

Uwe Zimmermann  
Harald Ortwig

## **Regelungstechnik I**

für Ingenieure und Praktiker (2. Auflage)

Trierer Systemtechnik

**Uwe Zimmermann, Harald Ortwig**

## **Regelungstechnik I**

für Ingenieure und Praktiker  
(2. Auflage)

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7669-1

ISSN 2190-6076

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Vorwort Das vorliegende Buch ist aus dem bewährten Umdruck zur Vorlesung „Regelungstechnik I“ im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Trier entstanden. Aus der Weiterentwicklung und Diversifizierung der Studiengänge resultierte der Wunsch, den Studenten über das gewohnte Skriptmaterial hinaus eine neu strukturierte, professionelle und gut verständliche Arbeitsunterlage zur Verfügung zu stellen. Das Buch enthält in kompakter Form wesentliche Grundlagen zum Übertragungsverhalten von Regelkreisgliedern, Regelstrecken und Regeleinrichtungen und geht darauf aufbauend detailliert auf die Modellbildung, die Reglereinstellung sowie die Stabilität von Regelkreisen ein.

Der in der Vorlesung „Regelungstechnik I“ dargebotene Stoff wird voll umfänglich behandelt, insofern erübrigt sich eine Vorlesungsmitschrift, so dass die Inhalte konzentrierter aufgenommen werden können. Zur Übung und Vertiefung der Inhalte wird jedes Kapitel durch Aufgabenstellungen ergänzt, die das selbständige Wiederholen des Stoffes sowie die Prüfungsvorbereitung ermöglichen. Darüber hinaus eignet sich das Buch auch zur Wiederholung bzw. zum Selbststudium und richtet sich daher ganz allgemein an Hochschulstudenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie verwandter Fächer, aber auch an Praktiker im Berufsleben. Es schafft das grundlegende Verständnis sowie das Basiswissen, welches der praktisch tätige Ingenieur zur Bewältigung seiner täglich anfallenden Aufgaben benötigt.

Für die zweite Auflage wurde das Buch umfangreich überarbeitet und verbessert. Dabei wurde darauf geachtet, Fachbegriffe und Formelzeichen nach der Norm DIN IEC 60050-351 zu verwenden und englische Fachausdrücke aus der Norm zu übernehmen.

Trier, im Oktober 2020

Prof. Dr.-Ing. Uwe Zimmermann, B.E. Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen und in den USA, Promotion am Institut für Regelungstechnik. Industrietätigkeit im Bereich Regelung schnelllaufender Grossdieselmotoren. Seit 1995 Professor für Mess- und Regelungstechnik an der Hochschule Trier.

Prof. Dr.-Ing. Harald Ortwig Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen, Promotion am Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen. Industrietätigkeit im Bereich Mobilhydraulik. Seit 1993 Professor für Fluidtechnik (Hydraulik und Pneumatik) an der Hochschule Trier.



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| 1.1      | Regelung und Steuerung (closed-loop control and open-loop control) . . . . .           | 1         |
| 1.2      | Wirkungsplan (functional diagram) . . . . .                                            | 3         |
| 1.3      | Beispiele für Regelungen . . . . .                                                     | 7         |
| 1.3.1    | Raumtemperaturregelung . . . . .                                                       | 7         |
| 1.3.2    | Außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung . . . . .                            | 11        |
| 1.3.3    | Kesseltemperaturregelung . . . . .                                                     | 12        |
| 1.3.4    | Wasserstandsregelung mit Schwimmerregler . . . . .                                     | 13        |
| 1.3.5    | Druckregelung mit einem Druckminderventil . . . . .                                    | 14        |
| 1.3.6    | Kraftregelung eines Hydropuls-Systems . . . . .                                        | 15        |
| 1.4      | Die Steuerung von Größen . . . . .                                                     | 16        |
| 1.5      | Übungsaufgaben . . . . .                                                               | 22        |
| <b>2</b> | <b>Übertragungsverhalten</b>                                                           | <b>29</b> |
| 2.1      | Allgemeines . . . . .                                                                  | 29        |
| 2.2      | Beharrungsverhalten von Übertragungsgliedern . . . . .                                 | 31        |
| 2.3      | Dynamisches Verhalten von linearen Übertragungsgliedern . . . . .                      | 36        |
| 2.3.1    | Proportionalglied oder P-Glied (Proportionalelement or P-element) . . .                | 37        |
| 2.3.2    | Verzögerungsglied erster Ordnung oder P-T <sub>1</sub> -Glied (firstorder lag element) | 40        |
| 2.3.3    | Integrierendes Glied oder I-Glied (integral element) . . . . .                         | 45        |
| 2.3.4    | Differenzierendes Glied oder D-Glied und D-T <sub>1</sub> -Glied (derivative element)  | 48        |
| 2.3.5    | Totzeitglied oder T <sub>1</sub> -Glied (dead-time element) . . . . .                  | 52        |
| 2.3.6    | Verzögerungsglied 2. Ordnung oder P-T <sub>2</sub> -Glied (second-order lag element)   | 54        |
| 2.4      | Frequenzgang . . . . .                                                                 | 59        |
| 2.5      | Frequenzgänge wichtiger linearer Übertragungsglieder . . . . .                         | 63        |
| 2.5.1    | P-Glied (proportional element) . . . . .                                               | 63        |
| 2.5.2    | I-Glied (integral element) . . . . .                                                   | 64        |
| 2.5.3    | D-Glied (derivative element) . . . . .                                                 | 64        |
| 2.5.4    | PI-Glied (proportional plus integral element) . . . . .                                | 64        |

|          |                                                                                    |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.5.5    | PD-Glied (proportional plus derivative element) . . . . .                          | 65         |
| 2.5.6    | PID-Glied (proportional plus integral plus derivative element) . . . . .           | 65         |
| 2.5.7    | P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .                                                  | 66         |
| 2.5.8    | P-T <sub>2</sub> -Glied . . . . .                                                  | 66         |
| 2.5.9    | T <sub>1</sub> -Glied . . . . .                                                    | 66         |
| 2.6      | Experimentelle Bestimmung des Frequenzganges . . . . .                             | 67         |
| 2.7      | Frequenzgang zusammengesetzter Übertragungsglieder . . . . .                       | 69         |
| 2.8      | Darstellung von Frequenzgängen in Ortskurven . . . . .                             | 74         |
| 2.9      | Darstellung von Frequenzgängen im Bode-Diagramm . . . . .                          | 75         |
| 2.10     | Ortskurven und Bode-Diagramme wichtiger Übertragungsglieder . . . . .              | 78         |
| 2.10.1   | P-Glied . . . . .                                                                  | 78         |
| 2.10.2   | I-Glied . . . . .                                                                  | 79         |
| 2.10.3   | D-Glied . . . . .                                                                  | 82         |
| 2.10.4   | PI-Glied . . . . .                                                                 | 84         |
| 2.10.5   | PD-Glied . . . . .                                                                 | 87         |
| 2.10.6   | PID-Glied . . . . .                                                                | 90         |
| 2.10.7   | P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .                                                  | 94         |
| 2.10.8   | P-T <sub>2</sub> -Glied . . . . .                                                  | 97         |
| 2.10.9   | T <sub>1</sub> -Glied . . . . .                                                    | 104        |
| 2.10.10  | D-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .                                                  | 106        |
| 2.10.11  | Zusammenfassung . . . . .                                                          | 107        |
| 2.11     | Übungsaufgaben . . . . .                                                           | 112        |
| <b>3</b> | <b>Regelstrecken (controlled systems)</b>                                          | <b>145</b> |
| 3.1      | Allgemeines . . . . .                                                              | 145        |
| 3.2      | Statisches Verhalten von Strecken mit Ausgleich . . . . .                          | 146        |
| 3.3      | Dynamisches Verhalten von Strecken mit Ausgleich . . . . .                         | 147        |
| 3.3.1    | Allgemeines . . . . .                                                              | 147        |
| 3.3.2    | P-T <sub>0</sub> -Strecke . . . . .                                                | 148        |
| 3.3.3    | P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                                                | 148        |
| 3.3.4    | P-T <sub>2</sub> -Strecke . . . . .                                                | 150        |
| 3.3.5    | T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                                                  | 150        |
| 3.3.6    | P-T <sub>1</sub> T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                                 | 151        |
| 3.3.7    | Dynamisches Verhalten nichtschwingungsfähiger P-T <sub>k</sub> -Strecken . . . . . | 152        |
| 3.4      | Dynamisches Verhalten von Strecken ohne Ausgleich . . . . .                        | 155        |
| 3.4.1    | Allgemeines . . . . .                                                              | 155        |
| 3.4.2    | Die I-T <sub>0</sub> -Strecke . . . . .                                            | 155        |
| 3.4.3    | Die I-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                                            | 156        |
| 3.4.4    | Die I-T <sub>2</sub> -Strecke . . . . .                                            | 157        |
| 3.4.5    | Dynamisches Verhalten nichtschwingungsfähiger I-T <sub>k</sub> -Strecken . . . . . | 158        |
| 3.5      | Übungsaufgaben . . . . .                                                           | 160        |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Stetige Regeleinrichtungen</b>                                        | <b>171</b> |
| 4.1      | Allgemeines . . . . .                                                    | 171        |
| 4.2      | Die P-Regeleinrichtung . . . . .                                         | 172        |
| 4.3      | Die I-Regeleinrichtung . . . . .                                         | 178        |
| 4.4      | Die PI-Regeleinrichtung . . . . .                                        | 182        |
| 4.5      | Die PD-Regeleinrichtung . . . . .                                        | 185        |
| 4.6      | Die PID-Regeleinrichtung . . . . .                                       | 188        |
| 4.7      | Übungsaufgaben . . . . .                                                 | 191        |
| <b>5</b> | <b>Modellbildung</b>                                                     | <b>205</b> |
| 5.1      | Allgemeines . . . . .                                                    | 205        |
| 5.2      | Antriebswelle mit Reibung . . . . .                                      | 206        |
| 5.3      | Elastisch gekoppelte Massen . . . . .                                    | 208        |
| 5.4      | Lagegegenerter Gleichstromservoantrieb . . . . .                         | 211        |
| 5.5      | Drehzahlregelung eines Dieselmotors . . . . .                            | 212        |
| 5.6      | Übungsaufgaben . . . . .                                                 | 216        |
| <b>6</b> | <b>Reglereinstellung</b>                                                 | <b>219</b> |
| 6.1      | Allgemeines . . . . .                                                    | 219        |
| 6.2      | Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen . . . . .                   | 219        |
| 6.2.1    | Allgemeines . . . . .                                                    | 219        |
| 6.2.2    | Das Übertragungsverhalten realer und idealer Regelkreise . . . . .       | 221        |
| 6.2.3    | Statisches Übertragungsverhalten von Regelkreisen . . . . .              | 222        |
| 6.2.3.1  | Regelkreis mit P-Regler und Strecke mit Ausgleich . . . . .              | 222        |
| 6.2.3.2  | Regelkreis mit P-Regler und Strecke ohne Ausgleich . . . . .             | 225        |
| 6.2.4    | Dynamisches Verhalten von Regelkreisen mit Totzeitstrecken . . . . .     | 226        |
| 6.2.4.1  | P-Regler mit P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                         | 226        |
| 6.2.4.2  | I-Regler und P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .                         | 231        |
| 6.2.4.3  | P-Regler und P-T <sub>1</sub> T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .          | 233        |
| 6.3      | Einstellregeln . . . . .                                                 | 235        |
| 6.3.1    | Allgemeines . . . . .                                                    | 235        |
| 6.3.2    | Kenngößen des Regelkreises . . . . .                                     | 236        |
| 6.3.3    | Reglereinstellung nach den Kenngößen der Streckensprungantwort . . . . . | 238        |
| 6.3.4    | Reglereinstellung nach einem Schwingversuch . . . . .                    | 246        |
| 6.4      | Übungsaufgaben . . . . .                                                 | 249        |
| <b>7</b> | <b>Stabilität</b>                                                        | <b>257</b> |
| 7.1      | Definition der Stabilität (stability) . . . . .                          | 257        |
| 7.2      | Algebraische Stabilitätskriterien . . . . .                              | 258        |

|     |                                                                  |     |
|-----|------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3 | Nyquist-Kriterium . . . . .                                      | 266 |
| 7.4 | Amplituden- und Phasenreserve (gain- and phase margin) . . . . . | 275 |
| 7.5 | Übungsaufgaben . . . . .                                         | 279 |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                   |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Handregelung einer Raumtemperatur . . . . .                                       | 2  |
| 1.2  | Automatische Raumtemperaturregelung . . . . .                                     | 2  |
| 1.3  | Steuerung einer Raumtemperatur . . . . .                                          | 3  |
| 1.4  | Elemente eines Wirkungsplanes . . . . .                                           | 4  |
| 1.5  | Wirkungsplan eines Regelkreises . . . . .                                         | 6  |
| 1.6  | Wirkungsplan eines vereinfachten Regelkreises . . . . .                           | 6  |
| 1.7  | Thermostatisches Heizkörperventil . . . . .                                       | 7  |
| 1.8  | Raumtemperatur nach Änderung der Sonneneinstrahlung . . . . .                     | 9  |
| 1.9  | Raumtemperaturregelung mit thermostatischem Heizkörperventil . . . . .            | 9  |
| 1.10 | Wirkungsplan der Raumtemperaturregelung . . . . .                                 | 10 |
| 1.11 | Außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung . . . . .                       | 12 |
| 1.12 | Heizkurve einer Außentemperaturgeführten Vorlauftemperaturregelung . . . . .      | 12 |
| 1.13 | Schematische Darstellung einer Kesseltemperaturregelung . . . . .                 | 13 |
| 1.14 | Wasserstandsregelung mit Schwimmerregler . . . . .                                | 14 |
| 1.15 | Vereinfachte Darstellung eines Druckminderventils . . . . .                       | 15 |
| 1.16 | Kraftregelung . . . . .                                                           | 16 |
| 1.17 | Wirkungsplan der Raumtemperatur-Steuerung . . . . .                               | 17 |
| 1.18 | Wirkungspläne von Steuerung und Regelung . . . . .                                | 17 |
| 1.19 | Zulufttemperatursteuerung . . . . .                                               | 18 |
| 1.20 | Zulufttemperaturregelung . . . . .                                                | 18 |
| 1.21 | Schützsteuerung eines Drehstrommotors . . . . .                                   | 19 |
| 1.22 | Lageregelung eines Maschinenschlittens . . . . .                                  | 20 |
| 1.23 | Lagesteuerung eines Maschinenschlittens . . . . .                                 | 20 |
| 1.24 | Pumpe und Rohrleitungsnetz . . . . .                                              | 22 |
| 1.25 | Anlagenschema einer Klimaanlage . . . . .                                         | 23 |
| 1.26 | Wirkungsplan der außentemperaturgeführten Vorlauftemperaturregelung . . . . .     | 24 |
| 1.27 | Wirkungsplan einer Wasserstandsregelung . . . . .                                 | 24 |
| 1.28 | Wirkung der Größen $\dot{V}_a$ und $\dot{V}_e$ auf den Block „Behälter“ . . . . . | 25 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.29 Wirkungsplan der Zulufttemperatur-Regelung . . . . .                                                | 25 |
| 1.30 Wirkungsplan der Zulufttemperatur-Steuerung . . . . .                                               | 26 |
| 1.31 Druckregelung . . . . .                                                                             | 26 |
| 1.32 Regelung der Raumtemperatur . . . . .                                                               | 27 |
| 2.1 Wirkungsplan eines Regelkreises . . . . .                                                            | 30 |
| 2.2 Blockdarstellung eines Übertragungsgliedes . . . . .                                                 | 30 |
| 2.3 Stellventil und Blockdarstellung eines Stellventils . . . . .                                        | 30 |
| 2.4 Kennlinienfeld eines Stellventils . . . . .                                                          | 31 |
| 2.5 Kennlinienfeld eines Lufterhitzers . . . . .                                                         | 32 |
| 2.6 Statisches Verhalten linearer Übertragungsglieder mit einer und mit zwei Eingangsgrößen . . . . .    | 33 |
| 2.7 Linearisierung der Kennlinie eines nichtlinearen Übertragungsgliedes . . . . .                       | 34 |
| 2.8 Ermittlung der Proportionalbeiwerte aus dem Kennlinienfeld des Ventils . . . . .                     | 35 |
| 2.9 Sprungfunktion und Sprungantwort eines einfachen Übertragungsgliedes . . . . .                       | 36 |
| 2.10 Sinusförmige Anregung und sinusförmige Antwortfunktion eines linearen Übertragungsgliedes . . . . . | 37 |
| 2.11 Sprungantwort des Übertragungsgliedes Ventil . . . . .                                              | 38 |
| 2.12 Sprungantwort des P-Gliedes . . . . .                                                               | 39 |
| 2.13 Proportionalglieder Hebel und Spannungsteiler . . . . .                                             | 39 |
| 2.14 Blocksymbol des P-Gliedes . . . . .                                                                 | 40 |
| 2.15 Druckbehälter mit Drossel . . . . .                                                                 | 40 |
| 2.16 Zeitverlauf des Behälterdrucks . . . . .                                                            | 41 |
| 2.17 Sprungantwort des P-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                               | 42 |
| 2.18 Blocksymbol des P-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                                 | 43 |
| 2.19 Schematische Darstellung eines elektrischen Durchlauferhitzers . . . . .                            | 44 |
| 2.20 Schaltung eines RC-Gliedes . . . . .                                                                | 45 |
| 2.21 Flüssigkeitsbehälter als I-Glied . . . . .                                                          | 45 |
| 2.22 Sprungantwort des Flüssigkeitsstandes im Behälter . . . . .                                         | 46 |
| 2.23 Sprungantwort des I-Gliedes . . . . .                                                               | 47 |
| 2.24 Blockdarstellung des I-Gliedes . . . . .                                                            | 47 |
| 2.25 Kondensator als I-Glied . . . . .                                                                   | 47 |
| 2.26 Elektrisches D-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung (D-T <sub>1</sub> -Glied) . . . . .                 | 48 |
| 2.27 Sprungantwort des elektrischen D-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                  | 49 |
| 2.28 Anstiegsantwort eines elektrischen D-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                              | 50 |
| 2.29 Sprungantwort des D-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                               | 51 |
| 2.30 Blocksymbol des D-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                                 | 51 |
| 2.31 Sprungantwort des D-Gliedes . . . . .                                                               | 52 |
| 2.32 Blockdarstellung des D-Gliedes . . . . .                                                            | 52 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.33 Mischwassertemperaturstrecke . . . . .                                                      | 53  |
| 2.34 Sprungantwort der Mischwassertemperaturstrecke . . . . .                                    | 53  |
| 2.35 Sprungantwort des Totzeitgliedes . . . . .                                                  | 54  |
| 2.36 Blocksymbol des Totzeitgliedes . . . . .                                                    | 54  |
| 2.37 Sprungantwort eines ungedämpften P-T <sub>2</sub> -Gliedes . . . . .                        | 57  |
| 2.38 Sprungantworten von gedämpften P-T <sub>2</sub> -Gliedern mit $0 < \vartheta < 1$ . . . . . | 57  |
| 2.39 Sprungantworten von gedämpften P-T <sub>2</sub> -Gliedern mit $\vartheta \geq 1$ . . . . .  | 58  |
| 2.40 Blocksymbol von gedämpften P-T <sub>2</sub> -Gliedern mit $\vartheta \geq 1$ . . . . .      | 58  |
| 2.41 Zeiger in der komplexen Zahlenebene . . . . .                                               | 60  |
| 2.42 Frequenzgang als Zeiger in der komplexen Zahlenebene . . . . .                              | 62  |
| 2.43 Eingangs- und Ausgangssignal eines linearen Systems . . . . .                               | 68  |
| 2.44 Zusammenschaltung von Übertragungsgliedern . . . . .                                        | 69  |
| 2.45 Reihenschaltung von Übertragungsgliedern . . . . .                                          | 70  |
| 2.46 Parallelschaltung von Übertragungsgliedern . . . . .                                        | 70  |
| 2.47 Kreisschaltung / Rückkopplung von Übertragungsgliedern . . . . .                            | 71  |
| 2.48 Vereinfachter Wirkungsplan . . . . .                                                        | 72  |
| 2.49 Wirkungsplan eines Regelkreises . . . . .                                                   | 73  |
| 2.50 Ortskurve eines Frequenzganges . . . . .                                                    | 75  |
| 2.51 Bode-Diagramm . . . . .                                                                     | 76  |
| 2.52 Bode-Diagramm des P-Gliedes . . . . .                                                       | 78  |
| 2.53 Ortskurve des P-Gliedes . . . . .                                                           | 79  |
| 2.54 Bode-Diagramm des I-Gliedes . . . . .                                                       | 81  |
| 2.55 Ortskurve des I-Gliedes . . . . .                                                           | 81  |
| 2.56 Bode-Diagramm des D-Gliedes . . . . .                                                       | 83  |
| 2.57 Ortskurve des D-Gliedes . . . . .                                                           | 83  |
| 2.58 Bode-Diagramm des PI-Gliedes . . . . .                                                      | 86  |
| 2.59 Ortskurve des PI-Gliedes . . . . .                                                          | 87  |
| 2.60 Bode-Diagramm des PD-Gliedes . . . . .                                                      | 89  |
| 2.61 Ortskurve des PD-Gliedes . . . . .                                                          | 90  |
| 2.62 Bode-Diagramm des PID-Gliedes . . . . .                                                     | 93  |
| 2.63 Ortskurve des PID-Gliedes . . . . .                                                         | 93  |
| 2.64 Bode-Diagramm des P-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                       | 96  |
| 2.65 Ortskurve des P-T <sub>1</sub> -Gliedes . . . . .                                           | 96  |
| 2.66 Bode-Diagramm schwingungsfähiger P-T <sub>2</sub> -Glieder . . . . .                        | 99  |
| 2.67 Ortskurve schwingungsfähiger P-T <sub>2</sub> -Glieder . . . . .                            | 100 |
| 2.68 Bode-Diagramm eines P-T <sub>2</sub> -Gliedes mit dem Dämpfungsgrad Null . . . . .          | 101 |
| 2.69 Ortskurve eines P-T <sub>2</sub> -Gliedes mit dem Dämpfungsgrad Null . . . . .              | 102 |
| 2.70 Bode-Diagramm eines P-T <sub>2</sub> -Gliedes mit $\vartheta \geq 1$ . . . . .              | 103 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.71 Ortskurve zweier P-T <sub>1</sub> -Glieder und des daraus zusammengesetzten P-T <sub>2</sub> -Gliedes | 103 |
| 2.72 Bode-Diagramm eines T <sub>1</sub> -Gliedes                                                           | 105 |
| 2.73 Ortskurve eines T <sub>1</sub> -Gliedes                                                               | 105 |
| 2.74 Ortskurve eines D-T <sub>1</sub> -Gliedes                                                             | 106 |
| 2.75 Bode-Diagramm eines D-T <sub>1</sub> -Gliedes                                                         | 107 |
| 2.76 Kennlinienfeld $\dot{V} = f(p_V, H)$                                                                  | 112 |
| 2.77 Sprungantwort eines Thermoelements                                                                    | 113 |
| 2.78 Sprungantwort eines Thermoelements bei einer Änderung der Temperatur von 60°C auf 25°C                | 114 |
| 2.79 Ein- und Ausgangsgrößenverlaufs eines Übertragungsgliedes                                             | 115 |
| 2.80 Ein- und Ausgangsgrößenverlauf eines Übertragungsgliedes                                              | 116 |
| 2.81 Ein- und Ausgangsgrößenverlauf eines Übertragungsgliedes                                              | 118 |
| 2.82 Amplituden- und Phasengang eines P-T <sub>1</sub> -Gliedes                                            | 119 |
| 2.83 Vorwärtsglied und Rückführglied                                                                       | 121 |
| 2.84 Wirkungsplan eines Regelkreises                                                                       | 122 |
| 2.85 Kennlinienfeld $\dot{V} = f(p_V, H)$ - Lösung                                                         | 123 |
| 2.86 Kennlinienfeld $\dot{V} = f(p_V, H=20\text{ mm})$                                                     | 125 |
| 2.87 Lösung-Sprungantwort eines Thermoelements                                                             | 126 |
| 2.88 Sprungantwort eines Thermoelements bei einer Änderung der Temperatur von 60°C auf 25°C                | 127 |
| 2.89 Ausgangsgröße eines Übertragungsgliedes                                                               | 128 |
| 2.90 Ausgangsgrößenverlauf des D-Gliedes                                                                   | 130 |
| 2.91 Ein- und Ausgangsgrößenverlauf eines P-T <sub>1</sub> -Gliedes                                        | 131 |
| 2.92 Amplituden- und Phasengang eines P-T <sub>1</sub> -Gliedes                                            | 133 |
| 2.93 Gemessene und angezeigte Temperatur bei 100Hz                                                         | 136 |
| 2.94 Gemessene und angezeigte Temperatur                                                                   | 137 |
| 2.95 Ortskurve eines Temperaturfühlers                                                                     | 138 |
| 2.96 Amplituden- und Phasengang eines P-T <sub>1</sub> -Gliedes                                            | 139 |
| 2.97 Amplituden- und Phasengang eines P-T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub> -Gliedes                            | 141 |
| 2.98 Ortskurve des P-T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub> -Gliedes                                               | 142 |
| 2.99 Übertragungsverhalten des Regelkreises                                                                | 143 |
| 2.100 Bestimmung des Gesamtfrequenzgangs                                                                   | 144 |
| 3.1 Wirkungsplan eines Regelkreises                                                                        | 145 |
| 3.2 Kennlinienfeld eines gasbeheizten Ofens                                                                | 147 |
| 3.3 Sprungantwort der P-Strecke                                                                            | 148 |
| 3.4 Sprungantwort der P-T <sub>1</sub> -Strecke                                                            | 149 |
| 3.5 Sprungantwort der T <sub>1</sub> -Strecke                                                              | 151 |
| 3.6 Wirkungsplan der P-T <sub>1</sub> T <sub>1</sub> -Strecke                                              | 151 |

|      |                                                                                                                       |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7  | Sprungantwort der $P-T_1T_1$ -Strecke . . . . .                                                                       | 152 |
| 3.8  | Wirkungsplan einer nicht schwingungsfähigen $P-T_k$ -Strecke . . . . .                                                | 152 |
| 3.9  | Sprungantworten von $P-T_k$ -Strecken . . . . .                                                                       | 153 |
| 3.10 | Bestimmung von $T_e$ und $T_b$ aus der Sprungantwort . . . . .                                                        | 154 |
| 3.11 | Sprungantwort einer I-Strecke . . . . .                                                                               | 156 |
| 3.12 | Wirkungsplan der $I-T_1$ -Strecke . . . . .                                                                           | 157 |
| 3.13 | Sprungantwort der $I-T_1$ -Strecke . . . . .                                                                          | 157 |
| 3.14 | Wirkungsplan einer $I-T_2$ -Strecke . . . . .                                                                         | 158 |
| 3.15 | Sprungantworten von $I-T_2$ -Strecken . . . . .                                                                       | 158 |
| 3.16 | Ermittlung der Verzugszeit $T_e$ . . . . .                                                                            | 159 |
| 3.17 | Raumtemperatur-Kennlinie . . . . .                                                                                    | 160 |
| 3.18 | Sprungantwort einer Raumtemperatur . . . . .                                                                          | 161 |
| 3.19 | Sprungantworten von Strecken höherer Ordnung . . . . .                                                                | 162 |
| 3.20 | Linearisierung einer Kennlinie . . . . .                                                                              | 164 |
| 3.21 | Bestimmung von Streckenkennwerten . . . . .                                                                           | 166 |
| 3.22 | Wirkungsplan einer Wasserstandsregelung . . . . .                                                                     | 167 |
| 3.23 | Wirkungsplan einer Zulufttemperaturregelung . . . . .                                                                 | 168 |
| 3.24 | Ortskurve eines Frequenzganges . . . . .                                                                              | 170 |
| 4.1  | Einteilung von Reglern . . . . .                                                                                      | 171 |
| 4.2  | Kennlinie eines Thermostaten . . . . .                                                                                | 173 |
| 4.3  | Verschiebung des Proportionalbereiches mit Hilfe des Sollwerteinstellers . . . . .                                    | 174 |
| 4.4  | Lage des Sollwertes in der Mitte des Proportionalbereiches . . . . .                                                  | 175 |
| 4.5  | Optimale Lage des Sollwertes bei nicht vollständig genutztem Stellbereich . . . . .                                   | 175 |
| 4.6  | Regelgrößenverlauf nach einer Störgrößenänderung (Sollwert liegt in der Mitte des Proportionalbereiches) . . . . .    | 176 |
| 4.7  | Regelgrößenverlauf nach einer Störgrößenänderung (Sollwert liegt am rechten Rand des Proportionalbereiches) . . . . . | 177 |
| 4.8  | Änderung des Proportionalbereichs bei verschiedenen Lagen des Sollwertes . . . . .                                    | 178 |
| 4.9  | Blockdarstellung der P-Regler . . . . .                                                                               | 178 |
| 4.10 | Schematische Darstellung einer Temperaturregelung mit I-Regler . . . . .                                              | 179 |
| 4.11 | Wirkungsplan des I-Reglers . . . . .                                                                                  | 180 |
| 4.12 | Kennlinie des I-Reglers . . . . .                                                                                     | 180 |
| 4.13 | Sprungantworten der I-Regeleinrichtung . . . . .                                                                      | 181 |
| 4.14 | Störsprungantwort eines Regelkreises mit I-Regler . . . . .                                                           | 182 |
| 4.15 | Wirkungsplan eines PI-Reglers . . . . .                                                                               | 183 |
| 4.16 | Sprungantwort des PI-Reglers . . . . .                                                                                | 184 |
| 4.17 | Blocksymbol des PI-Reglers . . . . .                                                                                  | 184 |
| 4.18 | Wirkungsplan eines PD-Reglers . . . . .                                                                               | 185 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.19 Sprungantwort des PD-Reglers . . . . .                                             | 186 |
| 4.20 Anstiegsantwort des PD-Reglers . . . . .                                           | 187 |
| 4.21 Wirkungsplan der PID-Regeleinrichtung . . . . .                                    | 188 |
| 4.22 Sprungantwort der PID-Regeleinrichtung . . . . .                                   | 189 |
| 4.23 Blocksymbol eines PID-Reglers . . . . .                                            | 190 |
| 4.24 Wasserstandsregelung . . . . .                                                     | 191 |
| 4.25 Sprungantwort eines PI-Temperaturreglers . . . . .                                 | 193 |
| 4.26 Kennlinie des Wasserstandsregelung . . . . .                                       | 194 |
| 4.27 Kennlinie der Raumtemperaturregelung . . . . .                                     | 197 |
| 4.28 Kennlinie der Raumtemperaturregelung bei 18 °C . . . . .                           | 198 |
| 4.29 Kennlinie der Raumtemperaturregelung bei 60 % Ventilhub . . . . .                  | 199 |
| 4.30 Kennlinie der Raumtemperaturregelung bei $X_p = 4 \text{ K}$ . . . . .             | 200 |
| 4.31 Ermittlung der Reglerkennwerte . . . . .                                           | 201 |
| 5.1 Entwurf eines Wirkungsplanes einer reibungsbehafteten Antriebswelle . . . . .       | 206 |
| 5.2 Wirkungsplan einer reibungsbehafteten Antriebswelle . . . . .                       | 207 |
| 5.3 Vereinfachter Wirkungsplan einer reibungsbehafteten Antriebswelle . . . . .         | 208 |
| 5.4 Wirkungsplan einer Antriebswelle mit Reibung . . . . .                              | 208 |
| 5.5 Motor und Bremse (elastisch gekoppelt) . . . . .                                    | 209 |
| 5.6 Wirkungsplan des Systems Motor und Bremse (elastisch gekoppelt) . . . . .           | 210 |
| 5.7 Wirkungsplan eines linearen, elastisch gekoppelten Zweimassenschwingers . . . . .   | 210 |
| 5.8 Wirkungsplan eines lagegeregelten Gleichstromservoantriebes . . . . .               | 212 |
| 5.9 Mitteldruckkennfeld . . . . .                                                       | 214 |
| 5.10 Wirkungsplan eines drehzahlgeregelten Dieselmotors . . . . .                       | 214 |
| 5.11 Wirkungsplan eines drehzahlgeregelten Dieselmotors (lineare Dynamik) . . . . .     | 215 |
| 5.12 Fahrzeug und Anhänger mit Auflaufbremse . . . . .                                  | 216 |
| 5.13 Hinweis zum Wirkungsplan eines Fahrzeuges und Anhänger mit Auflaufbremse . . . . . | 216 |
| 5.14 Wirkungsplan eines Fahrzeuges und Anhänger mit Auflaufbremse . . . . .             | 217 |
| 6.1 Wirkungsplan eines Regelkreises . . . . .                                           | 220 |
| 6.2 Führungs- und Störsprungantwort eines idealen Regelkreises . . . . .                | 221 |
| 6.3 Führungs- und Störsprungantwort eines realen Regelkreises . . . . .                 | 222 |
| 6.4 Änderung der bleibenden Sollwertabweichung . . . . .                                | 222 |
| 6.5 Störsprungantwort eines Regelkreises mit P-Regler . . . . .                         | 223 |
| 6.6 Aufgeschnittener Regelkreis . . . . .                                               | 224 |
| 6.7 Führungssprungantwort eines Regelkreises mit P-Regler . . . . .                     | 225 |
| 6.8 Wirkungsplan eines Regelkreises mit P-Regler und I- $T_n$ -Strecke . . . . .        | 225 |
| 6.9 Störsprungantwort eines Regelkreises mit P-Regler und I- $T_n$ -Strecke . . . . .   | 226 |
| 6.10 Schüttgutregelung . . . . .                                                        | 227 |

|      |                                                                                                                                                |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.11 | Wirkungsplan eines Regelkreises mit Totzeitstrecke . . . . .                                                                                   | 228 |
| 6.12 | Störsprungantwort eines Regelkreises mit Totzeit (Stabilitätsgrenzfall) . . . . .                                                              | 229 |
| 6.13 | Störsprungantwort eines Regelkreises mit Totzeit (Instabilität) . . . . .                                                                      | 230 |
| 6.14 | Wirkungsplan eines Regelkreises mit I-Regler und Totzeitstrecke . . . . .                                                                      | 231 |
| 6.15 | Störsprungantwort eines Regelkreises mit I-Regler und Totzeitstrecke . . . . .                                                                 | 232 |
| 6.16 | Wirkungsplan eines Regelkreises mit P-Regler und $P-T_1 T_1$ -Strecke . . . . .                                                                | 233 |
| 6.17 | Kreisverstärkung als Funktion des Schwierigkeitsgrades . . . . .                                                                               | 234 |
| 6.18 | Führungssprungantwort eines Regelkreises . . . . .                                                                                             | 236 |
| 6.19 | Störsprungantwort eines Regelkreises . . . . .                                                                                                 | 237 |
| 6.20 | Führungs- und Störsprungantwort mit schwingendem Regelgrößenverlauf . . . .                                                                    | 240 |
| 6.21 | Führungs- und Störsprungantwort mit aperiodischem Regelgrößenverlauf . . . .                                                                   | 240 |
| 6.22 | Sprungantwort einer Regelstrecke . . . . .                                                                                                     | 241 |
| 6.23 | Regelgrößenverlauf; P-Regler mit unterschiedlichen Proportionalbeiwerten . . .                                                                 | 242 |
| 6.24 | Regelgrößenverlauf; I-Regler mit unterschiedlichen Integrierbeiwerten . . . . .                                                                | 243 |
| 6.25 | Regelgrößenverlauf; Störverhalten; Überspringen; PI-Regler . . . . .                                                                           | 244 |
| 6.26 | Regelgrößenverlauf; Störverhalten mit Überspringen und PID-Regler; Störverhalten mit aperiodischem Regelgrößenverlauf mit PID-Regler . . . . . | 245 |
| 6.27 | Regelgrößenverlauf; Störverhalten mit aperiodischem Regelgrößenverlauf Vergleich P-, PI- und PID-Regler . . . . .                              | 245 |
| 6.28 | Regelgrößenverlauf; Führungsverhalten mit aperiodischem Regelgrößenverlauf Vergleich P-, PI- und PID-Regler . . . . .                          | 246 |
| 6.29 | Regelgrößenverlauf; Führungsverhalten mit Überspringen; Vergleich P-, PI- und PID-Regler . . . . .                                             | 247 |
| 6.30 | Störsprungantwort des Regelkreises mit PI- und PID-Regler . . . . .                                                                            | 250 |
| 6.31 | Kennlinie des P-Reglers mit Drehpunkt $y_0 = 40\%$ und $y_0 = 80\%$ . . . . .                                                                  | 254 |
| 6.32 | Störsprungantwort des Regelkreises mit P-Regler . . . . .                                                                                      | 255 |
| 6.33 | Störsprungantwort des Regelkreises mit PI- und PID-Regler . . . . .                                                                            | 255 |
| 7.1  | Monotone und oszillatorische Instabilität . . . . .                                                                                            | 257 |
| 7.2  | Sprungantworten eines $P-T_2$ -Gliedes . . . . .                                                                                               | 261 |
| 7.3  | Wurzeln der charakteristischen Gleichung in der komplexen Zahlenebene . . . .                                                                  | 263 |
| 7.4  | Wirkungsplan eines Regelkreises mit Totzeit . . . . .                                                                                          | 266 |
| 7.5  | Sprungantworten des Regelkreises mit Totzeit . . . . .                                                                                         | 267 |
| 7.6  | Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises mit Totzeit . . . . .                                                                             | 269 |
| 7.7  | Wirkungsplan eines Regelkreises mit PID-Regler und $P-T_2$ -Strecke . . . . .                                                                  | 269 |
| 7.8  | Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises mit $P-T_2$ -Strecke . . . . .                                                                    | 270 |
| 7.9  | Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises mit $P-T_2$ -Strecke beim kritischen Punkt -1 . . . . .                                           | 270 |
| 7.10 | Bodediagramm des aufgeschnittenen Regelkreises mit $P-T_2$ -Strecke . . . . .                                                                  | 271 |
| 7.11 | Wirkungsplan eines Regelkreises mit einer $P-T_3$ -Strecke . . . . .                                                                           | 272 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.12 Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises mit P-T <sub>3</sub> -Strecke . . . . .                             | 273 |
| 7.13 Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises mit P-T <sub>3</sub> -Strecke beim kritischen<br>Punkt -1 . . . . . | 273 |
| 7.14 Bodediagramm des aufgeschnittenen Regelkreises mit P-T <sub>3</sub> -Strecke . . . . .                           | 274 |
| 7.15 Amplituden- und Phasenreserve eines stabilen Regelkreises . . . . .                                              | 276 |
| 7.16 Amplituden- und Phasenreserve eines instabilen Regelkreises . . . . .                                            | 277 |
| 7.17 Ortskurvendarstellung der Amplituden- und Phasenreserve . . . . .                                                | 278 |
| 7.18 Ortskurvendarstellung der Amplituden- und Phasenreserve . . . . .                                                | 281 |
| 7.19 Ortskurvendarstellung der Amplituden- und Phasenreserve . . . . .                                                | 283 |
| 7.20 Ortskurvendarstellung der Amplituden- und Phasenreserve . . . . .                                                | 284 |
| 7.21 Ortskurvendarstellung der Amplituden- und Phasenreserve . . . . .                                                | 286 |
| 7.22 Bode-Diagramm . . . . .                                                                                          | 288 |

# Formelzeichen

| Name                                                                | englische Bezeichnung                                        | DIN IEC<br>60050-351-2014-09 | Formelzeichen     |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Abweichung im Beharrungszustand                                     | steady state deviation                                       | 351-45-38                    | $\Delta x_\infty$ |
| Amplitudengang des aufgeschnittenen Regelkreises                    | gain response; amplitude response                            | 351-45-41                    | $ G_0 $           |
| Anfangswert der Eingangsgröße                                       | initial value of the input                                   | 351-45-27                    | $U_0$             |
| Anregelzeit                                                         | control rise time                                            | 351-45-38                    | $T_{cr}$          |
| Anschwingzeit                                                       | step response time                                           | 351-45-27                    | $T_{sr}$          |
| Aufabengröße                                                        |                                                              | 351-44-07                    | $q$               |
| Ausgangsgröße                                                       | output variable                                              | 351-45-27                    | $v$               |
| Ausgleichszeit                                                      | equivalent time constant; balancing time                     | 351-45-34                    | $T_b$             |
| Ausregelzeit                                                        | control settling time                                        | 351-45-38                    | $T_{cs}$          |
| Beharrungszustand - Werte der Regelgröße vor und nach dem Sprung    | steady state values of the controlled variable               | 351-45-38                    | $X_0, X_\infty$   |
| Beharrungszustand - Werte der Sprungantwort vor und nach dem Sprung | steady state values before and after application of the step | 351-45-34                    | $V_0, V_\infty$   |
| Betragsreserve                                                      | gain margin                                                  | 351-45-41                    | $G_m$             |
| Bildvariable der Laplace-Transformation                             | complex variable of the Laplace transform                    | 351-50-02                    | $s$               |
| Dämpfungsgrad                                                       | damping ratio                                                | 351-45-19                    | $\vartheta$       |
| Differenzierbeiwert                                                 | derivative action coefficient                                | 351-50-13                    | $K_D$             |
| Durchtrittskreisfrequenz                                            | gain crossover angular frequency                             | 351-45-41                    | $\omega_c$        |
| Eingangsgröße                                                       | input variable                                               | 351-45-27                    | $u$               |
| Einheits sprungfunktion                                             | unit step function<br>Heavyside function                     | 351-45-21                    | $\varepsilon$     |
| Einschwingzeit                                                      | settling time                                                | 351-45-27                    | $T_s$             |
| Frequenzgang des aufgeschnittenen Regelkreises                      | frequency response                                           | 351-45-41                    | $G_0$             |
| Führungsgröße                                                       | reference value                                              | 351-47-06                    | $w$               |

| Name                                                                   | englische Bezeichnung                                               | DIN IEC           | Formelzeichen         |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Abweichung im Beharrungszustand                                        | steady state deviation                                              | 60050-351-2014-09 |                       |
| Integrierbeiwert<br>I-Beiwert                                          | integral action coefficient                                         | 351-45-38         | $\Delta x_{\infty}$   |
| Integrierzeit                                                          | integral action time                                                | 351-50-09         | $K_I$                 |
| Kreisfrequenz                                                          | angular frequency                                                   | 351-50-10         | $T_I = \frac{1}{K_I}$ |
| Nachstellzeit                                                          | reset time                                                          | 351-45-41         | $\omega$              |
| Phasengang des aufgeschnittenen Regelkreises                           | phase response                                                      | 351-50-11         | $T_n \rightarrow T_i$ |
| Phasenreserve                                                          | phase margin                                                        | 351-45-41         | $\varphi_0$           |
| Phasenschnittkreisfrequenz                                             | phase crossover angular frequency                                   | 351-45-41         | $\varphi_n$           |
| Proportionalbeiwert                                                    | proportional action coefficient                                     | 351-50-11         | $\omega_{\pi}$        |
| Regeldifferenz                                                         | error variable                                                      | 351-44-01         | $K_P$                 |
| Regelfaktor                                                            | control factor                                                      | 351-46-08         | $e$                   |
| Regelgröße                                                             | controlled variable                                                 | 351-45-38         | $R$                   |
| Reglerausgangsgröße                                                    | output variable of the controlling element                          | 351-48-01         | $x$                   |
| Rückführgröße                                                          | feedback variable                                                   | 351-48-02         | $m$                   |
| Sprunghöhe der Eingangsgröße                                           | step height of the input variation                                  | 351-45-27         | $r$                   |
| Sollwert                                                               | desired value                                                       | 351-45-38         | $U_S$                 |
| Stellgröße                                                             | manipulated variable                                                | 351-48-02         | $X_d$                 |
| Störgröße                                                              | disturbance variable                                                | 351-48-02         | $y$                   |
| Toleranzbereich                                                        | specified tolerance limit                                           | 351-45-27         | $z$                   |
| Totzeit                                                                | dead-time                                                           | 351-45-27         | $2 \cdot \Delta v_s$  |
| Transformierte der Ausgangsgröße                                       | output transform                                                    | 351-50-02         | $T_t$                 |
| Transformierte der Eingangsgröße                                       | input transform                                                     | 351-48-02         | $V(s)$                |
| Überschwingweite (größte vorübergehende Abweichung vom Beharrungswert) | overshoot (maximum transient deviation from the steady-state value) | 351-45-27         | $U(s)$                |
| Verzögerungszeit / Zeitkonstante                                       | time constant                                                       | 351-45-38         | $v_m$                 |
| Verzugszeit                                                            | equivalent dead times                                               | 351-50-03         | $T_1$                 |
|                                                                        |                                                                     | 351-45-34         | $T_e$                 |

| Name                            | englische Bezeichnung  | DIN IEC           | Formelzeichen                         |
|---------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Abweichung im Beharrungszustand | steady state deviation | 60050-351-2014-09 |                                       |
| Vorhaltzeit                     | rate time              | 351-45-38         | $\Delta x_{\infty}$                   |
| Vorhaltverstärkung              | derivative action gain | 351-50-16         | $T_v \rightarrow T_D$                 |
| Zeitkonstante, Verzögerungszeit | time constant          | 351-50-18         | $a$                                   |
| Zielgröße                       | command variable       | 351-45-32         | $\tau$                                |
| Zustandsgleichung               | state equation         | 351-44-01         | $c$                                   |
| Zustandsgröße                   | state variable         | 351-41-08         | $\vec{x} = f(\vec{x}(t), \vec{u}(t))$ |
|                                 |                        | 351-41-08         | $x(t)$                                |