# Bedienungsanleitung | Beispiele | Übungen



**HS-Rosenheim** 

Dienstag, 29. März 2022

### Gliederung der Dokumentation

ENT	ENTSPANNEN UND DURCHATMEN!			
EINF	FÜHRUNG	4		
	ÜBER PZMOVE	4		
	PROGRAMMSTRUKTUR /-AUFBAU	4		
INST	FALLATION UND VERWENDUNG	5		
	GRUNDSÄTZLICHES ZUR VERWENDUNG	5		
	PZMOVE ALS "STANDALONE"	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.		
	PZMOVE ALS MATLAB-FUNKTION	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.		
ALL	GEMEINE BEDIENELEMENTE	6		
	TITELLEISTE / PROJEKTBEZEICHNUNG	6		
	MENÜLEISTE	6		
	AUSWAHL DER FUNKTIONSMODULE	7		
EINS	STELLUNGEN / SETTINGS	20		
	ÜBERBLICK DER EINSTELLUNGSPARAMETER	20		
GRA	AFISCHE OBERFLÄCHE	8		
1.	FUNKTIONSMODUL "SYSTEM ANALYSIS"	10		
	PZMAP	10		
	Signal-Plan	10		
	ERGEBNISDARSTELLUNG	11		
	EINGABEBEREICH FÜR ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN	12		
2.	FUNKTIONSMODUL "CONTROLLER DESIGN"	14		
	DECKUNGSGLEICHE FUNKTIONSFLÄCHEN	14		
	SIGNALPLAN	15		
	REGLERENTWURF	15		
	EINGANGSKONFIGURATION	16		
•	AUSGANGSKONFIGURATION	16		
3.	FUNKTIONSMODUL "IDENTIFICATION"	18		
	Unterschied zu Analysis und Design	18		
	DATENIMPORT	18		
	FUNKTIONSIDENTIFIKATION ERGEBNISDARSTELLUNG	19 19		
	GEWICHTUNGSEINSTELLUNGEN	19		
	TERGRÜNDE, BEISPIELE UND ÜBUNGEN	21		
EINF	ÜHRUNG (HINTERGRÜNDE, BEISPIELE UND ÜBUNGEN)	21		
PZ <b>M</b> A	NP	22		
	PZMAP – BACKGROUND	22		
	ÜBUNG: ERSTELLEN EINER ÜBERTRAGUNGSFUNKTION (MITHILFE DER PZMAP)	24		
SIGN	AL-PLAN	25		
	BACKGROUND:	25		
	DARSTELLUNGSFORMEN DES SIGNAL-PLANS	26		
	ÜBERBLICK ÜBER EINEN VOLLSTÄNDIGEN REGELKREIS IN SIGNAL-PLAN AUFLISTUNG DER VERFÜGBAREN ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN	26		
	VERÄNDERUNG BEI DER KASKADENREGLUNG	27 29		
	ÜBUNG: EINGABE VON ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN OFFENER SYSTEME (SYSTEM ANALYSIS)	30		
Wiee	ENSWERTES ZU DEN PLOTS	32		
**133	ÜBERSICHT	32		
	NYQUIST PLOT	33		
	BODE DIAGRAMM	34		
	ANTWORTVERHALTEN	35		
	ÜBUNG: GERADEN-APPROXIMATION DES BODE-DIAGRAMMS	36		
	ÜBUNG: NYQUIST KRITERIUM (STABILITÄT DES RÜCKGEKOPPELTEN SYSTEMS)	39		
REGI	ERSYNTHESE MIT PZMOVE	43		
	Background	43		
	REGLERSYNTHESE MIT PZMOVE	44		

ÜBUNGSBEISPIEL: ZIEGLER-NICHOLS VERFAHREN	45
ÜBUNG: MANIPULIEREN DER POL- UND NULLSTELLEN (AM BEISPIEL DES DOMINIERENDEN POLPAARES)	50
MINIMALBEISPIEL: EIGENER IDENTIFIKATIONSVERSUCH	53
ANWENDUNGSBEISPIEL EINFÜHRUNG IN DIE WERKZEUGSYSTEMATIK VON PZMOVE	<u>58</u> 58

# **Entspannen und Durchatmen!**



Über diese Bedienungsanleitung

Der Umfang dieser Anleitung erscheint auf den ersten Blick sehr umfangreich doch...

Diese Bedienungsanleitung soll dem Bediener von pzMove, helfen das volle Potenzial der Lehrsoftware nutzen zu können.

Schaltflächen, Funktionsbereiche und Eingabefelder erklären.

Jedes dieser Elemente füllt so einige Seiten.

Ebenso Umfang dieser Bedieneranleitung sind **Beispiele und Übungen** um sich auch jenseits von Vorlesungen und regelungstechnischer Praktika mit der Software vertraut zu machen. Die Übungen führen hierbei über einfache Beispielrechnungen bis hin zu ehemaligen Prüfungsaufgaben der TH-Rosenheim und sind als pädagogische Erweiterung der bloßen Bedienerdokumentation zu verstehen. All das in einem Dokument lässt sich leider nicht in 10 Seiten zusammenfassen.

Niemand verlangt, dass diese Bedienungsanleitung in einem "Rutsch" durchgearbeitet wird.

Machen Sie sich mit der Installation, den allgemeinen Elementen und den grafischen Oberflächen bekannt und versuchen Sie dann die Übungen zu bearbeiten. Sie werden sehen vieles kommt Ihnen bereits bekannt vor und eventuell benötigen Sie ja nur ein Bruchteil dieser Anleitung, bis sie zum pzMove-Experten geworden sind.

#### Für Abkürzer und Praktiker



Wer einfach nur einmal pzMove in Aktion sehen möchte, ohne tieferes Verständnis der einzelnen Schaltflächen dem sei das Einsatzbeispiel der Software ans Leserherz gelegt:

⇒ Link zum Anwendungsbeispiel

Abschließend bleibt uns nur Ihnen viel Spaß beim Lesen dieser Anleitung zu wünschen!

# Einführung



pzMove als Lehrsoftware der Regelungstechnik

### Über pzMove

"Um effiziente Regelsysteme [...] zu entwickeln, brauchen Entwickler umfangreiches regelungstechnisches Hintergrundwissen. Das [...] zu entwickelnde Matlab Tool soll den Benutzer unterstützen, grundlegende Sachverhalte und Zusammenhänge, z.B. Stabilität von Systemen, zu verstehen und später anwenden zu können."

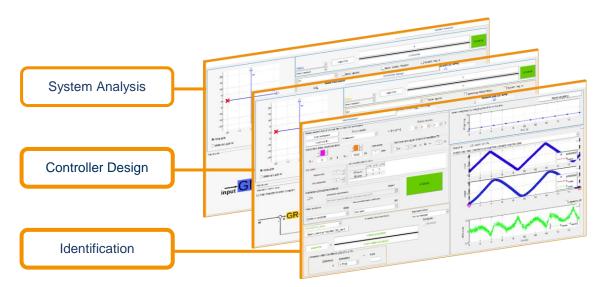
Das obenstehende Zitat stammt von Herrn Fabian Tutschka und ist Teil der Einleitung in seiner Bachelorarbeit über das damals (2012) noch in der Entwicklung stehende pzMove. Seit diesem Entwicklungsbeginn hat pzMove zwar stetig "dazugelernt" und sein Funktionsumfang ist beträchtlich gewachsen, aber die Grundidee hinter pzMove ist geblieben.

Ein Werkzeug das aufbauend auf die verschiedenen regelungstechnischen Toolboxen in MATLAB und SIMULINK, den Studenten unterstützen soll und ihm hilft, grundlegende Sachverhalte zu bearbeiten und zu verstehen.

### Programmstruktur /-aufbau

pzMove ist eine klassische grafische Bedieneroberfläche (GUI) basierend auf objektbasiertem MATLAB-Code und setzt sich grundlegend aus einer allgemeinen Rahmenstruktur und 3 themenspezifischen Funktionsmodulen zusammen. Diese Funktionsmodule seien wie folgt:

Funktionsmodul	Thema
- System Analysis	Regelungssysteme ohne Rückführung
- Controller Design	Regelungssysteme mit Rückführung und Störgrößen
- Identification	Identifikation fremder, teilweise unbekannter Regelungsstrecken



Die Funktionsmodule von pzMove in der Rahmenstruktur der Applikation

# Installation und Verwendung



Was, Woher, Wofür und Wieso

### Grundsätzliches zur Verwendung

Egal ob pzMove in MATLAB online oder local als m.-Funktion verwendet wird, so gilt grundsätzlich, dass das Tool für Lehr- und Übungszwecke entwickelt wurde. Bei Anmerkungen, Bugs oder Verbesserungsvorschlägen wenden Sie sich bitte an das Labor für Regelungstechnik an der TH-Rosenheim oder an den Projektleiter Herrn Prof. Dr. Zentgraf.

Prof. Dr. P. Zentgraf - peter.zentgraf@th-rosenheim.de

# Allgemeine Bedienelemente



Titel- und Menüleiste

### Titelleiste / Projektbezeichnung



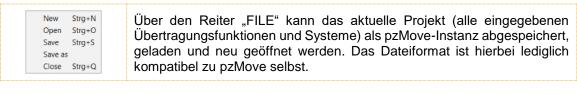
Die Titelleiste setzt sich durch den Anwendungstitel, in diesem Fall "pzMove" und den Projektnamen zusammen. Mit den allgemeinen Funktionsflächen am rechten Rand lässt sich die Anwendung minimieren, maximieren oder schließen.

#### Menüleiste

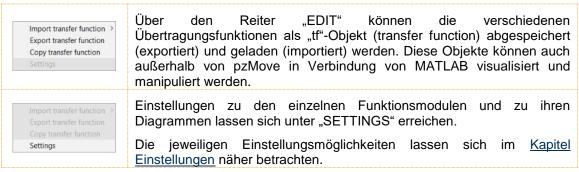


Die Menüleiste unterteilt sich in die Schaltflächen "FILE", "EDIT" und "HELP".

#### FILE:



#### EDIT:



#### HELP:



# Allgemeine Bedienelemente



Oberflächenauswahl

#### Auswahl der Funktionsmodule



pzMove setzt sich aus 3 grundlegenden und nach Themen unterschiedenen Funktionsmodulen (eigenständige Bedieneroberflächen) zusammen. Jedes Funktionsmodul kann über die Auswahlleiste und die jeweilige Schaltfläche erreicht werden.

#### - Identification

Das Funktionsmodul "Identification" behandelt die Identifikation einer unbekannten Regelstrecke mithilfe aufgezeichneter Messdaten.

"Identification" befasst sich weniger mit dem Grundverständnis regelungstechnischer Übertragungsfunktionen, sondern ist als ein eher spezifisches Werkzeug für Praktikumsversuche und Ingenieurs-/Masterprojekte konzipiert.

#### - System Analysis

Zu Programmstart wird das Funktionsmodul "System Analysis" automatisch aufgerufen und aktualisiert. "System Analysis" dreht sich um alle Übertragungsfunktionen (Regler (GR), Strecke und Streckenmodell (GS, GM)) die im späteren "Controller Design" zu vollständigen Regelsystemen zusammengefügt werden können.

Mithilfe von "System Analysis" lassen sich die einzelnen Übertragungsfunktionen für sich genommen analysieren und auf ihre Stabilität und ihr Antwortverhalten untersuchen.

#### - Controller Design

Das Funktionsmodul "Controller Design" ermöglicht es aus den einzelnen Übertragungsfunktionen einen vollständigen Regelungskreis zu formen und über verschiedene Reglerauslegungsmethoden das Regelverhalten zu beeinflussen.

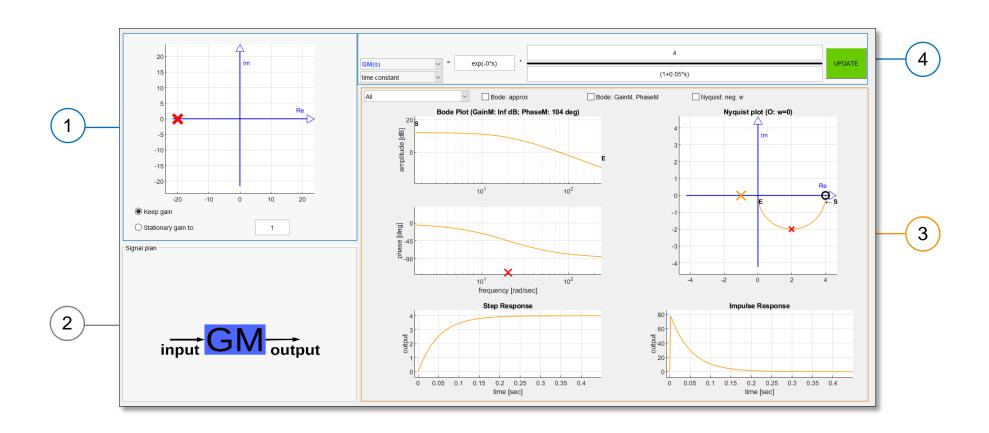
"Controller Design" greift dabei auf die gleichen Übertragungsfunktionen zurück wie "System Analysis". Alle Änderungen an den Übertragungsfunktionen werden auch von "System Analysis" auf "Controller Design" und umgekehrt übernommen.

Ein Überblick über die Funktionsmodule





Funktionsmodul: System Analysis

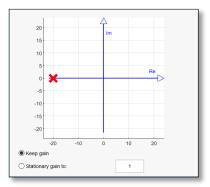




# 1 Funktionsmodul "System Analysis"

Detailvorstellung zu den einzelnen Bedienelementen, Schaltflächen und Plots des Funktionsmoduls "System Analysis".

### pzMap



pzMap mit einer Polstelle (bei s = -20)

Im Feld [1-System Analysis] pzMap sind die reale und imaginäre Achse der ausgewählten Übertragungsfunktion dargestellt.

Ebenfalls dargestellt werden Pol- (X - in rot) und Nullstellen (O in grün).

#### Schaltflächen:

	Verstärkung der ÜF	
○ Keep gain	wird nicht	
O recep guin	verändert.	
O Stationary gain to:	Die stationäre Verstärkung wird an das Eingabefeld angepasst. DEFAULT = 1	

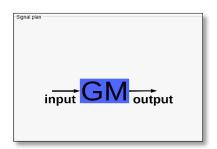
#### Background

- ⇒ pzMap verstehen
- ⇒ pzMap verwenden

#### Übungen pzMap:

- ⇒ Polstellen / Nullstellen hinzufügen
- ⇒ Polstellen verschieben (dominierendes Polpaar mit der pzMap)

### Signal-Plan



Im Feld [2<u>-System Analysis</u>] wird lediglich das Kurzzeichen für die angewählte Übertragungsfunktion abgebildet.

Bis auf die Visualisierung der gleichbleibenden Farbcodierungen für die hat dieses Feld keine Funktion.

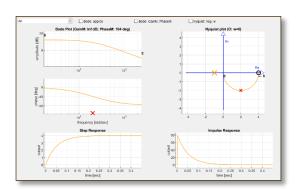


#### **Background**

⇒ <u>Tabelle aller ÜF-Kürzel und Erklärung zu den</u> Übertragungsfunktionen

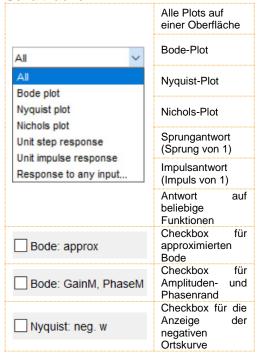


### Ergebnisdarstellung

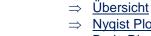


Im Feld [3]-System Analysis] können alle für die Analyse relevanten Plots abgebildet und auch als einzelne Grafiken angezeigt werden.

#### Schaltflächen:



#### Background:



- ⇒ Nyqist Plot / Ortskurve
- ⇒ Bode Diagramm
- Antwortverhalten (Sprung/Impulsantwort)

#### Übungen/Beispiele Ergebnisdarstellung

- Approximation des Bode Diagramms
- ⇒ Nyquist Kriterium (Stabilität des Rückgekoppelten Systems)

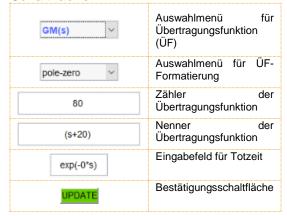


## Eingabebereich für Übertragungsfunktionen

Das Feld [4]-System Analysis] befasst sich ausschließlich mit der Eingabe der Übertragungsfunktionen und ihrer Formatierung.



#### Schaltflächen:

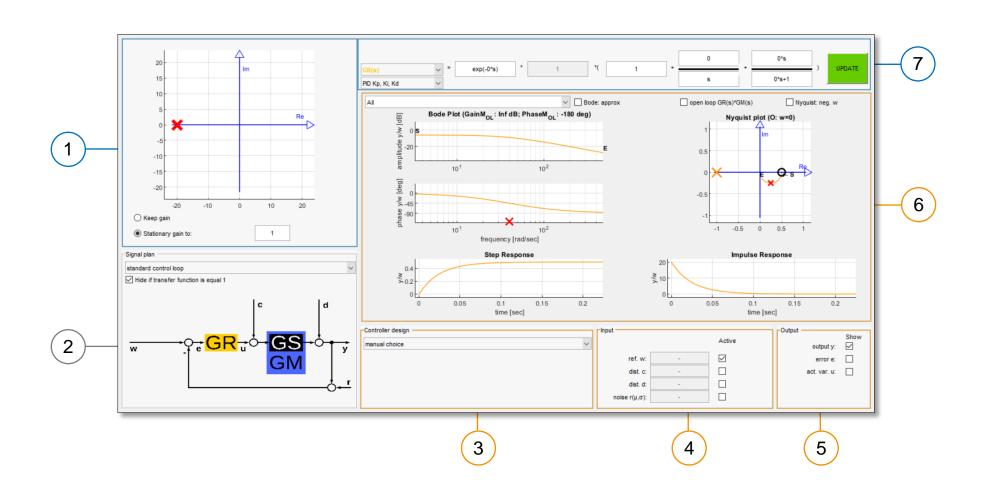




#### Beispiele Eingabebereich

- ⇒ Überblick über alle verfügbaren Übertragungsfunktionen
- ⇒ Manuelle Eingabe einer Übertragungsfunktion

Funktionsmodul: Controller Design



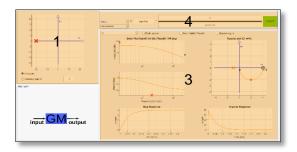


# 2 Funktionsmodul "Controller Design"

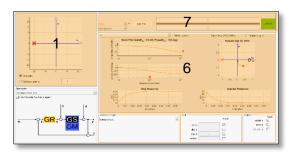
Detailvorstellung zu den einzelnen Bedienelementen, Schaltflächen und Plots des Funktionsmoduls "Controller Design".

Das Funktionsmodul "Controller Design" ist verknüpft mit dem vorhergegangenen Funktionsmodul "System Analysis". Seine grafische Oberfläche und die darin enthaltenen Schaltflächen sind oft deckungsgleich mit denen aus "System Analysis".

### Deckungsgleiche Funktionsflächen



Identische Funktionsflächen in der Oberfläche von System Analysis



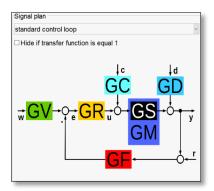
Identische Funktionsflächen in der Oberfläche von Controller Design

Die Felder [1-System Analysis], [3-System Analysis] und [4-System Analysis] im Funktionsmodul des vorigen Kapitels sind vollständig deckungsgleich mit den Feldern [1-Controller Design], [6-Controller Design] und [7-Controller Design] im Funktionsmodul "Controller Design".

Da die Funktionsfelder deckungsgleich sind, wird im weiteren auf die Feldvorstellungen im Kapitel 1 verwiesen.



### Signalplan



Visualisierung des "standard control loop" mit allen verfügbaren Übertragungsfunktionen

Im Feld [②-Controller Designer] kann die Art des Regelungskreises ausgewählt werden. Ebenfalls dient der Signalplan als Visualisierung des gesamten Systems mit allen verfügbaren/wirkenden Übertragungsfunktionen.

#### Schaltflächen:

standard control loop ~	Auswahlmenü für die Art des Regelungskreises
☐ Hide if transfer function is equal 1	Übertragungsfunktionen die keinen Einfluss auf den Regelungskreis haben [G(s) = 1] können ausgeblendet werden.



#### Background:

- ⇒ Signal-Plan
- ⇒ Darstellungsformen des Signal-Plans
- ⇒ Überblick über den vollständigen Regelkreis

### Reglerentwurf



Das Feld [3]-Controller Design] beinhaltet Funktionen um Regler entsprechend verschiedener Verfahren auslegen zu können.

#### Schaltflächen:



#### Background:

⇒ Reglersynthesen mit pzMove



#### Beispiele Reglersyntheseverfahren:

- ⇒ P-Regler; manual choice (Einsatzbeispiel)
- ⇒ PD-Regler; poleplacement (Einsatzbeispiel)
- ⇒ PI-Regler; Chien, Hrones & Reswick (Einsatzbeispiel)
- ⇒ PID-Regler; Ziegler-Nichols

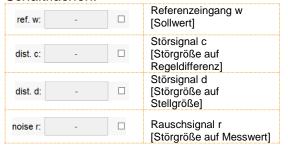


### Eingangskonfiguration



In Feld [4]-Controller Design] werden alle verfügbaren Eingangsgrößen aufgelistet und der Bezug zum jeweiligen Eingangssignal kann verändert werden. Die Ergebnisdarstellung [6]-Controller Design] kann hiermit in Verhältnis mit der ausgewählten Ausgangsgröße analysiert werden.

#### Schaltflächen:





#### Beispiele Eingangkonfiguration:

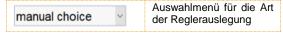
⇒ <u>Verwendung der Störungen um bleibende</u> Regelabweichung zu analysieren (Einsatzbeispiel)

### Ausgangskonfiguration



Über das Feld [5]-Controller Design] kann der Bezug auf die Ausgangsgröße verändert werden. Somit werden die Diagramme in der Ergebnisdarstellung [6]-Controller Design] im ausgewählten Verhältnis angepasst.

#### Schaltflächen:

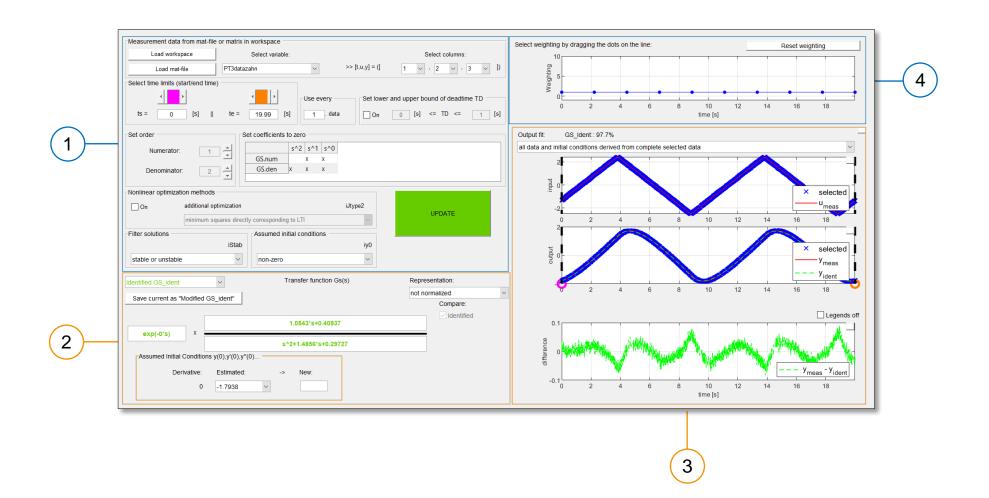




#### Beispiele Ausgangskonfiguration

⇒ Fortgeschrittene Einstellungen: Sättigung (Einsatzbeispiel)

Funktionsmodul: Identification





# 3 Funktionsmodul "Identification"

Im Folgenden soll das Funktionsmodul "Identification" grob umrissen werden. Eine Detailvorstellung jedes einzelnen Bedienelements wäre für diese Bedieneranleitung nicht zielführend.

### Unterschied zu Analysis und Design

Die Funktionsflächen in "System Analysis" und "Controller Design" dienen gleichzeitig als Lernumgebung für regelungstechnische Grundlagen UND als Werkzeuge in regelungstechnischen Praktika und Projekten.

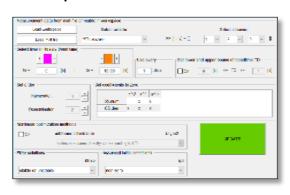


"Identification" ist vorrangig als Werkzeug/Laborsoftware konzipiert. Seine Oberfläche dementsprechend komplexer und die Funktionsflächen um ein Vielfaches gehäufter als dies bei den vorhergehenden Funktionsmodulen der Fall ist. Jedes Eingabefeld und jede Befehlsfläche detailliert abzubilden und zu beschreiben macht für den allgemeinen Kenntnisgewinn keinen Sinn, demnach werden die einzelnen Funktionsfelder nun lediglich grob umschrieben.

Wer Hilfe bei der Bedienung von "Identification" hat dem sei folgender Beispielversuch ans Herz gelegt:

⇒ Identifikation einer fremden Strecke

### **Datenimport**



Über das Feld [1]-<u>Identification</u>] können die vorher aufgenommenen Messdaten eingelesen und die zum Identifizieren benötigte Zeitbereich festgelegt werden.

Ebenfalls konfigurierbar in diesem Funktionsfeld sind die Ordnungen von Nenner und Zähler sowie unterschiedliche Optimierungs- und Filteroptionen.

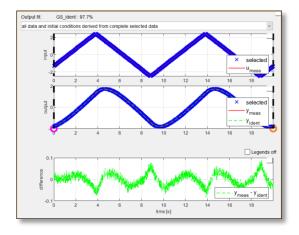


#### **Funktionsidentifikation**



Nach der erfolgreichen Identifizierung einer Übertragungsfunktion, i. d. R. in Form einer Regelstrecke, kann diese im Feld [2-Identification] manipuliert und gespeichert werden.

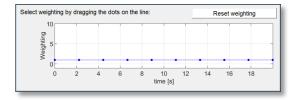
### Ergebnisdarstellung



Im Feld [3-Identification] Werden die aufgenommenen und ausgewerteten Messdaten noch einmal aufbereitet und die Simulation der identifizierten Strecke zum Abgleich über die Messdaten gelegt.

Zusätzlich wird visualisiert, welcher Zeitbereich nun für die Identifikation in Betracht gezogen wurde und dieser lässt sich auch isoliert visualisieren.

### Gewichtungseinstellungen



Die Gewichtung des Zeitbereiches im Feld [4-Identification] ermöglicht eine zusätzliche Filterung der aus den Messergebnissen berechneten Übertragungsfunktionen.

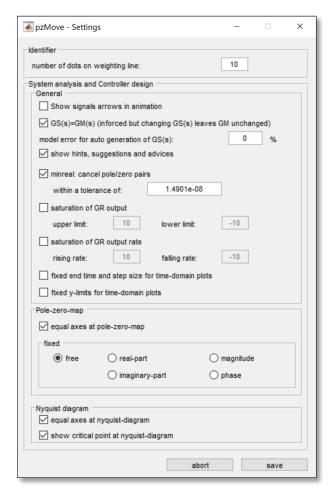
Die getroffenen Einstellungen können dabei jederzeit über eine entsprechende Befehlsfläche zurückgesetzt werden.

# Einstellungen / Settings



Konfiguration für fortgeschrittene Nutzer

### Überblick der Einstellungsparameter



Settings Oberfläche

#### Identifier

Anzahl der Gewichtungspunkte erhöhen / erniedrigen um auf den Identifikationsprozess Einfluss zu nehmen.

#### Beispiele zur Einstellung:

- ⇒ Minibeispiel Identifikation
- ⇒ Anwendungsbeispiel pzMove

# System Analysis and Controller Design

General

Generelle Einstellungen zu allgemeinen Parametern und Funktionen in den Modulen Signal Analysis und Controller Design.

#### Beispiele zur Einstellung:

- ⇒ Animationen
- $\Rightarrow$  GS = GM (Robustheit)
- ⇒ Sättigung (Saturation)

#### Pole-Zero-Map

Diese Einstellungen ermöglichen die Sperrung verschiedener Platzierungsachsen in der pzMap.

#### Beispiele zur Einstellung:

⇒ Übung (dom. Polpaar)

Nyquist Diagram

Spezifische Einstellungen für das Nyquist Diagramm [auch Ortskurve]

#### Beispiele zur Einstellung:

⇒ Übung (Nyquist Kriterium)



Funktionsmodule verstehen lerner

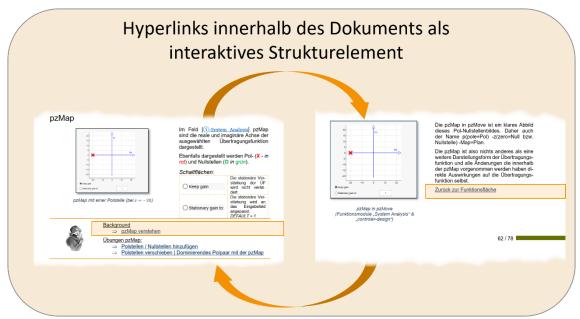
# Einführung (Hintergründe, Beispiele und Übungen)

Der in Grün gehaltene Teil dieser Bedienungsanleitung ist vor allem für Studenten und lernwillige Nutzer entwickelt worden. Hier werden Übungsbeispiele, Hintergrundwissen und Verbindungen zur Fachliteratur aufgebaut.

Versuchen Sie gerne alle Übungen und entwickeln Sie ein Gefühl dafür woher bestimmte Funktionsflächen und Darstellungsformen in pzMove stammen.

#### Links und interaktive Flächen

Diese Bedienungsanleitung wird auch durch Links und interaktive Feldfunktionen strukturiert:



Wenn Sie dieses Unterkapitel lesen haben Sie diesen Dokumentenabschnitt erreicht ohne auf weiterführende Links aus dem Kapitel: "Grafische Oberflächen" zu klicken. Teile dieses Kapitels enthalten aber auch Links die wiederum zurückverweisen.

Sollten Sie vor haben alle Übungen nacheinander durchzuarbeiten und Sie benötigen dabei keine Informationen aus dem Kapitel: "Grafische Oberflächen" dann vermeiden sie diese Links:



Verlinkungen zur jeweiligen Funktionsflächenvorstellung im Kapitel "Grafische Oberflächen"



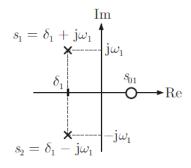
Funktionsmodule verstehen lernen

### pzMap

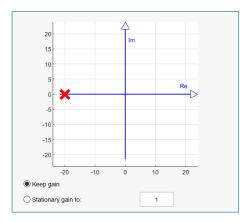
### pzMap - Background

$$G(s) = k \frac{\prod_{i=1}^{q} (s - s_{0i})}{\prod_{i=1}^{n} (s - s_{i})}$$

Übertragungsfunktion Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 276 (Kapitel 6.5.4 Pole und Nullstellen)



PN-Bild Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 276 (Kapitel 6.5.4 Pole und Nullstellen)



pzMap in pzMove (Funktionsmodule "System Analysis" & "controler-design")

Um die pzMap nutzen zu können sollte man sie zunächst verstehen lernen.

Links zu sehen ist die Darstellung einer Übertragungsfunktion in der Form einer Pol-Nullstellen-Darstellung. Diese Form kann ebenfalls als X-Y-Diagramm aufgezeichnet werden.

Die X-Achse wird dabei als reeller Zahlenstrahl bzw. Real-Achse und die Y-Achse als Imaginär-Achse gekennzeichnet.

D.h. reelle Pol- und Nullstellen befinden sich direkt auf der X-Achse des Diagramms. Imaginäre Pol- und Nullstellen sowie ihre komplex konjugierten Partner befinden sich ohne Realteil direkt auf der Y-Achse und Mischformen also Pol- und Nullstellen mit Real- und Imaginärteil werden in den jeweiligen Quadranten des Diagramms eingezeichnet.

In der Literatur wird diese Darstellung Pol-Nullstellenbild genannt. Oder kurz PN-Bild.

Die pzMap in pzMove ist ein klares Abbild dieses Pol-Nullstellenbildes. Daher auch der Name p(pole=Pol) -z(zero=Null bzw. Nullstelle) -Map=Plan.

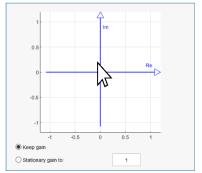
Die pzMap ist also nichts anderes als eine weitere Darstellungsform der Übertragungsfunktion und alle Änderungen die innerhalb der pzMap vorgenommen werden haben direkte Auswirkungen auf die Übertragungsfunktion selbst.



Funktionsmodule verstehen lernen

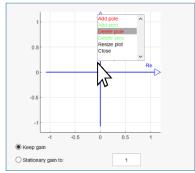
#### Einfügen von Pol und Nullstellen

Über die pzMap können Pol- (**X** - *in rot*) und Nullstellen (**O** *in grün*).auch einfach zur bestehenden Übertragungsfunktion hinzugefügt werden.



Cursor innerhalb der pzMap Oberfläche

Bewegen Sie dafür Ihren Cursor (Mauszeiger) über die pzMap, an die gewünschte Stelle und drücken sie die rechte Maustaste.



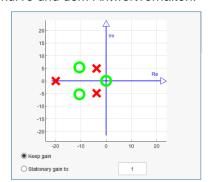
Scroll-Menü nach Rechtsklick

Um einen Pol bzw. ein komplexes Polpaar oder eine Nullstelle bzw. ein komplexes Nullstellenpaar zu erzeugen nutzen Sie die Option "Add …", das Entfernen derselben kann über "Delete …" erledigt werden ebenso besteht die Möglichkeit den Plot neu zu skalieren.

Add pole
Add zero
Delete pole
Delete zero
Resize plot
Close

Detailansicht Scroll-Menü

Nach dem Einfügen von neuen Polen (X) und Nullstellen (O) sind diese in der pzMap ebenso sichtbar wie auch in den verschiedenen Formen der Übertragungsfunktion und den Ergebnisdiagrammen wie Bode-Plot, Ortskurve und dem Antwortverhalten.



pzMap mit jeweils einem komplexen Pol- und Nullstellenpaar einer reelen Polstelle und einer Nullstelle im Ursprung

#### Verschieben von Pol- und Nullstellen

Die Pol- und Nullstellen können verschoben werden, sobald sie erstellt wurden. Dazu muss die Spitze des Mauscursors über die zu verschiebende Null- oder Polstelle bzw. einen Part des zu verschiebendes Pol- oder Nullstellenpaares gebracht werden. Mit einem Druck auf die Maustaste kann das jeweilige Element per "Drag&Drop" über die Fläche der pzMap bewegt werden.



Funktionsmodule verstehen lerner



# Übung: Erstellen einer Übertragungsfunktion (mithilfe der pzMap)

#### Einführung

Theoretisch ist es möglich, allein über die pzMap eine Übertragungsfunktion in pzMove einzugeben bzw. zu erstellen. Dies mag zwar unpräzise und je nach Verwendungszweck der Übertragungsfunktionen auch wenig praktikabel sein aber für Übungszwecke oder eine kurzfristige und grobe Veranschaulichung ist es sinnvoll.

Ziel der Übungsaufgabe ist es die gewünschte Übertragungsfunktion im Funktionsmodul "System Analysis" beispielsweise als GM(s) rein über die pzMap zu erstellen. Starten Sie dazu mit einer leeren Übertragungsfunktion (Zähler und Nenner bei 1).

Danach erstellen Sie mit den Funktionen "Add pole" und "Add zero" so lange Pol- und Nullstellen bis (ungefähr) die gewünschte Übertragungsfunktion im Eingabefenster zu sehen ist.

$$G(s) = \frac{s + 0.5}{s^3 + 2s^2 + 1.5s + 0.5} = \frac{(1 + 2s)}{(1 + s)(1 + \sqrt{2}(\sqrt{2}s) + (\sqrt{2}s)^2)} = \frac{(s + 0.5)}{(s + 1)(s + 0.5 + 0.5j)(s + 0.5 - 0.5j)}$$

Die gewünschte Übertragungsfunktion in Koeffizienten-, Zeitkonstanten- und Pol-Nullstellen-Darstellung.

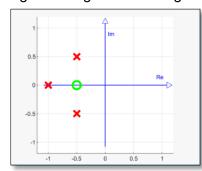
#### Tipps / Vorgehensweise

- Machen Sie sich zunächst mit dem Erstellen und Entfernen von Pol- und Nullstellen in der pzMap vertraut
- Welche Darstellung der Übertragungsfunktion kann Ihnen bei der Übungsaufgabe am meisten helfen? Welche Darstellungen sind eher weniger Hilfreich?
- Wie viele Pol- und wie viele Nullstellen erwarten/benötigen Sie?
- Die exakten Zahlenwerte sind über diese Methode (Maus + pzMap) kaum zu erreichen.
   Vergleichen Sie trotzdem Ihr Ergebnis mit den Ergebnisplots dieser Übung.

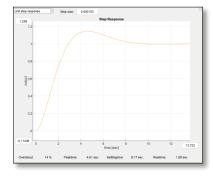
#### Übungsziel

Ziel dieser Übung ist es nachvollziehen zu können das man Übertragungsfunktionen und damit auch Systeme wie Regler oder Strecken einfach und schnell per pzMap eingeben kann.

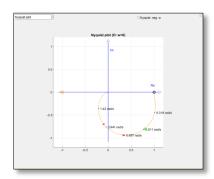
#### Ergebnisvergleich / Lösungen



Gewünschtes Abbild auf der pzMap



Sprungantwort auf das erstellte System



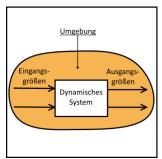
Ortskurve des offenen Systems



Funktionsmodule verstehen lernen

### Signal-Plan

### Background:

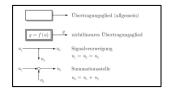


Blockschaltbild eines Systems Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 44 (Kapitel 3.2 Blockschaltbild – Grafik wurde angepasst)

In der Regelungstechnik wird das Verhalten dynamischer Systeme oft mit Modellen und abstrahierten Darstellungen abgebildet.

Eine wichtige Darstellungsform dieser Modelle ist das **Blockschaltbild**.

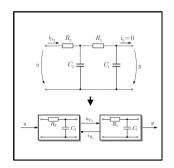
Das Blockschaltbild kann die wichtigsten Elemente (Teilsysteme, Komponenten) des Systems visualisieren und deren Verknüpfungen nachvollziehbar veranschaulichen.



Blockschaltbild eines Systems Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 44 (Kapitel 3.2 Blockschaltbild – Grafik wurde angepasst)

Um Blockschaltbilder lesen zu können, werden für funktionale Abhängigkeiten einfache Symbole eingeführt.

Mithilfe dieser Symbole lassen sich auch Verknüpfungen (Summen, Subtraktionen und Verzweigungen) visualisieren.



Vom Schaltplan zum Blockschaltbild Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 52 / 109

Werden die Prinzipien von Blockschaltbildern verstanden, lassen sich durch sie auch komplexere Systeme relativ einfach und platzsparend darstellen.

In pzMove nimmt man sich das Blockschaltbild als Modellgrundlage zu Hilfe um die einzelnen Übertragungsfunktionen von Reglern, Störungseinflüssen und ganzer Regelstrecken darzustellen.

Zwischen den einzelnen Blockschaltbildern verlaufen die Signale, weswegen für die Darstellung der Blockschaltbilder der Name "Signal-Plan" gewählt wurde.

<u>Zurück zur Funktionsfläche – Modul: System Analysis</u> Zurück zur Funktionsfläche – Modul: Controller Design



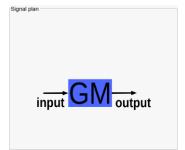
Funktionsmodule verstehen lernen

### Darstellungsformen des Signal-Plans

Der Signalplan wird in pzMove an zwei Stellen als passives Funktionsmodul dargestellt. Passiv ist er deshalb, weil der Signalplan an sich keine aktiven Funktionen übernimmt oder auslöst, sondern lediglich zur Visualisierung von Blockschaltplänen und den darin enthaltenen Übertragungsfunktionen dient.

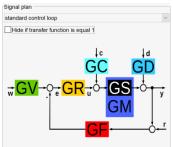
Die beiden Verwendungen können im folgenden Beispiel erklärt werden:

# Einzel-Darstellung im Modul **System Analysis**



Einzeldarstellung einer Übertragungsfunktion

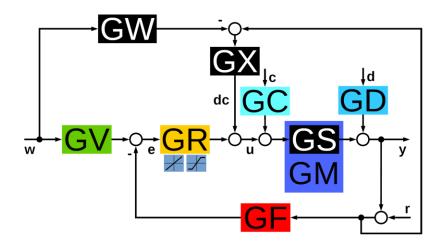
# Plandarstellung im Modul Control Design



Plandarstellung eines kompletten Regelungssystems

Der Signal-Plan im Modul System Analysis bezieht sich lediglich auf die Darstellung der aktuell ausgewählten Übertragungsfunktion. Sie besitzt keine weiteren Funktionen. Der Signal-Plan im Modul Control Design ist komplexer da er das gesamte System mit allen beteiligten Übertragungsfunktionen darstellt. Je nach Auswahl des Regelungssystems im Drop-down-Menü verändert der Signal-Plan hier auch die Auslegungsmöglichkeiten für den Regler.

### Überblick über einen vollständigen Regelkreis in Signal-Plan



Zurück zur Funktionsfläche – Modul: Controller Design



Funktionsmodule verstehen lernen

### Auflistung der verfügbaren Übertragungsfunktionen



#### ÜF Model:

Das Model der Regelstrecke. Diese Übertragungsfunktion wird verwendet, wenn Anpassungen an der Strecke gemacht werden müssen.



#### ÜF Strecke:

Die Übertragungsfunktion der (echten) festgelegten Strecke.

Änderungen an der Strecke sind nicht vorgesehen. Deshalb ist per *default* in den Settings eingestellt, dass Änderungen nicht übernommen werden. Hierzu sei das Beispiel zur Eingabe einer Strecke empfohlen:

Beispiel: Eingabe einer Strecke



#### ÜF Regler:

Übertragungsfunktion des Reglers.



#### ÜF Vorfilter:

Die Übertragungsfunktion zwischen Eingang des Systems (w) und dem Eingang des Reglers (e)



#### ÜF Störung (vor der Strecke):

Übertragungsfunktion für Störungseinflüsse zwischen Regler und Strecke. [Eingang (c); Ausgang (u)]



#### ÜF Störung (nach der Strecke):

Übertragungsfunktion für Störeinflüsse zwischen Strecke und Rückführung/Ausgang des Systems. [Eingang (d); Ausgang (y)]



#### ÜF Rückführung:

Mit dieser Übertragungsfunktion lassen sich Einflüsse der Rückführung (bsp. Einflüsse durch Messgeräte/ Sensoren) nachbilden.

[Eingang (r+y); Ausgang (e)]



<sup>-</sup>unktionsmodule verstehen lernen



#### **ÜF Gesamtes System:**

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Systems



#### ÜF Regler (OL-CL-Verfahren):

Regler-Übertragungsfunktion die nur verwendet wird bei der Design-Methode *OpenLoop-ClosedLoop* 



#### ÜF Gesamtes System (spez. Auslegungsmethoden):

Übertragungsfunktion für die Reglerauslegungsmethoden "exact poleplacement" und "poleplacement via best approximation"



#### **ÜF Kompensation:**

Übertragungsfunktion für die Kompensation mithilfe des gesamten Systems

Zurück zur Funktionsfläche – Modul: System Analysis
Zurück zur Funktionsfläche – Modul: Controller Design



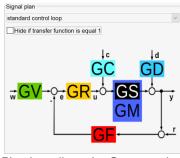
Funktionsmodule verstehen lernen



### Veränderung bei der Kaskadenreglung

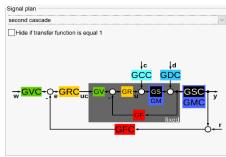
Bei der Kaskadenreglung (nur interessant im Modul Controller Design und für erfahrene Nutzer) erweitert sich der Signal-Plan um die Übertragungsfunktionen der Kaskade:

# Plandarstellung vor Einstellung der Kaskade



Plandarstellung des Systems ohne Kaskade

# Plandarstellung nach Einstellung der Kaskade



Plandarstellung der kompletten Kaskade

Wie bereits bekannt besteht das grundlegende Regelsystem aus den bereits vorgestellten Übertragungsfunktionen für Regler, Störeinflüsse, Rückführung und Strecke bzw. Modell der Strecke. Auf der Darstellung des Signal-Plans ist gut zu erkennen, dass das eigentliche Regelsystem nun fixiert wird und darum ein neues System aufgebaut wird mit neuen Übertragungsfunktionen die wiederum verändert werden können

Die spezifischen Übertragungsfunktionen des neuen Systems sind die Übertragungsfunktionen der Kaskade. Sie werden deshalb jeweils mit einem "C" versehen welches für Cascade steht.

#### Handhabung der Kaskadenreglung

Der Funktionsumfang der Kaskadenreglung ist nicht Teil dieses Handbuches. Eine Kaskadenreglung ist mit pzMove zwar schneller und unkomplizierter zu bewerkstelligen als dies ohne ein rechnergestütztes Verfahren der Fall wäre, aber um die Funktionen zu nutzen wird ein fundiertes regelungstechnisches Grundwissen benötigt.

Wenn Sie Interesse an der Kaskadenreglung haben dann empfehlen Ihnen die Autoren dieses Handbuchs die Masterarbeit von Herrn Johannes Fischer:

Erweiterung der Reglerentwurfsumgebung pzMove und Demonstration anhand der Stabilisierung eines LEGO® MINDSTORMS® EV3-Roboters

Sie behandelt im Detail die Einbindung der Kaskadenregelung in pzMove sowie die Verwendung am Beispiel eines Segway-Roboters.



Funktionsmodule verstehen lernen



# Übung: Eingabe von Übertragungsfunktionen offener Systeme (System Analysis)

#### Einführung

Anhand dieser Übung soll die simple Eingabe einer Übertragungsfunktion in pzMove erklärt werden. Anschließend können die verschiedenen Formatierungsformen der ÜF vorgeführt und eine grobe Beurteilung über das offene System getroffen werden.

Gegeben ist die folgende Übungsaufgabe: [Übung 4.15 des Übungskatalogs, Wintersemester 2018]

"Bringen Sie folgende Übertragungsfunktion in die Zeitkonstanten-Darstellung und in die Pol/Nullstellen-Darstellung und bestimmen Sie die stationäre Verstärkung. Begründen Sie, ob die Übergangsfunktion stabil oder instabil ist."

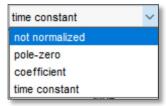
$$G(s) = \frac{6 + 6s + 3s^2}{(s + 0.5) * (s + 2.0) * (s - 3.0)}$$

Geben Sie die Übertragungsfunktion als offenes System in pzMove ein. Versuchen Sie sich in pzMove die Zeitkonstanten und Pol/Nullstellen Darstellung anzeigen zu lassen.

Wo/Wie können sie die stationäre Verstärkung ablesen. Wie können Sie Aussagen über die Stabilität des offenen Systems treffen, kann pzMove dabei helfen?

#### Tipps / Vorgehensweise

- Grundlegend bei der simplen Betrachtung von offenen Systemen gilt die Verwendung von GM als Modell des offenen Systems. Die Verwendung von GR wäre zwar ebenfalls möglich aber doch wenig zielführend, wenn aus der einfachen Betrachtung zum Beispiel anschließend eine geschlossene Regelung abgeleitet werden sollte.
- Ebenfalls könnte GS verwendet werden. Beachten Sie hierbei allerdings die Einstellungen für GM und GS.
  - Standardmäßig wird GS von GM überschrieben, sobald Änderungen an den Systemen vorgenommen werden!
- Die ÜF ist "nicht-normalisiert" gegeben. Der Zähler ist in Koeffizientenschreibweise gegeben, der Nenner in Pol/Nullstellenschreibweise. Für eine Eingabe der Funktion empfiehlt sich deshalb die Formatauswahl "not normalized"



- Die stationäre Verstärkung kann direkt aus der Zeit-Konstanten-Darstellung entnommen werden.
- Stabilitätsbetrachtungen k\u00f6nnen \u00fcber das Antwortverhalten des Systems nachvollzogen werden.

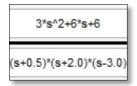
#### Übungsziel

Validieren der "händischen" Lösung mithilfe von pzMoves Bode-Plot

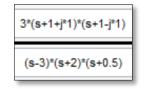


Funktionsmodule verstehen lernen

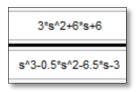
#### Ergebnisvergleich / Lösungen



Eingegebene ÜF in der "not normalized"-Darstellung



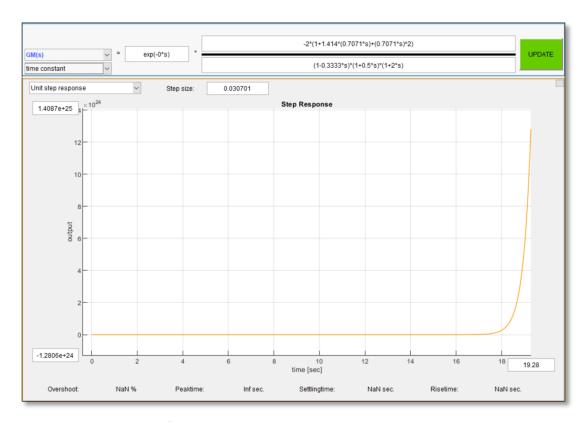
Pol-Nullstellendarstellung (Erkennbar, nur Zähler ändert sich da der Nenner bereits in PN-Darstellung gegeben ist)



Koeffizientendarstellung (Ebenfalls leicht zu erkennen das sich diesmal lediglich der Nenner ändert)

#### Erkenntnisse:

- ⇒ Zähler wurde in Form der Koeffizientendarstellung gegeben
- ⇒ Nenner wurde in Form der Pol-Nullstellendarstellung gegeben
- $\Rightarrow$  Nenner enthält eine Polstelle auf der positiven Realachse  $[(s-3) \rightarrow s_{01}=3]$  System wird deshalb Instabil!
- ⇒ Aus der Zeitkonstantendarstellung kann eine stationäre Verstärkung von -2 entnommen werden



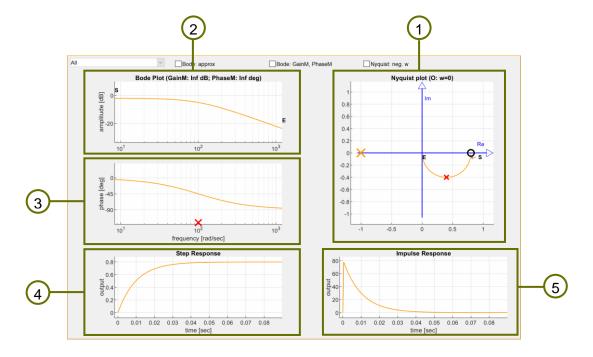
Eingegebene ÜF in der Zeitkonstantendarstellung und dazugehörige Sprungantwort (Deutlich zu sehen ist das instabile Verhalten [Sprung gegen Unendlich] und die stationäre Verstärkung ks=-2 kann aus dem Zähler der Darstellung entnommen werden)



<sup>-</sup>unktionsmodule verstehen lernen

## Wissenswertes zu den Plots

### Übersicht



Die Ergebnisausgabe besteht aus verschiedenen Plots, anhand derer das Verhalten der Übertragungsfunktionen visualisiert werden kann. Die folgenden Plots sind bereits in der Übersicht "All" zu sehen:

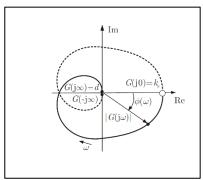
- 1. Nyquist Plot (Ortskurve)
- 2. Amplitudenverlauf (Bode Plot)
- 3. Phasenverlauf (Bode Plot)
- 4. Step Response
- 5. Impulse Response

Des Weiteren können über das Drop-down-Menü noch weitere isolierte Ansichten ausgewählt werden, um die einzelnen Plots genauer zu analysieren. Ebenfalls ist es über das Drop-down-Menü möglich auf spezifische Plots, wie den Nichols-P4lot oder Systemantworten auf beliebige Eingangssignale zu wechseln.

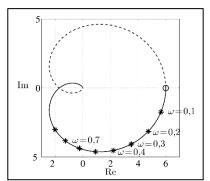


Funktionsmodule verstehen lernen

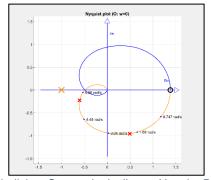
### Nyquist Plot



Prinzipielle Ortskurve Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 252 (Kapitel 6.3 Frequenzgang)



Reelle Ortskurve eines Systems Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 252 (Kapitel 6.3 Frequenzgang)



Ähnliches System im isolierten Nyquist-Plot pzMove GUI

Der Nyquist Plot, auch Nyquist Diagramm oder Nyquist-Graph genannt ist eine Ortskurve des Frequenzganges in einem regelungstechnischen System.

Dargestellt wird die Ortskurve dabei in der real/komplexen Ebene. In der Regel im Intervall  $\omega = 0...\infty$  wobei auch  $\omega = -\infty...\infty$ , darstellbar wäre. (in den Grafiken gestrichelt, in pzMove in blau eingefärbt)

Betrachtet man nun die Ortskurven auf der linken Seite so wird deutlich, dass der Anteil für den Frequenzbereich  $\omega = -\infty...$  0 aus der für  $\omega = 0...\infty$  gezeichneten Ortskurve durch Spiegelung an der reellen Achse hervor geht. Aus diesem Grund ist diese Spiegelung redundant zur Darstellung im Bereich  $\omega = 0...\infty$ .

Möchte man die Ortskurve nachvollziehen, so fasst man den Frequenzgang als Zeiger mit der Länge  $|G(j\omega)|$  und dem Winkel  $\phi(j\omega)$  auf. Dadurch beschreibt die Zeigerspitze die Ortskurve des Systems, wenn  $\omega$  von null an vergrößert wird.

Folgende Formeln beschreiben demnach die Ortskurve quantitativ:

$$G(0) = \frac{b_0}{a_0} = k_{\rm s}.$$

$$\lim_{\omega \to \infty} G(\mathrm{j}\omega) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{für } q < n \\ \frac{b_n}{a_n} = d & \text{für } q = n. \end{array} \right.$$

In pzMove sind auch noch weitere Informationen im Nyquist-Plot angezeigt.

Das orange Kreuz auf der Realachse bei (-1|0) kann für das Nyquistkriterium genutzt werden und hilft dabei Stabilitätsaussagen zu treffen.

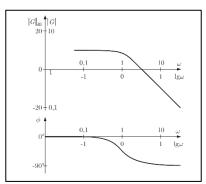
Die roten Kreuze auf diesem Diagramm stellen die Polstellen der eingegebenen Übertragungsfunktion dar. (siehe auch pzMap)

Allerdings ist die Darstellung dem Nyquist-Plot angepasst. [Polarkoordinaten über der Darstellung des Freguenzraumes]

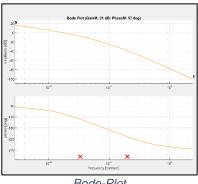


Funktionsmodule verstehen lernen

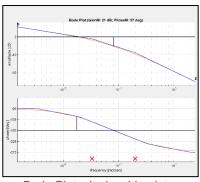
### **Bode Diagramm**



Bodediagramm Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 253 (Kapitel 6.3 Frequenzgang)



Bode-Plot pzMove GUI



Bode-Plot mit eingeblendeten Phasen- und Amplitudenrändern und approximierten Verlauf pzMove GUI

Stellt man den Frequenzgang für jede einzelne Frequenz  $\omega$  mit seinem Betrag  $|F(j\omega)|$  in einem "Amplitudendiagramm" und seine Phase  $\phi$  in einem "Phasendiagramm" dar, dann erhält man das sogenannte Bode-Diagramm:

Der Amplitudengang wird im dekadischen Logarithmus (also zur Basis 10) in Abhängigkeit vom Logarithmus der Kreisfrequenz  $\omega$  aufgetragen.

Auf der Abszissenachse wird die Kreisfrequenz  $\omega$  mit einer logarithmischen Skala oder  $\log(\omega)$  mit einer linearen Skala aufgetragen

Die Ordinatenachse wird linear unterteilt und der Amplitudengang in Dezibel angegeben:

In pzMove gehört der Bode-Plot oder das Bode Diagramm zu einem der Stadardplots die bereits in der default-Ansicht zu sehen sind.

Die orange Linie zeigt den genauen Verlauf der Amplitude und der Phase, ohne das komplizierte Formeln oder geometrische Schätzverfahren verwendet werden müssen.

Die roten Kreuze die auf die Frequenzachse projiziert werden zeigen die Lage der Polstellen und Nullstellen an.

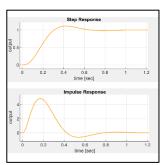
Im Bode-Plot von pzMove ist es möglich noch weitere interessante Informationen anzeigen zu lassen. Diese sind:

- Der geometrisch geschätzte Verlauf (blaue Strichlinie)
- Der Amplitudenrand [insofern vorhanden] (schwarz, im Amplitudenverlauf)
- Der Phasenrand
   [insofern vorhanden]
   (schwarz, im Amplitudenverlauf)

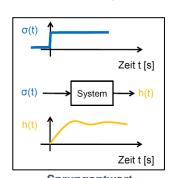


Funktionsmodule verstehen lerner

#### Antwortverhalten

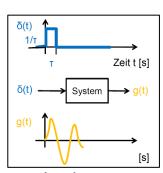


Antwortverhalten (System 2. Ordnung)
pzMove GUI
(Grafik wurde angepasst)



Sprungantwort

Zentgraf P., Regelungstechnik Skript, S 2.58
(Grafik wurde angepasst)



Impulsantwort
Zentgraf P., Regelungstechnik Skript, S 2.59
(Grafik wurde angepasst)

Zurück zur Funktionsfläche

Das dynamische Übertragungsverhalten eines Systems kann im Zeitbereich als Antwortverhalten auf eingehende Zeitfunktionen abgebildet werden.

Durch diese Abbildung über der Zeit (t) kann das System veranschaulicht werden und ein optischer Ersteindruck des Systemverhaltens geschaffen werden.

Zwei wichtige Kernfunktionen sind hierbei die **Sprung**- und die **Impulsfunktion** bzw. eben die Systemantwort auf die besagten Funktionen.

#### Sprungfunktion:

Mathematische Definition

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 1 & \text{für } t \ge 0 \end{cases}$$

- Die Antwort heißt "Sprungantwort"
- Ist die Sprunghöhe auf 1 normiert so nennt man die Antwort auch "Übergangsfunktion" h(t)

#### Impulsfunktion (Dirac-Impuls):

Mathematische Definition

$$\delta(t) = \lim_{\tau \to 0} \begin{cases} 1/\tau & \text{für } 0 \le t \le \tau \\ 0 & \text{für } t < 0 \text{ und } t > \tau \end{cases} = \begin{cases} \infty & \text{für } t = 0 \\ 0 & \text{für } t \ne 0 \end{cases}$$

- Die Fläche unter der Impulsfunktion ist 1
- Die Antwort des Systems heißt Impulsantwort oder "Gewichtsfunktion" g(t)



Funktionsmodule verstehen lernen



### Übung: Geraden-Approximation des Bode-Diagramms

#### Einführung

Diese Übung bezieht sich auf das Approximieren eines Bode-Frequenzverlaufs. Mit dieser Technik können das Phasen- und Amplitudendiagramm des typischen Bode-Plots mit addierten Geradengleichungen approximiert werden.

Wie schon kurz erwähnt werden bei der Bode-Approximation Geradengleichungen der einzelnen Grundübertragungsfunktionen miteinander addiert. Dadurch lässt sich eine brauchbare Näherung des Frequenzganges konstruieren.

Geradenapproximationen von Bode-Diagrammen sind ein Mittel sich ein Bild über das Frequenzverhalten einer Übertragungsfunktion zu machen, ohne große oder ausufernde Rechnungen anzustellen. pzMove kann dabei helfen, diese Approximationen zu verifizieren da pzMove die Approximation von Amplituden- und Phasenverläufen anzeigen kann. Dies soll in der folgenden Übung gezeigt werden:

Gegeben ist die folgende Übungsaufgabe: [Übung 4.17 des Übungskatalogs, Wintersemester 2018]

$$G(s) = \frac{10}{s * (5s+1) * (30s+1)}$$

Konstruieren sie zunächst den Amplituden- und Phasenverlauf "per Hand". Danach kann die Übertragungsfunktion in pzMove eingegeben werden und so das eigene Ergebnis überprüft werden.

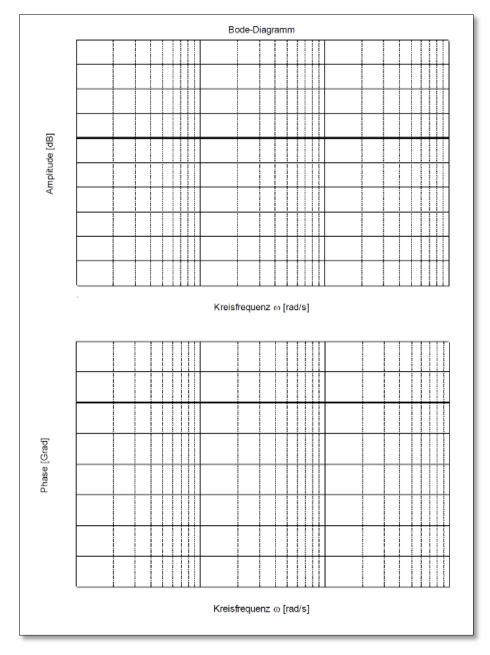
#### Tipps / Vorgehensweise

- Zerlegen Sie die Übertragungsfunktion zunächst in ihre Grundfunktionen
- Die Zeitkonstantendarstellung empfiehlt sich bei der Approximation von Bode-Verläufen
- Die Grundfunktionen k\u00f6nnen dann im Diagramm angedeutet werden und der wirkliche Bode-Verlauf kann aus der Addition der Geraden abgeleitet werden



Funktionsmodule verstehen lernen

Ein Beispiel für eine "händische Lösung" wäre Folgende:



"händische" Lösung auf Logarithmischem Papier

### Übungsziel

Validieren der "händischen" Lösung mithilfe von pzMoves Bode-Plot



Funktionsmodule verstehen lerner

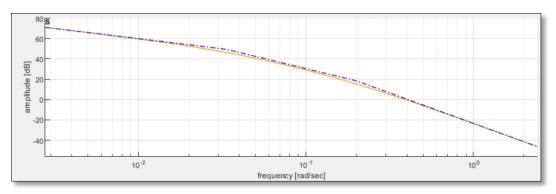
#### Ergebnisvergleich / Lösungen

Die Kontrolle der Daten kann auf der folgenden Seite mithilfe von pzMove und seiner Plots sehr einfach gelöst werden. Geben sie dazu die Funktion als GM ein und schalten sie im Dropdown-Menü auf die isolierte Darstellung des Bode-Diagramms.

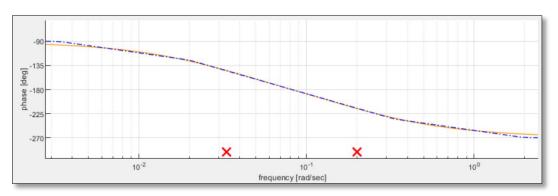
Um die Approximierte Geradengleichung des Amplituden- u. Phasenverlaufes zu sehen aktivieren sie die Checktbox "Bode: approx"



Die Einstellung für den Approximierten Verlauf befindet sich neben dem eigentlichen Dropdown-Menü



Der Verlauf der Amplitude (Approximierte Lösung in blau,strichpunkt)



Der Verlauf der Phase (Approximierte Lösung in blau,strichpunkt)



Funktionsmodule verstehen lernen



### Übung: Nyquist Kriterium (Stabilität des rückgekoppelten Systems)

#### Einführung

Über das Nyquist Kriterium ist es möglich bereits an der Ortskurve des offenen Systems zu erkennen ob das Rückgekoppelte System (z.B.: Strecke ohne Regler) stabil ist.

### Gegeben ist die folgende Übungsaufgabe:

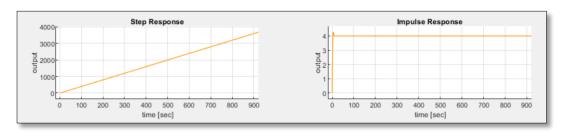
[ähnlich der Übung 6.9 des Übungskatalogs, Wintersemester 2018]

"Untersuchen Sie die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises, auf Stabilität. Was gilt für die Stabilität des rückgekoppelten Systems?"

$$G(s) = 2\frac{s+1}{s^3 + s^2 + 0.5 * s}$$

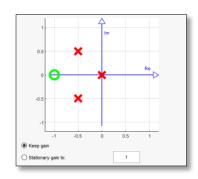
#### Tipps / Vorgehensweise

 Für die Stabilitätsbetrachtung des offenen Systems kann das Antwortverhalten des Systems herangezogen werden. pzMove erstellt bereits in der Default-Ergebnisausgabe hierfür folgende Plots:

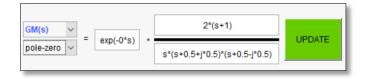


Sprung und Impulsantwort nach Eingabe der Übertragungsfunktion in pzMove (Deutlich zu erkennen ist ein instabiles verhalten des offenen Systems)

 Das einfache Nyquist-Kriterium kann nur angewendet werden, wenn die Übertragungsfunktion des offenen Systems Pole mit negativen Realteil und maximal einen Pol im Ursprung enthält. Die Übertragungsfunktion kann dazu entweder in die Pol-/Nullstellendarstellung gebracht werden oder das PN-Bild (pzMap) kann aufgezeichnet werden. pzMove bietet auch hier wieder folgende Ausgaben zur Lösungsvalidierung:





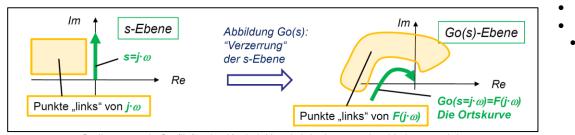


Pol-/Nullstellendarstellung der Übertragungsfunktion



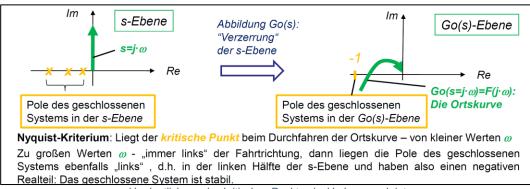
Funktionsmodule verstehen lernen

- Nachdem festgestellt wurde ob das Nyquistkriterium angewendet werden darf sollte die eigentliche Anwendung kurz nachvollzogen werden. Hierzu bietet sich entweder das Vorlesungsskript oder folgende Literaturquelle an:
  - Lunze, Jan; Regelungstechnik 1; Seite: 440; Kapitel 8.5.2: Nyguistkriterium



Stellvertretende Grafik für das Kapitel: Nyquistkriterium aus dem Vorlesungsskript

Der Nyquist-Plot ist bei dieser Aufgabe absichtlich etwas schwieriger zu zeichnen, als das beispielsweise bei einem einfachen PT1 System der Fall wäre. Bedenken Sie, dass es vor allem im Bereich um den "kritischen Punkt" wichtig ist zu wissen, wie die Ortskurve des offenen Systems verläuft. Auch hierzu bietet das Vorlesungsskript wieder gute Informationen:



Verdeutlichung des kritischen Punktes im Vorlesungsskript

 Die Stabilität des geschlossenen Systems lässt sich mithilfe von pzMove sehr einfach validieren. Die Übertragungsfunktion GW (aufgeführt in der <u>Übersicht der verfügbaren</u> <u>Übertragungsfunktionen</u>) steht für das geschlossene System und kann auf dieselbe Weise analysiert werden wie ein offenes Streckenmodell.

#### Übungsziel

Geben Sie die Übertragungsfunktion in pzMove ein und versuchen Sie anhand des Nyquist-Plots des offenen Systems auszusagen ob das geschlossene System stabil ist.

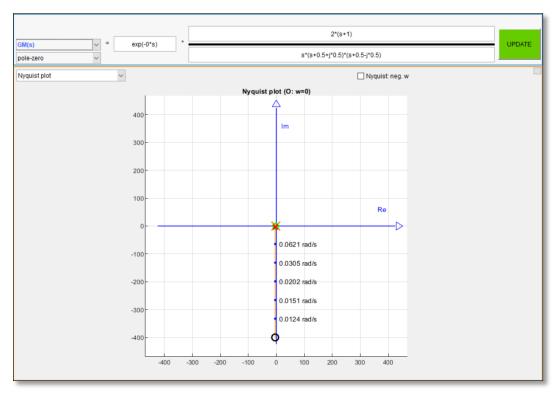
Verifizieren Sie ihre Aussage über die Anzeige des geschlossenen Systems (GW(s))



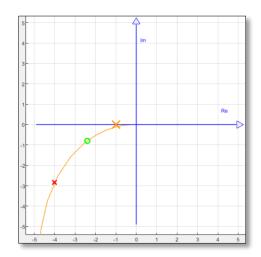
Funktionsmodule verstehen lernen

#### Ergebnisvergleich / Lösungen

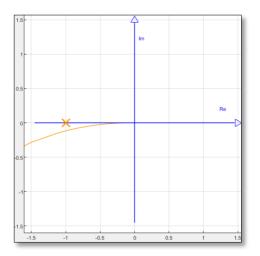
Zunächst ein Überblick über den Nyquist-Plot nachdem die Übertragungsfunktion eingegeben wurde:



Die Ortskurve verläuft sehr lange beinahe parallel zur Imaginären Achse. Wichtig für das Nyquist-Kriterium ist vor allem aber das Verhalten um den "kritischen Punkt"



Um den Plot zu vergrößern muss zunächst stark vergrößert werden. (Zoom über Mausrad sobald sich der Coursor über dem Plot befindet)

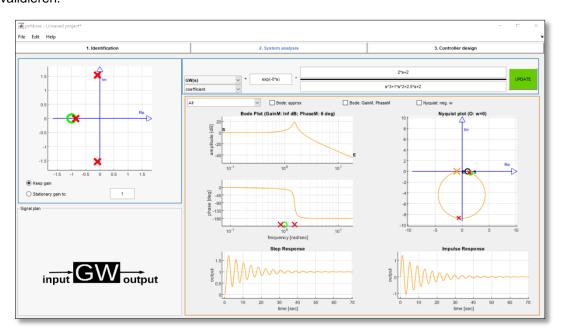


Nach mehrfachem Vergrößern ist zu erkennen das sich der "kritische Punkt" (Realachse = -1) "links" von der Ortskurve befindet. Das geschlossene System sollte also stabil sein!



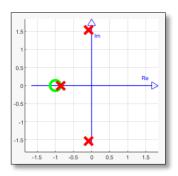
Funktionsmodule verstehen lernen

Über GW lässt sich in pzMove nun das geschlossene System bilden und das Nyquist Kriterium so validieren:

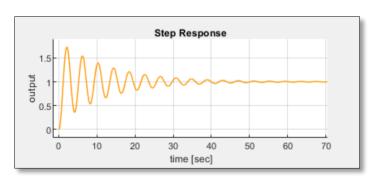


Ergebnis für das geschlossene System (GW)

Vor allem das Antwortverhalten und die Lage der Pole (des geschlossenen Systems) sind von Interesse, wenn Aussagen über seine Stabilität gemacht werden sollten:



pzMap des geschlossenen Systems



Sprungantwortverhalten des geschlossenen Systems (Das geschlossene System schwingt zwar stark aber ist trotzdem stabil)

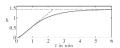


Funktionsmodule verstehen lernen

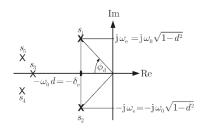
### Reglersynthese mit pzMove

### Background

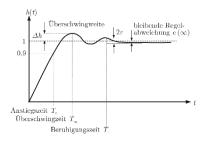
Voraussetzung	Regler	Reglerparameter
Approximation der Regelstrecke durch ein $PT_1T_t$ -Glied	P PI PID	$\begin{split} k_{\mathrm{P}} &= \frac{l_{\mathrm{h}}}{k_{\mathrm{h}}} \frac{T_{\mathrm{t}}}{T_{\mathrm{t}}} \\ k_{\mathrm{P}} &= \frac{0.9}{k_{\mathrm{s}}} \frac{T_{\mathrm{t}}}{T_{\mathrm{t}}},  T_{\mathrm{I}} = 3.33  T_{\mathrm{t}} \\ k_{\mathrm{P}} &= \frac{l_{\mathrm{s}}}{k_{\mathrm{s}}} \frac{T_{\mathrm{t}}}{T_{\mathrm{t}}},  T_{\mathrm{I}} = 2  T_{\mathrm{t}},  T_{\mathrm{D}} = 0.5  T_{\mathrm{t}} \end{split}$
Kritische Verstär- kung und Perioden- dauer sind bekannt	P PI PID	$k_{\rm P} = 0.5  k_{\rm krit}$ $k_{\rm P} = 0.45  k_{\rm krit}$ , $T_{\rm I} = 0.85  T_{\rm krit}$ $k_{\rm P} = 0.6  k_{\rm krit}$ , $T_{\rm I} = 0.5  T_{\rm krit}$ , $T_{\rm D} = 0.12  T_{\rm krit}$



Beispiel für Einstellregel-Tabellen Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 478 (Kapitel 9.4 Einstellregeln für PID-Regler)



Auslegung durch Polfestlegung Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 485 (Kapitel 9.4 Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises)



Güte-Anforderungen bei Sprungantworten Lunze J., Regelungstechnik 1, S. 355 (Kapitel 7.1 Regelerentwurfsaufgabe)

Unter Reglersynthese versteht man den Entwurf eines Reglers nach einem der unterschiedlichen Reglerauslegungsverfahren. Diese Verfahren lassen sich in 4 Kategorien einteilen:

- Empirische Einstellregeln
- Festlegung der Pole des geschlossenen Regelkreises
- Entwurf der Frequenzkennlinien
- Auslegung mithilfe Integralkriterien aus dem Zeitbereich

Um einen Regler auszulegen müssen zunächst zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Es existiert ein Modell der Strecke
- Die Anforderungen an den geregelten Kreis sind geklärt

Nachdem diese zwei Randbedingungen abgeklärt/festgelegt wurden kann der Regler den Anforderungen entsprechend, mithilfe eines Auslegungsverfahrens entworfen werden. Die Kombination aus Strecke und Regler und die Validierung der gewünschten Anforderungen schließen die Synthese ab.

Der Ablauf eines solchen Auslegungsverfahrens lässt sich grundsätzlich in 4 Schritten abstrahieren:

- Übersetzen der Anforderungen in die jeweiligen Ersatzforderungen für das gewählte Auslegungsverfahren
- 2. Festlegung der Reglerstruktur und seiner Parameter
- 3. Analyse des Regelkreisverhaltens
- 4. Bewertung der Regelkreisgüte
  - ⇒ Bei ungenügender Güte werden die Schritte 1-4 wiederholt.



Funktionsmodule verstehen lernen

### Reglersynthese mit pzMove

Mithilfe von pzMove sind Sie in der Lage den Arbeitsaufwand der Reglersynthese auf ein Minimum zu begrenzen. Sei es nur die Validierung der Güteanforderungen nach einer manuellen Reglersynthese oder die bis auf die Eingabe der tabellarischen Parameter reduzierten empirischen Einstellregeln.

Ausschlaggebend für das Auslegungsverfahren und dadurch auch die anschließende Handhabung von pzMove ist die Auswahl, die im Dropdown-Menü für die Auswahlverfahren getroffen wird.

Reference Association

The first region and the second of the second of

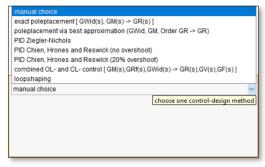
Controller Design Oberfläche abgedunkelt bis auf das beschriebene Dropdown-Menü

Das Ziegler-Nichols Verfahren, hier stellvertretend als Beispiel ausgewählt, benötigt mehrere Schritte zur Bestimmung der Reglerparameter, wenn es "per Hand" ausgeführt wird.

Regler	Kp	$T_d (=T_v)$	$T_i (=T_n)$
P-Regler	0.50· <b>K</b> <sub>pkrit</sub>	-	•
PD-Regler	0.80· <b>K</b> <sub>pkrit</sub>	0.12· <b>T</b> <sub>krit</sub>	
PI-Regler	0.45·K <sub>pkrit</sub>	-	0.85· <b>T</b> <sub>krit</sub>
PID-Regler	0.60-K <sub>pkrit</sub>	0.12 T <sub>krit</sub>	0.50- <b>T</b> <sub>krit</sub>

Einstellregeln des Ziegler-Nichols Verfahrens

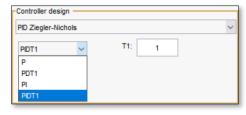
Öffnet man das Menü durch klicken auf den Pfeil am rechten Rand des Feldes, so kann man aus einer Liste an Auswahlverfahren wählen. Diese sind die möglichen Verfahren, die man für die Reglersynthese in pzMove verwenden kann.



Überblick über das gesamte Dropdown-Menü

In pzMove senkt sich die Anzahl der notwendigen Schritte dieses Verfahrens auf ein Minimum. Nach Auswahl des Auslegungsverfahrens werden alle Reglerparameter selbstständig berechnet und der Regler so erstellt.

Anschließend kann der Regler, insofern dies gewünscht ist, manuell angepasst werden.



Ziegler-Nichols Auslegungsverfahren in pzMove (lediglich die Zeitkonstante des realisierbaren PID Reglers muss bestimmt werden)



Funktionsmodule verstehen lerner



### Übungsbeispiel: Ziegler-Nichols Verfahren

#### Einführung

Als die bekannteste der empirischen Einstellregeln dient das Ziegler-Nichols Verfahren als schnelle und zuverlässige Reglersynthesemethode, wenn an den Regelkreis nur geringe Güteanforderungen gestellt werden.

#### Gegeben ist die folgende Übungsaufgabe:

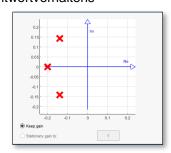
[ähnlich der Übung 7.4 des Übungskatalogs, Wintersemester 2018]

"Gegeben sei die Übertragungsfunktion der Regelstrecke [siehe  $G_s(s)$ ]. Gesucht sind die optimalen PID-Reglerparameter nach Ziegler und Nichols"

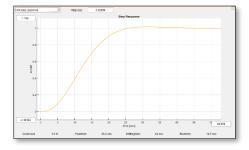
$$G_s(s) = \frac{1}{125s^3 + 60s^2 + 12s + 1}$$

#### Tipps / Vorgehensweise "per Hand"

Als Erstes sollte verifiziert werden, dass die Übertragungsfunktion der Strecke stabil ist.
 Ohne eine stabile Strecke lässt sich das Verfahren nicht durchführen. Eine Möglichkeit die Stabilität zu überprüfen ist die Eingabe in pzMove und die Analyse der Pole oder des Antwortverhaltens



Alle Pole der ÜF befinden sich in der linken (negativen) Halbebene der pzMap



Auch aus der Sprungantwort lässt sich schließen das die Strecke stabil ist, nach einem kurzen Einschwingvorgang behält der Sprung seinen Wert.

 Als typische "per Hand" Lösung für die Stabilitätsbetrachtung empfiehlt sich in der vorliegenden Form der Übertragungsfunktion allerdings das Hurwitz-Kriterium. Es lässt sich sofort, ohne Umformung anwenden.<sup>1</sup>

#### Stabilitätsbetrachtung nach Hurwitz:

Koeffizienten 
$$a_0$$
  $a_1$   $a_2$   $a_3$  Werte  $1$   $12$   $60$   $125$  
$$D = a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 12 * 60 - 1 * 125 = 720 - 125 = 595 > 0$$
 
$$\rightarrow D > 0 := Stabilität \ nach \ Hurwitz \ ist \ gegeben!$$

Auch nach der typischen "per Hand" Methode steht fest, dass sich das Ziegler-Nichols Verfahren auf die gegebene Strecken-Übertragungsfunktion anwenden lässt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Die Anwendung des Kriteriums soll hier nicht näher erklärt werden. Interessierten Studenten sei "Das Hurwitz-Kriterium" im Vorlesungsskript und/oder in Regelungstechnik 1; Lunze, Jan; Kapitel 8; Seite 428 empfohlen.



Funktionsmodule verstehen lernen

#### Wissenswertes für Zwischendurch



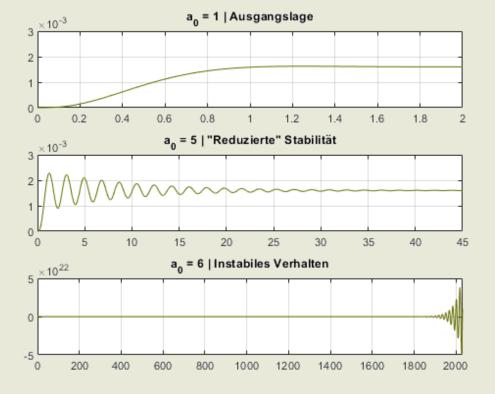
Während das Hurwitzkriterium eigentlich für die Stabilitätsbetrachtung geschlossener Systeme vorgesehen ist, lassen sich damit auch die Stabilitätsgrenzen der offenen Übertragungsfunktion, abhängig von den Koeffizienten untersuchen.

Am Beispiel dieser Übungsaufgabe:

$$D = a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 12 * 60 - 1 * 125 = 720 - 125 = 595 > 0$$

Um die Stabilitätsgrenzen zu erreichen können die Koeffizienten verändert werden. Angenommen man erhöht die Wertigkeit von  $a_0$  um die Grenze von D>0 zu erreichen beziehungsweise sogar zu überschreiten:





Sprungantworten des offenen Systems. Aufgenommen über pzMove mit unterschiedlichen Koeffizienten ( $a_0$ ) und in MATLAB aufbereitet.



Funktionsmodule verstehen lernen

Weiter – [Tipps / Vorgehensweise "per Hand"]

• Um das Ziegler-Nichols Verfahren nun anwenden zu können muss die kritische Verstärkung  $K_{P_{Krit}}$  bestimmt werden ab der das geschlossene System instabil werden würde. Bei Anwendung an realen Systemen kann hierzu eine Verstärkung über einen P-Regler in das System eingebracht werden und anhand dieser Verstärkung die kritische Verstärkung experimentell bestimmt werden. "Per Hand" muss das Hurzwitzkriterium am geschlossenen System angewendet werden und  $K_{P_{Krit}}$  kann analytisch bestimmt werden.

charakteristische Gleichung des geschlossenen Systems:

$$G_W(s)[K_P] = 1 + G_o(s) = 1 + KP \frac{1}{125s^3 + 60s^2 + 12s + 1}$$

$$verst \ddot{a}rkt \ durch \ K_{P_{Krit}}:$$

$$G_W(s)[K_{P_{Krit}}] = \frac{125s^3 + 60s^2 + 12s + 1 + K_{P_{Krit}}}{125s^3 + 60s^2 + 12s + 1} = 0$$

$$125s^3 + 60s^2 + 12s + 1 + K_{P_{Krit}} = 0$$

$$D_{Hurwitz} = a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 60 * 12 - 125 * (1 + K_{P_{Krit}}) = 0$$

$$K_{P_{Krit}} = a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 60 * 12 - 125 * (1 + K_{P_{Krit}})$$

$$K_{P_{Krit}} = \frac{119}{25} = 4,76$$

• Der nächste Schritt ist die Bestimmung der Periodendauer der grenzstabilen Dauerschwingung  $T_{Krit}$ . Dies könnte bei realen Systemen wiederum aufgezeichnet und somit experimentell bestimmt werden. "Per Hand" lässt sich  $T_{Krit}$  wiederum durch analytische Berechnungen bestimmen. Wichtig ist hierbei die Frequenz im kritischen Punkt des Frequenzganges des offenen Systems  $F_{(\omega)} = -1$ .

$$\begin{split} K_{P_{Krit}} * G_{O}(j\omega) &= K_{P_{Krit}} * \frac{1}{125(j\omega)^{3} + 60(j\omega)^{2} + 12(j\omega) + 1} = -1 \\ K_{P_{Krit}} &= -(-125*j*\omega^{3} - 60*\omega^{2} + 12*j*\omega + 1) \\ Realteil + Imagin \ddot{a}rteil &= \left(60\omega^{2} - 1 - K_{P_{Krit}}\right) + (125\omega^{3} - 12\omega)*j \\ &\to Beide\ Teile\ nach\ \omega\ auf\ l\ddot{o}sen \\ \omega_{real} &= \frac{2\sqrt{15}}{25} = \omega_{imag} = \frac{2\sqrt{15}}{25} = \omega_{Krit} \\ T_{Krit} &= \frac{2*\pi}{\omega_{Krit}} = \frac{25*\pi}{\sqrt{15}} \approx \mathbf{20,2789} \end{split}$$

 Nachdem die Parameter K<sub>PKrit</sub> und T<sub>Krit</sub> festgelegt, empirisch bestimmt oder analytisch errechnet wurden, kann der jeweilige Regler nach den Einstellungsregeln ausgelegt werden. Im Fall dieser Übung soll ein PID-Regler erstellt werden. Die Reglerparameter errechnen sich deshalb wie folgt:

$$K_P = 0.60 * 4.76 = 2.856$$
 $T_n = 0.12 * 20.2789 = 2.433$ 
 $T_v = 0.50 * 20.2789 = 10.139$ 



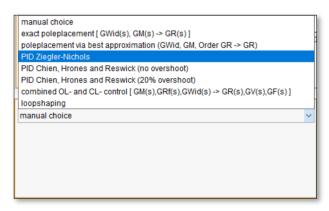
Funktionsmodule verstehen lernen

Nach der Auslegung "per Hand" steht fest wie der Regler nach Ziegler-Nichols Verfahren auszusehen hat. Nun kann die Übertragungsfunktion in pzMove eingegeben werden und die stark automatisierte Auslegung mithilfe von pzMove verifiziert werden.

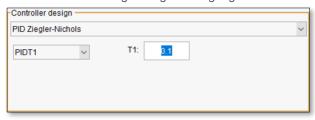
#### Übungsziel

Verifizierung des "per Hand" ausgelegten PID-Reglers und Verständnis dafür entwickeln wie viele Arbeitsschritte mithilfe von pzMove eingespart werden können.

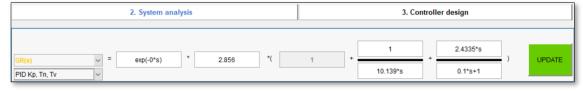
#### Ergebnisvergleich / Lösungen



Auswahl des richtigen Reglerauslegungsverfahrens



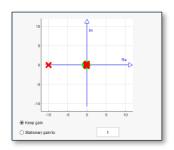
Ein PID-Regler wird in der Aufgabenstellung verlangt (Zeitkonstante T1 für den realisierbaren D-Anteil darf auch kleiner gewählt werden)



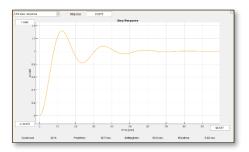
In System Analysis lässt sich der Regler auch in seinen einzelnen Reglerparametern darstellen (So lassen sich die Ergebnisse für  $K_P$ ,  $T_n$  und  $T_v$  einfach und auf einen Blick verifizieren)



Funktionsmodule verstehen lernen



Die pzMap des geschlossenen und geregelten System Zurück zur Funktionsfläche



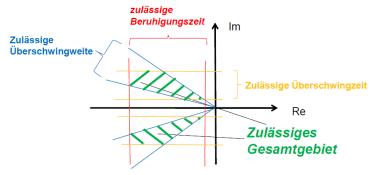
Die Sprungantwort des geregelten Systems



Funktionsmodule verstehen lernen



# Übung: Manipulieren der Pol- und Nullstellen (am Beispiel des dominierenden Polpaares)



Ausschnitt aus dem Skript zur Reglerauslegung mit dom. Polpaar [Kap. 7, S 23]

#### Einführung

pzMap eignet sich hervorragend um Zusammenhänge zwischen Null- und Polstellenposition und dem Ausgangsverhalten/Regelverhalten der manipulierten Übertragungsfunktionen zu sehen. Das Verständnis komplizierter Zusammenhänge, können so empirisch nachvollzogen werden.

Ein etwas komplexeres Beispiel hierfür ist die Reglersynthese mithilfe eines dominierenden Polpaares. Die Auswirkungen von Polstellenposition des dominierenden Paares und die Zusammenhänge mit den Systemanforderungen bei solchen Aufgaben lassen sich mit der "drag&drop" Methodik der pzMap wunderbar beobachten.

#### Aufgabenstellung

1. Die Reglerauslegung mithilfe dominierendem Polpaar:

Beginnen wir mit einer Reglersyntheseaufgabe wie sie auch in der Realität oder in Prüfungssituationen vorliegen kann. Gegeben ist die Übertragungsfunktion einer zu regelnden Strecke.

$$G_S(s) = \frac{1}{1-25s}$$
 (siehe auch ReTe Klausur SS2013 Auf gabe 3)

Sobald Sie die Strecke in pzMove eingegeben haben werden Sie sehen, dass die Strecke instabil ist. Es gilt nun einen geeigneten Regler zu entwerfen (Reglersynthese). Als weitere Aufgabenstellung kommen jedoch noch 3 Anforderungen für den geschlossenen Regelkreis hinzu:

- a. Der geschlossene Regelkreis soll stabil sein
- b. Die Überschwingweite ∆h soll 0,02 betragen
- c. Die Beruhigungszeit soll 3 Sekunden betragen

Um diese Anforderungen mit einem geeigneten Regler zu erreichen bietet sich die Reglerauslegung mithilfe des dominierenden Polpaares an.

Versuchen Sie zunächst einmal den Regler "per Hand" mithilfe der Rechenregeln aus dem Skript [Kapitel 7, Seiten 7-23] zu entwerfen und überprüfen Sie ihr Ergebnis mit der folgenden Übertragungsfunktion für den Regler:

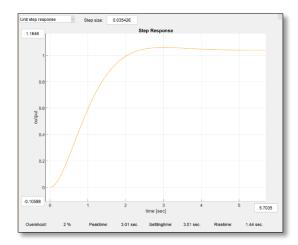


Funktionsmodule verstehen lernen

Gewünschte Regler-Übertragungsfunktion:

$$G_R(s) = \frac{-72,135}{(s+2,64)}$$

Geben Sie nun Regler und Strecke in pzMove ein, erzeugen Sie im "Controller Design" Funktionsmodul das geschlossene System (Gw(s)) und bewerten Sie das Ergebnis:



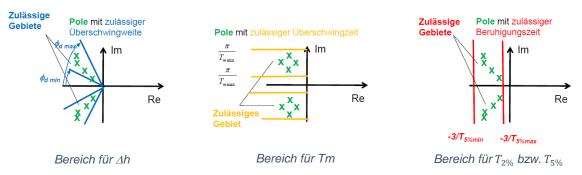
Das Ergebnis für die Sprungantwort ist in diesem Fall der ausschlaggebende Faktor. In ihr (der Sprungantwort) sind  $\Delta h$  (Overshoot) und Beruhigungszeit (Settlingtime) bereits aufgezeigt.

Anhand des Graphen und der herausgeführten Werte lässt sich sehen, dass der Regler den 3 Anforderungen gerecht wird. Die Reglersynthese ist also geglückt.

Diese Übung soll aber nicht nur beweisen das die Auslegungsregeln aus dem Skript funktionieren, sondern ebenfalls ein gewisses Verständnis für die Pollagenbereiche schaffen. Sie sind mit der Übung also noch nicht ganz fertig.

#### 2. Empirisches Nachvollziehen der Pollagenbereiche

pzMove ermöglicht nun mithilfe der pzMap die Auslegungsregeln des Skripts anhand der Pol-Lage zu überprüfen. Beachten Sie zunächst die drei ausschlaggebenden Bereiche für die jeweilige Systemanforderung:



Nun nutzen Sie die "drag&drop" Methode der pzMap um die Pole entlang der 3 Bereiche zu bewegen. Also entlang einer "gedachten" Ursprungshalbgerade, parallel entlang der Horizontalen und parallel entlang der vertikalen Achse. Sie werden bemerken, dass sich zwar alle 3 Systemanforderungen stetig verändern aber die jeweilige Anforderung sich entlang ihres Pollagenbereiches weniger verändert als die anderen Systemanforderungen.

Experimentieren Sie gerne mit allen 3 Systemanforderungen und versuchen Sie ein Gefühl für die Zusammenhänge zwischen Polposition und Ausgangsverhalten zu bekommen.



Funktionsmodule verstehen lerner

#### Übungsziel

Verstehen der "drag&drop"-Methodik bei Verschiebung von Pol- und Nullstellen. Entwickeln eines Gefühles für die Zusammenhänge zwischen Pollage und Ausgangsverhalten.

Zurück zur Funktionsfläche – pzMap (System Analysis)

<u>Zurück zur Funktionsfläche – Reglerauslegung (Controller Design)</u>



Funktionsmodule verstehen lernen



### Minimalbeispiel: Eigener Identifikationsversuch

#### Einführung

An einem kleinen Minimalbeispiel soll gezeigt werden, wie in MATLAB ein Datensatz erzeugt werden kann mithilfe dessen sich das Modul "Identifikation" verifizieren lässt. An diesem Beispiel kann zum einen die Bedienung des Moduls verdeutlicht werden und zum anderen kann ein Verständnis für die Parameter einer einfachen Regelstrecke entwickelt werden

Gegeben sei folgende Strecke erster Ordnung:

$$G(s) = \frac{Ks}{1 + T_1 * s}$$

#### Aufgabenstellung

- I. Geben sie die Angegebene Strecke in MATLAB ein, wählen sie hierbei selbstständig sinnvolle Werte für Ks und  $T_1$
- II. Erzeugen sie ein zeitabhängiges Eingangssignal u(t)
- III. Simulieren sie ein "perfektes" zeitabhängiges Ausgangssignal y(t)
- IV. Verrauschen sie Werte von y(t) (beispielsweise mit einem normalverteilten Zufallswert) und erzeugen sie so ein "reales" Signal einer "unbekannten" Strecke als  $y_{real}(t)$
- V. Speichern sie die Zeitwerte, das Eingangssignal und das "reale" Ausgangssignal als .mat-Datei für pzMove ab
- VI. Importieren sie die .mat-Datei und identifizieren sie die Strecke mit dem Modul "Identifikation"

#### Beispielhaftes MATLAB-Skript

```
%% Ident Minimalexample
%% SUBTASK I
              [Gs creation]
% parameter definition
T1 = 5;
Ks = 1;
% create tf function
s = tf('s'); %define s as tf() object
Gs = Ks/(1+T1*s);
display (Gs)
% generate u (Input) and y (output)
%% SUBTASK II [u(t) creation]
tau = 75; %period duration of periodic signal(in seconds)
Tf = 150;
              %time duration of the signal (in seconds)
Ts = 0.1; %spacing between the time samples(in seconds)
[u,t] = gensig('square',tau,Tf,Ts); %generate square signal
%% SUBTASK III [y(t) creation]
y = lsim(Gs, u, t);
```

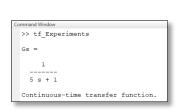


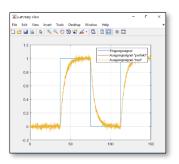
Funktionsmodule verstehen lernen

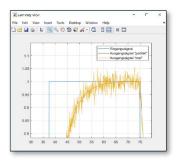
```
%% SUBTASK IV [create y real(t)]
% create noise
                                      %standard deviation
sigma = 0.025;
noise = randn(length(y),1)*sigma;
                                     %random normal distribution
% add noise to output signal
y real = y+noise;
% show results
figure('Name','Summary View','NumberTitle','off')
plot(t,u)
hold on
plot(t,y)
plot(t,y real)
hold off
grid on
legend('Eingangssignal','Ausgangssignal "perfekt"',...
       'Ausgangssignal "real"')
%% SUBTASK V
               [save as .mat-File]
data = [t,u,y real];
                      %pzMove expects a matrix M = [t, u(t), y(t)]
save('Ident_data.mat','data');
% end of skript
```

#### Übersicht über den Datensatz

Nachdem das MATLAB Skript ausgeführt wurde, befindet sich der Datensatz als .mat-Datei im gleichen Verzeichnis wie das Skript. Die Ausgabe im Command Window und der Plot geben einen kleinen Überblick über das "perfekte" (y(t)) und das "reale"  $(y_real(t))$  Signal.







Ausgabe im Command Window

Übersicht über den Signalverlauf

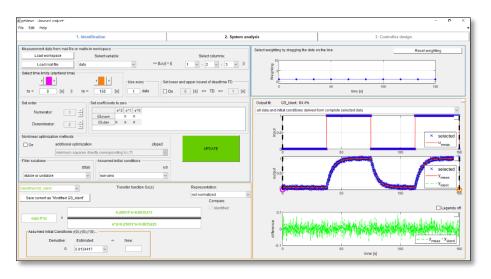
Das Rauschen des "realen" Signals (gelb) ist klar zu erkennen



Funktionsmodule verstehen lernen

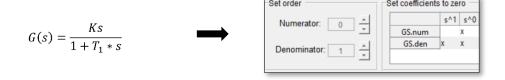
#### Identifikation der "unbekannten" Strecke mithilfe von pzMove

Die erstellte .mat-Datei kann nun in pzMove eingelesen werden, um die Strecke zu identifizieren. Dazu nach dem Start von pzMove auf das Modul "Identification" wechseln und über die Schaltfläche "Load mat-file" die .mat-Datei einlesen. Die "Update" Schaltfläche verfärbt sich rot und zeigt dadurch an, dass die Plots auf der rechten Seite nicht mehr aktuell sind. Aktualisieren sie die Anzeigen zunächst über die besagte "Update" Schaltfläche um den Datensatz kontrollieren zu können.



Benutzeroberfläche nach Einlesen und Aktualisieren des Datensatzes

Um ein sinnvolles Ergebnis für die Übertragungsfunktion der Strecke zu erhalten, sollte die Ordnung des Zählers und des Nenners eingestellt werden. In unserem Beispiel handelt es sich um eine PT1-Strecke. Das heißt, der Zähler weißt eine Ordnung von 0 und der Nenner eine Ordnung von 1 auf.



Erwartete Strecken-Übertragungsfunktion

Einstellungen in den Feldern "Set order" und "Set coefficients to zero"

Nachdem die Einstellungen für die Ordnung (eng.: order) und die erwarteten Koeffizienten (eng.: coefficients) angepasst wurden, können die Anzeigen erneut über die "Update" Schaltfläche aktualisiert werden.



Funktionsmodule verstehen lernen



Sinnvoll identifizierte Übertragungsfunktion GS\_Ident

Um die Parameter effektiv mit den erwarteten Werten zu vergleichen kann die Darstellungsform angepasst werden. Dem Standard entsprechend wird die identifizierte Übertragungsfunktion zunächst in der "nicht normalisierten" Ansicht präsentiert. Im Dropdown-Menü "Representation:" lässt sich die Darstellung ändern.



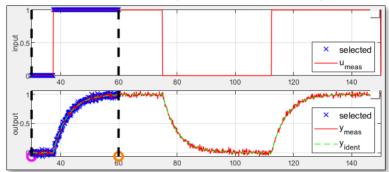
Identifizierte Übertragungsfunktion in der Zeitkonstantendarstellung

Die identifizierte Streckenfunktion liegt erkennbar nahe an der ursprünglichen Übertragungsfunktion. Würde man die Parameter Ks und  $T_1$  im gegebenen Beispiel auf eine gültige Stelle runden so hätte man bereits die gesuchte Übertragungsfunktion gefunden.

Sollen die Ergebnisse noch weiter verbessert werden, kann an einer Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten beeinflusst werden, wie genau die Strecke identifiziert wird. Die folgenden Schritte sind hierbei beispielhaft und erheben in keiner Weise den Anspruch auf ein perfektes Ergebnis. Es soll lediglich gezeigt werden, dass sich eine Genauigkeit von zwei gültigen Stellen (die Parameter Ks und  $T_1$  betreffend) auch trotz des verrauschten ("realen") Signals erreichen lässt.



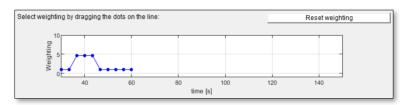
Zunächst kann es von Vorteil sein den Signalbereich auf eine Sprungantwort zu begrenzen



Der begrenzte Bereich umfasst den ersten Sprung und nur relativ kleine Bereiche in denen das Signal ein lineares Verhalten aufweißt



Funktionsmodule verstehen lernen



Zusätzlich kann der Bereich noch unterschiedlich "gewichtet" werden

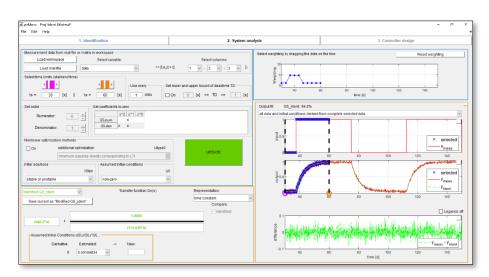
#### Auch hier gilt:

Bereiche in denen, dass Verhalten nur wenige Änderungen aufweist (lineares Verhalten) sind weniger wichtig wie Bereiche in denen das System wirklich auf das Eingangssignal reagiert

Nachdem die Bereiche limitiert und gewichtet wurden lassen sich die Parameter im Beispiel bis auf 2 gültige Stellen (im Fall von ... sogar auf 3 gültige Stellen) an die anfangs gewählten Werte rückrechnen. Das Verfahren ermöglicht also auch bei relativ verrauschten Messwerten eine zuverlässige Identifikation unbekannter Strecken.



Identifizierte Strecke mit Parametern ... und ... auf 2 gültige Stellen genau



Überblick über das gesamte Identification-Modul nachdem die Anforderungen für Gs\_Ident erreicht wurden



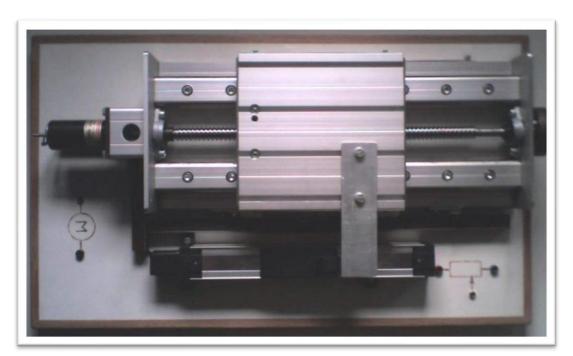
Anwendung der Software Schritt für Schritt

### Einführung in die Werkzeugsystematik von pzMove

pzMove ist gleichzeitig Lehrtool wie auch Werkzeug. Damit die Systematik des Werkzeugeinsatzes nachvollzogen werden kann, wird im folgenden Kapitel ein beispielhafter Einsatz der Software an einer Regelungsaufgabe in einer Schritt für Schritt Dokumentation aufbereitet.

Die nachfolgende Gliederung führt durch dieses Kapitel und dient als Übersicht für das beschriebene Beispiel:

- 1. Vorbereitung der Daten
- 2. Theoretische Überlegungen vor der Identifikation
- 3. Identifikation einer fremden Strecke
- 4. Analyse der identifizierten Strecke
- 5. Reglerauswahl mithilfe von pzMove
- 6. Analyse des Reglers und des geregelten Systems
- 1. Vorbereitung der Daten



Systembild des Praktikumversuches "Nachlauf"



### Anwendung der Software Schritt für Schritt

Am Beispiel vom Praktikumsversuch "Nachlauf" soll der Einsatz von pzMove veranschaulicht werden. "Nachlaufregelkreise (sog. Servos) sind in der Technik weit verbreitet: Servolenkung, Servobremse, Kopierfräser, CNC-Maschine, Rudermaschinen, Autopilot, autom. Landeverfahren, Rendezvous-Manöver etc. Das besondere Kennzeichen besteht darin, dass der Sollwert, d. h. die Position, keine konstante Größe sein muss wie bei der Festwertregelung, sondern eine zeitabhängige Funktion bilden kann, der der Regelkreis nachfolgen muss."

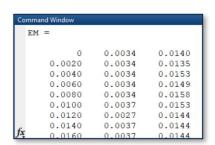
Die Daten aus dem Versuchsverlauf werden aufgezeichnet und können in einer vorgegebenen Form in pzMove aufgenommen werden. Die Form, die dazu benötigt wird kann folgendermaßen beschrieben werden:

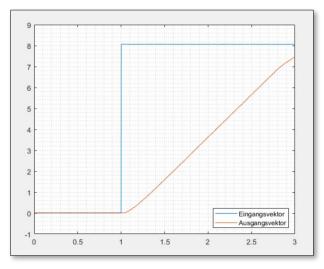
$$Eingabenmatrix = [Zeitvektor, Eingangsvektor, Aussgangsvektor]$$
 
$$EM = [\vec{t}, \overrightarrow{u(t)}, \overrightarrow{y(t)}]$$

Um dieser Anleitung auch ohne Versuchsdurchführung folgen zu können sind die Daten auf der Homepage der TH-Rosenheim als .zip-Archiv verfügbar:

#### Datenpaket\_Nachlauf-IT1-Strecke

Diese Daten lassen sich im gegebenen Fall beispielsweise zunächst in MATLAB visualisieren. Deutlich zu sehen ist das Eingabesignal (Eingangsvektor) und die träge Reaktion der ungeregelten Strecke in Form des Ausgangssignals (Ausgangsvektor).





Charakteristische Eingabematrix

Plot des Datensatzes in MATLAB

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Versuchsanleitung "Nachlauf"; Praktikumsunterlagen Regelungstechnik Praktikum; Wintersemester 2018



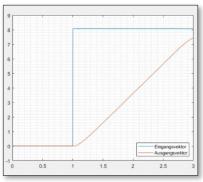
### Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### Theoretische Überlegungen vor der Identifikation

Um die Güte der identifizierten Strecke zu verbessern sollten Vorüberlegungen zur Ordnung des Zählers und des Nenners der Streckenübertragungsfunktion getroffen werden. Hierzu werden beispielsweise die aufgezeichneten Daten visualisiert und es lässt sich anhand des Verhaltens auf die Form der Übertragungsfunktion schließen.

Bei der Visualisierung der Daten kann das Verhalten eines Integriergliedes identifiziert werden. Das Ausgangssignal entspricht, bis auf eine geringe Verzögerung, dem Integral des Eingangssignals.3

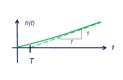
Die Verzögerung lässt sich durch Aufbereitung des Signalverlaufes empirisch bestimmen:



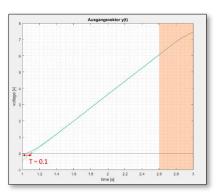
Aufbereitung

(Rampe als Integration des Sprungs)

Visualisierung der Daten ohne weitere



Empirische Analyse der Verzögerung



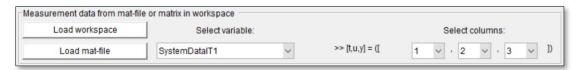
Aufbereitetes Ausgabesignal - Auslauf wurde Isoliert - oranger Bereich - Eischaltzeitpunkt [t = 1] dient als Schnittmarke für Gesamtsignal - Linearer Verlauf in grün bis auf den Nulldurchgang verlängert → T~0.1s

Aus den Überlegungen kann folgende Form für die Streckenübertragungsfunktion angenommen werden:

$$G(s) = \left(\frac{K_s}{s * (1 + T_s * s)}\right) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

#### 3. Identifikation einer fremden Strecke

Die Eingabematrix kann nun in pzMove eingelesen werden. Dies kann entweder über den MATLAB eigenen Workspace oder in Form einer mat-Datei geschehen. Bei der standalone-Version von pzMove empfiehlt sich das Vorgehen über mat-Datei.

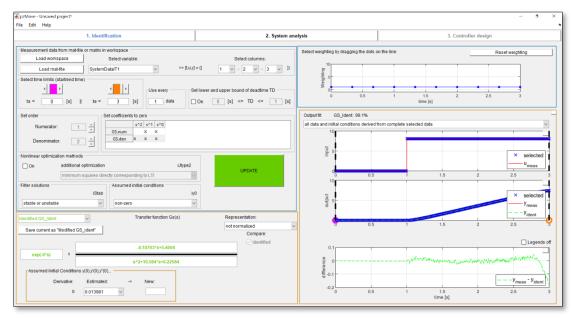


Charakteristische Eingabematrix

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Siehe hierzu: Regelungstechnik 1 Vorlesungsskript; Peter Zentgraf; 2018; Kap. 4 S. 84



Anwendung der Software Schritt für Schritt



Identifizierte Strecke ohne weitere Einstellung

Ohne weitere Einstellungen an pzMove vorzunehmen kann mithilfe der eingelesenen Matrix zunächst ein Bild des Datensatzes gemacht werden. Die identifizierte Strecke ist hierbei stark abhängig von eben diesen selektierten Einstellungen. Um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten sollten die im Vorhinein getroffenen Überlegungen nun auf die Einstellungen übertragen werden:



Ohne weitere Einstellungen macht die Strecke keinen Sinn bzw. wird sie nicht in der erwarteten Form identifiziert

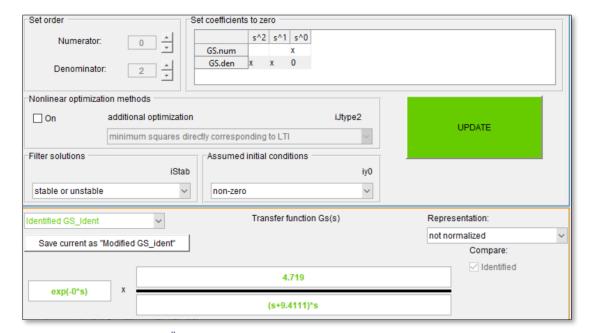
Da eine IT1-Übertragungsfunktion erwartet wird müssen die folgenden Anpassungen in pzMove vorgenommen werden um die identifizierte Übertragungsfunktion in die richtige Form zu bringen:

- Ordnung des Nenners (Numerator)
  - Koeffizient für s^0
- Ordnung des Zählers (Denominator)
  - Koeffizient f
    ür s^0
  - Koeffizient f
    ür s^1
  - Koeffizient für s^2

- = 0
- = x [vorhanden]
- = 2
- = 0 [nicht vorhanden]
- = x [vorhanden]
- = x [vorhanden]



### Anwendung der Software Schritt für Schritt



Nachdem die theoretischen Überlegungen zur Streckenübertragungsfunktion umgesetzt wurden entspricht die identifizierte Übertragungsfunktion der erwarteten Form

Zur weiteren Verbesserung der identifizierten Übertragungsfunktion werden die Einstellungen verfeinert. Bei der Verfeinerung der Einstellungen ist es zielführend zunächst Güteanforderungen für die Verfeinerungen festzulegen. Im gegebenen Beispiel wurde eine Güte von 99 % (im betrachteten Zeitbereich) vorausgesetzt.

Mit den folgenden Parametern konnte die Anforderung umgesetzt werden:

#### time limits



ts (starttime)

= 1 s

te (endtime)

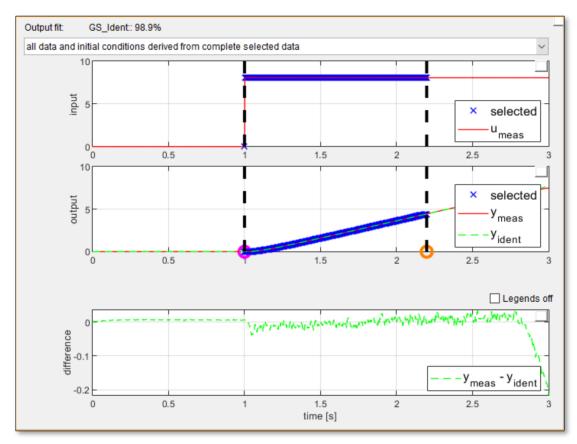
= 2.5 s

Der Grund für diesen Zeitbereich ist das im verwendeten Datensatz erst nach einer Sekunde Eingangsdaten empfangen wurden. Davor ist der Eingang gleich Null und verbessert deshalb nicht das Identifikationsergebnis. (Eingang = 0, wird von jeder beliebigen Strecke gewährleistet und ist deshalb nicht als Identifikationskennzeichen zu gebrauchen)

Im späteren Verlauf (t>2,5s) lief der Positionsschlitten des Versuchsaufbaus in einen Endschalter. Die aufgezeichneten Daten entsprechen ab dieser Stelle nicht mehr der angetriebenen Positionierung.

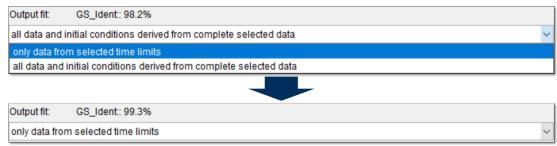


Anwendung der Software Schritt für Schritt



Beispielhafte Auswahl eines neuen Zeitbereichs T = [1 < t < 2.2]s

Nach jeder weiteren Anpassung muss die Identifikation durch den "Update"-Button wieder bestätigt werden. Der ausgewählte Zeitbereich wird standardisiert nur für die Identifikation der Strecke verwendet. Soll die identifizierte Strecke auch nur im gewählten Zeitbereich mit den Messdaten verglichen werden dann muss dies im Dropdown-Menü über den Plots ausgewählt werden.

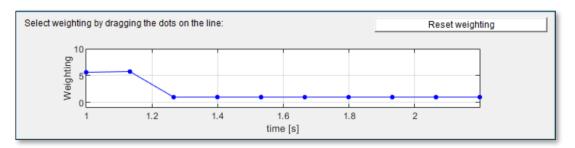


Dialogfenster beim Wechsel auf das Modul "System Analysis"

Beachten sie auch die Veränderung der erreichten Güte ("Output fit:"). Soll die Vorgegebene Güte-Anforderung von 99% erreicht werden dann müssen Sie die Zeitbereiche wie gezeigt im Dropdown-Menü auch für den Vergleich der Daten verwenden.

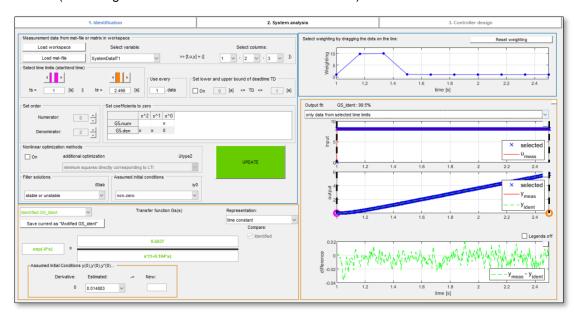


Anwendung der Software Schritt für Schritt



Vor allem im Bereich des reaktiven Verhaltens (t = 1 - 1.2) wird der Datensatz für den Identifikationsalgorithmus gewichtet

Es waren keine weiteren Verfeinerungen nötig um die festgelegten Güteanforderungen zu erreichen (siehe folgenden Screenshot der Nutzeroberfläche):



Endgültig Identifizierte Streckenübertragungsfunktion

Die Oberfläche des Moduls Identifikation wird über den Klick auf "System Analysis" eingeleitet. Es kann entschieden werden ob die identifizierte Streckenübertragungsfunktion übernommen werden soll und wenn, ob sie als GM oder GMC (Model für die Kaskadenregelung) abgespeichert wird.

Im Beispiel wird sie als GM also als Model der Strecke übernommen, um sie im Folgenden noch weiter zu analysieren und nicht zuletzt mithilfe von Reglern zu regeln.



Dialogfenster beim Wechsel auf das Modul "System Analysis"



### Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### 4. Analyse des offenen Systems

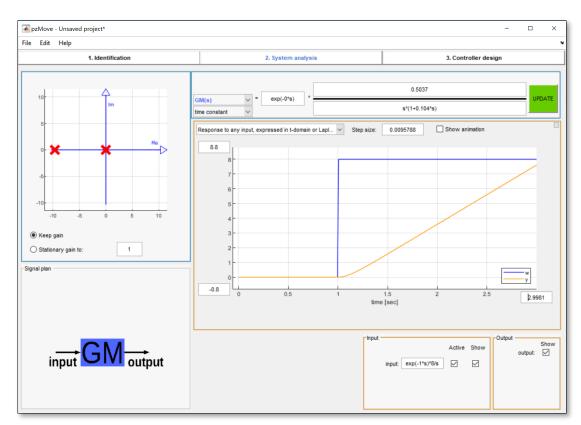
Im Modul "System Analysis" kann nun die identifizierte Strecke als offenes System analysiert werden. So kann z.B. das Verhalten auf andere Eingangssignale simuliert werden oder über die verschiedenen Stabilitätskriterien Aussagen über das geschlossene System getroffen werden.

Stellvertretend wird hierzu das Eingangssignal noch einmal in das System gespeist und das simulierte Ausgangssignal und ermöglicht reellen Datensatz verglichen werden. Um das System an einem beliebigen Eingangssignal zu simulieren muss aber zunächst die Plot-Anzeige geändert werden.



Dropdown-Menü für die Plot-Anzeige

Das einzustellende Eingangssignal ist um eine Sekunde verzögert und hat eine Sprunghöhe von 8

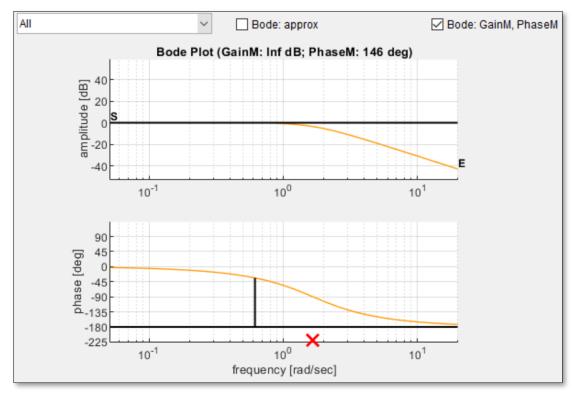


Antwort auf beliebige Antworten (hier  $u(s) = e^{-s} * \frac{8}{s}$ ) deutlich vergleichbar mit der ursprünglichen reellen Systemantwort



### Anwendung der Software Schritt für Schritt

Jetzt wo die Streckenantwort verifiziert wurde kann noch einmal auf die Ansicht mit allen Plots oder auf den Bode-Plot gewechselt werden um Parameter wie den Amplitudenrand und Phasenrand zu analysieren. Wenn Sie die (automatisch) gemessenen Werte, die über dem Bode Plot zu sehen sind, auch im Plot sehen wollen müssen sie die entsprechende Checkbox aktivieren.



Eingezeichneter Phasenrand ( $\alpha r = 146^{\circ}$ ) und "unendlicher" Amplitudenrand

Für die letztendliche Reglerauslegung muss auf das Modul "Controller Design" gewechselt werden.



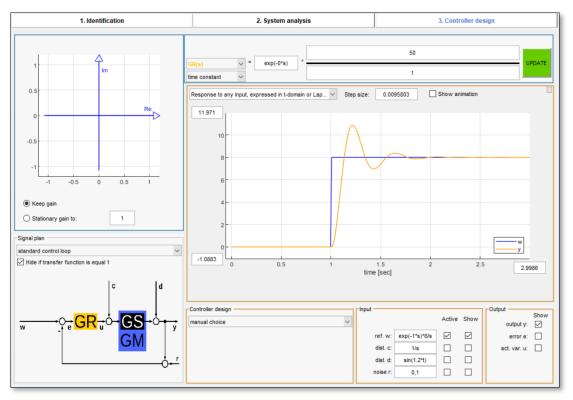
### Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### 5. Auslegung des Reglers

#### Manuelle Auslegung (P-Regler)

Aufgrund des unendlichen Amplitudenrandes im Bode-Diagramm ist ersichtlich, dass das geschlossene System mithilfe eines P-Reglers unendlich verstärkt werden kann.<sup>4</sup> Um diese Aussage zu überprüfen bietet sich die manuelle Reglerauslegung an. Diese ist nach dem Wechsel auf das Modul "Controller Design" standardmäßig eingestellt, deshalb muss am eigentlichen Auswahlmenü für die Regler-Auslegungsmethode keine weitere Einstellung vorgenommen werden. Lediglich der Wert Kp für den P-Regler muss in die Übertragungsfunktion des Reglers eingegeben werden.

Um die Reaktion des Systems zu simulieren wird wieder das verzögerte Eingangssignal mit Sprunghöhe 8 im "Response to any input, …" Plot eingegeben.



Geschlossenes System geregelt mit einem P-Regler (Kp = 50)

An der Systemantwort ist abzulesen, dass das geschlossene und geregelte System zwar stabil ist aber weit über den Sollwert (w(t)) hinaus schwingt. Dies kann je nach Anwendungsfall zu großen Problemen führen (Beispiel Bearbeitungszentrum: Überschwingen der Positionierachse für das Fräswerkzeug zerstört das Werkstück). Also sollte auch bei unendlichem Amplitudenrand nicht zwangsweise auch unendlich stark verstärkt werden.

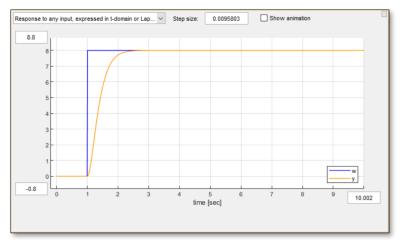
<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Siehe hierzu: Regelungstechnik 1 Vorlesungsskript; Peter Zentgraf; 2018; Kap. 6 S. 22



### Anwendung der Software Schritt für Schritt

[Ebenso bleibt zu beachten, dass durch eine "unendliche" Verstärkung auch eine "unendliche" Stellgröße (u(t)) benötigt werden würde. Dies ist in der Realität schlicht nicht möglich. Auf die Stellgröße und ihrer Begrenzung wird in diesem Einsatzbeispiel aber zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal eingegangen]

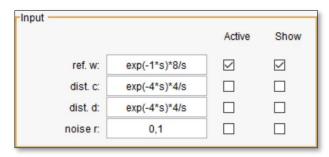
Eine kleinere Verstärkung kann dieses Überschwingen komplett verhindern.



Geschlossenes System geregelt mit einem P-Regler (Kp = 5) [Response to any input; Eingangssignal ( $ref.w(s) = e^{-1s} * \frac{8}{r}$ )]

Jedoch sind mit dem simplen P-Regler auch noch andere Problematiken verbunden die sich nicht ohne Weiteres ausgleichen lassen. So wäre es beispielsweise möglich, dass das System gestört wird. Dies kann in Form einer Störung vor dem eigentlichen Regler (disturbance "c") oder nach dem Regler (disturbance "d") geschehen.

Um die Auswirkung dieser Störungen zu analysieren müssen sie, ähnlich dem Eingabesignal zunächst eingegeben werden. Für das Beispiel werden Störungen vorbereitet die nach 3 Sekunden Versatz zum eigentlichen Eingangssignal zu wirken beginnen und um nur halb so stark auf das System einwirken wie das eigentliche Eingangssignal.

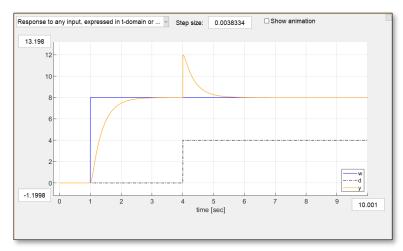


Vorbereitete Störungen VOR (dist. c) und NACH (dist. d) dem Regler

Die Vorbereiteten Störungen lassen sich über die Checkboxen auf der rechten Seite einblenden (Show) und aktivieren (Active). Zunächst wird die Störung nach dem Regler also Störung "d" eingeblendet und aktiviert.



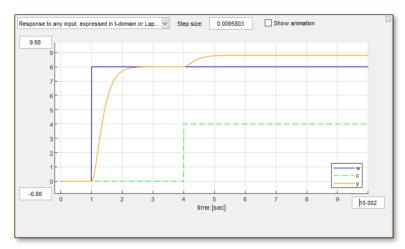
Anwendung der Software Schritt für Schritt



Auswirkungen der Störung NACH dem Regler [Response to any input; Eingangssignal (ref.  $w(s) = e^{-1s} * \frac{8}{s}$ ; dist.  $d(s) = e^{-4s} * \frac{4}{s}$ )]

Deutlich zu sehen ist, dass sich die Störung zwar stark auf das Ausgangssignal auswirkt aber genauso wie der Sprung des Eingangssignals, nach einer gewissen Zeit auf den Sollwert geregelt werden kann. Die Störung kann nun über die Checkboxen wieder deaktiviert und ausgeblendet werden.

Als Nächstes wird die Störung vor dem Regler aktiviert und eingeblendet. Eine Störung vor dem Regler kann vom P-Regler nicht vollständig ausgeglichen werden. Der Regler wird versuchen auf die Störung zu reagieren aber es wird zu einer bleibenden Regelabweichung kommen. Dem P-Regler sind in dieser Form klare Grenzen gesetzt.



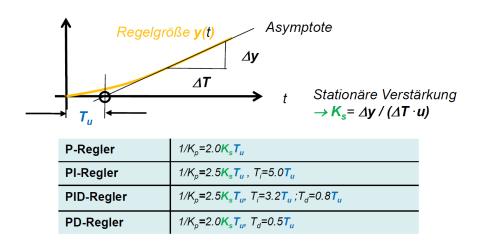
Auswirkungen der Störung VOR dem Regler [Response to any input; Eingangssignal (ref.  $w(s) = e^{-1s} * \frac{8}{s}$ ; dist.  $c(s) = e^{-4s} * \frac{4}{s}$ )]



Anwendung der Software Schritt für Schritt

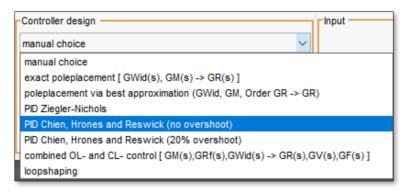
#### CHIEN, HRONES und RESWICK (PI-Regler)

Höhere Anforderungen für den Regler lassen sich schnell und effektiv durch die experimentellen Einstellregeln umsetzen. Im vorliegenden Beispiel soll hierbei ein PI-Regler mithilfe der Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick ausgelegt werden. Diese Einstellregeln ermöglichen eine sehr schnelle und einfache Reglersynthese über festgelegte Tabellenwerte bzw. Formeln die aus der Sprungantwort abgelesen werden können:



Einstellungsregeln von Chien, Hrones und Reswick aus dem Vorlesungsskript. Verdeutlicht sind die notwendigen Eingabeparameter Ks, Tu und Tg.

Die Regelparameter die eigentlich über die abgebildete Formel bestimmt werden müssen werden von pzMove automatisch ausgewählt. Lediglich die richtige Auslegungsmethode muss im Menü (controller design) für die Auslegungsmethoden ausgewählt werden.

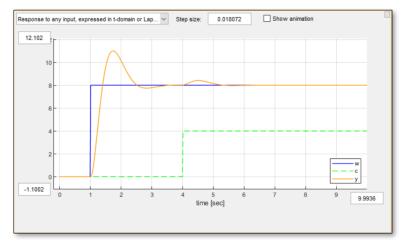


Auswahlmenü der möglichen Auslegungsmethoden (Chien, Hrones und Reswick zunächst als PID-Regler auswählbar)

Der PI-Regler sollte durch seinen I-Anteil auch die Störung zwischen Strecke und Regler vollständig ausgleichen sollen. Hierzu muss die Störung c wieder aktiviert werden. Beaufschlagt mit einer Störung nach 4 Sekunden ist klar zu erkennen, dass das geschlossene System die Störung nach kurzer Zeit auch ohne bleibender Regelabweichung ausgleichen kann.



Anwendung der Software Schritt für Schritt



Auswirkungen der Störung c bei Pl-Regler [Response to any input; Eingangssignal (ref.  $w(s) = e^{-1s} * \frac{8}{s}$ ; dist.  $c(s) = e^{-4s} * \frac{4}{s}$ )]

Gut sichtbar ist das das Ausgangssignal nun zwar nach der Störung wieder ausgeglichen wird aber stark überschwingt. Da es sich bei den Einstellregeln wie dem Chien, Hrones und Reswick Verfahren um empirische Einstellregeln handelt muss sich mit diesem Verhalten zufriedengegeben werden. Ein Zeichen dafür, dass auch die Einstellregeln ihre Grenzen haben.



### Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### Poleplacement via Approximation (PD-Regler)

Eine weniger einfache aber umso interessantere Möglichkeit, einen Regler auszulegen ist die Methode der vorbestimmten Pollage des geschlossenen Systems.

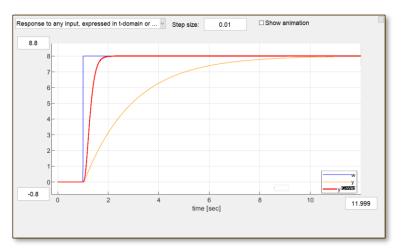
Hierbei sollten zunächst die gewünschten Anforderungen an das geregelte System in Parameter für eine Übertragungsfunktion definiert werden. Diese kann als Gwid also als ideales geschlossenes System (siehe Übertragungsfunktionen) vordefiniert werden. Für das vorliegende Beispiel sind die Vorgaben folgende:

Anforderungen	Umsetzung als Übertragungsfunktion	
Kein Überschwingen	nur reelle Pole	
Realisierung als PD-Regler	Zähler vom Grad 3 (Strecke hat bereits Grad 2)	
Geregeltes System soll <b>stabil</b> und schneller als	Kombiniert mit den vorhergehenden:	
das ungeregelte System sein	<b>→drei reelle</b> Pole bei -10	

Folgende Übertragungsfunktion erfüllt also beispielsweise diese Anforderungen:

$$Gw_{id}(s) = \frac{10^3}{(s+10)^3}$$

Diese wird als GWid eingegeben. Im Modul System Analysis ist es möglich sich die resultierende Antwort von Gwid anzusehen und mit den gestellten Anforderungen zu vergleichen.



Übereinandergelegte Sprungantworten des ungeregelten Systems Gw (orange) und Gwid (rot) [! Achtung, pzMove kann in der aktuellen Version keine zwei Systeme in einem Plot darstellen. Der gezeigte Plot wurde zur Veranschaulichung modifiziert. Versuchen Sie nicht ihn mit pzMove zu erstellen!]

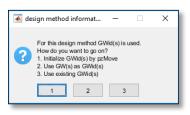


### Anwendung der Software Schritt für Schritt

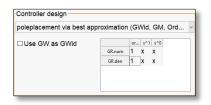
Nachdem Gwid als tauglich validiert wurde kann der Regler ausgelegt werden. Hierzu folgende Dialogfolge durchlaufen:



Auslegungsmethode: poleplacement via best approximation

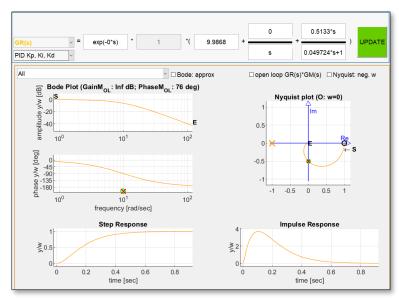


Fortführende Schritte:
Da Gwid bereits eingerichtet wurde
mit **Schaltfläche 3** fortfahren



Finalisieren des Reglers: Die Ordnung von Nenner und Zähler muss jeweils 1 betragen um einen kausalen PD-Regler realisieren zu können

Nach diesen Schritten ist der Regler ausgelegt und die errechneten Parameter lassen sich über GR kontrollieren. Dazu wechseln Sie auf den Regler im Modul System-Analysis oder Sie ändern die Auslegungsmethode wieder auf "manual"



Resultat der Regleranalyse [Regler in PID Schreibweise, D-Glied mit realisierbarem I-Anteil]

Mit diesem Regler lässt sich nun ein Regelkreis realisieren der ohne zu überschwingen, stabil und schneller als das ungeregelte System reagiert.

Natürlich ist beim PD-Regler eine Störung zwischen Strecke und Regler wieder eine Ursache für eine bleibende Regelabweichung. Zusätzliche Möglichkeiten bietet hier der PID-Regler. Siehe dafür beispielsweise: Ziegler & Nichols – Übung.

An dieser Stelle sei die Reglerauslegung beendet. pzMove bietet aber auch über die simple Auslegung des Reglers noch mehrere fortgeschrittene Features und Einstellungsmöglichkeiten die im folgenden Unterkapitel angeschnitten werden sollen.

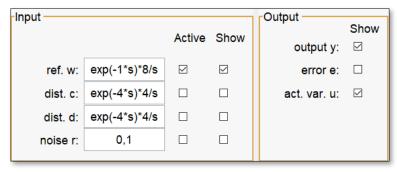


### Anwendung der Software Schritt für Schritt

6. Fortgeschrittene Einstellungen und Möglichkeiten

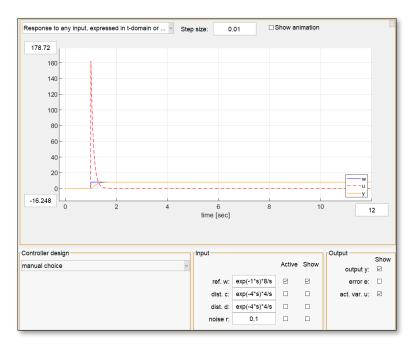
#### Signal- und Stellgrößenbegrenzung (Sättigung)

Der PD Regler als solches gibt eine gute Gelegenheit um auf die Begrenzung des Stellwertes bzw. des Stellsignals u(t) einzugehen. Dieses lässt sich ähnlich den Ein-, Aus- und Störsignalen auch im Plot für zeitlich abhängige Systemantworten anzeigen.



Auswahlmenüs Input und Output [Stellsignal = "act. var. u]

Aktiviert man die zugehörige Checkbox so wird der Verlauf des Stellsignals angezeigt und wenn notwendig auch die Achsen des Plots angepasst.



Verlauf des unlimitierten Stellsignals bei dem vorher ausgelegten PD-Regler [ebenso wie Eingang und Ausgangssignal]

Nun ist nicht jedes System in der Lage derlei Spitzen im Verlauf der Stellgröße zu gewährleisten. Viel näher an der Realität sind systembedingte Grenzen die die Hardware vorgibt und auf die die Simulation des Regelkreises dann auch angepasst werden muss.

pzMove hat für diese Notwendigkeiten eigene und teilweise sehr spezifische Einstellungen, zu denen man über die Menüleiste der Software gelangt (siehe Einstellungen). Unter anderem auch



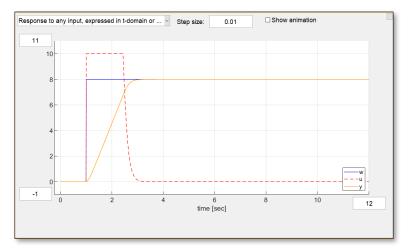
### Anwendung der Software Schritt für Schritt

Einstellungen die die Signal- und Stellgrößenbegrenzung (auch Sättigung oder eng. "saturation") regeln können:



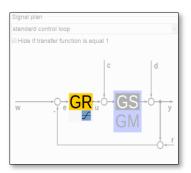
Beispiel für die Begrenzung der Stellgröße auf maximal 10 bzw. -10 [Auszug aus: Einstellungen]

Nach der Begrenzung der Stellgröße, werden die Signalverläufe neu errechnet und die Zeitabhängigen Plots angepasst:



Antwortverhalten nach Begrenzung der Stellgröße [deutlich zu sehen die Limitierung des Stellsignals (rot, strichlinie)]

Die Begrenzung der Stellgröße wird von pzMove im Übrigen auch im Signal-Plan durch ein spezielles Symbol ( ) angezeigt. Erscheint es unter dem Regler, so wird die Stellgröße bzw. deren Signal in den eingestellten Grenzen gehalten.



Sättigungssymbol unter dem Regler im Signal-Plan [Abbildung bearbeitet, restliche Symbole sind ausgeblichen]



Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### Robuste Regelkreise durch Variationen der Strecke

Ebenfalls Teil der Einstellungen ist eine Checkbox die das Modell der Regelstrecke (GM) und die Regelstrecke selbst (GS) miteinander gleichsetzt:

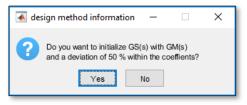


Beispiel für die Begrenzung der Stellgröße auf maximal 10 bzw. -10 [Auszug aus: Einstellungen]

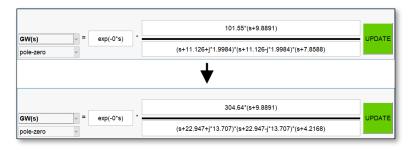
Diese Checkbox ist standardmäßig beim Start von pzMove aktiviert. Sie sorgt dafür, dass GM stets GS überschreibt und beide Übertragungsfunktionen nur dann nicht miteinander übereinstimmen, wenn der Anwender GS manuell im Modul System Analysis verändert. Nachdem der Anwender eine andere Übertragungsfunktion als GS auswählt, wird GS sofort wieder von GM überschrieben.

Um die Robustheit einer Regelung zu überprüfen kann es sinnvoll sein, Variationen der identifizierten Strecke ebenfalls mit dem ausgelegten Regler zu simulieren. So lassen sich beispielsweise Modellierungsfehler simulieren. Dazu wird die Checkbox deaktiviert und eine Prozentzahl für eine automatisch erzeugte Variation (als GS) des Modells festgelegt. Umso höher die Prozentzahl umso mehr wird sich die erzeugte Strecke vom Modell unterscheiden.

Die Variation des Modells wird erzeugt sobald Sie GS als Übertragung auswählen. pzMove benachrichtigt seinen Bediener in diesem Moment auch über ein übersichtliches Dialogfenster in dem noch einmal die Prozentzahl angezeigt wird um die sich GS von GM unterscheiden wird.



Benachrichtigung des Bedieners bevor GS erzeugt wird

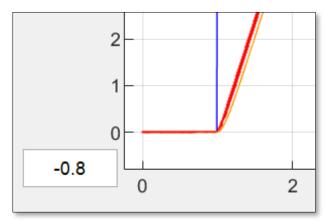


Auswirkung auf das geschlossene System GW (GW wird neu berechnet sobald der Bediener auf das Modul Controller Desing wechselt)



Anwendung der Software Schritt für Schritt

Es bleibt zu sagen, dass sich das vorliegende Beispiel des Nachlauf-Versuches nur bedingt als Veranschaulichung dieses Features eignet. Die vorliegende IT1 Strecke ist einfach als Grundlage bereits so robust, dass selbst starke Streckenvariationen nur sehr geringe Auswirkungen auf das Systemverhalten verursachen.



Geringe Auswirkung der Variation (rot = 50% Variation GS; orange = Ausgangslage des bisherigen Beispiels)

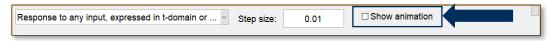


### Anwendung der Software Schritt für Schritt

#### **Animation des Systemverhaltens**

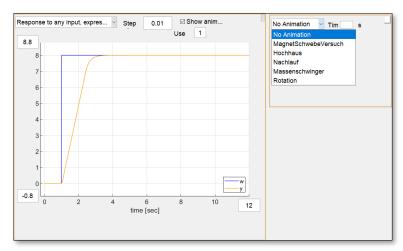
Wie bereits im Einsatzbeispiel mehrfach gezeigt lassen sich im Plot "Response to any input, expressed in t-domain or Laplace-(s)-domain" komplexe Systemantworten simulieren und analysieren.

Ebenfalls interessant ist die Möglichkeit sich das animierte Verhalten verschiedener Praktikumsaufbauten der FH-Rosenheim auf das aktuelle System anzeigen zu lassen. Hierzu muss die Checkbox auf der rechten Seite des Plot-Auswahlmenüs aktiviert werden:



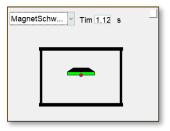
Checkbox für die Anzeige der animierten Praktikumsversuche

Diese Checkbox ist standardmäßig beim Start von pzMove deaktiviert. Nach der Aktivierung wird der Plot der eigentlichen Systemantwort nach links verschoben und am rechten Rand entsteht Platz für die jeweilige Animation.

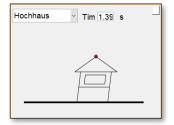


Auswahlmenü für die verfügbaren Animationen

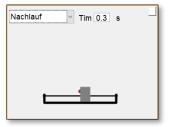
Zur Auswahl stehen die folgenden 5 Animationen:



Magnetschweber



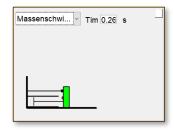
Hochhaus (Schwingungstilger)

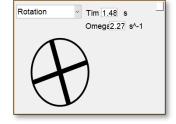


Nachlauf



### Anwendung der Software Schritt für Schritt





Massenschwinger

Rotation

In den Einstellungen von pzMove lassen sich zusätzlich Signalpfeile für die jeweilige Nulllage einstellen. Sie finden diese Einstellung unter dem Framework "General" in den Einstellungen für die Module System Analysis und Controller Design.

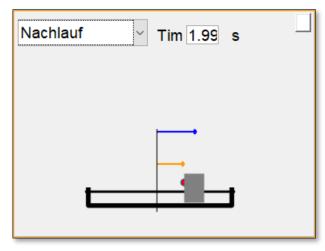
Ebenfalls eine spezifische Einstellung für die Animation ist der Einstellwert für die Animationsgüte ("Use"). Über diesen lässt sich festlegen ob alle Werte des Signalverlaufes (Use = 1) oder jeder nte Wert (Use = n) des Verlaufes für die Animation verwendet werden soll. Dies sollte nicht mit der Step-Einstellung verwechselt werden, die die Schrittweite des wirklichen Signalverlaufes definiert.



Checkbox für Signalpfeile (Auszug: Einstellungen)



Use-Einstellungswert (unter "Show animation"-Ceckbox)



Signalpfeile am Beispiel der Nachlauf-Animation