

Regelung eines Dämpfersystems für einen LKW

Dustin Walker (763190)– School of Engineering, Mechatronics Bachelor

Zusammenfassung—Es soll der Ladebereich eines LKWs aktiv gedämpft werden. Um das System simulieren zu können wird das System in Simulink nachgebaut. Anhand dieses Modells soll nun ein Regler entworfen und parametrisiert werden. Es soll ein digitaler Regler benutzt werden. Hierfür muss noch zusätzlich ein Anti Aliasing Filter designt werden.



Abbildung 1. kleiner LKW mit Laderaum

I. EINLEITUNG

Wenn der Laderaum eines LKWs voll geladen ist und über eine Landstraße brennt, dann kann es doch schon mal etwas holprig werden. Das ist nicht nur für den Fahrer unangenehm. Es kann auch gefährlich für den LKW und seine Ladung werden. Eine zu hart eingestellte Federung kann Unebenheiten nicht ausgleichen, so wird die Ladung und das Fahrwerk nicht geschützt. Wenn die Federung zu weich eingestellt ist kann es wiederum zu schwingungen führen. Um dies zu vermeiden wird eine Dämpfung verwendet. Hierbei wird zusätzlich zu einer Feder mit der Federkonstanten K ein Dämpfer mit der Dämpfungskonstanten μ verwendet. Diese beiden Parameter können nun genau auf die Masse m des LKW und die zu erwartenden Unebenheiten abgestimmt werden. Wenn sich nun aber die Masse ändert, zum Beispiel beim be- und entladen, stimmt das Verhalten der Feder und des Dämpfers nicht mehr. Da sich diese Parameter nicht einfach ändern lassen, wird ein aktives Dämpfungssystem verwendet. Hier wird zusätzlich zu der Feder und dem Dämpfer auch ein, meist pneumatischer aktuator verwendet. Der Aktuator soll störungen entgegenwirken und den Ladebereich auf einer bestimmten höhe halten. Die Kraft F ist die Stellgröße in unserem Regelkreis.

II. ZIELE DES PROJEKTS

In dieser Arbeit soll der Führungsfall betrachtet werden. Die höhe des Laderaums soll also so geregelt werden, dass

Diese Hausarbeit wird in die eingereichte Fassung als Grundlage für die Benurteilung der Prüfungsleistung für die Prüfung 60040099 Regelungstechnik 2. Der/Die Autor/Autorin versichert, dass dies sein/ihr eigenen Werk ist und alle entnommene Teile anderer Werke richtig zitiert sind.

Wunschhöhe x_w während der laufzeit geändert werden kann. In der Praxis kann diese Funktion beim Be- und Entladen nützlich sein. Oft haben Laderampen eine unterschiedliche höhe. Der Bediener will den Ladebereich beim Entladen auf die richtige höhe einstellen können. Die Vorgabe soll sein, dass die höhe x auf 0 bis 1m eingestellt werden kann.

Der Laderaum soll während dem gesamten Entladeprozess die gleiche höhe beibehalten, auch wenn die Masse geringer wird. Ein Einschwingen ist zu vermeiden. Der LKW sollte nicht mit der Überdachung vor der Entladerampe kollidieren, also ist auch ein Überschwinger zu vermeiden. Die Schnelligkeit des Einregelvorgangs steht in diesem Fall nicht im Vordergrund. Die Einregelzeit ist maßgeblich von der Kraft des Aktuators abhängig. Diese sollte aus Kostengründen so groß wie nötig, aber so klein wie möglich dimensioniert werden. Es wird festgelegt, dass die Kraft des Aktuators (!! wie in Abb. dargestellt) nur nach oben wirkt. Aufgrund des Designs des pneumatischen Aktuators kann die Kraft nicht negativ werden.

Um diese Ziele zu erreichen, soll ein zeitdiskreter Regler mit den richtigen Parametern entworfen werden. Dazu sind die folgenden Schritte notwendig:

- Nachbauen des Systems in Matlab Simulink
- Analysieren des Systems
- Dimensionieren eines Anti-Aliasing-Filters
- Bestimmung der Regelparameter mit Hilfe eines Parametrierverfahrens
- Optimieren der Regelparameter

III. THEORIE

A. Nachbauen des Systems

Als erster Schritt soll die zu regelnde Strecke in Simulink modelliert werden. Dafür muss zunächst einmal die Differenzialgleichung aufgestellt werden. Die Differenzialgleichung kann aus der Abbildung ?? abgeleitet werden. Nach dem Prinzip Aktio gleich Reaktio muss zu jedem Zeitpunkt ein Kräftegleichgewicht herrschen. x Entspricht der höhe des Laderaums. Die positive x -Richtung zeigt nach oben. Die Feder wirkt mit der Kraft $F_F = K \cdot x$ nach oben. Der Dämpfer wirkt mit der Kraft $F_R = \mu \cdot \dot{x}$ entgegen der Bewegungsrichtung. Die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ wirkt nach unten in negative x -Richtung. Der Pneumatik-Zylinder wirkt mit der Kraft nach oben. Die Addition dieser Kräfte mit richtigem Vorzeichen ergibt die resultierende Beschleunigungskraft $F_a = m \cdot \ddot{x}$ in x -Richtung.

$$m \cdot \ddot{x} = F_S + K \cdot x - \mu \cdot \dot{x} - m \cdot g \quad (1)$$

Für diese Formel muss angenommen werden, dass sich die Feder für alle realistischen Auslenkungen Δx im linearen elastischen Bereich befindet. Wenn das System stillsteht ist $F_a = 0$

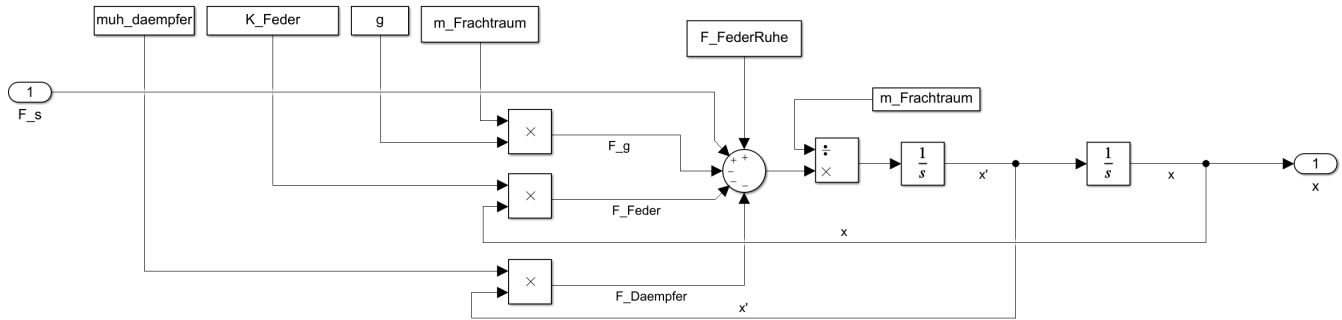


Abbildung 2. Simulink Modell der Regelstrecke

und $F_R = 0$. Damit ist $F_F = F_g$. Diese Stelle wird nun als $x = 0$ definiert. Durch diesen Trick kann F_g weggelassen werden. Um die Gleichung in Simulink nachzubauen, wird sie nach ihrer höchsten Ableitung $a = \ddot{x}$ aufgelöst. Somit erhält man (2).

$$\ddot{x} = \frac{F_S + K \cdot x - \mu \cdot \dot{x} - m \cdot g}{m} \quad (2)$$

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ergibt sich \dot{x} und x durch das Integrieren von \ddot{x} .

F_g und $F_{FederRuhe}$ heben sich eigentlich gegenseitig auf. Jedoch wurden sie in dem Simulink Modell gelassen, um die Realität möglichst genau nachzubilden, und alle Freiheiten zu behalten.

B. Analysieren des Systems

Das Simulink Modell kann nun verwendet werden, um Das System zu analysieren. Es soll die statische Verstärkung K , die Eigenfrequenz ω_0 und die Dämpfung d ermittelt werden. Diese Werte lassen sich aus der Sprungantwort ablesen. Es wird ein Sprung von $F_S = 1000$ N auf das System gegeben. Die Sprungantwort sieht wie folgt aus.

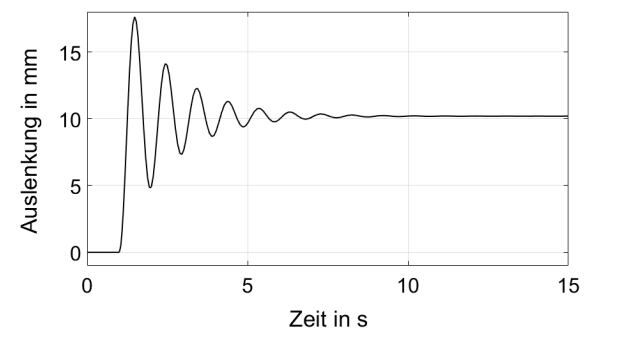


Abbildung 3. Sprungantwort auf 1000N

Die statische Verstärkung ist definiert als:

$$K = \frac{\text{Endwert der Sprungantwort}}{\text{Eingangssprung}} = \frac{10,2 \text{ mm}}{1000 \text{ N}} \quad (3)$$

$$= 10,2 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} = 1,02 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{N}}$$

Der Endwert der Sprungantwort kann abgelesen werden, nachdem sich das System eingependelt hat.

Aus der Schwingung der Sprungantwort lässt sich die Eigenfrequenz ablesen. Für eine bessere Genauigkeit wird die Zeit t für sechs Schwingungen mit einem Cursor gemessen. Die Eigenfrequenz berechnet sich dann wie folgt

$$T = \frac{t}{6} = \frac{5,783 \text{ s}}{6} = 0,964 \text{ s} \quad (4)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,964 \text{ s}} = 6,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (5)$$

Mithilfe der Formel aus [2, Tabelle 9.8] lässt sich die dämpfung aus der Sprungantwort berechnen:

$$d = \frac{\ln\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}\right)}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \ln^2\left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}\right)}} \quad (6)$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{3,95}{2,1}\right)}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \ln^2\left(\frac{3,95}{2,1}\right)}} = 0,1$$

Mithilfe dieser Werte und der Annahme, dass es sich um ein lineares PT2 Glied handelt, könnte man nun die Übertragungsfunktion (7) im Laplace-Bereich bilden.

$$G(s) = \frac{x(s)}{F_s(s)} = \frac{K}{1 + 2 \cdot d \cdot T \cdot s + T^2 \cdot s^2} \quad (7)$$

Aber die brauchen wir jetzt eigentlich gar nicht mehr.

C. Interpretation der Werte

Aus der statischen Verstärkung K ist zu erkennen, dass eine Große Kraft nötig ist, um die Ladefläche zu bewegen. Mit der Formel (3) kann ausgerechnet werden, welche Kraft nötig ist, um $x = 1$ m zu erreichen.

$$F_s = \frac{x_{max}}{K} = \frac{1}{1,02 \cdot 10^{-5} \frac{m}{N}} = 98 \text{ kN} \quad (8)$$

Der Laderaum soll mit vier einfachwirkenden Hydraulikzylindern gesteuert werden. Ein passender Zylinder sollte einen Hub von circa 1,5 m haben. Die vier Zylinder sollten eine Gemeinsame Kraft von mindestens $F = 50$ kN aufweisen. Es werden Zylinder ähnlich dem in [3] zum Einsatz kommen. Jeder Zylinder hat einen Hub von 1,5 m und eine Kraft von $F = 500$ kN. Damit ist das Stellglied auf eine Maximalkraft von

$$F_{s,max} = 4 \cdot 500 \text{ kN} = 2000 \text{ kN} \quad (9)$$

begrenzt. Es bleibt also noch genug Kraft übrig, um Regeln zu können.

IV. REGLERENTWURF

A. Digitalisierung Antialiasing

Die Höhe des Laderaums wird durch einen Sensor ausgelesen. Das Signal dieses Sensors soll digitalisiert werden. Für die digitalisierung wird ein Sample and hold Glied benutzt. Vor dieses Glied muss ein Anti aliasing Filter eingebaut werden. Nun soll die Samplefrequenz und die Grenzfrequenz festgelegt werden. Im letzten Abschnitt wurde die Eigenfrequenz bereits zu $6,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ bestimmt. Die Abtastrate sollte nach [4] das zehn bis zwanzigfache der schnellsten Zeitkonstanten betragen.

$$f_s = \frac{\omega_0}{2\pi} \cdot 20 = 20,75 \text{ Hz} \quad (10)$$

Eine Abtastfrequenz von 20,75 Hz reicht also aus um das System vernünftig regeln zu können. Diese Frequenz ist recht gering. Selbst die günstigsten Analog to Digital Converter (ADC) erreichen viel höhere Abtastraten. Generell gilt, dass eine geringere Abtastfrequenz eine erhöhte Verzögerung des Signals nach sich zieht. Eine erhöhte Verzugszeit T_u erschwert das Regeln. Daher sollte die Abtastfrequenz möglichst hoch gewählt werden. Solange die Auflösung des ADC nicht darunter leidet. Falls der verwendete Sensor hochfrequente Störungen hat, welche größer als eine Stufe des ADC sind, kann versucht werden diese Störungen durch einen Tiefpassfilter herauszufiltern.

In der Simulation ist der x-Wert störungsfrei, also könnte die Abtastfrequenz beliebig hoch gewählt werden. Für diesen Versuch wird sich aber auf eine relativ moderate Frequenz von

$$f_s = 10 \text{ kHz} \quad (11)$$

beschränkt.

Da es wie schon erwähnt in dieser Simulation keine Störungen gibt, wäre kein Anti-Aliasing-Filter notwendig. Er sollte in diesem Fall sogar vermieden werden, da er eine Verzugszeit

mit sich bringt. Der Anti-Aliasing-Filter ist Teil der Anforderungen also wird nachfolgend trotzdem einer verwendet. Die Aufgabe des Anti-Aliasing-Filter ist es die Einhaltung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems sicherzustellen. Der Tiefpass soll alle Frequenzen, größer als $f_s/2$ herausfiltern. Um dies sicherzustellen wird die Grenzfrequenz auf

$$f_G = \frac{f_s}{4} = 2,5 \text{ kHz} \quad (12)$$

festgelegt. Diese doppelte Sicherheit ist möglich, da bei der Abtastfrequenz viel Spielraum gelassen wurde. Es ist zu empfehlen einen Filter höherer Ordnung zu wählen. Für diese Arbeit wird einfachheitshalber ein Tiefpass 1. Ordnung verwendet. Für die Zeitkonstante des Filters ergibt sich:

$$T_F = \frac{1}{f_G} = \frac{1}{2,5 \text{ kHz}} = 0,4 \text{ ms} \quad (13)$$

B. Regler Parametrisierung

Für diese Regelstrecke ist das Wendetangentenverfahren nicht geeignet. Es wird das Stabilitätsrandverfahren angewendet. Dazu wird der Regelkreis mit einem reinen P-Regler geschlossen (Abb. 4) und die Verstärkung so lange erhöht bis ein Sprung am Eingang zu einer gleichförmigen Dauerschwingungen am Ausgang führt. Anhand der eingestellten Verstärkung und der Periodendauer der Schwingungen können dann die gesuchten Regelparameter abgeleitet werden.

C. Prediction

In this step you define the possible outcomes of your hypothesis and show how do you arrive to them. In engineering this would be the design process and is usually presented in the section regarding *Methodology*.

D. Testing

Your hypothesis/design must be critically analysed and validated. For this you need to test it (by means e.g. of simulation). Your findings come in the section *validation*.

E. Analysis

Through analysis of the results you may conclude if your hypothesis was correct or not. You should also explain what went wrong, under which circumstances the hypothesis would be right, etc. These findings come into the section *Conclusions*.

V. METHODOLOGY

In order to have a fast and homogeneous evaluation you should follow the rules laid out in the next subsections.

A. Structure

All reports must have the same structure at the *section* level. Subsections may be adapted according to the specifics of the project. Table I shows the required names in English and German.

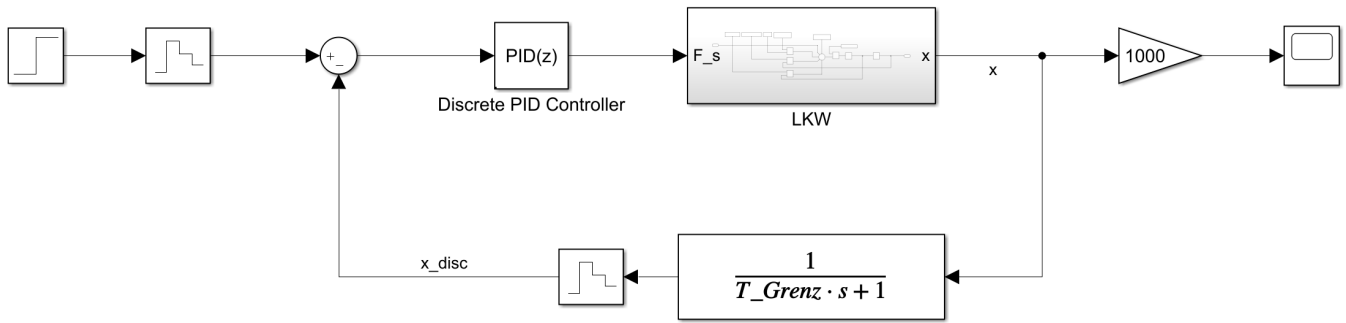


Abbildung 4. geschlossene Regelstrecke

B. Length

There is no minimum length, however, the report must include a comprehensible explanation of the different sections. The maximum length for the report is 8 pages.

C. Design

1) *General design:* Tue work must be presented as a two column article with a serif font (Computer modern, Times, etc.) size of minimum 9pt and a maximum of 10pt. The margins should be within 1 cm and 2 cm.

2) *Figures and Tables:* Tables and figures must be captioned (Tables above, Figures below) and *must be referenced in the document*. Both tables and figures may be presented in one column or in both columns as depicted in Figure ?? . Please do not include two-column tables or figures in the first page!

3) *Formulae:* Formulae shall be enumerated and can be referenced such as (14) if necessary.

$$E = m \cdot c^2 \quad (14)$$

4) *References:* References must be clearly and unequivocal stated and must be quoted. Inline quoting can be “Important debates in the history of science concern rationalism”[1]. Block quoting can be:

Important debates in the history of science concern rationalism, especially as advocated by René Descartes; inductivism and/or empiricism, as argued for by Francis Bacon, and rising to particular prominence with Isaac Newton and his followers; and hypothetico-deductivism, which came to the fore in the early 19th century.[1]

Tabelle I
REQUIRED SECTION HEADERS IN THE PROJECT

Nr.	English	German
I	Introduction	Einführung
II	Project targets	Projektziele
III	Theory	Theorie
IV	Methodology (Controller design)	Methodik (Reglerentwurf)
V	Validation (Parameter tuning)	Validierung/Test
VI	Observations and other effects	Beobachtungen und andere Effekte
VII	Conclusions	Schlussfolgerungen

References may be used either via BibTeX or they could be written in the document as presented in this example. In any case, the references must include author, title, edition and pages for printed media or URL and last access for electronic media. Please remember that an electronic book is still a printed media.

VI. VALIDATION

The project report and presentation will account for 100% of your grade. The marking scheme is based on a 100-point scale and is distributed through the criteria presented in Table II.

A. Points grading scheme

In all categories, there is the possibility of having either one, three, six or nine points. One-point rubrics are graded on present/not present. If the section is not present, the student will lose the point.

Three-, six- and nine-point rubrics are graded as follows:

- 1) One third of the points are awarded if the grading rubric represents the minimum effort necessary to comply with it (read and quote).
- 2) Two thirds of the points are awarded if the student is able to explain the required information (interpret and apply).
- 3) The full points are awarded if the student is able to interpret the information, apply it and discuss it.

Example: Describe the transfer function of an RC filter (input to output voltage) for 6 points

- 0p $U_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt$
- 2p Prof. Notholt says in script: $G(s) = \frac{1}{RCs+1}$
- 4p “The transfer function is the quotient of the Laplace input signal to the Laplace output signal” [Lunze 1999] thus being $G(s) = \frac{1}{Ts+1}$ with $T = RC$
- 6p The RC filter can be considered like a complex voltage divider with $Z = 1/sC$, the solution is then $U_C = \frac{1/sC}{R+1/sC} \cdot U_e$ or, simplified and as transfer function: $G(s) = U_C/U_e = \frac{1}{RCs+1}$

VII. CONCLUSIONS

This paper has described the minimum requirements for the written project and final presentation. Please make sure you read this document completely and follow the guidelines. Prof. Notholt wish you the best for your endeavor!

Tabelle II
GRADING SCHEME FOR PROJECTS IN SoSe 2020

#	Evaluation point	Criteria	Points
1	Introduction (10)	Is present	1
		Clearly states the problem	6
		Clearly states the relevance of the problem	3
2	Project targets (10)	Is present	1
		Problem is correctly defined	6
		Expected outcomes are clearly stated	3
3	Theory	Is present	1
		The proposed model covers the important/relevant characteristics	6
		The model is so described that it can be reproduced	3
4	Methodology	Is present	1
		Method is clearly stated (e.g. which controller will be used and why)	6
		Preliminary results (as input for simulation/validation) are clearly stated	3
5	Validation	Is present	1
		Results are plausible	3
		Results are discussed and potential limitations of the model are explained	6
6	Observations	Is present	1
		Relevant effects are discussed	3
		Explanations to the observed effects are relevant	6
7	Conclusions	Is present	1
		Conclusions address hypothesis and project aims and goals	9
8	Final presentation	Sticks to 5 Minute maximum	5
		Presents the content professionally	5
		Addresses all sections of the report	10
		Public can understand about the project, solution and effects even if they have little experience on the specific topic	10
Total			100

LITERATUR

- [1] Wikipedia, "The scientific method", online, https://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_method, accessed 20.4.2020.
- [2] Hochschule Karlsruhe, "Übertragungsglieder der Regelungstechnik", online, <https://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-a-zeitkontinuierliche-signale-und-systeme/uebertragungsglieder-der-regelungstechnik/zusammengesetzte-uebertragungsglieder/pt2-glied.html>, accessed 11.07.2020.
- [3] <https://www.hydrauliktechnik24.de/>, Webshop für Hydraulikzylinder, online, <https://www.hydrauliktechnik24.de/Hydraulikzylinder-einfachwirkend-60-er-Stange-900-Hub-EBL-1022> accessed 11.07.2020.
- [4] Prof. Dr.-Ing. Antonio Notholt, "Regelungstechnik 1 Thema 5, Übertragungsfunktionen im Bildbereich - Typische Übertragungsfunktionen", (WiSe 2019/2020), S.13 ff