OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Fakultät für Informatik

Institut für Wissens- und Sprachverarbeitung

Kurzeinführung in die Regelungstechnik

(A. Nürnberger, A. Klose, R. Kruse)

1 Begriff der Regelungstechnik

Die Notwendigkeit der *Regelung* tritt in fast allen technischen und natürlichen dynamischen Systemen auf. Ein System soll ein bestimmtes Verhalten aufweisen, welches durch seine Aufgabe vorgeschrieben ist. Hierzu genügt es meist nicht, eine bestimmte *Stellgröße* in Abhängigkeit von äußeren beeinflussenden Größen fest einzustellen (*Steuerung*), sondern das System muß laufend durch vergleichende Messungen überwacht werden (*Regelung*). Der Begriff der Regelung läßt sich somit (nach [FÖLLINGER, 1990]) wie folgt definieren:

> *Ausgangspunkt ist die Forderung nach selbsttätiger gezielter Beeinflussung eines dynamischen Systems, das nur unvollständig bekannt ist und das sein Verhalten in nicht genau vorhersagbarer Weise ändert. Die Erfüllung dieser Forderung erfolgt durch eine Rückführungsstruktur, bestehend aus einer Beobachtungseinrichtung, die laufend Informationen über das veränderliche Systemverhalten sammelt, und einer Beeinflussungseinrichtung, welche diese Informationen verarbeitet und dadurch so auf das System einwirkt, daß dessen Verhalten an das gewünschte Verhalten angeglichen wird. Eine solche Rückführungsstruktur heißt Regelung.*

Die *allgemeine Regelungsstruktur* ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Neben den gezielt zu beeinflussenden Regelgrößen sind meist noch weitere Größen meßbar, die alle der Beobachtungseinrichtung zugeführt werden, um aus ihnen das jeweilige Systemverhalten zu ermitteln.

Beispiele für Regelungsstrukturen sind der Drehzahlregler in einem Motor, die Temperaturregelung einer Raumheizung oder die Füllstandsregelung für einen Tank.

Die am häufigsten verwendete Regelungsstruktur ist die in Abbildung 1-2 dargestellte Struktur

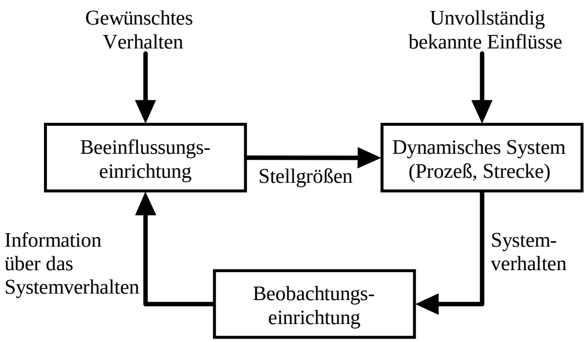

Abbildung 1-1: Allgemeine Regelungsstruktur

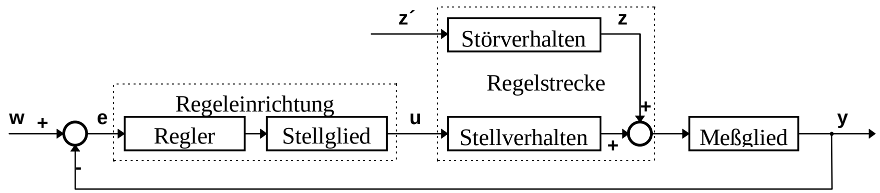

Abbildung 1-2 : Einfacher Regelkreis

eines *einfachen Regelkreises*. Dabei gelten folgende Bezeichnungskonventionen:

y	die Regelgröße (Istwert)	u	die Stellgröße
w	die Führungsgröße (Sollwert)	z	die Störgröße
e	die Regelabweichung		

Im folgenden werden aus Gründen der Vereinfachung nur Regelungsstrukturen mit einer Ein- und Ausgangsgröße betrachtet. Dies stellt im allgemeinen keine Einschränkung dar, da sich mehrere skalare Größen als Ein- bzw. Ausgangsvektoren auffassen lassen.

Wenn die Regelstrecke vollständig beschrieben werden kann und ausreichend stabil ist, und der Einfluß der Störgrößen vernachlässigbar klein ist, kann direkt aus den Sollwerten die Stellgröße bestimmt werden (*open-loop control; Steuerung*). Zumeist ist dies jedoch nicht der Fall und die Wirkung der Stellgröße auf die Ausgangsgröße geht über eine Rückkopplungsschleife wieder in die Regelung mit ein (*Regelung*).

Eine übliche Vorgehensweise ist es, wie in Abbildung 1-2 gezeigt, statt des Sollwertes w die Abweichung e des Istwertes vom Sollwert, also den Regelfehler, als Eingang für den Regler zu verwenden.

Beispiel: Füllstandsregelung

Bei der in Abbildung 1-3 dargestellten Füllstandsregelung soll die Niveauhöhe (*Regelgröße*) unabhängig von Störungen (z') im Zu- oder Abfluß konstant gehalten werden (*Festwertregelung*). Der Behälter ist hierbei die Regelstrecke. Als Meßglied dient ein Schwimmer dessen Stellung auf einen Hebelmechanismus einwirkt. Dieser gelagerte Hebel arbeitet als Regler, dessen Verstärkung durch das Verhältnis der beiden Hebelarme gegeben ist. Der Reglerausgang (linker Hebelarm) wirkt über das Ventil (*Stellglied*) auf den Zufluß (*Stellgröße*). Bei zu hohem Füllstand wird der Zufluß gedrosselt.

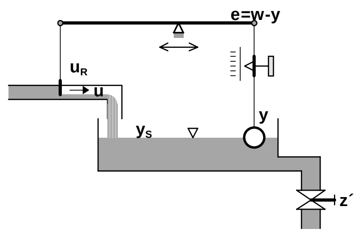

Abbildung 1-3: Anlagenskizze einer Füllstandsregelung

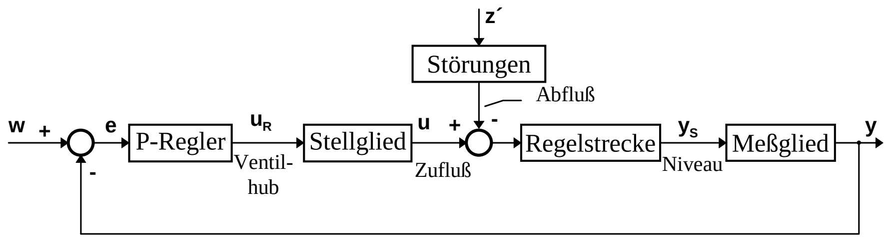

Abbildung 1-4: Blochschaltbild der Füllstandsregelung

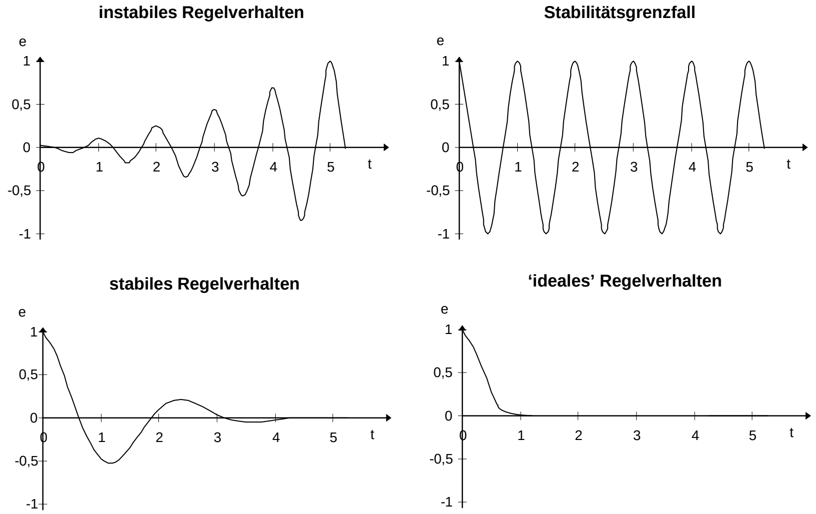

Abbildung 1-5: Stabilität

Stabilität

Die Rückkopplung bedingt ein generelles Problem der Regelungstechnik. Durch den Einfluß der Ausgangs- auf die Eingangsgrößen des Reglers ist keine Stabilität des Regelvorgangs gewährleistet, wie in Abbildung 1-5 angedeutet.

So kann es zu aufklingenden Schwingungen kommen, wenn kleine anfängliche Fehler durch ungeeignete Gegensteuerung immer größer werden. Bei einem stabilen Regelverhalten klingen die Schwingungen hingegen ab. Im Grenzfall zwischen Stabilität und Instabilität bleibt das System in konstantem Schwingen.

Der 'Idealverlauf' der Fehlerkurve einer Regelung ist im allgemeinen dann erreicht, wenn der Istwert mit einem möglichst geringen Nach- bzw. Überschwingen den vorgegebenen Sollwert erreicht. (Der 'Idealverlauf' der Fehlerkurve kann systemabhängig aber auch ein leichtes Überschwingen erfordern, um z. B. Kräfte, die bei zu starkem Gegensteuern entstehen, zu minimieren.)

2 Beschreibung dynamischer Systeme

Um ein System mit Methoden der konventionellen Regelungstechnik regeln zu können, muß ein mathematisches Modell für das dynamisches Verhalten des Systems aufgestellt werden.

Es bezeichne $\mathbb{F}$ die Menge aller Funktionen $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Weiterhin sei $x_e(t) \in \mathbb{F}$ die Eingangsfunktion für das System (z.B. die Regelstrecke). Dann liegt das Ziel in der Bestimmung der Funktion $T : \mathbb{F} \rightarrow \mathbb{F}$, so daß $x_a(t) = T(x_e(t))$ den Verlauf des Ausgangssignals des Systems wiedergibt. Die Funktion T beschreibt somit das Übertragungsverhalten des betrachteten Systems.

Lineare Systeme

Die grundlegenden Verfahren der konventionellen Regelungstechnik beschränken sich auf die Betrachtung linearer Systeme, um effiziente Modellierungs- und Lösungsverfahren einsetzen zu können. Von linearen Systemen spricht man, wenn sich das Ausgangssignal als lineare Überlagerung der Systemantworten mehrerer Eingangssignale beschreiben läßt, d. h. wenn das Superpositionsprinzip gilt:

$$\sum_{i=1}^{n} k_i x_{a_i}(t) = \sum_{i=1}^{n} k_i T\left[x_{e_i}(t)\right] = T\left[\sum_{i=1}^{n} k_i\, x_{e_i}(t)\right].$$

Die Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangssignal können häufig über Differentialgleichungen beschrieben werden. Wenn diese Differentialgleichungen nicht linear sind, ist es üblich, sie für gewisse Arbeitsbereiche näherungsweise zu linearisieren. Da sich mit Differentialgleichungen nur unhandlich rechnen läßt, werden lineare Differentialgleichungen über die Laplace-Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich übertragen, in welchem die Analyse von Systemen leichter vonstatten geht. Dabei wird einer Originalfunktion f(t) eine Bildfunktion F(s) mit Hilfe des Laplace-Integrals

$$F(s) = \int_0^\infty f(t) e^{-st}\, dt$$

zugeordnet, wobei $s=\sigma+j\omega$ komplex ist. Die Funktion *F(s)* wird, wenn *f(t)* das Übertragungsverhalten einer Regelstrecke (oder eines Teils davon beschreibt), auch als *Übertragungsfunktion* bezeichnet. Für große Klassen von Funktionen ist die Transformation bijektiv, so daß Berechnungen äquivalent im Frequenzbereich durchgeführt werden können.

Die Transformation in den Frequenzbereich erleichtert die Modellierung komplexer Systeme erheblich. So kann zum Beispiel die Ausgangsfunktion *Y(s)* einer Regelstrecke, die durch die Übertragungsfunktion *G(s)* definiert wird, durch einfache Multiplikation mit der Eingangsfunktion *X(s)* ermittelt werden: $Y(s) = G(s) \cdot X(s)$. Entsprechend berechnet sich die Übertragungsfunktion einer Hintereinanderschaltung linearer Elemente als Produkt der einzelnen Übertragungsfunktionen: $G(s)=G_1(s)\cdot G_2(s)\cdot \ldots \cdot G_n(s)$. Dies liefert ein mächtiges Verfahren zur Beschreibung und Lösung linearer Systeme [UNBEHAUEN, 1994].

Beispiel: Beschreibung eines mechanischen dynamischen Systems

Als Beispiel soll das Zeitverhalten des in Abbildung 2-1 dargestellten „gedämpften Schwingers" bestimmt werden. Dabei ist c die Federkonstante, d die Dämpfungskonstante und m die Masse. Die Größen v_1, v_2 und x_e beschreiben die Geschwindigkeiten in den jeweiligen Punkten.

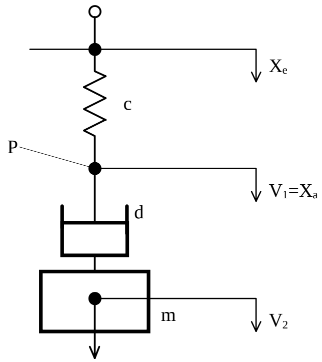

Abbildung 2-1 : Gedämpfter mechanischer Schwinger

Zum Aufstellen von Differentialgleichungen für mechanische Systeme werden folgende Gesetzmäßigkeiten verwendet:

- Newtonsches Gesetz,
- Kräfte- und Momentengleichgewichte,
- Erhaltungssätze von Impuls, Drehimpuls und Energie.

In unserem Fall gilt (nach dem Newtonschen Gesetz):

$$m\frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} = d(v_1 - v_2)\,. \tag{1}$$

Unter der Annahme, daß die Feder zum Zeitpunkt t = 0 keine Auslenkung besitzt, gilt für den Punkt P Dämpfungskraft = Federkraft (Kräftegleichgewicht):

$$d(v_1 - v_2) = c\int_0^t \left(x_e(\tau) - v_1(\tau)\right)\mathrm{d}\tau\,. \tag{2}$$

Nach Gleichsetzen folgt:

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{c}{m}\left(\int_0^t x_e(\tau)\mathrm{d}\tau - \int_0^t v_1(\tau)\mathrm{d}\tau\right). \tag{3}$$

Um die nicht interessierende Größe v_2 zu eliminieren, differenziert man (2):

$$d\,\frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} - d\,\frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} = c\left(x_e - v_1\right). \tag{4}$$

Anschließend setzt man (3) in (4) ein und differenziert ein weiteres Mal:

$$d\,\frac{\mathrm{d}^2 v_1}{\mathrm{d}t^2} - \frac{dc}{m}x_e + \frac{dc}{m}v_1 = c\,\frac{\mathrm{d}x_e}{\mathrm{d}t} - c\,\frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t}\,. \tag{5}$$

Man erhält also eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Mit $T_1 = \frac{m}{d}$, $T_2 = \sqrt{\frac{m}{c}}$ und $x_a = v_1$ erhält man

$$T_2^2\ddot{x}_a + T_1\dot{x}_a + x_a = x_e + T_1\dot{x}_e\,. \tag{6}$$

Für fest vorgegebenes $x_a(0)$ und $\dot{x}_a(0)$ ist die Lösung dieser Differentialgleichung ein eindeutiger Zusammenhang $G(x_e) = x_a$.

Nach der Transformation in den Frequenzbereich lautet die Gleichung (6):

$$T_2^2 s^2 X_a(s) + T_1 s X_a(s) + X_a(s) = X_e(s) + T_1 s X_e(s)\,. \tag{7}$$

Aus (7) kann man direkt die Übertragungsfunktion ablesen:

$$G(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}\,. \tag{8}$$

Bei Bedarf kann G(s) wieder in den Zeitbereich überführt werden. In der Praxis geschieht dies durch eine Partialbruchzerlegung der rechten Seite von (8) in eine Summe aus Standardtermen, deren inverse Laplace-Transformationen entsprechenden Tabellen entnommen werden können.

(nach [UNBEHAUEN, 1994], S.41ff)

3 Klassische Regelung

In der Regelungstechnik werden meist Regler eingesetzt, die zur Bestimmung der Stellgröße u den Fehler e, sowie dessen Ableitung $\frac{de(t)}{dt}$ und das Integral $\int_0^t e(x)dx$ verwenden.

In der Praxis weit verbreitet sind die PID-Regler, die die Stellgröße als Linearkombination dieser drei Anteile der Regelabweichung berechnen:

$$u(t) = Pe + \tfrac{P}{I}\int_0^t e(x)dx + PD\frac{de(t)}{dt} = P\left(e + \tfrac{1}{I}\int_0^t e(x)dx + D\frac{de(t)}{dt}\right)$$

Es sind die verschiedensten Varianten des PID-Reglers möglich, indem einige Komponenten der Formel weggelassen werden. So verwendet der P-Regler nur die Fehlergröße e, der PD-Regler den Fehler und seine Ableitung und der I-Regler nur den Integralanteil des Fehlers. Hierdurch wird, wie auch durch die Konstanten (P, I und D), ein unterschiedliches Regelverhalten erreicht. Allgemein läßt sich folgendes sagen:

Der Proportionalanteil P dient zur schnellen, groben Einstellung der Stellgröße auf den Fehler. Jedoch ist für eine erforderliche Stellgröße $u(t)\neq 0$ der verbleibende Fehler eines P-Reglers offensichtlich ebenfalls nicht null, sondern $e=u(t)/P$. Bei großem Verstärkungsfaktor P ist die verbleibende Regelabweichung zwar sehr klein, aber das Überschwingverhalten schlecht, da der Regler mit großen Stellwerten u(t) auf relativ kleine Regelabweichungen reagiert. Das Regelverhalten kann hierbei durch die Einführung eines Integralanteils verbessert werden, da dieser wegen der Integration $\int_0^t e(x)dx$ auch für $e(t)=0$ eine Stellgröße $u(t)\neq 0$ liefern kann. Der reine I-Regler kann zwar auch die Führungsgröße genau einregeln, jedoch ist er sehr langsam. Dies kann durch den Differentialanteil D verbessert werden. Durch einen Differentialanteil D reagiert der Regler sehr empfindlich auf die Änderungen des Fehlers, wodurch ein sehr viel

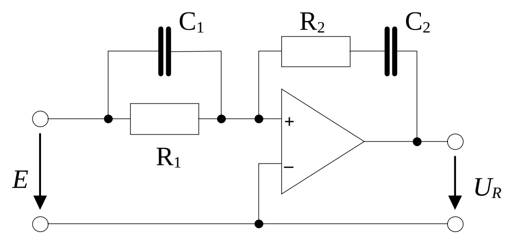

Abbildung 3-1 : PID-Regler mit Operationsverstärker schnelleres Einregelverhalten erreicht wird.

Das Problem der konventionellen Regelungstechnik besteht vor allem in der Bestimmung der Regler-Parameter (P, I und D), da hierzu die genaue physikalisch/mathematische Beschreibung des zu steuernden Systems notwendig ist (meist mittels eines Systems von Differentialgleichungen). Für lineare Systeme mit einer Meß- und einer Stellgröße gibt es Verfahren zur Bestimmung der Regler-Parameter. Für nichtlineare Systeme gibt es Ansätze zur automatisierten Bestimmung bzw. Optimierung bei gegebenen Gütekriterien (siehe z. B. [SOWA, 1989]), doch sind diese Verfahren nicht universell einsetzbar. In der Praxis werden die Regler-Parameter meist nach Erfahrungswerten voreingestellt und anschließend manuell modifiziert, bis das gewünschte Regelverhalten erreicht ist.

Abbildung 3-1 zeigt den schematischen Aufbau eines PID-Reglers mit Widerständen, Kondensatoren und einem Operationsverstärker. Über die Dimensionierung der Widerstände und Kondensatoren wird das Verhalten des Reglers festgelegt. Über die Reihen- bzw. Parallelschaltung der Kondensatoren wird die Integration und Ableitung des Fehlersignals realisiert.

Anmerkung: Möglichkeiten der Verbesserung der einfachen Regelkreisstruktur bestehen in der Rückführung von Hilfsgrößen, dem Einsatz (ergänzender) Rückführungen oder durch sogenannte Kaskadenregelungen mit mehreren Reglern (jeweils durch Unterteilung der Regelstrecke in mehrere Abschnitte; siehe z. B. [LEONHARD, 1992]).

Die Definition und Wirkungsweise konventioneller Regler wird ausführlich in [LEONHARD, 1992] und [FÖLLINGER, 1990] beschrieben.

4 Wissensbasierte Regelung

Ziel der wissensbasierten Regelung ist es, ein unbekanntes System ohne Kenntnis der exakten physikalisch/mathematischen Beschreibung des Systems regeln zu können. Anstelle eines mathematischen Modells tritt hier ein Modell, welches durch die Analyse des Verhaltens eines das System steuernden Experten gewonnen wird. Dieser Vorgang wird auch als *kognitive Analyse* bezeichnet ([KRUSE et al., 1995] S. 162 ff.). Liegt das Wissen anschließend in Form linguistischer Regeln vor, bietet sich eine *Fuzzy-Regelung* an, im Falle reiner Beobachtungsdaten eine *Neuronale Regelung*.

Weitere Vorteile lassen sich aus der Kombination der Ansätze erreichen. Beim Neuro-Fuzzy-Regler kann die durch vorhandenes Expertenwissen gegebene Regelbasis durch Beobachtungsdaten oder Experimente optimiert werden, wobei die Interpretierbarkeit des Reglers erhalten bleibt.

Anmerkung: Bei der Modellbildung beschränkt man sich hierbei nicht nur auf technische dynamische Systeme, sondern läßt auch Entscheidungsvorgänge und Beurteilungen zu (z. B. Einschätzung des Börsenverlaufs oder Betrachtung einer Investitionsentscheidung). Siehe hierzu auch [NAUCK et al., 1996] S. 234 ff.

Probleme wissensbasierter R egelung

Wissensbasierte Regler haben keine Möglichkeit, dynamische (d. h. zeitabhängige) Informationen zu verarbeiten bzw. zu speichern, wie dies bei den konventionellen Reglern (z. B. über den Integralanteil) möglich ist. Diese müssen dem wissensbasierten Regler geeignet zur Verfügung gestellt werden, um dann statisch ausgewertet werden zu können [WERBOS, 1992].

Eine Möglichkeit ist die Speicherung von Vergangenheitsdaten in Vektoren, die dann dem Regler als Eingabe zur Verfügung gestellt werden. So kann z. B. die Steigung (bzw. bei diskreten Systemen die Änderung einer Meßwertkurve $x(t_n)$) durch die Meßwerte zweier aufeinanderfolgender Zeitpunkte angenähert werden: $\Delta x(t_n) = x(t_n) - x(t_{n-1})$.

Weiterhin können diese Meßwerte, durch Differenzier- bzw. Integrierglieder vorverarbeitet, dem Regler zur Verfügung gestellt werden. Eine Darstellung dieser Problematik kann auch [KNAPPE, 1994] entnommen werden. Hier wird insbesondere die Regelung von PT_2-Systemen im Vergleich zwischen PI(D)- und Fuzzy-Reglern erörtert.

5 Literaturhinweise

[FÖLLINGER, 1990] Föllinger, Otto (1990): Regelungstechnik, Hüthig Buch Verlag GmbH, Heidelberg

[KIENDL, 1997] Kiendl, Harro (1997): Fuzzy Control methodenorientiert, R. Oldenbourg Verlag, München

[KNAPPE, 1994] Knappe, Heiko (1994): Comparison of Conventional and Fuzzy-Control of Non-Linear Systems, in [KRUSE et al., 1994] S. 75-87

[KRUSE et al., 1994] Kruse, Rudolf; Gebhardt, Jörg, Klawonn, Frank (1994): Foundations of Fuzzy Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, et al.

[KRUSE et al., 1995] Kruse, Rudolf; Gebhardt, Jörg; Klawonn, Frank (1995): Fuzzy-Systeme, 2. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart

[LEONHARD, 1992] Leonhard, Werner (1992): Einführung in die Regelungstechnik, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden

[NAUCK et al., 1996] Nauck, Detlef; Klawonn, Frank; Kruse, Rudolf (1996): Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme, 2. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden

[SOWA, 1989] Sowa, Jörg (1989): Ein Beitrag zum industriellen Einsatz selbsteinstellender PID-Regler für verfahrenstechnische Regelstrecken, Fortschr.-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 190, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf

[UNBEHAUEN, 1994] Unbehauen, Heinz (1994): Regelungstechnik I: klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, 8. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden

[WERBOS, 1992] Werbos, P. J. (1992): Neurocontrol: Where it is Going and Why it is Crucial, Artificial Neural Networks, 2:61-68