

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

Verfasst von:

cand. Mach.

Matrikel-Nr.:

Betreut von:

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Zweitprüfer:

Garbsen, den

Abstract

Thema der Arbeit: Dynamische Regelung der Walzkraft beim mechanischen Festwalzen

Erstellt von: cand. Mach.

Matr.-Nr.

Kenn-Nr.:

Abgabedatum:

Betreut von:

Abstrakt

Der von der Transferstagnation beeinträchtigte Walzprozess wird in dieser Bachelorthesis regelungstechnisch behandelt. Als Filter von der Schwankung und Beeinträchtigung kam ein gleitender Mittelparamteragent zum Einsatz. Zur Anpassung an der Transferstagnation wird der Smith-Schätzer und der PID-Bediener verwendet und mit Tauglichkeit als Indikator Begutachtet. In der Drehmaschine werden die Regelparameter empirisch idealisiert. Darüber hinaus sind zwei Innovative Schätzer entwickelt, die sich aus pionär eingeführten Verfahren zur Lösung von Matrizen fundiert ist. Die zuletzt erwähnten Techniken wurden während der Lösung von der Aufgabenstellung erfunden. Die Kombination aus der Mittelwert-Echtzeit- und Smith-Schätzung mit diffensiv idealisierten Parameter erreichte unter schwierigen Einstellungen die beste Effizienz.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Ausarbeitung ohne fremde Hilfe angefertigt habe und mich dabei anderer als der von mir angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe.

Hannover, den

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Literaturrecherche.....	3
2.1 Roter Faden.....	3
2.2 Einleitung.....	4
2.3 Signale und Systeme, Steuerungstechnik und Einleitung in Regelungs-technik.....	4
2.4 Theoretische Basis der Regelungstechnik.....	12
2.5 Walzprozess: Begutachtung.....	17
2.6 Transferstagnation.....	20
2.7 Prozessbetrachtung, Störgrößen und moderne Regelungstechnik.....	36
3 Strategischer Plan und Realisierungsansatz.....	47
4 Kontrolle der Transferstagnation.....	50
4.1 Der Smith-Schätzer.....	50
4.1.1 Modellierung von dem Smith-Schätzer.....	51
4.1.2 Innovation von dem Algorithmus.....	55
4.1.3 Registrierung von Daten.....	71
4.1.4 Idealisierung der Regelparameter von dem PID-Bediener und dem Smith-Schätzer mit Impaktreaktion durch Maschine.....	77
4.1.5 Idealisierung der Schätzung von dem Smith-Schätzer.....	85
4.2 M.ae- & M.e-Schätzer:.....	96
4.2.1 Diskussion von der Ist-Kraft.....	96
4.2.2 Mittelparameiter-Asynchron-Schätzer (M.A-SCHÄTZER):.....	97
4.2.3 Mittelwert-Echtzeit-Schätzer.....	102
5 Beeinträchtigungsunterdrückung.....	104
5.1 Allgemeine Betrachtungen.....	104
5.2 Selektion von dem Glättungsagent.....	105
5.2.1 Allgemeines Vorgehen.....	105
5.2.2 Begutachtung von den Glättungsagenten.....	108
5.3 Realisierung von dem Glättungsagent in TwinCAT.....	110
5.3.1 Debatte von der Begutachtung.....	110
5.3.2 Algorithmus von dem Glättungsagent in IEC61131.....	111
6 Verfizierung.....	113

7 Zusammenfassung.....	124
8 Literaturverzeichnis.....	125
9 Bestätigung der Erfüllung der Abgabeanforderungen.....	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 : Offener Regelkreis.....	5
Abbildung 2.2 : Geschlossener Regelkreis.....	6
Abbildung 2.3 : Blockdiagramm des geschlossenen Regelkreises gemäß Signal-theorie.....	7
Abbildung 2.4 : Rück- und Transformation mit Konnektierungstabelle von Laplace'schen gewöhnlichen Funktionen.....	8
Abbildung 2.5 : Quantisierung einer (unbekannten) Störgröße mittels Kennlinienfeld	10
Abbildung 2.6 : Der Weg zum Bode-Diagramm.....	16
Abbildung 2.7: Verhalten des geregelten und ungeregelten Festwalzprozess.....	18
Abbildung 2.8: Interaktion von dem Prozess.....	20
Abbildung 2.9: Fixwerteapproximation.....	29
Abbildung 2.10: Bestimmung der statischen Verstärkung.....	30
Abbildung 2.11: Wechselschalter nach Gleichung 3.50.....	31
Abbildung 2.12: Schnittpunkt der Inverse der Hysterese mit der Ortskurve.....	32
Abbildung 2.13: Auto-Tuning des PID Bedieners mit Smith-Schätzer.....	35
Abbildung 2.14: Abstraktion von dem Prozess.....	37
Abbildung 2.15: Zielgebiet der Soll-Charakteristik nach Lunze.....	40
Abbildung 2.16: Regelungsentwurf in allgemeiner Präsentationsform.....	41
Abbildung 2.17: Detektorregelung mit Glättungsmechanismen und I-Glied.....	46
Abbildung 3.1: ungeregelter Prozess.....	48
Abbildung 4.1: Konzeptionelles Schaltbild des Smith-Schätzers.....	51
Abbildung 4.2: Blockschaltbild der virtuellen Strecke in Simulink.....	52
Abbildung 4.3: Blockschaltbild der vollständigen Schaltung des Smith-Schätzers in Simulink.....	53
Abbildung 4.4: Simulation des Smith-Schätzers mit optimalen PID-Parametern in Simulink.....	54
Abbildung 4.5: 3D-Modell des Apparatus in CAD-Software Solidworks.....	57
Abbildung 4.6: Beckhoff-Dashboard (Links) und Beckhoff-Software Windows-Control (Rechts: Industrie-PC).....	58
Abbildung 4.7: Ansys-Simulation des Apparatus.....	59
Abbildung 4.8: Code-Teil vom Python-Programm von den Smith-Schätzern.....	60
Abbildung 4.9: Code-Teil von dem experimentellen Einrichtung von dem Smith-Schätzers in TwinCAT.....	61
Abbildung 4.10: Realisierung von dem PID-Bedieners als Matlab-Funktion innerhalb eines Simulink-Baustein.....	62
Abbildung 4.11: Algorithmus von dem PID-Bedieners als Matlab-Funktion.....	63
Abbildung 4.12: Virtuelle Strecke des Smith-Schätzers als Matlab-Algorithmus.....	65
Abbildung 4.13: Simulation des als Algorithmus realisiertes Smith-Schätzer.....	66
Abbildung 4.14: Windows-Controll-Benutzerschnittstelle.....	67

Abbildung 4.15: Algorithmus des PID-Bediener in Windows-Control.....	68
Abbildung 4.16: Algorithmus des Smith-Schätzers in TwinCAT (Bereich I bis III).....	69
Abbildung 4.17: Algrotihmus zum Smith-Schätzer (Bereich IV bis V).....	70
Abbildung 4.18: Ziel-Struktur des CNC-Codes für die Siemens-Steuerung.....	73
Abbildung 4.19: Impakte je 10ms des bereits vorhandenen PID-Bediener.....	74
Abbildung 4.20: Export-CSV-Dateien von Windows-Control.....	75
Abbildung 4.21: Erarbeitung der TwinCAT-CSV-Dateien in MATLAB.....	75
Abbildung 4.22: Zoomen und Beschriften von dem bedeutsamen Anteil bei der Impulsantwort von dem PID-Bediener.....	76
Abbildung 4.23: Perspektive zur Bestimmung der idealen PID-Parameter nach Horne-Chin sowie Zigler-Nichols für Führungs- und Beeinträchtigungssregelung.	78
Abbildung 4.24: Impaktantwort von dem PID-Bediener mit idealen Parameter.....	79
Abbildung 4.25: Empirische Idealisierung von dem PID-Bediener.....	79
Abbildung 4.26: Begutachtung von dem PID-Bediener mit vier horizontalen Kennlinien.....	81
Abbildung 4.27: Begutachtung von dem Smith-Schätzer (II) mit vier horizontalen Kennlinien.....	81
Abbildung 4.28: Begutachtung von Smith-Schätzer (I) mit vier horizontalen Kennlinien.....	81
Abbildung 4.29: Abstraktion von dem Prozess.....	85
Abbildung 4.30: Idealisierung der Parameter der Strecke durch Idealisierung der Schätzung.....	87
Abbildung 4.31: Reaktion von dem PID-Bediener mit diffensiven PID-Parameter.....	90
Abbildung 4.32: Reaktion von dem Smith II mit diffensiven PID-Parameter.....	90
Abbildung 4.33: Die vier letzten Reaktionen (Smith II).....	91
Abbildung 4.34: Maximale und Minimale Übersteuerungen (PID-Bediener).....	93
Abbildung 4.35: Solver-Funktion.....	100
Abbildung 4.36: Umformung des Gleichungssystem von Matrix zu augmentierten Matrix.....	101
Abbildung 4.37: Allgemeine Darlegung der Mittelwert-Schätzer.....	103
Abbildung 5.1: Filter von Windows-Control.....	106
Abbildung 5.2: Verstörtes Signal aus der realen (In der Machine) Impaktreaktion-Simulation.....	108
Abbildung 6.1: Ablauf der durch die Steuerung erzwungenen Kraftsänderung.....	114
Abbildung 6.2: Echtzeit-Schätzung (Blau).....	115
Abbildung 6.3: Schätzung nach der Streuungsdämpfung und Limitation vom Ausgang.....	116
Abbildung 6.4: PID-Bediener mit suboptimalen PID-Werte in extremen Bedingungen.....	117
Abbildung 6.5: PID-Bediener mit diffensiven PID-Parameter in extremen Bedingungen.....	117
Abbildung 6.6: Smith II mit suboptimalen PID-Werte in extremen Bedingungen.....	118
Abbildung 6.7: Smith II mit diffensiven PID-Parameter in extremen Bedingungen.	118

Abbildung 6.8: Ausgewählte Schwingung für die „Worst-Case-Scenario“-Analyse.	118
Abbildung 6.9: AA. Von dem PID-Bediener mit diffensiv-idealen Parameter in extremen Bedingungen.....	119
Abbildung 6.10: AA. von PID-Bediener mit sub-optimaler Konfiguration in extremen Bedingungen.....	119
Abbildung 6.11: AA. von Smith II mit sub-optimaler Konfiguration in extremen Bedingungen.....	120
Abbildung 6.12: AA. von Smith II mit diffensiv-idealen Parameter in extremen Bedingungen.....	120
Abbildung 6.13: M.E-Schätzer und PID mit idealen diffensiven Parameter.....	121
Abbildung 6.14: M.E-Schätzer mit idealen diffensiven Parameter.....	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter des virtuellen Strecke zum Simulation nach Abbildung 4.3.....	53
Tabelle 2: Optimale PID-Parameter.....	79
Tabelle 3: Optimale PID-Parameter des Smith-Schätzers.....	79
Tabelle 4: Schnittpunkte mit den vier horizontalen Kennlinien.....	82
Tabelle 5: Prozentuale Abfallsspanne der Bediener nach der 4-Punkte-Metrik.....	83
Tabelle 6: Leistungsindex der Bediener.....	84
Tabelle 7: Optimale PID-Parameter (diffensiv/Schnell) vom PID-Bediener und Smith II.....	88
Tabelle 8: Messwerte von Smith II und PID bei der 4 Punkte-Metrik über 4 Reaktionen.....	92
Tabelle 9: Maximum-Minimum-Metrik der Überswingungen über zwei hintereinander liegenden Reaktionen jeweils vom Smith II und PID-Bediener.....	92
Tabelle 10: Zusammenarbeit von dem M.E-Schätzer mit PID und Smith II in extremen Rahmbedingungen.....	122

Liste der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
Bzw.	Beziehungsweise
Gem.	Gemäß
FEM	Finite-Elemente-Methode
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
IEC 61131	Standard strukturierter Sprache zur Programmierung
IFW	Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen
LTI	Linear Time Invariant
AA	Absolute Abweichung
QA	Quadratische Abweichung
SVD	singular value decompositio
LSA	Least Squares Approximation
LU	lower–upper decomposition
LR	Low-rank approximation

1 Einleitung

Die mechanische Abarbeitung von Bauelementen, insbesondere durch Festwalzen, ist von großer Bedeutung in der modernen Fertigungstechnik. Das Verfahren ermöglicht nicht nur die Reduzierung der Hüllenaunheit, sondern auch die wesentliche Verbesserung der mechanischen Attribute und der Lebensdauer der Elemente. Die genaue Steuerung der Walzkraft spielt eine wichtige Rolle, weil sie maßgeblich die Folge der Verformung prägt und deshalb direkte Folge auf die Qualität der bearbeiteten Erzeugnisse hat [DEN22].



Bild 1.1: *Drehmaschine: DMG-Mori Beta CTX gamma 2000 TC*

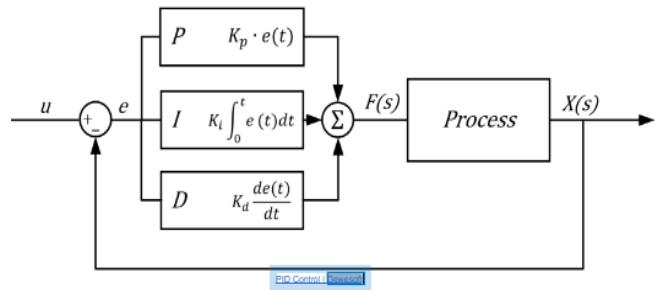
In der IFW wird an der dynamischen Regelung der Walzkraft operiert. Das Hauptziel besteht darin, die positionsabhängige Regelung der Festwalzkraft unter Zuhilfenahme des sensorischen Gerät Typ EG45 von Ecoroll zu gewährleisten [DEN23].

Ein Problem ist die **Totperiode**, welche die Integration von OPC-UA zur Interaktion mit dem Gerät mit sich bringt, welche in der Drehmaschine und Typ DMG Mori CTX

gamma 2000 sowie in IPC implementiert ist. Die **Leerlaufphase**, die durch Kommunikationsretardierung zwischen den verschiedenen Geräten entsteht, kann die Monitoring des Festwalzablauf beeinträchtigen, insbesondere bei schnellen Prozessen. Sie kann zu einer verspäteten Reaktion des Prozesses führen, was nicht treue Daten und Instabilitäten zur Folge haben kann.



[Bild 1.2: Festwalzwerkzeug Ecoroll EG45 im Originalform](#)



[Bild 1.3: PID-Bediener mit Parallel- und Verstärkungskonvention](#)

Damals hat IFW eine Regelung einem PID-Bediener umgesetzt, aber ist eine Modifikation obligatorisch, um die Last flexibel in Be dingtheit von der Position und der Geometrie zu regeln.

Zur Bewältigung der kritischen Schwierigkeiten, wird ein Regelalgorithmus entwickelt und auf einem IPC realisiert. In „**Literaturrecherche**“ werden verschiedene Ansätze betrachtet, um die idealen davon zur Verbesserung des Festwalzablauf zu finden. Dabei werden nicht nur die Inaktivität, sondern auch die Lage und die Geometrie von dem Bauelementen in die Regelung integriert. Die Idealität der innovativen Algorithmen wird durch vielfachen Versuche verifiziert.

2 Literaturrecherche

2.1 Roter Faden

Die Arbeit gliedert sich in vier Hauptreihen und mehrere Nebenteile. Letztere sind die standardmäßigen Reihen wie Zusammenfassung, Literaturverzeichnis, Anhang und Inhaltsverzeichnis, die aufgrund ihrer Funktion verständlich sind. Die Hauptreihen bestehen aus der Literaturrecherche, Kontrolle der Transferstagnation, Beeinträchtigungsunterdrückung und Verrifizierung.

Die **Literaturrecherche** behandelt die theoretischen Basis der klassischen und modernen Regelungstechnik. Hier werden Analyse- und Entwurfsstrategien aufgezeigt, die die Lösung der Aufgabe fördern.

In **Kontrolle der Transferstagnation** wird das in der Literatur als geeignet identifizierte theoretische Wissen praktisch ausgenutzt. Die in der Literaturrecherche als taugliche Methode zur Regelung des Kaltwalzablaufs identifizierten Verfahren werden simuliert, idealisiert und anschließend experimentiert. Zusätzlich wird eine Begutachtung durch Impaktreaktionen simuliert, um die Tauglichkeit der verschiedenen Regler unter realen Bedingungen zu überprüfen.

Die Reihe **Beinträchtigungsunterdrückung** knüpft nahtlos an die Kontrolle der Inaktivität an. Nachdem die Totphaseneffekte beseitigt wurden, wird der Fokus auf externe Beeinträchtigung gerichtet, die Verhalten ebenfalls manipulieren. Unterschiedliche Filter werden auf ihre Tauglichkeit hin begutachtet und derjenige Filter implementiert, der das größte Potenzial für die spezifischen Anforderungen aufweist. Die hier gewonnenen Ergebnisse über Filtertechnologien sind kritisch für die abschließenden Verifizierungen.

In **Verifizierung** werden schließlich die in den initiierten Reihen entwickelten Verfahren unter extremen realen Bedingungen getestet, um sie an ihre Limitations zu bringen. Hier werden die Techniken von den Transferstagnation und Beeinträchtigungsunterdrückung, einzeln und in Kombination, auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich verschiedener Metriken begutachtet.

2.2 Einleitung

Automatisierungstechnik durchdringt nahezu alle Facetten vom alltäglichen Leben, von der einfachen Raumtemperatur bis hin zur aufwendigen Steuerung von

Transport und industriellen Fertigungstechniken. Diese Konstrukten sind nicht nur in der menschlichen Welt präsent, sondern finden auch in der Natur Anwendung, wo sie vitale Perspektive wie die Regulation des Zuckerspiegels eingesetzt werden [NOR15].

Die Bedeutung automatisch geregelter Prozessen erstreckt sich auch auf sportliche Leistungen, wo Athleten ihre Leistung durch die Entwicklung idealer Strategien maximieren. Während ein Kurzstreckenläufer das Ziel hat, eine Strecke schnell möglichst zurückzulegen, muss ein Marathonathlet darüber hinaus den Energieverbrauch über die lange Distanz hinweg berücksichtigen.

In der Industrie ist die Regelungstechnik von besonderer Rolle, insbesondere in Bereichen wie der Fertigungstechnik, der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie der Robotertechnik. Durch die Entwicklung technologisch führende Geräte wurde die Optimierung der Leistung von verwickelten Prozessen erleichtert und sich wiederholende manuelle Abläufe wurden durch automatisierte Prozessen ersetzt [NOR15].

Die Einführung neuartige Werkzeuge und spezielle Anwendungen hat es Ingenieuren erleichtert, anspruchsvolle Modelle zu vereinfachen und pionierhafte Techniken zu implementieren. Solche Innovationen haben zur Lösung der Herausforderungen in der Regelungstechnik beigetragen und eine vielen Anwendungen in unterschiedlichen Branchen ermöglicht [KAT97].

2.3 Signale und Systeme, Steuerungstechnik und Einleitung in Regelungstechnik

Ein Regelschleife besteht in der Regel aus Unterschleifen , die darauf abzielen, eine definierte Leistung unter Berücksichtigung der Initialbedingungen zu erzielen. Ein einfaches Prozess hat drei Hauptkomponenten: das Eingangssignal U , das Verfahren und das Ausgangssignal Y . Die Beziehung zwischen den Teile wird durch die Richtung der Pfeile verdeutlicht. Verfahren, bei denen die Ausgangssignale nicht zurückgeführt werden, werden als offene Regelkreise bezeichnet.

Das Verfahren kann auch einen Bediener und Störsignalen Z enthalten. Die Referenzsignale, auch Orientierungsgröße W genannt, ist das Eingangssignal des Bedieners, dessen Ausgang als Stellsignal in die Regelstrecke eingeht und geregelt

wird, um sicherzustellen, dass das Ausgangssignal Y entsprechend der Orientierungsgröße verhält [LUN16].

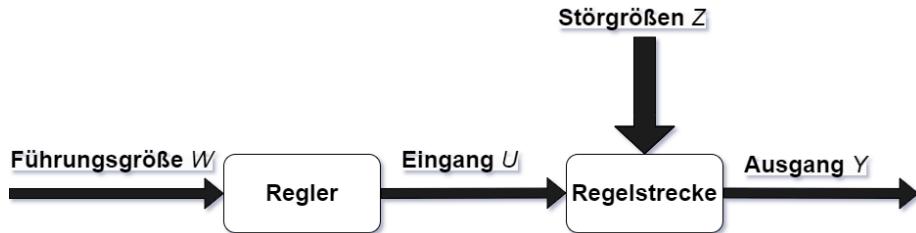


Abbildung 2.1 : Offener Regelkreis

Ein Bediener kann unterschiedliche Formen haben, wie Bspw. ein Operationsverstärker oder eine mechanische Lenkung. In Letzterem können die Räder als das geregelte Ausgangssignal Y angesehen werden, während das Lenkrad als Stellsignal U fungiert und deren Verbindung als Regelstrecke bezeichnet wird. Beeinträchtigungssignale können unterschiedliche Auslöser haben, wie etwa eine feuchte Straße oder zu hohe Geschwindigkeit. Ein typisches Merkmal offener Regelkreise ist, dass sie weder Beeinträchtigung verdrängen noch unbeabsichtigtes Rauschen oder Fehler in der Eingangsgröße korrigieren können, was das Ausgangssignal irreführen könnte. In der Realität werden solche Abläufe nur dann angewendet, wenn sie weder innere noch äußere Beeinträchtigung erfahren und die Beziehung zwischen Eingang und Ausgang gegeben ist. Die Nachteile des offenen Regelkreises, insbesondere seine Sensitivität gegenüber Störgrößen und die Untauglichkeit, die dadurch entstehende Fehler zu korrigieren, können durch die Schließung des Regelkreises, wie in **Abbildung 2.2** visualisiert, überwunden werden. In geschlossenen Regelkreisen ist eine Regelung dadurch zu erreichen, dass Ausgangssignal Y zurückgeführt und mit der Orientierungsgröße W verglichen. Das Ergebnis wird als Fehler bezeichnet und durch eine der Fehler proportionalen Eingang durch die Regelstrecke hindurch korrigiert.

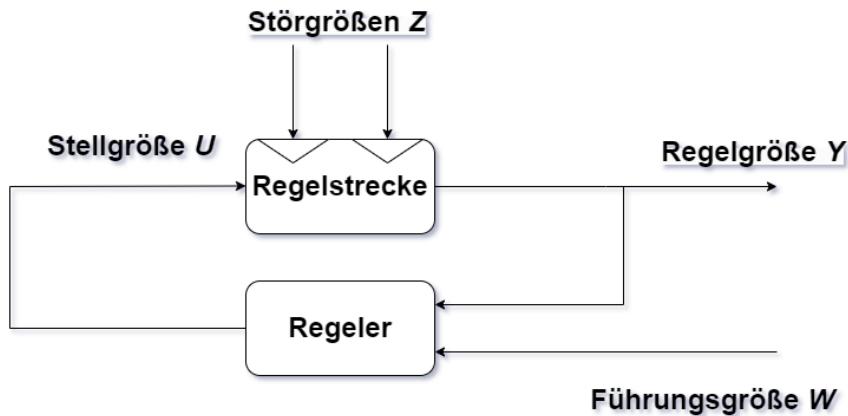


Abbildung 2.2 : Geschlossener Regelkreis

In **Abbildung 2.2** ist der Einfluss der Rückleitung vereinfacht visualisiert, welche nicht nur durch die Verminderung der Abweichung motiviert ist, sondern auch durch andere sehr wichtige Aspekte, wie die Verbesserung der Ablaufleistung, die durch die tiefere Behandlung von dem Prozesse ermittelt werden können.

Ein Verfahren wird in der Signaltheorie als eine mathematische Beziehung zwischen dem Eingang x und dem Ausgang y beschrieben [MAR17]:

$$x \rightarrow y \quad \text{bzw.} \quad y = f(x) \quad (3.1)$$

Signale können wiederum zeitlich oder diskret sein. Die Abstraktion der Signaltheorie bildet die theoretische Basis bei dem Einstieg in regelungstechnische Verfahren. Der Einflüsse von Beeinträchtigungen Z können nun wie in **Abbildung 2.3** hinzugefügt werden, wobei die Regelstrecke und der Bediener als Kaskade bzw. Reihenschaltung gelten. Die Reihenschaltung ergibt eine verschachtelte Beziehung der kombinierten Bediener bzw. Regelstrecken, während sie bei der Parallelschaltung summiert oder subtrahiert werden. Die Beziehung der Bediener bzw. Regelstrecken wird als Überführungsfunktion bezeichnet, die im zeitkontinuierlichen Bereich durch die Faltung mit Stoßantwort bestimmt und somit mathematisch beschrieben wird [POP21]:

$$H(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot \delta(t-\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Die Berechnung der Faltung im zeit-kontinuierlichen Bereich ist aufwendig, daher wird dies oft auf Fourier- oder Laplacetransformation erledigt. Laplacetransformation wird meistens verwendet, weil sie eine leichte Beschreibung der

Überführungsfunktion erlaubt. Im Bildbereich wird die Reihenschaltung zu einer Multiplikation der Transferfunktionen und die Summe bleibt unverändert.

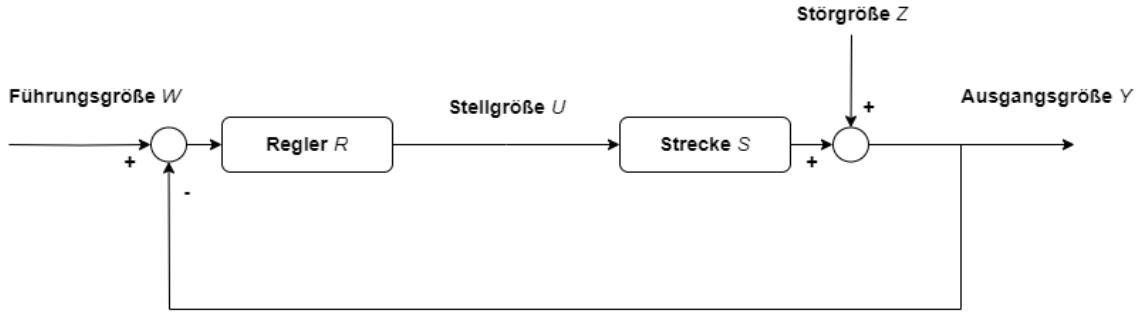


Abbildung 2.3 : Blockdiagramm des geschlossenen Regelkreises gemäß Signal-theorie

Bildbereich-Herleitung von Transferfunktion des geschlossenen Regelkreises :

$$\text{Fehler: } e(s) = W(s) - Y(s) \quad (3.3)$$

$$U(s) = R(s) \cdot e(s) = R(s) \cdot (W(s) - Y(s)) = R(s) \cdot W(s) - R(s) \cdot Y(s) \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} Y(s) &= S(s) \cdot U(s) + Z(s) = S(s) \cdot (R(s) \cdot W(s) - R(s) \cdot Y(s)) + Z(s) \\ \Leftrightarrow Y(s) &= S(s) \cdot R(s) \cdot W(s) - S(s) \cdot R(s) \cdot Y(s) + Z(s) \\ \Leftrightarrow Y(s) + S(s) \cdot R(s) \cdot Y(s) &= S(s) \cdot R(s) \cdot W(s) + Z(s) \\ \Leftrightarrow Y(s) \cdot (1 + S(s) \cdot R(s)) &= S(s) \cdot R(s) \cdot W(s) + Z(s) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\Leftrightarrow \frac{Y(s)}{W(s)} = G_w(s) = \frac{S(s) \cdot R(s) + Z(s)}{(1 + S(s) \cdot R(s))} \quad (\text{Führungsübertragungsfunktion})$$

$$\text{Störungsfrei folgt: } G_w(s) = \frac{S(s) \cdot R(s)}{(1 + S(s) \cdot R(s))} \quad (3.6)$$

Es ist bedeutsam zu beachten, dass die Störung nicht immer in der in **Abbildung 2.3** visualisierten Weise auf den Ablauf ausgelöst wird. Sie können ebenfalls vor der

Regelstrecke auftreten oder als Beeinträchtigung zusammen mit dem Eingang in den Regelkreis gelangen. Trotz der variierenden Eintrittspunkte bleibt die Gültigkeit von **Gleichung 3.6** erhalten, solange die Beeinträchtigung vernachlässigt werden.

Es lassen sich Vielzahl von gewöhnlichen Transferfunktionen mit Hilfe einer Konnektierungstabelle bestimmen, sodass auch verwickelte Transferfunktionen als zusammengesetzte Transferfunktionen gewöhnlicher Funktionen leicht hergeleitet werden können. Gleichermaßen gilt für die Reversion aus Laplace- zum zeitkontinuierlichen Bereich gem. **Abbildung 2.4 [POP21]**.

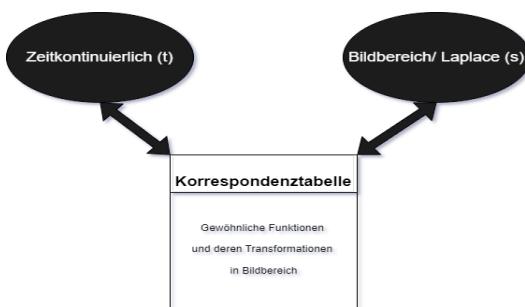


Abbildung 2.4 : Rück- und Transformation mit Konnektierungstabelle von Laplace'schen gewöhnlichen Funktionen

Wie erklärt, wird ein Regelablauf geschlossen, indem der Ausgang zurückgeführt wird, um Einfluss auf unterschiedliche Eigenschaften zu nehmen, darunter der Abweichung von der Orientierungsgröße. Das bedeutet, dass sich der Ablauf kollaborieren sollte, damit eine solche Regelung von Bedeutung wird. Eine nicht-statische Gesamtheit muss gem. Signaltheorie zwei wichtige Merkmale erfüllen, nämlich **Linearität** und **Zeitinvarianz**. Linearität bedeutet einerseits Additivität:

$$x_1(t) + x_2(t) = y_1(t) + y_2(t), \quad (3.7)$$

sodass die Summe verschiedener Eingangswerte eine Überführungsfunktion ergibt, und die Summe der jeweiligen Ausgängen entspricht, und andererseits Konsistenz:

$$a \cdot x(t) = a \cdot y(t), \quad (3.8)$$

sodass die Reaktion auf einen skalierten Eingang wiederum einen skalierten Ausgang ist. Die Zeitinvarianz bedeutet, dass eine Verschiebung des Eingangs gleiche Verschiebung des Ausganges ist:

$$x(t-T_0) = y(t-T_0). \quad (3.9)$$

Allgemein wird **LTI** überprüft, indem begutachtet wird, ob eine skalierte Addition zweier verschobener Eingangssignale in dem Ausgang die gleiche Wirkung hat wie gem. **Gleichung 3.10** erwartet [MAR17]:

$$a \cdot [x_1(t-T_0) + x_2(t-T_0)] = a \cdot [y_1(t-T_0) + y_2(t-T_0)]. \quad (3.1)$$

LTI ist bei der Dynamik von entscheidender Bedeutung, da letztere im zeitkontinuierlichen Bereich durch Differentialgleichungen und diskret durch Differenzengleichungen beschrieben werden, die solche Eigenschaften voraussetzen. Weil die meisten physikalischen Prozessen zeitlich sind, wird zur Begutachtung die Umwandlung in den Laplace oft genutzt.

In Regelungsproblemen sind oft Nichtlinearitäten vorhanden, die entweder auf physikalischen Effekten beruhen oder durch Messversuchen bestimmt werden können. Die Nichtlinearitäten können direkt aus dem Prozess als nichtlineare Differentialgleichungen abgeleitet werden, die dann in der Nähe von dem Arbeitspunktes durch eine Taylorentwicklung linearisiert werden [LUN16]. Eine nichtlineare Differentialgleichung ist Bspw:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = f(y, \frac{dy}{dt}) \quad (3.1)$$

Die zugehörige Taylorreihe lautet wie folgt :

$$f(y) \approx f(y_0) + \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial f}{\partial y}_{(y_0)} [(y - y_0)] + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}_{(y_0)} [(y - y_0)^2] + \dots \quad (3.1)$$

Bei kleinen Verzerrungen können höhere Terme der Taylorreihe vernachlässigt werden. Wenn die Beziehung zwischen Eingang und Ausgang nur messbar ist, bleibt das grundlegende Verfahren für die Analyse ähnlich. Die Beziehung der Variablen werden durch Kennlinienfelder visualisiert, wie es in **Abbildung 2.5** zu sehen ist, und für feste Fixwerte nahe an einem gewissen Punkt linearisiert, welche sehr nahe am Arbeitspunkt ist.

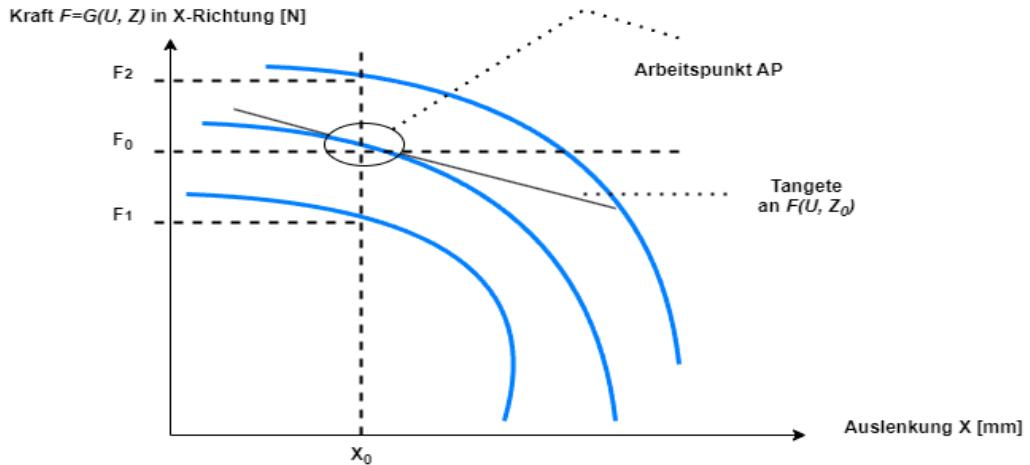


Abbildung 2.5 : Quantisierung einer (unbekannten) Störgröße mittels Kennlinienfeld

Allgemein wird ein LTI wie folgt beschrieben:

$$\sum_{i=0}^n a_i \cdot \frac{d^i y(t)}{dt^i} + \sum_{i=0}^m b_i \cdot \int_0^t y(\tau) d^i \tau = \sum_{i=0}^r c_i \cdot \frac{d^i x(t)}{dt^i} + \sum_{i=0}^s e_i \cdot \int_0^t x(\tau) d^i \tau \quad (3.1)$$

Mit:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = a_n \cdot \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 \cdot y(t) \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=0}^m b_i \cdot \int_0^t y(\tau) d^i \tau = b_m \cdot \int_0^t y(\tau) d^m \tau + b_{m-1} \cdot \int_0^t y(\tau) d^{m-1} \tau + \dots + b_0 \cdot \int_0^t y(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

Ähnlich zu **Gleichungen 3.14** und **3.15** gilt für Input $x(t)$ auf der rechten Seite der **Gleichung 3.13**, die zunächst auf die Form gebracht wird:

$$\sum_{i=0}^g u_i \cdot \frac{d^i y(t)}{dt^i} = \sum_{i=0}^w h_i \cdot \frac{d^i x(t)}{dt^i} + q_0 \cdot \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

D.h:

$$\begin{aligned} u_g \cdot \frac{d^g y(t)}{dt^g} + u_{g-1} \cdot \frac{d^{g-1} y(t)}{dt^{g-1}} + \dots + u_0 \cdot y(t) &= h_w \cdot \frac{d^w x(t)}{dt^w} + h_{w-1} \cdot \frac{d^{w-1} x(t)}{dt^{w-1}} + \dots \\ &\quad + h_0 \cdot x(t) + q_0 \cdot \int_0^t x(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (3.1)$$

Anschließend wie folgt normiert:

$$\sum_{i=1}^k T_i \cdot \frac{d^i y(t)}{dt^i} + y(t) = K_s \cdot \left[\sum_{i=1}^y T_{D_i} \cdot \frac{d^i x(t)}{dt^i} + x(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t dx(\tau) d\tau \right] \quad (3.1)_8$$

Die obere Normierung dient dazu, die Differentialgleichung ausschließlich in Bezug auf die tatsächlichen Ein- und Ausgängen und nicht von deren Ableitungen zu formulieren, wodurch sämtliche Konstanten eliminiert werden.

In der Regelungstechnik werden die Differentialgleichungen als Überführungsglieder bezeichnet. Das erlaubt eine Klassifizierung von Prozessen anhand ihrer Überführungsfunktionen und ihrer dynamischen Veränderungsrate, was die strategische Entwicklung einer tauglichen Regelung erleichtert. Um die Art des Überführungsglieds zu bestimmen, wird die Differentialgleichung in die genormte Form gem. **Gleichung 3.18** umgewandelt. Die höchste Ordnung des Index der Kontante T_i gibt die Stagnation an. K_s wird als proportionale statische Verstärkung bezeichnet, T_{D_i} als Zeitparameter vom differenzierenden Glieds und T_i als Nachstellphase von dem Integrator. Die **Gleichung 3.18** umhüllt sämtliche Basisübertragungsglieder [LUN16]. Aus praktischen Gründen werden Systeme oft nur bis zur zweiten Ordnung betrachtet. Bspw. wird ein Prozess aus Masse-Feder-Dämpfer-Mechanismus durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung repräsentiert. Die Konnektierung mit einem anderen, gleichartigen Prozess erlaubt, dass die Schaltung durch ein Ersatzschaltbild auf ein reduziertes Netz mit einem Bauteil je Zweig reduziert wird, welches eine leichte Begutachtung, je nach Schaltung (Parallel- oder Reihenschaltung) und Zusammenfassung gleichartiger Einheiten, sodass die Ordnung der Differentialgleichung nicht ändert. Das Prinzip gilt auch bei Impedanz-Induktanz-Mechanismen aus der Elektrotechnik, wobei die höchste Ordnung in der Regel „Zwei“ beträgt.

Ein Integrator ist äquivalent zu einer Retardierung des Ausgangs. Die proportionale Verstärkung gibt an, wie stark das Eingang Relativ zu Ausgang verstärkt wird. Bspw. wird bei einem Fahrrad die relativ geringe Drehung des Pedals durch eine verstellbare Verstärkung verstärkt, was zu einer erhöhten Drehung der Räder verursacht. Die allgemeine Differentialgleichung wird gem. den vorangegangenen Überlegungen und Erläuterungen wie folgt ausgedrückt:

$$T_2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_s \cdot \left[\frac{dx(t)}{dt} + x(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t dx(\tau) d\tau \right] \quad (3.1)_9$$

Das Prozess, das durch **Gleichung 3.19** repräsentiert wird, wird als **PIDT2-Prozess** bezeichnet und enthält daher sämtliche Arten von Basisüberführungsgliedern. Andere Überführungsglieder können auch als Kombination der Basisüberführungsglieder betrachtet werden. Die Differentialgleichung eines Masse-Feder-Dämpfer-Mechanismus ist:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \varrho \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \varsigma \cdot x(t) &= F_{aus}(t) \\ \Leftrightarrow \frac{m}{\varsigma} \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{\varrho}{\varsigma} \cdot \frac{dx(t)}{dt} + x(t) &= \frac{1}{\varsigma} F_{aus}(t) \quad \text{mit:} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$F_{aus}(t)$: **Resultierende Kraft**, $x(t)$: **Auslenkung**
 m : **Masse**, ϱ : **Dämpferkonstante** ς : **Fäderkonstante**.

Vergleichen mit der **Gleichung 3.19** liefert:

$$T_2 \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = K_s \cdot F_{aus}(t) \quad (3.2)$$

Der Prozess ist dann äquivalent mit einem Proportional Transferglied mit Retardierung zweiter Ordnung bzw. PT2-Prozess [LUN16].

2.4 Theoretische Basis der Regelungstechnik

Stabilität ist einer der prioritären Aspekte bei der Regelungsentwurf. Ein instabiler Prozess wird in der Regelungstechnik als unbrauchbar betrachtet. Die Untersuchung der Stabilität ist aber nur bei dynamischen Modellen erreichbar, die die bereits erwähnten LTI-Merkmale realisieren, die durch lineare Differentialgleichungen n-ten Grades mit konstanten Koeffizienten erklärt werden können. Dabei wird zwischen absoluter und relativer Stabilität unterschieden. Die Absolute beantwortet die Frage, ob das Gebilde stabil ist, mit „Ja“ oder „Nein“, während die relative Stabilität beschreibt, wie stabil es ist. Ein Prozess wird als stabil gesehen, wenn sein Ausgang unabhängig von den Anfangswerten mit einem begrenzten Eingang begrenzt ist. Der Ausgang kann auch gemäß **Gleichung 3.22** als Faltungsintegral des Eingangs mit der Reaktion ausgedrückt werden [FAR09]:

$$y(t) = \int_0^\infty u(t-\tau) \cdot x(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
&\Leftrightarrow |y(t)| = \left| \int_0^\infty x(t-\tau) \cdot g(\tau) d\tau \right| \\
&\Leftrightarrow |y(t)| \leq \int_0^\infty |x(t-\tau)| \cdot |g(\tau)| d\tau, \quad \text{wenn } x(t) \text{ begrenzt} \rightarrow |x(t)| \leq M \\
&\Leftrightarrow |y(t)| \leq M \cdot \int_0^\infty |g(\tau)| d\tau, \quad \text{wenn } y(t) \text{ begrenzt} \rightarrow |y(t)| \leq N \\
&\Leftrightarrow M \cdot \int_0^\infty |g(\tau)| d\tau \leq N, \\
&\Leftrightarrow \int_0^\infty |g(\tau)| d\tau \leq Q < \infty, \quad \text{mit } Q = \lceil \frac{N}{M} \rceil
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Für Laplac'sche Variable s gilt: $|e^{-st}| = |e^{-\sigma t}|$ mit σ Realteil von s . Das he

$$\Leftrightarrow |G(s)| = |\mathcal{L}[g(t)]| \leq \int_0^\infty |g(\tau)| \cdot |e^{-\sigma \tau}| d\tau \leq Q < \infty, \quad (i)$$

Die Gleichung (i) ist nur für $\sigma \leq 0$ erfüllt. Das bedeutet, dass die Überführungsfunktion $G(s)$ keine Pole haben darf, deren Realteil in der rechten s-Halbebene liegt. Die Pole müssen keinen positiven Realteil haben, sonst ist das Gebilde entweder instabil oder grenzstabil. Von asymptotischer Stabilität spricht man, wenn die Entwicklung der Ausgangsgröße bei ausreichend großen Perioden gegen Null konvergiert. Für die Untersuchung der Stabilität wird zunächst die Überführungsfunktion bestimmt. Die Differentialgleichung besteht aus der Summe zweier Teillösungen, nämlich der partikulären und der konsistenten Lösung [POP21]:

$$\begin{aligned}
y(t) &= y_h(t) + y_p(t) \quad \text{mit} \\
y_h(t) &: \text{ Konsistente Lösung, } \quad y_p(t) : \text{ Partikuläre Lösung.}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Die konsistente Lösung beschreibt die Differentialgleichung ohne Störung. Die partikuläre Lösung hängt von dem Eingang ab. Zur Berechnung der konsistenten Lösung ist es einfacher, das typische Gleichung zu verwenden, indem eine Umwandlung in den Bildbereich gemacht wird, wodurch ein Polynom n -ten Grades entsteht:

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot s^i = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_0 + \lambda_1 \cdot s + \lambda_2 \cdot s^2 + \lambda_3 \cdot s^3 + \dots + \lambda_n \cdot s^n = 0 \tag{3.2}$$

Die konsistenten Lösung liefert die Lage der Nullstellen, die ebenfalls Rolle bei Robustheitsüberprüfung spielt. Nach der Umwandlung der kompletten Differentialgleichung in den Bildbereich wird nachfolgend vorgegangen:

$$Y(s) \cdot \sum_{i=0}^n \lambda_{y_i} \cdot s^i = X(s) \cdot \sum_{i=0}^m \lambda_{x_i} \cdot s^i,$$

$$\Leftrightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{i=0}^m \lambda_{x_i} \cdot s^i}{\sum_{i=0}^n \lambda_{y_i} \cdot s^i} = \frac{\lambda_{x_0} + \lambda_{x_1} \cdot s + \lambda_{x_2} \cdot s^2 + \lambda_{x_3} \cdot s^3 + \dots + \lambda_{x_n} \cdot s^n}{\lambda_{y_0} + \lambda_{y_1} \cdot s + \lambda_{y_2} \cdot s^2 + \lambda_{y_3} \cdot s^3 + \dots + \lambda_{y_n} \cdot s^n} = \frac{Z(s)}{N(s)}, \quad (3.2 \text{ } 6)$$

$G(s)$: Übertragungsfunktion eines Übertragungsgliedes,

$Z(s)$: Zähler der Übertragungsfunktion,

$N(s)$: Nenner der Übertragungsfunktion.

Die Lösung des Zählerpolynoms liefert die Nullstellen und die Lösung des Nennerpolynoms liefert die Polstellen. Die Lösungen eines Polynoms ab dem dritten Grades können oft numerisch oder durch Vermutung wie bei dem newtonschen Approximation der Nullstellen berechnet werden. Nachdem die Lösung eines Polynoms n-ten Grades mit $n \geq 3$ gefunden wurde, können entweder Polynomdivision oder das Horner-Schema verwendet werden, um die anderen Lösungen unter dem n-ten Grad zu finden. Das Horner-Schema wird aufgrund seiner Recheneffizienz verwendet [LUN16]. In MATLAB können die Lösungen eines Polynoms vom n-ten Grad mit der Funktion **roots(p)** berechnet werden.

Neben der oben erklärten Methode existieren weitere Methoden zur Begutachtung der Tauglichkeit einer Regelung, darunter das Hurwitz-Kriterium, das Nyquist-Kriterium und das Bode-Diagramm. Das Hurwitz-Kriterium ist eine algebraische Methode, das die absolute Stabilität des Regelkreises bestimmt, indem untersucht wird, ob die Polstellen mit fixen Koeffizienten, die das LTI beschreibt, auf dem rechten oder auf dem imaginären Teil liegen. Das Nyquist-Kriterium ist eine halbgraphische Methode, die den Unterschied zwischen der Anzahl der Polstellen und der Anzahl der Nullstellen untersucht, die sich in der rechten s-Halbebene befinden. Das Bode-Schaubild ist eine progressive Methode, die aussagekräftige Informationen über die Stabilität liefert. Es exemplifiziert den Amplituden- und Phasengang des Frequenzgangs in dB bzw. Grad, wobei die Beiträge der einzelnen Teil-Überführungsfunktionen addiert und multipliziert werden, um die linearen

Merkmale der Überführungsfunktion zu verdeutlichen. Die Bode-Diagramm wird logarithmisch dargestellt, um das Eintragen und Ablesen der Werte zu erleichtern, und kann daher als logarithmische Darstellung des Phasengangs gesehen werden [LUN16].

Die Phasenreserve gibt das Verhältnis an, um welches die Phasenverschiebung reduziert werden kann. Eine niedrige Phasenreserve ist mit einem erhöhten Schwingungsverhalten fest-verdrahtet. Ein geschlossener Regelkreis ist asymptotisch stabil, wenn alle Bedingungen der Polvorgabe in offenen Regelkreisen erfüllt sind und eine positive Phasenreserve besteht, was bedeutet, dass die Phasenverschiebung bei der Durchtritt-Frequenz kleiner als -180° sein muss. Die zuletzt erwähnte Überlegungen werden in Verbindung mit Nyquist-Kriterium im Bode-Schaubild angewandt und unterstützen die Entwicklung oder Verbesserung eines tauglichen Bedieners. Die Regelungsentwicklung besteht im Wesentlichen darin, die Eigenwerte der geschlossenen Schleife so zu beeinflussen, dass das gewünschte Dynamik erreicht wird. In den klassischen Ansätzen, in denen Regelkreise durch Transferfunktionen repräsentiert werden, wird das Verhalten des offenen Regelkreises analysiert und dessen Ziele definiert. Dann werden vorhandene Bediener betrachtet und unter Berücksichtigung ihres Reaktionscharakteristik ausgewählt oder kombiniert. Die Überführungsfunktion von dem Bediener wird dann mit dem Prozess als Rückschleife kombiniert, um die vollständige Überführungsfunktion zu bekommen. Anschließend wird eine Stabilitätsanalyse durchgeführt.

Auch bei der Bode-Abbildung gibt es eine Klassifizierung der Teilskizzen je nach Lage der Pol- und Nullstellen in der s -Ebene, um das manuelle Zeichnen zu erleichtern. Es ist leichter, die Polynome des Nenners und des Zählers zu lösen und sie dann so zu dimensionieren, dass nur Fixwerte mit der s multipliziert werden und dann entweder eine „1“ davon subtrahiert oder dazu addiert wird. Die Kehrwerte der einzelnen Konstanten sind die Kreisfrequenzen, an denen sich das Verhalten ändert, und können direkt in die Skizze eingetragen werden. Enthält der Ausdruck eine Subtraktion, liegt die Polstelle rechts, ansonsten links, was einen Knick nach oben oder unten und eine Phasenänderung von 90° bedingt. Ähnlich gilt oppositionell für die Nullstellen. Komplex imaginäre Pol- und Nullstellenpaare führen auf ein verzweigten Effekt. Zunächst wird mit der Verstärkung begonnen, die bei negativen Werten eine zusätzliche 180° -Drehung hervorruft. Die Gesamtstatik der Verstärkung wird durch die Logarithmierung von dem Betrag der Überführungsfunktion ermittelt. Anschließend wird in die Bode-Normalform

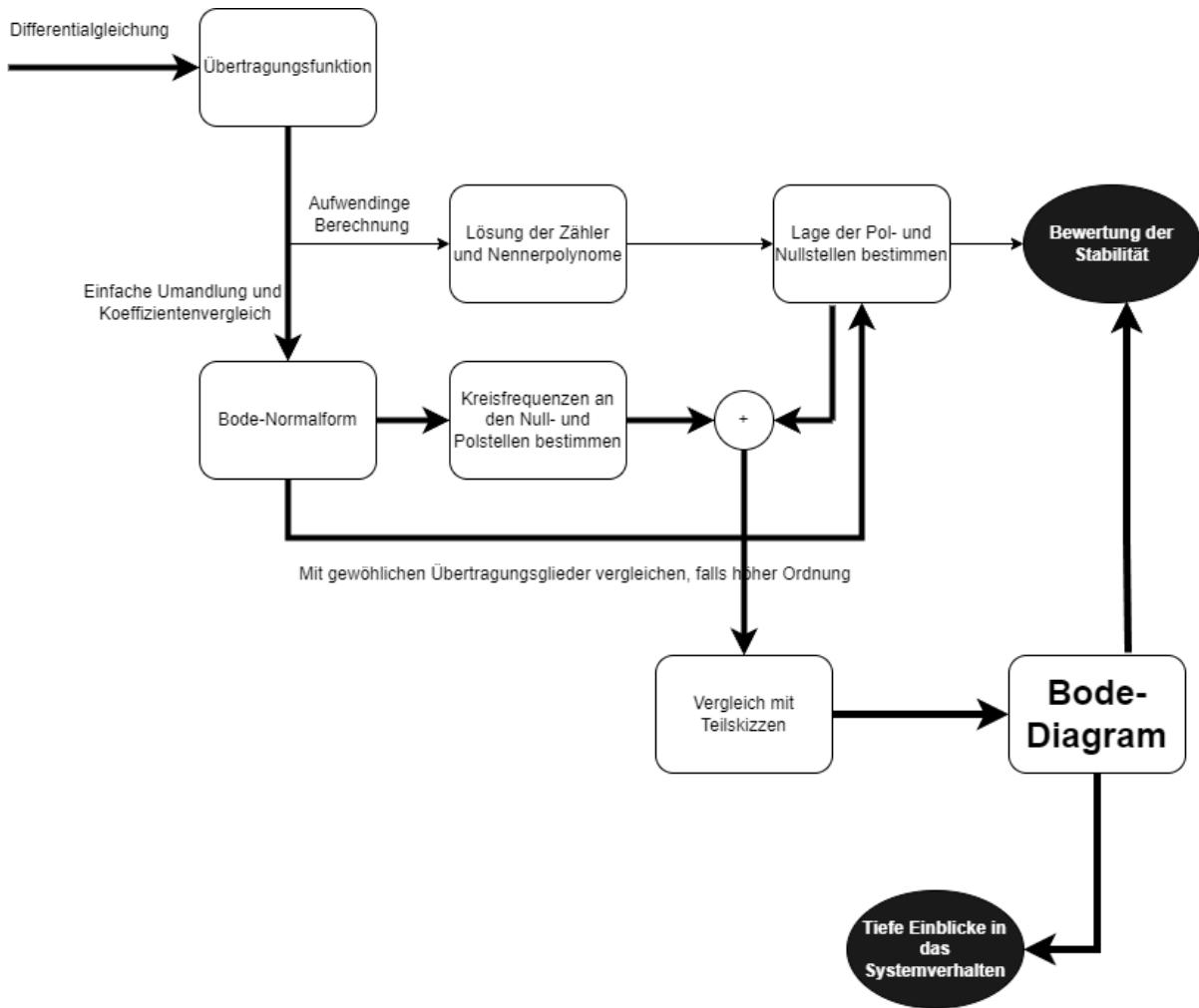


Abbildung 2.6 : Der Weg zum Bode-Diagramm

umgewandelt, wobei alles wie bereits erklärt ausgeklammert ist. Danach werden die einzelnen Kreisfrequenzen durch die Division von 1 durch die mit den s-Variablen multiplizierten Fixwerten berechnet. Danach festgestellt, ob es sich um eine Null- oder Polstelle handelt. Schließlich werden die in der Formelsammlung verfügbaren Tabellen der Teil-Bode-Abbildungen entsprechend der Lage der Null- und Polstellen verglichen und das Bode-Schaubild entsprechend "additiv" ververtet. In **Abbildung 2.6** ist die Methode beim Zeichnen von dem Bode-Diagramm visualisiert. In MATLAB kann das Diagramm mit **bode(.)** gezeichnet werden.

Das Diagramm ermöglicht nicht nur die Bewertung der Stabilität, sondern auch die Ableitung weiterer Eigenschaften, einschließlich der Phasenreserve und Amplituden-

reserve, die sich im Schnittpunkt des Amplitudengangs mit der horizontalen 0dB-Linie befinden. Die Amplitudenreserve quantifiziert die noch verfügbare Verstärkung. Die Vorwärtsregelung beinhaltet die Einleitung der Regelungsüberführungsfunktion mit noch nicht festgelegten Parametern in den Prozess. Durch einen Vergleich der Zielparameter mit den Ist-Parametern werden dann die Regelparameter bestimmt. Bei der Rückwärtsregelung werden die gewünschten typischen Gleichungen mit den tatsächlichen typischen Gleichungen von dem Prozess verglichen, um die Regelparameter so gestallten, dass die gewünschten Merkmale erreicht werden. So kann die Regelung entwickelt, um die gewünschten Vibranz und Kontrollziele zu erreichen.

Die Basisgattungen der Regelung sind P,I und D-Bediener. P-Bediener expionieren eine moderate Reaktion und moderate stationäre Richtigkeit, I-Bediener reagieren zu langsam, aber zeigen hohe stationäre Eindeutigkeit und D-Bediener reagieren im Kontrast zu I-Bedienern sehr schnell, haben aber keine Einflüsse auf die stationäre Eindeutigkeit. Mit anderen Worten sind I-Bediener aufgrund von dem verbleibenden Regelabweichung und technischer Realisierbarkeit auszuwählen, während D-Bediener zu einer Schnelle Rückfluss und Vermeidung von Fluktuationen am besten tauglich ist.

Unterschiedliche Effekte werden dadurch überlagert werden, dass die Basisgattungen zusammenarbeiten, welches dazu bringt, dass die einzelnen Effekte addiert werden. Ein PID-Bediener ist eine Überlagerung von den Basisgattungen und sollte daher sehr winzige bleibende Regeldifferenz wegen dem I-Anteil haben, welche auch überwiegend in stationären Begebenheiten bemerkbar ist. Die schnelle Reaktion wird durch den D-Anteil erreicht.

2.5 Walzprozess: Begutachtung

Das bereits implementierte PID hat nicht optimal und schnell auf Beeinträchtigung reagiert, insbesondere wenn sich die Vorgabewerten oder sich Radius ändert wie ein Impakt im Durchmesser des Bauteils. Dies führt dazu, dass sich bei einer kleinen Anomalie von 0.05 mm des Durchmessers, die gemessene Kraft mit bis zu 150 N abweicht.

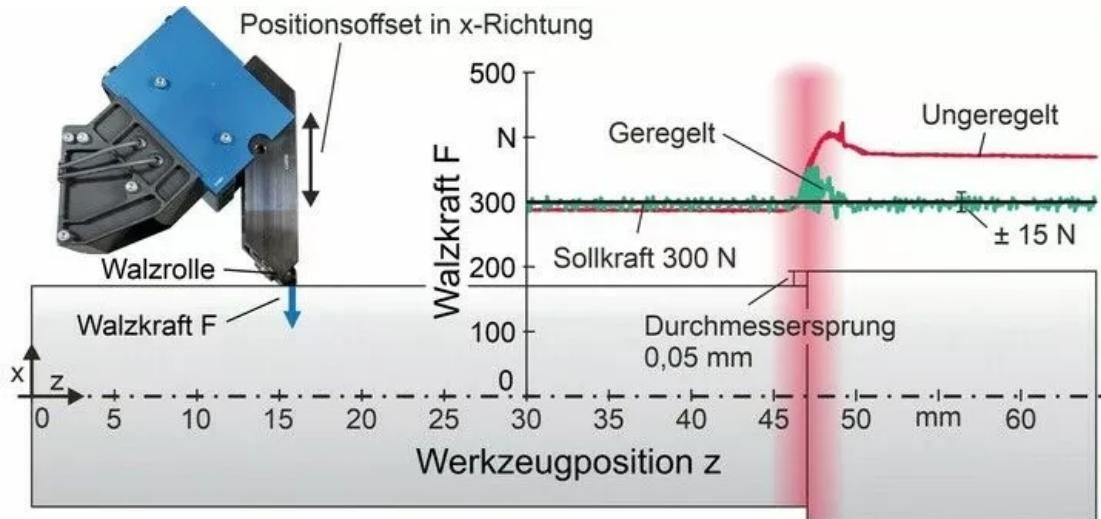


Abbildung 2.7: Verhalten des geregten und ungeregelten Festwalzprozess

Das mechanische Walzen ist ein idealer Prozess zur Steigerung der Lebensdauer überbeanspruchte Werkstoffe. Die Möglichkeiten zur Ablaufmonitoring waren bisher sehr limitiert, was die Automatisierung von dem Prozess verhindert hat. In einem Kooperationsprojekt zwischen einem Unternehmen für Walzgeräte und IFW wurde ein neuartiges sensorisches Apparatus von Ecoroll der EG-45 Baureihe modifiziert, mit dem die Belastungen entlang der x- und z-Richtung bestimmt werden können, wodurch die Grundlagen für Ablaufmonitoring und Regelung geschaffen wurden.

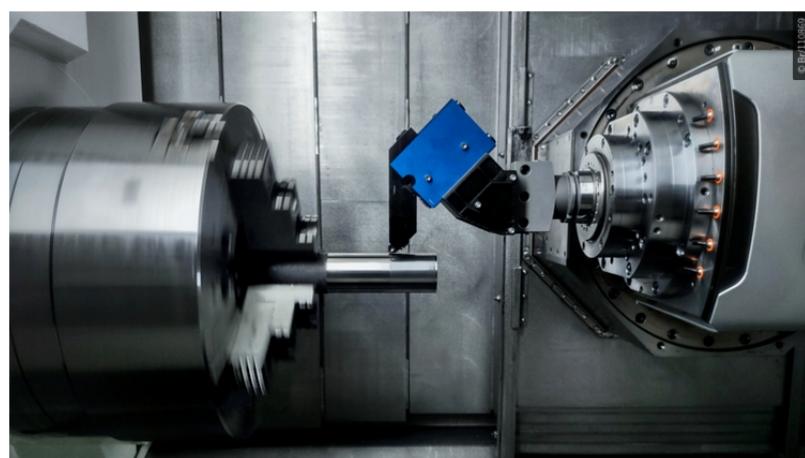


Bild 2.1: Walzwerkzeug am IFW Institut

Die Lebensdauersteigerung ist durch das Glätten der Grundstoffhülle, Verfestigung und Einbringung von Druckspannungen erreichbar. Hindernisse des Kaltwalzablauf sind, dass die ausgeübten Kräfte in zunehmender Tiefe nicht genau ermittelt werden können, weshalb Analyse und Monitoring des Ablaufs zur Qualitätsbewertung erforderlich ist. Die verfügbaren Geräte auf dem Markt können die Kraft nur entlang einer Richtung messen. Das am IFW neu entwickelte Gerät bietet zusätzlich die Messung entlang orthogonale Achse, um die tatsächliche Walznormalkraft zu berechnen [DEN22].

Durch mehrere Messungen und Begutachtungen in IFW wurde die Kraftauflösung von ± 15 N schärfer gemacht, was in Relation zu dem maximalen Anwendungsbereich von 4 kN einer maximalen Abweichung von 0,5 % entspricht. Die zweiachsige Kraftauflösung ermöglicht es, Fehler festzustellen, darunter Verzerrungen im Durchmesser sowie Unrundheiten. Die eingebrachte Kraft ist auschlaggeben für die ergebende Außenhaut sowie die eingebrachten Spannungen, die bei zunehmender Verformung zunehmen und somit ein Beeinträchtigungsverhalten widerspiegeln [DEN23]. Die Drehmaschine verfügt über eine Antenneapparatus, die eine Verbindung mit dem Walzwerkzeug herstellt und eine Fernbedienung erlaubt. Die Daten fließen durch WLAN und auch über Bluetooth, sodass das Apparatus auch per Handy gesteuert werden kann. Der bisher verwendete PID-Bediener kommuniziert mit dem Apparatus über die Standardschnittstelle OPC-UA, die als Server in der Maschine und als Client auf einem IPC mit Beckhoff-Dashboard und Windows-Control installiert ist. Der IPC empfängt über die Schnittstelle die Messdaten sowie Statushinweise, die im TwinCAT visualisiert werden. Dies ermöglicht beliebige Anpassungen der Sollkräfte sowie verschiedene Konfigurationen.

Die Bestimmung der Nenngröße ist aber aufgrund des plastisch-elastischen Verhaltens des Materials sehr aufwendig und fehlerbehaftet. In der Praxis wird die Nenngröße deswegen aus bereits vorhandenen Daten ermittelt [DEN23]. Ein anderes Wagnis ist die Transferstagnation, die durch die Integration von OPC-UA zur Steuerung des Walzwerkzeugs verursacht wird.

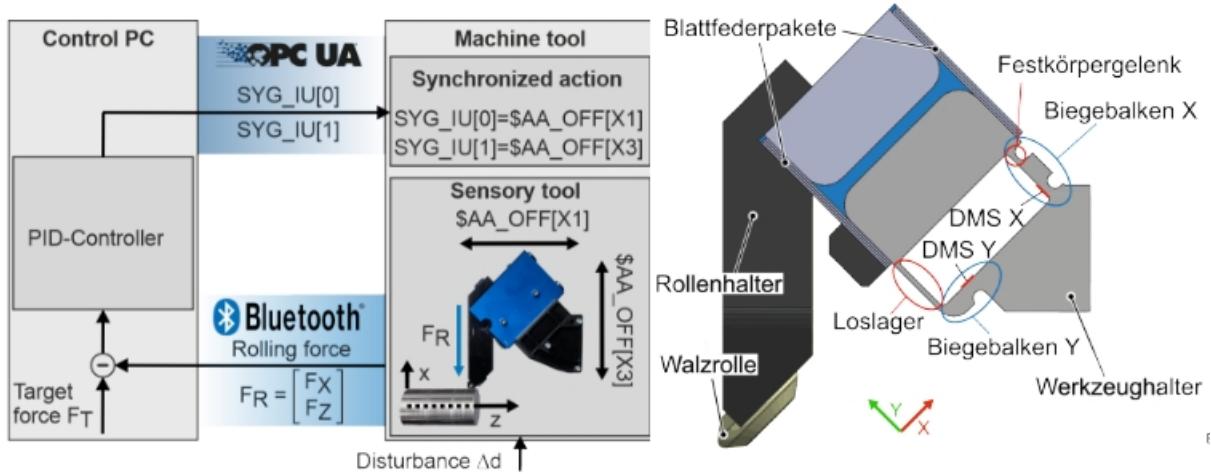


Abbildung 2.8: Interaktion von dem Prozess

2.6 Transferstagnation

Durch Transferstagnation reagiert der Ausgang auf einen gegebenen Eingang erst nach einem bestimmten Zeitraum T_t . Ein Inaktivitätsbruchteil ruft deswegen Verschiebung des Signals auf:

$$y_m(t) = y(t - T_t) \quad (3.2)$$

$y_m(t)$: Messdaten (Verzögert); $y(t - T)$: Tatsächliche Messdaten

Die zugehörige Transformation auf laplace'schen Raum lautet:

$$Y_m(s) = Y(s) \cdot e^{-T_t s} \Leftrightarrow G_m(s) = e^{-T_t s} \quad (3.2)$$

Die Übertragungsfunktion $G_m(s)$ lässt sich auf unterschiedlichen Arten approximieren. Eine solche Einschätzung kann durch die sogenannte MacLaurin-Reihe bis zum dritten Grad erfolgen:

$$e^{-T_t \cdot s} \approx \left| \frac{T_t \cdot s + \frac{T_t^2 \cdot s}{2}}{1 + T_t \cdot s + \frac{T_t^2 \cdot s}{2}} \right| \quad (3.2)_{\frac{9}{9}}$$

Die Abschätzung nach 3.29 wird aber widersprüchlich, sollte der Betrag von T_t größer werden. Eine bessere Einschätzung bietet die sogenannte Padé-Abschätzung [AST93]:

$$e^{-T_t \cdot s} \approx \frac{1 - \frac{T_t \cdot s}{2}}{1 + \frac{T_t \cdot s}{2}} \quad (p=q=1) \quad (3.3)_{\frac{0}{0}}$$

Die Approximation nach 3.30 hat Nullstelle in der rechten s -Halbebene, sodass die Antwort auf Sprüngen einen kleinen negativen Unterschwinger nahe $t=0s$ zeigt. Bei erheblichen Transferstagnationen können die Padé-Parameter p und q erhöht werden:

$$e^{-T_t \cdot s} \approx \frac{1 - \frac{T_t \cdot s}{2} + \frac{(T_t \cdot s)^2}{12}}{1 + \frac{T_t \cdot s}{2} + \frac{(T_t \cdot s)^2}{12}} \quad (p=q=2) \quad (3.3)_{\frac{1}{1}}$$

Leerlaufperioden haben einen destabilisierenden Effekt. Eine Abschätzung kann auch durch die Ortskurve erfolgen, indem die ursprüngliche Transferstagnation gezeichnet und dann mit ihrer Approximation verglichen wird, um zu überprüfen, welche davon geeignet ist und welche auszuwählen ist. Die Padé-Abschätzung erlaubt die Begutachtung von dem Prozess durch Bode-Diagramm. Die Reduktion der Phasenreserve bei der Durchtrittsfrequenz hat zur Folge, dass sich die Dämpfung so verringert, dass die Schleife vielfache Wechselpendelungen zeigt. Die Reduktion der Phase kann auch eine Reduktion der Amplitudenreserve hervorrufen, was Instabilitäten nach sich zieht.

Smith (1958) hat nachgewiesen, wie eine Regelungsstruktur entwickelt werden kann, welche die Transferstagnation herausnimmt, sodass eine Regelung basierend auf der Überführungsfunktion der offenen Schleife ohne Einfluss von Transferstagnation

ausgelegt werden kann. Die Smith-Methode zeichnet sich dadurch aus, dass eine Überführungsfunktion für die geschlossene Schleife mit Transferstagnation T_t entworfen wird, die jedoch die gleiche Impakt demonstriert, als gäbe es keine Transferstagnation [AST93].

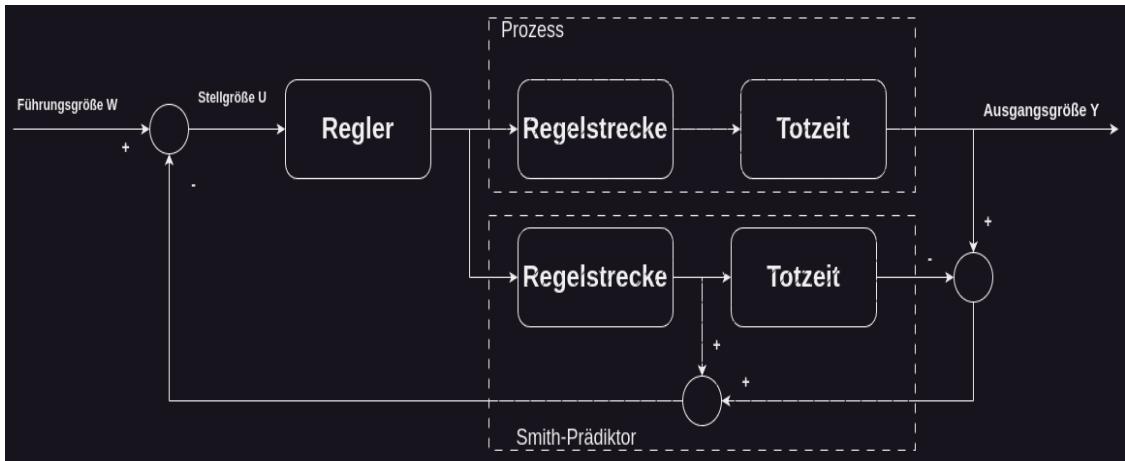


Bild 2.2: Anordnung des Smith-Schätzers

Die Überführungsfunktion der mit Smith-Schätzer geregelten Schleife ist:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{R'(s) \cdot G_o(s) \cdot e^{-T_i s}}{1 + R'(s) \cdot G_o(s) \cdot e^{-T_i s}} \quad (3.3)$$

$R'(s)$ ist dabei so zu bestimmen, dass sie alle Komponenten des geschlossenen Kreises präsent sind, aber die Transferstagnation weggemommen wird.

$$R'(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s) \cdot [G_{op}(s) \cdot e^{-T_p s} - G_{oq}(s) \cdot e^{-T_q s}]} \quad (3.3)$$

$G_{op}(s)$: Übertragungsfunktion der Regelstrecke (Äußere Schleife),

$G_{oq}(s)$: Übertragungsfunktion der Regelstrecke (Innere Schleife)

Wenn die Transferstagnationseinheit und die Transferfunktion der geöffneten Schleife gegeben sind, kann die Vernetzung ausgehend von **Abbildung 2.2** leicht entworfen werden, sodass (theoretisch) ein kontinuierlicher Abfluss resultiert, als wäre keine Transferstagnation enthalten. In zeit-kontinuierlichen Systemen ist es

obligatorisch, die Ruhezeit ausgehend von der Padé-Abschätzung anzunähern, während sie in digitalen Schaltungen direkt integriert werden kann. Es ist auch wichtig anzumerken, dass $R'(s)$ eine Verstärkung der Überführungsfunktion der offenen Schleife entblößt, weshalb kleine Diskrepanz in der Regelstrecke zu erheblichem Varianz verursachen und deswegen die Destabilisierung der Schleife verursacht wird. In idealen Begebenheiten sollte der Nenner der **Gleichung 3.34** Eins sein, was rechnerisch richtig ist, wenn die Überführungsfunktionen der offenen Schleife in der inneren sowie der äußeren Schleife gleich sind. In statischen Fällen ohne äußere Einflüsse sowie mit idealen Orientierungsgrößen und keine Beeinträchtigungen können die Parameter der Überführungsfunktionen gleichgesetzt werden. Abläufe sind aber oft hypergestresst und können aufgrund dessen Wechselpendelungen enthalten, weshalb es notwendig ist, die Konstanten in der inneren Schleife so zu konfigurieren, dass die unerwünschten Anomalien unterdrückt werden.

[MAR86] hat nachgewiesen, dass die Regelung mit dem Smith-Prediktor einige negative Effekte mit sich bringen kann, darunter die erweckte Wechselbeziehungen des Ablaufs durch kleine Diskrepanz. Huang und Debra et al. haben basierend auf der Arbeit von Marshall et al. expandiert, dass die Sensitivität des Prädiktors durch taugliche Modifikation und Konstantenauswahl (Tuning) verbessert werden kann. Zunächst wird auf den mathematischen Hintergrund des Konstantenauswahl zurückgegriffen [OBE13]:

In dreidimensionalen Räumen lässt sich ein Koordinatenreferenz mit drei zueinander orthogonal stehenden, kodifizierten Richtungsparameter komplett beschreiben. Der durch die Richtungsparameter ausgedehnte Richtungsbereich wird als Orthonormalbasis bezeichnet. Sind die Richtungsparameter nicht kodifiziert, so heißt das Richtungsgebiet eine Orthogonalbasis. Ein endlich dimensionales Richtungsgebiet über der Menge der reellen Zahlen wird mit dem Skalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$ repräsentiert. Die Wurzel des Skalarprodukts bildet das sogenannte Rahmen bzw. **Norm**. Basisrichtungsparameter haben den Rahmen Eins (L_1 -Norm) und sind paarweise zueinander orthonormal. Betrachtet man den Raum aller stetigen, 2π -periodischen Beziehungen so ergibt sich:

$$V_{2\pi} = \{ f \in V(\mathbb{R}) : \forall t \in \mathbb{R} : f(t+2\pi) = f(t) \}$$

mit dem Skalarprodukt:

(3.3)
4)

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) \cdot g(t) dt$$

Das zugehörige Rahmen wie mit $\| \cdot \|_2$ bezeichnet. Die Sinus- und Cosinusfunktionen bilden eine Orthonormalbasis des Skalarprodukts. D.h., sie dehnen einen Teilraum auf, der eine Orthonormalbasis bildet.

$$V_T = \left\{ f \in V_{2\pi} : f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cdot \cos(k \cdot t) + b_k \cdot \sin(k \cdot t)]; a_k, b_k \in \mathbb{R} \right\} \quad (3.3) \quad 5)$$

Das Ziel der Abschätzung besteht darin, aufwendig auszuwertende Daten anzunähern. In einem bekannten gerahmten Raum $(\mathbb{R}, \| \cdot \|)$ einer nicht leeren Menge wird die Einschätzung f' wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \forall f \in V_T : \|f - f'\| &\leq \|f - g\| \\ \|e\| &\leq \|f - g\|, \quad e(t): \text{Fehlerfunktion} \end{aligned} \quad (3.3) \quad 6)$$

In reellen Räumen wird der Betrag eines Richtungsgebiet mit dem Satz von Pythagoras berechnet, was zur euklidischen Rahmen bzw. zur **L₂-Rahm** ergibt. Demzufolge wird die L₂-Abschätzung der Abweichung Folgendermaßen ausgedrückt:

$$\|e\|_2 = \|f - g\|_2 = \int_0^{2\pi} (f(t) - g(t))^2 dt, \quad (3.3) \quad 7)$$

Mit **Gleichung 3.37** lässt sich die **L₂-Idealschätzung** einer Abweichung nachfolgend ermitteln:

$$\begin{aligned} f_n(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cdot \cos(k \cdot t) + b_k \cdot \sin(k \cdot t)] \\ a_k &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos(k \cdot t) dt, & b_k &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin(k \cdot t) dt \end{aligned} \quad (3.3) \quad 8)$$

Für $n \rightarrow \infty$, entsteht die Fourier-Reihe:

$$f(t) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cdot \cos(i \cdot t) + b_i \cdot \sin(i \cdot t)] \quad (3.3)$$

Daraus lässt sich schließen, dass jede stetige Beziehung mit einem Amplitudenspektrum eingeschätzt werden kann. Da das Amplitudenspektrum gerahmt ist, ist es gleichzeitig die **L2-Idealschätzung** von der Beziehung. Wenn das Amplitudenspektrum nun als Beziehung eines Raumgebiet betrachtet wird, kann der Betrag von dem Richtungsgebiet mit dem euklidischen **Rahmen** nach dem Satz von Pythagoras bestimmt werden:

$$\|f(t)\|_2 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx \quad (3.4)$$

Dies wird die **L2-Raum** genannt und gibt:

$$\|f(t)\|_2 = a_0^2 + \sum_{k=1}^n a_k^2 + b_k^2 \quad (3.4)$$

Das Bedeutet, dass für die diskreten Fourier-Transformation gilt:

$$\|f(t)\|_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} |F[n]|^2 \quad \text{mit} \quad F[n] = C_n = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T}^{T} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.4)$$

Analog für den Frequenztransformation:

$$\|f(t)\|_2 = 2 \cdot \pi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega = 2 \cdot \pi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) \cdot F(-j\omega) d\omega \quad (3.4)$$

Jetzt ist bekannt, dass stetige Beziehungen mit Amplitudenspektrum eingeschätzt werden können und dass der Betrag von der Einschätzung das L₂-Raum ist. Letztere liegt eine Abschätzung vom Betrag der ursprünglichen Beziehung dar, und weil sie mit dem euklidischen Rahmen bzw. L₂-Raum bestimmt ist, ist sie deshalb L₂-Idealschätzung von dem Betrag der ursprünglichen Beziehung. Somit kann die Beziehung nach 3.43 als eine aussagekräftige Approximation von Begräßen stetiger Funktionen unter anderem Fehlerfunktionen angesehen werden.

Im zeit-kontinuierlichen Bereich ist die Bestimmung von dem L₂-Raum von Abweichungsbeziehungen sehr aufwendig, weshalb dies häufig im Bildraum durchgeführt wird.

$$J_{par} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-j\infty}^{j\infty} E(s) \cdot E(-s) ds \quad (3.4)$$

Sie wird in der Signaltheorie als die totale Energie des (Fehler)Signals, ihre physikalische Hintergrund auf Leistung elektrischer Energie beruht:

$$\mathbf{P}(t) = R \cdot \mathbf{i}^2(t) = \frac{\mathbf{u}^2(t)}{R};$$

$$E(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau = R \cdot \int_0^t i^2(\tau) d\tau = \frac{1}{R} \cdot \int_0^t u^2(\tau) d\tau; \quad (5)$$

(3.4)

R: Widerstand, P(t): Leistung, E(t): Energie.

In der Signaltheorie und auch in der Regelungstechnik werden solche Werte meistens einheitslos untersucht, sie behalten aber oft ihre ursprünglichen physikalischen Benennungen [HUA00].

Zur richtigen Parametrisierung von dem Smith-Schätzer müssen zunächst die Fixwerte des Ablaufs bezüglich einer Basis gerahmt werden, sodass sie eine orthonormale Basis bilden. Die Fehlerfunktion wird dann Raumrichtungsgebiet linearer Kombination der Fixwerte, einschließlich normalisierter Transferfunktion, angesehen, d.h ihr Betrag ist die L₂-Norm. Letztere liefert dann die L₂-Idealschätzung der Parameter der inneren Rückkonnektierung. Der L₂-Raum von der Abweichung wird auch als Leistungsindex bezeichnet und dient zur Bestimmung der idealen Parameter sowie zur rechtmäßigen Begutachtung von dem System.

Die Werte der Rückführungsschleife in der inneren Schleife sollten bezüglich der Transferstagnation des Ablaufs approximiert werden. Deswegen ist die Normierung des Leerlaufbausteins notwendig ist. Wenn $s \cdot T_t = s \cdot \tau$ gesetzt und die neue Überführungsfunktion in Beziehung mit τ bestimmt wird, so wird für Stagnation $\tau = 1$ gesetzt. $e^{s^* \tau}$ ist also ein Einheitsrichtungsgebiet des von ihm ausgedehnten Richtungsparamterraums. Die Überführungsfunktion von dem geschlossenen Kreis ist somit als eine Produktbildung von einem Richtungsgebiet zu sehen ist, was wiederum ein Richtungsgebiet ist. Deswegen ist der Fehler die Subtraktion zweier Richtungsgebiete, die wiederum einen Richtungsgebiet in der Orthonormalbasis liefert, dessen Länge bzw. Betrag mit euklidischem Rahmen bestimmt wird. Letztere entspricht der L₂-Raum, und da L₂-Raum als L₂-Idealschätzung gilt und die Fehlerfunktion die normierten Fixpunkte der Transferfunktion enthält, sind in ihrem Betrag die L₂-Idealschätzungen der bezüglich des Transferstagnation normalisierten Fixwerte enthalten. Durch Koeffizientenvergleich und Umdrehung von dem Rahmen

bezüglich des Inaktivitätsteil entstehen die L₂-Idealschätzungen der Parameter von dem inneren Kreis.

Das Ziel von dem Smith-Schätzers besteht darin, eine Rückkonnektierung ohne die Transferstagnation durch das Leerlaufbaustein zu ermöglichen. Theoretisch soll direkt auf den Knoten nach der Transferfunktion des offenen Regelablaufs bzw. zwischen der Transferfunktion und dem Inaktivitätsanteil zugegriffen werden, um die Regelung ohne Ruhezeit durchzuführen. Das ist praktischer jedoch nicht umsetzbar, da das Signal des offenen Regelablaufs erst nach Abklingen der Transferstagnation verfügbar wird. Stattdessen kann auf ein virtuelles äquivalentes Signal zurückgegriffen werden, indem eine ähnliche Überführugsfunktion der Regelstrecke ohne Ruhezeit verwendet wird. Das Signal von der Regelung wird teilweise in die innere Rückkonnektierung eingespeist, während das andere Teil ein ähnliches Inaktivitätsbaustein durchgeführt und anschließend von Fehler subtrahiert wird. Letztere Operation sollte prioritär nach einem Takt den Fehler durch die Transferstagnation vollständig verdrängen. In der Realität sind aber häufig sowohl zeitliche Abweichungen als auch Amplitudenvariationen bemerkbar, wodurch unklar bleibt, ob die Reaktion nach einem Takt die gleiche Form beibehalten würde.

Das bedeutet, dass die Fehlerfunktion der inneren Rückkonnektierung den Transferstagnation nicht enthält, was wiederum bedeutet, dass die Abweichung von dem Smith-Schätzer einfach den Fehler der vollständig geschlossenen Schleife ohne Ruhezeit ist. Bereits wurde die Fehlerfunktion mit dem Rahmen der Transferstagnation standardisiert, um die Abweichung am besten zu schätzen. Nun wird die Herleitung auch dazu verwendet, die Parameter der inneren Rückkonnektierung zu bestimmen, indem die Abweichung jetzt als Richtungsbereich betrachten wird. Das bedeutet, dass der Vektor der Fehlerfunktion der Prädiktion ein Vektor ist, der sich aus der Abweichung von der vollständigen Kreis ergibt, minus dem Vektor der Transferstagnation [HUA00]:

$$\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}} = \widehat{\mathbf{e}_{g,n}} - \widehat{\mathbf{e}_{t,n}} \quad (3.4)$$

sp: Smith – Prädiktor, g: Gesamt, t: Totzeit n: Normalisierung mit \tilde{s}

Das bedeutet auch, dass:

$$\|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 = \|\widehat{\mathbf{e}_{g,n}} - \widehat{\mathbf{e}_{t,n}}\|_2 \quad (3.4)$$

Bekannt ist, dass alle Parameter mit dem gleichen Einheitsrichtungsgebiet \mathbf{e}_t gerichtet sind:

$$\begin{aligned}
 \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 &= \|\mathbf{e}_{g,n} \cdot \widehat{\mathbf{e}_{t,n}} - \widehat{\mathbf{e}_{t,n}}\|_2 \\
 \Leftrightarrow \quad \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 &= \|\widehat{\mathbf{e}_{t,n}} \cdot (\mathbf{e}_{g,n} - \boldsymbol{\tau})\|_2 \\
 \Leftrightarrow \quad \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 &= \|\widehat{\mathbf{e}_{t,n}}\|_2 \cdot (\mathbf{e}_{g,n} - \boldsymbol{\tau}) \\
 \Leftrightarrow \quad \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 &= \boldsymbol{\tau} \cdot (\mathbf{e}_{g,n} - \boldsymbol{\tau}) \\
 \Leftrightarrow \quad \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 &= \mathbf{e}_{g,n} - \boldsymbol{\tau} \\
 \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{e}_{g,n} - \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 \tag{3.4} \\
 \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{\tau} &= \|\widehat{\mathbf{e}_{g,n}}\|_2 - \|\widehat{\mathbf{e}_{sp,n}}\|_2 \\
 \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{\tau} &= \int_{-j\infty}^{j\infty} \mathbf{E}_g(\tilde{s}) \cdot \mathbf{E}_g(-\tilde{s}) ds - \int_{-j\infty}^{j\infty} \mathbf{E}_{sp}(\tilde{s}) \cdot \mathbf{E}_{sp}(-\tilde{s}) ds, \\
 \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{\tau} &= \int_{-j\infty}^{j\infty} \mathbf{E}_g(\tilde{s}) \cdot \mathbf{E}_g(-\tilde{s}) ds - \int_{-j\infty}^{j\infty} \mathbf{E}_{sp}(\tilde{s}) \cdot \mathbf{E}_{sp}(-\tilde{s}) ds,
 \end{aligned}$$

Die obere **Integralgleichung** in 3.84 kann numerisch gelöst werden und sollte Ausdrücke in Relation zu den optimalen Fixwerte der Transferfunktion in der inneren Schleife liefern. Es ist jedoch zu beachten, dass die diejenigen normalisierten Transferfunktionen die normalisierte Inaktivitätsglied als Exponentialfunktion sowohl im Zähler als auch im Nenner enthalten. Aufgrund dessen sollten die Inaktivität vor der Berechnung des Integrals mit **Pade** geschätzt werden. Die Exponentialfunktion kann auch als lineare Kombination aus Sinus- und Kosinusfunktionen ausgedrückt werden. Die Transferfunktionen enthalten nichtlineare Ausdrücke, was keinen besseren Ansatz bei der Schätzung von Exponentialbeziehungen darlegt.

PID-Bediener sind die meistverwendeten Bediener in der Industrie, daher wurden sie gründlich untersucht und ihre optimalen Fixwerte empirisch erfasst. Je nach gewünschtem Verhalten können die Verhältnisse der Konstanten aus speziellen Tabellen entnommen werden. PID-Bediener können sowohl in Reihe als auch parallel verschaltet werden. Wenn sie parallel verschaltet sind, hemmt der D-Glied

stark differenzierendes Verhalten. Es kann auch vor der Verschaltung mit dem Proportionalglied eine Verstärkung K an die Führungsgröße angebracht werden. Mit $K < 1$ wird eine gezielte Reduzierung der Verstärkung der Orientierungsgröße erreicht, was die Reaktion auf Störgrößen beeinflusst. Bei $K=1$ ist der Sprungantwort auf Beeinträchtigung negativ oszillierend. Die zuletzt erwähnte Merkmale von dem parallel verschalteten PID-Bediener werden als Zwei-Freiheitsgrade bezeichnet. Im in Reihe verschalteten Bediener sind solche Eigenschaften nicht vorhanden, und es ist auch unmöglich, imaginäre Nullstellen zu erhalten. Es existieren direkte und indirekte Methoden zur Abstimmung der Parameter von dem PID-Bediener. Die direkten Methoden verwenden die sogenannten heuristischen Verfahren. Indirekte Methoden beruhen auf der Ziegler-Nichols-Sprungantwort-Verfahren, die zwei typische Merkmale hat: das Maximum der Kurve und die Tangente am Maximum.

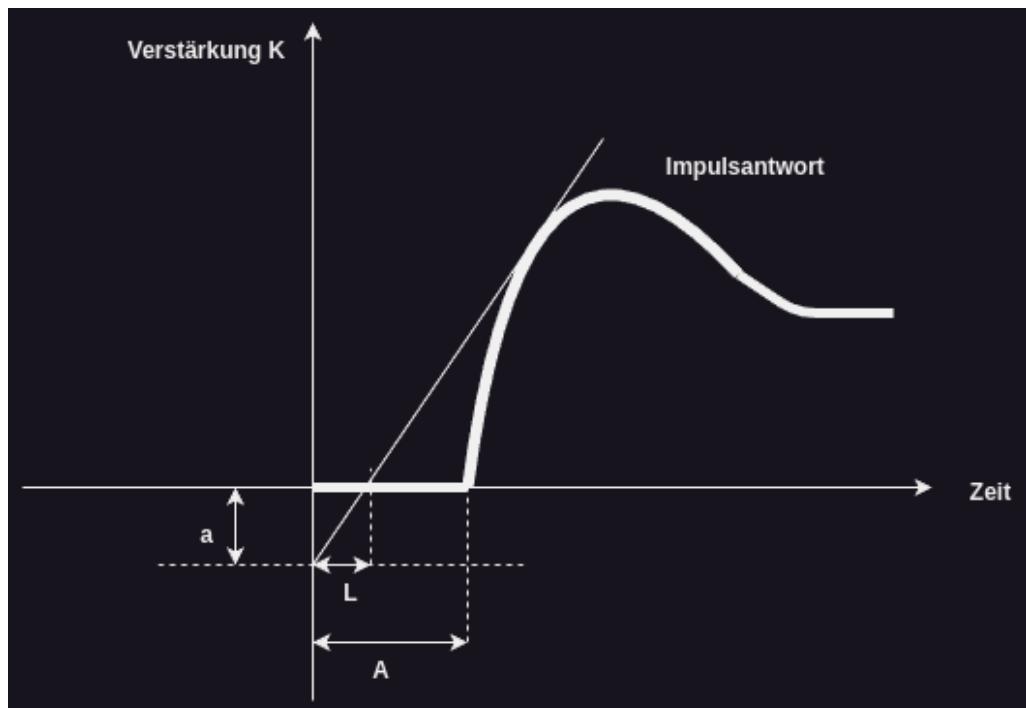


Abbildung 2.9: Fixwerteapproximation

Die Schnittpunkten mit der Kurve liefern die Parameter a und L , welche eine vereinfachte Darstellung der Überführungsfunktion der offenen Regelkreis ermöglichen.

$$G_p(s) = \frac{a}{s \cdot L} \cdot e^{-s \cdot L} \quad (3.4 \text{ } 9)$$

Basierend auf Konfiguration nach 3.49 wurden zahlreiche empirische Erhebungen an mit solchen Transferfunktionen geschlossenen Schleifen durchgeführt, sodass bei jedem adäquaten Vibranz eine bestimmte Modifikation von den Parameter resultiert wird [HUA00].

Die automatische Abstimmung der Regelparameter (Auto-Tuning) bedeutet, dass die idealen Parameter automatisch durch einen einfachen Befehl vom Benutzer zu berechnen sind. Ein Nachteil des Auto-Tuning besteht darin, dass alle Informationen über die Regelstrecke gegeben sein werden müssen. Eine andere Methode ist durch Verstärkungsplanung (Gain Scheduling), bei der die Fixpunkte der Schleife in Abhängigkeit von den gemessenen Fixwerte angepasst werden, welches eine taugliche Methode zur Regelung von Gefügen, deren Wechselpendelung wegen äußerer Effekten ändern. Die dritte Methode ist die sogenannte adaptive Regelung (Adaptive Control), bei der die Parameter kontinuierlich verbessert werden, um Beeinträchtigung sowie Änderungen in der Dynamik auszugleichen. Die Kombination aus automatischer Abstimmung und Verstärkungsplanung eignet sich für abschätzbare Änderungen in der Dynamik, während die Kombination aus automatischer Abstimmung und adaptiver Regelung für unvorhersehbare Änderungen in der Dynamik geeignet ist. Prozessen, die bei denen solche Methoden angewandt werden, werden als indirekte Prozessen bezeichnet [AST93].

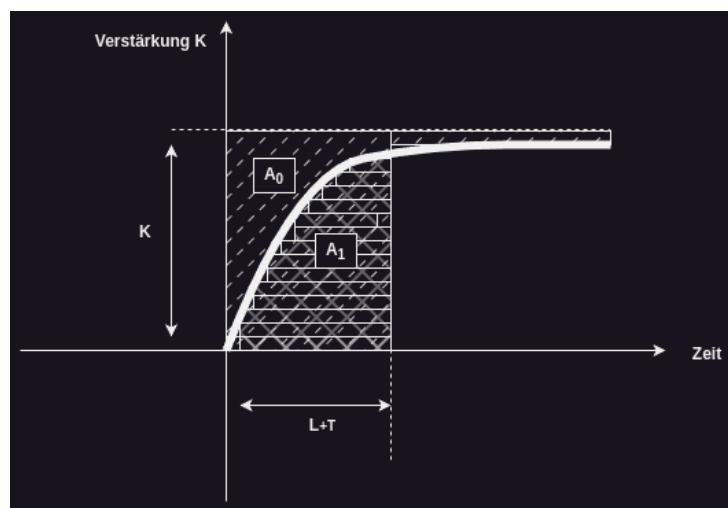


Abbildung 2.10: Bestimmung der statischen Verstärkung

$$N(a) = \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot a} \cdot \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{a} \right)^2} \right) - i \cdot \frac{\xi}{a}$$

d: Amplitude des Gleichrichters

($\begin{matrix} 3.5 \\ 0 \end{matrix}$)

ξ : Hystrese-Konstante

a: Die Amplitude des eingespeisten Signals

Sie zeichnen sich durch ein Modell aus, das relevante Daten aus dem Prozess registriert, letztere behandelt und an das Regelungsdesign absendet, welches die Informationen zur Entfaltung der optimalen Fixwerte verwendet. Ein Verfahren zur Abstimmung der statischen Verstärkung des Regelablaufes ist der **Abbildung 2.10** zu entnehmen. Dabei ist die Fläche A_1 zu ermitteln und dann T gem. $T = \frac{A_1}{K_p} \cdot e^1$ zu bestimmen. Das Verfahren eignet sich auch für Abläufe höheren Grades. Wenn die Fixwerte eigenständig berechnet werden, ist der Ablauf mit einer Schaltung mit Verzögerungeffekt vorgesehen. Die Schaltung verursacht kleine Unterbrechungen zur Feststellung der Festwerte. Das Rückstandeffekt erzeugt ein wechselpendelndes Signal nahe bei -180° . Die Verstärkung bei dieser Kreisfrequenz wird aus den Messungen abgeleitet und verwendet. Die Funktion des Wechselschalters ist in **Gleichung 3.50**.

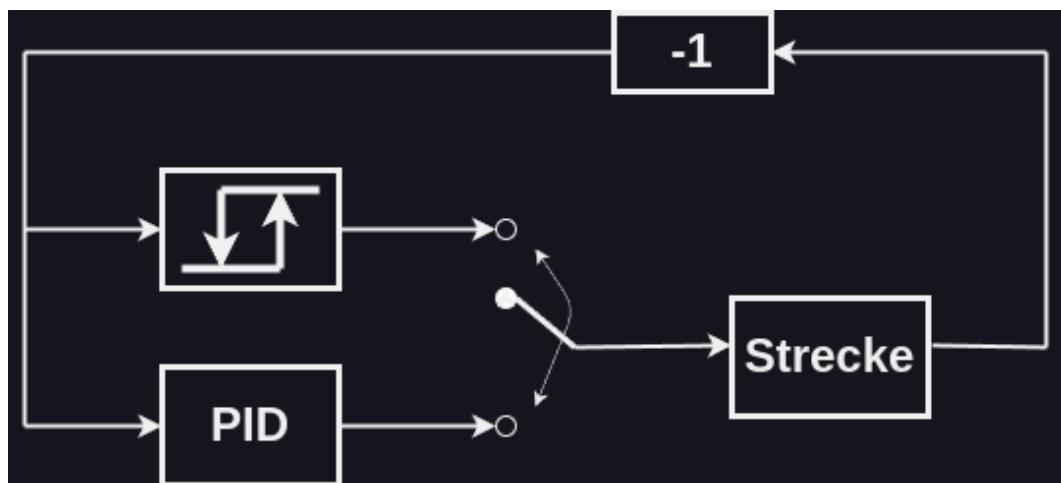


Abbildung 2.11: Wechselschalter nach **Gleichung 3.50.**

Die Inverse des Verzögerungseffekts ist die horizontale Linie in der s -Ebene, die parallel zur reellen Achse läuft. Die Wechselpendelungen treten dort auf, wo die horizontale Linie die Ortskurve der Schleife schneidet [AST93].

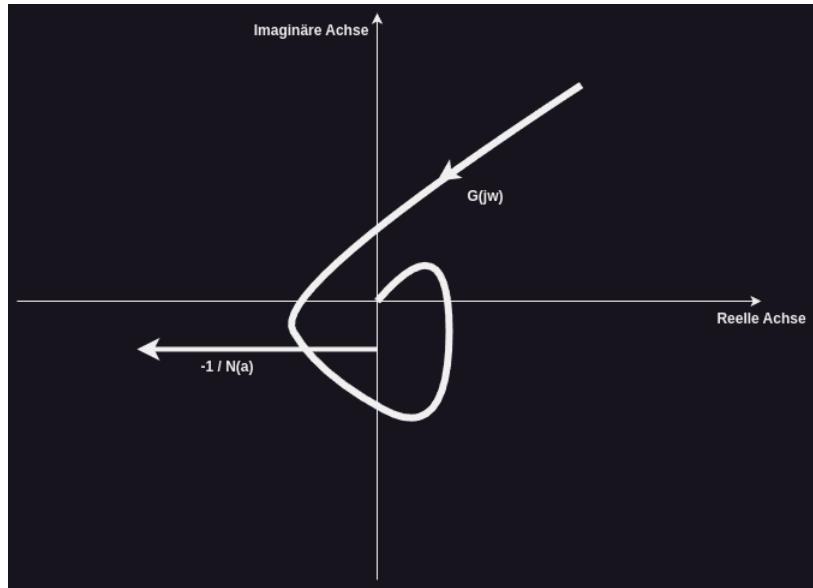


Abbildung 2.12: Schnittpunkt der Inverse der Hysterese mit der Ortskuve

In der Nachrichtentechnik wird ein Signal, das sich genau vorhersagen lässt, als deterministisches Signal bezeichnet. Gegenteilig dazu stehen Zufallswerte, die als stochastische Signale bezeichnet werden und sich nur durch Kenngrößen wie (Auto)Korrelation beschreiben lassen. Stochastisches Signale sind Bspw. die elektromagnetischen Wellen von einem Antennenapparatus. Rauschsignale werden im Allgemeinen als stochastische Signale betrachtet [MAR17].

Korrelation ist eine Studie, die auf der Analyse eines Signals basiert, sodass verschiedene benachbarte Amplituden erkennbar sind. Das sich an die benachbarten Amplituden anpassende Pattern wird quantitativ in normierten Phasen erwogen, um die nächsten Werte vorhersagbar zu machen. Es gibt unterschiedliche Verfahren zur wahrscheinlichen Analyse von Signalen, darunter die Berechnung der Fehler und die Bestimmung von dem Quadratischen Mittelpunkt, was im Wesentlichen nichts anderes als die diskrete L2-Bestapproximation ist. Ein ergänzendes Signal, das häufig in der Wahrscheinlichkeitsrechnung verwendet wird, ist die so benannte pseudo-

randomisierte binäre Sequenz (PRBS), die eine Abfolge von zufälligen Bits ist. Nach dem Einspeisen von PRBS zeigt sich die Antwort wie Nachfolgend [MAR17]:

$$g(\tau) = \frac{1}{s^2 \cdot h} \cdot \left(\frac{M}{M+1} \right) \cdot \left(\Phi_{uy}(\tau) + \sum_{k=0}^{M-1} \Phi_{uy}(k) \right)$$

(3.5)

s: Amplitude des PRBS-Signals

h: Sampling Interval

M·h: Periodendauer von PRBS

Φ_{uy} : Kreuzkorrelation zwischen Eingang und Ausgang

Die Beziehung $g(\tau)$ hat eine ähnliche Form wie ein Amplitudenspektrum. Sie wird numerisch im Frequenzraum abgebildet, sodass die gesuchten Festwerte wie die fixe Verstärkung, Periodendauer und die normalisierte Transferstagnation berechnet werden können. Die Kreuzkorrelation ist eine imaginäre-gepaarte Faltung und beschreibt die Korrelation zweier Signale bei unterschiedlichen Verschiebung durch Erwartungswerte, die stochastisch bestimmt wird. Da die Korrelationsstudie in Relation zu dem Zeitraum des eingespeisten Signals gerahmt ist, wird die Studie in einer Orthonormalbasis gemacht. Das bedeutet, dass erneut Richtungsgebiete im Richtungsraum betrachtet werden. Die imaginäre-gepaarte Faltung im Zeitbereich ist nichts anderes als Produkt aus dem Signals mit seinem imaginären Selbst. Zu sehen auch ist eine Summe über die Korrelationsfunktion im **rechten Teil der Gleichung 3.52**, welche der Integration der Korrelation im Zeitbereich entspricht, was auch einer Integration in den üblichen Bereichen entspricht. Die Integration eines Signals, das mit seinem imaginären Selbst multipliziert wird, in Richtungsräumen, ist wie bereits im Leistungsindex erklärt, nichts anderes als der L_2 -Raum. Da der L_2 -Raum das euklidische Rahmen eines Richtungsgebiets in dem von ihm ausgedehnten Richtungsraum beschreiben ist, ist daraus zu schließen, dass $g(\tau)$ die L_2 -Idealschätzung von dem Signal ist.

Zur Idealisierung der Parameter bieten sich verschiedene Methoden wie der absolute Abweichung (IAE), der integrierte absolute Abweichung (ITAE) und der über die Zeit integrierte quadratische Abweichung (ISE) usw [AST93]. Die Regelung über die Polplatzierung ist bei bekannten Parametern von der Regelkreis ist die tauglichste, schnellste und meistverwendete Methode zur Konfiguration des Verhaltens des Ablaufs. Sie wurde zu Beginn von dem Faden erklärt. Zur

Bestimmung der Regelparameter von einer Regelkreis, die unter Transferstagnation leidet, eignet sich am besten die Begutachtung mit dem Toggle-Taster und der Leerlauf, wodurch die ideale Verstärkung wie nachfolgend berechnet wird:

$$K_\mu \approx \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot e} \quad (3.5) \quad 2$$

d : Ausgang des Gleichrichters, e : Fehler

Durch die Berechnung des Schnittpunktes der Wechselschalterfunktion mit der Ortskurve kann die Periode gefunden werden:

$$a = \frac{T_\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{(K \cdot K_\mu)^2 - 1}$$

$$T = \frac{T_\mu}{2 \cdot \pi} \cdot [\pi - \tan^{-1}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot a}{T_\mu}\right)]$$

a : Amplitude der Hysterese des Gleichrichters, $(3.5) \quad 3$

T_μ : Ultimative Periodendauer,

K : Statische Verstärkung,

K_μ : Ultimative Verstärkung,

T : Gesuchte Periodendauer.

Bei der automatischen Abstimmung der Parameter von dem Smith-Schätzer sind die nachfolgenden Schritte zu erledigen [AST93]:

- **Identifizierung der Regelstrecke:**
 - Bestimmung der statischen Verstärkung durch Impaktreaktion.
 - Ermittlung der ultimativen Verstärkung und ultimativen Dauer durch den Leerlauf mit dem Toggle-Taster.
 - Mit den gefundenen Parametern ist die Bestimmung von dem Zeitraum sowie von dem Leerlauf von der Regelkreis zu machen.

- **Bestimmung von dem $K\tau$ -Parameter:**
 - Verwendung von Proportionalgliedern mit der Hälfte der ultimativen Verstärkung (Ziegler-Nichols-Verfahren).
 - Bestimmung der ausgehend von dem Leerlauf gerahmten Gesamtverstärkung $K\tau$.
- **Automatische Abstimmung von den Parameter:**
 - Mit $K\tau$ ist die Regelung zu idealisieren.
 - Abstimmung der idealen Parameter durch Heilung der Integralgleichung der Leistungsindizes (Bspw. mit der Funktion fminsearch in MATLAB):
 1. optimale Polstellen.
 2. ideale Verstärkung.
 3. Temporäre Abweichung bzw. idealer Zeitraum.
- **Benutzen der optimalen Fixwerte.**
- **Evaluation des Verhaltens.**

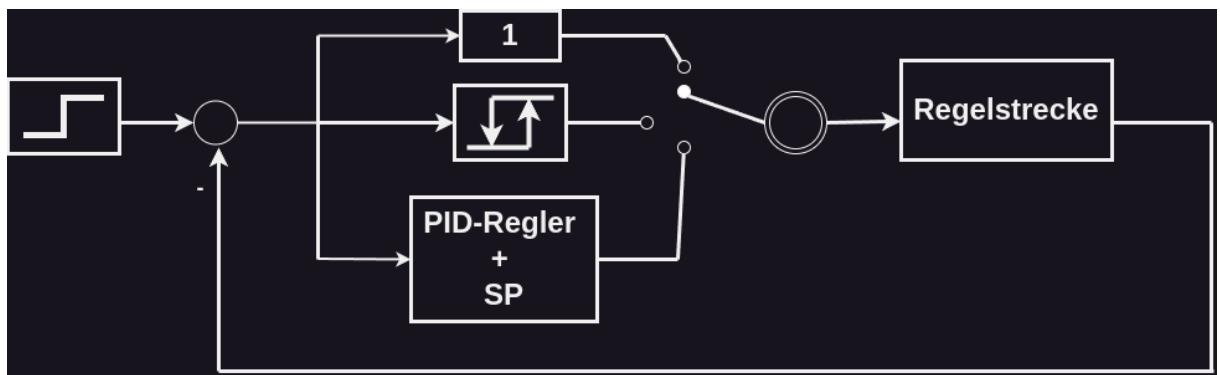


Abbildung 2.13: Auto-Tuning des PID Bedieners mit Smith-Schätzer

Es gibt auch modifizierte Smith-Prädiktoren, wie den Aström-Smith-Prädiktor. Dieser wurde durch ein zusätzliches I-Glied verbessert, um die Beeinträchtigung mit differenzierendem Verhalten zu verdrängen. Während der klassische Smith-Prädiktor für stabile Regelstrecken ist, beachtet der Aström-Smith-Schätzer die Beeinträchtigung als auch Instabilitäten. Ein Ertrag von dem Smith-Schätzer ist die Behandlung der Stillstandperiode, aber es kann ein Nachteil in der unzureichenden

Unterdrückung von der Beeinträchtigung liegen, was beim klassischen Smith-Schätzer zu unkontrollierbaren Fehler führen kann.

Bei Regelmäßigen Smith-Schätzern muss der Zeitraum der Regelstrecke doppelt so groß sein wie die Inaktivitätszyklus, sonst ist eine eigenständige Anpassung der Fixwerte erforderlich.

2.7 Prozessbetrachtung, Störgrößen und moderne Regelungstechnik

Um die Walzoperation zu verstehen, muss der Ablauf auf infinitesimaler Linie gebrechtl werden. Das Bauelement dreht sich mit konstanter Geschwindigkeit und leitet die Rotation auf die anliegende Rolle weiter, die mit einem Federpaket verbunden ist. Dies führt zu kleinen Stößen aufgrund der nicht vollständig glatten Hülle, die schnell durch das Federpaket gedämpft werden. Es kann deshalb von einer schnellen Wechselpendelung ausgegangen werden, die nahe der Resonanzfrequenz von dem Federpaket liegt. Somit kann die Pendelfrequenz der Beeinträchtigung aufgrund suboptimal-periodischer Unrundheiten annähernd berechnet werden, die zur Synchronisierung mit der Beeinträchtigung genutzt und somit teilweise gemindert werden können. Suboptimale-periodische Unrundheiten können leicht Begutachtet, und wenn sie erkannt werden, kann ein normaler Aström-Prädiktor bzw. geglättete Smith-Schätzer verwendet werden, um die innere Zeitparameter zur Unterdrückung der Beeinträchtigung entsprechend der erwarteten Kreisfrequenz zu erweitern, sodass die Rekonstruktion der Regelstrecke verbessert wird.

Beeinträchtigungen können verschiedenen Ursachen haben. Eine davon ist die variierende Geometrie der Anordnung. Die Aufgabe des Festwalzablauf ist die Hülle zu glätten, d.h. die Hülle ist ungleichmäßig, welches auch bedeutet, das der Durchmesser variiert. Wenn sich der Radius ändert, dann ändert sich die Lage der Presswalze und wenn sich die Position der Rolle ändert, ändert sich auch die Stauchung der Federn, über welche die Kraft berechnet wird. D.h, das sich die Last bei Änderungen in der Durchmesser auch mit variieren würde. Diesen Effekt ist zu vermeiden, da mit einer gewissen quasi konstanten Kraft die Hülle gedrückt werden soll.

Solche Effekte sind feststellbar, wenn das Durchbiegen von dem Bauelement entlang seiner Längestachse steigt oder sinkt, weswegen es notwendig ist, die Wechselwirkung hinter dem Ablauf genauer zu untersuchen.

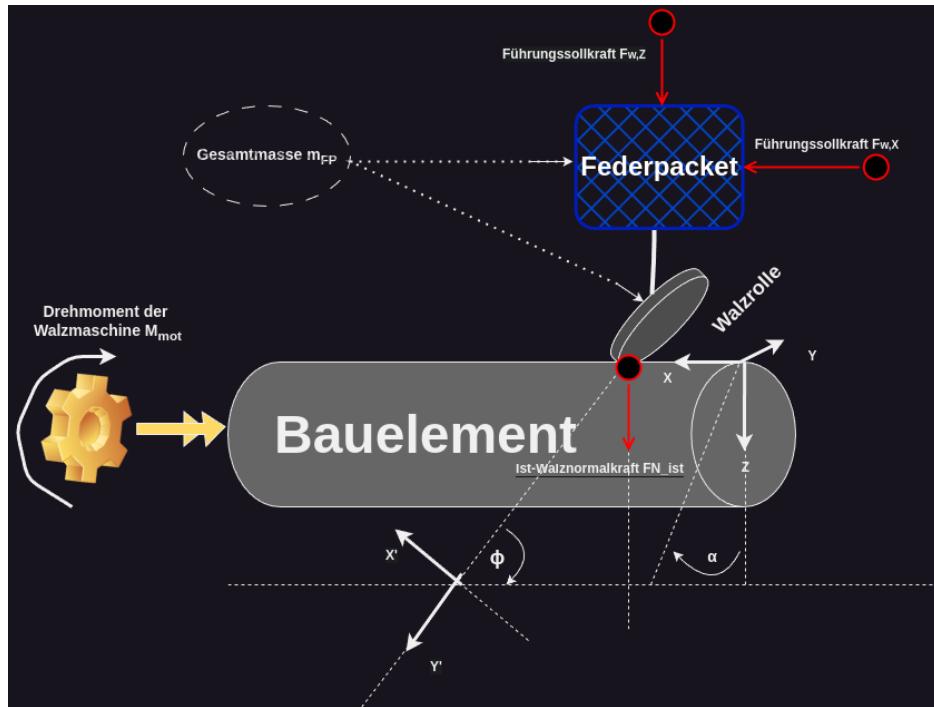


Abbildung 2.14: Abstraktion von dem Prozess

Der Prozess hat drei Hauptbereichen: Das Bauelement, das Federpaket und das Walzenpaar, die an das Federpaket befestigt ist, weshalb das Modell als bestehend aus zwei Teilchen angesehen werden darf.

Aufgrund der Dynamik und Strömungslimitations werden solche Prozesse überwiegend mithilfe des Lagrange-Formalismus untersucht. Es gibt sowohl holonome als auch nicht-holonome Zwangsbedingungen, die die Strömungsfreiheit limitieren, bspw. entlang der X-Richtung, wo das Apparatus eine bestimmte Strömung nicht überschreiten darf. Eine andere Limitation besteht entlang der Z-Achse, wo das Walzenpaar nur mehrere Millimeter ausschlagen darf, was die Anzahl der Freiheitsgrade reduziert, mit welcher die Anzahl der möglichen generalisierten Koordinaten berechnet werden.

Zunächst müssen die generalisierten nicht-konservativen Lasten ermittelt werden. Dabei lassen sich die Bearbeitungskräfte als solche annehmen, die nicht mit den auf

die Federn induzierten Soll-Kräften verwechselt werden dürfen, da letztere konservativ aus dem Potenzial abgeleitet werden und Arbeit verrichten können. Die Walzkräfte hingegen verursachen zwar virtuelle Verschiebungen, wie etwa das Biegen von dem Bauelementen, stellen aber Zwangskräfte dar, da die virtuelle Arbeit verschwindet. Die tatsächlichen Walzkräfte lassen sich aber nur über Dehnungsmessstreifen (DMS) approximieren, da kein direkter Zugriff auf die Kräfte möglich ist.

Für die Berechnung der Rotationsenergie sollte eine neue generalisierte Koordinate gewählt werden, bspw. der Winkel α in der Y-Z-Ebene. Anschließend wird die potentielle und dann die translatorische Energie berechnet, abgeleitet und die Strömungsgleichungen lassen sich in Folge dessen konfigurieren. Der Nachteil des Lagrange-Formalismus besteht darin, dass zahlreiche aufwendige Berechnungen notwendig sind, insbesondere die Bestimmung von dem Massenträgheitsmoment, welche nicht nur von der unbekannten Form, sondern auch von den Materialfixwerte des Grundstoffes abhängen, was die exakte Berechnung erschwert. Selbst wenn die Masse bestimmt werden kann, wären die Trägheiten nur näherungsweise ermittelbar. Darüber hinaus kann auf die Rotation keinen direkten Einfluss genommen werden, weil die Rotation durch die Maschine bedingt ist und weder als Stellgröße noch als Regelgröße zur Verfügung steht.

Das Ziel besteht darin, die dahinterliegende Dynamik zu konfigurieren. Daher bietet sich zur Leichtmachung der Behandlung von dem Prozess das D'Alembert-Prinzips an. Die Differentialgleichung von dem Federpacket ist [OMR09]:

$$m \cdot \frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} + d \cdot \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} + c \cdot \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t). \quad (3.5)$$

Die Masse m von dem Federpaket sowie die Federparameter c_x und c_z sind bekannt. Da das Prozess schnell strömt und die Feder sehr schnell schwingen, wird eine moderate Dämpfung geschätzt und daraus die Dämpfungsstufe bestimmt. Die Dämpfung kann auch messtechnisch durch die Resonanzkurve bestimmt, indem das Federpaket mit einer Schwingung bekannter Frequenz und Amplitude erregt wird.

Der Statusraum ist Matrizenraum der Strömungsgleichungen von dem Prozess mit n Statusparametern. Sie beschreibt die Konnektierung von dem Prozess mit seiner Umwelt. Das Anreiz von der Darlegung besteht nicht nur darin, die zuletzt erwähnte Wechselbeziehungen zu behandeln, sondern auch die Tauglichkeit, Einfluss auf das

Prozess durch rechnerisch nicht schwer zu entwerfende Regelungen zu machen [LUN16]:

$$\dot{\underline{x}}(t) = A \cdot \underline{x}(t) + B \cdot \underline{u}(t),$$

$$y(t) = C^T \cdot \underline{x}(t) + d \cdot \underline{u}(t),$$

$$\underline{x}(t=0) = x_0.$$

- $\underline{x}(t)$: Zustandsvektor,
 $\underline{u}(t)$: Eingangsgröße,
 $y(t)$: Ausgangsgröße,
 A : Systemsmatrix,
 B : Eingangsvektor,
 C^T : Ausgangsvektor,
 d : Durchgangsanteil.
- (3.5)
5

Die Repräsentation nach 3.55 erlaubt auf Zustände zuzugreifen und zu regeln, auf die mit klassischem Ansatz hätte nicht zugegriffen werden können [LUN16]:

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ \underline{x}(t) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \ddot{\underline{x}}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\underline{x}}(t) \\ \dot{\underline{x}}(t) \end{bmatrix},$$

$$\text{Gleichung 3.74 : } m \cdot \ddot{\underline{x}}(t) + d \cdot \dot{\underline{x}}(t) + c \cdot \underline{x}(t) = F(t)$$

$$\Leftrightarrow \ddot{\underline{x}}(t) = \frac{1}{m} \cdot F(t) - \frac{d}{m} \cdot \dot{\underline{x}}(t) - \frac{c}{m} \cdot \underline{x}(t), \quad \dot{\underline{x}}(t) = \mathbf{1} \cdot \dot{\underline{x}}(t),$$

$$\Leftrightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{\underline{x}}(t) \\ \dot{\underline{x}}(t) \end{bmatrix}}_{\dot{\underline{x}}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -d/m & -c/m \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ \underline{x}(t) \end{bmatrix}}_{\underline{x}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1/m \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot \underbrace{F(t)}_{\underline{u}(t)},$$
(3.5)
6

$$\underbrace{\underline{x}(t)}_{y(t)} = \underbrace{[\mathbf{0} \quad \mathbf{1}]^T}_C \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}(t) \\ \underline{x}(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\mathbf{0}}_d \cdot F(t),$$

Die obige Präsentation wird die allgemeine Präsentationsform bezeichnet. Die typische Gleichung ist dann:

$$P_{ist}(s) = \det(I \cdot s - A) = \det \begin{bmatrix} s + \frac{d}{m} & \frac{c}{m} \\ -1 & s \end{bmatrix} = s^2 + \frac{d}{m} \cdot s + \frac{c}{m} \quad (3.5)$$

Die Polstellen erhält man durch Lösung der beschreibenden Formel. Es ist zuerst zu überprüfen, ob das Prozess steuerbar ist. D.h., dass die Polzuweisung beliebig möglich ist. Das ist der Fall, wenn die Steuerbarkeitsmatrix den vollen Rang hat bzw. Ihre Determinante ungleich Null ist [LUN16]:

$$Q_s = (B, A \cdot B, A^2 \cdot B, \dots, A^{n-1} \cdot B), \quad (3.5)$$

Steuerbar \rightarrow $\text{rang}(Q_s) = n \vee \det(Q_s) \neq 0$ (8)

Für den Regelungsentwurf in allgemeiner Präsentationsform ist die Berechnung einer Soll-Eigenschaft erforderlich, deren Pole in einem Gebiet liegen sollen, wo die Eigenwerte einen Mindestabstand zur imaginären Referenz aufweisen und somit eine Mindestmaß an Dynamik zeigen. Sie sollten auch entlang der Imaginären Referenz begrenzt sein, sodass sie eine Mindestdämpfung haben. Die Eigenwerte sollten auch bezüglich der reellen Referenz nicht zu negativ ausgewählt werden, um die Sensitivität zum Rauschen zu limitieren. Das Zielgebiet sollte nach [LUN16] in **Abbildung 2.15** visualisiert.

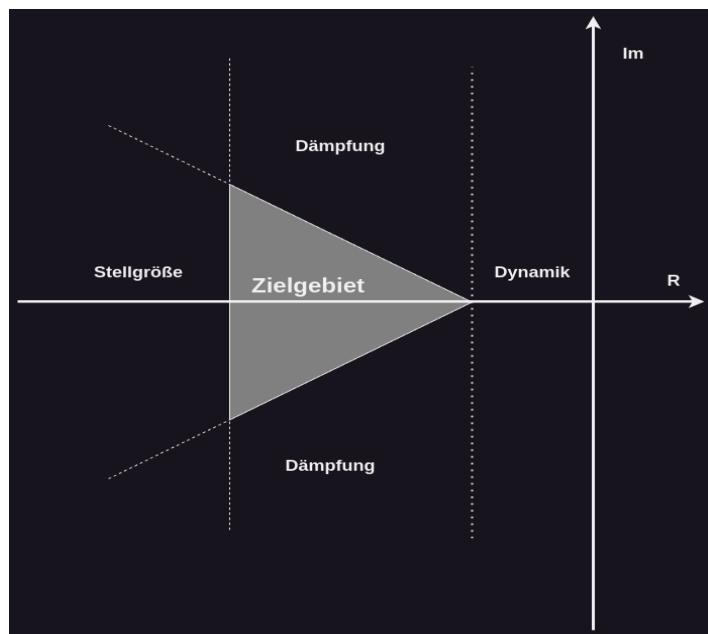


Abbildung 2.15: Zielgebiet der Soll-Charakteristik nach Lunze

Danach ist ein Richtungsgebiet von dem Bediener zu definieren, und dann Produkt mit \mathbf{B} zu bilden. Danach mit Matrix \mathbf{A} zu addieren, sodass die Matrix \mathbf{A}_G von der geschlossenen Regelkreis besteht.

$$\mathbf{K}^T = [\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_n], \quad \underline{\mathbf{A}}_G = (\mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}^T) \quad (3.5)$$

Die Bestimmung der typischen Gleichung von der geschlossenen Kreis mit Einbeziehung von den Parametern von dem Feedback durch die gleiche Methode ist die nächste Etappe. Die letzte Etappe ist dann der Koeffizientenvergleich mit der Soll-Status, sodass die Parameter von dem Richtungsbereich von dem Feedback entstehen.

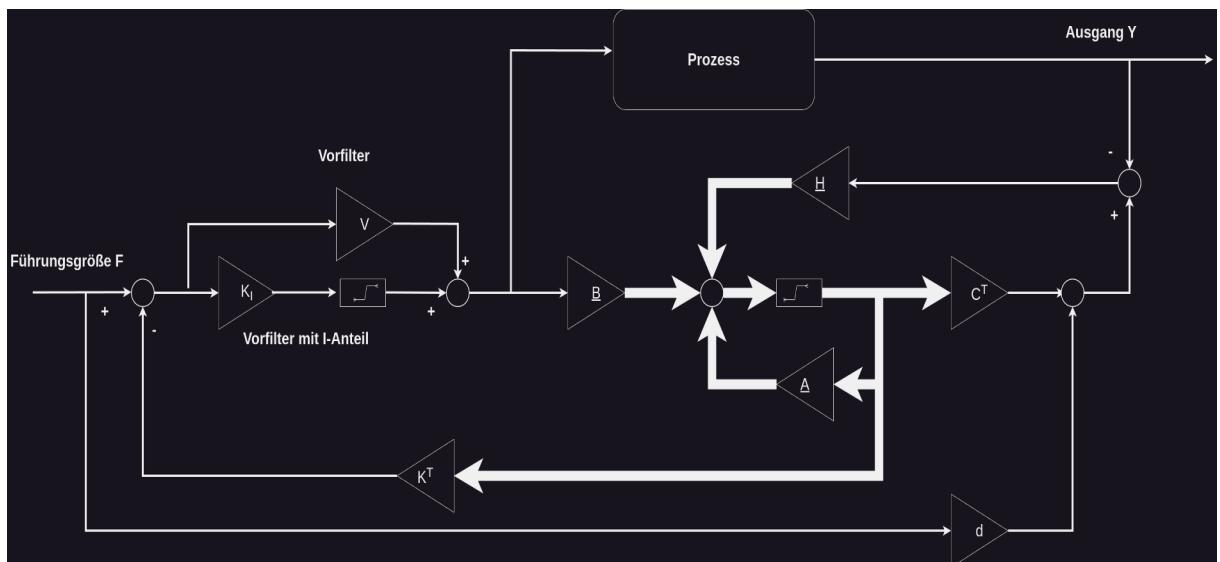


Abbildung 2.16: Regelungsentwurf in allgemeiner Präsentationsform

Die Eigenwertzuweisung nach letztes Verfahren hat unterschiedliche Begrenzung, die sich in Prozessvariationen, Messinterferenz und Stellwertbegrenzung kennzeichnen. Die quadratische Idealisierung durch Orientierungsparameter eines Schwingvibranz bietet für Eingrößenprozessen mehr Flexibilität, indem eine Phasenreserve von mindestens 60° modifiziert wird. Jede Optimierungsetappe sollte gewichtet werden durch Leistungsfunktion wie bei Festwertoptimierung von Prädiktoren, mit welcher das Optimum begutachtet werden kann. Wie bereits bei der Auslegung von Festwerten bei klassischen Bedienern erwähnt, werden solche Bestimmungen in Orthonormalbasen durchgeführt, sodass bezogen auf einer Norm

Approximationen gewisser Konstanten gefunden werden. Bestimmung der Raumrahmen, ob in euklidischem oder anderen Raum ist durch Distanzbeziehungen, die auch als metrische Begutachter bzw. Metriken bezeichnet werden. Metriken können wiederum mehrere Indikatoren haben. Ein Indikator kann Bspw. die Übersteuerung, die Abklingkonstante oder die Steigzeit der Reaktion sein. Das Ziel von dem Walzprozess ist es ja die Lebensdauersteigerung von Elementen zu erreichen. Angenommen, dass dies von der Qualität der Deckschicht sowie von den eingebrachten Eigenspannungen abhängt. Angenommen auch, dass mit einer Walznormalkraft in einem gewissen Intervall mit einer gewissen Geschwindigkeit könnte ganz gut geglättet werden kann, aber werden die Eigenspannungen nicht ganz gut verteilt und mit einem anderen Intervall und andere Geschwindigkeit geschieht genau das Gegenteil, wo bei nicht erkennbar ist, welcher Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Walznormalkraft besteht. Ein systematisches Vorgehen ist die lineare quadratische Idealisierung anzuwenden, indem die Wichtigkeit der Qualität von der Außenschicht und die Wichtigkeit der Verteilung von der Eigenspannung gewichtet werden.

$$J = \sum_{i=0}^N (Q \cdot \text{Glättung}_i + R \cdot \text{Eigenspannung}_i)$$

(3.6)
J: Objektive / Kostenfunktion
Q: Wichtigkeit der Glättung,
R: Wichtigkeit der Verteilung von den eingebrachten Eigenspannungen

Das Ziel ist es dabei, dass bei einer gewissen Konfiguration die objektive Funktion minimal wird, dass die Kosten der Lebensdauersteigerung in Abhängigkeit von Glättung und Verteilung der eingebrachten Eigenspannungen gering gehalten werden muss. Die Optimalität hängt aber auch von der Wichtung der Indikatoren, sodass es zu beachten ist, dass das Ergebnis für eine gewisse Konfiguration kein globales Minima abbildet. Dann wird auch bei der Optimierung der Regelung vorgegangen, indem der Einfluss der Walzkraft sowie der Einfluss von der Geschwindigkeit des Walzprozesses und auch die Position der Rolle gewichtet werden, und versucht wird die Kosten minimal zu halten. Dabei ist es bedeutsam zu wissen, welche Zusammenhang zwischen letzteren und der Form des Baustoffs sowie andere Merkmale besteht, um dann die Bedeutung und entsprechende Einschätzung zuweisen zu können, welche in „**Strategischer Plan und Realisierungsansatz**“ erklärt wird.

Die objektive Beziehung muss auch quadriert werden, da negative Werte durch die Wichtung oder durch die Eingangs- oder Ausgangswerte entstehen können, sodass die Kosten auch negativ werden, welches widersprüchlich ist:

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(\tau) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(\tau) + \mathbf{E}^T(\tau) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{E}(\tau))^2 d\tau \quad (3.6)$$

J: Gütefunktional

Q: Verhalten des Regelkreises (Positiv semidefinite Wichtungsmatrix),

R: Wichtigkeit der eingebrachten Kräfte (Positiv semidefinite Wichtungsmatrix)

Meistens ist die Matrix Q eine Diagonalmatrix, um die Effekte separiert zu betrachten. Das Minimum wird dadurch bestimmt, dass für die ideale Rückkonnektierung nachfolgendes gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= -\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P}, \\ &\text{mit} \\ \mathbf{R}_c &= \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{P} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \end{aligned} \quad (3.6) \quad (2)$$

Das Heilmittel der Matrix-Riccati-Gleichung \mathbf{R}_c ergibt sich durch die Bestimmung von Richtungsbereich \mathbf{P} , mit welchem das Richtungsgebiet der Rückkonnektierung bestimmt wird [LUN].

Obwohl bei dem Verfahren die Kräfte teilweise über die Friktionskraft gekoppelt werden, aber sind sehr klein, weshalb der Statusraumpräsentation in entkoppelter Form erfolgen darf. Weitere Gründe für solche Repräsentation sind, dass -wie bereits bei Lagrange-Fromalismus erläutert- die Rotation nicht beeinflusst werden kann sowie keinen Zugang zu Materialkonstanten besteht, mit den die Trägheiten bestimmt werden können. Auch mit D'Amlbert'schen Prinzip kann zwar Strömungsgleichung aufstellen, es besteht jedoch keinen direkten Zugriff auf die Inneren Modi von dem Statusrichtungsgebiet insbesondere die Geschwindigkeit, welche auch in der Regelung betrachtet wird. Für solche nicht messbare Zustände eignet sich der sog. Detektor, welcher die Rekonstruktion nicht messbarer Zustände übernimmt. Es wird ein Richtungsbereich von dem Status definiert, sodass seine Strömungsgleichung bzw. seine Ableitung eine stetige Kombination ist, die sowohl der Eingang- als auch der Ausgang des ursprünglichen Verfahren enthält. Es ist aber davor durch Detektorbarkeitsmatrix zu überprüfen, ob das Gebilde erfassbar bzw. ob

das Richtungsgebiet von dem Status rekonstruierbar ist. Welches durch die Detektierbarkeitsmatrix zu machen, bei ihr auch gilt, was für die Steuerbarkeitsmatrix galt [LUN16]:

$$Q_b = \begin{bmatrix} \underline{C} \\ \underline{C} \cdot \underline{A} \\ \underline{C} \cdot \underline{A}^2 \\ \vdots \\ \underline{C} \cdot \underline{A}^{n-1} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

$$\text{Beobachtbar} \rightarrow \text{rang}(Q_b) = n \vee \det(Q_b) \neq 0$$

Sowohl die Steuerbarkeit als auch die Detektierbarkeitsmatrix von dem Prozess lassen sich sehr vereinfacht auch ohne Berechnung bestimmen. Da Richtungsgebiet **B** als auch Richtungsgebiet **C** nur einen Parameter haben, wird bei der zweiten Etappe nur mit der Spalte oder die Zeile der Matrix **A** multipliziert. Die Determinante ist bei der Begebenheit nur dann gleich Null, falls die Multiplikation dem gleichen Richtungsgebiet **C** in der Situation der Detektierbarkeit und **B** in der Situation der Steuerbarkeit liefert. Was hier als auch oft bei einelementigen Richtungsgebiet gilt. Die Ableitung von dem Richtungsgebiet vom Status ist:

$$\hat{\underline{x}}(t) = \underline{M} \cdot \hat{\underline{x}}(t) + \underline{G} \cdot \underline{F}(t) + \underline{H} \cdot \underline{x}(t) \quad (3.6)$$

$\hat{\underline{x}}(t)$: Rekonstruierter Zustandsvektor

Es muss eine lineare Funktion aus Eingang und Ausgang des Verfahren sein, sodass nach einer kompakten Zeitraum keinen Unterschied zwischen den Richtungsgebieten gibt. D.h, dass die Fehler zwischen den Richtungsgebieten beseitigt werden müssen [LUN16]:

$$\hat{\underline{e}}(t) = \hat{\underline{x}}(t) - \underline{x}(t) = (\underline{A} - \underline{H} \cdot \underline{C}) \cdot \underline{e}(t) = \underline{A}_e \cdot \underline{e}(t) \quad (3.6)$$

Der Fehler verschwindet gegen Unendlich nur dann, wenn die durch \underline{A}_e entstehende typische Gleichung keine positive Realteile aufweist. Der Vektor der Rückführungsschleife **H** kann also gemäß Polplatzierung berechnet werden. Bei der tauglichen Wiederaufbau der Richtungsparametern vom Status muss die Regelgüte der Matrix \underline{A}_e so bestimmt werden, dass die Abweichung von dem Detektor relativ schneller abklingt. Sie sollten aber nicht zu weit entfernt von den Eigenwerten von der Matrix **A** liegen, sonst wäre die Detektion sensitiv gegenüber Beeinträchtigungen.

Zur Behandlung die durch die Detektion entstehende Fehler werden sogenannte Vorfilter eingesetzt, welche gemäß der Führungsgröße regeln sodass der Unterschied zwischen der Vorgabe und Zufluss im Unendlichen gegen Null konvergiert [LUN16]. Es muss also gelten:

$$y(\infty) = w(\infty) \rightarrow F_i = \frac{1}{d - (C^T + d \cdot K^T) \cdot (A + B \cdot K^T)^{-1} \cdot B} \quad (3.6)$$

Die Herausforderung bei Vorfiltern ist es, dass sie die bleibende Regeldifferenz durch Messfehlern oder durch die Beeinträchtigung nicht verdrängen können [LUN16]. Der Regeldifferenz kann als neues Status verstanden werden:

$$x_I(t) = \int_0^t (w(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (3.7)$$

Für keine bleibende Regeldifferenz muss also gelten:

$$y(\infty) = w(\infty) \rightarrow \dot{x}_I(t) = 0 \quad (3.8)$$

Für die Einleitung des neuen Zustandes durch separate Betrachtung von der ungeregelten Regelkreis muss gelten:

$$x_I(t) = -y(t) = -c^T \cdot x(t) - d \cdot u(t) \quad (3.9)$$

Führt man obere Größe im Richtungsgebiet von dem Status, so ergibt sich die Präsentation durch **Gleichung 3.69**. Es ist dann eine gewünschte Sollmaß nach Polpalzierungsverfahren so zu berechnen, dass der Pol des I-Anteils nicht zu weit nach links verschoben wird, sodass die Geschwindigkeit von dem Prozess erhalten bleibt. Die Fixwerte der Transferstagnation des Integrators ist nach Koeffizientenvergleich mit der Vorgabekennzahlen zu berechnen [LUN16]. Es kann eine Dämpfungsstiefe parallel arbeiten, sodass sich die Effekte gekoppelt werden. Das Netz von dem Prozess ist in **Abbildung 2.17** visualisiert.

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_I(t) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tilde{\dot{\mathbf{x}}}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_I(t) \end{bmatrix},$$

Mit $\dot{\mathbf{x}}_I(t) = 0$,

$$\Leftrightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_I(t) \end{bmatrix}}_{\tilde{\dot{\mathbf{x}}}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A}_G & \underline{B} \cdot \mathbf{K}_I \\ -\underline{C}^T - \mathbf{d} \cdot \mathbf{K}^T & -\mathbf{d} \cdot \mathbf{K}_I \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{A}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_I(t) \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{x}}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{B}}} \cdot \underbrace{\mathbf{F}_w(t)}_{w(t)}, \quad (3.7)$$

$$\underbrace{\mathbf{x}(t)}_{y(t)} = \underbrace{[\underline{C}^T + \mathbf{d} \cdot \mathbf{K}^T \quad \mathbf{d} \cdot \mathbf{K}_I]^T}_{\tilde{\mathbf{C}}^T} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_I(t) \end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{x}}(t)},$$

\underline{A}_G : Systemmatrix nach Rückführung,

K^T : Rückführungsvektor,

K_I : Verstärkung des I-Gliedes,

$\tilde{\mathbf{A}}$: Gesamtsystemmatrix mit Rückführung und I-Anteil,

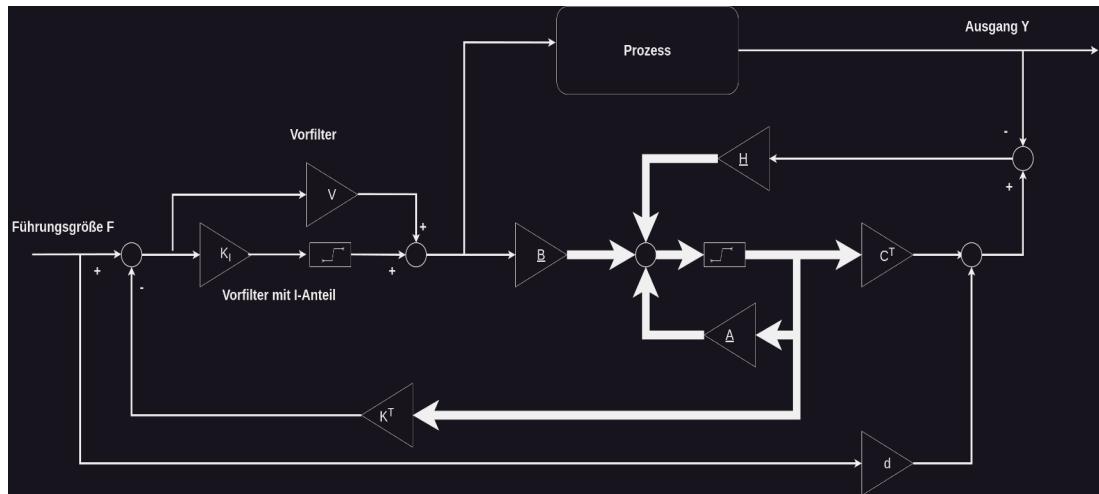


Abbildung 2.17: Detektorregelung mit Glättungsmechanismen und I-Glied

3 Strategischer Plan und Realisierungsansatz

Das Ziel des Festwalzablauf ist es, originäre Bauteile, wie in **Bild 3.1** visualisiert, die in den meisten Fällen Fehlstellen und Unrundheiten aufweisen können, auf der Weise plastisch zu verarbeiten, dass sie die Ansprüche an Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf Form und die Verteilung der Eigenspannungen, erfüllen.



Bild 3.1: Bauteil aus Baustahl in Originalform ($m > 2\text{kg}$)

In letzterer Reihe wurde der Übergang von der Signal- und Systemtheorie zu den theoretischen Basen der Regelungstechnik beschrieben. Es wurde erläutert, wie verschiedene Methoden zur Analyse und Regelung von Prozessen, insbesondere in Regelschleifen, eingesetzt werden. Die Walzhärtungsoperation wurde untersucht, wobei Herausforderungen wie Leerlaufstufe und Hüllengefahr identifiziert wurden, die mit herkömmlichen PID-Bedienern nicht vollständig verdrängt werden können. Zur Verbesserung wurden wegweisende Bediener wie dem Smith-Schätzer und der LQR-Bediener vorgeschlagen. Für eine präzise Vorhersage und Optimierung wurden räumliche mathematische Modelle angewendet, unterstützt durch theoretische und praktische Ansätze aus der Regelungstechnik.

Das genauere Ziel von der Arbeit besteht darin, den durch die Leerlaufstufe bedingten zeitlichen Versatz aufzuheben und eine präzise Regelung des Kaltwalzhärtungsablauf zu erzielen. Das Hauptziel ist es, die Nenngröße exakt vorherzusagen und zuverlässig zu regeln.

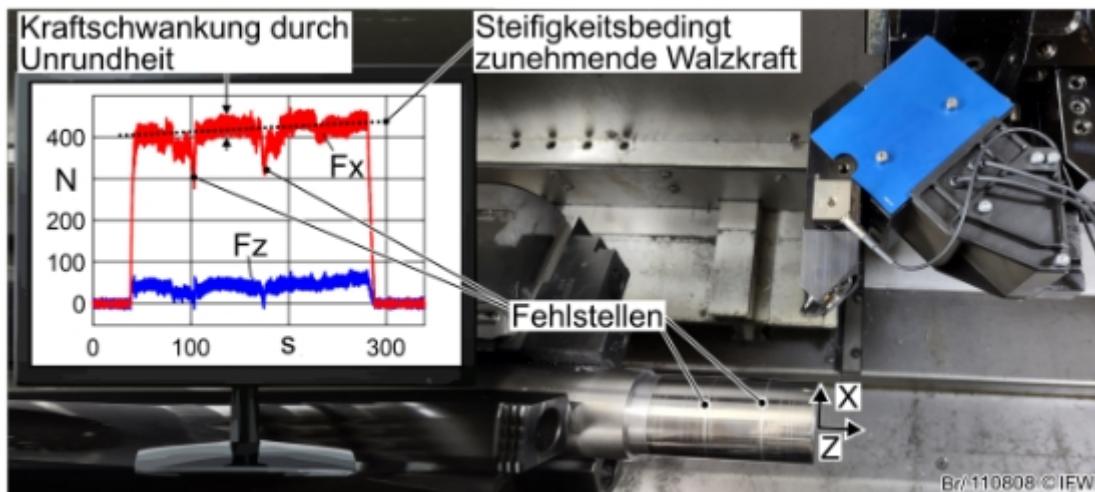


Abbildung 3.1: ungeregelter Prozess

Ein zusätzliches Ziel ist die schnelle Verdrängung von Wechselpendelungen und Fehler, die durch die variierende Fehlstellen entstehen. Für das Endprodukt zweier mit der Drehmaschine festgewalzter Bauteile, die ursprünglich die Form aus **Bild 3.1** hatten, ist in den **Bild 3.2** und **3.3** aus der Seiten- sowie der Draufsicht veranschaulicht.



Bild 3.2: Verarbeitetes Bau teil 1



Bild 3.3: Verarbeitetes Bau teil 2

Der Realisierungsansatz gliedert sich wie folgt:

- **Entwicklung der mathematischen Modells zur Kontrolle der Transferstagnation.**
- **Simulation in MATLAB/Simulink** zur Verifizierung des Modells.
- **Entwicklung von Algorithmen von den Schätzern und Bedienern** gemäß der Norm IEC 61131..
- **Simulation der Bediener mit Impaktreaktion.**
- **Begutachtung der Ergebnisse.**
- **Optimierung der Algorithmen** basierend auf den Simulationsergebnissen.
- **Verifizierung**

Das strukturierte Plan sollte ermöglicht eine fundierte und zielgerichtete Bearbeitung der Problemstellungen des Walzverfahren und unterstützt die Entwicklung optimaler Regelungsstrategien.

4 Kontrolle der Transferstagnation

Zur Dämpfung der durch die Leerlaufsperiode entstehenden Verzerrungen werden verschiedene Ansätze angewendet. Im Fokus steht jedoch der Smith-Schätzer dank seiner Tauglichkeit, das Prozessverhalten vorherzusagen und somit die Ist-Kraft zu approximieren und entsprechend zu regeln. Eine Dimensionierung zu dem Smith-Schätzer in Simulink wird daher entwickelt und getestet, um die Theorie der Smith-Schätzung durch Realitätsnahe Anwendung zu verifizieren. Anschließend wird ein entsprechender Algorithmus gemäß dem Standard IEC61131 zum Einsatz in der Windows-Control umgesetzt. Der Algorithmus wird dann durch eine Sprungantwort des Walzapparatus entlang der X-Richtung getestet, wobei die auftretenden Fehler klassifiziert und behoben werden. Danach erfolgt die Optimierung der Fixwerte sowohl vom PID-Bediener als auch vom Smith-Schätzer, da der PID-Bediener als Richtregler arbeitet und mit dem Smith-Schätzer sowie anderen Regelalgorithmen verglichen wird. Dabei werden die Messungen registriert und verwertet. Abschließend erfolgt die Verifizierung der Regelalgorithmen.

4.1 Der Smith-Schätzer

Die wesentlichen Komponenten von dem Smith-Schätzer sind der PID-Bediener sowie die virtuelle Strecke, die das Benehmen vom Walzablauf nachahmen, sowie ein Leerlaufanteil, welches die Inaktivitätsperiode der Transfer von Daten durch die OPC-UA-Schnittstelle und die Periode, die zu den Rechenoperationen in Windows-Control benötigt wird (T_t ca. 300 Millisekunden), berücksichtigt. **Abbildung 4.1** exemplifiziert eine allgemeine Struktur von dem mit Smith-Schätzer geregelten Kaltverformungsablauf.

Der Smith-Schätzer berechnet den approximierten Ausgang bzw. die Istkraft des Kaltverformungsablauf, die in zwei Pfaden verarbeitet wird: durch das Leerlaufbruchteil und ohne. Das Signal, das durch das Inaktivitätsblock läuft, wird mit dem tatsächlichen Ausgang, der mit Leerlaufsphase behaftet ist, verglichen und liefert einen Fehler, der dann mit der approximierten Istkraft ohne Ruhezeit verglichen wird, um die Schätzung weiter zu idealisieren. Anschließend wird die Schätzung mit der Führungsvorgabe verglichen und liefert einen Fehler, der durch den PID-Bediener verarbeitet, der den notwendigen Offset bestimmt und als Erregersignal zum Prozess weitergeleitet wird. Dadurch wird die Regelung nicht nur basierend auf

die Schätzung durchgeführt, sondern auch unter Berücksichtigung der Istkraft, die nach der Transferstagnation auftritt.

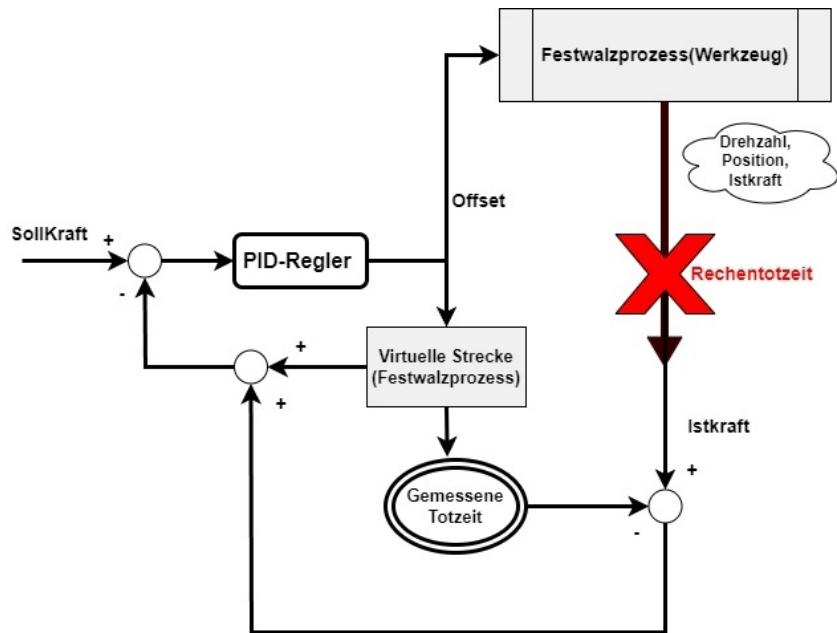


Abbildung 4.1: Konzeptionelles Schaltbild des Smith-Schätzers

4.1.1 Modellierung von dem Smith-Schätzer

Nachfolgend wird die komplette Anordnung ausgehend von **Abbildung 4.1** in Simulink überführt und getestet. Für die virtuelle Strecke wird ein Massenschwingerverfahren mit einer Differentialgleichung zweiter Ordnung verwendet, da die genaue Auslegung und Herleitung der Differentialgleichung erst bei der Realisierung des Algorithmus obligatorisch sind. Die Simulation führt primär zu Überprüfung der Theorie von dem Smith-Schätzer und der Überprüfung von dem Ansatz. Die virtuelle Strecke nach **Abbildung 4.2** implementiert die folgende Differentialgleichung:

$$m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + d_x \cdot \frac{dx(t)}{dt} + c_x \cdot x(t) = F(t) \quad (3.7)$$

Zur Realisierung als Anordnung wie in **Abbildung 4.2** soll die **Gleichung 3.71** wie folgt:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = \frac{1}{m} \cdot (\mathbf{F}(t) - d_x \cdot \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} - c_x \cdot \mathbf{x}(t)) \quad (3.7)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = \frac{1}{m} \cdot \mathbf{F}(t) - \frac{1}{m} \cdot d_x \cdot \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} - \frac{1}{m} \cdot c_x \cdot \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

modifiziert. Die mimitierte Strecke und der reale Prozess bekommen den durch den PID-Bediener bestimmten Offset, der in Mikrometern angegeben ist. Deshalb wird der Eingang $\mathbf{F}(t)$ durch einen entsprechenden Verstärker nach folgender Gleichung umgerechnet:

$$\mathbf{F}(t) = \frac{c_x}{m} \cdot \text{Offset}(x) \quad (3)$$

Abbildung 4.3 expioniert die Simulationsanordnung von dem Smith-Schätzer in X-Richtung. Er besteht aus einer Strecke vom Apparatus, dem Smith-Schätzer, einem Scope, das als Oszilloskop dient und Referenzkraft.

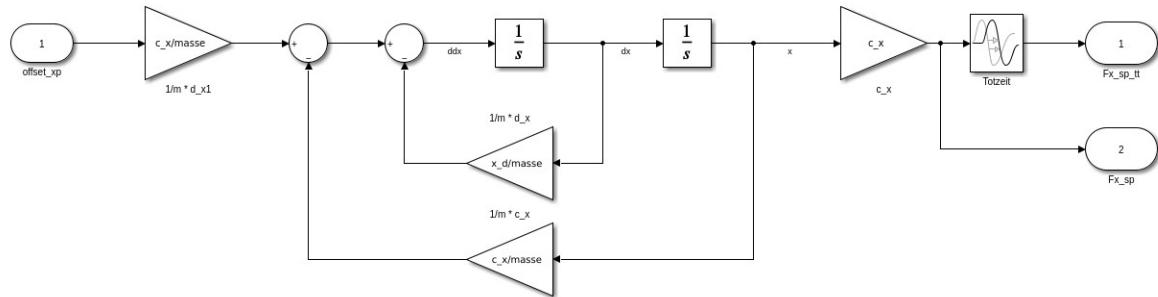


Abbildung 4.2: Blockschaltbild der virtuellen Strecke in Simulink

Die Strecke des Festwalzablaufs unterscheidet sich von der mimierten Strecke durch eine zusätzliche sinusförmige Beeinträchtigung von 20 N, die mit 50 Hz frequentiert, um das tatsächliche Verhalten des Ablaufs besser nachzuahmen. Der PID-Bediener hat dabei zwei Eingänge: die Referenzgröße, welche die Sollkraft ist, und den Input, welcher die Walzkraft des Festwalzablaufes erfasst. Die beiden Signale werden miteinander verglichen und liefern das Inputsignal „Offset“, das

sowohl der virtuelle Prozess als auch in den Kaltwalzablauf zugeführt wird. Der verwendete PID-Bediener ist ein „2DOF“-PID-Bediener, der sich auch automatisch abstimmen lässt.

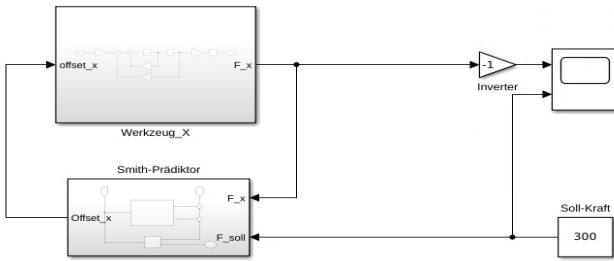


Abbildung 4.3: Blockschaltbild der vollständigen Schaltung des Smith-Schätzers in Simulink

Die automatische Abstimmung kann sowohl auf der Überführungsfunktion als auch auf dem Frequenzgang berufen, wobei frei gewählt werden kann, ob sich der PID-Bediener diffensiv, schnell oder langsam verhalten soll. Zudem werden ‚live‘ sowohl die Impaktreaktion von dem unabgestimmten System als auch die von dem Abgestimmten visualisiert, sodass auch die Übersteuerung modifiziert werden kann. Das Leerlaufsglied („Transport Delay“) ruft eine Verspätung des Signals um 0,3 Sekunden hervor. Die Simulation über 10 Sekunden mit automatisch abgestimmten bzw. idealen PID-Parametern ist in **Abbildung 4.4**. Der blaue Verlauf stellt die Ist-Last des Festwalzablaufes dar, während die Braune die Orientierung repräsentiert. Der anfängliche lineare Verlauf der blauen Kurve, der Ist-Kraft, ist auf die Transferstagnation zurückzuführen und daher unvermeidbar. Die Wechselpendelungen der Ist-Kraft werden durch die kleine sinusförmige Beeinträchtigung verursacht. Die bei der Simulation verwendeten Parameter von der virtuellen Strecke sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 1: Parameter des virtuellen Strecke zum Simulation nach **Abbildung 4.3**

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Wert
m	Masse des Federpaketes	kg	3
c_x	Federsteifigkeit des Federpaketes	$N \cdot m^{-1}$	167000

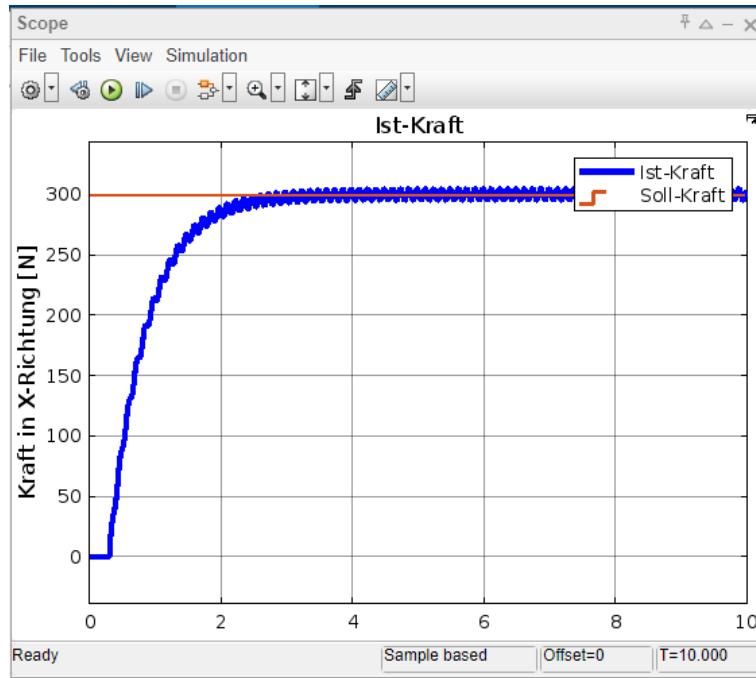


Abbildung 4.4: Simulation des Smith-Schätzers mit optimalen PID-Parametern in Simulink

Die Dämpfung wurde deswegen als sehr gering unterstellt, da bekannt ist, dass der Walzablauf nahe der Resonanzfrequenz vibriert. Deswegen kann dies als die **halbe Wurzel von Zwei** erwogen werden. Die Bestimmung der Dämpferbasisgröße basiert sich auf der Berechnung der Kreisfrequenz von dem Prozess:

$$w_{0x} = \sqrt{\left(\frac{c_x}{m}\right)} \quad (3.7)$$

d.h:

$$d_{0x} = \frac{2 \cdot c_x \cdot D_x}{w_{0x}} \quad (3.7)$$

Abbildung 4.4 exemplifiziert die erwartete Kurve bei einer Regelung mit dem Smith-Schätzer und unterscheidet sich nur wenig von der Regelung mit dem PID-Bediener.

4.1.2 Innovation von dem Algorithmus

Das Schritteil beschreibt die Entwicklungsphasen von dem Algorithmus zum Smith-Schätzer. Zunächst werden der Experimentelle Einrichtung, die Drehmaschine und das Apparatus detailliert erklärt, einschließlich der Schritte von der Befestigung des Apparatus bis zum Start von dem Programm. Anschließend werden die ersten Schritte zur Entwicklung von dem Algorithmus in Python und Matlab sowie deren Überführung in den IEC 61131-Standard zur Ausführung in der TwinCAT dargelegt, in dem auch die Hindernisse bei dem Experiment akzentuiert werden. Danach werden MATLAB/Simulink-Funktionen in TwinCAT eingesetzt und überprüft, um deren Perspektiven sicherzustellen und mögliche Fehler wegzuschaffen. In der nächsten Phase werden die Algorithmen in TwinCAT realisiert und Messwerte registriert. Anschließend wird die Idealisierung der Regelparameter durch Impaktreaktion-Simulation sowie die Begutachtung und die Differenzierung der Bedienerfunktionalitäten. Abschließend wird die Schätzung von dem Smith-Schätzer idealisiert und neue Daten werden erwogen.

4.1.2.1 Versuchsfeld, Drehmaschine und Apparatus

Der Versuchsfeld hat einen Regal, das die für die Reparatur des Apparatus und der Drehmaschine notwendigen Utensilien und Geräte enthält (Vgl. **Bild 4.1.**) Rechts neben der Maschine und dem Regal befindet sich das Arbeitsbüro, das dem IPC trägt. Auf der linken Seite von dem Bildschirm ist die Antennenapparatus zur Verbindung mit dem Gerät, die über Wlan mit dem IPC kommuniziert. Hinter dem IPC ist Beckhoff-Hardware montiert, die über die vorinstallierte Beckhoff-Software Windows-Control gesteuert wird. Messdaten und Steuerungsinformationen werden zwischen der Maschine und dem Beckhoff-Dashboard über das OPC-UA-Protokoll ausgetauscht. Der IPC besitzt außerdem Internetzugang, was die Nutzung von Matlab-Online und Suchdienste ermöglicht. **Bild 4.1** enthüllt die Drehmaschine mit geöffnetem Eingang. Rechts ist die Werkzeughalterung zu sehen, in der das Apparatus befestigt wird und in zwei Richtungen bewegt wird. In **Bild 4.2** sind Bilder vorhanden, die das in IFW entwickelte Apparatus von Ecoroll EG45 von unten, oben und von der Seite visualisieren.

Bild 4.1: Versuchsmaschine: DMG Mori CTX gamma 2000 TC



Am Ende des Geräts ist eine Nut gestanzt, in der das vordere Glied der Halterung eingeht, sodass die kinematische Energie von der Halterung an ihn weitergeleitet wird.



Bild 4.2: Walzgerät: von Unten, Oben und Seiten

Das Walzgerät ist mit zwei dreischichtigen Federn im Federpaket ausgestattet, die sich im vorderen Teil hinter der Rolle sowie ganz hinten befinden. Das Walzenpaar ist um 45° versetzt, was ermöglicht, dass die Walznormalkraft normal auf das Bauteil ausgelöst wird. Existiert Neigung nicht, so wäre die Normalkraft bei dem Verbundpunkt, bestehend aus der Vorschubbewegung in Z-Richtung und der Walzkraft in X-Richtung, um 45° geneigt. **Abbildung 4.5** zeigt einen Querschnitt von dem 3D-Modells des Apparatus, in dem die Neigung der Rolle deutlich zu erkennen ist.

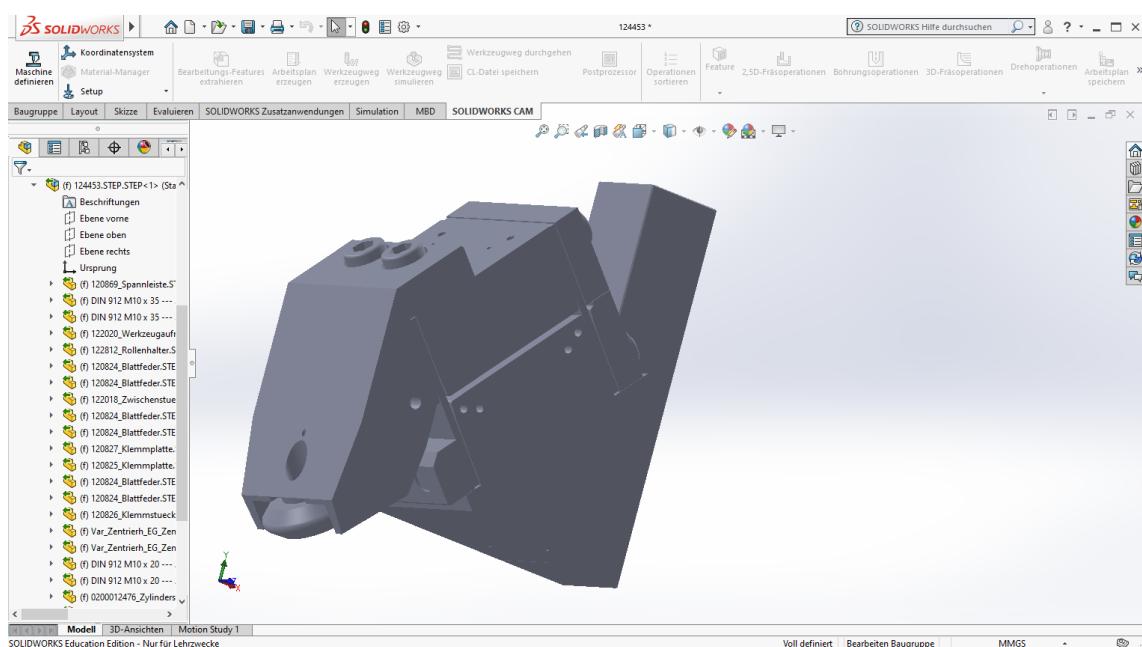


Abbildung 4.5: 3D-Modell des Apparatus in CAD-Software Solidworks

Der Winkel hat den zusätzlichen Effekt, dass Fehlstellen auf der Hülle ähnlich wie bei einem Rasierapparat entfernt werden. Das Walzapparatus kann auch über die „Core-Sensing“ via Bluetooth-Protokoll gesteuert werden. Es wurde bei einem Kooperationsprojekts zwischen dem IFW und zwei anderen Firmen weiterentwickelt und mit Dehnungsmessstreifen (DMS) erweitert, sodass die Kraft in beiden Richtungen detektiert wird. Die zweiachsige Detektion bildet den Startpunkt für die entkoppelte Monitoring des Gerätes.

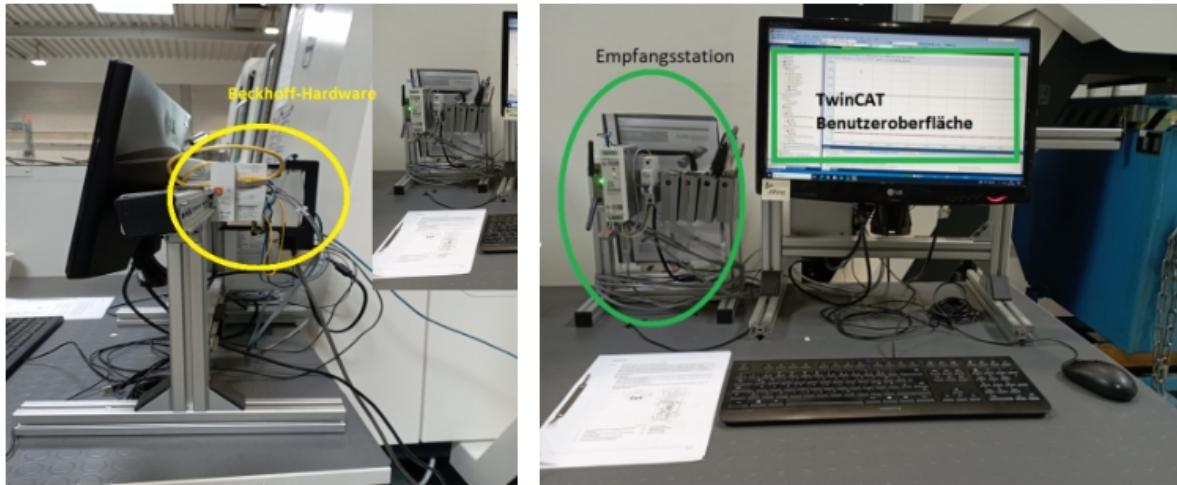


Abbildung 4.6: Beckhoff-Dashboard (Links) und Beckhoff-Software Windows-Control (Rechts: Industrie-PC)

Der Festwalzprozess beginnt damit, dass das Bauteil einseitig gespannt und mit einer bestimmten Drehzahl rotiert wird. Das Walzwerkzeug wird an der Halterung (rechte Seite auf **Bild 4.1**) befestigt und bewegt sich zweiachsig entlang der X- und Z-Richtung und kontaktiert die Bauteilhülle über ein Walzenpaar, wobei das Drehmoment reibungslos auf die Rolle transportiert wird. Die sich daraus ergebende Walznormalkraft ergibt sich aus dem Richtungsgebiet von der Summe der Kräfte in beiden Richtungen. Auf Hüllen mit fixem Radius muss eine gleichmäßige Spannungsverteilung sichergestellt werden. Um die erforderlichen Walzkräfte zu bestimmen, wird die FEM eingesetzt, welche nicht immer exakt ist und einen hohen Aufwand erfordert. Daher werden die Soll-Walznormalkräfte stattdessen auf Basis bereits bekannter Messdaten bestimmt. FEM-Methode wird aber zur Feststellung des Verhaltens der Schrauben, Federpaket sowie die komplette Gehäuse von dem Bauelement verwendet. **Abbildung 4.7** zeigt das Gerät während einer Simulation in Ansys, bei der das Walzenpaar mit einer Belastung mittig entlang der X-Richtung auf eine kleine Krafthülle belastet wird. Dadurch können die Verformung, Spannung sowie die flexible Dehnung in einer statisch-mechanischen Simulation ermittelt werden. Das Verfahren wird zunächst in SolidWorks erstellt und anschließend als IGS-Format in Ansys importiert, ein Netz wie in **Abbildung 4.5** - erstellt und danach simuliert.

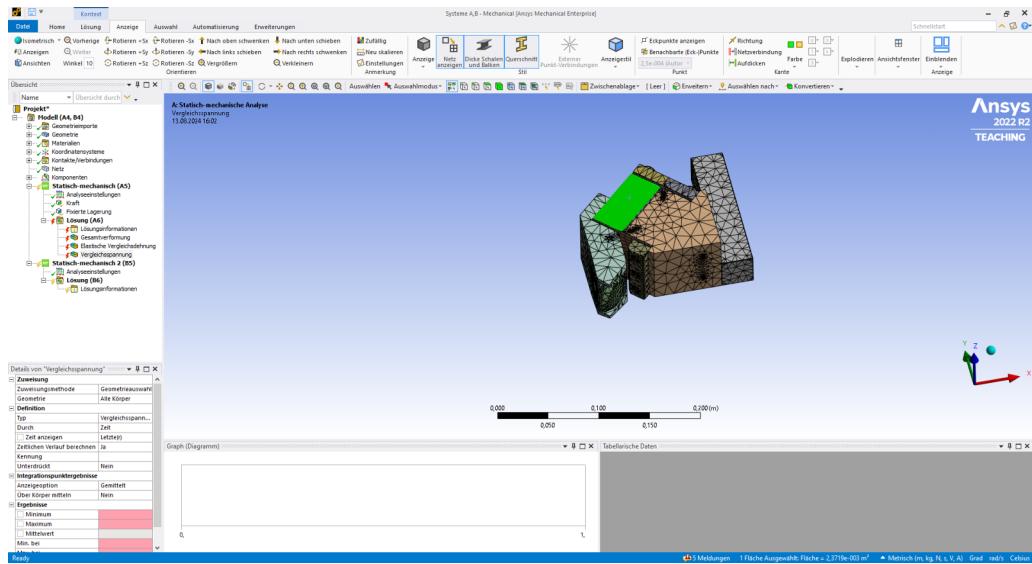


Abbildung 4.7: Ansys-Simulation des Apparatus

4.1.2.2 Algorithmus von dem Smith-Schätzer : Erste Experimente

Die Dimensionierung von dem Smith-Schätzer in dem Standard IEC 61131 unterscheidet sich erheblich von der Implementierung in konventionellen Softwaresyntaxen und bedingt daher deutlich mehr Sorgfalt und Geduld. Im Kontrast zu Python, C, C++ oder Java entfaltet die Programmierung von IEC 61131 besondere Hindernisse, die vielfältige Anpassungen und spezifisches Wissen benötigen. Zunächst wurde erkundet, unterstützend von Python mehrere Bediener zu kriegen und anschließend in eine strukturierte Sprache zu überführen. Dabei hebten sich aber mehrere Hindernisse hervor wie die Nichtausführbarkeit. Die Mehrheit der in Python, C, C++ und Java erworbenen Know-How erwies sich als wenig nützlich. Stattdessen war eine intensive Auseinandersetzung mit der Windows-Control-Referenz notwendig.

Ein spezifisches Problem bestand in der Handhabung von Arrays, da in IEC 61131 nicht einfach deklariert werden können. Zudem erwies sich die Trennung von Funktionen, wie sie in C oder Python üblich ist (Bspw. def PID(Array)), als besonders problematisch. Debugging war äußerst aufwendig, insbesondere während der Verifizierung. Kleine Fehler wurden oft nur durch eine einfache Unterstreichung angezeigt, und wenn Arrays betroffen waren, erschien lediglich ein Fragezeichen,

falls der Array nicht iterierbar war oder Fehler im Index auftraten. Solche Probleme traten häufig erst auf, wenn das Walzgerät verbunden war, was die Fehlersuche zusätzlich erschwerte.

```

211 # Funktionen für den Smith-Prädiktor
212
213 def Differenzierer(sampling_time, u): # Funktion zur Berechnung des Differential
214     return (1/sampling_time) *(u[0]-u[1])
215
216 def Integrator(sampling_time, u):    # Funktion zur Berechnung des Integral
217     return (sampling_time/2) * Sum_array(u)
218
219
220 def PID(sampling_time, u, ks, ti, td): # Funktion des PID-Reglers
221     return ks*u[0]+ (1/ti)* Integrator(sampling_time, u) + td * Differenzierer(sampling_time,u)
222
223
224 def Virt_Strecke(sampling_time,u,m,d,c, ddy, dy,y, N): # Funktion der virtuellen Strecke
225     yy      = [0]*2
226     ddy[0]  = (1/m)* (u[0] - d*dy[1]-c*y[2])
227     dy[0]   = dy[1] + sampling_time*ddy[0]
228     y[0]    = y[1] + sampling_time*dy[0]
229     yy[0]   = y[0]
230     yy[1]   = y[N]
231     return yy
232
233 def Smith_Prädiktor(sampling_time, u, ks, ti, td, m, d, c, ddy, dy, y, N, e, Re): #Funktion des
234     yy      = Virt_Strecke(sampling_time,u, m, d, c, ddy,dy,y,N)
235     e[0]    = (u[0] - c*yy[0] + c*yy[1])
236     Re[0]   = PID(sampling_time, e, ks, ti, td)
237
238     return Re[0]

```



Abbildung 4.8: Code-Teil vom Python-Programm von den Smith-Schätzern

Hinsichtlich der genannten Engpässen wurde zunächst probiert, den Code in Python zu schreiben und mit Bibliotheken wie Matplotlib und Time zu experimentieren, um ihn anschließend sorgfältig und manuell von Python in Windows-Control einzuführen. Dieses Verfahren stieß aber auf ähnliche Hindernisse, was zu Anpassung des Modus Operandi geführt hat.

Als nächstes wurde der von Python in TwinCAT umgesetzte Code systematisch idealisiert. Zunächst wurde er auf dem IPC Detailgetreu überprüft und anschließend unterstützend von einer Cloud-Anwendung, die in VS-Code bereitstehend ist verfeinert. Zur nachfolgende Optimierung wurde der Code mittels mimetisierte Intelligenz wie ChatGPT und Gemini synthetisiert, um die Richtigkeit von dem Code zu überprüfen. Da das Verfahren dominante Temporaldimension nötigt, war es notwendig, die Realisierung anderer Bediener wie Detektor, Glättungsagent und ideale Bediener vorläufig zu pausieren und sich auf die Korrektheit eines einzigen

Moderator zu fokussieren. Die Moderatoren setzten überwiegende separater Funktionen aus, darüber hinaus Matrix-Richtungsgebiet-Aktionen oder den Gauss-Jordan-Algorithmus, um ihr Befugnis zu gewährleisten.

```

functions.st > ...
1323  FUNCTION_BLOCK Regelstrecke
1324    VAR_INPUT
1327      a,v,p,u          :ARRAY[0..*] OF REAL;
1328      END_VAR
1329      VAR_OUTPUT
1330        pos            :REAL;
1331        f               :REAL;
1332        END_VAR
1333        a[0]             := (1/m)*(u[0]-d*v[1]-c*pos[2]);
1334        v[0]             := v[1] + delta_t*a[0];
1335        p[0]             := p[1] + delta_t*v[0];
1336        pos              := p[0];
1337        f                := pos*c;
1338    END_FUNCTION_BLOCK
1339 // Smith-Prädiktor +
1340 FUNCTION SmithPraediktor           :REAL
1341   VAR_INPUT
1342     delta_t, d, c, ks, ti, td,   :REAL;
1343     m, N                  :INT;
1344     r, rs, fs, fi         :ARRAY[0..*] OF REAL;
1345   END_VAR
1346   VAR
1347
1348     e1, e2, ,e3          :ARRAY[0..1] OF REAL;
1349     s                   :Strecke;
1350   END_VAR
1351   s(delta_t:=delta_t,m:=m,d:=d,c:=c,a:=a,v:=v,p:=p,u:=r);
1352   rs[0]                 :=s.f;
1353   e1[0]                 :=fi[0]-rs[N-1];
1354   e1[1]                 :=fi[1]-rs[N];
1355   e2[0]                 :=fs[0]-e1[0];
1356   e2[1]                 :=fs[1]-e1[1];
1357   e3[0]                 :=e2[0]-rs[0];
1358   e3[1]                 :=e2[1]-rs[1];
1359   r[0]                  :=PID(delta_t:=delta_t, ks:=ks, ti:=ti, td:=td, u:=e3);
1360   SmithPraediktor:     = r[0];
1361 END_FUNCTION
1362
1363

```

Abbildung 4.9: Code-Teil von dem experimentellen Einrichtung von dem Smith-Schätzers in TwinCAT

Der Prädiktor wurde daraufhin optimiert, indem der PID-Moderator und die Strecke von dem Hauptprogramm separiert wurden. Trotz genauer Befolgung von Windows-Controll-Anweisungen funktionierte das Verfahren aber nicht wie gewünscht. Nach überzähligen Versuchen wurde beschlossen, auf die Separierung der Funktionen zu verzichten und die komplette Realisierung strategischer zu konzipieren. Demnach wurde beschlossen, den kompletten Code zunächst rekursiv Zeile für Zeile im

Hauptprogramm zu implementieren und zu testen, bis die Funktionalität gewährleistet wird.

4.1.2.3 Algorithmus von dem Smith-Schätzer als Matlab-Funktion

Weil die Funktionen nun nicht separat realisiert werden, sondern direkt und rekursiv in im Hauptprogramm integriert werden, eignet sich die Simulation von dem Ansatz als Matlab-Funktion, anschließend in Simulink als Regelungsblock verwendet, bevor sie in Windows-Control implementiert wird. So können potenzielle Unstimmigkeiten frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor die echte Impaktreaktion-Simulation beginnt. Zunächst werden die idealen PID-Parameter aus der **Tabelle 1** übernommen und nur mit dem PID-Bediener simuliert. Anschließend wird das Algorithmus von dem Smith-Schätzer integriert. **Abbildung 4.10** expliziert die Schaltung sowie den Aufruf der Matlab-Funktion in Simulink, während **Abbildung 4.11** den Code von dem PID-Bediener darlegt.

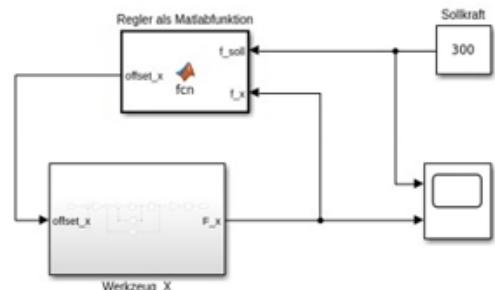
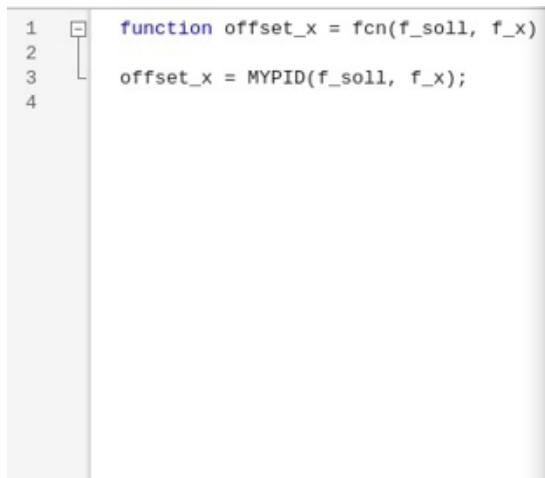


Abbildung 4.10: Realisierung von dem PID-Bedieners als Matlab-Funktion innerhalb eines Simulink-Baustein

Auf der rechten Seite der **Abbildung 4.10** ist der Matlab-Funktionsbaustein zu sehen, der die gewünschte Funktion aufruft. Der Block hat einen einzigen Ein- und Ausgang, deren Anzahl und Bezeichnung aber von der aufgerufenen Funktion abhängt, wie auf der linken Seite der Abbildung dargelegt. Auf dem Baustein wird die **MYPID** benannt, in dem **f_soll** (Vorgabe) und **f_x** (Istkraft) ausgenutzt werden. Nach

der Ausführung liefert die Beziehung von den dem Ergebnis das **Offset**, der als Input in den Prozess fließt.

```
/MATLAB Drive/MYPID.m
1 function u = MYPID(f_soll, f_x) % PID-Regler als Matlab-Funktion
2 dt = 0.01; % Sampling-Zeit
3 % Konstanten PID-Regler Optimale Parameter
4 Ki = 1.07066430656881e-05;
5 Kd = 0;
6 Ks = 1.09431219064942e-07;
7 % Variablen PID Regler
8 persistent integ ablei p_e;
9 if isempty(integ)
10     integ= 0;
11     ablei = 0;
12     p_e = 0;
13 end
14 % Berechnung des Fehlers
15 e = f_soll - f_x;
16 % Berechnung des Integral des Fehlers
17 integ = integ + (e + p_e) * dt / 2;
18 % Berechnung der Ableitung des Fehlers
19 ablei = (e - p_e) / dt;
20 % Update des Fehlers
21 p_e = e;
22 % Ausgang des PID-Reglers
23 u = Ki*integ+ Kd * ablei + Ks * e;
24
```

Abbildung 4.11: Algorithmus von dem PID-Bediener als Matlab-Funktion.

Der Matlab-Algorithmus in **Abbildung 4.11** bei dem PID-Bediener verwendet die idealen PID-Parameter aus der vorherigen Simulation in **Schriftteil 4.1.1** sowie die Sampling-Periode, die zur Berechnung des Integrals und der Ableitung genutzt wird.

Zunächst werden persistente Variablen bei dem Integrator, dem Differenzierer und der Fehler deklariert, um sicherzustellen, dass die Variablen nach jeder Iteration erhalten bleiben. Anschließend erfolgt die Berechnung des Fehlers. Der Integrator berechnet das Integral mit dem eulerschen Verfahren (siehe **Zeile 17** in **Abbildung 4.11**), das annähernd der Summe der vorherigen Fehler entspricht. Die Ableitung

wird als Quotient des Unterschieds zwischen der aktuellen und der vorherigen Varianz und der Zeitraum zwischen den Schritten (**10 ms**) bestimmt. Demnach wird das Regelsignal u in **Zeile 23** ausgegeben, basierend auf der parallelen Anordnung von dem PID-Bediener. Der Smith-Schätzer idealisiert den Algorithmus durch die Modellierung der imitierten Struktur ohne Störung sowie eine Schätzung der Ist-Last. Die interaktive Struktur von dem Smith-Schätzer wird rekursiv realisiert, indem die Differentialgleichung entsprechend den **Gleichungen 3.72** verwendet wird. Wie bereits in **Schrittein 4.1.1** erklärt, wird statt der Kraft der Offset als Input der Strecke verwendet, wie es in **Gleichung 3.73** beschrieben ist. Die diskrete Präsentation der Differentialgleichung in **Gleichung 3.72** ist nachfolgend:

$$a_x[n] = \frac{1}{m} \cdot (F_x[n] - d_x \cdot v[n-1] - c_x \cdot x[n-1]) \quad (3.7)_6$$

Durch Modifikation der **Gleichung 3.76** mittels **Gleichung 3.73** ergibt sich:

$$a_x[n] = \frac{1}{m} \cdot (c_x \cdot \text{Offset}_x[n] - d_x \cdot v[n-1] - c_x \cdot x[n-1]) \quad (3.7)_7$$

Hinter der Annahme einer sehr winzigen Dämpfung folgt:

$$a_x[n] = \frac{c_x}{m} \cdot (\text{Offset}_x[n-1] - x[n-1]) \quad (3.7)_8$$

Alternativ könnte die Dämpfung inkludiert werden, wurde aber zur Erleichterung der Simulation nicht berücksichtigt. Dies liegt insbesondere daran, dass der Geschwindigkeit iterativ berechnet wird, wie in **Zeile 42** der **Abbildung 4.12** zu sehen ist. Ein hoher Wert würde zu einer entsprechend großen Ausschlag x führen, die zur Bestimmung von dem Offset benutzt wird und den Offset dadurch ebenso stark dehnen könnte. Es ist bedeutsam zu beachten, dass sich die **Gleichung 3.78** von den **Gleichungen 3.76** und **3.77** unterscheidet. Während die **Gleichungen 3.76** und **3.77** theoretisch richtig sind, wird im realen Experiment der Offset aus der letzten Iteration verwendet. Das ist dadurch bedingt, dass das Abfluss von dem PID-Bediener das Regelsignal ist, und nicht das Ausgangssignal der virtuellen Strecke, die zur Schätzung von der Ist-Kraft verwendet wird. Die Schätzung muss daher vor der Bestimmung von dem Abflusses von dem PID-Bediener bestimmt werden. Der Array **Xps** registriert die letzten **30** Messungen der Ist-Last. Die Zahl **30** ergibt sich aus dem **Verhältnis zwischen der Transferstagnation von 300 ms und der Zeit, die während einer Iteration vergeht (10 ms)**. Die Abweichung ist entsprechend

Abbildung 4.1 bestimmt, in dem die Abweichung, die vor der Transferfunktion auftreten würde, mit dem letzten Element des Arrays verglichen wird, um die Schätzung zu idealisieren.

```

40 % Strecke (Plant)
41 a_x = (osp_x - c_x * x)/masse; %% Differentialgleichung, wie es uns in der Vorlesung ermittelt wurde.
42 v_x = v_x + dt * a_x;
43 x = x+ dt*(v_x); %%+ a_x * (dt/2));
44 % Aktualisieren der Verzögerungsleitung (Delay Line)
45 Xsp(1) = c_x*x;
46 % Berechnung des Fehlers
47 e_x = f_soll - f_x; % Aktueller Fehler
48 e_x = f_x - Xsp(30); % Fehler zwischen gemessenem und prädiziertem Wert
49 e_x = (29/30)*e_x - (1/30)*e_x; % Fehler für den Smith-Prädiktor
50 % 29/30 und 1/30 zeichnen dabei die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser Fehlermessungen.

```

Abbildung 4.12: Virtuelle Strecke des Smith-Schätzers als Matlab-Algorithmus

Der Algorithmus in **Zeile 49** des gleichen Skripts wurde zusätzlich mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fehler erweitert. Dies berücksichtigt, dass ein Fehler nur einmal alle 30 Takte auftritt, während ein anderer in den übrigen Schritten stets präsent ist. Die letztere Entfaltung ist optional, demonstriert jedoch im Abgleich zur ursprünglichen Version ohne Entwicklung idealisierte Schätzungen.

Abbildung 4.13 exemplifiziert die Simulation der Regelschleife mit dem als Algorithmus realisierten Smith-Schätzer, der als Matlab-Funktionsbaustein in Simulink implementiert wurde. Der dargestellte Verlauf zeigt den erwarteten Verlauf, demonstriert jedoch an mehreren Bereichen Letharige Punkte auf, die auf die rekursive sowie diskrete Implementierung zurückzuführen sind. Die Übersteuerungen sind auch auf die nicht berücksichtigte Dämpfung zurückzuführen, die durch Anpassung der Fixwerte oder durch deren Optimierung reduziert werden könnte. Zum jetzigen Simulation ist die zuletzt erwähnte Reduktion aber von untergeordneter Bedeutung. Die Rechenkomplexität bleibt dabei unbeeinflusst, da das Verschieben der Array-Elemente lediglich fixes Aufwand erfordert. Im realen Prozess könnte dies an Bedeutung gewinnen, da die Bestimmungen innerhalb von weniger als 10 ms abgeschlossen sein müssen. Dennoch ist der Ansatz deutlich besser als die Implementierung oder der Zugriff auf einen großen Speicherbereich.

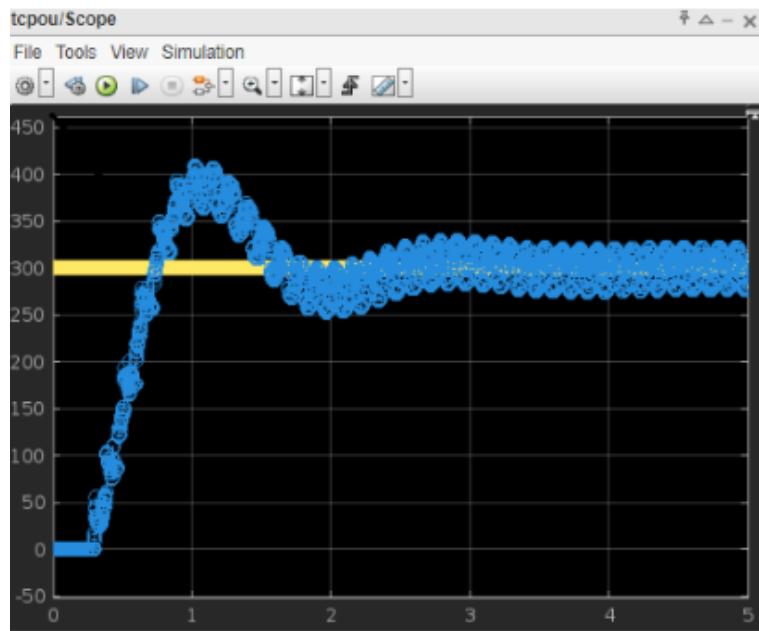


Abbildung 4.13: Simulation des als Algorithmus realisiertes Smith-Schätzer

4.1.2.4 Algorithmus von dem Smith-Schätzer in TwinCAT

Das Windows-Control bietet eine Benutzerschnittstelle, die in ihrer Struktur denjenigen von Matlab ähnelt. Auf der linken Seite befinden sich geöffnete Dateien, während am oberen Rand eine Leiste mit notwendigen Funktionen wie dem Einfügen von Dateien, dem Öffnen von Dateien oder dem Ausführen verfügbar ist. In der Mitte der Benutzerschnittstelle sind die aktuell geöffneten Dateien veranschaulicht. Die Hauptfunktion, bezeichnet als Main, befindet sich im Ordner „TCPOUS“. Jede Datei im Ordner trägt den Windows-Control-Prefix „.tcPOU“, der umsetzbare Dateien illustriert. Auch das Haupt-Programm befindet sich im Hauptordner und ist in zwei Hauptbereiche unterteilt: einen Bereich zur Deklaration von Variablen und Festwerten und einen zur Ausführung. Im ersten Bereich werden die Variablen bei den DMS-Signalen initialisiert, die für die Kraftauswertung in zwei Richtungen wesentlich sind. Darüber hinaus werden Variablen zum Registrieren von den Offset-, Signalen und Parametern zum Eichung der DMS-Signale definiert. Variablen, die mit der OPC-UA-Schnittstelle kommunizieren, erhalten zusätzliche Deklarierungen (AT%I und AT%Q). Die Deklaration in Windows-Control ist ähnlich wie in der C-Programmierung, wobei Integers (INT, DINT) und Gleitkommazahlen (REAL, LREAL) als Datengattungen verwendet werden. Arrays müssen mit ihrem ersten und letzten Index deklariert

werden, wobei die Indizes durch zwei Punkte getrennt sind. Außerdem muss angegeben werden, ob die Konstanten des Arrays Integers oder Gleitkommazahlen sind.

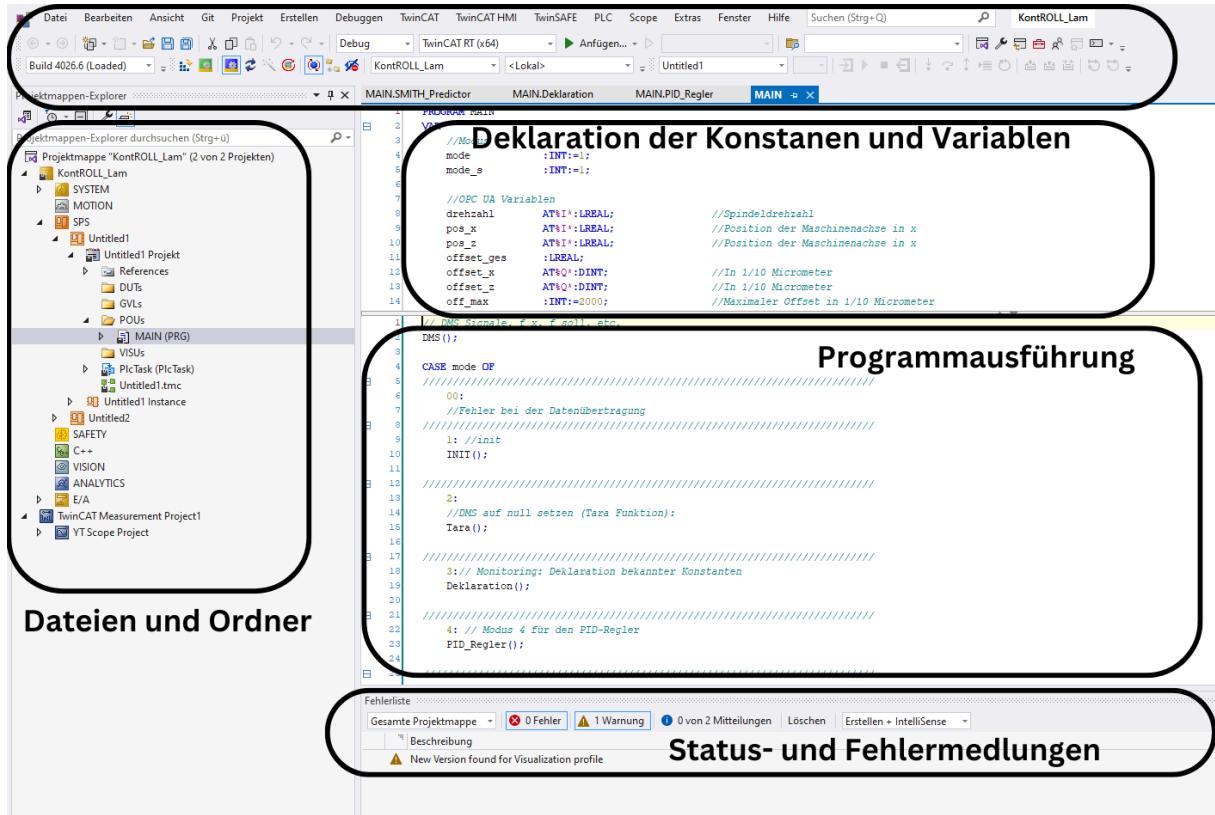


Abbildung 4.14: *Windows-Controll-Benutzerschnittstelle*

Im zweiten Bereich von dem Hauptprogramm wird zunächst die Kraft aus den DMS-Signalen berechnet. Es folgt ein Verbindungscheck, und anschließend erfolgt die Kalibrierung der Signale. Nach der Kalibrierung kann zwischen verschiedenen Modi gewechselt werden. Automatisch wird iterativ von Modus 0 zu Modus 3 gewechselt. Modus 0 dient der Initialisierung, falls ein Kommunikationsfehler aufgetreten ist oder das Walzgerät nicht verbunden und fehlerbehaftet ist. Modus 1 dient der Initialisierung der Variablen, die zur Mittelwertberechnung der DMS-Signale verwendet werden. Modus 2 bestimmt den Mittelpunkt, und Modus 3 ist für Monitoring, in welchem das Programm nach fruchtbarem Experiment, bis eine manuelle Änderung in der danach geöffneten Schaltstelle vorgenommen wird.

Während der Programmumsetzung können in der Tabelle sowohl Modi als auch bereits initialisierte Festwerte und Variablen konfiguriert werden. Ab Modus 3 können zusätzliche Modi deklariert werden, in denen Moderatoren implementiert werden können. Beispiel hierfür ist Modus 4, in dem sich der vor der Arbeit realisierte PID-Bediener befindet. In Windows-Control können rekursive Beziehung von dem Hauptprogramm durch Aktionen untergeordnet werden, wie bereits in **Absatz 4.1.2.2** erklärt. Der Algorithmus von dem PID-Bediener, dargelegt in der entsprechenden Abbildung, weist im Wesentlichen nur Unterschiede in der Syntax sowie den zusätzlichen OPC-UA-Trigger „write.Write_Enable“ auf, der das Schreiben und Überführen der Daten über den OPC-UA-Server ermöglicht.

```

MAIN.PID_Regler ➔ X | MAIN
1 // Regelung der X-Achse
2
3 //IF o_x = 0 THEN
4     //o_x := f_soll;
5 //END_IF
6
7 e_x := f_soll - f_x;                                // Berechnung des Fehlers
8 integ_x := integ_x + (e_x + p_e_x) * (delta_t/2);    // Berechnung des Integrals
9 differ_x := (e_x - p_e_x) / delta_t;                  // Berechnung der Ableitung
10 p_e_x := e_x;                                       // Speicherung des letzten Fehlers
11 o_x := ks_x * e_x + ki_x * integ_x + kd_x * differ_x; // Berechnung des PID-Ausganges
12
13 write.Write_Enable := 1;                            // Trigger zum Schreiben für OPC-UA
14
15 offset_x := LREAL_TO_DINT(o_x);                   // Schreiben des Offsets

```

Abbildung 4.15: Algorithmus des PID-Bedieners in Windows-Control

Ähnlich wie bei der C-Programmierung ist beim Schreiben einer Variable, deren Datengattung von dem übernommenen Datengattung abweicht, ein „Casting“ zu machen, wie in **Zeile 15** der Abbildung zu sehen ist. Dabei wird zuerst der ursprüngliche Datengattung der Variablen auf der rechten Seite geschrieben, gefolgt von „TO“ (bzw. „Zu“ im Deutschen) und dem Zieldatengattung, der dem Datengattung der Variable auf der linken Seite entspricht. Die Variable „**Offset_x**“ übernimmt das berechnete Regelsignal als Integer, also ohne Gleitkommazahlen, was bedeutet, dass die Regelung nur mit einer Annäherung aber sehr scharfe an das tatsächliche Regelsignal weitergeleitet wird.

```

MAIN.SMITH_Predictor  ✘ X MAIN.PID_Regler      MAIN
1 // Regelung der X-Achse
2 // Strecke (zu Löschen / Kommentieren , wenn die Differentialgleichung der Strecke als linear angenommen wird).
3
4 a_x := (c_x * (osp_x-x) - x_d * v_x) / masse;
5
6 v_x := v_x + delta_t*a_x;
7
8 x := x + delta_t*v_x;
9
10
11 // -----
12
13 // x := f_x / c_x ( Wenn die Differentialgleichung der
14 // Fsp_x[0] := c_x * x;           // Speicherung der Messwerte (IST-Kräfte)
15 //Fsp_x[0] := c_x * osp_x;       // Speicherung der Messwerte (IST-Kräfte)
16
17
18
19 // Fehlerberechnung
20
21 esp_x := f_x - Fsp_x[29];      // Prädikterter Fehler vor der Totzeit sollte Fx nach der Totzeit kompensieren
22 esp_x := f_soll - esp_x;        // Fehler bezüglich der Sollkraft
23 esp_x := esp_x - Fsp_x[0];      // Abziehung der Prädiktion
24
25
26 // Jan's Implementierung der Fehlerberechnung von Smith-Prädiktor: _____
27
28 //e_x := f_soll - f_x - Fsp_x[0]+Fsp_x[29]; // Aktueller Fehler
29
30
31
32 // PID-Regelung für den Smith-Prädiktor
33
34 integ_smith_x := integ_smith_x + (esp_x + p_esp_x) * (delta_t/2);    // Berechnung des Integrals
35 differ_smith_x := (esp_x - p_esp_x) / delta_t;                         // Berechnung der Ableitung
36 p_esp_x := esp_x;                                                       // Speicherung des letzten Fehlers
37
38 osp_x := ks_smith_x * esp_x + ki_smith_x * integ_smith_x + kd_smith_x * differ_smith_x; // PID-Regelung

```

Bereich I

Bereich II

Bereich III

Abbildung 4.16: Algorithmus des Smith-Schätzers in TwinCAT (Bereich I bis III)

In Modus 5 ist der Smith-Schätzer realisiert, der aus fünf Bereichen besteht und zwei unterschiedliche Regelungsoptionen hat. Der erste Bereich setzt die memitisierte Struktur, wie in **Absatz 4.1.2.3** erklärt. Im zweiten Bereich befindet sich die Schätzung sowie die Berechnung des Fehlers. Die durch die Strecke prädizierte Ist-Last wird im Array „**Fsp_x**“ registriert. In **Zeile 22** wird die vor 30 Schritten berechnete Ist-Kraft aus der virtuellen Strecke mit der verspäteten, tatsächlichen Ist-kraft verglichen, was den Leerlaufanteil simuliert. Das Abgleichen ist ein zentraler Bestandteil der Schätzung mittels Smith-Schätzer, da der berechnete Soll-Fehler dadurch in der nächsten Zeile verfeinert wird. Anschließend wird die aktuelle Prädiktion von dem virtuellen Prozess von den vorherigen Berechnungen abgezogen, um den vollständige Fehler zu berechnen.

Der nächste Bereich bestimmt das PID-Regelsignal ähnlich dem Code-Absatz in **Abbildung 4.11**, aber mit dem Unterschied, dass der berechnete Wert in den neuen Variablen „**osp_x**“ (Zwischenregister vom Offsets vom Smith-Schätzer) gespeichert wird. **osp_x** Wert muss limitiert werden, bevor er von dem tatsächlichen Offset übernommen wird, da ohne Limitation die Werte, insbesondere die des Integrators und der virtuellen Strecke, aufgrund der dazu addierten früheren Werte ins Unendliche steigen könnte.

```

40 // Begrenzen des Offsets
41
42 IF osp_x > 2000 THEN
43   osp_x := 2000;
44 END_IF
45 IF osp_x < -2000 THEN
46   osp_x := -2000;
47 END_IF
48
49 // Begrenzen des Integrals
50 //IF in_x/ti_x > 2000 THEN
51 //in_x := 2000*tix;
52 //END_IF
53 //IF in_x/ti_x < -2000 THEN
54 //in_x := -2000*tix;
55 //END_IF
56 //Fsp_x[0] := c_x * osp_x;
57
58
59 //Werte aktualisieren
60
61 FOR j := 39 TO 0 BY -1 DO
62   Fsp_x[j+1] := Fsp_x[j];
63 END_FOR
64
65
66
67 write.Write_Enable := 1;           // Trigger zum Schreiben für den Smith-Prädiktor
68 offset_x := LREAL_TO_DINT(osp_x); // Schreiben des Offsets

```

Abbildung 4.17: Algorithmus zum Smith-Schätzer (Bereich IV bis V).

Zur Vermeidung unsinnvoller Regelungsfehler wurde beschlossen, den Ausgang auf maximal 2000 N zu begrenzen, wie es bereits im ursprünglichen PID-Bediener gelungen ist, weil die axiale Summe der Walzkräfte 4000N nicht überschreiten darf. Ohne Limitation ist detektiert worden, dass das Software nach einigen Sekunden fehlerhaft wurde und nicht mehr ausführbar war.

Im vorherigen Codebereich von dem Smith-Schätzer erfolgt die Verschiebung der Arraywerte der präzisierten Ist-Kraft, wodurch das Leerlaufsglied implementiert wird. In der Simulation wurde die Größe des Arrays um 10 Bereichen gedehnt, um zu

überprüfen, ob der Zugriff auf spätere Schritte die Prädiktion verbessert, weil die gemessene Transferstagnation und die Sampling-periode nicht exakt und fehlerbehaftet sind. Der realisierte Smith-Schätzer bietet zwei Varianten, wie im zweiten Kommentar von dem Code im ersten Bereich der **Abbildung 4.16** präsentiert sowie im **ersten Unterabsatz** erwähnt: eine ohne imitierten Struktur und eine mit ihr. Die Prädiktion der virtuellen Struktur ist optional, jedoch ist die anschließende Bestimmung von der Schätzung von zentraler Bedeutung. Zu Beginn der Ausführung wurde die Realisierung der virtuellen Strecke vernachlässigt, um zunächst die Perspektive der wesentlichen Teile zu gewährleisten. Nach der Sicherstellung der Funktionalität wurde die virtuelle Strecke, die bereits in der Matlab-Funktion gem. **Abbildung 4.12** vorhanden war, implementiert. Bei beiden Realisierungen von dem Smith-Schätzers sowie von dem PID-Bediener wurden mehrere Messungen durchgeführt und die Parameter der verschiedenen PID-Bediener in zahlreichen Experimenten idealisiert, worauf im nächsten Schriftteil näher eingegangen wird.

4.1.3 Registrierung von Daten

Bei fruchtbarem Experiment können Variablen in Oszilloskope angemeldet werden, welche zeitlich dargelegt werden. Bei jedem Experiment, insbesondere bei der Simulation der Impaktreaktion, sollte die Kraft in OPC-UA-Client neu kalibriert werden, was gewährleistet, dass die Ist-Kraft im Verhältnis zur Soll-Kraft korrekt angezeigt wird. Die Kalibrierung erfolgt durch wiederholtes Wegfahren des Geräts um die maximal zulässige Kraft von -2000 N bis das Apparatus das Bautelement leicht berührt und dann mit der Vorgabe darauf drückt. Anschließend kann das Scope-Tool von der linken Seite aufgerufen und angezeigt werden. Die Maschine ist mit einer programmierbaren Steuerung (siehe **Abbildung 4.5** in **Absatz 4.1.2.1**) ausgestattet, mit der sowohl das Gerät als auch die Drehmaschine gesteuert werden können. **Abbildung 2.8** enthüllt ein Interaktionsdiagramm des vollständigen Verfahrens.

Die Signale im Bereich „Machine tool“ (siehe **Abbildung 2.8**) werden mithilfe OPC-UA zwischen dem Client und Server kommunizieren und können auch durch die Steuerung konfiguriert werden. In der Steuerung werden Programme in CNC geschrieben, wobei eine spezifische Struktur eingehalten wird. Allgemein strukturierte Befehle können durch CAM-Software generiert werden. In einer HiWi-Job in IFW wurde der Autor beauftragt, einen Algorithmus in Matlab zu entwickeln,

der die CAM-Struktur in eine für die verwendete Siemens-Steuerung 840 DSL verständliche CN umsetzt, sodass das Programm in der Steuerung laufen kann.

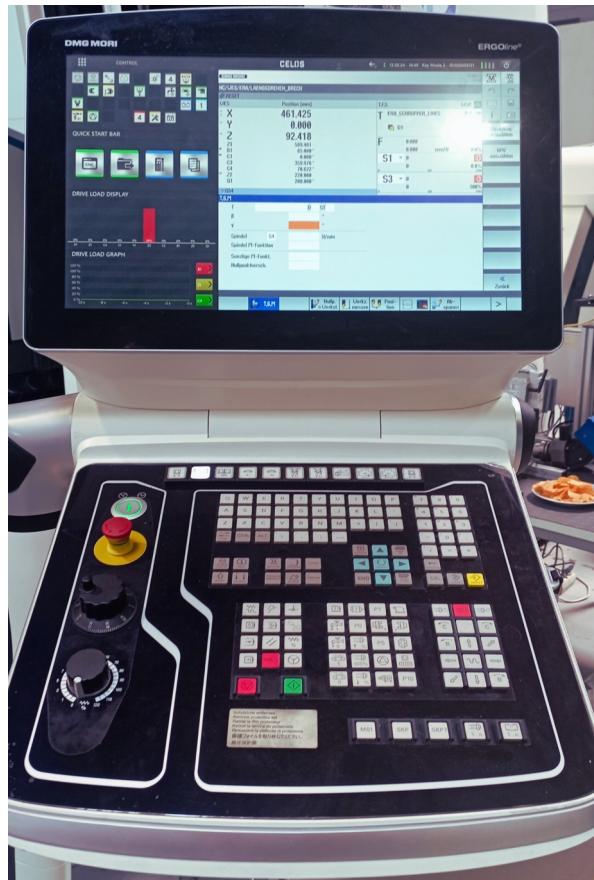


Bild 4.3: : Siemens-Steuerung 840 DSL

Der Programmcode zur Simulation der Impaktreaktion wird in der Steuerung der Maschine, wie in **Bild 4.3** exemplifiziert, arbeiten. Das Display ist ähnlich wie bei Smartphones berührungsempfindlich und kann mit den Fingern bedient werden. Zusätzlich zur Touch-Funktionalität kann das Programm über Tasten gesteuert werden. Bspw. kann die Maschine links mit dem roten Knopf ausgeschaltet werden. Die drehbaren Knöpfe dahinter regulieren die Drehzahl des Bautstoffes. Die Position des Gerätes wird über den Halter festgelegt, der mit den Pfeiltasten auf der rechten Seite der Tastatur gesteuert wird. Der rote Knopf auf der Tastatur stoppt das

Programm vorläufig, während der grüne Knopf es startet. Das Experiment von dem Programm setzt mehreren Schritten voraus, die auf dem Bildschirm präsentiert werden und vor dem Start abgeschlossen sein müssen. Vor dem Starten sollten zudem die Türen durch das Betätigen der beiden weißen Knöpfe am oberen Rand der Tastatur geschlossen werden. Die Knöpfe öffnen die Türen auch. Alternativ lassen sich die Türen durch Drücken vom unter der Steuerung gelagerte Pedal zu machen. Solange das Programm aktiv ist, werden die Signale als Kurven auf der unteren linken Seite von dem Bildschirm betitelt und transient veranschaulicht. Ein Exemplar für die gezielten Struktur des CNC ist in folgender Kartierung aufgezeigt:

/MATLAB Drive/Referenz_01_Schlachten_eingang.txt

```
1 Informationsliste erzeugt von Berlin
2 Datum 10-Apr-2024 13:53:48
3 Aktuelles aktives Teil \\ifw.uni-hannover.de\daten\B4-Daten\01-
4 Knotenname 15-0017
5 %
6 N0010 G94 G90 G20
7 N0020 G50 X0.0 Z0.0
8 :0030 T02 H00 M06
9 N0040 G97 S2518 M03
10 N0050 G94 G00 X17.5203 Z-16.912
11 N0060 Z.8784
12 N0070 X15.8457
13 N0080 X15.8 Z.8
14 N0090 G95 G02 X15. Z0.0 I0.0 K-.8 F.1588
15 N0100 G92 S0
16 N0110 G96 S250 M03
17 N0120 G01 Z-10.4 F.1508
18 N0130 G02 X17.3048 Z-20.7964 I24.6 K0.0
19 N0140 G01 X21.531 Z-29.8595 F.174
20 N0150 G02 X32.6 Z-36.9112 I11.069 K5.1616 F.2
21 N0160 G01 X36.6
22 N0170 G03 X45. Z-45.3112 I0.0 K-8.4
23 N0180 G01 Z-46.9112
```

Abbildung 4.18: Ziel-Struktur des CNC-Codes für die Siemens-Steuerung

Das Programm wird ähnlich wie in „Assembler“ umgesetzt. Mithilfe ähnlicher CNC-Abläufe entwickelte der W.m einen Algorithmus, der periodisch einen Dirac-Sprung in den Prozess einspeist, um die Regelung mittels Impaktreaktion überprüfen zu können. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht eine Simulation zur Überprüfung der PID-Bediener-Parameter auf ihre Idealisierung.

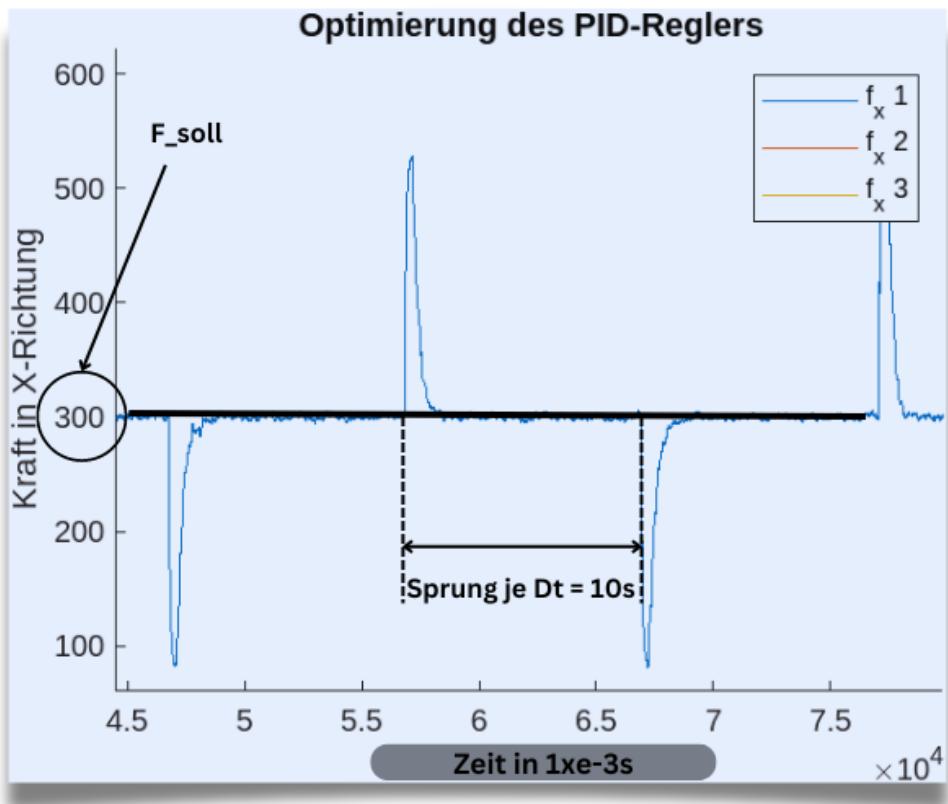


Abbildung 4.19: Impakte je 10ms des bereits vorhandenen PID-Bediener

Ohne Regelung Prozess wegen Unrundheiten und Untauglichkeiten resultiert die **Abbildung 3.1**. Daher war die Durchführung einer Impaktreaktion-Simulation zur Ermittlung der idealen PID-Bediener-Parameter essenziell. **Abbildung 4.19** enthüllt das Endprodukt der Simulation. Zunächst wurden die Verläufe in Oszilloskop angezeigt. Anschließend, nach etwa einer Minute Simulationszeit werden die Daten in CSV-Format registriert. **Abbildung 4.20** enthüllt einen Ausschnitt der aufgenommenen Messdaten von dem PID-Bediener während der Optimierung der proportionalen Verstärkung:

Kontrolle der Transferstagnation

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1	Name	YT Scope Project																
2	File	C:\Users\localadmin\Desktop\Lamjahd\Messungen\PID_nur_P_2.csv																
3	Starttime of expo	1.33853E+17 Freitag, 12. Juli 12:52:10.217																
4	Endtime of expo	1.33853E+17 Freitag, 12. Juli 12:56:16.657																
5																		
6																		
7	Name	dms_1	Name	dms_2	Name	dms_mean_1	Name	dms_mean_2	Name	mode	Name	f_z	Name	f_x	Name	f_soil	Name	f_pos
8	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	10	SampleTime/ms	
9	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	SymbolBased	TRUE	T	
10	SymbolName	MAIN.dms_1	SymbolName	MAIN.dms_2	SymbolName	MAIN.dms_mean	SymbolName	MAIN.dms_mean	SymbolName	MAIN.mode	SymbolName	MAIN.f_z	SymbolName	MAIN.f_x	SymbolName	MAIN.f_soil	SymbolName	
11	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	10.172.112.124.	NetID	
12	Port	851	Port	851	Port	851	Port	851	Port	851	Port	851	Port	851	Port	851	Port	
13																		
14	0	-12547	0	-5405	0	-12607.68	0	-538.841.943	0	5	0	-20.543.817.999	0	30.151.752.499	0	300	0 30.22	
15	0	-12635	10	-5362	10	-12608.68	10	-538.796.045	10	5	10	-27.051.211.799	10	30.062.792.499	10	300	10 30.18	
16	0	-12581	20	-5365	20	-12608.68	20	-538.841.043	20	5	20	-23.234.817.999	20	30.129.572.499	20	300	20 30.21	
17	0	-12567	30	-5420	30	-12605.391	30	-538.910.059	30	5	30	-20.732.317.999	30	30.042.352.499	30	300	30 30.11	
18	0	-12529	40	-5381	40	-12603.88	40	-538.89	40	5	40	-20.775.717.999	40	30.298.322.499	40	300	40 30.38	
19	0	-12599	50	-5397	50	-12603.88	50	-538.89	50	5	50	-21.542.817.999	50	30.147.312.499	50	300	50 30.22	
20	0	-12639	60	-5338	60	-12605.44	60	-538.64	60	5	60	-28.552.217.999	60	30.148.082.499	60	300	60 30.28	
21	0	-12683	70	-5389	70	-12608	70	-538.726.074	70	5	70	-27.003.417.999	70	28.888.032.499	70	300	70 3.000	
22	0	-12699	80	-5391	80	-12606.68	80	-538.841.943	80	5	80	-27.192.021.799	80	28.884.212.499	80	300	80 299.8	
23	0	-12604	90	-5308	90	-12606.7	90	-538.799.854	90	5	90	-28.250.217.999	90	28.958.002.499	90	300	90 30.10	
24	0	-12686	100	-5388	100	-12607.68	100	-5387.82	100	5	100	-2.824.301.799	100	28.955.322.499	100	300	100 30.08	
25	0	-12638	110	-5388	110	-12608.68	110	-538.753.955	110	5	110	-25.843.017.999	110	28.960.882.499	110	300	110 30.07	
26	0	-12617	120	-5417	120	-12609.3	120	-538.696.143	120	5	120	-23.313.817.999	120	28.914.852.499	120	300	120 3.00	
27	0	-12630	130	-5412	130	-12608.1787	130	-5387.49	130	5	130	-19.354.817.999	130	30.173.442.499	130	300	130 30.23	
28	0	-12688	140	-5415	140	-12607.68	140	-538.801.853	140	5	140	-21.914.317.999	140	30.007.722.499	140	300	140 30.08	
29	0	-12629	150	-5308	150	-12609.68	150	-538.848.047	150	5	150	-2.551.071.799	150	28.993.012.499	150	300	150 30.10	
30	0	-12557	160	-5413	160	-12607.617	160	-538.892.041	160	5	160	-20.812.017.999	160	3.009.525.249.8	160	300	160 301.6	

Abbildung 4.20: Export-CSV-Dateien von Windows-Control

Die CSVs enthalten alle Informationen zu jeder Sampling-Zeit, einschließlich aller in der Main-Funktion deklarierten Veränderlichen und Fixwerten. Obwohl CSV-Dateien für Datenbankprogramme gedacht sind, bietet Matlab auch integrierte Funktionen, um CSV-Dateien sowohl mit als auch ohne Datenbanken zu importieren, zu verarbeiten und darzulegen. Beispiel für solche Funktionen ist in der nachfolgend dargestellt:

```
/MATLAB Drive/Messungen/messungen.m
1 close all;
2
3 figure;
4 hold on;
5
6 % Define line thickness
7 lineThickness = 1.4;
8
9 %% CSV 1
10 table = readtable('PID/PID_nur_P_opt.csv');
11 data = table(2815:end, :);
12 fx = data.f_x;
13 fx = fx + 84.383;
14 x = data.Name;
15 x = x + 920;
16 plot(x, fx, 'LineWidth', lineThickness, 'DisplayName', 'Fx: Ks= 0.55, Ki=Kd=0');
```

Abbildung 4.21: Erarbeitung der TwinCAT-CSV-Dateien in MATLAB

Zunächst muss die Datei in das Verzeichnis hochgeladen werden, in dem die Matlab-Funktion ausgeführt wird. Die Datei wird dann als Tabelle in der Variablen Table durch den Befehl readtable registriert. In **Zeile 11** wird angegeben, ab welcher Zeile die Daten modifiziert werden sollen, da die ersten Werte häufig NaN (im Deutschen „NULL“) sind oder nutzlos erscheinen, weil sie den Beginn der Simulation repräsentieren. Der Befehl data gefolgt von einem Punkt ermöglicht den Zugriff auf die Variablen der Tabelle, ähnlich wie bei der Zugriff auf Mitglieder einer Struktur in der C-Sprache. Falls die Messdaten nicht korrekt veranschaulicht werden, kann dies durch die in **Zeile 13** vorgenommenen Anpassungen wegschafft werden. Nach Abwicklung wird im rechten Bereich einer dem ursprünglichen Bild vom TwinCAT entsprechenden Abbildung modelliert. Die Unterschiede bestehen nur in den Konfigurationen und Verschiebungen, die im Matlab-Skript vorgenommen wurden. Die **Abbildung 4.19** expliziert, dass die Darstellung beliebig vergrößert oder verkleinert werden kann, um die gewünschte Impaktreaktion wie in der **Abbildung 4.22** zu bekommen.

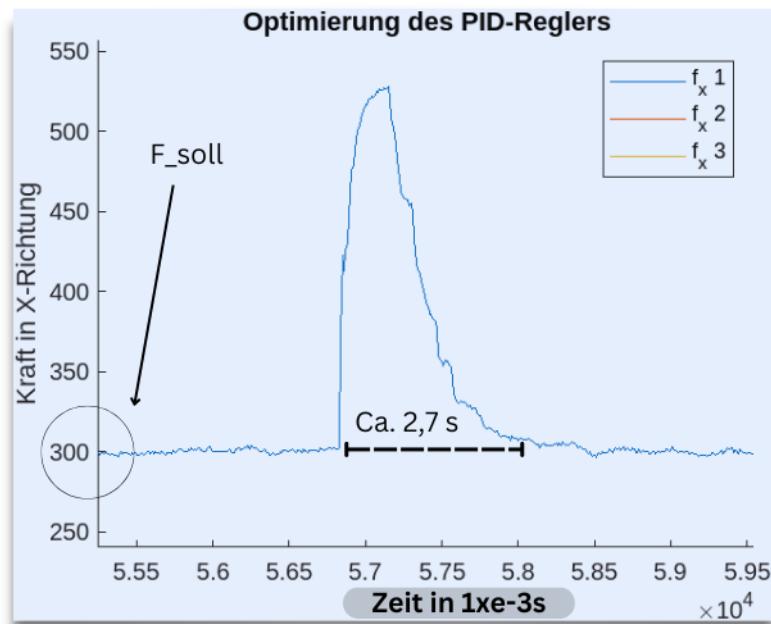


Abbildung 4.22: Zoomen und Beschriften von dem bedeutsamen Anteil bei der Impulsantwort von dem PID-Bediener

Abbildung 2.7 veranschaulicht das Verhalten des geregelten (grüner Strömung) und des ungeregelten (roter Strömung) Prozess bei 300 N Orientierungsgröße. Bei einem Durchmesserimpakt von weniger als 0,05 mm weist der ungeregelte Prozess eine erhebliche Abweichung von der Orientierungsgröße auf, im Kontrast zum geregelten Prozess. Letzterer soll in den Rahmen von Transferstagnation sowie die Wechselpendelungen dringend idealisiert werden.

4.1.4 Idealisierung der Regelparameter von dem PID-Bediener und dem Smith-Schätzer mit Impaktreaktion durch Maschine

Ohne klare Idealisierungstrategien der Regelparameter von dem PID-Bediener und von dem PID-Bediner im Smith-Schätzer wäre es erhaben, ideale Parameter einzurichten. Zwar bietet sich die Simulationssoftware Matlab-Simulink an, um die Parameter mittels dem verwendeten „2DOF“-PID-Moderator ausgehend von der idealen Charisma des Ablauf zu tunen. Allerdings kann das tatsächliche Verhalten trotz vorhandener Messwerte wie Federsteifigkeit, approximierte Masse von dem Federpaket und oszillierende Beeinträchtigung nicht genau genug nachgebildet werden. Im Faden 2.6 von der „Literaturrecherche“ wurden bereits mehrere Verfahren vorgestellt, die messtechnisch zur Optimierung der Fixwerte ausgenutzt werden können. Dazu gehören unter anderem die Methode von Ziegler-Nichols und Methode von Chien-Hrones, die sich in der Literatur als nutzbar erwiesen haben. Zur Anwendung von den Verfahren wurde bereits zu Beginn ein Code in Python geschrieben und anschließend in TwinCAT umgesetzt. Die Funktion „*OptimalPID*“ in **Abbildung 4.23** ermöglicht die Auswahl zwischen zwei Idealisierungstrategien von dem PID-Bediener: Hornes-Chien-Reswick und Ziegler-Nichols. Bei der Auswahl von Hornes-Chien-Reswick kann der Benutzer zusätzlich zwischen einer aperiodischen oder einer normalen Regelung wählen sowie zwischen Führungs- und Störungsregelung differenzieren. kollektiv bietet die Funktion durch die Implementierung von „IF-Anweisungen“ fünf verschiedene Idealisierungstrategien, die sowohl vom einzelnen PID-Bediener als auch in das Experiment mit dem Smith-Schätzer anwendbar sind. Wegen der in den **Absätzen 4.1.2.2** und **4.1.2.4** beschriebenen Hindernisse war das ursprünglich geplante Experiment aber nicht durchführbar, weshalb stattdessen ein empirischer Ansatz zur Optimierung der Fixpunkte gewählt wurde, bei dem die Fixpunkte nacheinander optimiert und anschließend fixiert, bevor der nächste angepasst wird.

```

# functions > OptimalPID
1363 FUNCTION OptimalPID
1364 VAR_INPUT
1365   op_aperiodic :BOOL;           // Aperiodisch oder 20% Überschwingen
1366   zn :ARRAY[0..2] OF REAL;     // zn = [Totzeit, Verstärkung der Strecke, Zeitkonstante der Strecke]
1367   chr :ARRAY[0..2] OF REAL;    // chr = [ks, tu, tg]
1368 END_VAR
1369 VAR
1370   kr :REAL;
1371   tn :REAL;
1372   tv :REAL;
1373 END_VAR
1374 IF mod = 0 THEN // ZN Parameter
1375   kr := (1.2 * zn[2])/(zn[1] * zn[0]);
1376   tn := 2 * zn[0];
1377   tv := 0.5 * zn[0];
1378 ELSEIF mod = 1 THEN // Chien, Hrones und Reswick Störungsregelung
1379   IF op_aperiodic = TRUE THEN
1380     kr := 0.96 * (chr[2]/chr[1]*chr[0]);
1381     tn := 2.40 * chr[1];
1382     tv := 0.2 * chr[1];
1383   ELSE
1384     kr := 1.2 * (chr[2]/chr[1]*chr[0]);
1385     tn := 2 * chr[1];
1386     tv := 0.2 * chr[1];
1387   END_IF;
1388 ELSE // CHR Führungsregelung
1389   IF op_aperiodic = TRUE THEN
1390     kr := 0.6 * (chr[2]/chr[1]*chr[0]);
1391     tn := 1 * chr[1];
1392     tv := 0.5 * chr[1];
1393   ELSE
1394     kr := 0.96 * (chr[2]/chr[1]*chr[0]);
1395     tn := 1.38 * chr[1];
1396     tv := 0.47 * chr[1];
1397   END_IF;
1398 END_IF;
1399 OptimalPID := [kr, tn, tv];
1400 END_FUNCTION

```

Ln 1401, Col 1 Spaces: 4 UTF-8 CRLF Structured Text

Abbildung 4.23: Perspektive zur Bestimmung der idealen PID-Parameter nach Horneres-Chin sowie Ziegler-Nichols für Führungs- und Beeinträchtigungssregelung

Das Verfahren ist ähnlich wie newtonsches Iterationsverfahren für die Approximation von Nullstellen von Gleichungen höheres Grades, bei dem schrittweise Annäherungen vorgenommen werden, bis die Regelung stabilisiert ist. In der Simulation wurden die Fixpunkte zweck Optimierung je 10s angepasst..

Der Idealisierungsprozess fängt den proportional Block zu optimieren, da der Einfluss des D-Stück bei winzigen Konfigurationen oft zu großen Fehler führen und deswegen nicht leicht isolierbar sind. Der I-Glied wurde anschließend optimiert, gefolgt vom D-Stück. **Abbildung 4.25** visualisiert den Verlauf bei der drei Idealisierungsansätze von dem PID-Bediener. Die blaue Kurve liegt den Verlauf des optimalen Proportionalabschnitts, der nach seiner Optimierung fixiert wurde. Anschließend wurde nach dem optimalen Integrator gesucht, wodurch der PI-Bediener entstand. Die braune Farbe hebt den Einfluss von zufälligem Integratorwert, wodurch Wechselpendelungen verursacht sind. Der gelbe Verlauf repräsentiert den idealen PID-Bediener, bei dem alle Parameter fruchtbar abgestimmt sind. Die nächste

Abbildung 4.24 visualisiert die Impaktreaktion von dem PID-Bediener mit den ermittelten idealen Parametern.

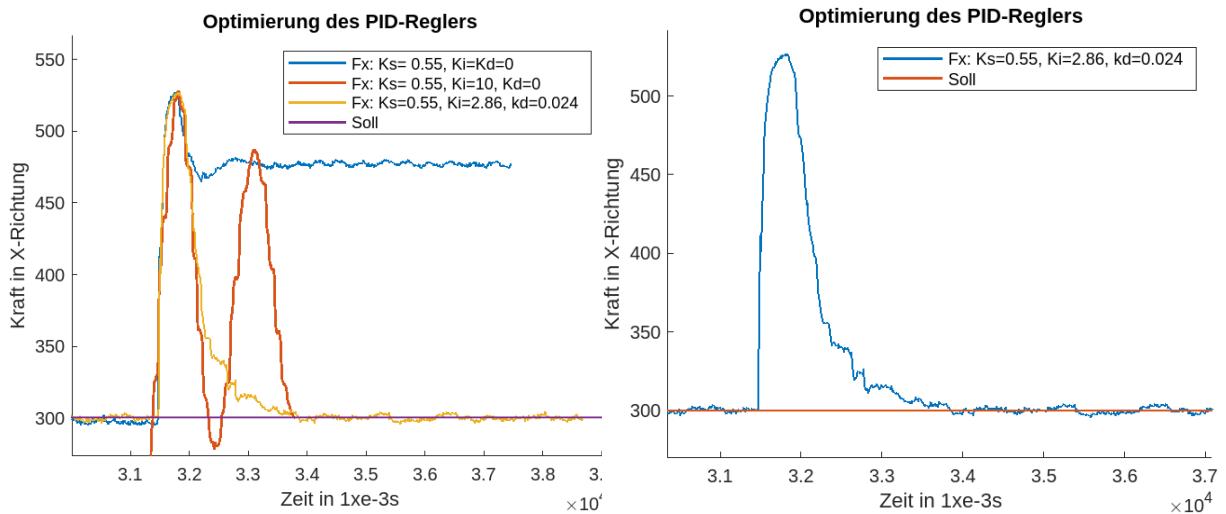


Abbildung 4.25: Empirische Idealisierung von dem PID-Bedieners

Abbildung 4.24: Impaktantwort von dem PID-Bedieners mit idealen Parameter

Die empirisch ermittelten PID-Parameter vom einzelnen PID-Bediener sind in **Tabelle 2** dargelegt, während die auf die gleiche Weise bestimmten idealen PID-Parameter von den Smith-Schätzer in **Tabelle 3** zu finden sind.

Tabelle 2: Optimale PID-Parameter

Formelzeichen	Beschreibung	Wert
Ks	Statische Verstärkung des P-Anteils	0.55
Ki	Verstärkung des I-Anteils	2.86
Kd	Verstärkung des D-Anteils	0.024

Tabelle 3: Optimale PID-Parameter des Smith-Schätzers

Formelzeichen	Beschreibung	Wert
Ks	Statische Verstärkung des P-Anteils	0.14
Ki	Verstärkung des I-Anteils	3.9

Kd	Verstärkung des D-Anteils	0.005
----	---------------------------	-------

Die Abweichung der idealen Parameter zwischen dem einzelnen PID-Bediener und dem Smith-Schätzer lässt sich auf zwei Hauptgründe zurückführen. Erstens spielt die spezielle Behandlung des Fehlers durch den Smith-Schätzer eine wesentliche Rolle. Zweitens löst sich die Prädiktion der virtuellen Strecke aus. Dabei ist der Einfluss vom ersten Parameter entscheidend, da die Parameter von dem Smith-Schätzer sowohl mit als auch ohne die Einbeziehung der virtuellen Strecke – wie im vorletzten **Unterabsatz** von dem **Absatzes 4.1.2.4** erklärt – tauglich bleiben.

Es existieren mehrere Metriken zur Begutachtung von dem Impaktreaktion, darunter die Überschwingzeit und die Regelungszeit, welche bereits in **Faden 2.6** von „**Literaturrecherche**“ als entscheidende Merkmale bei der Idealisierung von dem PID-Bediener behandelt wurden. Die Überschwingzeit definiert, wie stark der Istwert über den Sollwert hinausschießt, bevor er sich stabilisiert, wobei geringe Übersteuerungen angestrebt werden. Die Regelungszeit dagegen bezieht sich auf den Zeitraum, in dem der Istwert innerhalb eines Toleranzbereichs dem Sollwert folgt und nur geringfügig auf Beeinträchtigung reagiert. Die Leistungstauglichkeit eines Regelungssystems wird üblicherweise anhand den beiden Metriken begutachtet.

Während der Idealisierung wurde jedoch auch eine sehr taugliche Metrik umgesetzt, die nicht nur einen einzelnen Punkt, sondern die Bedeutung mehrerer Punkte berücksichtigt. Der erste Punkt ist die Abklingphase, die der zuvor erwähnten Regelzeit ähnelt. Zusätzlich wurden drei horizontale Kennlinien adaptiert, die jeweils um +15 N von der Orientierungsgröße entfernt sind, wie in den **Abbildung 4.26**, **Abbildung 4.27** sowie **Abbildung 4.28** zu sehen ist. Der Schnittpunkt der ersten horizontale Kennlinie (AP1) dient zur Begutachtung der Robustheit und Flexibilität der Regelung. Die darüber liegenden horizontalen Kennlinien legen strengere Anforderungen an das Regelverhalten fest und kennzeichnen, wie der Regelkreis auf größere Änderungen reagieren.

Durch die Schnittpunkte kann das Verhalten des Regelablaufs sowie die Leistungstauglichkeit der Regelung in unterschiedlichen Situationen und unter verschiedenen Lastbedingungen weitreichend begutachtet werden. **Abbildung 4.26** expioniert die Impaktreaktion von dem PID-Bediener sowie die vier horizontalen Kennlinien. Ähnliche Darlegungen finden sich in **Abbildung 4.27** und **Abbildung 4.28**, wobei der Index I den Smith-Schätzer ohne Inklusion der Schätzung des memetisierten Modells und II das Kontrast markiert.

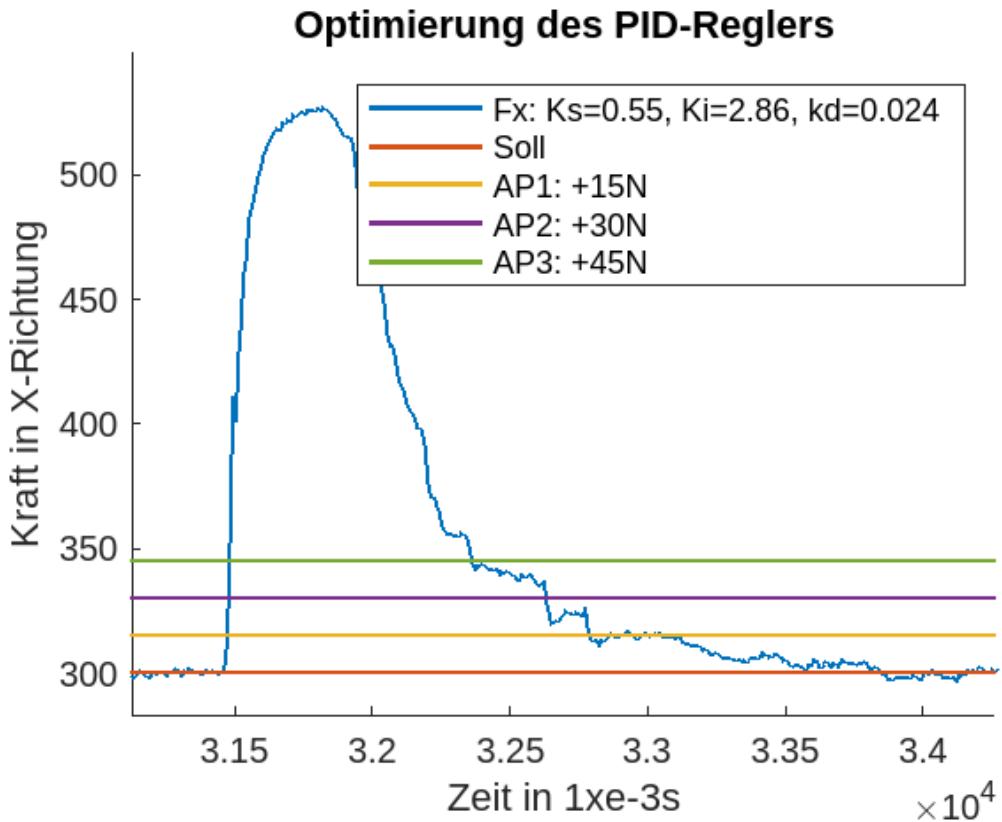


Abbildung 4.26: Begutachtung von dem PID-Bediener mit vier horizontalen Kennlinien

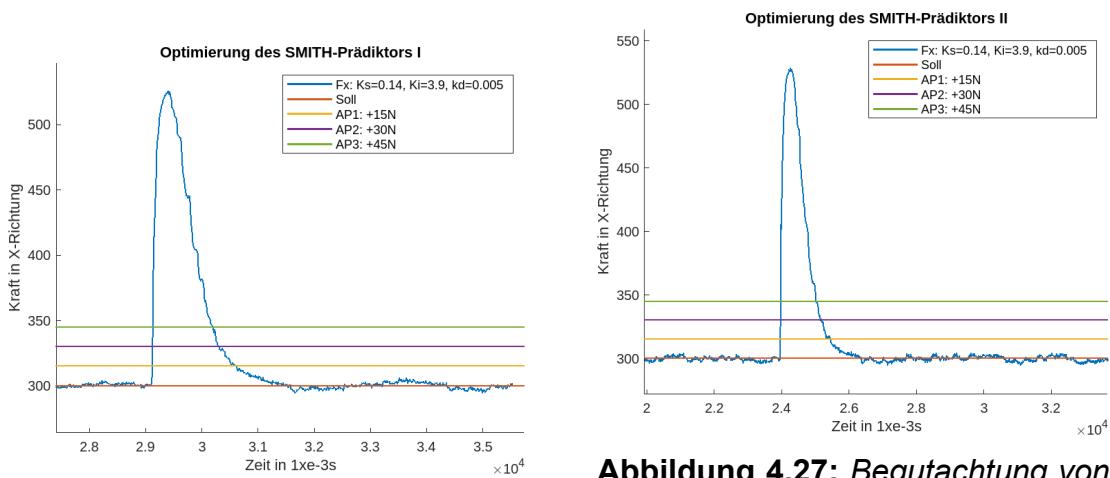


Abbildung 4.28: Begutachtung von dem Smith-Schätzer (II) mit vier Smith-Schätzer (I) mit vier horizontalen Kennlinien

Die Schnittpunkte mit den horizontalen Kennlinien für die drei Regelungsarten sind in **Tabelle 4** dargelegt. Die Begutachtung der Leistung mit der Metrik ist durch die Gewichtung der Schnittpunkte anhand ihrer Bedeutung wie in **Gleichung 3.79** zu machen.

$$\text{Metrik}_{\text{sprungantwort}}(\text{Regler}) = w_1 \cdot dt_1 + w_2 \cdot dt_{15} + w_3 \cdot dt_{30} + w_4 \cdot dt_{45} \quad (3.7) \quad (9)$$

Die Gewichtung w_i wird als prozentualer Abfall definiert, und die zugehörige Spanne dt_i entspricht der Periode von der Sprung des Regelablaufs bis zum jeweiligen Schnittpunkt. Die Schnittpunkte können in Matlab ermittelt werden, indem der Maus über den entsprechenden Punkt bewegt wird. **Gleichung 3.79** ermöglicht eine präzise Begutachtung der Regelungsleistung anhand gewisser Abfallkriterien, die für die Begutachtung und Idealisierung von dem Prozess von zentraler Relevanz sind. Die Schnittpunkte sowie der zugehörige prozentuale Abfall sind in der nachfolgenden Tabelle eingetragen:

Tabelle 4: Schnittpunkte mit den vier horizontalen Kennlinien

Bediener	Kennlinie	Abfallperiode	Abfallsrate
PID-Bediener	AP0	2.37s	100%
	AP1	1.28s	93.33%
	AP2	1.17s	86.66%
	AP3	0.91s	80%
Smith-Schätzer (I)	AP0	2.49s	100%
	AP1	1.51s	93.33%
	AP2	1.2s	86.66%
	AP3	1.09s	80%
Smith-Schätzer (II)	AP0	2.38s	100%
	AP1	1.46s	93.33%
	AP2	1.22s	86.66%
	AP3	1.1s	80%

Die Metrik sollte zu besseren Begutachtung relativiert sein. Weshalb die Abfallperiode prozentual ausgedrückt werden. Zum Experiment werden die Abfallperioden von einander durch den Mittelwert der totalen Abfallphase (0ter horizontale Kennlinie) der jeweiligen Bediener abhängig gemacht:

$$\bar{dt} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=0}^2 dt_{0i} = 2.413 \text{ s} \quad (3.8)$$

Jedoch ist zu bedenken, dass der prozentuale Abfall der Kurve in Erwägung der Kraft positiv zur Leistungsbegutachtung beträgt, während der Abstieg in Relation zum Mittelpunkt in **Gleichung 3.80** das Kontrast ausprägt, welches daraus resultiert, dass eine prägnantere Abfallperiode eine bessere Leistung signalisiert. Daher muss die prozentuale Abfallperiode vor der Eintragung umgepolt bzw. von der vollen Abfallperiode (100%) subtrahiert werden. Daraus ergibt sich die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 5: Prozentuale Abfallsspanne der Bediener nach der 4-Punkte-Metrik

Bediener	Arbeitspunkte	Prozentuale Abfallsspanne
PID-Bediener	AP0	1.79%
	AP1	46.96%
	AP2	51.52%
	AP3	62.63%
Smith-Schätzer (I)	AP0	0%
	AP1	37.43%
	AP2	50.27%
	AP3	54.83%
Smith-Schätzer (II)	AP0	7.26%
	AP1	39.5%
	AP2	49.45%
	AP3	54.42%

Somit ergibt sich für den Leistungsindex nach **Gleichung 3.79**:

Tabelle 6: Leistungsindex der Bediener

Bediener	Leistungsindex M
PID-Bediener	1.40369
Smith-Schätzer (I)	1.22361
Smith-Schätzer (II)	1.30514

In **Tabelle 6** ist zu erkennen, dass der PID-Bediener in Anbetracht der **relativen Metrik** der vier Punkte dominierend ist, gefolgt von dem Smith-Schätzer (II) mit der mit der kompletten memetierten Struktur, während der Smith-Schätzer (I) ohne imitierten Strecke zuletzt kommt. Es war zu erwarten, dass der PID-Bediener wegen der zusätzlichen virtuellen Gebilde den Smith-Schätzer überlegen sein würde. Diese Annahme ist aber nicht vollständig belastbar, da der Smith-Schätzer (II) wegen zusätzlichen virtuellen Gebilde dichtere Kreis verfügt als der Smith-Schätzer (I). Die Unterschiede sind aber minimal; der PID-Bediener übertrifft den Smith-Schätzer (II) in der Abklingphase bloß um 10 ms, was nur einem Iterationsschritt entspricht und schätzungsweise von der Schätzung oder der zusätzlichen Deduktion verwendet wurde.

Der Abgleich ist primär der Veranschaulichung gedacht, dass die Parameter von dem PID-Bediener gut idealisiert sind. Das eigentliche Ziel der Regelung liegt aber mehr in der Kontrolle der Transferstagnation, die durch geschickte Vorhersage der Ist-Kraft möglich ist, was mit einer Impaktantwort-Simulation nicht komplett erreichbar ist, weil es sich bei einem Impakt um ein augenblickliches Ereignis handelt, das nur schwer prognostizierbar ist, wenn die Trajektorie nicht bekannt ist. Die memetisierte Struktur von dem Smith-Schätzer und die prädiktive Deduktion sollen ein Muster imitieren, das sich aus einer Abfolge von Ereignissen ergibt. Eine solche Abfolge sollte mindestens zwei Iterationen oder 20 ms dauern, um einen solchen geschätzten Muster zu bilden. Daher kann die Impaktantwort-Simulation keine vollständige Auskunft über die Unterdrückung der Stagnation geben, sondern lediglich die Interaktivitätstauglichkeit von dem Smith-Schätzer sowie von dem verwendeten PID-Bedieners sicherstellen.

4.1.5 Idealisierung der Schätzung von dem Smith-Schätzer

Die bisher verwendete Dämpfungsstiefe wurde nur geschätzt, da es keine direktes Verfahren gab, letzteres genau zu messen. Zudem wurde das Gerät lediglich gewogen, wobei eine Masse von 3 kg ermittelt wurde. In der Realität veranlasst die Masse jedoch keinen direkten Einfluss auf den Kaltwalzablauf, da das Gerät an der Halterung befestigt ist. Seine potenzielle Energie wird deswegen nicht auf die Rolle transportiert, weshalb die letztere vernachlässigt werden kann. Allerdings werden dadurch die Effekte, die durch die Beschleunigung entstehen, vernachlässigt. Die Beschleunigung steht im Zusammenhang mit der Pulserhaltung, die durch das Stoßen durch die Rollreibung das Walzenpaar und die Federung initiiert wird. Wie im **Faden 2.7 von Literaturrecherche** erwähnt, schwingt das Walzenpaar durch die Federung hin und her, was direkten Einfluss auf dem Prozess ausübt. Es war deswegen notwendig, ein Verfahren zu finden, das solche Effekte berücksichtigt.

Bevor Messungen gemacht werden, sollte die Differentialgleichung richtig ermittelt, da in **Schriftteil 4.1.1** und **Absatz 4.1.2.3** Zur Klarheit eine Differentialgleichung zweiter Ordnung betrachtet wurde. Eine richtige Abstraktion von dem Prozess ist in der nächsten Abbildung:

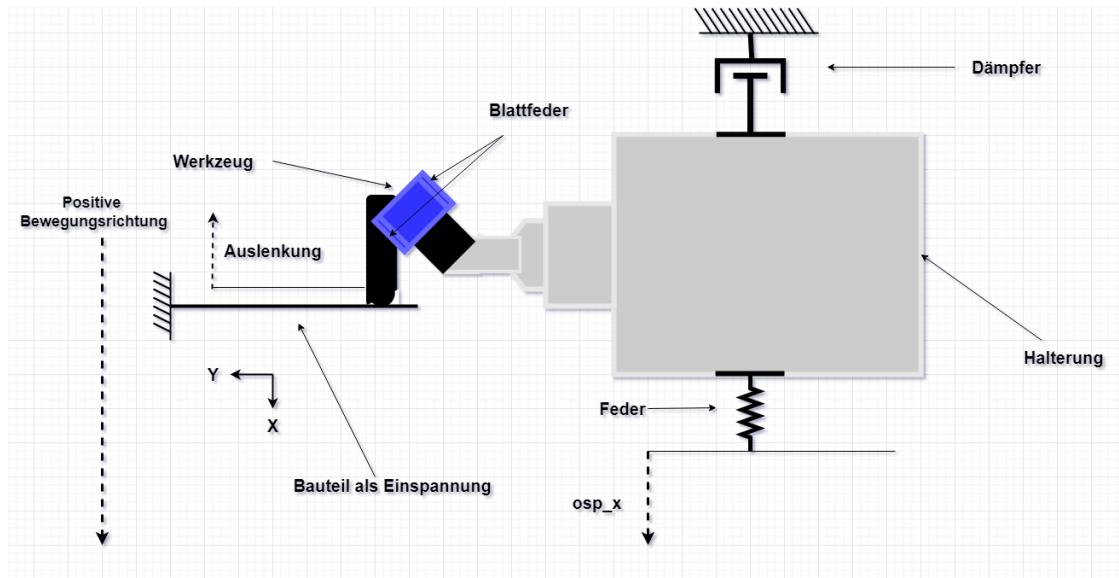


Abbildung 4.29: Abstraktion von dem Prozess

Die Strecke des Apparatus besteht aus einem Hauptteil und einem Nebenteil. Das Hauptteil ist durch die Federung, den Kontakt mit dem Baustein usw. illustriert. Der Nebenteil besteht aus der Halterung (rechts), die das Gerät beidseitig bewegt. Das Gebilde kann entweder nur den Hauptteil oder auch den Nebenteil enthalten. Das Gebilde, das nur den Hauptteil enthält, wird wie in **Schriftteil 4.1.4** erklärt als Smith I bezeichnet, während das Gebilde, welches das gänzliche Gebilde berücksichtigt, mit römisch II indexiert wird.

Masse und Dämpfung haben, auch wenn nur in winzigem Maße, Einfluss auf die Kinematik, weshalb sie richtig ermittelt werden sollten. Letztere können sowohl von der Halterung als auch vom Gerät verursacht werden. Um die Differentialgleichung richtig zu ermitteln, werden diese Effekte auf die Halterung zurückgeführt, wie in **Abbildung 4.29** veranschaulicht. Der Ausschlag ergibt sich somit aus dem Ausschlag des Apparatus und der Bewegung der Halterung. Die Bewegung der Halterung induziert jedoch in entgegengesetzter Richtung zur positiven Richtung, da letztere im Kontrast zum Instrument eine geometrische Zwangsbedingung hat, die die Strömung entlang der X-Achse limitiert. Dadurch wird die Bewegung des Geräts von der Gesamtbewegung in der positiven Richtung subtrahiert. Der Dämpfer an der Halterung kann als eine Reihen/Parallelschaltung seiner Eigengen Federsteifigkeit als auch der Blattfedern des Gerätes angenommen werden, die zur Reduzierung der Anzahl der zu idealisierenden Parametern beiträgt und durch ein Ersatzschaltbild erzielbar ist. (Siehe **Faden 2.3. der zweiten Reihe**). Somit kann der Offset als auch der Ausschlag in der anderen Richtung direkt mit einer einzigen Federsteifigkeit präsentiert werden:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = (c \cdot (osp - x) - d \cdot \frac{dx(t)}{dt}) \cdot \frac{1}{m} \quad (3.8)$$

Smith I gilt aufgrund der Vereinfachung (Siehe **Schriftteil 4.1.4**) als lineare Beziehung der Kraft von dem Ausschlag und Federsteifigkeit. Ist aber auch ungenau. Zu korrekten Berechnung von letzterem und die weiteren Fixwerten der Strecke muss sichergestellt werden, dass die Prädiktion durch wahre Ist-Kraft konsistent ist. Die Simulationsmethode zur Verbesserung der geschätzten Parametern wurde von dem W.m vorgeschlagen. Dabei wird ein monoton steigendes Signal mit einer etwa 300-600ms zeitlichen Retardierung zwischen den Signalen verwendet, und gleichzeitig wird die Prognose der virtuellen Gebilde untersucht. Die Bewegung des

Geräts lässt sich entweder durch die Siemens-Steuerung oder über die OPC-UA-Schnittstelle ändern. Die Bedienelemente eigneten sich für solches Verfahren, weil dazu kein CNC notwendig war. Es reicht, einen Parameter an der entsprechenden Position in der Schnittstelle zu konfigurieren, woraufhin sich der Ausschlag augenblicklich änderte. Zunächst wird das Apparatus mit dem Baustein verbunden, danach erfolgt das Einfügen des ersten Fixwert des Prädiktion-Arrays \mathbf{x} für den virtuellen Oszilloskop. Anschließend wird der Bedieneralgorithmen von dem PID-Bediener auskommentiert, da die Regelung wegen Testzwecken nicht notwendig ist und keinen direkten Einfluss auf die Schätzung hat. Danach werden die Windows-Control- und OPC-UA-Benutzerschnittstelle nebeneinander eingeschaltet, um sicherzustellen, dass die Änderungen der Strömung auch tauglich sind. Das gewünschte Verhalten ist, dass sich die Kurve der Prädiktion der wahren Kraft annähert.

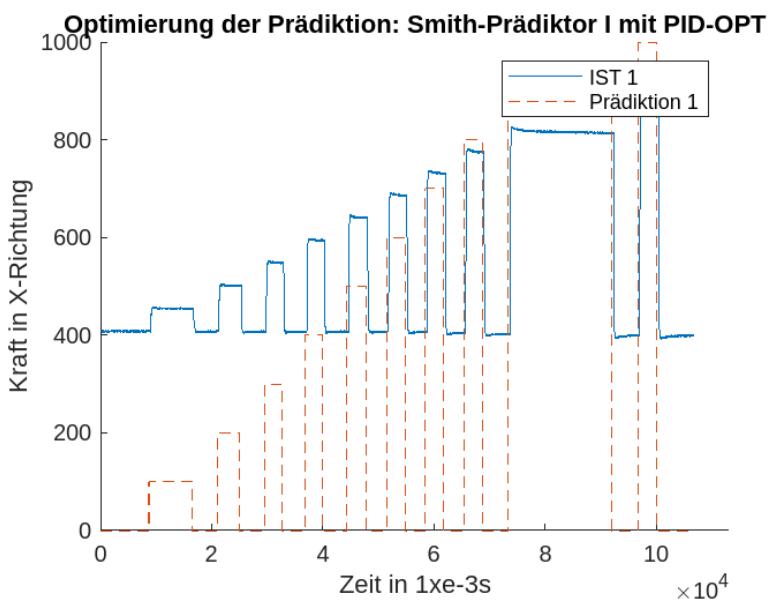


Abbildung 4.30: Idealisierung der Parameter der Strecke durch Idealisierung der Schätzung

Die Strömung wird jedes Mal erhöht, danach (300 ms Stagnation) tritt das Signal auf. Anschließend wird wie bei der empirischen Methode zur Schätzung der idealen PID-Parameter umgesetzt, sodass ein idealer Parameter gefunden, registriert und danach mit der Such nach anderen optimalen Fixwerten fortgefahrene wird. Es wurde zuerst die Masse idealisiert, die sich im Kontrast zur 3-kg-Annahme als sehr

unterschiedlich herausstellte. **Abbildung 4.30** exemplifiziert den endgültigen Verlauf. Nach der Idealisierung der Parameter entspricht der Abfluss der memetisierten Struktur nahezu der realen Last. Der Versatz wegen der horizontalen Referenz, der Zeitachse, ist durch die Transferstagnation verursacht und deswegen unvermeidbar. Der Versatz Entlang der Vertikalen kann durch die Regelung verdrängt werden, weshalb er vernachlässigt werden kann. An der Kurve ist außerdem zu erkennen, dass der Verlauf der Prädiktion geradlinig ist und Ecken aufweist, während die Strömung der realen Last von Interferenz beeinflusst wird. Zum einen liegt das an der Fehler in der effektiven Kraft, zum anderen daran, dass nur ganze Zahlen in den Offset überführt werden und keine Gleitkommazahlen. Dadurch werden gemessene Werte, die sich nur in den Nachkommastellen unterscheiden, als gleich überführt. In **Tabelle 7** sind die idealen Parameter der Strecke registriert:

Tabelle 7: Optimale PID-Parameter (diffensiv/Schnell) vom PID-Bediener und Smith II

Formelzeichen	Beschreibung	Wert	
		PID	SmithII
Ks	Statische Verstärkung des P-Anteils	0.9	2.5
Ki	Verstärkung des I-Anteils	4.5	16.5
Kd	Verstärkung des D-Anteils	0.045	0.0175

Nachdem die Fixwerten gefunden wurden, muss gesichert werden, dass die vorher gefundenen, suboptimalen Fixwerte konsistent geblieben sind. Andernfalls wird wie in **Schriftteil 4.1.4** vorgegangen. Trotz der vorgenommenen Änderungen in der Differentialgleichung sowie in der Schätzung lieferten die Ergebnisse nahezu identische Verläufe mit geringen Fehlern.

Zur Optimierung der Festwerte eignet sich das Hrones-Chien-Reswick-Verfahren (Siehe **Faden 2.6 der zweiten Reihe**). Letztes wurde aufgrund seiner Effektivität zuerst berücksichtigt und wie in **Schriftteil 4.1.4** und **Abbildung 4.23** als Funktionen und Funktionsblöcke implementiert, konnte aber aufgrund der in **Absatz 4.1.2.2.** beschriebenen Hindernisse in Windows-Control nicht verwendet werden. Dies führte auf die Frage, ob die gefundenen Fixwerte eingentlich und auch gemäß der Forschung korrekt berechnet wurden, sodass sie als „ideal“ gelten. Die Antwort auf

die Frage nach der Richtigkeit von der Methode und von den ermittelten Parameter ist positiv, da die Parameter innerhalb der Limitations lagen, nach denen Übersteuerungen und vorteilhafte Sprünge bewertet wurden. Die Antwort auf die Frage nach der „Optimalität“ war aber negativ, da nur Annahmen wie „keine Übersteuerungen“ und „keine unsinnvolle Sprünge“ getroffen wurden, ohne eine Metrik in Betracht zu ziehen. Dies führte auf die Frage, wie der Leistungsindex weiter verbessert werden kann. Nach dem bereits angewandten empirischen Idalisierungsmethoden ist bekannt, dass eine Verbesserung des Leistungsindexes, insbesondere hinsichtlich der Verkürzung der Abklingphase, nur durch defensive Modifikation von dem PID-Bediener zu machen ist, was aber negative Effekte mit sich bringen kann, insbesondere ein paar Übersteuerungen. Die nächste Frage war, wie sind Übersteuerungen zu behandeln bzw. welche Übersteuerungen tolerierbar sind. Die Antwort auf die Frage lieferte die gesuchte Index, die es erlaubt, die gefundenen PID-Parameter als ideal zu bezeichnen, nämlich die Metrik der Übersteuerungen, die von Hrones-Chien-Reswick sowie für Anti-Wind-Up-Maßnahmen verwendet wird, wobei 20 % Übersteuerung als maximaler Übersteuerungsbereich angenommen wird. Eine 20-prozentige Übersteuerung innerhalb der maximal zulässige axiale Kraft entspricht 400 N, was weitere Fehlstellen verursachen könnte und fast dreimal höher ist als die auflösbar Kraft von 138 N. Das Hauptziel des Festwalzablaufs ist es aber, die Fehlstellen zu korrigieren und nicht zu verursachen. Deshalb muss der Intervall weiter verkleinert werden. Früher bei den Verfahren in **Schriftteil 4.1.3** wurde mit 300 N simuliert, die keine Fehlstellen verursachte. Das ist aber eben kein aussagekräftiges Maximum. Das neu entwickelte Werkzeug ist empfindlich und kann sehr kleine Fehlstellen (kleiner als 0,05 mm) spüren. Der maximal auflösbar Bereich von ± 15 N, der die Fehler der Kraft bei der Messung visualisiert, wurde bei der Sprungantwort-Test erwogen, die ein Maximum von etwa 525 N erreicht. Zu dem Bereich wurde besonders auf mögliche Fehlstellen inzipiziert. Unter den schlechtesten Bedingungen wird der Bereich um +5 N überschritten, was nicht oft beim PID-Bediener detektiert wurde. Das ist dadurch bedingt, dass der PID-Bediener dank der leichten Deduktion reaktionsfreudiger ist als der Smith-Schätzer, der die virtuelle Strecke enthält. D.h. unter den schlechtesten Bedingungen eine Übersteuerung von weniger als 4 %, die nur in der ersten, zweiten und selten in der dritten Schwingung zu sehen ist. Bei der maximal erlaubten axialen Kraft von 2000 N entspricht das einer Übersteuerung von 80 N, welches wegen der Tatsache akzeptabel ist, da in dem Experiment ein Durchmesserimpakt, der die Ist-Last in der ungeregelten Begebenheit auf 2000 N

ansteigen lässt und eine solche Übersteuerung von 80 N verursachen würde, bei etwa 1 cm liegt (siehe **Abbildung 2.7**). Eine Eindringtiefe von 1 cm gilt nicht mehr als Fehlstelle, sondern als Kante, Ausgehend von der Geometrie der verwendeten Bauelemente (vergleiche **Bild 3.2 und 3.3**). Eine solche Kante ruft keinen Sprung hervor, da das sich mitdrehende Walzenpaar eine scharfe, spitzenförmige Hülle im Millimeterbereich aufweist, sodass ein Impakt nur durch Abweichungen resultieren können, die eine kompakte Geometrie aufweisen. Ansonsten führt ein solcher Versatz zur Haftung mit den seitlichen Kanten von dem Walzenpaar, wodurch die Ist-Kraft zwar erhöht werden könnte, jedoch nicht sprunghaft, sondern langsam in Beziehung von der vorgegebenen Walzkraft. In der Begebenheit rollt die Rolle entweder langsam über eine solche Stelle oder perfektioniert sie weiter. Ein Impakt kann daher nur dann auftreten, wenn die Dicke der Fehlstelle nicht verhältnismäßig zur Dicke der dem Bauteil kontaktierten Hülle der Rolle ist. Ein sprunghafter Anstieg der Kraft auf die maximal erlaubte axiale Kraft von 2000 N würde außerdem andeuten, dass die vorherige Kraft bzw. Vorgabe vor der Fehlstelle bei 0 gelegen haben müsste, was in dem Experiment eben nicht möglich ist. Aus den letzten Überlegungen lässt sich folgern, dass die Metrik tauglich ist.

Die nachfolgenden Abbildungen exemplifizieren die genannten Verläufe:

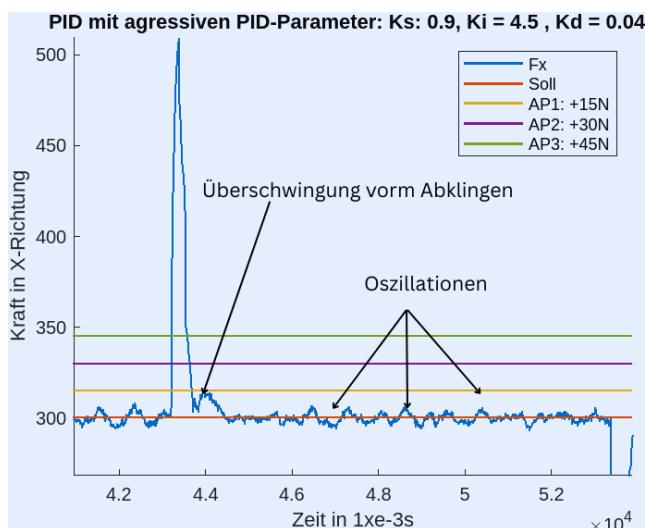


Abbildung 4.31: Reaktion von dem PID-Beidener mit diffensiven PID-Parameter

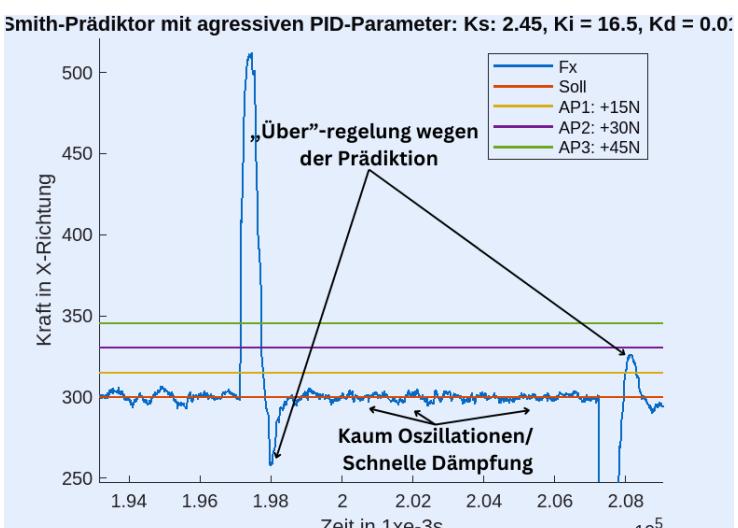


Abbildung 4.32: Reaktion von dem Smith II mit diffensiven PID-Parameter

Aufgrund der festgestellten Unterschiede bei der gleichen Impaktreaktion-Simulation wird statt nur einer Antwort eine Folge von vier hintereinander liegenden, bezogen auf die Kraft positiven Antworten von jedem Bediener in Betracht gezogen. In dem Fall werden die Schnittpunkte mit den horizontalen Kennlinien berechnet und dann der Mittelpunkt gebildet, um eine Begutachtung zu machen. Um auch die Übersteuerungen zu behandeln werden für Zwei Hintereinander liegenden Impaktreaktion jeweils für das maximale positive und maximale negative Übersteuerung in Relation zu Strömung in postiver X-Richtung die Abklingsperiode und die Amplitude bestimmt. Danach wird der Betrag der Amplitude als Relation zu Orientierungsgröße in Prozent ausgedrückt. Danach wird aus denen den Mittelpunkt bestimmt, sodass eine Begutachtung der Bedienern mit der Übersteuerung als Indikator stattfindet. Anschließend erfolgt der vollständige Vergleich. **Tabelle 8** liegt den ersten Vergleich ausgehend von dem **Schriftteil 4.1.4** dar, jetzt jedoch über 4 hintereinander liegenden Reaktionen.

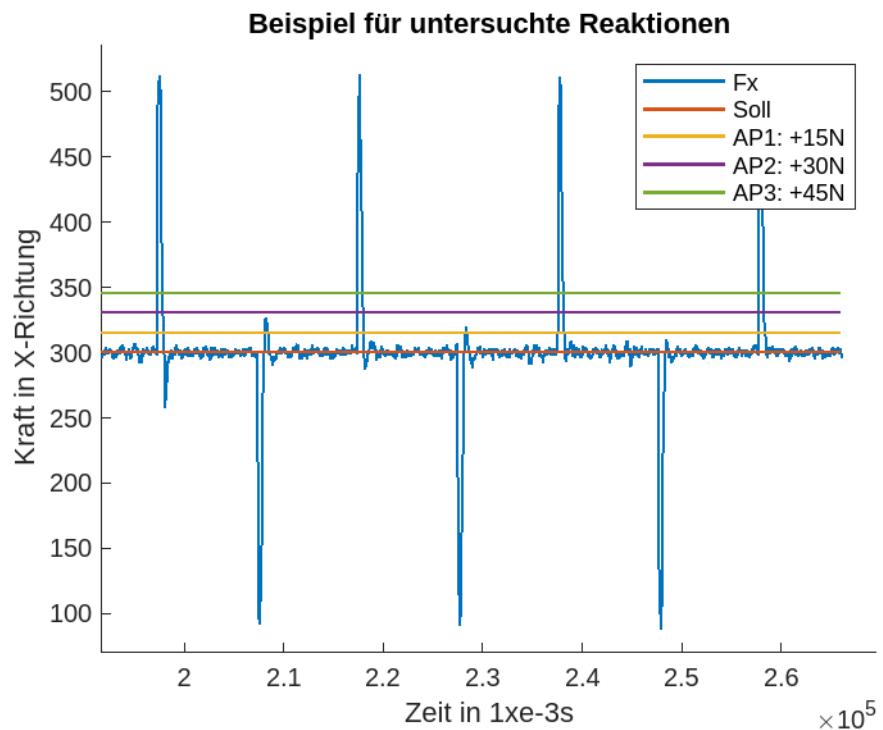


Abbildung 4.33: Die vier letzten Reaktionen (Smith II)

Mw zeichnet dabei den Mittelpunkt einer Zeile. **Tabelle 9** zeigt die Werte für den Vergleich der Flut. Die Vorzeichen bezeichnen die Richtung der Übersteuerung.

Tabelle 8: *Messwerte von Smith II und PID bei der 4 Punkte-Metrik über 4 Reaktionen*

Arbeitspunkt und hori. Kennlinie		Bediener									
AP	A	PID					Smith II				
		Abfall in s von					Abfall in s von				
		Impaktreaktion					Impaktreaktion				
		1	2	3	4	Mw	1	2	3	4	Mw
0	0 N	0.59	1.17	1.48	0.49	0.932	0.76	0.77	0.67	0.7	0.725
1	+15 N	0.51	0.87	1.03	0.43	0.71	0.66	0.68	0.59	0.64	0.642
2	+30 N	0.51	0.83	0.67	0.4	0.602	0.55	0.59	0.58	0.59	0.577
3	+45 N	0.51	0.75	0.63	0.39	0.57	0.53	0.59	0.57	0.59	0.57

Tabelle 9: *Maximum-Minimum-Metrik der Überschwingungen über zwei hintereinander liegenden Reaktionen jeweils vom Smith II und PID-Bediener*

Arbeitspunkt und hori. Kennlinie		Bediener					
Amplitude A und Zeit T		PID			Smith II		
		Impaktreaktion			Impaktreaktion		
		1	2	Mw	1	2	Mw
+	A in %	7.37	4.65	6.01	2.35	3.42	2.885
	T in s	0.3	0.35	0.325	0.32	0.11	0.215
-	A in %	5.78	3.94	4.86	1.62	3.1	2.36

	T in s	0.48	0.13	0.305	0.11	0.26	0.185
M	A in %	1.59	0.71	1.15	0.73	0.32	0.525
	T in s	0.39	0.24	0.315	0.215	0.185	0.2

In Anbetracht von der Begutachtung der Metrik von den vier Punkten wird der Mittelparameter Mw realisiert. **Gleichung 3.80** bei dem PID-Bediener resultiert mit einer Leistung von **2,5721** und bei dem Smith II mit **2,2800**. Der Smith I-Schätzer ist in der Begutachtung wegen der Ergebnisse in **Tabelle 6** sowie weiterer Messungen nicht berücksichtigt worden, da Smith II in beiden Prüfungen dominant war. '**M'** in **Tabelle 8** bezeichnet den mittleren Parameter (nicht zu verwechseln mit dem Mittelparameter), der sich zwischen dem maximalen Ausschlag über und unter der Vorgabe (siehe **Abbildung 4.34**) ergibt. Zur Ermittlung der mittleren Zeit wurde der Mittelparameter verwendet. Die Einstufung der mittleren Zeit kann durch die prozentuale mittlere Übersteuerung erfolgen. Es ist jedoch zu beachten, dass eine größere Übersteuerung negative Folgen auf die Regelung hat. Daher deutet ein niedrigerer Leistungsindex auf eine bessere Leistung hin. Zur Vereinfachung der Berechnung, aber auch zur Klarheit, wird auf die Teilung durch 100 verzichtet, da die Messungen sehr kompakt sind. Der PID-Bediener erzielte bei der Begutachtung einen Leistungsindex von **0,36225**, während der Smith II einen Wert von **0,105** erreichte, was exemplifiziert, dass der Smith II in beiden Begebenheiten dominant ist.

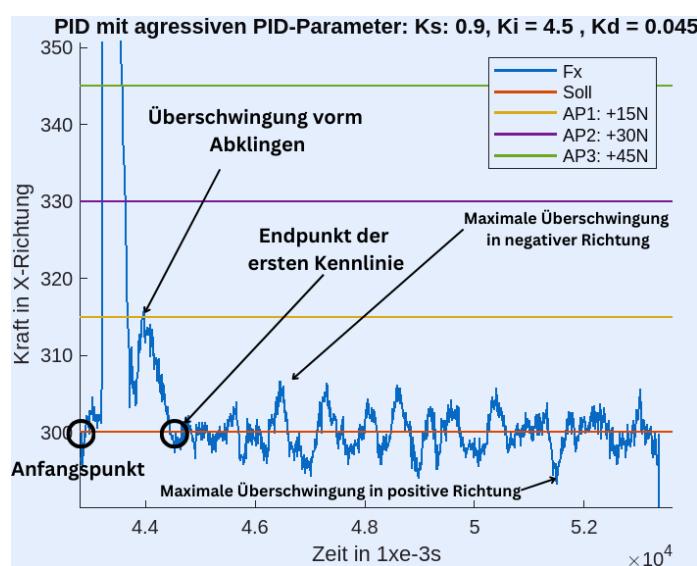


Abbildung 4.34: Maximale und Minimale Übersteuerungen (PID-Bediener)

Bei allen Messungen werden die Verläufe gemäß dem Skript in **Abbildung 3.32** in Matlab visualisiert. Eine Impaktreaktion wird ausgewählt, beginnend von der letzten Messung. Es wird dann ausgedehnt, und der letzte Schnittpunkt mit der horizontalen -Kraft-Kennlinie wird als Anfangspunkt genommen und gespeichert. Die zeitliche Differenz wird ermittelt, indem der erste Berührungs punkt mit einer Kennlinie als Referenz genommen und von der ersten gefundenen Punkt subtrahiert wird, wodurch die gesuchte spanne entsteht (Siehe **Abbildungen 4.31** und **4.32**).

Bei der Behandlung der Übersteuerung war es bei beiden Bedienern zu erwarten, dass die Kurve nach den ersten Übersteuerungen zu dämpfen beginnt. Das Verhalten wurde aber nicht oft bei dem PID-Bediener (Siehe **Abbildung. 4.31**) detektiert. Auch bei dem Smith II (Siehe **Abbildung. 4.32**) wurde das Verhalten in geringerem Grad detektiert. Bei dem PID-Bediener war die Antwort von Fall zu Fall unterschiedlich. Bei beiden Bedienern wurden aber die ersten Übersteuerungen bis zu einer gewissen Amplitude gedämpft, wonach sich die Ist-Kraft, im Kontrast zu weniger defensiv modifizierten Bedienern (siehe **Schriftteil 4.1.4**), relativ stark überflutend verhält. Darüber hinaus ist bei dem hier behandelten PID-Bediener in mehreren Impaktreaktion eine zweite Übersteuerung zu sehen, bevor sich die Kurve abklingt. Dieses Verhalten wurde bereits während der Optimierung mehrfach festgestellt, konnte aber in Angleichung zu Smith II nicht vermieden werden. Eine Übermaximierung der Bedienerparameter hätte zu einer erheblichen Verlängerung der Abklingphase (mehr als eine Sekunde) geführt. Es wurde eben versucht, den Bereich der Dezimalstellen zu begrenzen. Zunächst zeigte sich der gewünschte Strom, aber nach einigen Folgerantworten trat erneut die zweite Übersteuerung vor dem Abklingen auf. Eine Strategie bei der Idealisierung war es, einen relativ großen Spielraum bei den Gleitkommazahlen zu schaffen, um eine Bedingtheit der Ereignisse, bei denen letztere auftreten, von den sehr gut abgestimmten Parametern zu erkennen. Die Dichte solcher Reaktionen nahm mit steigendem P-Anteil und sinkendem I-Anteil innerhalb einer Minute ab. Bei der defensiven Abstimmung von dem PID-Bediener wurde immer wieder verbessert, bis die Dichte minimal war. Eine oder zwei solche Reaktionen waren aber innerhalb einer Minute unvermeidbar.

Im Allgemeinen sollte der PID-Bediener dank der leichten Realisierung erhaben sein, was auch in **Spalte 1** und **4** von dem PID-Bediener verglichen mit Smith II in **Tabelle 7** erkennbar ist, wobei der PID-Bediener schneller regelt als der Smith II. Die relativ langen Zeiten in den **Spalten 2** und **3 derselben Tabelle** sind durch die zweite Übersteuerung (Siehe **Abbildung 4.31**) initiiert. Auch dort, wo der PID-Bediener die

beste Leistung exponiert, Bspw. in **Spalte 4 der Tabelle 7**, kommt leider eine starke folgende Übersteuerung (vergleiche **Spalte 1 der Tabelle 8**). Im nicht grau markierten Bereich der **ersten Spalte in Tabelle 8** sind die maximalen Übersteuerungen direkt nach der besten Antwort in **Spalte 4 der Tabelle 7** auf. Es ist bemerkbar, dass die gute Leistung von dem PID-Bediener die Regelzeit manchmal verdoppeln kann, wie es in den **Spalten 2 und 3 von dem PID-Bediener in Tabelle 7** zu sehen ist.

Zur Klarstellung des Verhaltens, muss die Reaktion von dem PID-Bediener in einfachen Worten untersucht werden: In der Tat lag die Ist-Kraft vor 300 ms bei 525 N. Erst nun beginnt der PID-Bediener, die effektive Kraft zu regeln. Er sendet dabei alle 10 ms einen Offset. In solcher Modifikation probiert der PID-Bediener die Kraft stark und aggressiv zu reduzieren, basierend auf der Annahme, dass die Ist-Kraft dort ist, wo sie vor der Transferstagnation war. Mit der Mutmaßung geht der PID-Bediener über, was bei ideal abgestimmten Parametern oft zu den gewünschten Ergebnissen führt, jedoch nicht bei schnellen PID-Bedienern. Aufgrund der erhöhten Fixwerte zieht der PID-Bediener die anliegende Kraft in Richtung der Vorgabegröße, ohne bedeutsame Merkmale wie Masse oder Dämpfung zu betrachten. Nach den Newtonschen Axiomen bedingt jeden Impakt eine kommensurable Reaktion, die in dem untersuchten Aspekt als starke Dämpfung angesehen werden kann, die die reale Last in einer bestimmten Zeit davon abhält, weiter in Richtung von dem Offset zu fließen. Wenn dies geschieht, hat der PID-Bediener bereits mit einer falschen Last geregelt, die nur ausreicht, um die effektive Kraft in die positive Richtung zu bewegen, aber nicht zur Neutralisierung des Gegeneffekts. Deswegen wird sich die effektive Kraft kurzfristig vom Offset befreien und dann quasi sprunghaft ansteigen, bis 300 ms vergangen sind und der PID-Bediener ein entsprechendes Signal sendet. Der Smith II kann aber trotz der Antworten die Ist-Kraft dazu bringen, der Vorgabe zu folgen, weil er durch die virtuelle Strecke bereits eine solche Antwort erwartet und den Offset entsprechend modifiziert hat. Die Regelparameter von dem Smith II sind viel diffensiver modifiziert (**Tabelle 7**) als die von dem PID-Bediener. Da der Smith-Schätzer auch über den PID-Bediener regelt, sind logischerweise mehrere solche Reaktionen geschätzt, die jedoch bei noch größer werdenden Parametern wenig zu bemerken waren. Es traten lediglich Wellenpendelungen auf, wie sie auch beim PID-Bediener detektiert sind, aber nur selten eine Übersteuerung vor dem Abklingen, was diese Reflexionen bekräftigt.

4.2 M.a- & M.e-Schätzer:

Die Bedingungen und Erklärungen von der Dimensionierung eines tauglichen Schätzers werden zunächst erleuchtet. Anschließend wird das Schema von dem asynchronen erfahrungsbasierten Schätzers detailliert beschrieben. Daraufhin folgt eine Erklärung von dem Ansatz der Mittelwert-Echtzeit Schätzung. Die erwähnten Ansätze werden anschließend in MATLAB/Simulink simuliert. Abschließend werden die Daten bei den erfahrungsbasierten asynchronen Schätzer registriert und dann die Realisierung der Schätzern in TwinCAT.

4.2.1 Diskussion von der Ist-Kraft

Bereits zu Beginn der Gliederung zur Verdrängung der Transferstagnation war die Tauglichkeit der Schätzung durch den Smith-Schätzer ein zentraler Punkt der Diskussion. Daraus resultiert, dass die Orientierungsgröße im realen Prozess unbekannt ist und die in der Impaktreaktion verwendete fixe Kraft lediglich zu Simulationszwecken fix gehalten wird. Im echten Prozess wird die Orientierungsgröße jedoch nicht Fest sein. Beide der Smith-Schätzer als auch moderne Ansätze, die eine virtuelle Strecke nutzen, wie Detektor (siehe **Faden 7** der **zweiten Reihe**), benötigen ein gewisses Wissen über die Trajektorie der Orientierungsgröße oder einen Initialwert, um die Ist-Last zu schätzen und entsprechend behandel zu können.

Für eine präzise Vorhersage bei Transferstagnation-behafteten Prozessen ist es notwendig, dass das partielle Wissen über die Trajektorie eine Dauer hat, die dem Verhältnis zwischen der Leerlaufphase und der Zeitraum, die während eines Iterationsschritts entsteht, entspricht—in der Begebenheit 30 Takte. Ohne Vorwissen über die Trajektorie können die Prädiktoren im realen Prozess im Abgleichung zu einem üblichen, idealisierten PID-Bediener nur limitierte Erträge bieten. Es ist daher entscheidend, dass die Sollkraft nicht durch eine Leerlaufphase beeinflusst wird, um eine richtige Schätzung zu realisieren.

Während des Stillstands wird auf die Orientierungsgröße N Takte lang zur prognostizierung von F_{ist} gewartet, das aber bereits vorhanden ist. Das Ziel ist es, den Fehler vorherzusagen, indem eine ähnliche Strecke erstellt wird, die einen vergleichbaren Fehler liefert. Zur Berechnung der Fehler, ist eine Angleichung an der Orientierungsgröße obligatorisch, die bei dem Zeitpunkt jedoch noch nicht vorhanden ist. Ist sie schließlich vorhanden, so ist eben F_{ist} vorhanden. Daher ist die die virtuelle

Strecke bei der Begebenheit nicht erforderlich, wenn die Orientierungsgröße durch die Transferstagnation verspätet wird.

In einer solchen Begebenheit könnte es obligatorisch sein, die Geometrie von dem Bauelement zu betrachten, insbesondere Fixwerte wie Eigenspannung, Dehnung, Festigkeit und andere schwer zu berechnende Fixwerten. Das könnten zwar mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelt werden, brauchen aber ebenfalls einen erheblichen Aufwand. Der **letzte Satz von dem vorletzten Schriftteils in Absatz 4.1.2.1 von dritten Faden**, der aus [DEN22] entnommen wurde, deutet an, dass das partielle Wissen vorhanden ist. Die Vorgabe kann nicht wegen Inaktivität beeinträchtigt sein, da sie von der Steuerung vorgegeben wird und nicht über OPC-UA.. Selbst wenn das Gegenteil der Fall wäre, bliebe sie aufgrund des persistenten Register **N** Takte unveränderlich.

Solche Erkenntnisse sind besonders relevant bei der Berechnung der notwendigen Walzkräfte entlang der Hülle. Hierbei ist es entscheidend, lediglich zu wissen, ob letztere vorhanden sind, was in dieser Sachverhalt erfüllt ist. Somit ist die Hauptbedingung bei der Dimensionierung eines Schätzers gegeben. Das partielle Wissen dient dabei als Nebenbedingung, das die Schätzung verbessert, insbesondere durch die Vorbereitung auf Verhaltensänderungen und Anpassung der Festwerte, wenn wegen einer bekannten Trajektorie eine erhebliche Umdispionierung der Orientierungsgröße geschätzt ist.

4.2.2 Mittelparamter-Asynchron-Schätzer (M.A-SCHÄTZER):

Es ist bekannt, dass das Walzenpaar, das Federpaket zusammen mit dem Bauelement und die Beeinträchtigung im Allgemeinen ein System zweiter Ordnung bilden. Dies ergibt sich aus den Lagrange- bzw. D'Alembert-Gleichungen (siehe den **dritten Schriftteil im siebten Faden** der **zweiten Reihe** zusammen mit Herleitung in **Gleichung 3.71** von dem **Schriftteil 4.1.1** sowie **Schriftteil 4.1.5**). Die Istkraft kann deswegen diskret wie folgt ausgedrückt werden:

$$F_a[n] = K_1 \cdot H''[n] + K_2 \cdot H'[n-1] + K_3 \cdot H[n-2] \quad (3.8)$$

In **Gleichung 3.82** bezeichnet ein Apostroph eine diskrete Ableitung der Strömung. Der Fixpunkt **K_i** repräsentieren die Fixwerten der virtuellen Strecke. Verglichen zu den einfacheren und meistverwendeten Konvention in **Gleichung 3.76** aus **Absatz 4.1.2.3** wurde die Strömungsfreiheit in letzterer Konvention zwei Schritte verspätet,

um dem Signalfluss durch zwei Stagnationsglieder in der Strecke in **Abbildung 4.2** aus **Schriftteil 4.1.1** zu entsprechen. Eine diskrete Ableitung, wie sie in **Zeile 9** der **Abbildung 4.15** in **Absatz 4.1.2.4** präsentiert wird, wird nachfolgend bestimmt:

$$\mathbf{H}'[n] = (\mathbf{H}[n] - \mathbf{H}[n-1]) \cdot \frac{1}{T_s} \quad (3.8)_3$$

Unter Vernachlässigung der dadurch entstehenden Multiplikationen der Fixwerten und durch deren Ersetzung durch anderen Parameter resultiert das Einsetzen von **Gleichung 3.83** in **Gleichung 3.82** in:

$$\mathbf{F}_a[n] = A_1 \cdot \mathbf{H}[n] + A_2 \cdot \mathbf{H}[n-1] + A_3 \cdot \mathbf{H}[n-2] \quad (3.8)_4$$

Ist die Gebilde offen, so kann **H[n]** als eine lineare Kombination aus Störung und Orientierung verstanden werden:

$$\mathbf{F}_a[n] = \mathbf{F}_{soll}[n] + \mathbf{Z}_{stoerung}[n] \quad (3.8)_5$$

Einsetzen von **Gleichung 3.85** in **Gleichung 3.84** resultiert in:

$$\mathbf{F}_a[n] = A_1 \cdot (\mathbf{F}_s[n] + \mathbf{Z}[n]) + A_2 \cdot (\mathbf{F}_s[n-1] + \mathbf{Z}[n-1]) + A_3 \cdot (\mathbf{F}_s[n-2] + \mathbf{Z}[n-2]) \quad (3.8)_6$$

Zur Reduktion der **Gleichung 3.86** wird die Beeinträchtigung mit der Frequenz 40 Hz erwogen bzw. Innerhalb vier Takten fix bleibt oder alle 4 Takte eingespeist wird. Die Einschätzung mit 4 Takten ist zulässig, da der angenommene Spanne kürzer ist als die Transferstagnation ist. Somit ergibt sich:

$$\mathbf{F}_a[n] = A_1 \cdot \mathbf{F}_s[n] + A_2 \cdot \mathbf{F}_s[n-1] + A_3 \cdot \mathbf{F}_s[n-2] + (A_1 + A_2 + A_3) \cdot \mathbf{Z}[n] \quad (3.8)_7$$

Da nun **Z[n]** über vier Takte hinweg als fix angenommen werden kann, lässt sich bei der vier Takte nachfolgendes schreiben:

$$(A_1 + A_2 + A_3) \cdot \mathbf{Z}[n] = Z_1 \quad \text{für } 0 \leq n \leq 3; \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3.8)_8$$

Zum Heilen der **Gleichung 3.88** obligatorische Anzahl an Iterationen resultiert:

$$F_a[n] = A_1 \cdot F_s[n] + A_2 \cdot F_s[n-1] + A_3 \cdot F_s[n-2] + Z1$$

$$F_a[n-1] = A_1 \cdot F_s[n-1] + A_2 \cdot F_s[n-2] + A_3 \cdot F_s[n-3] + Z1$$

$$F_a[n-2] = A_1 \cdot F_s[n-2] + A_2 \cdot F_s[n-3] + A_3 \cdot F_s[n-4] + Z1$$

$$F_a[n-3] = A_1 \cdot F_s[n-3] + A_2 \cdot F_s[n-4] + A_3 \cdot F_s[n-5] + Z1$$

($\begin{matrix} 3 \\ 9 \end{matrix}$)

Die Tragweite dieser Einschätzung kann durch die Registrierung von Messparametern im echten Prozess überprüft werden, um zu bestimmen, ob sich die Beeinträchtigung dem angenommenen Muster annähert. Falls dies aber nicht der Fall ist und kein erkennbares Muster vorliegt, kann der Rang der Matrix um mehrere Zellen ausgedehnt werden. Die Matrix sollte zunächst in eine erweiterte (augmentierte) Matrix umgewandelt werden, damit sie entweder direkt durch den Gauß-Jordan-Algorithmus oder indirekt durch SVD-, LSA-, LU- oder LR-Approximation geheilt werden kann, mithilfe der sogenannten „Solver“-Funktion. Die Solver-Funktion ist in der nachfolgenden **Abbildung 4.35** visualisiert. Die Solverfunktion in **Abbildung 4.35** deklariert die notwendigen Variablen und Funktionen, zur Einschätzung sowie bei dem direkte Ansatz mit dem Gauß-Jordan-Algorithmus genutzt werden. Dazu gehören unter anderem die Matrix-Transponierte, die Inverse-Matrix, die Pseudo-Inverse-Matrix und die üblichen Matrix-Vektor-Skalar-Operationen. Zuerst wird die Matrix von dem Gauß-Jordan-Algorithmus vorbereitet, wie in **Abbildung 4.36** exemplifiziert. Wie in **Gleichung 3.89** erkennbar ist, bezieht sich die höchste Schrittzahl (vom aktuellsten Schritt, dem nullten Schritt) auf den fünften Schritt. Das bedeutet, dass mit fünf Messungen aus der Vergangenheit und der aktuellsten Messung die nächste Messung durch die Bestimmung der Parameter eingeschätzt werden kann. Mit dieser Abschätzung lassen sich weitere Messungen bis zu 30 Takten in die Zukunft einschätzen, sodass Leerlaufphase von der Schleife exkludiert wird und richtig prognostiziert werden kann. Die Beziehung Augmented_Matrix nimmt die Messungen und wandelt sie in eine Gleichungsform ausgehend von der Herleitung in **Gleichung 3.89** um. Dabei stehen die Messungen auf der linken Seite als bekannte Parameter in der augmentierten Matrix, genau wie es bei der Verwendung des Gauß-Algorithmus der Fall ist. Alle Zeitmessungen werden als Parameter behandelt, während der Fixwert A_i als zu berechnende Variable angesehen wird.

```

1060  FUNCTION_BLOCK Solve
1070      VAR_OUTPUT
1071          SOLUTION_TOVAR : REAL;
1072      END_VAR
1073      VAR_INPUT
1074          e : ARRAY[0..*] OF REAL;
1075          n : INT;
1076      END_VAR
1077      VAR
1078          aug_matrix : ARRAY[*,*] OF REAL;
1079          gaussian : GaussianEliminator;
1080          least_squares : LeastSquaresApproximation;
1081          pseudo_inverse : PseudoInverseApproximation;
1082          svd_approx : SVDApproximation;
1083          qr_solver : QR Solver;
1084          lu_solver : LUSolver;
1085      END_VAR
1086      aug_matrix := Augmented_Matrix(data := e, m := SIZEOF(e) / n, n := n);
1087      gaussian(gaussian(aug_matrix));
1088      IF gaussian.solution_found THEN
1089          solution := gaussian.solution;
1090          solution_found := TRUE;
1091      ELSE
1092          // Try Least Squares Approximation
1093          least_squares(least_squares(aug_matrix));
1094          IF least_squares.solution_found THEN
1095              solution := least_squares.solution;
1096              solution_found := TRUE;
1097          ELSE
1098              // Try Pseudo-Inverse Approximation
1099              pseudo_inverse(pseudo_inverse(aug_matrix));
1100              IF pseudo_inverse.solution_found THEN
1101                  solution := pseudo_inverse.solution;
1102                  solution_found := TRUE;
1103              ELSE
1104                  // SVD Approximation
1105                  svd_approx(svd_approx(aug_matrix));
1106                  IF svd_approx.solution_found THEN
1107                      solution := svd_approx.solution;
1108                      solution_found := TRUE;
1109                  ELSE
1110                      // QR Decomposition
1111                      qr_solver(qr_solver(aug_matrix));
1112                      IF qr_solver.solution_found THEN
1113                          solution := qr_solver.solution;
1114                          solution_found := TRUE;
1115                      ELSE
1116                          // LU Decomposition
1117                          lu_solver(lu_solver(aug_matrix));
1118                          IF lu_solver.solution_found THEN
1119                              solution := lu_solver.solution;
1120                              solution_found := TRUE;
1121                          ELSE
1122                              solution := [];
1123                              solution_found := FALSE;
1124                          END_IF;
1125                      END_IF;
1126                  END_IF;
1127              END_IF;
1128          END_IF;
1129      END_IF;
1130  END_FUNCTION_BLOCK
1131
1132
1133
1134
1135
1136

```

Abbildung 4.35: Solver-Funktion

Zuerst wird der direkte Gauß-Algorithmus angewendet. Sollte dieser keine Heilmittel liefern, werden nacheinander verschiedene Abschätzungsmethoden basierend auf Ihre Eindeutigkeit nacheinander verwendet. Wenn ein Verfahren nicht erfolgreich ist,

wird zur nächsten übergegangen. Innerhalb der Abschätzungsmethoden ist eine andere Einschätzung, falls die Berechnung der Inversen nicht möglich ist. In der Begebenheit wird die Pseudo-Inverse-Matrix verwendet. Ist die Pseudo-Inverse nicht ermittelbar, wird die augmentierte Matrix an die nächste Abschätzungsmethode übergeben. Bei fruchtbaren Behebung werden die ermittelten Parameter in CSV-Dateien gespeichert, sodass mit ihnen bis zu 30 Schritte in die Zukunft in Windows-Control Vorhersagen generiert werden können.

```

96 // Bestimmung der augmentierten Matrix aus den Messdaten +
97 FUNCTION_BLOCK Augmented_Matrix
98 VAR_OUTPUT
99   augmented_matrix :ARRAY[*,*] OF REAL;
100 END_VAR
101 VAR_INPUT
102   data :ARRAY[0..*] OF REAL;
103   m, n :INT;
104 END_VAR
105 VAR
106   i, j :INT;
107   row :ARRAY[0..*] OF REAL;
108 END_VAR
109 FOR i := 0 TO m-1 DO
110   FOR j := 0 TO n-1 DO
111     row[j] := data[(i + j + 1) MOD (2 * m)];
112   END_FOR;
113   FOR j := 0 TO n-1 DO
114     augmented_matrix[i, j] := row[j];
115   END_FOR;
116   augmented_matrix[i, n] := data[i];
117 END_FOR;
118 END_FUNCTION_BLOCK
119

```

Abbildung 4.36: Umformung des Gleichungssystem von Matrix zu augmentierten Matrix

Der Hauptgrund für die Nichtlösbarkeit des Aufgabenstellung liegt darin, dass der Pivot in der Matrix null ist, was eine Division nicht zulässt. Sollte nach allen Funktionen nach wie vor keine Heilmittel gefunden werden, wird ein spezieller Gauß-Algorithmus angewendet, der die Division des Pivots durch null vermeidet. Dieser Algorithmus geht einen Schritt nach hinten und verwendet die Bernoulli-Ableitung auf den Quotienten, die in den meisten Begebenheiten 1 ergibt.

Die Tauglichkeit von der Methode wurde bereits in Python überprüft und enthüllt gute Ergebnisse bei Daten mit einem erkennbaren Muster, einschließlich alternierender Reihen, monoton steigender und fallender Reihen sowie geordneter Reihen mit randomisierten Daten in der Mitte. Bei der Berechnung der Fixwerte bei der Nichtlösbarkeit werden die Daten aber anders in der CSV-Datei benannt, um Konflikte bei der Programmausführung zu vermeiden. Falls genügend Daten im echten Prozess vorhanden sind, dann werden sie primär geschätzt werden, bevor auf den Gauß-Algorithmus mit Bernoulli-Approximation zurückgegriffen wird. Näheres dazu wird in dem nächsten Schriftteil erklärt.

4.2.3 Mittelwert-Echtzeit-Schätzer

Wie vorhin erwähnt ist die Einschätzung bei Nichtlösbarkeit der Matrix primär. Dabei ist die Beeinträchtigung als Teil der Kraft berücksichtigt und deswegen gegenteilig zur Herleitung im vorherigen Faden behandelt. Der Echtzeit-Schätzer nutzt denselben Ansatz wie zuvor aus, jedoch ohne die Störung, was ein zusätzliches fixes Wert statt **Z1** erfordert. Um das Gleichungssystem so groß wie in **Gleichung 3.89** zu halten, wären sieben Messwerte erforderlich. Dies ist grundsätzlich akzeptabel, da nur am Anfang des Verformungsverfahrens eine Ruhezeit notwendig ist. Die Lösung erfordert bei komplexen Gleichungssystemen mehr Aufwand, die mit dem Rang und der Anzahl der Abschätzmethoden zunimmt. Da nur 10 ms pro Takt zur Verfügung stehen, müssen die Rechnungen in dieser Periode erfolgen. Schon im **letzten Paragraphen** vom **Schriftteil 4.1.4** wurde der Einfluss zusätzlicher Deduktion auf den Algorithmus angesprochen. Auch die Realisierung solcher aufwendiger Algorithmen ist mit vielen Hindernissen verbunden (siehe **Absatz 4.1.2.2**). Daher muss die Rechnung so vereinfacht werden, dass sie den Komplexitätsbestimmungen entspricht, insbesondere der **O(1)**-Komplexität, die mit dem Ansatz von zwei X-en, wie von [LAM24] beschrieben, erreicht werden kann. [LAM24] hat exemplifiziert, dass Gleichungssysteme zweiter Ordnung in **O(1)** gehellt werden können. Dies bietet den Vorteil einer hohen Recheneffizienz bei der Schätzung, allerdings ist die Schätzung bis zu 30 Schritte vollständig tragend, wenn die Beeinträchtigung während der Kaltwalzablauf nicht eine Frequenz nahe Netzfrequenz von 50 Hz aufweist, die in den Simulationen in den **Schriftteil 4.1.1** und **Absatz 4.1.2.3** verwendet wurde.

Um die genannten Hindernisse zu bewältigen, kann ein Idealisierer eingesetzt werden, der sich für einen Schätzungsmodi – dem asynchronen Schätzer, dem echtzeit Schätzer bei und nicht bei Nichtlösbarkeit – entscheidet. Der Idealisierer

kann in **O(1)** hetzen, weil es mit „IF-Befehlen“ implementierbar ist. Eine andere Option wäre, einen vierten Ansatz durch parallele Kombination mit einem üblichen Schätzer, wie einem Smith-Schätzers oder einer Detektorstruktur. **Abbildung 4.37** veranschaulicht den allgemeinen Ansatz.

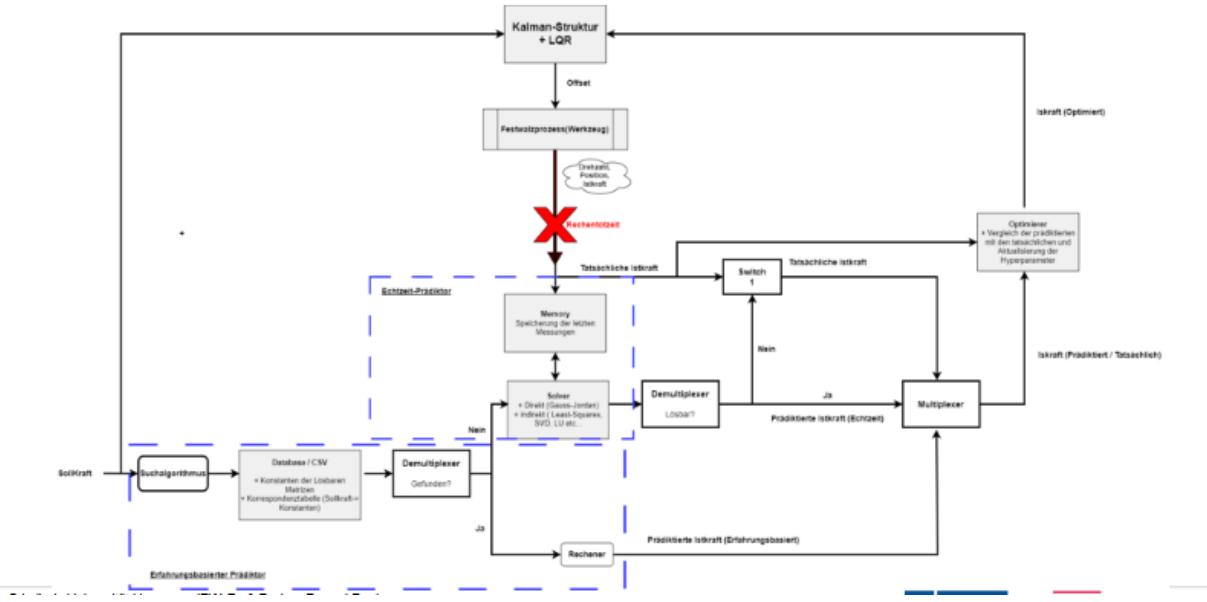


Abbildung 4.37: Allgemeine Darlegung der Mittelwert-Schätzer

M.a- & M.e-Schätzer entstanden aus der Erleuchtung, dass die Herleitung der Differentialgleichung nicht zwingend von der definierten Masse von dem Federpaket oder der gemessenen Federsteifigkeit abhängt. In der Abarbeitung sind die Parameter nicht fix, sodass die Differentialgleichung mit abstrakten Parametern betrachtet werden kann, die von den Iterationsschritten sowie der gerade ausgeübten Beeinträchtigung und Führung auf das System abhängen. Das bedeutet, dass sich die Differentialgleichung des Systems in jeder Iteration ausgehend von den Bedingungen von dem Prozess ändern kann. Mit M.a- & M.e-Schätzern wurde es möglich, die Illustration von der Differentialgleichung des Prozesses lebendig zu machen, entsprechend der kinetischen Natur des Ablaufs selbst.

5 Beeinträchtigungsunterdrückung

Im nachfolgenden Reihe werden die Phasen zur Auslegung des Filters zur Unterdrückung der Beeinträchtigung erläutert, mit welcher das Regelkreis insbesondere bei der Regelung mittels Smith-Schätzer II jedoch auch der PID zu Gutachtung in Betracht geholt.

5.1 Allgemeine Betrachtungen

Wie schon in **Faden 2.7 der zweiten Reien** erklärt und in **Abbildung 2.17** dargelegt, wird ein Glättungsmechanismus üblicherweise zur Unterdrückung verrauschter Orientierungsgrößen eingesetzt. Der Begriff „Vorfilter“ leitet sich davon ab, dass das Signal gewissermaßen „geglättet“ wird, sodass es auf der anderen Seite frei von Beeinträchtigung – in dieser Sachverhalt Interferenz oder Fehlstellen – vorliegt und somit korrekt von dem Prozess interpretiert werden kann. Der Präfix „Vor“ verweist auf die Position des Filters vor dem eigentlichen Vorgang.

Vorfilter werden als Trennungsvorrichter bei überlagerten Signalen verwendet, die differenzierendes mechanismus, bleibende Regelabweichungen oder eine Kombination von den Effekten zeigen, Bspw. durch den Einsatz eines PID-Bediener. Die Orientierungsgröße kann entweder aus bereits bekannten Daten bestimmt werden (siehe **Schriftteil 4.2.1**), durch die Drehmaschine ermittelt oder in die Siemens-Steuerung vorgegeben werden. Dabei enthält sie keine Gleitkommazahlen (DINT) und weist keine Wechselpendelungen auf. Stattdessen nimmt sie eine feste Form an (fix, steigend, fallend oder trigonometrisch). Wechselpendelung erfolgt nur dann, wenn eine Mindestdauer zwischen den Wertänderungen liegt. Dieses Verhalten tritt lediglich bei trigonometrischen Beziehungen auf, die in der Ausführung aber selten verwendet werden und nur zu Verifizierung und Testzwecken dienen.

In solchen Fällen basieren die Trennvorrichter überwiegend auf der Orientierungsgröße, die in der Regel durch Regelabweichungen beeinflusst wird, zu deren Behandlung ein PID-Bediener die ideale Entscheidung abbildet. Zwar kann Variaz in Fehlern auftreten, spielt aber in der Aufgabe eine untergeordnete Rolle. Der Einsatz eines anderen PID-Bediener oder eines I-Anteils nach der Fehlerberechnung würde lediglich den Einfluss des bestehenden PID-Bediener verstärken, was im Wesentlichen nur den I-Anteil erhöht und dadurch eine erhebliche Retardierung initiiert.

Die verbleibenden Regelabweichungen sowie das differenzierende Benehmen im werden durch den vorhandenen PID-Bediener jedoch auch in Kombination mit einem Smith-Schätzer ausreichend kompensiert. Auffällig in der Simulation der Sprungantwort sind aber die Fehler und Wellenpendelungen der Ist-kraft, die eine besondere Herausforderung bei der Regelung sind. Die Wechselpendelungen können von den Bedienern fälschlicherweise interpretiert werden, sodass der Bediener auf Basis inkonsistenter Messungen arbeitet. Infolgedessen kann der Bediener bei über stimulierten Wechselpendelungen zu fehlerhaften Regelungen führen. Es sind deswegen Ansätze nötig, um derartige Beeinträchtigungen zu verhindern.

5.2 Selektion von dem Glättungsagent

Die Vorfilter sind vielfältig, weshalb ein Begutachtung obligatorisch, um den tauglichen Ansatz bei dem Prozess zu finden.

5.2.1 Allgemeines Vorgehen

In der Windoes-Control-Ausführung werden unterschiedliche Filter bereitgestellt, darunter IIR-, Gleitender-Mittelwert-, Median-, PID-, Notch- und Lead-Lag-Filter. Der IIR-Filter (Infinite Impulse Response) wird in Fällen verwendet, in denen Phase und Verspätung keine wesentliche Rolle spielen. Der Gleitende-Mittelparameter-Agent bestimmt den Mittelpunkt, jedoch nicht über eine starre, sondern über eine änderliche Anzahl von Daten. Der Median ermittelt den mittleren Parameter. Der PID-Bediener wird, wie in **Faden 4** erklärt, zur Behandlung von bleibender Regelabweichung und Regeldifferenz eingesetzt. Der Notch-Filter basiert auf der Einschätzung, dass das zu behandelnde Signal eine Überlagerung eines idealen Signals und eines sinusförmigen Rauschens ist. Das Ziel von der Trennvorrichtung ist es, die sinusförmige Beeinträchtigung vom idealen Signal zu trennen, ohne das eigentliche Signal zu verzerrern. Der Lead-Lag-Filter funktioniert ähnlich wie ein PID-Bediener und ist bei der Behandlung überlagerter Signale vorgesehen. Diese Filter sind übliche Agents zur Interferenzunterdrückung und zur Verdrängung von Beeinträchtigungsfehlern.

Eine tiefgehende mathematische Betrachtung von dem Glättungsagent ist nicht notwendig, weil sich die Beeinträchtigungen unregelmässig verhalten, D.h, sie verändern sich nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich. Der Entwurf der Glättungsvorrichter anhand ihrer typischen Parameter setzt voraus, dass die Störung

bekannt ist. Daher müsste die Beeinträchtigung demoduliert werden, sodass entweder ein Muster erkennbar wird oder eine Korrelationsstudie durchgeführt werden kann (siehe **Faden 2.6**). Dies wäre aber trotz der vorhandenen Messwerte aus realen Prozessen mit erheblichem Aufwand verbunden, da die Störung nur geschätzt werden kann. Solche Abschätzungen werden insbesondere in der Regelung mit dem asynchronen Schätzer experimentell differenziert (siehe **Schriftteil 4.2.2**). Bei der Interferenzfilterung ist aber ein anderer Vorfahren von nötzen.

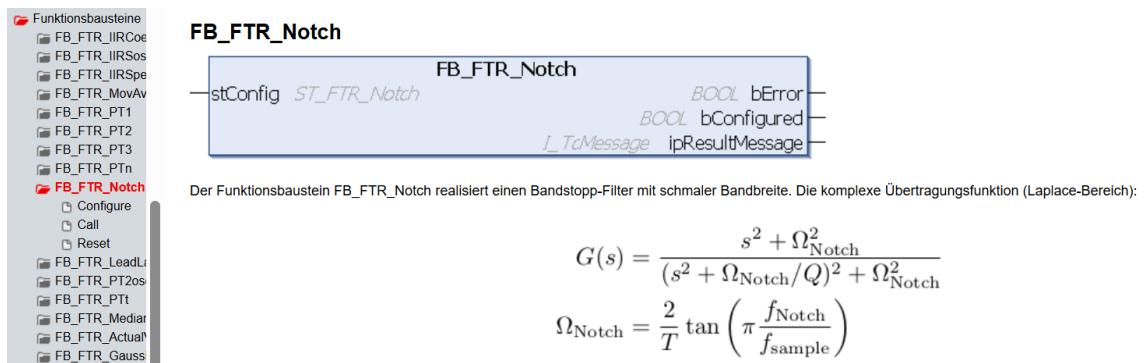


Abbildung 5.1: Filter von Windows-Control

Die in Windows-Control verfügbaren Filter sind nicht automatisch initialisierbar und erfordern mehrere Deklarationsschritte, die oft nicht direkt mit den notwendigen Berechnungen verbunden sind. Die Dokumentation zu diesen Filtern ist allgemein gehalten. Es gibt zwar Beispiele, aber nur unvollständige Teile zur Deklaration der internen Befugnisse und Funktionen. Weiterhin wurde festgestellt, dass die bereitgestellten Befugnisse kostenpflichtig sind und eine spezielle Lizenz erfordern, die nur bei einem Überprüfungszeitraum von sieben Tagen zur Verfügung gestellt wird.

Das Schreiben von Code in TwinCAT ist aufgrund der in **Absatz 4.1.2.2** beschriebenen Hindernissen fehlerbehaftet, weshalb mehrere Tage zur Realisierung und das Testen aller Glättungsagent eingeplant werden sollten. Nach Ablauf der Testphase wäre es erforderlich, dass der zuständige Techniker, der an der Maschine arbeitet, die Lizenz erneuert, um außerdem die Filtern zu nutzen. Zur Vermeidung solches Problems wäre die Nutzung einer Simulationssoftware sinnvoll.

In Python stehen die Bediener als Funktionen der Bibliothek „Scipy.signal“ zur Verfügung, was es ermöglicht, zeitlich unlimitiert und kostenfrei zu testen. Als Testplattform kann ein lokaler PC oder ein IPC verwendet werden. Zu robusten Überprüfungen ist eine Cloudanwendung wie „colab“ besser anzuwenden, das eine kostenfreie Compute-Engine sowie Speicherplatz für Berechnungen bereitgestellt. Obwohl RAM und Festplattspeicher begrenzt sind, reichen jedoch auch bei sehr komplexen Bestimmungen aus.

Es fehlen aber noch Metriken zur Begutachtung der Bedienerleistung. Wie in **Faden 2.6** erwähnt, eignen sich bei solchen Begutachtungen insbesondere Abstandsmaße. Die Tauglichkeit von Glättungsagenten lassen sich besonders gut mittels den Metriken SNR (Signal-to-Noise Ratio) und MSE (Mean Squared Error) begutachten.

Die Qualität der Modifikation wird kann mit den Metriken zur Interferenzunterdrückung und zur Abweichungsbehebung vom idealen Anzeichen ermittelt. Während MSE und SNR in vielen Anwendungen, insbesondere in der Signalkonfiguration, von zentraler Bedeutung sind, begutachten sie nicht direkt die Leistungstauglichkeit hinsichtlich der Beeinträchtigungsaufschaltung und der Rauschfilterung. Daher ist es notwendig, die Verläufe auch visuell zu beurteilen. Zu dieser Hinblick wurden zwei visuelle Methoden angewendet: Erstens die zeitlich Darstellung des Verlaufs und zweitens eine FFT-Analyse (Fast Fourier Transform), sodass Vergleiche in Frequenzbereich zu ermöglichen.

Zunächst wurde das Signal des diffensiv modifizierten PID-Bedieners aus **Schriftteil 4.1.5** aufgrund der hypergereizten Wechselpendelungen nach einer Impaktreaktion registriert. Die Bilder wurden ausgedehnt und der Beginn sowie das Ende der stärksten Oszillation bestimmt. Anschließend wurde das Signal von CSV in eine Textdatei umgewandelt, um eine leichte Integration bei Colab zu ermöglichen. **Abbildung 5.2** exploriert einen Ausschnitt des verrauschten Signals. Nach dem Hochladen der Datei wurde der Verlauf mit dem ursprünglichen Signal verglichen, um sicherzustellen, dass die Dateien nicht komprimiert wurden. Da die Abarbeitung der Dateien stets zeitlich nicht direkt nach einander erfolgen und daher die Daten eine Weile online gespeichert werden, ist der Integritätscheck von zentraler Bedeutung, falls online Angreifer die Daten Beeinträchtigt hat. Die letztere Prüfung wird bei allen Messwerten durchgeführt, da aus Sicherheitsbedenken keine USB-Sticks in den IPCs erlaubt sind und die Daten deswegen online hochgeladen werden. Nach der Überprüfung erfolgt die Registrierung der Daten auf dem lokalen PC.

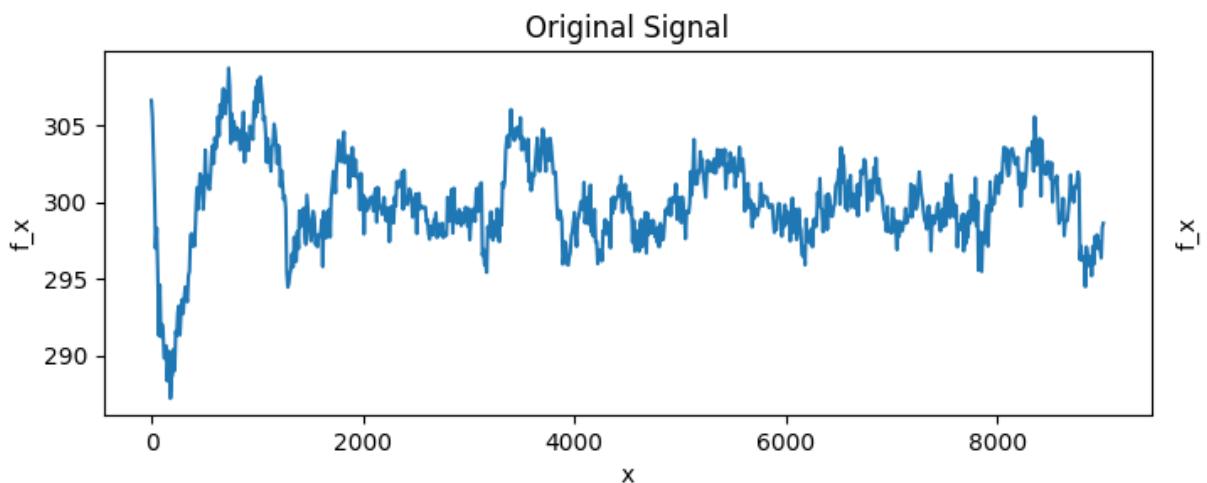


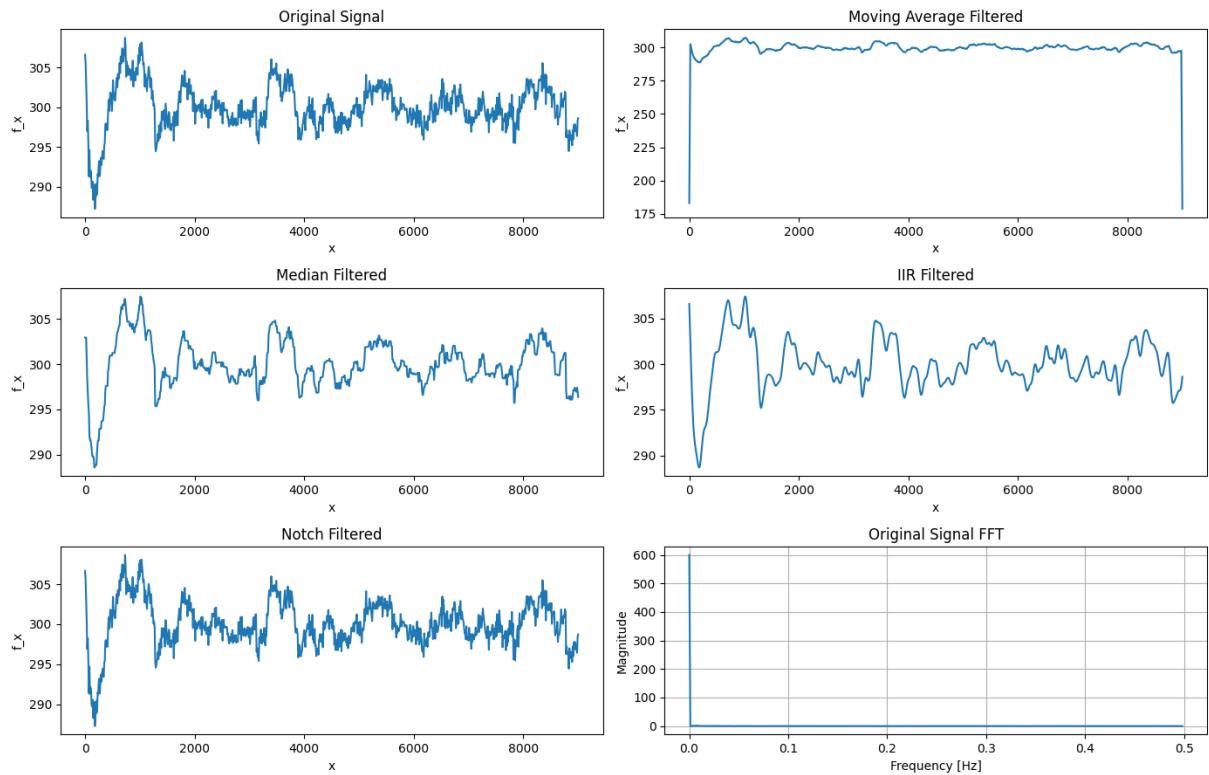
Abbildung 5.2: Verstörtes Signal aus der realen (In der Machine) Impaktreaktion-Simulation

Falls die Daten in Matlab begutachtet werden, wird die Hash-Summe der Datei mittels eines Python-Skripts in der Cloud mit der des lokalen Datensatzes verglichen, um die Integrität sicherzustellen. Anschließend wird das Textdatei wie bei dem verrauschten Signals verwendet, und danach alle Glättungsagenten darauf anzuwenden. Parallel dazu werden die relevanten Metriken bestimmt und die gefilterten Signale zeitlich veranschaulicht.

Die Visualisierung der Daten im Fourierbereich hat wenig an aussagekräftigen reiche Hinweise im Kontrast zu der normalen Betrachtung im Zeitbereich, anhand welcher die Leistung der Filtrierung präzise begutachtet werden kann. Es wird deshalb zudem nur das Signal mit dem höchsten Leistungsindex durch eine FFT-Analyse visualisiert.

5.2.2 Begutachtung von den Glättungsagenten

Die nachfolgende Abbildung modelliert die Strömungen der jeweiligen mit den im vorherigem Schriftteil genannten Filter gefilterte Beinträchtigung dar:



5.2.2.1 Abgleichung zwischen Glättung und Verzerrung

Der Gleitende-Mittelwert-Glättungsagent hat ausgehend von den Metriken die beste Leistung gezeigt. Der Filter neigt aber dazu, das Signal stark zu glätten, wodurch bedeutende Details verloren gehen können. Eine übermäßige Signalglättung kann dazu führen, dass relevante Merkmale verwischt werden, was die Aussagekraft reduziert.

5.2.2.2 Überakzent von der Begutachtung

Obwohl der IIR-Filter das Signal mit geringer Verzerrung filtern kann, besteht die Gefahr, dass er Interferenz und insbesondere Signalspitzen verstärkt. Die Verstärkung kann die Analyse beeinträchtigen und zu falschen Schlussfolgerungen führen.

5.2.2.3 Komplexität und Robustheit

Der Median-Agent, der den Median der Parameter verwendet (nicht zu verwechseln mit dem Mittelpunkt), erweist sich bei dieser Begutachtung als gut

Entscheidung. Er bietet eine moderate Glättung und enthüllt eine hohe Robustheit gegenüber Signalspitzen, die effektiv entfernt werden.

5.3 Realisierung von dem Glättungsagent in TwinCAT

Im nachfolgendem Faden wird die Implementierung des Vorfilters für die Ist-Kraft in Windows-Control beschrieben. Zunächst werden die verschiedenen Ansätze diskutiert und verglichen. Anschließend erfolgt die finale Auswahl und Analyse des Filters. Das Experiment von dem Glättungsoperator in TwinCAT wird danach schrittweise erläutert und durchgeführt.

5.3.1 Debatte von der Begutachtung

Die Debatte von der Begutachtung ist von entscheidender Bedeutung, um Rückschlüsse auf die abschließende Entscheidung, die Relevanz der wichtigsten Merkmale sowie die Tauglichkeit ziehen zu können.

5.3.1.1 Schätzung und Regelgüte

Während SNR und MSE bedeutsame Metriken für die Begutachtung der Idealität der Glättungsmechanismen zu Unterdrückung von Beeinträchtigungen und Interferenz sind, sind sie nicht unbedingt entscheidende Qualifikationen in Gebilden behaftet von Transferstagnation. Im Kontext eines Smith-Schätzers liegt der Fokus auf der Schätzung und der Leerlaufsphasenverdrängung, die direkt zur Verbesserung der dynamischen Regelgüte beiträgt, unabhängig davon, wie gut das Rauschen gefiltert ist.

5.3.1.2 Überaktzen der Schätzung

Obwohl die Dateiltreue der Schätzung nicht stark von der Reinheit des Signals abhängt, würde ein reineres Signal eine bessere Regelung anregen, weil der PID-Bediener als auch der Smith-Schätzer einen integrierenden Anteil enthalten, der algebraisch und algorithmisch auf der Summe der letzten Werte basiert. Eine kompakte Modifikation von dem Integrator kann einen großen Unterschied im Offset anregen, da letztere zusätzlich mit dem Fixwert der Nachstellperiode multipliziert und zu den anderen Werten des D- und P-Anteils addiert wird.

5.3.1.3 Anschließende Entscheidung von dem Glättungsagent

Es werden nicht nur die numerischen Metriken berücksichtigt, sondern auch qualitative Aspekte wie die Erhaltung des Signals sowie die Vermeidung absurde

Spitzen, die der Anwendung und den spezifischen Anforderungen an das gefilterte Signal entsprechen. In mehreren praktischen Begebenheiten ist es wichtig, die qualitativen Begutachtungen der Metriken zu machen, um ein richtiges und anwendungsorientiertes Ergebnis zu erzielen. Die Argumentation kann darauf aufbauen, dass der Smith-Schätzer die Herausforderung auch ohne zusätzliche Filter bewältigt, da er den durch die Leerlaufphase entstehende Versatz kompensiert. Die Schätzung während der Transferstagnation ist von entscheidender Bedeutung, weshalb die Signalqualität nach SNR und MSE in dieser speziellen Anwendung weniger ausschlaggebend ist. Die Wahl des Median-Filters ist deswegen aufgrund der genannten qualitativen Metriken sowie der visuellen Begutachtung gerechtfertigt.

Es wäre aber unangebracht, den Vergleich unabhängig vom Kontext durchzuführen. Die betrachtete Störung wurde aus ihrem Zusammenhang herausgelöst, wobei die Last eindeutig bei 300 N liegt und nicht dem durch den Median-Agent rekonstruierten Signal in **Abbildung 5.1** entspricht. Die gereizten Wechselpendelungen treten in einem Bereich von 15 N auf, was die Abweichung der DMS-Sensoren entspricht. Deswegen könnte die Schwingung als 300-N interpretiert werden. Der Gleitende-Mittelwert-Agent nähert dies am besten an, was visuell jedoch auch in den besten Parameter von SNR und MSE erkennbar ist.

5.3.2 Algorithmus von dem Glättungsagent in IEC61131

Der Gleitende-Mittelwert-Agent, auch als gleitender Durchschnitt bezeichnet, wird zur Glättung von Daten und Messwerten verwendet. Ein zentrales Merkmal ist die sogenannte „Fenstergröße“, die als veränderliche Breite dient und als vordefinierte Array-Größe verwendet wird, um den Mittelparameter ausgehend von:

$$M = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} X_i \quad (3.9)$$

Zu bestimmen. „Gleitend“ leitet sich davon ab, dass der Mittelparameter nicht über einen festen Datensatz berechnet wird, sondern über das eintreffende Signal „gleitet“. Dabei ist die Bestimmung in ausgehend von der Fenstergröße, die die Anzahl der Messwerte definiert, welches eine lokale anstatt einer globalen, Mittelparameterbestimmung erlaubt. Das „Gleiten“ kann durch die bereits realisierte Tauglichkeit von dem Schieberegisters im Smith-Schätzer realisiert werden.

Die Größe von dem Schieberegister wird zunächst zufällig gewählt, da die bei den Simulationsbestimmungen verwendete Fenstergröße nicht final ist. Eine fixe Größe wäre ausreichend, wenn es sich nicht um eine Simulation handelte. Die Veränderung der Array-Größe kann nicht einfach über eine Benutzerschnittstelle erfolgen, da die Schleifenstruktur im Schieberegister vom höchsten Index des Arrays abhängt und der Parameter rechtzeitig geändert werden muss, um Abweichungen zu vermeiden.

Somit Fenstergröße fungiert als Array, das bis zum höchsten Index dehnen oder auf einen Wert von 2 reduziert werden kann. Sie kann jederzeit, auch nach der Ausführung angepasst werden, weil sie in der Schleife von dem Schieberegisters integriert ist. Die Idealisierung vom Parameter ist, wie bei der empirischen Idealisierung von den Regelparametern. In dieser Sachverhalt wurde eine Array-Größe von 12 und eine Fenstergröße von 9 als ideal erachtet, sodass das gefilterte Signal der Vorgabe bestmöglich folgt.

6 Verfizierung

Die Verifizierung am realen Prozess stieß auf mehrere Hindernisse: Erstens wurde laut Aussage von W.m. als ausreichend erachtet, die Leistung der Regelung sowie der einzelnen Bediener ausschließlich mit den bereits durchgeführten Tests zu bewerten. Die Prädiktion basierte auf der Deutung, dass der Prozess lediglich durch kleinere Fehlstellen beeinträchtigt wird, die solche Sprünge verursachen. Die Begründung ist in Verbindung mit dem zweiten **Schriftteil von Faden 5.1** gerechtfertigt.

Die Belastbarkeit der Aussage ist aber begrenzt, da die Tauglichkeit der Schätzung, insbesondere durch den Smith-Schätzer, bei einer Regelung mit einer geringen Abklingphase von weniger als drei Inaktivitätsperioden, wie bei dem diffensiv modifizierten Smith II, wenig feststellbar ist. Wie in **Schritteil 4.1.4** erklärt, hängt die Definition einer Prädiktion von der Existenz einer Folge von Ereignissen ab, die eine Abschätzung des nächsten Ereignisses ermöglichen. Um eine Schätzung mittels des Smith-Schätzers zu ermitteln, ist es ausreichend, die Orientierungsgröße vor der Leerlaufspeiode zu begutachten. Die Schätzung wird durch jede Begutachtung verbessert, wobei jedoch unklar bleibt, nach wie vielen Schritten sie genauer wird und welches Muster die Orientierungsgröße annehmen sollte, um die Schätzung weiter zu präzisieren.

Auch bei den M.A- und M.E-Schätzer müssen mehrere Leerlaufphasen vergangen sein, um eine richtige Schätzung der Last zu erlauben. Bei dem M.e-Schätzer genügen bereits zwei Leerlaufphasen im ersten Schritt, was etwa 600 ms entspricht danach nur eine. Da die Regelung mit Smith II schnell ist und manchmal nur etwa 0,75 bis 0,9 Sekunden benötigt, um abzuklingen, gestaltet sich die Begutachtung der Prädiktion bei Kombination der Schätzeren jedoch auch einzeln als schwierig.

Das zweite Hindernis bestand in einer plötzlichen Belastung der Maschine, die auch von anderen W.ms zur Überprüfungsbestimmungen verwendet wurde. Die zusätzliche Belastung ist planwidrig, da die Deutung der Flächendeckung von der Impaktreaktion-Simulation bereits vor Beginn der Arbeit bestand. Dennoch ist es essenziell, die Tauglichkeit der Schätzeren zu begutachten und die Regelung an ihre Limitation zu bringen. Die Tauglichkeit lässt sich durch eine kontinuierlichen zeitlichen Strömung leicht überprüfen. Um die Regelung aber an ihre Grenzen zu führen, wäre ein alternierender Verlauf oder eine abwechselndes Befugniss erforderlich. Ein alternierender Verlauf stellt im Wesentlichen eine Reduzierung der

Periodendauer zwischen den Sprüngen der vorher simulierten Impaktreaktion dar. Daher wurde beschlossen, eine trigonometrischen Strömung zu verwenden.

Zur dieser Hinblick entwickelte der zuständige W.m. eine sinusförmige CNC-Vorgabe in der Siemens-Steuerung, die ausschließlich auf die X-Richtung, also die Walzkraft des Bauelements, mit einer Amplitude von 600N und einer Periodendauer von 6.5 s basiert, sodass ein Walzablauf nicht notwendig ist, da sich letzterer nur durch die Vorschubbewegung entlang der Z-Richtung unterscheidet. Die nachfolgende Abbildung präsentiert Teil von dem Strom:

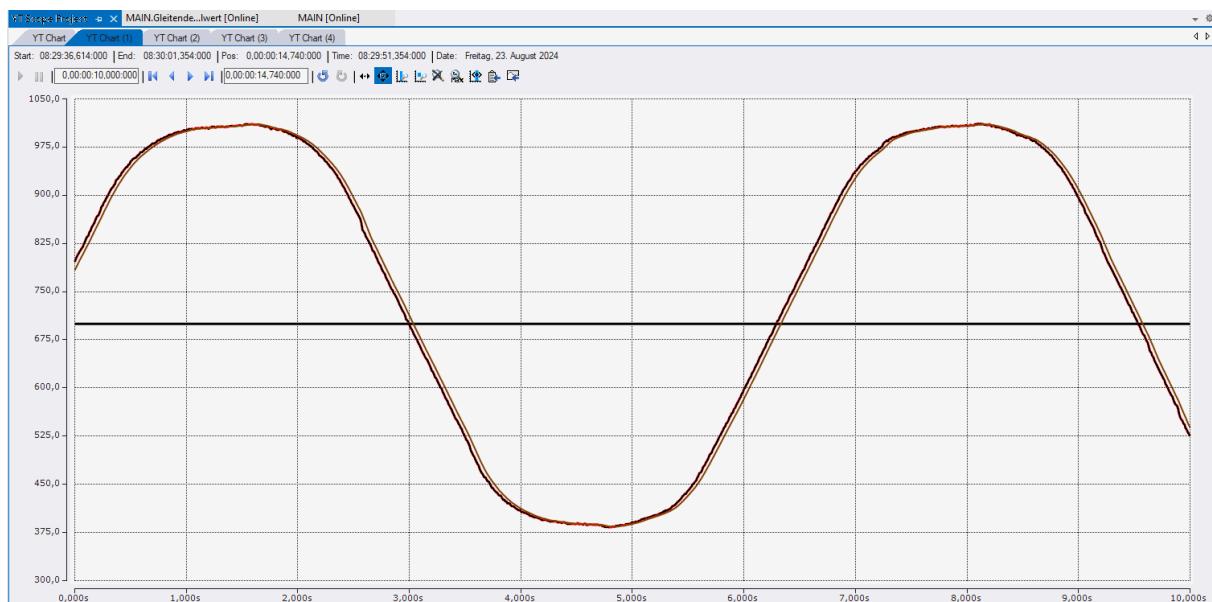


Abbildung 6.1: Ablauf der durch die Steuerung erzwungenen Kraftsänderung

Die gezwungene Strömung in **Abbildung 6.1.** erlaubte, 11 Überprüfungen zu machen sowie zahlreiche Abbildungen und Messwerte zu registrieren. Es wurde beschlossen, aus M.a- und M.e-Schätzern nur den M.e-Schätzer zu testen und auf seinen erheblichen Einsatz mit dem M.a-Schätzer sowie den PID- und Smith-Schätzer momentan umzuplanen, um die Simulation einfach zu halten. Die Arbeitsweise von M.a- und M.o-Schätzer sind im Wesentlichen gleich, da sie sich nur in der Anzahl der verwendeten Messwerte unterscheiden. Der M.a-Schätzer ist wegen des großen Matrixrangs eindeutiger, aber verharrete Prädiktionen mit sich bringen kann.

Um die Validierung zu vereinfachen und die Zeit an der Maschine effizient zu nutzen, wurde der Code bei jedem Bediener, Glättungsagenten sowie den Schätzer in Form

von Aktionen im Hauptprogramm, wie in **Absatz 4.1.2.2** beschrieben, eingereicht. Dadurch kann der Code kompakt und übersichtlich im Hauptprogramm verwendet werden. In jedem Modi ist ein spezifischer Bediener aktiv. Zu Beginn der Main, gerade nachdem die Variablen und Konstanten deklariert werden, werden die Glättungsagenten sowie die Schätzer aktiviert, damit sie in allen Modi arbeiten. Begründet wird letzteres dadurch, dass die beiden Elemente die UPC-UA-Signale verwenden und daher unabhängig („detached“) von den anderen Modi arbeiten. So können sie leichter mit den Hauptreglern zusammenarbeiten.

Um die Konnektierung der Bediener leichter zu machen, wurden bei der Abweichungsbestimmung auskommentierte Konnektierungseinheiten eingesetzt. Die Einheiten repräsentieren die ursprüngliche Fehlerrechnung, sodass statt der Ist-Kraft entweder die Schätzung oder das gefilterte Signal angewendet wird. Da das modifizierte Signal gute Ergebnisse und keine signifikanten negativen Folgen auf die Abklingperiode oder die Vier-Punkte-Metrik hat, wird in den nächsten Verifizierungen ausschließlich das rauschfreie Signal verwendet.

Zuerst wurde die Schätzung von dem echtzeit Schätzers begutachtet:

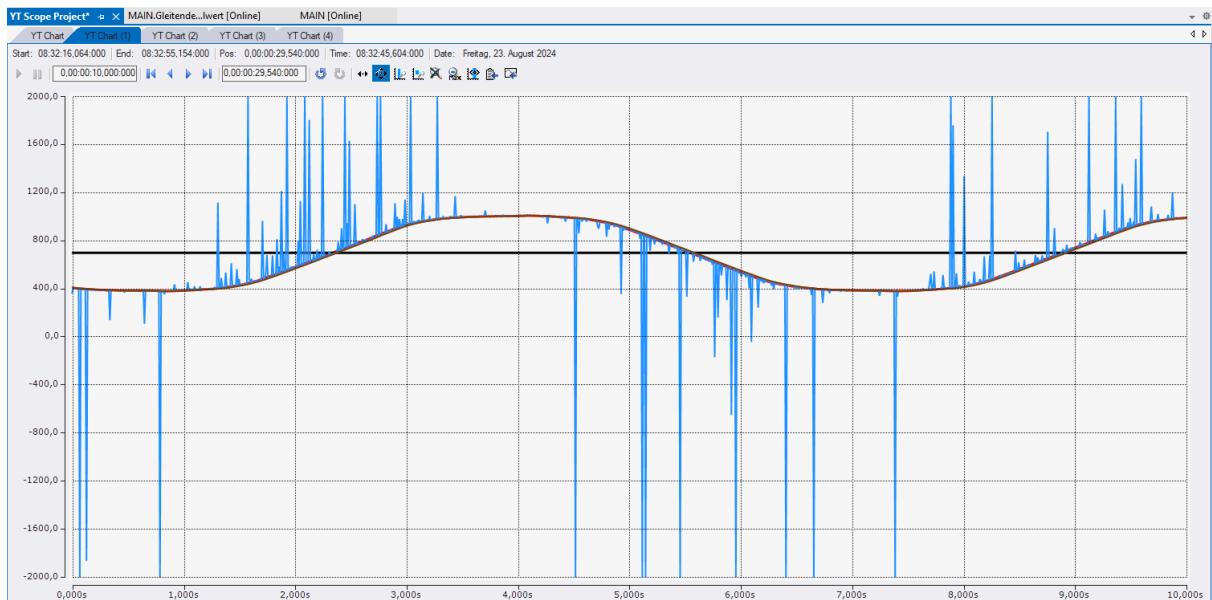


Abbildung 6.2: Echtzeit-Schätzung (Blau)

Der M.e-Schätzer kann die Kraft zwar in den meisten Fällen korrekt vorhersagen, enthüllt jedoch erhebliche Abweichungen auf, die die maximal zulässige axiale Kraft

überschreiten. Dieses Verhalten war zu erwarten, insbesondere aufgrund der Nichtlösbarkeit der Matrix, die durch eine Division durch Null beim Pivot-Element entsteht. Das Problem wird zwar durch die Bernoulli-Einschätzung behandelt, jedoch bleibt die Detailtreu der Schätzung limitiert. Wie in **Schriftteil 4.2.3** erklärt, sollte der M.e-Schätzer trotz dieser Nichtlösbarkeit eindeutige Vorhersagen liefern.

Das zentrale Problem ist aber, dass zukünftige Vorhersagen, die auf solchen beruhen, nicht präzise prognostiziert werden können. Dies äußert sich in den deutlichen blauen Sprüngen in der Abbildung. Bei einer weiter entfernten Betrachtung der kompletten Abbildung lässt sich zudem ein Muster erkennen, das auf ein verrausches Signal hindeutet. Ein solches verrausches Signal kann durch den bereits verwendeten Operatoren geglättet werden. Zunächst wurde der Ausgang von dem Schätzer auf den zulässigen Bereich limitiert, anschließend der Code um einen Gleitenden-Mittelwert-Agent erweitert, der nach der Limitation am Offset installiert wurde. Die resultierende Strömung ist nachfolgend visualisiert:



Abbildung 6.3: Schätzung nach der Streuungsdämpfung und Limitation vom Ausgang

Die Schätzung hat sich wie erwartet verbessert, demonstriert jedoch nach wie vor Fehler, die bis zu 500 N betragen können. Diese Fehler werfen Fragen hinsichtlich

der Tauglichkeit von dem M.e-Schätzer auf. Es ist jedoch bedeutsam zu beachten, dass es sich hierbei um einen Schätzer ohne eigene Regeleinheit handelt. Er kann bis zu 600 ms sehr präzise Prognose für monoton ansteigende und fallende Funktionen generieren, biegt aber nach dieser Spanne zu einer Mittelwertbestimmung ab, die einem Parameter entspricht, der etwa 300 ms zuvor aufgetreten ist.

Der M.e-Schätzer stößt an seine Limitationen, wenn er erkundet, ein Signal direkt bei einem Zeitpunkt einzuschätzen, der um 300 ms in der Zukunft liegt. Präzise wird der M.e-Schätzer nur, wenn ein Zwischenschritt vernachlässigt wird und eine Einschätzung gemacht wird, die dann durch Mittelwertbildung wieder in die Vergangenheit „zurückkehrt“. Bei einem generalisierten Schätzer wird zur Generierung einer $n \times n$ -Matrix eine Anzahl von $n+1$ Elementen aus der Vergangenheit benötigt.

Empirisch und durch mehrere Begutachtungen mit Python wurde verifiziert, dass die Eindeutigkeit der Prognose nur dann steigt, wenn das ***n-te*** Wert, das nach ***n-tem*** Schritt auftreten würde, direkt vorhergesagt wird. Die Begutachtung der ***(n-i)-ten*** Werte, wobei ***i < n***, mit den erwarteten Werten hat gezeigt, dass letztere lediglich als Hilfswerte für die ***n-te*** Prognose dienen. Sie stimmen nur selten mit den erwarteten Werten überein.

Es wurde aber ein Muster erkannt: Der einzuschätzende Parameter ist der Mittelpunkt aus dem zweiten prognostizierten Wert und dem zweiten echten Parameter, der zur Heilung der Matrix verwendet wurde. Das bedeutet, dass der ***(n-k)-te*** Wert, mit ***k < n***, bis zum Ende des ***n-ten*** Schrittes des Horizonts prognostiziert werden sollte. Anschließend wird der ***(n-k)-te*** Wert durch den Mittelpunkt des ***n-ten*** prognostizierten und ***(n-k)-ten*** richtigen Wertes berechnet, womit die $n \times n$ -Matrix mit ***n+1*** echten Messungen geheilt ist.

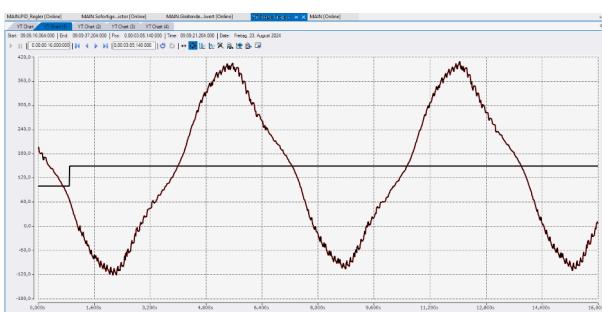


Abbildung 6.4: *PID-Bediener mit suboptimalen PID-Werten in extremen Bedingungen*

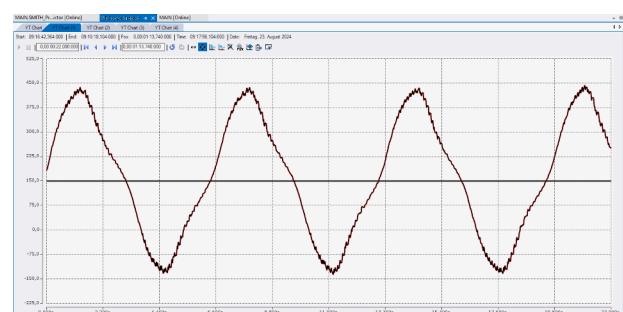


Abbildung 6.5: *PID-Bediener mit diffensiven PID-Parameter in extremen Bedingungen*

Die Abbildungen 6.4, 6.5, 6.6 und 6.7 veranschaulichen PID-Bediener und der Smith II mit den suboptimalen Werte aus Tabelle 2 und auch mit den schnellen diffensiven Parametern aus Tabelle 7.

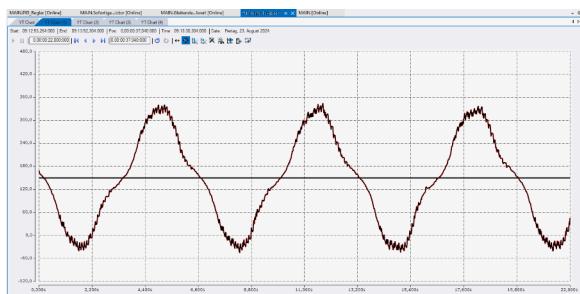


Abbildung 6.6: Smith II mit suboptimalen PID-Werten in extremen Bedingungen

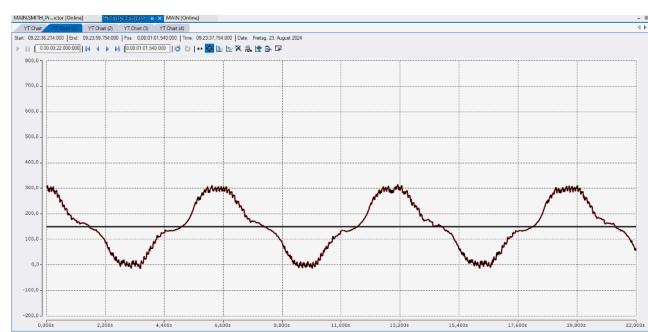


Abbildung 6.7: Smith II mit diffensiven PID-Parametern in extremen Bedingungen

Alle Bediener sowie der M.e-Schätzer verwenden ausschließlich das gefilterte Signal der Ist-Kraft. In der oberen Abbildung ist es aufgrund der ähnlichen Verläufe schwierig, die Leistung der Regler zu bewerten. Um die Unübersichtlichkeit zu beheben, wurden die Signale durch ihre absoluten Fehler zur Vorgabewert quantifiziert. Bei allen Messungen wurde aus den letzten fünf Schwingungen jeweils die Schwingung ausgewählt, die die schlechteste Leistung zeigt. Die Schwingung bildet die Grundlage für die Bewertung in "Worst-Case-Szenario":

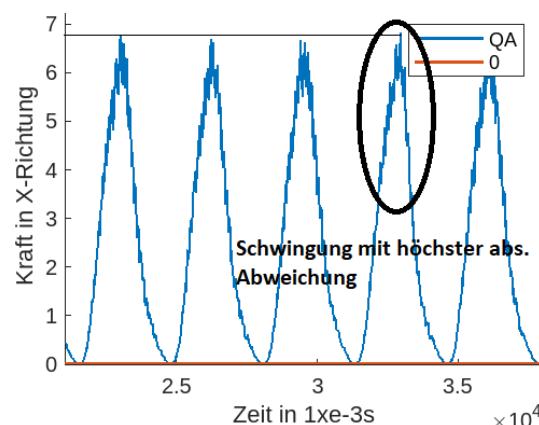


Abbildung 6.8: Ausgewählte Schwingung für die „Worst-Case-Scenario“-Analyse

Die ausgewählte Schwingung wird ausgedehnt und mittels der Vier-Punkte-Metrik (siehe **Schriftteil 4.1.5**) begutachtet. Die nachfolgende Tabelle enthält die mit zuletzt erwähnten Metrik ermittelten Messwerte:

Arbeitspunkt und hori. Kennlinie		Bediener			
AP	A	PID		Smith II	
		Weite in s von		Weite in s von	
		Q-Ideal	Ag-Ideal	Q-Ideal	Ag-Ideal
0	0 N	3,3	3,24	3,3	3,14
1	+100 N	2,08	1,53	2,12	1,44
2	+150 N	1,55	1,08	1,77	0,79
3	+200 N	1,04	0	1,15	0
4	MAX	261 N	-	285,182 N	-

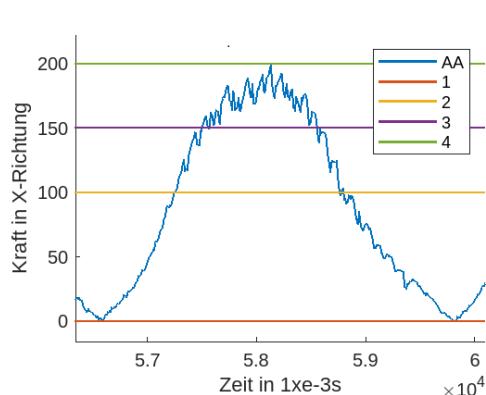


Abbildung 6.9: AA. Von dem PID-Bediener mit diffensiv-idealen Parameter in extremen Bedingungen

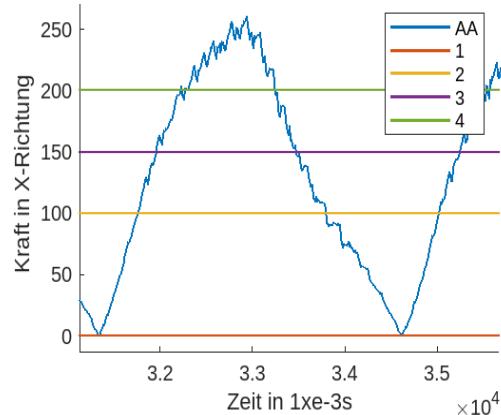


Abbildung 6.10: AA. von PID-Bediener mit sub-optimaler Konfiguration in extremen Bedingungen

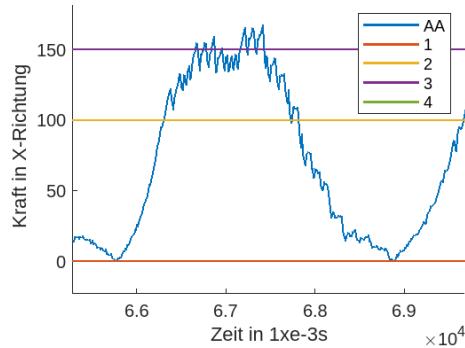


Abbildung 6.12: AA. von Smith II mit diffensiv-idealen Parameter in extremen Bedingungen

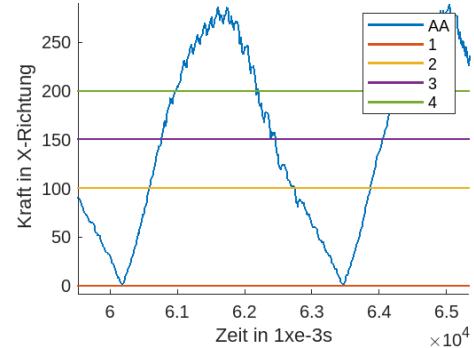


Abbildung 6.11: AA. von Smith II mit sub-optimaler Konfiguration in extremen Bedingungen

Auch ohne einen rechnerischen Begutachtung nach **Gleichung 3.80** zu ziehen, ist es relativ einfach zu erkennen, dass die Bediener mit den diffensiv modifizierten Parametern überlegen sind (vergleiche **Spalte 4** und **Spalte 6** mit den anderen Spalten). Letztere überschreiten nicht einmal die letzte 200-N-Kennlinie. Für die fünfte Spalte gilt:

$$M_5 := 1 \cdot 3,24 \text{ s} + 0,6 \cdot 1,53 \text{ s} + 0,3 \cdot 1,08 \text{ s} = 4,482 \text{ s} \quad (3.9)_1$$

und für die siebte Spalte:

$$M_7 := 1 \cdot 3,14 \text{ s} + 0,6 \cdot 1,44 \text{ s} + 0,3 \cdot 0,79 \text{ s} = 4,241 \text{ s} \quad (3.9)_2$$

Der Smith-II-Bediener mit diffensiv regulierten PID-Parametern exemplifiziert nach obiger Bestimmung eine gute Leistung. Die Sequenz **{1.; 0,6; 0,3}** stellt dabei die Einstufung der Messparameter in Prozent dar, die, wie im letzten Vier-Punkte-Metrik-Begutachtung, bei zunehmender Entfernung von der 0-N-Kennlinie abnehmen. Im Kontrast zur letzten Begutachtung mit der gleichen Metrik ist der Anfangspunkt aber veränderlich, d.h. er hängt vom Schnittpunkt mit der jeweiligen horizontalen Kennlinie ab. Im ungeregelten Begebenheit ändert sich die Last maximal um 620 N, d.h. 310 N über und unter der Orientierungsgröße. Bei den beiden diffensiv regulierten Bedienern weicht die Last maximal um niedriger als 200 N ab d.h. 100N über und unter der Orientierungsgröße, was auf eine gute Leistung hindeutet. Ebenfalls ist es wichtig zu berücksichtigen, dass sich der sinusförmige Verlauf auf die Auslenkung

und nicht auf die Sollmaß bezieht, da die Steuerung den X-Ausschlag so regelt, dass die Kraft einer sinusförmigen Änderung des Bauteilradius ähnelt. Wenn sich der Querschnitt innerhalb von drei Sekunden (siehe **Abbildung 6.1**) so verändert, dass die Last von 380 N auf 1000 N ansteigt, entspricht dies bei den verwendeten Bauelementgeometrien einem maximalen Anstieg von etwa 0,31 cm. Bereits ein Versatz von 0,05 mm aktiviert einen Impakt (siehe **Abbildung 2.7**), weshalb der Versatz als zu groß zu sehen ist.

Die Smith II und PID-Regler mit diffensiven Parametern, sind in der Lage, mehr als 65 % von dem Anstiegs zu dämpfen, was in Bezug auf die Größe des Versatzes als gute Kompensation betrachtet werden kann. Als nächstes wird der Schätzer mit dem Bediener zusammenarbeiten:



Abbildung 6.13: M.E-Schätzer und PID mit idealen diffensiven Parameter



Abbildung 6.14: M.E-Schätzer mit idealen diffensiven Parameter

Wie in den obigen Abbildungen zu sehen ist, zeigt die Kraft scharfe Wechselpendelungen, was die Übersichtlichkeit der Ergebnisse beeinträchtigt. Die Begutachtung anhand der absoluten Abweichung und der vier horizontalen Kennlinien gestaltet sich auch in dieser Sachverhalt, wie in der nächsten Abbildung zu sehen, als schwierig. Daher wird stattdessen der Durchschnitt der quadratischen Abweichung ermittelt, um die Leistung der Bediener besser begutachten zu können. Zusätzlich wurden die Tests um zwei weitere Testläufe erweitert, bei denen der Offset der Bediener mitteks eines Glättungsagent geglättet wurde, um zu überprüfen, ob dieser Ansatz zur Reduzierung der Wechselpendelungen führen könnte. Wie in der Tabelle zu erkennen ist, war die Filtrierung des Offsets nicht zielführend (siehe Zeilen 2 und 4 rechts). Bei der vollständigen Konnektierung des M.e-Schätzer mit dem PID-Bediener wurde eine bessere Leistung als bei der Konnektierung mit dem Smith II gemerkt.

Tabelle 10: Zusammenarbeit von dem M.E-Schätzer mit PID und Smith II in extremen Rahmbedingungen

Bediener	Mittlere Quadratische Abweichung MQA in N ²	
M.E-Schätzer und PID-Bediener mit diffensiven	Normal Offset	20168,9934
	Filtrierte Offset	22649,3997
M.E-Schätzer und Smith II mit ag-Parameter	Normal Offset	23382,8389
	Filtrierte Offset	25647,1092

Es ist jedoch zu beachten, dass die Begutachtung auf der quadratischen Abweichung basiert und nicht auf einer visuellen Vergleich. Vergleicht man **Abbildung 6.13** mit **Abbildung 6.14**, so erkennt man, dass der Smith II die Kraft dazu bringt, der Orientierungsgröße besser zu folgen als der PID-Bediener, was besonders an den Maxima von den Strömgen zu bemerken ist. Zwar oszilliert der Smith II stärker, jedoch behält er seine Orientierung.

Das globale Maximum von dem Smith-Schätzer, mit und ohne M.E-Schätzer, erreicht niedrigere Werte als der PID-Bediener. Die vergleichsweise schlechtere Leistung von dem Smith-Schätzer bei der Begutachtung ist auf die erheblichen Wechselpendelungen zurückzuführen. Der PID-Bediener zusammen mit dem M.E-Schätzer übertrifft den Smith II mit dem M.E-Schätzer um 21.213,8455 N², was einer Differenz von 145,649 N innerhalb einer Minute entspricht. Über 20 Schwingungen pro Minute verteilt, ergibt dies eine Abweichung von 7,28 N, was unterhalb des Abweichungsbereichs von 15 N liegt, den die DMS-Sensoren erfassen. Daraus lässt sich schließen, dass die Bediener nahezu gleiche Leistungen bei der vollständigen Konnektierung mit dem M.E-Schätzer in den harten Rahmbedingungen erbringen. Beide Bediener sind in der Lage, etwa 67 % der durch erzwungene geometrische Änderungen bedingten Abweichungen aufzuheben, was den Einsatz von dem M.E-Schätzers trotz der bereits erwähnten Probleme bei der Schätzung erweist.

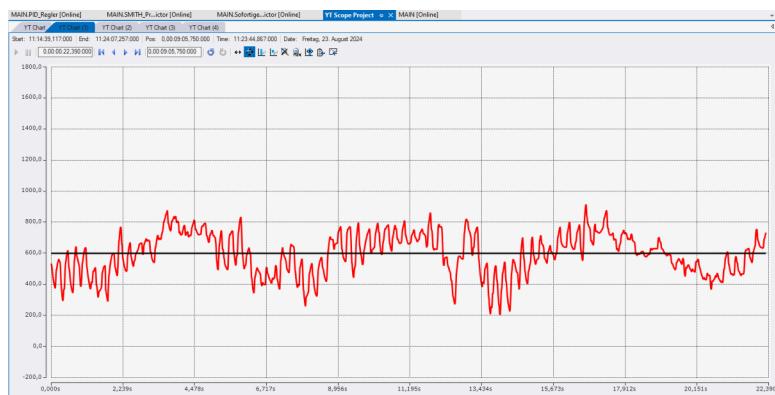
In der Begebenheit von dem Smith-Prädiktor spielte die originelle Kraft keine wichtige Rolle bei der Abweichungsbestimmung, da die Prädiktion durch den Schätzer die

Prädiktion der virtuellen Strecke stört. Es ist deswegen schwierig zu beurteilen, ob eine Kombination aus der Prädiktion der memitierten Strecke und dem M.E-Schätzer zu einer verbesserten Leistung führen könnte. Zur Überprüfung wurde deshalb ein zusätzlicher Verifizierung durchgeführt, bei dem die Schätzung durch den M.E-Schätzer nicht den Haupteinfluss auf dem Fehler ausübt, sondern in Kombination mit der imitierten Struktur ausgehend von der **Gleichung 3.93** verwendet wird:

$$\epsilon_x := \frac{1}{2} \cdot [(Sc - F_{30}) + (f_x - F_0)] \quad (3.9)$$

ϵ_x : Abweichung, Sc : Schätzung, F_i : Prädiktion der Strecke.

Das bedeutet, dass statt sich ausschließlich auf die Schätzung von den M.A-Schätzer zu verlassen, wird der Mittelpunkt aus denen und Schätzung der memtisierten Struktur gebildet und in die Abweichung einfließen. Die Methode enthüllt nach der Verifizierung nachfolgendes Ergebnis:



Es ist erkennbar, dass die Kurve nach wie vor Wechselpendelungen zeigt, jedoch in Abgleichung zu den vorherigen Tests ruhiger abwackelt und näher an der Orientierungsgröße liegt. Die zwangsbedingten An- und Abfälle der Kurve sind wenig noch bemerkbar. Der Durchschnitt der quadratischen Abweichungen bestärkt die visuelle Einschätzung mit einem Leistungsindex von 14.468,6744 N², was im Abgleich zur besten Kombination aus dem PID-Bediener und dem M.E-Schätzer aus dem letzten Test eine Verbesserung von 28,26 % bedeutet.

7 Zusammenfassung

Die Arbeit behandelt die Idealisierung von Regelungstechniken zur Verbesserung des Walzprozesses, insbesondere zur Bewältigung von Transferstagnation und externen Beeinträchtigungen. Ein zentraler Ansatz ist der Einsatz von dem Smith-Schätzer, der die durch Schnittstellenlatenzen verursachten Verzögerungen verdrängt, indem er den Prozess imitiert und so eine präzisere Regelung erlaubt. In Kombination mit einem PID-Bediener explodiert sich die Memorisierung als besonders tauglich. Simulationen mit Simulink und TwinCAT bestätigen die Ergebnisse.

Zwei innovative Schätzer sind im Rahmen der Arbeit entwickelt: der M.A-Schätzer (Mittelparameter-Asynchron-Schätzer) und der M.E-Schätzer (Mittelwert-Echtzeit-Schätzer). Beide Schätzer arbeiten parallel zur Steuerung und verbessern die Reaktionstauglichkeit von dem Prozess bei Störungen. Der M.A-Schätzer optimiert die Walzkraft durch die Berechnung asynchroner Eingangssignale, während der M.E-Schätzer Echtzeitmessungen verwendet, um die Regelparameter dynamisch zu modifizieren. Die Verifizierung dieser Ansätze erfolgt durch Tests und Simulationen, die ihre Tauglichkeit bei der Minimierung von Totperioden und der Erhöhung der Stabilität im Prozess sicherstellen.

Ein weiteres zentrales Thema der Arbeit ist die Beeinträchtigungsunterdrückung. Unterschiedliche Filtertechniken wurden implementiert, um externe Beeinträchtigung zu reduzieren und die Stabilität zu verbessern. Auch hier werden die entwickelten Methoden in TwinCAT getestet und liefern versprechende Ergebnisse. Besondere Aufmerksamkeit wird der Verifizierung von dem M.E-Schätzer gewidmet, der sich als besonders tauglich für die Heilung von Systemen bei der Schätzung mittels Bernoulli-Schätzung und der Zwei-X-Methode erwiesen hat. Diese Methoden erlauben eine schnelle und präzise Bestimmung bei nichtlösbarer Matrizen, insbesondere in 2x2-Systemen. Der Schätzer stellt somit eine ideale Erweiterung der Regelungstechniken dar und zeigt sich als das beste Verfahren zur Steuerung von Prozessen mit Inaktivitätsphasen. Insgesamt bestätigt die Arbeit, dass die Kombination aus Smith-Schätzer, PID-Regler und den neuen Schätzern (M.A- und M.E-Schätzer) eine überwiegende Verbesserung von Leistung erlaubt. Diese innovativen Ansätze tragen dazu bei, Transferstagnation zu minimieren und externe Beeinträchtigungen effektiv zu unterdrücken, was die Qualität und Produktivität von dem Walzprozesses erheblich steigert.

8 Literaturverzeichnis

Zeitschriftenaufsatz

- [LAM24] [Lamjahdi, Mohamed El Mami, Zwei-X-Methode \(2024\).](#)
- [DEN23] Denkena, B., Klemme, H., Berlin, J.: (2023): [Festwalzen – Prozesssicher dank Walzkraftregelung](#), Industrie Anzeiger (2023), Nr. 6, S. 62-64.
- [DEN22] Denkena, B., Klemme, H., Berlin, J., Maiss, O., Dove, M.: (2022): [Prozessregelung beim mechanischen Festwalzen](#), dima (2022), Nr. 3, S. 60-61.

Konferenzen

- [HUA00] Jih-Jenn Huang & Daniel B. DeBra Automatic Tuning of Smith-Predictor Design Using Optimal Parameter Mismatch, TIB Online
- [HUA97] Jih-Jenn Huang & Daniel B. DeBra, Liquid Temperature Control for a Hydraulic Turning Machine (1997), TIB Online.
- [AST93] K.J. Aström, T. Higglund*, C.C. Hang** and W.K. Ho, Automatic Tuning and Adaptation for PID-Controllers – A Survey, TIB Online
- [MAR86] J. E. Marshall and K. Walton, A Review of analytical methods for control of time-delay systems

Buch

- [POP21] Popula, A. (2021), Mathematik für Ingenieure, Band 2 und 3.
- [MAR17] Martin Werner, Nachrichtentechnik, 8.Auflage (2017) TIB Online.

- [LUN16] Jan Lunze, Regelungstechnik 2, 9. Auflage TIB Online.
- [NOR15] Norman S. Nise, Control Systems Engineering, 7. Edition (2015).
- [FAR09] Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems, 9. Edition (2009)
- [KAT97] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering (1997), Library of Congress, Cataloging-in-Publication Data.

Vorlesung

- [MUL23] Matthias Müller, Tosten Lilge. Veranstaltungen, Vorlesungsfolien Regelungstechnik 1, 2, Leibniz Universität
- [SAM17] Sami Haddadin, Tosten Lilge. Vorlesungsfolien Regelungstechnik 1, 2, Leibniz Universität Hannover.
- [OBE13] Hans Joachim Oberle, Vorlesungsfolien, 7. Approximation periodischer Funktionen, Universität Hamburg.
- [OMR09] Ahmed Omran, Vorlesungsfolien, Grundlagen der Lagrange-Mechanik (2009), Technische Universität München

9 Bestätigung der Erfüllung der Abgabeanforderungen

Hiermit bestätigen Herr/Frau _____ (Name des Studierenden) und Herr/Frau _____ (Name des Betreuers), dass die nachfolgenden Anforderungen zur Abgabe der Abschlussarbeit vollständig erfüllt sind:

1. Form der Abgabe:

- Die Abschlussarbeit wurde in zweifacher, gedruckter Ausfertigung eingereicht:
 - Ein Exemplar in Leimbindung, welches das Original der Aufgabenstellung enthält.
 - Ein Exemplar in Spiralbindung, welches eine Kopie der Aufgabenstellung enthält.
- Beide Exemplare der Arbeit enthalten eine unterzeichnete und mit der internen Nummer versehene Aufgabenstellung.

2. Elektronische Abgabe:

- Der Abschlussarbeit wurde eine CD beigelegt, die die folgenden Dateien enthält:
 - Die Arbeit im **PDF- und DOCX-Format**.
 - Weitere erstellte Dateien im Originalformat (z.B. XLSX, PPTX, JPEG, etc.).
 - Rohdaten von Experimenten oder Simulationen.
- Alle Daten, insbesondere große Dateien wie Simulations- oder Messdaten, wurden in Absprache mit dem Betreuer ebenfalls auf dem IFW-Server abgelegt.

3. Qualität der PDF-Datei:

- Es wurde sichergestellt, dass die PDF-Datei eine hohe Bildqualität aufweist, sodass Abbildungen und Grafiken deutlich lesbar sind. Abbildungen wurden bei der Erstellung der PDF-Datei nicht komprimiert, um die bestmögliche Qualität zu gewährleisten.

Ort: _____

Datum: _____

Unterschrift des Studierenden: _____

Unterschrift des Betreuers: _____