

Vol. 1, No. 2018-06

Forschungspapiere und

Fallstudien der



Die Regelungstechnik ist eine sehr anspruchsvolle technische Fachdisziplin. Mit ihr werden viele Einzeldisziplinen wie Mechanik, Elektrotechnik und Antriebstechnik zu einer funktionierenden Gesamtanlage verbunden. Mit der Regelungstechnik wird eine Anlage befähigt, ein bestimmtes Ziel zu erreichen.

Dieser Beitrag zeigt eine kompakte Einführung in die Regelungstechnik und was sie als Ingenieurwissenschaft auszeichnet. Es werden industriepraktische Anwendungen gezeigt. Als Ausblick werden Ideen diskutiert, wie die Methoden der Regelungstechnik für nicht-technische Anwendungen übertragen werden können.

Über die Regelungstechnik als Ingenieurwissenschaft und ihre technischen sowie nicht-technischen Anwendungen

Tobias Loose

ISSN-Nummer (Online) 2570-2459

ISSN-Nummer (Print) 2570-2505

Herausgeber: Prof. Dr. Ute Reuter, Professorin für Betriebswirtschaftslehre, insb.
Unternehmensführung, Personal und Organisation an der VWA-
Hochschule für berufsbegleitendes Studium

Prof. Dr. Tobias Loose, Professor an der Hochschule Heilbronn sowie
Prorektor und Dekan der Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der
VWA-Hochschule für berufsbegleitendes Studium

Wolframstraße 32
71091 Stuttgart

Erscheinungsort: Stuttgart, Deutschland

© by the author

ISSN-Nummer (Online) 2570-2459

ISSN-Nummer (Print) 2570-2505

Über die Regelungstechnik als Ingenieurwissenschaft und ihre technischen sowie nicht-technischen Anwendungen

Tobias Loose

Zusammenfassung:

Die Regelungstechnik ist eine sehr anspruchsvolle technische Fachdisziplin. Mit ihr werden viele Einzeldisziplinen wie Mechanik, Elektrotechnik und Antriebstechnik zu einer funktionierenden Gesamtanlage verbunden. Mit der Regelungstechnik wird eine Anlage befähigt, ein bestimmtes Ziel zu erreichen.

Dieser Beitrag zeigt eine kompakte Einführung in die Regelungstechnik und was sie als Ingenieurwissenschaft auszeichnet. Es werden industriepraktische Anwendungen gezeigt. Als Ausblick werden Ideen diskutiert, wie die Methoden der Regelungstechnik für nicht-technische Anwendungen übertragen werden können.

Schlüsselwörter:

Regelungstechnik, Ingenieurwissenschaft, Modellbildung, Reglerauslegung, Parameteridentifikation.

Inhalt

1. Einleitung
2. Prinzip der Regelungstechnik
3. Identifikation eines Modells
4. Ingenieurwissenschaftliche Auslegungsmethoden eines Reglers
5. Exemplarischer Bezug zu nicht-technischen Anwendungen
6. Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

1 Einleitung

Die Regelungstechnik ist eine wichtige und mit großem Respekt anerkannte ingenieurwissenschaftliche Fachdisziplin. Mit der Regelungstechnik werden viele Einzeldisziplinen wie z.B. Elektrotechnik, Mechanik und Antriebstechnik zu einer funktionierenden Gesamtanlage verbunden, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Dabei ist eine hinreichende Fachkenntnis in den Einzeldisziplinen sowie ein Gesamtverständnis für den Maschinen- und Anlagenbau erforderlich. Die Zielerreichung ist in der Regelungstechnik von fundamentaler Bedeutung. Dazu wurden viele wissenschaftliche Methoden entwickelt, um sie optimal für die jeweilige Anlage sicherzustellen. Das Finden eines Optimums kann mathematisch und in Folge dessen auch rechnergestützt bewiesen werden. Damit ist die Regelungstechnik ein sehr reizvolles aber mitunter auch sehr komplexes Fach.

In diesem Beitrag wird das grundlegende Prinzip der Regelungstechnik vorgestellt. Anhand einfacher Beispiele werden anschließend ausgewählte Methoden der Regelungstechnik demonstriert. Damit wird gezeigt, was die Regelungstechnik als Wissenschaft, genauer als Ingenieurwissenschaft, auszeichnet. Abgerundet wird der Exkurs mit Praxisbeispielen aus der Industrie.

Als Ausblick ist die Übertragung und Interpretation der Methoden aus der Regelungstechnik für nicht-technische Anwendungen gezeigt.

2 Prinzip der Regelungstechnik

Mit der Regelungstechnik wird ein technisches System befähigt, eine bestimmte vorgegebene Zielgröße zu erreichen. Einzelheiten zum technischen System oder dessen Zustand fehlen oftmals, z.B. weil das System wegen der

Komplexität nur unvollständig bekannt ist oder weil Systemprozesse nicht genau vorhersehbar und veränderlich sind. Ein klassisches technisches Beispiel ist die Geschwindigkeitsregelung eines Autos. Hierbei soll die Geschwindigkeit des Autos auf einen konstanten Wert gehalten werden. Unbekannt und ständig veränderlich sind Einflussgrößen wie Gegenwind, Steigungen oder Kurvenfahrten. Diese Einflussgrößen wirken als unterschiedliche Kräfte auf das Auto und bewirken eine Geschwindigkeitsänderung, die nun durch einen Regler mit der gezielten Beeinflussung des Autos ausgeglichen werden muss. Kennzeichnend für die Regelungstechnik ist die fortlaufende Erfassung der zu regelnden Größe (Regelgröße x), die ständig mit der Zielgröße (Führungsgröße w) verglichen wird, siehe *Abbildung 1*. Der Regler beeinflusst das System (Regelstrecke, z.B. Auto) mit dem Ziel einer Angleichung an die Führungsgröße, siehe [1,2]. Bei der Geschwindigkeitsregelung wird mit einem Sensor die Regelgröße (hier Geschwindigkeit des Autos) fortlaufend erfasst. Diese Größe wird im Industriejargon auch als Ist-Wert bezeichnet, präziser ist aber die Bezeichnung „Messgröße“ (der wahre Wert kann niemals exakt erfasst werden, weil u.a. immer Messfehler auftreten).

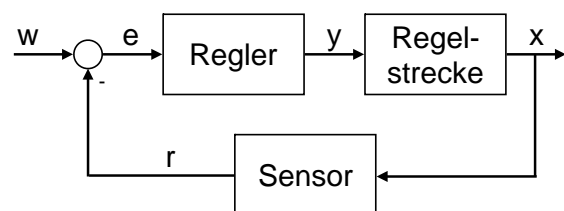


Abbildung 1: Regelkreis mit dem zu regelnden System (Regelstrecke), einem Sensor und einem Regler sowie der Führungsgröße w , der Regeldifferenz e , der Stellgröße y , der Regelgröße x und dem Messwert r

Das Prinzip wird dabei nicht nur in der Technik verwendet. Auch in der

Betriebswirtschaft und Unternehmensführung werden Prozesse geregelt, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen, z.B. das Erreichen eines bestimmten Unternehmensgewinns. Dazu werden fortlaufend Größen wie Absatz, Marge, usw. gemessen und entsprechend in Unternehmensprozesse eingegriffen, um das Ziel des Unternehmens zu erreichen. Auch alle Lebewesen nutzen das Prinzip der Regelungstechnik. Beispielsweise wird die Körpertemperatur eines Menschen auf einen bestimmten Sollwert (z.B. 36,8 °C zzgl. „Toleranz“) geregelt. Bei Abweichungen reagiert der Körper durch Schwitzen (dem Körper wird durch Kondensation des Schweißes Wärme entzogen) oder Zittern (Muskelkontraktionen zur Erhöhung der Körpertemperatur), um den Sollwert zu halten. Weitere Beispiele sind Blutdruck, Blutzuckerspiegel, das Greifen eines Gegenstandes, die allesamt geregelte Prozesse sind. Auch in der Tier- und Pflanzenwelt werden Prozesse geregelt, z.B. die Ausrichtung einer Pflanze zur Sonne, um maximale Photosynthese zu erreichen oder das erfolgreiche Jagen einer Beute. Bei Jägern sind beispielsweise die Augen nach vorne gerichtet, um Abstände zur Beute besser zu erfassen, d.h. um eine präzisere Messgröße zu erhalten. Bei fluchtorientierten Beutetieren sind die Augen seitlich, um eine bessere Rundumsicht zu haben. Dies lässt sich bereits als Optimierung der jeweiligen Regelkreise auffassen.

Im Prinzip wird diese Entwicklung (der Evolution) künstlich durch die Regelungstechnik repliziert.

3 Identifikation eines Modells

In einem ersten Schritt in der Regelungstechnik wird die Regelstrecke analysiert und ein (mathematisches) Modell ermittelt. Die Regelstrecke ist das zu regelnde System, z.B. ein Roboterarm, der eine

bestimmte Position anfahren soll oder das bereits erwähnte Auto, das eine bestimmte Geschwindigkeit einhalten soll.

Diese Analyse der Regelstrecke wird im Rahmen einer Modellbildung und Parameteridentifikation durchgeführt. Bei der Modellbildung wird ein hinreichend genaues Abbild der Realität erstellt. Meistens handelt es sich dabei um physikalisch-mathematische Modelle mit denen die Realität beschrieben wird. Für technische Systeme funktioniert das deswegen sehr gut, weil es sich um kausale und deterministische Prozesse handelt. Kausal bedeutet, dass es einen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung gibt, z.B. wird nur durch eine Krafteinwirkung (Ursache) eine Masse beschleunigt (Wirkung). Deterministisch bedeutet, dass Prozesse streng nach Gesetzen folgen, z.B. Energieerhaltungssatz. Damit kann die Realität quantitativ erfasst werden. Hier begründet sich bereits, warum die Regelungstechnik zu den Wissenschaften zählt: Damit lassen sich später Erkenntnisse und Rückschlüsse über die Realität erzielen, um technische Systeme für ein gegebenes Ziel quantitativ (!) optimal (!) auszulegen.

Viele Maschinen und Anlagen lassen sich durch typische Regelstrecken modellieren, z.B. sog. Verzögerungsglieder 1. oder 2. Ordnung, siehe *Abbildung 2* und zahlreiche Lehrbücher in denen die Modellbildung detailliert beschrieben ist [2,5,11,12,14,15,16]. Ein Verzögerungsglied 1. Ordnung (sog. P-T₁ Glied) kann beispielsweise ein Motor sein, der in Abhängigkeit einer Eingangsgröße $y(t)$ eine bestimmte Geschwindigkeit als Ausgangsgröße $x(t)$ aufbaut. Die Eingangsgröße $y(t)$ ist z.B. eine bestimmte Spannung bei Elektromotoren oder die Gaspedalstellung bei einem Verbrennungsmotor (damit verbunden ist die Einspritzmenge des Treibstoffes in die

Brennkammern). Weitere Beispiele für ein derartiges Verhalten sind der Temperaturanstieg aufgrund Wärmeeinwirkung (Backofen, Hochofen, Motortemperatur, verfahrenstechnische Anlagen, ...) oder Drehmomentanstieg eines Elektromotors.

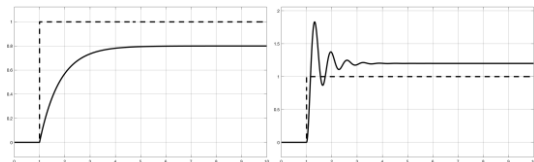


Abbildung 2: Beispiele typischer Regelstrecken, Verzögerungsglied 1. Ordnung (links) und 2. Ordnung (rechts)

Ein solches Verzögerungsglied 1. Ordnung wird mathematisch durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung

$$T \cdot \dot{x}(t) + x(t) = K \cdot y(t) \quad (1)$$

oder als Übertragungsfunktion

$$G_{S1}(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2)$$

mit dem Verstärkungsfaktor K und der Zeitkonstanten T beschrieben, siehe *Abbildung 3*.

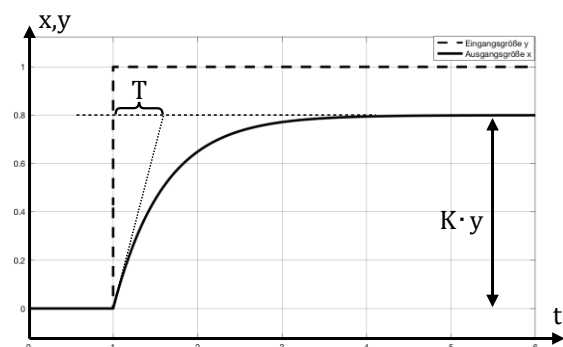


Abbildung 3: Verzögerungsglied 1. Ordnung mit dem Verstärkungsfaktor K und der Zeitkonstanten T , hier sind $K = 0,8$ und $T = 0,6$

Der Verstärkungsfaktor K gibt das Verhältnis des Endwertes zur Eingangsgröße an. Die Zeitkonstante T ist ein Maß für die „Trägheit“ des Systems zur Erreichung des Endwertes. Diese beiden Faktoren können auch aus dem Anlagen-

verhalten mit Messwerten abgelesen werden, siehe *Abbildung 3*.

Ein Verzögerungsglied 2. Ordnung (sog. P-T₂ Glied) hat, neben dem Verstärkungsfaktor K , zwei weitere Parameter, dem Dämpfungsgrad D sowie der Eigenkreisfrequenz ω_0 , zur Charakterisierung des Systems. Es wird als Differentialgleichung 2. Ordnung

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + 2D\omega_0 \cdot \dot{x}(t) + \omega_0^2 \cdot x(t) \\ = K \cdot \omega_0^2 \cdot y(t) \end{aligned} \quad (3)$$

bzw. als Übertragungsfunktion

$$G_{S2}(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 \cdot s + \omega_0^2} \quad (4)$$

beschrieben. Der Dämpfungsgrad D ist ein Maß für die „Schwingungsfähigkeit“ des Systems. Für $D = [0..1]$ ist das System schwingungsfähig und für $D \geq 1$ ist das System nicht schwingungsfähig, wobei für $D = 1$ der aperiodische Grenzfall beschrieben wird, siehe *Abbildung 4*. Die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 ist ein Maß für die Schwingungsfrequenz bzw. auch für die Schnelligkeit des Systems. Dabei hängt sie mit der Frequenz f_e bzw. dem Dämpfungsgrad D mit

$$\omega_e = 2\pi \cdot f_e = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - D^2} \quad (5)$$

zusammen. Das System schwingt tatsächlich mit der Frequenz f_e bzw. der Kreisfrequenz ω_e . Für kleine Dämpfungsgrade D gilt näherungsweise

$$\omega_e = 2\pi \cdot f_e \approx \omega_0 \quad (6)$$

und kann u.a. aus Messwerten ermittelt werden, siehe *Abbildung 4*.

Für Feder-Masse-Systeme gilt

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (7)$$

mit der Federsteifigkeit bzw. Elastizität c und der bewegten Masse m . Dieser Zusammenhang wird beispielsweise bei der Projektierung von Hydraulikanlagen genutzt, um die Eigenfrequenz des ungedämpften Systems f_0 abzuschätzen. Die Eigenfrequenz ist ein wichtiger Indikator für eine regelungstechnische Inbetriebnahme. In der Industriepraxis werden Eigenfrequenzen im Anlagenbau von $f_0 > 15 \text{ Hz}$ angestrebt. Damit wird die Anlage bei gängigen Industrie-Taktzeiten unterhalb der Eigenfrequenz angeregt, um ein Aufschwingen zu vermeiden.

Es haben aber nicht nur Maschinen und Anlagen eine Eigenfrequenz. Auch andere Systeme sind schwingungsfähig und haben eine ausgeprägte Eigenfrequenz, z.B. Gebäude und Brücken (mit $f_0 \approx 1..2 \text{ Hz}$), Klaviersaiten (vom tiefsten Ton „A mit $f \approx 27,5 \text{ Hz}$ bis zum höchsten Ton „c“ mit $f \approx 4.186,01 \text{ Hz}$), Pendel bei einer Standuhr bzw. das Schaukeln oder das Springen auf einem Trampolin (letztenannte alle mit $f_0 \approx 0,5..2 \text{ Hz}$).

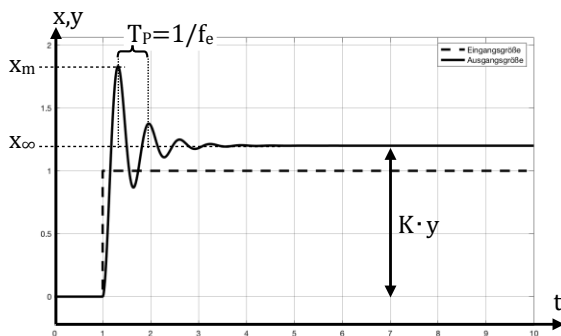


Abbildung 4: Schwingungsfähiges Verzögerungsglied 2. Ordnung

Der Dämpfungsgrad D kann u.a. aus Messwerten ermittelt werden, siehe *Abbildung 4*. Dazu wird die relative Überschwingweite

$$x_r = \frac{x_m - x_\infty}{x_\infty} \quad (8)$$

ermittelt und der Dämpfungsgrad

$$D = \frac{|\ln x_r|}{\sqrt{\pi^2 + (\ln x_r)^2}} \quad (9)$$

berechnet. Technische Beispiele für schwingungsfähige Verzögerungsglieder 2. Ordnung sind Regalbediengeräte (Mastschwingungen beim Anfahren bzw. Abbremsen), Werkzeugmaschinen (z.B. hydraulische Pressen), Roboter, Krananlagen.

Die mathematische Beschreibung realer Systeme ist die Grundlage, um ein System quantitativ zu optimieren bzw. quantitativ, wissenschaftlich den Regler auszulegen, wie nachfolgend exemplarisch gezeigt wird. In der Praxis lassen sich allerdings reale Systeme aufgrund ihrer Komplexität nur hinreichend genau bzw. nur mit großem Aufwand mathematisch beschreiben. Beispielsweise sind Lagerspiele nur statistisch erfassbar und werden daher meistens vernachlässigt. Zudem existiert auch die heuristische Optimierung und Auslegung, die in der Industriepraxis ebenso praktiziert wird, z.B. um pragmatisch zeitoptimiert eine akzeptable Lösung zu erzielen. Dies lässt sich als Pareto-Prinzip interpretieren: In 20% der eingesetzten Zeit wird eine 80%-Lösung erreicht.

Das Verhalten eines Verzögerungsglied 1. Ordnung kann auch als Pareto-Prinzip interpretiert werden, siehe *Abbildung 3*. In den ersten 20% der Zeit werden 80% des Endwertes erreicht. Um weiter in die Nähe des Endwertes zu kommen, muss sehr viel mehr Zeit aufgewendet werden. Nicht nur technische Prozesse weisen dieses (vereinfacht modellierte) Verhalten auf, sondern nicht-technische Prozesse wie Umsatzsteigerungen trotz zunehmender Marktsättigung, Fitnesszustand durch Sporttraining, Know-How-Zuwachs beim Lernen. Die Erkenntnisse der Regelungstechnik können daher - zumindest vom Ansatz her - auch auf andere Prozesse übertragen werden.

4 Ingenieurwissenschaftliche Auslegungsmethoden eines Reglers

Nachdem das reale, zu regelnde System durch ein hinreichend genaues Modell beschrieben werden kann, wird anschließend ein optimal passender Regler gesucht. Um ein Optimum zu finden, muss eine Zielgröße und ein Gütemaß zur Bewertung der Zielerreichung präzise (mathematisch) definiert werden. Beides ist je nach Typ von Anlage unterschiedlich definiert. Beispielsweise ist ein Überschwingen für spanende Werkzeugmaschinen zwingend zu vermeiden, hingegen ist bei einem Roboter für pick-and-place Aufgaben ein gewisses Überschwingen akzeptabel.

Mit der Gesamtübertragungsfunktion

$$G_{ges} = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S G_M} \quad (10)$$

des Regelkreises und der Übertragungsfunktion des Reglers G_R , der Regelstrecke G_S und der Messeinrichtung G_M lässt sich ein passender Regler finden. Die Übertragungsfunktion der Messeinrichtung (Sensor) kann mit $G_M = 1$ angenommen werden, wenn der Sensor im Vergleich zur Anlage sehr schnell und hinreichend genau die Messwerte liefert.

In der Industriepraxis hat sich für viele Standard-Anlagen der PID-Regler bewährt. Der Regler berechnet aus der Regeldifferenz eine Stellgröße, siehe *Abbildung 1*. Der PID-Regler besteht aus der Summe von drei Anteilen: Die Regeldifferenz wird mit einem Faktor multipliziert (proportional, P), integriert (I) bzw. differenziert (D). Der PID Regler wird somit durch die Übertragungsfunktion

$$G_R = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (11)$$

$$= K_P \cdot \frac{1 + T_N \cdot s + T_N \cdot T_V \cdot s^2}{T_N \cdot s} \quad (12)$$

$$= K_{Pm} \cdot \frac{(1 + T_{Nm} \cdot s) \cdot (1 + T_{Vm} \cdot s)}{T_{Nm} \cdot s} \quad (13)$$

beschrieben. Die Faktoren K_P , K_I und K_D sind die P-, I- und D-Anteile. Die Übertragungsfunktion kann in die sogenannte additive Form mit der Nachstellzeit T_N und Vorhaltzeit T_V umgerechnet werden, siehe Gleichung (12). Sie kann auch in die sogenannte multiplikative Form mit den Anteilen des Verstärkungsfaktors K_{Pm} , der „multiplikativen“ Nachstellzeit T_{Nm} und der „multiplikativen“ Vorhaltzeit T_{Vm} dargestellt werden, siehe Gleichung (13). Je nach Vorgehensweise der Reglereinstellung bieten die drei Darstellungsweisen der Regler-Übertragungsfunktion ihre Vorzüge. Beispielsweise wird eine heuristische Einstellung üblicherweise mit Gleichung (11) eingestellt. Mit den anderen beiden Übertragungsfunktionen aus Gleichung (12) und (13) können Parameter der Regelstrecke kompensiert werden, was nachfolgend exemplarisch gezeigt wird.

Beispiel 1: Die Geschwindigkeit eines Elektromotors soll geregelt werden. Für den Motor sei die Übertragungsfunktion

$$G_{SM} = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K_M}{T_{1M} \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{T_{2M} \cdot s + 1} \quad (14)$$

ermittelt und die Parameter $K_M = 0,1$ sowie $T_{1M} = 0,1$ bzw. $T_{2M} = 0,01$ identifiziert worden. Mit einem PI-Regler nach Gleichung (13) kann die größte Zeitkonstante mit $T_{Nm} = T_{1M} = 0,1$ kompensiert werden, um die Dynamik des Regelkreises zu erhöhen. Mit der Kompensation ist die Nachstellzeit $T_{Nm} = 0,1$ festgelegt. Mit Hilfe des sogenannten Betragsoptimums kann die Reglerverstärkung mit $\frac{K_{Pm}}{T_{Nm}} = \frac{1}{2 \cdot K_M \cdot T_{2M}} = \frac{1}{2 \cdot 0,1 \cdot 0,01}$ zu $K_{Pm} = 50$ bestimmt werden. Bei der Herleitung des Betragsoptimums kann gezeigt werden, dass der geschlossene Regelkreis für eine maximale Frequenz-

Bandbreite eine optimale Führungsübertragungsfunktion aufweist, d.h. die Regelgröße folgt über viele Frequenzen dem Sollwert, siehe [2,12,14,15]. Mit dieser Vorgabe einer möglichst großen Bandbreite lässt sich ein Optimum finden. Dabei wird der so eingestellte Regelkreis eine Dämpfung $D = \sqrt{0,5} \approx 0,7$ haben, was einem Optimum entspricht! Was bei diesem Optimum allerdings nicht betrachtet wurde, ist die Ausregelung von Störungen.

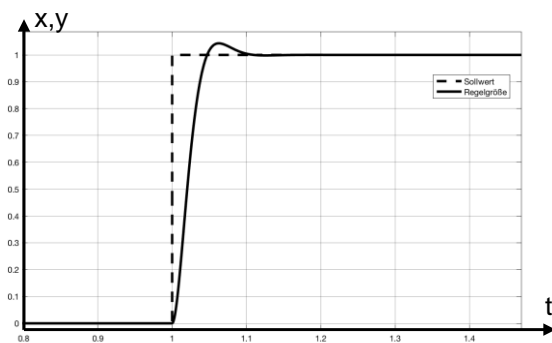


Abbildung 5: Ergebnis eines ausgelegten Reglers aus Beispiel 1 nach dem Betragsoptimum und einer Kompensation der größten Zeitkonstanten

Es kann gezeigt werden, dass bei dieser Strecke ein I-Regleranteil zwingend erforderlich ist, um den Sollwert zu erreichen, siehe [2,12]. Allerdings wird dadurch der Regelkreis schwingungsfähig. Der P-Regleranteil erhöht dabei die Dynamik des gesamten Regelkreises.

Bei einer sprungförmigen Anregung kann es allerdings sein, dass wegen der Regelkreisverstärkung die Stellgröße y für die Strecke unzulässig groß wird, siehe *Abbildung 6* mit einer maximalen Stellgröße $y_{max} = 50$.

In der Praxis wird daher eine Stellgrößenbegrenzung eingesetzt, um die Strecke zu schützen. Natürlich wird dadurch die Dynamik (theoretisch) eingeschränkt, aber der Regler kann nicht „mehr“ aus der Strecke herausholen als sie leisten kann.

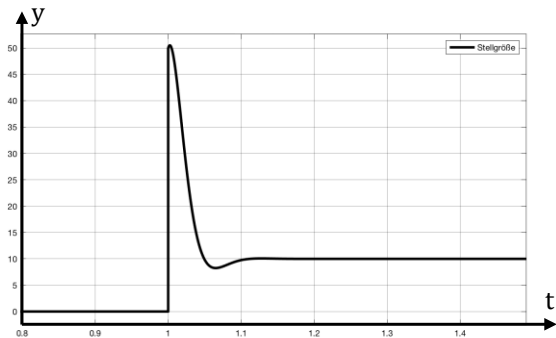


Abbildung 6: Stellgröße $y(t)$ des ausgelegten Reglers aus Beispiel 1

Wenn der Regler allerdings die Strecke über ihre Begrenzung hinaus anregt, dann wird der I-Regler die Regeldifferenz weiter integrieren. Im Industriejargon heißt es, dass der I-Anteil „überläuft“, sog. Wind-up-Effekt. Das muss wieder „weg-integriert“ werden mit der Folge, dass die Anlage schwingt bzw. instabil wird. Eine Anti-Wind-up-Lösung ist die Abschaltung des I-Reglers oder den Begrenzungsfehler als Kompensationsintegrator rückzuführen, siehe auch [5,12,15].



Abbildung 7: Rampenförmige Anregung des Regelkreises aus Beispiel 1 mit dem Sollwert w (gestrichelt), der Stellgröße y (fett, durchgezogen) und der Regelgröße x (dünn, durchgezogen)

Eine weitere und zusätzliche Möglichkeit, um die Stellgröße zu verringern, ist keine sprungförmigen Sollwertänderungen vorzugeben. Das kann z.B. durch eine Rampenfunktion erfolgen, siehe *Abbildung 7*. Durch die Rampenzeit wird die maximale Stellgröße reduziert.

Beispiel 2: Das Schwingungsverhalten eines Regalbediengerätes soll reduziert werden. Die Anlage hat eine Eigenfrequenz $f_0 = 1,5 \text{ Hz}$ bzw. $\omega_0 = 2\pi f_0 = 9,4 \text{ sec}^{-1}$ und einen Dämpfungsgrad $D = 0,1$, für eine ausführliche Beschreibung und typische Werte siehe [8,9,10]. Zusammen mit dem Antrieb sei das reale Anlagenverhalten durch die Übertragungsfunktion

$$G_{SG} = \frac{K_G \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot \frac{1}{T_G \cdot s + 1}$$

$$= \frac{K_G}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_0} s + 1} \cdot \frac{1}{T_G \cdot s + 1}$$

hinreichend genau beschrieben. Die weiteren Parameter wurden mit $K_G = 4$ und $T_G = 0,5$ identifiziert. Die Übertragungsfunktion inkl. Parameter kann durch eine mathematisch-physikalische Modellbildung hergeleitet oder durch Messwerte mit einer realen Anlage bestimmt werden, für eine genaue Beschreibung siehe [8,12]. Mit einem PID-Regler nach Gleichung (12) lässt sich die Schwingung eliminieren. Dazu werden die Reglerparameter entsprechend den Steckenparametern mit

$$T_N = \frac{2D}{\omega_0} = \frac{2 \cdot 0,1}{9,4} \approx 0,021$$

$$T_N T_V = \frac{1}{\omega_0^2} \text{ bzw. } T_V = \frac{1}{T_N \cdot \omega_0^2} \approx 0,53$$

gewählt. Dadurch werden die Streckenparameter mit dem Schwingungsverhalten kompensiert. Mit $\frac{K_P}{T_N} = \frac{1}{2 \cdot K_G \cdot T_G}$ wird die Reglerverstärkung

$$K_P = 0,0053$$

bestimmt. Mit dieser Einstellung reagiert der Regelkreis auf Änderungen des Sollwerts analog zu Beispiel 1, siehe *Abbildung 5*. Der Regelkreis hat dabei die gleiche Dämpfung, nur die größere Zeit-

konstante der Strecke wirkt sich entsprechend träger auf das Reglerergebnis aus.

Die hier gezeigte Vorgehensweise zur Reglerauslegung ist nur eine von vielen Auslegungsmethoden. Weitere Methoden sind u.a. das symmetrische Optimum, Optimum nach Integralkriterien, die Verfahren nach Ziegler-Nichols und auch heuristische Methoden, siehe z.B. [2,12,14, 15].

In diesem Beitrag soll lediglich demonstriert werden, dass mit einer vorgegebenen Zielstellung ein Regler optimal ausgelegt werden kann. Das Optimum kann durch einen methodisch-systematischen und somit ingenieurwissenschaftlichen Lösungsweg gefunden werden. Hierzu stehen viele Methoden zur Verfügung, die in der Regelungstechnik angewendet werden. Schwierigkeiten dabei sind u.a. die mathematische Formulierung einer passenden Zielsetzung (z.B. muss das Ziel mit der Anlage prinzipiell erreichbar sein) oder das Finden eines mathematischen Modells inkl. Parametern, um die Realität hinreichend genau zu beschreiben.

Zudem sind in der Technik manche Lösungsansätze konkurrierend, z.B. Schnelligkeit des Regelkreises bei gleichzeitiger Schwingungsreduzierung (die Steigerung der Schnelligkeit geht einher mit einer erhöhten Neigung zu Schwingungen). Es muss daher ein guter Kompromiss gefunden werden. Zudem kommt es vor, dass die Lösung eines Problems ein weiteres Problem verursacht, siehe Begrenzung der Stellgröße und den Wind-up-Effekt als Folge. Dieses weitere Problem muss dann zusätzlich gelöst werden.

5 Exemplarischer Bezug zu nicht-technischen Anwendungen

Der sportliche Trainingszustand eines Menschen kann als Verzögerungsglied 1.

Ordnung aufgefasst werden, siehe *Abbildung 3*. Dabei zeigt die Ordinate (vertikale Achse) den Trainingszustand über der Zeitachse (Abszisse, horizontale Achse). Fängt ein untrainierter Mensch mit Sport an, dann sind in den ersten Trainingswochen große Fortschritte festzustellen, siehe auch [4]. Im weiteren Verlauf flacht der Trainingsfortschritt immer weiter ab, sofern die Trainingsintensität gleichbleibend ist. Einen derartigen (verein-fachten) Zusammenhang gibt es auch bei der Lernkurve, z.B. bei der Einarbeitung in ein neues Fachgebiet oder bei der Produktion eines neuen Erzeugnisses.

Ein Verzögerungsglied 1. Ordnung kann auch den Verlauf einer Markteinführung eines neuen Produktes beschreiben. Bei einem guten, neuen Produkt kann am Anfang eine hohe und schnelle Marktdurchdringung erfolgen. Im weiteren Verlauf tritt dann nach und nach eine Marktsättigung ein, bei gleichbleibenden Randbedingungen und Unternehmensaktionen, z.B. Vertriebsaktivitäten.

Um nun bei derartigen Zusammenhängen ein bestimmtes Niveau (Trainingszustand, Marktdurchdringung, ...) zu erreichen und zu halten, gehen aus Sicht der Regelungstechnik folgende Erkenntnisse hervor:

- Ein klares, präzise formuliertes und realistisches Ziel muss gegeben bzw. definiert werden, z.B. das Erreichen eines bestimmten Trainingszustandes.
- Der Ist-Wert muss fortlaufend gemessen werden, um die Regel-differenz zu bestimmen.
- Es muss ein Regler verwendet werden, der aus der Soll-Ist-Wert-Differenz entsprechend auf das System einwirkt (Voraussetzung ist, dass das System steuerbar ist),
- Im Falle eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung als Strecke ist ein P-Regler unzureichend, d.h. es muss ein I-Regler mit verwendet werden, um das Ziel zu erreichen, z.B. als PI-Regler. Dabei erhöht der P-Anteil die Dynamik.
- Die Parameter des PI-Reglers müssen in Abhängigkeit des Streckenverhaltens eingestellt werden. Bei Änderungen sind die Parameter ggf. anzupassen, siehe adaptive Regelung [2,12].

Diese Erkenntnisse lassen sich nun für die einzelnen nicht-technischen Disziplinen anwenden, wie nachfolgend gezeigt wird. Bei einer sprunghaften Änderung der Zielvorgabe und Anwendung eines P- oder D-Reglers entstehen große Stellgrößen und können das System bzw. die Regelstrecke überlasten, siehe *Abbildung 6*. Entschließt sich beispielsweise ein untrainierter Mensch plötzlich einen bestimmten Trainingszustand zu erreichen und koppelt die Trainingsintensität vom Ist- an den Ziel-Trainingszustand, dann erfährt sein Körper eine sehr hohe Belastung, möglicherweise auch eine Überbelastung. Besser ist es, rampenförmig die Zielvorgabe anzuheben. Das verringert die Stellgröße bzw. hier die Belastung des Körpers, siehe *Abbildung 7*. Ist nun ein bestimmter Trainingszustand zu erreichen, dann reicht ein P-Regler nicht aus. Mit einem P-Regler wird die Trainingsintensität proportional zum „Defizit des Trainingszustandes“ (=Differenz zwischen Soll- und Ist-Trainingszustand) vorgegeben. Der reine P-Regler reduziert dann die Trainingsintensität je näher der Zielzustand erreicht wird. Aus Sicht der Regelungstechnik muss ein I-Regleranteil mit ergänzt werden. Dieser Anteil erhöht zusätzlich die Trainingsintensität je länger der Zielzustand nicht erreicht ist. Im Prinzip bewertet der I-Regleranteil das zeitlich vergangene Defizit und steigert die

Trainingsintensität. Das Ergebnis ist in *Abbildung 7* gezeigt: Die Trainingsintensität muss stärker ansteigen als der zunehmende Trainingszustand, was so auch in der Sportwissenschaft umgesetzt wird [4].

Wird darüber hinaus bei Erreichen des Ziels die Regelung abgeschaltet, z.B. indem nicht mehr trainiert wird, dann wird der Trainingszustand wieder abnehmen, siehe *Abbildung 8* und die dargestellte abfallende Kurve nach dem Zeitpunkt $t=1$. Natürlich lässt sich diese Diskussion auch u.a. auf die genannte Lernkurve oder Marktdurchdringung übertragen. Wenn nicht mehr „gelernt“ wird, dann geht das Wissen wieder zurück, siehe z.B. Verlernen von Sprach- oder Mathematikkenntnissen bei Nicht-Anwendung. Oder aus Sicht und mit dem Jargon der Betriebswirtschaft: „Wenn der Markt nicht bearbeitet wird“, dann reduziert sich wieder die bereits erreichte Marktdurchdringung. Auch das Erreichen eines Ziels beim Lernen oder bei der Marktdurchdringung lässt sich analog zum hier gezeigten Sporttraining übertragen.

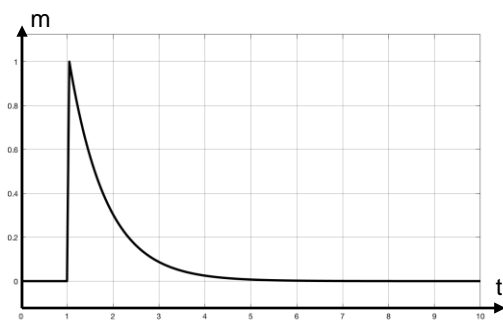


Abbildung 8: Impulsartige Anregung eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung zum Zeitpunkt $t=1$

Eine weitere Erkenntnis aus der Unternehmensorganisation ist die Mitarbeitermotivation durch Gehaltserhöhungen, siehe [3,6]. Die Mitarbeitermotivation m kann durch eine Gehaltserhöhung gesteigert werden, siehe *Abbildung 8*. Zum Zeitpunkt $t=1$ wird das Gehalt gesteigert.

Das wirkt sich „impulsartig“ auf die Mitarbeitermotivation aus. Allerdings reduziert sich die Motivation wieder. In der Industriepraxis wurde die Erkenntnis gewonnen, dass sogar nach ca. 3 Monaten die Zusatz-Motivation wieder abgeklungen ist, siehe *Abbildung 8*. Um die Motivation durch monetäre Anreize wieder anzuheben, sind (aus regelungstechnischer Sicht) weitere Gehaltserhöhungen notwendig, siehe *Abbildung 9*. In der Industriepraxis werden üblicherweise nicht so häufig Gehaltserhöhungen vergeben, weil das wiederum die „Motivation“ der Unternehmenseigner senkt.

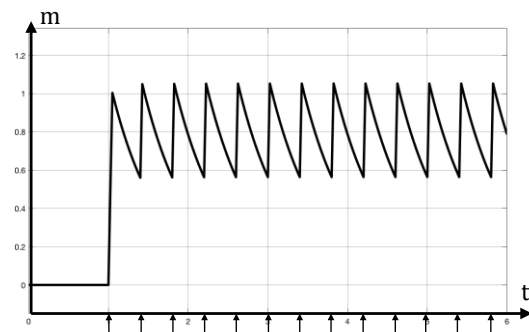


Abbildung 9: Anregung eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung durch wiederholte, impulsartige Signale, siehe Pfeile

Zum Glück ist Mitarbeitermotivation keine rein technische, ingenieurwissenschaftliche Problemstellung und wird daher in diesem Beitrag nicht weiter gelöst. Aus unternehmerischer Sicht gibt es dazu verschiedene Lösungsstrategien, z.B. Erhöhung der intrinsischen Motivation durch gute Verhältnisse zu Vorgesetzten und Kollegen, flexible Arbeitszeiten, Heimarbeit. In skandinavischen Ländern bieten Unternehmen dazu u.a. kostenfrei Getränke, frisches Obst, Fitnessräume, Massagestunden während der Arbeitszeit an.

Es ist empfehlenswert den eigenen Berufs- und Karriereweg auch aus regelungstechnischer Sicht zu planen. Hierzu ist eine gute Zielsetzung und -formulierung wichtig, sowie die fortlaufende Prüfung und entsprechende Einwirkung auf den

eigenen Lebenslauf, siehe auch [13]. Dabei ist Kenntnis über die Regelstrecke (=das eigene Potenzial zur Arbeitsleistung) sehr wichtig, um realistische, erreichbare Ziele zu formulieren und den „Regler“ optimal auszulegen, so dass das Ziel erreicht wird. Selbstverständlich sind Änderungen im Verhalten der Regelstrecke oder die Einwirkung von (Stör-)Größen übliche regelungstechnische Herausforderungen. Lösungen sind die Anpassung des Reglers oder sogar der Zielvorgaben.

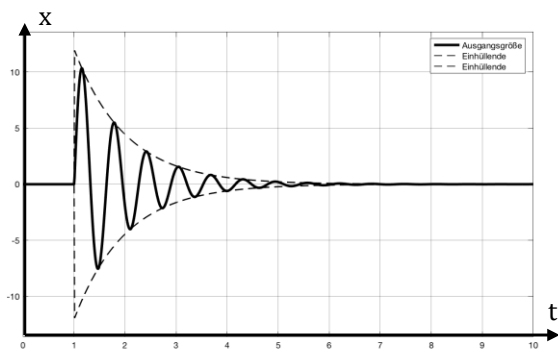


Abbildung 10: Impulsantwort eines schwingungsfähigen Systems ($P-T_2$) mit dem Dämpfungsgrad $D=0,1$ (durchgezogen als „Ausgangsgröße“ dargestellt), die Einhüllenden sind gestrichelt gezeigt

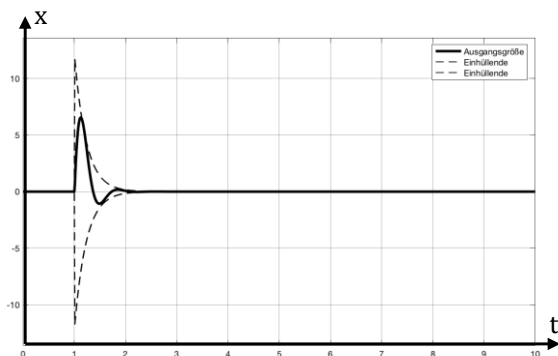


Abbildung 11: Impulsantwort eines schwingungsfähigen Systems ($P-T_2$) mit dem Dämpfungsgrad $D=0,5$ (zusätzlich sind die Einhüllenden gestrichelt dargestellt)

Eine weitere nicht-technische Anwendung sind Stimmungsschwankungen, die aus psychologischer Sicht analysiert und behandelt werden. Aus regelungstechnischer

Sicht können Schwingungen durch passive und aktive Maßnahmen gedämpft werden. Eine passive Maßnahme ist die Optimierung der Regelstrecke indem deren Dämpfungsgrad D vergrößert wird. Das kann durch zusätzliche mechanische Dämpfer erzielt werden, indem die (viskose) Reibung des Systems erhöht wird. Aus der Modellbildung wird ersichtlich, dass der Dämpfungsgrad D mit der Geschwindigkeit bzw. Änderung der Ausgangsgröße gekoppelt ist, siehe Gleichung (3) und (4). Das heißt, um Schwingungen zu dämpfen muss auf die *Änderung* der zu betrachtenden Größe (hier also die *Stimmungsänderung*) entgegengewirkt werden, siehe *Abbildung 10* im Vergleich zur *Abbildung 11*.

Es ist nicht ausreichend bzw. zielführend nur auf den absoluten Betrag der Größe entgegenzuwirken. Aus technischer Sicht wird dadurch lediglich die Frequenz, genauer die Eigenfrequenz, erhöht. Es wird nämlich dadurch ein Energiespeicher „stärker“, der sich dann mit „voller Wucht“ entlädt, was sich dann in Schwingungen auswirken kann. Allerdings kann je nach Anregung des Systems die Erhöhung der Eigenfrequenz das System dennoch beruhigen, indem das System mit niedrigeren Frequenzen angeregt wird, d.h. unterhalb der Eigenfrequenz. Hingegen lassen impulsartige oder sprungförmige Anregungen das System mit ihrer (höheren) Eigenfrequenz schwingen.

Eine aktive Maßnahme zur Erhöhung der Dämpfung wird durch eine gezielte Anregung eines Stellgliedes erreicht. Dadurch muss ein Regelkreis geschlossen werden. Auch hier wird die Erhöhung der Dämpfung proportional zur *Änderung* der Regelgröße bewirkt. Für ein gutes Führungsverhalten ist diese Methode in *Beispiel 2* gezeigt worden. Allerdings wurde dabei der Regelkreis nicht auf Störeinflüsse hin optimiert. Das lässt sich mit

einer anderen Reglereinstellung erreichen, was aber einer anderen Zielvorgabe entspricht.

Zu beachten ist, dass mit einer falschen Reglereinstellung auch das Gegenteil verursacht werden kann, so dass das System aufschwingt bzw. instabil wird, siehe *Abbildung 12*.

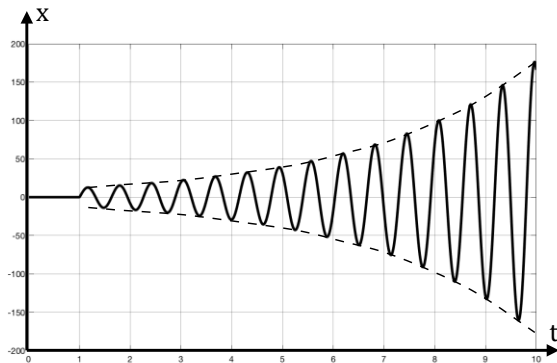


Abbildung 12: Beispiel eines instabilen Systems mit aufschwingender bzw. aufklingender Ausgangsgröße (mit den gestrichelt dargestellten Einhüllenden)

Natürlich ist die Psyche des Menschen sehr viel komplexer und komplizierter, als sie durch die hier vorgestellten (einfachen) Modelle interpretiert werden können. Auch die Stellgrößen und Eingangsgrößen sind sehr viel komplexer und zahlreich, als sie nur durch *eine* deterministische Eingangsgröße beschrieben werden kann, wie in den hier gezeigten Modellen mit kausalen Ausgangsgrößen. Die Behandlung derart komplexer Zusammenhänge ist das Fachgebiet der Psychologie und nicht Inhalt dieses regelungstechnischen Beitrags. Es soll hier lediglich demonstriert werden, wie technische, methodische Ansätze auf andere Fachgebiete übertragen werden können. Damit sollen Ideenansätze angeregt werden, um ingenieurwissenschaftliche Methoden auf nicht-technische Anwendungen zu übertragen.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt einen kompakten Überblick über regelungstechnische

Methoden, u.a. Modellbildung inkl. Parameteridentifikation und die daraus resultierende Reglerauslegung. Dabei wird gezeigt, was die Regelungstechnik als Ingenieurwissenschaft auszeichnet, u.a. indem eine optimale Reglereinstellung gefunden werden kann. Als Ausblick zeigt der Beitrag Ideen wie die Methoden auf nicht-technische Anwendungen übertragen werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN IEC 60050-351:2014-09: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik*, Beuth, 2014.
- [2] *Föllinger, O.: Regelungstechnik*, VDE VERLAG, 2016.
- [3] *Herzberg, F.: One more time: How do you motivate employees?*, Harvard Business School Publishing Corp., 1968, Nachdruck: Harvard Business Review 2003.
- [4] *Hottenrott, K; Neumann, G.: Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*, Meyer & Meyer Sport, 2016.
- [5] *Jaschek, H.; Voos, H.: Grundkurs der Regelungstechnik*, Oldenbourg Verlag, 2010
- [6] *Judge, T.; Piccolo, R.; Podsakoff, N.; Shaw, J.; Rich, B.: The relationship between pay and job satisfaction: A meta-analysis of the literature*, Journal of Vocational Behavior, Vol. 77, S. 157 - 167, 2010
- [7] *Loose, T.: Projektierung mechatronischer Anlagen als Laborarbeit in der Hochschullehre am Beispiel LEGO® MINDSTORMS®, 2. IFToMM D-ACH Konferenz, Universität*

- Innsbruck, S. 1-8 (Tagungsband auf CD-ROM) , 2016
- [8] Loose, T.: Benchmark-Anwendung zur Schwingungsanalyse und -dämpfung von Regalbediengeräten am Beispiel eines Labormodells, 25. Workshop „Computational Intelligence“ des GMA-FA 5.14, KIT Scientific Publishing, S. 127-144, 2015
- [9] Loose, T.; Pospiech, T.: Benchmark-Untersuchung zur Regelung schwach gedämpfter Systeme bei industriepraktischen Anwendungen, 27. Workshop „Computational Intelligence“ des GMA-FA 5.14, KIT Scientific Publishing, S. 175-194, 2017
- [10] Loose, T.; Pospiech, T.: Regelungstechnische Labormodelle mit industriepraktischen Anwendungen für die Hochschullehre, akzeptierter Beitrag in der *at – Automatisierungstechnik*, erscheint voraussichtlich 01/2019.
- [11] Lunze, J.: Regelungstechnik 1, Springer, 2016
- [12] Lutz, H. ; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik, Europa-Lehrmittel, 2014.
- [13] Mell, H.: Erfolgreiche Karriereplanung, Springer Vieweg, 2014
- [14] Oppelt, W.: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge, Verlag Chemie, 1972.
- [15] Schulz, G.; Graf, K.: Regelungstechnik 1, De Gruyter Studium, 2015.

[16] Unbehauen, H.: Regelungstechnik I, Vieweg +Teubner, 2008

Kontaktdaten:

Prof. Dr.-Ing. Tobias Loose

Professur für Automatisierungstechnik,
Hochschule Heilbronn und
VWA-Hochschule für berufsbegleitendes
Studium, Prorektor und Dekan der
Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät

Wolframstraße 32
70191 Stuttgart

E-Mail: tobias.loose@vwa-hochschule.de



Bachelor of Engineering (B.Eng.) Wirtschaftsingenieurwesen

Präsenzstudium
neben dem Beruf
in Baden-Württemberg

DIE HOCHSCHULE FÜR BERUFSTÄTIGE

Es gibt viele gute Gründe, an der VWA-Hochschule zu studieren!

- Präsenzstudium neben dem Beruf
- Studieren mit und ohne Abitur
- Staatlich anerkannte Hochschule
- Akkreditierte Studiengänge mit 180 ECTS-Punkten
- Direkter Theorie-Praxis-Transfer
- Persönliche Atmosphäre, individuelle Betreuung
- Beste Karrierechancen mit Hochschulabschluss
- Erste VWA-Hochschule in Deutschland

WR

WISSENSCHAFTSRAT

Erfolgreiche Konzeptprüfung durch den Akkreditierungsausschuss

PROGRAMMAKKREDITIERT

nach Akkreditierungsrat ■ durch  FIBAA



Bachelor of Arts (B.A.) Betriebswirtschaftslehre

Präsenzstudium
neben dem Beruf
in Baden-Württemberg

DIE HOCHSCHULE FÜR BERUFSTÄTIGE

Bisher erschienen / Published Papers:

Vol. 1, No. 2018-01	Reuter, Ute	Entwicklungsperspektiven von Frauen auf dem Weg in Führungspositionen.
Vol. 1, No. 2018-02	Anhorn, Denise und Ute Reuter	Die Personalentwicklung der Südwestbank AG.
Vol. 1, No. 2018-03	Duijm, Bernhard	Der schwierige Weg des Renminbi zur Weltwährung.
Vol. 1, No. 2018-04	Bischof, Rainer und Jörg Föllner	Outdoor Funknavigation mittels Funklaufzeitmessung. Ergebnisse des KMU- Innovativ-Projekts „NUR FUN“, gefördert durch das BMBF.
Vol. 1, No. 2018-05	Willburger, Nadine und Ute Reuter	Organisation, Planung und Personalwesen bei der LIEMOBUT GmbH.
Vol. 1, No. 2018-06	Loose, Tobias	Über die Regelungstechnik als Ingenieurwissenschaft und ihre technischen sowie nicht-technischen Anwendungen.