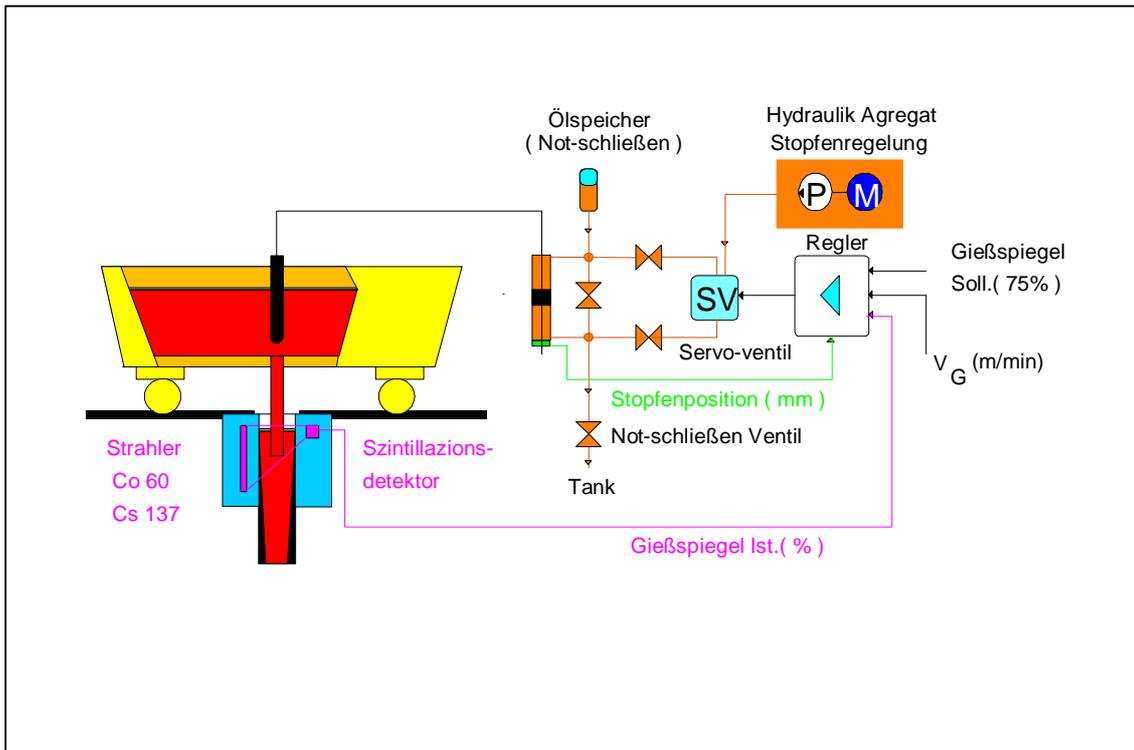


Abbildung 2.12: Giessspiegelregelung mit elektroydraulischem Stellsystem

2.2.3. Strangabzugsregelung

Die Abzugsgeschwindigkeitsänderungen wirken als Störgröße direkt auf den Giessspiegel. Andererseits ist für ein hochqualitatives Produkt eine konstante Geschwindigkeit erforderlich. Die Ausrüstung der Ausziehrichtmaschine mit Stromrichter oder Wechselrichter ermöglicht eine Geschwindigkeitsregelung mit einer Genauigkeit von 1%.

Die Forderung nach einer präzisen mechanischen Stahlführung führt zum Mehrmotorenantrieb, der mit gleicher Geschwindigkeit läuft und eine gleichmässige Lastverteilung vornimmt. Ein durch mehrere Motoren gekoppeltes Antriebssystem ohne Lastausgleich kann zur Vollbelastung nur eines Motors führen. Der entsprechende Motor fährt dabei an die Strom- und Momentgrenze, seine zugehörige Geschwindigkeitsregelung ist nicht mehr wirksam und der Motor bremst mit Auswirkungen auf die Verbundgeschwindigkeit. Als Folge schwankt der Giessspiegel und die mechanischen Teile werden stark belastet.

Die Lastverteilung wird benötigt, wenn Antriebe mechanisch miteinander verbunden sind. Während des Giessprozesses sollen zwei oder mehrere über das Material (Kalt- und Warmstrang) miteinander gekoppelte Antriebe in Parallelbetrieb laufen. Es soll erreicht werden, dass sich die Gesamtlast der mechanischen Anordnung in definierten Proportionen auf die Einzelantriebe verteilt.

Dafür wird ein Antrieb (als Master bezeichnet) bestimmt, der die Drehzahlregelung für den gesamten Verbund übernimmt. Die anderen Antriebe (Slaves) folgen dem führenden Antrieb in der Drehzahl und beteiligen sich an der Last in einem einstellbaren Verhältnis. In der SPS wird der Master durch das Programm definiert. Die Einschaltung der Master – Slave Funktion wird in Abhängigkeit von der Kalt-Warmstrang- Position zwischen den abgesenkten Ausziehrollen freigegeben.

Eine Lastverteilung kann nur dann funktionieren, wenn die Antriebe mechanisch gekoppelt sind. Es ist zu vermeiden, dass unkontrollierte Beschleunigungen oder Geschwindigkeitsänderungen während des Giessprozesses erfolgen.

In der Abbildung 2.13 ist die Konfiguration des Antriebes der Ausziehrichtmaschine der Brammenanlage Yieh United Taiwan dargestellt.

Die vier Frequenzumrichter sind über PROFIBUS mit der SPS vernetzt. Von der SPS werden die Sollwerte gesendet, sowie die Steuerbefehle (Start, Stop, Master, Slave, Lastverteilung aktiv). Die Frequenzumrichter senden via Profibus an die SPS die Istwerte und die Betriebszustände. Die Punkt-zu-Punkt-Kommunikation ist als schnelle serielle Kommunikation zwischen den Frequenzumrichtern erforderlich. Es gibt verschiedene Methoden, um eine Momentenaufteilung zu erreichen. Im einfachsten Fall wird der Momentensollwert des Masters an den Slave weitergegeben. Dies ist nur dann möglich, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die mechanische Kopplung zwischen den Antrieben niemals aufgetrennt wird. Bei realen Anwendungen ist das sehr selten gegeben. Es muss auch von einem unkontrollierten Bruch der mechanischen Kupplungselemente ausgegangen werden. Auch dabei muss ein sicherer Zustand für den Antrieb bestehen. Das wird dadurch erreicht, dass die Drehzahlregelung des geführten Antriebs im Prinzip beibehalten wird [59].

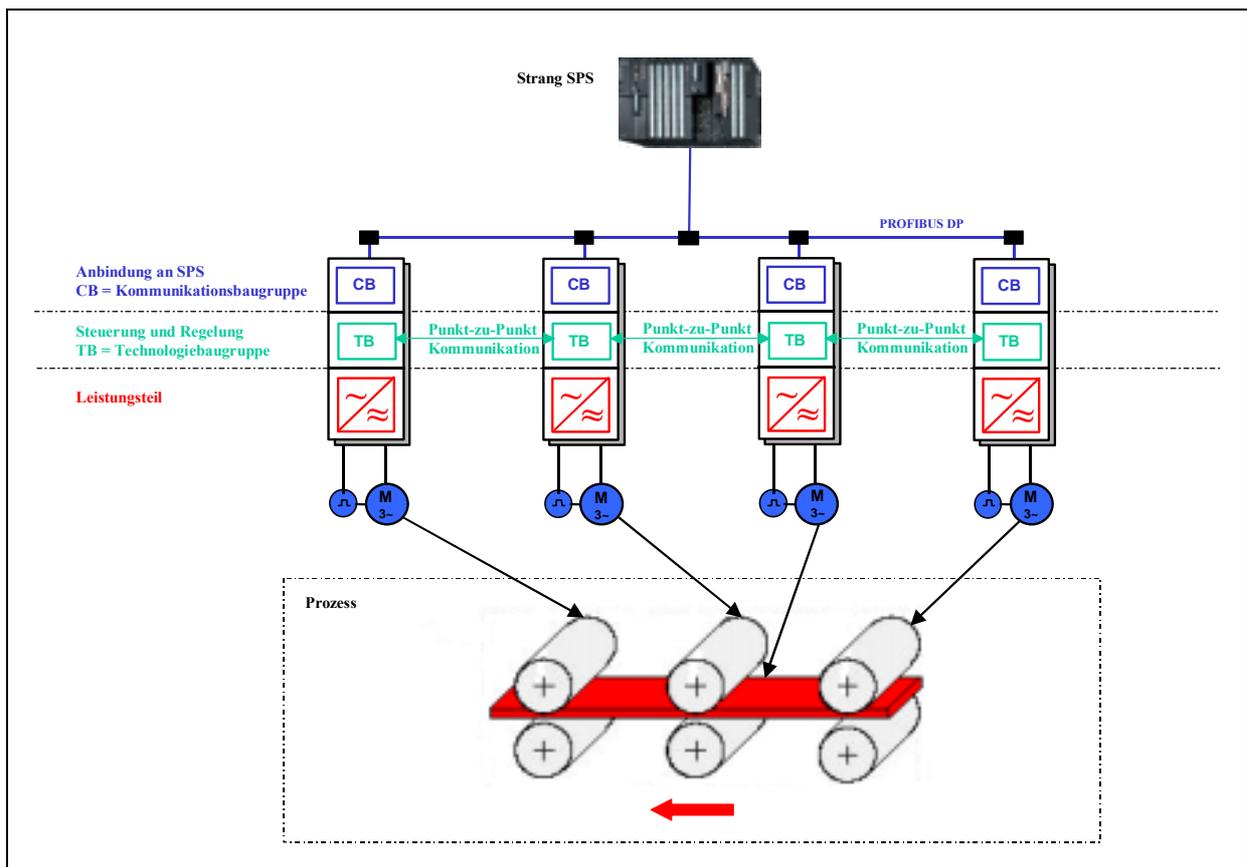


Abbildung 2.13: Mehrmotorenantrieb, Konfiguration für die Ausziehrichtmaschine

Der Lastanteil wird durch Manipulation:

- des Geschwindigkeitssollwertes (Statik und Kompensation) oder
 - der Strombegrenzung (Übersteuerung und Begrenzung)
- eingestellt.

2.2.3.1. Statik und Kompensation (Variante A)

Im Parallelbetrieb (gekoppelt) zweier drehzahl geregelter Antriebe mit PI Reglern, wird der geringste Fehler im Istwertabgleich integriert und die Regler driften bis an die Momentbegrenzung. Die Situation wird gelöst, wenn nur der Regler des Masters einen Integrationsanteil erhält. Der Slave wird nur mit einem P-Regler ausgestattet. Es kann statt dessen ein Teil des I-Anteils als Zusatz Istwert zurückführt werden (Statik). Durch diese Massnahmen wird eine fallende (geneigte) Lastkennlinie des Slave-Antriebs erreicht. (Abbildung 2.14)

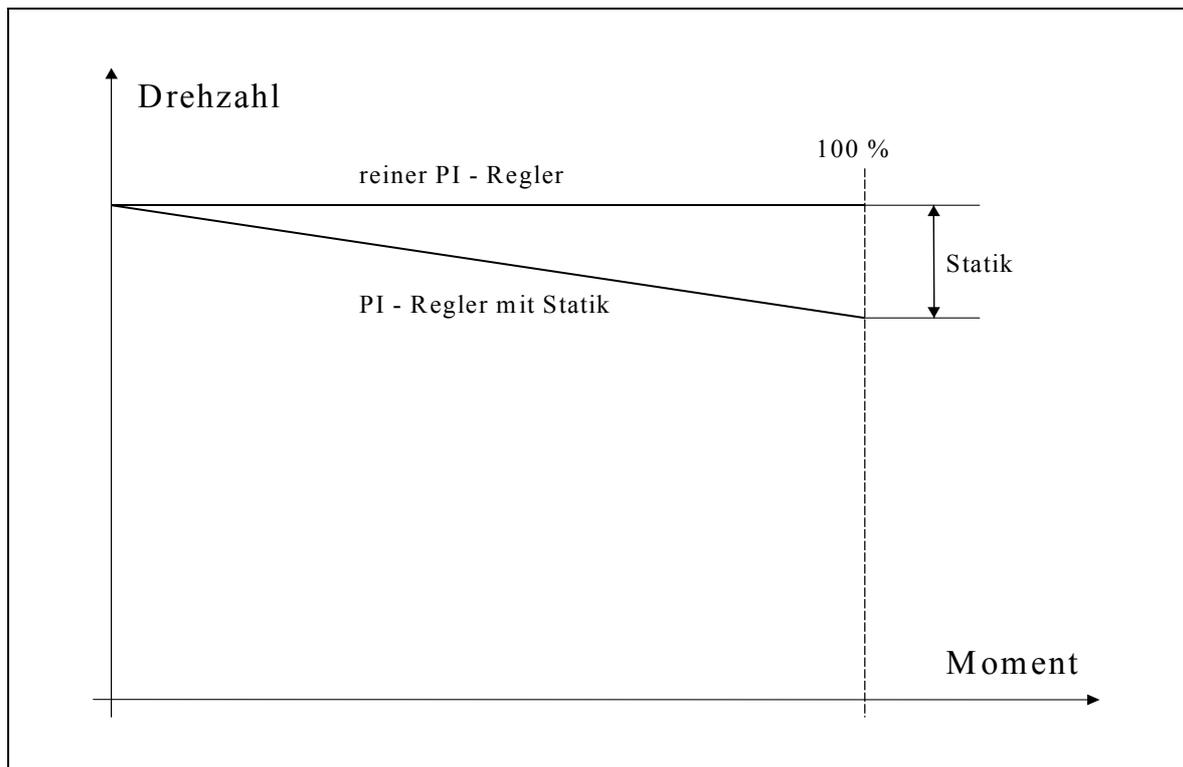


Abbildung 2.14: Drehzahl / Moment-Kennlinie [59]

Im Falle der Statik ist der Faktor im Rückführungszweig diejenige Drehzahländerung, die bei einer Laständerung von 100% auftritt. Der Master wird das erforderliche Moment aufbringen, der Slave jedoch nichts, weil dessen Soll-Ist-Differenz immer Null ist und somit auch sein Reglerausgang. Als Abhilfe wird dem Slave ein Zusatzgeschwindigkeitssollwert aufgeschaltet, welcher dem Produkt aus Lastanteil des Masters und Statikfaktor entspricht. Dadurch wird eine künstliche Sollwert-Istwert-Abweichung erzeugt, bis der Regler des Slaves denselben Lastanteil wie der Master führt.

In der Abbildung 2.15 ist das Prinzip dieser Methode - Statik und Kompensation mit gleichen Abgabemomenten – für einen Verbund aus zwei Antrieben dargestellt. Die Funktion bei mehreren Slaves ist sinngemäss dieselbe.

Bei Stranggiessanlagen ist es notwendig, dass keine Differenzmomente zwischen den Rollen auftreten, wenn dort Kalt- oder Warmstrang laufen. Deshalb ist es erforderlich, die Verluste der Antriebe individuell zu kompensieren.

Reibung und Beschleunigung werden in jedem Antrieb getrennt vorgesteuert.

Vom Leittrieb darf nur der Regleranteil (Korrekturmoment) verwendet werden. Statt des Gesamtmomentes wird der Reglerausgang des Masters als Korrektur für den Slave geschaltet [59].

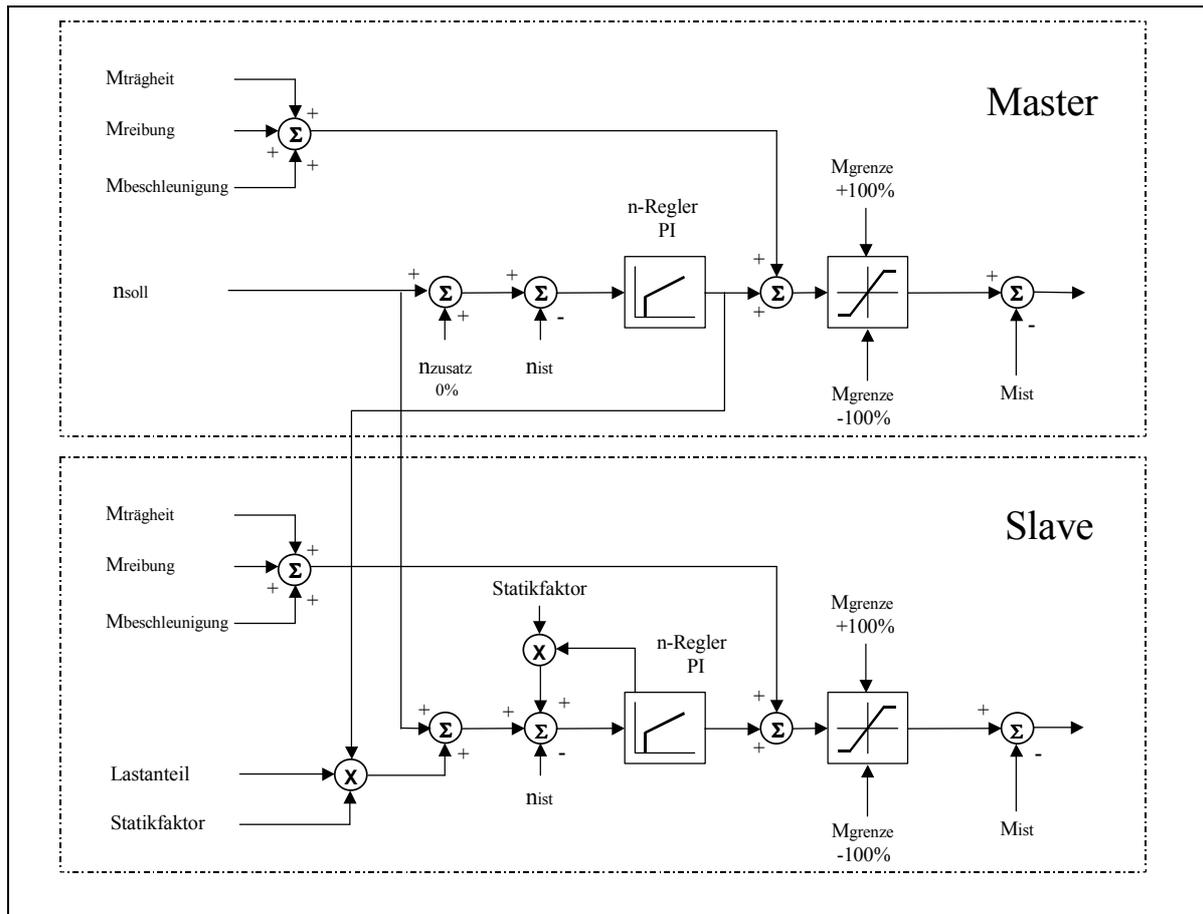


Abbildung 2.15: Lastausgleich mit Statik und Kompensation

Die Vorsteuer momente sind jeweils wirksam, somit ist auch bei unterschiedlichen Antrieben eine technologische Lastverteilung realisierbar.

2.2.3.2. Übersteuerung und Begrenzung (Variante B)

Diese Methode geht auf die Idee zurück, den Momentensollwert direkt auf den Slave zu schalten. Wenn beide Antriebe mechanisch gekoppelt sind, gibt es nur eine gemeinsame Geschwindigkeit. Dafür wird nur ein Regler benötigt. Dessen Momentensollwert gilt für Master und Slave gleichermassen. Der Momentensollwert vom Master wird über die Punkt-zu-Punkt-Kommunikation an den Slave übertragen. Dafür wird eine der Momentenbegrenzungen verwendet, so kann der Drehzahlregler des Slave aktiv bleiben; er wird lediglich mit Hilfe eines Übersteuerungssollwertes an die Begrenzung gefahren. Der Übersteuerungssollwert wird so gewählt (ca.5% vom Hauptsollwert), dass die Drehzahlerhöhung beim Bruch der Verbindung gering ist, der Regler aber auch bei dynamischen Lastschwankungen sicher an der Begrenzung verbleibt.

In der Abbildung 2.16 ist die Regelungsstruktur Übersteuerung und Begrenzung mit gleichen Abgabemomenten dargestellt.

Sinngemäß wie bei Statik und Kompensation wird hier nur der Reglerausgang zurückgeschaltet, der am Slave zusammen mit dem Vorsteuermoment wirksam wird. Das Vorsteuermoment wird für Master und Slave zusammen ermittelt und aufgeschaltet [59]. Die beschriebene Lösung bietet den technologisch korrekten Lastausgleich ebenso wie den Vorteil, dass nur ein Drehzahlregler im Eingriff ist.

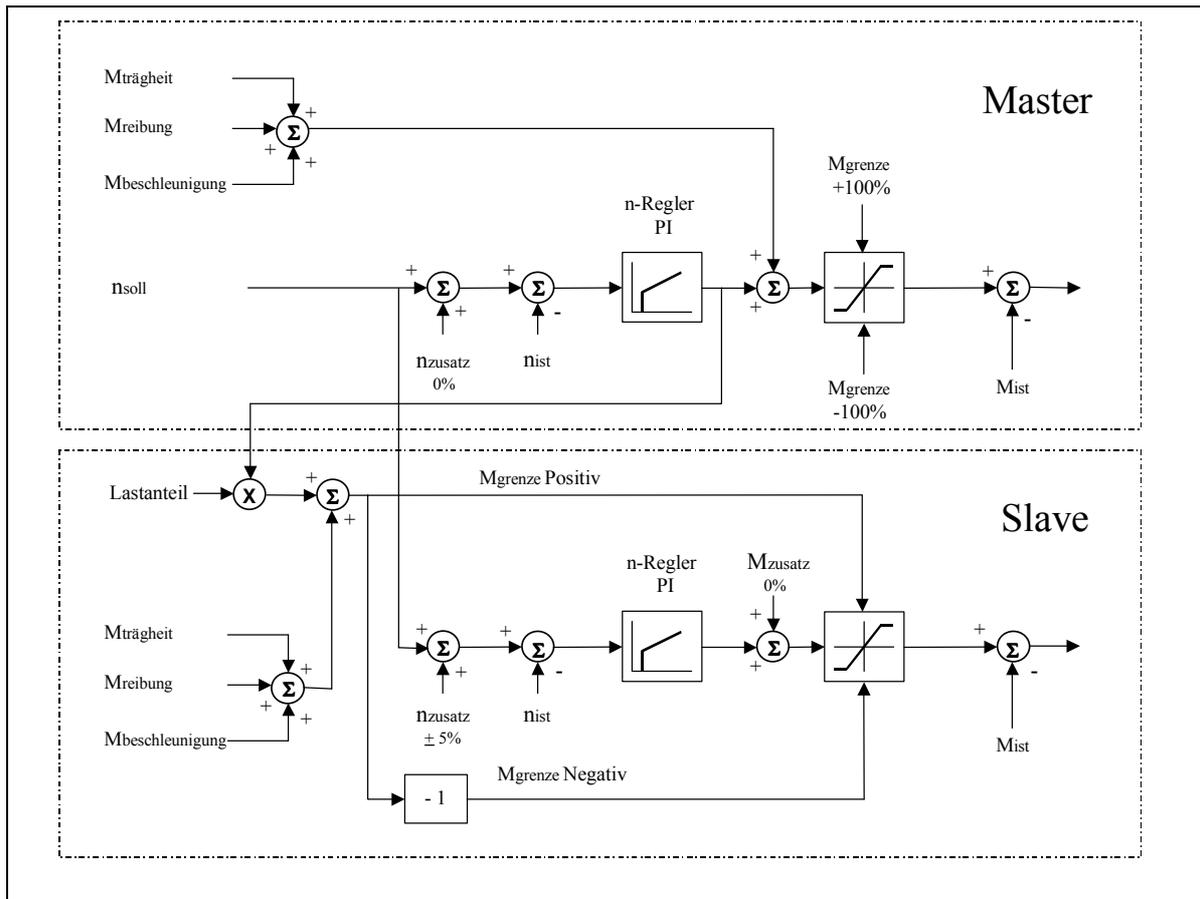


Abbildung 2.16: Lastausgleich mit Übersteuerung und Begrenzung

Der Nachteil von Variante A (Statik) ist, dass wegen der eventuell ungleichen Momenten-Istwerte eine einfache Kontrollmöglichkeit fehlt. Das ist für den Bediener schwer verständlich.

Die Verluste von allen Antrieben müssen bekannt sein (das gilt für beide Methoden), bzw. ausgemessen werden (Reibungskennlinie).

2.3. Havariefälle

Alle Störungen in einer Strangiessanlage führen zu zwei prinzipiellen Havariefällen

- Überlauf oder
- Durchbruch.

In beiden Situationen ist der weitere Betrieb bei dem betroffenen Strang nicht mehr möglich. Bei einer 1 - Stranganlage (z.B. Bramme) wird der Giessprozess ganz unterbrochen. Auch bei Mehrstranganlagen ist der Verlust eines oder zweier Stränge kritisch, da die Giessleistung niedriger wird und die damit verbundene Giesszeit zu lang wird. Das führt zu einem nicht vertretbaren Temperaturverlust in der Pfanne.

2.3.1. Überlauf

Ein Überlauf entsteht, wenn aus verschiedenen Gründen der Stahlzufluss in die Kokille so intensiv und unkontrollierbar ist, dass die Kokille überläuft. Eine typische Havarie für kleinere Giessformate, da die Füllzeiten niedrig sind.

Gründe dafür sind:

- Hand giessen, unerfahrene Bediener.
- Fehler in der Giessspiegelmessung.
- Ausziehmaschine gestört und gestoppt, Stopfen reagiert zu langsam.

- Stopfen / Ausguss abgenutzt, der Stopfen schliesst nicht mehr.
- Der Strang hängt (blockiert) mechanisch in der Maschine.
- Der Kaltstrang entkoppelt sich kurz nach dem Angiessen.

Im extremen Fall, kann die überlaufene Stahlmenge so hoch sein, dass die Giessspiegelmessung (Szintillationszähler und/oder Strahler) irreversible beschädigt wird.

In der Steuerung wird eine Überwachung implementiert, die bei steigendem Giessspiegel (über 90 %) den Regler ausschaltet und den Stopfen schliesst. Eine solche Massnahme ist in vielen Situationen hilfreich. Falls eine starke Beschädigung des Stopfens entsteht, ist der Strang nicht mehr zu retten. Mit einer speziellen mechanischen Ausrüstung (Messer) werden die Tauchrohre getrennt und der Ausguss geschlossen.

2.3.2. Durchbruch

Als Durchbruch definiert wird die Situation, wenn die frisch kristallisierte Schale unterhalb der Kokille durchbrochen wird, und der flüssige Stahl unkontrolliert in die Kühlkammern fliesst und den Giessspiegel schnell absenkt.

Ein Durchbruch beendet in den meisten Fällen den Giessprozess am entsprechenden Strang. Der Schaden entsteht bei den sekundären Kühlsystemen. (übergossene Rohre und Spritzdüsen).

Gründe für Durchbrüche sind:

- Mangelhafte Kokillenkühlung.
- Schlackenmitfluss
- Mangelhafte Strangschmierung in der Kokille (Giesspulver)
- Mangelhafte sekundäre Kühlung in der ersten Zone. (z.B. verstopfte Düsen)
- Zu wenig Kühlzeit bei Angiessen.

Je grösser die Giessformate, also je grösser die Kokille, desto schwerer sind die Konsequenzen eines Durchbruchs.

Bei Brammenanlagen ist es in den heutigen Tagen eine Pflicht, die Kokille mit Warnsystemen gegen Durchbruch auszurüsten.

Ein solches System besteht aus mehreren (ca. 40) Temperatursensoren, eingebaut in die Kokillenwände. Die gemessenen Temperaturen und deren zeitliche Ableitungen werden in einen Rechner (PC) ausgewertet. Mittels mathematischer Modelle wird es möglich, eine Frühwarnung auszulösen [2], [47].

Diese Frühwarnsysteme sind bei grossen Giessformaten wie Vorblock oder Bramme einsetzbar. Bei kleineren Formaten (< 250mm) sind die Warnsysteme wegen der relativ langen Zeitkonstanten (typisch für Temperaturmessungen) nicht einsetzbar.

Die zweite Massnahme, die Konsequenzen des Durchbruchs zu minimieren, ist durch Beobachtung des Giessspiegels und schneller Reaktion beim Schliessen des Stopfens, die Ausziehrichtmaschine anzuhalten.

Falls ein Durchbruch entsteht, sinkt der Giessspiegel schnell und der Giessspiegelregler hat die Tendenz den Stopfen weiter zu öffnen, um die immer grösser werdende Abweichung zu kompensieren.

Um eine derartige Situation zu vermeiden wird eine logische Überwachung nach folgenden Regeln in die Steuerung implementiert:

- Wenn der Giessspiegel bei konstanter Giessgeschwindigkeit sinkt und 35 % des Messbereichs erreicht, wird die Giessgeschwindigkeit auf den Angiesswert (0,8 – 1,2 m/min) reduziert.
- Wenn trotz vorhergehender Massnahme der Giessspiegel schnell weiter sinkt, wird bei 5 % Giessspiegel der Stopfen geschlossen und die Maschine gestoppt.

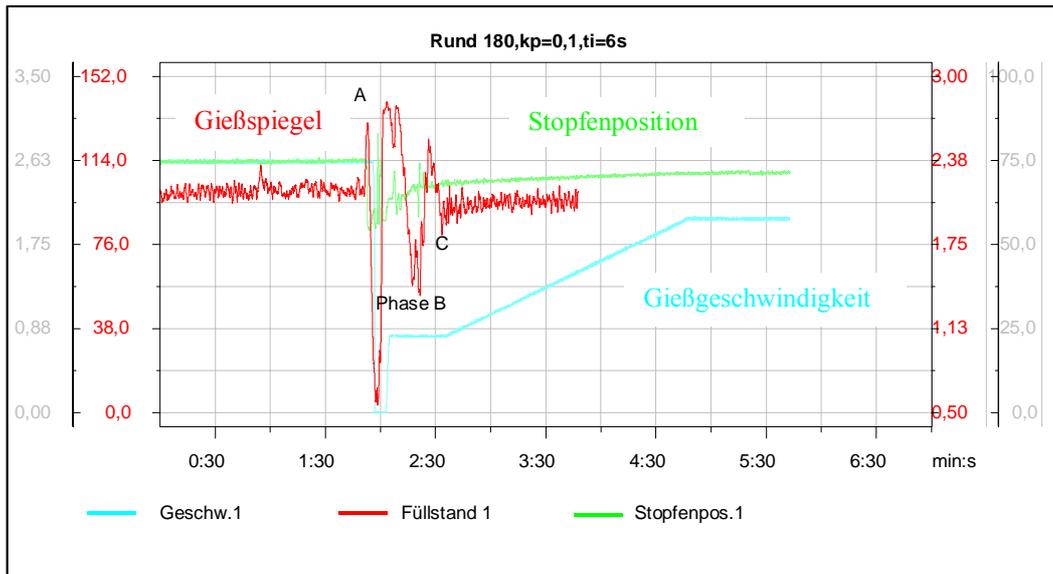


Abbildung 2.17: Parameteraufzeichnung bei Durchbruch

Die beschriebene Überwachung ist auch wirksam bei Ablagerungen von Stahl oder einer Verstopfung im Tauchrohr, wodurch ein extrem niedriger Giesspiegel verursacht wird. Ein solcher Fall ist in Abbildung 2.17 dargestellt.

Nach der automatischen Erkennung der Durchbruchsituation (Zeitpunkt A) wird der Strangabzug gestoppt. Der Giesser stellt auf manuellen Betrieb um, startet die Ausziehrichtmaschine mit dem minimalen Geschwindigkeit, und spült mit starken Stopfenbewegungen das Tauchrohr wieder frei (Phase B). Dann schaltet er wieder in den automatischen Betrieb (Zeitpunkt C), und erhöht die Giessgeschwindigkeit.

2.4. Automatisches Angiessen

Es gibt mehrere Philosophien für das automatische Angiessen. Fast jeder Konstrukteur oder Stahlproduzent hat seine eigenen Sequenzen, seine eigenen Erfahrungen passend zu seiner Giessmaschine, sowie den produzierten Stahlqualitäten und Giessformaten entwickelt.

Die kleineren Giessformate (z.B. 130 bis 200 mm) sind sehr schwer in manueller Betriebsart zu giessen.

Die Messbereiche in der Kokille sind in den meisten Fällen 130 bis 200 mm unter der oberen Kokillenkante. Der Abstand zwischen Kaltstrang Kopf und oberer Kante ist in der Regel 350 bis 650 mm. Es gibt einen Bereich von ca. 220 bis 450 mm, der beim Angiessen nicht kontrollierbar gefüllt werden muss (Bereich unter der Messzone). Der Regler kann nur dann freigegeben werden, wenn der Stahlpegel den Messbereich erreicht hat.

Das Einschalten der Giesspiegelregelung soll ohne grössere Schwankungen des Stahlpegels in der Kokille erfolgen.

2.4.1. Automatisches Angiessen für kleinere Giessformate

In der Abbildung 2.18 ist der Zeitablauf eines automatischen Angiessens für kleinere Giessformate dargestellt.

Der Angiessvorgang kann in folgende Einzelschritte zerlegt werden:

A. Stopfen schliessen, Ermittlung der Stopfenschliessstellung.

Die Sequenz ist nicht in Abbildung 2.18 dargestellt und wird, während die Verteilerrinne von der Heizposition zur Giessposition fährt, bearbeitet.

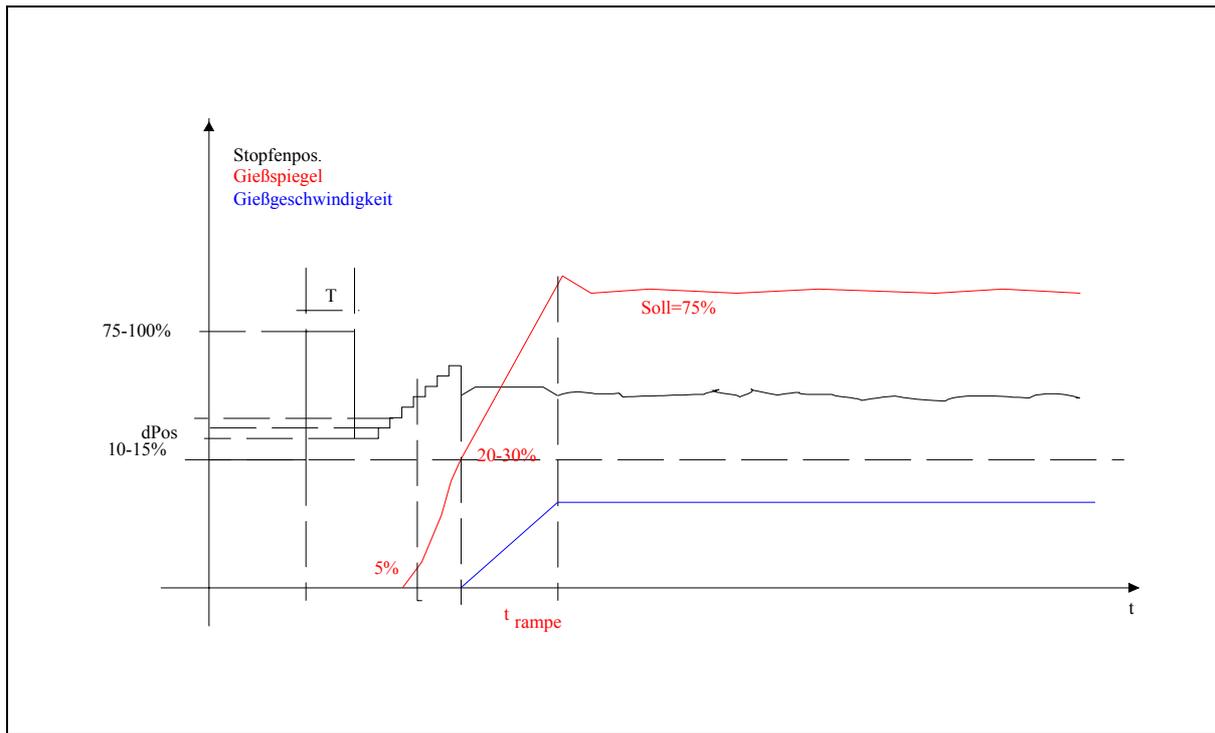


Abbildung 2.18: Zeitablauf des automatischen Angiessens für kleinere Giessformate

1. Ermittlung der Verfahrkräfte

Da die Verfahrkräfte von Mechanik zu Mechanik unterschiedlich sind, wird ein Stopfenschliessen mit konstantem Druck nicht zu reproduzierbaren Schliessstellungen führen. Der Wert muss um die Verfahrkräfte korrigiert werden.

2. Schliessen des Stopfens mit korrigierten Druckwerten

Hierzu wird zunächst der Stopfen im Leerhub verfahren, die dabei erforderlichen Kräfte über flächenbewertete (Kolben- Kolbenstangenseite) Differenzdruckmessung gemessen und der erforderliche Schliessdruck (ca. 5 – 8 bar Differenzdruck) ermittelt. Erreicht beim Aufdrücken des Stopfens der gemessene Wert den errechneten, so wird anschliessend lagegeregelt diese Position gehalten. Wenn der Schliessdruck weiter ansteigt, so sind Deformationen im Stopfen/Ausgussystem unvermeidbar, die beim späterem Öffnen zu unterschiedlichen Durchflussquerschnitten führen.

B. Füllen der Kokille

1. Beginn mit erhöhter Durchflussmenge

Zu Beginn muss mit etwa der dreifachen Durchflussmenge gegenüber der für eine Kokillenfüllung in 5 – 8 sec. gerechneten Menge gestartet werden, da das Ausgussystem gegenüber dem flüssigen Stahl kalt ist und sonst einfrieren wird. (Stopfen Öffnung 75 – 100 % für ca. 0,5 bis 1 sec)

2. Füllen mit vermindertem Durchfluss

Nach der vorangegangenen Aufheizperiode mit hohem Durchfluss muss nach ca. 0,5 – 1 sec (querschnitt- und ausgussabhängig) die Position auf etwa $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$ Durchfluss vermindert werden. Die Position darf dann nicht konstant gehalten werden, da das Ausgussystem mit Tauchrohr noch nicht die Stahltemperatur erreicht hat, und mit weiteren Verbärungen zu rechnen ist. Die Verbärungen müssen durch kontinuierliche Durchflusserhöhung wieder aufgeschmolzen werden.

Die Füllperiode ist beendet, wenn der Giessspiegel von der Messung erfasst wird und ca. 20 – 30 % erreicht hat.

3. Übergang in den geregelten Betrieb

Nach Erreichen eines Giessspiegels von ca. 10 – 20 % sind folgende Schritte durchzuführen:

1. Ermittlung des Arbeitspunktes für die nachfolgende Giessspiegelregelung. Damit es beim nachfolgendem Umschalten auf die Giessspiegelregelung nicht zu einem ungewollten Hochschnellen oder Abfallen des Giessspiegels kommt, muss die Regelung entsprechend den aktuellen Durchflussbedingungen mit dem richtigen Positionsarbeitspunkt gestartet werden. Die Position errechnet sich aus der Steilheit des in den Messbereich einlaufenden Giessspiegels. Praktisch wird eine Identifikation der Geschwindigkeits /Stopfenpositionskennlinie durchgeführt [21] (siehe Abbildung 2.19).

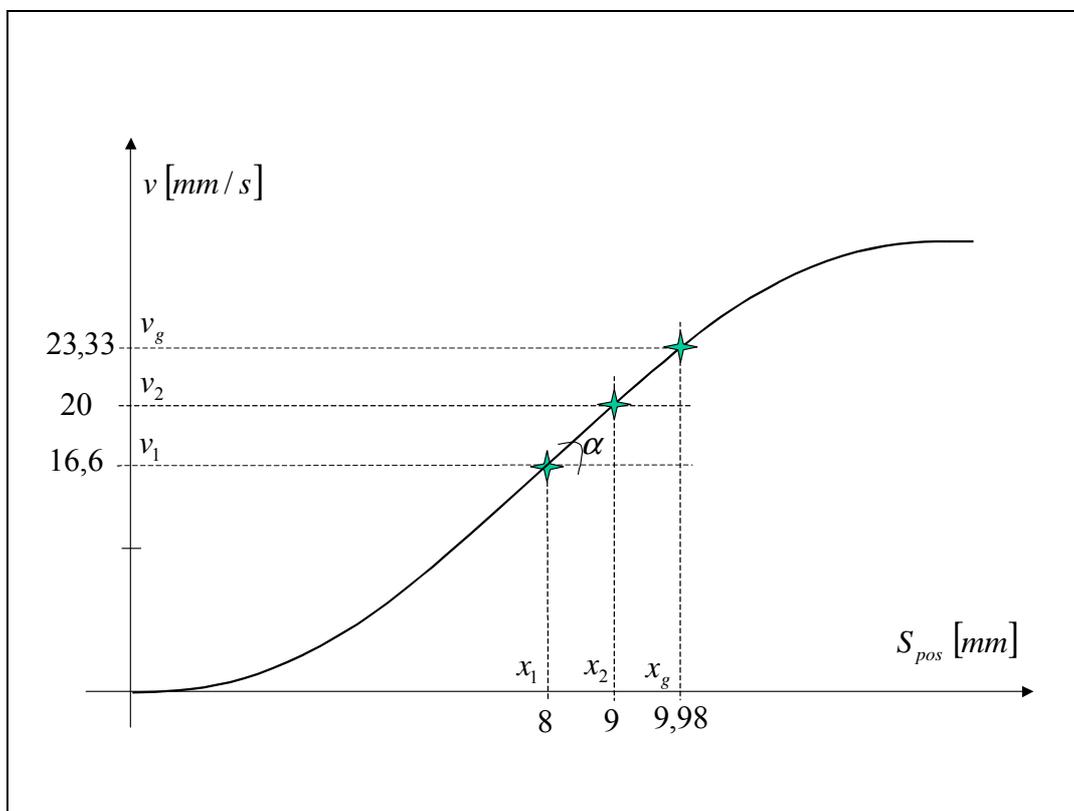


Abbildung 2.19: Geschwindigkeit (v) – Stopfenposition (S_{pos}) Kennlinie

Rechenbeispiel mit den gemessenen Werten in Taiwan, Januar 2000:

- für $x_1 = 8 \text{ mm}$ Öffnung wurde ein Giessspiegelanstieg von $\frac{\Delta h_1}{\Delta t} = v_1 = 16,6 \text{ mm/s}$ gemessen.
- für $x_2 = 9 \text{ mm}$ Öffnung wurde ein Giessspiegelanstieg von $\frac{\Delta h_2}{\Delta t} = v_2 = 20 \text{ mm/s}$ gemessen.

Die Steilheit der Kennlinie in den linearen Bereich ist:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1} = \frac{20 - 16,6}{9 - 8} = 3,4 \text{ mm/s/mm} \quad (2.6)$$

Für eine gewünschte Angiessgeschwindigkeit von $v_g = 1,4 \text{ m/min} = 23,33 \text{ mm/s}$ ergibt sich die Arbeitsposition des Stopfens durch die Berechnung:

$$x_g = \frac{v_g - v_1}{\operatorname{tg} \alpha} + x_1 = \frac{23,33 - 16,6}{3,4} + 8 = 9,98 \text{ mm} \quad (2.7)$$

Der Stopfen muss schnell in die Position gefahren werden.

Der Arbeitspunkt des Lagereglers muss aus der Anstiegssteilheit berechnet werden, da die Durchflüsse beim Anfahren trotz gleicher Position unterschiedlich sein können.

Hauptursache hierfür sind:

- Stahlqualität
- Stahltemperatur
- Vorheiztemperatur Verteiler
- Toleranzen Giessarmaturen (glasierte Stopfen)
- Füllhöhe Verteiler

2. Starten der Maschine, und Einschalten der Giesspiegelregelung. Zugleich mit zuvor beschriebenem Schritt und bei einem Füllwert von 30 - 60 % werden die Treibermaschinen gestartet, Umschaltung auf die Giesspiegelregelung und Start Kokillenszillation.

C. Kontinuierliches Auffüllen der Kokille bis zum vorgewählten Sollwert.

Nachdem der Stopfen zum Schluss des Angiessvorganges seine errechnete Arbeitsposition erreicht hat, ist der aktuelle Istwert des Giessspiegels als Sollwert in die Giesspiegelregelung zu übernehmen. Anschliessend nach Einregeln des Istwertes wird der vorab übernommene Sollwert kontinuierlich verändert, bis der Originalsollwert (ca. 75 % von Messbereich) erreicht ist. Diese Sollwertkorrektur wird so vorgenommen, dass es zu keinem Schwingen des Giesspiegelwertes kommt. Die beschriebene Angiesssequenz wurde bei der Rundgiessanlage (180 – 240 mm) in Baotou V.R.China, in Taiwan 140 x 140 mm Knüppelgiessanlage und bei den Rundgiessanlage (150-180 mm) in Hunedoara/Rumänien und inbetriebgenommen.

2.4.2. Automatisches Angiessen für grössere Giessformate

Für grössere Giessformate es ist wichtig, dass die Ausziehrichtmaschine nach der minimalen Kühlzeit gestartet wird, um Durchbrüche zu vermeiden. Eine 1800 x 175 mm Bramme braucht bis zu 100 sec. Kühlzeit in der Kokille, um eine sichere, kristallisierte Schale zu bilden.

In der Abbildung 2.20 sind die Kühlzeiten nach 20 + 30 sec zu erkennen. Nach der ersten Öffnung des Stopfens und Erreichen eines Stahlpegels von 30 bis 50 %, wird der Stopfen geschlossen.

Nach Ablauf der Kühlzeit läuft die Sequenz ähnlich wie in der beschriebenen Sequenz für kleinere Formate.

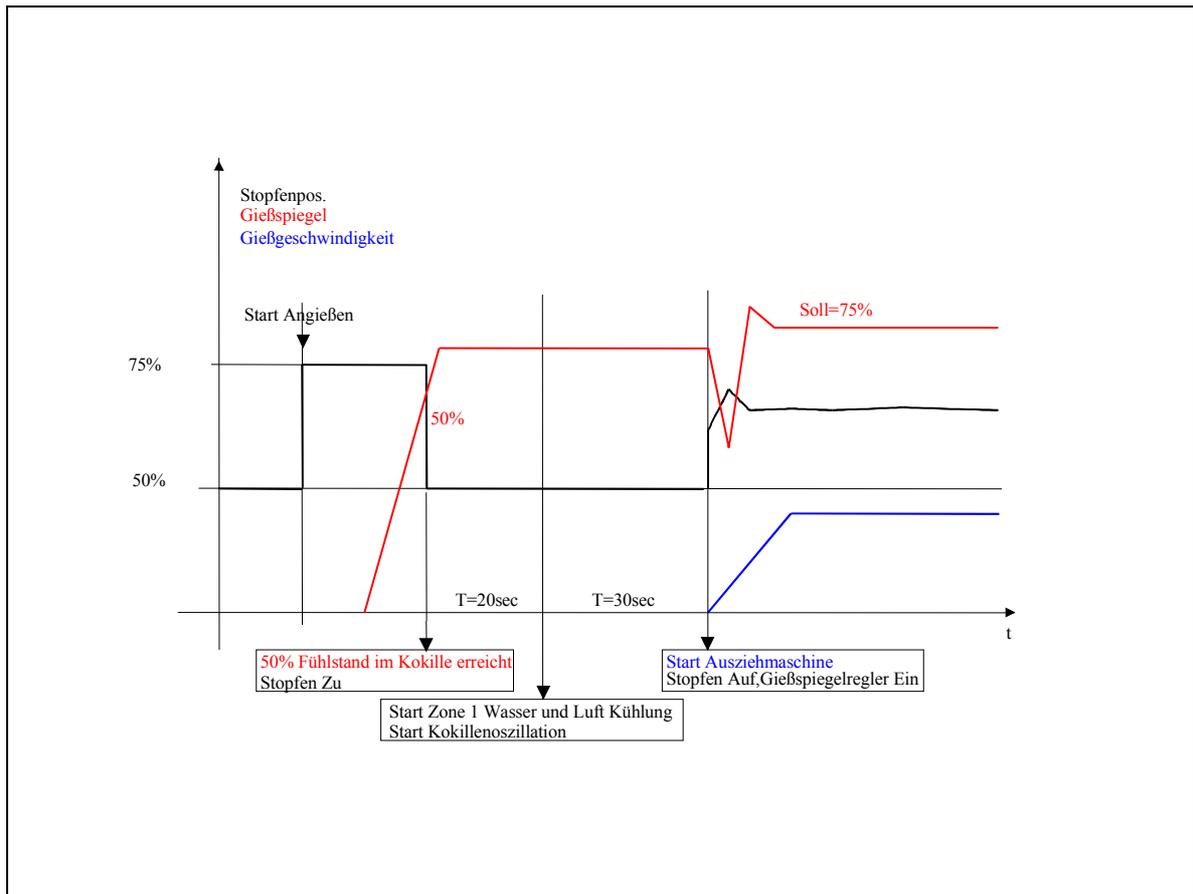


Abbildung 2.20: Zeitablauf für automatisches Angiessen einer Bramme

Die beschriebene automatische Angiessesequenz wurde bei der Vorblockgiessanlage (250 x 350 mm) in Baotou, V.R.China, bei der Brammenanlage (1800 x 175 mm) in Taiwan und bei der Vorblockgiessanlage (250 x 270 mm) in Hunedoara/Rumänien implementiert und inbetriebgenommen.

3. Einsatz neuer Methoden für Giessspiegelregelung

Der nicht direkt messbare Prozesswert, der Stahlzufluss in die Kokille und die Veränderungen des Stopfenausgusses, machen die Giessspiegelregelung von nichtlinearen und zeitvarianten Kennlinien abhängig.

Verschiedene Regelstrukturen wurden untersucht, um die Zeitvarianz und die Messschwierigkeiten zu überbrücken. Strukturen wie Zustandsregler mit Beobachter [49],[50] eignen sich besser, lösen aber nicht das Problem der Zeitvarianzen. Die Fuzzy-Struktur mit der Möglichkeit unscharfe Kenntnisse in linguistischen Termen zu beschreiben, bietet eine neue Methode um den klassische PID Giessspiegelregler direkt zu ersetzen oder durch Adaption zu verbessern.

In Rahmen der Projektierung der Stranggiessanlage Baotou, China sind mehrere Fuzzy-Reglerstrukturen untersucht worden:

- Fuzzy-PI-Regler, als Ersatz des konventionellen PI-Reglers
- Parallel geschaltete Fuzzy-PD-Regler zum konventionellen PID-Regler mit Gewichtungsfaktor.
- PID-Regler mit Fuzzy Adaption

3.1. Fuzzy-PI-Regler

Die Struktur der Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus) wurde wie in Kap.1.2.2.1 beschrieben untersucht. Um die dynamischen Eigenschaften einzubeziehen, wurde die Zeitableitung der Abweichung konventionell berechnet und zum fuzzifizierten Eingang geschaltet.

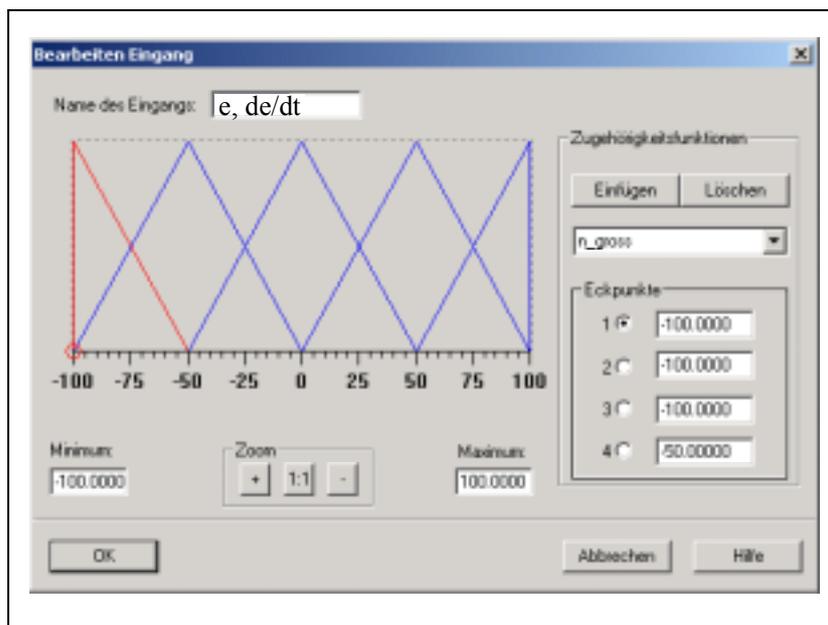


Abbildung 3.1 Zugehörigkeitsfunktionen der Reglerabweichung und der Zeitableitung der Reglerabweichung (Projektierungswerkzeug [58])

In Abbildung 3.1 sind die Zugehörigkeitsfunktionen der Reglerabweichung e und dessen Zeitableitung $\dot{e}(de/dt)$ mit den linguistischen Termen:

n_gross, n_klein = Eingangswert negativ gross, klein bzw.

null = Null,

p_gross, p_klein = positiv gross, klein.

In Abbildung 3.2 sind die Zugehörigkeitsfunktionen (Singletons) der Ausgangsgrößen der PI-Regler dargestellt, mit der Linguistischen Terme:
n_sgross, n_gross, n_mitt, n_klein = Ausgangswert negativ sehr gross, gross, mittel, klein bzw.
null = Null,
p_sgross, p_gross, p_mitt, p_klein = positiv sehr gross, gross, mittel, klein

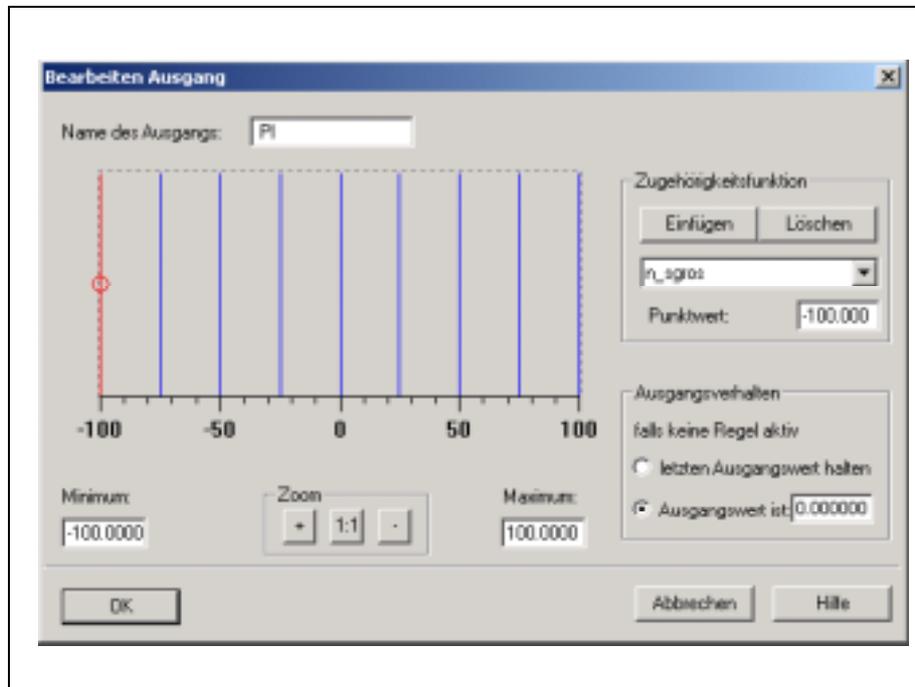


Abbildung 3.2 Zugehörigkeitsfunktionen der Reglerausgang

Die Tabelle 3.1 zeigt die Regel-Matrix zum Ermittlung der Ausgangs des Fuzzy-PI-Reglers.

e de	<i>n_gross</i>	<i>n_klein</i>	<i>null</i>	<i>p_klein</i>	<i>p_gross</i>
<i>n_gross</i>	<i>n_sgross</i>	<i>n_gross</i>	<i>n_mit</i>	<i>n_klein</i>	<i>null</i>
<i>n_klein</i>	<i>n_gross</i>	<i>n_mit</i>	<i>n_klein</i>	<i>null</i>	<i>p_klein</i>
<i>null</i>	<i>n_mit</i>	<i>n_klein</i>	<i>null</i>	<i>p_klein</i>	<i>p_mit</i>
<i>p_klein</i>	<i>n_klein</i>	<i>null</i>	<i>p_klein</i>	<i>p_mit</i>	<i>p_gross</i>
<i>p_gross</i>	<i>null</i>	<i>p_klein</i>	<i>p_mit</i>	<i>p_gross</i>	<i>p_sgross</i>

Tabelle 3.1 Regel-Matrix des Fuzzy-PI-Reglers

Das Kennfeld in der Abbildung 3.3 zeigt ein PI-Regler Verhältnis. (siehe auch [30]) Der Fuzzy-PI Regler wurde in einer Siemens S5-135 Steuerung, CPU928B und in einem nachgebauten Giessspiegelmodell erprobt. In dem Modell wurde Wasser als Fließmittel verwendet. Der nachgebauter Stopfen wurde mit einem elektrischen Servomotor positioniert. Der Füllstand in dem Kokillenmodell wurde durch den entstehenden Wassersäulendruck ermittelt [11], [17].

Die Modellsimulation des implementierten Fuzzy-PI-Reglers zeigte, dass ein direkter Ersatz des klassischen PI-Regler durch eine Fuzzy-Struktur die Probleme einer nichtlinearen und zeitvarianten Strecke nicht löst.

Die Versuche, durch Änderungen der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis, die Nichtlinearitäten oder Kennlinienänderungen des Stopfens zu kompensieren, führen zu keinem zufriedenstellendem Ergebnis [11], [17], [32], [33].

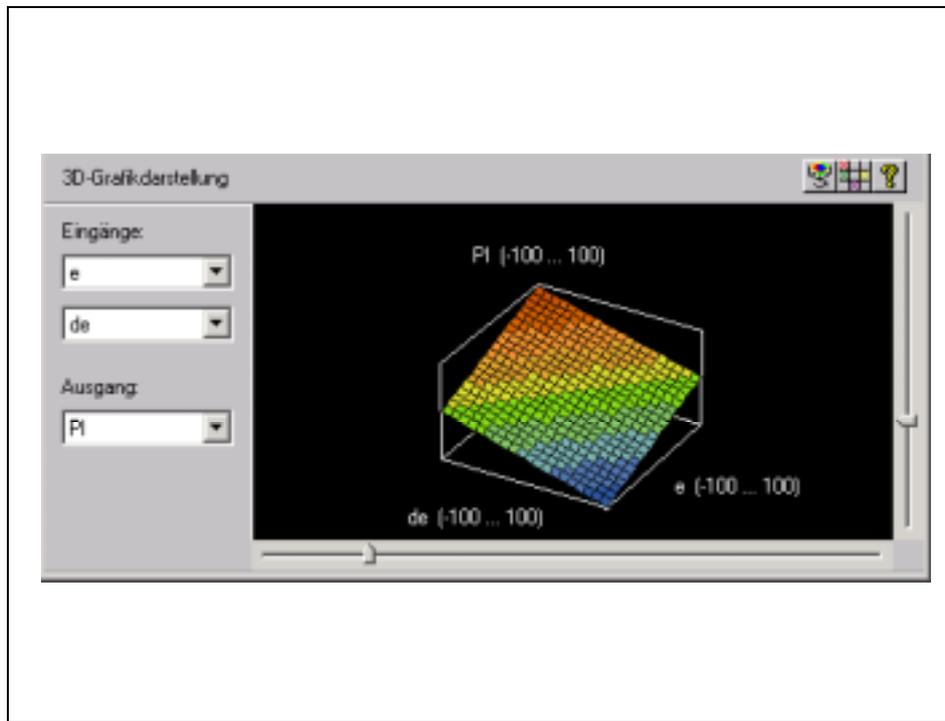


Abbildung 3.3 Kennfeld des implementierten Fuzzy-Reglers
(Projektierungswerkzeug [58])

3.2. PI / Fuzzy-PD-Regler parallel geschaltet

Das Konzept für den Entwurf eines Parallel-Fuzzy-Reglers für eine Giessspiegelregelung [11],[32] und [33] basiert auf der Idee, den klassischen PID-Regler bei grossen und schnellen Abweichungen zu unterstützen.

Die Auslösung einer Ablagerung auf den Stopfen/Ausguss hat eine schlagartige Änderung des Giessspiegels zur Folge. Ein PI-Regler optimiert nach einem symmetrischem Kriterium (empfohlen für die Strecke) kann deshalb mit seinen Zeitkonstanten von $T_N = 2 - 8$ sec die Störungen nicht schnell genug ausregeln. Die konventionelle Regelung reagiert bei dieser Störung ausgesprochen träge.

In Abbildung 3.4 a. ist die Parallel-Fuzzy-PD-Reglerstruktur dargestellt (siehe auch [11], [17], [32], [37]). Hier wurde dem klassischen Regler eine Fuzzy-Struktur hinzugefügt, die eine höhere Dämpfung innerhalb des Giessspiegelkreises bewirkt. Der Eingang des Parallelreglers ist die Kokillenfüllstandsabweichung. Die Zeitableitung der Abweichung wird differenziert und der Fuzzy-Struktur zugeschaltet. (Abbildung 3.4 b.)

Der Ausgang des Fuzzy-PD-Reglers wird mit dem des konventionellen PI-Reglers addiert. Eine Gewichtungsfaktor (Werte von 0 bis 100%) multipliziert den Ausgang des Fuzzy-Reglers und wird während der Optimierungsphase justiert.

Die Parallelschaltung des Reglers kann als additive Regelungsstruktur betrachtet werden, wobei der D-Anteil (Fuzzy-PD) nicht permanent aktiv ist.

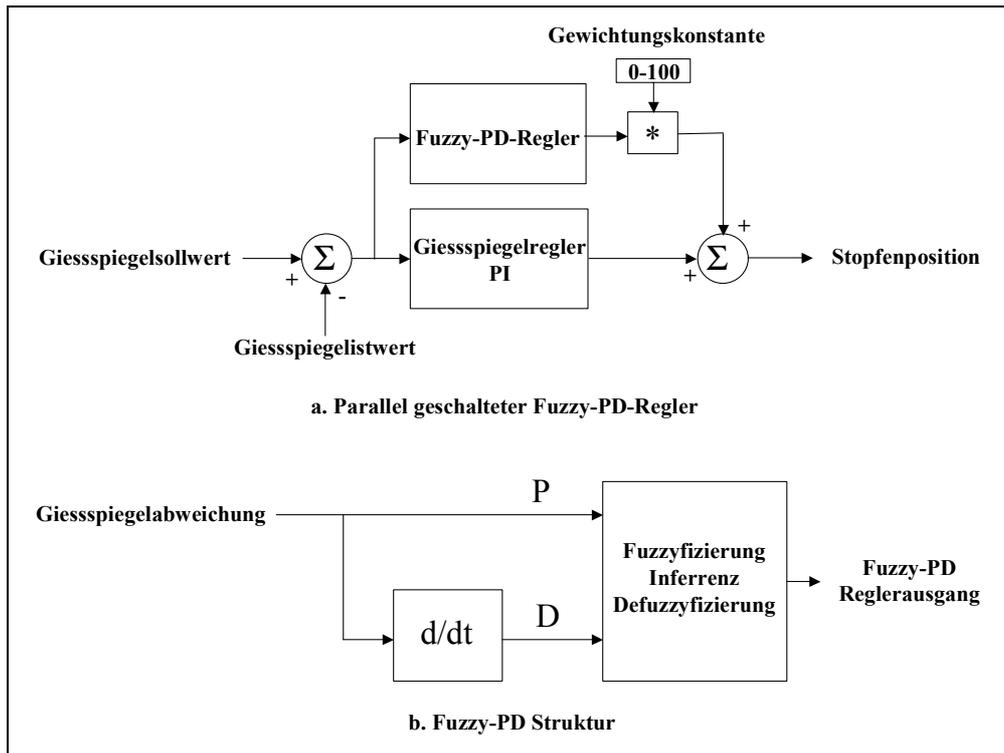


Abbildung 3.4 Parallel Fuzzy-PD geschalteter Regler

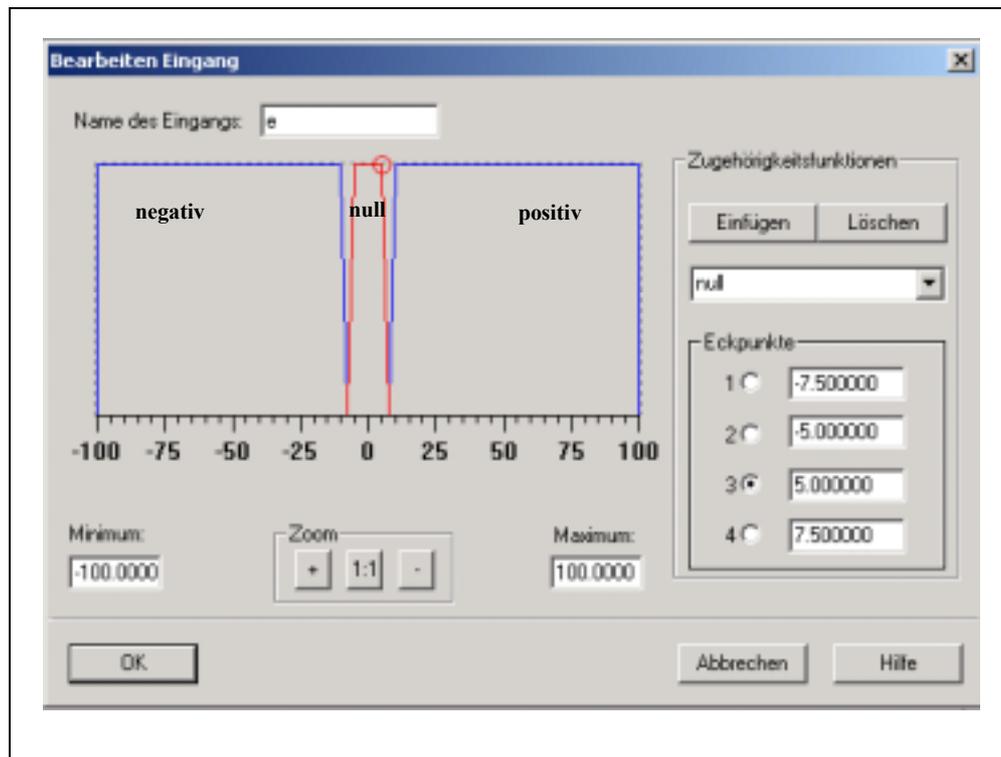


Abbildung 3.5 Zugehörigkeitsfunktionen der Regelabweichung des Parallel-Fuzzy-PD geschalteten Reglers

In Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 sind die Zugehörigkeitsfunktionen der Reglerabweichung e und dessen Zeitableitung \dot{e} mit den linguistischen Termen:

- für e (Abweichung)

negativ, null, positiv = Abweichung (in Prozenten) ist negativ, null bzw. positiv. Der Terme **null** definiert eine Zone, in der der Fuzzy-PD-Regler nicht aktiv und sein Ausgang null ist.

- für de/dt (Zeitableitung der Abweichung)

n_gross, n_klein = Ableitung (in Prozenten pro sec.) ist Negativ gross, Negativ klein, bzw.

null = Null,

p_gross, p_klein = Positiv gross, Positiv klein dargestellt.

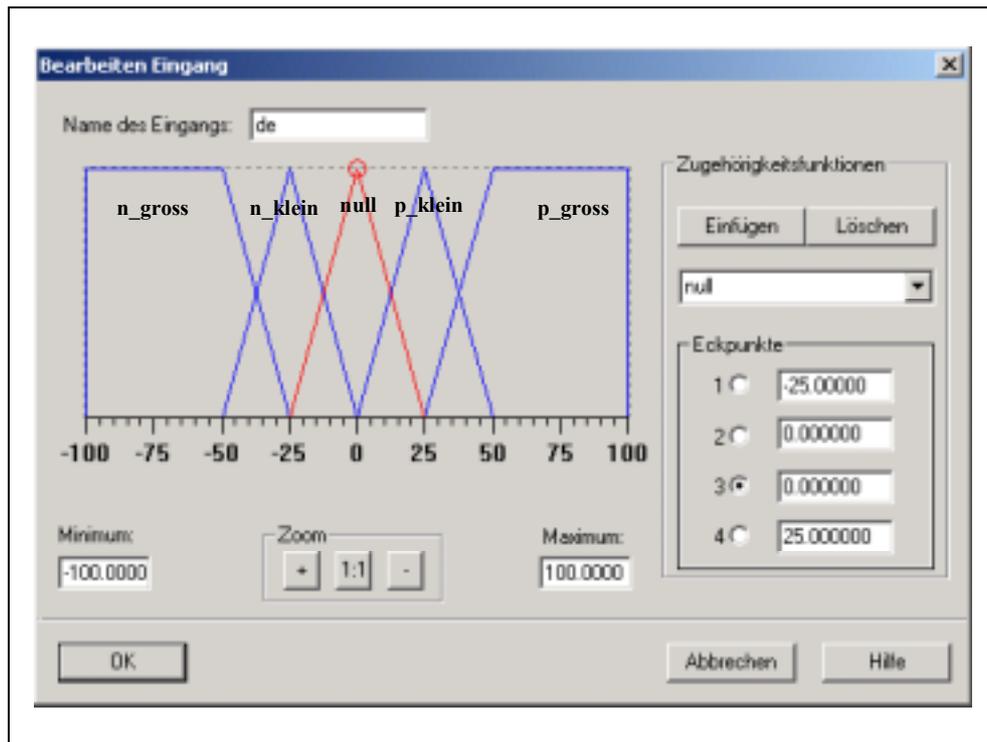


Abbildung 3.6 Zugehörigkeitsfunktionen der Zeitableitung der Regelabweichung des als Parallel-Fuzzy-PD geschalteten Reglers

In Abbildung 3.7 sind die Zugehörigkeitsfunktionen (Singelton) der Ausgangsgrößen des PI-Reglers dargestellt, mit den Linguistischen Termen:

n_gross, n_klein = Fuzzy-PD Ausgang ist Negativ gross, Negativ klein bzw.

null = Null,

p_gross, p_klein = Positiv gross, Positiv klein.

Der Wert des Gewichtungsfaktors (siehe Abbildung 3.4 a.) definiert die Stärke des Einflusses des Fuzzy-PD-Reglers auf den gesamten Regelkreis.

In Tabelle 3.2 ist die verwendete Regel-Basis als Matrixform dargestellt.

Ziel ist es, den D-Anteil nur dann zu aktivieren, wenn die Regeldifferenz eine zulässige Bandbreite überschreitet. Durch die Regel:

- Wenn Abweichung **null** dann Fuzzy-PD Ausgang **null** wird die Zuschaltungsbedingung des Fuzzy-Anteils bestimmt.

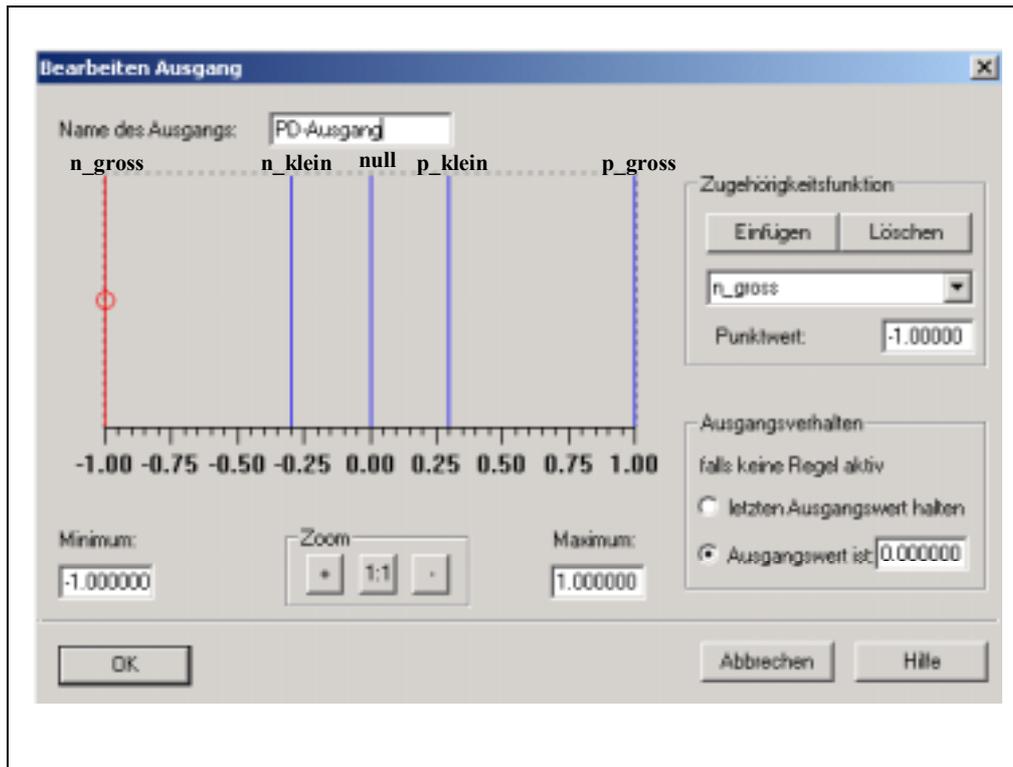


Abbildung 3.7 Zugehörigkeitsfunktionen des Ausgangs des als Parallel-Fuzzy-PD geschalteten Reglers

Die Tabelle 3.2 zeigt die Regel-Matrix zum Ermittlung der Ausgangs des Fuzzy-PI-Reglers.

e de	negativ	null	pozitiv
<i>n_gross</i>	<i>p_gross</i>	<i>null</i>	<i>n_klein</i>
<i>n_klein</i>	<i>p_gross</i>	<i>null</i>	<i>n_klein</i>
<i>null</i>	<i>p_gross</i>	<i>null</i>	<i>n_gross</i>
<i>p_klein</i>	<i>p_klein</i>	<i>null</i>	<i>n_gross</i>
<i>p_gross</i>	<i>p_klein</i>	<i>null</i>	<i>n_gross</i>

Tabelle 3.2: Regel-Matrix des Fuzzy-PD-Reglers

Die anderen Regeln definieren ein zusätzliches Auf- oder Zufahren der Sollwerte für den Stopfen, abhängig von einem schneller sinkendem oder steigendem Füllstand. Durch den Einsatz der Fuzzy-Komponente entsteht ein dreidimensionales, nichtlineares Kennfeld (siehe Abbildung 3.8) das sich mit Hilfe der verbal formulierten Regeln einfach modifizieren lässt.

Die in [32] und [33] beschriebenen Simulationsergebnisse zeigen ein besseres Verhältnis der Regelung bei schlagartigen Änderungen des Giessspiegels, da der I-Anteil eines konventionellen PI-Reglers zu träge ist.

Der Nachteil der beschriebenen Struktur ist, dass der Fuzzy-PD-Regler den Istwert zu schnell wieder in den Bereich der konventionellen Regelung zurückführt, da der I-Anteil der konventionellen Regelung zu träge ist und sich deshalb die Grösse wieder vom Sollwert entfernt. Dies hat ein Schwingen zur Folge, dass den Füllstand langsamer dem Sollwert nähert, als ohne Parallelanteil.

Ein Verbesserung der Einregelzeit ist durch eine niedrigere Integrationszeitkonstante des PI-Regler möglich. Die Verkleinerung des I-Anteils sollte realisiert werden, wenn der Fuzzy-PD-Regler aktiv ist.

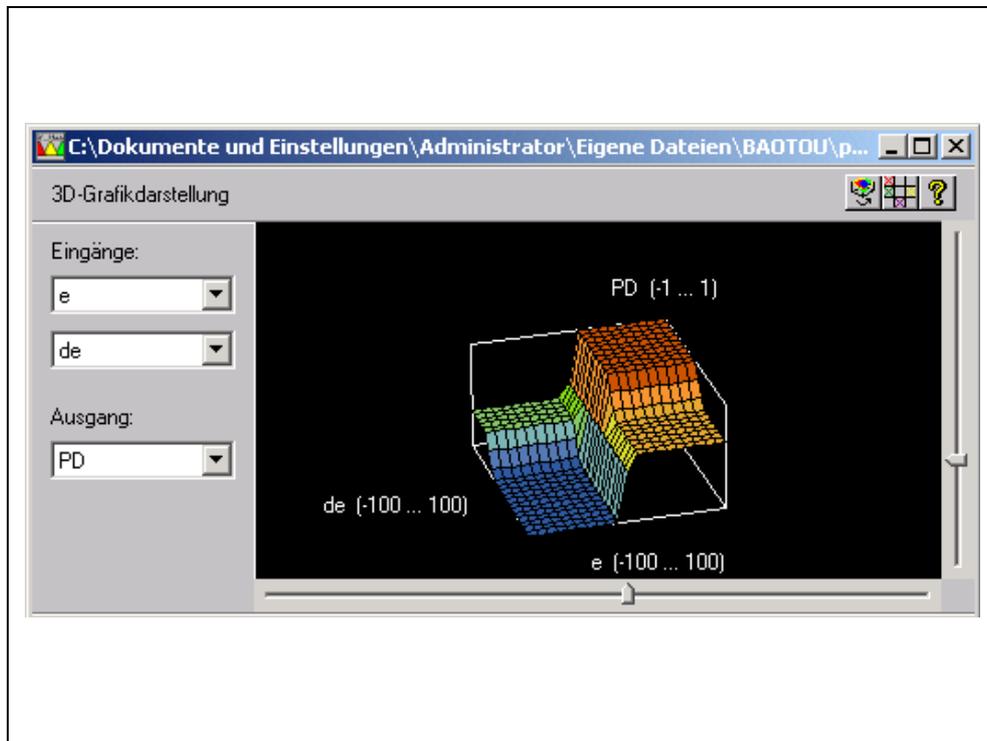


Abbildung 3.8 Kennfeld der Fuzzy-PD-Regler (Projektierungswerkzeug [58])

In der in [33] beschriebenen Untersuchung einer solchen Struktur wurde eine Kennlinie für die Änderung der Integrationszeitkonstante anstelle eines festen Wertes eingesetzt. Somit wurde ein einfacher Kompromiss zwischen einer zeitoptimalen und einer „ruhigen“ Regelung in stationärem Zustand erreicht.

Den Fuzzy-PD-Regler parallel geschaltet, bringt eine Verbesserung beim Ausregeln der Störungen, löst aber weiter nicht die Problematik der Abnutzungen und Ablagerungen.

In Abs. 3.3 wird ein adaptiver PID-Regler mit Fuzzy-Komponenten entworfen, in dem die Prozessvariablen wie Giessgeschwindigkeit und Stopfenposition nutzbare Informationen geben können, um die Prozessänderungen abzuschätzen und die Reglerparameter einzupassen.

3.3. PID-Regler mit Fuzzy Adaption

Der Regelkreis (siehe Abbildung 3.9) besteht aus einer Kaskadenregelung mit PID-Regler (Giessspiegel) und PD-Regler (Stopfenposition) [10], [21].

Der Ursprungs-Parametersatz des PID-Reglers wird dabei zunächst einer Datenbank entnommen und ist bereits an die Stahlmarke und das Format angepasst. Die Ausgangsgrösse des PID-Reglers wird an den unterlagerten Regelkreis mit PD-Regler weitergeleitet, der analog auf einer Karte zur Ansteuerung der Stopfenhydraulik realisiert ist.

Eine Störgrössenaufschaltung dient zur Kompensation veränderter Strangabzugsgeschwindigkeiten. Eine schnellere Störausregelung erfordert eine höhere Regelverstärkung, was wiederum der Forderung nach Robustheit des Regelkreises gegenüber einer erhöhten Stopfenabnutzung widerspricht und zu Stabilitätsproblemen führen kann. Die Strangabzugsgeschwindigkeit wird aus

technologischem Grund vom Bediener rampenförmig geändert. Die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit wird als zusätzliche Füllstandssollwertkorrektur geschaltet. Somit entsteht eine Regelabweichung. Durch den I – Anteil des Reglers wird der Positionssollwert des Stopfens zu dem neuen Arbeitspunkt geändert. Die Auswirkung der Kokillenoszillation auf den gemessenen Giessspiegel werden mittels eine Tschebyschew Sperr-Filter gedämpft. In der hier gewählten Regelungsstruktur (Abbildung 3.9) adaptiert der Fuzzy-Regler zusätzlich die Reglerverstärkung K_R des PID-Reglers.

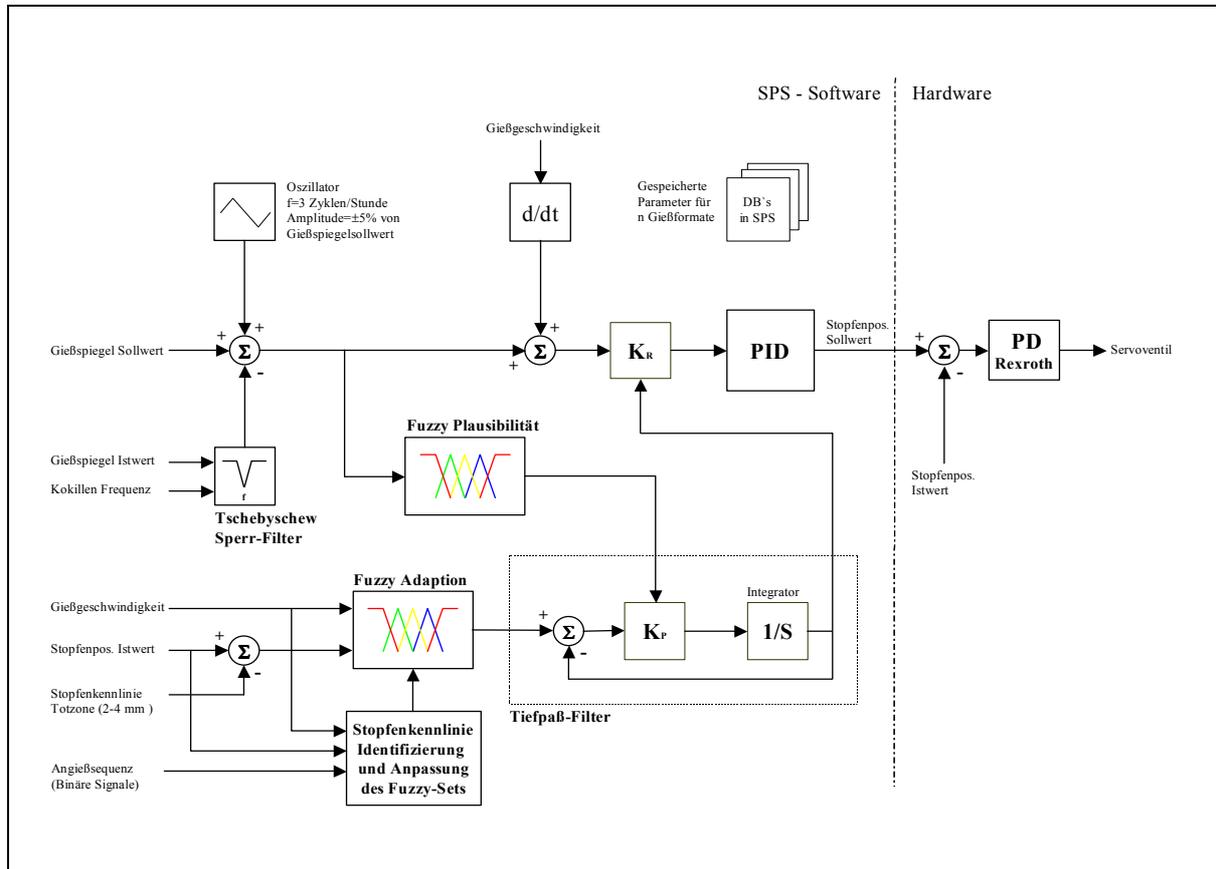


Abbildung 3.9: Modell der Giessspiegelregelung mit Fuzzy-Adaptionseinrichtung, Störgrössenaufschaltung und Tschebyschew-Filter

Die Hauptaufgabe besteht in der Erkennung der aktuellen Betriebssituation bezüglich der geschätzten Stopfenabnutzung. Diese Erkennung wird regelbasiert vorgenommen und liefert Informationen über notwendige Reglerparameter. Entscheidend für die praktische Akzeptanz des Fuzzy-Reglers ist die Tatsache, dass der vorhandene PID-Regler erhalten bleibt und alle aufgeführten Fuzzy-Komponenten modular aufgebaut werden. Die zeitvariante statische Kennlinie vom Sättigungscharakter kann sehr gut von einem einzelnen fuzzy adaptiven PID-Regler erfasst werden [64]. Damit besteht sowohl in der Inbetriebnahmephase als auch während des Normalbetriebes die Möglichkeit, die Anlage in verschiedenen Betriebsmodi (Hand / Automatik, mit Fuzzy-Komponenten, oder nur reine PID-Regler) zu betreiben. Dabei folgt der Entwurf einer in [9],[11] dargestellten Strategie. Die Abnutzung des Stopfens vollzieht sich langsam, in deren Folge sich die Kennlinie bei konstanter Strangabzugsgeschwindigkeit v mit einem entsprechenden Abzug h_{ab} in Richtung einer tieferen Stopfenposition verschiebt. Dieser Effekt ist durch Fuzzy-Regeln (siehe auch [10], [11], [17], [19]) wie:

1. WENN Stopfenposition extrem niedrig

(3.1)

- UND Abzugsgeschwindigkeit mittel
DANN Kennlinie steil (Kennlinie 3 in der Abbildung 2.10)
UND notwendige Reglerverstärkung niedrig
2. WENN Stopfenposition niedrig (3.2)
UND Abzugsgeschwindigkeit mittel
DANN Kennlinie normal (Kennlinie 1 in der Abbildung 2.10)
UND notwendige Reglerverstärkung normal zu beschreiben
3. WENN Stopfenposition extrem gross (3.3)
UND Abzugsgeschwindigkeit mittel
DANN Kennlinie flach (Kennlinie 2 in der Abbildung 2.10)
UND notwendige Reglerverstärkung gross
zu beschreiben

Entsprechend beschriebener Vorgehensweise können ebenso Ablagerungen (z.B. ein Stahlfilm auf dem Stopfen) erfasst werden. Die Auswertung von Stopfenposition und Strangabzugsgeschwindigkeit gibt ebenfalls indirekte Informationen über Viskositätsänderungen.

Die Regeln liefern nur Informationen über den Gleichgewichtszustand, wenn der Zufluss aus dem Verteilerwagen gleich der abgezogenen Stahlmenge ist. Anderenfalls beeinflussen dynamische Übergangsvorgänge die Beurteilung der Abnutzung. Es erfolgt eine zusätzliche Tiefpass-Filterung, wobei die Korrektur der Reglerverstärkung um so schneller erfolgt, je klarer die Prozesssituation als angeregt erkannt wird und keine Abweichungen vom Soll-Giessspiegel aufweisen (Fuzzy-Block Plausibilität).

In der Abbildung 3.10: ist der Prinzipielle Aufbau einer Giessspiegelregelung mit Fuzzy-Adaptionseinrichtung dargestellt.

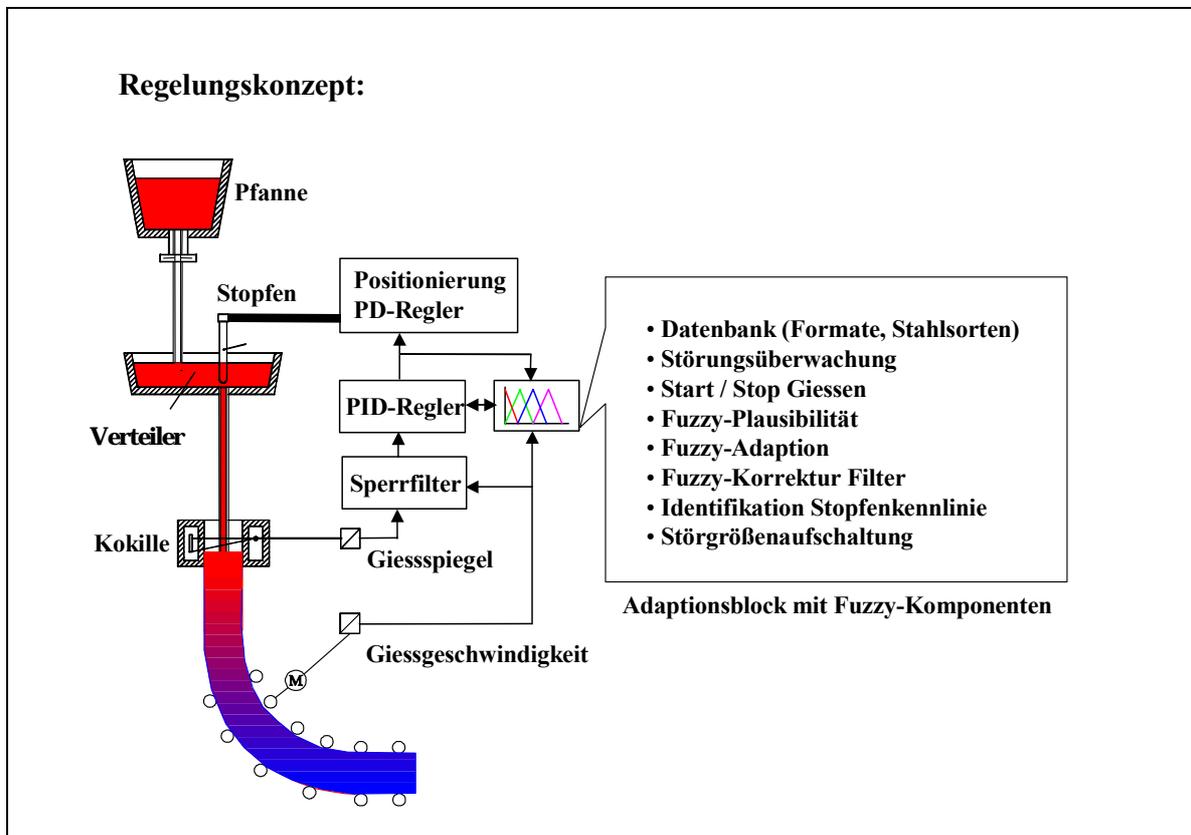


Abbildung 3.10: Prinzipieller Aufbau einer Giessspiegelregelung mit Fuzzy-Adaptionseinrichtung

In dem folgenden Abschnitt werden die einzelnen Komponenten und Funktionen der entworfenen Regelungskonzepte.

3.3.1. Fuzzy – Block Adaption

Die Fuzzy-Block Adaption dient zur Abnutzungserkennung des Stopfens während des Giessens und wird nachfolgend beschrieben und ermittelt.

Die Eingänge der Fuzzy-Block Adaption sind die Stopfenposition und die Giessgeschwindigkeit. Der Ausgang der Fuzzy-Block Adaption ist der Korrekturfaktor.

Die Variable und Terme der Fuzzy – Block Adaption sind:

- linguistische Variable:

SP = Stopfenposition

V = Giessgeschwindigkeit

KR = Fuzzy Korrekturfaktor $K_R(t)$ vor den Filter

- linguistische Terme:

1. Stopfen Position

e_klein, s_klein, klein, mittel, gross, s_gross, e_gross = Stopfenposition ist extrem klein, sehr klein, klein, mittel, gross, sehr gross bzw. extrem gross

2. Giessgeschwindigkeit

s_langs, langs, mittel, schnell, s_schnell = Giessgeschwindigkeit ist sehr langsam, langsam, mittel, schnell bzw. sehr schnell

3. Stopfenkennlinie

steil, mittel, flach = Stopfenkennlinie ist steil, mittel bzw. flach

4. Korrekturfaktor

klein, mittel, gross = Korrekturfaktor wird klein, mittel bzw. gross

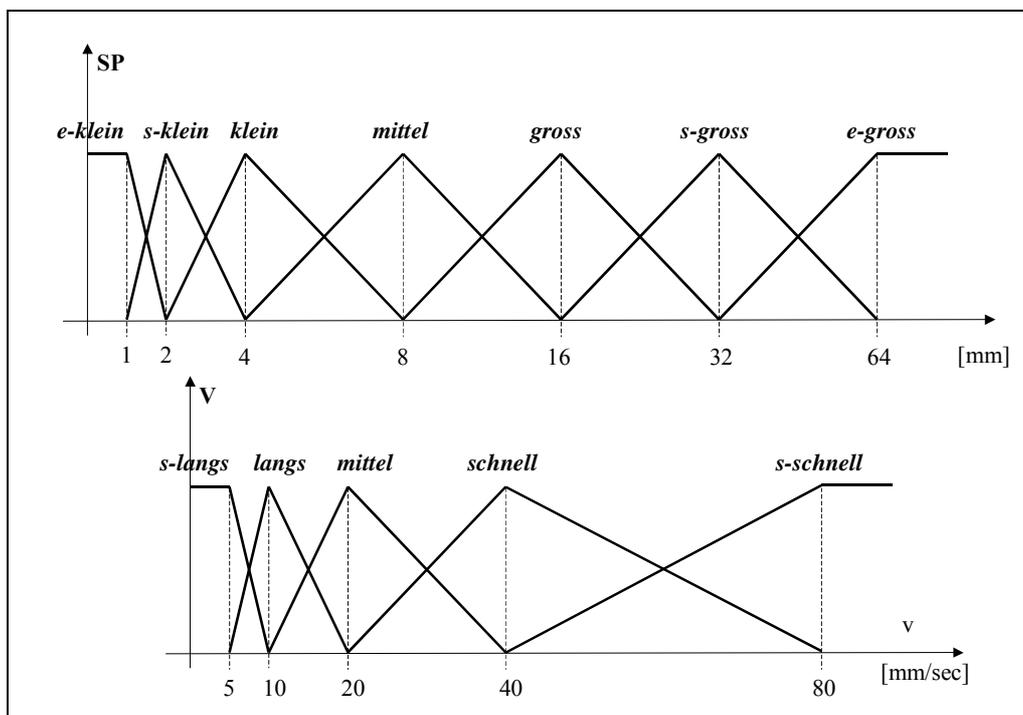


Abbildung 3.11: Zugehörigkeitsfunktionen der Stopfenposition und der Giessgeschwindigkeit

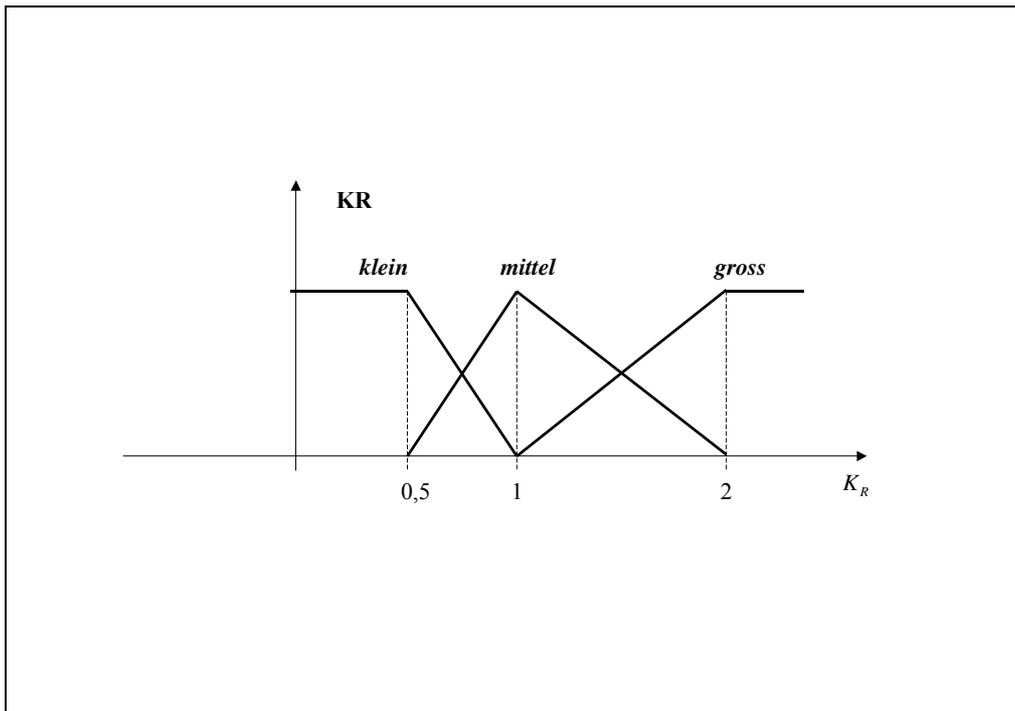


Abbildung 3.12: Zugehörigkeitsfunktionen des Korrekturfaktors

Die entworfene Strategie (Regeln (3.1) bis (3.3)) wird in der Regelbasis (siehe Tabelle 3.3) umgesetzt.

V SP	<i>s_langs</i>	<i>langs</i>	<i>mittel</i>	<i>schnell</i>	<i>s-schnell</i>
<i>e_klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>
<i>s_klein</i>	<i>mittel/mittel</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>
<i>klein</i>	<i>flach/gross</i>	<i>mittel/mittel</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>
<i>mittel</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>mittel/mittel</i>	<i>steil/klein</i>	<i>steil/klein</i>
<i>gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>mittel/mittel</i>	<i>steil/klein</i>
<i>s_gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>mittel/mittel</i>
<i>e_gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>	<i>flach/gross</i>

Tabelle 3.3: Regelbasis zur Ermittlung des Anstieges der Stopfenkennlinie und der notwendigen Reglerverstärkung

Mit diesen Situationseinschätzungen können nun direkte Rückschlüsse auf die notwendige PID- Reglerverstärkung (je stärker der Anstieg der Stopfenkennlinie, desto geringer die Reglerverstärkung) und die Plausibilität dieser Aussage (je besser die Situation als angeregelt einzustufen ist, desto plausibler die Aussage) gezogen werden.

Der Ausgang des so definierte Fuzzy-Blocks, der Fuzzykorrektur $K_R(t)$, wird durch ein Tiefpassfilter (zeitvariantes PT1- Verhalten) gefiltert.

Die zeitkonstantenveränderliche Tiefpass beruht auf der Differentialgleichung [11]:

$$\frac{d\bar{K}_R(t)}{dt} = \frac{K_R(t) - \bar{K}_R(t)}{\tau(t)} \quad (3.4)$$

aus der

$$\bar{K}_R(t) = \int \frac{1}{\tau(t)} [K_R(t) - \bar{K}_R] dt \quad (3.5)$$

resultiert.

In der Gleichungen (3.4) und (3.5) bedueten:

$K_R(t)$ den ungefilterten Korekturfaktor

$\bar{K}_R(t)$ den gefilterten Korekturfaktor

$\tau(t)$ die zeitveränderliche Filterzeitkonstante

Der gefilterten Korekturfaktor multipliziert sich mit den Reglerverstärkung des PID-Reglers, um die erkannten Änderungen der Stopfenkennlinie zu kompensieren. Wie schnell die Korrektur erfolgt ist von der Zeizkonstante der Tiefpassfilter abhängig. In der nächste Abschnitt wird der Fuzzy-Block Plausibilität beschrieben, der die Ermittlung der Filterzeitkonstanten realisiert.

3.3.2. Fuzzy – Block Plausibilität

Vom Zustand Giesssspiegel angeregelt wird gesprochen, wenn die Giesssspiegelregeldifferenz sowie deren zeitliche Ableitung gleichzeitig annähernd Null betragen.

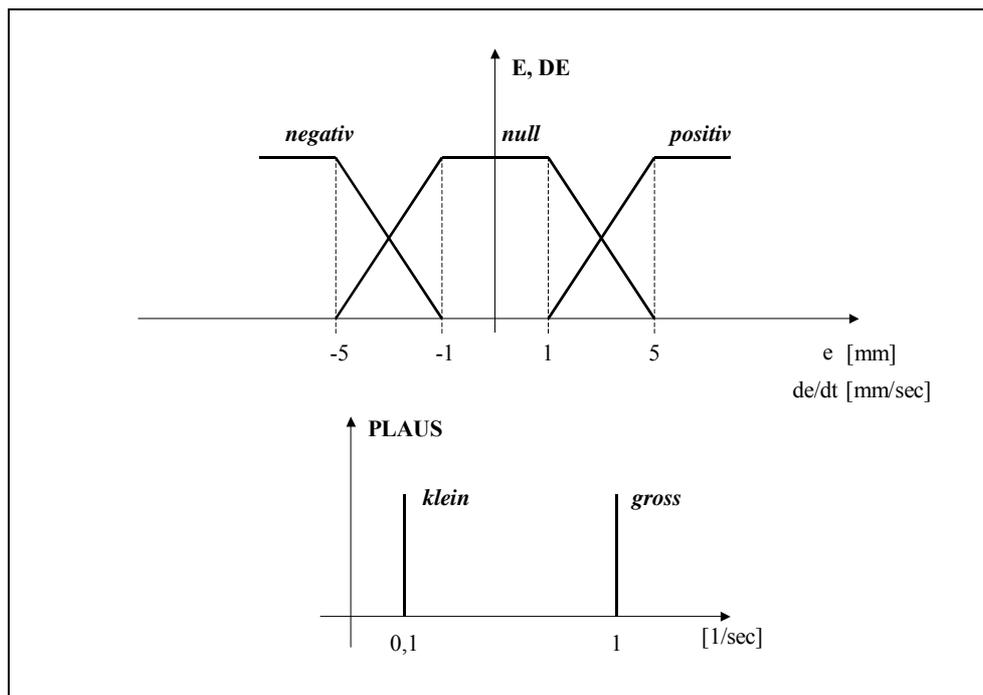


Abbildung 3.13: Zugehörigkeitsfunktionen der Regelabweichung, der zeitlichen Ableitung der Regelabweichung und der Plausibilität

Nur dann dürfen Aussagen über den Verschleissgrad des Stopfens Gültigkeit erlangen. Wenn die Regeldifferenz oder ihre Ableitung negativ oder positiv sind, ist der Giesssspiegel als nicht angeregelt zu betrachten und dynamische Übergangsvorgaben beeinflussen die Beurteilung der Abnutzung.

Der Ausgang der Fuzzy-Block Plausibilität ändert die Zeitkonstante des Tiefpass-Filters. Je kleiner die Abweichungen vom Soll-Giesssspiegel sind desto kleiner die Zeitkonstante des Filters gesetzt wird und desto schneller erfolgt die Korrektur der Reglerverstärkung des PID-Reglers.

Die Variable und Terme der Fuzzy – Block Plausibilität sind:

- linguistische Variable:

E = Regelabweichung

DE = zeitlichen Ableitung der Regelabweichung

PLAUS = Plausibilität

- linguistische Terme:

negativ, null, positiv = Abweichung ist negativ, null, bzw. positiv

ang, n_ang = Zustand Giessspiegel angeregt bzw. nicht angeregt

gross, klein = Plausibilität ist gross bzw. Plausibilität klein

lang, kurz = Filter Zeitkonstante soll gross bzw. klein

E DE	negativ	null	positiv
negativ	n_ang/ klein/lang	n_ang/klein/lang	n_ang/klein/lang
null	n_ang/klein/lang	ang/gross/kurz	n_ang/klein/lang
positiv	n_ang/klein/lang	n_ang/klein/lang	n_ang/klein/lang

Tabelle 3.4: Regelbasis zur Ermittlung der Plausibilität der ermittelten Stopfenkennlinie und der Filterzeitkonstante

Die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistische Terme **E= null**, und **DE= null** ist für die Wirkung des unscharfen Fensters von entscheidender Bedeutung.

Eine zu schmale Definition birgt die Gefahr, dass bei starken Störungen die Prozesssituation nie als angeregt erkannt werden kann und damit die Adaption unwirksam bleibt. Andersfalls werden bei einer zu breiten Definition dieser Zugehörigkeitsfunktionen auch dynamische Übergänge in die Bewertung der statischen Kennlinie einbezogen, was zu einer Verfälschung der Klassifikationsergebnisse führt [11].

Die Verknüpfung der beiden defuzzifizierten Ausgangsgrößen muss nun so erfolgen, dass ein langsames Überblenden der aktuellen Reglerverstärkung in die neu ermittelte mit einer von der Plausibilität abhängigen Zeitkonstante erfolgt. Dabei muss die Korrektur der Reglerverstärkung um so schneller erfolgen, je klarer die Prozesssituation als angeregt erkannt wird. Die kleinste einstellbare Korrekturzeitkonstante muss jedoch aus Stabilitätsgründen hinreichend gross gegenüber der grössten Zeitkonstante des Basisregelkreises sein.

Das in der Abs. 3.3 dargestellte Regelungskonzept wurde ausführlich in [11] beschrieben, untersucht und simulativ erprobt. Weiter in [10], [17], [19], [21], [43], [44] sind praktische Ergebnisse und Ergänzungen des Konzeptes nach Implementierungen in verschiedenen industriellen Anlagen beschrieben.

Ein der in [11] und [44] dargestellten Simulationsbeispiele ist in Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15 gezeigt. Die zwei Abbildungen als Vergleich zwischen das Fuzzy-adaptierten PI-Regler und den PI-Regler mit festen Parametern zeigen das Ausregeln von Störungen bei abgenutztem Stopfen. Die simulierten Störungen sind die häufigsten Fälle im Giessprozess:

Situation 1: positiver Störung als Ergebnis einer plötzlichen Ablösung von Tonerde

Situation 2: negative Störung als Ergebnis einer plötzlichen Verstopfung durch Tonerde

Situation 3: Verlauf nach einer Änderung der Strangabzugsgeschwindigkeit und Teilkompensation durch Störgrössenaufschaltung.

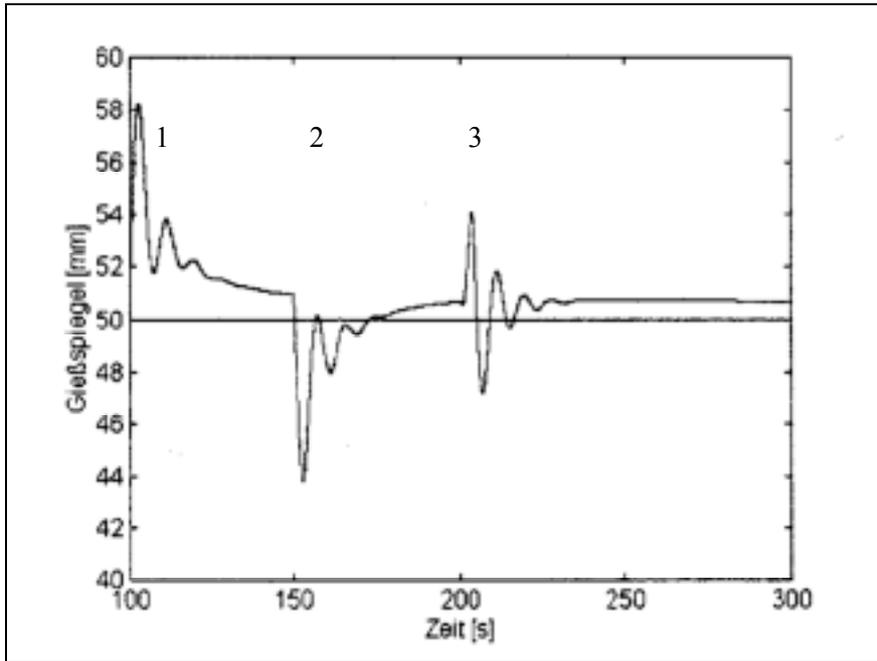


Abbildung 3.14: Ausregeln von Störungen bei abgenutztem Stopfen, Fuzzy-adaptiver PI-Regler

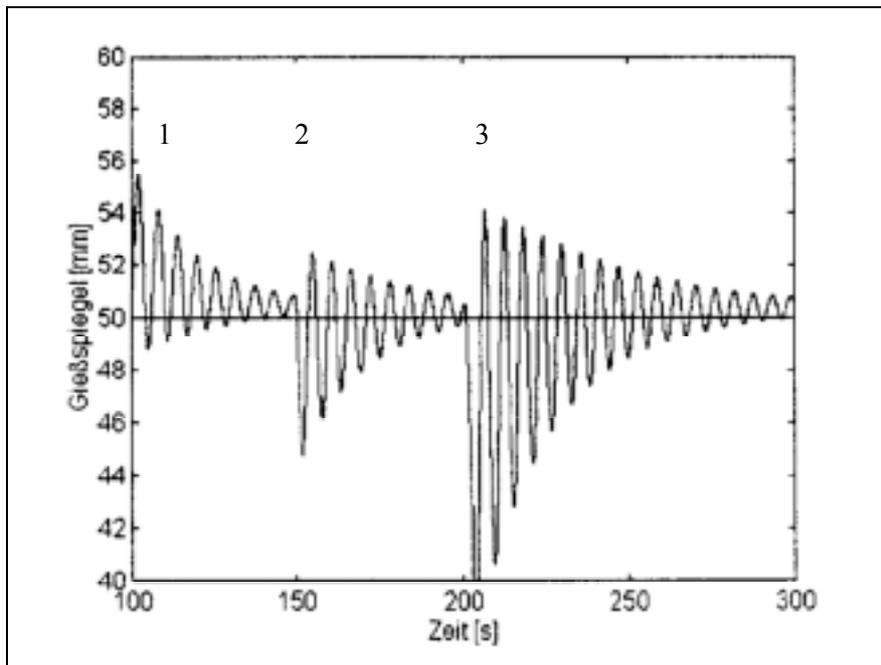


Abbildung 3.15: Ausregeln von Störungen bei abgenutztem Stopfen, nichtadaptiver PI-Regler

Die eingestellte Reglerverstärkung des PI-Reglers mit festen Parametern ist nicht an den Arbeitspunkt für die Stopfenabnutzung angepasst und führt daher zu starkem Überschwingungen und unruhigen Stellverläufen. Das obige Simulationsbeispiel zeigt die Fähigkeiten der Fuzzy-Komponente einer ständig fortschreitenden Stopfenabnutzung zu folgen und dabei eine ausreichende Regelqualität auch bei starken Störungen zu gewährleisten.

3.4. Digitaler Filter für Kokillenoszillationsstörungen

Die Auswirkung der Kokillenoszillation auf den gemessenen Giessspiegel ist ein überlagertes, periodisches Störsignal, sinusförmig, dessen Amplitude von ± 2 bis ± 5 mm vom Kokillenhub abhängig ist. Die Frequenz des Störsignals ist direkt proportional mit der Giessgeschwindigkeit und liegt in einen Bereich von 30 bis 250 Hüben / min entsprechend 0,5 bis 4,16 Hz (siehe 2.1.2.4, und Abbildung 2.3). Der gemessene Giessspiegel wird über ein Sperrbandfilter so gefiltert (Abbildung 3.9), dass die Auswirkungen der Kokillenoszillation gedämpft werden [19], [21]. Da diese Frequenz von der Giessgeschwindigkeit abhängt, erfolgt on-line eine Modifikation der Filterparameter über Interpolationsgleichungen. Die Aufgabe des digitalen (Abtastzeit T_A) in die SPS implementierten Filters ist es, die Schwingungen mit einer variablen Kreisfrequenz ω_F , einer zugehörigen Frequenz f_F und einer Periodendauer der Schwingung T_F so gut wie möglich zu dämpfen. Alle anderen Signale werden mit einer Verstärkung von „Eins“ ohne Phasendrehung durchgelassen.

Die diskrete Form der Übertragungsfunktion des Tschebyschew-Typ I Sperrband Filters ist [12], [34], [36]:

$$G(z) = \frac{Y_F(z)}{Y(z)} = \frac{b_2(\omega_F) \cdot z^2 + b_1(\omega_F) \cdot z + b_0(\omega_F)}{z^2 + a_1(\omega_F) \cdot z + a_0(\omega_F)} \quad (3.6)$$

mit:

$Y_F(z)$ der filtrierte Giessspiegel Istwert, z-Transformierte

$Y(z)$ der gemessene Giessspiegel, z-Transformierte

Durch Rücktransformation wird daraus eine Rekursionsgleichung:

(3.7)

$$y_F(k) = -a_1(\omega_F) \cdot y_F(k-1) - a_0(\omega_F) \cdot y_F(k-2) + b_2(\omega_F) \cdot y(k) + b_1(\omega_F) \cdot y(k-1) + b_0(\omega_F) \cdot y(k-2)$$

Wobei

$$y_F(k), y_F(k-1), y_F(k-2)$$

$$y(k), y(k-1), y(k-2)$$

die filtrierten und die gemessenen Werte an $k, k-1, k-2$ Abtastzeiten sind.

Die Berechnungen der Parameter für die diskrete Form der Filter wurden mit Hilfe von MATLAB Programmen nach folgenden Entwurfsschritten durchgeführt [60]:

- A. Filter-Berechnungen für Bandpässe mit unterschiedlichen Sperrfrequenzen ω_F liefern Zähler- und Nennerpolynom für die jeweilige Frequenz, also a_i - und b_i -Faktoren unter Berücksichtigung der Abtastzeit T_A . Die Schärfe der Filter (Breite der Bandsperre im Frequenzbereich) kann unterschiedlich eingestellt werden.

- B. Kubische Interpolationen der a_i - und b_i -Werte zur Erzeugung der analytischen Beschreibung; daraus resultieren α - und β -Werte zur stufenlosen Berechnung der Filter.

On-line

- C. Aus α - und β -Werten werden a_i - und b_i -Filterkoeffizienten berechnet. (a_i - und b_i - werden nun zum aktuellen Kokillenhub angepasst)
- D. Differenzgleichung (Gleichung (3.7)) wird ausgeführt, so dass der filtrierte Giessspiegel entsteht.

Nach den obigen Entwurfsschritten folgenden Formeln werden für die Parameterberechnung verwendet [12]:

$$a_1(\omega_F) = \alpha_{13} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^3 + \alpha_{12} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^2 + \alpha_{11} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right) + \alpha_{10} \quad (3.8)$$

$$a_2(\omega_F) = \alpha_{23} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^3 + \alpha_{22} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^2 + \alpha_{21} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right) + \alpha_{20} \quad (3.9)$$

$$b_0(\omega_F) = \beta_{03} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^3 + \beta_{02} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^2 + \beta_{01} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right) + \beta_{00} \quad (3.10)$$

$$b_1(\omega_F) = \beta_{13} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^3 + \beta_{12} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^2 + \beta_{11} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right) + \beta_{10} \quad (3.11)$$

$$b_2(\omega_F) = \beta_{23} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^3 + \beta_{22} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right)^2 + \beta_{21} \left(\frac{\omega_F}{\omega_G} \right) + \beta_{20} \quad (3.12)$$

Das Verhältnis $\frac{\omega_F}{\omega_G}$ wurde aus numerischen Gründen gewählt, da sonst die Parameter extrem klein werden.

Anstelle dieses Verhältnisses kann auch $\frac{T_A}{2T_F}$ berechnet werden, es folgt das gleiche Resultat.

Dabei gilt (für eine Abtastzeit $T_A = 0,01$):

$$a_1(\omega_F) = b_1(\omega_F) \quad (3.13)$$

$$a_0(\omega_F) = 2b_0(\omega_F) - 1 \quad (3.14)$$

Die Grenzfrequenz des Filter $\omega_G = \frac{2\pi}{2T_A} = 314,2 \text{ rad/s}$ entspricht $f_G = 50 \text{ Hz}$

für eine zu dämpfende Frequenz $f_F = 5 \text{ Hz}$, $T_F = 0,2 \text{ s}$, $\omega_F = 31,42 \text{ rad/s}$

ergibt sich $\frac{\omega_F}{\omega_G} = \frac{31,42}{314,2} = \frac{2T_A}{T_F} = 0,1$

Folgende Parameter ergeben sich nach der Filter Berechnung mit MATLAB:

a_2	0 / 0	0 / 0	0 / 0	1,0000 / 1,0000
a_1	-5,8291 / -7,7912	9,8074 / 11,8735	0,5427 / -0,0089	-1,9974 / -1,9951
a_0	-0.1837 / -0.0081	0,1965 / 0,0235	-0,6566 / -0,2194	1,0000 / 1,0000

Tabelle 3.5: Parameter alpha für eine Dämpfung von 0,7 bis 1,3 –fachem (Normalschrift) der Sperrfrequenz und für eine Dämpfung von 0,9 bis 1,1 –fachem (Fett) der Sperrfrequenz

b_2	-0,0919 / -0,0041	0.0983 / 0.0118	-0,3283 / -0,1097	1,0000 / 1,0000
b_1	-5,8291 / -7,7912	9,8074 / 11,8735	0,5427 / -0,0089	-1,9974 / -1,9951
b_0	-0,0919 / -0,0041	0.0983 / 0.0118	-0,3283 / -0,1097	1,0000 / 1,0000

Tabelle 3.6: Parameter alpha für eine Dämpfung von 0,7 bis 1,3 –fachem (Normalschrift) der Sperrfrequenz und für eine Dämpfung von 0,9 bis 1,1 –fachem (Fett) der Sperrfrequenz

Mit diesen Parametern sind die Amplitudendämpfung und die Phasenkenlinien im Frequenzbereich wie folgt:

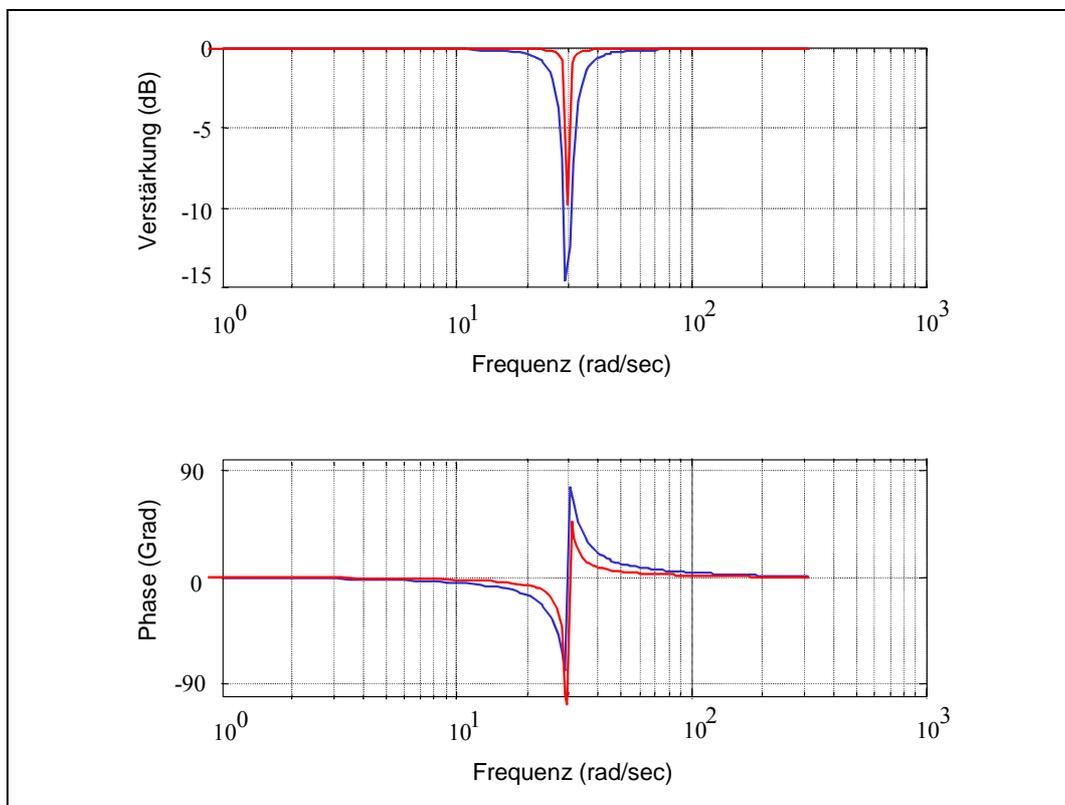


Abbildung 3.16: Amplitudendämpfung und Phasenkenlinie im Frequenzbereich für eine Dämpfung von 0,7 bis 1,3–fachem (blau) und von 0,9 bis 1,1 –fachem (Rot) der Sperrfrequenz

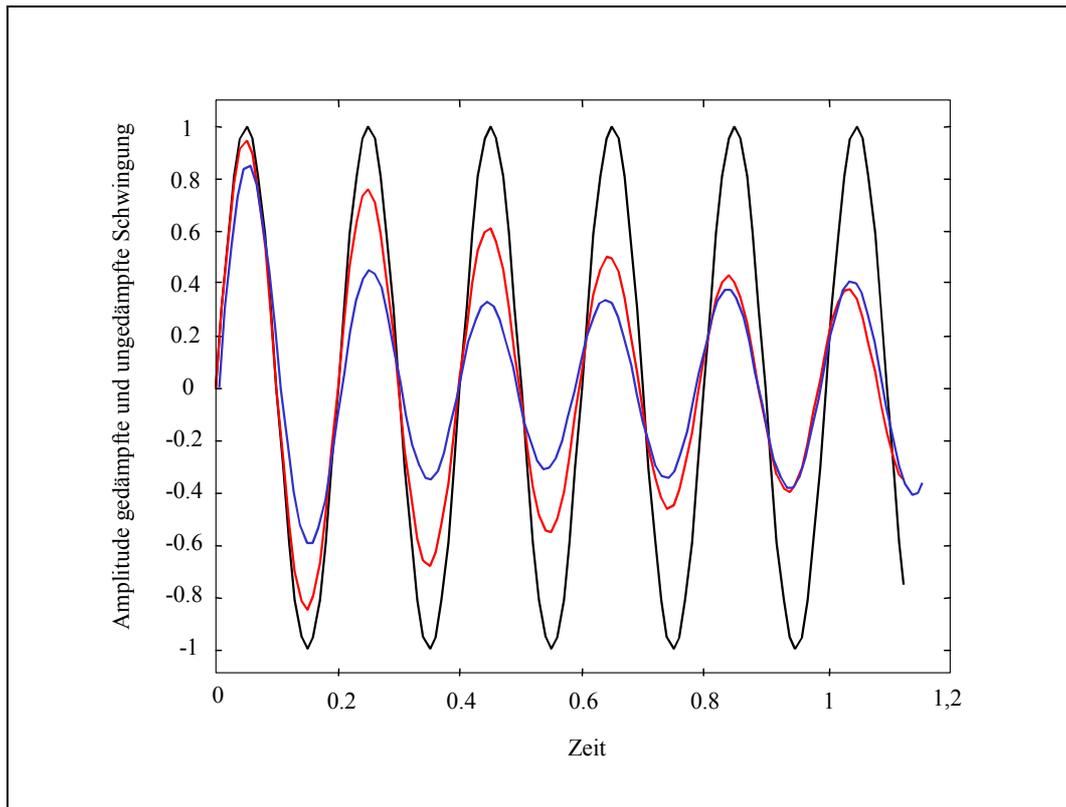


Abbildung 3.17: Amplitudenungedämpfte Schwingung (Schwarz) und gedämpfte für eine Dämpfung von 0,7 bis 1,3 -fachem (Blau) und für eine Dämpfung von 0,9 bis 1,1 -fachem (Rot) der Sperrfrequenz

Nach der On-line-Implementierung der Parameter wurden nach der Imbetriebnahme für eine Abtastzeit von 50 msec, wie in Tabelle 3.7 dargestellt, wie folgt berechnet:

b_2	-0,0042	0.0118	-0,1097	1,0000
b_1	-7,2289	11,570	-0,0167	-1,9936
b_0	-0,0042	0.0118	-0,1097	1,0000

Tabelle 3.7: Parameter beta für $T_A = 50$ msec und Dämpfung 0,9 bis 1,1- fachem der Sperrfrequenz

Für ein Abtastzeit $T_A = 50$ msec und aus dem Einsetzen von $2T_A$ in

$\frac{T_A}{2T_F} = 2T_A \cdot f_F = 2T_A \cdot f_{osz}$, resultiert die folgende Implementierungs Formel:

$$b_0(f_{osz}) = -4,1688 \cdot 10^{-6} \cdot f_{osz}^3 + 1,1812 \cdot 10^{-4} \cdot f_{osz}^2 - 1,0971 \cdot 10^{-2} \cdot f_{osz} + 1 \quad (3.15)$$

$$b_1(f_{osz}) = -7,2289 \cdot 10^{-3} \cdot f_{osz}^3 + 1,1570 \cdot 10^{-1} \cdot f_{osz}^2 + 1,6687 \cdot 10^{-3} \cdot f_{osz} - 1,9936 \quad (3.16)$$

$$b_2(f_{osz}) = b_0(f_{osz}) \quad (3.17)$$

$$a_0(f_{osz}) = 2b_0(f_{osz}) - 1 \quad (3.18)$$

$$a_1(f_{osz}) = b_1(f_{osz}) \quad (3.19)$$

$$(3.20)$$

$$y_F(k) = -a_1(f_{osz}) \cdot y_F(k-1) - a_0(f_{osz}) \cdot y_F(k-2) + b_2(f_{osz}) \cdot y(k) + b_1(f_{osz}) \cdot y(k-1) + b_0(f_{osz}) \cdot y(k-2)$$

In der SPS wird der Filter nach folgender Struktur programmiert, so dass der Rechenaufwand deutlich absinkt:

- A. Giessgeschwindigkeit Sollwert lesen und f_{osz} berechnen (mit der Kennlinie von Abbildung 2.3)
- B. Aktuellen Giessspiegelwert lesen und speichern (Abtastzeiten $k, k-1, k-2$)
- C. Parameter b_0, b_1, b_2, a_0 , und a_1 nach den Gleichungen (3.15) bis (3.19) berechnen.
- D. Der filtrierte Wert nach den Gleichung (3.20) berechnen und speichern (Abtastzeiten $k, k-1, k-2$)

Die so gefundene Lösung wurde in eine SIMATIC S5 und S7 und ADVANT 450 implementiert nach der erfolgreichen Erprobung der S5-Variante in Baotou. Für zukünftige Realisierungen ist allerdings die Schärfe der Filter im Bereich der Sperrfrequenz zu reduzieren, da die Frequenz der Kokillenoszillation nicht genau eingestellt wird und zu selektive Filter eine zu geringe Dämpfung dieser Störsignale bewirken.

4. Integration der Steuerungen und Regelungen in Prozessleitsysteme

Die Integration der Steuerungen und Regelungen in Prozessleitsysteme ermöglicht die effektive Beherrschung komplexer Anlagen. Sie minimiert eine unkontrollierte Bearbeitung von Störungen und ermöglicht eine nahezu 100%- tige Produktionsbereitschaft für die Herstellung von Produkten in kontinuierlich laufenden Anlagen. Gleichzeitig fordert sie den Ingenieur zur Erbringung neuer Lösungen und zum ganzheitlichem Denken auf.

Im Weiteren soll die Integration der in Kapitel 3 vorgestellten Algorithmen zur Giesspiegelregelung in verschiedene Prozessleitsysteme gezeigt werden.

4.1. Hierarchie und Anordnung der Module in Prozessleitsystemen

Die Basisautomatisierung besteht aus folgenden Systemen:

- Prozess-Leit-System (PLS)
- Prozess-Bus (PB)
- Prozess-Steuerungs-Stationen (PSS)

In der Abbildung 4.1 ist eine Leitsystem Konfiguration gezeigt. Oberhalb des Prozess-Busses befinden sich der Prozess-Leit-System Rechner als Kern des Bedien- und Beobachtungssystems.

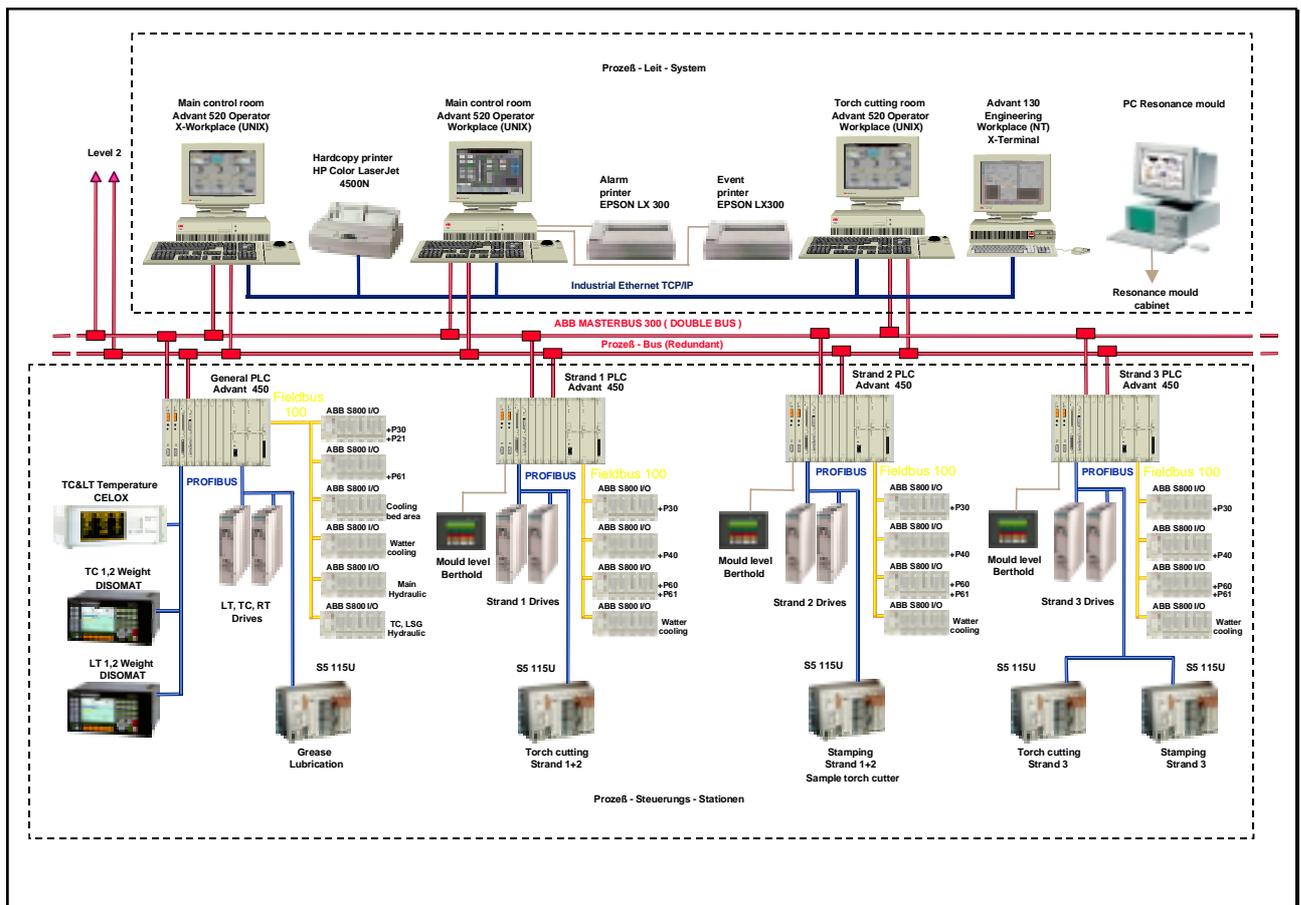


Abbildung 4.1: Leitsystem Konfiguration, 3 x Stranggiessanlage
Yieh United Taiwan, ABB Advant

Die drei dargestellten Bedienstationen sind Hardware und Software identisch ausgestattet und erhalten durch die Anbindung an den Prozess-Bus die gleichen Prozess-Informationen. Die gleichberechtigten Stationen gewährleisten die Redundanz des Bedien- und Beobachtungssystems.

Unterhalb des Prozess-Busses sind die Prozess-Steuerungs-Stationen angebunden. Die vier PSS sind an die Anlagekonfiguration angepasst. Die erste enthält Programme und Funktionen für den allgemeinen Teil der Anlage. Die weiteren drei sind für drei Stränge verantwortlich. In der Abbildung 4.1 sind die Messeinrichtungen, die Antriebe und die dezentralen Peripherien über die Feldbuskommunikation an die PSS angebunden.

Die wichtigsten durchzuführenden Aufgaben sind die Beobachtung, Überwachung und Regelung der Prozessgrößen sowie die Realisierung von Ablaufsteuerungen und Verriegelungen. Prozessdaten werden gespeichert und archiviert.

Alle Geber, Sensoren, Messstellen und Regelungsgeräte sind über Ein-/Ausgabe-Baugruppen an einzelne PSS angeschlossen. Jede auf dem Markt für diese Anlage verfügbare Schnittstelle muss verarbeitet werden können.

Die Bedienung und Beobachtung des Prozesses bzw. der kompletten Anlage erfolgt zentral durch Bildschirm-Bedienstationen.

Die Art der Darstellung, Signalverarbeitung und die Funktionen (z. B. Anzahl der Regelkreise pro CPU) sowie die Handhabung der Systeme sind jedoch unterschiedlich und hängen im Wesentlichen vom ausgewählten Fabrikat ab. Grundsätzlich ist aber allen Systemen gemeinsam, dass analoge Informationen digitalisiert werden und mittels Mikroprozessor-Technik die notwendigen Funktionen abgearbeitet werden. Ebenfalls gemeinsam ist die Benutzung von Monitoren (Bildschirmen) als Darstellungsmedium und der Prozesszugriff über Bedienungstastaturen.

Prozess-Leit-System (PLS)

Die zentrale Beobachtung, Überwachung und Bedienung des Stranggiessprozesses wird durchgeführt mittels:

- Farbmonitoren
- Bedienungstastaturen
- Alarm- und Ereignis-Drucken
- Farbgrafik-Drucken

Die Geräte sind im Stranggiess-Leitstand auf der Giessbühne aufgestellt.

Prozess-Bus

Für die Kommunikation zwischen den Komponenten des Beobachtungs- und Bedienungssystems und der untergeordneten Steuerungen der Anlagenleitebene sorgt ein als Lichtwellenleiter ausgeführtes Industrial Ethernet. Die Konzeption als Lichtwellenleiter bietet folgende Vorteile[20]:

- grosse Reichweite
- galvanische Trennung
- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen

Der Prozessbus trennt die Übertragungsfunktionen vom übrigen System und ermöglicht, das Netzwerk frei zu erweitern ohne Auswirkungen auf die Anwenderprogramme in den Prozessstationen.

Der Informationsaustausch zwischen einzelnen Prozessstationen erfolgt mittels Datensätzen, die Meldungen aus ihren Datenbanken enthalten. Die Datensätze werden in den kommunizierenden Prozessstationen bei der Anwendungsprogrammierung festgelegt. Der Ablauf der Übertragung auf dem Prozessbus erfolgt auf mehreren übereinanderliegenden, unabhängigen Verbindungsebenen.

Prozess-Steuerungs-Stationen (PSS)

Prozess-Steuerungs-Stationen, in der Praxis bekannt auch als **SPS** (**S**peicher-**P**rogrammierbare **S**teuerungen) sind für verschiedene Prozessfunktionen vorgesehen. Es sollen kurzschlussfeste, selbstüberwachende Komponenten eingesetzt werden.

Die in Schaltschränken eingebauten Prozessstationen bestehen im Einzelnen aus:

- Stromversorgungseinheit (als Unterbrechungslose Stromversorgungs Einheit)
- Zentraleinheit einschl. Mikroprozessor
- Speichereinheiten
- Eingangs-/Ausgangskarten, digital (Diodenanzeige je E/A)
- Eingangs-/Ausgangskarten, analog
- Zeitfunktionen
- Zählerfunktionen
- Kommunikationsbaugruppen
- Erweiterungseinheiten, (soweit erforderlich)
- Funktionsbaugruppen (Positionierung, Regelung, usw.).

Die Anzahl der benötigten Ein- und Ausgänge ergibt sich aus der Anzahl der Antriebe und Verbraucher, sowie der angeschlossenen Instrumentierung. Sie werden weiterhin bestimmt durch das Anwender-Programm in Verbindung mit den notwendigen Steuerungs- und Regelungsabläufen.

Die Anwenderfunktionen werden in den einzelnen PSS realisiert und sind nach technologischen Kriterien aufgeteilt.

PSS Allgemeine Funktionen

Hier werden die Messungen, die Steuerungen und die Regelungen vom allgemeinen Teil der Anlage (die nicht einem Strang zugeordnet sind) implementiert.

Das sind:

- Pfannendrehturm-Steuerung
- Verteilerrinnenwagen-Steuerung
- Füllstandsregelung der Verteilerrinne
- Hydraulik-Steuerung
- Signalaustausch mit unterlagerten Systemen
- Umrichter Drehturmantrieb
- Stahlbadtemperaturmessung Verteilerrinne
- Wiegeeinrichtungen Pfannendrehturm/Verteilerrinne
- Verteilerrinnenbeheizung
- Wasserpumpensteuerung
- Abtransport
- Quertransport
- Kühlbett

PSS Giessmaschinenfunktionen (Strang)

In der Strang PSS sind die Messungen, die Steuerungen und die Regelungen die zum einzelnen Strang gehören. Die Strang PSS enthält identische Programme. Die hier implementierten Funktionen sind:

- Betriebsablaufsteuerung (Betriebsartenwahlschalter)
- Steuerung Segmentantriebe
- Steuerung verschiedener Hydraulikeinheiten

- Giessgeschwindigkeitssteuerung
- Stranglängenmessung (Grobmessung/Wegverfolgung)
- Überwachung / Regelung Kokillenkühlwasser
- Überwachung und Regelung Spritzkühlwasser
- Überwachung Maschinenkühlwasser
- Steuerung Dampfabsaugung
- Steuerung der Rollgänge und Transporteinrichtungen
- Signalaustausch mit unterlagerten Systemen
- Giessspiegelregelung
- Kokillenoszillation

In der Systemhierarchie ist der Giessspiegelregler Teil der Strang SPS.

In den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.3 werden zunnächst die Varianten zur Implementierung des Giessspiegelreglers in der Industrie präzisiert.

4.1.1. Software Regler in CPU der Strang SPS

Der PID – Regler wird als zyklisch zeitgesteuertes Teilprogramm in den Strang Zentralprozessor (CPU) mit höherer Bearbeitungspriorität als das Hauptprogramm (Allgemeine Maschinensteuerung) implementiert. Es wird eine Abtastzeit in der CPU für das Reglerteilprogramm von 10 bis 50 ms programmiert. Für jede Abtastzeit wird das Hauptprogramm unterbrochen, das Reglerteilprogramm bearbeitet, dann wird das Hauptprogramm fortgeführt. Die Abtastszeit muss grösser als die Bearbeitungszeit des Softwarereglers sein, die abhängig vom Giessformat ist. So eine Implementierungsvariante benötigt keine zusätzlichen Hardwarekomponenten für den Regler. Durch die zyklische Unterbrechung des Hauptprogramms wird die gesamte CPU-Zykluszeit grösser. In Abbildung 4.2 ist eine solche Konfiguration dargestellt.

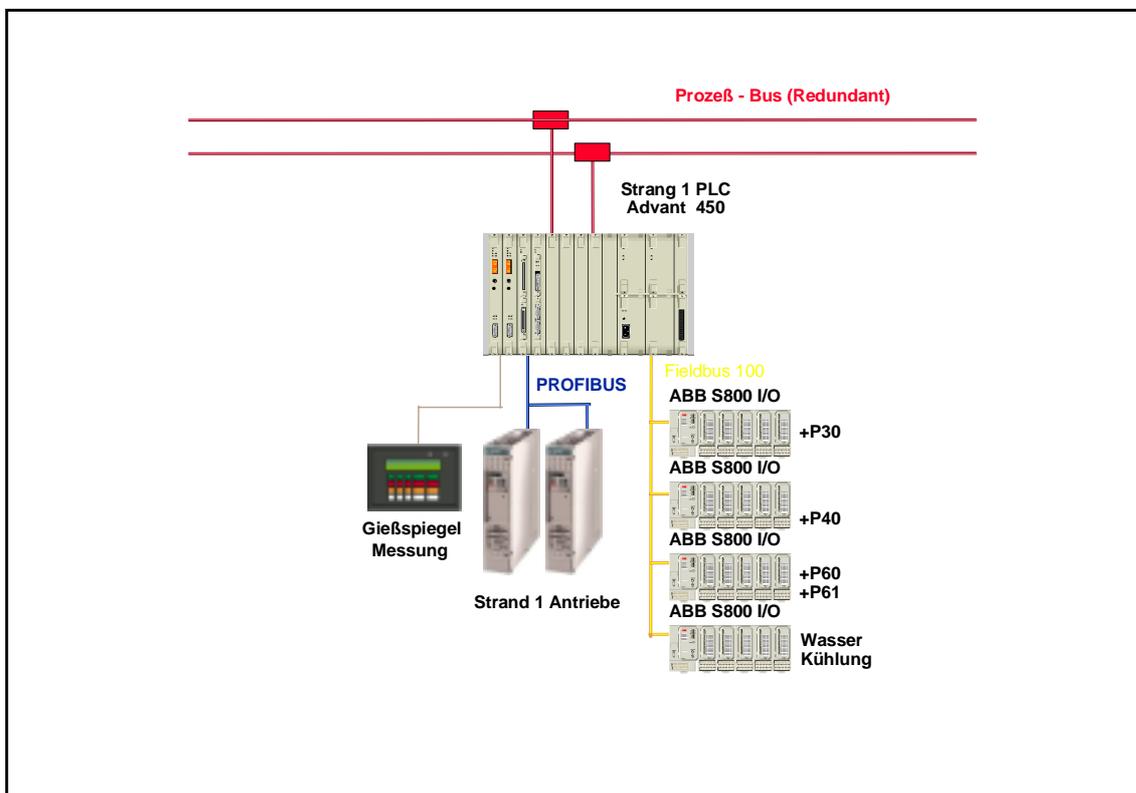


Abbildung 4.2: Strangkonfiguration mit einer SPS

Die beschriebene Ausführung ist mit Hochleistungs-Prozessoren lauffähig. In der Konfiguration sind die Bedienpulte +P30 bis +P61 und der Wasserkühlung mit dezentralen Peripherien bestückt.

4.1.2. Software Regler in CPU 2 der Strang SPS

In der Abbildung 4.3 ist die Mehrprozessoren-Variante mit Siemens SIMATIC S5[®] Komponenten dargestellt, wie sie in eine Anlage in Baotou/China realisiert wurde. Die Struktur ist durch einen Mehrprozessorenbetrieb gekennzeichnet, in dem die erste CPU für das strangbezogene Programm verantwortlich ist und die zweite CPU die implementierte Regelungsstruktur enthält.

Die genannte Variante gewährleistet eine Trennung der Aufgaben in der Strang SPS zwischen den allgemeinen Strangprogrammen und den Reglern, jede CPU hat eine eigene Zykluszeit.

Die Koordinator-CPU ist bei Mehrprozessorenbetrieb immer erforderlich. Sie hat die Aufgabe den Zugriff auf den Rückwandbus (interner Baugruppenträger-Bus) zeitlich zu koordinieren und den Datenaustausch zwischen den CPU`s zu ermöglichen.

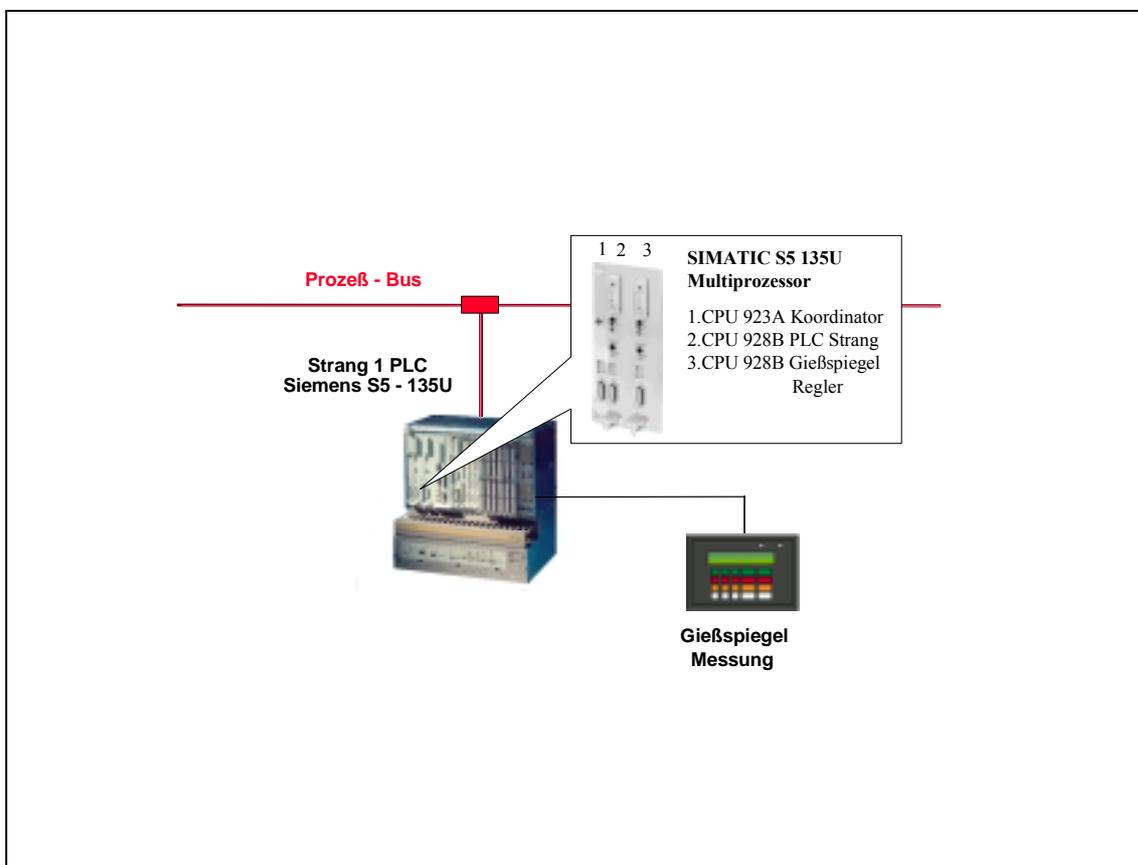


Abbildung 4.3: Strangkonfiguration in Mehrprozessorenbetrieb

Die Voraussetzung für eine solche Methode ist, dass die benutzte SPS Technologie einen Mehrprozessorenbetrieb ermöglicht.

4.1.3. Software Regler in separater SPS

Die komplette Trennung zwischen Gießspiegelregler und allgemeinen Strangfunktionen ist durch die Implementierung des Kokillenfühlstandsreglers in einer selbständigen Einheit realisierbar.

Zwei Lösungen sind in der letzten Zeit feststellbar:

- SPS in der gleichen Technologie wie die Strang SPS.
- Industrie PC

Die erste Lösung – SPS – bietet die folgenden Vorteile:

- Harmonische Integration ins Leitsystem durch gleichartige Schnittstellen.
- Die Verbindung mit den Strang SPS erfolgt durch den System Feldbus. Kommunikation und Kommunikationsprotokolle wie in der gesamter Anlage (z.B PROFIBUS DP bei Siemens oder Advant Fieldbus 100 bei ABB).

- Gleichartige Programmiersoftware.
- Gleichartige Systemsoftware und vereinfachte Integration in das
- Störmeldesystem, sowie im Bedien – und Beobachtungssystem.

Bei der PC-Lösung wird der Software Regler in C/C++ unter Windows NT oder im OS9 Betriebssystem programmiert. Diese Lösung kann korrekte und leistungsfähige Ergebnisse gewährleisten, aber als „Fremdteil“ in der Anlagenkonfiguration findet sie weniger Akzeptanz wegen der zusätzlichen Schnittstellenprogrammierung, der Ersatzteilverhaltung, der Wartung und Schulung.

In der Abbildung 4.4 ist die zweite SPS Variante dargestellt.

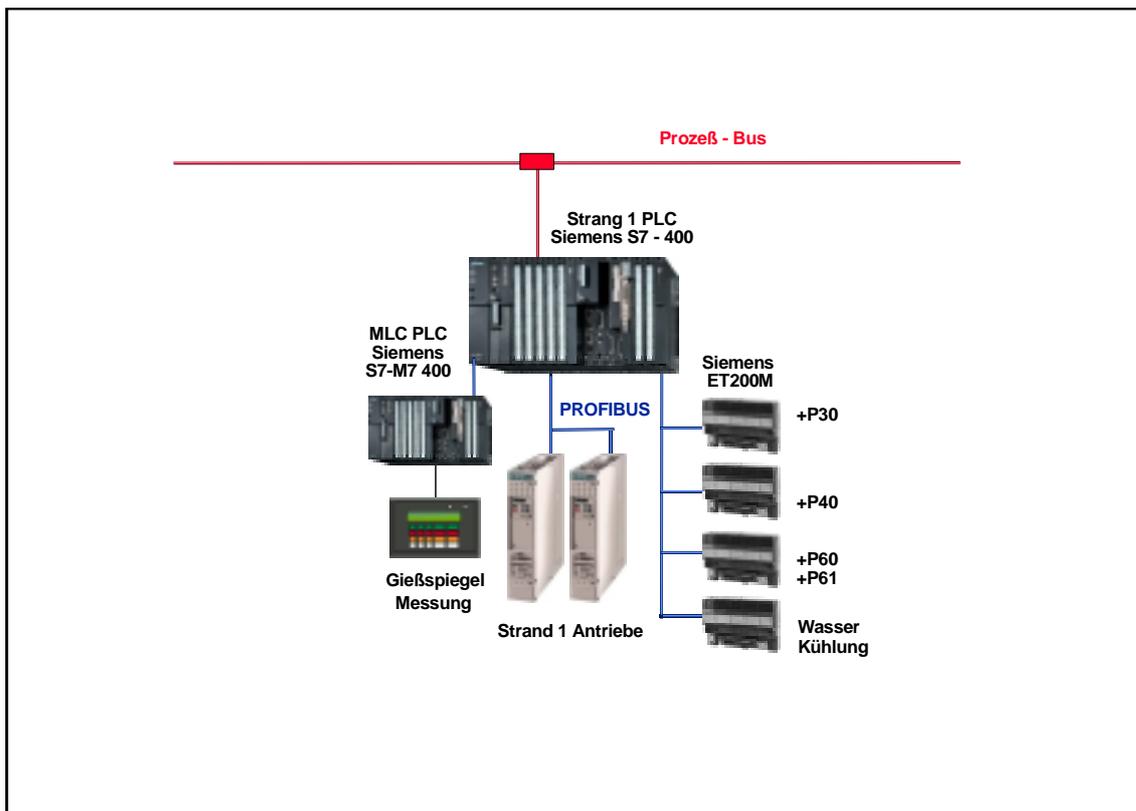


Abbildung 4.4: Strangkonfiguration mit separater Giessspiegelregler SPS

4.2. Kompakte Lösung für Giessspiegelregelung, Stopfenpositionierung, Kokillenoszillation und Durchbruchüberwachung

Die weitere Entwicklung der Leitsysteme/SPS bietet eine kompakte und elegante Lösung für die Implementierung der Giessspiegelregelung, Stopfenpositionierung, Kokillenoszillation und Durchbruchüberwachung an.

Die SIMATIC S7 – M7 Produkte der Siemens SPS Familie ermöglicht den Einsatz in die gleichen Baugruppenträger, SPS CPU mit entsprechenden Ein / Ausgangskarten sowie freiprogrammierbaren PC – Baugruppen.

Die Applikationsbaugruppe FM 456 – 4 ergänzt die S7 Zentralbaugruppen um eine freiprogrammierbare Plattform zur Lösung von Technologieaufgaben oder zur Integration von PC – Funktionalitäten in einem SPS System.

In der Abbildung 4.5 ist die System Konfiguration der Lösung dargestellt.

In der ersten Applikationsbaugruppe PC – A wird die Positionierung des Stopfen mit hydraulischen Servoachsen für beide Verteilerrinnen als Lageregelungen realisiert.

In der zweiten Applikationsbaugruppe PC – B wird die Gleichlauf- und Lageregelung von den zwei hydraulischen Servoachsen des Kokillenzillationssystem (Resonanzkokille) integriert.

Die PC Baugruppen sind mit **Synchron Seriellen Interface (SSI)**, digitalen und analogen Ein- und Ausgängen ausgerüstet. Die SPS CPU und die PC – A und B Applikationsbaugruppen kommunizieren miteinander über den internen Bus, so dass der Datenfluss zum übergeordneten Visualisierungssystem (via SPS und PROFIBUS DP) auf einfache Art möglich ist.

Die CPU SPS übernimmt die Steuerungsaufgaben (Ein / Ausgänge), die Kommunikation mit der Strang SPS, die Aquirierung der Temperatursensoren für die Durchbruchfrüherkennung. Hier wird ebenfalls der Giessspiegelregler programmiert.

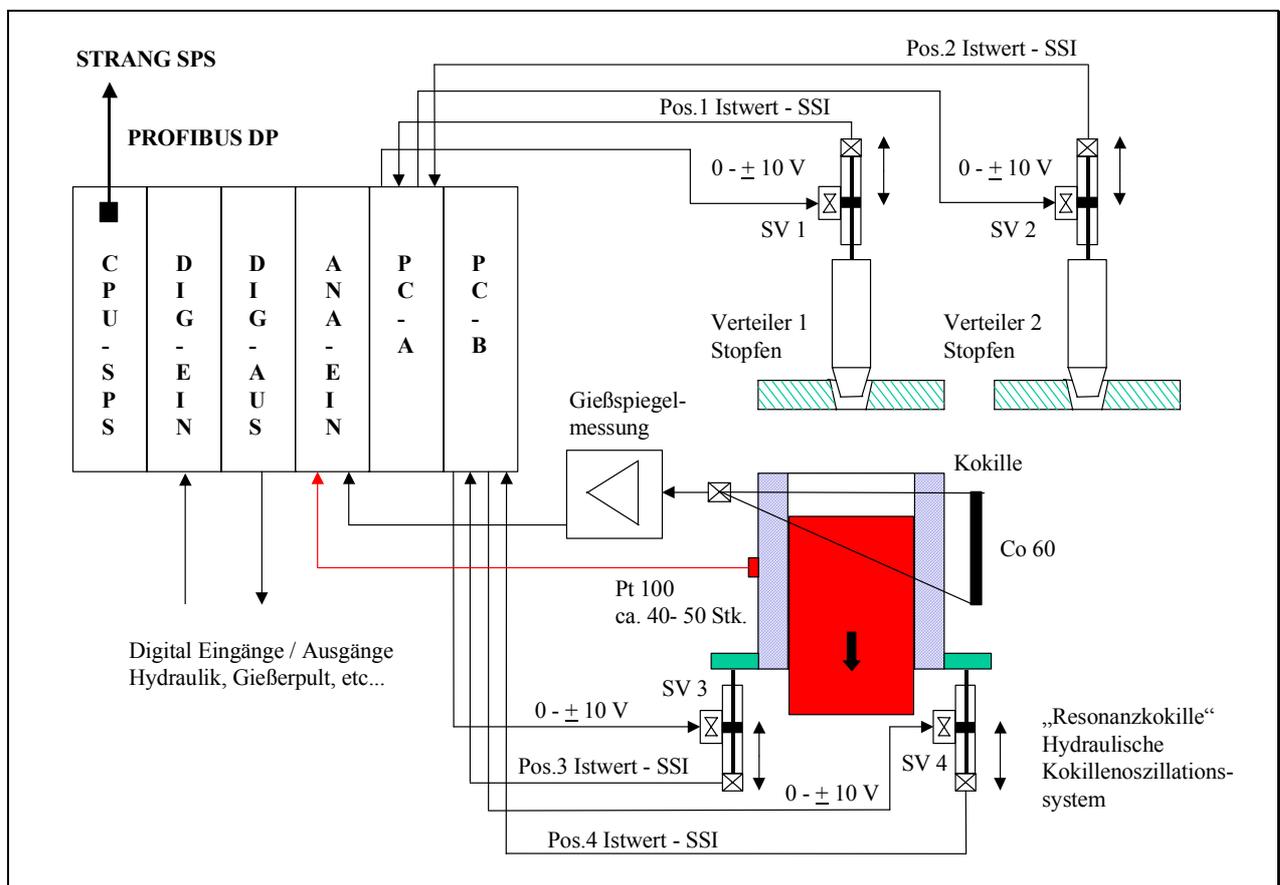


Abbildung 4.5: Systemstruktur für kompakte Kokillenregelungen

Die Positions-Istwerte sind durch im hydraulischen Zylinder integrierte Traduktoren erfasst und per serieller Schnittstellen (SSI) in den PC – Baugruppen untergebracht.

Die PC – Baugruppen steuern durch die analogen Ausgänge ($0 - \pm 10V$) die Servoventile SV1 bis SV4 mit integrierter Elektronik.

Für die Programmierung der Anwendung im PC und der SPS stehen Standard Funktionsbausteine wie Modulare PID Control, Fuzzy Control, und Engineering Tools wie CFC (Continuous Function Chart) oder M7-ProC/C++ zur Verfügung.

Die Vorteile dieser Lösung sind:

- Gleichartige Hardware und Software für getrennte Aufgaben.
- Einfache Integration in das Leitsystem durch Minimierung des Datenaustauschs.
- Die Auswerteelektronik der Zylinderpositionierung entfällt durch den Einsatz der integrierten SSI Schnittstellen.
- Die Analogreglerbaugruppen für die Servoventile entfallen durch die Software Lösung auf der PC Karte.

Die Lösung wurde für eine Stranggiessanlage bei Hoogovens (Niederlande) untersucht.

4.3. Bedienkomponenten und Visualisierung

Die Prozessdarstellung auf den Monitoren erfolgt mittels:

- Anlagenfließbildern
- Gruppenbildern
- Kreisbildern
- Kurvendarstellungen
- Kurzzeittrendkurven
- Langzeittrendkurven
- Meldesystemen
- Darstellung von antriebsbezogenen Einschalt- und Verriegelungsbedingungen aller Antriebe und Systeme
- Darstellung und Bedienung übergeordneter Systeme (z.B. Level 2)
- Darstellung und Bedienung untergeordneter Systeme (z.B. Resonanzkokille)

Prozesssteuerfunktionen werden über das PLS eingeleitet:

- Betriebsartenwahl
- Auswahl der Antriebe
- Auswahl der Kühlkurven
- Auswahl von Sollwerten
- Auswahl von Reserveantrieben

Im PLS werden alle Daten aufbereitet, die für die Darstellung der Prozessbilder auf den Monitoren notwendig sind. Die Darstellung der Prozessbilder erfolgt als vollgrafische Farboberfläche. Die Eingabe in das PLS erfolgt über Standardtastaturen bzw. Funktionstastaturen.

Zusätzlich sind konventionelle Pulte und Bedienstationen mit integrierten Tastaturen und Bildschirmen für bestimmte Funktionen an bestimmten Orten innerhalb der Anlage aufgestellt. Sie sind über lokale, intelligente Schnittstellen an das PSS angeschlossen.

Für die weitere Analyse des Visualisierungssystems werden als Beispiel Bilder von der Anlage Yieh United Taiwan dargestellt.

Die Applikationssoftware des Bedien- und Beobachtungssystems besteht aus ca. 80 Anlagenübersichtsbildern, Gruppenbildern, Einzelkreisbildern, Kurz- und Langzeittrendkurven, die nach Vorgaben und aus Erfahrungen früherer Anlagen erstellt wurden. Bei der Darstellung des Prozessabbildes wurde hoher grafischer Aufwand betrieben. Die Gestaltung der Oberflächen verbindet ergonomische Bedienbarkeit des Systems mit einer sinnvollen Informationsdichte, realisiert durch Verwendung typischer Bildelemente, Farben und Menüstrukturen. Für häufig wiederkehrende Komponenten, wie zum Beispiel geregelte Antriebe und Ventile wurden spezielle Präsentationen und Objektbilder geschaffen, die direkt mit einer

Datenstruktur im AdvantController korrespondieren und eine umfangreiche Beobachtung und Diagnose ermöglichen.

4.3.1. Anlagenübersichtsbilder

Die Prozessbilder werden entsprechend den Möglichkeiten des eingesetzten PLS-Systems erstellt. Sie enthalten statische und variable Anteile. Die variablen Anteile stellen den aktuellen Zustand der Stranggiessanlage dar. Variable Anteile können aktuelle Zustände (z.B. Antrieb: Ein/Aus) oder aktuelle Werte (z.B. Giesslänge) sein. Werte können als Balken und/oder numerisch dargestellt werden. Kritische Anlagenzustände werden durch unterschiedliche Farben oder durch Blinken hervorgehoben.

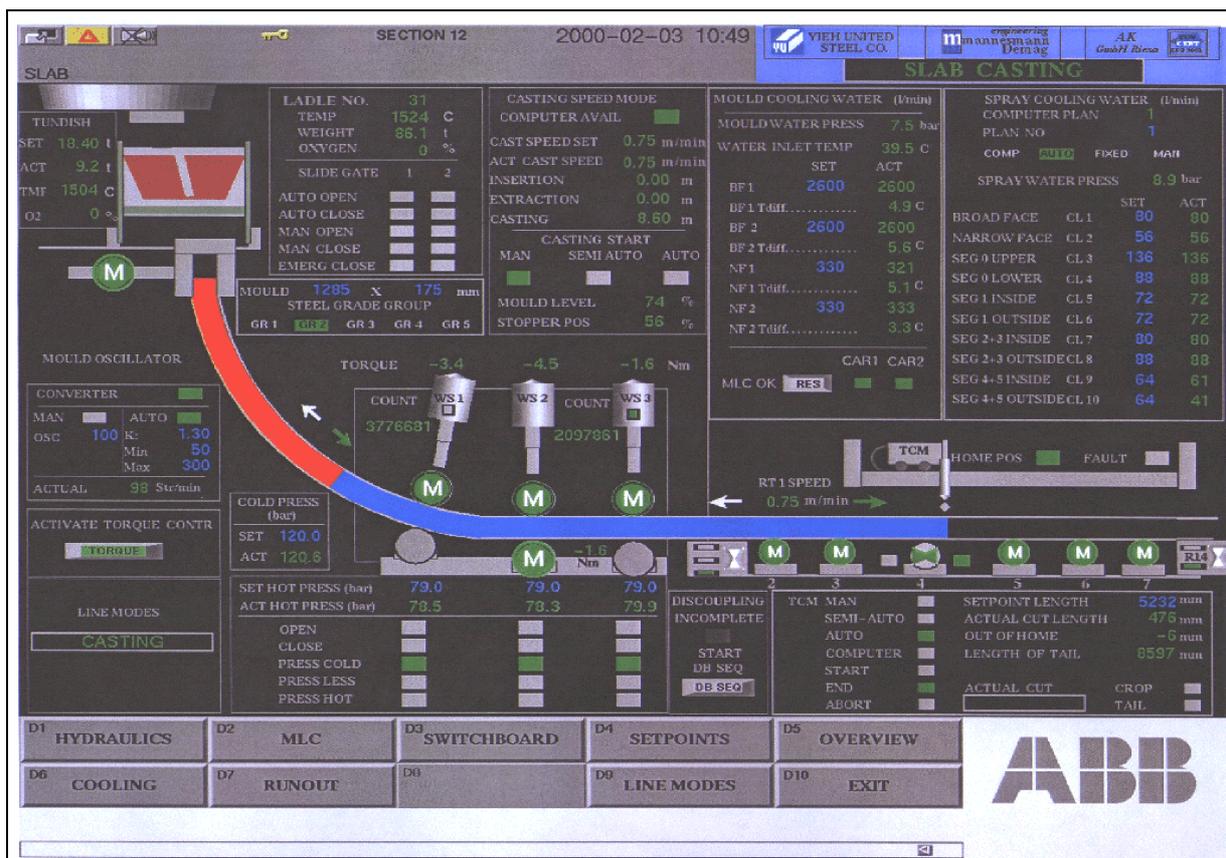


Abbildung 4.6: Anlagenübersichtsbild, Brammenanlage Yieh United, Taiwan

4.3.2. Gruppenbilder/Messkreisbilder

Für Mess- und Regelungsanwendungen werden standardisierte Gruppen- und Messkreisbilder eingesetzt. Das Layout wird entsprechend den Erfordernissen der Stranggiessanlage erstellt und für alle Mess- und Regelungsaufgaben verwendet. In einem Gruppenbild können bis zu sechs Regel- oder Messkreise gleichzeitig dargestellt werden. Messwerte und Reglerwerte (z.B. Sollwert, Istwert und Stellgliederstellungen) werden sowohl in Balkenform als auch numerisch angezeigt. In einem Kreisbild wird jeweils ein Mess- oder Regelkreis mit allen aus dem mit Standard Funktionsbausteinen gebildeten Prozessfunktionen dargestellt. Im Messkreisbild kann der jeweils dargestellte Messkreis bedient werden. Zusätzlich zur Wertedarstellung in Balkenform ist im Kreisbild für ausgewählte Werte eine Kurvendarstellung vorgesehen.

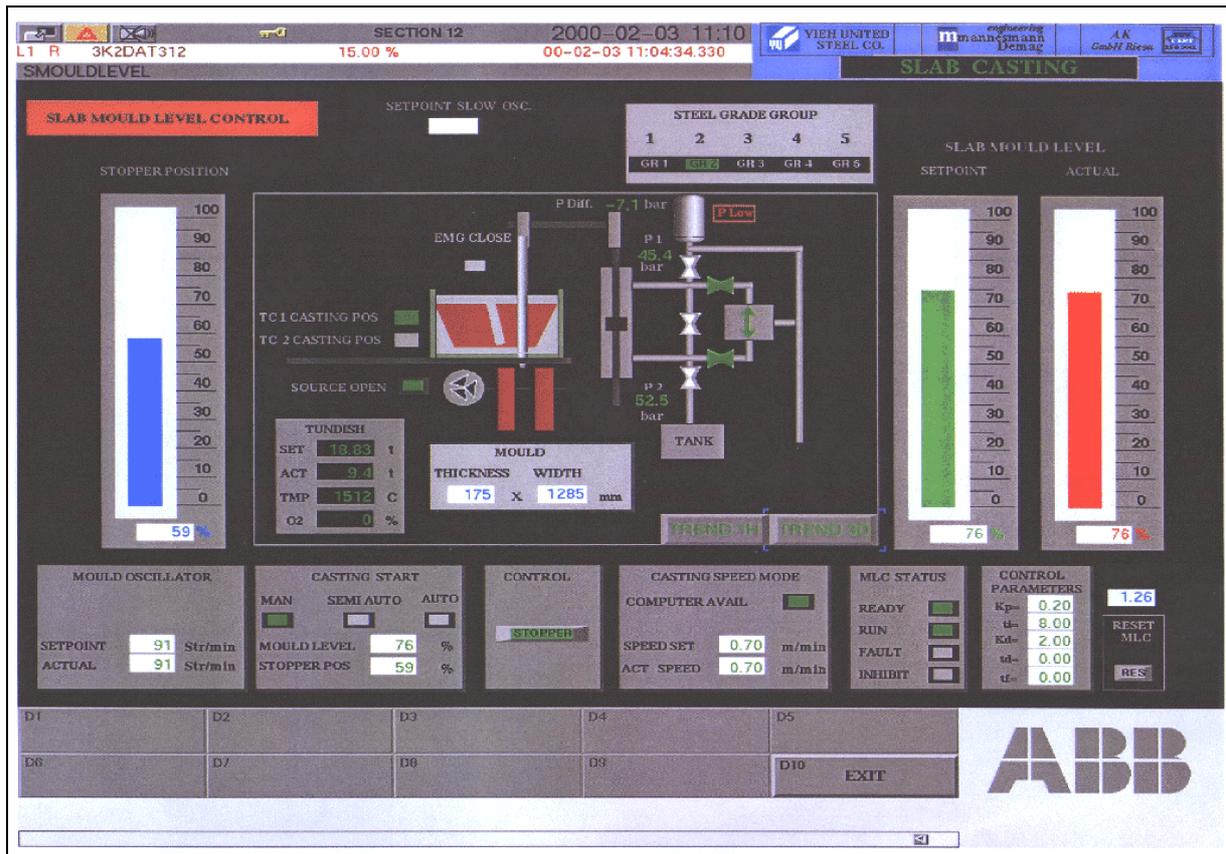


Abbildung 4.7: Messkreisbild Giesspiegelregelung, Yieh United Taiwan

In der Abbildung 4.7 ist das Messkreisbild der Giesspiegelregelung eines Stranges der Anlage in Taiwan gezeigt. Das Bild enthält die graphische Darstellung des Stopfenmechanismus mit seinen hydraulischen Komponenten, Prozessvariable in Balken und numerischer Form, software Bedienelemente (Taster und Wahlschalter) mit verschiedenen Betriebsarten. Ausserden werden in dem Bild die eingesetzten Reglerparameter gezeigt. Die Zustände der verschiedenen Komponenten werden durch Farben dynamisiert (z.B. Grün = Ventil Auf, Rot blinkend = Störung, u.s.w.)

4.3.3. Kurvendarstellung

Kurven können in der Kreisbilddarstellung oder in Kurvenfenstern dargestellt werden. In einem Kurvenfenster können bis zu sechs Messwerte dargestellt werden. Die Zuweisung von Messwerten zu einem Kurvenfenster ist frei projektierbar.

4.3.3.1. Kurzzeittrendkurven

Die Darstellung von Messwerten erfolgt mit festgelegter Abtastrate und Zeitdauer. Abtastrate und Zeitdauer sind durch die Anzahl der im Kurvenfenster dargestellten Kurvenpunkte aufgrund des Speicherplatzes in der SPS begrenzt.

Die Kurzzeittrendkurven enthalten Prozessvariable mit einer schnelleren Dynamik, die Abtastzeiten sind bis max. 1 sec und die Aufzeichnungsintervalle von 1 bis 15 min angelegt. Die Kurzzeittrendkurven dienen für Beobachtung, Analyse und Diagnose der momentanen Verläufe der aktuellen Variablen, aber auch für die Protokollierung der Störungen und Nachweise für die Qualität des Produktes. Die Abbildung 4.8 ist ein Beispiel einer Kurzaufzeichnung der wichtigsten Variablen für die Giesspiegelregelung. Gezeigt werden der Giesspiegel, die Stopfenposition, die Giessgeschwindigkeit und die Momente der Ausziehrichtmaschinen.

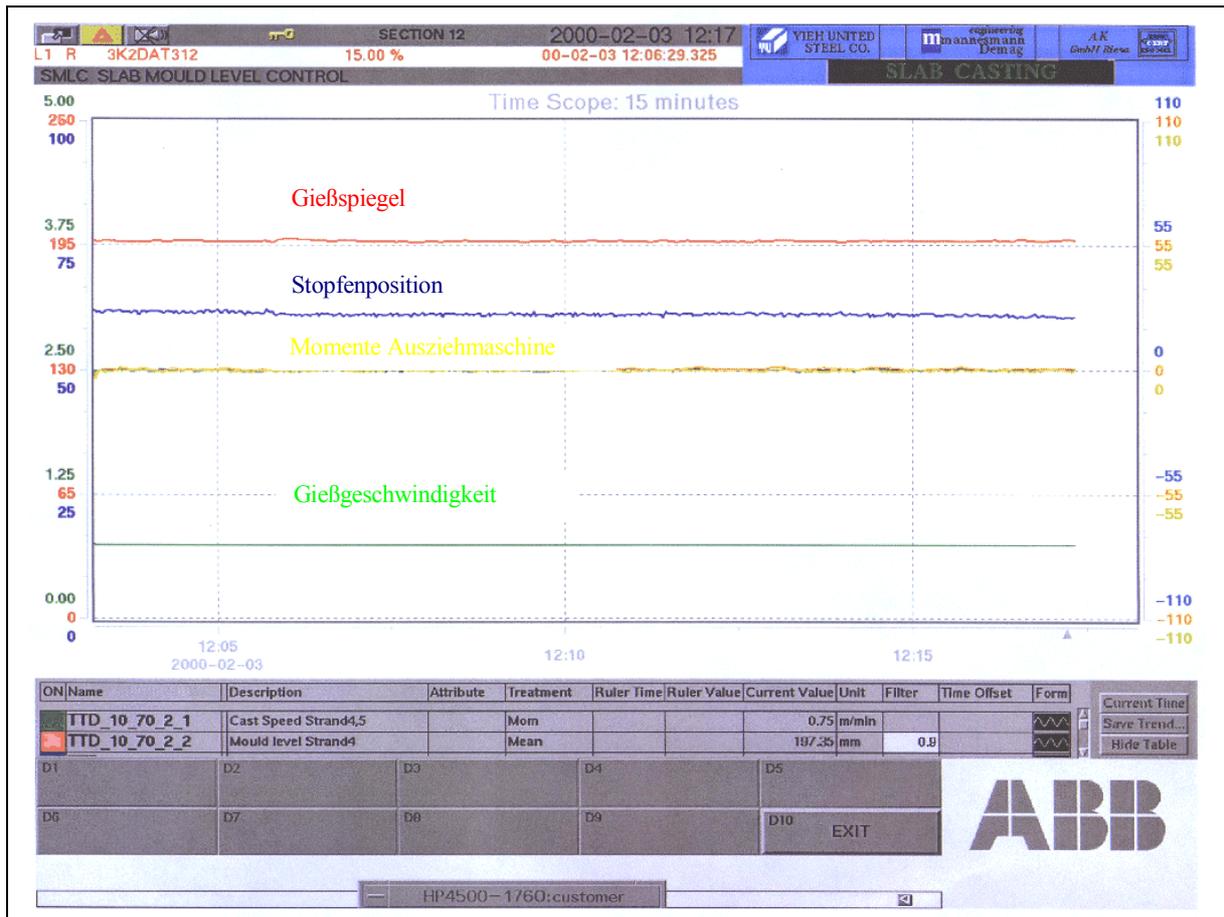


Abbildung 4.8: Kurzzeittrendkurven (15 Minuten Aufzeichnung)

4.3.3.2. Langzeittrendkurven

Der Langzeittrend eines Messwertes stellt die gespeicherten historischen Werte als Kurve dar. Die Zeitdauer der Langzeitspeicherung, Abtastrate des Messwertes und die Zeitbasis für die Kurvenausgabe werden während der Projektierung festgelegt. Die Langzeittrendkurven enthalten Informationen über den Ablauf der gesamten Produktionssequenz. Die Abtastzeit kann zwischen 5 bis 10 sec eingestellt werden. Die Aufzeichnungszeit kann von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen programmiert werden. In der Abbildung 4.9 ist eine achtstündige Giessequenz aufgezeichnet. Anhand der Giessequenz ist es möglich den Produktionsablauf festzustellen. Das sind im Einzelnen:

- Anzahl der gegossenen Pfannen
- Giessleistung (t/min)
- Giessgeschwindigkeitänderungen
- Verlauf des Giessspiegels
- Abnutzung des Stopfens und der Verlauf der Fuzzy-Korrektur.

Das Dokument der Produktionssequenz der Abbildung 4.9 zeigt das automatische Angiessen und die ununterbrochene Funktion der Giessspiegelregelung über die gesamte Giessequenz mit einer hohen Stahlpegelkonstanz, unabhängig von der Giessgeschwindigkeit. Die Zeitverläufe der Stopfenposition und der Fuzzy-Korrektur zeigen starke Änderungen der Stopfen-Ausguss-Kennlinie während der fünfständigen Giessequenz ohne Wirkung auf den Stahlpegel. Damit wird die korrekte Funktion der Fuzzy-Adaption bewiesen.

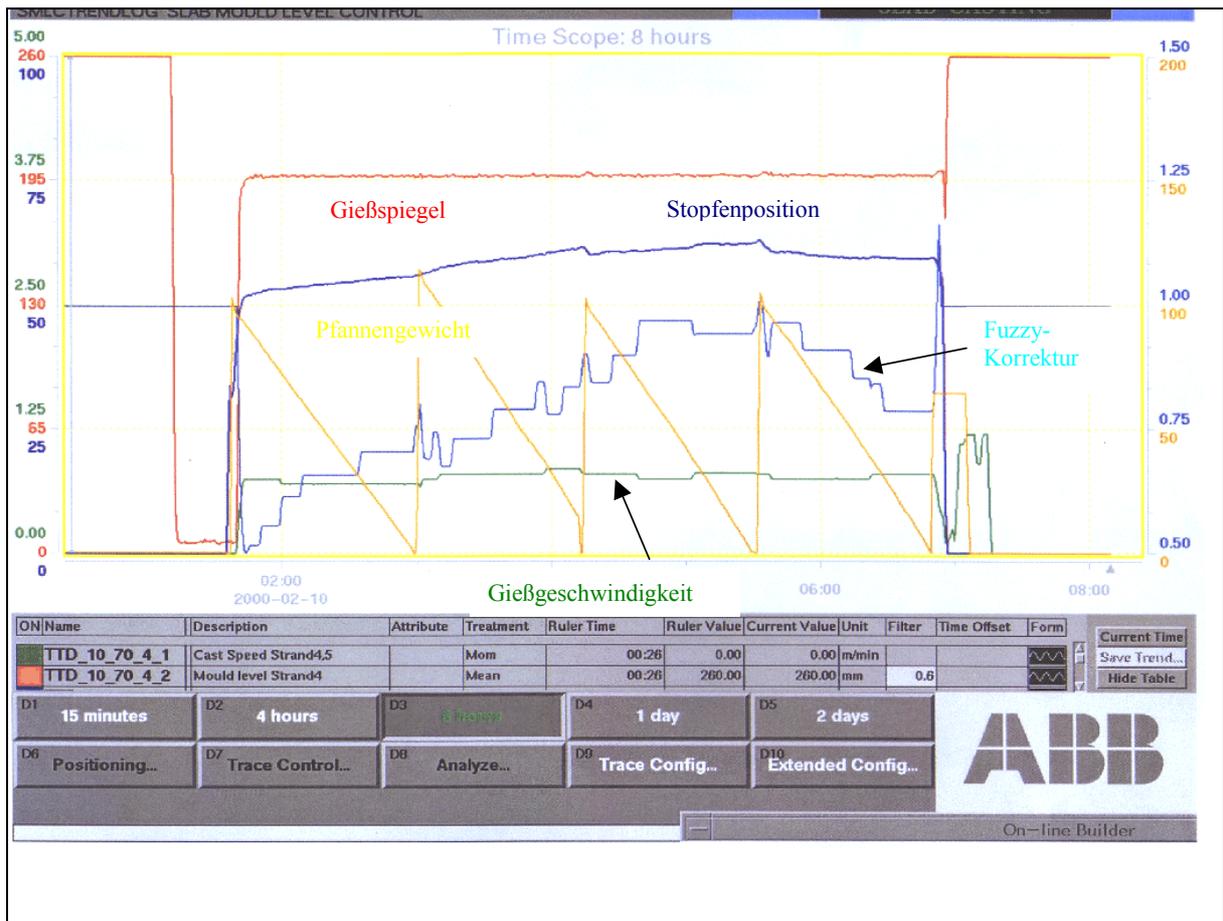


Abbildung 4.9: Langzeittrendkurven, achtstündige Aufzeichnung, vier Pfannensequenzen

4.3.4. Meldesystem

Das Meldesystem informiert den Anlagenbediener über Anlagenstörungen und Betriebszustände. Meldungen werden in den Prozess-Steuerungs-Stationen erzeugt. Zustandsänderungen einer Meldung werden zur PLS übertragen und dort für die Meldeausgabe vorbereitet. Meldungen sind mit notwendigen Kennzeichnungen zu versehen. Das Meldesystem verwaltet anstehende Meldungen in einem Archiv. Die Meldungen werden klassifiziert und ausgewertet nach Zeitraum, Anlagenbereich oder Aggregat. Die Ausgabe einer Meldung erfolgt als Meldezeile in jedem angewählten Bild auf dem Monitor sowie über den Drucker.

Im Meldesystem werden folgende Meldungstypen unterschieden:

- Störmeldungen sind Meldungen über nicht zulässige Betriebszustände von Antrieben oder Antriebsgruppen.
- Betriebs-/Ereignismeldungen sind Meldungen und Aussagen über die Betriebsbereitschaft von Anlagenteilen oder über die betrieblich zulässigen Anlagenzustände.
- Alarmmeldungen werden im Wesentlichen von Mess- und Regelungserfassungsbausteinen erzeugt.
- Logische Erfassung und Auswertung von Störmeldungen.
- Zeiterfassung und Vorgaben vom Level 2 (Materialmanagement)

Die Zeiumstellung Sommerzeit – Winterzeit erfolgt automatisch im System.

5. Implementierung und experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie mit Standard-Funktionsbausteinen von verschiedenen Herstellerfirmen durch die Implementierung des entwickelten Fuzzy-Konzeptes eine Verbesserung des Giessspiegelverhaltens erzielt werden kann. Dazu werden die an drei unterschiedlichen Anlagen (Baotou/China, Taiwan und Hunedoara/Rumänien) erhaltenen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Es wurde bewusst auf Hardware Eigenentwicklungen verzichtet, um Störungen durch Interface Verbindungen zu vermeiden und die Untersuchung auf den Schwerpunkt Giessspiegel Verbesserung und Zuverlässigkeit zu lenken.

5.1. Stranggiessanlagen in Baotou

Bei den Anlagen handelt es sich um einen 4x Rund-Stranggiessanlage (mit den Formaten 180, 240, 270, 300, 350mm) und einen 4x Vorblock-Stranggiessanlage (mit den Formaten 280x325,280x380,319x410mm) der Baogang Steel in Baotou/ China. Die Inbetriebnahme erfolgte von Juli bis Dezember 1997.

5.1.1. Implementierung der Fuzzy-Komponenten

Die Konfiguration der 4x Knüppelanlage mit Siemens SIMATIC S5 Komponenten ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Struktur ist durch einen Mehrprozessor-Betrieb gekennzeichnet, in dem die erste CPU für das strangbezogene Programm verantwortlich ist und die zweite CPU die implementierte Regelungsstruktur enthält.

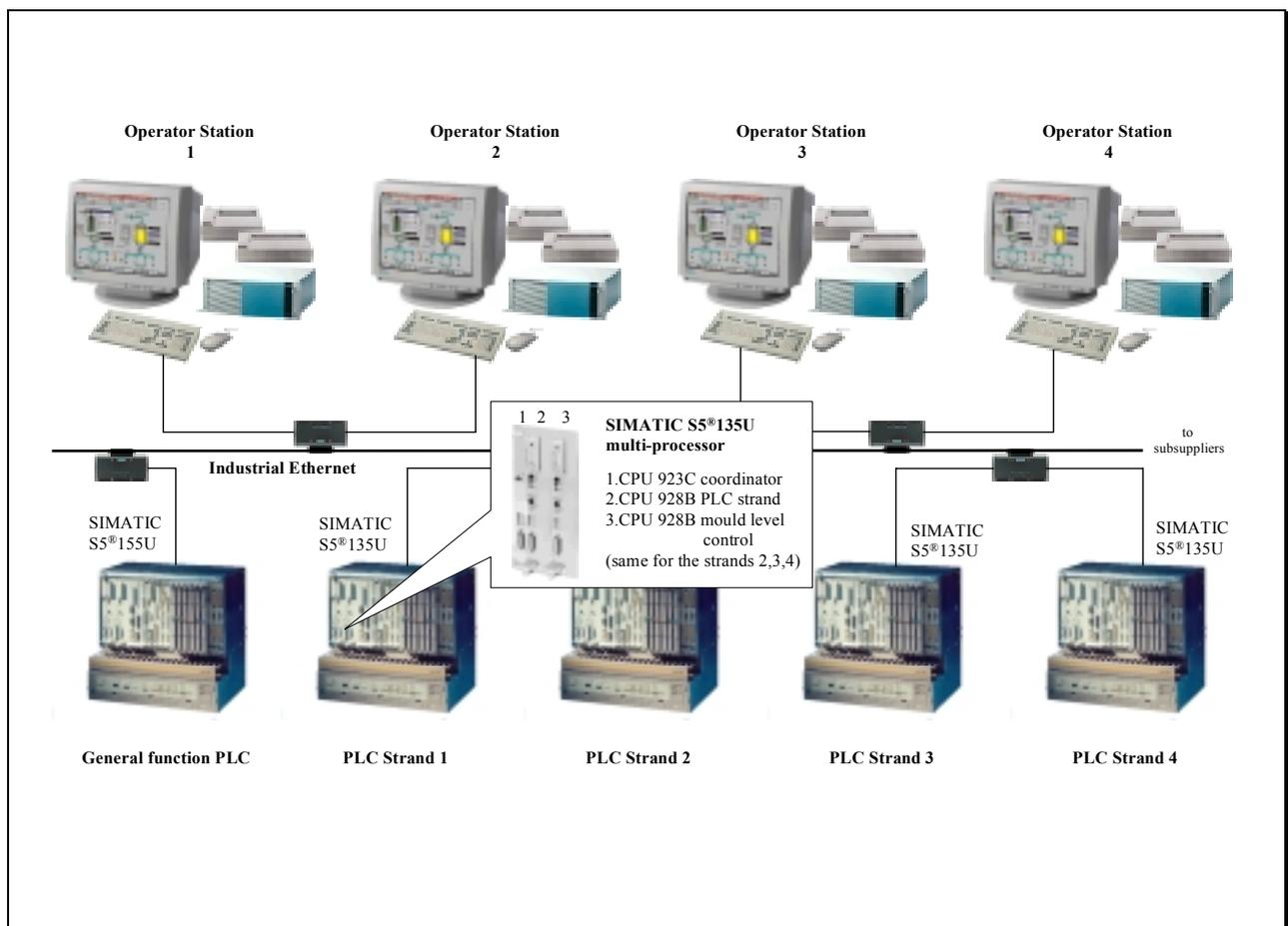


Abbildung 5.1: Implementierung mit SIMATIC S5 135U - BAOTOU , VR CHINA

Siemens SIMATIC S5 hat ein Standard-Softwarepaket zur Implementierung von Regelungen [55]. Das modulare Regelungspaket verfügt neben den klassischen Algorithmen auch über Fuzzy-Bausteine. Mit Hilfe des Programmsystems SIFLOC S5 [57] können die Fuzzy-Applikationen und Regeln definiert und mit dem SIMATIC S5 AWL-Editor/Batch-Compiler (v2.2) in Maschinensprache übersetzt werden. Die nach dieser Variante generierten Regelungen sind auf SPS SIMATIC S5 135/155 U (CPU 928B/948) lauffähig [4]. Das Softwarepaket enthält ausserdem modulare Komponenten zur Inbetriebnahme und On-line Optimierung der entworfenen Regelungsstruktur. (siehe Kap. 3.3, Abbildung 3.9)

Die Notwendigkeit, die Standard- Softwarepakete für die Implementierung der Regelungsstrukturen und Fuzzy-Komponenten zu benutzen, wurde aus Gründen der Gewährleistung, der Produkt-Unterstützung und als Up-date Unterstützung gewählt.

Merkmale der Standard Siemens Fuzzy-Bausteine (FB113-Fuzzifizierung, FB116-Defuzzifizierung) und durch SIFLOC S5 erzeugte Fuzzy-Applikationen [57]:

- Die Summe der Zugehörigkeitswerte einer jeden linguistischen Variablen ergibt, unabhängig vom jeweiligen Augenblickswert der zu fuzzifizierenden Eingangsgrösse, stets Eins. Dabei dürfen stets höchstens zwei benachbarte Zugehörigkeitsfunktionen Erfüllungsgrade grösser Null aufweisen.
- Als t – Norm für die UND-Verknüpfung wird der MIN- Operator verwendet.
- Als t – Konorm für die ODER-Verknüpfung wird der MAX- Operator verwendet.
- MAX- PROD Inferenzmethode wird angewendet.
- Als Ausgangsgrössen- Zugehörigkeitsfunktionen werden überlappungsfreie Dreiecksfunktionen mit den Schwerpunktmethoden Defuzzifizierung verwendet.

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen mit den entsprechenden Stützpunkten sowie die Regelbasis für zwei Fuzzy-Blöcke (Plausibilität und Adaption) sind in Kap. 3.3 beschrieben.

Das Angiessen der einzelnen Stränge erfolgt vollautomatisch. Bei den kleineren Formaten (Rund 180 bis 240 mm) wurde die Angiessessequenz wie in Kap. 2.4.1, Abbildung 2.18 beschrieben realisiert, während beim grösseren Formaten die Angiessessequenz wie in Kap. 2.4.2, Abbildung 2.20 vorgestellt gefolgt wurde. Die Fuzzy-Komponenten berücksichtigen die Besonderheiten und zusätzlichen Überwachungsaufgaben während des Angiessvorgangs. Das Konzept ist in [19], [43] mit den vollständigen Regelbasen und Algorithmen dargestellt.

Zum Regelungskonzept gehören ausser dem anlagespezifischen Algorithmen

- zum automatischen Nullabgleich zwischen Giessspiegelmessung und Giessspiegel,
- zur stossfreien Umschaltung zwischen Hand- und Automatikbetrieb,
- zum Aufschalten einer langsamen Schwingung auf die Führungsgrösse mit einer Periodendauer von 20 Minuten, um die Tauchrohre zu schonen
- für Überwachungsfunktionen zur Erkennung und nachfolgenden Schadensbegrenzung bei Durchbrüchen und zu hohen Giessspiegeln mit der Gefahr des Überlaufs.

Der Programmausdruck der gesamten implementierten Regelungsstruktur ist in Anhang 1 dargestellt.

Zum Programm gehören ausser dem Regler und seinen Nebenfunktionen, S5-Systemfunktionen. Das sind:

- Systemrahmen, Speicheraufteilung
- Mehrprozessorbetrieb, Organisation des Busverkens und der Peripheriezugriff
- Anlaufarten, Dateninitialisierung und zyklischer Betrieb
- Abtastzeitdefinition und Zeittaktverteilung
- Datenorganisation
- Kommunikation mit dem Leitsystem über den Strangprozessor.

5.1.2. Erprobung

In der praktischen Erprobung zeigte sich die Fähigkeit der Fuzzy-Komponenten, unabhängig von der Abnutzungssituation, eine gute Regelqualität auch bei starken Störungen zu gewährleisten. Dabei wurden durch die Fuzzy-Adaption trotz baugleicher Stränge häufig strangabhängige Reglerparameter eingestellt, weil alle Stränge ein unterschiedliches Abnutzungsverhalten aufgewiesen haben.

Für die Erprobung in Baotou wurden den folgende Werte verwendet:

- Abtastzeit der implementierten Regelstruktur (Kap.3.3, Abbildung 3.9) in der CPU928B : 50 msec
 - Bearbeitungszeit des Algorithmus: 26 msec
 - Eingesetzte Messzeitkonstante für die auf Cobalt 60 Isotopen basierte Giessspiegelmessung: 200 msec
- Für einen Messbereich von 160 mm und einen Füllstandssollwert von 75% (gemessene Impulsrate 1500 Imp/sec, entspricht 120 mm) ergibt sich eine mittlere Anzeigeschwankung nach der Formel [6]:

$$\frac{\Delta I}{I} = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \cdot n \cdot \tau}} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 3500 \cdot 0.2}} = \frac{1}{\sqrt{1400}} = 0,026 \quad (5.1)$$

Für $I=120$ mm ist $\Delta I = 0.026 \cdot 120 = 3,12$ mm

- Verstärkungsfaktor der PD-Regler (Analog Rexroth) für Stopfenpositionierung: $K_{PH} = 7$
- D-Anteil der PD-Regler (Analog Rexroth) für Stopfenpositionierung: $T_{DH} = 10$ msec
- Basisverstärkungsfaktor (nicht mit Fuzzy adaptiert) des PID-Giessspiegelreglers: $K_p = 0,1$, für 240mm Rund
- Basis I-Anteil (nicht mit Fuzzy adaptiert) des PID-Giessspiegelreglers: $T_i = 2,6$ sec , für 240mm Rund
- Basis D-Anteil (nicht mit Fuzzy adaptiert) des PID-Giessspiegelreglers: $T_D = 100$ msec , für 240mm Rund
- Verstärkung und Zeitkonstante für der Störgrössenaufschaltung (Giessgeschwindigkeit): $K_{pV} = 1$
 $T_{DV} = 150$ msec , für 240mm Rund
- Der filtrierte Fuzzy- Adaptionsfaktor multipliziert den Basisverstärkungsfaktor der Regler, jedoch ist dieser zwischen 0,5 und 1,5 begrenzt.
Der Regler wird am Anfang des Giessens mit den Basisparametern gestartet, dann wird die Adaption nach 10 sec freigegeben. Beim weiteren Schalten auf

Hand/Automatik innerhalb einer Giesssequenz wird der Regler mit den letzten korrigierten Parametern freigegeben.

- Die Parameter des Tschebyschew-Typ I Sperrbandfilters sind wie in Kap.3.4, und Gleichungen (3.15) bis (3.20) beschrieben.

Die Basis-Parameter des Giessspiegelreglers für verschiedene Formate sind in einer Datenbank der SPS gespeichert. Die Auswahl erfolgt über die Visualisierungsmaske. Nach Inbetriebnahme und Optimierung (Symmetrisches Optimum) wurden die Werte wie in Tabelle 5.1 aufgeführt eingegeben.

Format Rund Parametern	180 mm	240 mm	270 mm	300 mm	350 mm
K_p	0.08	0,1	0,11	0,14	0,16
T_I	2 sec	2,6 sec	3 sec	3,6 sec	4,2 sec
T_D	150 msec				

Tabelle 5.1: Parameter der Giessspiegelregler in Abhängigkeit von den Giessformaten

- Die Zugehörigkeitsfunktionen, sowie die Regelbasis für die implementierten Fuzzy- Komponenten sind wie in Kap. 3.3 beschrieben.

In der Abbildung 5.2 ist ein Giessverlauf kurz nach dem Angiessen mit einer neuen Verteilerrinne, neuen Stopfen, Tauchrohren und Ausgüssen dargestellt.

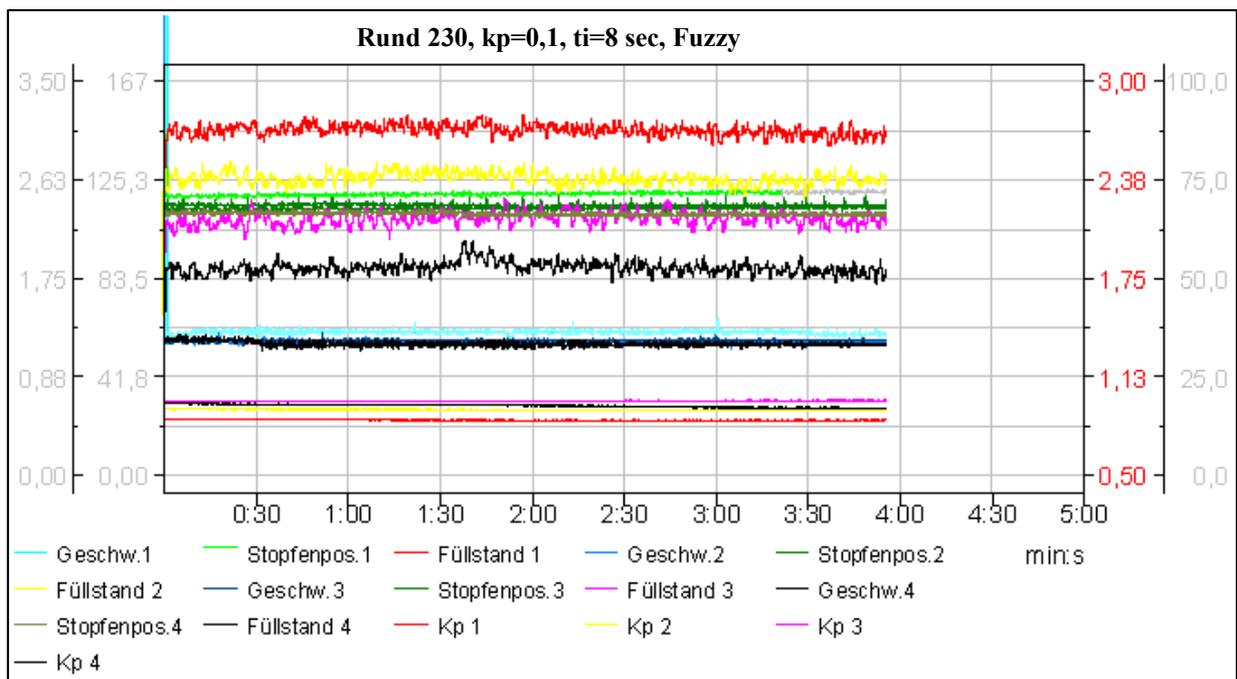


Abbildung 5.2: Verläufe der Giessspiegel 15 min nach dem Angiessen, Stopfenpositionen und eingestellte Reglerverstärkungen beim Betrieb mit Fuzzy-adaptierten PID-Reglern (Giessspiegel sind zur besseren Darstellung gegeneinander verschoben)

Die vier Stränge verhalten sich quasi gleichmässig, die vier Fuzzy- Korrekturfaktoren sind zwar leicht unterschiedlich aber haben keine grosse Bedeutung.

Bei zunehmender Abnutzung der mechanischen Teile nimmt durch die Adaption die Bedeutung der Korekturfaktoren kontinuierlich zu.

Die Aufzeichnungen der wichtigen Variablen und Parameter zeigen eine deutliche Verbesserung der Giesspiegelregelung und eine Erhöhung der Konstanz des Stahlpegels in der Kokille über eine längere Giesszeit.

Eine weitere Aufzeichnung (Abbildung 5.3) ca. eine Stunde später bei der gleichen Maschine zeigt einen grossen Unterschied zwischen den Fuzzy- Korrekturfaktoren (der kleinste ist 0,55 der grösste fast 1) für die gleiche Konstanz des Giessspiegels. Die Gründe liegen nicht nur in den unterschiedlichen Stopfenverschleiss, sondern auch durch die unterschiedlichen Stahlflüssigkeiten bei nicht homogenen Temperaturen im Verteiler und Änderungen der Eigenschaften der Stopfenmechanik bei höheren Temperaturen.

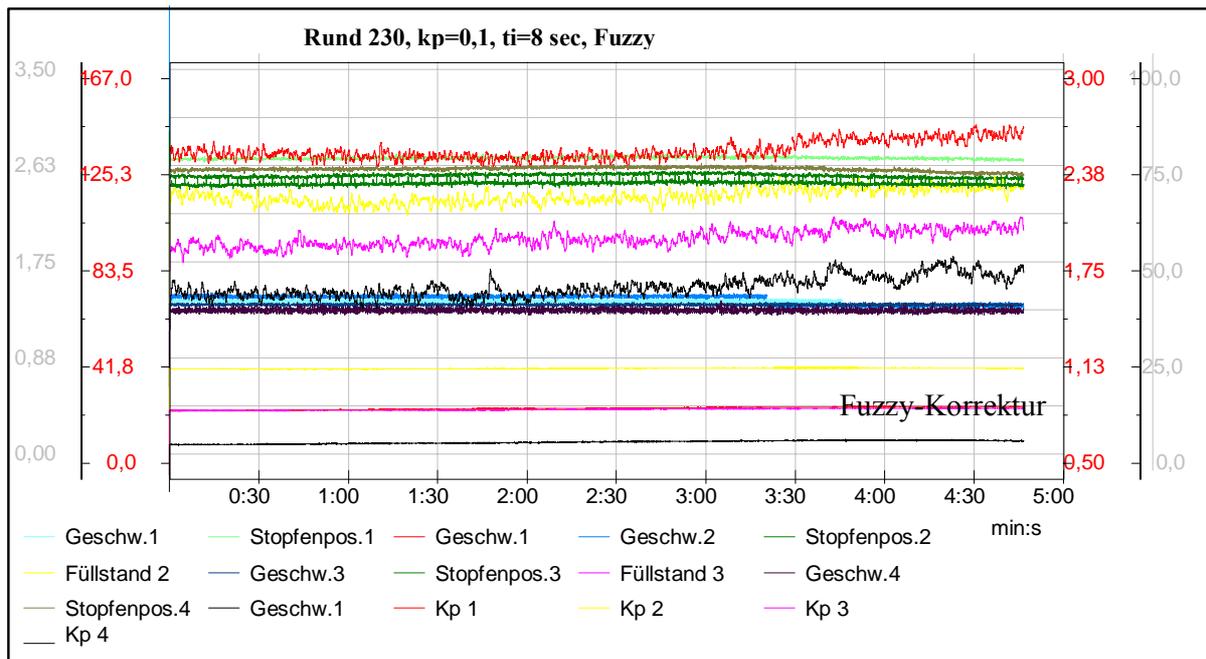


Abbildung 5.3: Verläufe der Giessspiegel nach 1 Stunde und 20 min nach dem Angiessen, Stopfenpositionen und eingestellte Reglerverstärkungen beim Betrieb mit Fuzzy- adaptierten PID- Reglern (Giessspiegel sind zur besseren Darstellung gegeneinander verschoben)

Mit diesen Ergebnissen ist es gelungen, mit gleichem Verteiler und ohne Durchbruch- oder Überlaufgefahr, unterbrochene Sequenzen von bis zu sieben Pfannen zu giessen [10], [18]

Der Leistungstest mit 72 Stunden kontinuierlicher Produktion (Ende August 1997) hat auch gezeigt, dass die Zuverlässigkeit der gesamten Struktur auf eine optimale Einstellung der Reglerparameter zurückzuführen ist.

Die Abbildung 5.4 zeigt eine automatische Angiesssequenz beim den Vorblock-Stranggiessanlage. In Abbildung 5.4 ist die erste Füllung, die Kühlzeit, der Maschinenstart und die Öffnung des Stopfens zu erkennen. Die Sequenz wurde implementiert wie in Kap.2.4.2 beschrieben und in Abbildung 2.20 gezeigt.

In der Abbildung 5.4 ist der Giessspiegel beim Strang 1 als ungefilterte (Rot) und durch den Tschebyschew-Typ I Sperrband Filter gefilterte (Grau) Variabel aufgezeichnet. Es ist deutlich die korrekte Funktion und Wirkung der Filter zu erkennen. Die nicht gewünschte Kokillenoszillationsfrequenz wird gedämpft, ohne die Dynamik des Giessspiegelverlaufs zu unterdrücken.

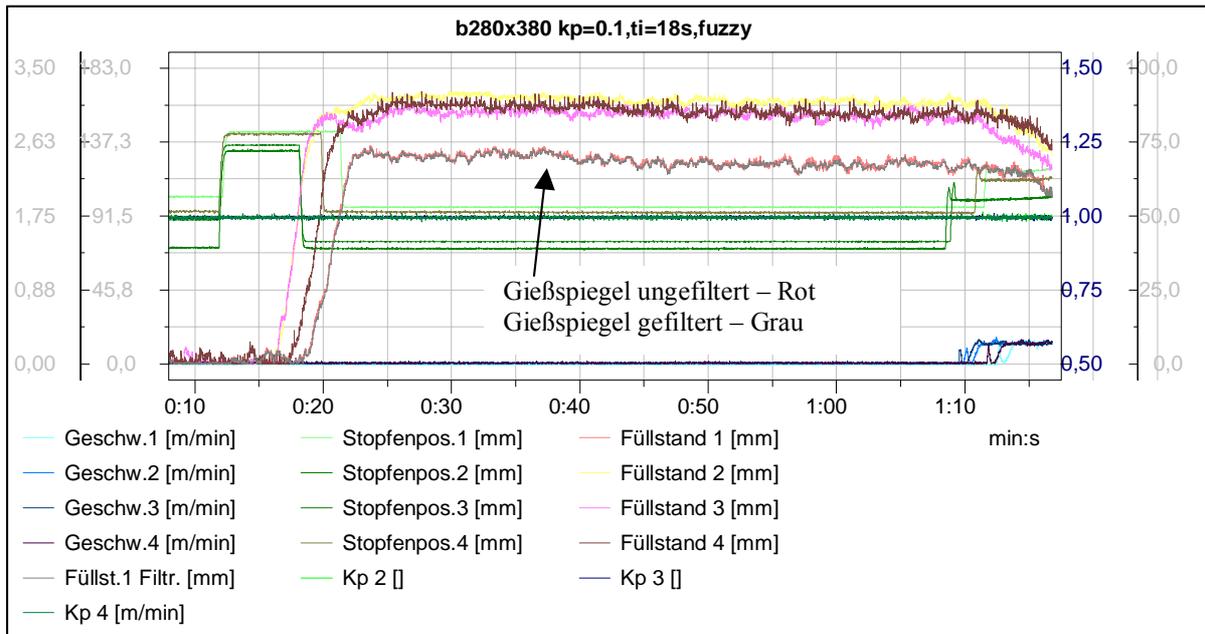


Abbildung 5.4: Verlauf der Giesspiegel während des automatischen Angiessens der Vorblock-Stranggiessanlage in Baotou

Die Überwachungsfunktionen zur Erkennung der Durchbrüche, der Überläufe und die automatischen Sequenzen, um die Maschine zu schützen, wurden mit Erfolg implementiert und getestet. Die Abbildung 5.5 zeigt eine Produktionssituation in der beide Havariefälle zu erkennen sind.

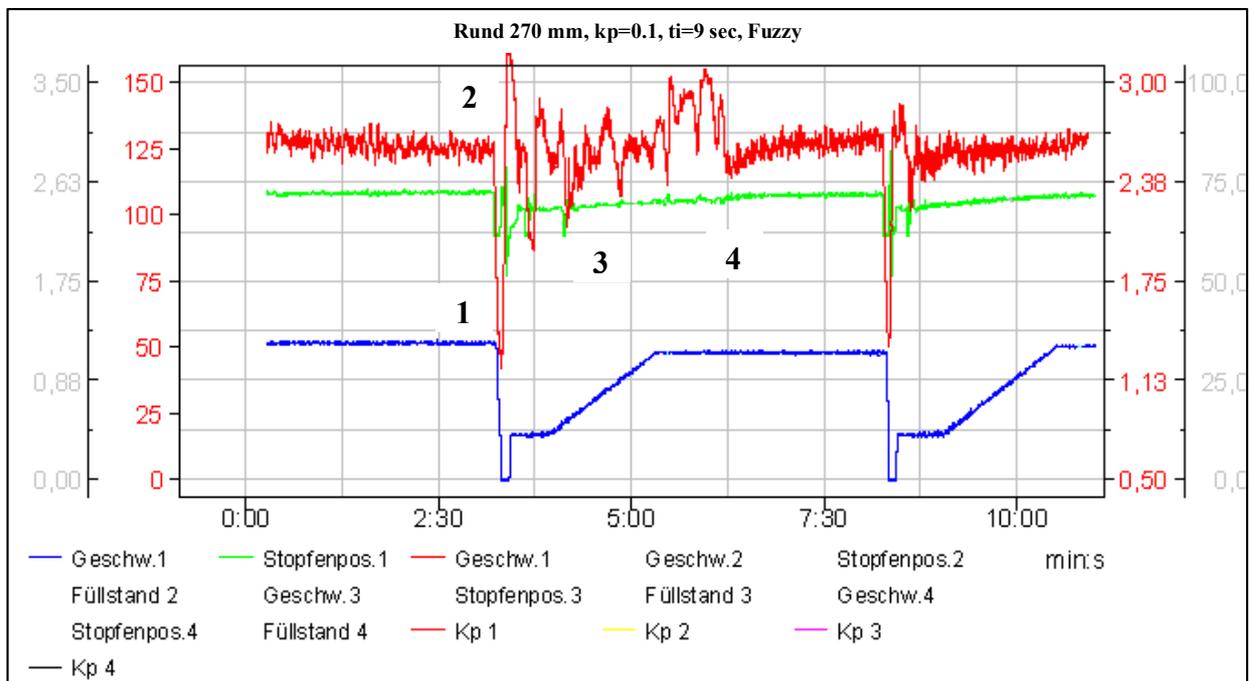


Abbildung 5.5: Automatische Verhinderung eines Durchbruchs durch Überwachungseingriff, Umschalten auf manuellen Betrieb und Wiederanlauf der Automatik (Aufzeichnung mit DAQBOOK [13], [14]).

Zeitpunkt 1: Durchbruchgefahr, Maschine ist gestoppt und der Stopfen wird geschlossen. Der Bediener übernimmt den Strang in Handbetrieb. Dadurch entsteht

kurzzeitig Überlaufgefahr (Zeitpunkt 2) und der Stopfen wird wieder geschlossen. Nach Stabilisierung des Giessens im Handbetrieb (Phase 3) erfolgt der Wiederanlauf der Automatik (Zeitpunkt 4).

5.2. Kombianlage in Taiwan

Das Fuzzy-adaptive Regler-Konzept (so wie in Kap.3.3 beschrieben) für eine Giessspiegelregelung, wurde in einer weiteren Anlage in Taiwan bei Yieh United Steel Corp. implementiert.

Das Problem bestand hier darin, dass gleiche Regler-Konzept ohne Strukturänderungen in ein anderes Leitsystem – Advant Controller, Fabrikat ABB – mit der durch das System zur Verfügung gestellten Hardware, den Projektierungswerkzeugen und der vorgegebenen Software erstellt werden musste.

5.2.1. Prinzip

Um eine möglichst schnelle Bearbeitungszeit in der SPS für die Ausführung von Fuzzy- Komponenten auf hierfür nicht spezialisierter Hardware zu erreichen, wird in dieser ABB ADVANT 450 SPS eine Realisierung des Fuzzy- Reglers als Look-Up-Table mit einer bilinearen Interpolation zwischen ihren Stützpunkten angewendet [11]. Der Standardblock „FUNC-2V“ der ABB Programmibliothek unterstützt diesen Interpolationsmechanismus. Die Bearbeitungszeit liegt für einen Regelblock bei ca. 0,7 msec. (siehe auch [11],[43])

Das PC- Element FUNC-2V (**F**unction **G**enerator of **2** Variable) in dem dieser Interpolationsmechanismus realisiert ist, ist in Abbildung 5.6 dargestellt [1],

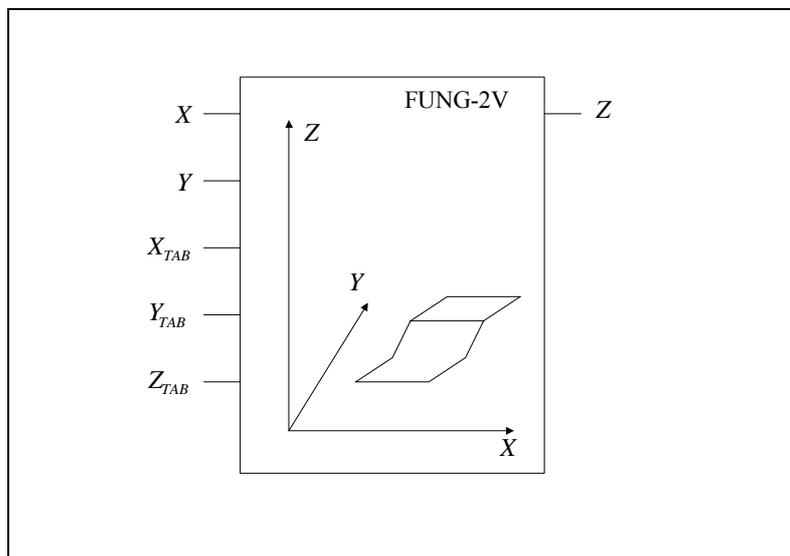


Abbildung 5.6: Blockbild des ABB PC- Elementes, Funktion von zwei Variablen wobei die Eingänge und der Ausgang der Bausteine bedeuten:

X = Variable 1

Y = Variable 2

Z = Ausgang

X_{TAB} = Index der Variablen X

Y_{TAB} = Index der Variablen Y

Z_{TAB} = Ausgangswerte für $X \times Y$

Die bilineare Interpolation wird im ABB Funktionsblock nach folgender Gleichung realisiert [1]:

$$Z = f(x_i, y_j) + K_x \cdot [f(x_{i+1}, y_j) - f(x_i, y_j)] + K_y \cdot [f(x_i, y_{j+1}) - f(x_i, y_j)] + K_x \cdot K_y \cdot [f(x_i, y_j) + f(x_{i+1}, y_{j+1}) - f(x_{i+1}, y_j) - f(x_i, y_{j+1})] \quad (5.2)$$

mit:

$$K_x = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad \text{und}$$

$$K_y = \frac{y - y_j}{y_{j+1} - y_j}, \quad y_j \leq y \leq y_{j+1}$$

Für eine Zugehörigkeitsfunktion der Variablen X und Y , dreiecksförmig mit n bzw. m Terme aus dem Index der Variablen X bzw. Y wird:

$$X_{TAB} = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad x_i = \text{Eingangswert } x \text{ für Maxima der Terme } i$$

$$Y_{TAB} = (y_1, y_2, \dots, y_m); \quad y_j = \text{Eingangswert } y \text{ für Maxima der Terme } j$$

mit x_1 bis x_n bzw. y_1 bis y_m in aufsteigender Folge.

Bei trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktionen wird sowohl der Minimal- als auch der Maximalwert mit einer Zugehörigkeit von Eins verwendet:

$$X_{TAB} = (x_1, x_2, \dots, x_{k \min}, x_{k \max}, \dots, x_n)$$

Terme k trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen

$$x_{k \min} = \text{Eingangswert } x \text{ für Minima der Terme } k - 1$$

$$x_{k \max} = \text{Eingangswert } y \text{ für Minima der Terme } k + 1$$

$Z_{TAB} = n \times m$ Tabelle mit den Werten der Ausgangsgrösse Z wird als Maxima der Ausgangszugehörigkeitfunktionen sowie in der Regelbasismatrix die linguistische Terme eingesetzt.

Dabei wird ein Fuzzy- Algorithmus mit folgenden Operatoren und Eigenschaften abgearbeitet [11]:

1. Die Summe der Zugehörigkeitswerte einer jeden linguistischen Variablen ergibt, unabhängig vom jeweiligen Augenblickswert der zu fuzzifizierenden Eingangsgrösse, stets Eins. Dabei dürfen immer höchstens zwei benachbarte Zugehörigkeitsfunktionen Erfüllungsgrade grösser Null aufweisen.
2. Als t – Norm für die UND- Verknüpfung wird das Produkt der Zugehörigkeitswerte verwendet.
3. Dreiecksfunktionen mit der Center-of-Maximum- Defuzzifizierung (die hier mit der Schwerpunktmethod identisch ist) verwendet, was der „Vorab“-Defuzzifizierung jeder einzelnen Konklusion der Regelbasis gleichkommt.
4. Die Regelbasis ist vollständig und widerspruchsfrei.
5. Die Erfüllungsgrade gleichlautender Regeln addieren sich zu einem Gesamterfüllungsgrad der jeweiligen Regel. Dadurch verstärken sich gleichlautende Regeln gegenseitig in ihrer Wirkung (Inferenzmethode SUM-PROD)

Die Fuzzy-Komponenten werden in den Rechnern (Advant Controller 450) der nächsthöheren Hierarchieebene abgearbeitet (siehe Abbildung 5.7). Die Berechnung der aktuell notwendigen Regelverstärkung in der AC 450 ist weniger zeitkritisch, weil die zeitvarianten Vorgänge vergleichsweise langsam ablaufen. Die interne Realisierung mit ABB spezifischen Programmelementen des Blocks „Fuzzy- Regler (PROD, SUM-PROD)“ ist in der Abbildung 5.8 gezeigt.

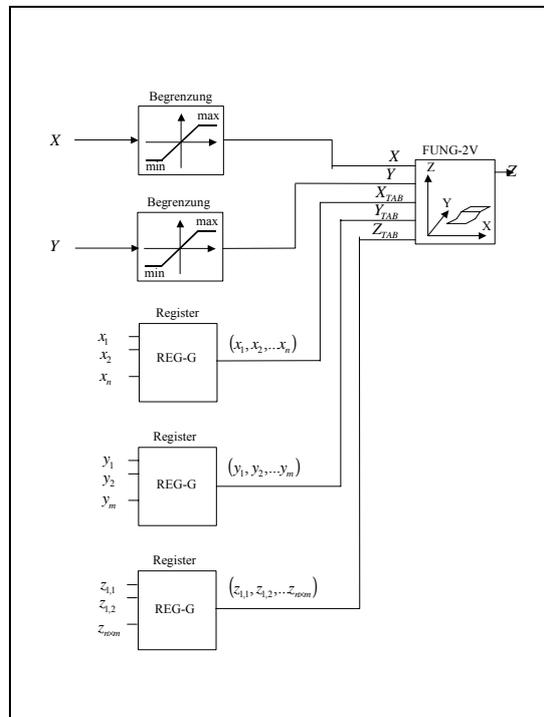


Abbildung 5.8: Aufbau der Fuzzy-Substrukturen

Die Eingänge X und Y des Fuzzy-Blocks werden durch Begrenzungselemente auf deren physikalischen minimum und maximum Werten begrenzt und mit den entsprechenden Eingängen der Look-Up-Table FUNG-2V verbunden. Die Werte der Eingangsgrößen-Zugehörigkeitsmaxima (x_1, x_2, \dots, x_n) und (y_1, y_2, \dots, y_m) werden im Programm durch die Registerbausteine REG-G eingetragen. Die Registerbausteine erzeugen (ABB Programmiersprache spezifisch) die Vektoren X_{TAB} , Y_{TAB} . Die Ausgänge der Registerbausteine sind mit den X – und Y – Stützpunktkoordinateneingängen des Look-Up-Table verbunden. Nach dem gleichen Prinzip sind die Z – Koordinaten der Stützpunkte, die Werte der Ausgangsgrößen-Singletons $(z_{1,1}, z_{1,2}, \dots, z_{1,m})$, über einen Registerbaustein am Eingang Z_{TAB} des Bausteins FUNG-2V definiert. Das Ausleseresultat des Fuzzy-Blocks liegt am Ausgang Z des Look-Up-Tables.

Die Implementierung des Fuzzy- Blocks für die Ermittlung der Filterzeitkonstante (Fuzzy- Plausibilität) basiert auf den Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis in Kap. 3.3.2, Abbildung 3.13. Die Regelbasis mit der Berücksichtigung der Regel WENN $E=null$ und $DE=null$ bei trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktionen (Zellen in Doppelrahmen in der Tabelle 5.2) lautet:

E	negativ	null	null	positiv
DE	-5	-1	1	5
Negativ	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>
-5	10	10	10	10
null	<i>n_ang / lang</i>	<i>ang / kurz</i>	<i>ang / kurz</i>	<i>n_ang / lang</i>
-1	10	1	1	10
null	<i>n_ang / lang</i>	<i>ang / kurz</i>	<i>ang / kurz</i>	<i>n_ang / lang</i>
1	10	1	1	10
Positiv	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>	<i>n_ang / lang</i>
5	10	10	10	10

Tabelle 5.2: Regelbasis zur Ermittlung der Filterzeitkonstante

Damit ergeben sich für die Funktion von zwei Variablen die folgenden Parametrierungen:

$$X_{TAB} = (-5, -1, 1, 5); Y_{TAB} = (-5, -1, 1, 5); Z_{TAB} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 1 & 1 & 10 \\ 10 & 1 & 1 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \end{pmatrix}$$

Die Implementierung des zweiten Fuzzy-Blocks für die Ermittlung des Verstärkungsfaktors des PID- Reglers (Fuzzy- Adaption) basiert ebenfalls auf den Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis in Kap. 3.3.1, Abbildung 3.11, Abbildung 3.12 und Tabelle 3.3 und der aufgestellten Look-Up-Tabelle.

Nach dem Umbau von September 1999 bis April 2000 ist die Anlage in Taiwan in der Lage Brammen oder Knüppel zu produzieren.

Zwei Sätze von Zugehörigkeitsfunktionen für Giessgeschwindigkeit und Stopfenkennlinien (siehe Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4) wurden in der SPS Datenbank gespeichert und automatisch je nach Produktionsbedarf angewählt.

Giess- geschwindigkeit Format	s_langs = sehr langsam	langs = langsam	mittel = mittel	schnell = schnell	s_schnell = sehr schnell
Bramme 1800x175	2,5 mm/s	4,0 mm/s	8,0 mm/s	14,0 mm/s	20,0 mm/s
Knüppel 140x140 mm	5,0 mm/s	10,0 mm/s	20,0 mm/s	40,0 mm/s	60,0 mm/s

Tabelle 5.3: Geschwindigkeitswerte für die zwei Giessformate, Yieh United, Taiwan

Stopfenposition Format	e_klein = extrem klein	s_klein = sehr klein	klein = klein	mittel = mittel	gross = gross	s_gross = sehr gross	e_gross = extrem gross
Bramme 1800x175	3,6 mm	5,4 mm	9,0 mm	16,2 mm	25,2 mm	32,4 mm	39,6 mm
Knüppel 140x140 mm	2,8 mm	4,2 mm	7,0 mm	12,6 mm	19,6 mm	25,2 mm	30,8 mm

Tabelle 5.4: Stopfenpositionswerte für die zwei Giessformate, Yieh United, Taiwan

Somit ergeben sich die Vektoren X_{TAB} und Y_{TAB} mit den Werten der Eingangsgrößen-Zugehörigkeitsmaxima und die Z – Koordinaten der Stützpunkte Z_{TAB} für die Parametrierung der Funktion von zwei Variablen des Fuzzy-Adaptions-Blocks:

$$X_{TAB} = (2.5, 4, 8, 14, 20) \text{ für Bramme bzw. } X_{TAB} = (5, 10, 20, 40, 60) \text{ für Knüppel}$$

$$Y_{TAB} = (3.6, 5.4, 9, 16.2, 25.2, 32.4, 39.6) \text{ bzw. } Y_{TAB} = (2.8, 4.2, 7, 12.6, 19.6, 25.2, 30.8)$$

$$Z_{TAB} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 2 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 2 & 2 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0,5 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

5.2.3. Erprobung

Alle Funktionen der Regelung, Steuerung und Überwachung wurden wie für die Anlagen in Baotou auch hier eingesetzt. Zusätzlich wurden in der Anlage Taiwan neue Funktionen zur Verbesserung der Giessspiegelregelung implementiert:

- Stopfenkennlinien Identifizierung und Anpassung der Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen (wird in das Abs. 5.2.4 beschrieben)
- Momentenregelung und Lastausgleich bei den Ausziehrichtmaschinen (siehe Abs. 2.2.3)

Für die Erprobung in der Stranggiessanlage Taiwan wurden die folgenden Werte verwendet:

- Abtastzeit der implementierten Regelstruktur (Kap.3.3, Abbildung 3.9)
 - MP90 (PID): 20 msec
 - AC450 (Fuzzy-Komponenten): 40 msec
- Eingesetzte Messzeitkonstante der Giessspiegelmessung (Isotop Cäsium137):
 - Bramme: 600 msec
 - Knüppel: 150 msec
- Verstärkungsfaktor der PD-Regler (analog Rexroth) für die Stopfenpositionierung:

$$K_{PH} = 9,7$$
- D-Anteil der PD-Regler (analog Rexroth) für Stopfenpositionierung:

$$T_{DH} = 10 \text{ msec}$$
- Basisverstärkungsfaktor (nicht mit Fuzzy adaptiert) der PID-Giessspiegelregler:
 - Bramme: $K_P = 0,2$
 - Knüppel: $K_P = 0,08$
- Basis I-Anteil (nicht mit Fuzzy adaptiert) der PID-Giessspiegelregler:
 - Bramme: $T_I = 8 \text{ sec}$
 - Knüppel: $T_i = 1,2 \text{ sec}$
- Basis D-Anteil (nicht mit Fuzzy adaptiert) der PID-Giessspiegelregler:

$$T_D = 150 \text{ msec}$$

- Verstärkung und Zeitkonstante für die Störgrössenaufschaltung (Giessgeschwindigkeit):

$$K_{PV} = 1$$

$$T_{DV} = 150 \text{ msec}$$
- Der filtrierte Fuzzy-Adaptionsfaktor multipliziert den Basisverstärkungsfaktor des Reglers, jedoch ist dieser zwischen 0,5 und 1,5 begrenzt.

Technische Daten des Antriebes in Taiwan:

- $P = 11 \text{ kW}$, 460V DS, 60 Hz, 1200 Upm, 24,5 A, 109 Nm,
- n – Reglereinstellung:

$$K_p = 5$$

$$T_I = 200 \text{ msec}$$
- Lastausgleichseinstellung:
 - Statikfaktor = 10 %
 - Lastanteil = 100%

Mit einer unterschiedlichen Implementationsmethode wie in den zwei Anlagen Baotou, V.R.China, zeigte die Fähigkeit der Fuzzy – Komponenten, unabhängig von der Abnutzungssituation, eine sehr gute Regelqualität während der praktischen Erprobungen zu gewährleisten (Abbildung 5.9 bei Twin Knüppel 140 x 140 mm und Abbildung 5.10 bei Bramme 1800 x 175 mm).

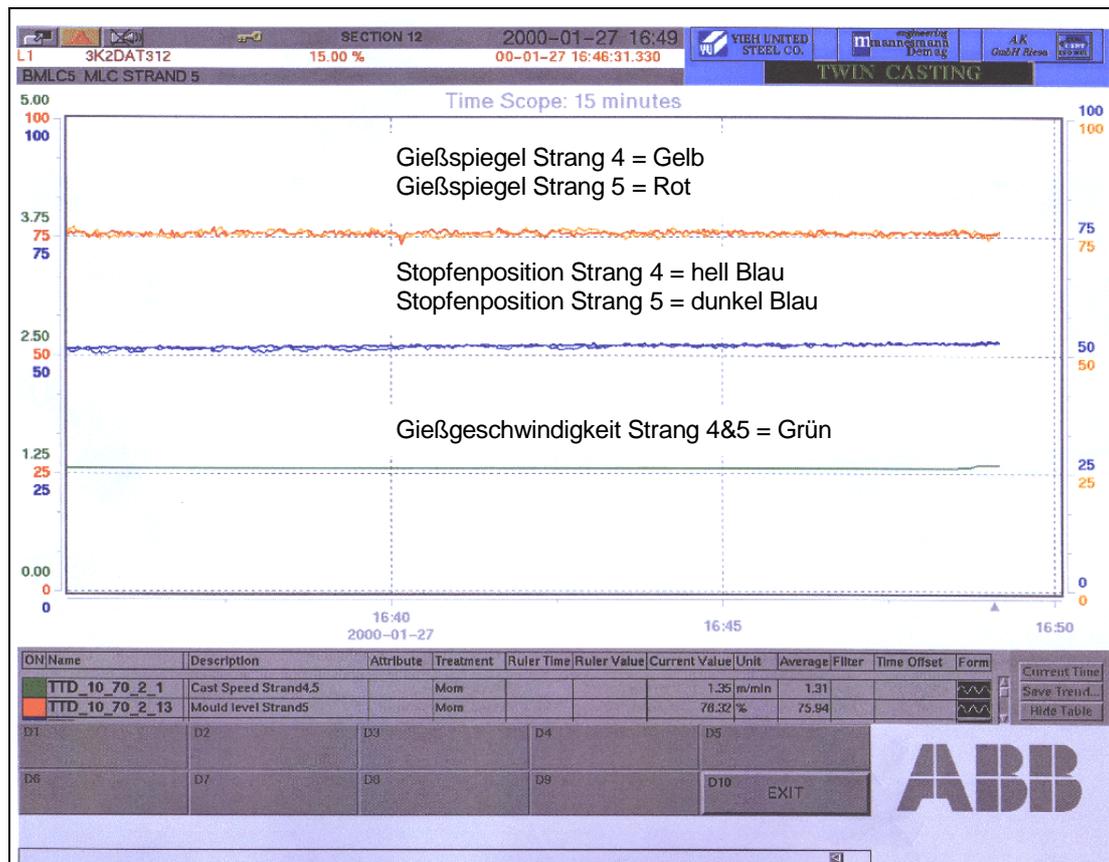


Abbildung 5.9: Verlauf der Giesspiegel Strang 4 und 5, Knüppel 140 x 140 mm in Taiwan

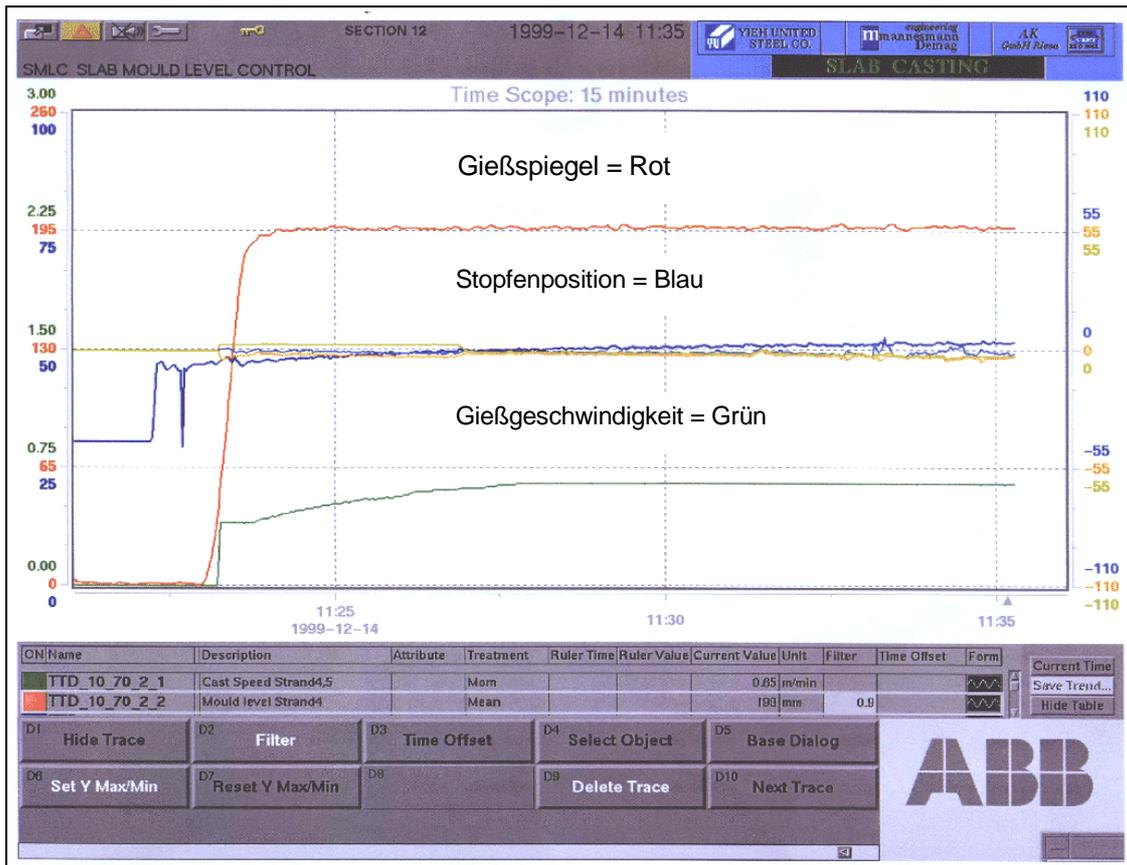


Abbildung 5.10: Verlauf der Giessspiegel beim Brammengiessen 1800 x 175 mm, Taiwan

In der Abbildung 5.10 ist eine gute Regelqualität auch bei starken Störungen zu beobachten. Trotz der Giessgeschwindigkeitsänderung, die rampenförmig erhöht wird, bleibt der Giessspiegel nach dem Angiessen konstant. (wirksame Störgrössenaufschaltung)

Die Abbildung 5.11 ist eine Bildschirm Hardcopy von einer Langzeittrendkurvenmaske aus der ABB Advant Visualisierung. Dargestellt sind die Verläufe von Giessspiegel, Stopfenposition, Giessgeschwindigkeit, Pfannengewicht und Fuzzy-Korrekturfaktor über eine gesamte Giessequenz von fünf Pfannen. Die in den Abbildung notierten Phasen 1 bis 6 haben keine technologische Bedeutung, die Verteilung ist für die Vereinfachung der Prozessanalyse eingefügt.

In der Phase 1 nimmt der Stopfen immer eine höhere Position (bis ca. 12 mm) bei konstanter Giessgeschwindigkeit ein. Das bedeutet eine Verschiebung in die Richtung einer flacheren Stopfenkennlinie (d.h. einer kleineren Kreisverstärkung). Die implementierte Fuzzy-Struktur reagiert korrekt und der Fuzzy-Korrekturfaktor vergrößert die Verstärkung der PID-Regler.

In Phase 2 ist der Verlauf umgekehrt, die Stopfenposition ist niedriger, die Giessgeschwindigkeit ist konstant. Der Fuzzy-Korrekturfaktor verringert die Verstärkung der PID-Regler. In den Phasen 3 bis 6 ist die Stopfenposition quasi-konstant, die Adaption erfolgt mit leichten Anpassungen.

Während der gesamten Giessequenz (6,5 Stunden) ist der Giessspiegel konstant geblieben, damit wird eine sehr gute Regelqualität gewährleistet.

Die gemessenen Schwankungen des Giessspiegels (optische Messung) in der Produktion waren $\pm 2,7$ mm, wobei eine Verbesserung gegenüber den vorgegebenen Werten (± 3 mm) erreicht wurde.

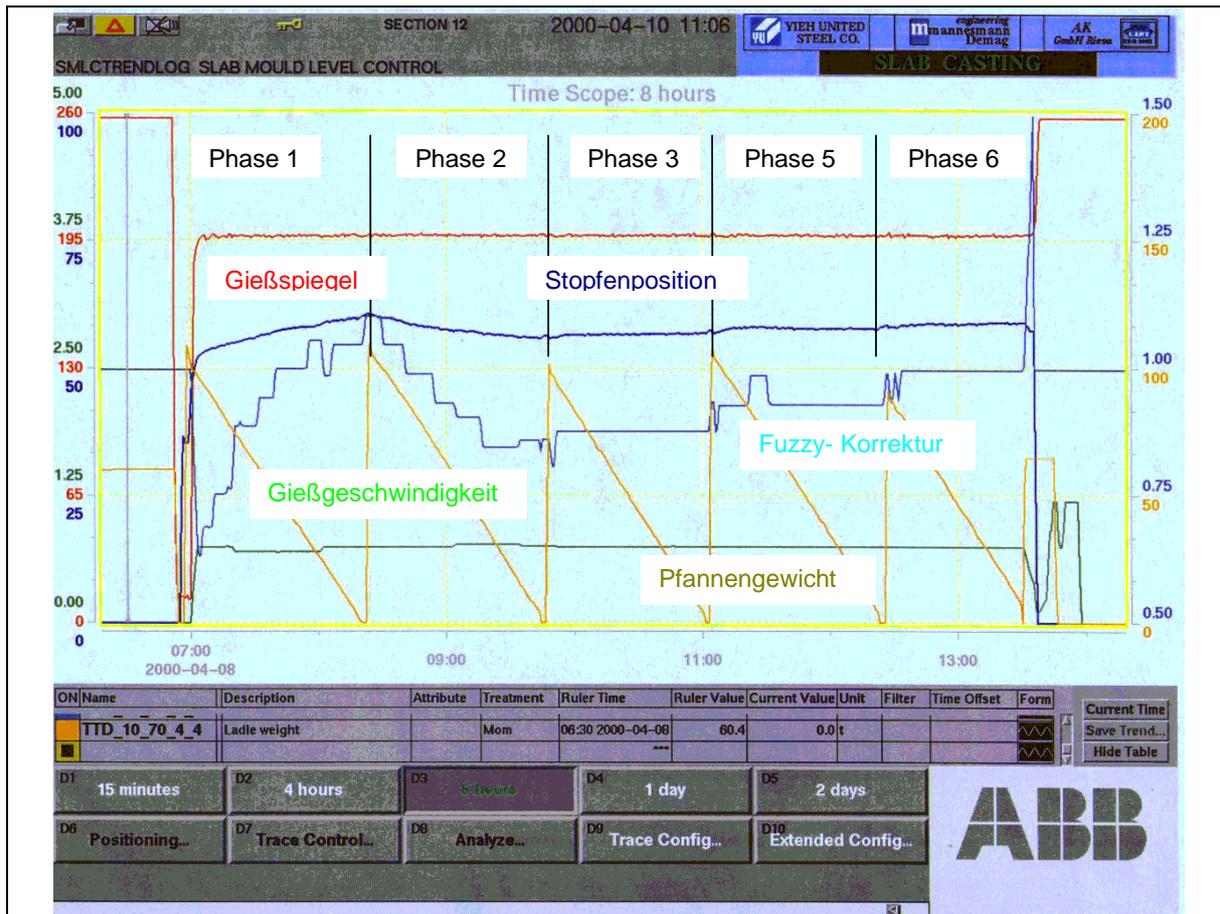


Abbildung 5.11: Giessequenz Bramme, Taiwan

Zu den guten Ergebnissen der implementierten Giessspiegelregelung hat die Automatisierung und Regelung (Giessgeschwindigkeit und Lastausgleich) der Ausziehrichtmaschinen einen grossen Anteil.

Beide Regelstrukturen für den Lastausgleich zwischen den Antrieben der Ausziehrichtmaschine (siehe Abs. 2.2.3) wurden in Taiwan eingesetzt und getestet, jedoch hat die Variante B (Abs. 2.2.3.2) nicht die zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert. Grund dafür sind die mechanischen Spiele im Getriebe, sowie ein mechanischer Schlupf am Kaltstrang.

In dieser Situationen verursacht die Übersteuerung eine schlagartige Geschwindigkeitsänderung, die nicht nur die Mechanik belastet, sondern auch die Konstanz des Strangverlaufs beeinflusst (Strang „rüttelt“) und die Giessspiegelregelung verschlechtert.

Dabei wurden bis $\pm 3\%$ Stranggeschwindigkeitsänderungen gemessen.

Die Variante A (Abs. 2.2.3.1) wurde mit sehr guten Ergebnissen inbetriebgenommen: In Abbildung 5.12 ist eine Aufzeichnung der Giessgeschwindigkeit und der vier Motorenmomente während des Giessens (Anlage Yieh United Taiwan) dargestellt.

Nach der Inbetriebnahme der Antriebe wurden folgende Ergebnisse erreicht:

- Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den vier Antrieben $< \pm 1\%$
- Momentenausgleich (Momentendifferenzen) $< \pm 1\%$,

somit wurde die Beeinflussung der Giessgeschwindigkeit auf den Giessspiegel minimiert.

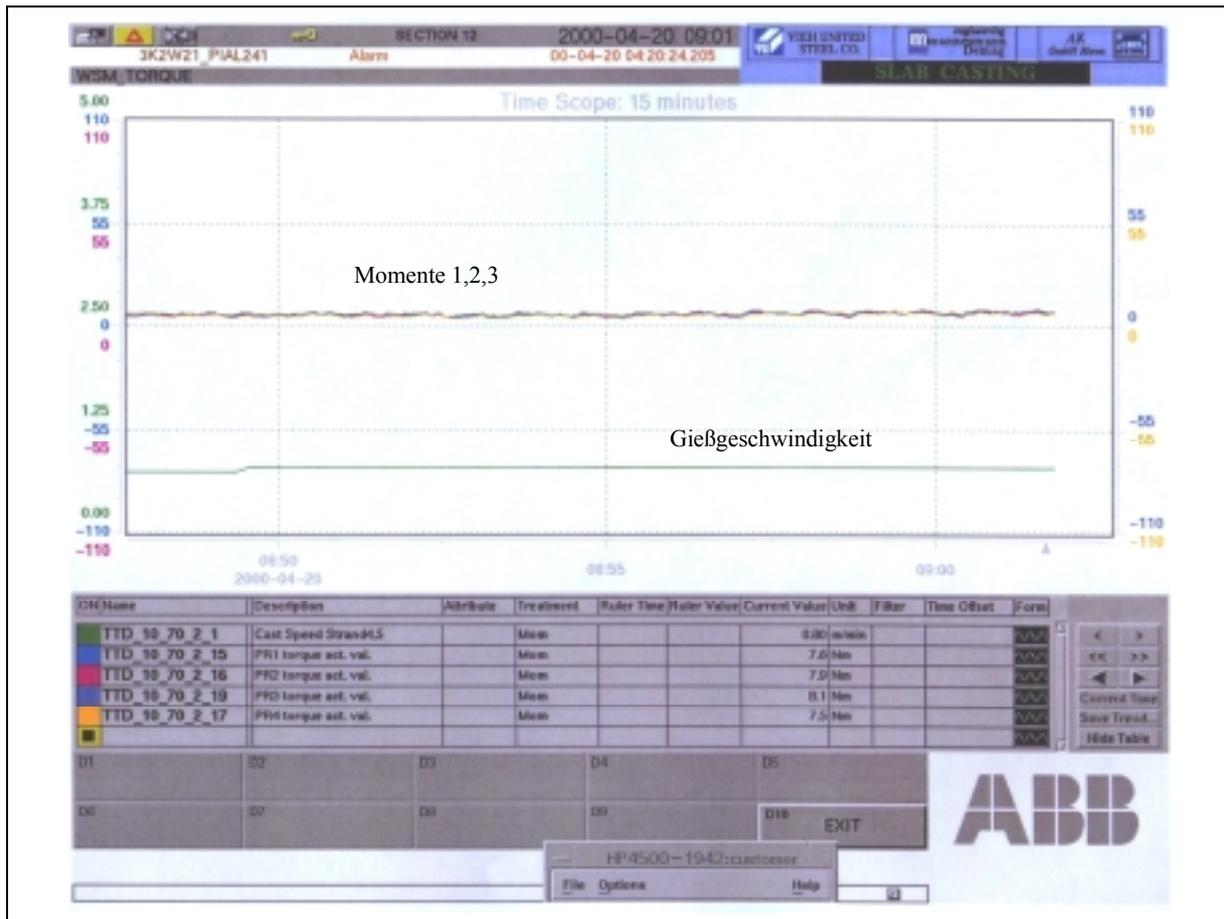


Abbildung 5.12: Momente und Giessgeschwindigkeit der Ausziehrichtmaschine im Giessverlauf

5.2.4. Stopfenkennlinien Identifizierung und Anpassung der Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen

Während der Inbetriebnahme und Warmoptimierung (April 2000 in Produktion) wurde bemerkt, dass der Verlauf der Fuzzy-Korrektur über eine Giessequenz und zwischen verschiedenen Giessequenzen sehr unterschiedlich war.

Bei manchen Giessequenzen hatte der Korrekturfaktor Werte immer kleiner als Eins. In extremem Fall blieb der Korrekturfaktor stets an der unteren Grenze (0,5), während sich in der gesamten Giessequenz die Regelqualität verschlechterte.

Damit war die Fuzzy-Adaption unwirksam. Die Ursache lag in den Zugehörigkeitsfunktionen der Giessgeschwindigkeit und der Stopfenposition.

Es wurde festgestellt, dass die eingesetzten Stopfen von zwei verschiedenen Herstellern geliefert wurden, die unterschiedliche Kennlinien hatten. Um diese Störsituation zu erkennen und zu eliminieren, wurde eine neue Funktion erfolgreich implementiert (siehe Abbildung 3.9):

- Während des Angiessens wird eine Identifikation der Stopfenkennlinie durchgeführt (siehe Beschreibung in Kap.2.4)
- Die Maximum der Zugehörigkeitsfunktion des Terms *mittel* der Giessgeschwindigkeit (im Folgenden als Referenzwert bezeichnet) entspricht als Wert der Giesstartgeschwindigkeit und ist immer konstant.
- Die berechnete (oder beim Handstart gemessene) Stopfenposition beim Giesstart soll dem Referenzwert der Stopfenposition entsprechen, wenn beim

neuen Angiessen immer neue Stopfen / Ausgüsse (ohne Abnutzung) eingesetzt werden.

- Im Programm wurde eine Konstante vorgesehen, die mit den Stützpunkten der Zugehörigkeitsfunktion der Stopfenposition multipliziert wird, so dass die Stopfenangiessposition dem Referenzwert entspricht.
- Die Konstante ergibt sich als Quotient der vorletzten Stopfenangiessposition und der aktuellen Stopfenangiessposition.
- Mit dieser Kennlinienanpassung wird beim Start der Fuzzy-Korrekturfaktor „Eins“ entsprechend dem Referenzwert des Korrekturwertes.

Beim Einsetzen eines neuen Stopfens mit der gleichen Geometrie wie der vorherige wird die Korrekturkonstante „Eins“ und die Stützpunkte der Zugehörigkeitsfunktionen bleiben unverändert.

5.3. Stranggiessanlage in Hunedoara

Eine weitere Implementierung des Regelungskonzeptes vom Abs.3.3, Abbildung 3.9 wurde in einer Anlage in Hunedoara/Rumänien realisiert. Es handelt sich um eine 5x Stranggiessanlage für drei Formate: 150 mm Rund, 180 mm Rund und 250 x 270 mm Vorblock.

Zwischen der 15. Oktober und den 15. Dezember 2001 wurde das gesamte Automatisierungssystem, die geregelten Antriebe, die Messungen und die Regelungen modernisiert. Die mechanischen und hydraulischen Komponenten der Giessspiegelregelung sowie die Ausziehrichtmaschinen in der Anlage sind identisch mit die Anlage in Taiwan.

Es ergab sich die Anforderung, dass der PID-Regler mit Fuzzy Adaption für die Giessspiegelregelung mit alle seinen Komponenten und Funktionen (wie in Taiwan realisiert) mit einer neuen Hardware und Software zu implementieren waren.

Die eingesetzten Hardwarekomponenten für das Leitsystem und die Steuerungen waren WinnCC und Simatic S7-400 der Fa. Siemens. Der Giessspiegelregler wurde als Software Regler in separater SPS realisiert (siehe Abs. 4.1.3, Abbildung 4.4).

Für die Implementierung des Regelungskonzeptes wurden die Standard Funktionsbausteine (PID und Fuzzy-Komponenten) das modulare Regelungskpaket der Siemens Simatic S7-400 benutzt [56]. Die Projektierung der Fuzzy-Strukturen wurden mit Siemens Fuzzy Control++ Windows basierter Software durchgeführt [58].

Für die Erprobung in der Stranggiessanlage in Hunedoara wurden die folgenden Werten verwendet:

- Abtastzeit der implementierten Regelstruktur
S7-400 (PID) S7-400 (Fuzzy-Komponenten): 20 msec
- Eingesetzte Messzeitkonstante der Giessspiegelmessung (Isotop Cobalt 60):
Rund 150: 100 msec
Rund 180: 150 msec
Vorblock 250 X270 mm: 600 msec
- Verstärkungsfaktor der PD-Regler (analog Rexroth) für die Stopfenpositionierung:
 $K_{PH} = 8,7$
- D-Anteil der PD-Regler (analog Rexroth) für Stopfenpositionierung:
 $T_{DH} = 10 \text{ msec}$
- Basisverstärkungsfaktor (nicht mit Fuzzy adaptiert) der PID-Giessspiegelregler:
Rund 150 mm: $K_p = 0,1$
Rund 180 mm: $K_p = 0,12$

Vorblock 250 X270 mm:

$$K_p = 0,15$$

- Basis I-Anteil (nicht mit Fuzzy adaptiert) der PID-Giessspiegelregler:

Rund 150 mm:

$$T_i = 1,6 \text{ sec}$$

Rund 180 mm:

$$T_i = 1,8 \text{ sec}$$

Vorblock 250 X270 mm:

$$T_i = 3 \text{ sec}$$

- Basis D-Anteil der PID-Giessspiegelregler:

$$T_D = 150 \text{ m sec}$$

- Verstärkung und Zeitkonstante für die Störgrössenaufschaltung (Giessgeschwindigkeit):

$$K_{pV} = 1$$

$$T_{DV} = 150 \text{ m sec}$$

- Der filtrierte Fuzzy-Adaptionsfaktor multipliziert den Basisverstärkungsfaktor des Reglers, jedoch ist dieser zwischen 0,5 und 2 begrenzt.

Technische Daten des Antriebes:

- P = 7,5 kW, 400V DS, 50 Hz, 1000 Upm, 17,5 A, 75 Nm,
- n – Reglereinstellung:

$$K_p = 4,7$$

$$T_i = 200 \text{ m sec}$$

- Lastausgleicheinstellung:

Statikfaktor = 10 %

Lastanteil = 100%

- Die Zugehörigkeitsfunktionen, sowie die Regelbasis für die implementierten Fuzzy- Komponenten sind wie in Kap. 3.3 beschrieben.

Besonderheit dieser Anlage ist, dass in Vergleich mit den Anlagen Baotou und Taiwan die Zugehörigkeitsfunktionen der Stopfenposition im negativen Bereich der Position definiert wurden (siehe Abbildung 5.13).

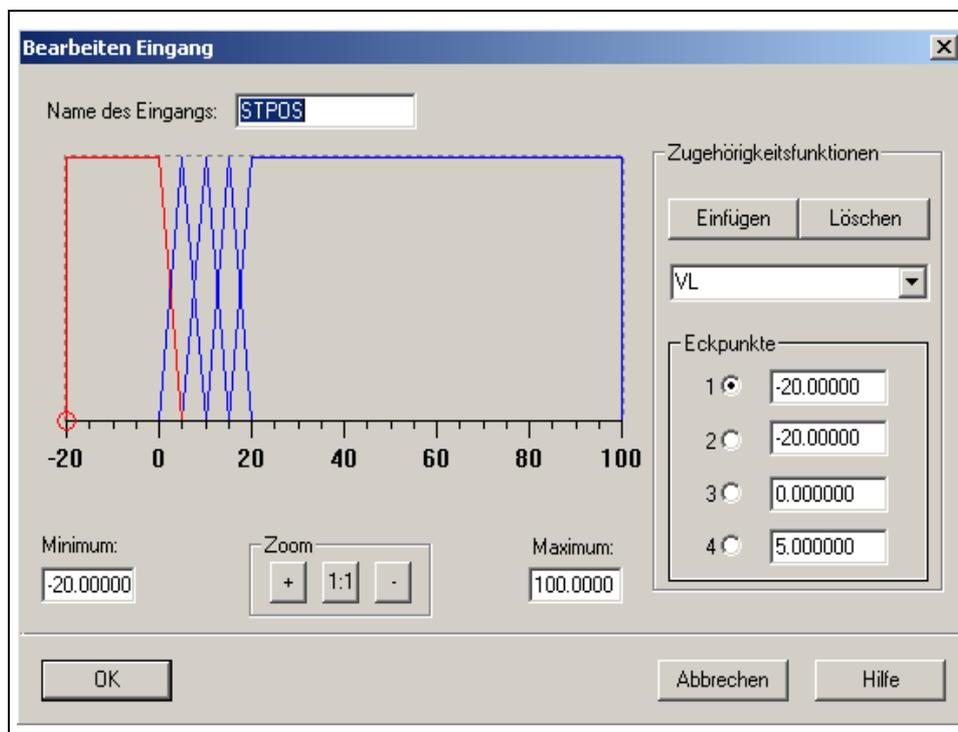


Abbildung 5.13: Zugehörigkeitsfunktionen der Stopfenposition (Anlage in Hunedoara)

Die vom Kunden eingesetzten Stopfen hatten eine sehr hohe Abnutzung. Die aktuelle Stopfenposition wurde nach den ersten gegossenen Pfannen kleiner, als die am Anfang gemessene null Position.

In der Abbildung 5.14 ist der Zeitverlauf der Giessspiegel, der Stopfenposition und der Giessgeschwindigkeit für Strang 3, Giessformat 150 mm Rund dargestellt. Bemerkungswert ist die sehr präzise Angiessautomatiksequenz und die kurze Anregelzeit nach der Reglereinschaltung. Das gleiche Ergebnis wurde für alle Stränge und Giessformate erreicht.

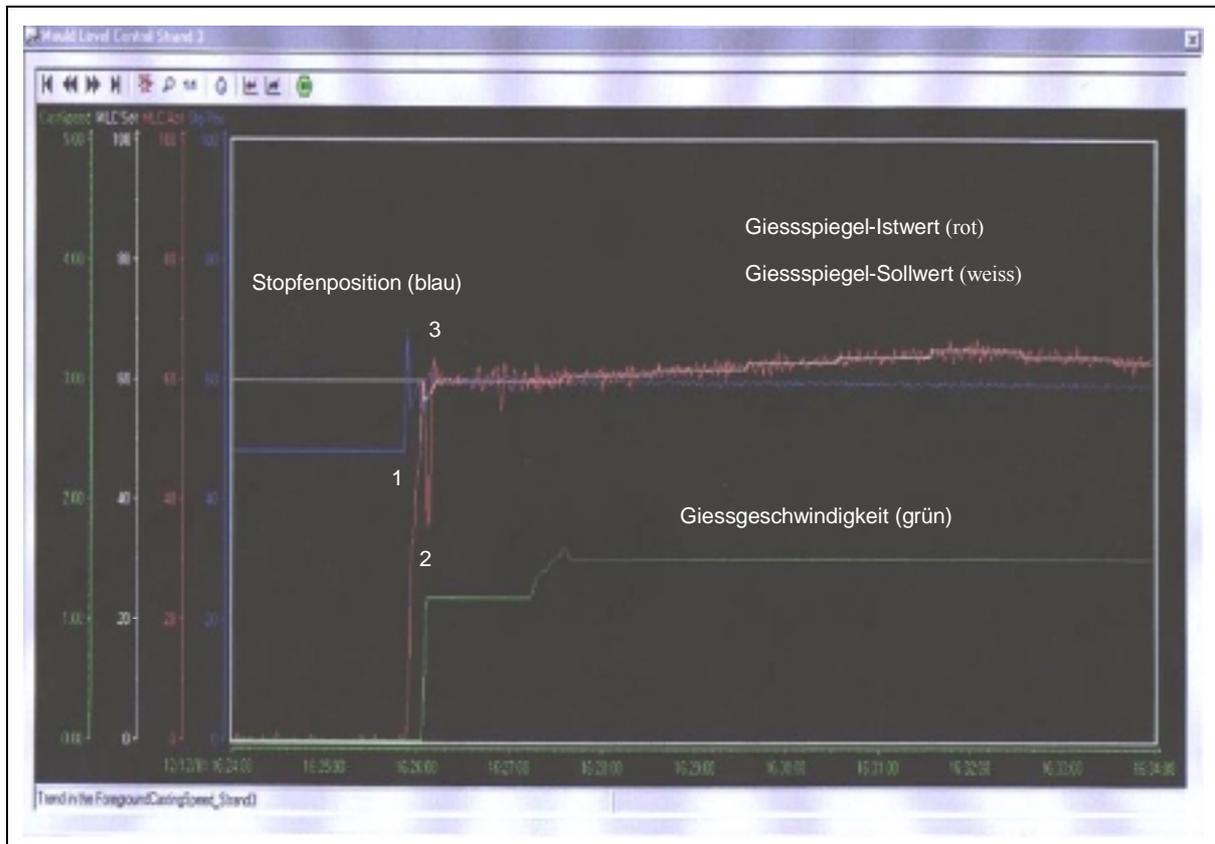


Abbildung 5.14: Verlauf der Giessspiegel beim 150 mm Rundgiessen, Hunedoara

Zum Zeitpunkt 1 öffnet sich automatisch der Stopfen und die Kokille wird gefüllt. Bei 50% Giesspiegel wird die Ausziehrichtmaschine gestartet (Zeitpunkt 2). Der Stahlpegel sinkt während des Abzuges, wird aber bei der Regler-Freigabe (kurz nach Maschinenanlauf) schnell und praktisch ohne Überschwingungen an den Sollwert geführt. Nach Zeitpunkt 3 läuft der Strang mit normaler Giessgeschwindigkeit und die Regelung gewährleistet die gewünschte $\pm 2\%$ Genauigkeit des Giessspiegels.

Die Lastausgleich mit Momentenregelung der Antriebe der Ausziehrichtmaschine wurde auch hier (wie in der Anlage Taiwan) mit vergleichbaren guten Ergebnissen implementiert.

Der Zeitverlauf der Giessgeschwindigkeit in der Abbildung 5.14 beweist eine sehr hohe Genauigkeit der Regelung der Ausziehrichtmaschinen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Varianten mit Fuzzy-Komponenten befriedigende Ergebnisse liefern, wenn vom ursprünglichen Arbeitspunkt abgewichen wird.

Die letzte Implementierung mit einer kurzen Projektierungs- und Optimierungszeit zeigt, dass die entworfene Giessspiegelregelung mit Fuzzy-Adaption zu einer industrietauglichen Form entwickelt wurde. Sie ist mit verschiedenen Leitsystemen eingesetzt worden und die vergleichbaren Ergebnisse zeigen die Überlegenheit des Konzeptes gegenüber den konventionellen Regelungen.

Die kontinuierlich gewonnene Erfahrung mit der Implementierung des Regelungskonzeptes ermöglicht die Programmierung der Regelungsstruktur und seinen Nebenfunktionen in nur 15 Tagen.

Die Tatsache, dass die Inbetriebnahme in Hunedoara um zwei Wochen verkürzt wurde und die Warmoptimierung der Giessspiegelregler inklusive vollautomatischem Angiessen in drei Tagen für Vorblockformat bzw. fünf Tagen für 150 mm und 2 Tagen für 180 mm Rundformat durchgeführt wurde, ist auf eine kontinuierliche Verbesserung der Inbetriebnahmestrategie zurückzuführen.

Die in Taiwan und Hunedoara/Rumänien implementierte Regelungs- und Steuerungsstruktur mit konventionellen und Fuzzy-Komponenten, in Zusammenhang mit der Regelungslösung für die Ausziehrichtmaschinen, sowie eine korrekte Störgrössenaufschaltung und die Filtrierung der Kokillenoszillationfrequenzen umschreibt das System als ganzheitliche Automatisierung einer Strangiessanlage [21].

6. Allgemeine Hinweise zur Inbetriebnahme

Die Anlagenbeschreibung und die Analyse der Hauptkomponenten und Funktionen einer Stranggiessanlage stellen eine komplexe Aufgabe für die Automatisierung des Prozesses dar. Die Lösungen für die Teilanlagen und deren Abhängigkeiten müssen die Gesamtanlage berücksichtigen und als ganzheitliche Automatisierung der Stranggiessanlage betrachtet werden.

Es sind langsame (Gewichts- und Wasserdurchflussregelungen) und schnelle Prozesse (Servosysteme, Geschwindigkeits- und Momentenregelungen, Lastausgleich), lineare, nichtlineare und zeitvariante Prozesse (Giesspiegelregelung) zu bearbeiten.

Die Umwandlung des flüssigen Stahls in solide Endprodukte erlaubt keinen Handbetrieb der Anlage. Deshalb sind umfangreiche Steuerungsketten, die alle Teile der Anlage umfassen, notwendig.

Das komplexe Bedien- und Beobachtungssystem zusammen mit den Steuerungen, den Antrieben und Regelungen ermöglicht eine vollautomatisierte Produktion.

Die Betriebsstörungen können in den überwiegenden Fällen grosse Anlagenschäden, Produktionsverluste und hohe Reparaturkosten verursachen. Die Lösungen für die Automatisierung und die Antriebe müssen eine hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit gewährleisten. Hardware- und Softwarekomponenten sind in die Automatisierung implementiert, um Störungen zu vermeiden oder Störungsfolgen zu minimieren.

Diese Besonderheiten stellen eine schwierige Aufgabe für die Inbetriebnahme der Anlage dar. Die Freigabe zum ersten Guss wird nur dann gegeben, wenn alle Komponenten, Funktionen, Überwachungen und die gesamte Automatisierung getestet und optimiert sind.

Eine mangelhafte Funktion in einem der Anlagenteile, ob Ausziehrichtmaschine, Spritzwassersystem, Giesspiegelregelung oder Auslaufsystem, hat eine Unterbrechung des Giessprozesses zur Folge. Die Inbetriebnahme stellt daher einen wesentlichen Teil der Abwicklung eines Projektes dar.

Die Inbetriebnahme ist eine Anzahl von Tätigkeiten, die in einer logischen Reihenfolge durchgeführt werden, um die komplexen mechanischen, hydraulischen und elektrischen Ausrüstungen zu harmonisieren und die gewünschten Funktionen für eine sichere, zuverlässige und hochqualitative Produktion zu erreichen.

In der Abbildung 6.1 sind die Bestandteile der Inbetriebnahme, die Reihenfolge der Tätigkeiten und deren Abhängigkeiten dargestellt.

Die ganzheitliche Automatisierung umfasst den komplexen Verbund von Teilbereichen zu einer einheitlich funktionierenden Gesamtanlage.

Die aufgezeichneten Schritte sind dabei einzuhalten, wobei einzelne Tätigkeiten (Parametrierung der Einzelantriebe, Funktionen von verschiedenen Ventilen, Bewegung von Zylindern, Funktionen von Mess- oder Wiegeeinrichtungen) auch parallel durchgeführt werden können.

Für die Inbetriebnahme der elektrotechnischen Ausrüstung und der Automatisierung einer Stranggiessanlage wird folgendes Personal benötigt:

- Antriebstechniker
- Programmierer für die Steuerungen
- Programmierer für die Bedien- und Beobachtungssysteme (Visualisierung)
- Mess- und Regelungsingenieure.

Das eingesetzte Inbetriebnahmepersonal soll nicht nur für die speziellen Bereiche gut ausgebildet sein, sondern soll den Ablauf der gesamten Anlage verstehen und die Systemeigenschaften der implementierten Komponenten und technologischen Funktionen beherrschen.

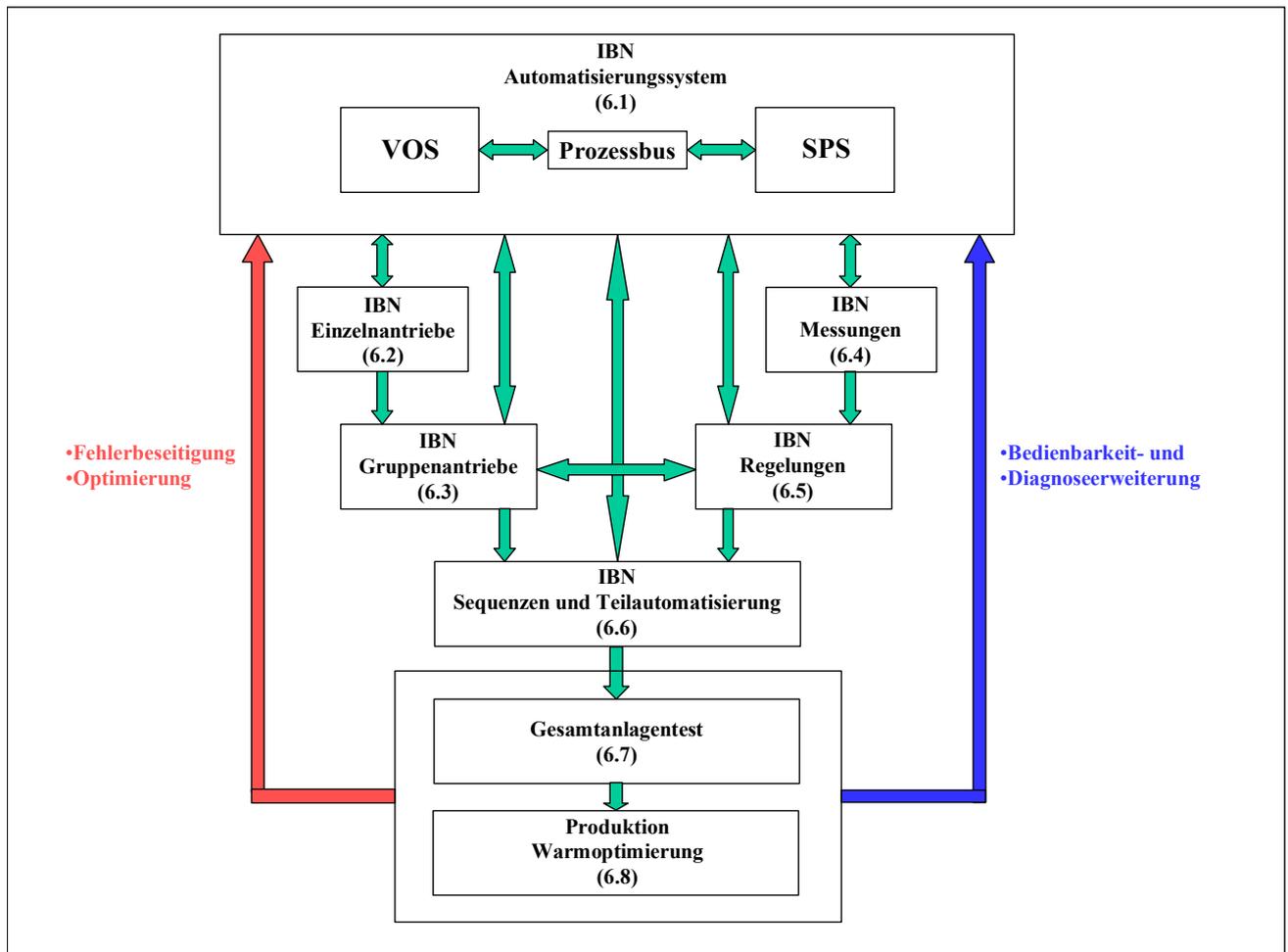


Abbildung 6.1: Ablauf einer Inbetriebnahme

6.1. Inbetriebnahme der Automatisierungssysteme

Das Automatisierungssystem mit seinen drei Bereichen: Steuerung, Bedien- und Beobachtungssystem und Prozessbus, ist der wichtigste Teil einer modernen Anlage. Hier werden alle binären- und analogen Signale gesammelt, von der einfachen Logik bis zu umfangreichen und komplizierten Algorithmen programmiert, die die Kommunikation zwischen den Teilnehmern gewährleisten.

So wie in Abbildung 6.1 dargestellt, ist das Automatisierungssystem die Basis für die gesamte Inbetriebnahme.

Nachdem das System hochgefahren worden ist, vollzieht sich die Inbetriebnahme schrittweise bis zur Betriebsbereitschaft. Die Inbetriebnahmeschritte sind wie folgt zusammengefasst:

- SPS und VOS Stationen hochfahren und mit der Systemsoftware laden.
- Kommunikation zwischen Teilnehmern über Prozessbus (Ethernet) testen.
- Anwendersoftware laden.
- Feldbuskommunikation testen. Teilnehmer am Feldbus testen (dezentrale Peripherien, geregelte Antriebe, andere Geräte)
- Eingänge / Ausgänge testen.

Die Systemkonfiguration und die Systemparameter werden vor der Lieferung programmiert und getestet. Fremde Teilnehmer am Prozessbus, wie Werksrechner, Unterlieferanten PC und SPS werden auf der Baustelle getestet.

In der Endphase (Anlagentest, Kalt- und Warmoptimierung) können durch Optimierungen und von Anlagebedienern gewonnenes Wissen durch zusätzliche Funktionen wie Bedien- und Diagnoseerweiterungen ergänzt werden.

6.2. Inbetriebnahme der Einzelantriebe

Bei der Inbetriebnahme der Einzelantriebe werden alle Verbraucher (Motoren, Ventile, hydraulische und pneumatische Antriebe) und deren Befehlsgeber und Sensoren ohne Verknüpfung zu anderen Anlagenteilen auf Funktion einzeln getestet. Hierzu gehören auch geregelte Antriebe. Zum Beispiel werden bei frequenzgeregelten Antrieben alle antriebspezifischen Parameter eingegeben, anschliessend erfolgt eine Prüfung im Leerlauf mit vom Getriebe entkoppeltem Antrieb sowie mit gekoppeltem Antrieb.

Folgenden Schritte werden in dieser Phase berücksichtigt:

- Justierung und Prüfung der elektrotechnischen Überwachungen und Verriegelungen (Überstrom, Überspannung, Erdschlussüberwachung, usw.)
- Leerlauf im Einrichtbetrieb und Prüfung der Drehrichtung (Motoren), Laufrichtung (Hydraulik- und Pneumatikantriebe)
- Parametrierung der geregelten Antriebe, Eingabe der Motorenennwerte, Überwachung, Meldung und Abschaltgrenzen (Strom-, Spannung-, Momentgrenzen, u.s.w.).
- Leerlauftest für die geregelten Antriebe, Normierung der Nennwerte, Anpassung der Istwerte, (Impulsgeber, Strommessung, Spannungsmessung)
- Optimierung der Stromregler, Voroptimierung der Geschwindigkeitsregler.
- Parametrierung und Test der Hochlauf- und Bremsrampen.
- Test der Nebenantriebe (Motorlüfter, Bremsen, Umwälzpumpen), deren Überwachungen und Verriegelungen.
- Ankopplung an Mechanik und Test mit den zu bewegenden Anlagenteilen.
- Mechanische Justierung der Endschalter, Kopierwerke, Not-Aus Schalter.
- Optimierung der Geschwindigkeitsregler mit der angekoppelten Masse.
- Aufzeichnung der Reibungskräftekennlinie für die Antriebe mit Momentregelung.
- Positions-Istwert Prüfung und Normierung (Umsetzfaktor der Getriebe) für die Antriebe mit Positionierung, oder Wegverfolgung (Drehturm, Verteilerrinnen, Quertransport, Ausziehrichtmaschinen).
- Positionierungskreis schliessen und optimieren (Hochfahrrampe, Bremsweg, Maximal- und Endpositionierungsgeschwindigkeit setzen).

Start / Stop, Drehrichtungsbefehle werden von lokalen Pulten oder von Visualisierungsmasken, über SPS und Feldbuskommunikation vorgegeben.

Die Meldungen, Überwachungen und Abschaltungen werden in der SPS bearbeitet und in den Beobachtungsmasken und im Störmeldesystem angezeigt.

Die Sicherheitssequenzen (Not-Aus, Not-Halt, Wiederanlauf bei Wiedereinschaltung, Not-Fahrt in technologisch definierte Positionen) werden getestet [48], [61].

Die Istwerte (Ströme, Spannungen, Momente, Wicklungstemperaturen, Geschwindigkeiten, Positionen, usw.) von einzelnen Antrieben werden gelesen und in den Bedien- und Beobachtungsmasken dargestellt.

6.3. Inbetriebnahme der Gruppenantriebe

Als Gruppenantriebe sind die Anlagenteile definiert, die für eine bestimmte Anlagenfunktion mehrere Einzelantriebe in einen logischen Ablauf bringen. Voraussetzung für die Phase (siehe Abbildung 6.1) ist die vollständige, abgeschlossene Durchführung der Inbetriebnahme der Einzelantriebe.

Folgenden Gruppenantriebe sind in einer Stranggiessanlage inbetriebzunehmen:

- Haupthydraulik.
- Drehturm Hydraulikaggregat
- Verteilerrinnen Hydraulikaggregat
- Die Hydraulikaggregate werden vom Bedien- und Beobachtungssystem eingeschaltet. Der Hochlauf des Hydrauliksystems, der Tanküberwachung (Füllstand, Temperatur, Filter), der Öl- Kühlung, der Heizung, der Reservepumpe und das Zuschalten bei Ausfall der Arbeitspumpe erfolgen vollautomatisch.
- Drehturm (drehen und positionieren)
- Verteilerrinnen (synchron fahren)
- Ausziehrichtmaschinen (fahren im Verbund).

Parametrierung, Inbetriebnahme und Test der Lastausgleichsregelung für die Treibermotoren. Der Kaltstrang wird in die Treiber gefahren, dabei werden die Treiber auf den Kaltstrang gepresst, um den verbundenen Betrieb zu simulieren. Die Maschinen werden zusammen eingeschaltet und gefahren, um so eine vollständige Inbetriebnahme und Optimierung der Momentenregelung zu ermöglichen.

Weitere Gruppenantriebe die technologisch bedingt zu einer Stranggiessanlage gehören sind:

- Brennschneidmaschine (Einsatzpunkt und Anschaltung)
- Markiermaschine (Produkt markieren)
- Kaltstrangmanipulator
- Abtransport (Rollgänge)
- Quertransport
- Kühlbett

6.4. Inbetriebnahme der Messungen

Parallel mit der Inbetriebnahme der Antriebe und den Hydraulikaggregaten werden die technologischen Messungen inbetriebgenommen und die Sequenzen für die Teilautomatisierung sowie die Regelungen vorbereitet.

Alle Messungen sind mit lokalem Auswertegerät (Messumformer mit Anzeiger) ausgerüstet und werden bei den ersten Schritten lokal betrachtet und einzeln getestet. Die parametrierbaren Messstellen werden in dieser Phase mit prozessbedingten Werten eingestellt. Dabei handelt es sich um:

- Eingabe der Nennquerschnitte (DN)
- Nenndrücke (PN)
- Messeinheiten
- Alarmwerte
- Normierung der Ausgangssignale (Geräte mit 0/4 – 20 mA Ausgang)
- Parametrierung der Feldbuskommunikation (für die Geräte mit Busanschluss)

Die einzelnen Messungen werden mit Kalibriergeräten (z.B. Stahltemperatur, Giessspiegel) und Referenzgewichten (Wiegeeinrichtungen) durchgeführt.

Der zweite Schritt im Rahmen der Inbetriebnahme der Messungen ist die Prüfung des Prozessleitsystemes. Hierbei sind die folgenden Aktionen erforderlich:

- Normierung der Analogeingänge

- Prüfung und Normierung der Werte, die über die Feldbuskommunikation übertragen werden
- Prüfung der korrekten Anbindung und Bearbeitung der Werte in den Softwareregelungen der Steuerungen
- Prüfung der indirekten (berechnete) Messungen (z.B. Gesamtverbrauch, Gasdurchflussmessung mit Druck und Temperaturkompensation, Differentialdrücke, Differentialwasserdurchflüsse mit Temperaturkompensation, u.s.w.)
- Prüfung der Softwarealarmwerte.
- Prüfung der Referenzsequenzen (z.B. Tarierung der Wiegeeinrichtung)
- Prüfung der Anzeigen von Messungen in den Bedien- und Beobachtungsmasken.
- Simulierung der Alarm- und Ereignismeldungen im Alarmmeldesystem.

6.5. Inbetriebnahme der Regelungen

Eine Klassifizierung der Regelungen einer Stranggiessanlage und deren Optimierungsmethoden sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst:

Objekt	Regler	Optimierung	Stellglied	Messung
Giessgeschwindigkeit Kokillenoszillation	PID Hardware	Symmetrisches Optimum	Umrichter / Stromrichter	Impulsgeber
Motorstrom	PI Hardware	Betragsoptimum	Umrichter / Stromrichter	Stromwandler
Momentausgleich	Statik- und Kompensation		Umrichter / Stromrichter	Berechnung im Umrichter
Wasserdurchfluss - Sekundärkühlung - Kokille	PI Software (SPS)	Betragsoptimum	Pneumatische Ventile	Induktiv Magnetisch
Luftdruck - Sekundärkühlung	PI Software (SPS)	Betragsoptimum	Pneumatische Ventile	Druckmessdose
Anpressdruck (Treiber)	Zweipunkt-Regler mit Hysterese Software (SPS)		Motorische Hydraulikventile	Druckmessdose
Stopfenposition, Pfannenschieberposition	PD Hardware	Integralkriterien der zeitgewichteten Betragsregelfläche	Servoventil Zylinder	Ultraschall im Zylinder
Giessspiegel	adaptiver Fuzzy-PID	Symmetrisches Optimum	Stopfen	Radiometrisch Co60 / Cs137
Verteilerfüllstand	PI Software	Symmetrisches Optimum	Pfannenschieber	Gewicht
Drehturmposition Querschlepperposition	PD Hardware Baugruppe in SPS	Bremsweg Berechnung	Umrichter / Stromrichter	Absolutgeber Gray Code

Tabelle 6.1: Regelungen in einer Stranggiessanlage

Der Einsatz neuer Methoden verbessert die Regelungsgüte und garantiert eine höhere Zuverlässigkeit der Anlage. Die klassischen Methoden bleiben ein wichtiger Teil der Inbetriebnahme. Je präziser die Regleroptimierung, desto wirksamer wird die Adaption.

Die Inbetriebnahme der Regelungen soll von „Einfach nach Komplex“ durchgeführt werden. Die Erkennung der Teilaufgaben und der Einsatz der passenden Methoden, die schrittweise Lösung der automatisierungstechnischen Probleme garantiert die Vollständigkeit der implementierten Funktionen.

6.5.1. Geregelte Antriebe

Die Regelungen von Geschwindigkeit, Strom, Moment bei Gleichstrommotoren oder Drehstrommotoren sind zum Teil in Stromrichtern oder Frequenzrichtern digitalisiert und auf Mikroprozessorbasis implementiert. Die Optimierung wird direkt am Gerät mittels Parametereingabe durchgeführt, ein schnelles Aufzeichnungsgerät (z.B. Oszilloscop) dient zur Visualisierung der geregelten Werte.

Die Reihenfolge der Optimierung ist Strom, Geschwindigkeit, Momentausgleich.

6.5.2. Wasserdurchfluss in Sekundärkühlung und Kokillenkühlung

Die Wasserdurchflussregler sind als Software-PI-Regler in den Steuerungen implementiert.

Die Regelelemente sind elektropneumatische Ventile mit integrierten Stellungsreglern (PD-Regler pneumatisch im Werk optimiert) und mechanischer Rückführung.

Für Durchfluss- und Druckregelungen können die Zeitkonstanten der Strecken z.B. durch eine einfache Identifikationsmethoden wie Sprungantwort gemessen werden. Damit werden die Reglerparameter eingestellt.

Die Optimierung der Wasserregler wird in der Kaltphase vollständig durchgeführt.

6.5.3. Inbetriebnahme und Optimierung der Stopfenpositionsregler

Der Lageregelkreis der Stopfen (Pfannenschieber identisch) ist als Elektro-Hydraulische Servo- Achse zu betrachten. Das Regelelement ist ein schnelles Servoventil mit interner mechanischer Rückführung. Der Positionsregler ist ein analoger PD-Regler, wobei in der letzten Zeit Steuerungslieferanten freiprogrammierbare Karten zur Verfügung stellen (Abtastungszeiten von 1 ms), die einen Softwareregler zu implementieren ermöglichen.

Eine integrierte Baugruppe in der Steuerung vereinfacht den Datenaustausch (Sollwerte, Istwerte) mit dem Bedien- und Beobachtungssystem und eliminiert die Ungenauigkeiten der Analogbaugruppen.

Für die Giesspiegelregelungsgüte muss der untergeordnete Lageregelkreis des Stopfens drei wichtige Bedingungen erfüllen:

- a. Schnelligkeit
- b. Steifigkeit gegenüber Kraftstörungen
- c. Stellgenauigkeit

Die Berücksichtigung dieser Fähigkeiten des Positionierungskreises definiert die Optimierungsstrategie. Unter Vernachlässigung der dynamischen Eigenschaften von Ventil und Stellzylinder ergibt sich für den Stopfenpositionierungskreis ein System 1. Ordnung. Eine vereinfachtes Blockschaltbild des Servohydraulischen Lageregelkreises ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

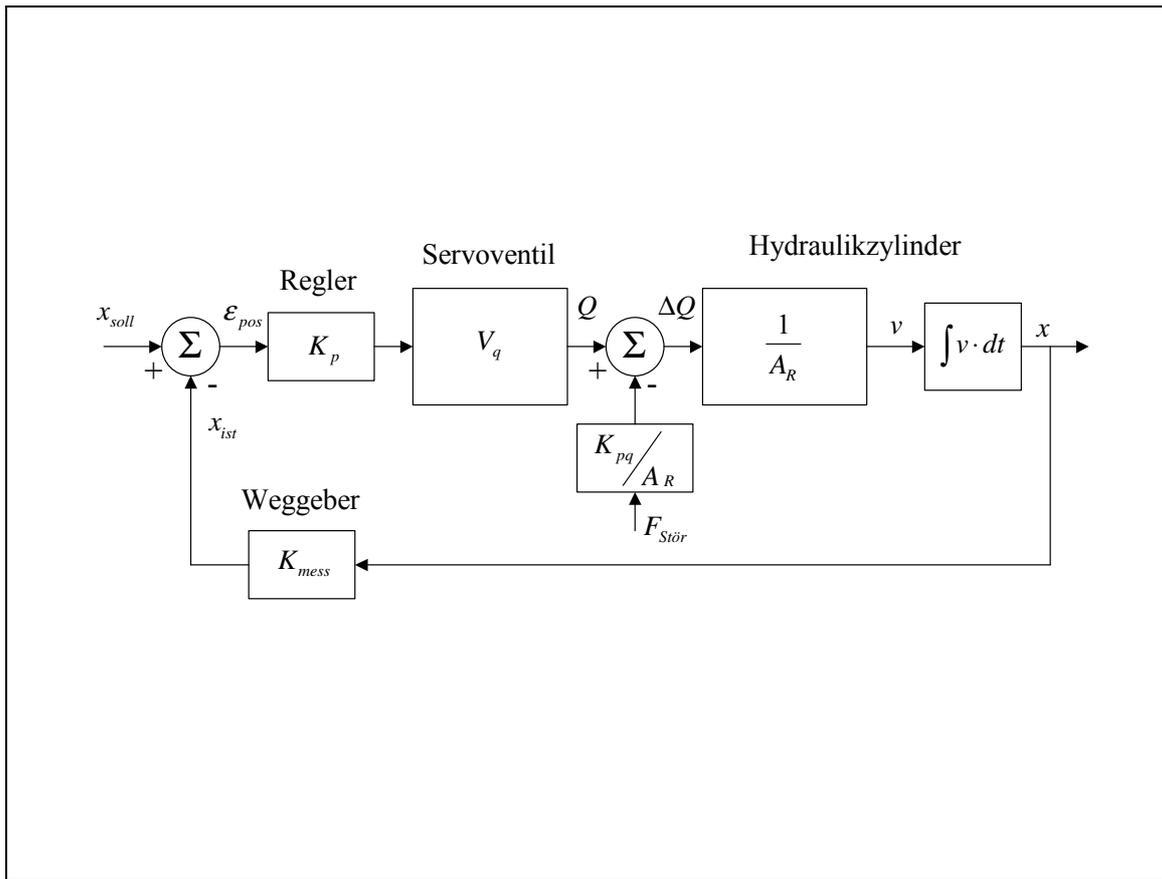


Abbildung 6.2: Vereinfachtes Blockschaltbild des servohydraulischen Lageregelkreises

Für die einzelnen Parameter gelten folgenden Gleichungen:

Zeitkonstante

$$T = \frac{1}{K_V} \quad (6.1)$$

Steifigkeit (in stationärem Zustand):

$$C = \frac{F_{Stör}}{\Delta X} = K_V \cdot K_{Konstr} = \frac{K_V \cdot A_R^2}{K_{pq}} \quad (6.2)$$

Stellgenauigkeit:

$$\Delta x = \frac{\varepsilon_v \cdot v_{\max}}{K_V}, \quad (6.3)$$

dabei (siehe Abbildung 6.2) werden als:

K_V = Kreisverstärkung

$F_{Stör}$ = Störkraft

ΔX = Positionsänderung unter Störkraft

K_{Konstr} = Hydraulikzylinder Konstruktionskonstante

ε_v = Benötigte Ventilstromänderung für Störkraftkompensation oder Geschwindigkeit um null zu erreichen ($\varepsilon_v = 0,01 - 0,5$ je nach Servoventil Typ)

v_{\max} = maximale Geschwindigkeit

V_q = Volumenstrom-Verstärkung

A_R = Ringfläche des Zylinders

K_{pq} = Druck-Volumenstrom-Verstärkung

$Q, \Delta Q$ = Ölmengen

K_{mess} = Verstärkung des Weggebers

bezeichnet.

Je grösser die Kreisverstärkung K_V gewählt wird, desto schneller ist das System, je steifer wird das System gegenüber Störkräften und um so besser wird die Stellgenauigkeit. Wird die Kreisverstärkung grösser als eine kritische Kreisfrequenz $K_{V\text{crit}}$, so wird das System instabil.

Das dynamische Verhalten von Servoventilen wird von den Herstellern durch Phasen- und Amplitudengang im Bode-Diagramm dargestellt. Ausgehend von der Erkenntnis, dass die Stabilität des Regelkreises nur für Phasenverschiebungen grösser -180 Grad gewährleistet ist und die Wegmessung im Lageregelkreis bereits eine Integration der Kolbengeschwindigkeit mit einer Phasenverschiebung von -90 Grad darstellt, verbleibt für das Servoventil eine Phasenverschiebung bis -90 Grad. Die Kennkreisfrequenz ω_v des Servoventiles kann also bei -90 Grad Phasenverschiebung aus dem Frequenzgang des Servoventiles abgelesen werden. Ist die Kennkreisfrequenz ω_v des Servoventiles wesentlich höher ($\omega_v \geq 3 \cdot \omega_L$) als die von der Last ω_L , kann zunächst die Dynamik des Teilsystems mit der höheren Eigenfrequenz vernachlässigt werden. Dadurch wird der Regelkreis auf ein System 3. Ordnung reduziert. Hier gilt:

$$K_V \leq K_{V\text{crit}} = 2 \cdot \omega_L \cdot \xi$$

ξ = dimensionsloser Dämpfungsbeiwert

Für die hydraulischen Servo- Achsen wird häufig das Integralkriterium der zeitgewichteten Betragsregelgröße verwendet, damit nur geringe Überschwingungen auftreten.

$$ITAE = A = A(t \rightarrow \infty) = \int_0^{\infty} |\varepsilon_{reg}(t) - \varepsilon_{reg}(t \rightarrow \infty)| \cdot t \cdot dt = Min, \quad (6.4)$$

mit

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_{reg}(t) & \text{Regeldifferenz} \\ \varepsilon_{reg}(t \rightarrow \infty) & \text{bleibende Regeldifferenz} \end{array}$$

Für den Bereich typischer Dämpfungsbeiwerte ($0,2 \leq \xi \leq 0,9$) liegen die optimalen

ITAE- Werte $\frac{K_V}{\omega_L}$ zwischen 0,25 und 0,35.

Daraus folgt die optimale Kreisverstärkung:

$$K_{V\ opt} \approx \frac{1}{3} \cdot \omega_L \quad (6.5)$$

Bei Berücksichtigung beider Eigenfrequenzen ω_v und ω_L entsteht ein System 5. Ordnung. Hier ist die kritische Frequenz immer kleiner als die kleinere der beiden Frequenzen ω_v und ω_L .

Mit hinreichender Genauigkeit wird für den servohydraulischen Lageregelkreis die folgende Faustformel eingesetzt:

$$\omega_{krit} = \frac{\omega_v \cdot \omega_L}{\omega_v + \omega_L} \quad (6.6)$$

und damit die optimale Kreisverstärkung:

$$K_{V\ opt} \approx \frac{1}{3} \cdot \omega_{krit} \quad (6.7)$$

Die Kennkreisfrequenz der in Baotou und Taiwan eingesetzten Servoventile von Typ 4WS2EM10-4X/10B2ET315ZBEV, Fabrikat Rexroth, war [40]:

$$f_v = 85\ Hz, \quad \omega_v = 2 \cdot \pi \cdot f_v = 2 \cdot 3,14 \cdot 85 = 534\ s^{-1}$$

Die Kennkreisfrequenz der zu bewegenden Masse des angekoppelten Hydraulik-Gleichgangzylinders rechnet sich nach der Formel :

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{öl}} \cdot A_R^2}{V \cdot m_{red}}} \quad (6.8)$$

mit den Werten der Anlagen in Baotou und Taiwan

$V = \frac{A_R \cdot H}{2} + V_{RL} = 90\ cm^3$	gesamtes eingespanntes Ölvolumen
$A_R = 13,5\ cm^2$	Ringfläche des Zylinders
$E_{\text{öl}} = 1,4 \cdot 10^7\ Kg / cm \cdot s^2$	Elastizitätsmodul des Öles
$V_{RL} = 9\ cm^3$	eingespanntes Ölvolumen in der Rohrleitung auf der Ringseite des Zylinders
$H = 10\ cm$	Hub des Zylinders
$m_{red} = 300\ Kg$	Reduzierte Masse (auf die Zylinderachse bezogen)

ergibt sich eine Kennkreisfrequenz von (siehe Gleichung (6.8)):

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4 \cdot 10^7 \cdot 13,5^2}{90 \cdot 300}} = 434\ s^{-1}, \text{ entspricht } f_L = \frac{\omega_L}{2 \cdot \pi} = \frac{434}{2 \cdot 3,14} = 69\ Hz$$

$$\omega_{krit} = \frac{\omega_v \cdot \omega_L}{\omega_v + \omega_L} = \frac{534 \cdot 434}{534 + 434} = 239,5\ s^{-1} \quad (\text{siehe Gleichung (6.6)})$$

$$K_{V\ opt} \approx \frac{1}{3} \cdot \omega_{krit} = \frac{239,5}{3} = 79,8\ s^{-1} \quad (\text{siehe Gleichung (6.7)})$$

Die Kreisverstärkung ist gleich dem Produkt der Verstärkungsfaktoren der Übertragungsglieder im Regelkreis:

$$K_V = K_P \cdot K_{SV} \cdot \frac{V_q}{A_R} \cdot K_{mess} \quad (6.9)$$

mit

K_P = P-Regler Verstärkung

$V_q = 10\ L / \text{min} / 10\ V = 16,6\ \frac{cm^3}{s \cdot V}$ Volumenstrom-Verstärkung (Taiwan Wert)

$K_{mess} = \frac{10\ V}{12\ cm} = 0,83\ V / cm$ Verstärkung des Weggebers

$K_{SV} = 10$ Verstärkung der servoelektronischen Karte

ergibt sich eine P-Regler Verstärkung von (siehe Gleichung (6.9)):

$$K_P = \frac{K_{V\ opt}}{V_q \cdot \frac{1}{A_R} \cdot K_{mess} \cdot K_{SV}} = \frac{79,8}{16,6 \cdot \frac{1}{13,5} \cdot 0,83 \cdot 10} = 7,82$$

Die oben geführten Berechnungen gehören zu den Inbetriebnahmevorbereitungen und stellen Referenzen für den Inbetriebnehmer dar. Die Werte werden endgültig in der Anlage geprüft und mit der sich bewegenden Mechanik endjustiert. Die Kreisfrequenzen der Servoventile und der Hydraulikzylinder sind stark abhängig von der Ölviskosität. Eine gute Optimierung soll unter Betriebsbedingungen durchgeführt werden (konstanter hydraulischer Systemdruck, konstante Arbeitstemperatur - ca. 60° C - Öltemperatur im System)

6.5.4. Positionierungsaufgaben

In diese Gruppe gehören Maschinenteile, die kontrolliert in notwendige, technologische Positionen gefahren werden. Sie sind nicht als Servoachsen zu betrachten. Der Positionsregler ist nicht permanent freigegeben, nach der erreichten Position wird der Regler gesperrt und die Teilmaschine mechanisch verriegelt. Der Drehturm sowie der Querschlepper sind geregelt angetrieben (geschwindigkeitskontrolliert).

Für die zu bewegenden Gewichte M mit der maximalen Geschwindigkeit v_{\max} ergibt sich nach der Antriebsoptimierung eine maximale Beschleunigung a_{\max} (die Antriebe werden rampenförmig hochgefahren und gebremst) und ein Bremsweg w_{brems} . Für eine lineare Bewegung mit konstanter Beschleunigung gilt:

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot a_{\max} \cdot w_{\text{brems}}} \quad (6.10)$$

Bei der Fahrt in eine neue Position soll der Positionsregler einen Geschwindigkeitssollwert berechnen, der den Bremsweg w_{brems} erfüllt (siehe Abbildung 6.3).

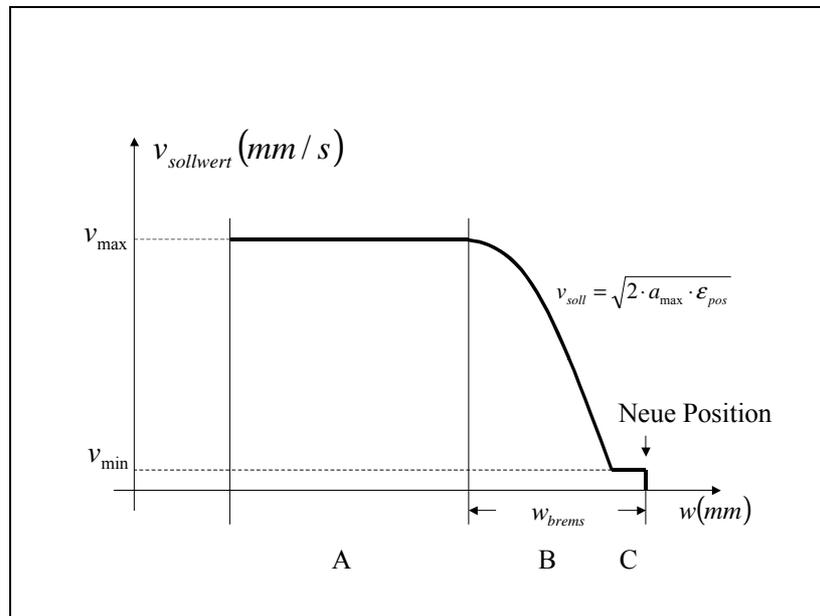


Abbildung 6.3: Geschwindigkeitssollwertverlauf in Abhängigkeit vom Bremsweg.

Bei einem neuen Positionierungsbefehl ist der Positions-Sollwert grösser als der Bremsweg (Phase A in Abbildung 6.3), dadurch wird der Positionsregler dem geregelten Antrieb die maximale Geschwindigkeit zuteilen.

$$v = v_{\max} \quad \text{für} \quad \varepsilon_{pos} \geq w_{brems} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{pos} = \text{Positionsabweichung}$$

In der Phase B, wenn der noch zu fahrende Restweg kleiner als der Bremsweg ist führt der Regler den Antrieb mit dem Sollwert:

$$v = \sqrt{2 \cdot a_{\max} \cdot \varepsilon_{pos}} \quad \text{für} \quad \varepsilon_{pos} \leq w_{brems} \quad ,$$

somit bremst die Maschine rampenförmig.

Die Feinpositionierung (Phase C) wird mit einer Geschwindigkeit $v_{\min} = 5\% \cdot v_{\max}$ durchgeführt, sobald der Restweg kleiner als das definierte Positionierungsfenster ist:

$$v = v_{\min} \quad \text{für} \quad \varepsilon_{pos} \leq \varepsilon_{\min} \quad , \quad \varepsilon_{\min} = \text{fein Positionierungsfenster}$$

Ist die gewünschte Position erreicht, wird der Sollwert null, die Freigabe wird aufgehoben und die mechanische Bremse geschlossen.

6.5.5. Giessspiegelregelung

Alle oben beschriebenen Steuerungen und Regelungen können ohne Stahl vor Produktionsanfang simuliert, optimiert oder so vorbereitet werden, so dass die Anlage während der Produktion ohne Schaden mit leichten Anpassungen optimal eingestellt werden kann.

Ausser der beschriebenen Problematik der Giessspiegelregelung (Nichtlinearität, Zeitvarianz) ist die grösste Herausforderung für die Inbetriebnahme, dass der Regler nur mit flüssigem Stahl in der Kokille optimiert werden kann.

Trotzdem ist es möglich, mit den vorhandenen Daten die Regelung so weit vorzubereiten, dass eine hohe Erfolgsrate bei der ersten Produktion erreicht wird, und das selbst bei kleineren Giessformaten.

Nach der Optimierung des Stopfenlageregelkreises (siehe Abs.6.5.3) wirkt der geschlossene Positionskreis im Füllstandskreis als Verzögerungselement

1. Ordnung mit:

$$K_{pos} = \frac{100}{10} = 10 \frac{mm}{V}, \text{ und}$$

$$T_{pos} = \frac{1}{K_{Vopt}}$$

K_{Vopt} die optimierte Kreisverstärkung des Lageregelkreises

In der Abbildung 6.4 ist der vereinfachte Füllstandsregelkreis dargestellt.

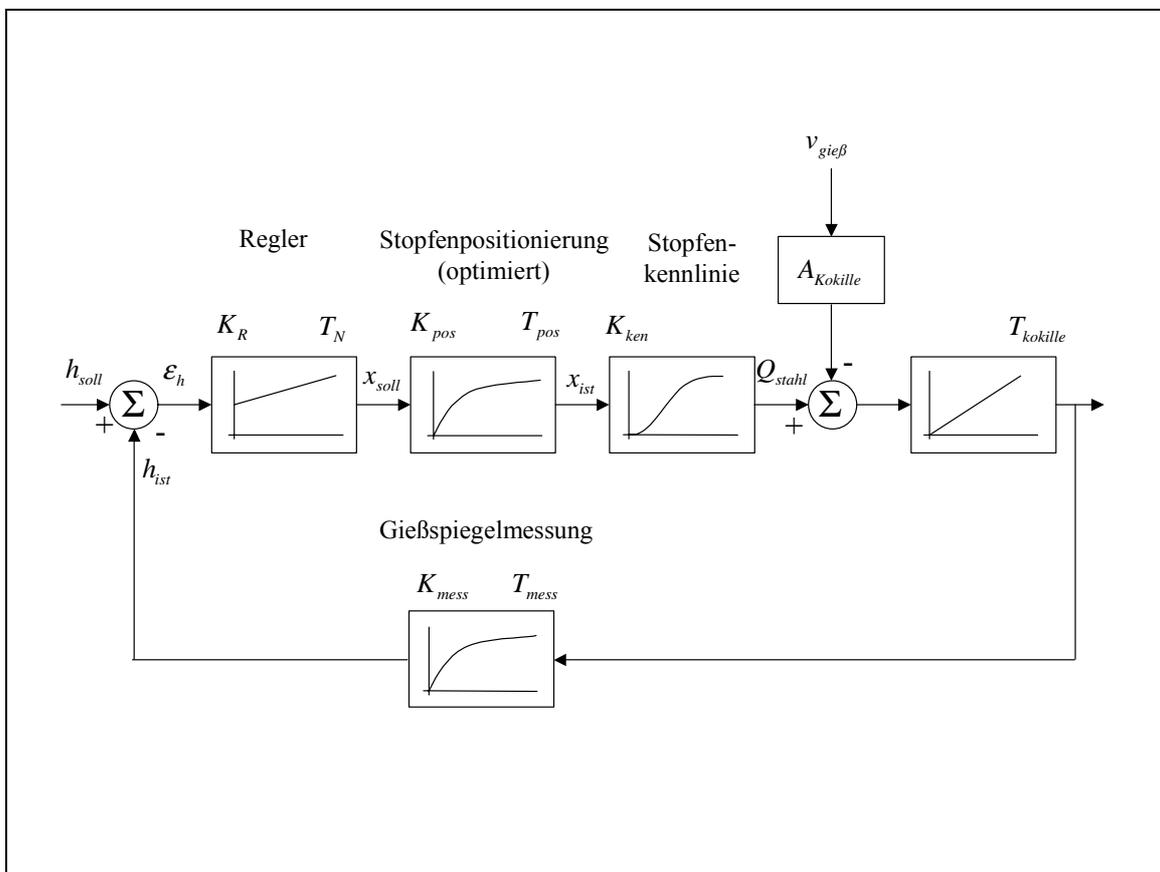


Abbildung 6.4: Vereinfachtes Blockschaltbild der Giessspiegelregelung

Die Regelstrecke enthält ein integrales Übertragungselement (Kokille) und ein Verzögerungselement (Füllstandsmessung mit der geschlossenen Stopfenpositionierung).

Die Optimierung ist nach dem Verfahren des Symmetrischen Optimums vorzunehmen, wobei PI- oder PID-Regler eingesetzt werden. Von Vorteil bei dieser Reglereinstellung ist ein schnelles Ausregeln des Störgrössensprungs, wobei durch

Freigabe- und Umschaltung der Regler, die Führungsgrösse nicht sprungweise verändert werden darf (43,4% Überschwingungen beim Symmetrisches Optimum)

Die Inbetriebnahme der radiometrischen Füllstandsmessung in der Kokille kann ohne flüssigen Stahl durchgeführt werden. Verschiedene Füllstände können mittels eines zum Kokillenformat passenden kalten Stahlblocks simuliert werden. Der aktuelle Messbereich Δh (Kokille leer – Kokille voll) wird gemessen. Für eine maximale Abzugsgeschwindigkeit v_{\max} ergibt sich eine minimale Entleerungszeit der Kokille:

$$T_{\text{leer}} = \frac{\Delta h}{v_{\max}} \quad (6.11)$$

Für kleine Formate (120 – 180 mm) ist ein 2- bis 3-fach grösserer Stahlzufluss in der Kokille bei maximaler Öffnung des Stopfens (10 – 15 mm) als der mögliche Mengenabzug mit v_{\max} zu erwarten. Das bedeutet eine Füllzeit von:

$$T_{\text{voll}} = \frac{T_{\text{leer}}}{(2-3)} \quad (6.12)$$

Die Impulsintegrationszeit T_{mess} (parametrierbar) der radiometrischen Messung muss dem Kokillenformat angepasst werden.

$$T_{\text{mess}} = \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{5} \right) \cdot T_{\text{voll}} \quad (6.13)$$

Die Stahlmenge (m^3) in der Kokille berechnet sich nach der Formel

$$V_{\text{Kokille}} = \int Q_{\text{zufluss}} \cdot dt, \text{ für } v_{\text{gieß}} = 0 \quad (6.14)$$

$$V_{\text{Kokille}} = h \cdot A$$

V_{Kokille} = Stahlmenge in der Kokille

h = Füllstand

A = Kokillenquerschnitt

$$h = \frac{1}{A} \cdot \int Q_{\text{zufluss}} \cdot dt \quad (6.15)$$

normiert auf die Maximalwerte:

$$\frac{h}{h_{\max}} = \frac{1}{A} \cdot \frac{Q_{\max}}{h_{\max}} \cdot \int \frac{Q_{\text{zufluss}}}{Q_{\max}} \cdot dt = \frac{1}{T_{\text{Kokille}}} \cdot \int \frac{Q_{\text{zufluss}}}{Q_{\max}} \quad (6.16)$$

ergibt sich die Integrationszeit für die Kokille:

$$T_{\text{Kokille}} = \frac{h_{\max} \cdot A}{Q_{\max}}, \text{ und mit } Q_{\max} = (2-3) \cdot v_{\max} \cdot A$$

$$T_{Kokille} = \frac{h_{\max} \cdot A}{Q_{\max}} = \frac{h_{\max} \cdot A}{(2-3) \cdot v_{\max} \cdot A} = T_{leer} \quad (6.17)$$

Die Kokillenintegrationszeit für die Formate 140 x 140 mm Knüppel in Taiwan ist:

$$T_{Kokille} = \frac{h_{\max} \cdot A}{Q_{\max}} = \frac{h_{\max} \cdot A}{(2-2,5) \cdot v_{\max} \cdot A} = \frac{130[mm]}{(2-2,5) \cdot 50[mm/s]} = 0,87-1,3 \text{ s}$$

Nach dem Symmetrischem Optimum sind die PID-Regler Einstellungen:

$$T_N = 4 \cdot T_E \quad \text{I-Anteil} \quad (6.18)$$

$$T_V = T_1 \quad \text{D-Anteil} \quad (6.19)$$

$$K_R = \frac{T_{Kokille}}{2 \cdot K_S \cdot T_E} \quad \text{P-Anteil} \quad (6.20)$$

$$T_E = \sum T_i, \quad T_1 \geq T_E, \quad K_S = \prod K_i,$$

mit

T_i = Verzögerungszeitkonstante

K_S = Streckenverstärkung

T_{int} = Zeitkonstante des integralen Übertragungselementes

Mit den Werten für die Anlage in Taiwan ergibt sich:

$$\sum T_i = T_{pos} + T_{mess} + 2 \cdot T_{SPS}$$

$$K_S = K_{pos} \cdot K_{ken} \cdot K_{mess}$$

$$T_{\text{int}} = T_{Kokille}$$

$$T_{pos} = \frac{1}{K_{Vopt}} = \frac{1}{79,8} = 0,0125 \text{ s, und}$$

$$T_{mess} = 0,15 \text{ s}$$

$$T_{SPS} = T_{Abtast} + T_{Analog} = 0,02 + 0,01 = 0,03 \text{ s}$$

$$T_{Abtast} = \text{SPS Zykluszeit}$$

$$T_{Analog} = \text{Konvertierungszeit der Analogeingabegruppe in der SPS}$$

$$T_E = T_{pos} + T_{mess} + 2 \cdot T_{SPS} = 0,15 + 0,0125 + 2 \cdot 0,03 = 0,2225 \text{ s}$$

$$K_{mess} = \frac{10 \text{ [V]}}{130 \text{ [mm]}}$$

$$K_{pos} = \frac{100}{10} = 10 \frac{\text{[mm]}}{\text{[V]}}$$

$$K_{ken} = \frac{(2-3) \cdot v_{\max}}{\Delta S_{\max}} = \frac{(2-3) \cdot 50 \frac{\text{[mm]}}{\text{[s]}}}{(10-15) \text{ [mm]}} = 6,6-15 \text{ s}^{-1}$$

$$K_S = \frac{10}{130} \cdot \frac{100}{10} \cdot (6,6 - 15) = 5 - 11,5 \text{ s}^{-1}$$

Mit diesen Werten ergeben sich folgenden PID-Regler Einstellungen für den Regler in Taiwan:

$$T_N = 4 \cdot T_E = 4 \cdot 0,2225 = 0,89 \text{ s} \quad \text{I-Anteil}$$

$$T_V = T_I = 0,15 \text{ s} \quad \text{D-Anteil}$$

$$K_R = \frac{T_{Kokille}}{2 \cdot K_S \cdot T_E} = \frac{(0,87 - 1,3)}{2 \cdot (5 - 11,5) \cdot 0,89} = 0,042 - 0,146 \quad \text{P-Anteil}$$

Die optimalen Werte für den Giessspiegelregler können nur während des ersten Giessens justiert werden. Dafür ist es notwendig den Regler bei Stahlfluss und ohne Schadensgefahr ein erstes Mal einzuschalten. Mit den berechneten Werten war es möglich den Giessspiegelregler freizugeben und einen stabilen Zustand zu erreichen.

Ein Vergleich der vorkalkulierten und optimalen PID-Regler Einstellungen (Tabelle 6.2) für das Knüppelformat 140x140 mm beweisen die Richtigkeit der Berechnungen, trotz mangelhafter Informationen und Annäherungen.

Parameter	Berechnet	Optimal nach INB
K_p Stopfenpositionierung	7,82	9,7
K_p Giessspiegelregler	0,042 – 0,146	0,08
T_N Giessspiegelregler	0,89	1,2
T_V Giessspiegelregler	0,15	0,15
K_p Fuzzy- Korrekturbereich	0,042 - 0,146	0,04 – 0,15

Tabelle 6.2: Vergleich zwischen berechneten und optimierten Reglerparametern

Die Fuzzy- Komponenten können vor der Produktion programmiert, parametrieren und getestet werden.

Die Fuzzy- Zugehörigkeitsfunktionen für Giessgeschwindigkeit und Fuzzy- Block Plausibilität werden sich während der Inbetriebnahmephase nicht mehr ändern. Unbekannt sind die Fuzzy- Zugehörigkeitsfunktionen für die Stopfenposition. Es wird ein Satz von Stützpunkten vorprogrammiert und nach mehreren Güssen ist es möglich, eine Anzahl von Stopfenkennlinien zu identifizieren und die Stützpunkte zu korrigieren.

Eine automatische Identifikation der Stopfenkennlinie (siehe Abs. 5.2.4) gewährleistet eine Fein Anpassung der Fuzzy- Zugehörigkeitsfunktionen zu unerwarteten Prozessänderungen. Durch die Identifikation wird die Referenz-Stopfenkennlinie festgelegt und die Wirksamkeit der Fuzzy-Korrektur für die beide Situationen (Ablagerung und Abnutzung) abgesichert.

Empfehlenswert ist, eine vollständige Optimierung der PID-Regler durchzuführen, für alle Formate und Stahlqualitäten und erst danach die Fuzzy- Adaption zuzuschalten. Ein nicht optimaler PID-Regler Parametersatz kann durch die Adaption Stabilitätsprobleme verursachen oder der Regler reagiert zu langsam bei Störungen. Weiterhin verringert eine nicht optimale Einstellung des Reglers die Effekte der Fuzzy-Adaption.

Zur kompletten Kaltinbetriebnahme gehören auch die Prüfungen der Sequenzen zur:

- Stopfen- Ausgussnullerfassung
- Stossfreien Umschaltung der Regler zwischen Automatik- und Handbetrieb
- Kokillenoszillationsfilter
- Sequenzen zum automatischen Angiessen
- Überwachungsfunktionen für Durchbruch und Überlauf.

6.6. Sequenzen und Teilautomatisierung

Hierzu gehören anlage- und technologisch bedingte Verfahren, die Teile oder die Gesamtanlage in Referenzzustände für die Produktion, den Produktionsablauf oder das Produktionsende bringen, vorzubereiten.

In der Sequenz sind Einzelantriebe, Messungen, Regelungen, Gruppenantriebe als Teilnehmer involviert.

Die Sequenzen werden vom Bediener gestartet und der weitere Ablauf erfolgt automatisch. Die Anfangsbedingungen sind Referenzpositionen für die Anlagenteile, Betriebsbereitschaft der Teilnehmer, erfüllte Verriegelungen, störfreie Mess- und Regelungen, sowie aufnahmebereite Überwachungssysteme.

Die Bedingungen zwischen zwei Sequenzschritten sind erreicht, wenn vordefinierte geografische Positionen der sich bewegenden Maschinen oder Anlagenteile (z.B. „Kaltstrang in Ausziehrichtmaschine 1“), oder bestimmte Funktionen (z.B. „Kokille Leerkalibrierung durchgeführt“), oder gemessene Parameter (z.B. „Start Füllstand im Verteiler“) erreicht oder erfüllt sind.

In den Sequenzschritten werden Start/Stop Befehle für Bewegungen der Einzelantriebe (z.B. „Kaltstrangmanipulator Heben“) oder für Gruppenantriebe (z.B. „Ausziehrichtmaschinen 1 – 4 Start“), Freigabe der Regelungen (z.B. Sekundärwasserkühlung), Start Funktionen (z.B. Brennschneidmaschine Schnittstart“) ausgelöst oder untergeordnete Sequenzen initialisiert (z.B. „Abtransport aufräumen - geschnittene Knüppel“).

Der Ablauf der Sequenzen ist graphisch im Leitsystem implementiert und dynamisiert.

Kaltstrang einfahren

Der Kaltstrang wird durch die Maschine gefahren und in der Kokille positioniert. Am Giessanfang wird der flüssige Stahl in der Kokille über den Kopf des Kaltstranges gegossen und im Verbund (erstarrter Stahl und Kaltstrang) mit den Treibern heruntergezogen.

Das Einfahren des Kaltstranges erfolgt automatisch. In dieser Phase wird das Materialverfolgungssystem inbetriebgenommen. Mittels an den Treibern montierter Impulsgeber wird die momentane Position des Kaltstrangs in der Maschine erfasst. Die Impulse werden in der SPS gezählt, der Inhalt der Zähler ist ein Abbild der Position des Kaltstrangs (und später des gegossenen Stahls) in der Giessmaschine. Das Wegverfolgungssystem wird während des Kaltstrangtransportes durch eine Lichtschranke initialisiert. In die SPS werden die Schaltpunkte eingegeben, so dass die Treiber sich im richtigen Moment auf den sich bewegenden Kaltstrang legen und mit hydraulisch geregeltem „Kaltdruck“ angepresst werden.

Die Anpressdruckregelungen werden endgültig optimiert. Damit werden die Bedingungen für der Optimierung der Momentenausgleichsregelung für die Motoren der Ausziehrichtmaschinen erfüllt.

Giesssequenz

Der Kaltstrang befindet sich in Giessposition (in der Kokille). Ohne Stahl wird die Ausziehrichtmaschine gestartet und eine Giesssequenz simuliert.

Beim Ausfahren dürfen die Rollen der Ausziehrichtmaschine nicht auf den Verbund Kalt- Warmstrang drücken. Es werden die Schaltpunkte getestet, um den Anpressdruck zwischen „Kaltdruck“, „Drucklos“ und „Warmdruck“ zu steuern, so wie das Einschalten der Sekundärkühlungen und deren Regelungen, Kaltstrangentkopplung, Schneidsequenzen, Markiersequenzen und Abtransport. Die Wasserregelungen werden optimiert, die Abhängigkeiten Wassermenge zu Giessgeschwindigkeit und Kokillenoszillationsfrequenz zu Giessgeschwindigkeit geprüft und justiert.

Giessende

Die Sequenz wird gestartet, entweder nach einem normalen Produktionsende oder in Havariefällen, wenn der Giessprozess unterbrochen werden muss.

Der noch in der Maschine bis zur Kokille gegossene Stahl muss herausgezogen werden.

Die Inbetriebnahme wird bei der Simulation mit dem Kaltstrang durchgeführt. Es werden die Abschaltpunkte zum Öffnen und Anhalten der Ausziehrichtmaschine geprüft. Sobald das Material kurz vor dem Ende ist, erfolgen die Abschaltungen der Wasserregelungen, des Schnittes, des Endschnittes und des Abtransportes.

Die beschriebenen Sequenzen werden während der Inbetriebnahme geprüft, bis der Ablauf fehlerfrei simuliert ist. In dieser Phase werden auch alle Prozesswerte im Leitsystem beobachtet, alle Bedienmasken kontrolliert und die möglichen Fehler behoben.

6.7. Gesamtanlagentest

Der Gesamtanlagentest kann als Mensch-Maschine-Integrationstest bezeichnet werden.

Das Giesspersonal wird geschult, um mit den Bedien- und Beobachtungsmasken zu arbeiten, Teile oder gesamte Sequenzen einzuschalten, Produktionsparameter zu beobachten und an Hand der dargestellten Daten, Störungen zu diagnostizieren und zu beseitigen.

Parallel zu dem Bedienschulprozess und als Test, werden Feinanpassungen in den Steuerungen, Regelungen, und bei den Antrieben durchgeführt.

(Hochlaufzeiten, min- und maximale Geschwindigkeiten, Kühlwasserwerte, etc.)

Die Sicherheitssequenzen für die Störungsfälle werden getestet:

- Drehturm Notfahrt in Notposition falls Pfannenbruch.
- Verteilerwagen Notfahrt in Notposition falls unkontrollierter Stahlzufluss.
- Notwasser Test. In die Anlage werden ein oder mehrere Wassertanks eingebaut, die im Fall eines totalen Spannungsausfalls für 20 bis 30 min die notwendige Kühlwassermenge beibringen können.

Die Anlage und seine Funktionen, Messungen, Regelungen und Überwachungen sind betriebsbereit. Die gesamte Anlage wird vom Bediener wie unter Produktionsbedingungen gefahren, simuliert und getestet.

Die Anlage ist für die Produktion bereit, wenn die gesamte Automatisierung störungsfrei getestet ist, das Bedienpersonal geschult und eingewiesen ist.

Dann heisst es: „Start erster Guss“.

6.8. Bedeutung der Inbetriebnahme

Eine Anlage wird vom Betreiber dreimal bewertet.

1. Beim Verkauf durch Überzeugung, Vision und finanzielle Machbarkeit.
2. Während der Planungsphase und Werkstattfertigung durch den Einsatz moderner Hardware, strukturierter Software und den visuellen Eindruck, sowie eine machbare Umsetzung von Kundenwünschen
3. Bei der Inbetriebnahme, bei der der Nachweis der ganzheitlichen Funktionalität im Verbund mit Mechanik, Hydraulik und anderen Gewerken zu erbringen ist.

Dabei hinterlässt die Inbetriebnahme als der zu erbringende Beweis für Funktion, Bedienfreundlichkeit und Ergonomie den nachhaltigsten Eindruck. Der Inbetriebnahme kommt somit eine herausragende Rolle bei Bewertung der Technik und Ökonomie durch den Betreiber zu.

Auf das Giessspiegelregelungskonzept hat die Inbetriebnahme kontinuierlich eine wichtige und positive Wirkung durch die in der Praxis gewonnenen Kenntnisse die das theoretische Konzept permanent verbessert und ergänzt haben, z.B.:

1. Bei der Prozessbewertung der Anlage Taiwan (1996) wurde festgestellt, dass die Kokillenoszillation Auswirkungen auf den Giessspiegel hat [16]. Der Filter wurde theoretisch entworfen (siehe Abs. 3.4) und in den Anlagen Baotou implementiert [18]. Danach ist der Filter Standard-Komponente des Konzeptes geworden.
2. Während der Inbetriebnahme der Fuzzy-Block-Plausibilität in Baotou zeigte sich das Problem der Definition der Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistische Terme **E= null**, und **DE= null** (siehe Abs. 3.3.2).
Bei den ersten Versuchen in Baotou wurden zu kleine Werte für die Maxima der Termen **null**, **negativ** und **positiv** eingesetzt. Da bei den Strängen starke Schwankungen des Stahlpegels vorhanden waren, wurde die Prozesssituation nie als angeregt erkannt, die Adaption war langsam und unwirksam. Die sich nach Optimierung ergebenden Werte wurden danach in allen anderen Anlagen eingesetzt.
3. Durch eine wirksame Störgrössenaufschaltung wurden in der Anlage Baotou die Einflüsse des Giessgeschwindigkeit minimiert.
Die resultierenden Ausbauchungen auf den Strängen durch den Bulging-Effekt verursachten Geschwindigkeitsschwankungen der Ausziehrichtmaschine und implizierten Schwankungen des Stahlpegels. Ohne Lastausgleich und Momentenregelung sind diese Schwankungen schwer zu kompensieren. Somit wurde bei der Kombi-Anlage in Taiwan die notwendige Hardware und Software für die Implementierung der Momentenregelung bei den Ausziehrichtmaschinen vorgesehen.
4. Die unterschiedlichen Stopfenlieferungen in Taiwan (siehe Abs.5.2.4), die durch unterschiedliche Geometrien und Standfestigkeiten gegen Abnutzung eine fehlerhafte Adaption verursachten, ergab die Idee zur Kennlinienidentifikation. Dadurch wurde eine Feinanpassung der Zugehörigkeitsfunktionen der Stopfenposition an den Prozess ermöglicht, und die Adaption für alle

Prozesssituationen gewährleistet. Die neu entstandene Komponente wurde als Standard in das Regelungskonzept integriert.

5. Die Vorberechnung der Parametern von Teilen des geregelten Kreises nach klassischen Optimierungsmethoden (siehe Abs. 6.5) mit sich ergebenden Werten die der Optimaler sehr nahe sind, entwickelte sich eine Inbetriebnamestrategie, die von einer Anlage zur Anderen die Inbetriebnahmezeit verkürzt hat.
6. Während der Inbetriebnahme ist es möglich die Implementierung des Regelungskonzeptes mit unterschiedlichen Leitsystemen zu bewerten. Mit allen drei Hardwaresystemen wurden gleichwertige Ergebnisse erreicht. Die Simatic S7 als Nachfolger der S5 bietet sich durch seine höhere Leistungsfähigkeit und durch integrierte Softwarefunktionen als ideal für die Implementierung des Regelungskonzeptes an. Die Advant 450 Prozessoren sind als Leistung und als Softwarebibliothek vergleichbar mit der Simatic S7. Als Implementationsmethode der Fuzzy-Strukturen, Fuzzy-Bausteine oder Look-Up-Table, durch die Fuzzy Projektierungswerkzeuge Sifloc S5 und Fuzzy Control ++, ist die Projektierung, Inbetriebnahme und Optimierung einfacher. Eine Änderung in einem mit Look-Up-Table implementiertem Fuzzy-Block benötigt eine off-line Analyse die definierter Fuzzy-Struktur. Fuzzy Control ++ bietet durch die Integration in der Programmiersoftware-Plattform des Simatic Managers die Möglichkeit on-line Änderungen durchzuführen.

Die Inbetriebnahme durch Anpassungen an die realen Systeme und Anlagen nach einer entworfenen Theorie zu verbessern, ist mit entscheidend für den Erfolg des Konzeptes.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Fuzzy-adaptives Konzept für die Giessspiegelregelung einer Stranggiessanlage entworfen, in vorhandene Prozessleitsysteme implementiert und praktisch in zwei Anlagen des Stahlwerkes Baogang Steel in China, und in zwei weiteren Anlagen bei Yieh United Steel Corp. in Taiwan und Siderurgica SA, Hunedoara in Rumänien erprobt. Die hier beschriebene Regelung befindet sich seit September 1997 im Dauerbetrieb in der V. R. China, seit Dezember 1999 in Taiwan und seit Dezember 2002 in Rumänien.

Das Konzept sichert eine deutliche Qualitätsverbesserung bei der Beherrschung von Abnutzungs- und Anlagerungserscheinungen im Stopfenbereich, in Bereichen niedriger Strangabzugsgeschwindigkeiten und bei dessen Veränderungen.

Die wesentliche Qualitätsverbesserung und Zuverlässigkeit des implementierten Konzeptes wurde anhand zahlreicher Untersuchungsergebnisse bei allen drei Anlagen bestätigt. Als Konsequenz daraus, ist dieses Konzept jetzt in den Standard-Giessspiegelregelungen eines grossen deutschen Stahlwerkslieferanten implementiert (siehe Abbildung 7.1).

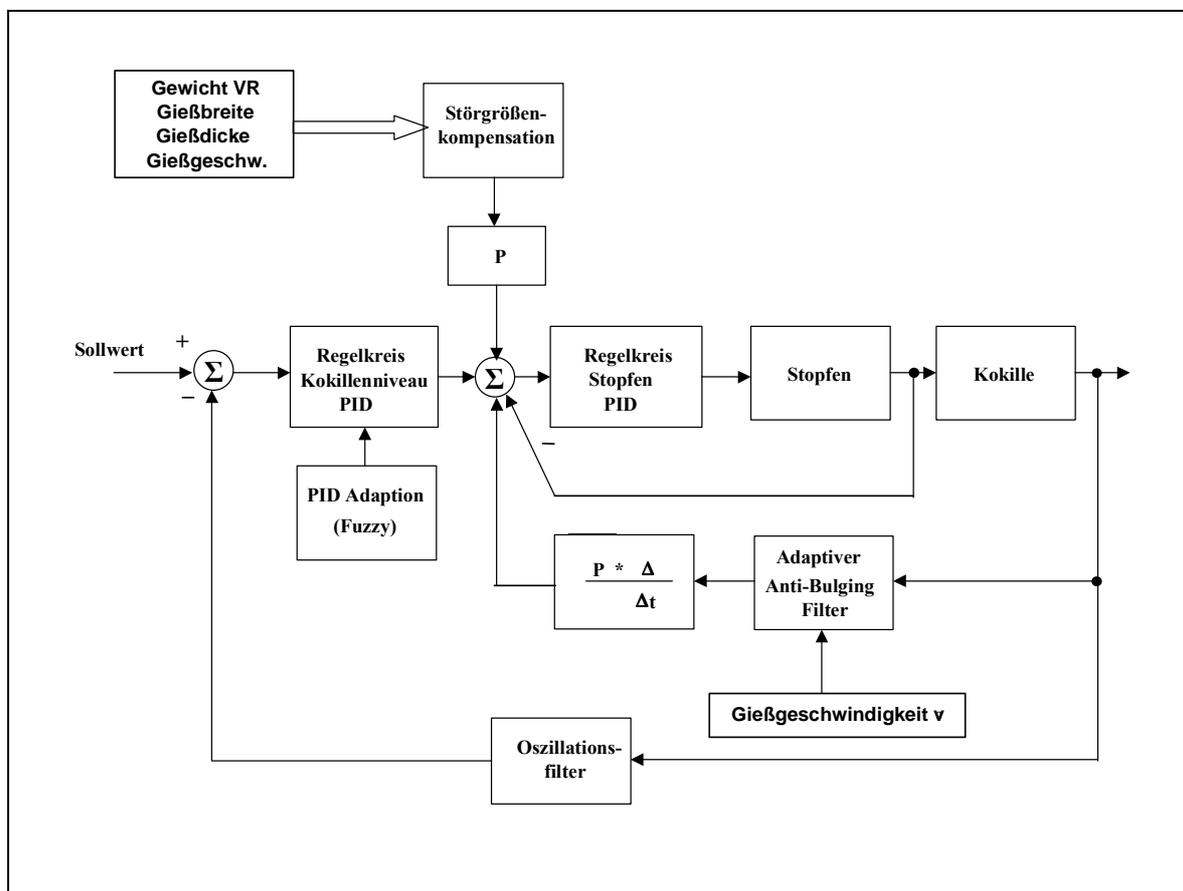


Abbildung 7.1: Standard Blockbild für Giessspiegelregelungen

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

Im Einzelnen sind das:

1. Aufbauend auf einer detaillierten Analyse des Giessprozesses der Stranggiessanlagen wurde ein neues qualitatives Regelungskonzept vorgeschlagen und realisiert.

2. Die Festlegung der automatisierungstechnischen Probleme in der Anlage und deren gegenseitige Beeinflussung haben nicht nur zu einer neuen Reglerstruktur geführt, sondern auch zu Regelungs- und Steuerungslösungen für den Prozessteil, der als Störfaktor für Füllstandsregelungen in Kokillen gilt.
3. Die direkte Beobachtung der Produktion und das von den Prozessbedienern (Giesser) gewonnene Wissen ermöglichte den Entwurf eines Konzeptes, das sich auf die linguistische Bewertung der technologischen Situation stützt.
4. Die linguistische Bewertung erlaubt eine graduelle Einschätzung der Stopfenkennlinie und deren Zeitabhängigen Änderungen. Die Richtigkeit dieser Einschätzung wurde mittels einer Plausibilitätsfunktion [46] getestet, die auf Anwendung der Fuzzy-Logik beruht.
5. Die genaue Giessgeschwindigkeitsregelung mit Lastausgleich für die Mehrmotorenantriebe der Ausziehrichtmaschine gewährleistet einen ruhigen Verlauf des warmen Stranges. Für die Kompensation der Geschwindigkeitsänderungen wurde die Geschwindigkeit als Störgrösse aufgeschaltet.
6. Der gemessene Füllstand enthält Störsignale, die mit Messverfahren oder mechanischen Baumassnahmen nicht zu dämpfen sind. Weiterhin ändern sich die Frequenzen der Störkomponenten mit der Strangsabzugsgeschwindigkeit. Ein digitaler Filter wurde eingebaut. Die Parameter wurden on-line neu berechnet und der technologischen Situation angepasst.
7. Für die Fuzzy Adaptionsebene wurden rechentechnische Implementierungen erarbeitet, die eine effiziente Realisierung in Entwicklungsumgebungen (MATLAB, SIMULINK, SIFLOC und Fuzzy Control ++) und in Prozessleitsystemen (ABB, SIEMENS S5 und S7) erlauben.
8. Die entwickelte Vorgehensweise ist an einem praktischen Modell simulativ erprobt und in mehreren Anlagen experimentell demonstriert worden. Dabei wurde gezeigt, dass die Anwendung der Fuzzy-Adaptionsalgorithmen zur Lösung der Zeitvarianz des Stopfen-Giessens die Sicherheit des Giessprozesses erhöht und die Zuverlässigkeit der Giessspiegelregelung verbessert.
9. Durch vereinfachte, automatische Parameteridentifikation (Stopfenkennlinie) wurden die Zugehörigkeitsfunktionen den Anfangsbedingungen angepasst. Damit wurde eine effiziente Adaption für die Situationen Ablagerung und Abnutzung erreicht.
10. Entwicklung einer Inbetriebnahmestrategie durch Ableitung allgemeiner Hinweise für „optimale“ Inbetriebnahme.
11. Experimenteller Nachweis der „optimalen“ Inbetriebnahme, dass mit theoretisch errechneten Anfangswerten, die den optimalen sehr nahe sind, sehr gute Ergebnisse erzielt worden.
12. Neues Konzept durch diese Untersuchungen jetzt im Standard Angebot eines grossen deutschen Anlagenlieferanten integriert.

Dennoch verbleibt eine Reihe offener Probleme, zu deren Lösung weitere Forschungsaktivitäten erforderlich sind. Diese konzentrieren sich insbesondere auf neue Messmethoden und auf die Früherkennung von anlagenbedingten Störfällen.

1. Industrie geeignete Messeinrichtung des Stahlzuflusses in der Kokille. Damit wird für die Giesspiegelregelung die nichtlineare und zeitvariante Stopfen-Ausguss-Kennlinie irrelevant.
2. Umweltschonende Erfassungsmethode des Stahlpegels in der Kokille als Alternative zur radiometrischen Messung [12].
3. Fuzzy basierte Durchbruchfrüherkennungssysteme auch für kleine Formate[2].
4. Der Einbau einer Überwachungsfunktion des Stabilitätsgrades [46] und die Einbeziehung dessen in die Ermittlung der Regelverstärkung. Dabei kann der Prozess in extremen Störsituationen durch die Anpassung der Adaptionfähigkeit der Fuzzy-Komponenten stabilisiert werden [9], [46].
5. Wirksame Kompensation von aus dem Bulging-Effekt resultierenden Schwingungen des Giesspiegel.

In vielen Anlagen mit hohen Sicherheitsanforderungen sind Regelungskonzepte und Diagnosealgorithmen auf Basis der unscharfen Theorie implementiert, beziehungsweise ist eine Umsetzung entsprechender Projekte in den nächsten Jahren zu erwarten.

8. Literatur

- [1] ABB Industrie und Automation AG Mannheim: Benutzerhandbücher MP 200/1, ADVANT CONTROLLER 450
- [2] ADAMY, J.: Breakout prediction for continuous casting by fuzzy Mealy automata. Proc., EUFIT'95, Aachen, S, 754-759; 1995
- [3] ALIEV, R.; BONFIG, K. W.; ALIEW, F.: Messen, Steuern, Regeln mit Fuzzy-Logik. Franzis-Verlag GmbH, München; 1994
- [4] BERGER, H.: Automating with the SIMATIC S5-135, Siemens-Berlin, München, 1993
- [5] BERGER, M.; SCHWARZ, H.: Logische Bewertung von t-Normen in der Fuzzy-Regelung. Proc., 5. Workshop Fuzzy Control (GMA-UA 1.4.2.), Dortmund, S. 42-55; 1995
- [6] DR. BERTHOLD EG&G: Giessspiegelmessgerät LB352 – Betriebsanleitung, Bad Wilbad, 1993
- [7] BRETTHAUER, G.; STRAUBE, B.: Einsatzmöglichkeiten für Fuzzy-Regler. Studie, SMWK4-7541.82-EPS/I, S. 1-208, Dresden; 1992
- [8] BRETTHAUER, G.; MIKUT, R.; OPITZ, H.-P.: Stabilität von Fuzzy-Regelungen - eine Übersicht. Proc., GMA Aussprachetag Fuzzy Control (VDI-Bericht 1113), Langen, S. 287-297; 1994
- [9] BRETTHAUER, G.; MIKUT, R.; BINDEL, T. : Stabilitätssicherung mit einer Fuzzy-Überwachungs- und Adaptionsebene auf der Basis unscharfer Ljapunov-Funktionen. Proc., Anwendersymposium zu Neuro-Fuzzy-Technologien, Wittenberg, S. 179-184; 1995
- [10] BRETTHAUER, G.; MIKUT, R.; DUMITRIU, B.; BÖTTGER, S.; SIEWIOR, M.; WERFEL, G.; Design, Implementation and Commissioning of a Fuzzy-Adaptive Mould Level Control System., European Control Conference, 31 August – 3 September 1999, Karlsruhe, Germany
- [11] BRETTHAUER, G.; DUMITRIU, B.; GARBE, J.; KÖNIG, S.; MIKUT, R.: Einsatz der Fuzzy-Technologie zur Giessspiegelregelung, Abschlussbericht zum Vorhaben PT 1737; 1996
- [12] BRETTHAUER, G.; DUMITRIU, B.; GRALLA, R.; MIKUT, R.: Entwicklung eines neuen Systems zur Erhöhung der Produktqualität bei Stranggiessanlagen unter Berücksichtigung ökologischer Bedingungen, Abschlussbericht zum Vorhaben PT 2986; 1998
- [13] DAQBOOK / DAQBOARD, Data acquisition Board. Users guide. Version 5.05, 1997, Omega, Newport

- [14] DASYLab 32 Version 4.02.20, 1998. Data acquisition software. Users book. DASYTEC Daten System Technik GmbH
- [15] DRANSFIELD, P.; HABER, D. F.: Instruire programata in metoda locului radacinilor. Cambridge University Press, London; 1973
- [16] DUMITRIU, B.: Inbetriebnahmebericht der 5 x Knüppelanlage der Yieh United Steel Corporation. Interner Bericht.; 1996
- [17] DUMITRIU, B.; MIKUT, R., BRETTHAUER, G ., GARBE, J.: Erprobung einer Fuzzy-Giessspiegelregelung für Stranggiessanlagen. Proc., Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, S. 66-80; 1997
- [18] DUMITRIU, B.: Inbetriebnahmebericht der 4 x Round Caster und der 4 x Bloom Caster Anlage der Baogang Steel Baotou/China. Interner Bericht; 1998
- [19] DUMITRIU, B., MIKUT, R., BRETTHAUER, G.; WERFEL, G., BÖTTGER, S.; SIEWIOR, M.: Inbetriebnahme einer fuzzy-adaptiven Giessspiegelregelung in einem Stahlwerk der Baogang Steel in Baotou /China. Erscheint in Stahl und Eisen; Januar 1999
- [20] DUMITRIU, B.; GARBE, J.; MARKIEWICZ, J.: Processautomation bei der Straggiessanlage Huta Ostrowiec. Engineering und Automation, Siemens, S.26-28, Mai 1997
- [21] DUMITRIU, B.; BRETTHAUER, G.; MIKUT, R.; WERFEL, G.: Ganzheitliche Automatisierung von Stranggiessanlagen, GMA-Kongress, 23 Mai 2001, Baden-Baden.
- [22] FÖRSTER, E.; GUDENAU, H. W.; KEMPER, G. M.; STERCKEN, K.: Reibungskräfte Zwischen Strang und Kokille beim Knüppelstrangguss von Stahl Mit Kokillenölschmierung , Stahl und Eisen. September 1993
- [23] FÖLLINGER, O.: Nichtlineare Regelungen. Oldenbourg-Verlag, München; 1993
- [24] FRANK, P. M.; KIUPEL, N.: Implementierung eines Fuzzy-Logik basierten Regelungskonzeptes am Beispiel einer Stranggiessanlage. Proc., Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, S. 51-65; 1997
- [25] GARBE, J.; DUMITRIU, B.; MIKUT, R.; BRETTHAUER, G: A fuzzy concept for the mould level control in the continuou.n casting of steel. Proc., 5th Zittau Fuzzy-Colloquium, S.43-50; 1997
- [26] GISSLER, J.; SCHMID, M.: Vom Prozess zur Regelung. Analyse, Entwurf, Realisierung in der Praxis. Siemens – Berlin, München; 1990
- [27] HARSTE, K.; BANNENBERG, N.; BERGMANN, B.; SPITZER, K.-H.: Optimierung und Überwachung der Prozessführung beim Stranggiessen von Stahl , Stahl und Eisen. Juli 1993

- [28] HORBACH, U.; KOCKENTIEDT, J.; JUNG, W.: Knüppelschnellgiessen mit parabolischer Kokillenkonizität. Stahl und Eisen, S. 95-101., December 1997
- [29] ISERMANN, R.: Zur Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik. ATP S. 24-36; November 1996
- [30] KAHLERT, J.: Fuzzy Control für Ingenieure. Analyse, Synthese und Optimierung von Fuzzy-Regelungssysteme. Frid.Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden; 1995
- [31] KAHLMAN, R. E.; FALB, P. L.; ARBIB, M. A.: Topics in Mathematical System Theory. McGraw-Hill, Inc.; 1969
- [32] KIUPEL, N.: PI-Fuzzy-D, ein Konzept zur Erweiterung der konventionellen PI-Regelung. Proc., GMA Aussprachetag Fuzzy Control (VDI-Bericht 1113), S. 349-358, Langen; 1994
- [33] KIUPEL, N.; WITTPOTH, J.: Modellbildung und Fuzzy-Logik-Basierte Regelung von Giessspiegelregelkreisen, Anwenderseminar Fuzzy Duisburg '96, 10. IAR Kolloquium 1996, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, s.16-30
- [34] KAMMEYER, K.D.; KROSCHEL, K.: Digitale Signalverarbeitung. Filterung und Spektralanalyse. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart; 1989
- [35] KROLL, A.: Fuzzy-Systeme zur Modellierung und Regelung komplexer technischer Systeme. VDI-Fortschrittsberichte Nr. 612, Reihe 8, VDI-Verlag, Düsseldorf; 1997
- [36] KUO, B. C.: Analysis and synthesis of the sampled-data control systems. Prentice-Hall; 1965
- [37] LEE, Y.-H.; LIEB, A.; WIEGELS, H.; KOPP, R.: Anwendung der Fuzzy-Logik bei der Regelung einer Schmiedepresse. Stahl und Eisen, S. 93-99. November 1994
- [38] LUNZE, J.: Stabilisierung dynamischer Systeme durch qualitative Regelung. Proc., 3. Ilmenauer Wissenschaftliches Kolloquium, Band 3, 5. 24-29; 1994
- [39] LUTZ, H.; WENDT, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main; 1998
- [40] MANNESMANN REXROTH ENGINEERING, Stetigventile, Regelungssysteme, Elektronik-Komponenten, Katalog RD 00 155-01, 1999
- [41] MANNESMANN DEMAG HÜTTENTECHNIK, Funktionsbeschreibung. Round and Bloom Caster , Projekt Baotou - China , Duisburg , 1994
- [42] MIKUT, R.: Fuzzy-Überwachungsebenen mit unscharfen Ljapunov-Funktionen. Operations Research Proceedings (SOR'95 in Passau), Springer-

Verlag, Berlin, S. 288-293; 1996

- [43] MIKUT, R.; KÖNIG, S.; DUMITRIU, B.; GARBE, J.: Erhöhung der Qualität moderner Stranggiessanlagen durch den Einsatz moderner Fuzzy-Technologie. Proc., GMA-Kongress Mess- und Automatisierungstechnik'96 (VDI-Bericht 1282), S, 627-636; 1996
- [44] MIKUT, R.; KÖNIG, S.; DUMITRIU, B.; BRETTHAUER, G.; GARBE, J.: Ein Konzept für den Einsatz von Fuzzy-Logik zur Regelung und Qualitätssicherung in Stranggiessanlagen, Proc., 6. Workshop Fuzzy Control (GMA-UA 1.4.2.), Dortmund, S.113-126; 1996
- [45] MIKUT, R.; BINDEL, T.; RIEDEL, E.: Modellgestützte Regelgenerierung für Fuzzy-Regler unter Verwendung von Petri-Netzen. Proc., 7. Workshop Fuzzy Control des GMA-UA 1.4.2., Dortmund, S. 39-52; 1997
- [46] MIKUT, R.: Modellgestützte on-line Stabilitätsüberwachung komplexer Systeme auf der Basis unscharfer Ljapunov-Funktionen. Dissertation, Universität Karlsruhe 1999
- [47] MILLER, C.: Integrierte Überwachungssysteme für Stranggiessanlagen und ihre Komponenten , Stahl und Eisen, Dezember 1991
- [48] NAMUR-EMPFEHLUNG 3l: Anlagensicherung mit Mitteln der Prozessleittechnik; 1992
- [49] NIEMANN, M.; ADAMY, J , NITSCHKE, H.-J.: Modular aufgebaute Giessspiegelregelung für Stranggiessanlagen. Proc., 7. Workshop Fuzzy Control (GMA-UA 1.4.2.), Dortmund, S. 133-148; 1997
- [50] NIEMANN, M.; ADAMY, J , NITSCHKE, H.-J.: Modular aufgebaute Giessspiegelregelung für Stranggiessanlagen. Proc., Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, S. 81-95; 1997
- [51] OFPELT, W.; VOSSIUS, G.: Der Mensch als Regler: Eine Sammlung von Aufsätzen. Verlag Technik; Berlin; 1970
- [52] SASABE, Y.; KUBOTA, S.; KOYAMA, A.; MIKI, H.: Real - time Expert System Applied to Mould Bath Level Control of Continuous Caster , ISIJ International , Vol . 30, Nr . 2 , S.136 – 141; 1990
- [53] SCHREWE, H.: Stranggiessen von Stahl, Einführung und Grundlagen. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf; 1987
- [54] SCHWERDTFEGGER, K.: Metallurgie des Stranggiessens. Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf; 1992
- [55] SIEMENS AG, Modulare Regelung. Funktionsbausteine für SIMATIC S5 135/155. Users book.
- [56] SIEMENS AG, Modulare Regelung. Funktionsbausteine für SIMATIC S7-400.

Users book.

- [57] SIEMENS AG: Sifloc, Projektierungs Software für Fuzzy-Regelungen. Users Book.
- [58] SIEMENS AG: FuzzyControl++, Fuzzy Projektierungswerkzeug v 4.0, 1998, C79000-G8276-C144-01.
- [59] SIEMENS AG: Standardprojektierung Mehrmotorenantrieb MS360 für technologiebaugruppe T300 in SIMOVERT MASTERDRIVES 6SE70/71, Softwareversion 1.4, Handbuch, Ausgabe 04.99.
- [60] THE MATHWORKS, INC.: MATLAB User's Guide; 1992
- [61] VDI-VDE-RICHTLINIE 2180: Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik; 1984-1986
- [62] ZADEH, L. A.: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, S. 338-353; 1965
- [63] ZADEH, L. A.: The concept of the linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part I. Information Science, 8, S. 199-249; 1978
- [64] Kock , M. ; Kuhn, Th. ; Wernstedt, J.: Fuzzy Control. Optimale Nachbildung und Entwurf optimaler Entscheidungen, Oldenbourg Verlag München Wien 1996, Seiten 249-265, 298-307