

2 Modellbildung (nicht zu verwechseln mit gebildeten Models)

Übersicht

2.1	Der Regelkreis, die kreisende Regel	8
2.2	Der „kleine“ Unterschied: Steuerung und Regelung	11
2.3	Beschreibung von Übertragungsgliedern	12

Autobahnkreuz Hannover-Ost, Geschwindigkeit 140, linke Spur. Der VW-Polo ist voll besetzt. Die Stimmung ist gut, das Ziel ist klar, laute Musik, A2 nach Berlin. Der Verkehrsfunk verspricht nichts Gutes. Dichter Verkehr. Bei Peine ist es dann passiert. Ein LKW hatte auf der Fahrbahn seine Ladung verloren und sich quer gestellt. Vollsperrung. Zum Glück auf der gegenüberliegenden Seite.



Was macht die Fahrerin des VW-Polo? Bei dichtem Verkehr und Kolonnenfahrt ist ein Überholen nicht möglich. Dann heißt es: Abstand halten. Die Fahrerin beobachtet den Verkehr; genauer gesagt das Fahrzeug vor ihr. Ist der Abstand OK? Bis 2 zählen hat der Fahrlehrer einst gesagt ... und dann: reagieren.

Hier sind wir schon beim Thema angekommen. Die Fahrerin arbeitet in einem Regelkreis. Sie ist Bestandteil des Regelkreises. Ohne sie funktioniert die Fahrt mit dem Auto gar nicht! Was macht sie denn nur?

Mit Hilfe der Augen¹ erfasst sie den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Wie erreicht sie es, diesen Abstand einzuhalten, selbst wenn auf ihr Fahrzeug Störungen einwirken, wie z. B. Steigungen, Wind, Geschwindigkeitsänderungen des fließenden Verkehrs², die nicht vorhersagbar sind?

Die Fahrerin erfasst mit ihren Augen die **Messgröße** r , dies ist der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Sie weiß, welchen Abstand sie bei welcher Geschwindigkeit einhalten *soll*. Dieser Soll-Abstand trägt in der Regelungstechnik die Bezeichnung **Sollwert** w . Das bedeutet: so groß soll der Abstand sein. Sollwert und Messgröße werden miteinander verglichen; mathematisch gesehen voneinander abgezogen. Diese Differenz aus Sollgröße und Messgröße wird **Regeldifferenz** e genannt. Ist die Regeldifferenz positiv, dann ist der Abstand zu klein. Bei negativer Differenz ist der Abstand zu groß. Die Geschwindigkeit des Autos wird durch die Fahrerin entsprechend der Regeldifferenz e angepasst.

Um die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ändern zu können, benötigt die Fahrerin Eingriffsmöglichkeiten, von denen sie gleich mehrere hat: Zum allmählichen Anpassen der Geschwindigkeit dient das Gaspedal, das die Kraftstoffzufuhr zum Motor beeinflusst. Wenn die Fahrerin aber plötzlich eine sehr schnelle Abnahme des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug feststellt, dann heißt es: Anker werfen, bremsen und beten ...

Die Eingriffsmöglichkeiten, über die die Fahrerin verfügt, werden in der Regelungstechnik als **Stellgrößen** u bezeichnet.

Und was ist dazwischen? Das, was die Fahrerin in der Fahrschule gelernt³ hat. Die Versicherungen erhöhen regelmäßig die Beiträge, wenn dieser Prozess nicht richtig funktioniert. Die Fahrerin erhält durch Auge und Erfahrung die Regeldifferenz. Aus dieser Regeldifferenz ermittelt sie die Stellgröße, die sie ständig mittels Gaspedal und Bremse an das Fahrzeug weiterleitet. Die Fahrerin koppelt die Regeldifferenz zurück. Sie schließt den Regelkreis. Sie arbeitet als **Regler**. Sie *ist* der Regler!

Eine Verkleinerung des Abstandes bewirkt eine negative Regeldifferenz. Der Regler weiß jetzt „Ich muss den Abstand vergrößern“. Der Regler „berechnet“ daraus die **Stellgröße** u „Gaspedal weniger stark durchtreten“. Das Fahrzeug erhält weniger Antriebsleistung und verringert daraufhin die Geschwindigkeit, was eine Erhöhung des Abstandes zur Folge hat.

¹hier: visuelle Sensoren

²NDR2 berichtet gerade „Das Stauende liegt hinter einer Kurve“ ...

³oder schon wieder vergessen

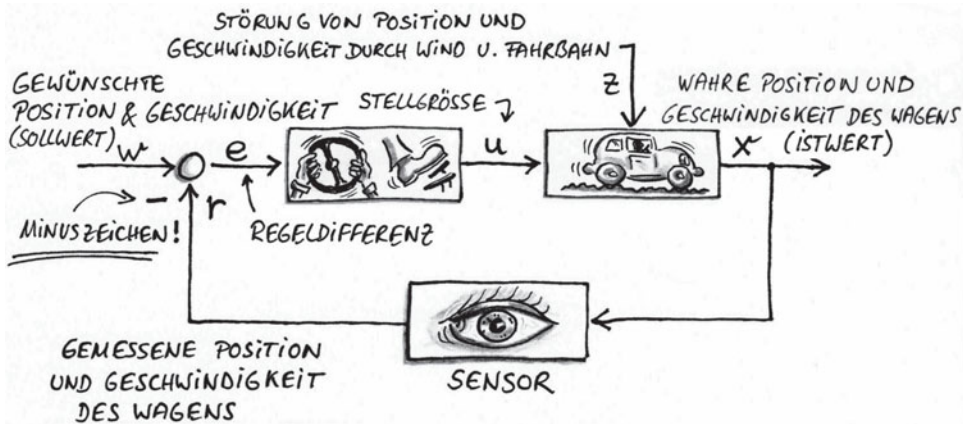


Abbildung 2.1 Regelung bei einem Fahrzeug

Hier beißt sich die Katze in den Schwanz. Die Regeldifferenz wirkt auf sich selbst zurück. Dies wird als Rückkopplung bezeichnet. Normalerweise ist der Regler bestrebt, die Regeldifferenz möglichst klein zu halten, indem er über die Stellgröße auf das Fahrzeug einwirkt und dieses gerade so beeinflusst, dass die Regeldifferenz klein wird. Wenn der Regler aber eine falsche Stellgröße berechnet (z. B. Beschleunigen bei sich verringern dem Abstand), dann führt dies dazu, dass die Regeldifferenz groß wird und der Unfall nicht mehr weit ist („Positive Rückkopplung“).

Wie funktioniert der Regler? Wie wird der Regler entworfen? Gibt es da eine Systematik? Wie macht man es richtig? Ist dies schwierig? Wer kann mir dabei helfen? Wann ist endlich Wochenende?

Ja, dies ist das Thema der Regelungstechnik! Für den Regelungskreis ist es unerheblich, welche Größen geregelt werden sollen. Regelgrößen reichen von der Temperatur eines Bügeleisens oder der Körpertemperatur eines Menschen über mechanische Größen wie die Geschwindigkeit des Autos, die Drehzahl eines Antriebs, den Druck im Kessel eines Kohlekraftwerks, die Flugbahn eines Jumbo-Jets, die Frequenz des elektrischen Versorgungsnetzes bis zur Spannung beim Laden von Akkus. Das Mischungsverhältnis zweier Komponenten in einem chemischen Reaktor ist ebenso eine Regelgröße wie der Kurs eines Satelliten oder die Sendeleistung eines Mobiltelefons. Auch biologische Populationen folgen den Gesetzen der Regelungstechnik⁴.

Da Regelkreise unterschiedliche Regelgrößen besitzen, ist die Regelungstechnik nicht auf eine technische Disziplin beschränkt. Sie erfüllt eine Schlüsselaufgabe. Die Beschreibung des Regelkreises sowie seine Berechnung erfolgen dabei bewusst auf abstrakter, allgemeiner Ebene.⁵

⁴Nur die Teddybären-Population Herrn Prof. Tiestes wächst nach eigenen Angaben über alle Grenzen ...

⁵Und dies ist wahrscheinlich auch ein Grund, weshalb das Fach Regelungstechnik oft als Mathe 4 bezeichnet wird.

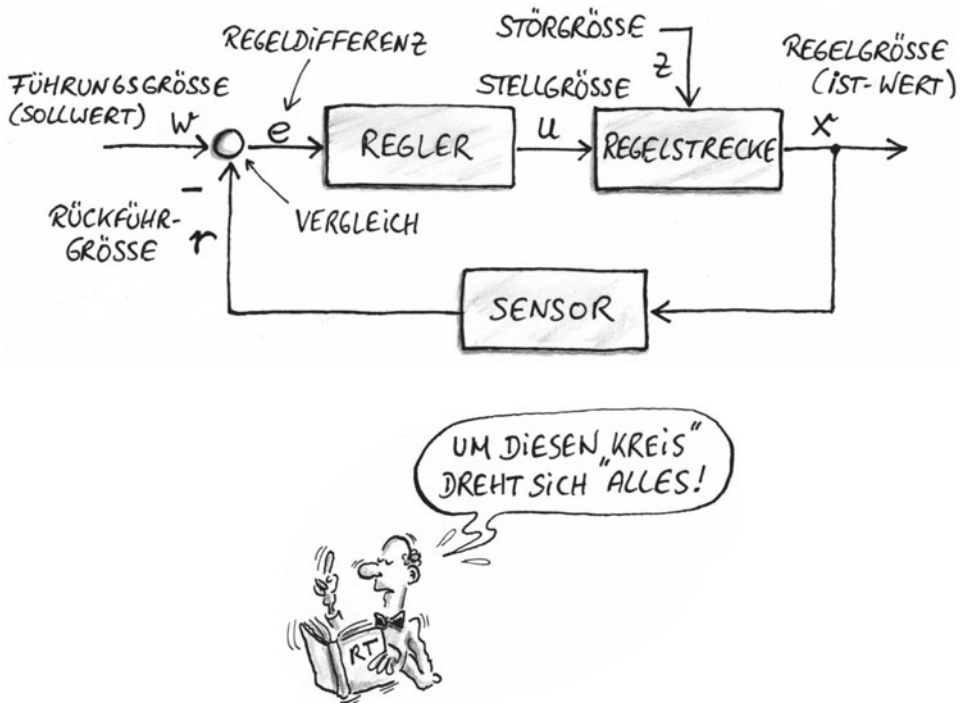


Abbildung 2.2 Prinzipieller Aufbau eines Regelkreises

2.1 Der Regelkreis, die kreisende Regel

Regelkreise arbeiten nach einheitlichen Prinzipien. Die Begriffe des Regelkreises sind festgelegt.

Die **Regelgröße** $x(t)$ ist der Wert, der geregelt werden soll, z. B. der Abstand zum vorausfahrenden Verkehr oder die Temperatur beim Mischen von warmem und kaltem Wasser morgens beim Duschen.

Die Regelgröße wird durch einen Sensor (z. B. durch die Temperaturrezeptoren auf der Haut des total verschlafenen Studenten) gemessen und wird auch als Messgröße bezeichnet. Die gemessene Größe heißt dann **Rückführgröße** $r(t)$. Das Betätigen der Mischbatterie führt dazu, dass sich die Wassertemperatur ändert. Dies merkt der verschlafene Student aber erst nach einigen Sekunden, da das Wasser zunächst einmal durch den Schlauch zur Brause fließen muss, ehe es auf der Haut bei den Temperaturrezeptoren ein „Autsch! Viiiieel zu heiß!“ auslöst. Eigentlich möchte man die Regelgröße unmittelbar und verzögerungsfrei messen. Dies geht in vielen Anwendungen nicht direkt, so dass hier das dynamische Verhalten des Sensors (die Verzögerung durch den Schlauch und die individuelle Reaktionszeit des Studenten) berücksichtigt werden muss. Die Messgenauigkeit der Rückführgröße $r(t)$ spielt bei der Genauigkeit der Regelung eine wesentliche Rolle. Wichtig ist auch hier, dass der Sensor, der die

Rückführgröße misst, möglichst nahe und mit einer möglichst guten Präzision an die Regelgröße $x(t)$ herankommen sollte.

Auf welches Ziel hin soll geregelt werden? Wie warm *soll* die Temperatur im Raum sein, wie hoch der Druck im Reaktionsbehälter, wie schnell die Geschwindigkeit des Fahrzeugs? Dies wird durch die **Führungsgröße** $w(t)$ vorgegeben, die auch **Sollwert** genannt wird.

Die Rückführgröße $r(t)$ wird mit der Führungsgröße $w(t)$ verglichen und daraus die **Regeldifferenz** $e(t) = w(t) - r(t)$ berechnet. Die Regeldifferenz $e(t)$ dient als Eingangsgröße für den Regler, der sich darum bemüht, diese auf den Wert 0 zu regeln. Wichtig ist hierbei, dass die Rückführgröße von der Führungsgröße abgezogen wird.⁶ Wenn man das Thermostatventil am Heizkörper aufdreht, dann ist die am Ventil eingestellte gewünschte Temperatur $w(t)$ höher als die gemessene Raumtemperatur $r(t)$. Die Regeldifferenz $e(t)$ ist dann positiv. Diese Vorzeichenregel ist Konvention in der Regelungstechnik.

Wie ihr seht, muss auf verdammt viel geachtet werden und es gibt viele Größen, die zu berücksichtigen sind. Es ist auch manchmal wichtig, dass man — besonders im Hinblick auf spätere Klausuraufgaben — auch auf die kleinen, versteckten Informationen achtet!



Der Regler erhält als Eingangsgröße die Regeldifferenz $e(t)$. Er hat die Aufgabe, aus diesem Signal die **Stellgröße** $u(t)$ zu ermitteln. Bei dem Thermostatventil ist die Stellgröße der Durchfluss des Warmwassers für den Heizkörper. Temperaturregelungen arbeiten ziemlich träge. Eine andere Regelung ist die Positionsregelung des Schreib-Lese-Kopfes in einer Festplatte, die innerhalb weniger Millisekunden die neue Spur auf dem Datenträger gefunden und die Daten auch schon ausgelesen haben muss, damit der Film unterbrechungsfrei wiedergegeben werden kann. Um die Anforderungen der Positionsregelung erfüllen zu können, muss der Regler Kenntnis über das statische und dynamische Verhalten der Regelstrecke besitzen.

⁶Generell gibt es für einen werdenden Ingenieur genau drei Schwierigkeiten: Erstens: das negative Vorzeichen, zweitens: die Faktoren 2π , $\sqrt{2}$ oder $\sqrt{3}$ sowie drittens: den ganzen Rest!

Es gibt keine universellen Regler, die sich wie eine eierlegende Wollmilchsau an alle Gegebenheiten anpassen⁷ und in jedem Fall ein befriedigendes Ergebnis sicherstellen. Stattdessen ist es erforderlich, dass der Regler an die zu regelnde Strecke angepasst ist und mit ihr zusammen ein robustes und stabiles System bildet. Es gibt beispielsweise auch Regelstrecken, wie z. B. den balancierten Besen, die von Haus aus instabil sind und erst durch den Regler in einen stabilen, also brauchbaren Zustand versetzt werden.

Auf die Regelstrecke wirken stets **Störgrößen** ein, die als $z(t)$ bezeichnet werden. Eine Störgröße ist beispielsweise der Sonnenschein⁸, der durch ein großes Fenster in den Raum fällt. Die Sonnenstrahlung führt dazu, dass sich der Raum aufheizt. Bei einem geregelten System wird das Thermostatventil durch seine Rückführgröße $r(t)$ sehr schnell merken, dass die gemessene Temperatur höher ist als der Sollwert und damit die Stellgröße $u(t)$ verringern, so dass kein Warmwasser mehr in den Heizkörper gelangt.⁹

⁷Herr Dr. Romberg bezweifelt, ob sich eierlegende Wollmilchsäue tatsächlich an alle Gegebenheiten anpassen würden.

⁸Herr Dr. Romberg wirft ein, dass es eine sehr kühne Behauptung von Herrn Prof. Tieste sei, den Sonnenschein als „Störgröße“ zu bezeichnen. Wahre Ingenieure bezeichnen den Sonnenschein aber tatsächlich als Störgröße, weil er sie von der Arbeit abhält!

⁹Ein weiteres Beispiel für eine Regelstrecke ist Herrn Prof. Tiestes Kühlschranks, dessen Inhalt auf zwei Flaschen Möwenbräu geregelt wird. Störgröße ist Herr Dr. Romberg, der sich häufig ohne zu fragen bedient ...

2.2 Der „kleine“ Unterschied: Steuerung und Regelung

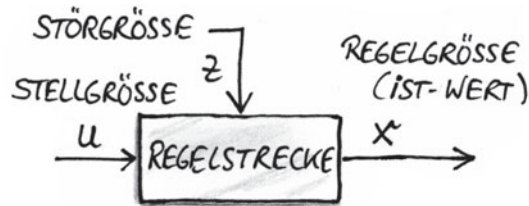


Abbildung 2.3 Aufbau einer Steuerung

Und was ist ohne Regler? Dann spricht man von einer Steuerung. Bei einem gesteuerten System (Absperrhahn an Stelle des Thermostatventils an der Heizung) merkt die Heizung nichts davon, dass der Sonnenschein bereits kräftig mitheizt. Der Heizkörper heizt weiter, egal wie warm es im Raum ist. Gesteuerte Systeme können im Vergleich zu geregelten Systemen nicht gut mit Energieressourcen umgehen. Toleranzen und Störgrößen werden nicht ausgeglichen. Gesteuerte Systeme sind sehr einfach aufgebaut. Sie sehen aus wie eine Regelstrecke, bei der die Regelung fehlt. Der Regler (im englischsprachigen Raum spricht man von „automatic control“) automatisiert die Steuerung und schließt den Regelkreis, wodurch dann die Störgrößen und Toleranzen schließlich verringert oder beseitigt werden. Eine Regelung hat gegenüber der offenen Wirkungskette einer Steuerung zwei entscheidende Vorteile: Das Regelungsziel $x(t) = w(t)$ kann auch dann erreicht werden, wenn

- die Regelstrecke durch Störgrößen beeinflusst wird oder
- die Eigenschaften der Regelstrecke nicht genau bekannt sind oder gar Toleranzen aufweisen.

Aber geregelte Strecken haben auch ihre Tücken und Probleme:

- Es ist einiges an Know-How erforderlich, um einen guten Regler auszulegen. (Dies ist vielleicht auch der Grund dafür, weshalb Du jetzt dieses Buch liest ...)
- Geregelte Strecken können bei falsch ausgelegtem Regler schwingen oder gar instabil werden.
- Regelungen sind aufwändig und häufig teuer.

2.3 Beschreibung von Übertragungsgliedern

2.3.1 Original und Fälschung

Am Anfang war das Wort. Interpretation des Rätseltechnikers: Am Anfang steht die Modellbildung! Viele technische Systeme sind derartig komplex gebaut, dass sie sich nicht vollständig mit mathematischen Methoden beschreiben lassen. Oft existieren für technische Systeme keine geschlossenen Lösungen oder man muss sich mit „numerischen Krücken“ behelfen. Daher ist eine *einfache* mathematische Beschreibung der technischen Systeme erforderlich, frei nach dem Motto: so genau wie nötig, so präzise wie möglich und eben so einfach, wie es geht!

Aber Vorsicht: so ein Modell ist *nur* ein Modell und *nicht* eine Kopie der Wirklichkeit! Ein Modell kann nur ganz bestimmte Eigenschaften wiedergeben, aber eben genau die, die man zur Lösung des Problems benötigt!



Wie beispielsweise lässt sich der Dampfkessel in einem Kohlekraftwerk beschreiben, der eine Höhe von 100m hat und der aus vielen Kilometern Rohrleitungen, Feuerungsanlagen, Belüftungen und was es sonst noch so gibt besteht? Der vor sich hin dösende Ingenieur in der Leitwarte des Kraftwerks möchte lediglich wissen, wie viel Kohle und Luft für die Erzeugung der geforderten Dampfmenge mit dem gewünschten Dampfdruck und der passenden Temperatur erforderlich sind.

Hier befinden wir uns mitten in der Modellbildung.

Welche Auswirkung hat die Änderung der Kohlenmenge auf den Dampfdruck im Kessel?

Komplexe Systeme und Anlagen werden vereinfacht dargestellt. Man modelliert reale Systeme in Form von berechenbaren mathematischen Modellen, die aber in dem Arbeitspunkt, also da, wo geregelt wird, die Realität so präzise wie möglich beschreiben. Das wesentliche Verhalten der Anlage muss mit Hilfe möglichst weniger Gleichungen oder Kennlinien herausgearbeitet werden.

Ein Werkzeug dafür ist die Darstellung komplexer technischer Verhaltensweisen mit Hilfe von Blöcken, die man auch **Systeme** nennt. Diese Systeme enthalten eine Beschreibung ihres Verhaltens. Blöcke lassen sich verschalten. Aus einfachen Blöcken lassen sich dann umfangreiche Systeme zusammenstellen.

Es ist Mittwoch mitten im Semester. Im Silo¹⁰ findet unüberhörbar eine Party auf der 4. Etage statt, bei der mit Hilfe von professioneller Bühnentechnik die Standfestigkeit von Betonwänden gegenüber intensivster Beschallung erprobt werden soll.



Systeme werden als Blöcke dargestellt, eine Box also — vielleicht zu verstehen wie der Verstärker auf der Fete, der ja tatsächlich wie eine schwarze Kiste aussieht, in die etwas hineingeht und aus der etwas anderes herauskommt. Nur ein paar gebildete E-Techniker interessieren sich dafür, was darin passiert.¹¹ Die Kiste besitzt einen oder mehrere Eingänge sowie einen oder mehrere Ausgänge, wobei innerhalb dieser „Black Box“ mit den Signalen, die von den Eingängen kommen, irgendetwas geschieht, bevor diese an die Ausgänge weitergereicht werden.

Systeme werden als Kästen gezeichnet, in die das Eingangssignal x_e hineingeht und aus denen das Ausgangssignal x_a herauskommt. Die Signale, die die einzelnen Systeme verbinden, sind grundsätzlich rückwirkungsfrei, das bedeutet, dass das nachfolgende

¹⁰Studentenwohnheim in Hannover

¹¹Herr Dr. Romberg (von Haus aus Maschinenbauer) merkt an, dass er beim Reinschauen einst feststellte, dass darin rein gar nichts passiere ... zumindest würde sich da nichts bewegen.

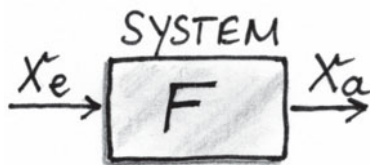


Abbildung 2.4 Das Black-Box-System

System keine Rückwirkungen auf die Signalquelle besitzt. Diese Eigenschaft wird auch durch den Pfeil angedeutet.

Oft wünscht man sich auch im wirklichen Leben die uneingeschränkte Rückwirkungsfreiheit in Bezug auf das eigene Handeln ...



Vom CD-Player gelangt das Musiksignal an das Mischpult. Dort wird es verstärkt und mit anderen Signalquellen (zweiter CD-Eingang, Mikrophoneingang etc.) gemischt, das heißt addiert. Die Verstärkung lässt sich am Schieberegler des Mischpults einstellen. Durch einen Equalizer wird der Frequenzgang des Signals eingestellt.

Der Verstärker besteht aus einer Spannungsversorgung, Transistoren und einem großen Kühlkörper. Bei leiser Musik arbeitet der Verstärker im linearen Bereich, er bildet damit das Eingangssignal mit ausreichender Genauigkeit und kleinem Klirrfaktor¹² auf das Ausgangssignal ab. Bei extremer Lautstärke hingegen kommt der Verstärker an seine Leistungs- bzw. Spannungsgrenze. Die Versorgungsspannung reicht nicht mehr aus, um die Musik verzerrungsfrei wiederzugeben; der Verstärker übersteuert.

¹²Normalerweise sollen lineare Systeme die Kurvenform eines sinusförmigen Signals nicht verzerren. Wenn eine Verzerrung eintritt, dann entstehen dadurch Oberwellen, also Vielfache der Grundschwingung des Sinussignals, die auch Harmonische genannt werden. Der Klirrfaktor ist ein Maß für den Oberwellengehalt. Er ist das Verhältnis der Intensität von Oberwellen zur Gesamt-Intensität.

Keine Panik vor Regelungstechnik!

Erfolg und Spaß im Mystery-Fach des Ingenieurstudiums

Tieste, K.-D.; Romberg, O.

2015, VIII, 265 S. 132 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-06347-4