

Jan Lunze

Regelungstechnik 1

Systemtheoretische Grundlagen

Analyse und Entwurf

einschleifiger Regelungen

12., neu bearbeitete Auflage

Alle Abbildungen in A4-Vergrößerung

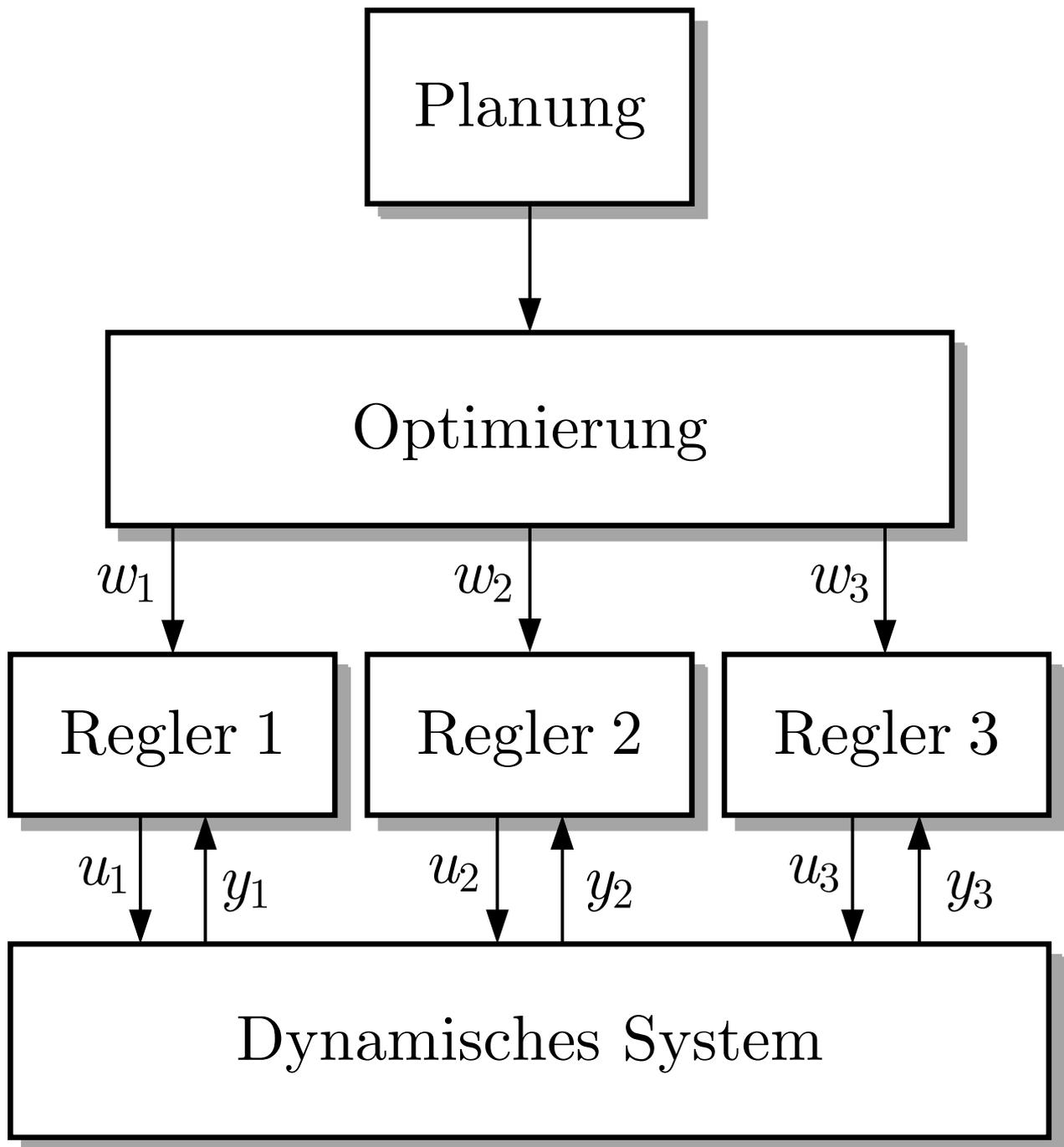


Abb. 1.1: Struktureller Aufbau einer Mehrebenensteuerung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

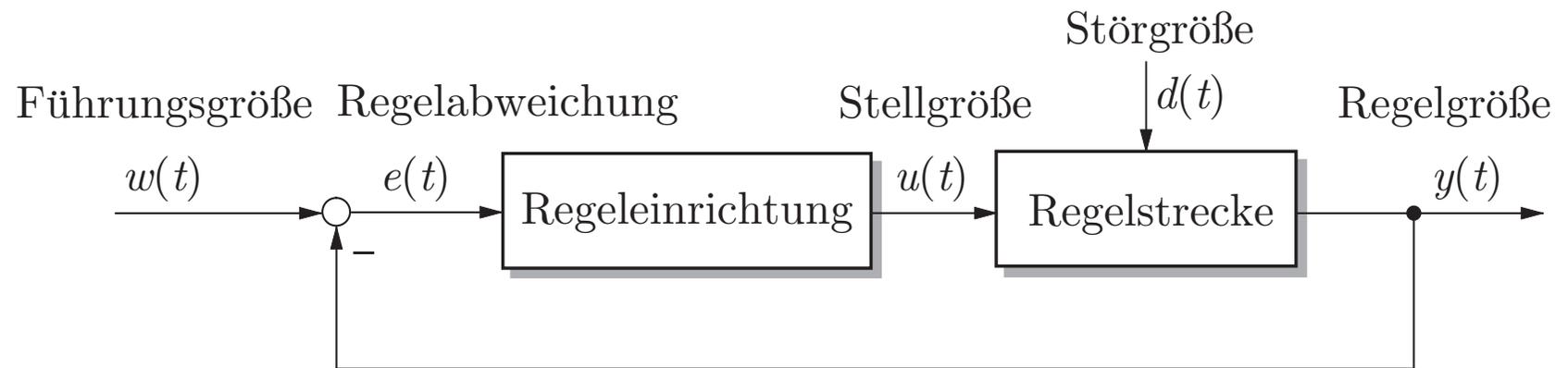


Abb. 1.2. Grundstruktur des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

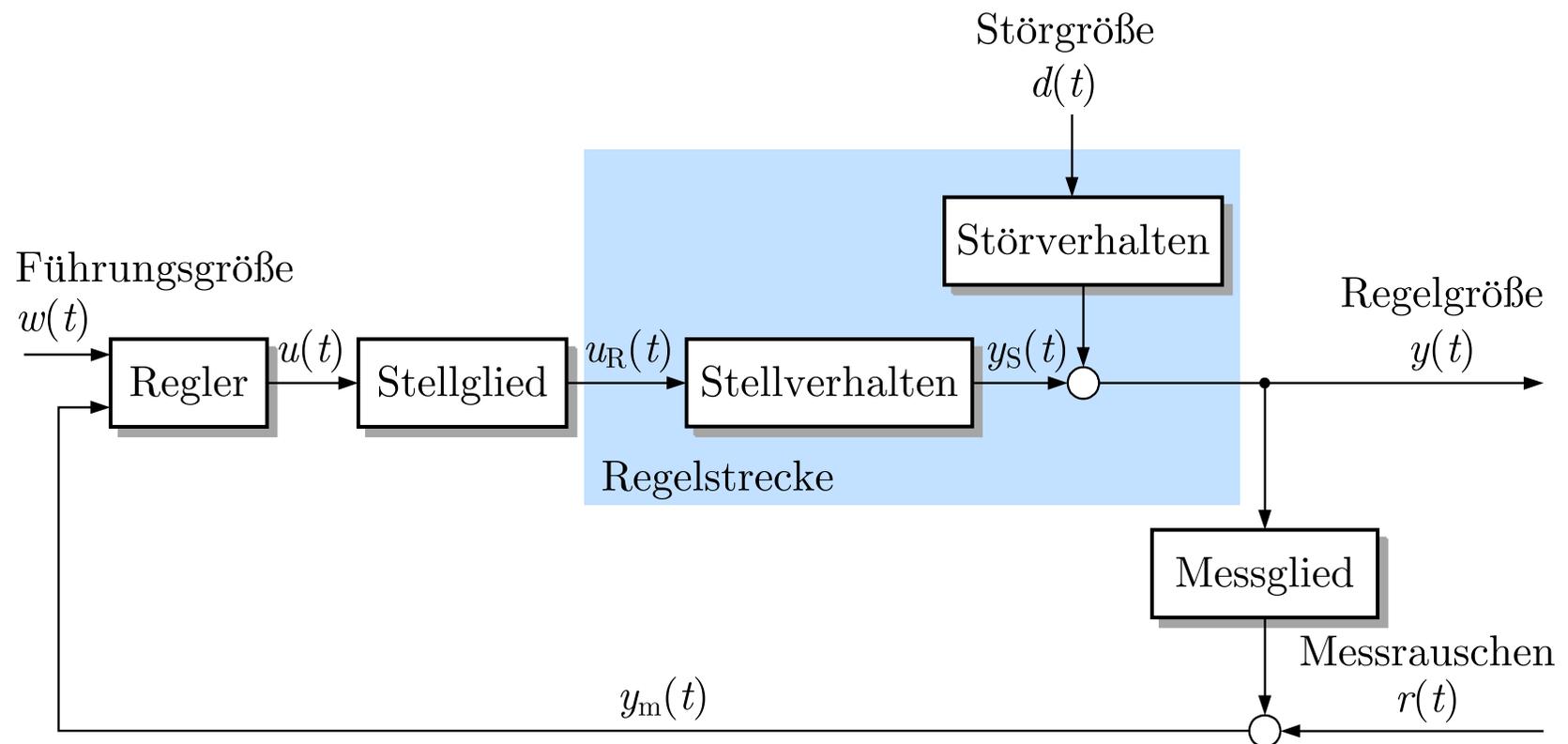


Abb. 1.3. Erweiterte Grundstruktur des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

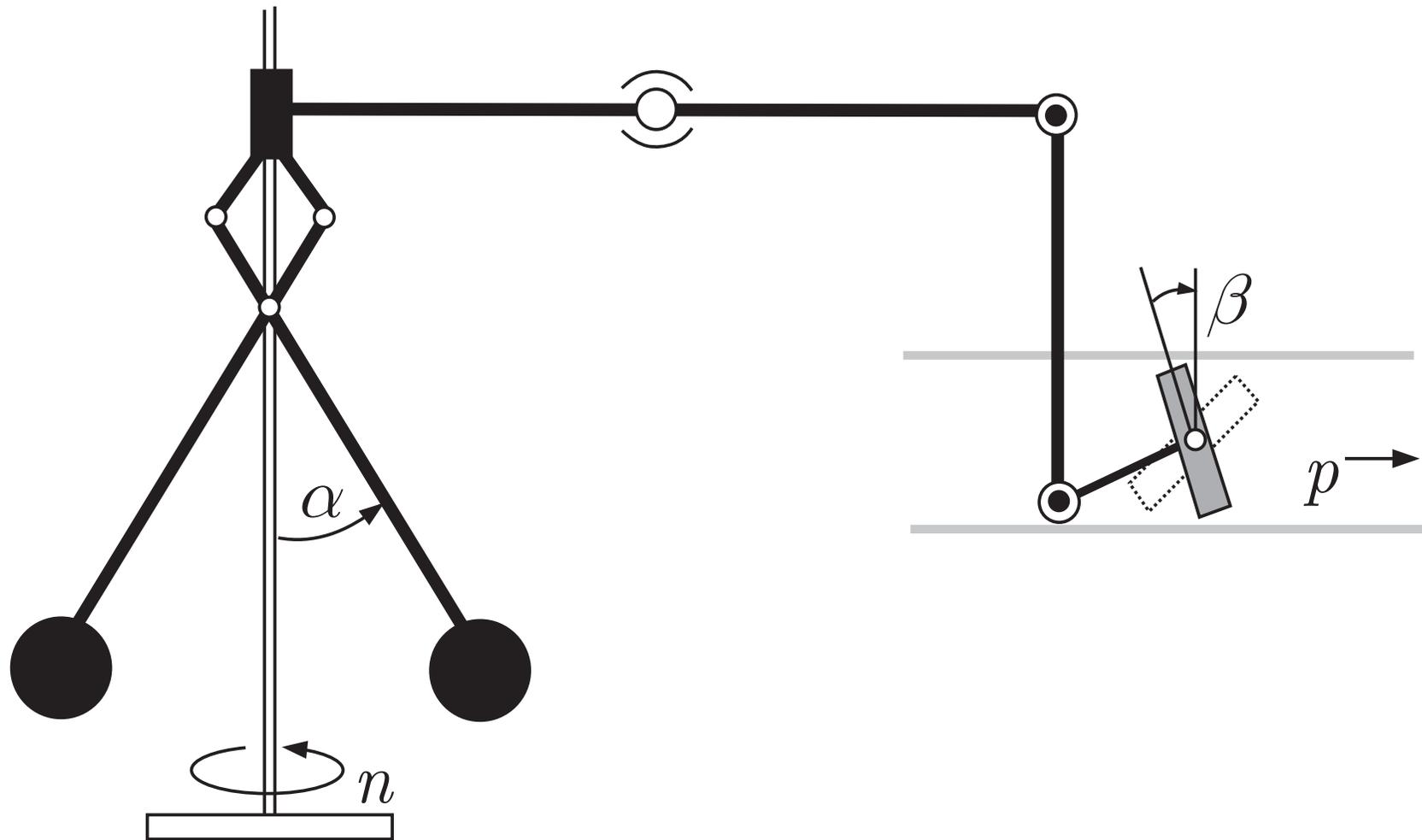


Abb. 1.4. Prinzip des Fliehkraftreglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

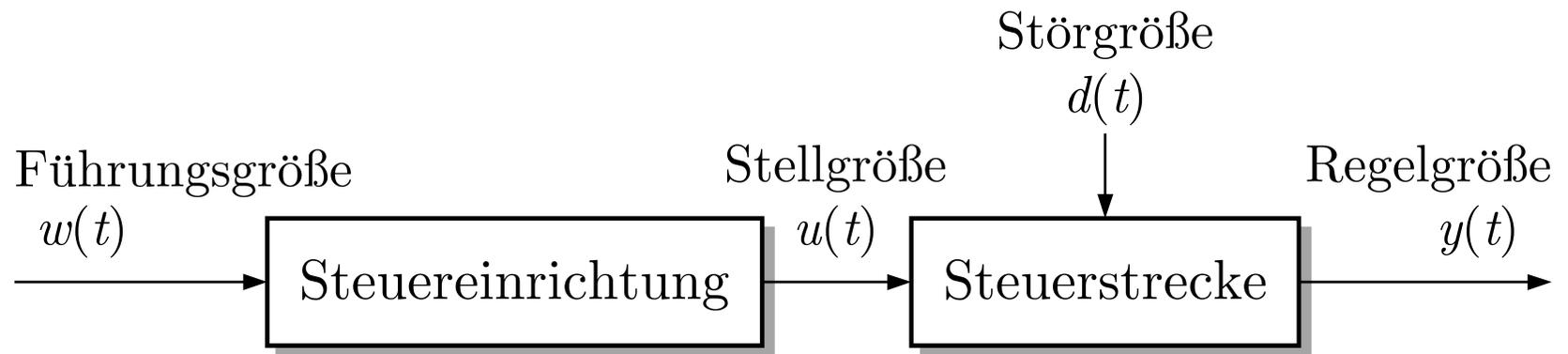
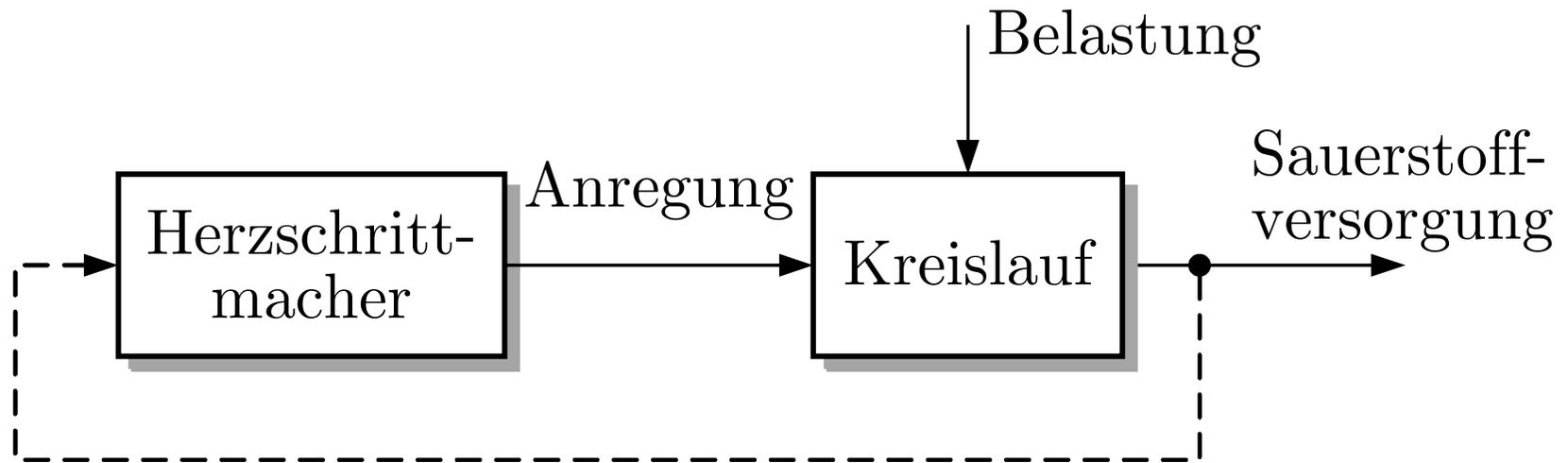


Abb. 1.5. Steuerung in der offenen Wirkungskette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 1.6. Herzschritt-
macher als Steuereinrichtung in einer offenen Wirkungskette**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

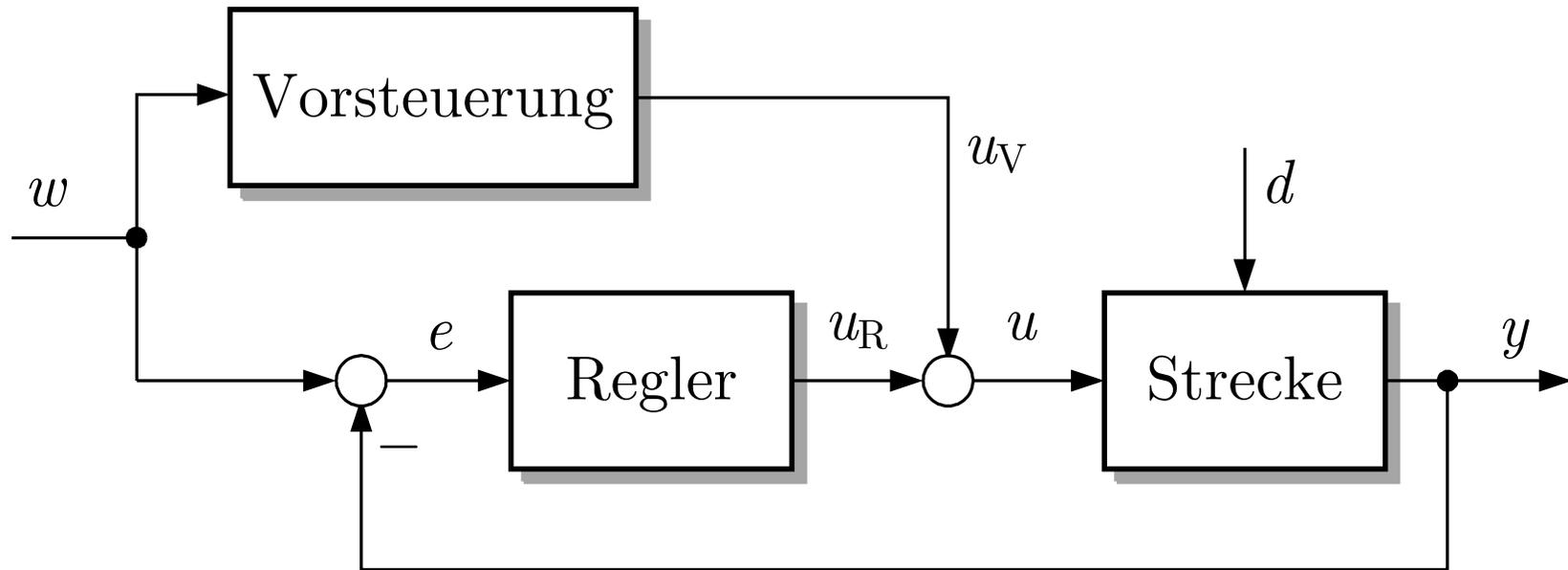


Abb. 1.7. Regelkreis mit zwei Freiheitsgraden

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

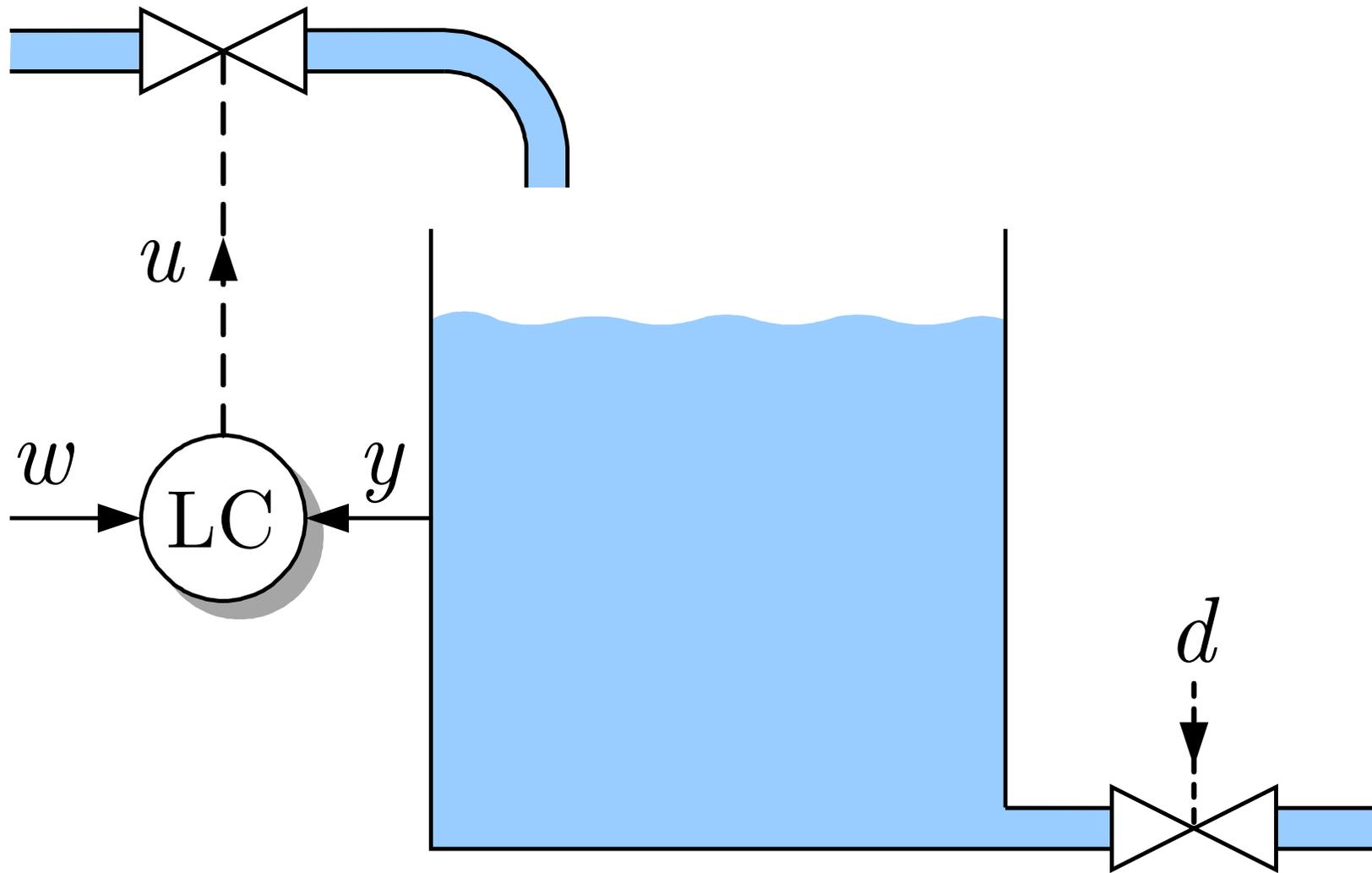


Abb. 1.8. Füllstandsregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

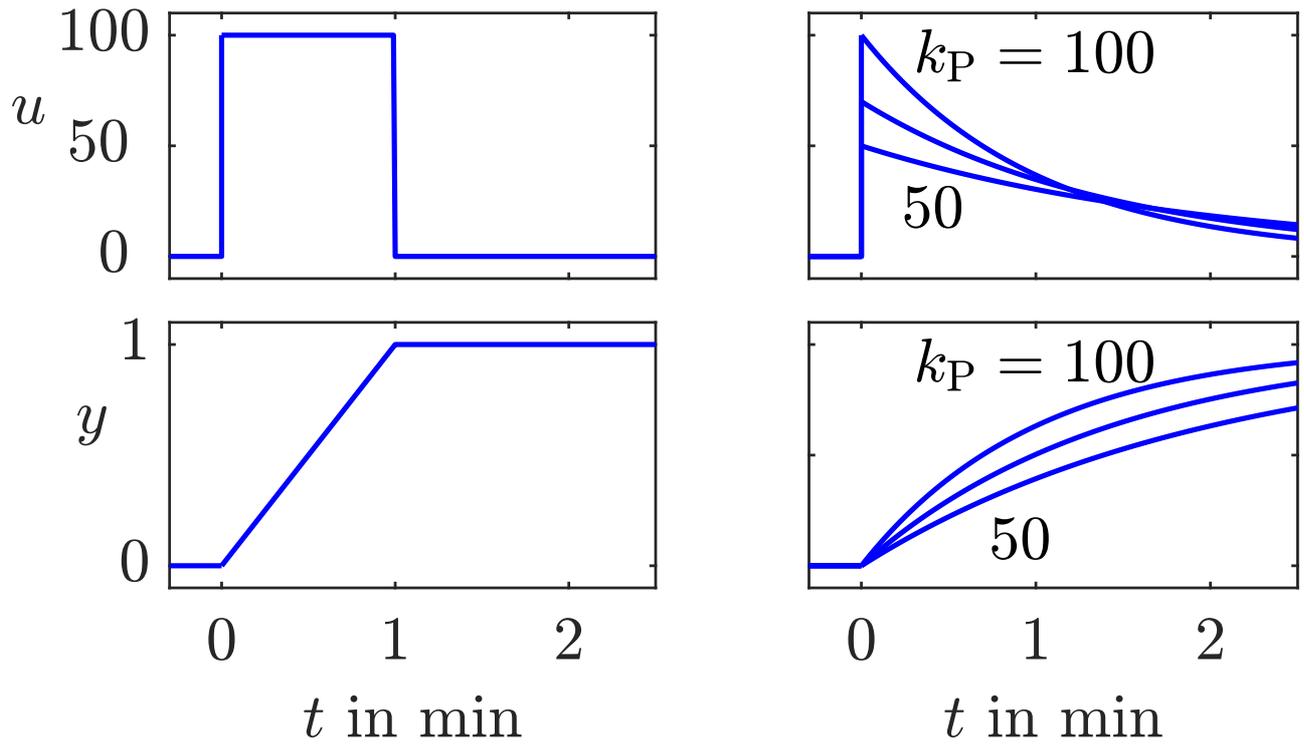


Abb. 1.9: Verhalten des Behälters bei einer Steuerung in der offenen Wirkungskette (links) und einer Regelung (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

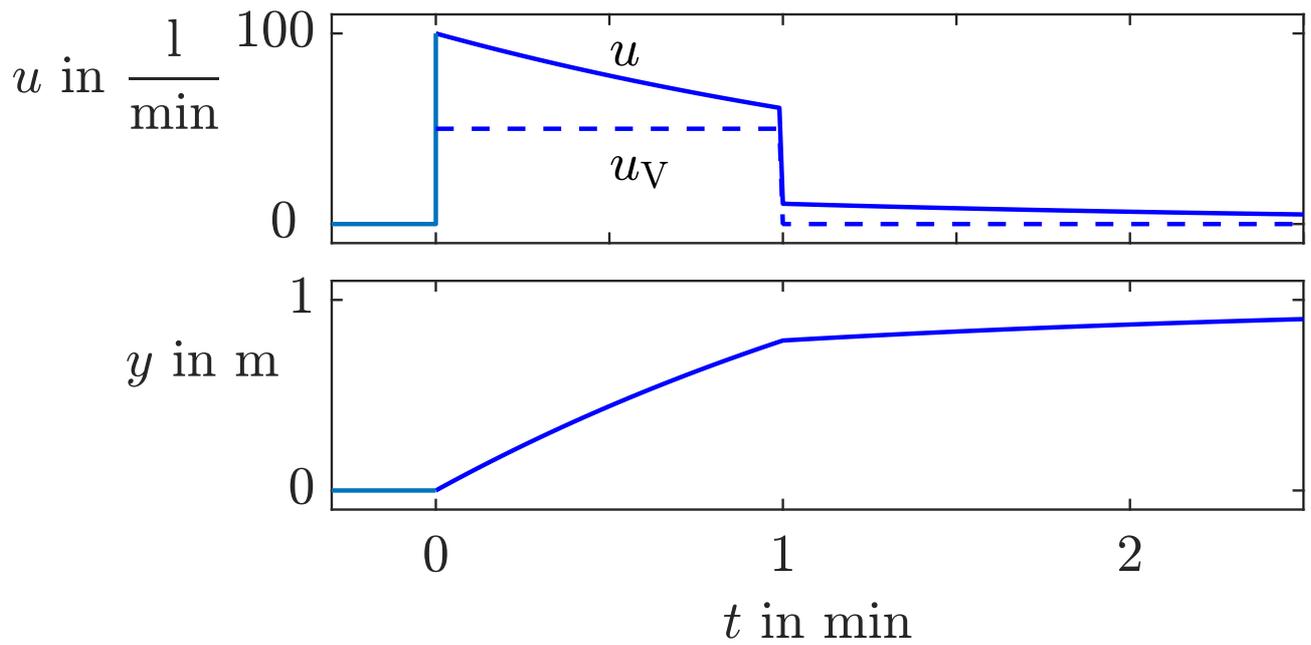


Abb. 1.10: Verhalten des Behälters bei Regelung und Vorsteuerung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

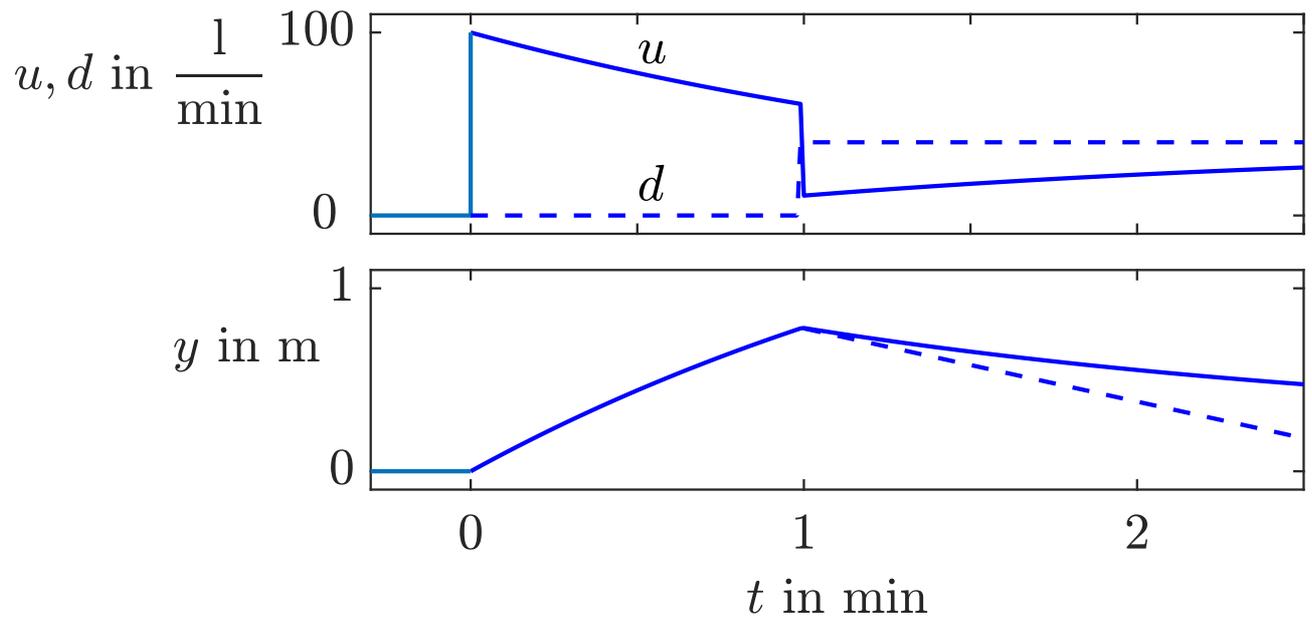


Abb. 1.11: Störverhalten des Behälters

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

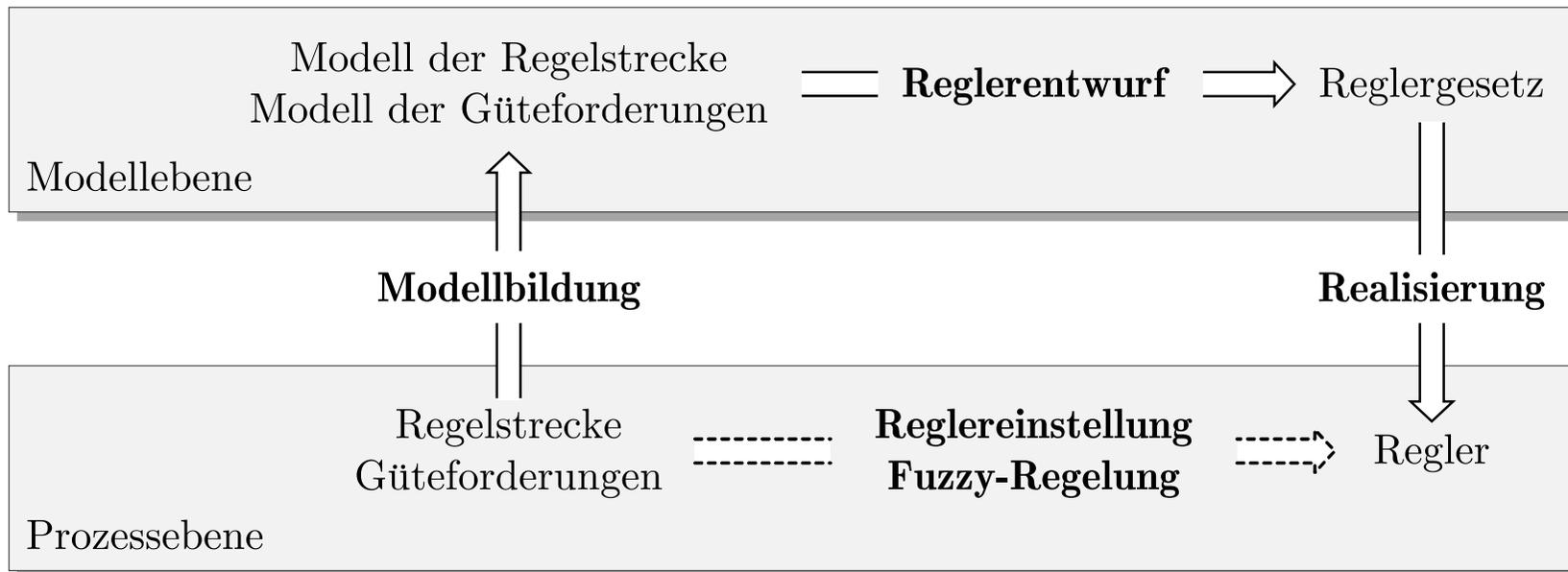


Abb. 1.12. Prinzipieller Lösungsweg für Regelungsaufgaben

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

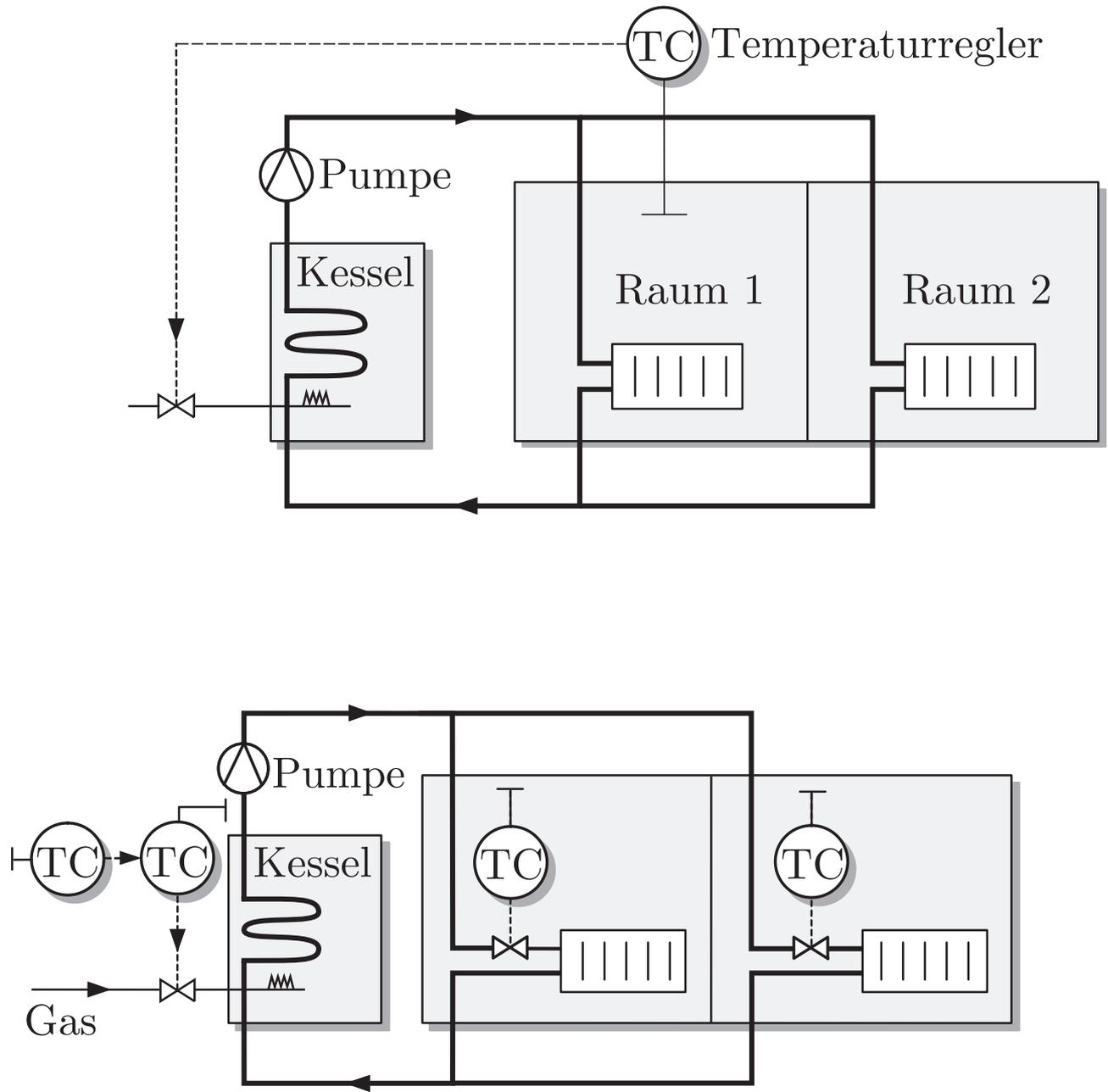


Abb. 2.1: Raumtemperaturregelungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

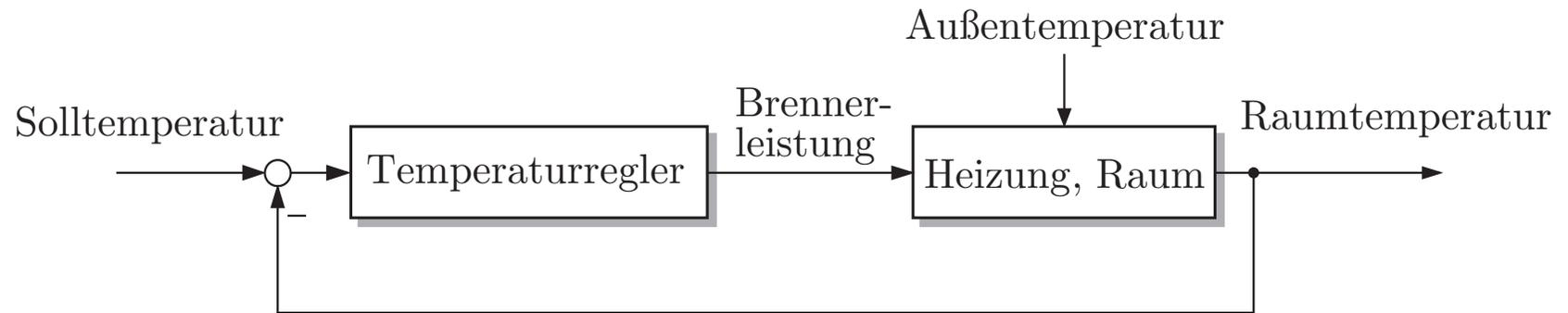


Abb. 2.2. Blockschaltbild der Raumtemperaturregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

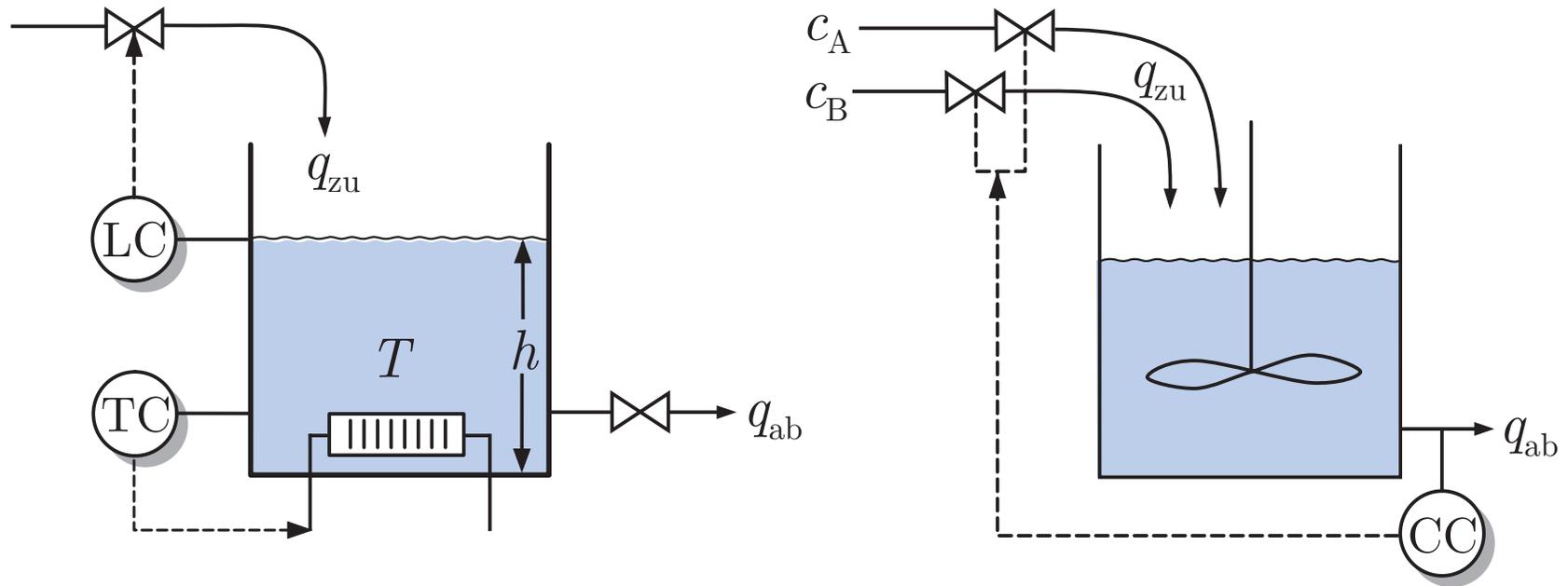


Abb. 2.3. Rührkesselregelungen (LC = Füllstandsregelung; TC = Temperaturregelung; CC = Konzentrationsregelung)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

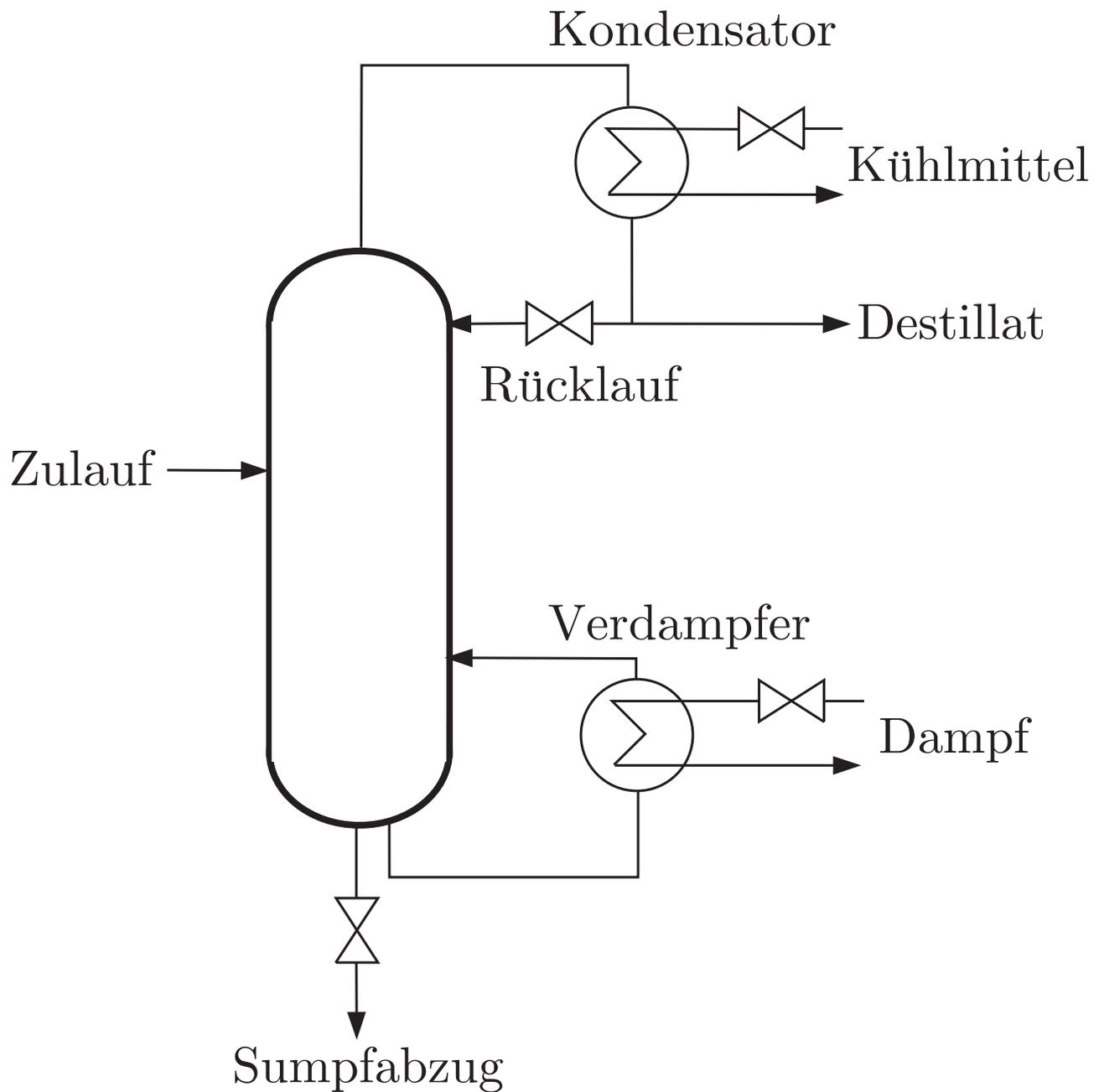


Abb. 2.4: Destillationskolonne

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

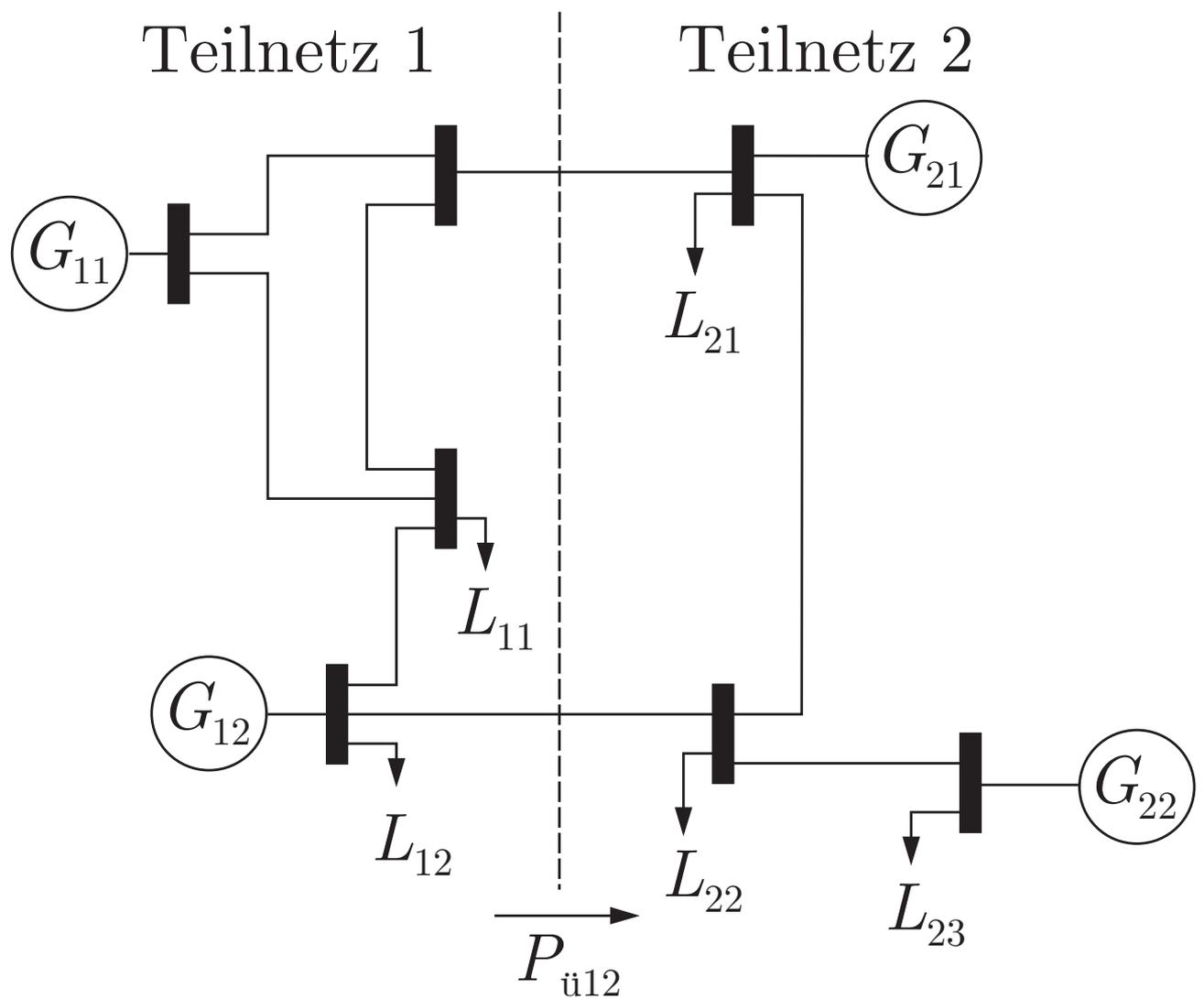
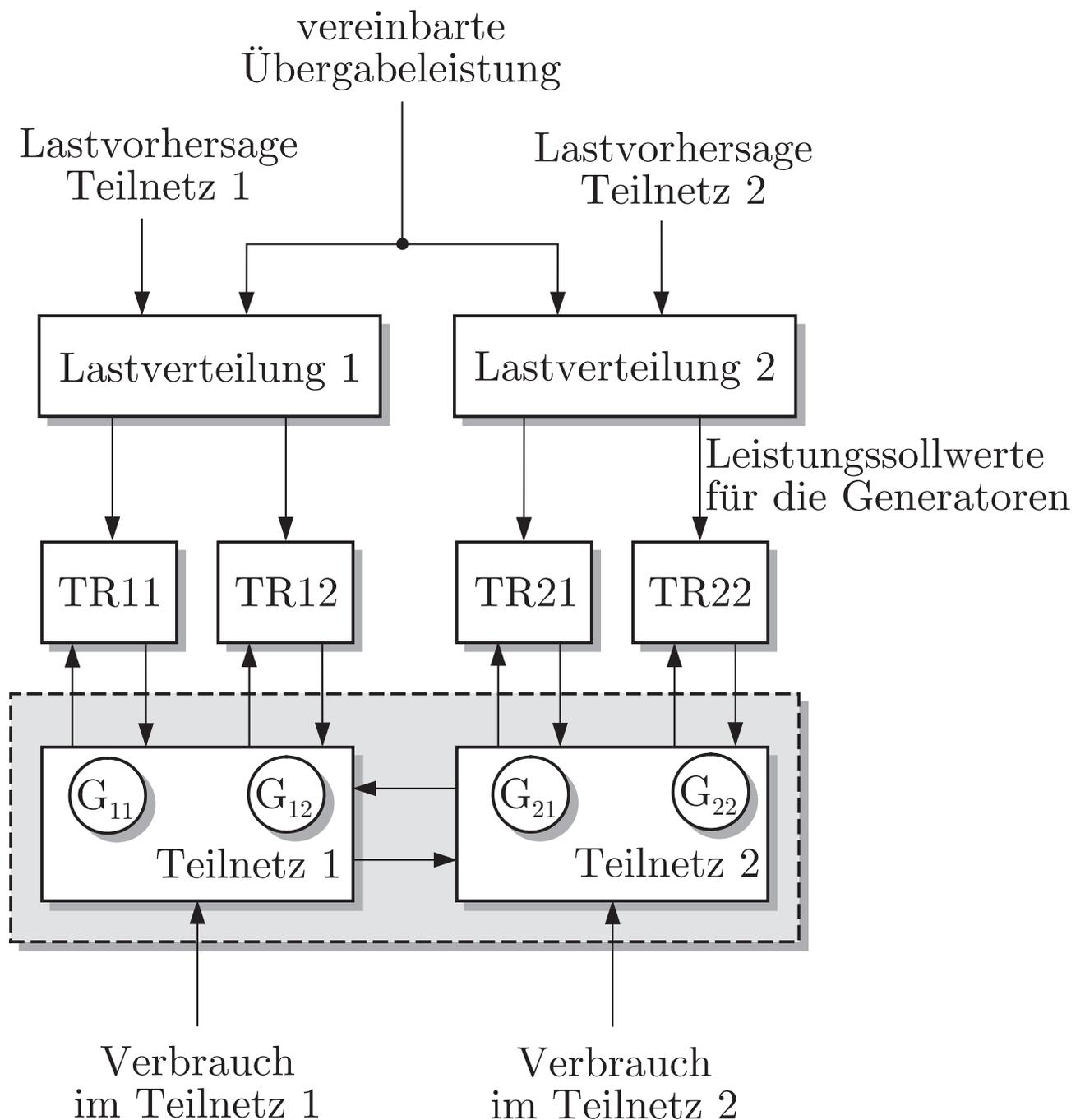


Abb. 2.5: Ein aus zwei Teilnetzen bestehendes Elektroenergieverbundsystem

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 2.6: Steuerung von
Elektroenergieverbundsystemen**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

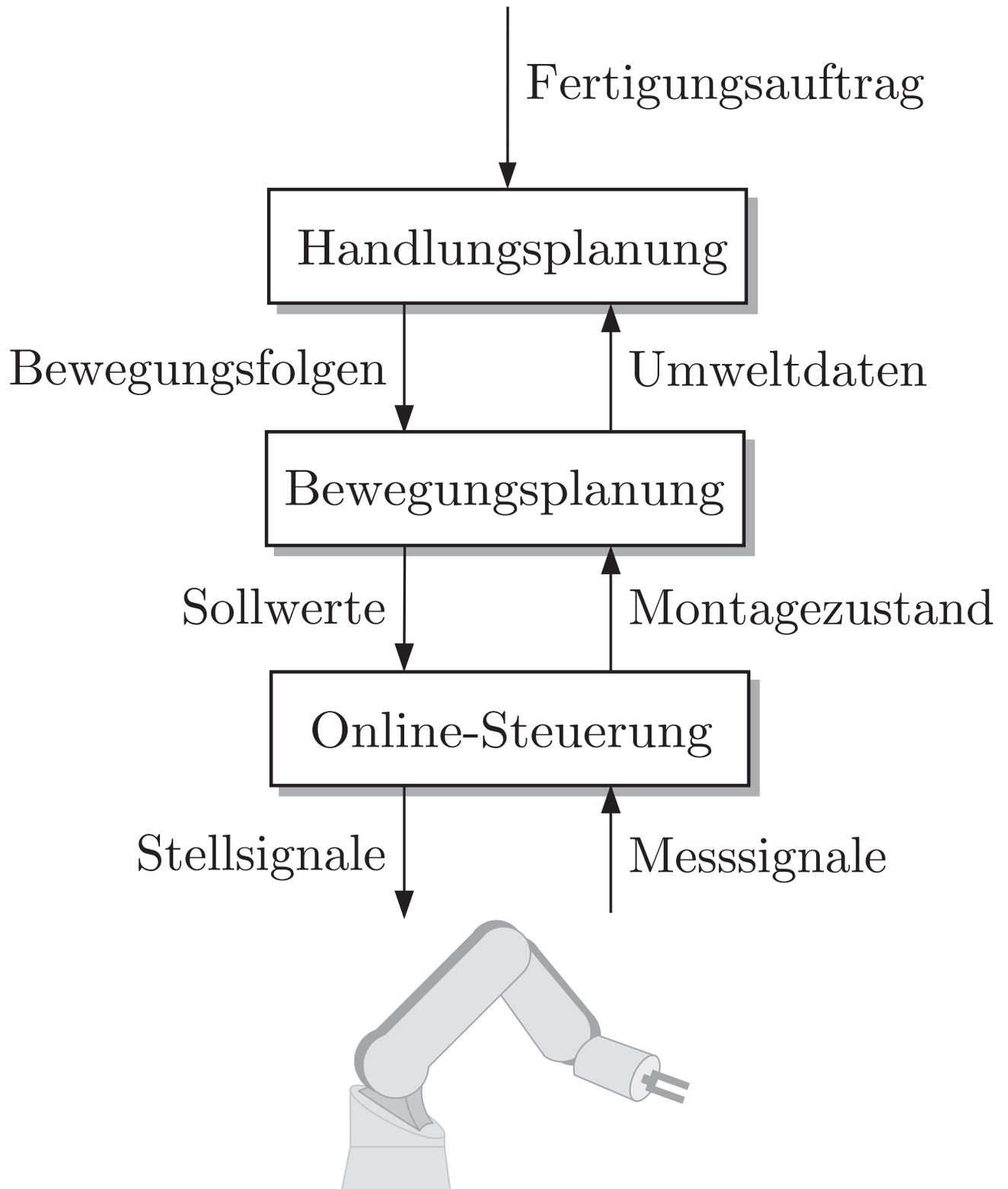


Abb. 2.7: Hierarchische Struktur von Robotersteuerungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

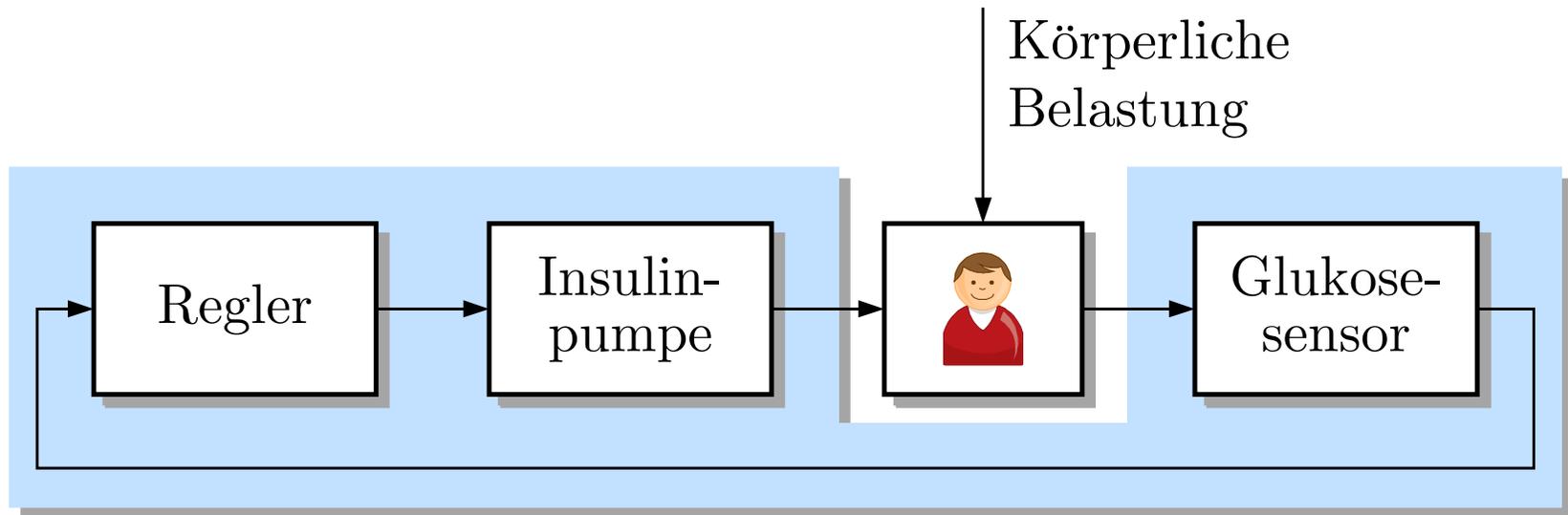


Abb. 2.8. Strukturbild der Blutzuckerregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

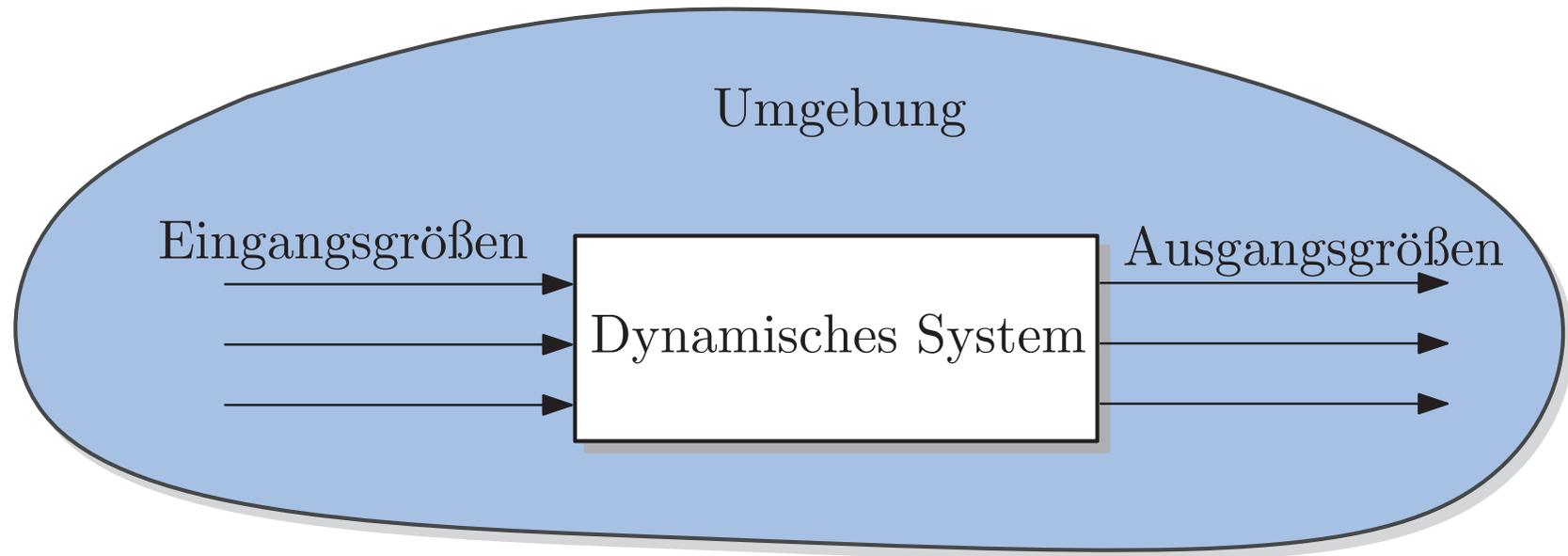


Abb. 3.1. Blockschaltbild eines Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

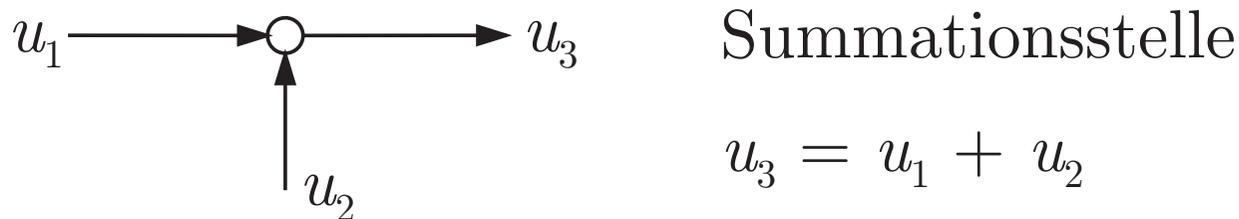
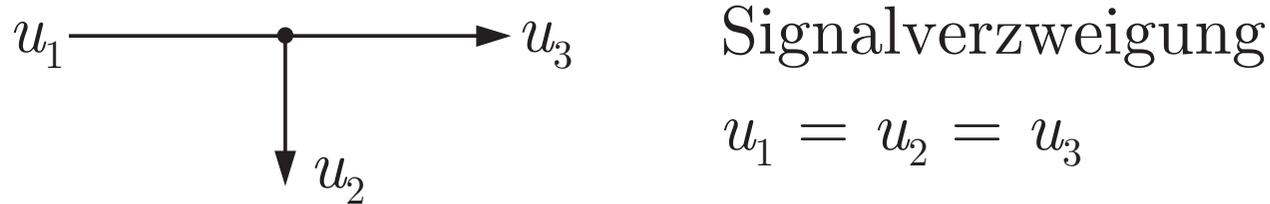


Abb. 3.2. Spezielle Symbole in Blockschaltbildern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

Drehrohrofen

Kühler

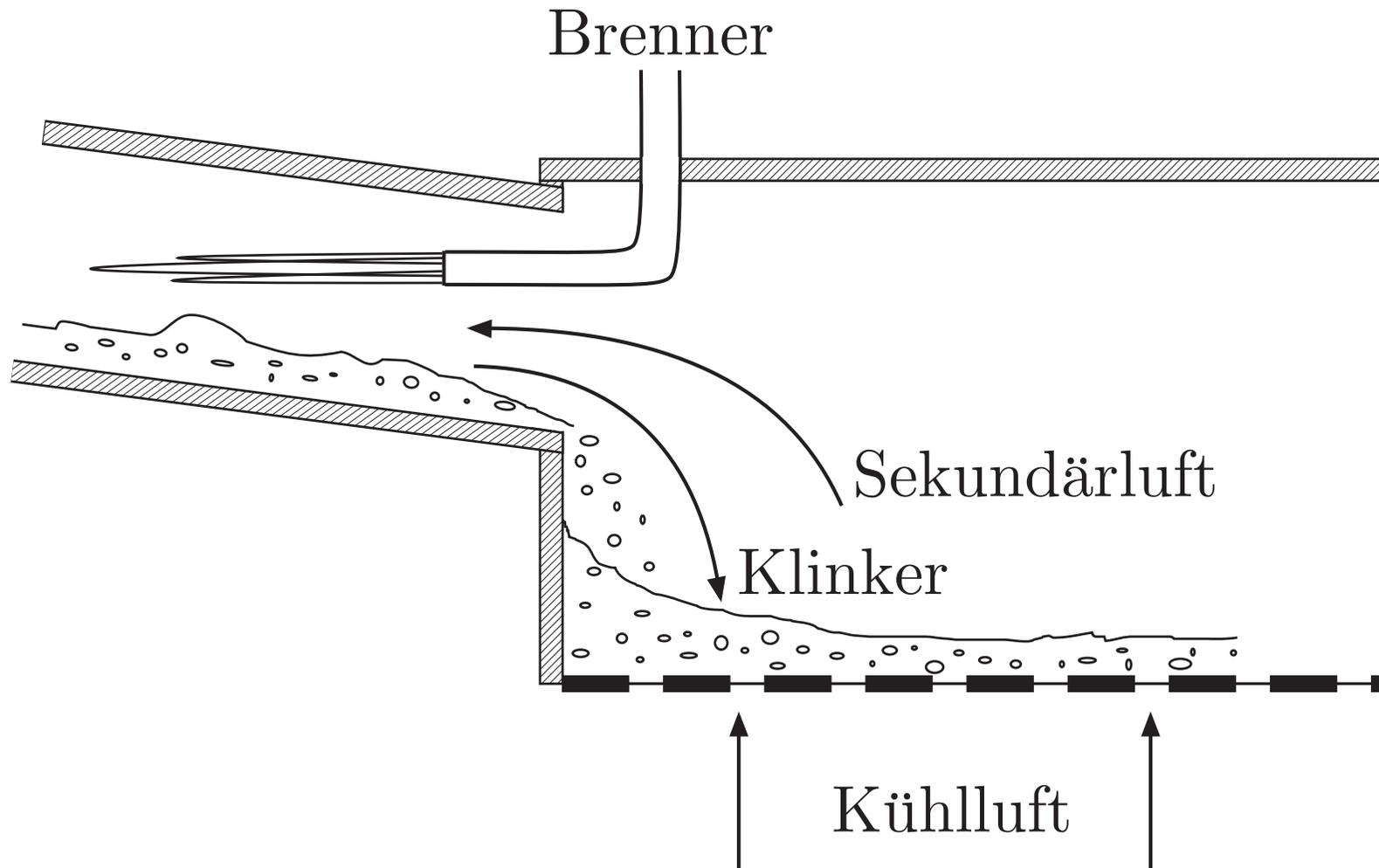


Abb. 3.3. Drehrohrofen und Klinkerkühler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

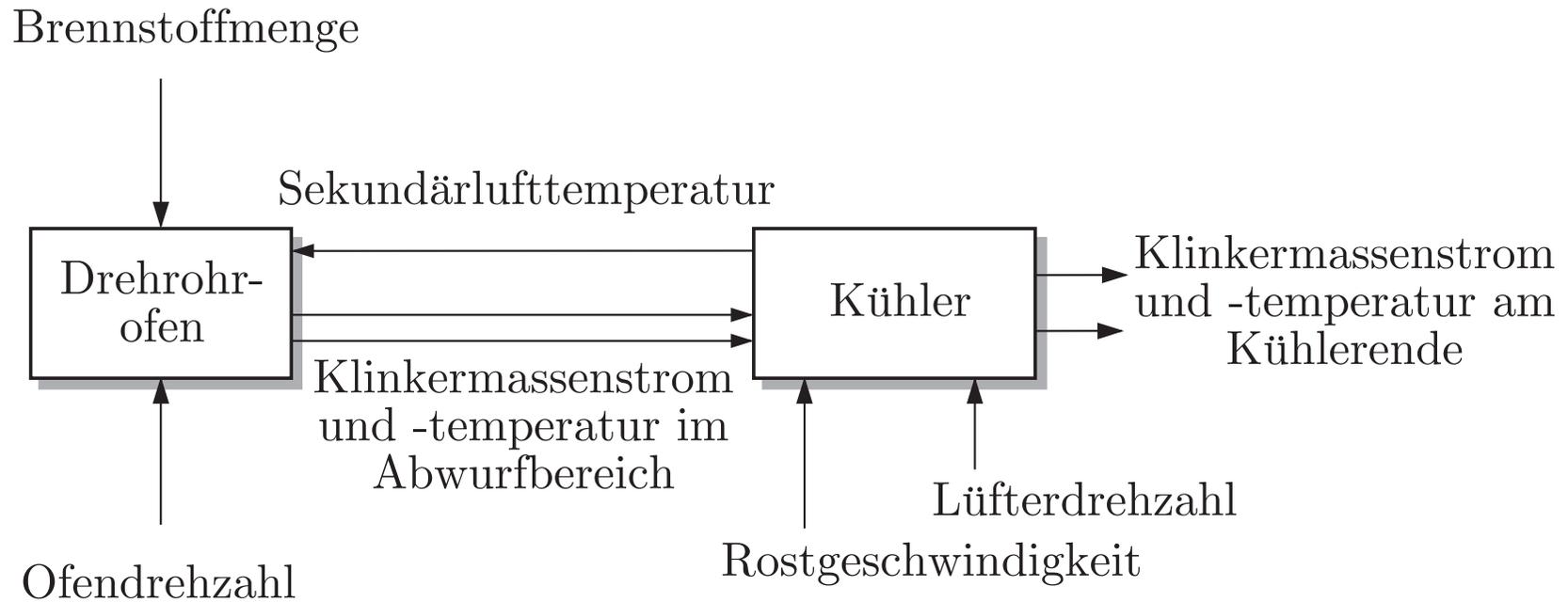


Abb. 3.4. Blockschaltbild zur Beschreibung der dynamischen Wechselwirkungen von Drehrohröfen und Klinkerkühler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

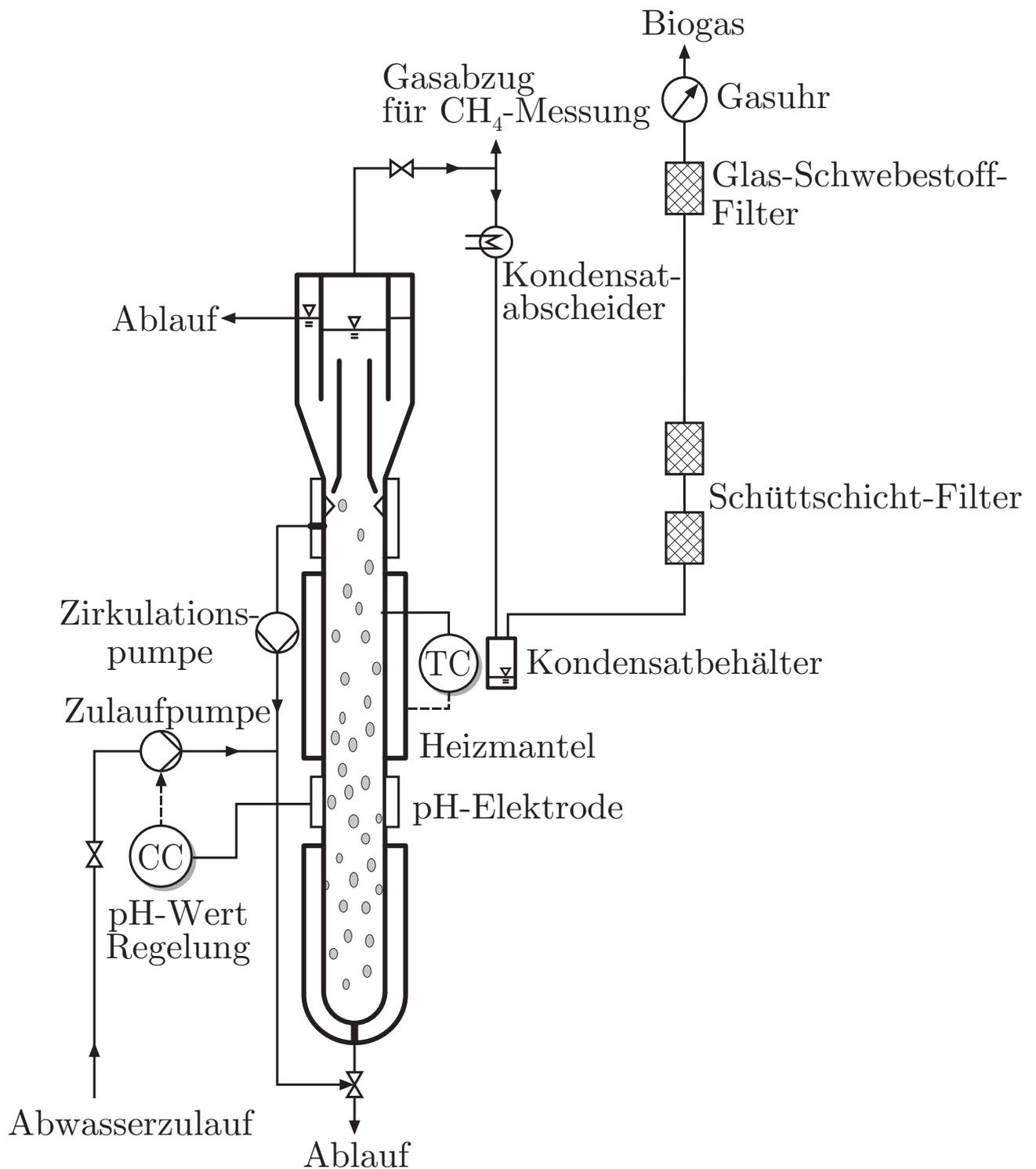


Abb. 3.5: UASB-Reaktor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

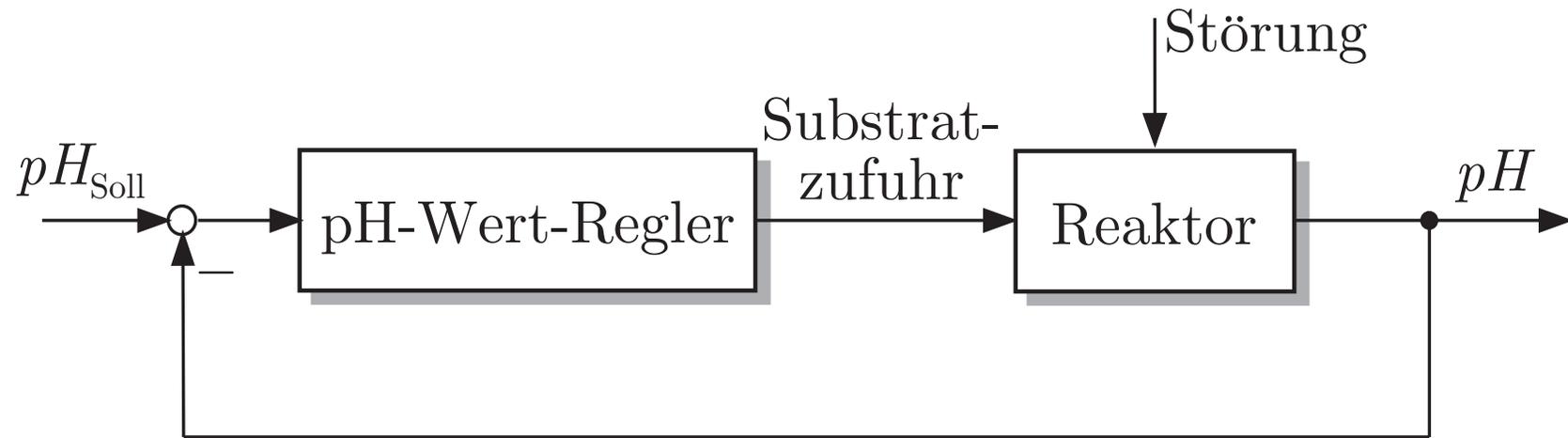


Abb. 3.6. Blockschaltbild der pH-Wert-Regelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

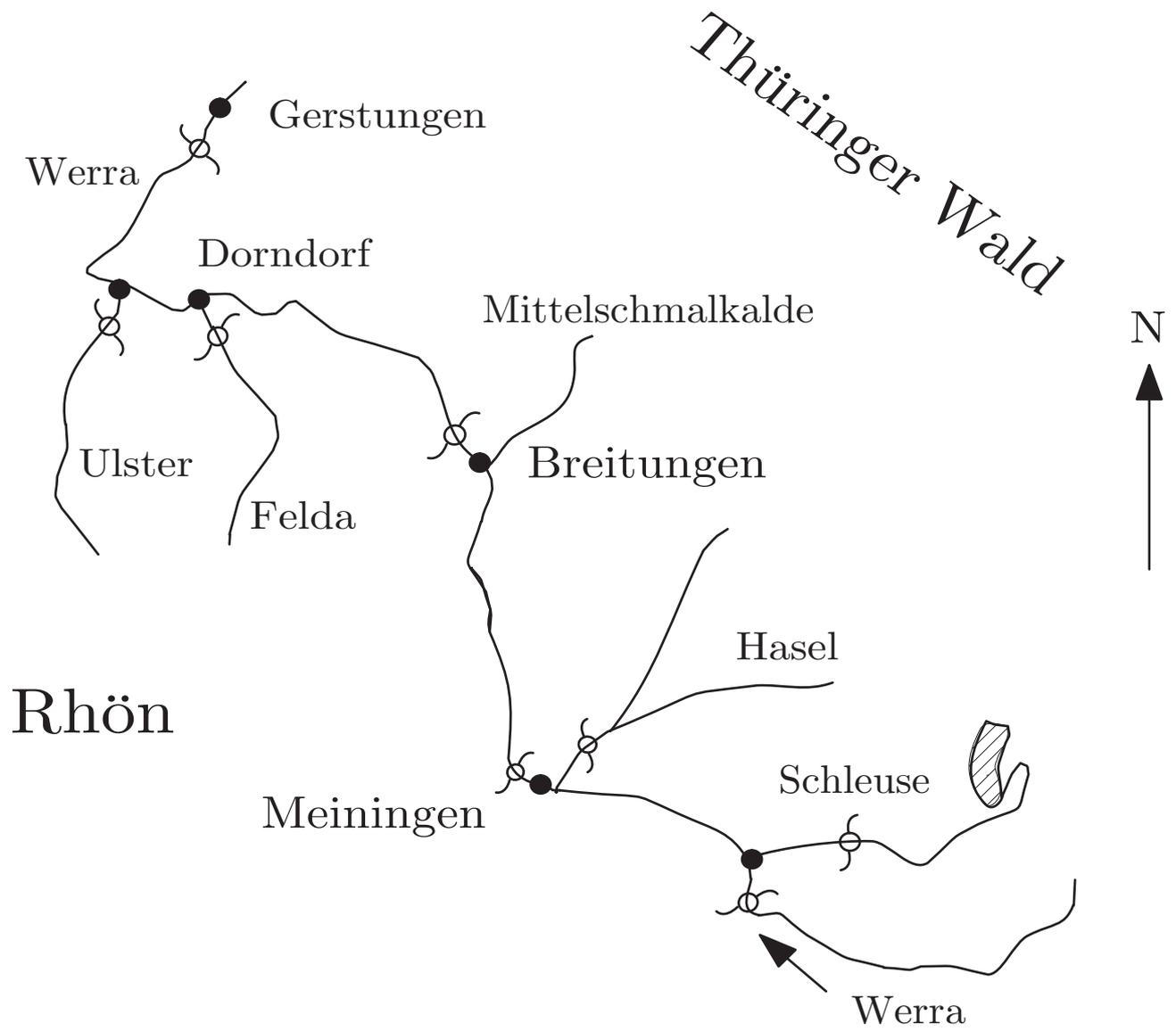


Abb. 3.7: Flussgebiet der Werra im Raum Thüringen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

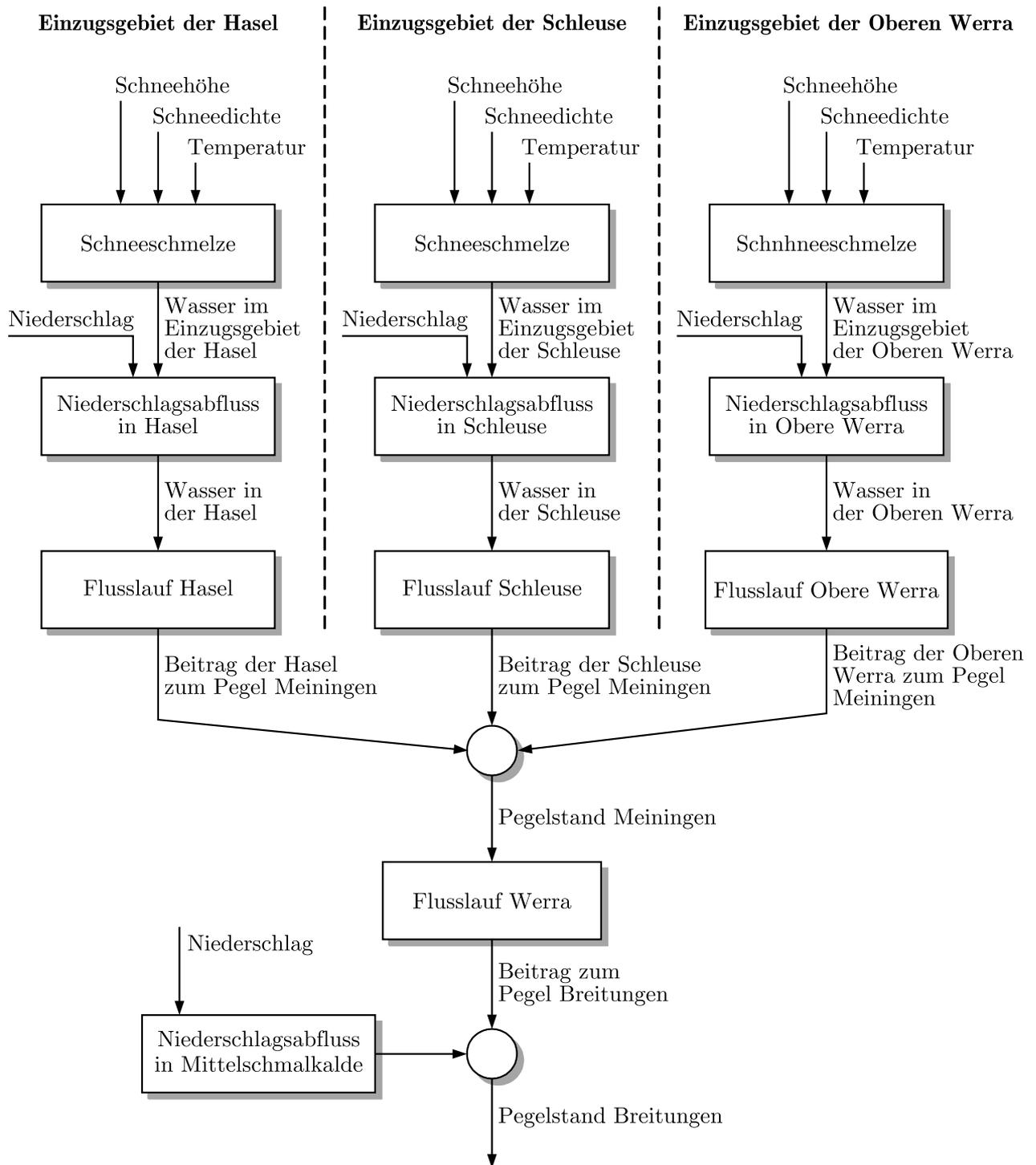


Abb. 3.8: Blockschaltbild zur Beschreibung der Pegelstände der Werra

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

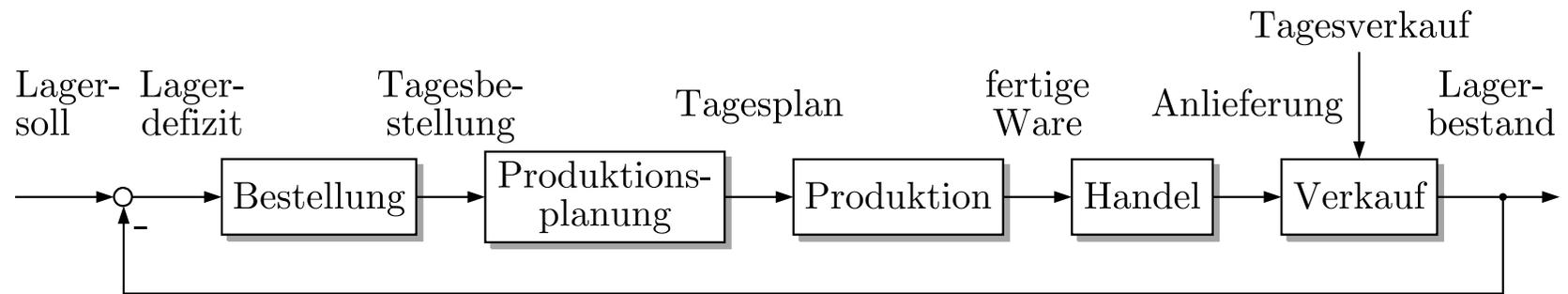


Abb. 3.9. Blockschaltbild einer Lagerhaltung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

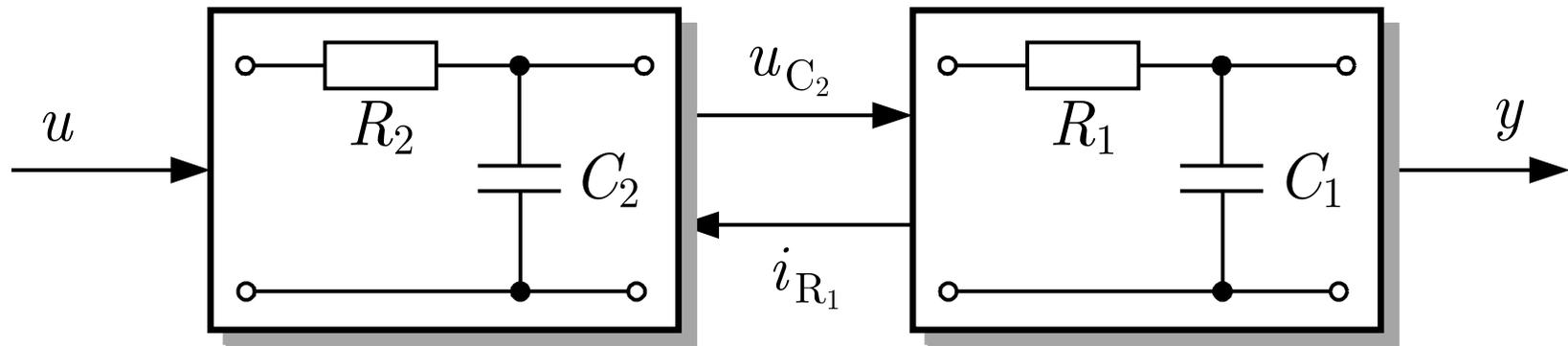


Abb. 3.10. Blockschaltbild für die Schaltung aus Abb. 4.21

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

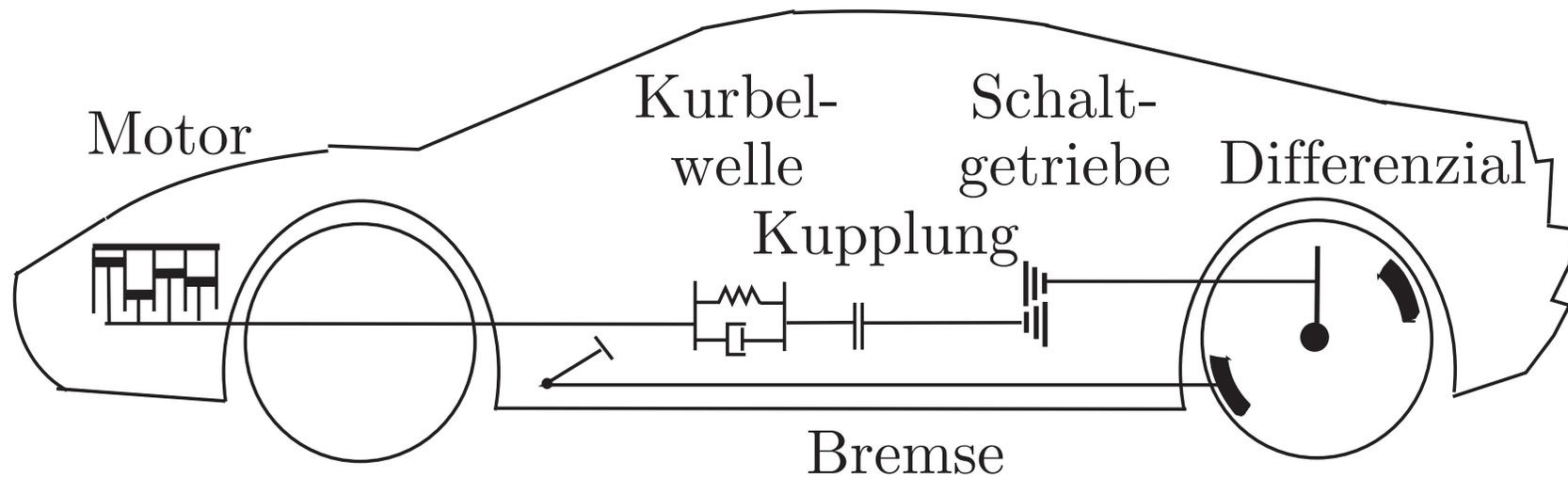


Abb. 3.11. Schematische Darstellung des Antriebsstranges eines Kraftfahrzeugs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

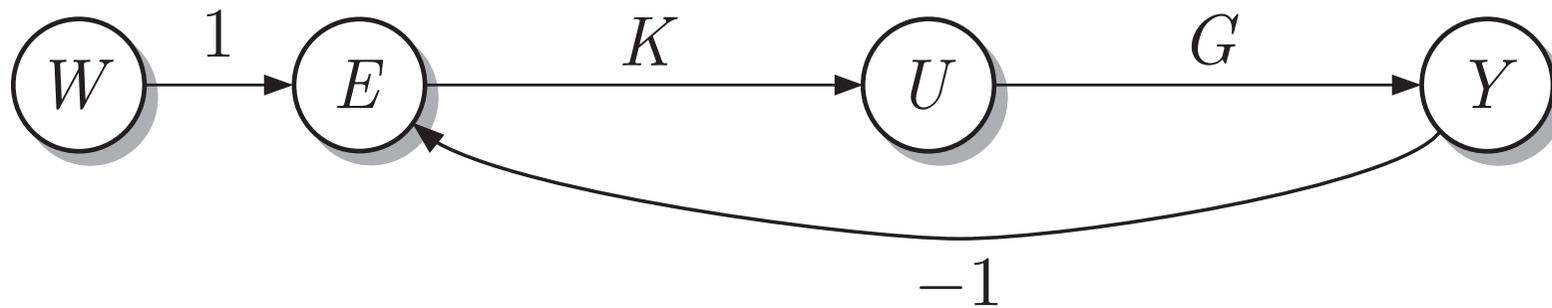
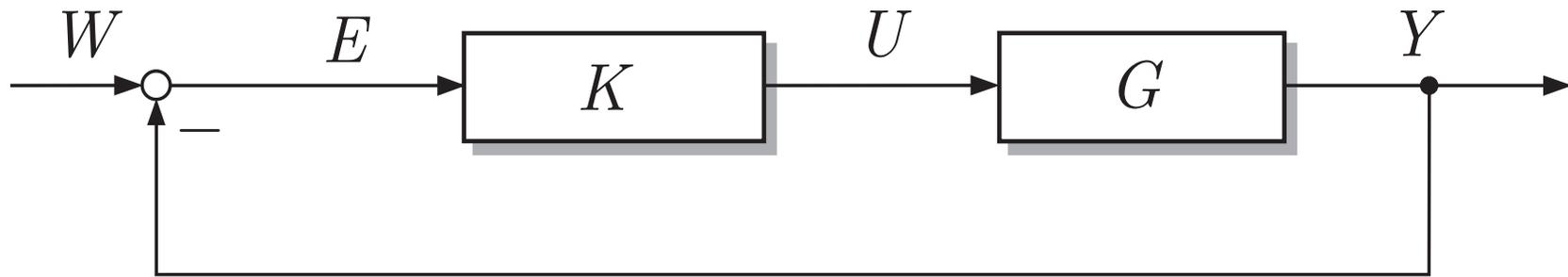


Abb. 3.12. Blockschaltbild (oben) und Signalflussgraph (unten) eines Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

Signalflussgraph

Blockschaltbild

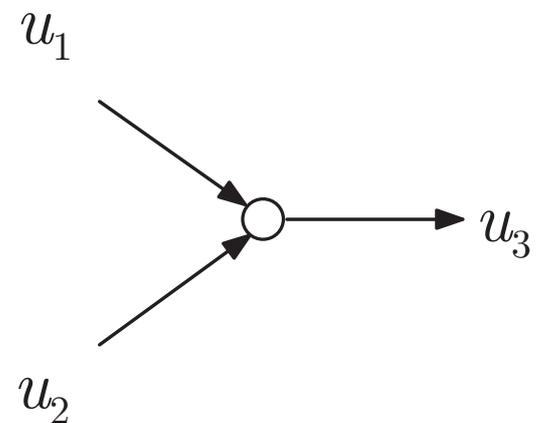
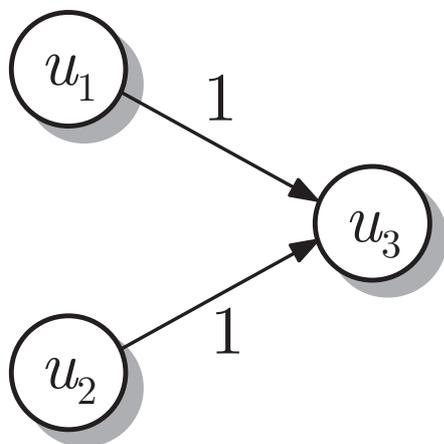
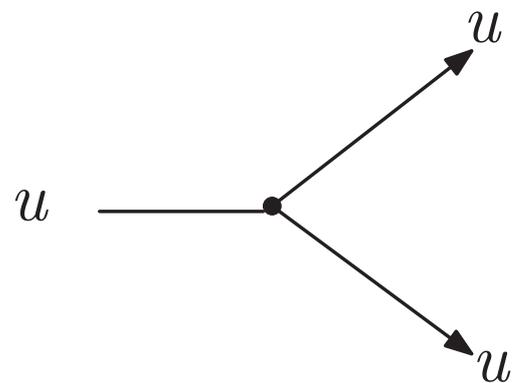
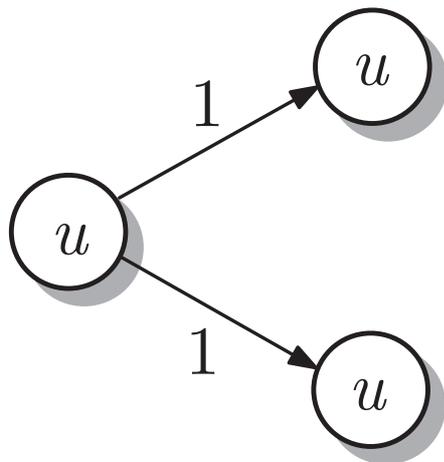
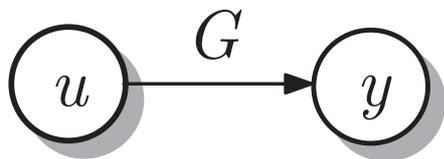


Abb. 3.13: Vergleich der wichtigsten Elemente von Signalflussgraphen und Blockschaltbildern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



Abb. 4.1. Strukturbild des Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

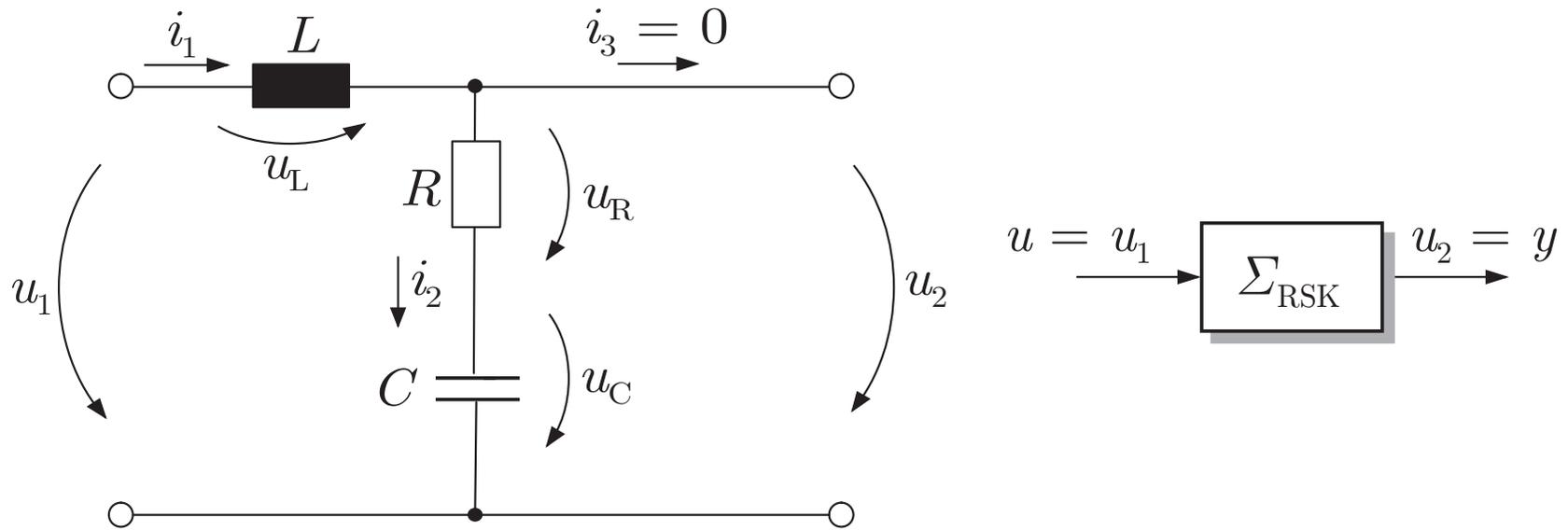


Abb. 4.2. Schaltung und Blockschaltbild eines Reihenschwingkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

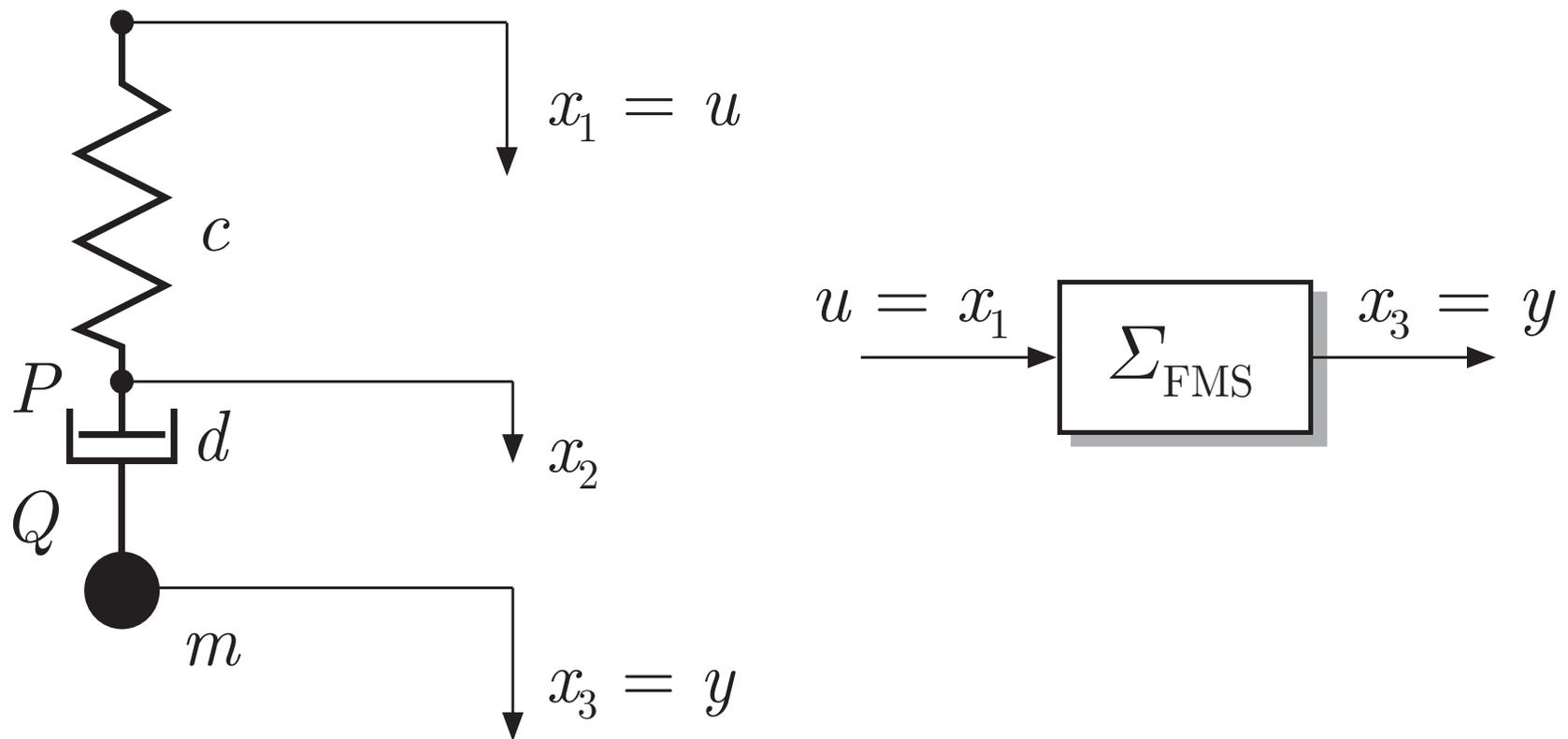


Abb. 4.3. Feder-Masse-Schwinger

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

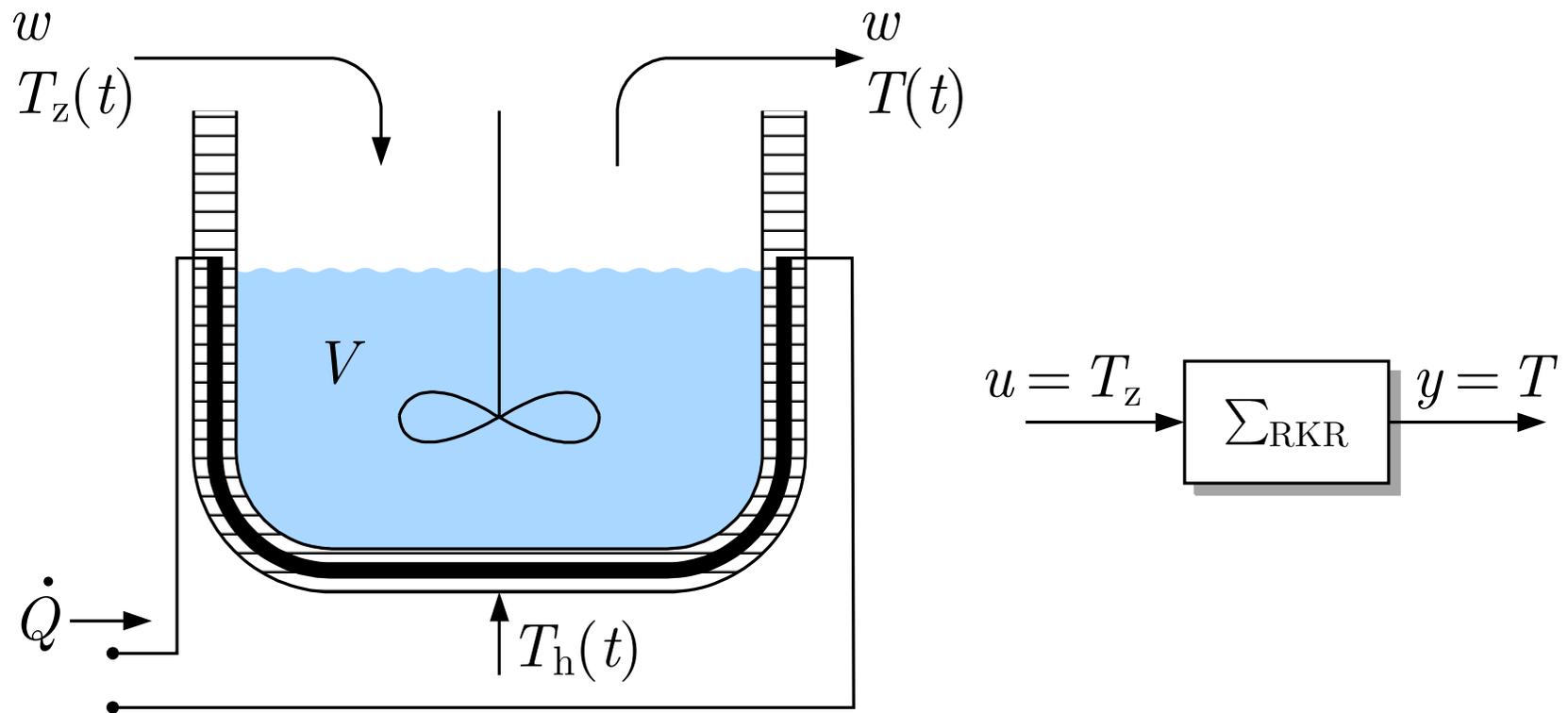


Abb. 4.4. Rührkesselreaktor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

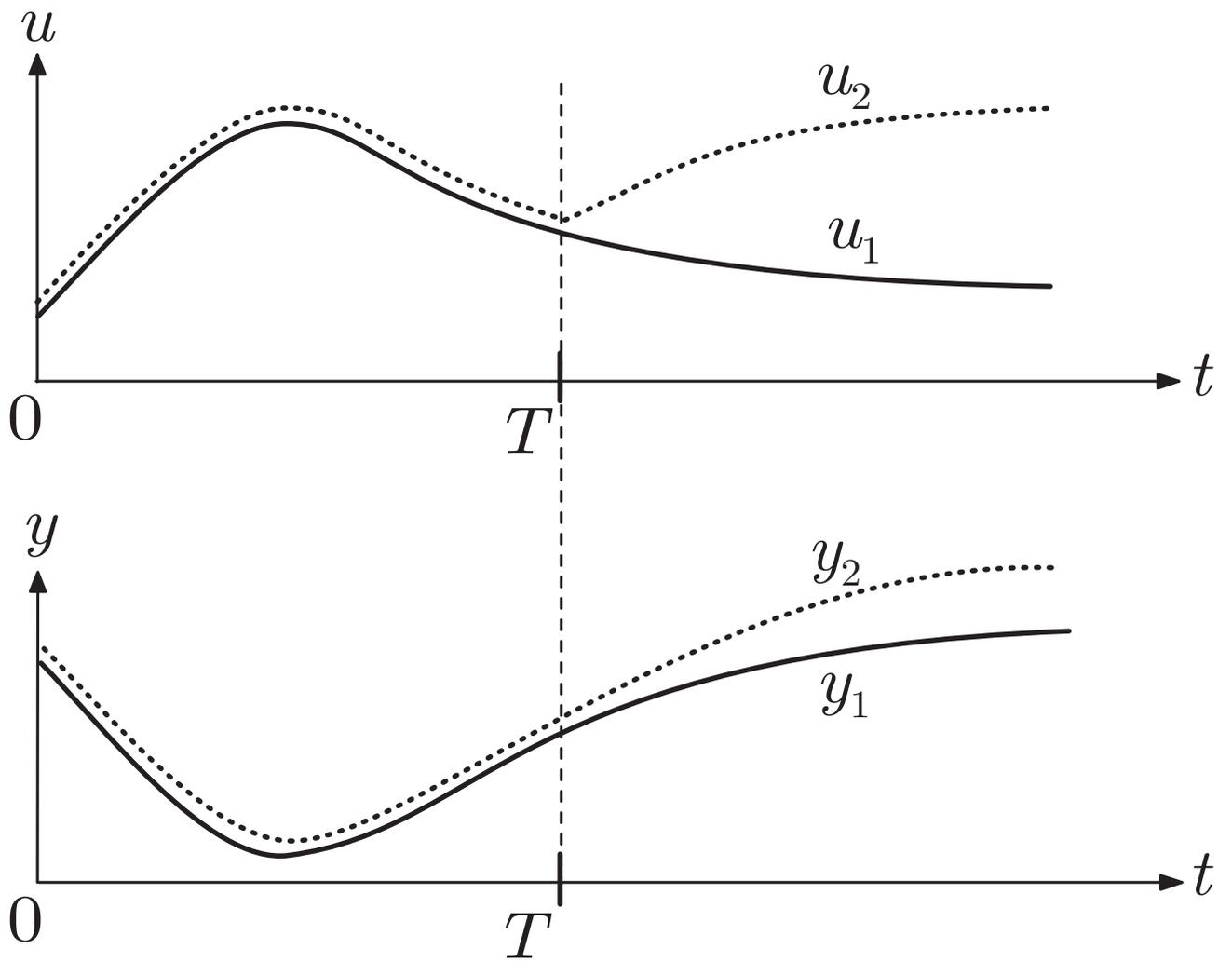


Abb. 4.5: Interpretation der Kausalität dynamischer Systeme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

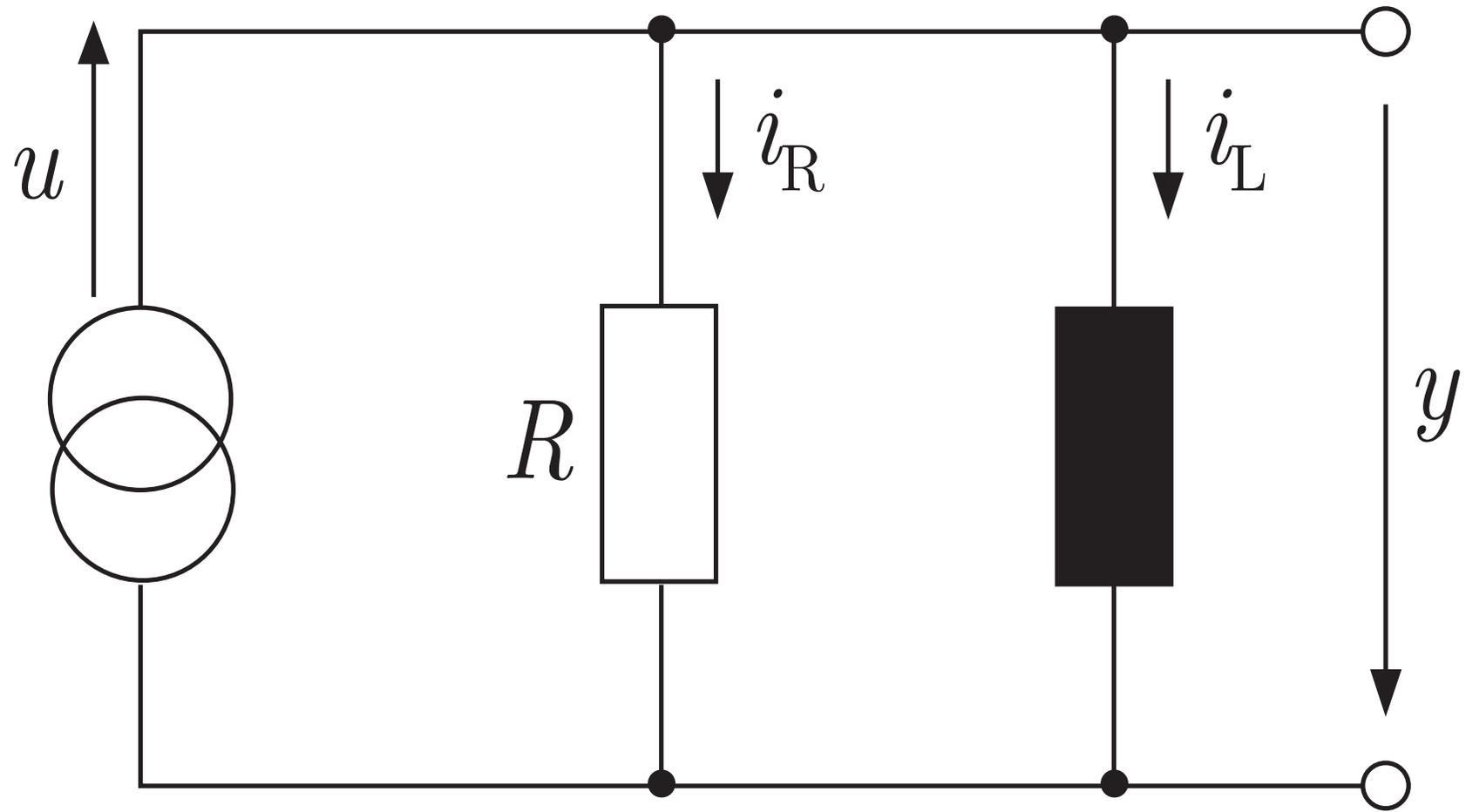


Abb. 4.6. RL-Glied zur Differentiation

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

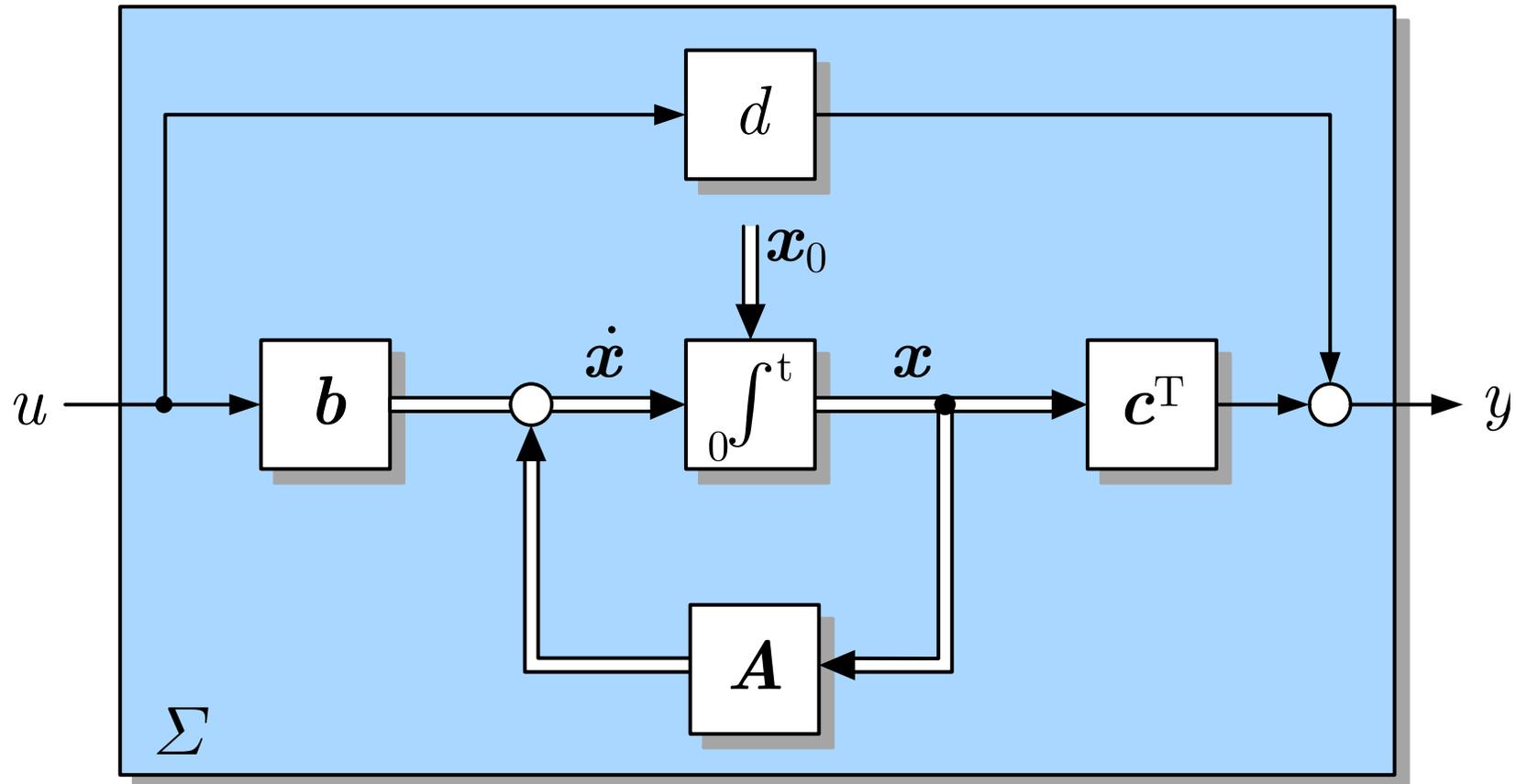


Abb. 4.7. Strukturbild des Zustandsraummodells

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

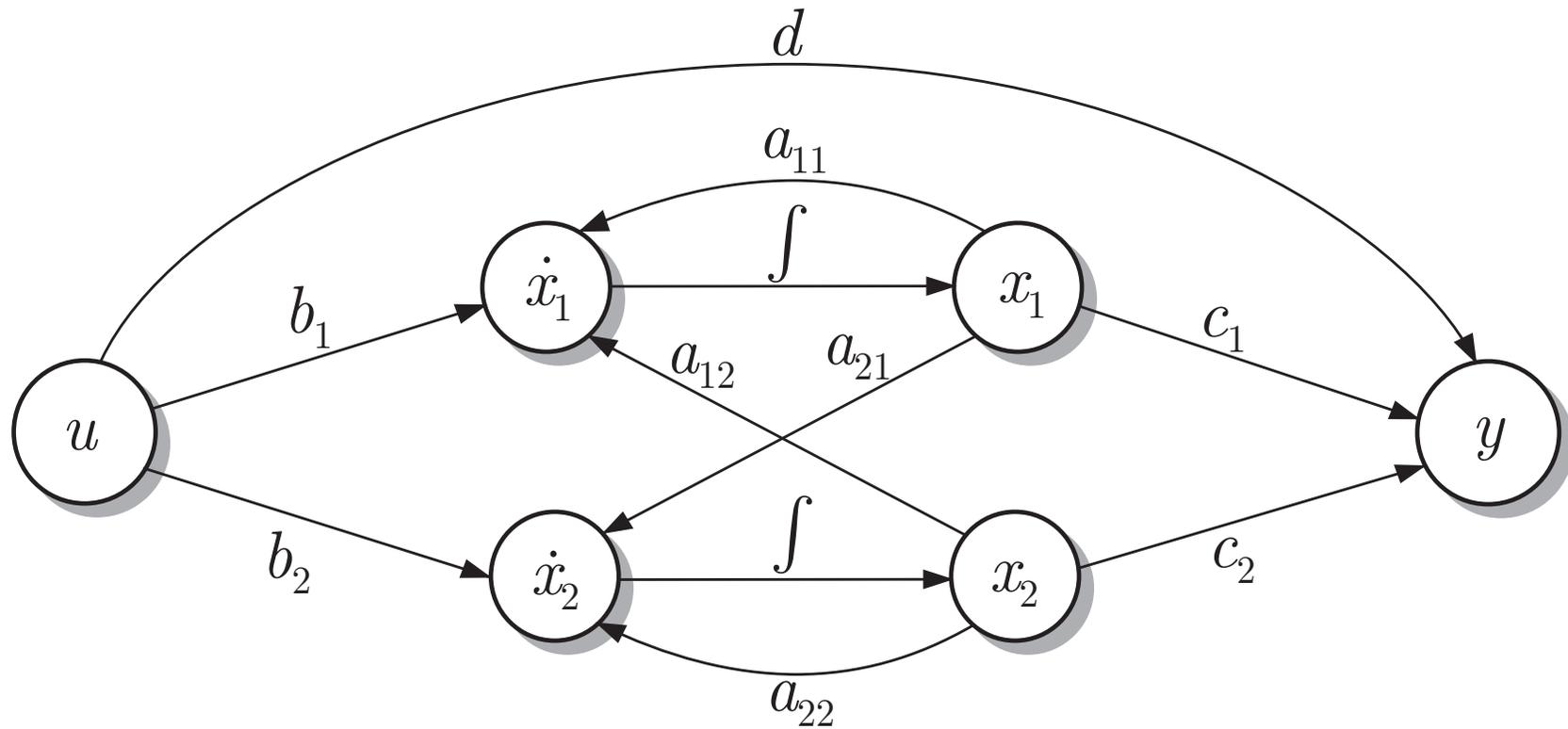


Abb. 4.8. Signalflussgraph eines Systems zweiter Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

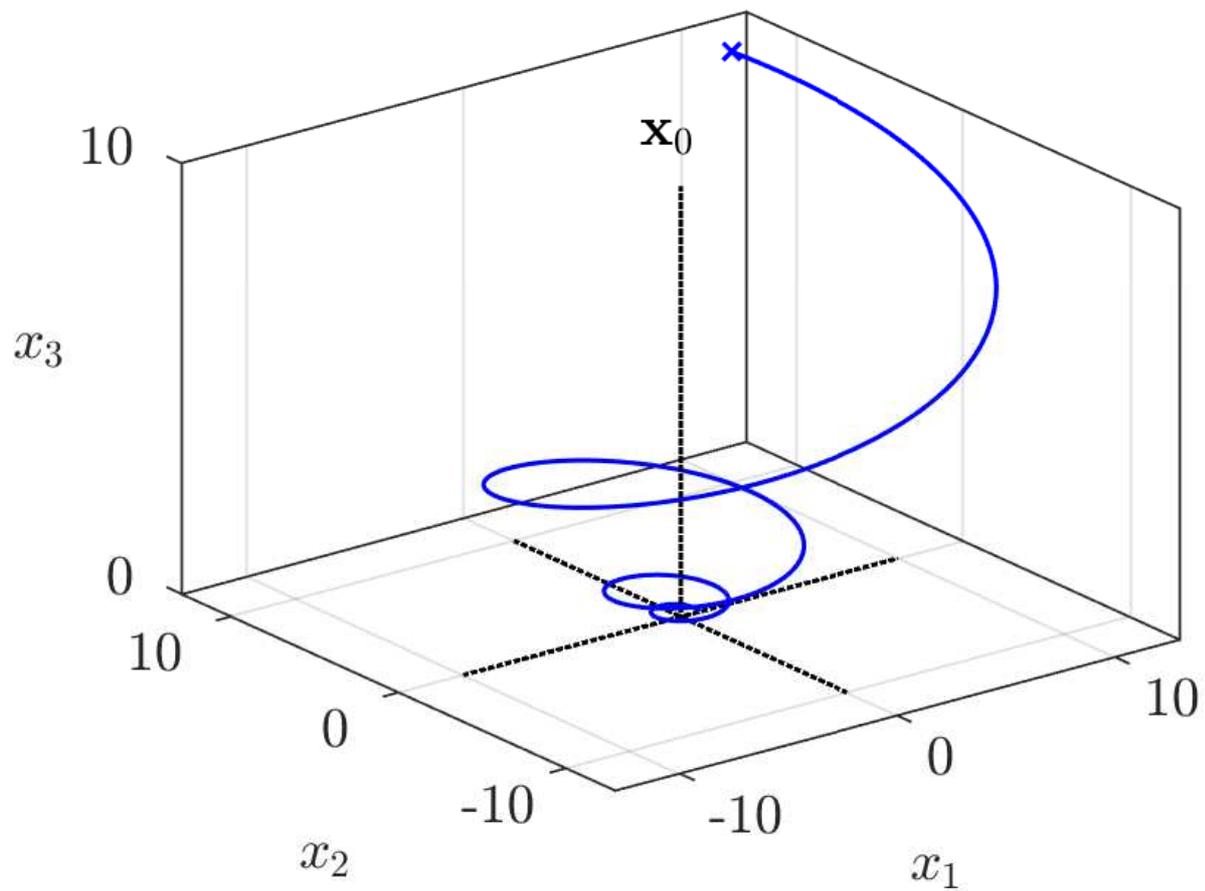


Abb. 4.9: Trajektorie eines Systems dritter Ordnung im Zustandsraum

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

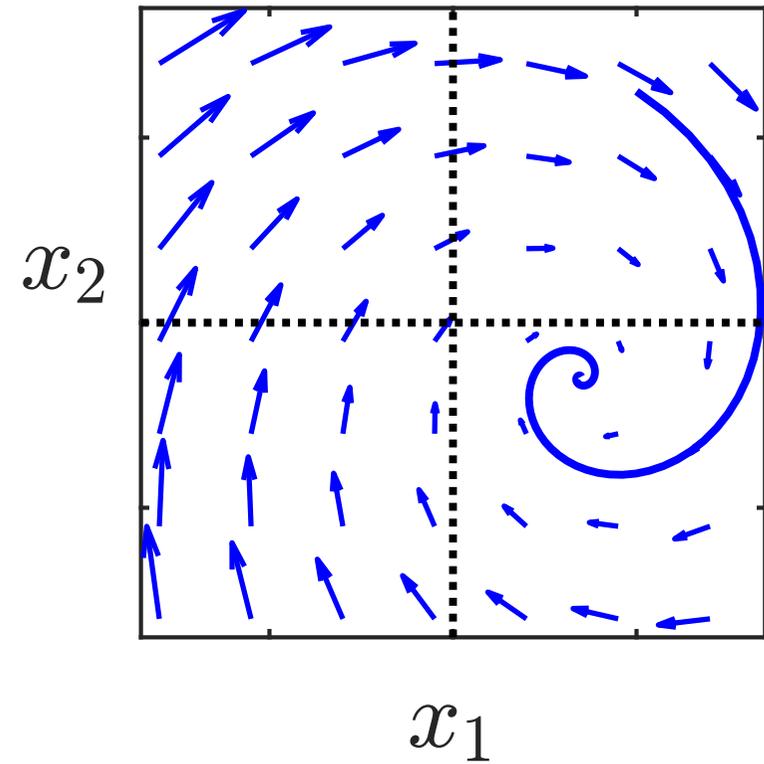
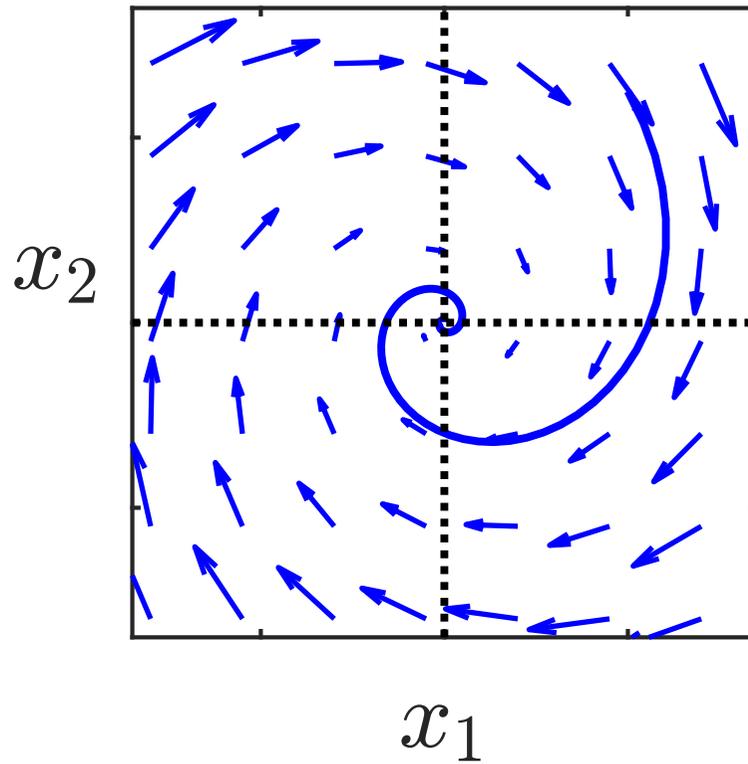


Abb. 4.10. Vektorfeld eines schwingungsfähigen Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

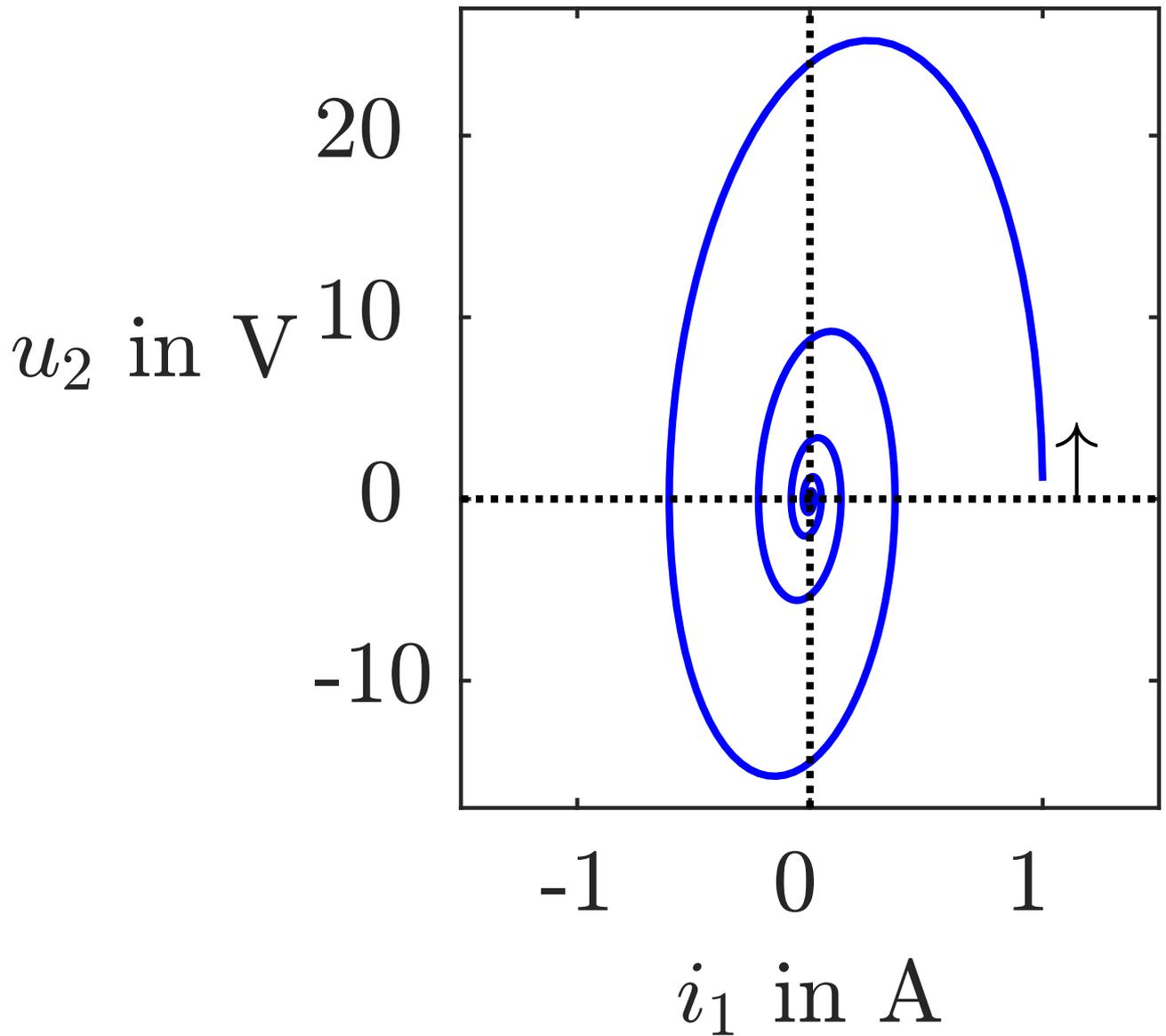


Abb. 4.11: Verlauf von Strom und Spannung des Reihenschwingkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

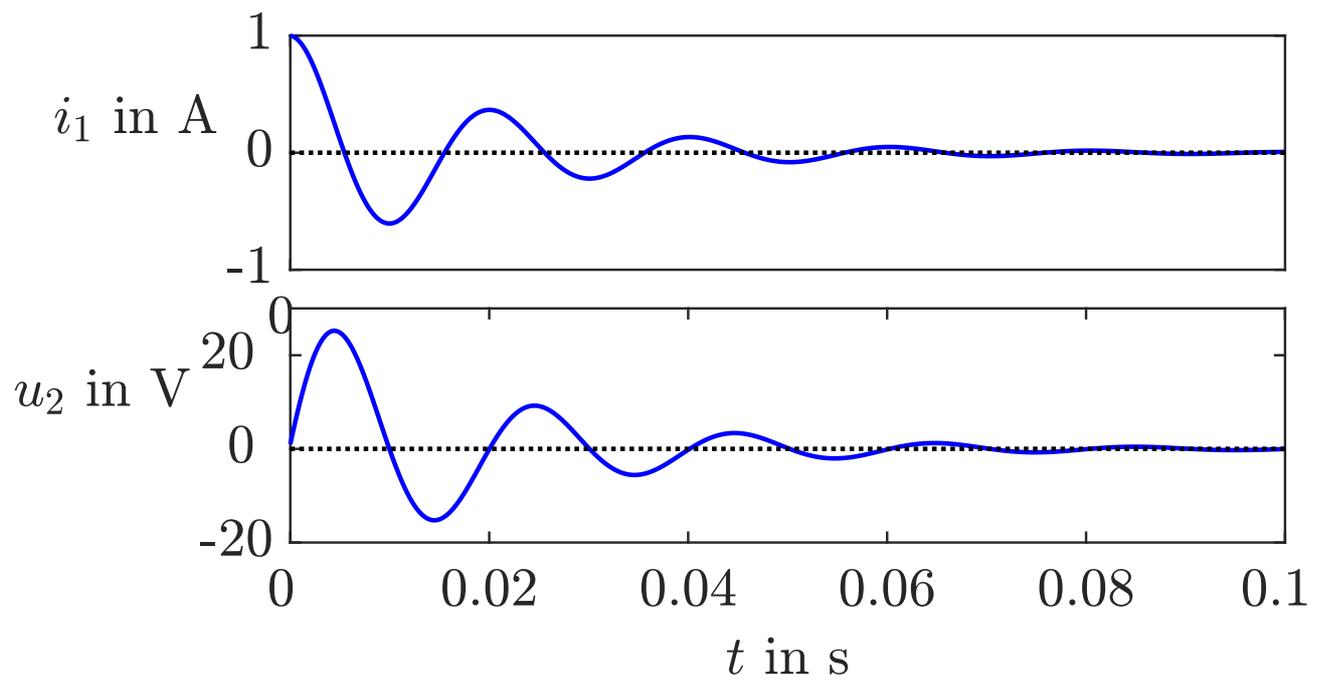


Abb. 4.11: Verlauf von Strom und Spannung des Reihenschwingkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

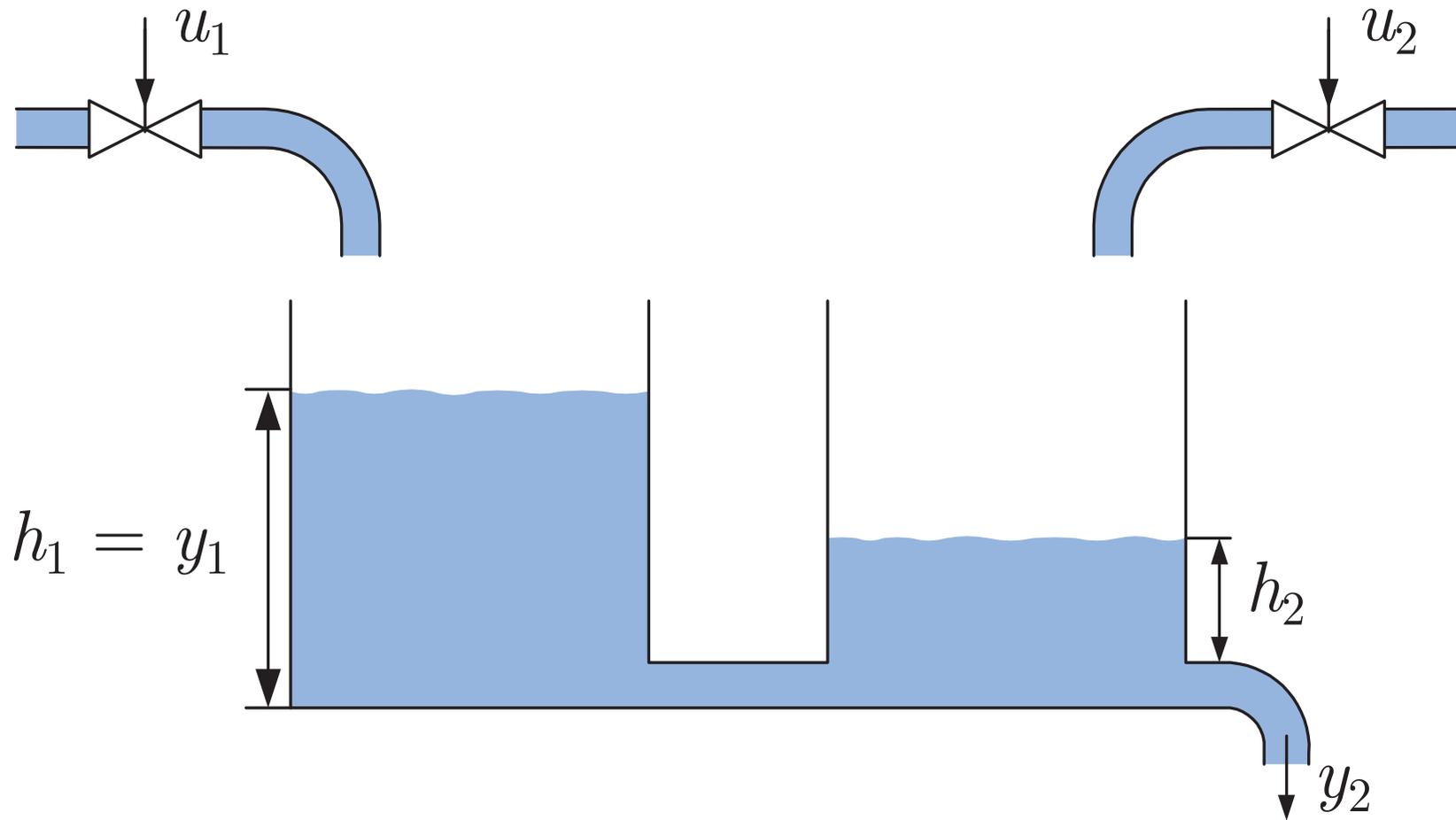


Abb. 4.12. Behältersystem mit zwei Eingängen und zwei Ausgängen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

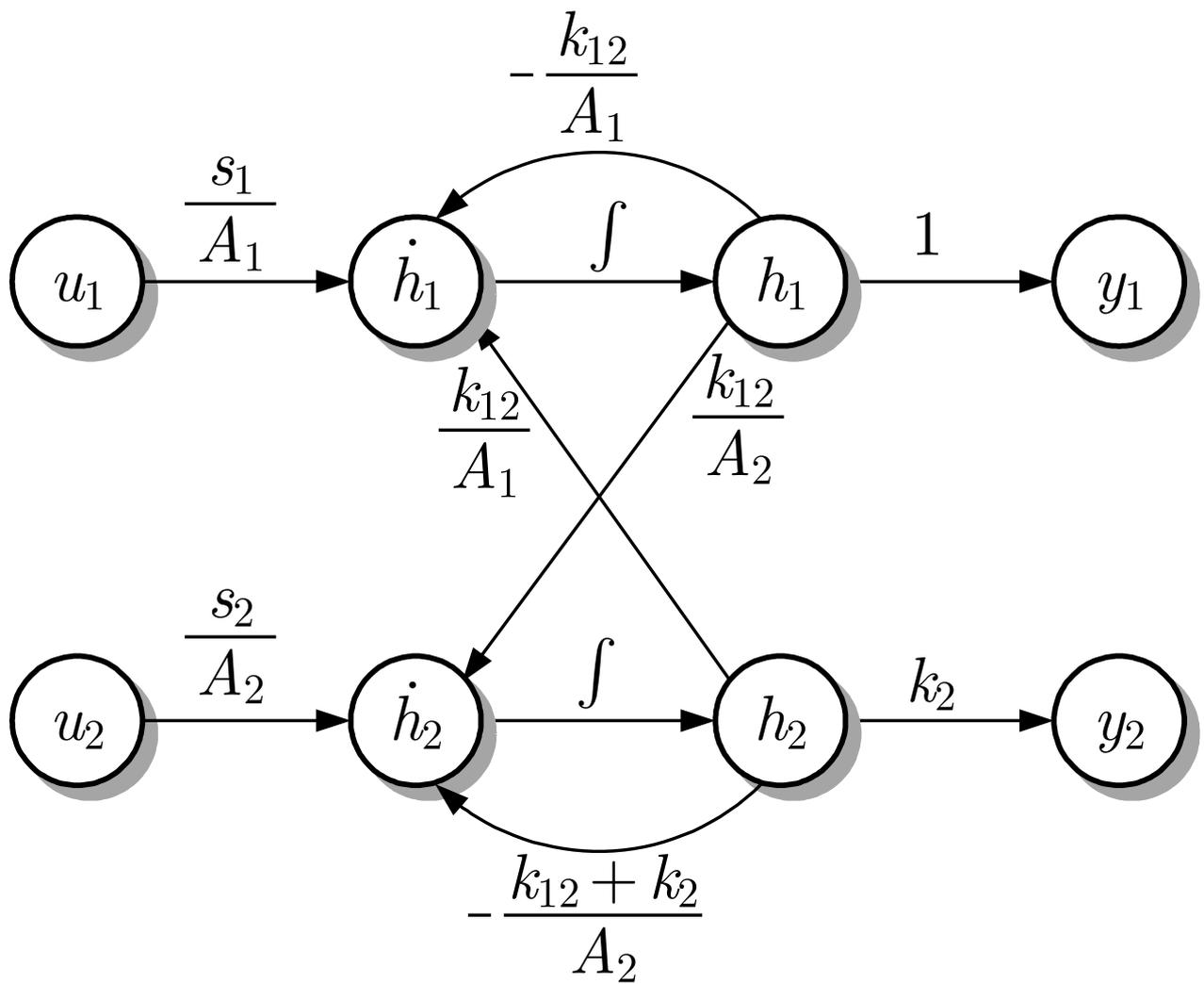


Abb. 4.13: Signalflussgraph des Modells (4.49)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

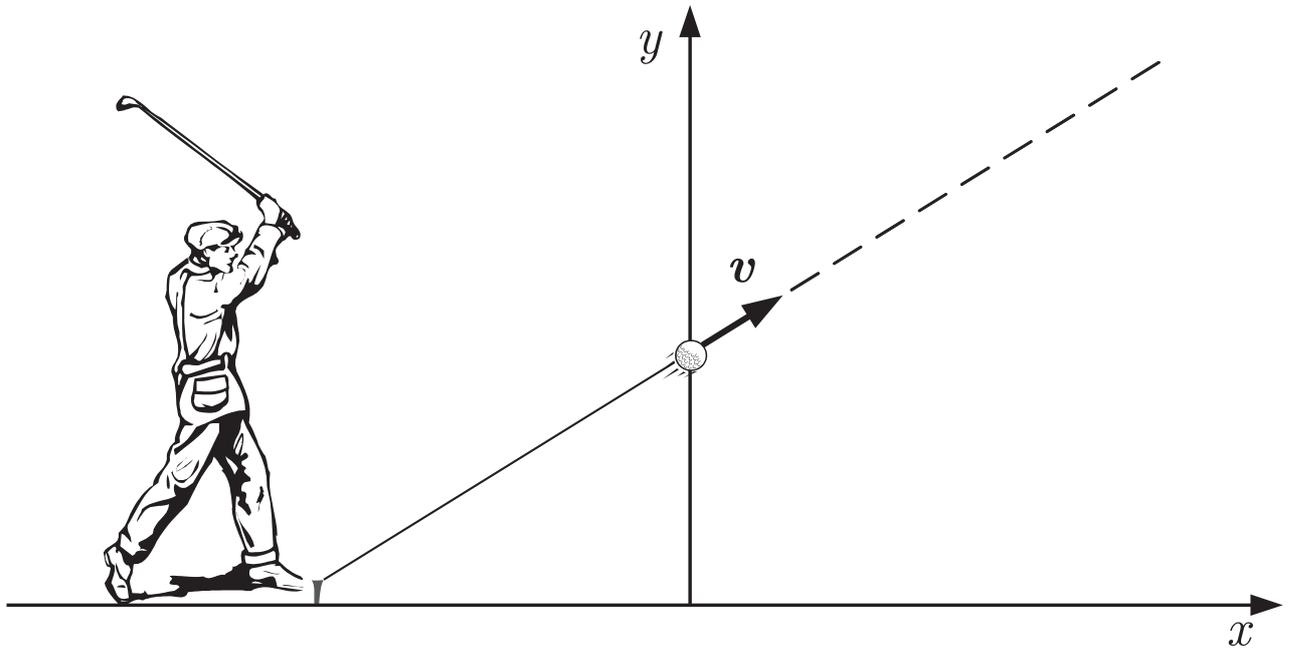


Abb. 4.14: Golfschlag

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

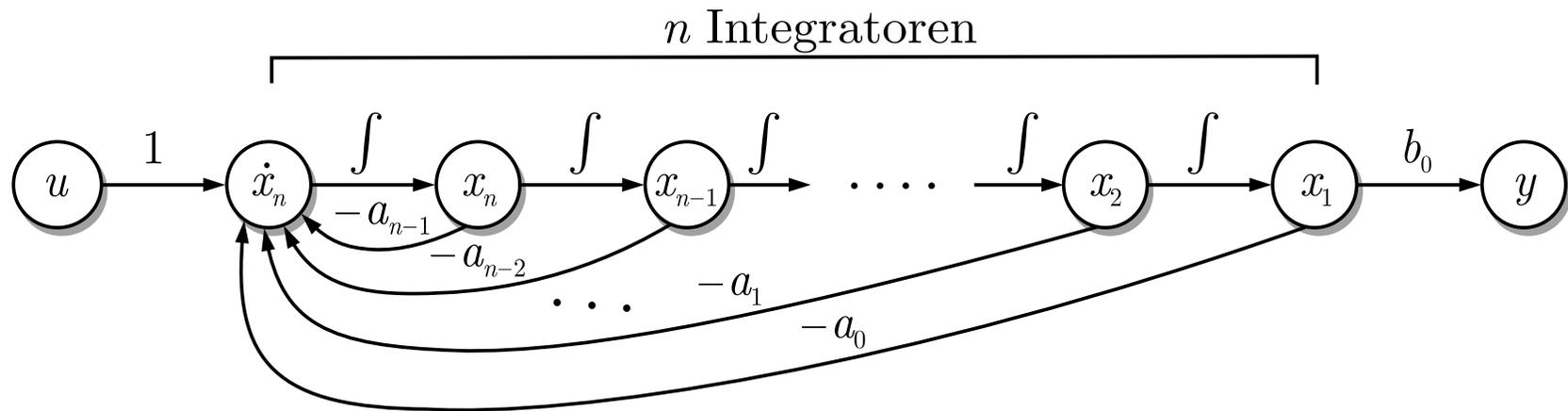
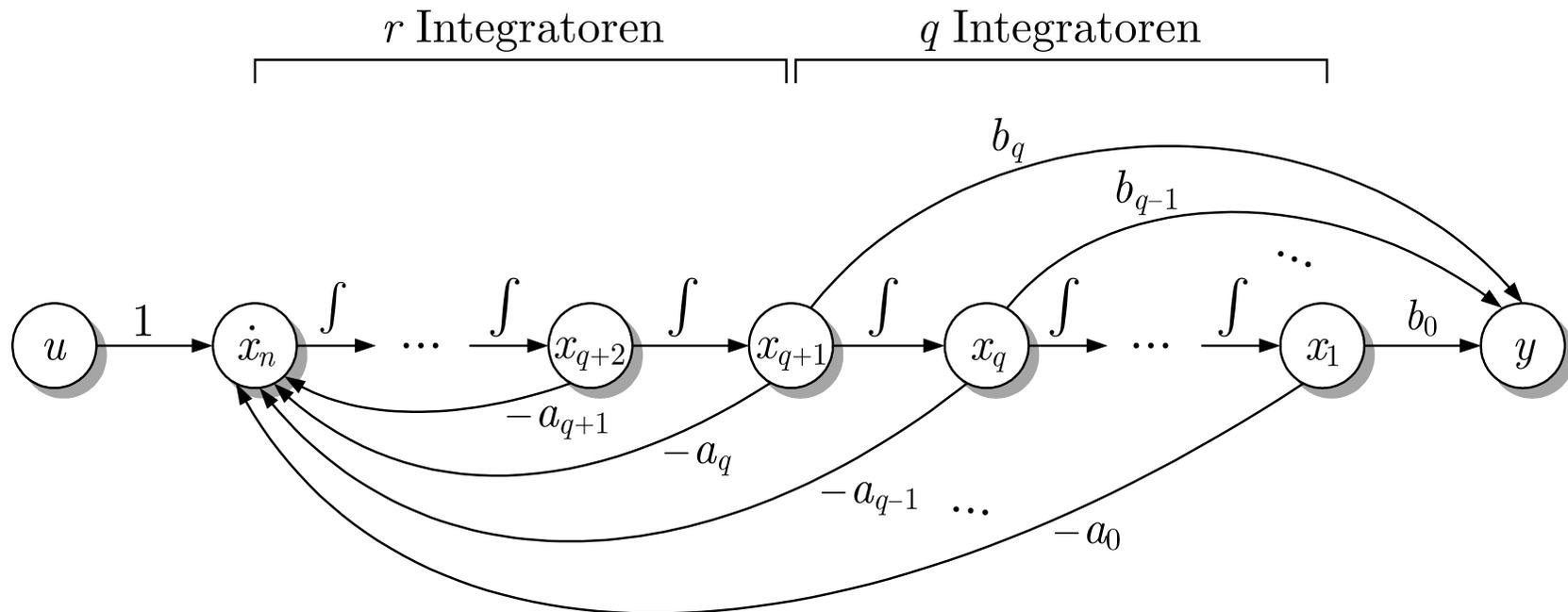


Abb. 4.15. Signalflussgraph für ein Zustandsraummodell mit Systemmatrix in Begleitmatrixform ($r = n$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 4.16. Signalflussgraph für ein Zustandsraummodell in
Regelungsnormalform ($0 < r \leq n$)**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

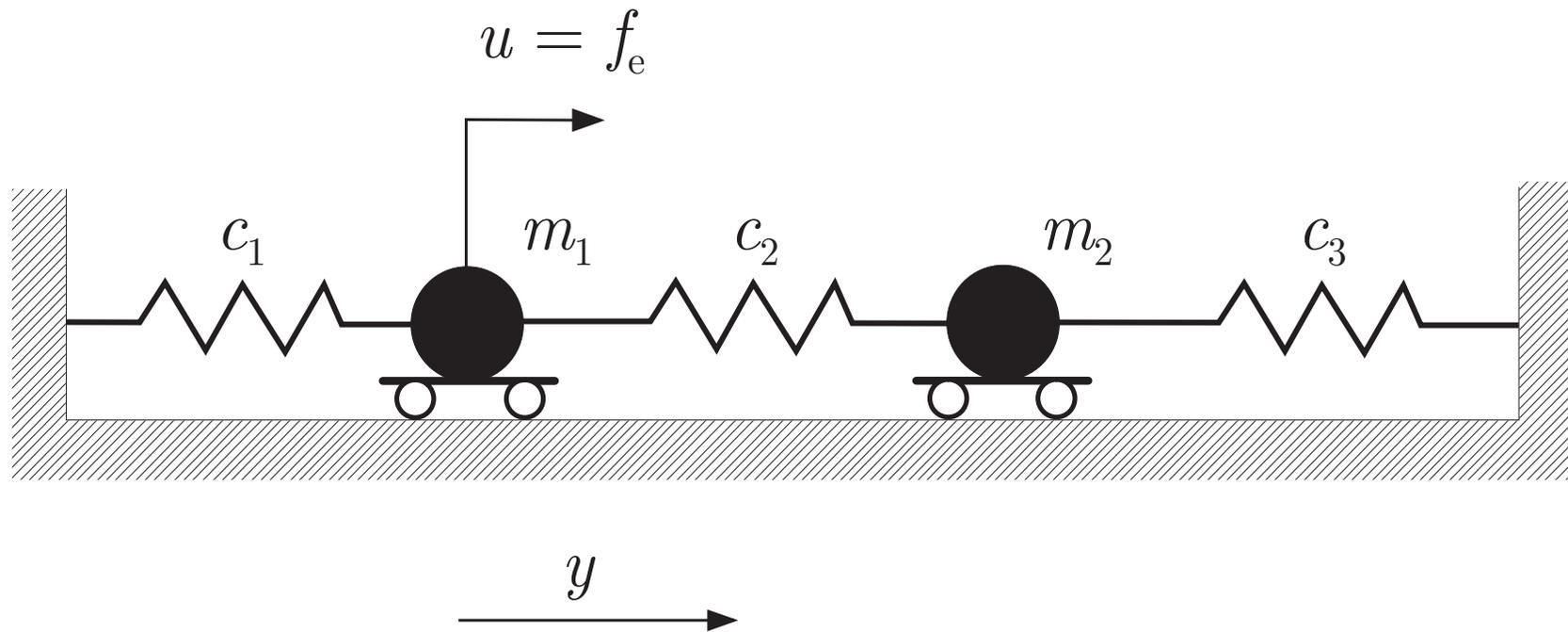


Abb. 4.17. Gekoppeltes Feder-Masse-System

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

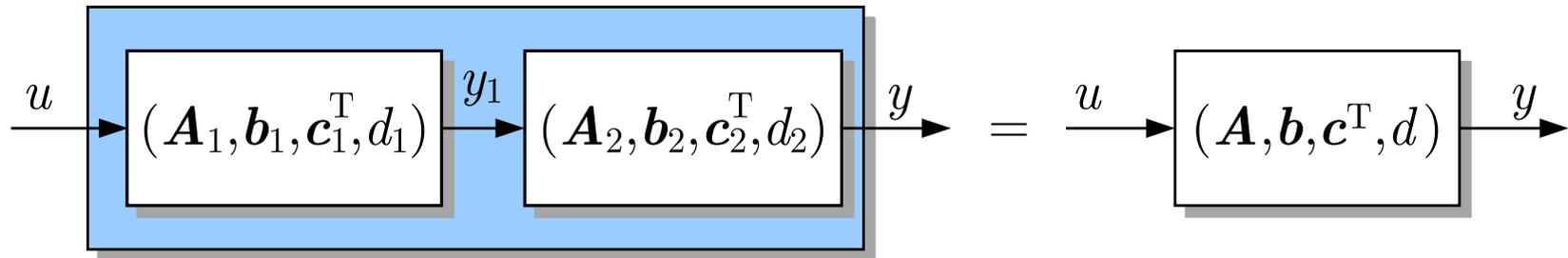


Abb. 4.18. Reihenschaltung zweier Teilsysteme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

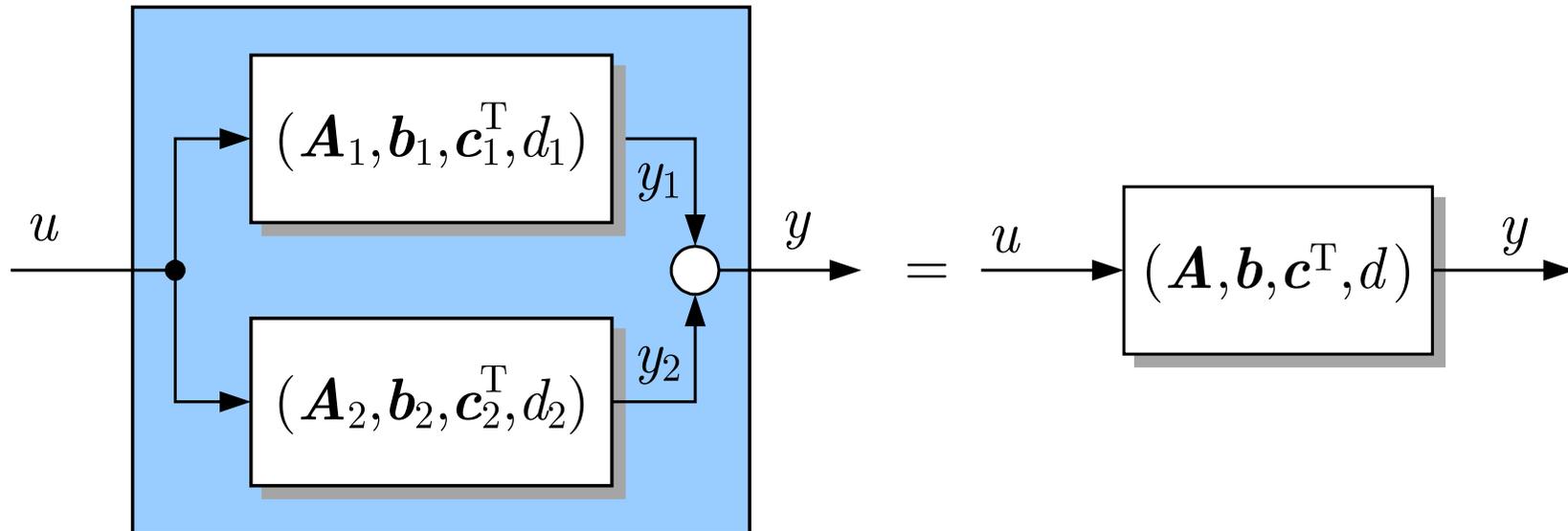


Abb. 4.19. Parallelschaltung zweier Teilsysteme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

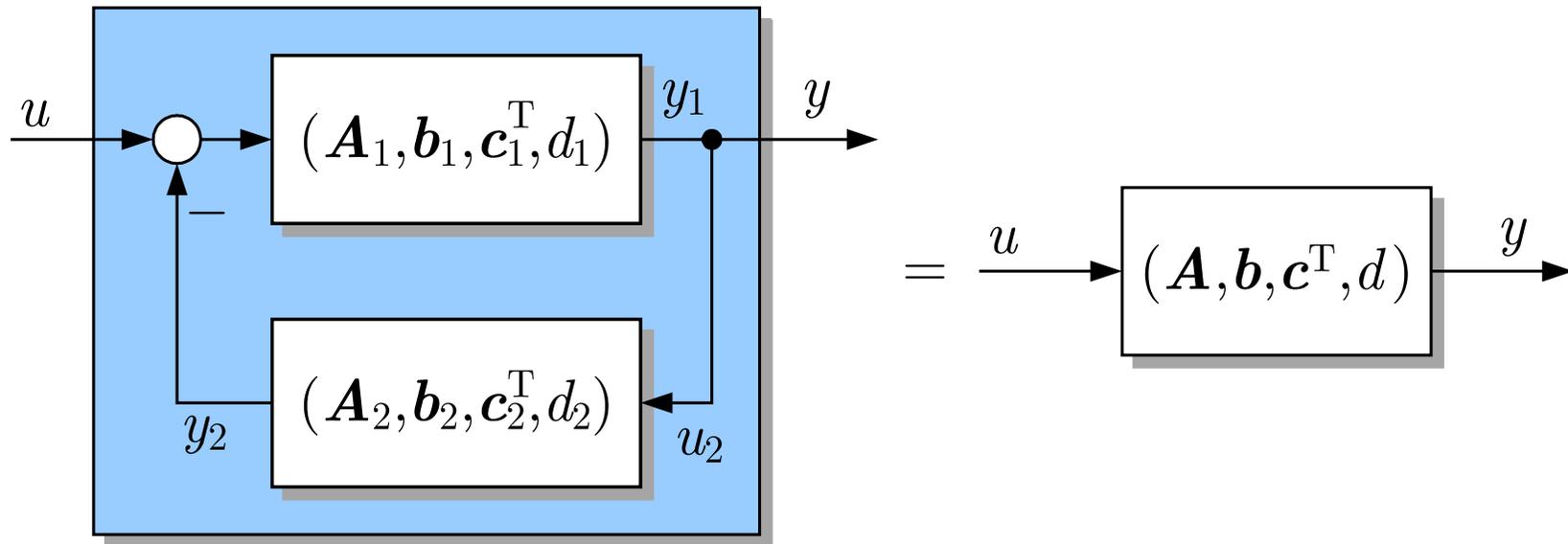


Abb. 4.20. Rückkopplungsschaltung zweier Teilsysteme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

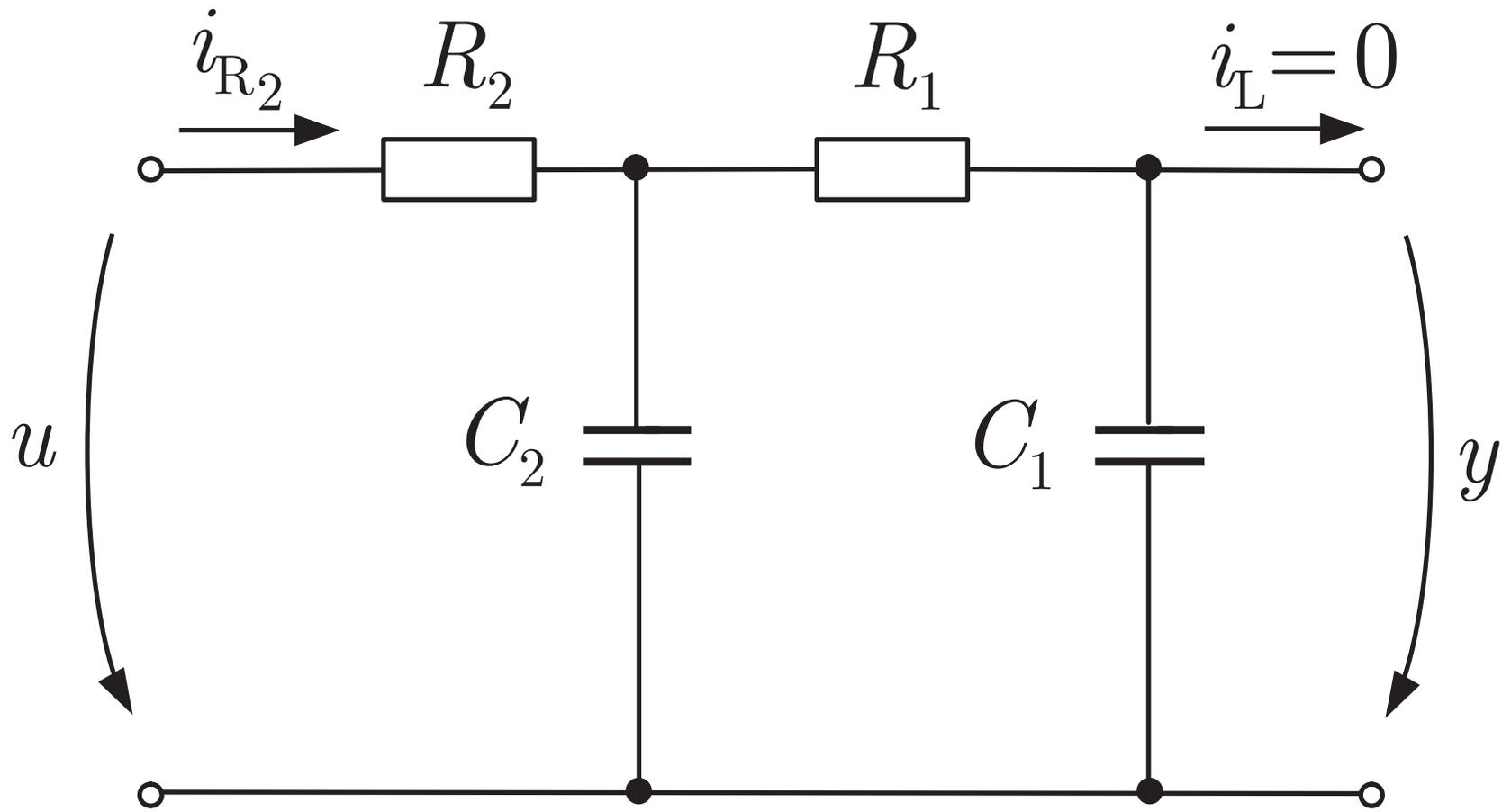


Abb. 4.21. RC-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

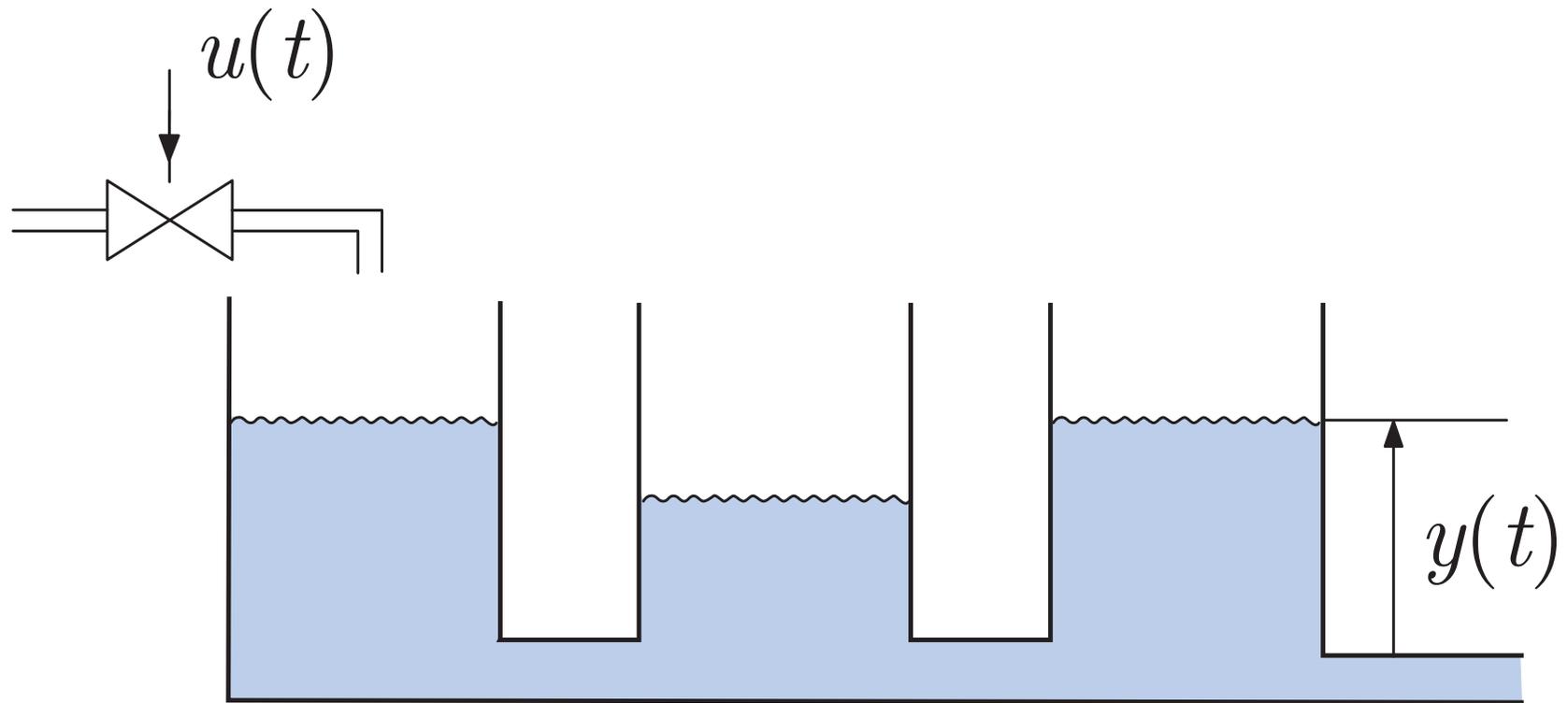


Abb. 4.22. 3-Tank-System

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

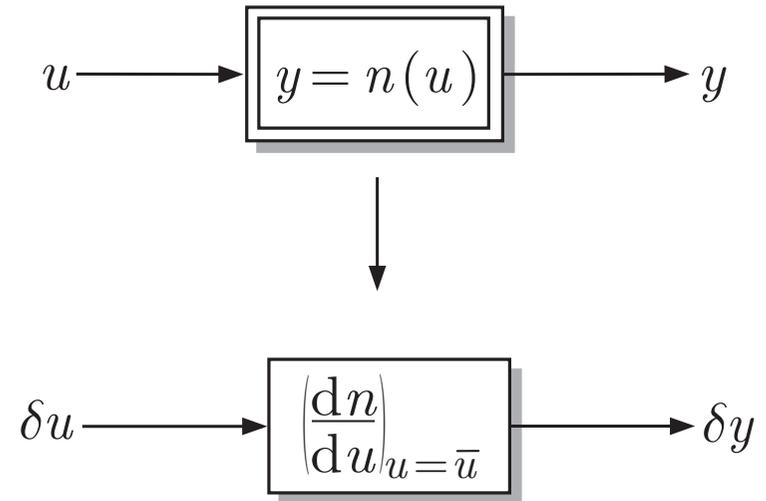
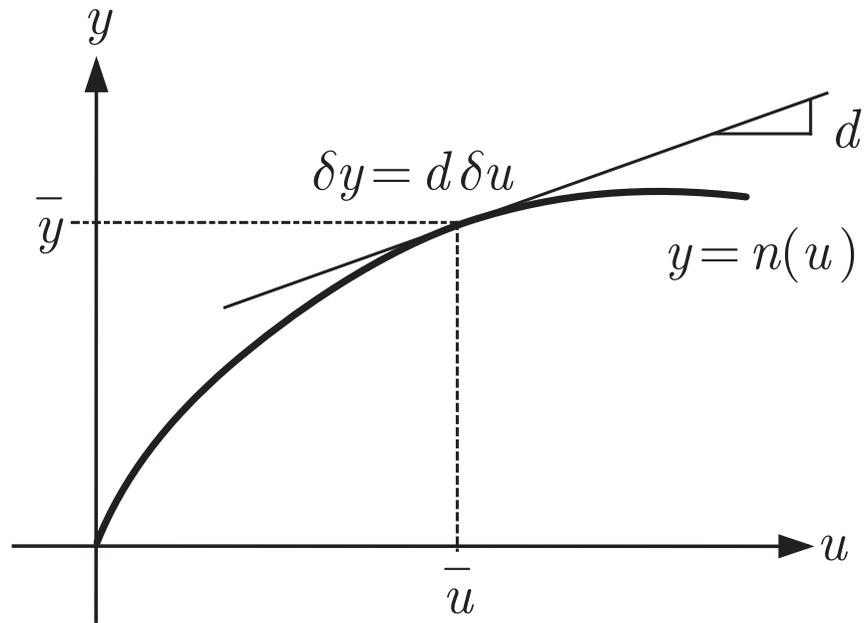


Abb. 4.23. Linearisierung einer statischen Nichtlinearität

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

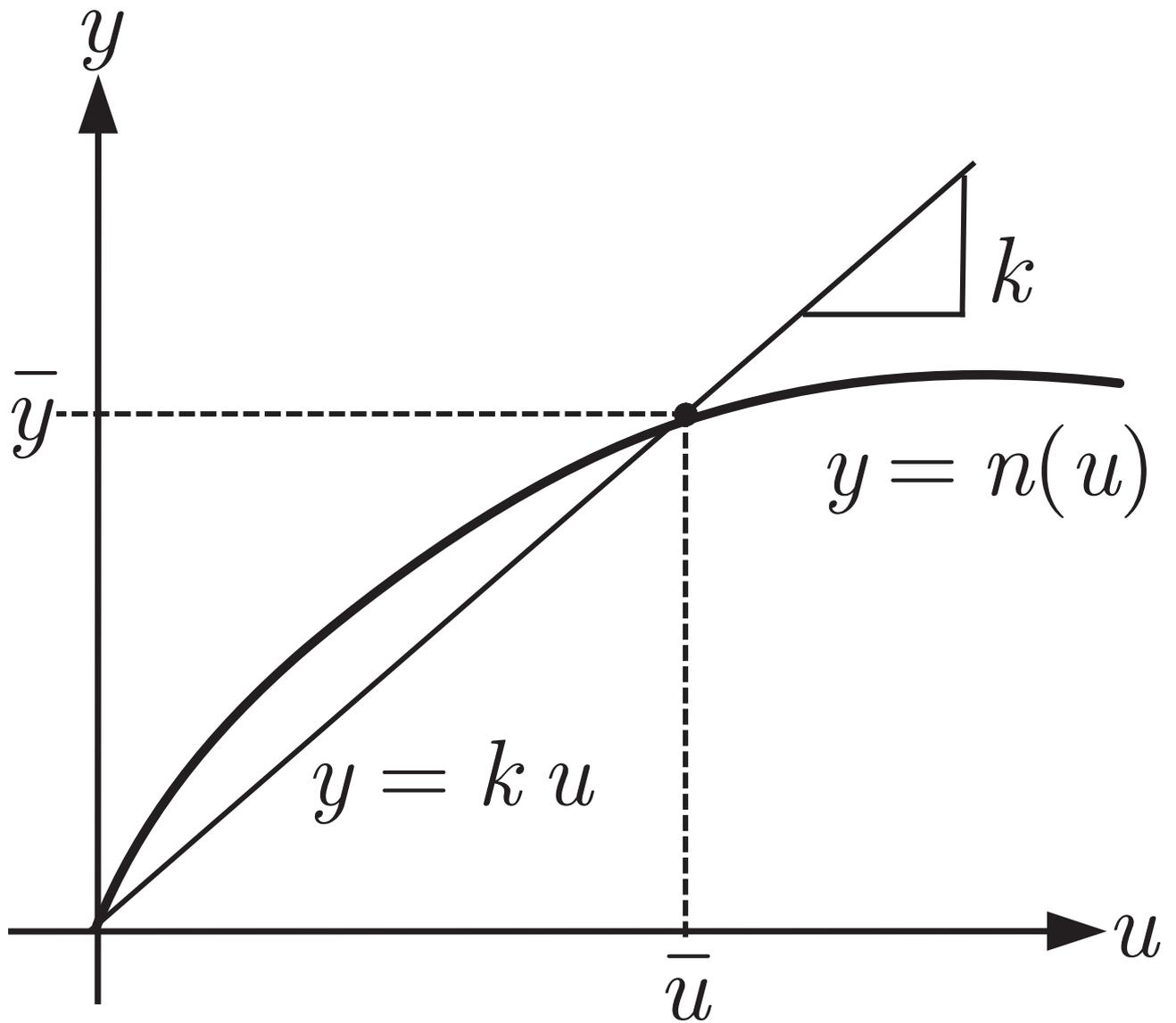


Abb. 4.24: Linearisierung der TORICELLI-Gleichung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

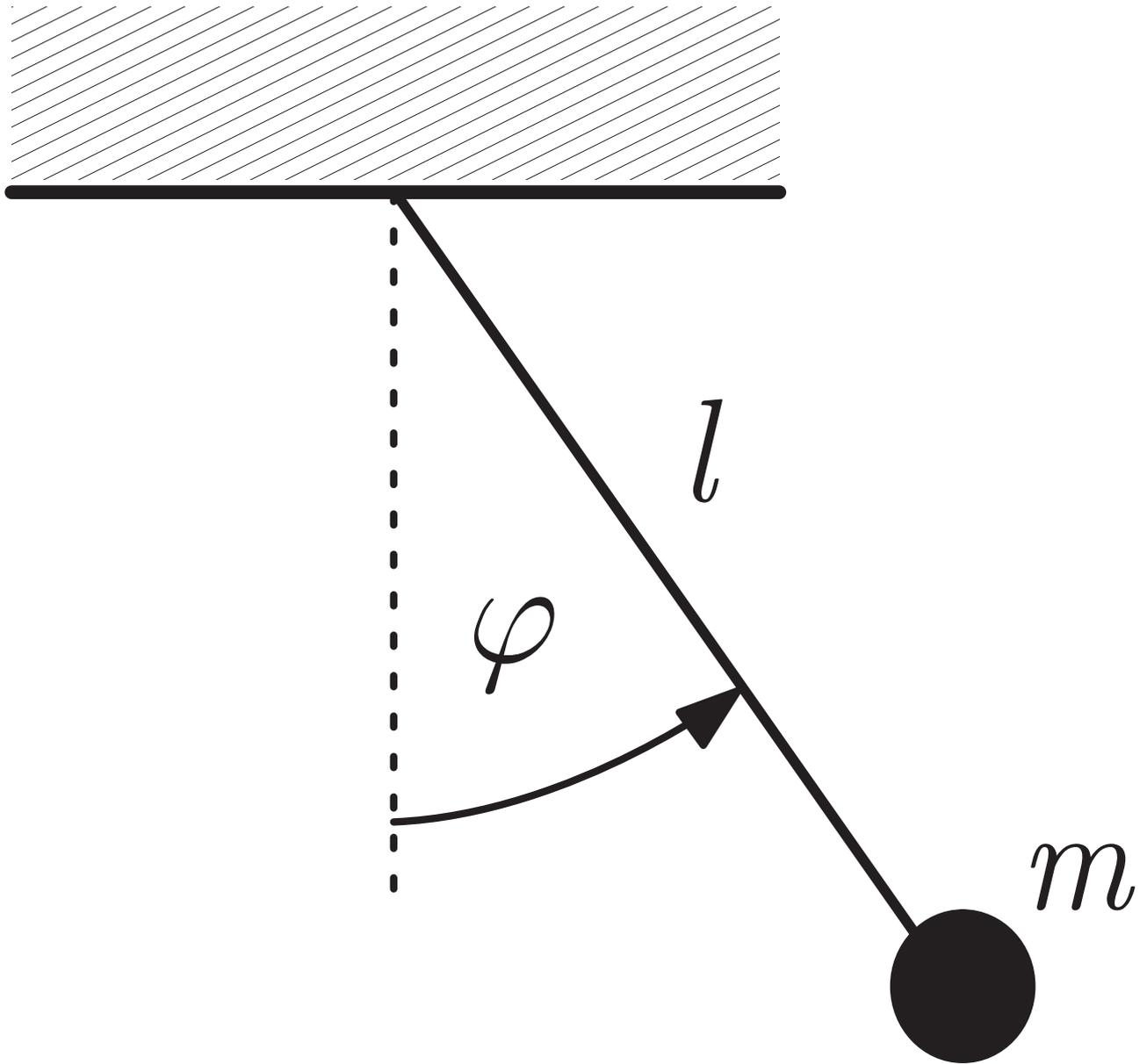


Abb. 4.25: Pendel

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

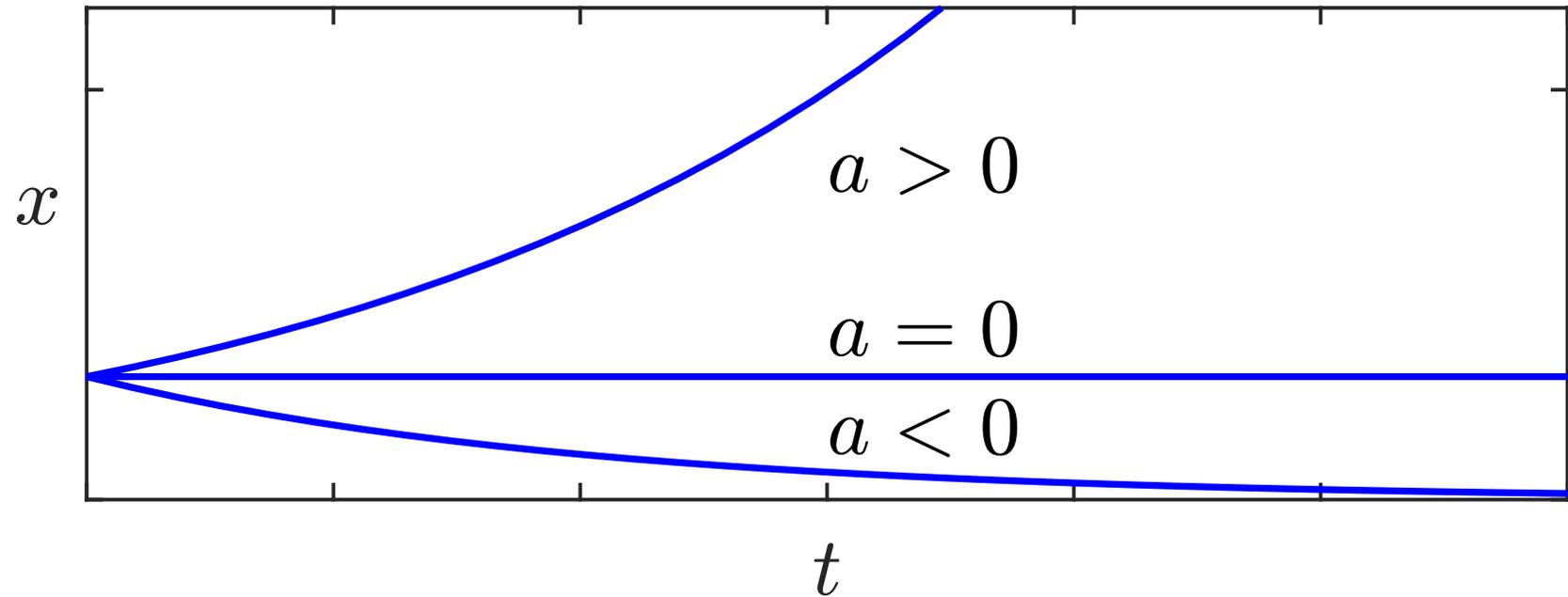


Abb. 5.1. Eigenbewegung eines Systems erster Ordnung für $x_0 = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

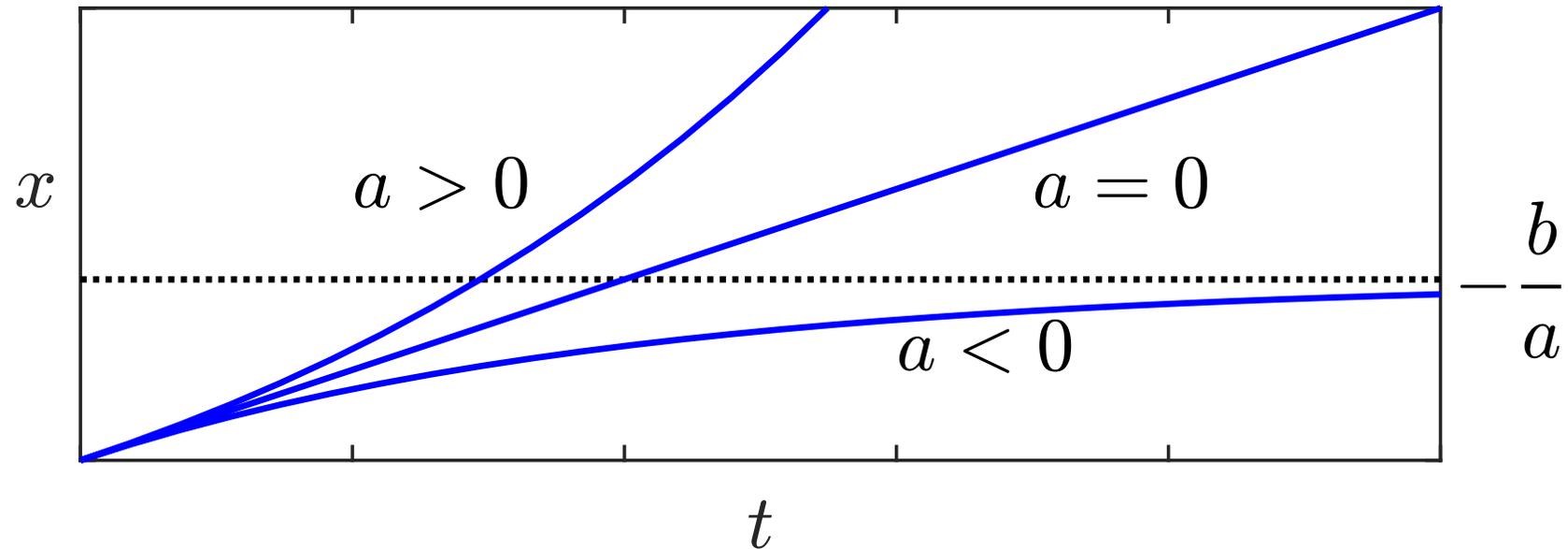


Abb. 5.2. Erzwungene Bewegung eines Systems erster Ordnung für sprungförmige Eingangsgröße (5.6)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

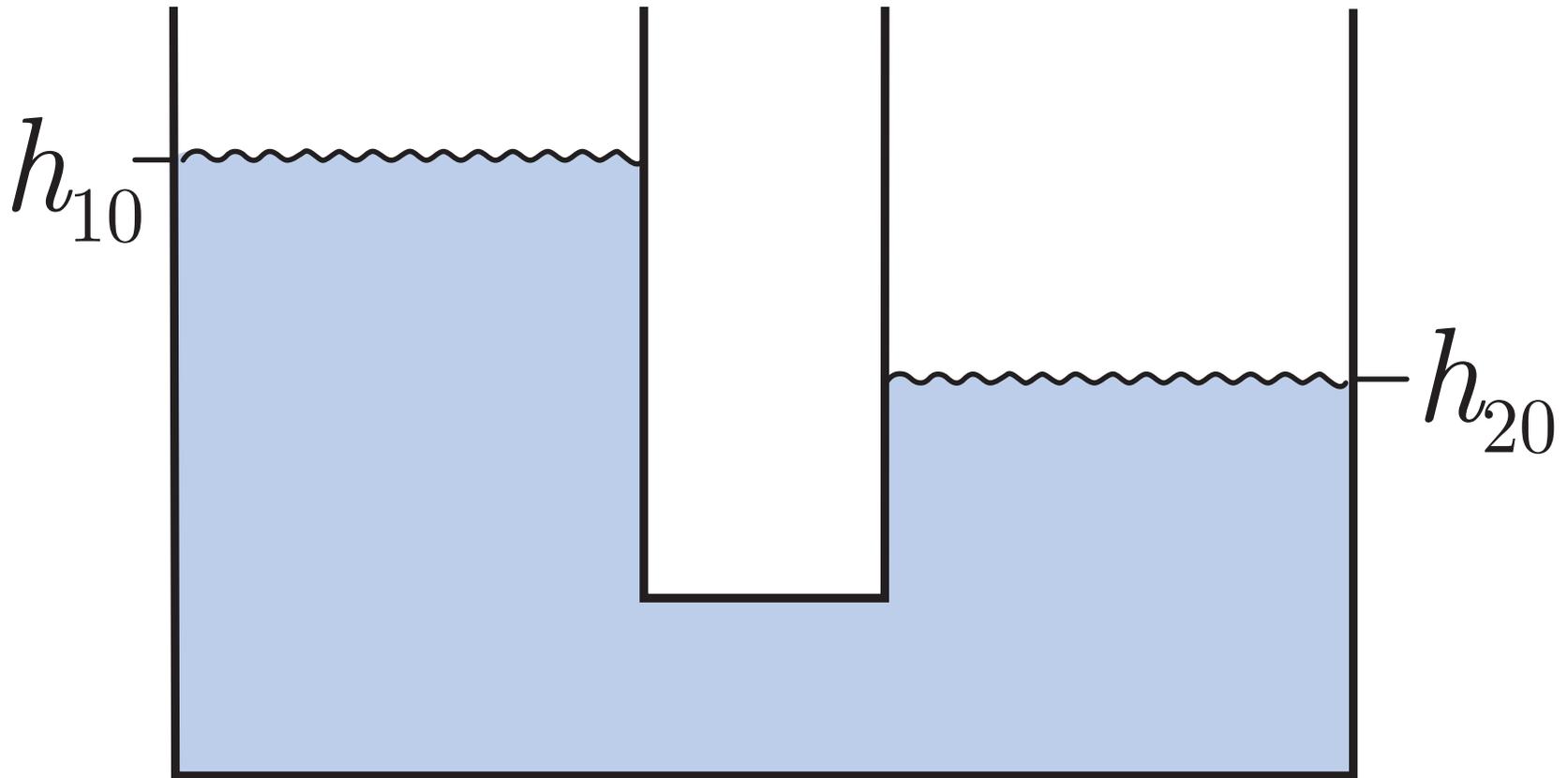


Abb. 5.3. Behältersystem

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

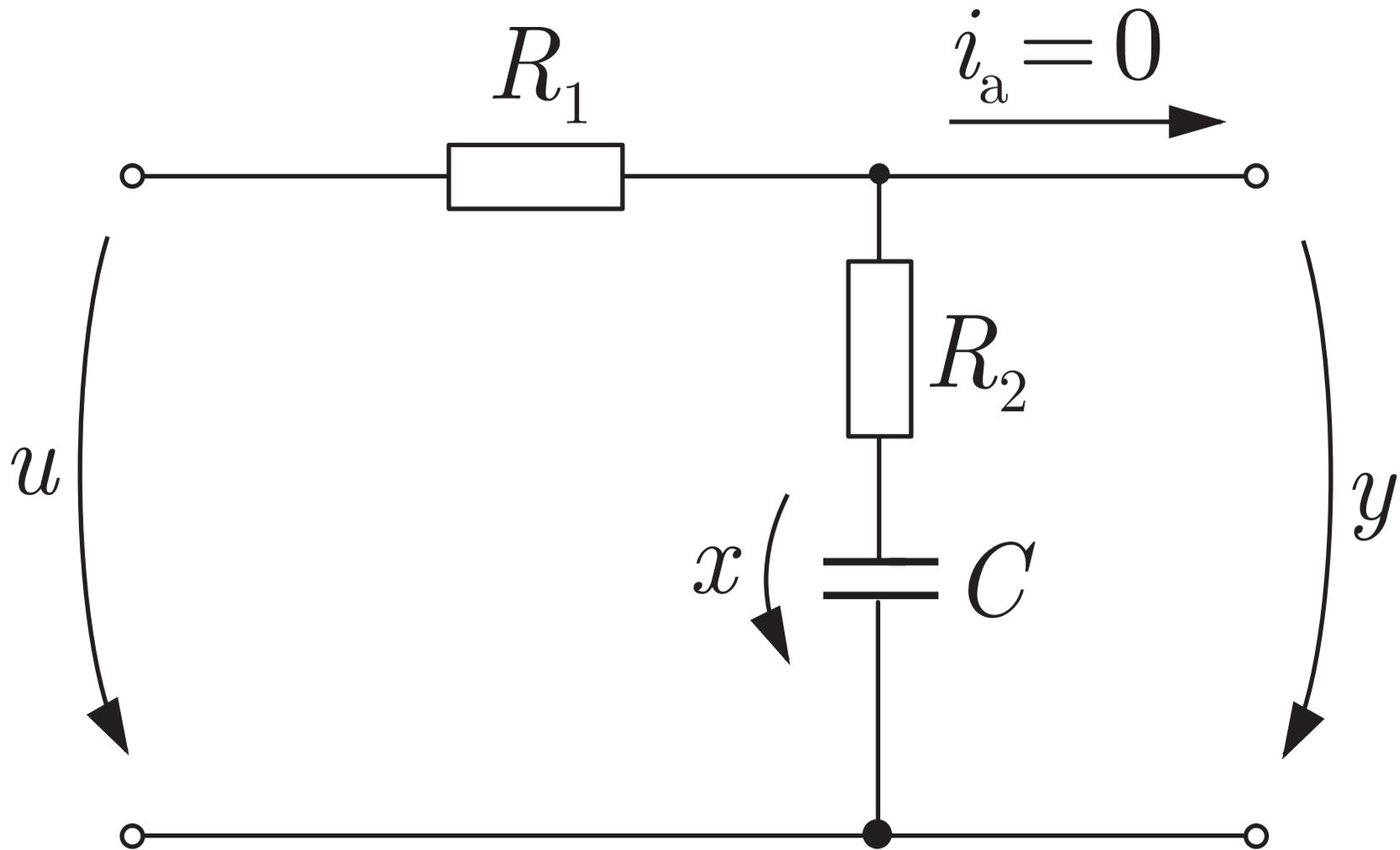


Abb. 5.4. RC-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

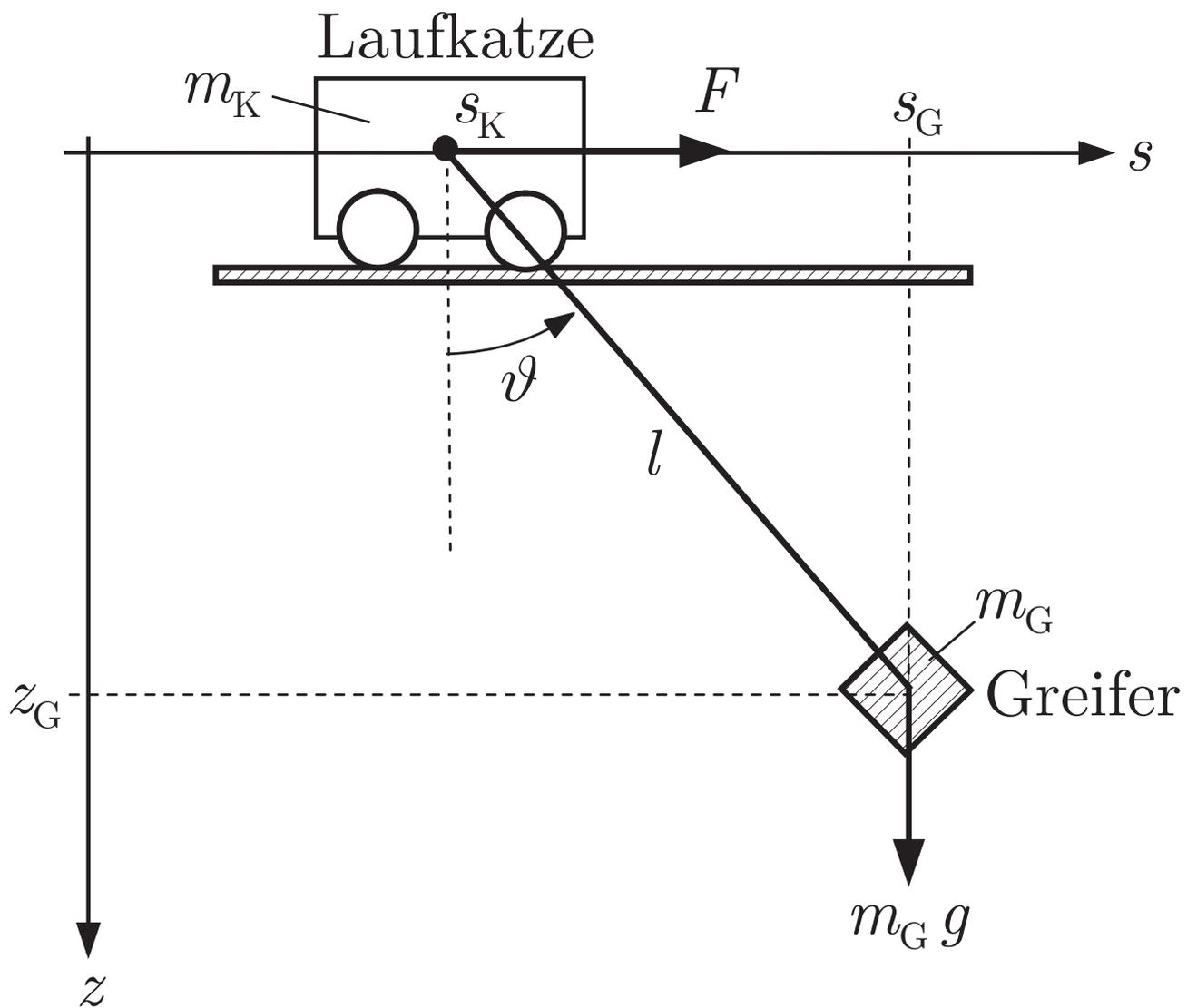


Abb. 5.5: Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

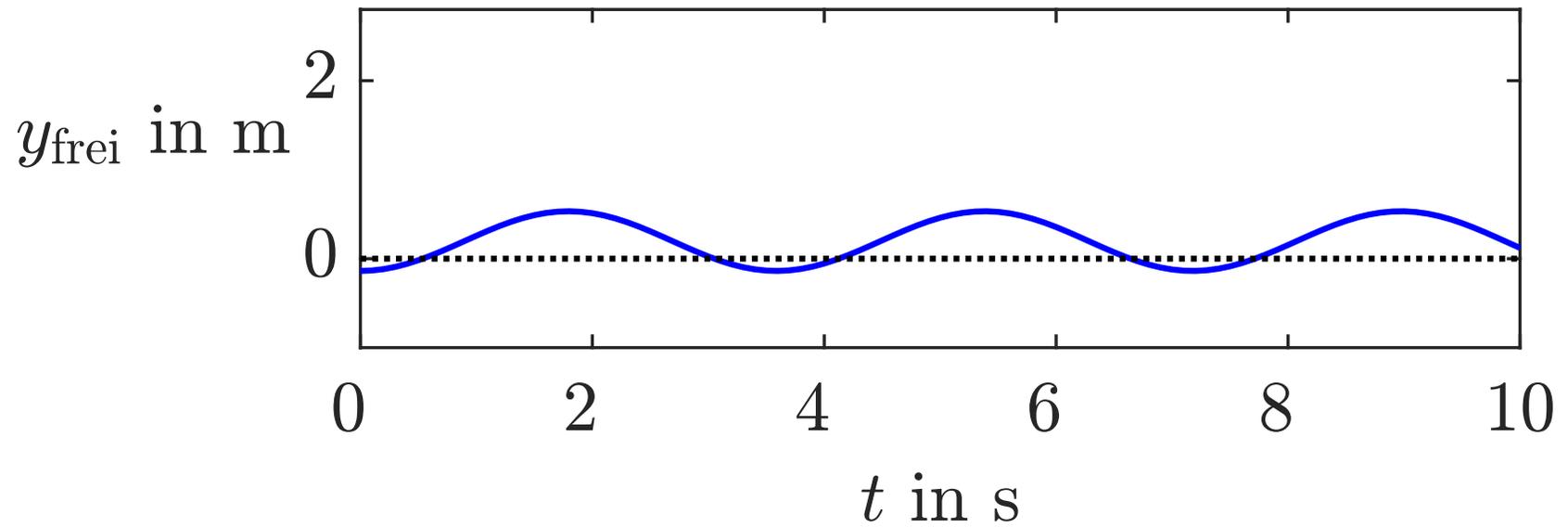


Abb. 5.6. Eigenbewegung der Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

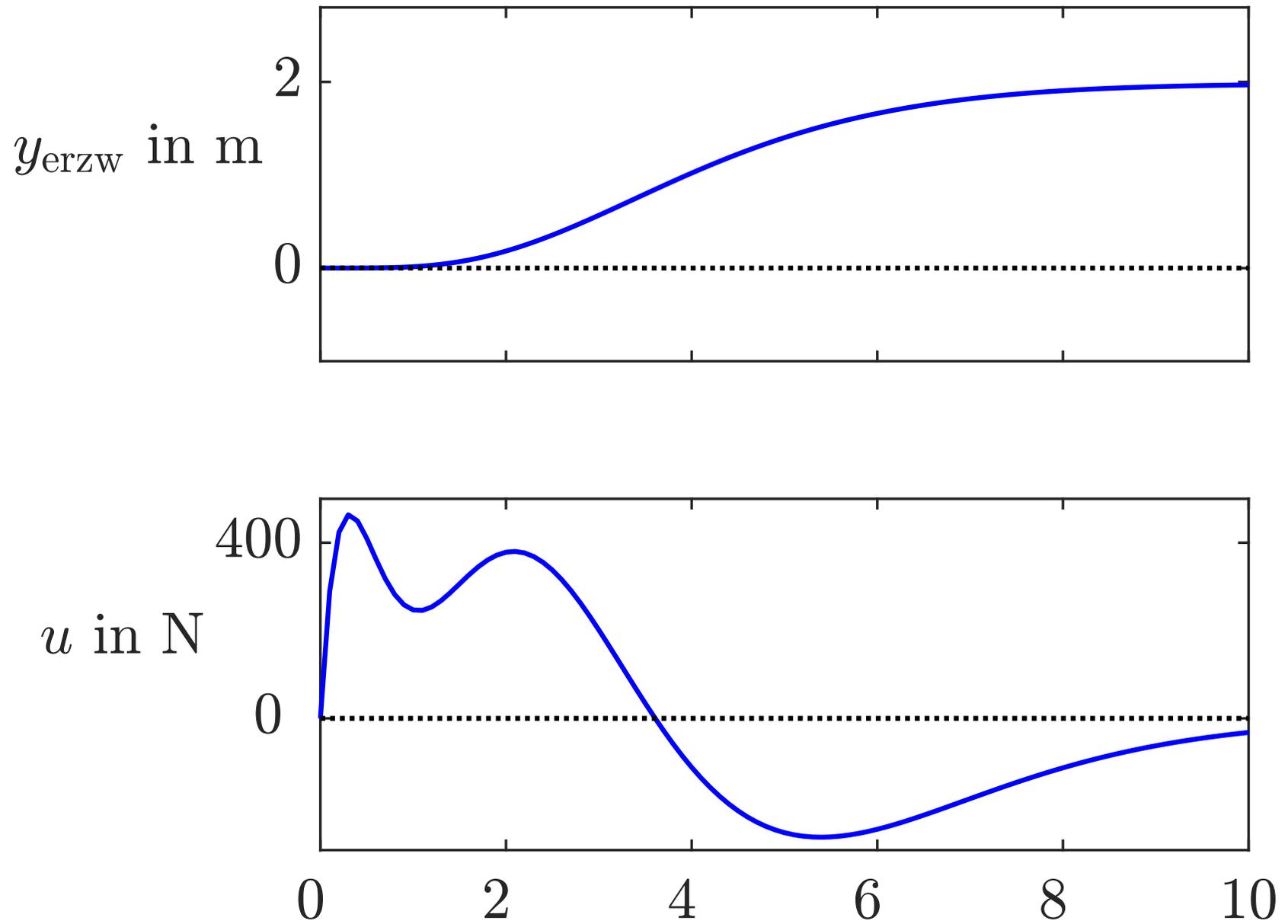


Abb. 5.7. Erzwungene Bewegung der Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

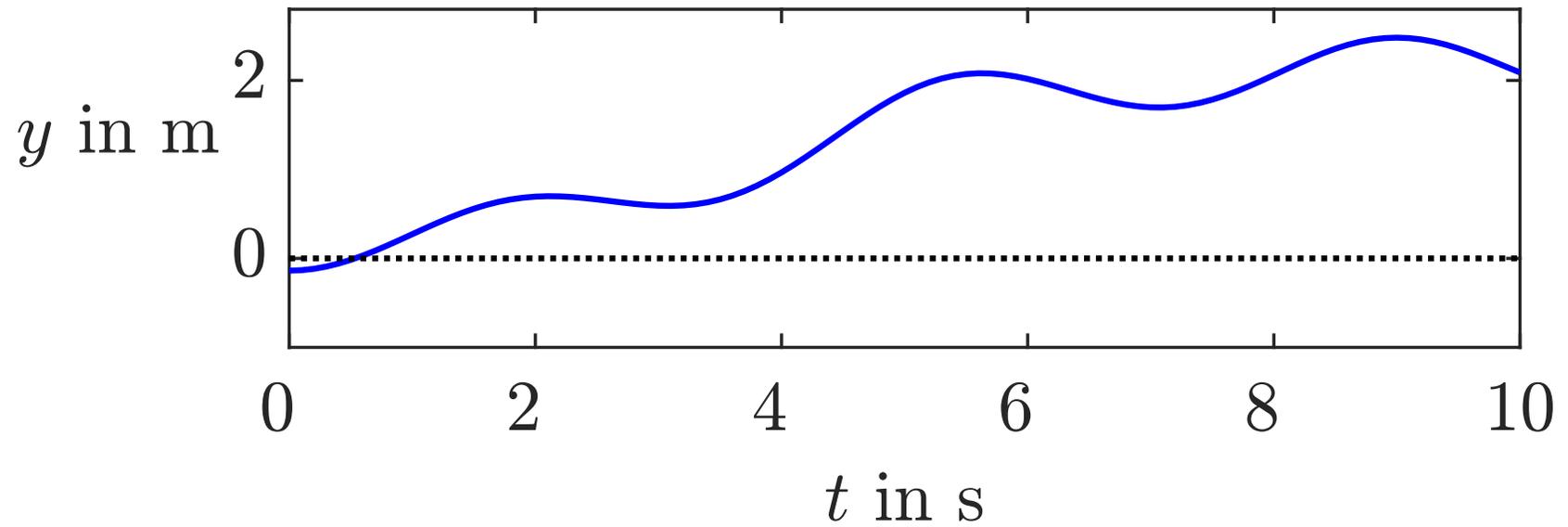


Abb. 5.8. Summe von Eigenbewegung und erzwungener Bewegung der Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

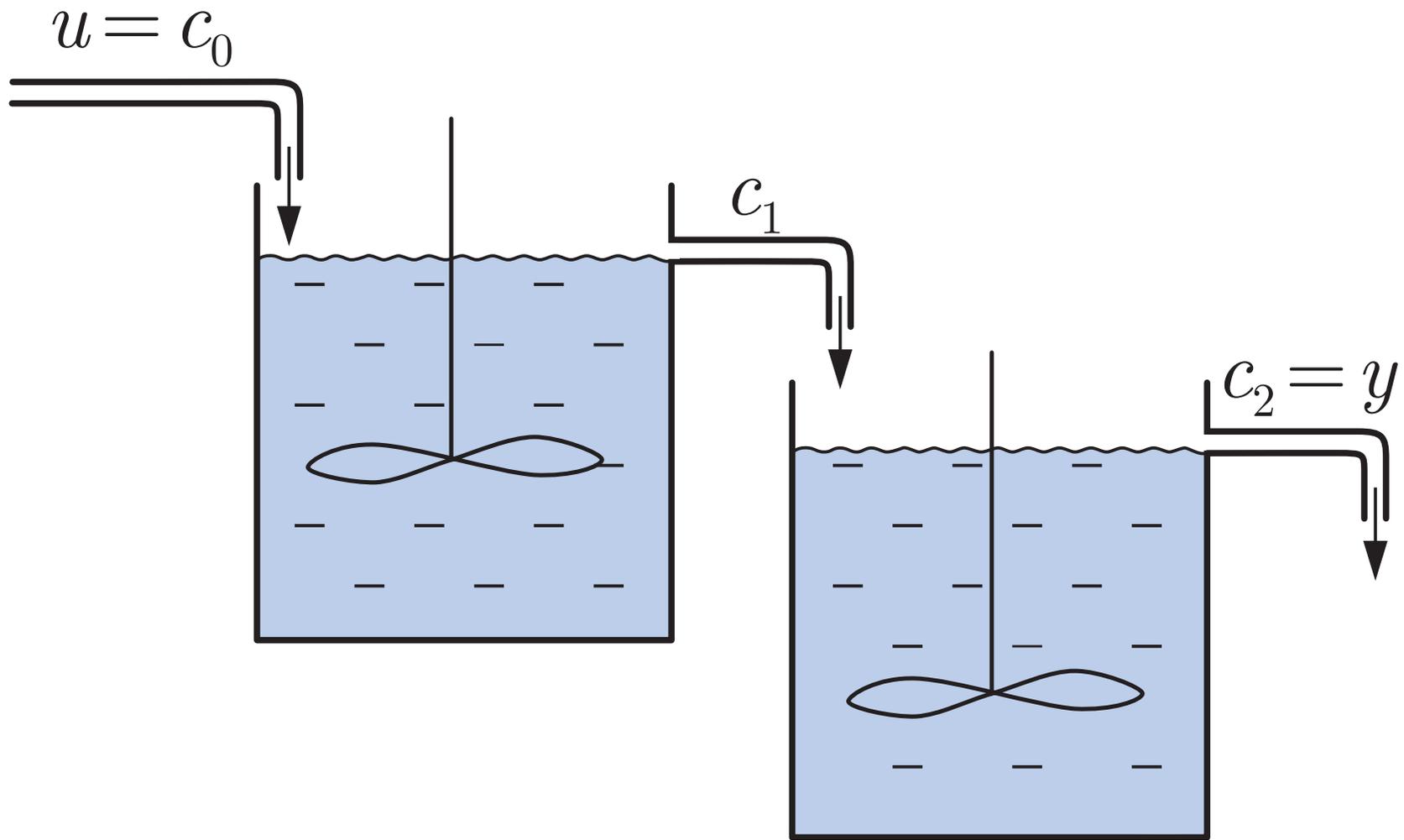


Abb. 5.9. Rührkessel

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

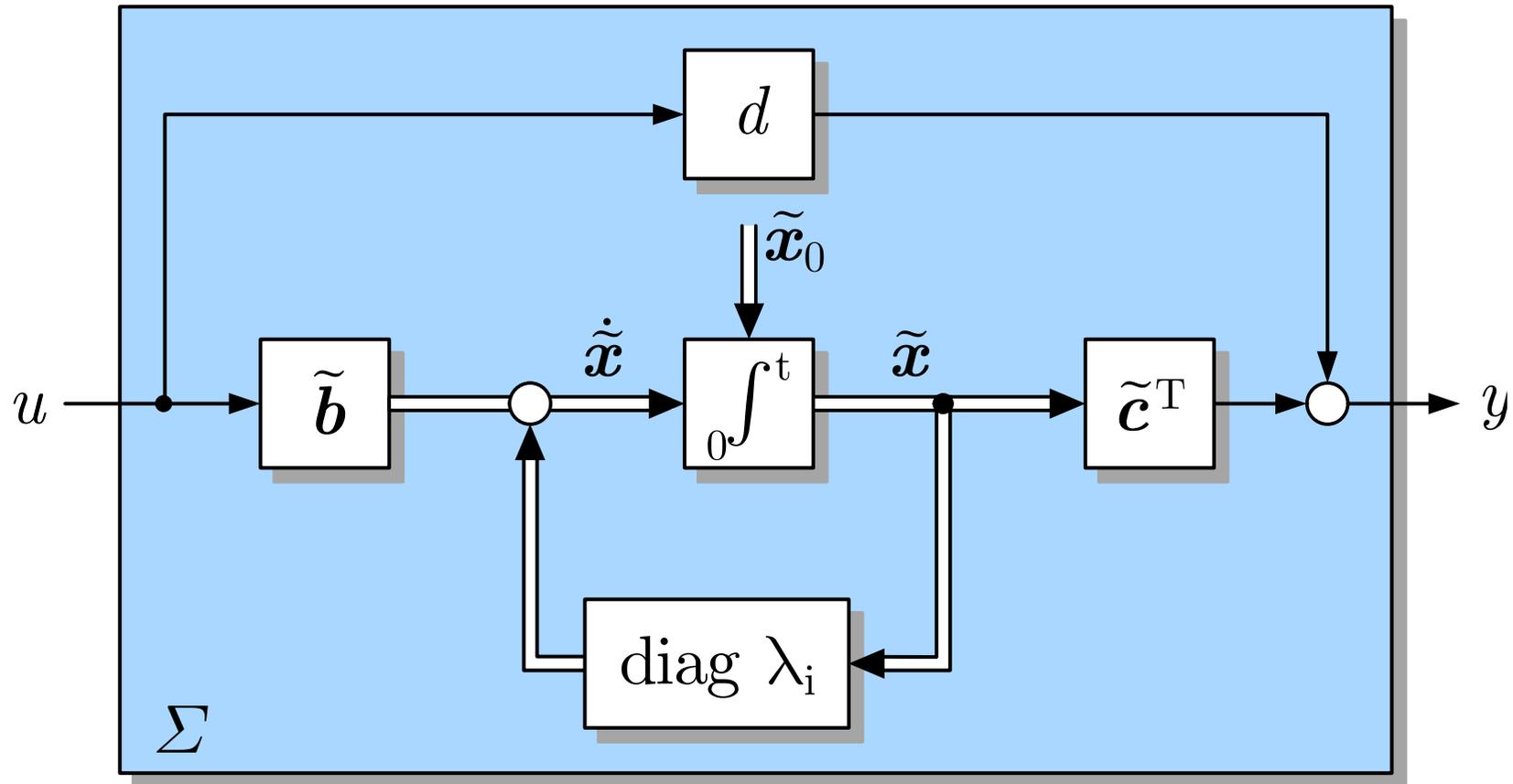


Abb. 5.10. Blockschaltbild des transformierten Modells

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

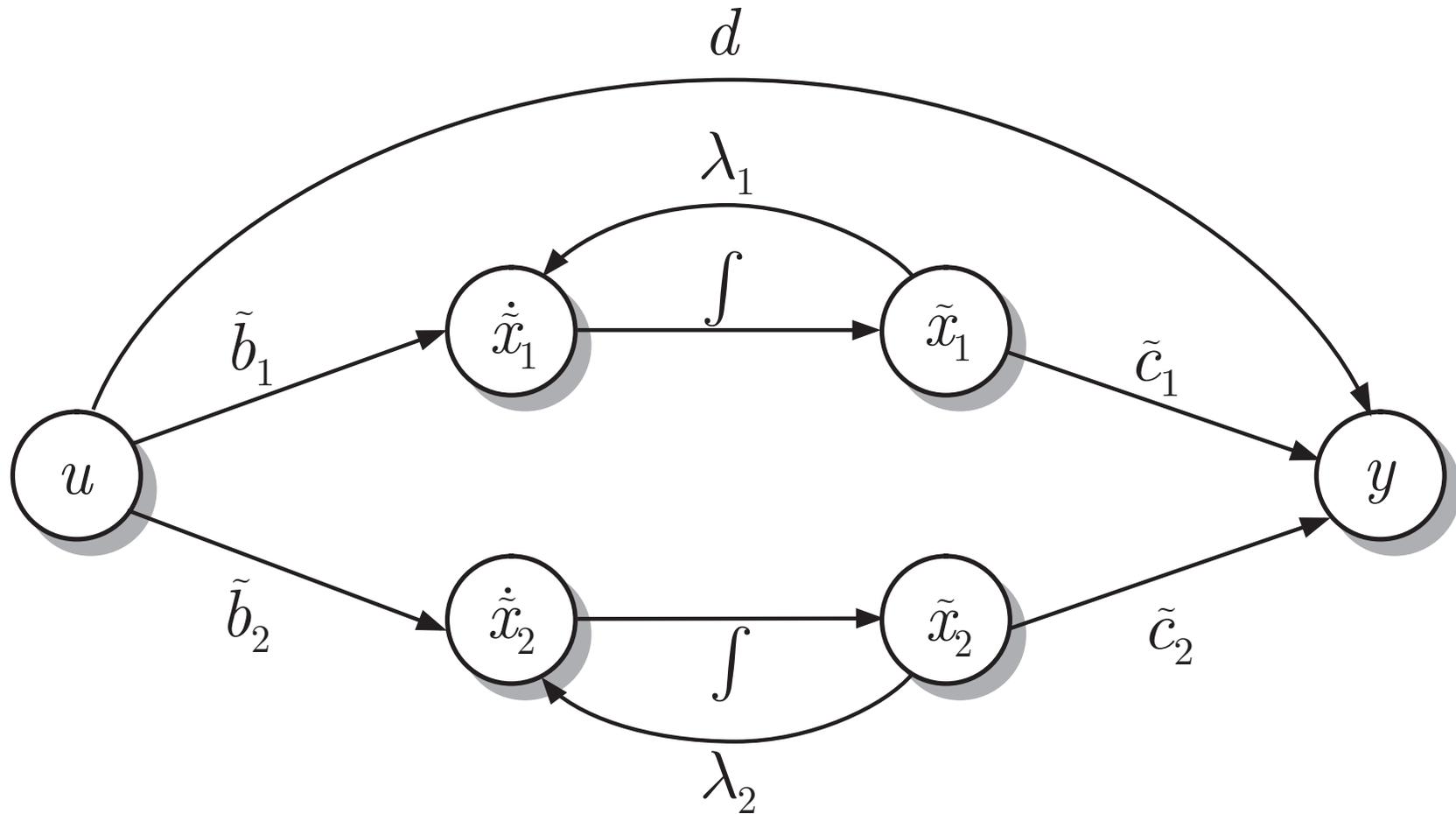


Abb. 5.11. Signalflussgraph eines Systems zweiter Ordnung mit kanonischen Zustandsvariablen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

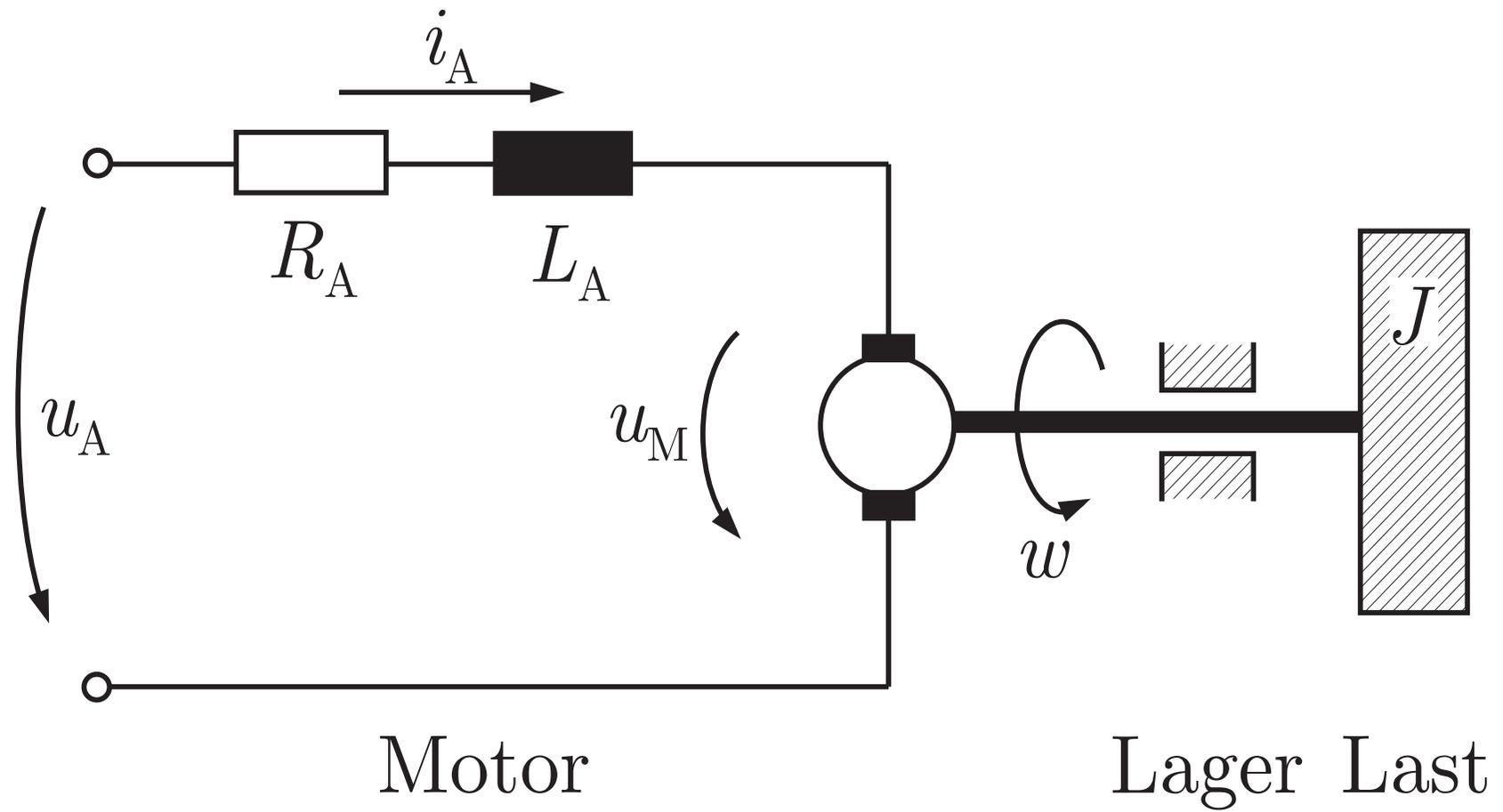


Abb. 5.12. Gleichstrommotor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

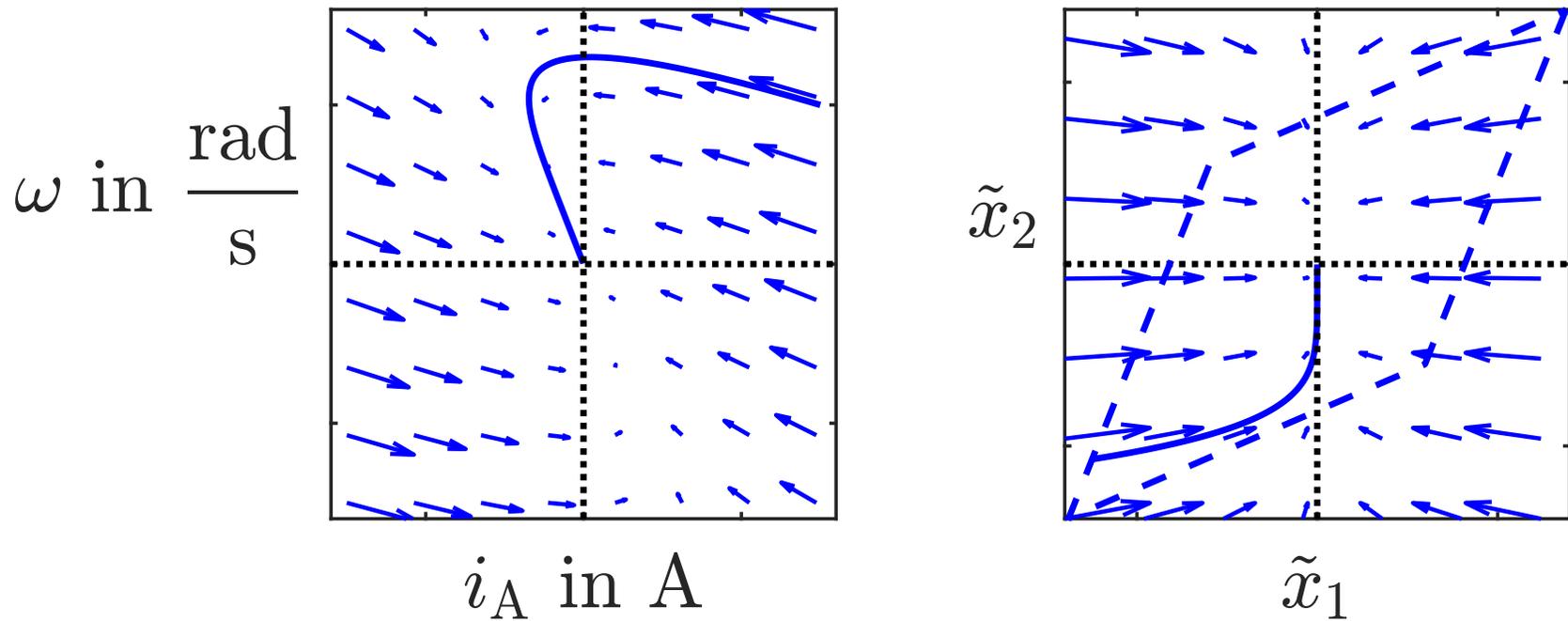


Abb. 5.13. Vektorfeld des Gleichstrommotors (links im i_A/ω -Koordinatensystem; rechts im transformierten Zustandsraum \tilde{x}_1/\tilde{x}_2)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

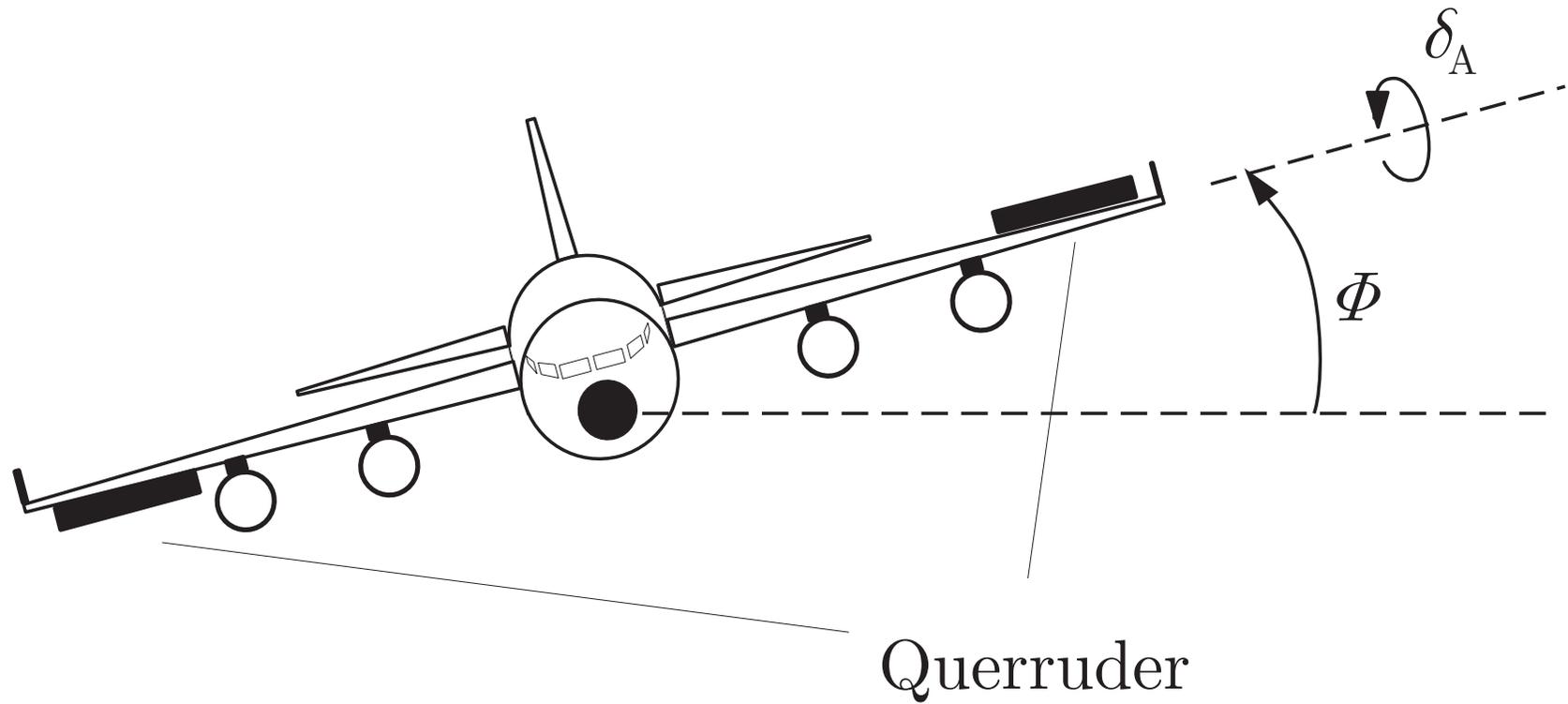


Abb. 5.14. Flugzeug als Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

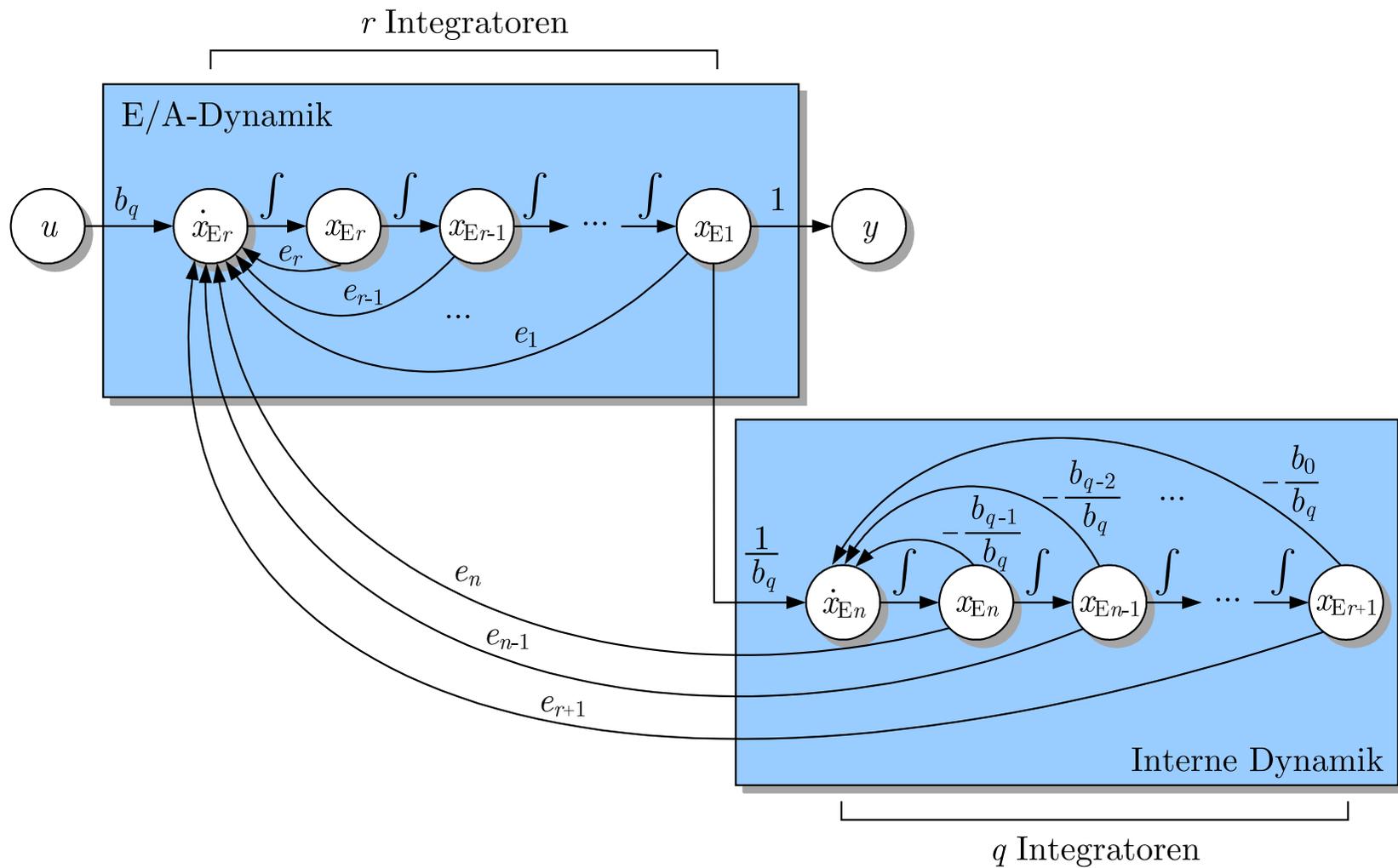


Abb. 5.15. Signalflussgraph des Zustandsraummodells in der E/A-Normalform

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

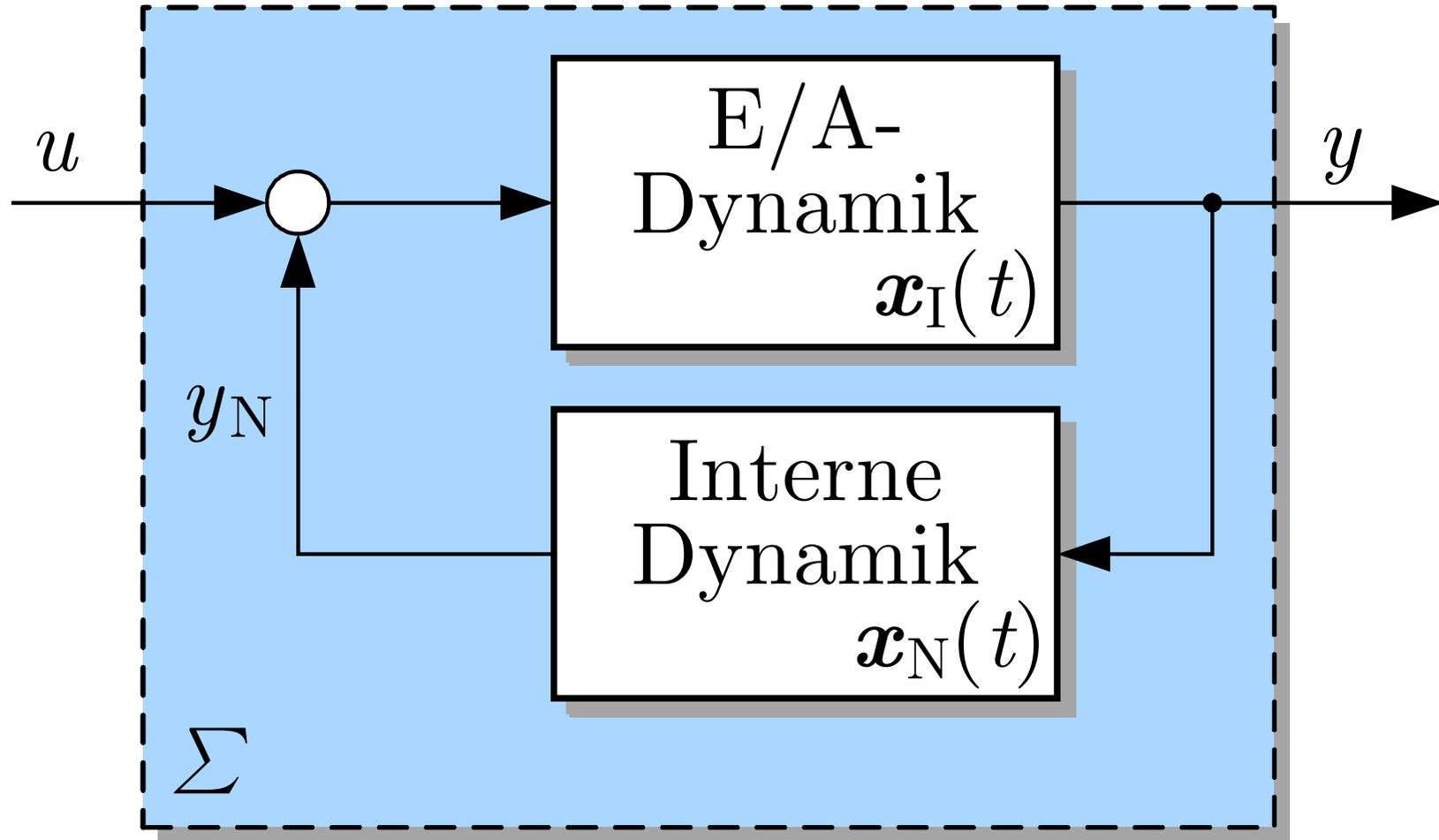


Abb. 5.16. Strukturbild des Zustandsraummodells in der E/A-Normalform

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

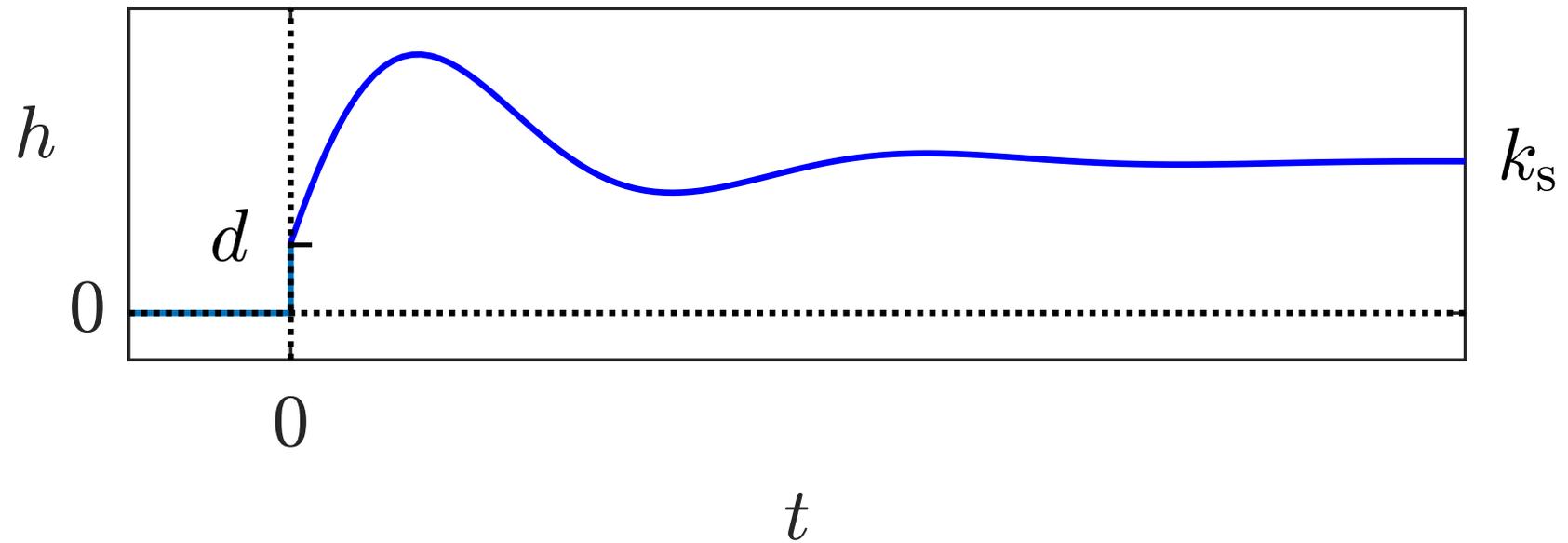


Abb. 5.17. Übergangsfunktion eines Systems zweiter Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

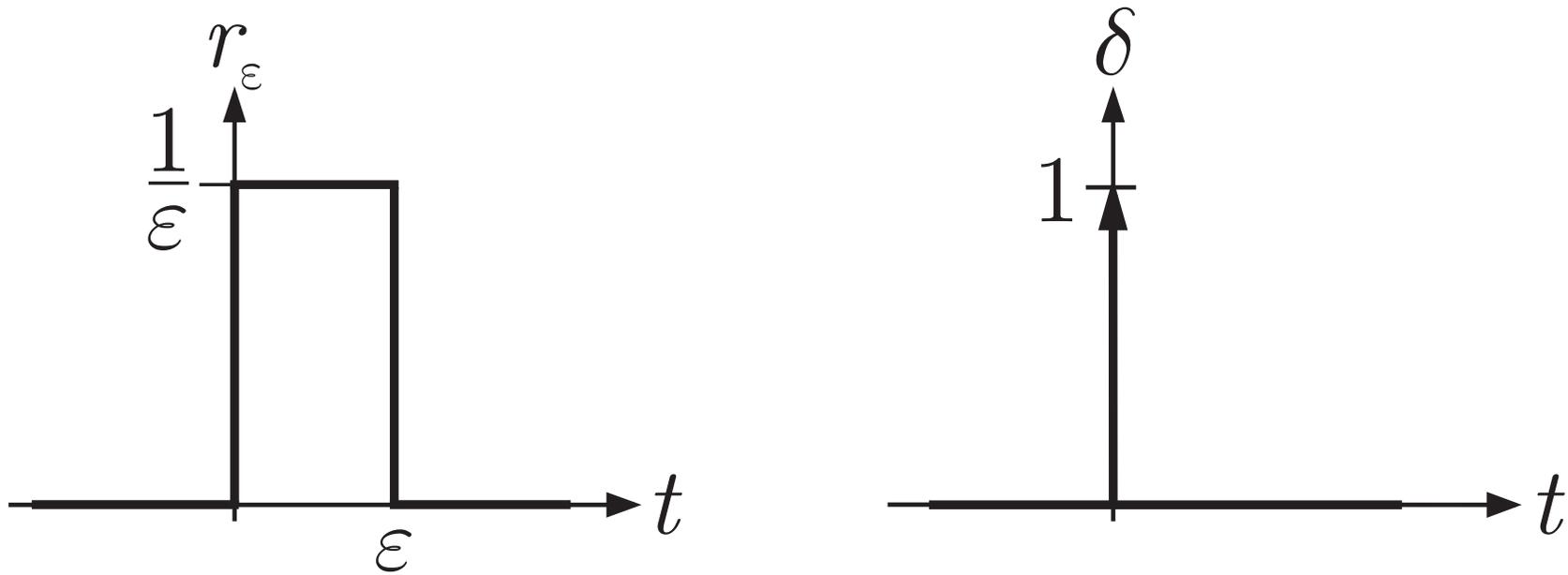


Abb. 5.18. Definition und Darstellung des Diracimpulses

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

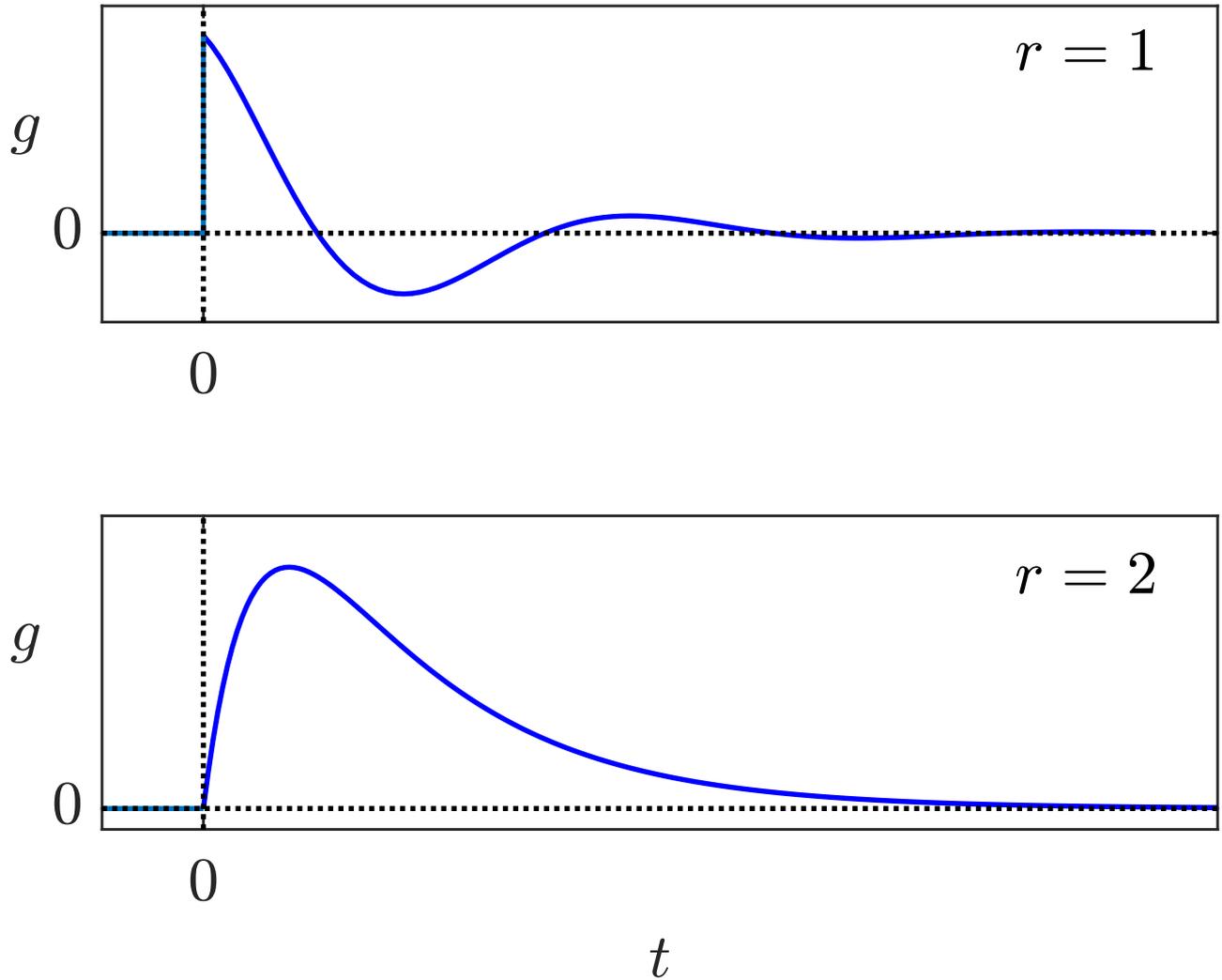


Abb. 5.19: Gewichtsfunktion von zwei Systemen zweiter Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

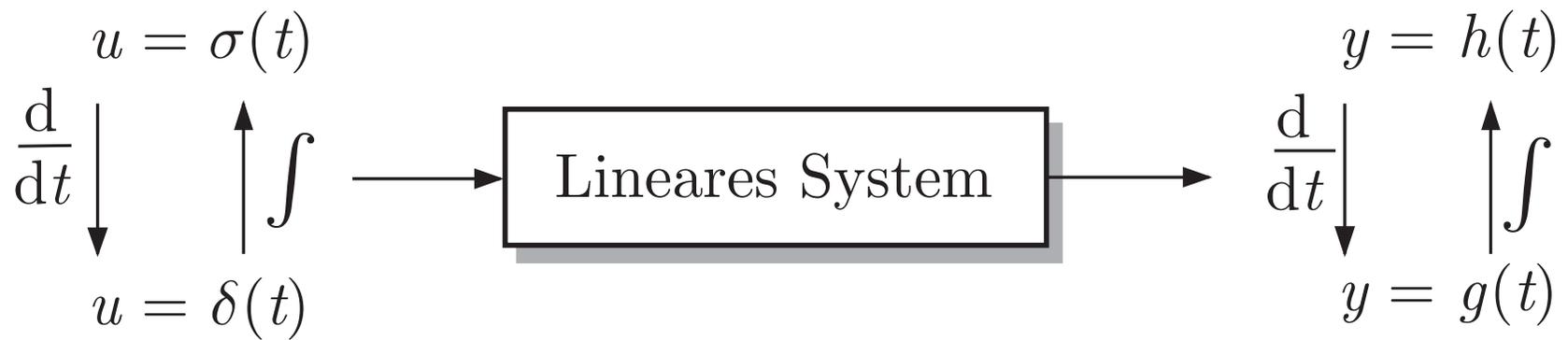


Abb. 5.20. Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

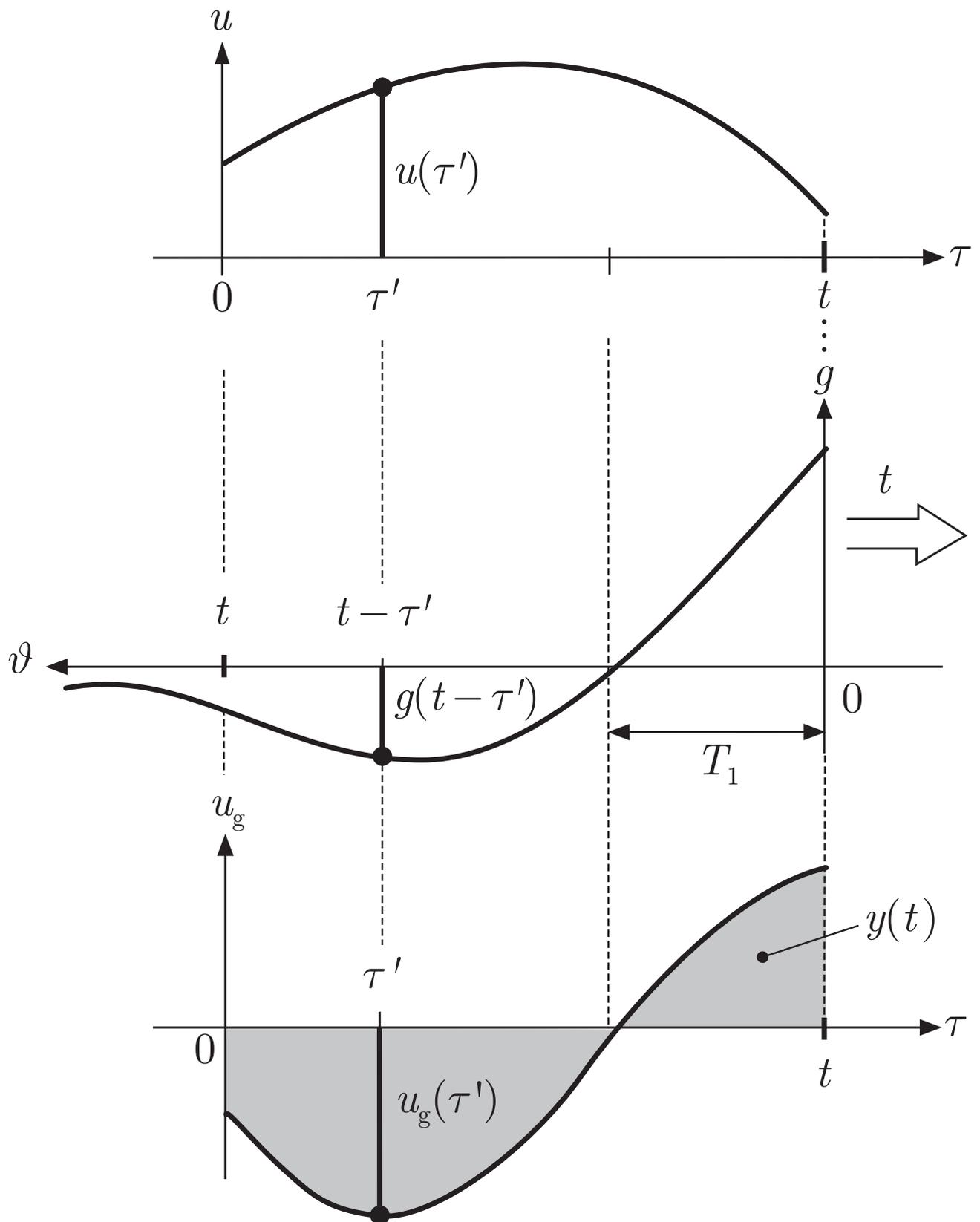


Abb. 5.21: Berechnung der Ausgangsgröße $y(t)$ mit Hilfe des Faltungsintegrals

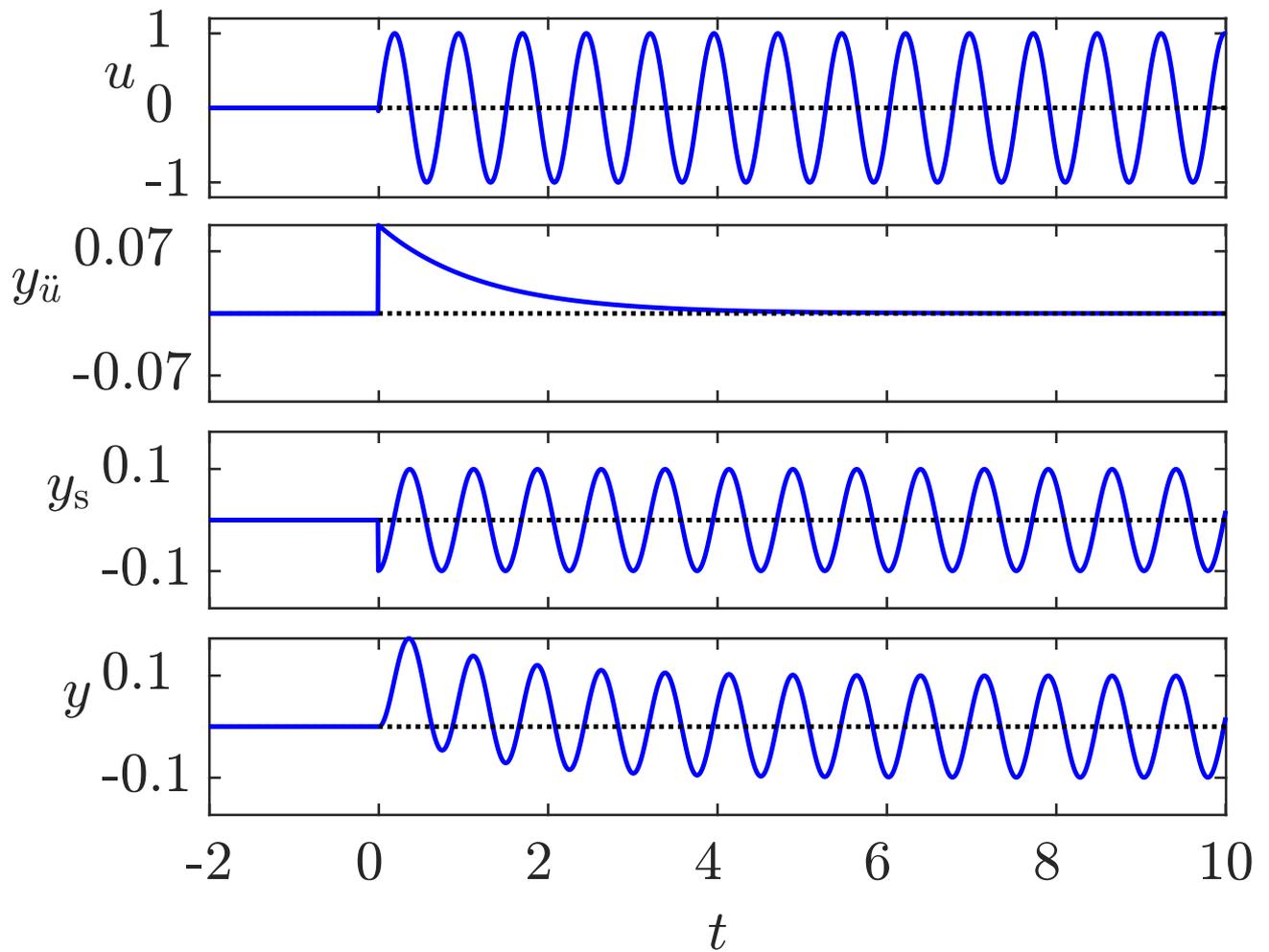


Abb. 5.22: Übergangsverhalten und stationäres Verhalten eines Systems erster Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

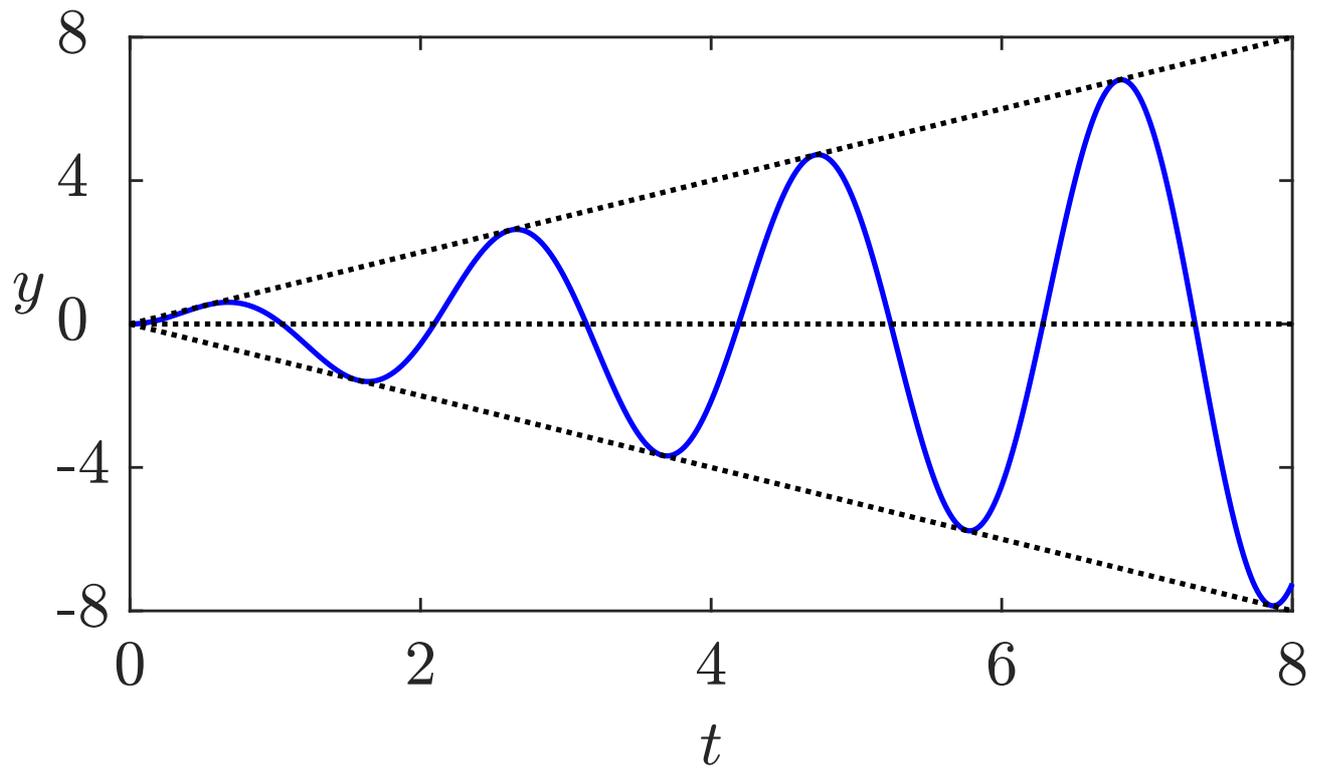


Abb. 5.23: Verhalten eines Oszillators bei Resonanz

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

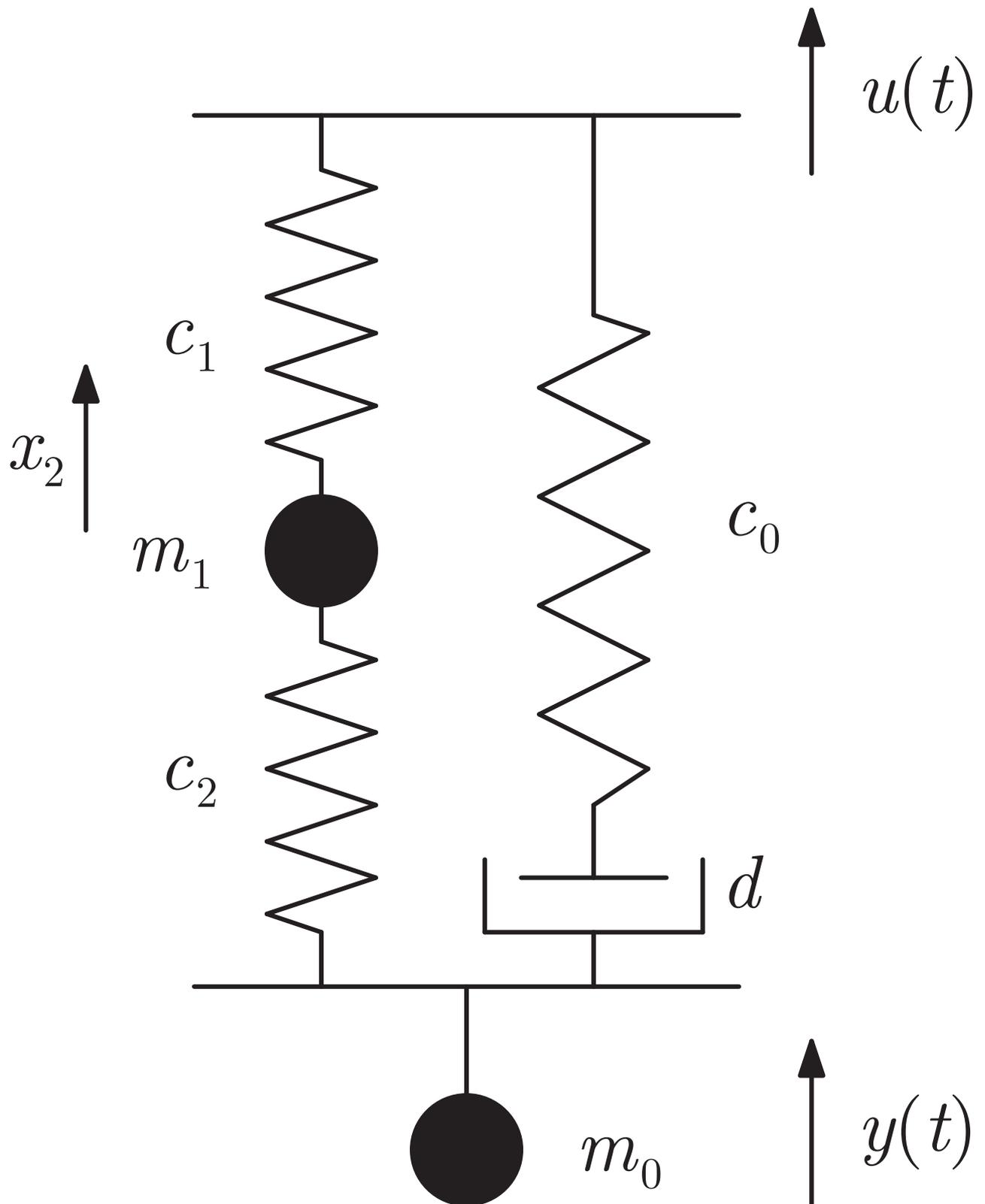


Abb. 5.24: Feder-Masse-Dämpfer-System Σ_{FMD}

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

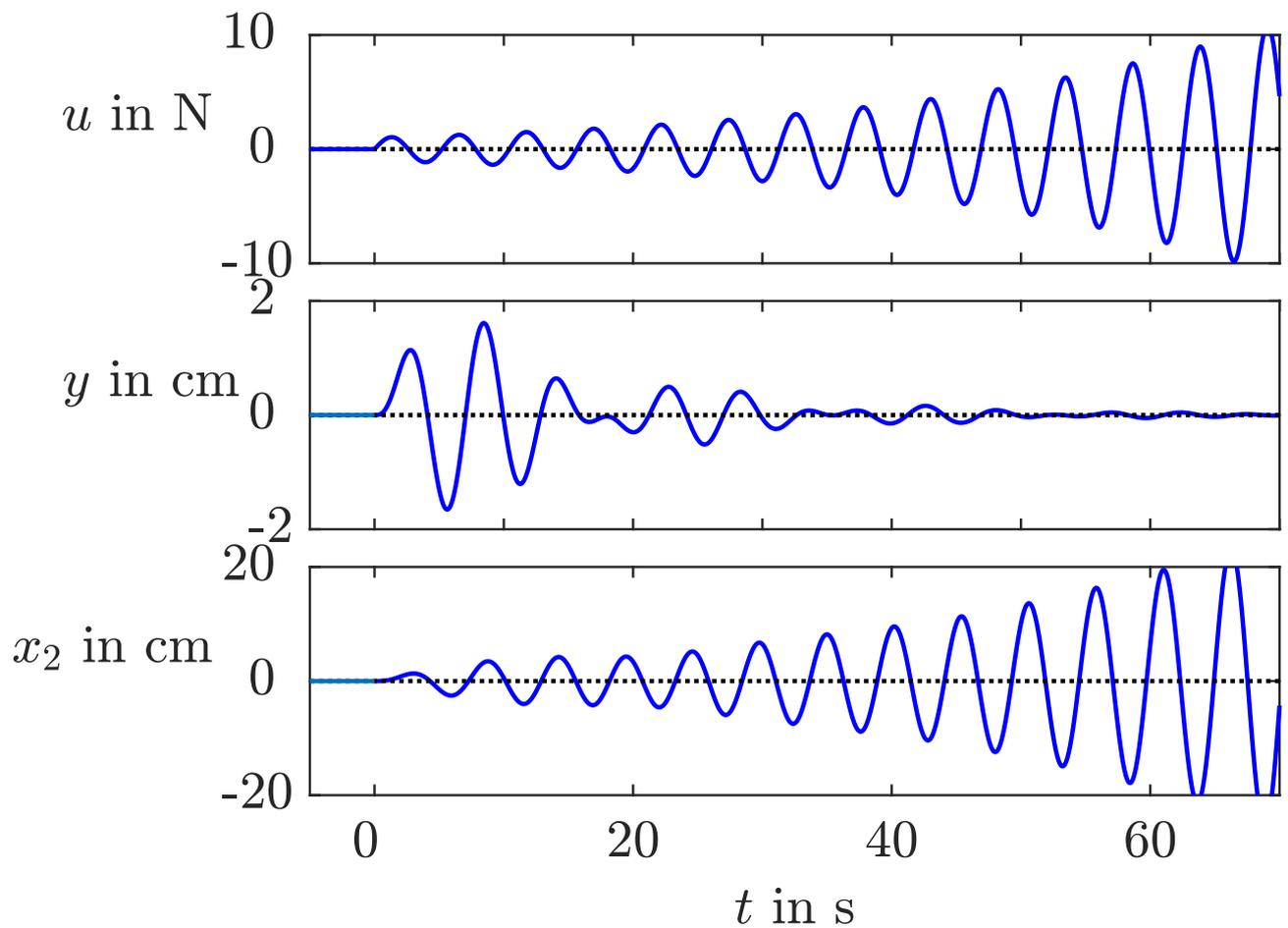


Abb. 5.25: Eingangsgröße, Ausgangsgröße und Position der Masse m_1 bei Erregung durch $u(t) = e^{0,0344t} \sin 1,206 t$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

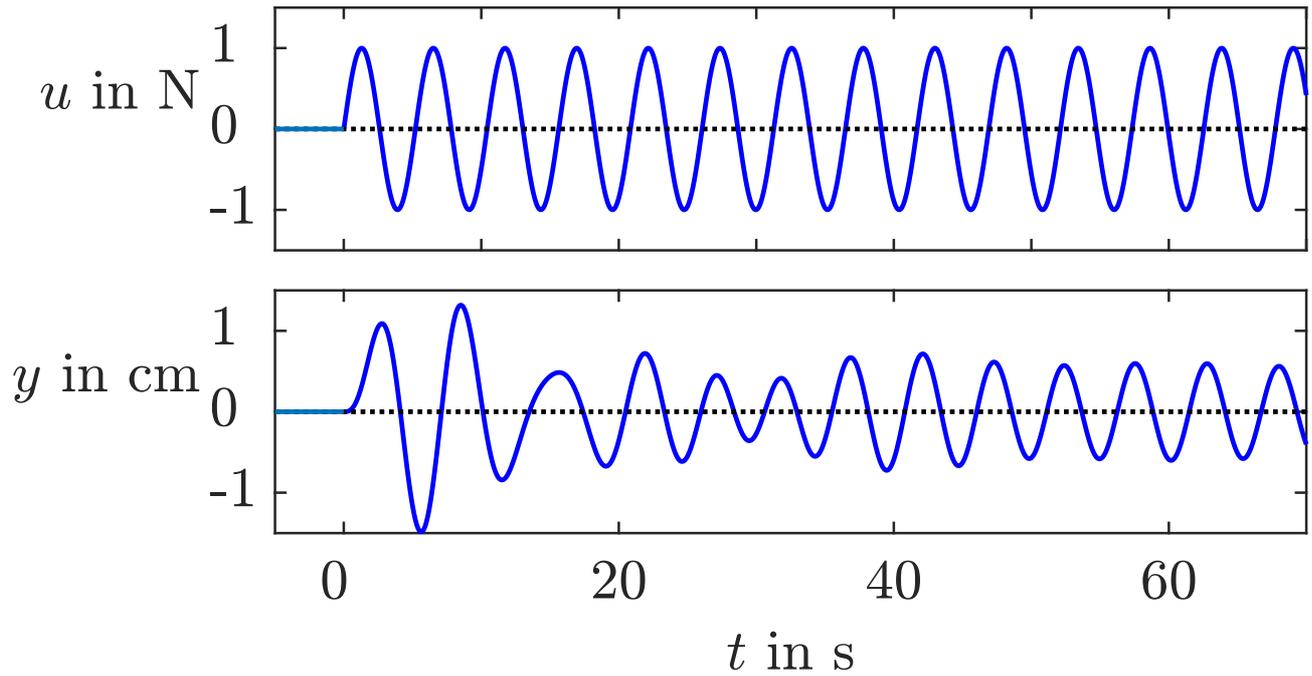


Abb. 5.26: Verhalten des Feder-Masse-Dämpfer-Systems bei sinusförmiger Erregung $u(t) = \sin 1,206 t$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

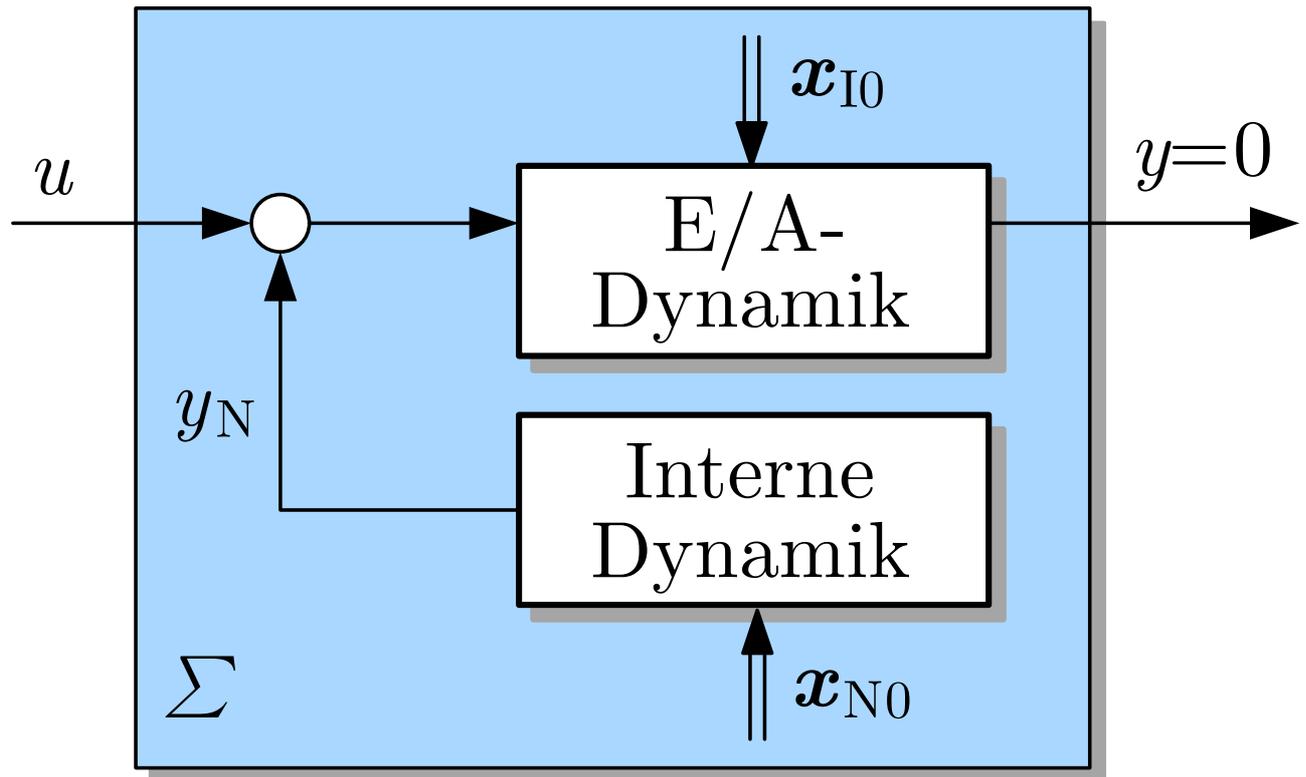


Abb. 5.27: System in E/A-Normalform für $y(t) = 0$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

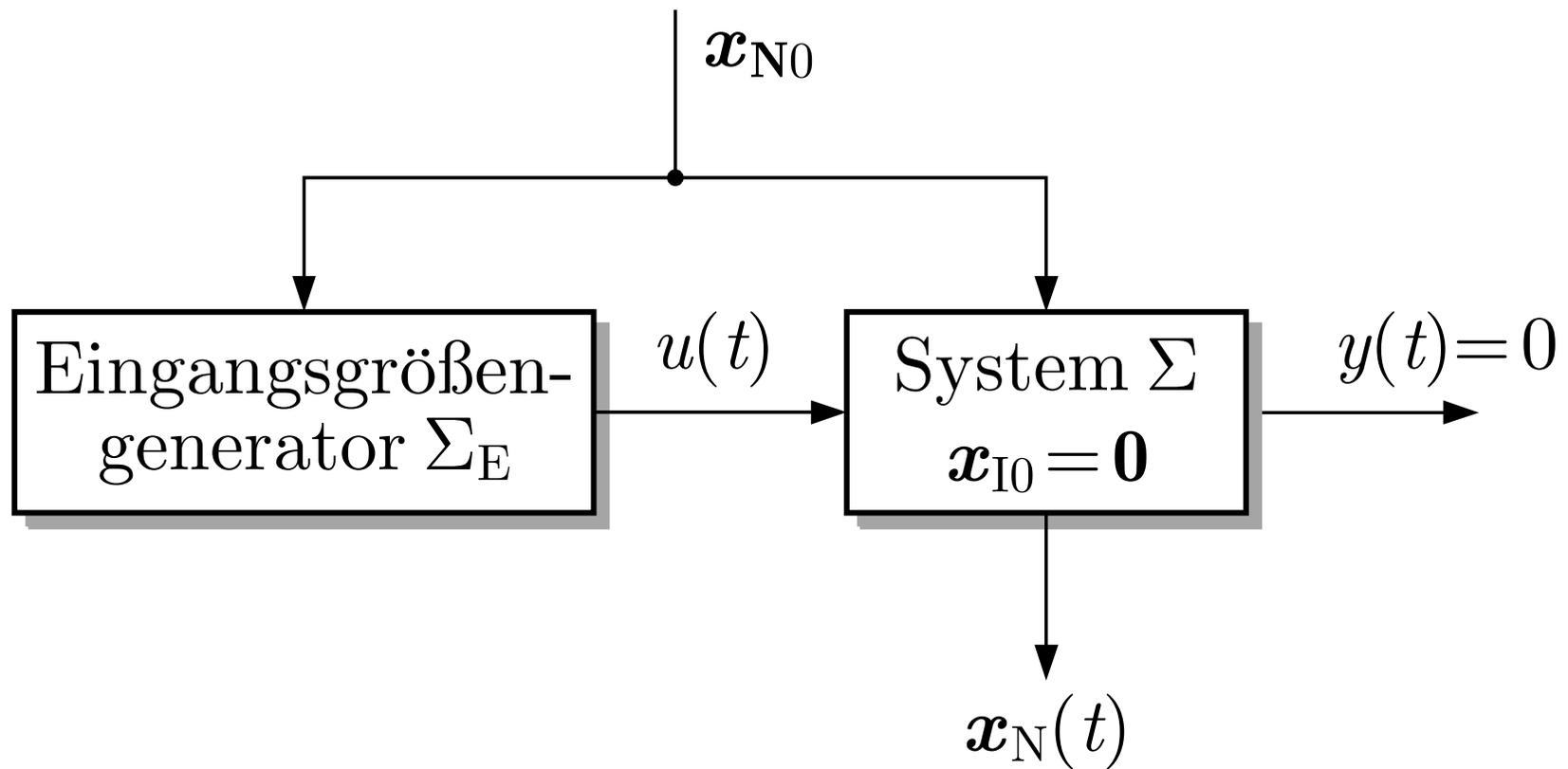


Abb. 5.28. Nulldynamik eines Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

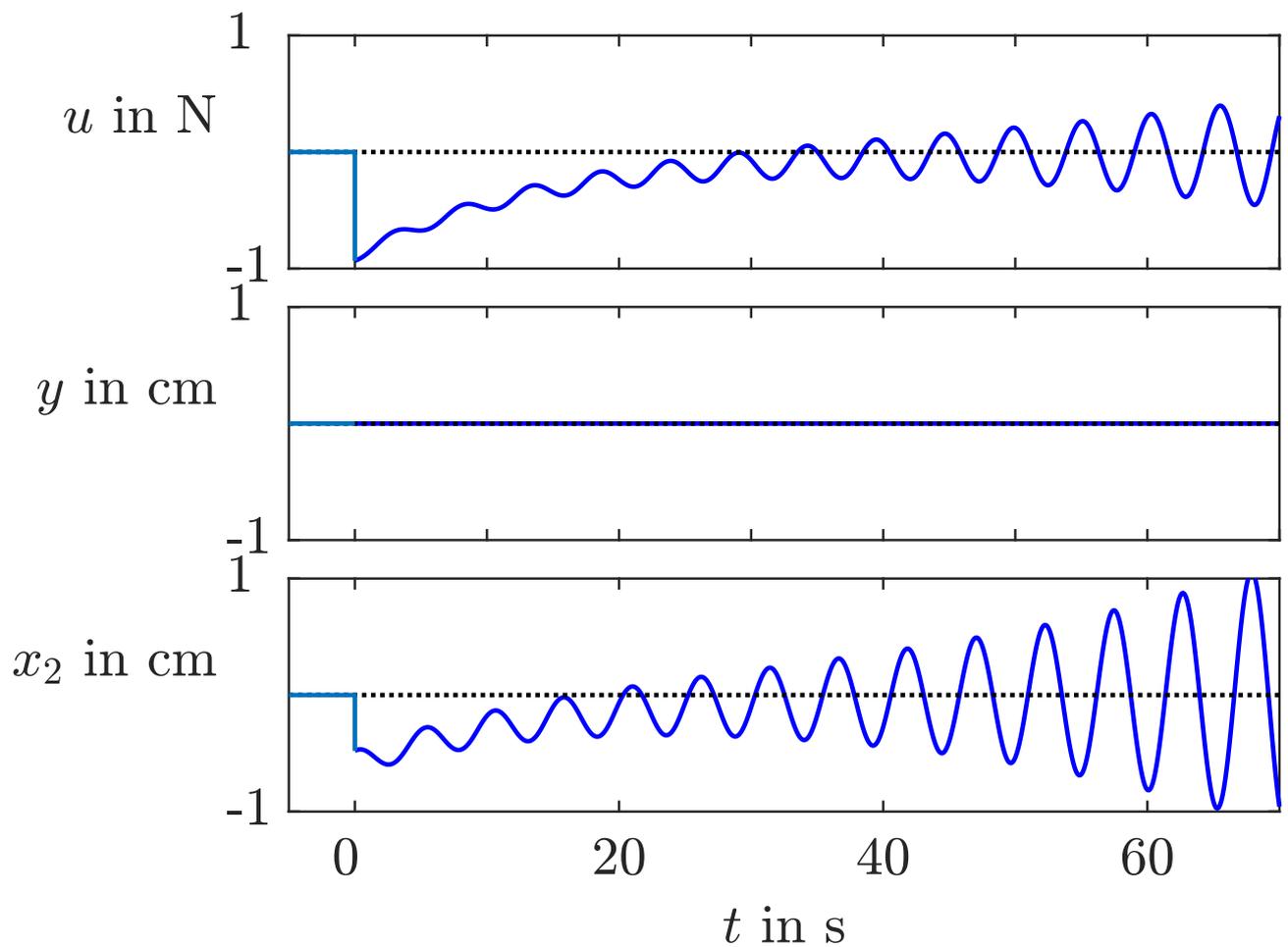


Abb. 5.29: Verhalten des Feder-Masse-Dämpfer-Systems für das vom Eingangsgrößengenerator erzeugte Signal $u(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

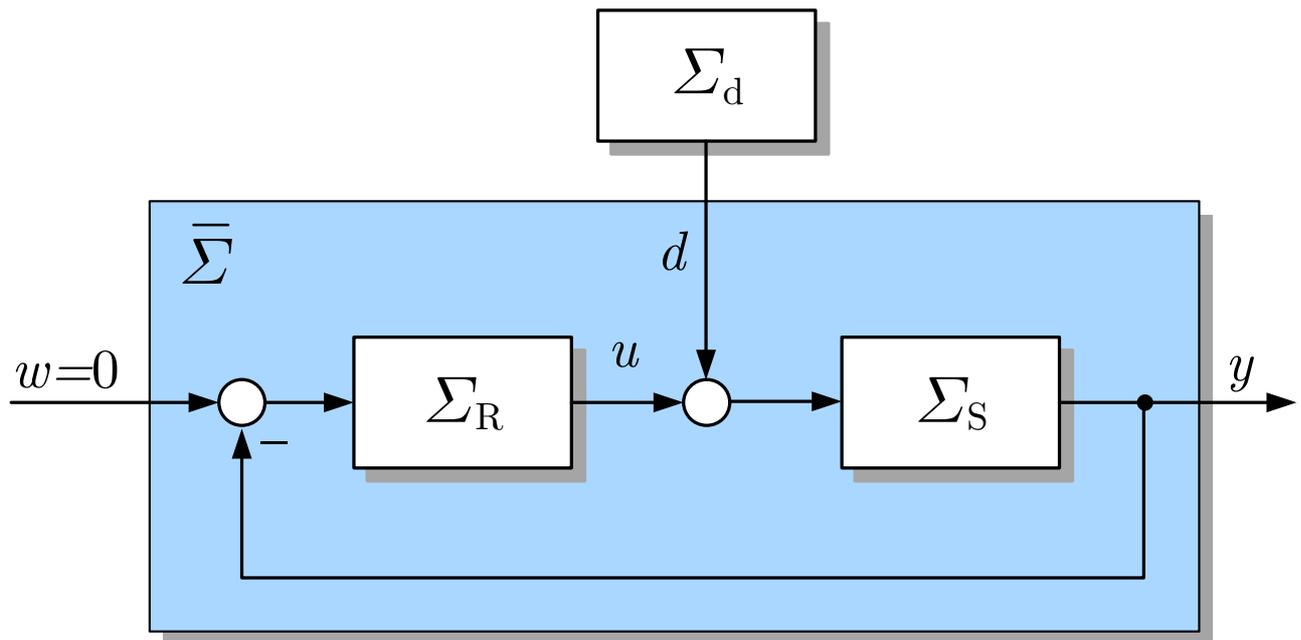


Abb. 5.30: Regelkreis mit Störung am Eingang der Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

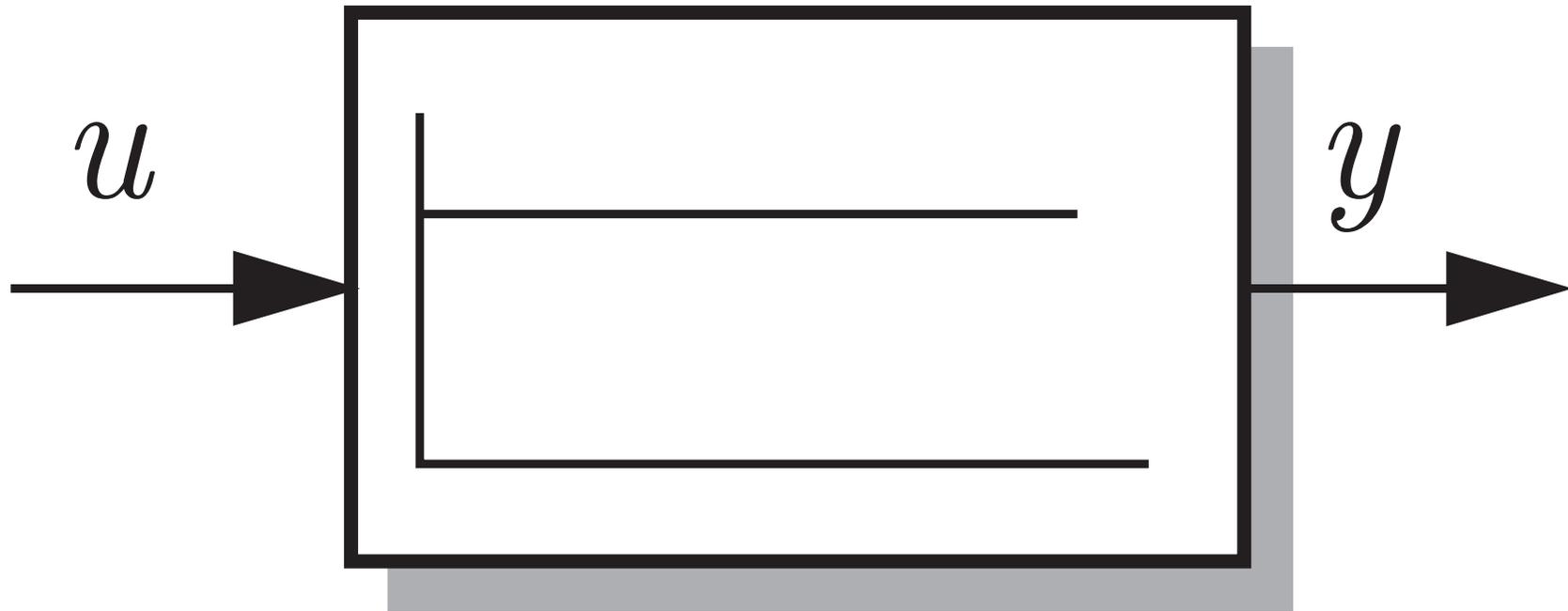


Abb. 5.31. Symbol des P-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

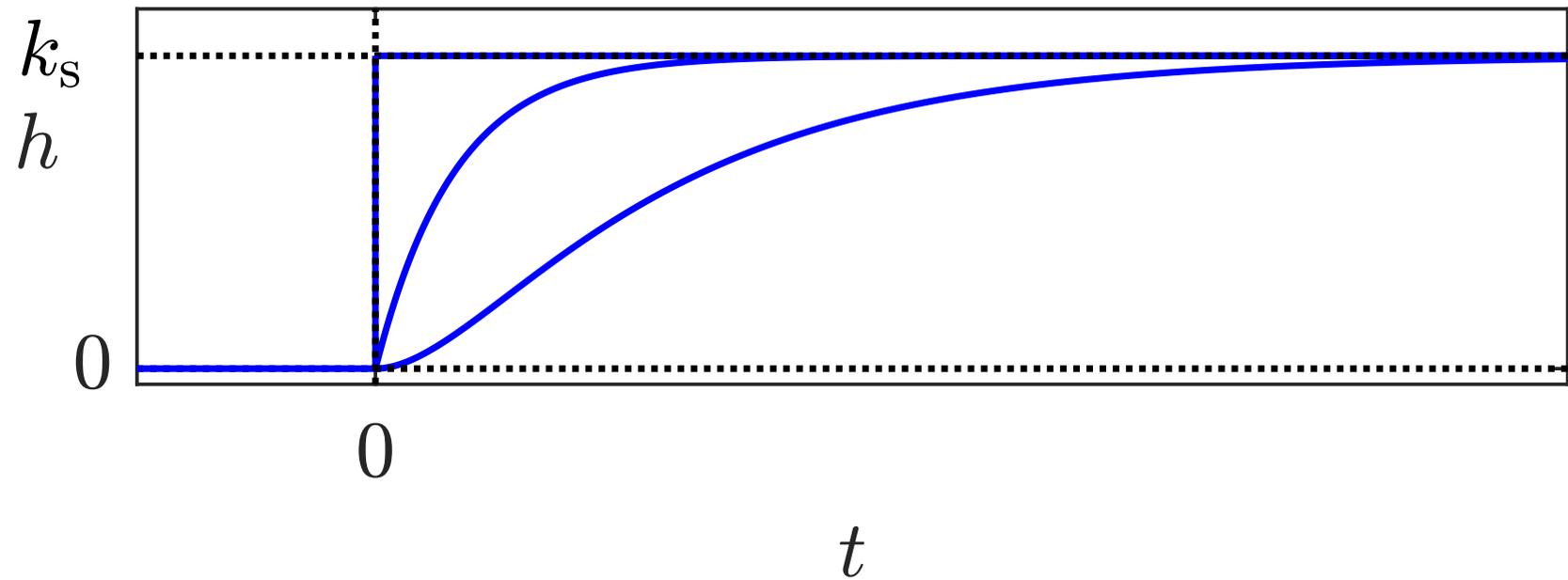


Abb. 5.32. Übergangsfunktion von P-, PT₁- und PT₂-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

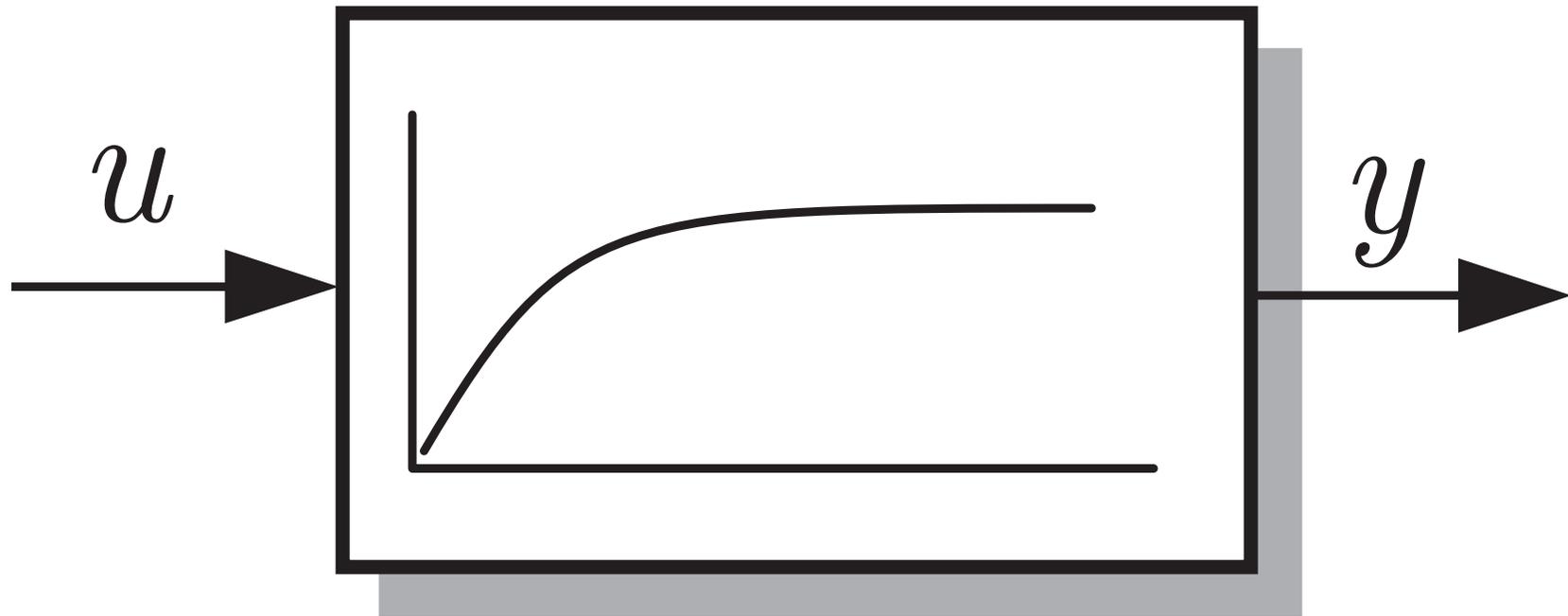


Abb. 5.33. Symbol des PT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

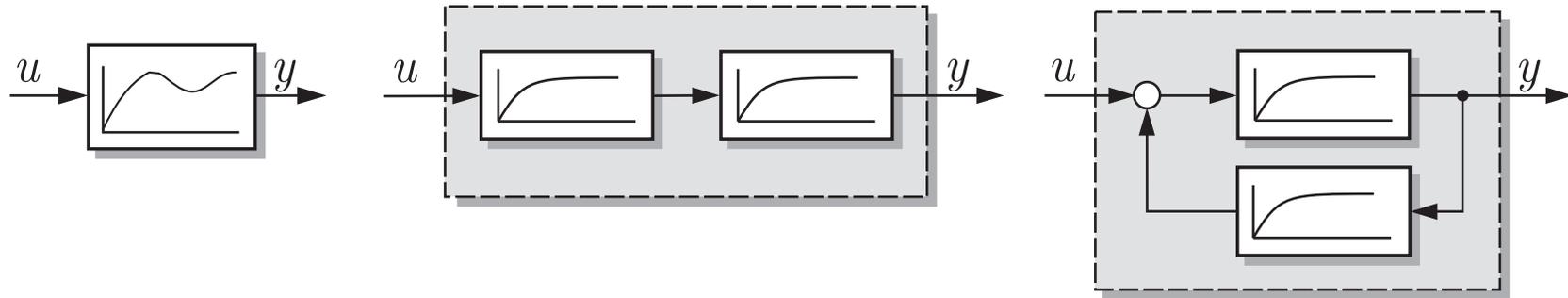


Abb. 5.34. Symbol des schwingungsfähigen PT₂-Gliedes (links) und Blockschaltbilder der aus zwei PT₁-Gliedern zusammengesetzten PT₂-Glieder (Mitte und rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

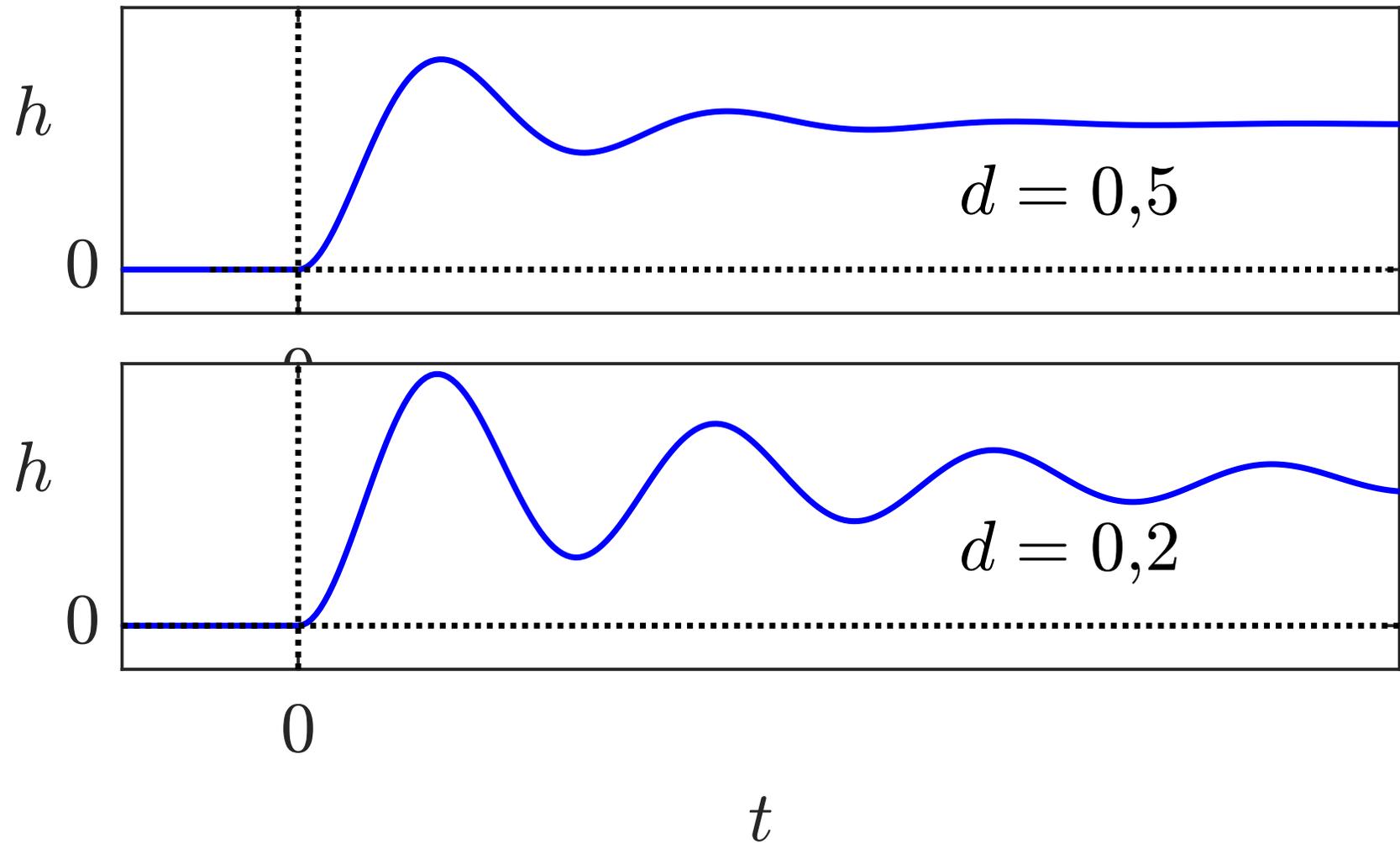


Abb. 5.35. Übergangsfunktionen von PT_2 -Gliedern mit kleiner Dämpfung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

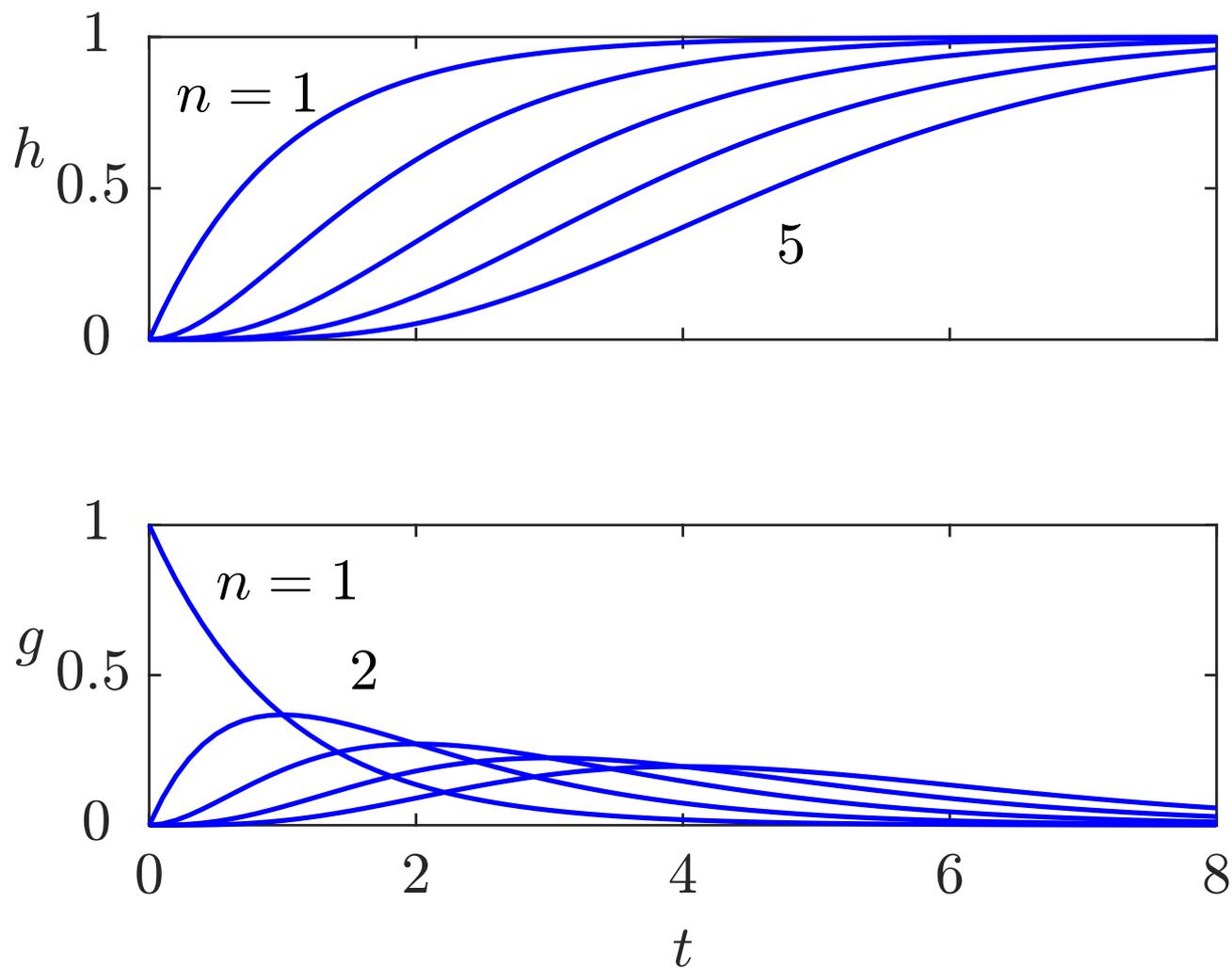


Abb. 5.36: Übergangsfunktionen und Gewichtsfunktionen von PT_n -Gliedern ($n = 1, 2, \dots, 5$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

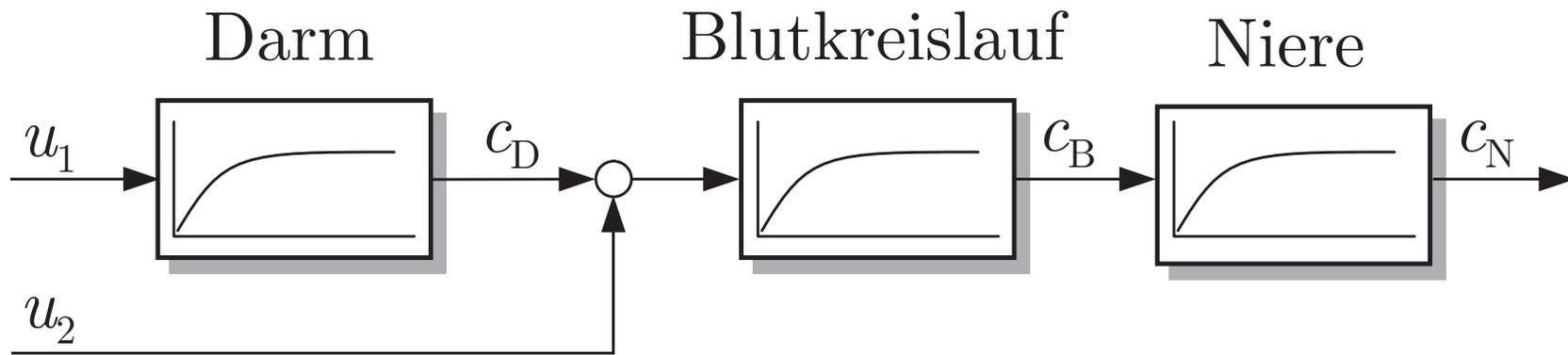


Abb. 5.37. Kompartimentmodell zur Berechnung des Wirkstoffverlaufes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

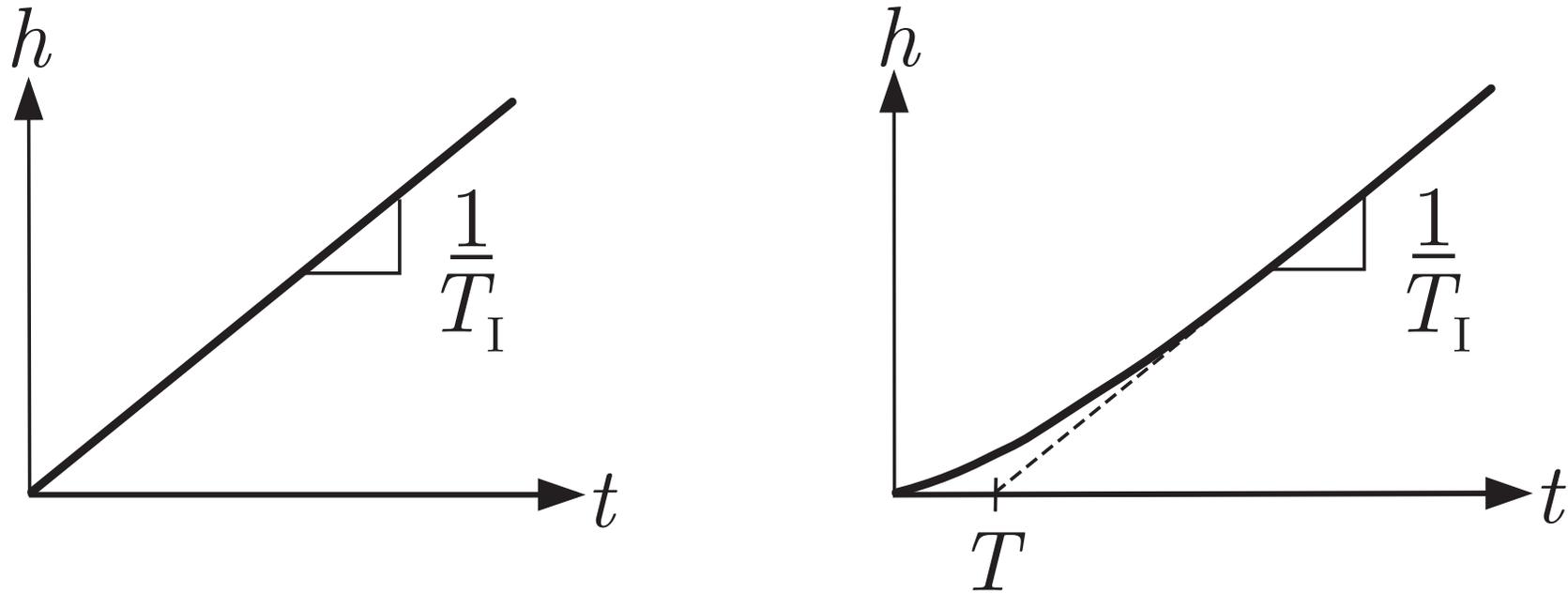


Abb. 5.38. Übergangsfunktion eines I-Gliedes (links) und eines IT_1 -Gliedes (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

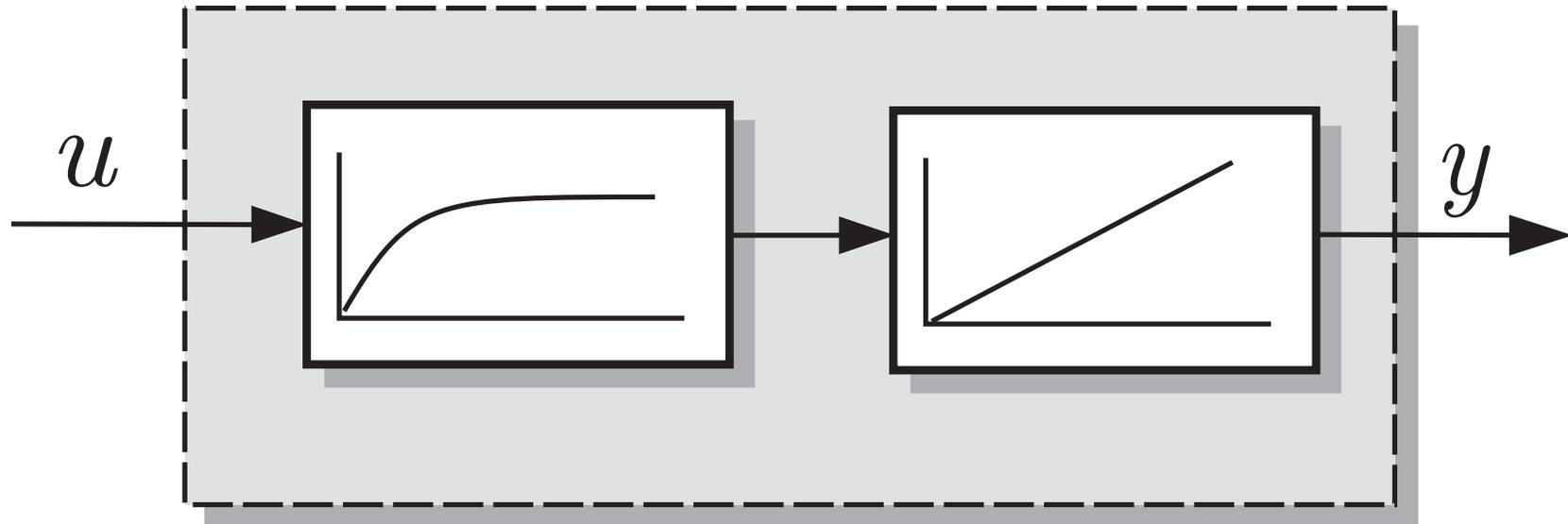


Abb. 5.39. IT₁-Glieder bestehend aus einem PT₁-Glieder und einem I-Glieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

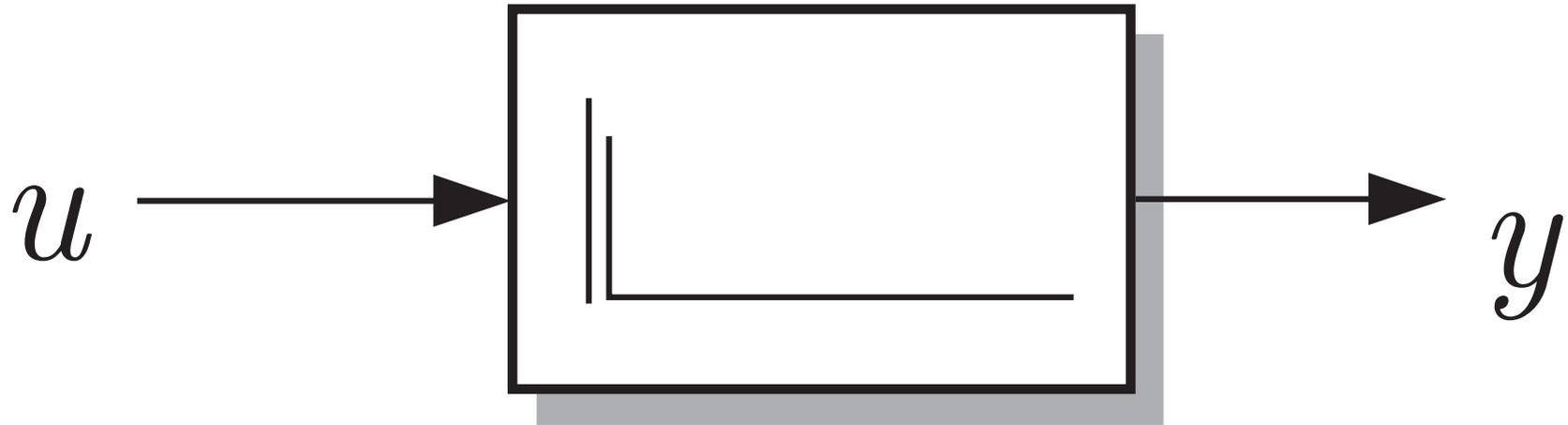


Abb. 5.40. Symbol des D-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

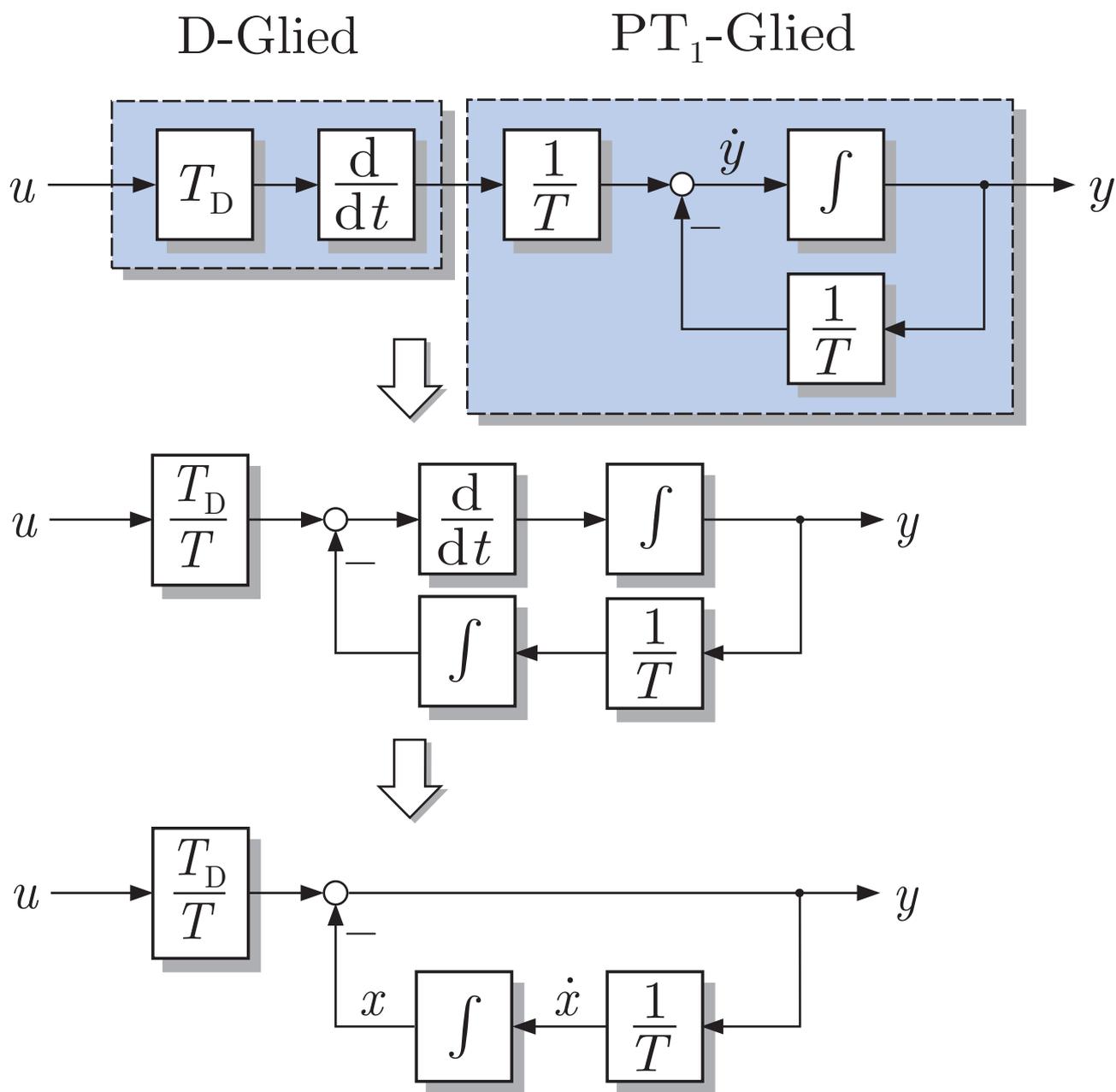


Abb. 5.41: Umformung des Blockschaltbildes bei der Aufstellung des Zustandsraummodells des DT_1 -Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

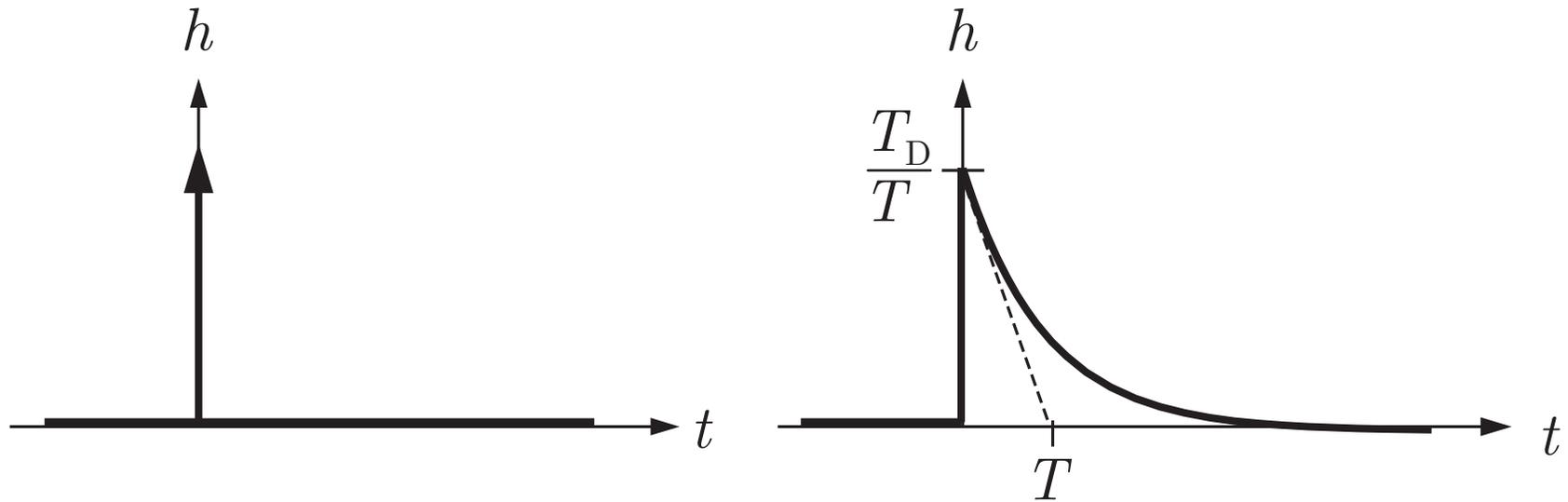


Abb. 5.42. Übergangsfunktion von D-Gliedern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

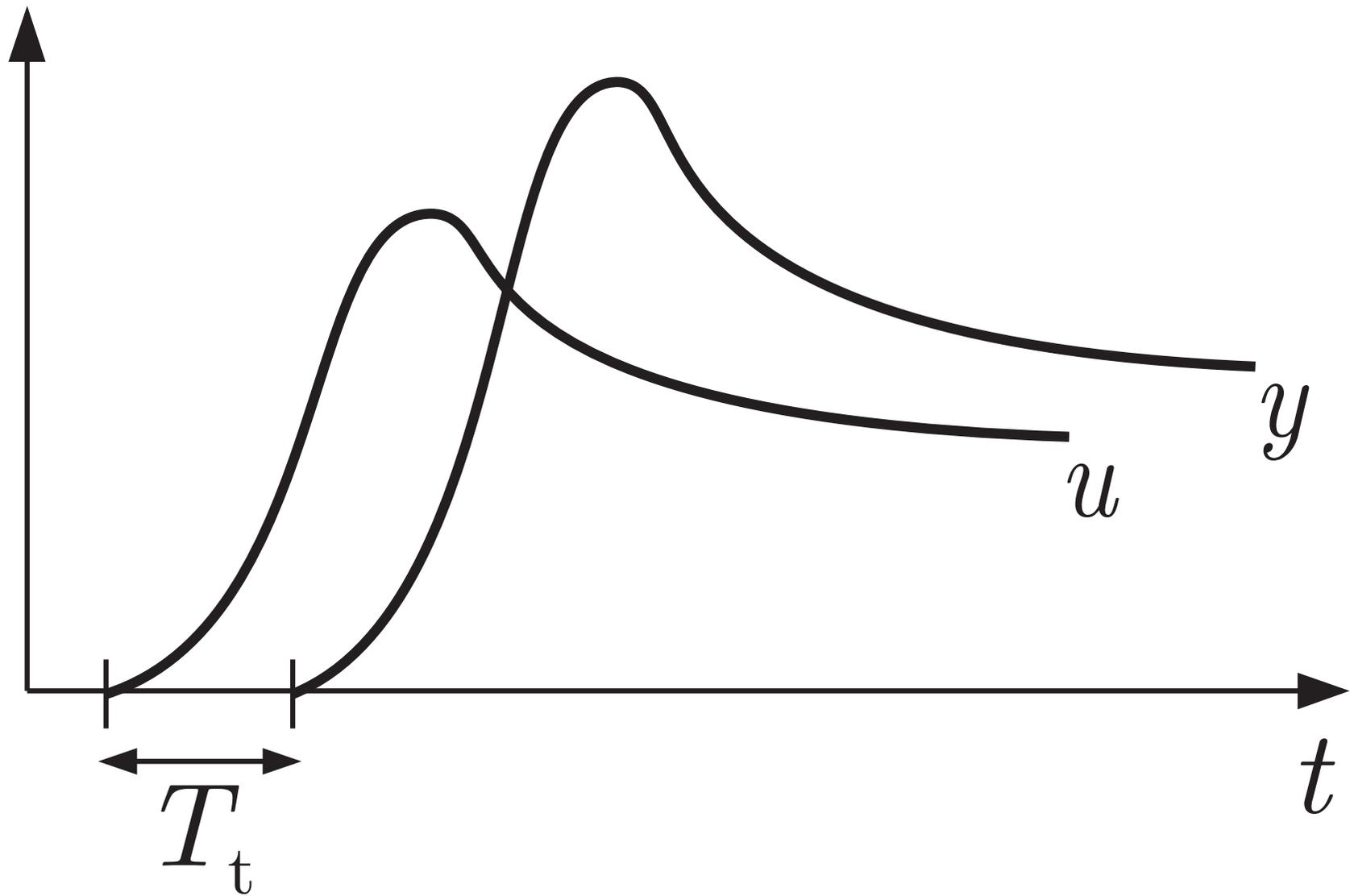


Abb. 5.43. Verhalten eines Totzeitgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

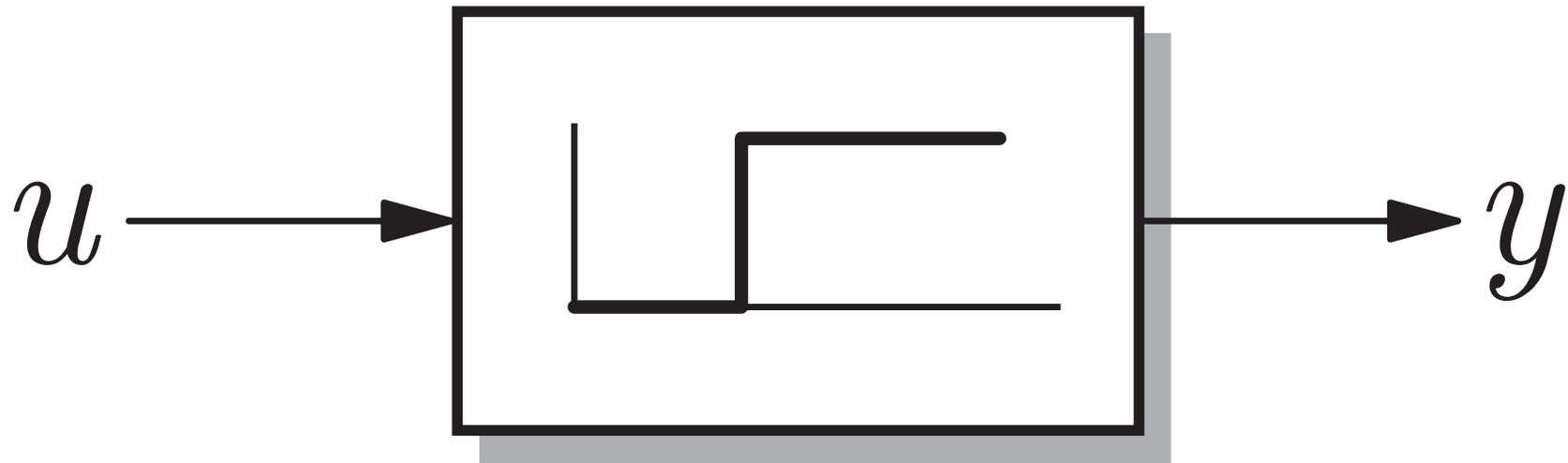


Abb. 5.44. Symbol des Totzeitgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

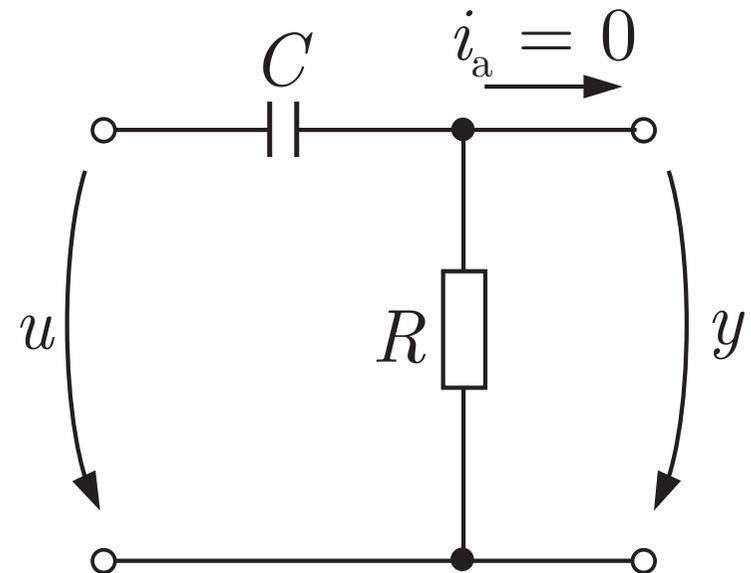
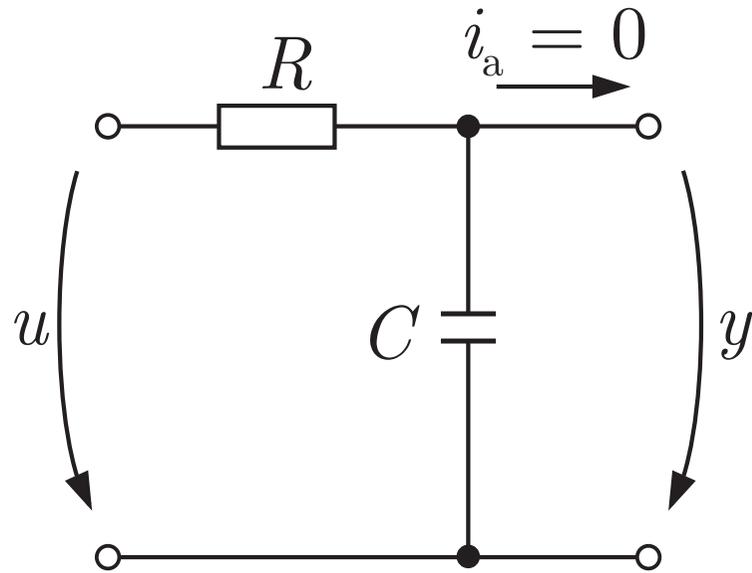


Abb. 5.45. RC-Glieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

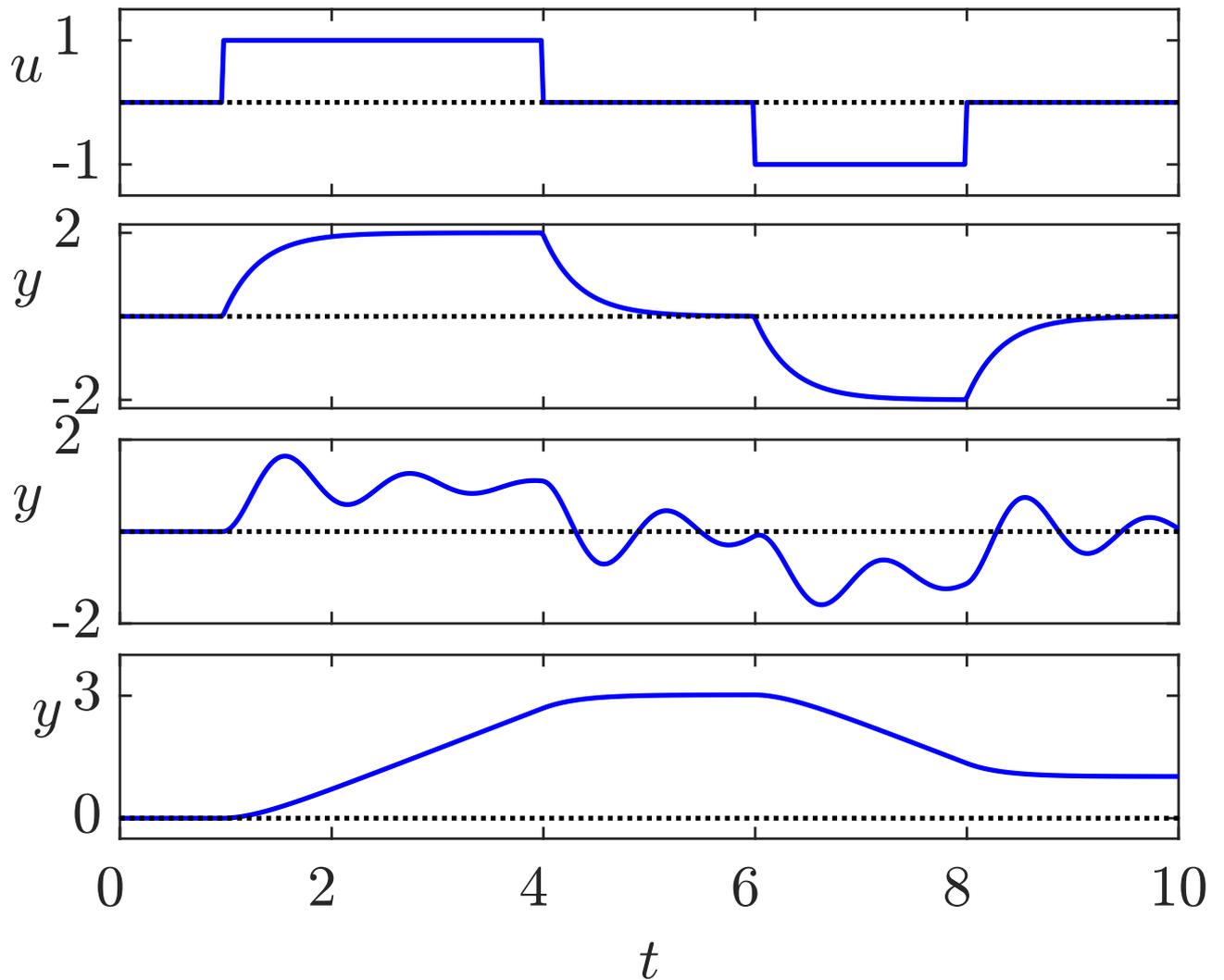


Abb. 5.46: Verlauf der Eingangs- und Ausgangsgrößen einfacher Übertragungsglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

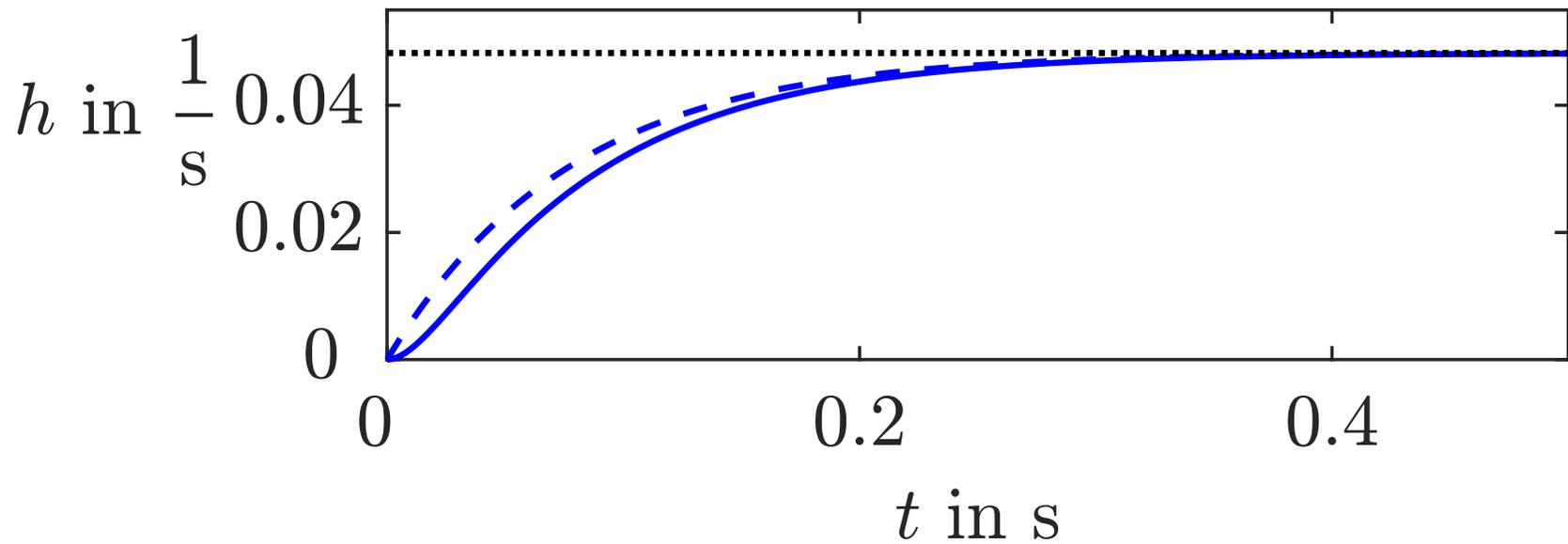


Abb. 5.47. Vergleich der Übergangsfunktionen des vollständigen — und des vereinfachten - - - Modells des Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

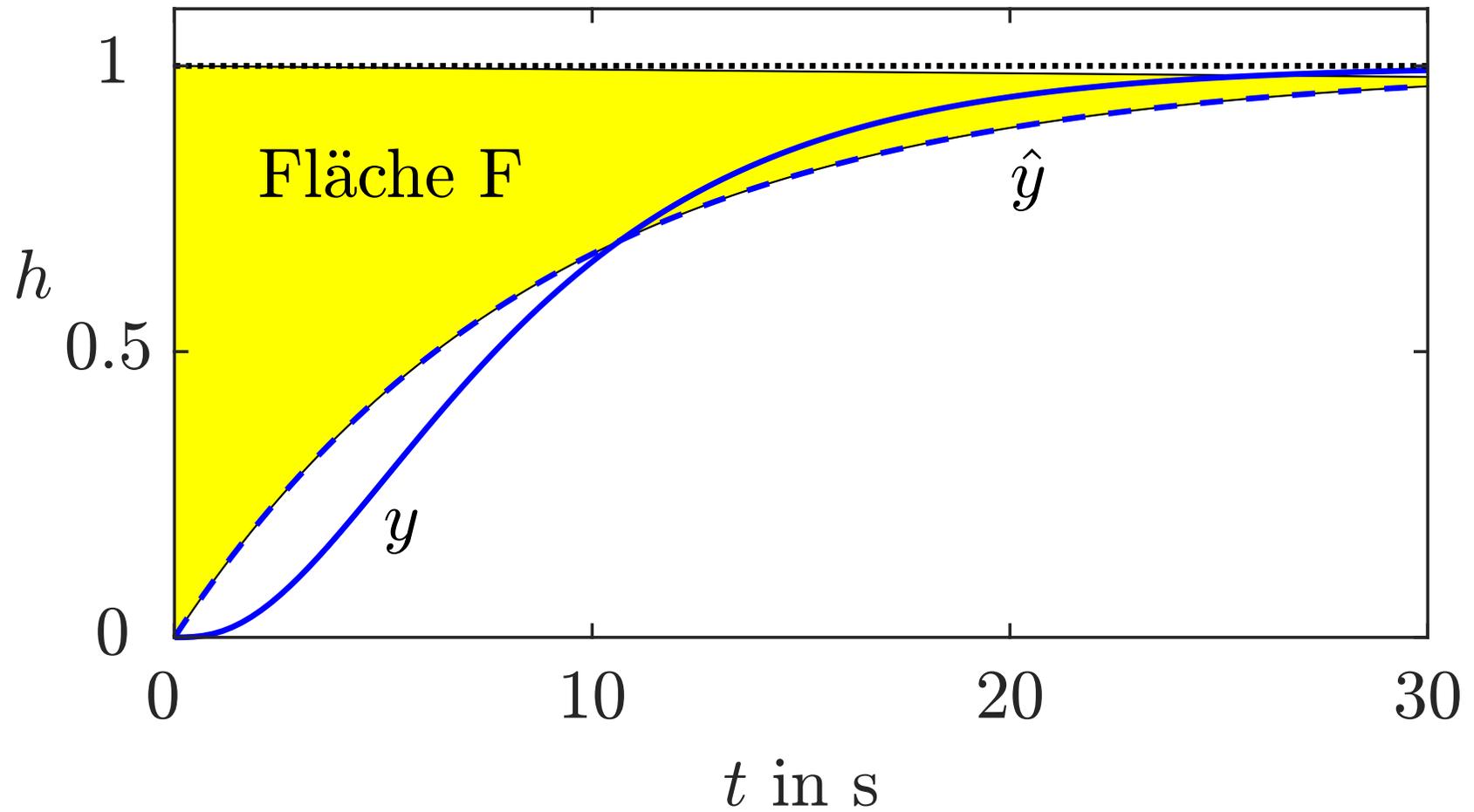


Abb. 5.48. Näherung eines PT₃-Gliedes durch ein PT₁-Glieder mit derselben Summenzeitkonstante

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

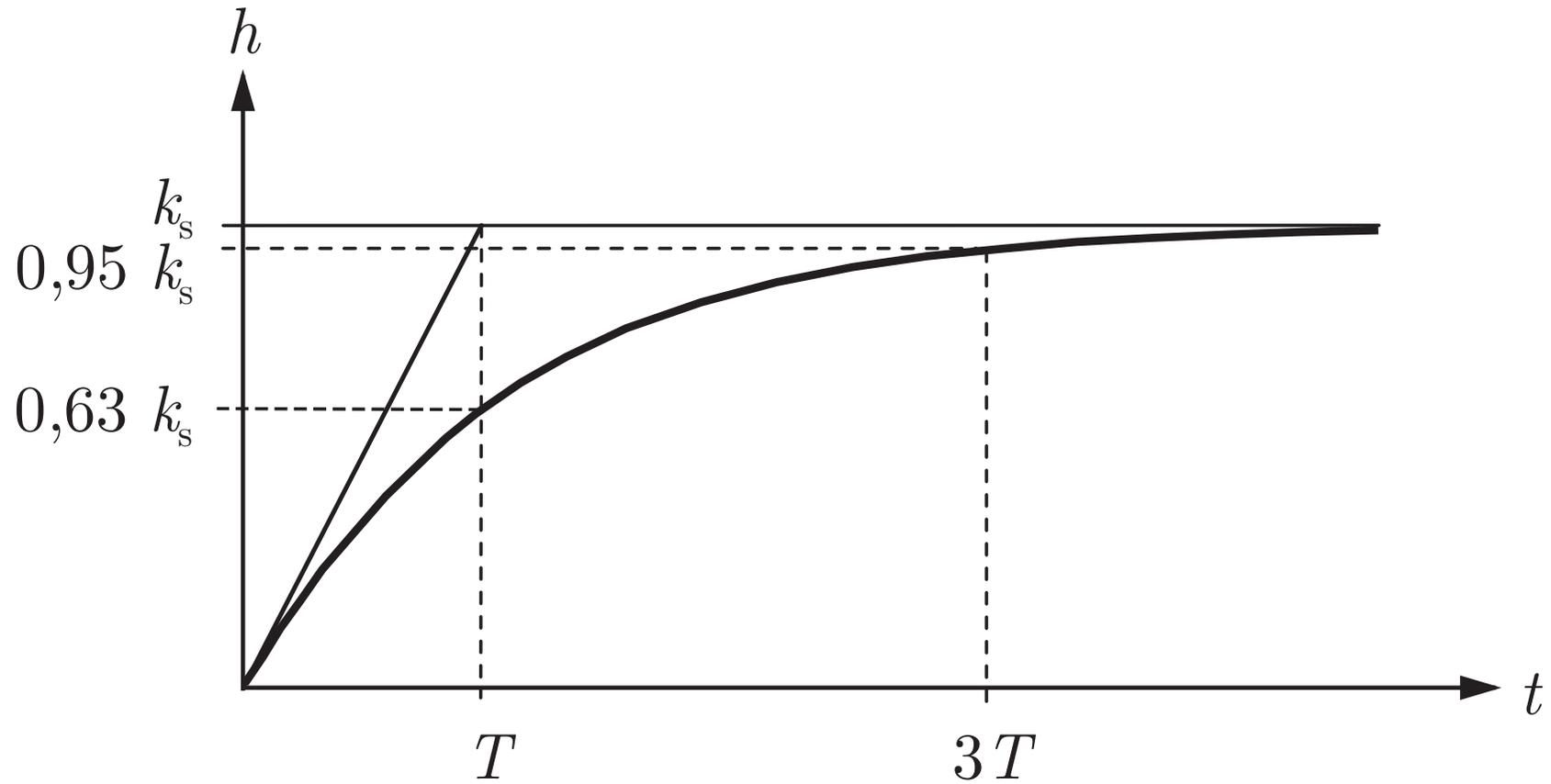


Abb. 5.49. Übergangsfunktion eines PT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

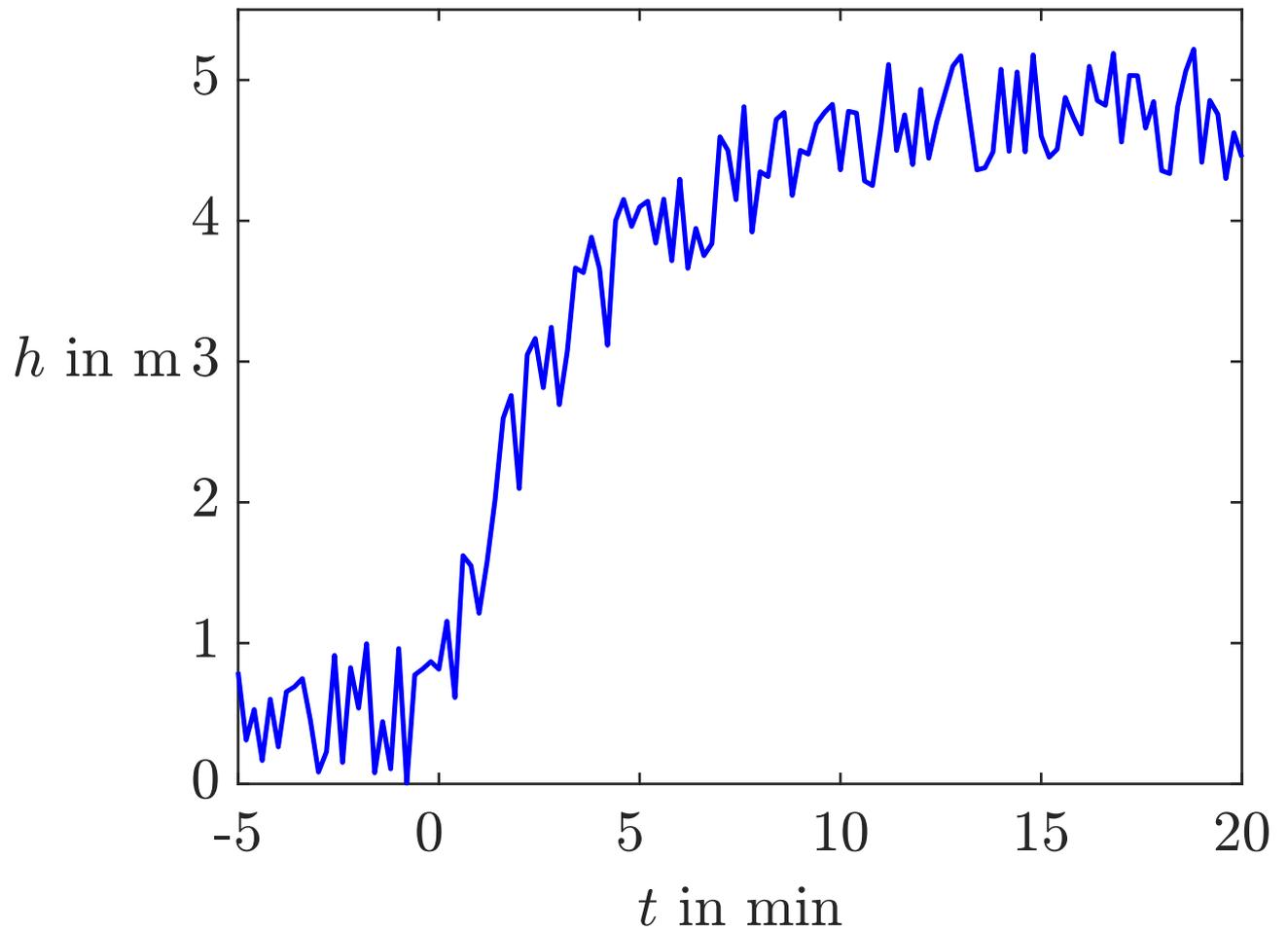


Abb. 5.50: Experimentell bestimmte Übergangsfunktion

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

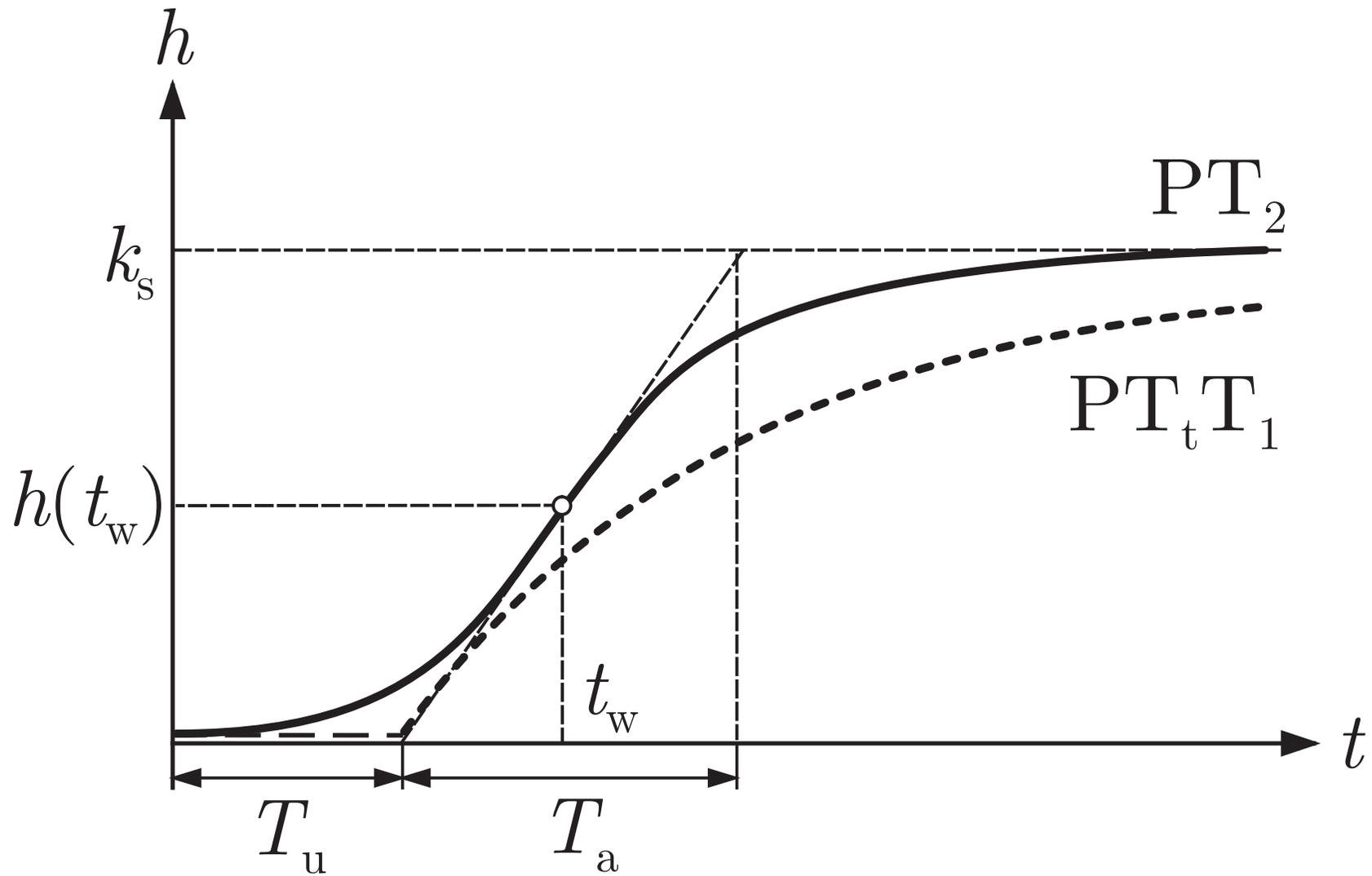


Abb. 5.51. Verzugszeit T_u und Anstiegszeit T_a der Übergangsfunktion von PT_2 -Gliedern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

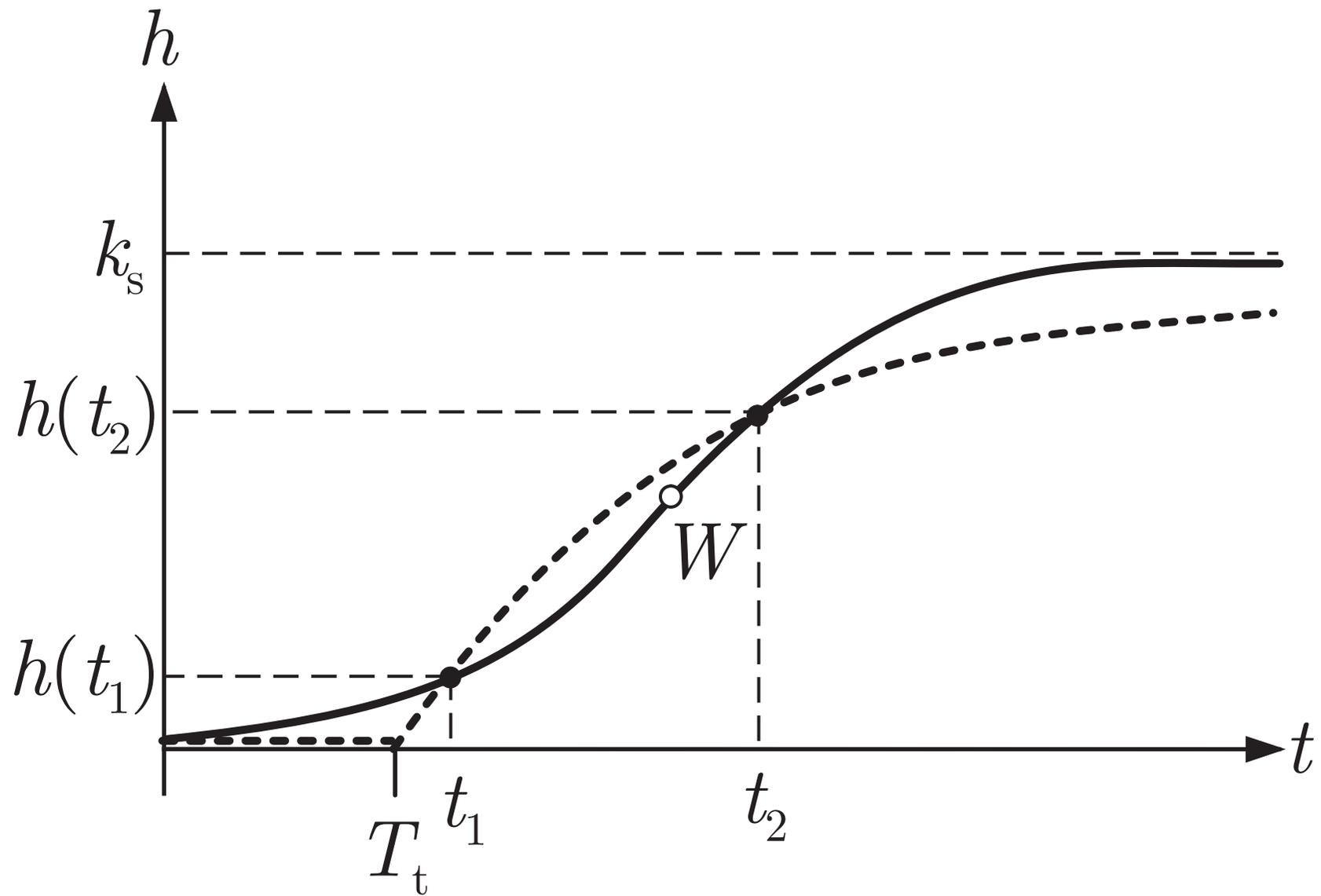


Abb. 5.52. Approximation einer Übergangsfunktion durch die Übergangsfunktion eines $PT_t T_1$ -Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

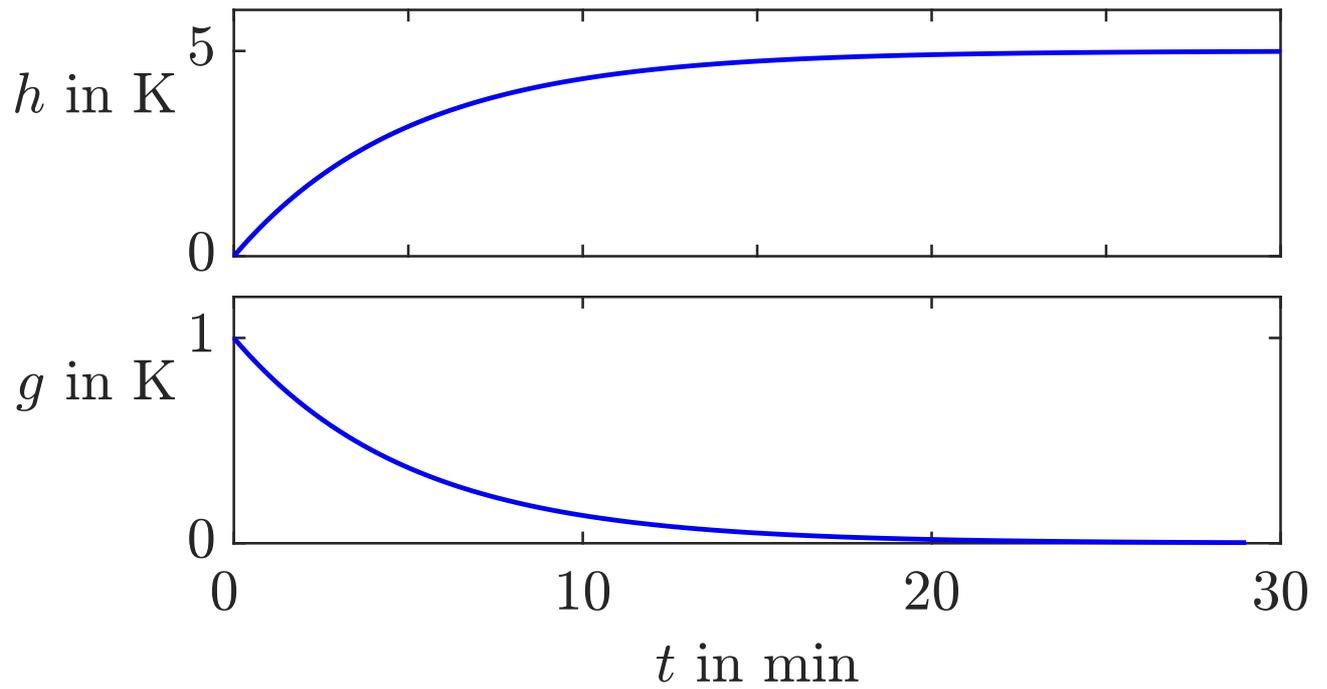


Abb. 5.53: Übergangsfunktion und Gewichtsfunktion eines Raumes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

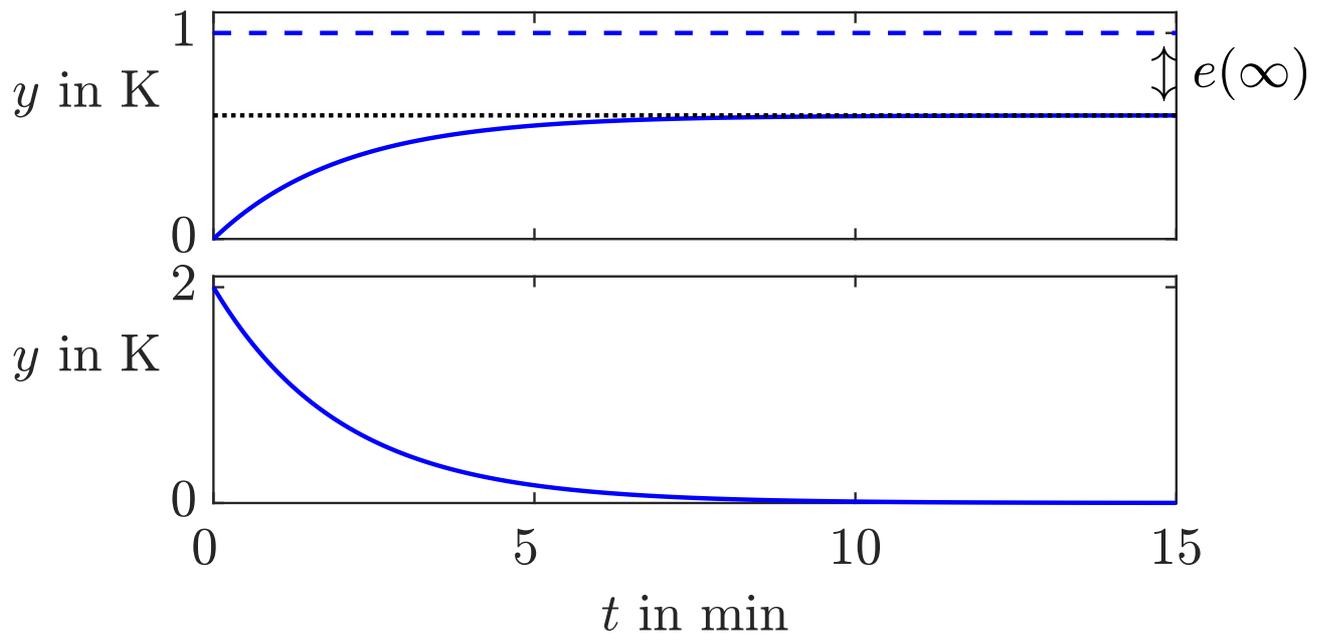


Abb. 5.54: Übergangsfunktion und Eigenbewegung des Raumtemperaturregelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

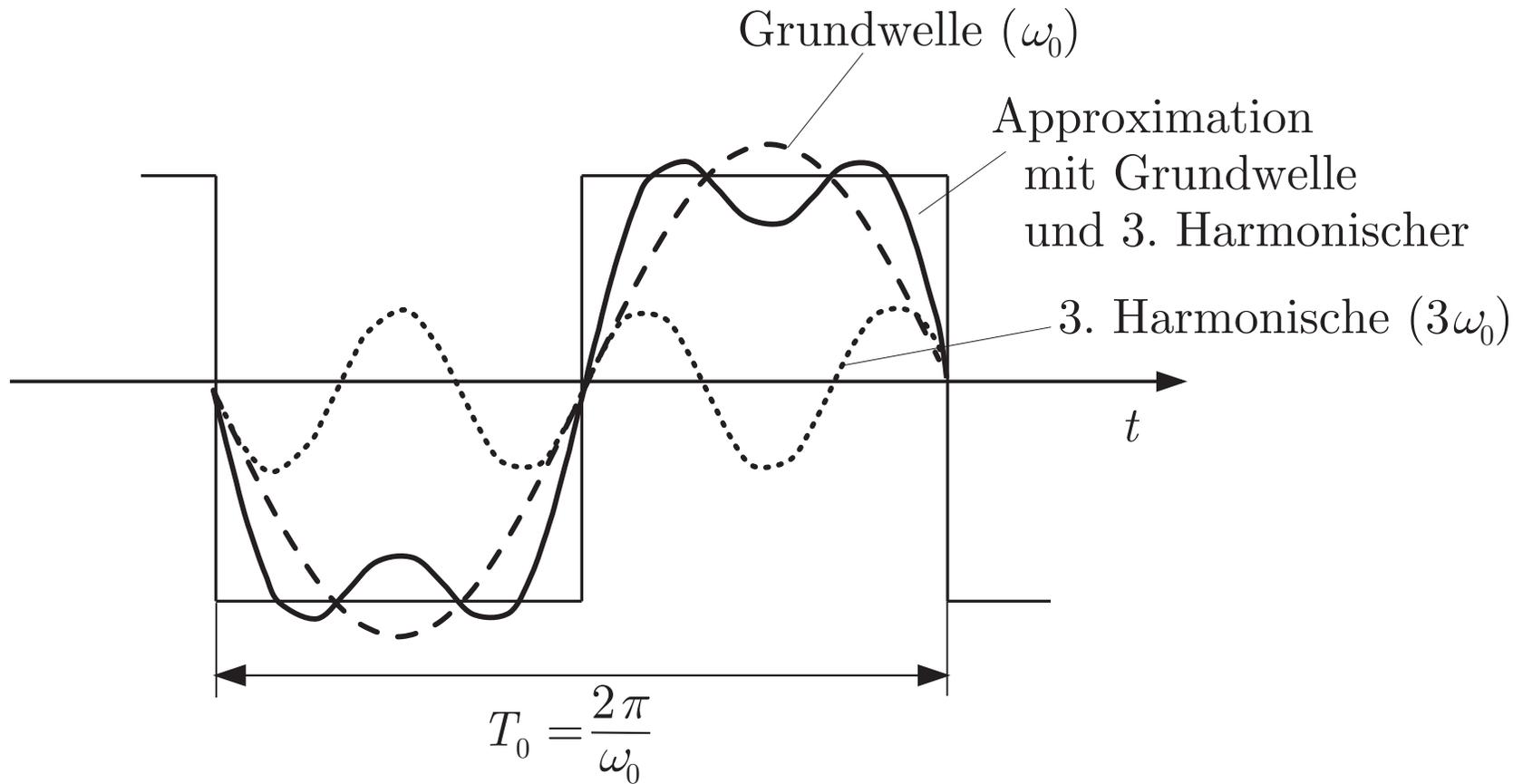


Abb. 6.1. Zerlegung einer Rechteckschwingung in Sinusschwingungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

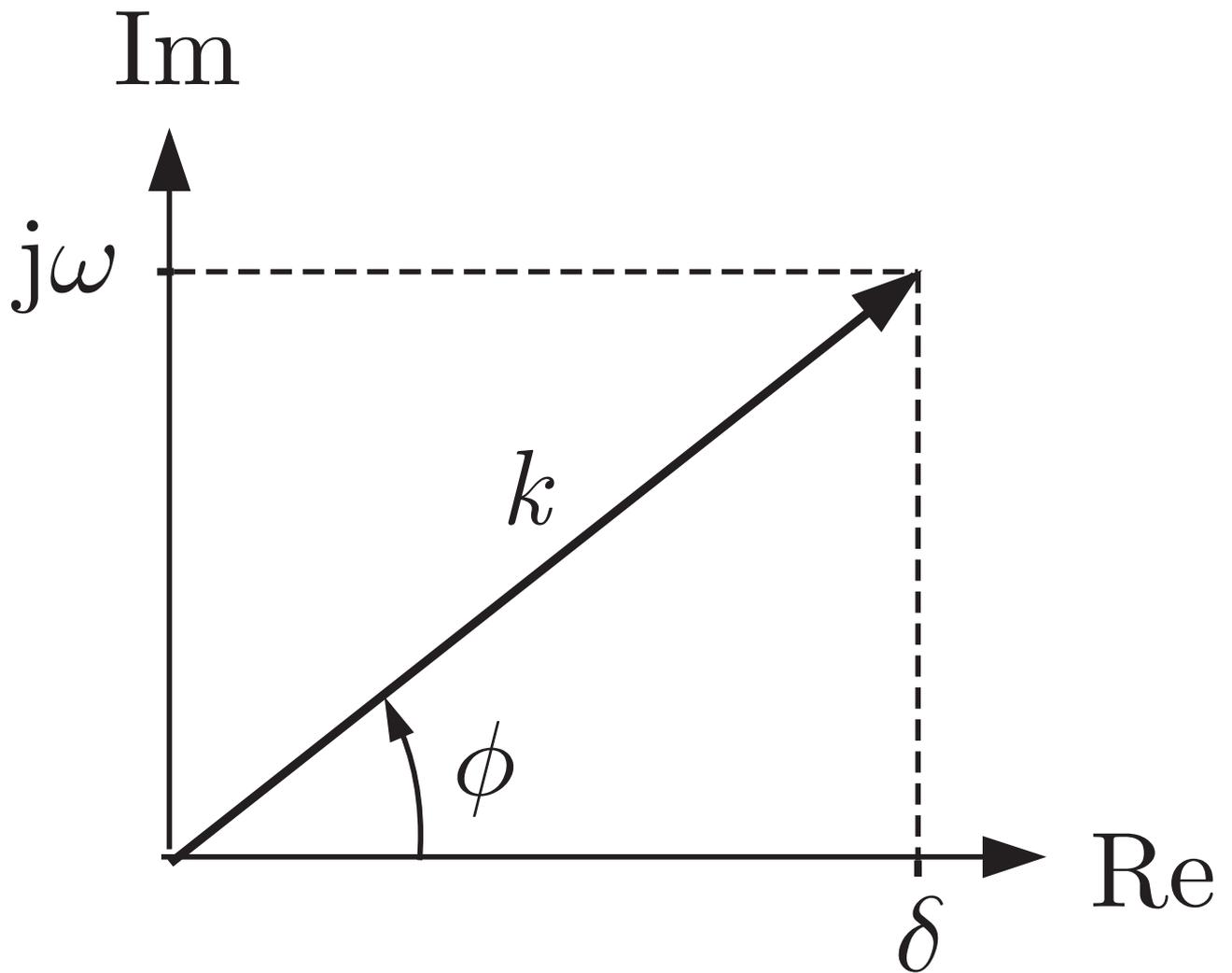


Abb. 6.2: Interpretation der Eulerformel in der komplexen Ebene

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

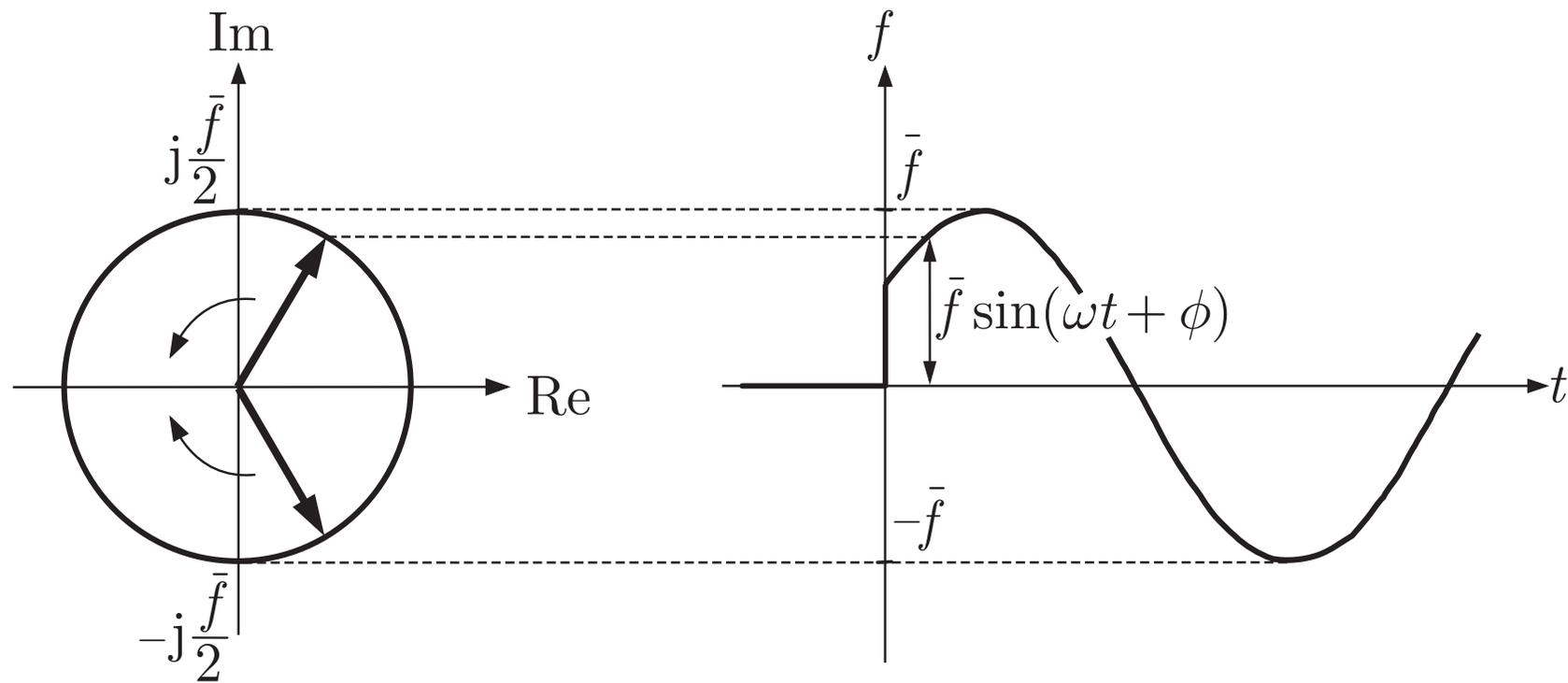


Abb. 6.3. Erzeugung der Funktion $f(t) = \bar{f} \sin(\omega t + \phi)$ durch zwei rotierende Zeiger

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

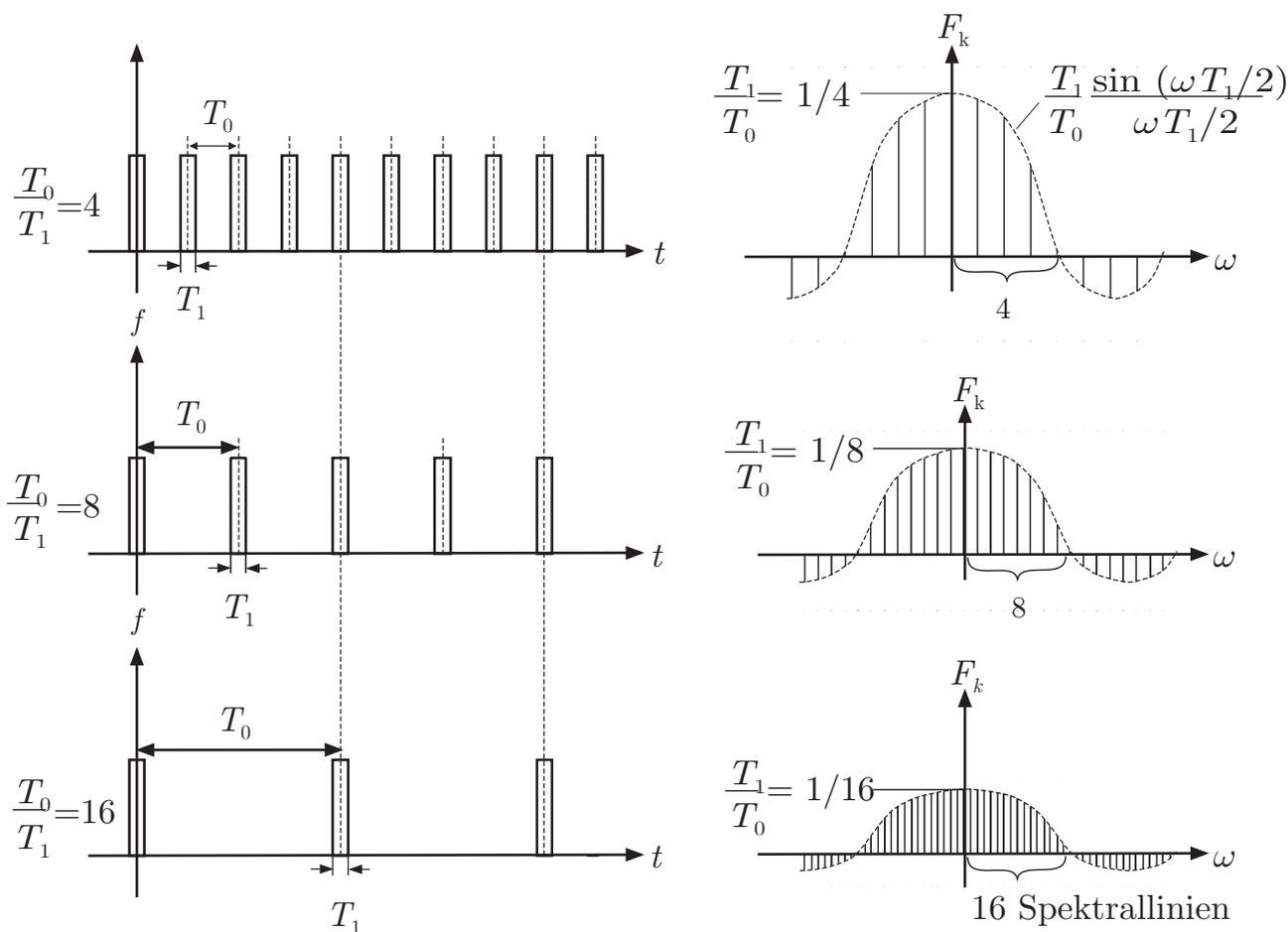


Abb. 6.4: Spektrum von Pulsfolgen verschiedener Tastverhältnisse $\frac{T_0}{T_1}$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

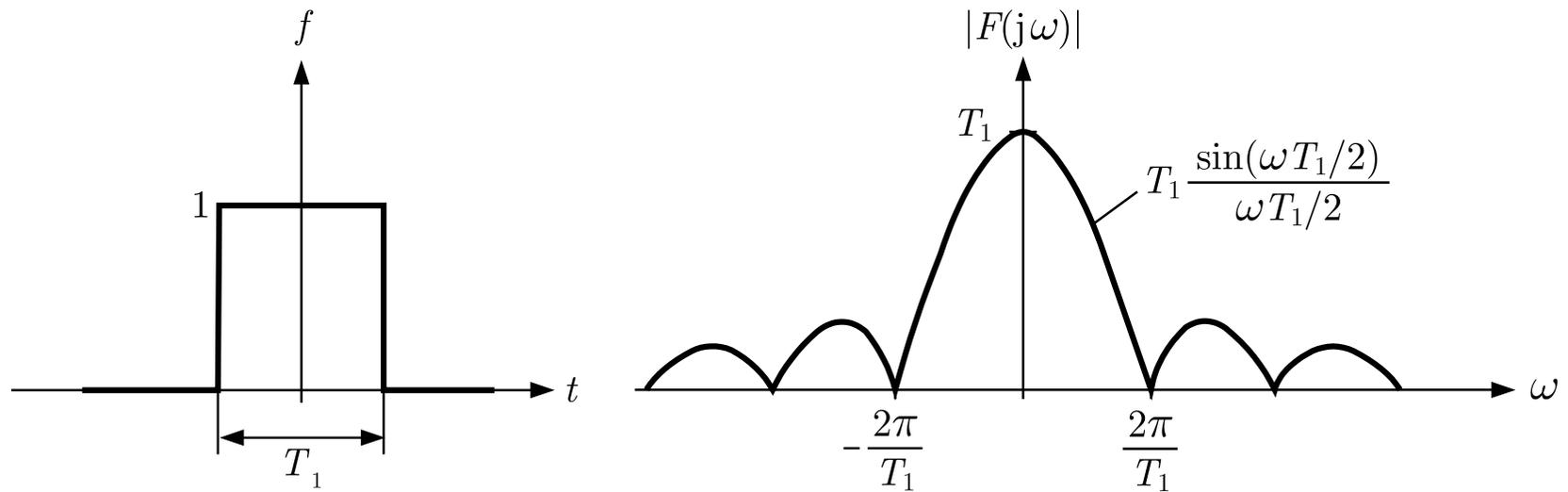


Abb. 6.5. Zeitverlauf (links) und Amplitudendichtespektrum (rechts) für einen Impuls

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

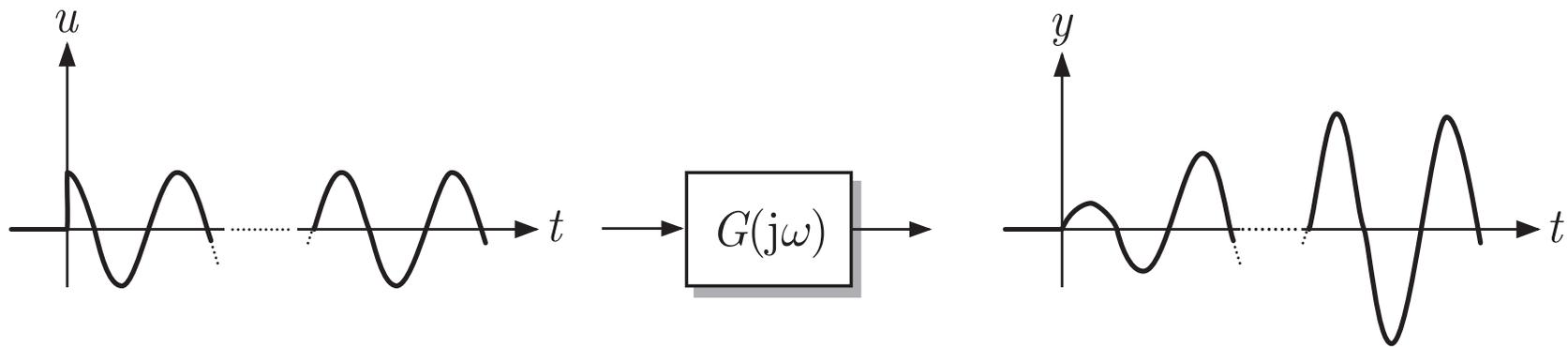


Abb. 6.6. Definition des Frequenzgangs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

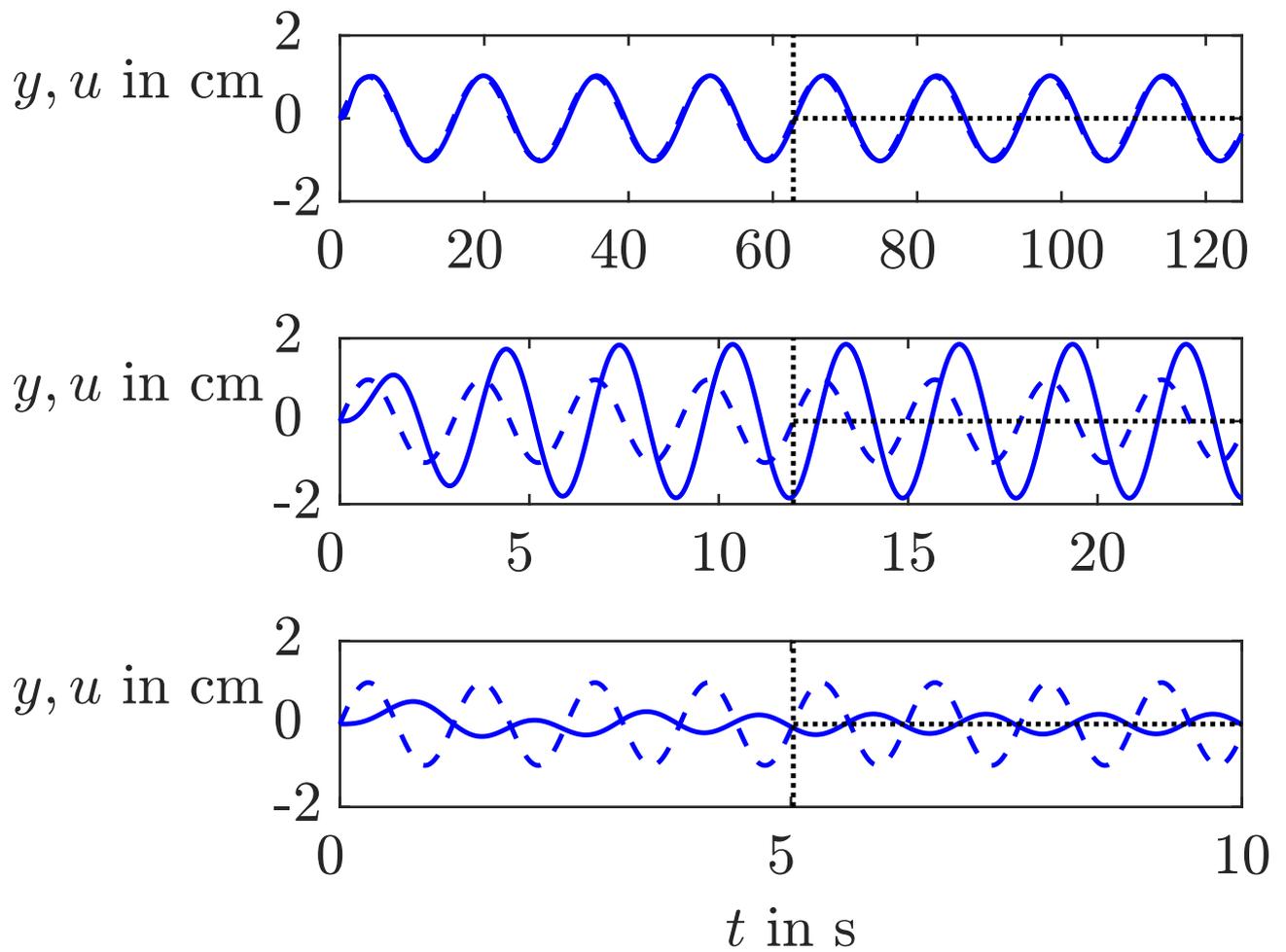
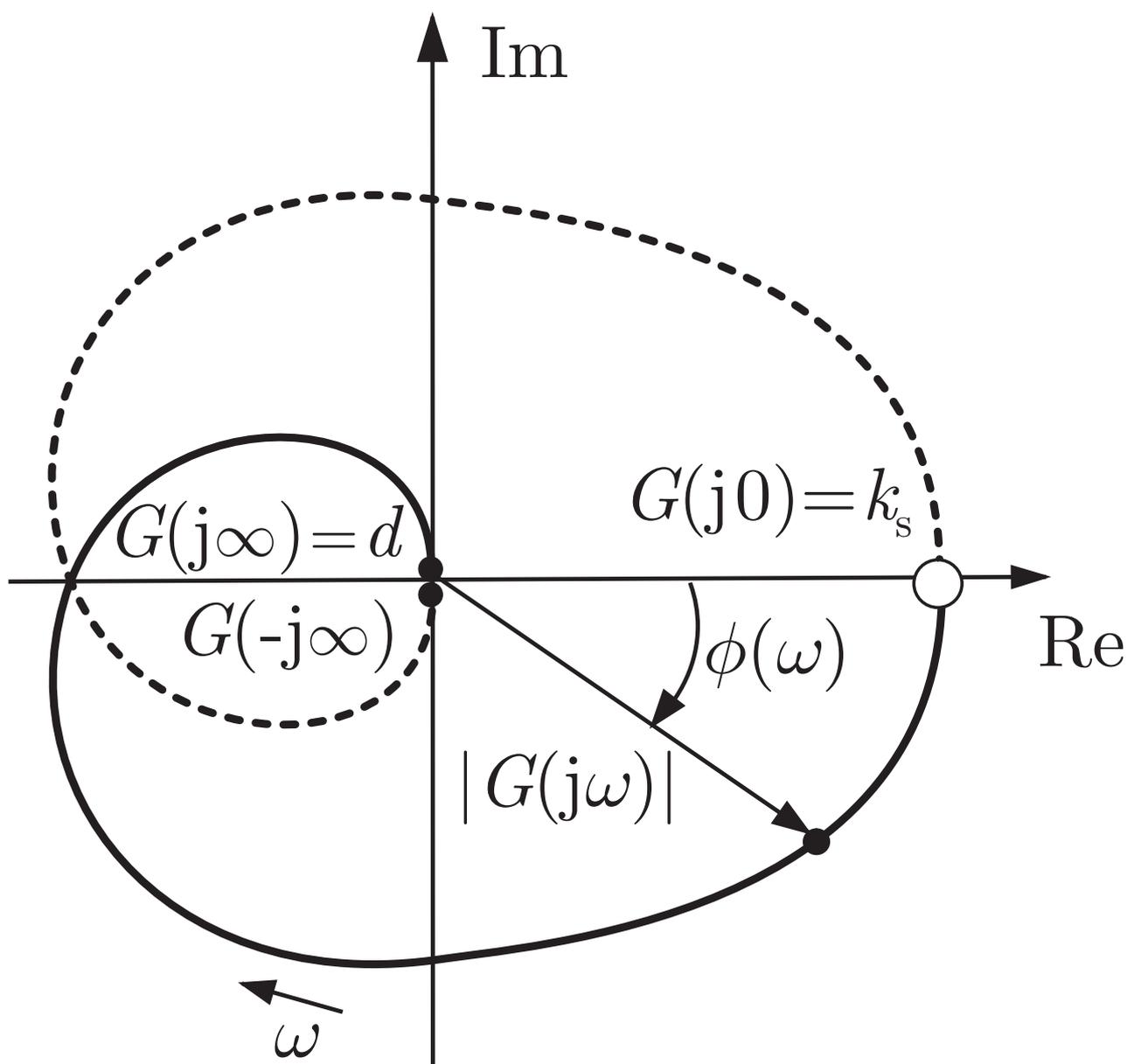


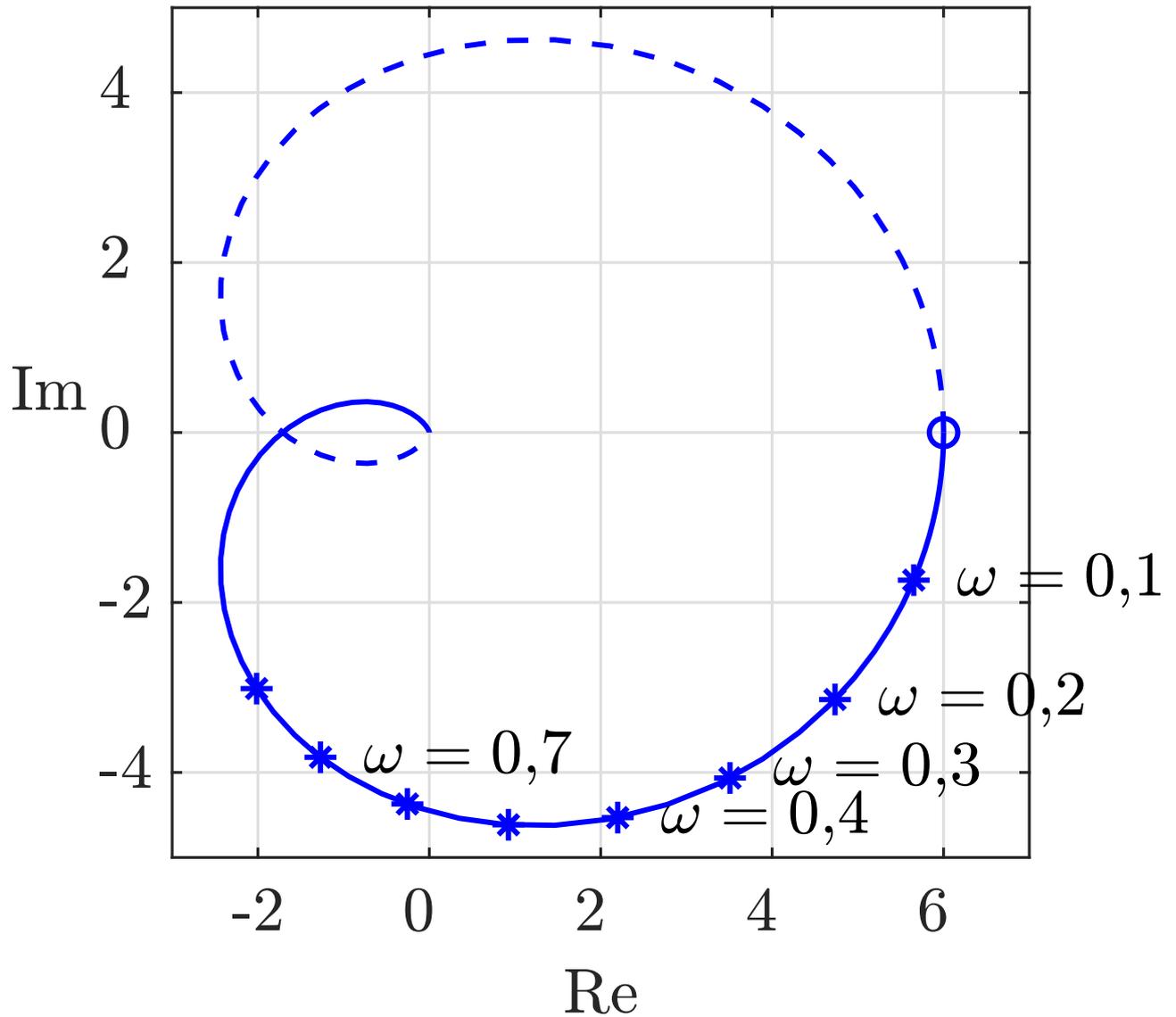
Abb. 6.7: Verhalten eines Feder-Masse-Schwingers bei sinusförmiger Erregung unterschiedlicher Frequenz

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 6.8: Ortskurve eines nicht sprungfähigen Systems:
prinzipieller Verlauf**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 6.8: Ortskurve eines nicht sprunghfähigen Systems:
Verlauf für ein System dritter Ordnung**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

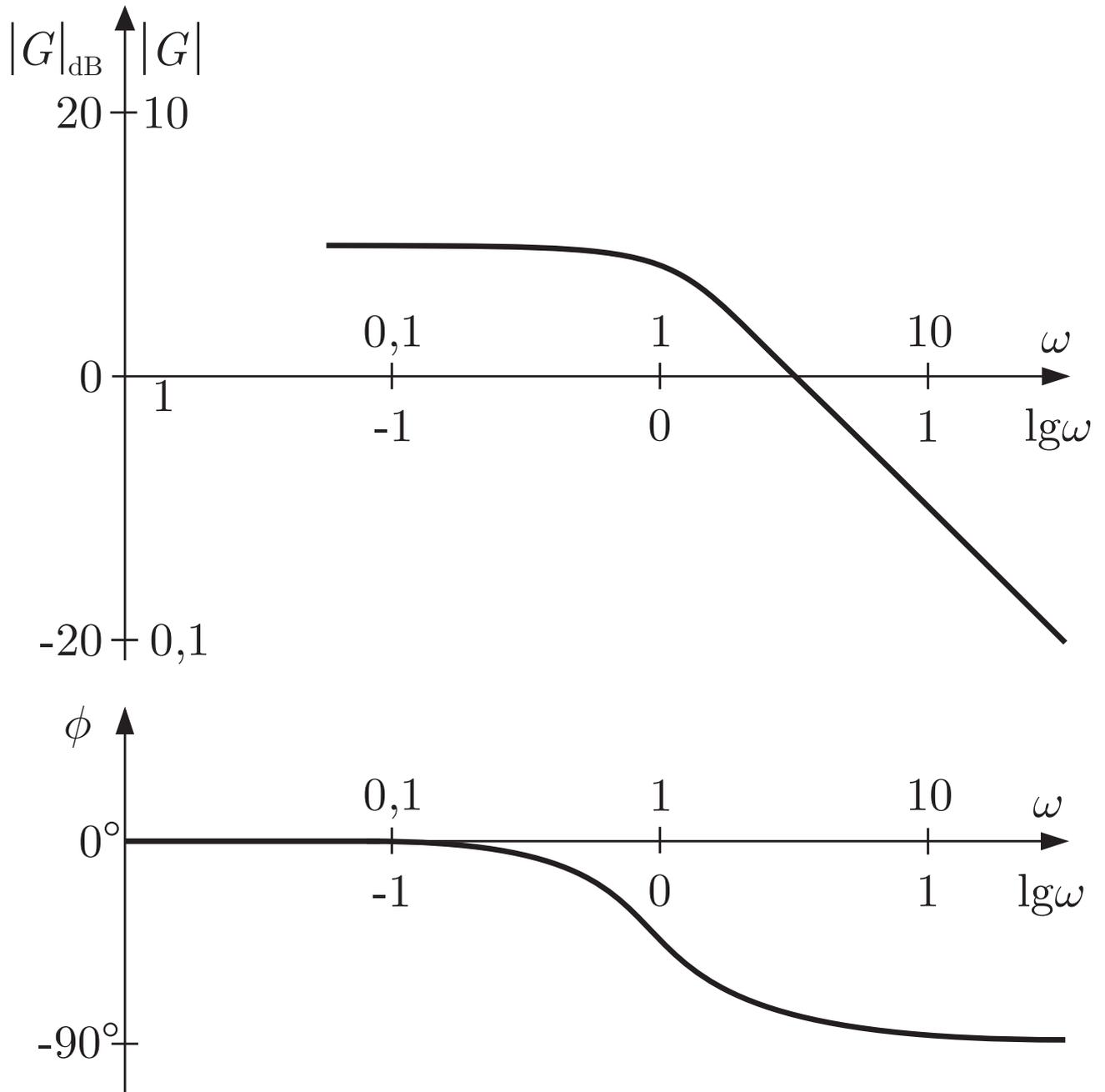


Abb. 6.9: Bodediagramm: Amplitudengang (oben) und Phasengang (unten) in logarithmischer Darstellung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

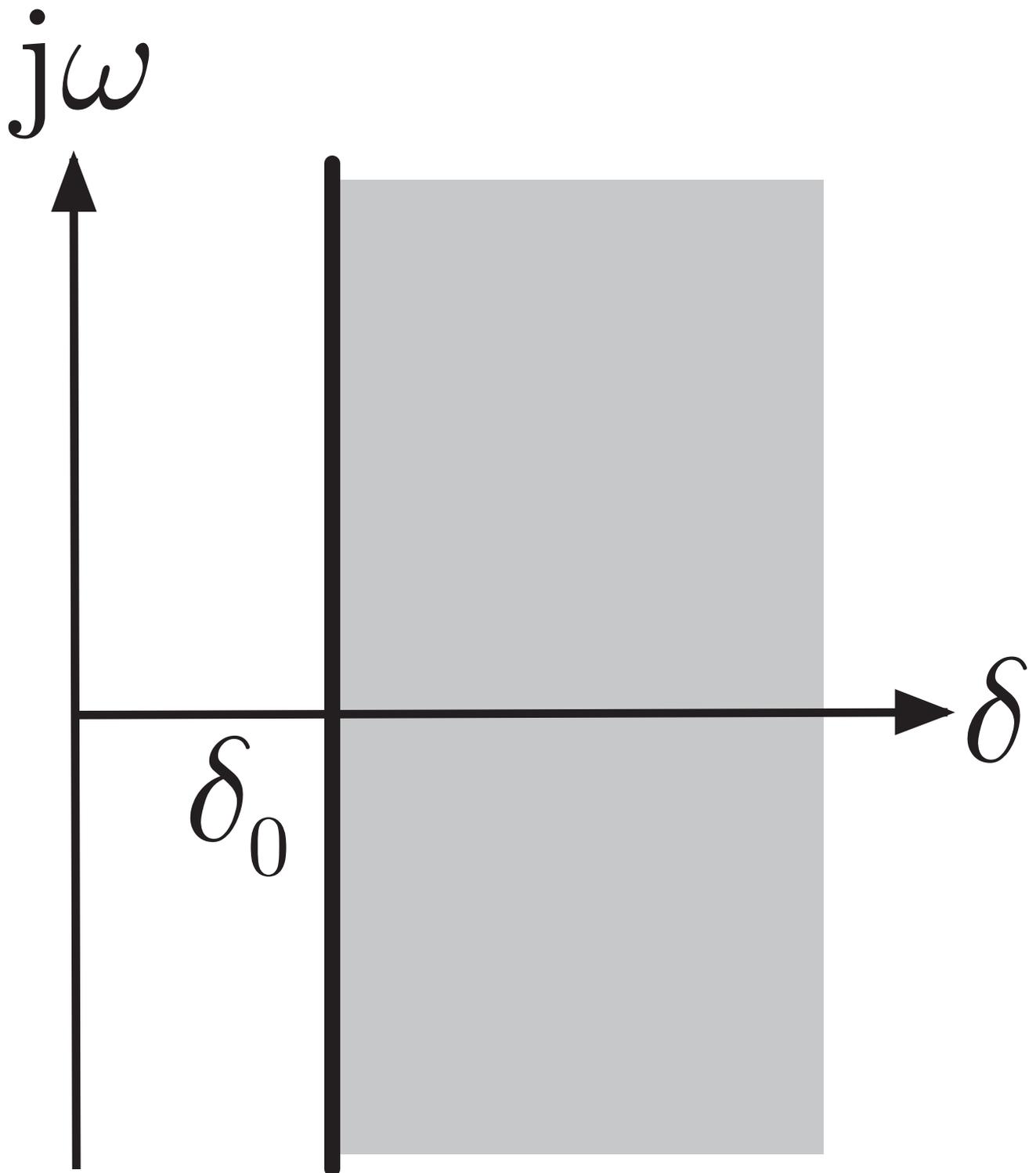


Abb. 6.10: Konvergenzhalbebene

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

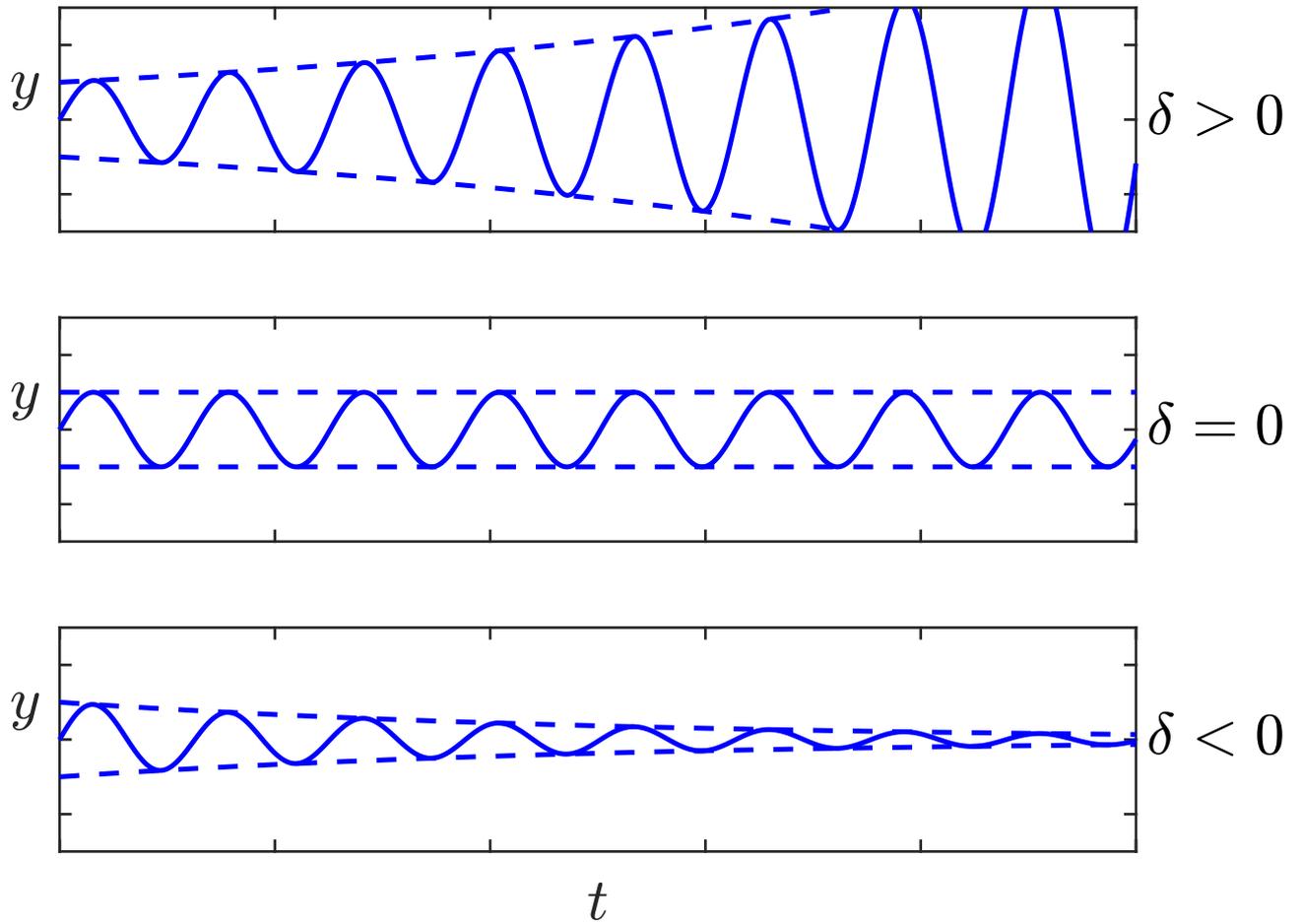
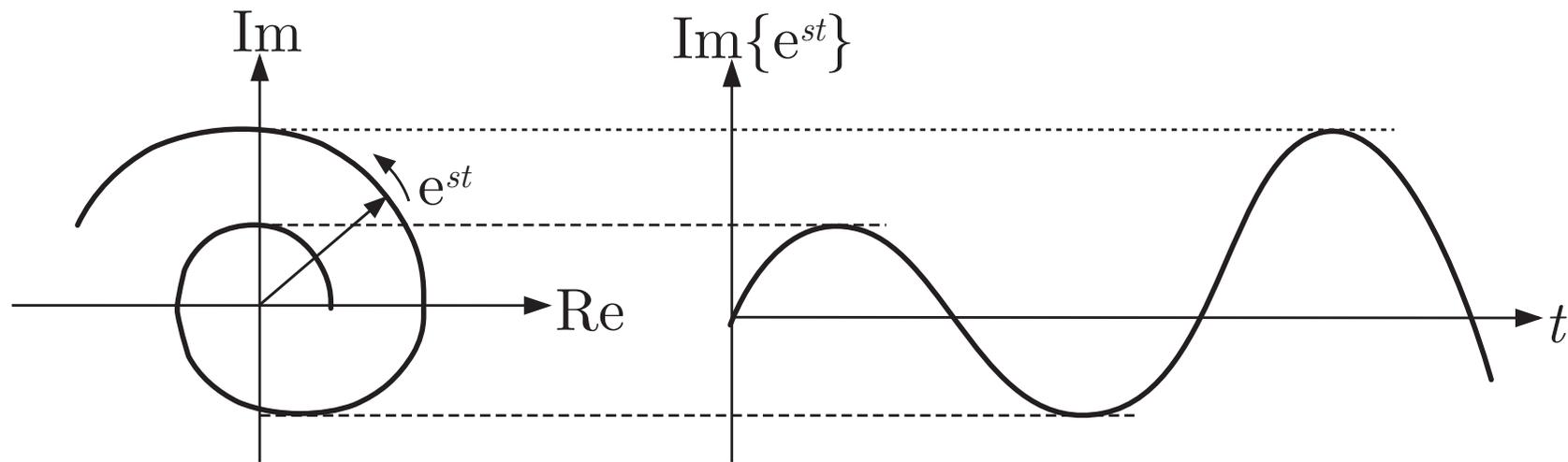


Abb. 6.11: Funktionen $y(t) = e^{\delta t} \sin \omega t$ mit unterschiedlicher Dämpfung δ

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 6.12. Darstellung der Funktion e^{st} durch einen rotierenden Zeiger
(hier: $\text{Re}\{s\} > 0$)**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

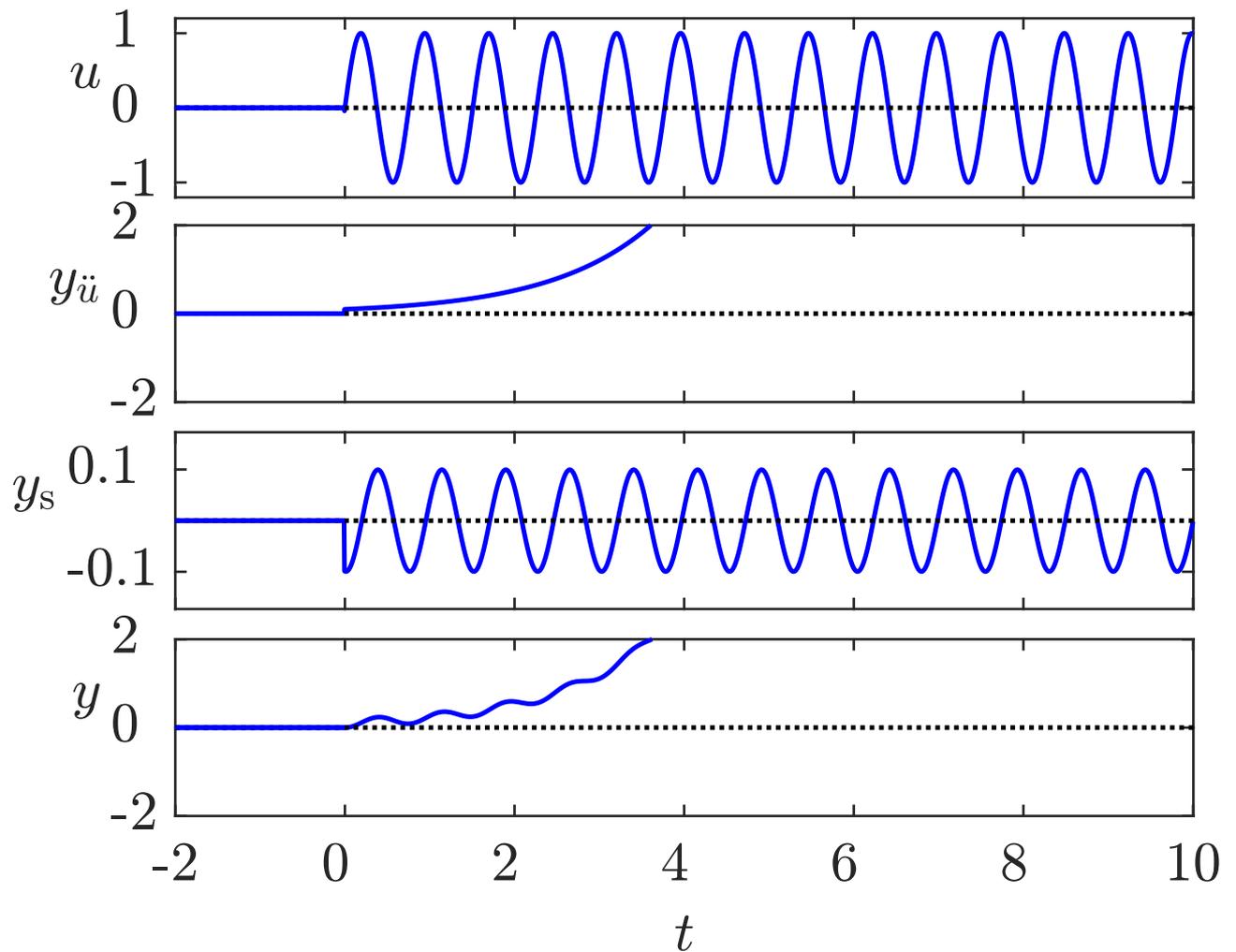


Abb. 6.13: Übergangsverhalten und stationäres Verhalten eines instabilen Systems erster Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

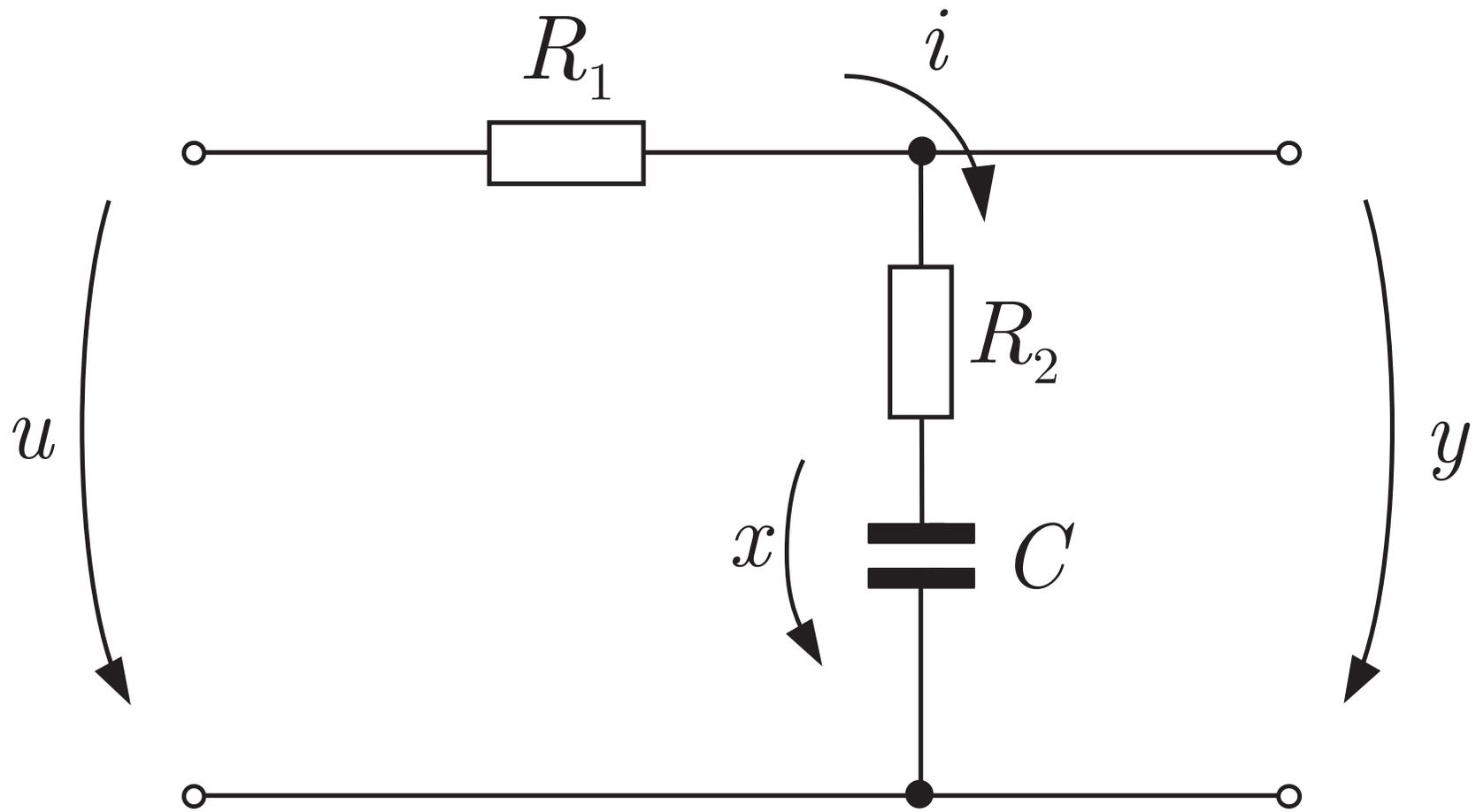


Abb. 6.14. RC-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

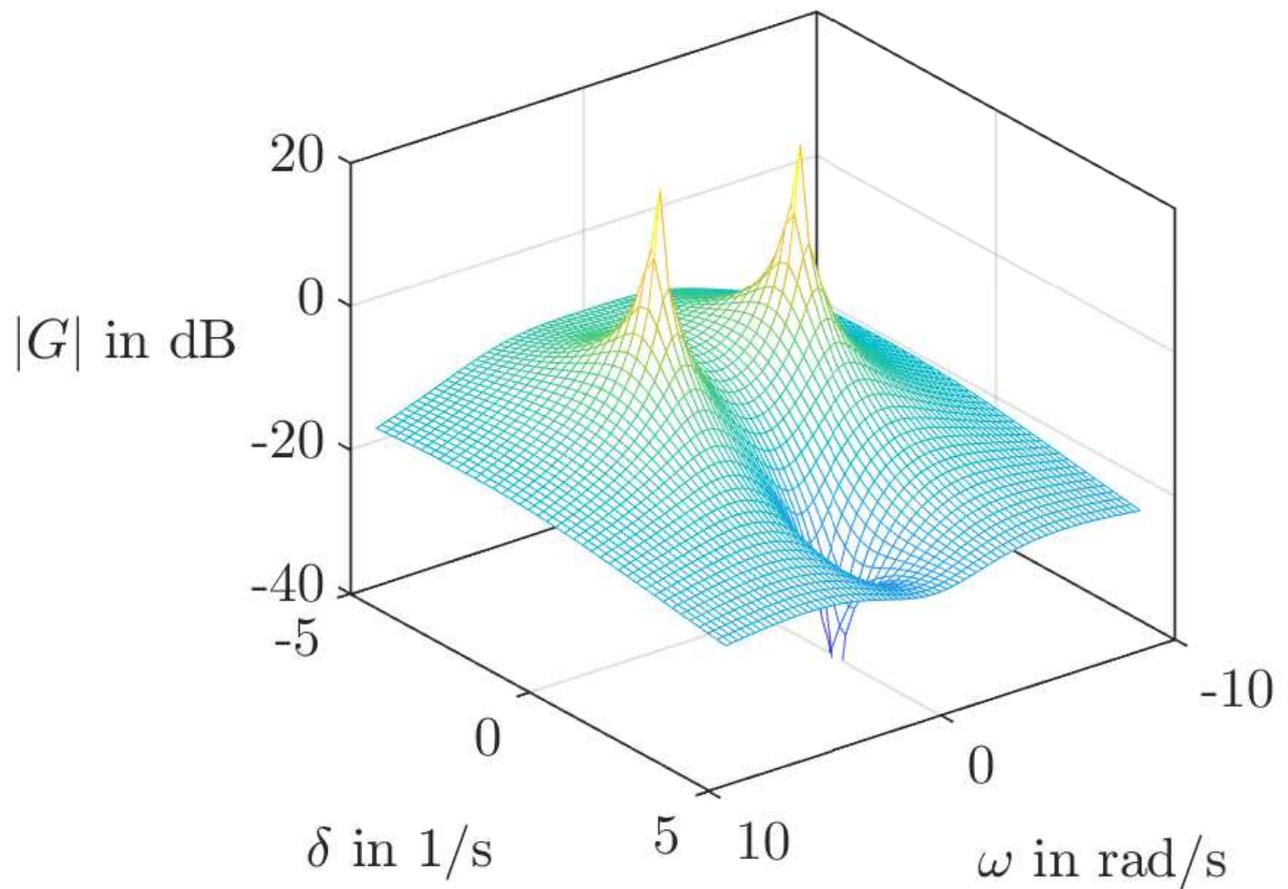


Abb. 6.15: Dreidimensionale Darstellung von $|G(s)|$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

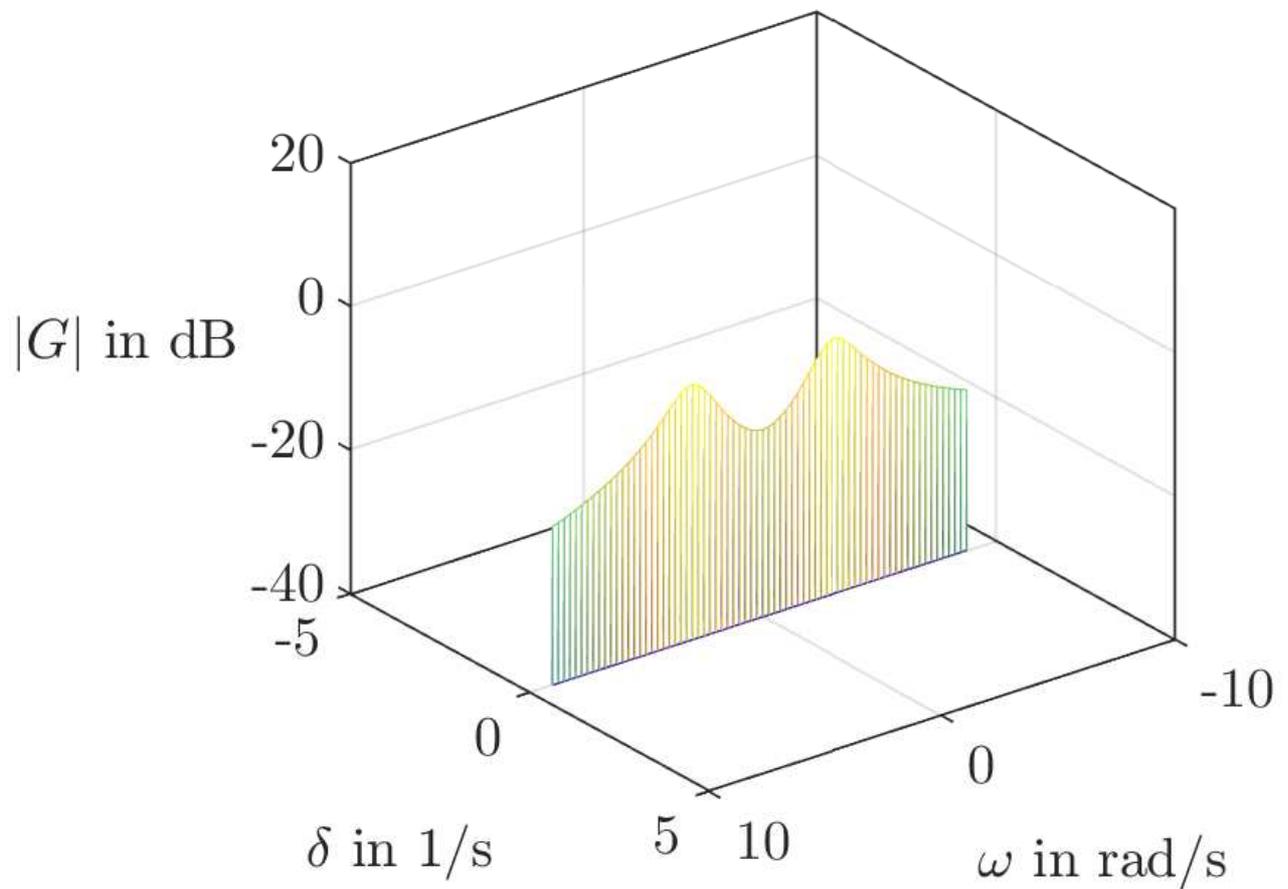


Abb. 6.16: Dreidimensionale Darstellung des Amplitudenganges $|G(j\omega)|$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

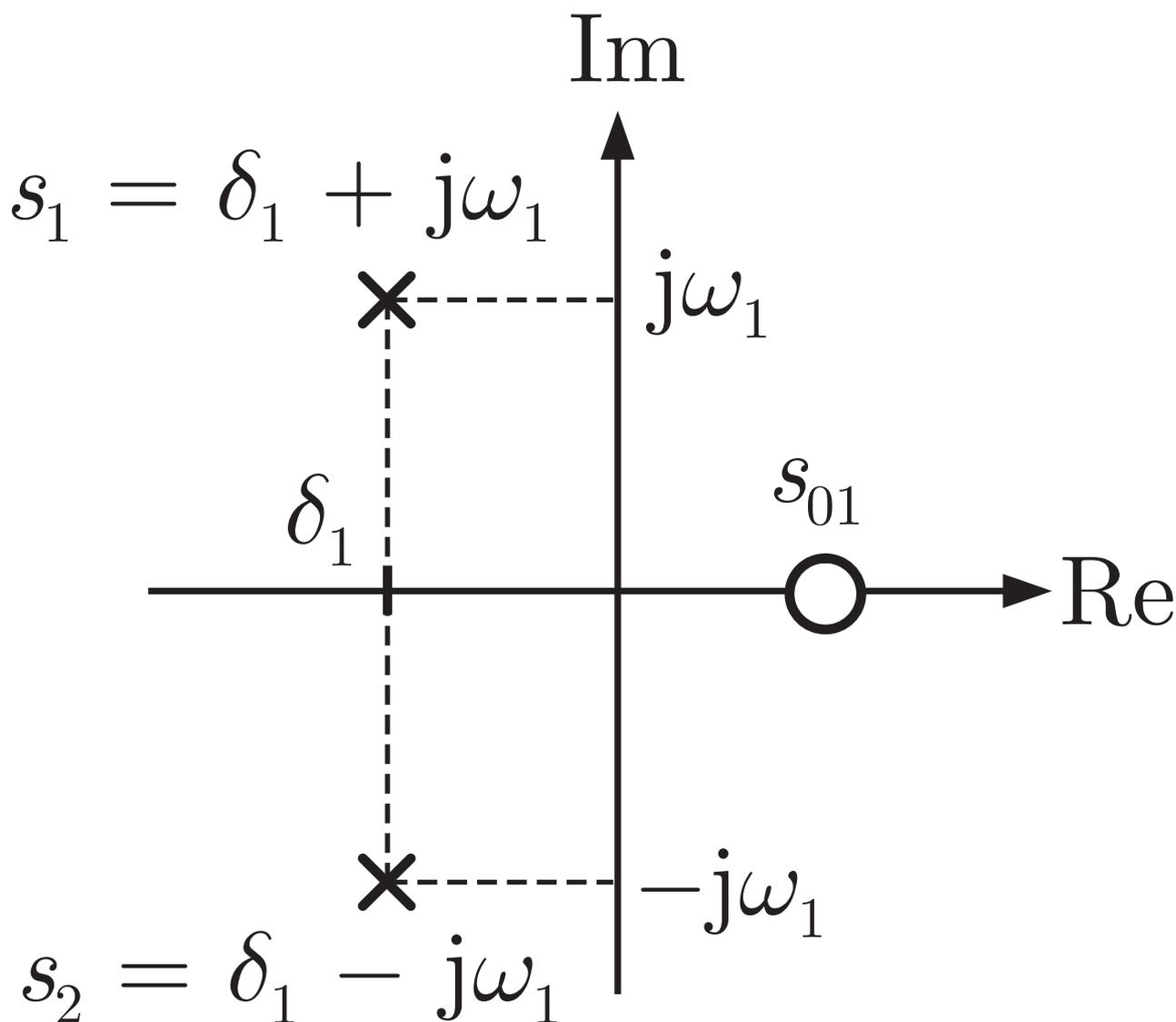


Abb. 6.17: Pol-Nullstellen-Bild einer Übertragungsfunktion

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

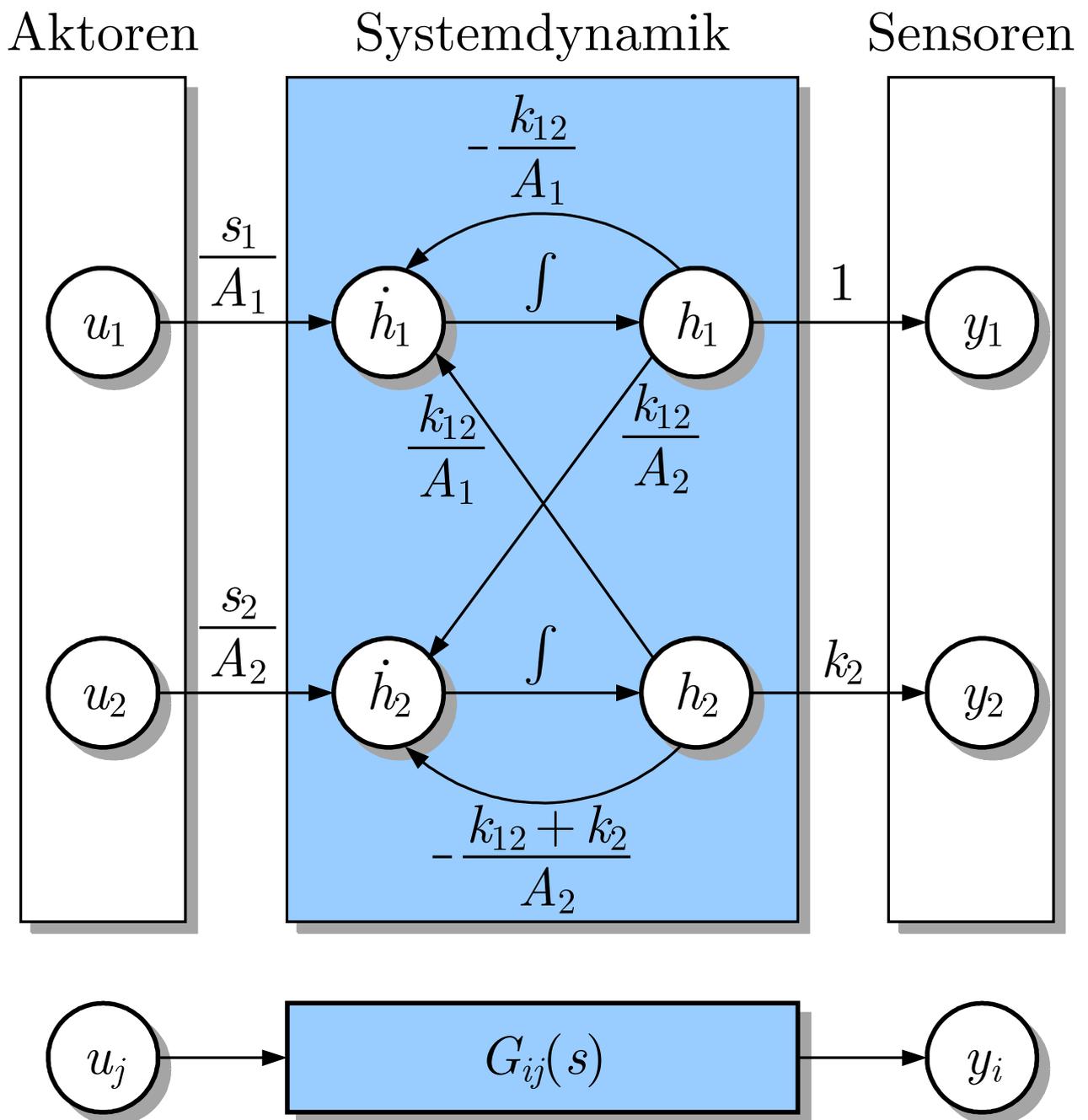


Abb. 6.18: Interpretation der Übertragungsfunktion des Behältersystems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

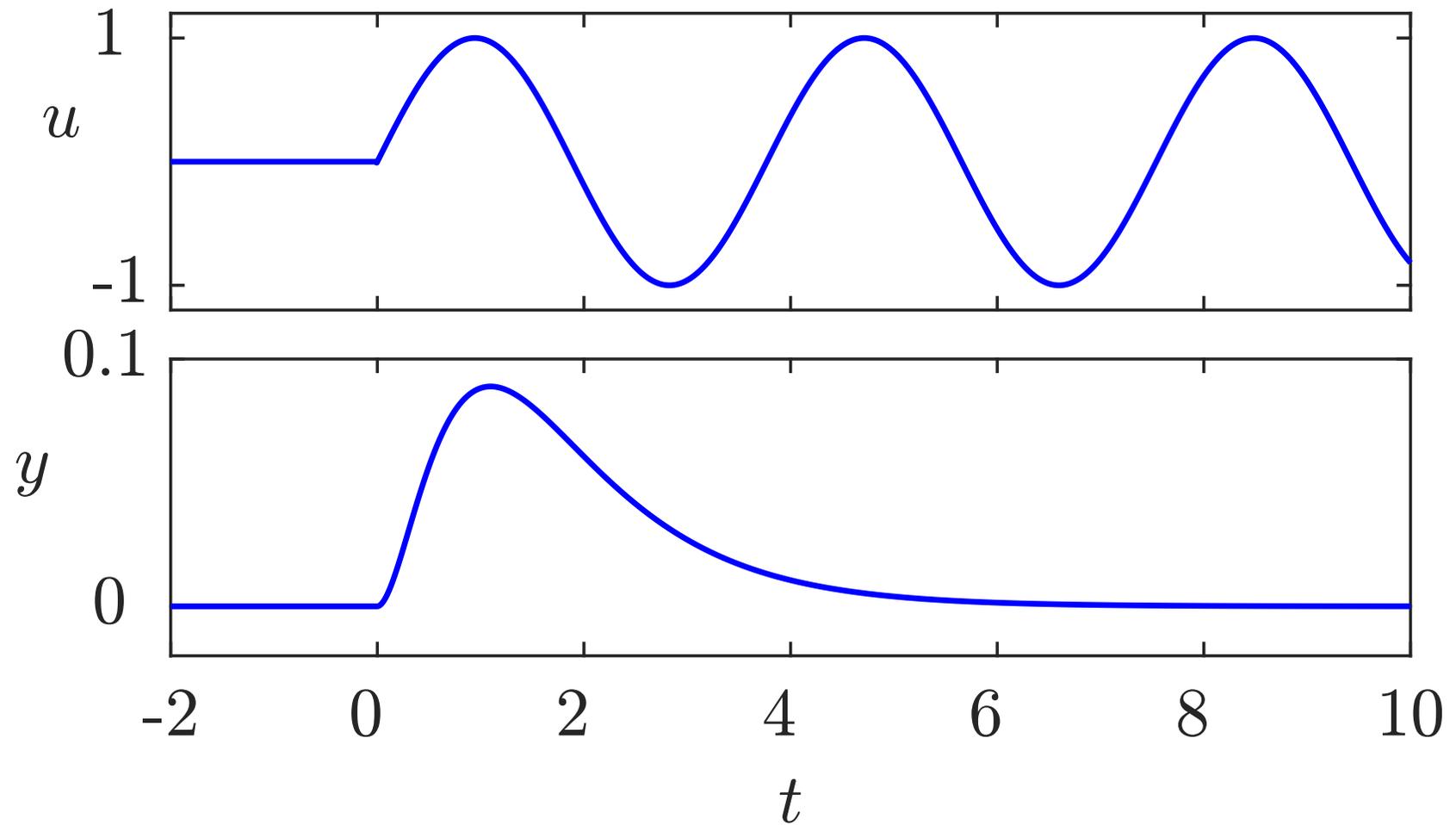


Abb. 6.19. Eingangsgröße und Ausgangsgröße des in Aufgabe 6.10 betrachteten Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

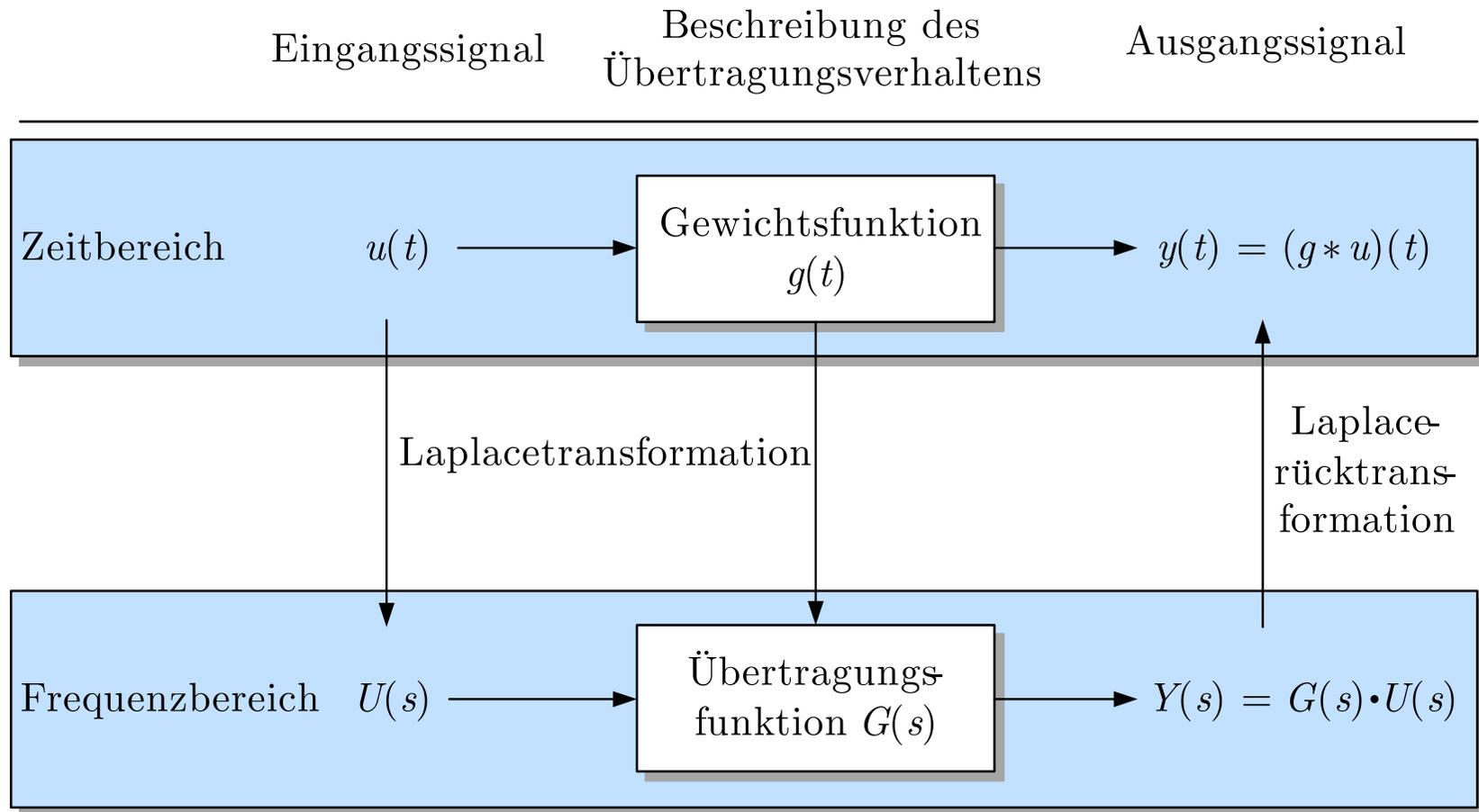


Abb. 6.20. Rechenschema für die Berechnung des Systemverhaltens mit Hilfe der Laplacetransformation

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

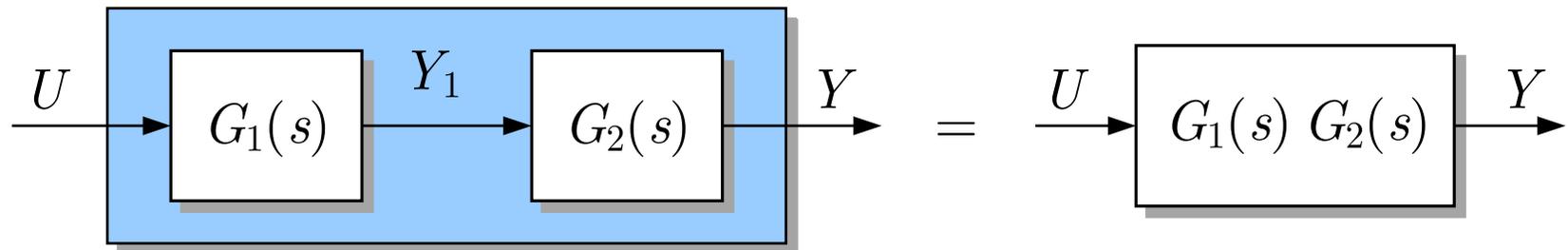


Abb. 6.21. Reihenschaltung zweier Übertragungsglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

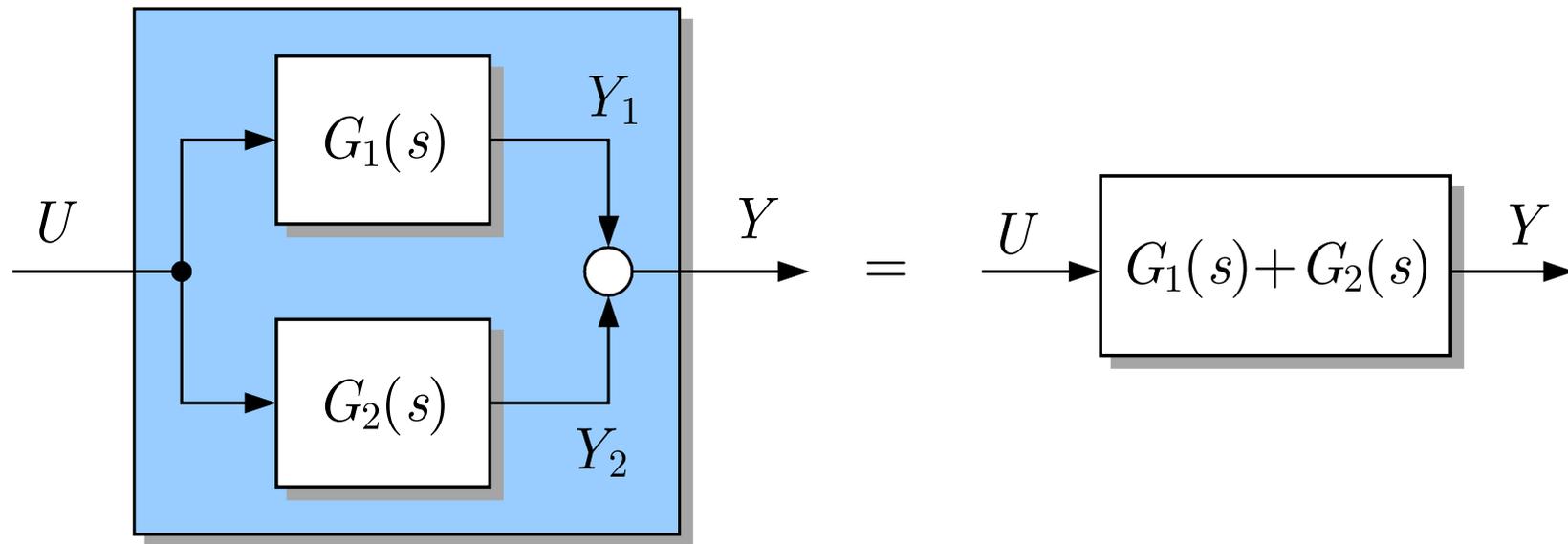


Abb. 6.22. Parallelschaltung zweier Übertragungsglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

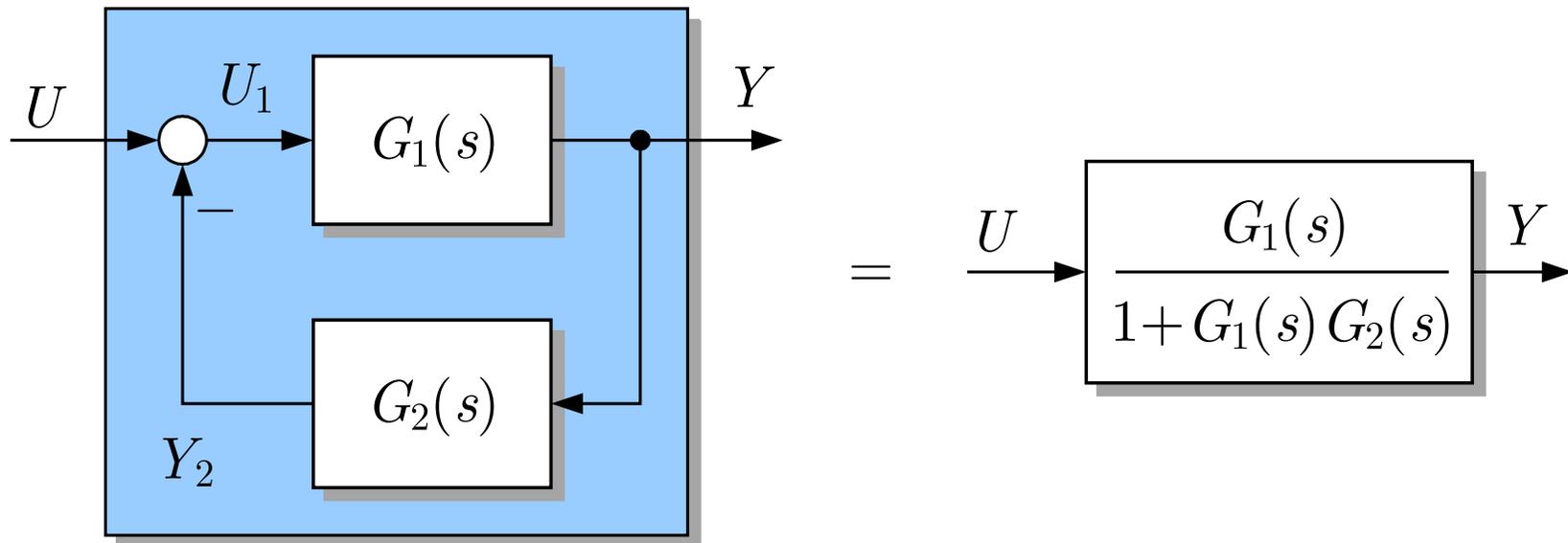


Abb. 6.23. Rückkopplungsschaltung zweier Übertragungsglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

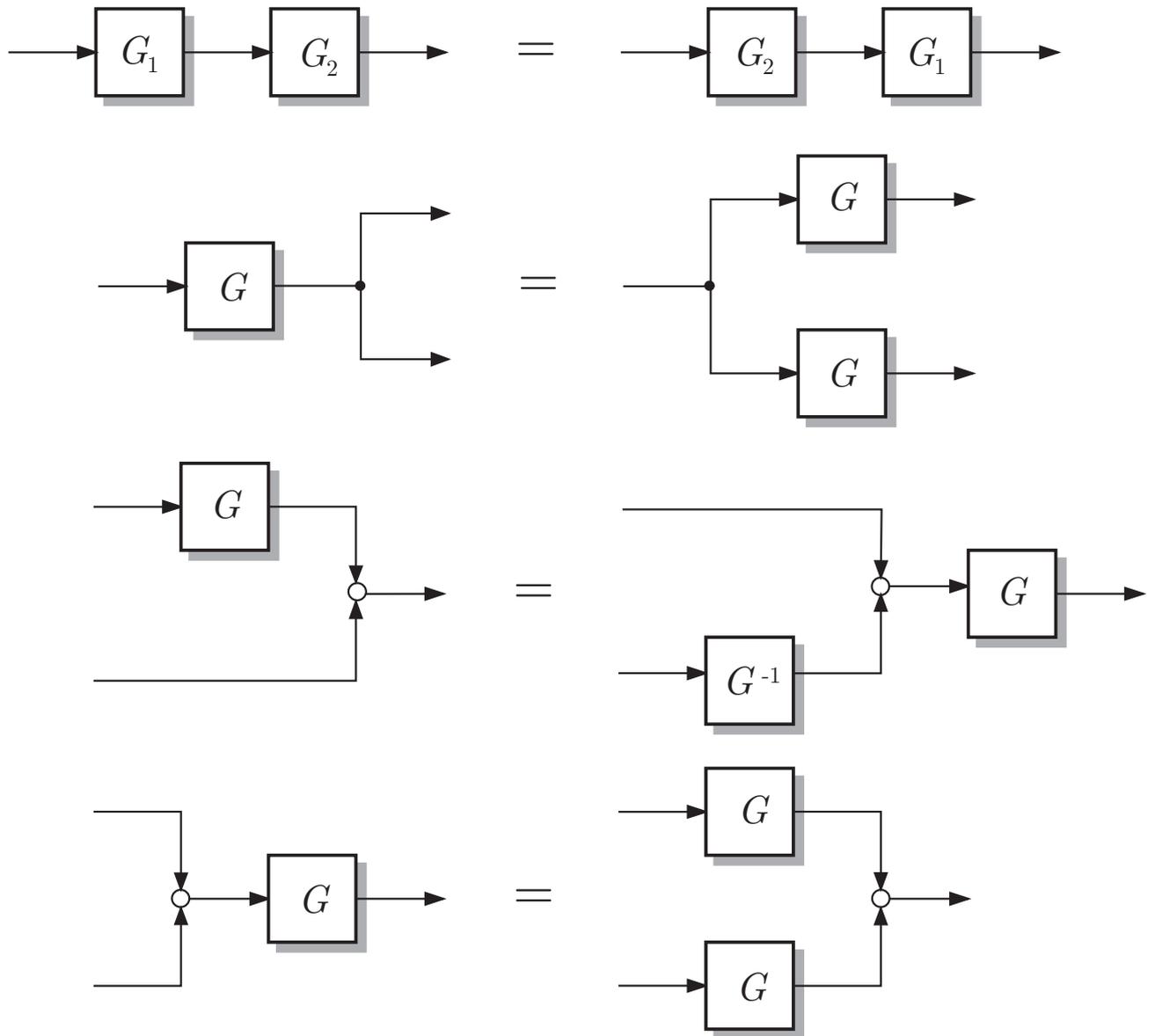


Abb. 6.24: Weitere Regeln für das Umformen von Blockschaltbildern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

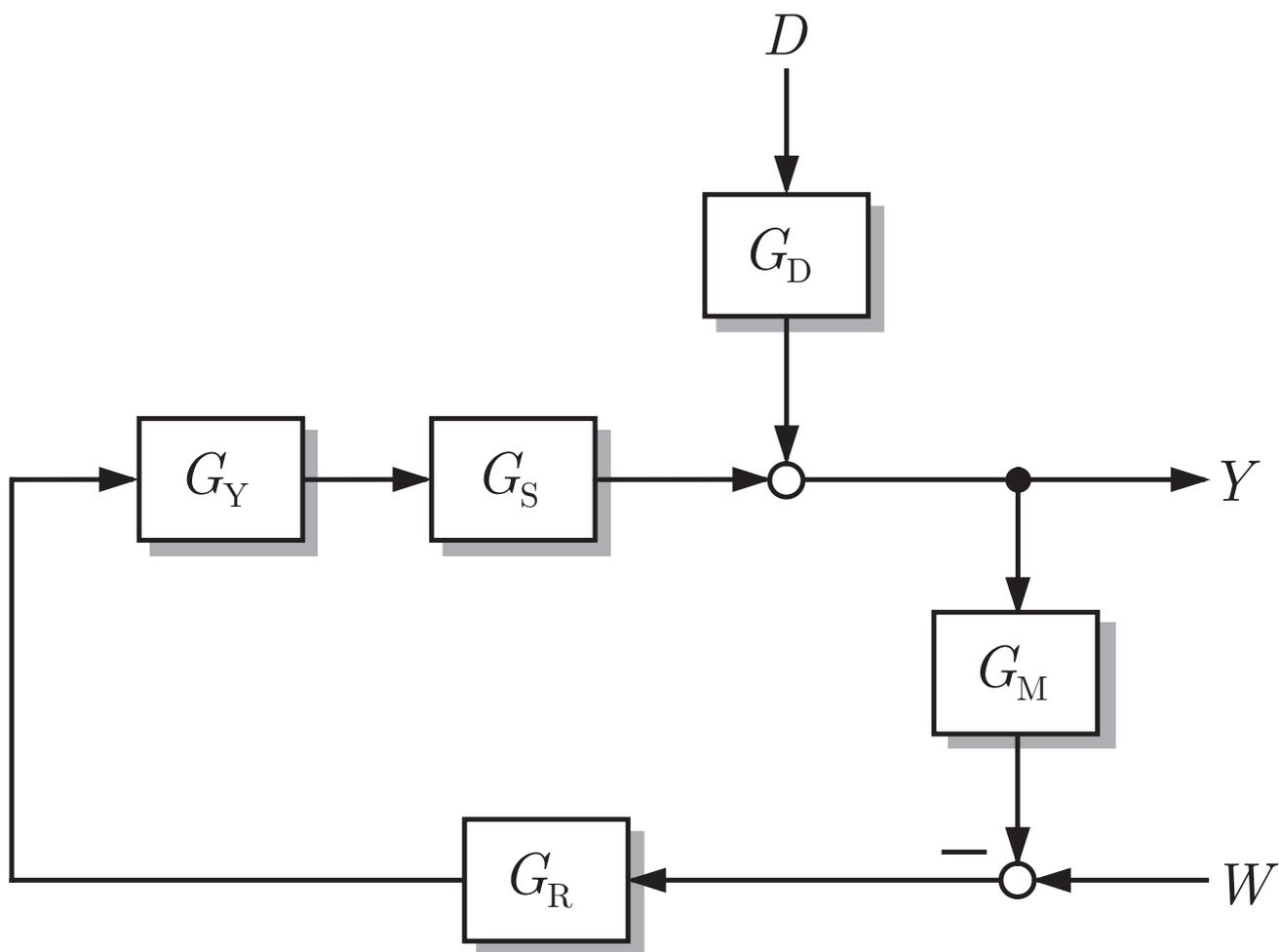


Abb. 6.25: Blockschaltbild eines Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

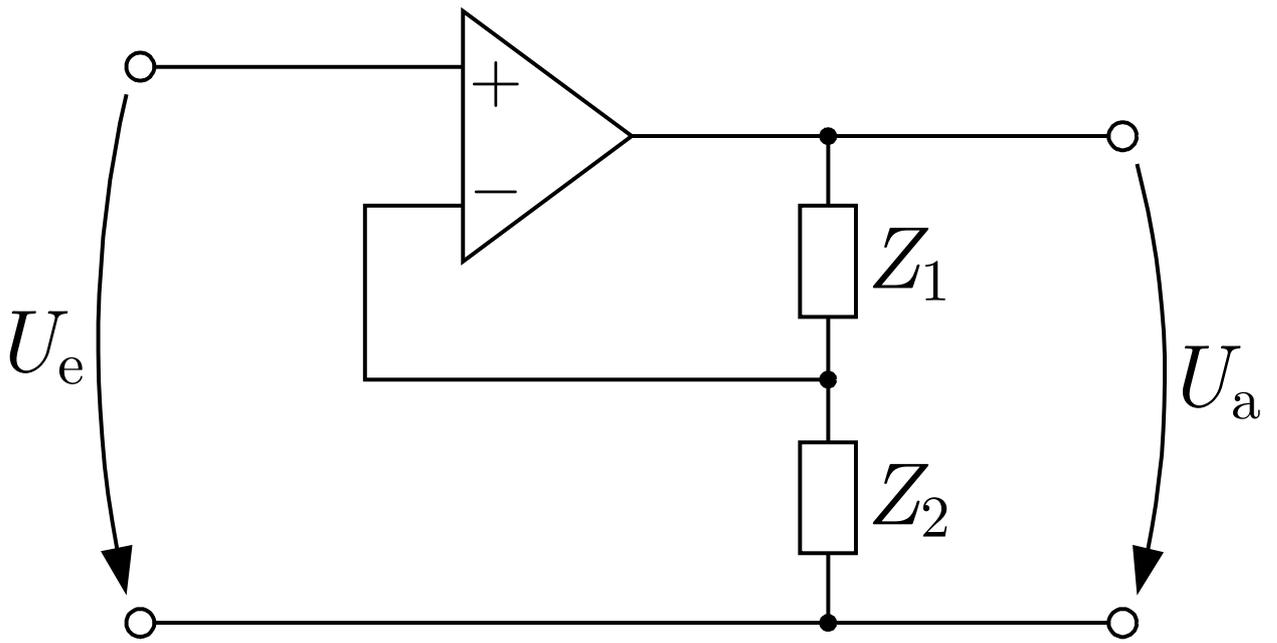


Abb. 6.26: Operationsverstärker mit Beschaltung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

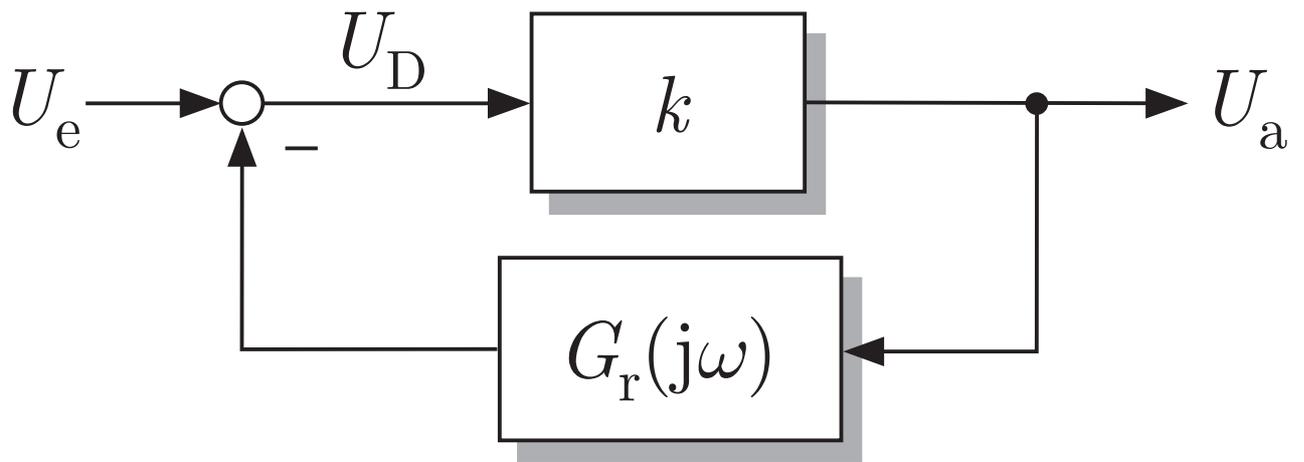


Abb. 6.27: Interpretation der Operationsverstärkerschaltung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

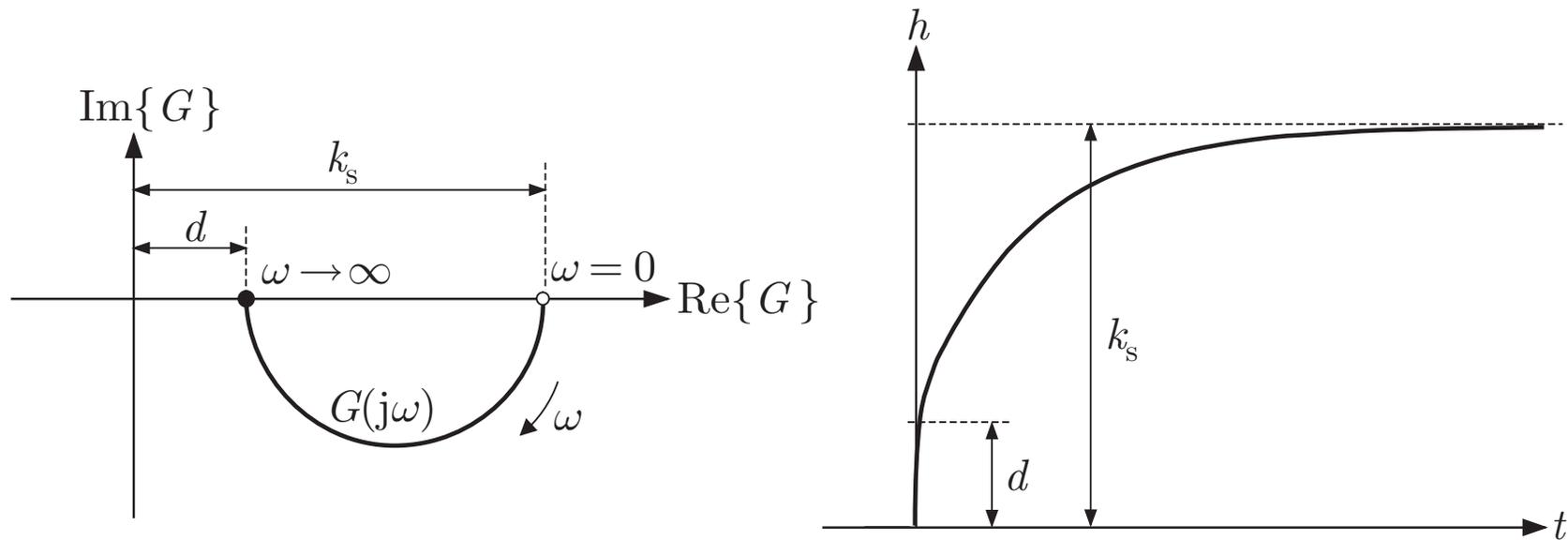


Abb. 6.28. Zusammenhang zwischen Frequenzgang $G(j\omega)$ und Übergangsfunktion $h(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

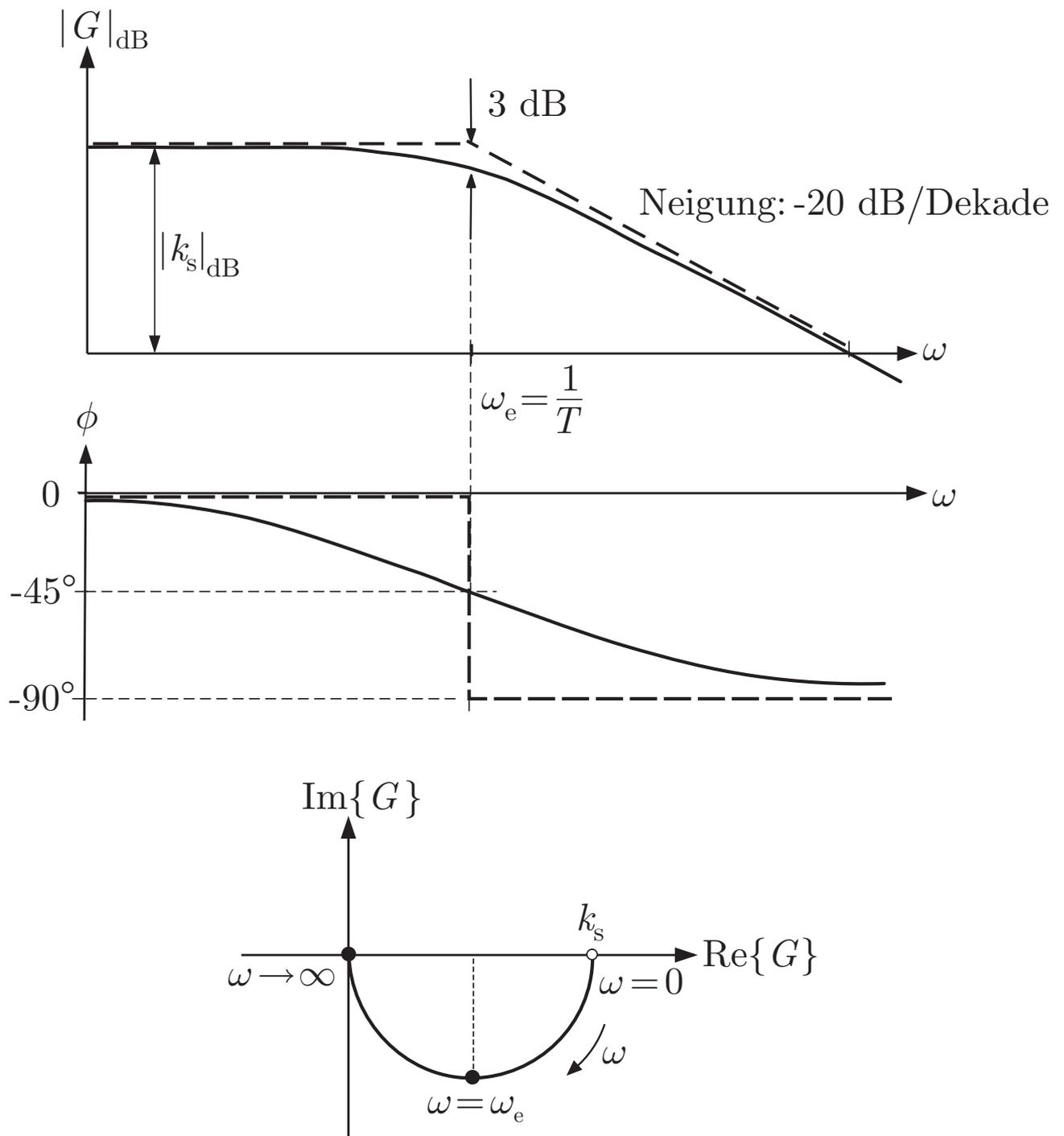


Abb. 6.29: Bodediagramm und Ortskurve eines PT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

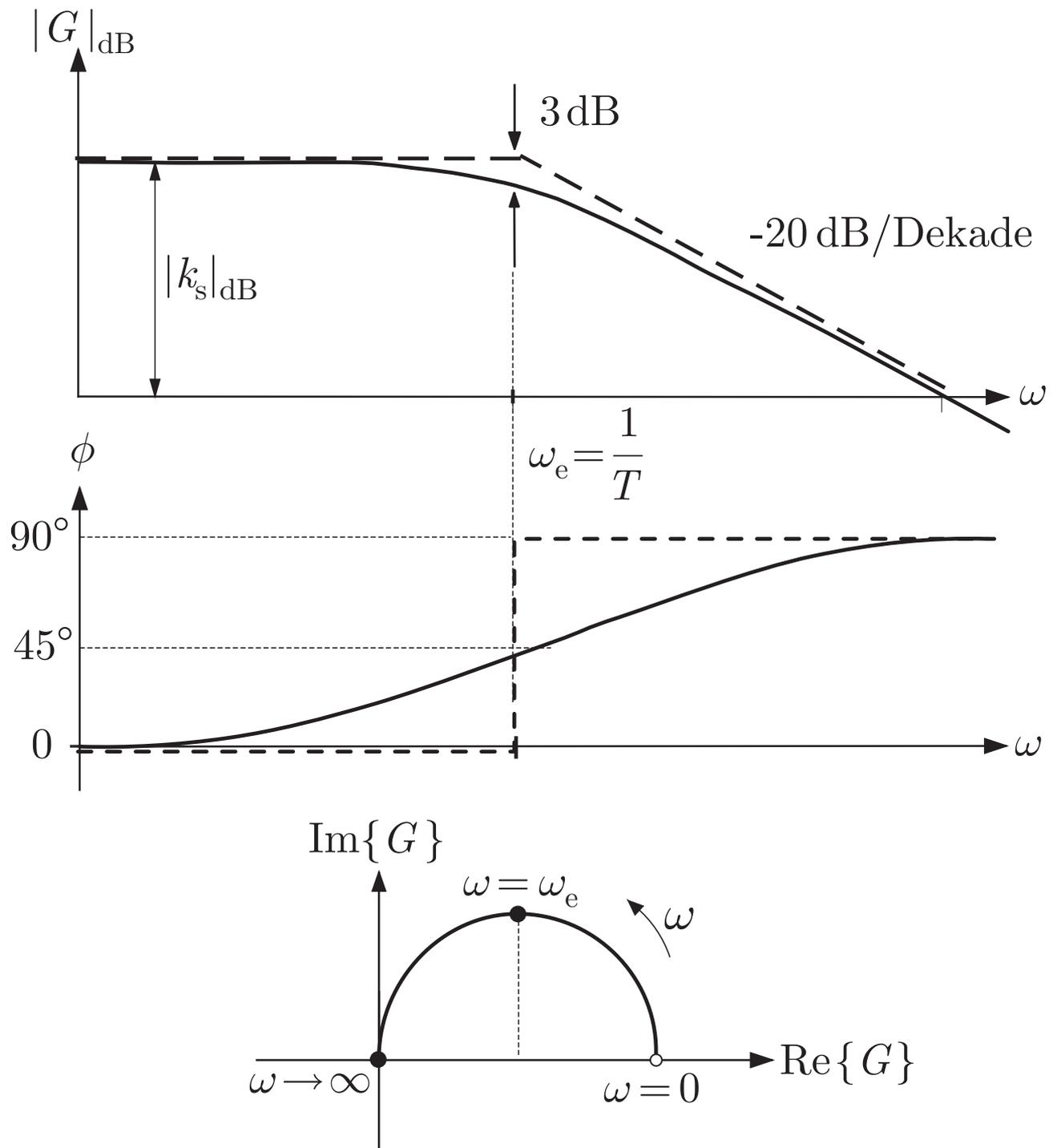


Abb. 6.30: Bodediagramm und Ortskurve eines instabilen Systems erster Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

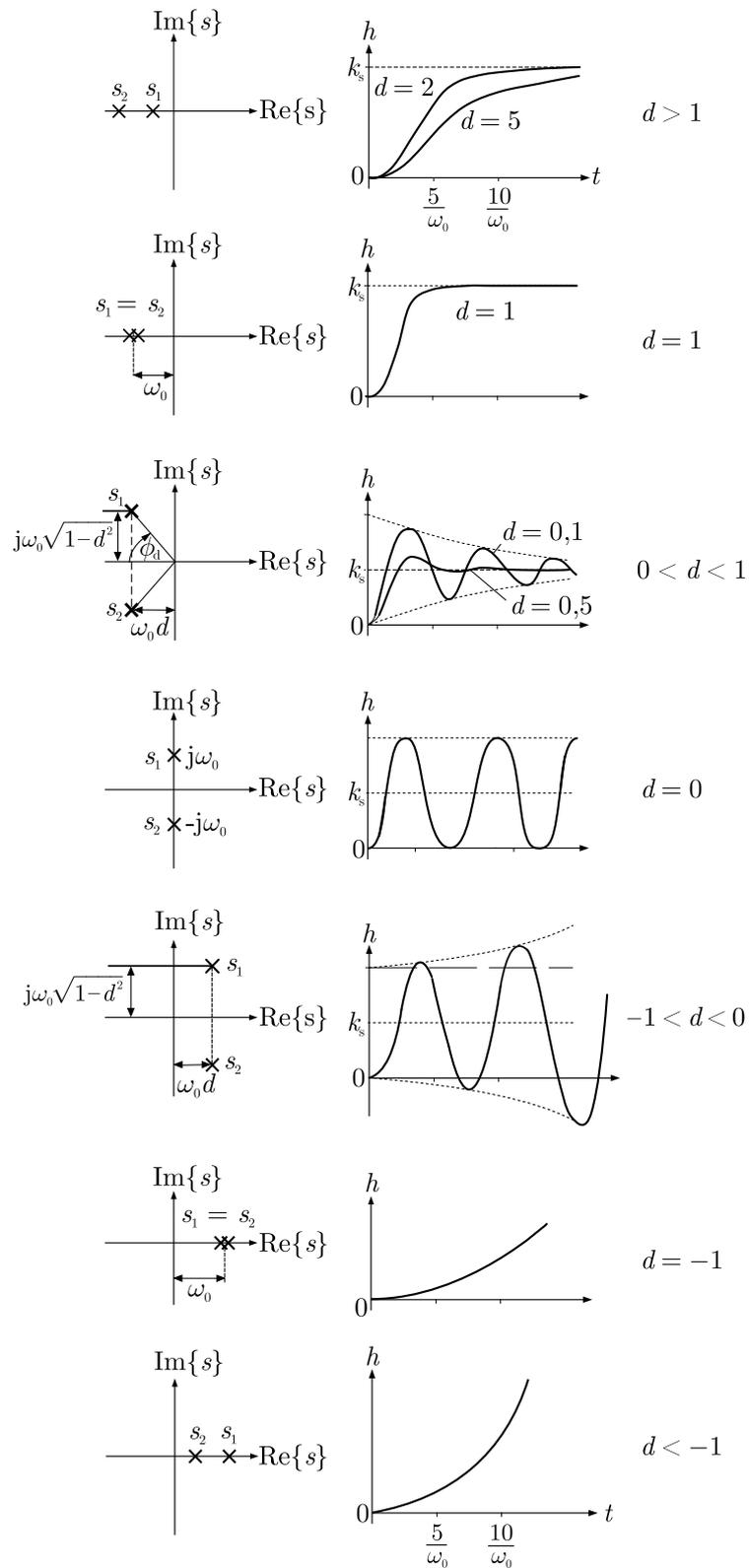


Abb. 6.31. Pole und Übergangsfunktion von PT₂-Gliedern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

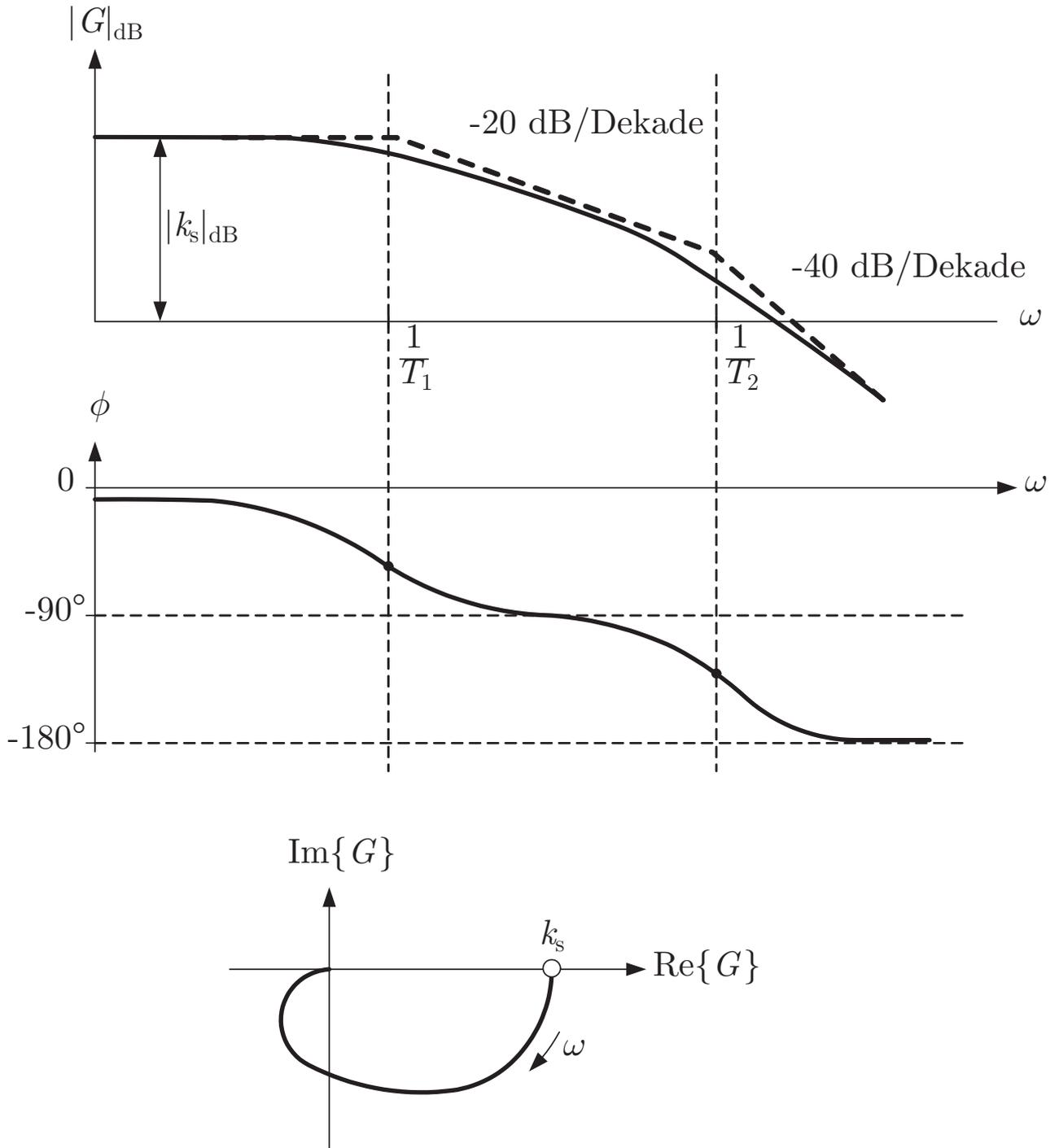


Abb. 6.32: Bodediagramm und Ortskurve des PT₂-Gliedes (6.112)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

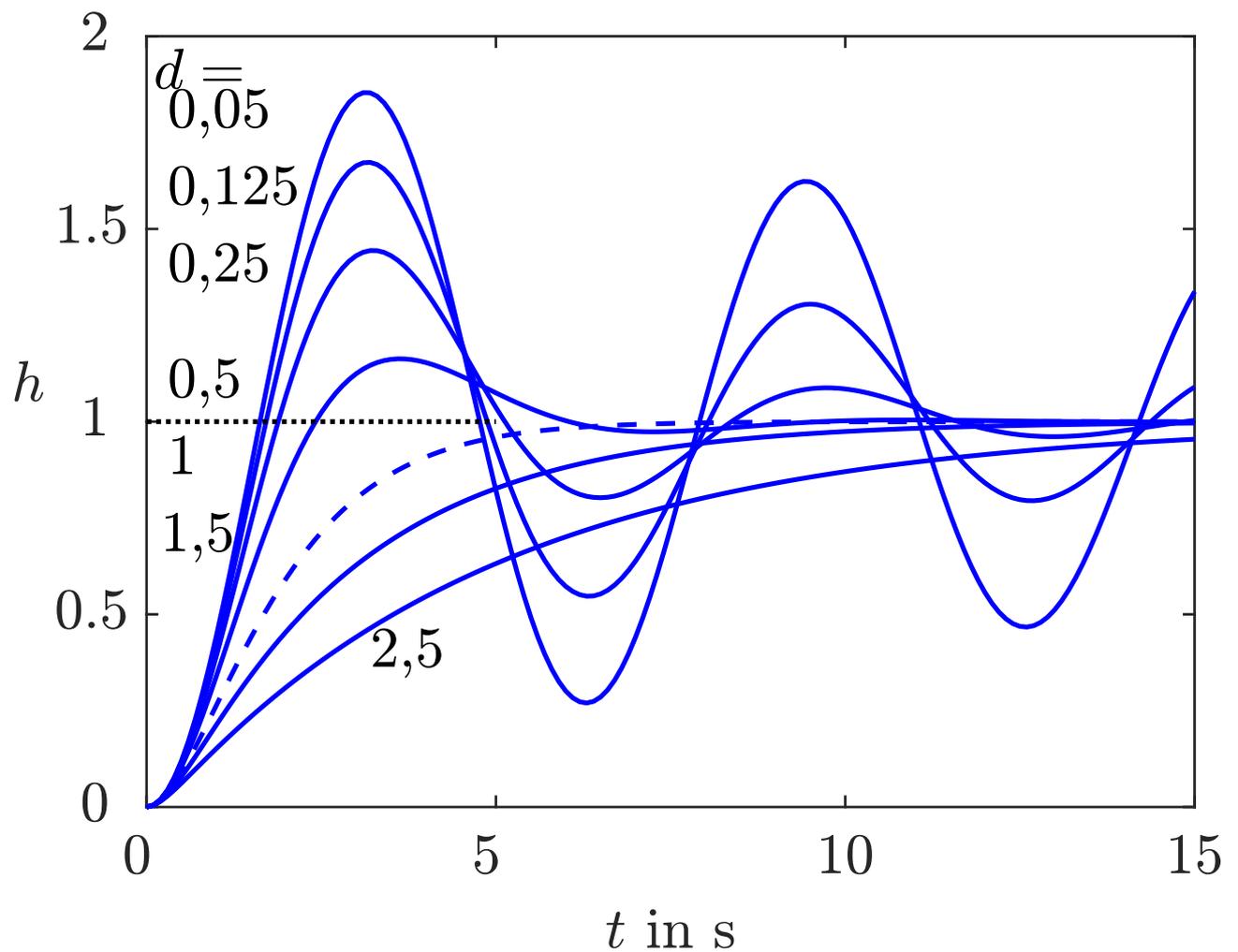


Abb. 6.33: Übergangsfunktionen von Schwingungsgliedern mit unterschiedlicher Dämpfung und derselben Zeitkonstante $T = 1$ und statischen Verstärkung $k_s = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

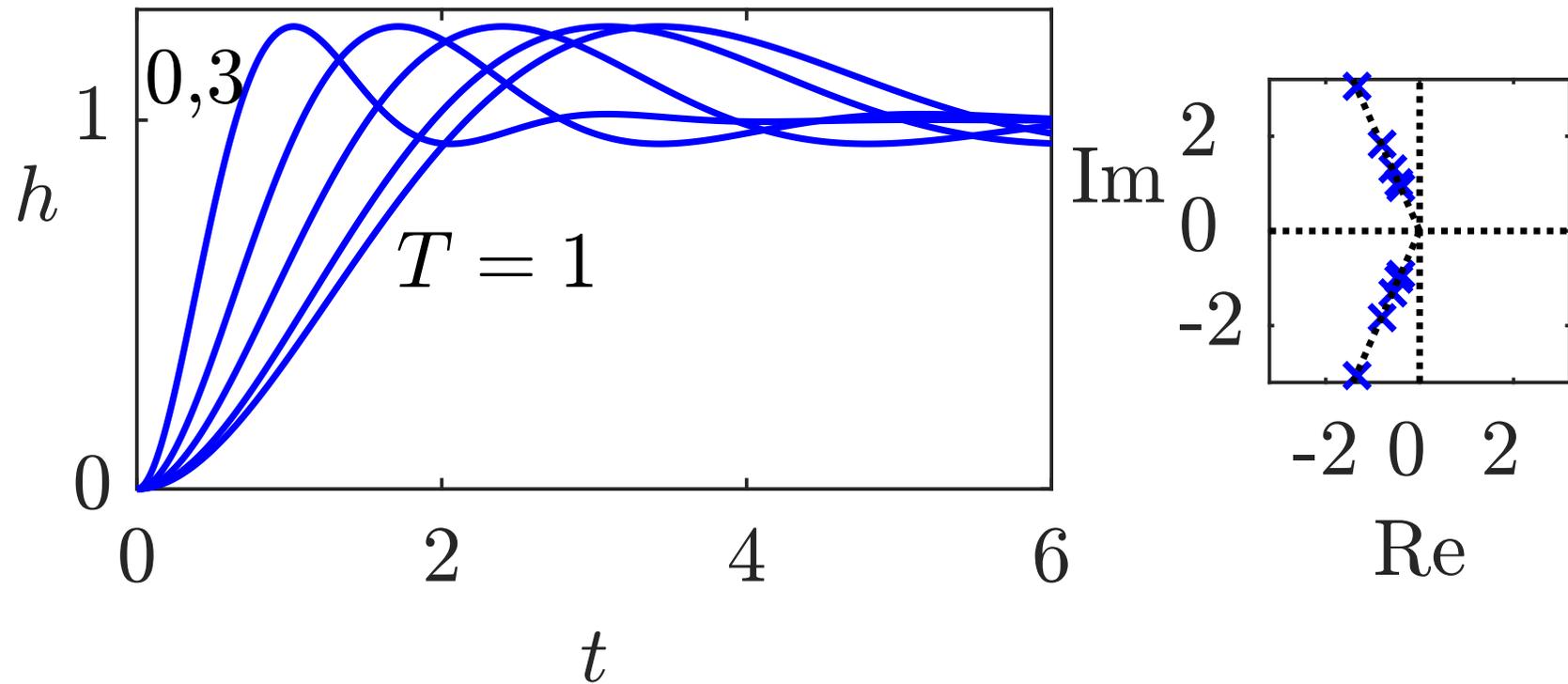


Abb. 6.34. Übergangsfunktion von PT_2 -Gliedern mit derselben Dämpfung $d = 0,4$ und unterschiedlichen Zeitkonstanten $T = 0,3, 0,5, 0,7, 0,9$ und 1

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

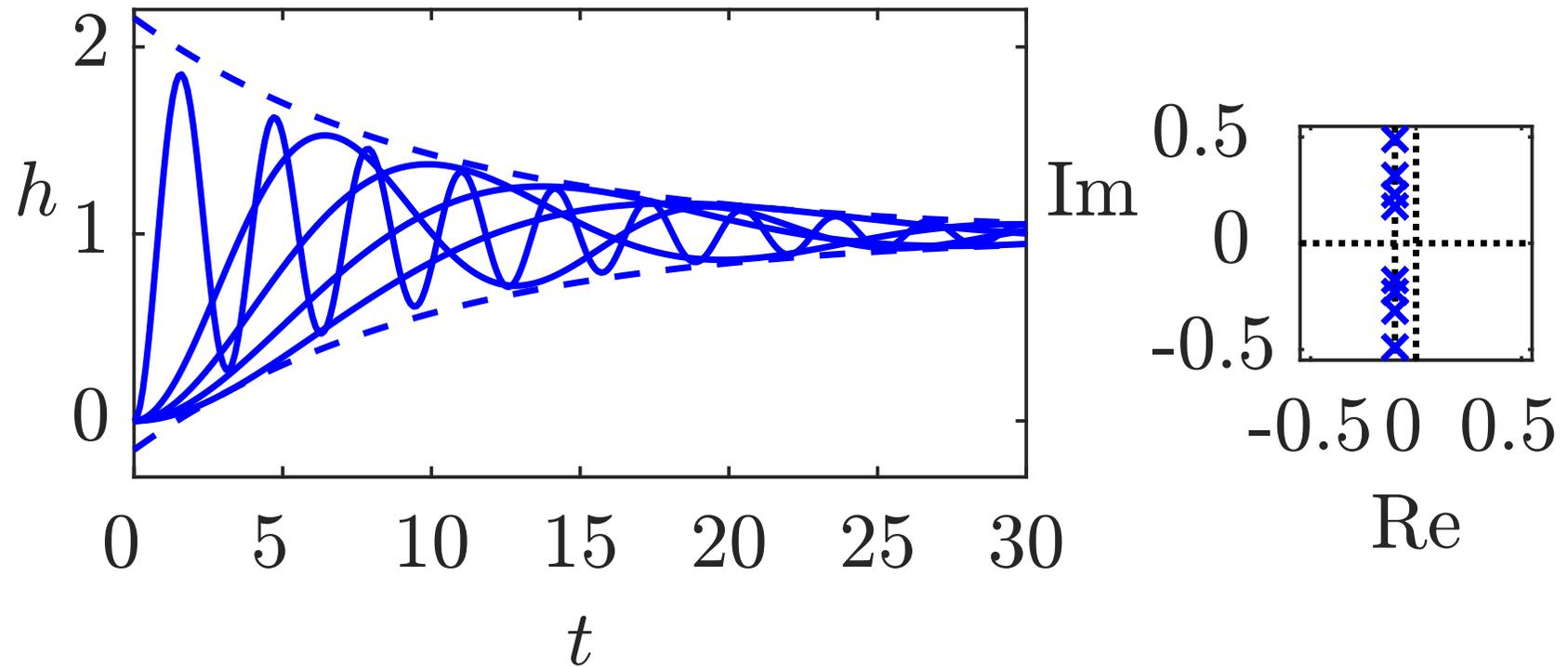


Abb. 6.35. Übergangsfunktion von PT_2 -Gliedern mit Polen $\text{Re}\{s_i\} = -0,1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

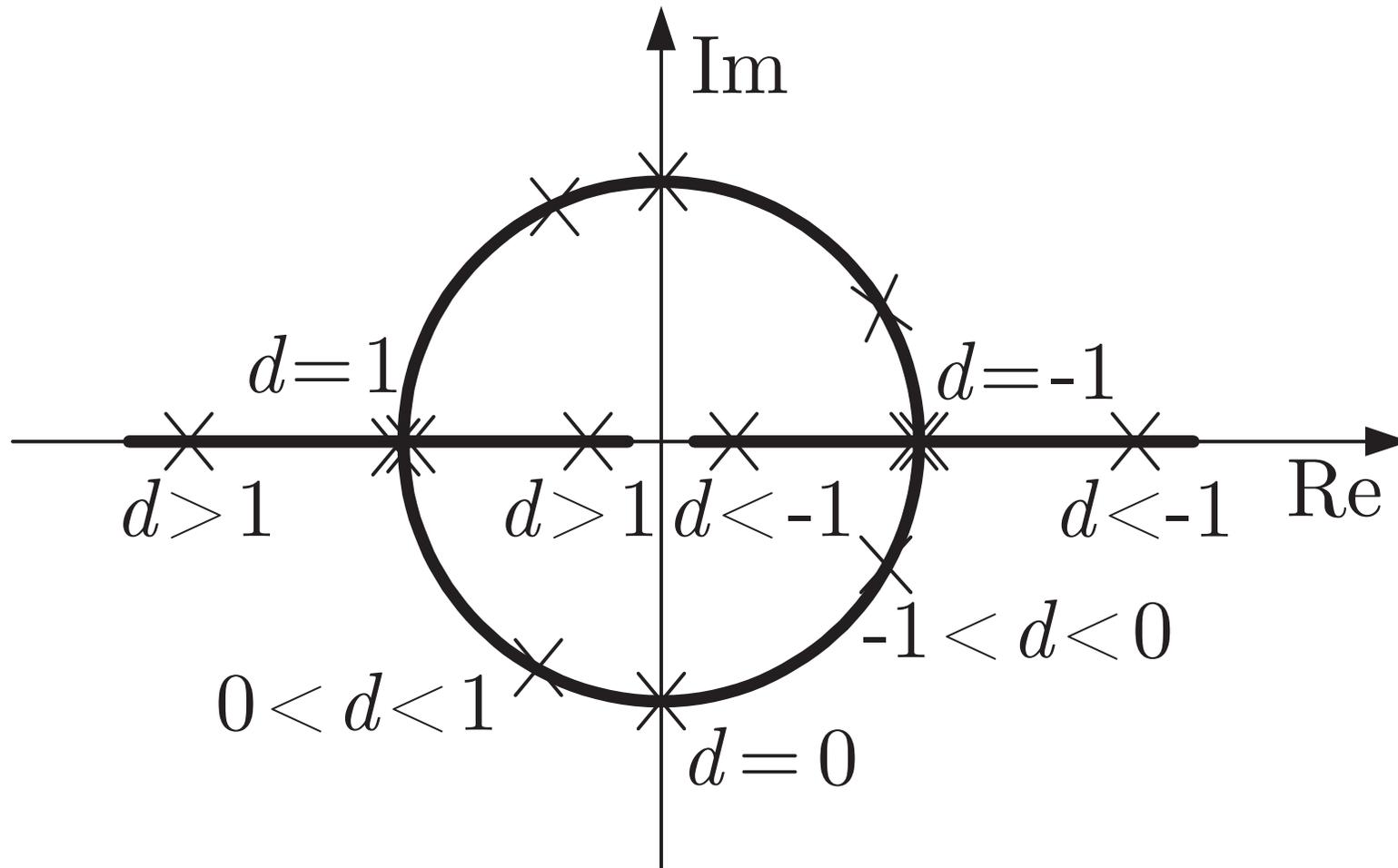


Abb. 6.36. Lage der beiden Pole von PT₂-Gliedern mit $T = 1$ in Abhängigkeit vom Dämpfungsfaktor d

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

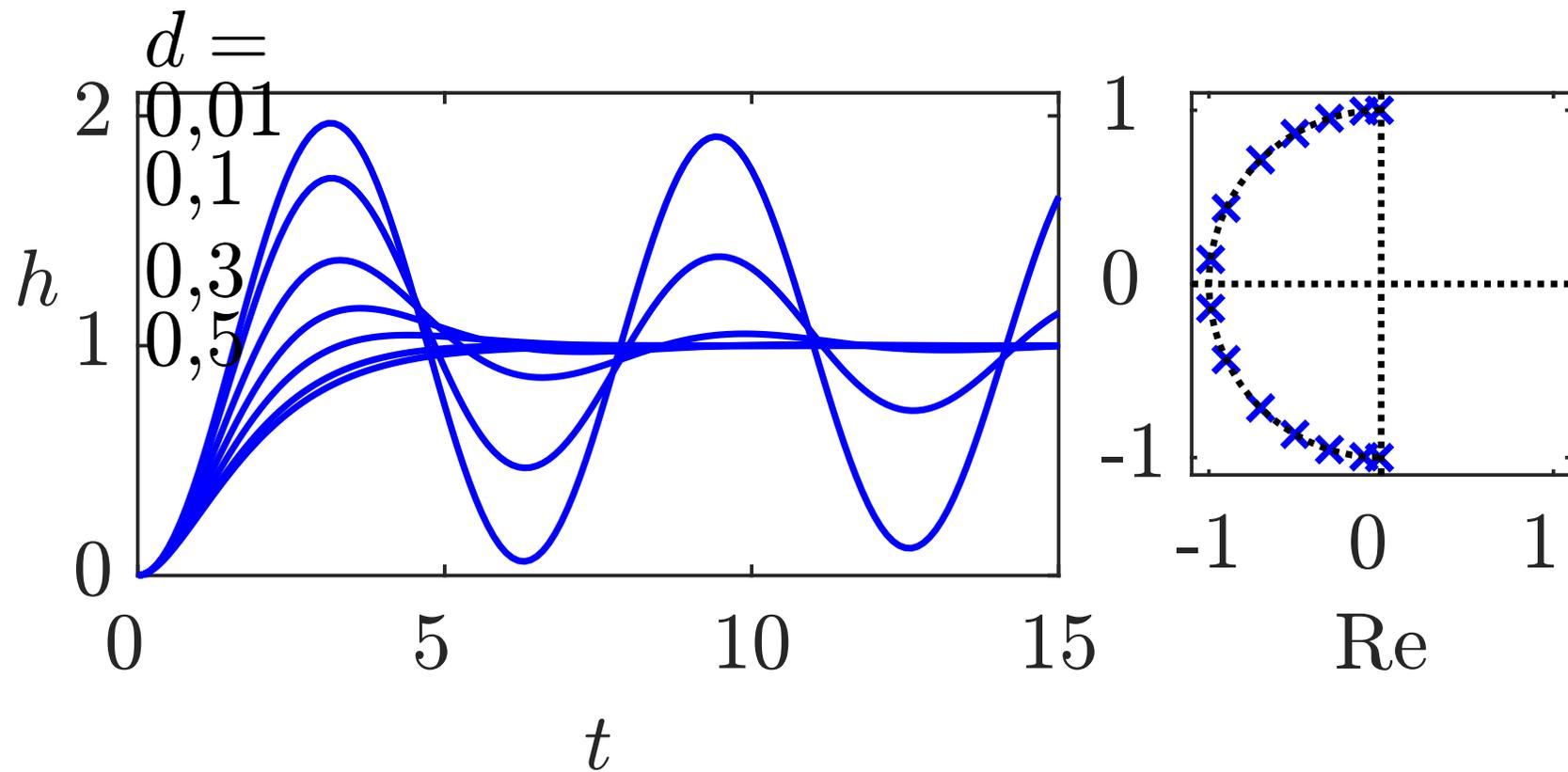
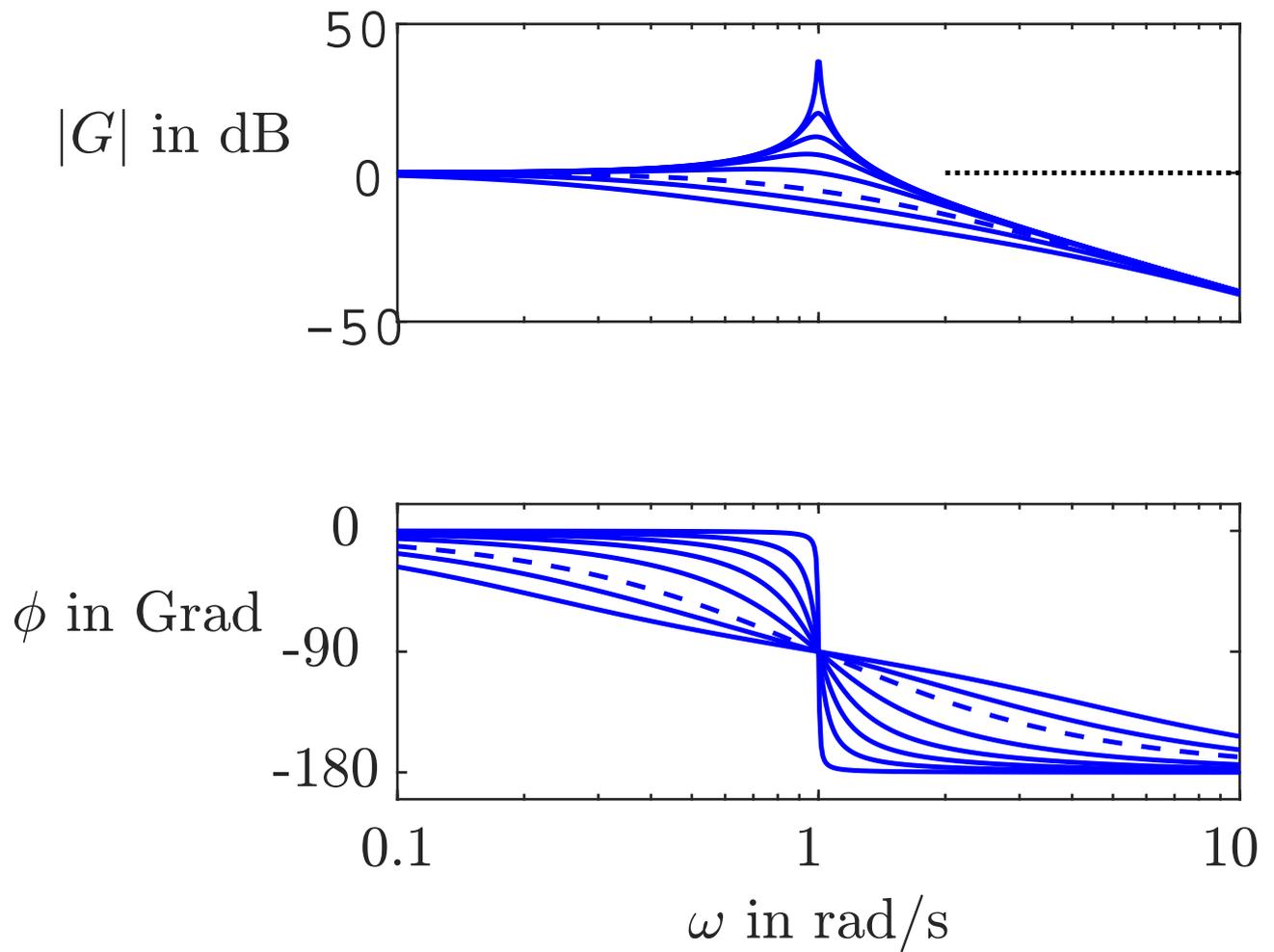


Abb. 6.37. Übergangsfunktionen von PT_2 -Gliedern mit unterschiedlicher Dämpfung d und derselben Eigenfrequenz $\omega_0 = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 6.38: Bodediagramm von PT_2 -Gliedern mit $k_s = 1$,
 $T = 1$ und $0 < d < 1$**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

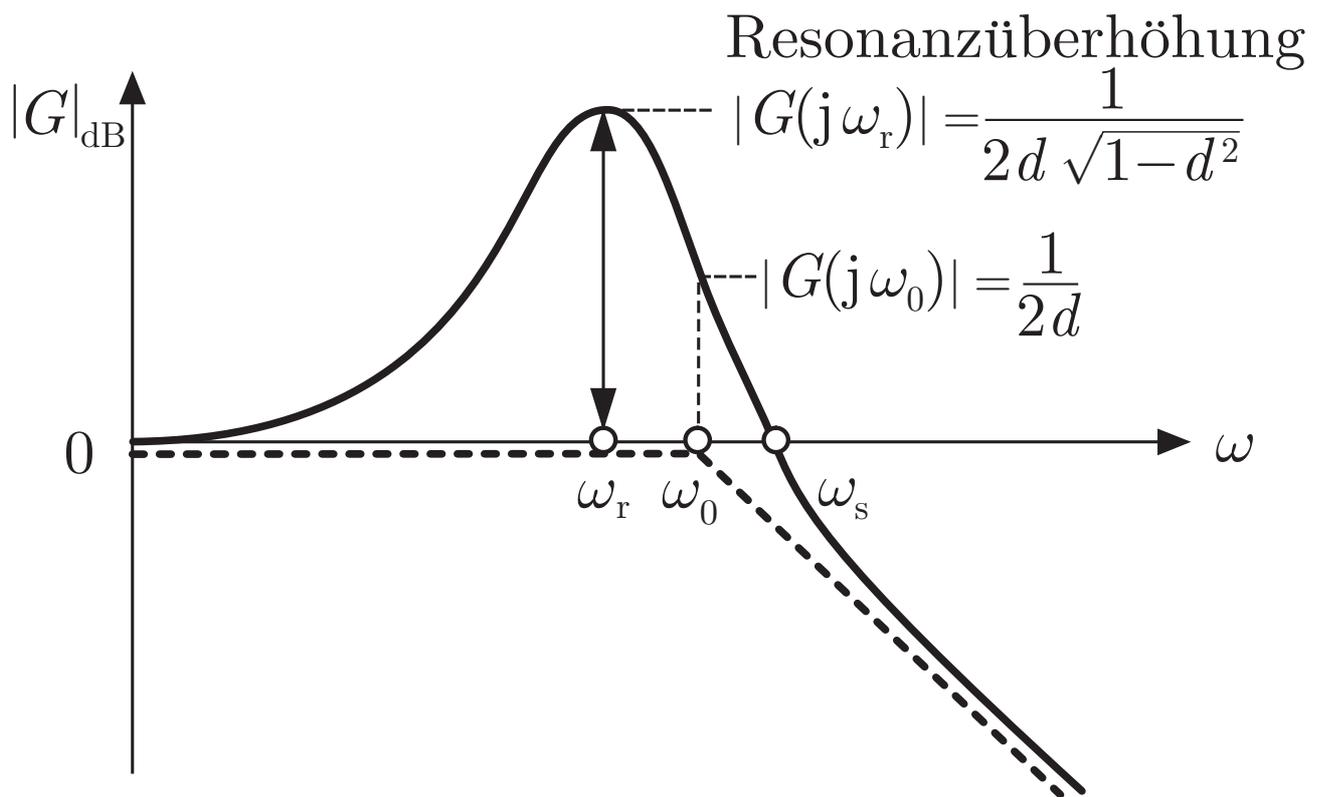


Abb. 6.39: Resonanzüberhöhung beim PT₂-Glied für
 $0 < d < \frac{1}{\sqrt{2}}, k_s = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

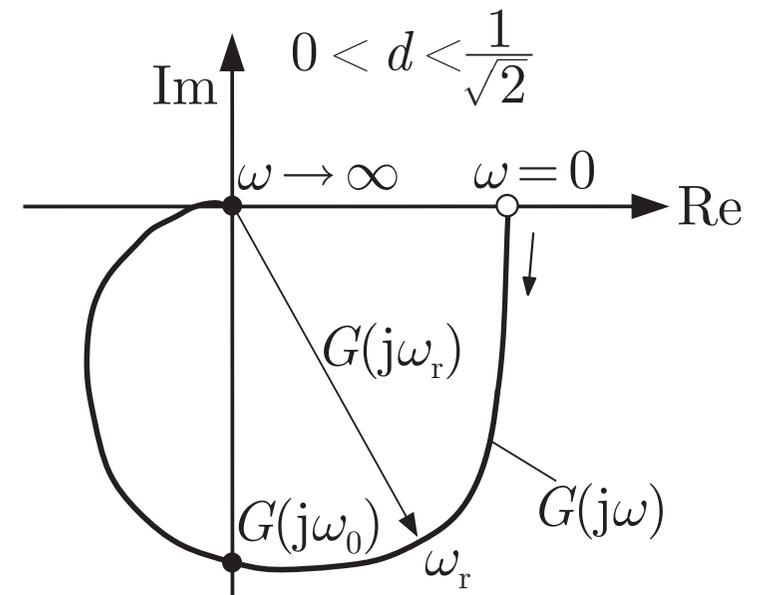
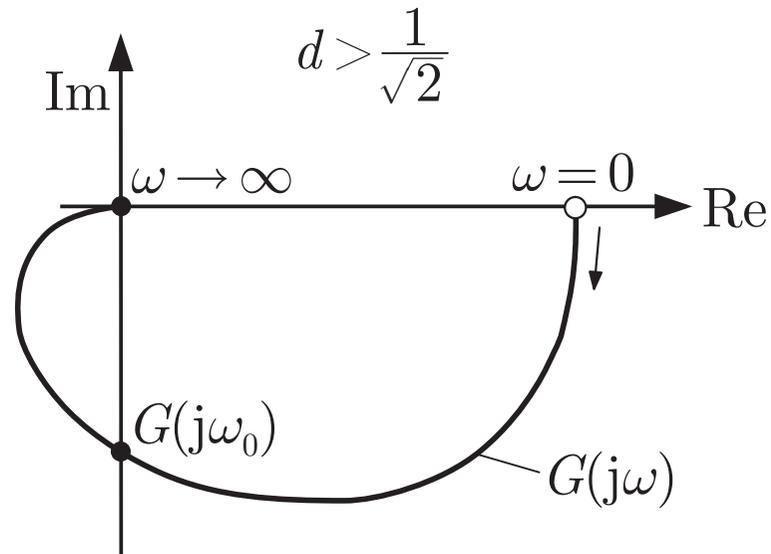


Abb. 6.40. Prinzipieller Verlauf der Ortskurve von PT₂-Gliedern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

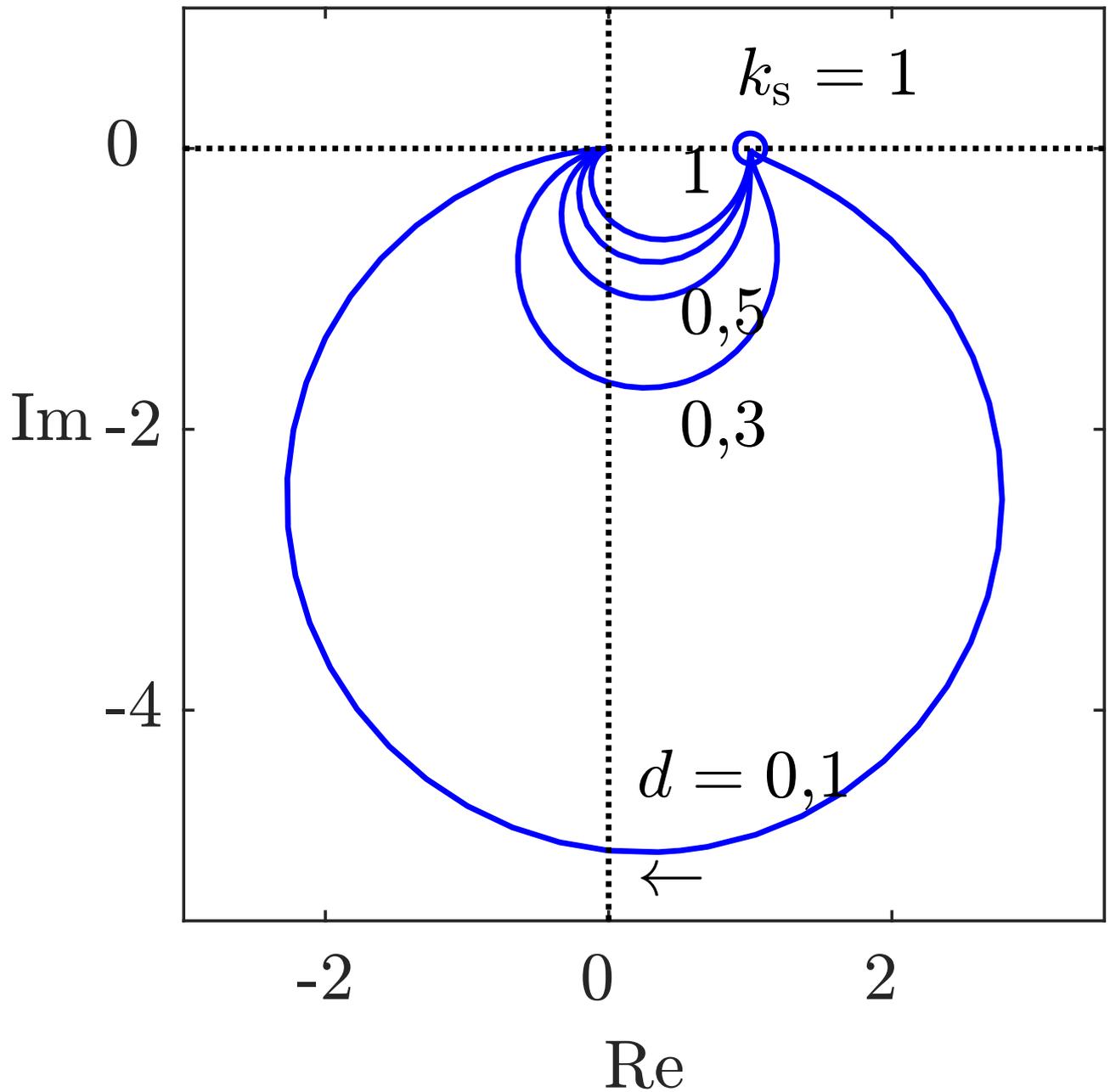


Abb. 6.41: Ortskurven von PT_2 -Gliedern mit $k_s = 1$, $T = 1$ und $d = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ und 1

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

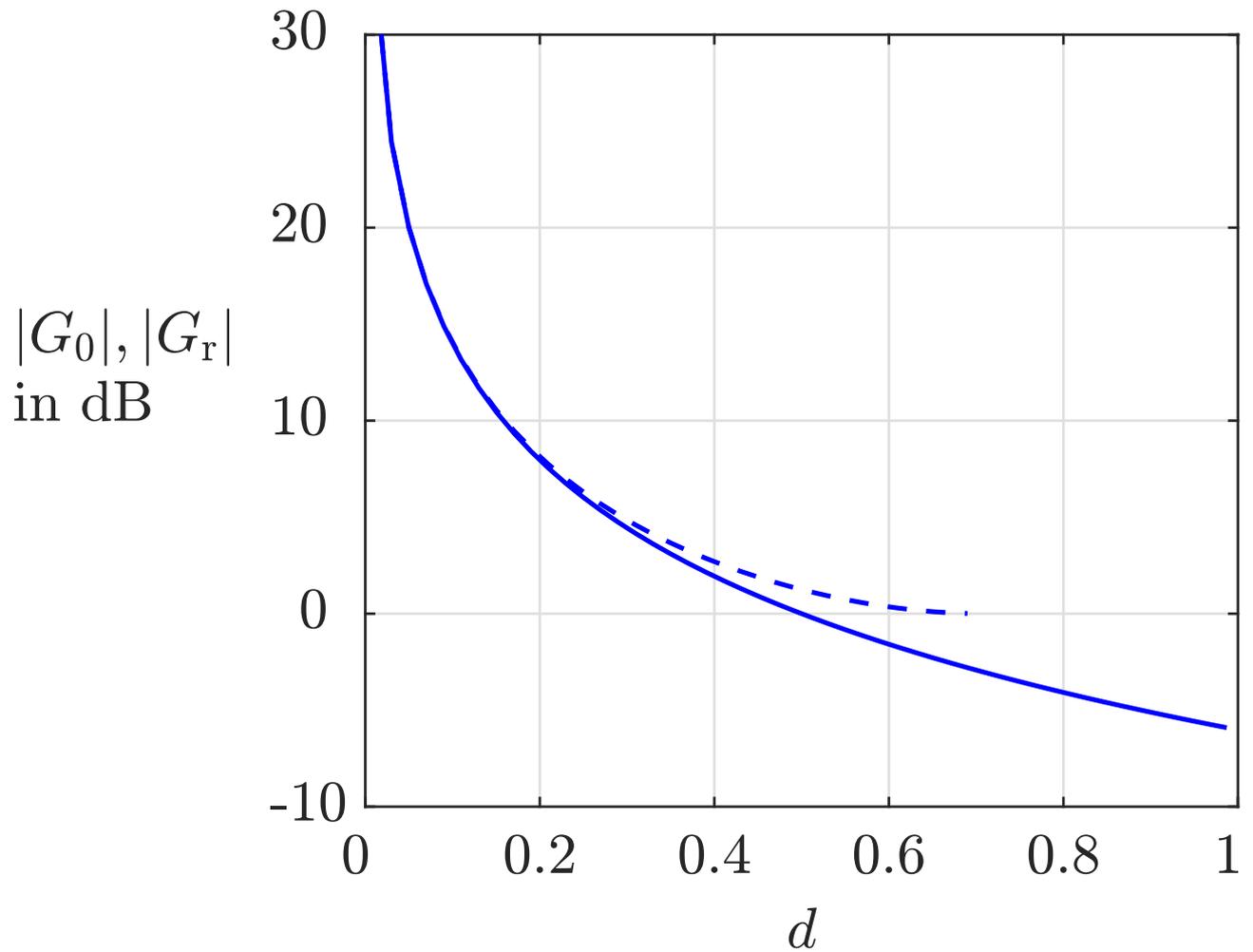


Abb. 6.42: Abhängigkeit von $|G(j\omega_r)|$ - - - und $|G(j\omega_0)|$ — von der Dämpfung d (bei $|k_s| = 1$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

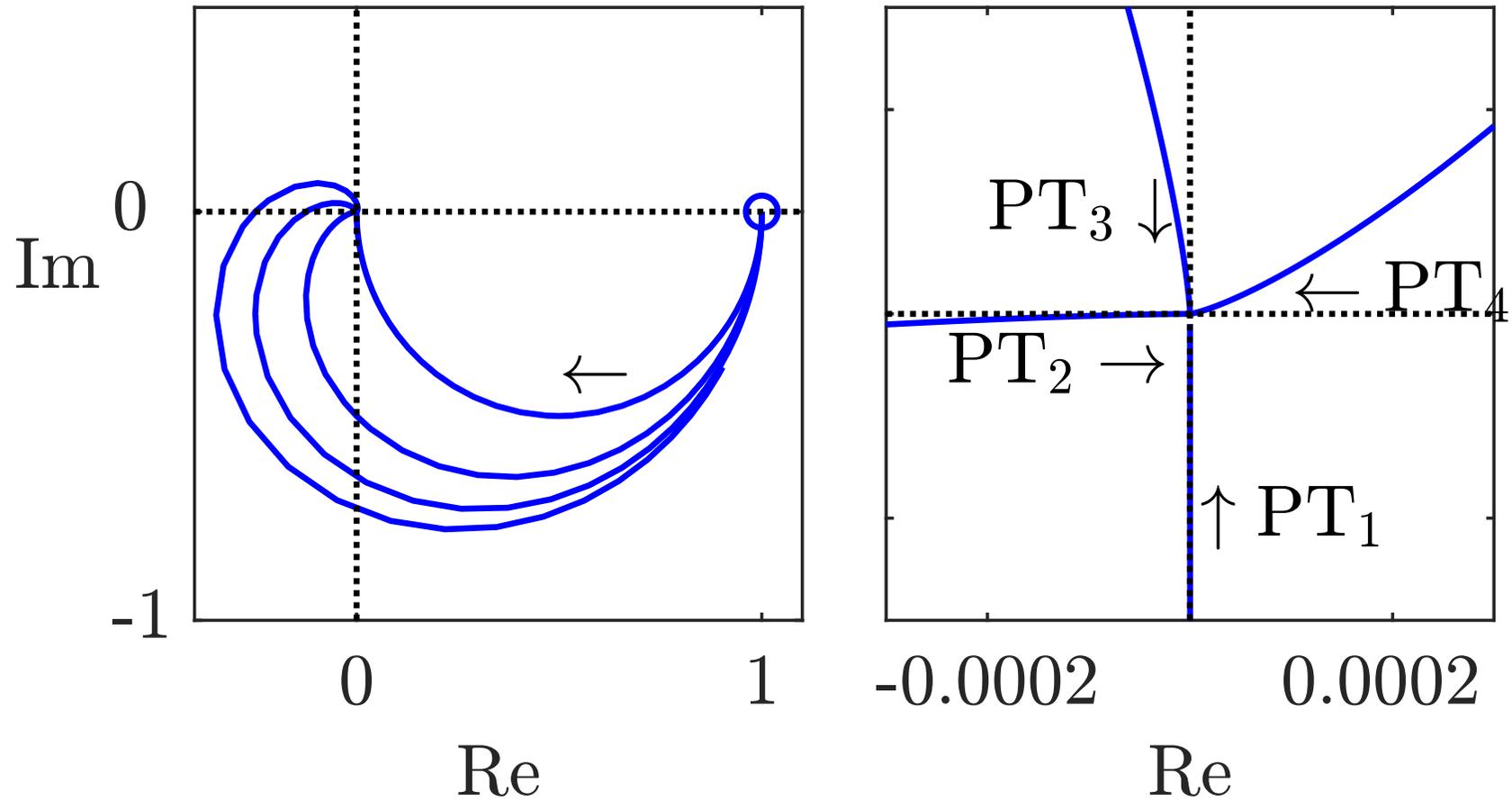


Abb. 6.43. Ortskurve von PT_n -Gliedern (Gesamtbild links und Ausschnitt um den Nullpunkt rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

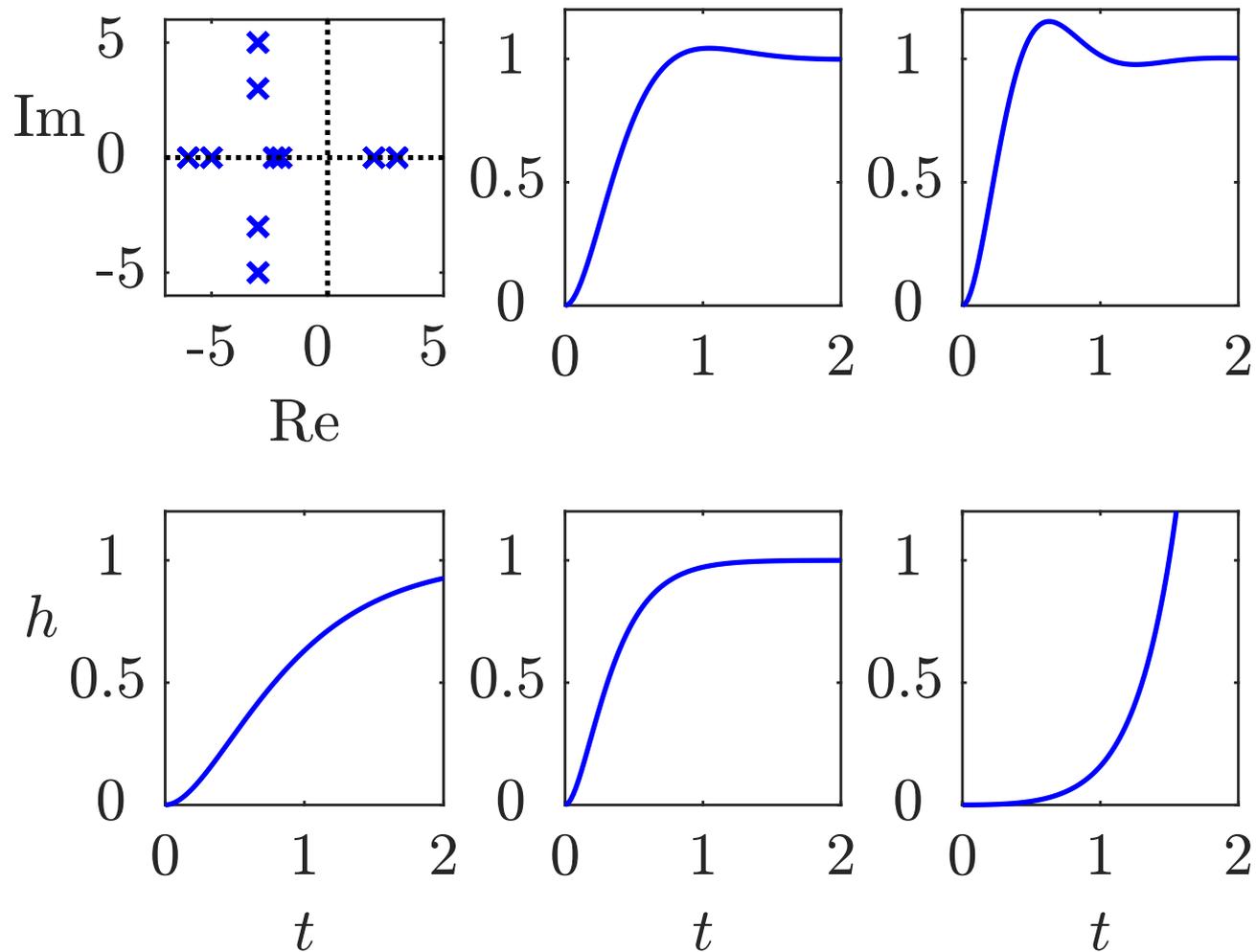


Abb. 6.44: PN-Bild und Übergangsfunktionen von PT_2 -Gliedern

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

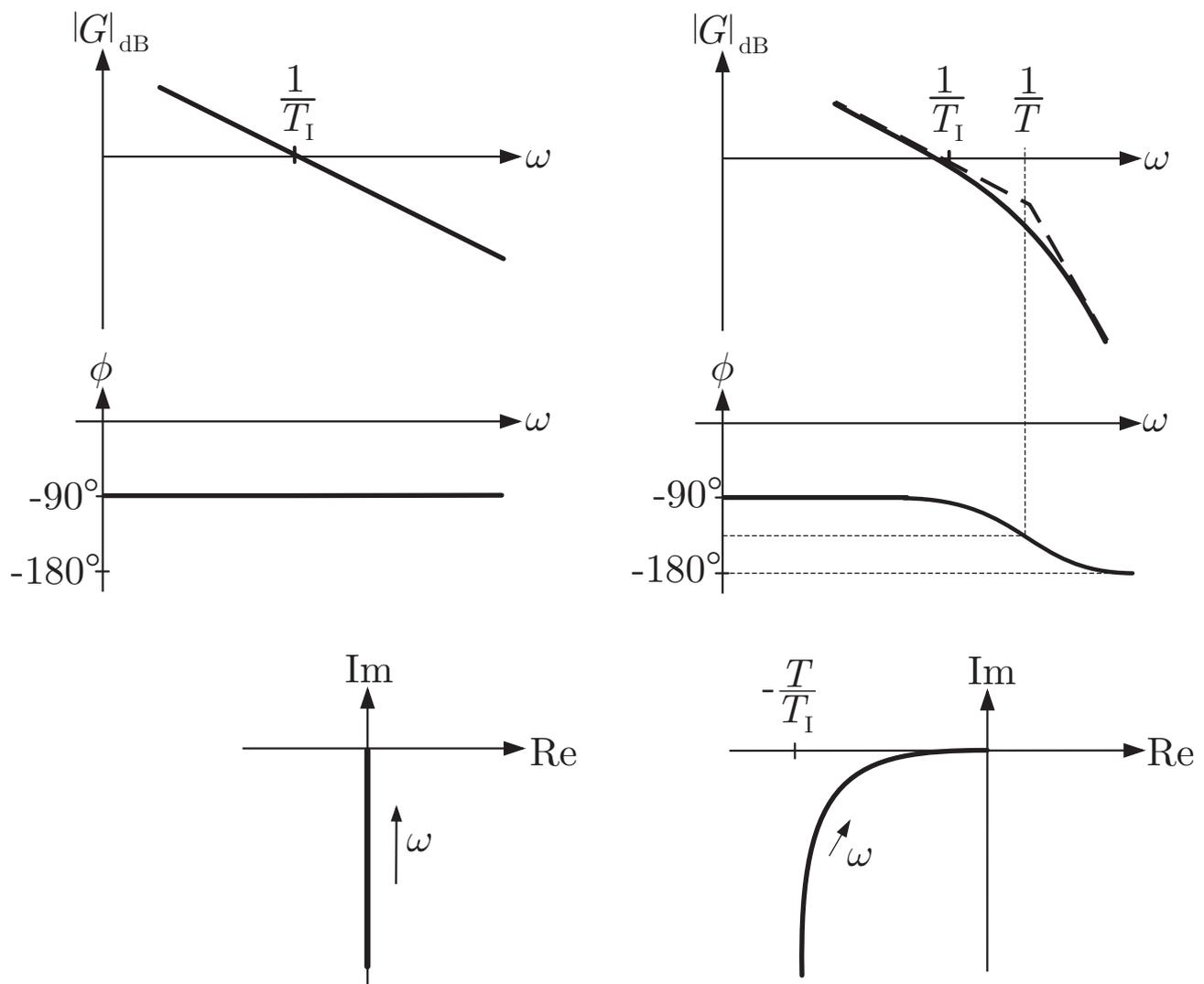


Abb. 6.45: Ortskurve und Bodediagramm eines I- und eines IT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

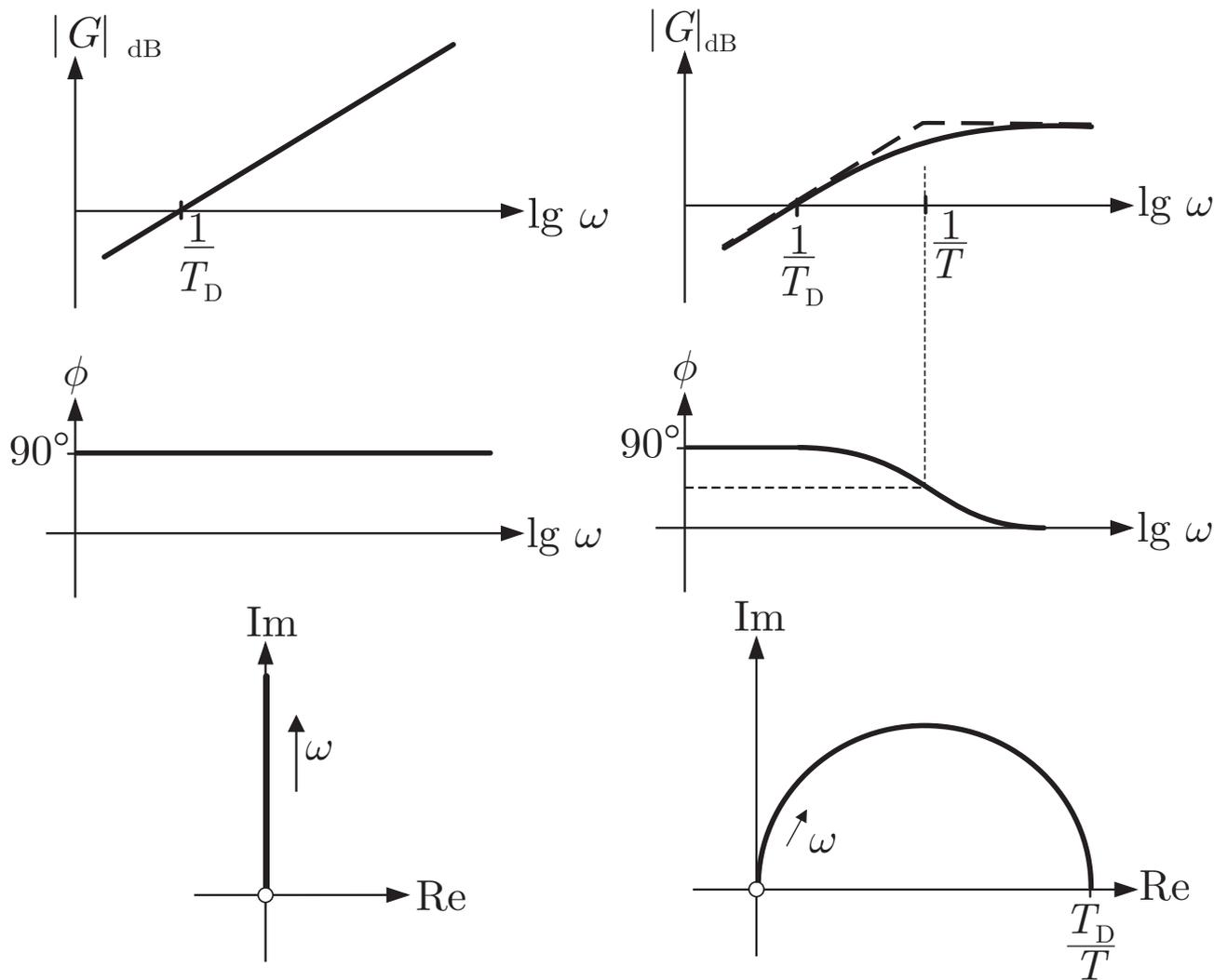


Abb. 6.46: Ortskurve und Bodediagramm eines D- und eines DT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

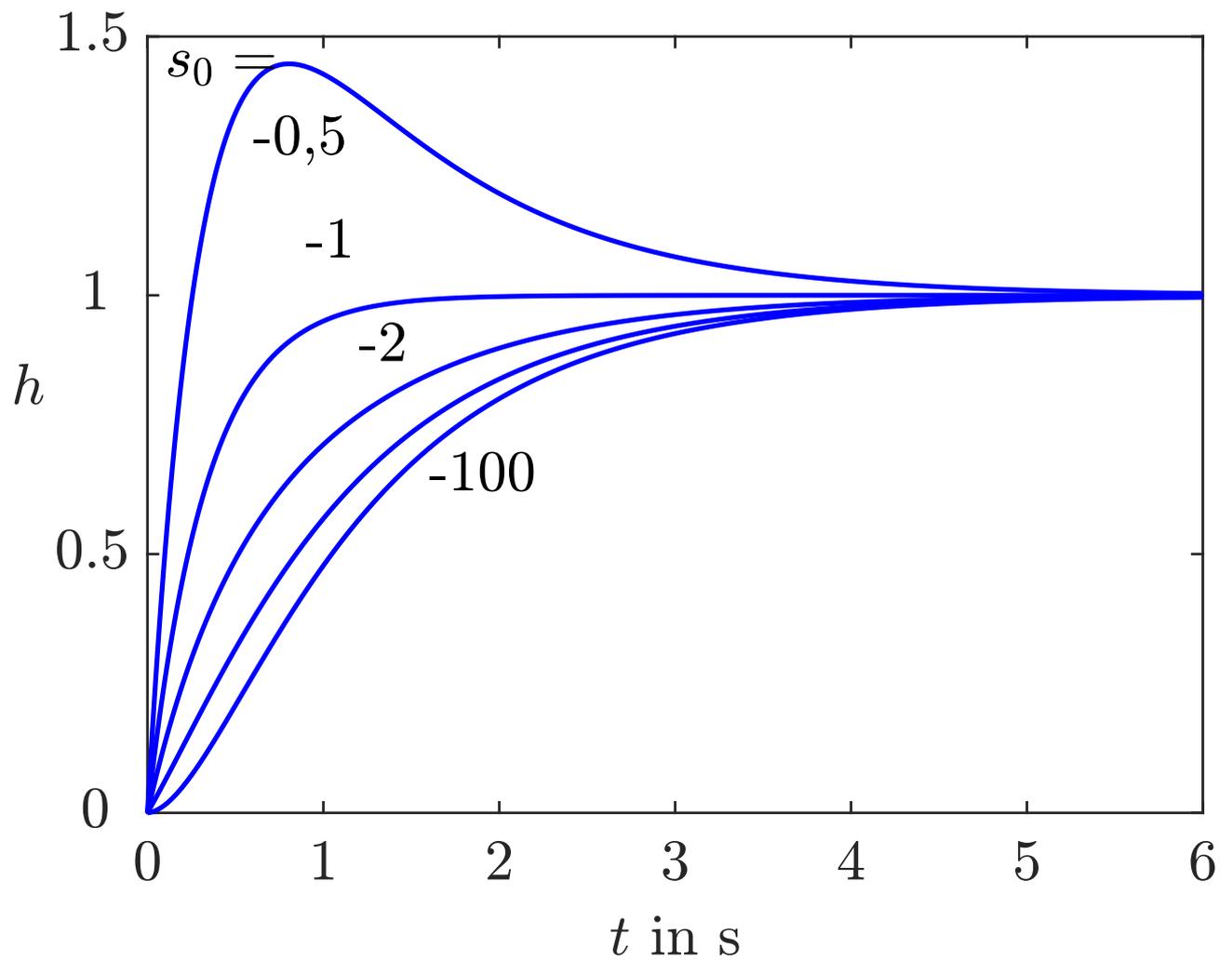


Abb. 6.47: Übergangsfunktion des Systems

$G(s, s_0) = -\frac{3}{s_0} \frac{s-s_0}{(s+1)(s+3)}$ für unterschiedliche Werte von s_0

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

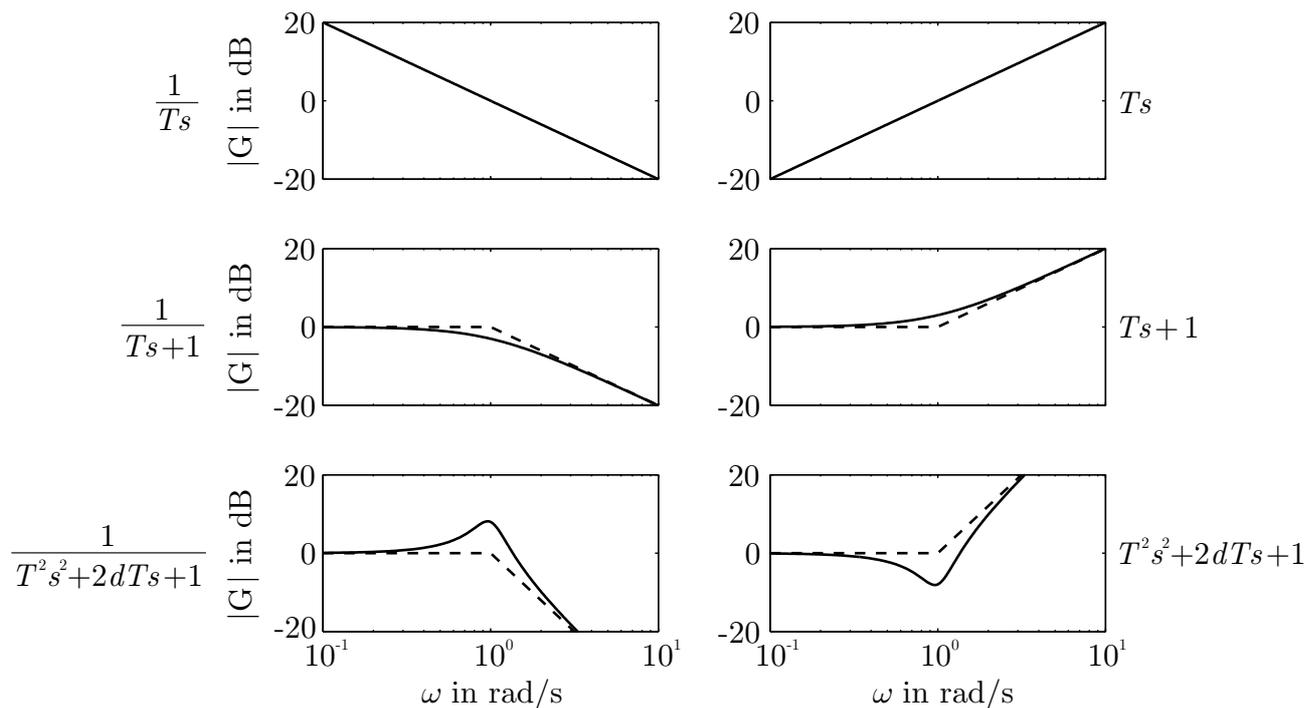


Abb. 6.48: Amplitudengang wichtiger elementarer Übertragungsglieder mit $T = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

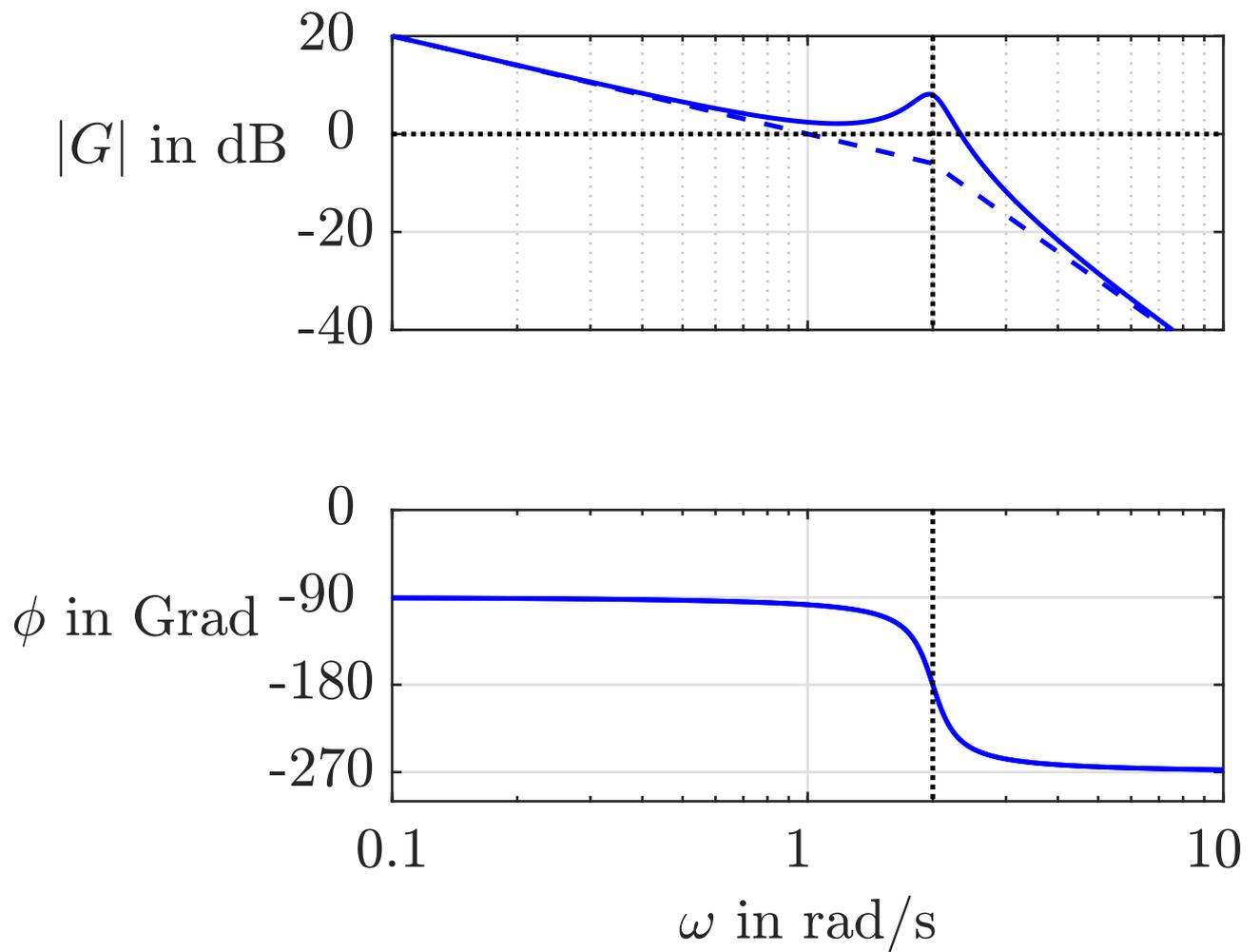


Abb. 6.49: Bodediagramm zur Übertragungsfunktion (6.126)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

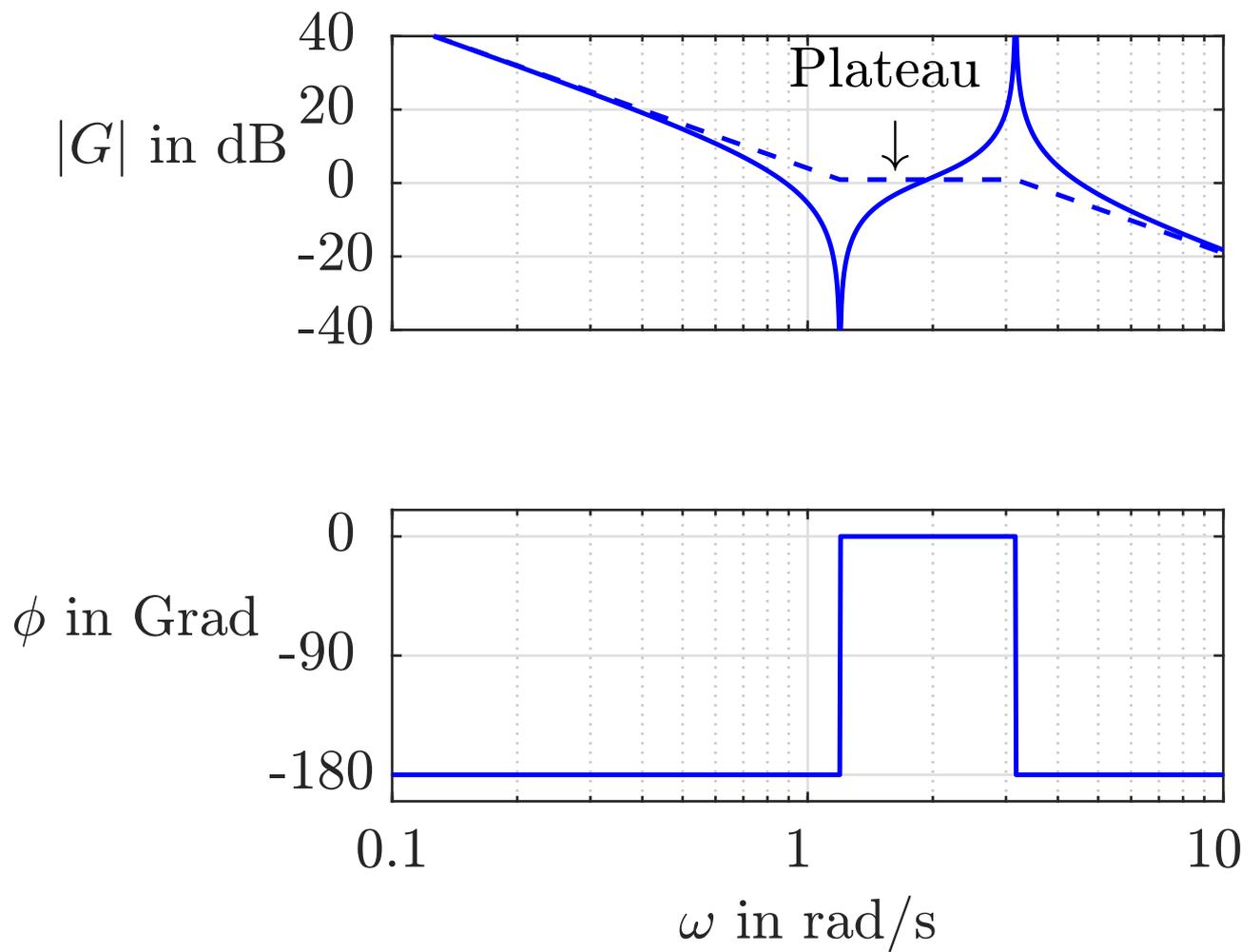


Abb. 6.50: Bodediagramm zur Übertragungsfunktion (6.127)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

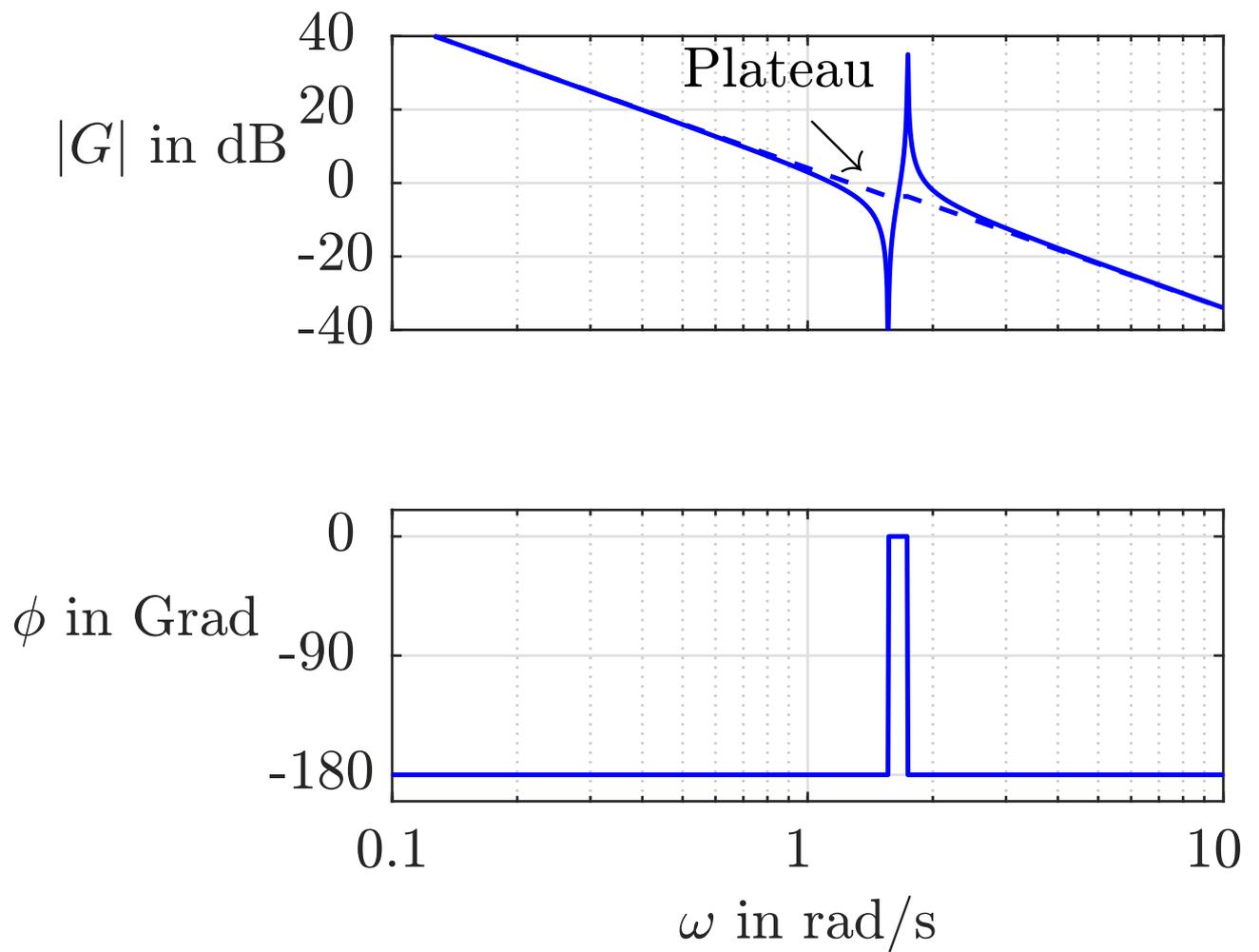


Abb. 6.51: Bodediagramm zur Übertragungsfunktion (6.128)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

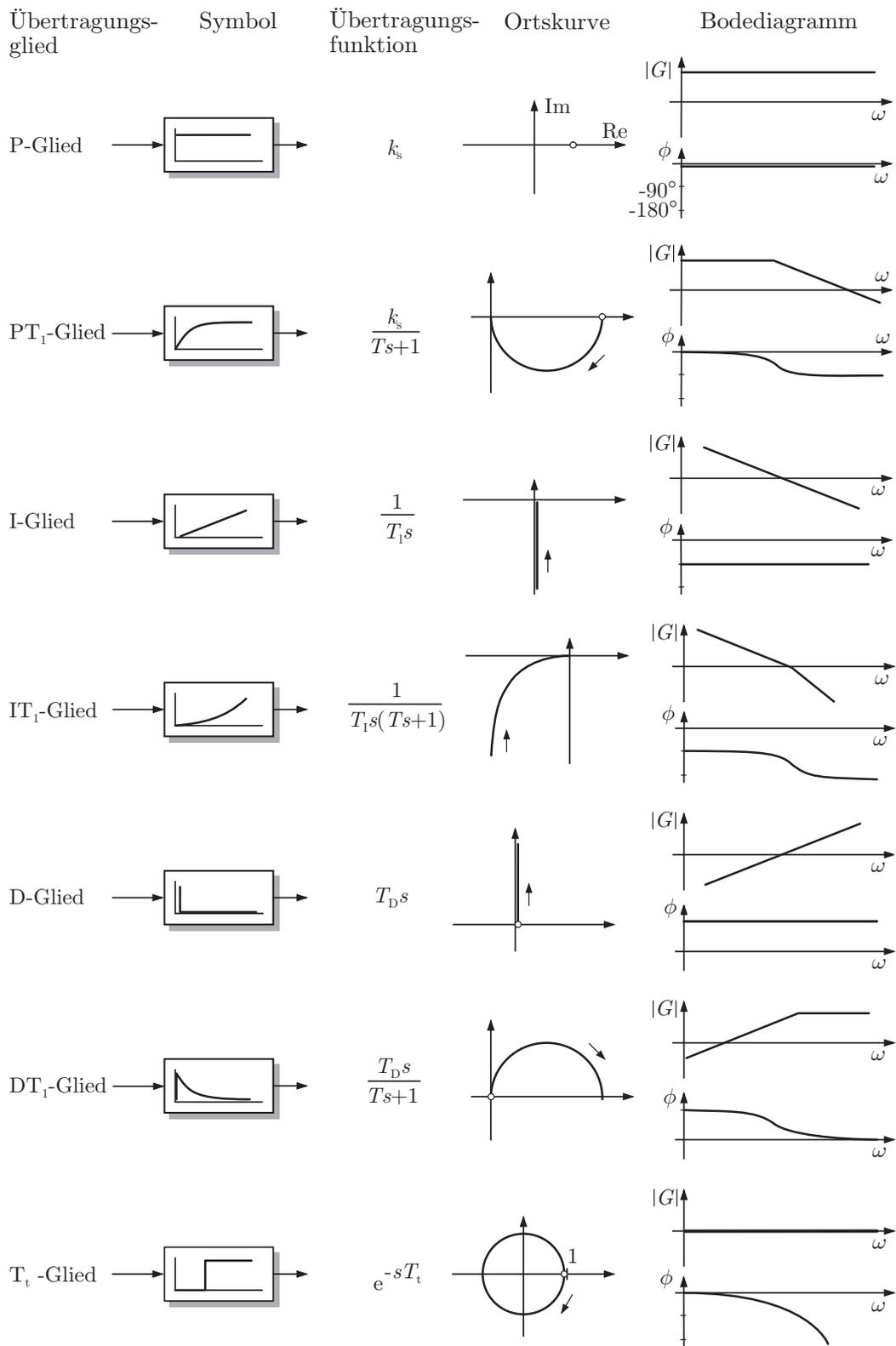


Abb. 6.52. Wichtige Übertragungsglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

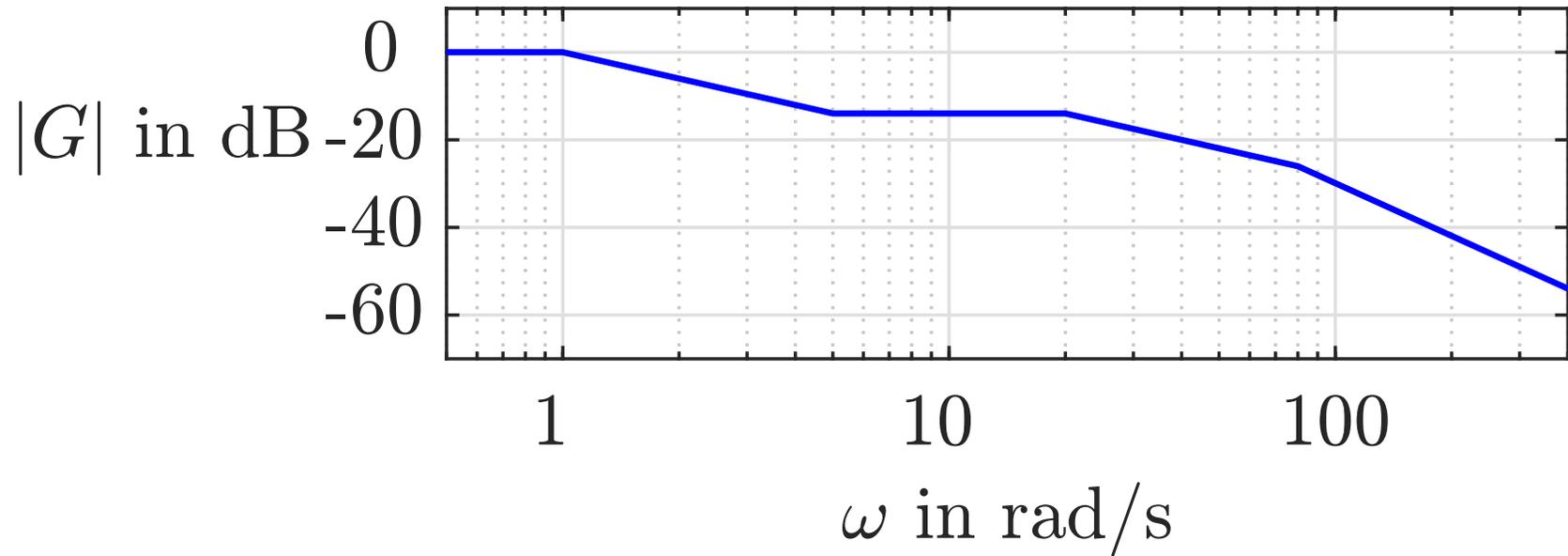


Abb. 6.53. Geradenapproximation eines Amplitudengangs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

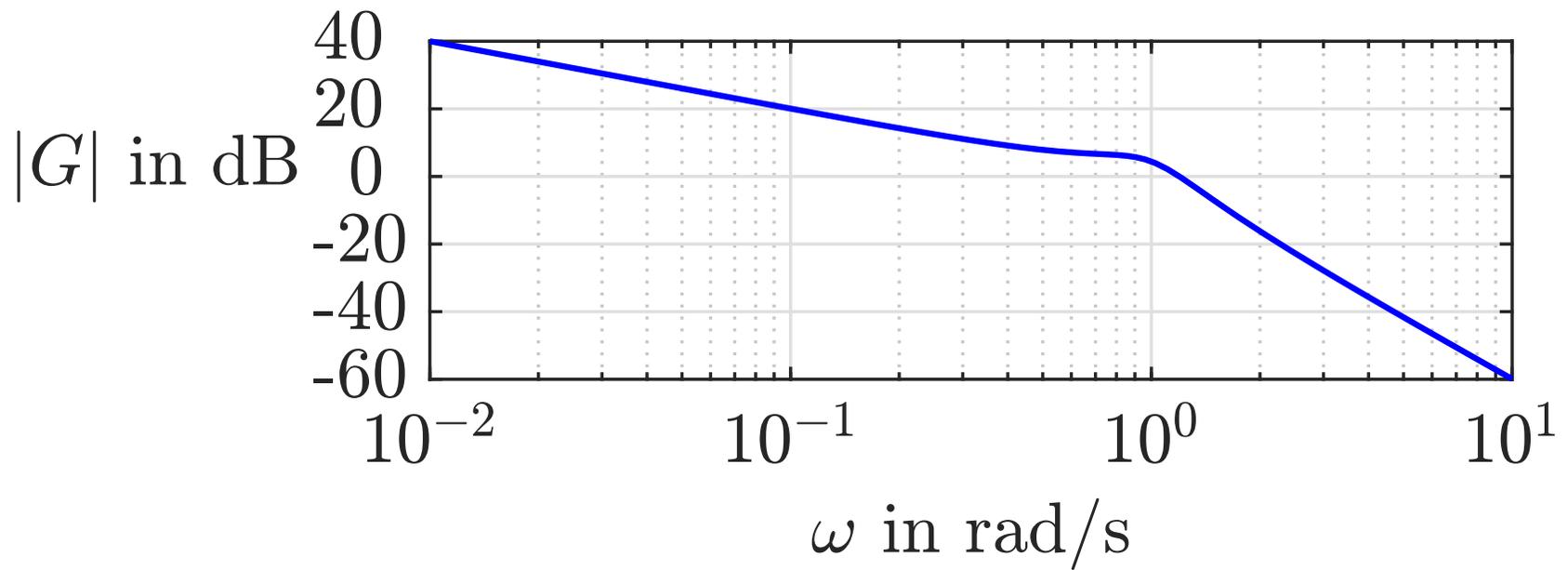
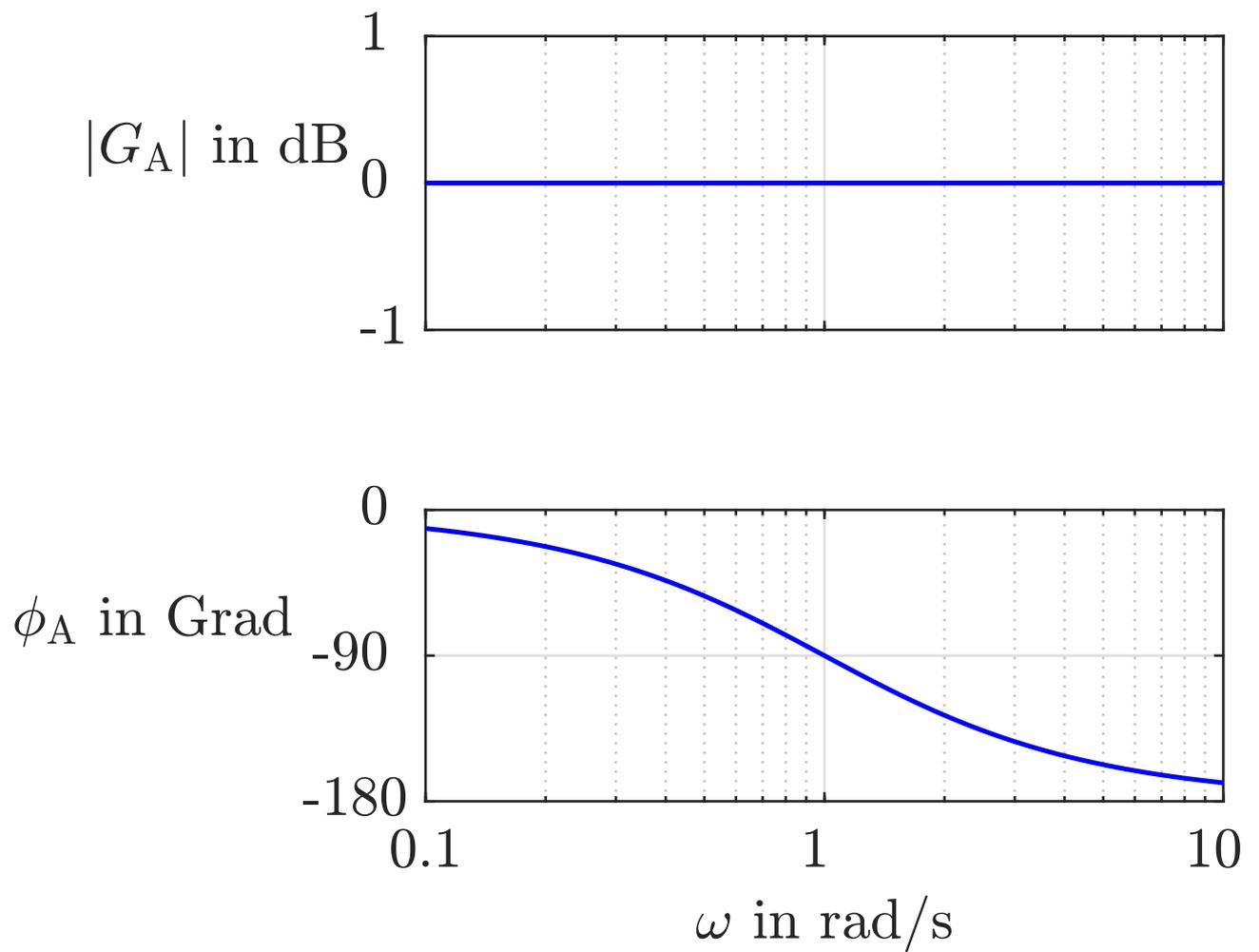


Abb. 6.54. Amplitudengang eines hydraulischen Ruderstellsystems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 6.55: Bodediagramm des Allpassgliedes (6.133)
mit $T = 1$ s**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

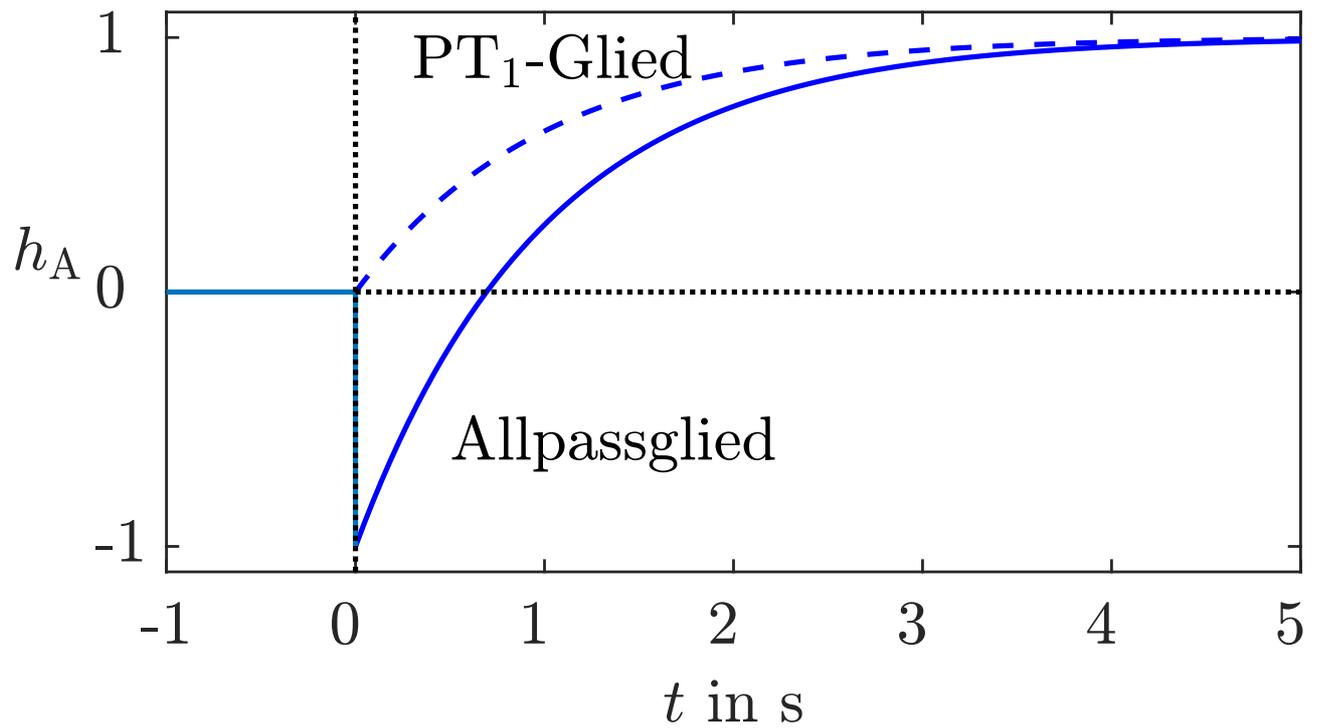
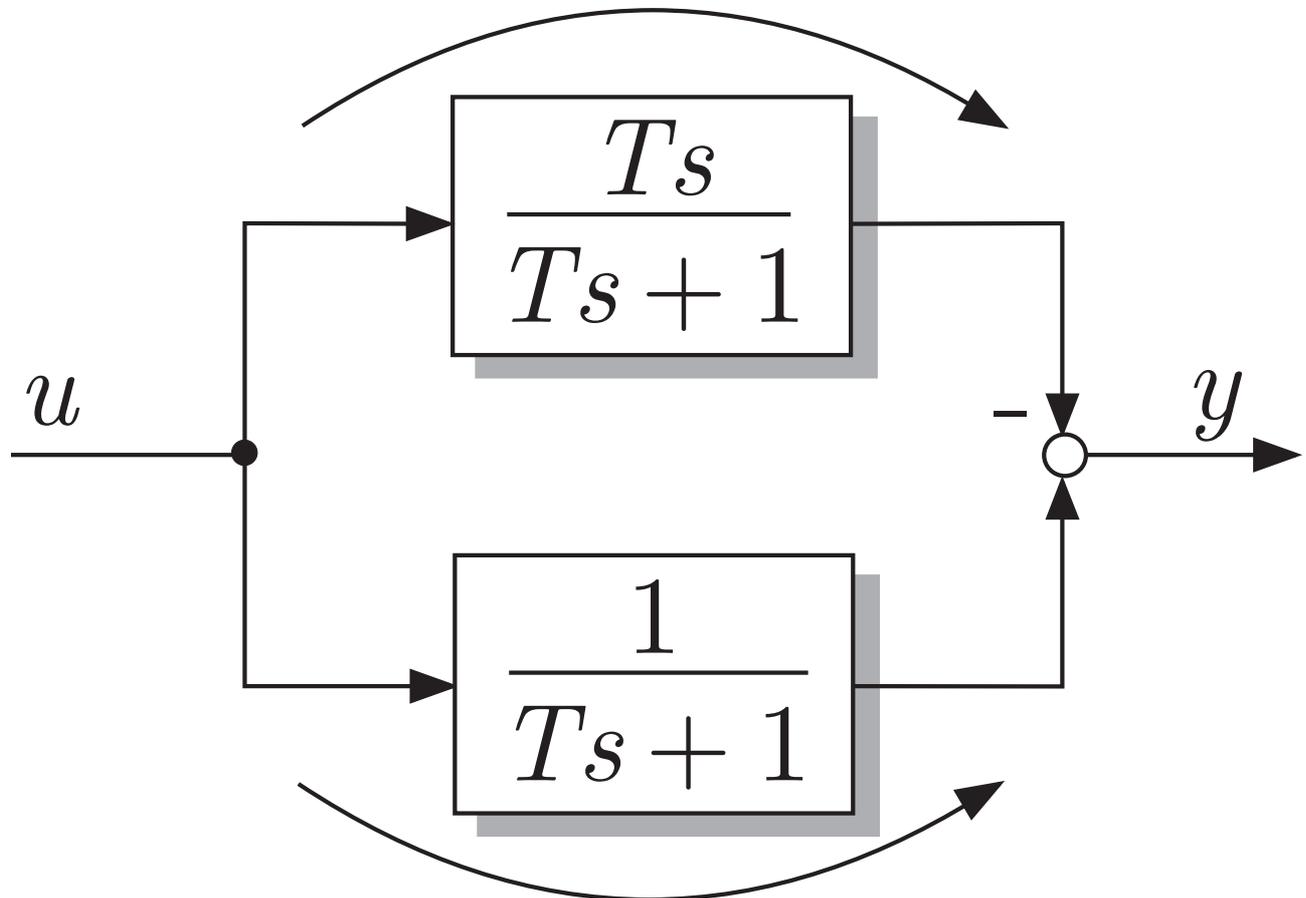


Abb. 6.56: Übergangsfunktion des Allpassgliedes $G_A(s) = \frac{-Ts+1}{Ts+1}$ im Vergleich zu der des PT₁-Gliedes $\frac{1}{Ts+1}$ mit $T = 1$ s

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

schneller Wirkungsweg



langsamer Wirkungsweg

Abb. 6.57: Wirkung eines Allpassgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

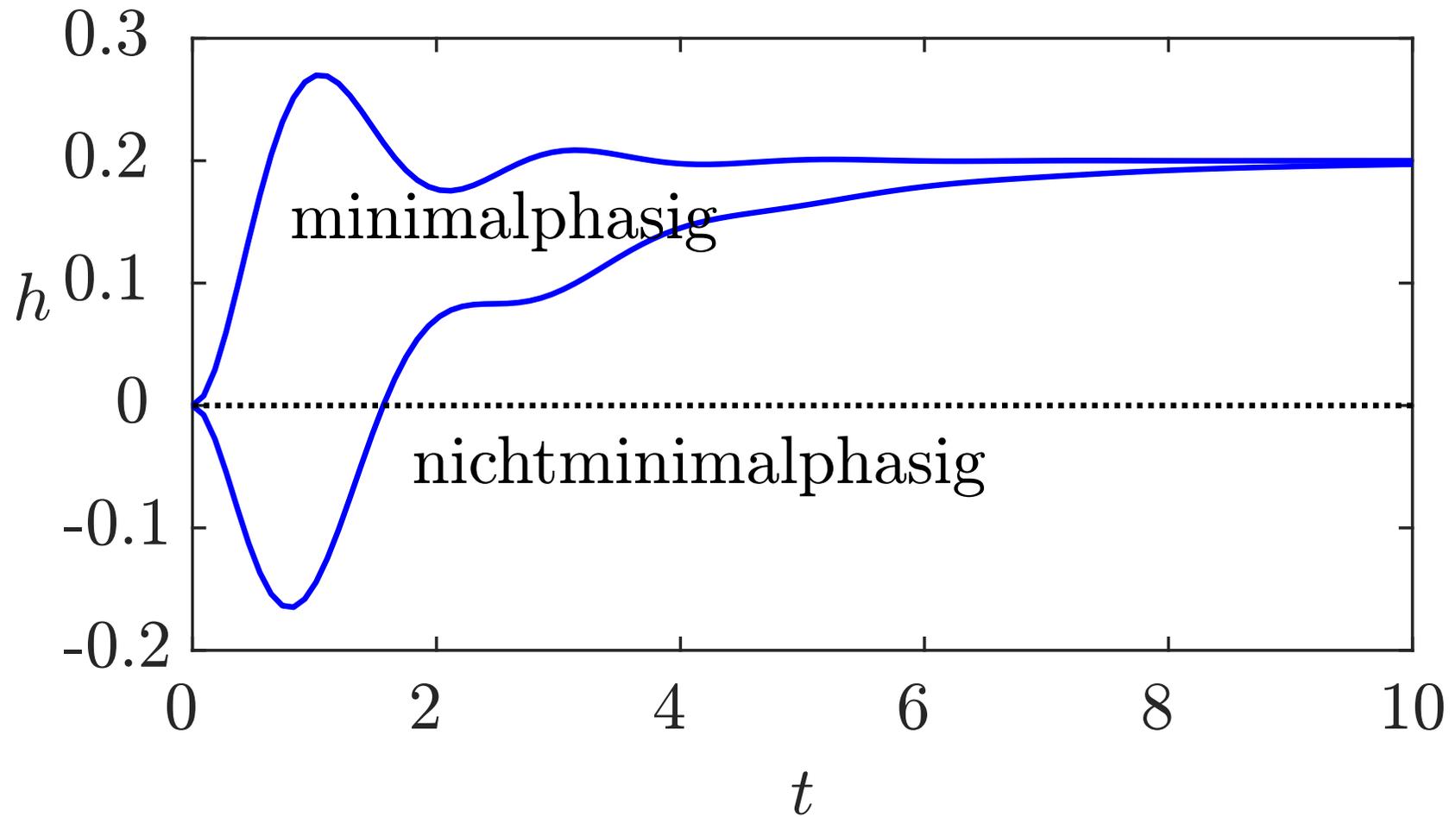


Abb. 6.58. Übergangsfunktion eines minimalphasigen Systems und der Reihenschaltung dieses Systems mit einem Allpassglied $G_A(s) = \frac{-Ts+1}{Ts+1}$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

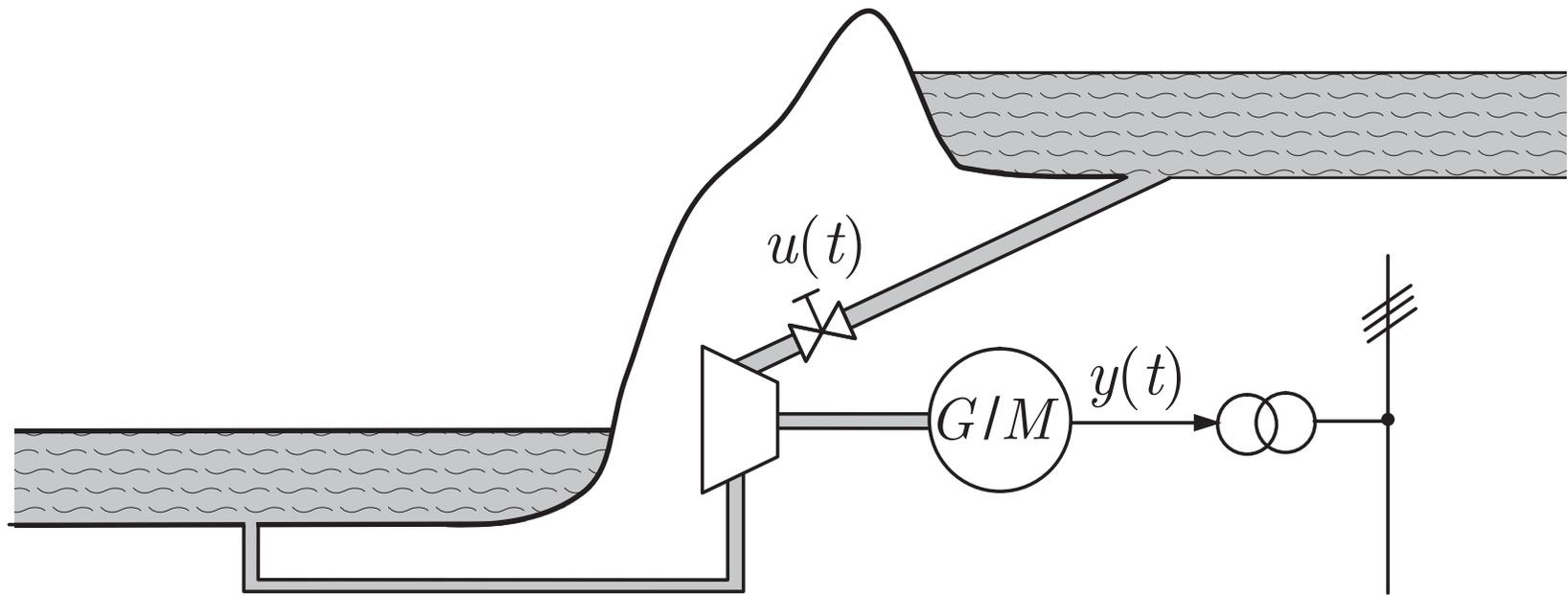


Abb. 6.59. Wasserkraftwerk

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

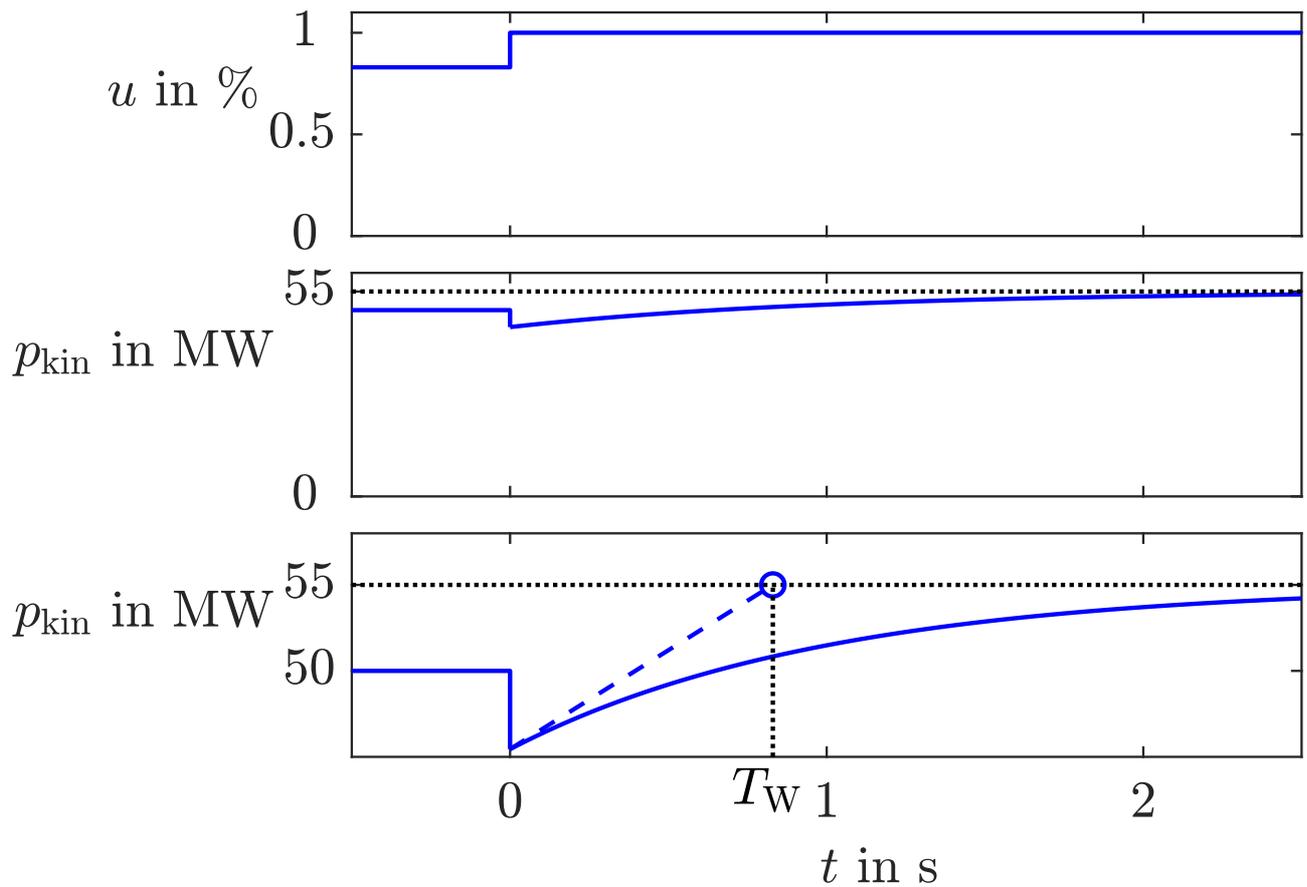


Abb. 6.60: Verhalten des Wasserkraftwerkes bei Leistungserhöhung von 50 MW auf 55 MW

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

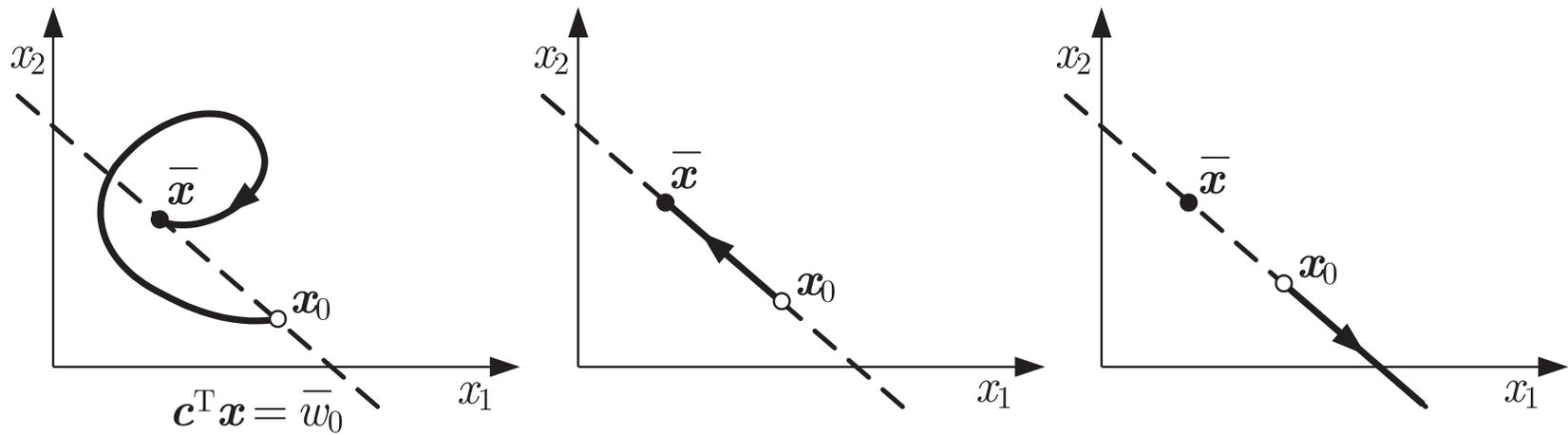


Abb. 6.61. Umsteuerung von Systemen mit stabiler und instabiler interner Dynamik

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

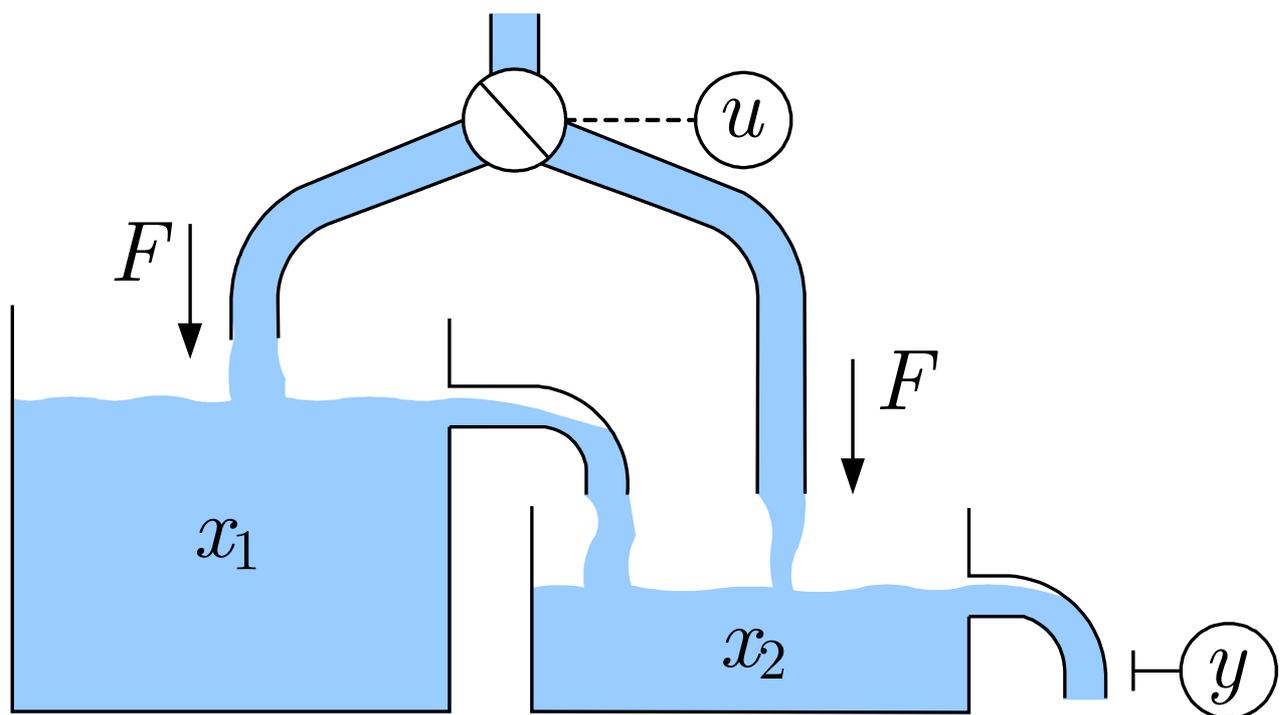


Abb. 6.62: Nichtminimalphasiges Behältersystem

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

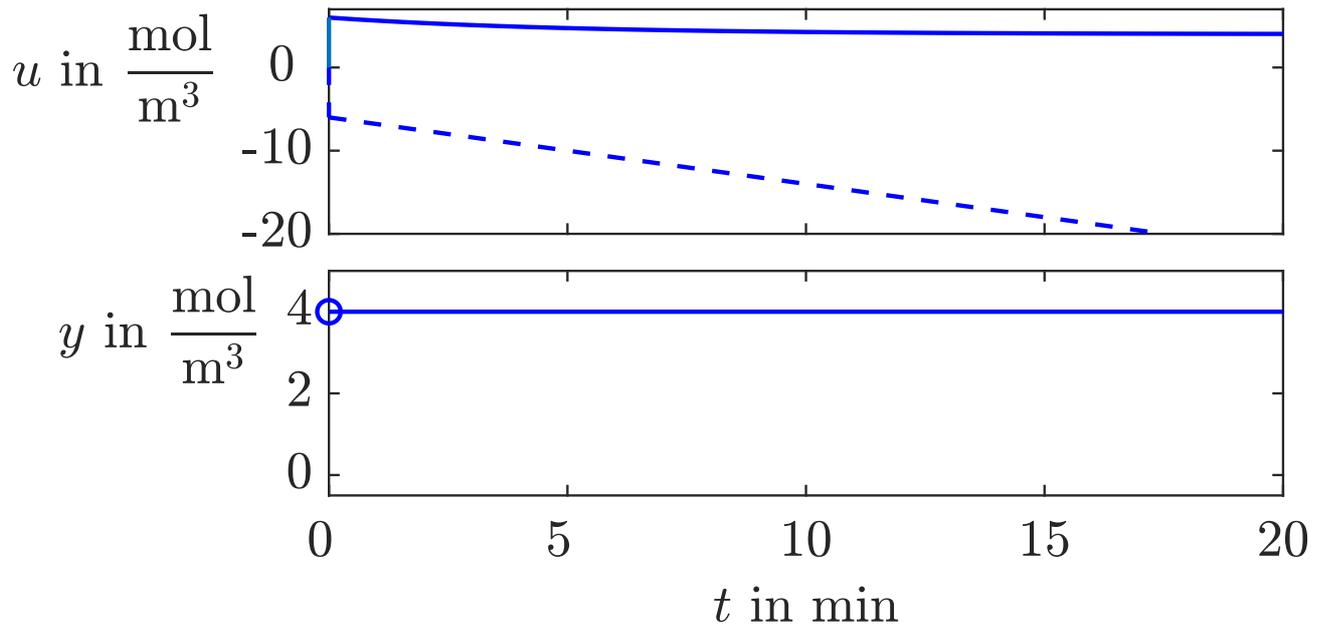


Abb. 6.63: Steuerung des minimalphasigen Systems Σ_1 (—) und des nichtminimalphasigen Systems Σ_2 (- - -)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

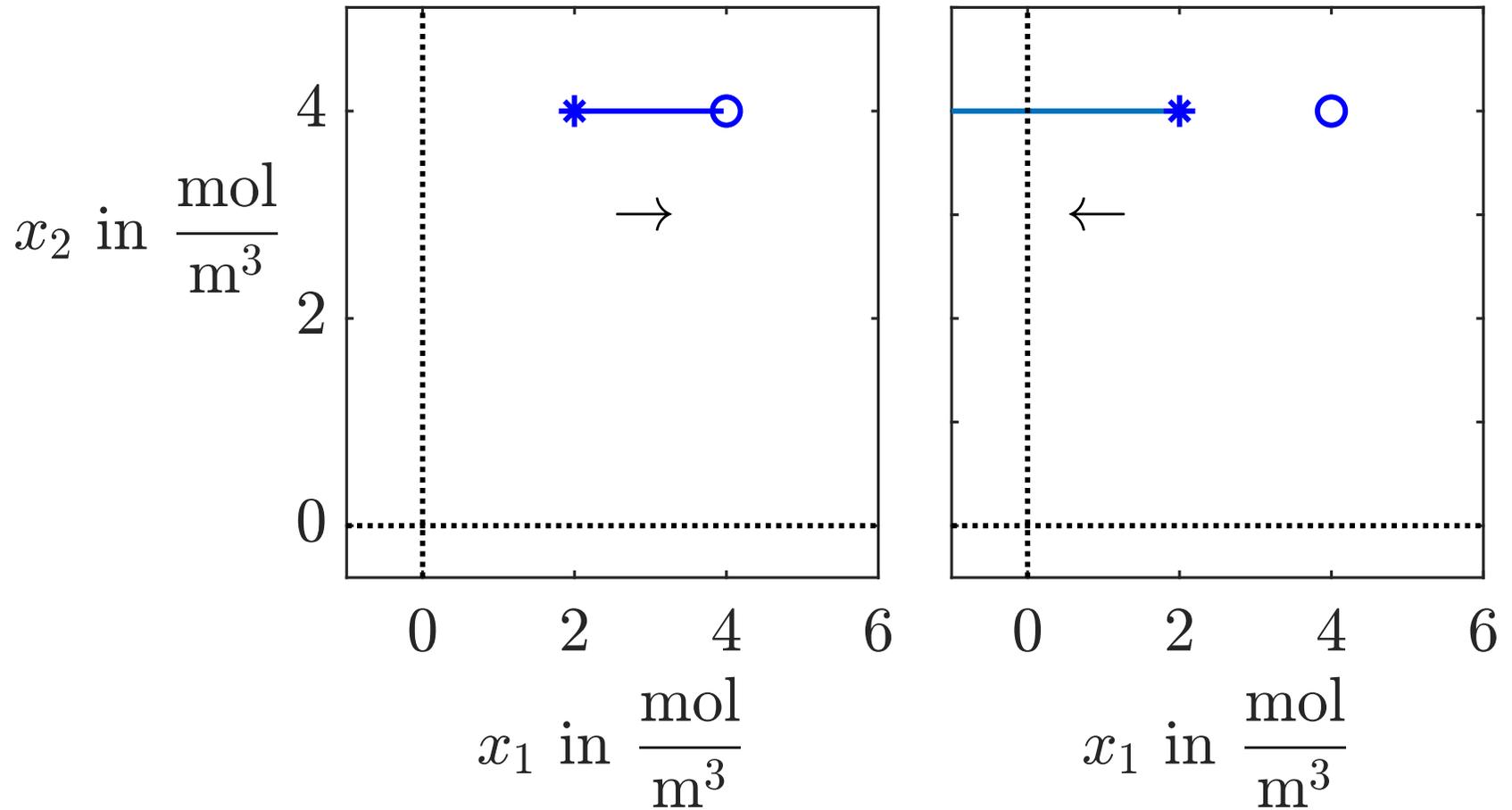


Abb. 6.64. Trajektorien des minimalphasigen Behältersystems Σ_1 (links) und des nichtminimalphasigen Systems Σ_2 (rechts) im Zustandsraum

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

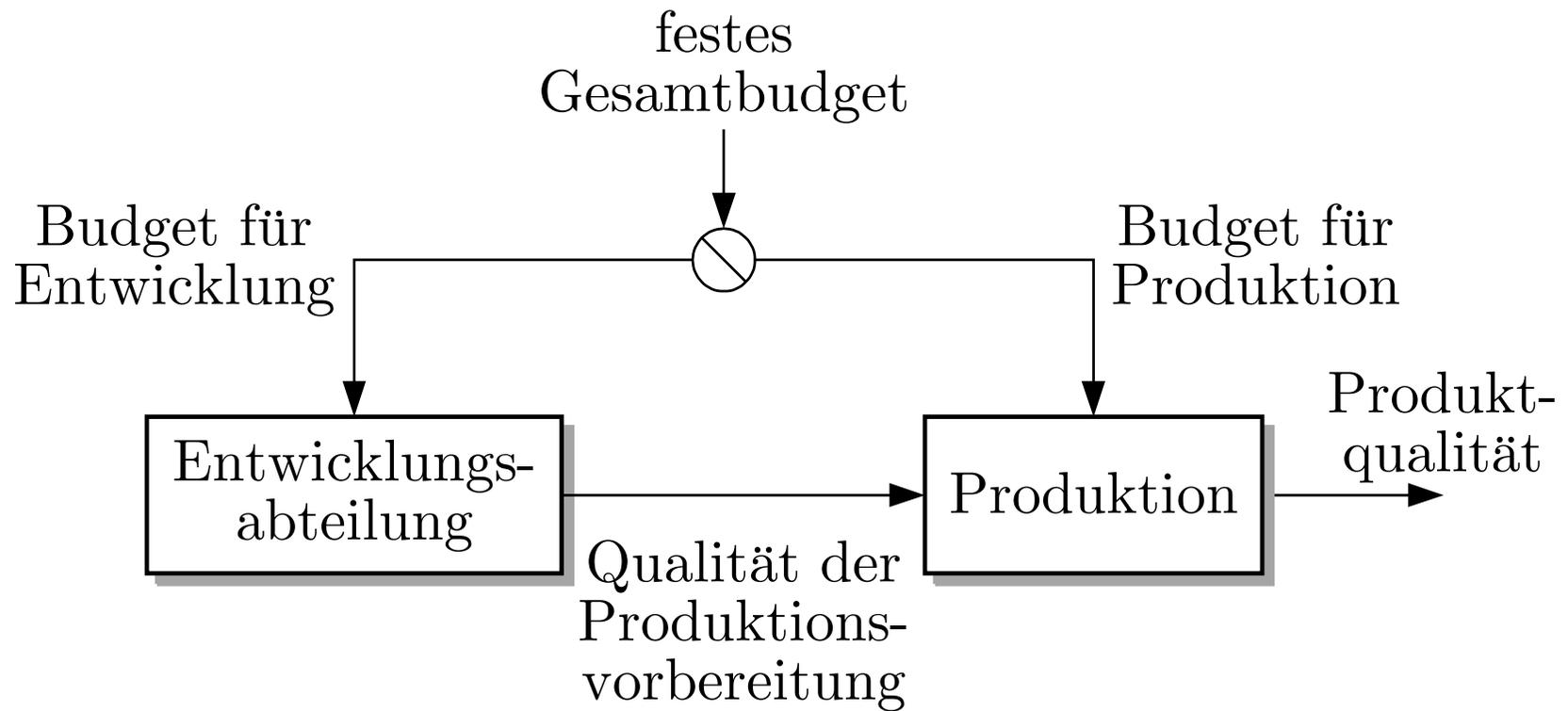


Abb. 6.65. Budgetverteilung in einem Unternehmen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

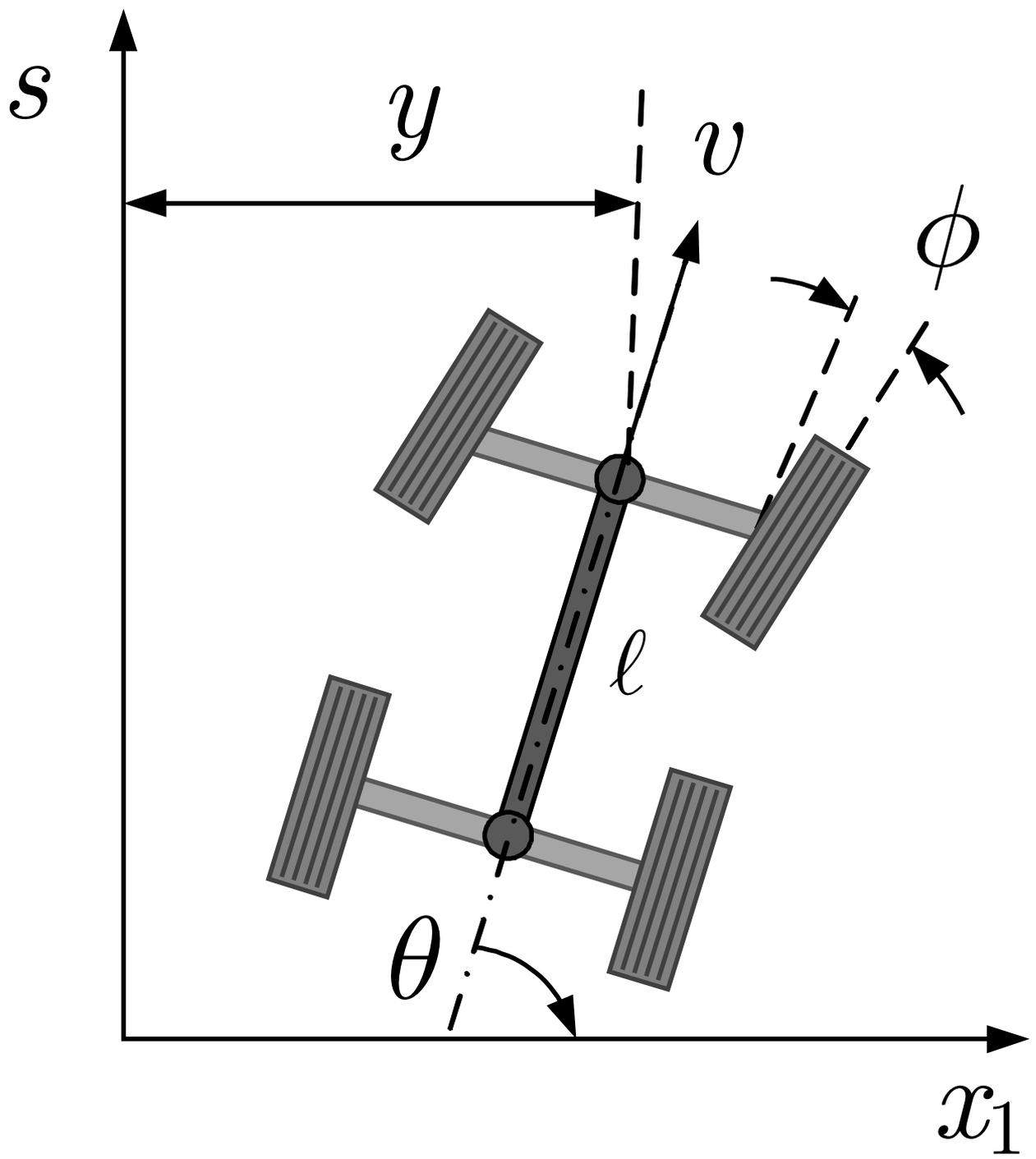


Abb. 6.66: Fahrzeugmodell

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

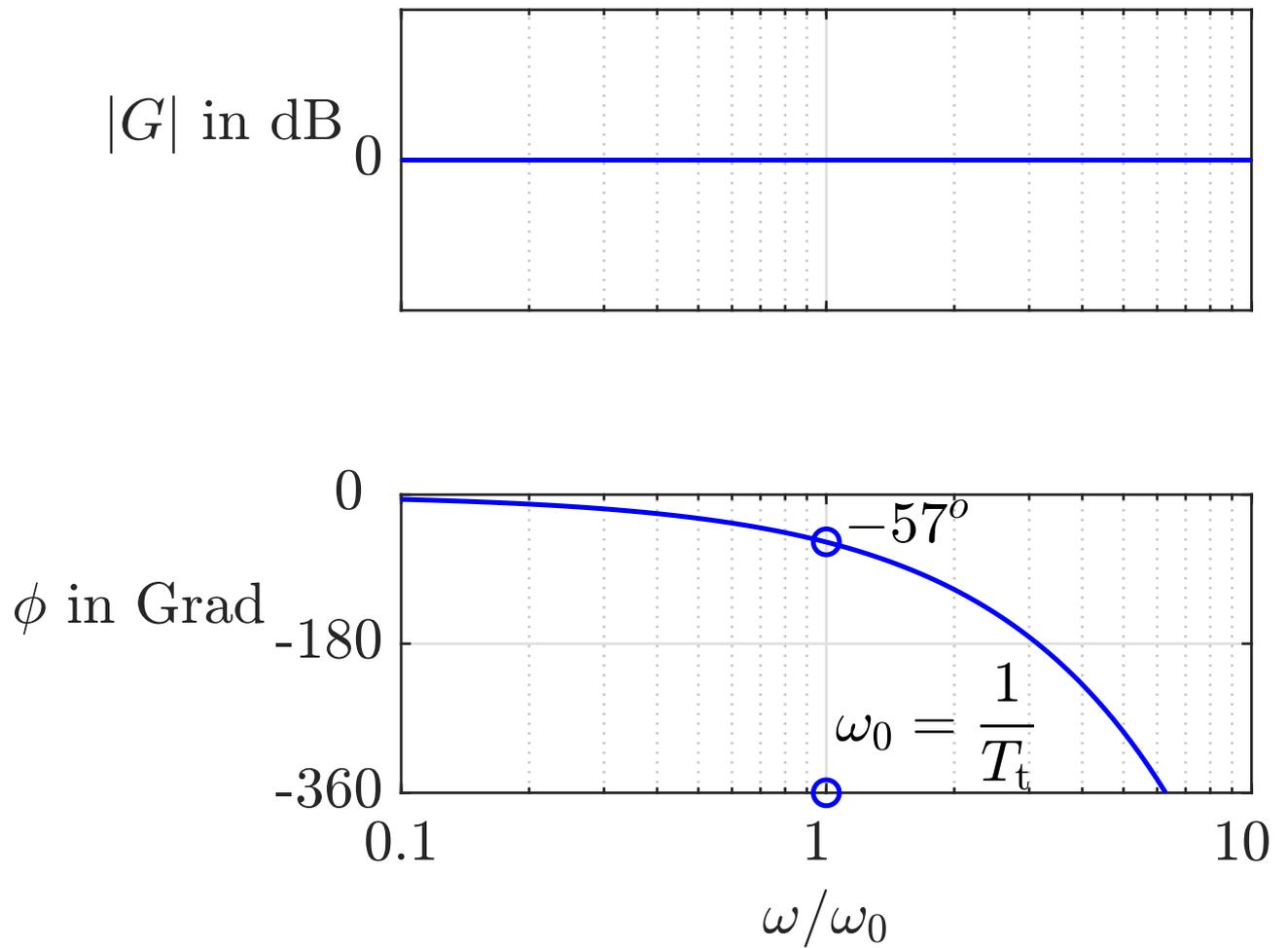


Abb. 6.67: Bodediagramm des Totzeitgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

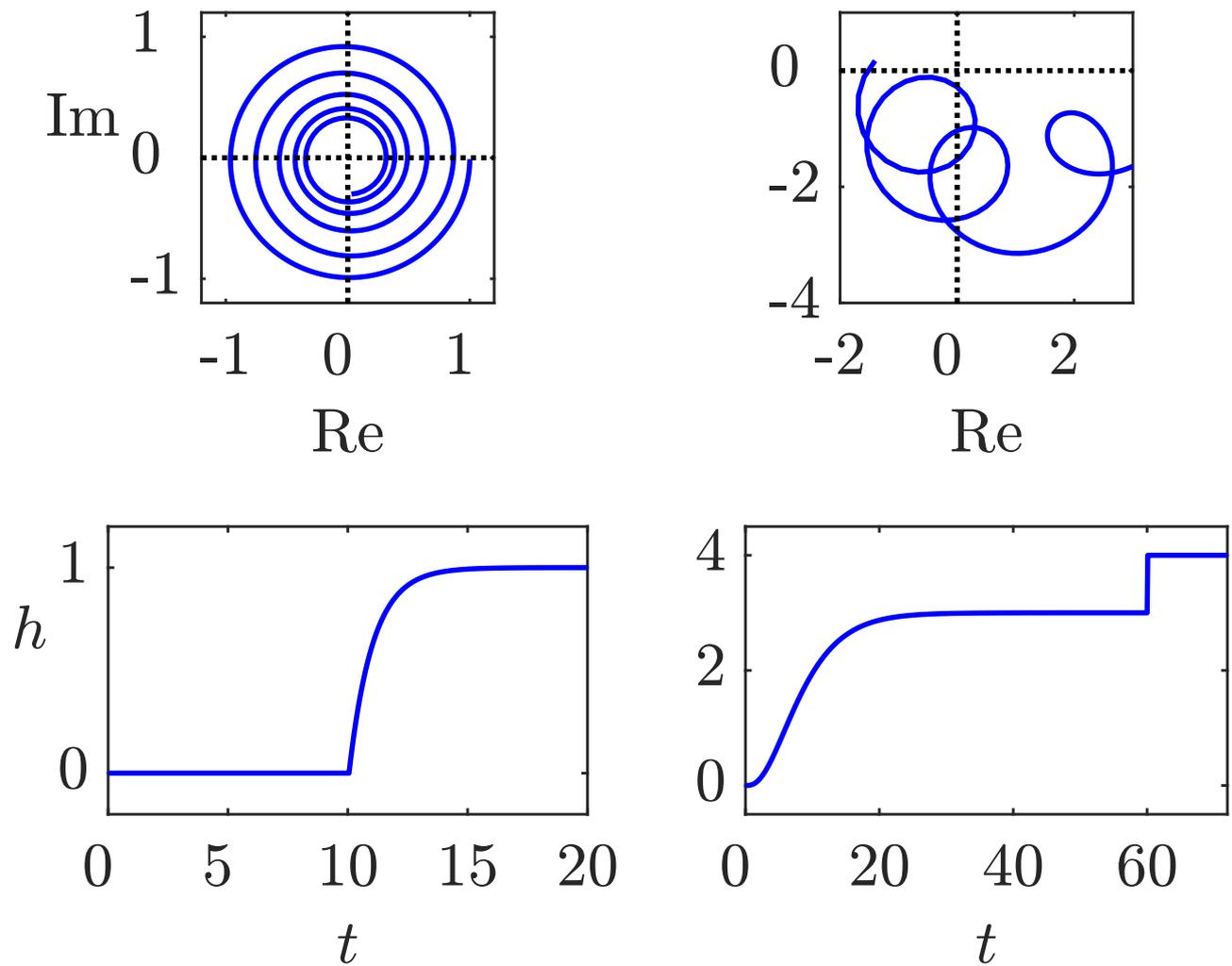


Abb. 6.68: Ortskurven und Übergangsfunktionen zweier totzeitbehafteter Systeme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

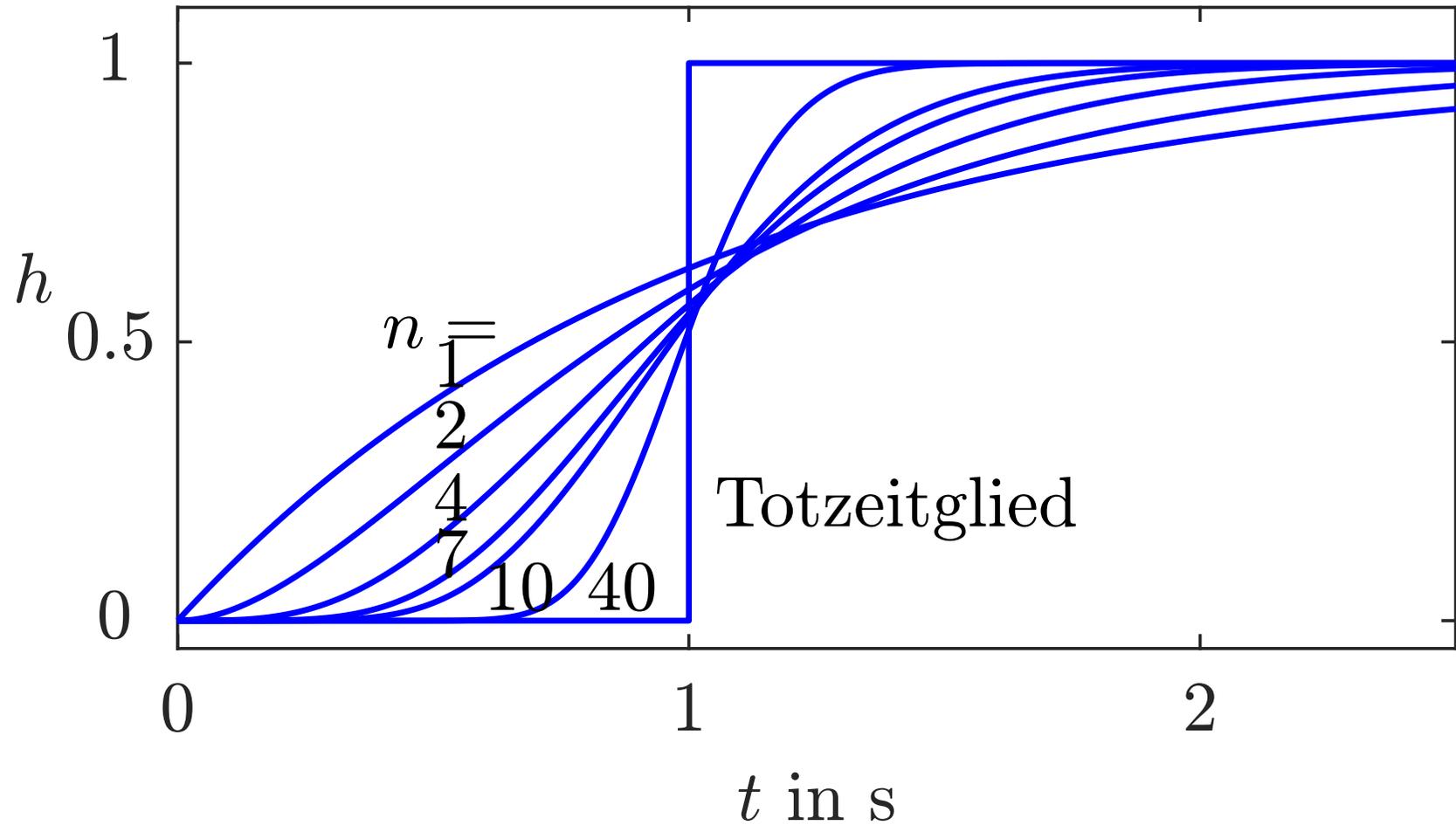


Abb. 6.69. Übergangsfunktion von PT_n -Näherungen des Totzeitgliedes mit $T_t = 1$ s

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

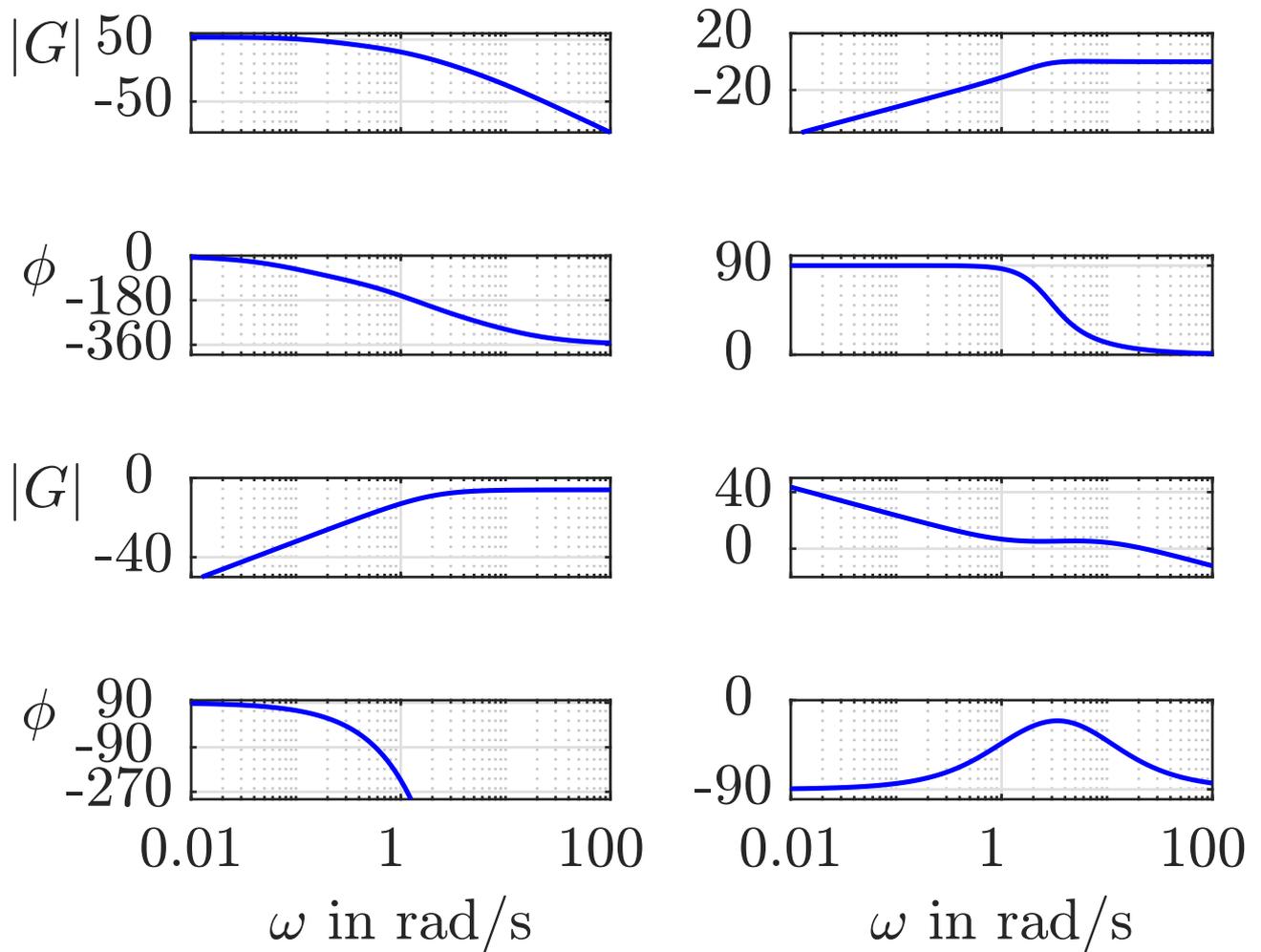


Abb. 6.70: Frequenzkennliniendiagramme von vier Systemen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

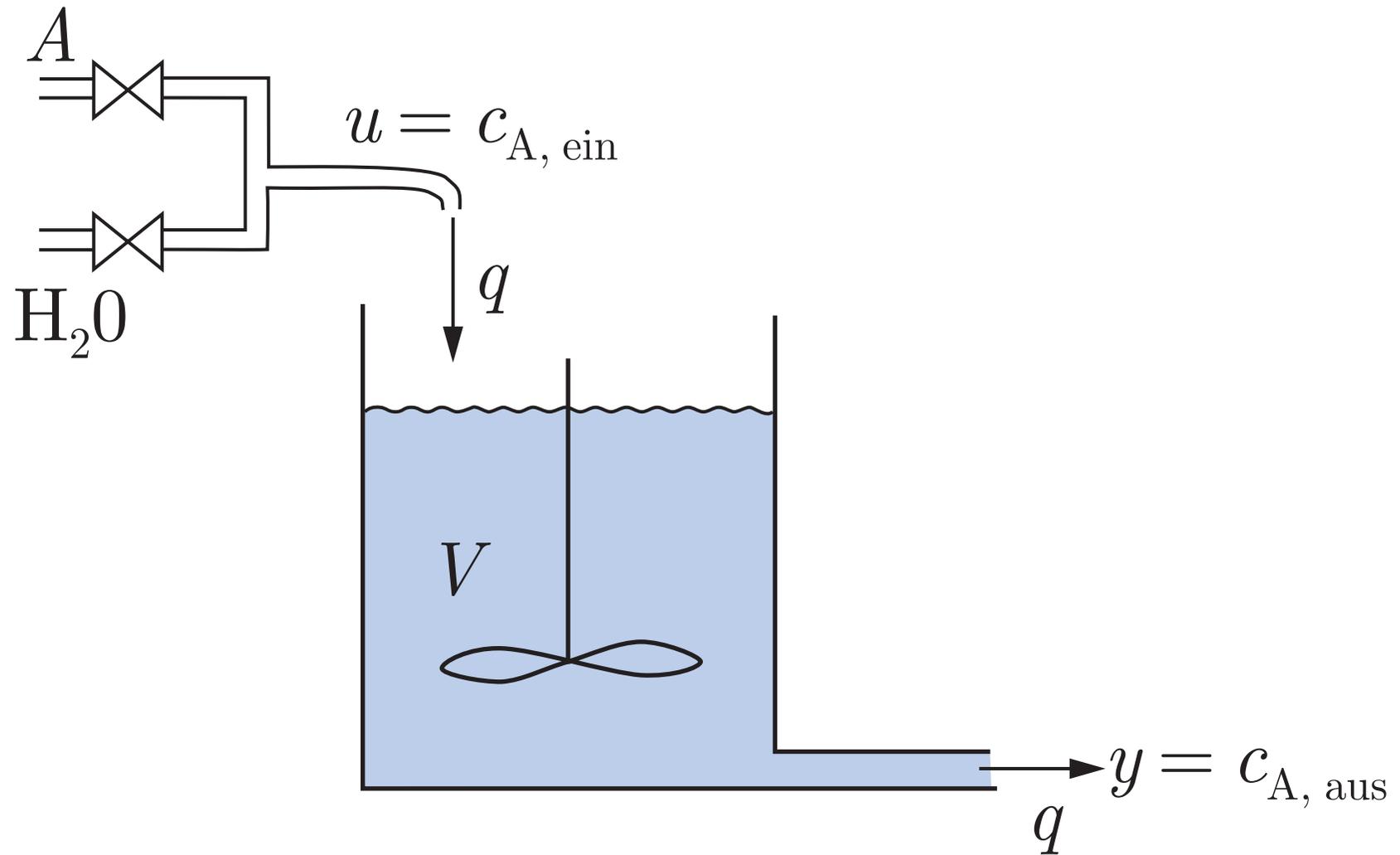


Abb. 6.71. Kontinuierlich durchflossener Reaktor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

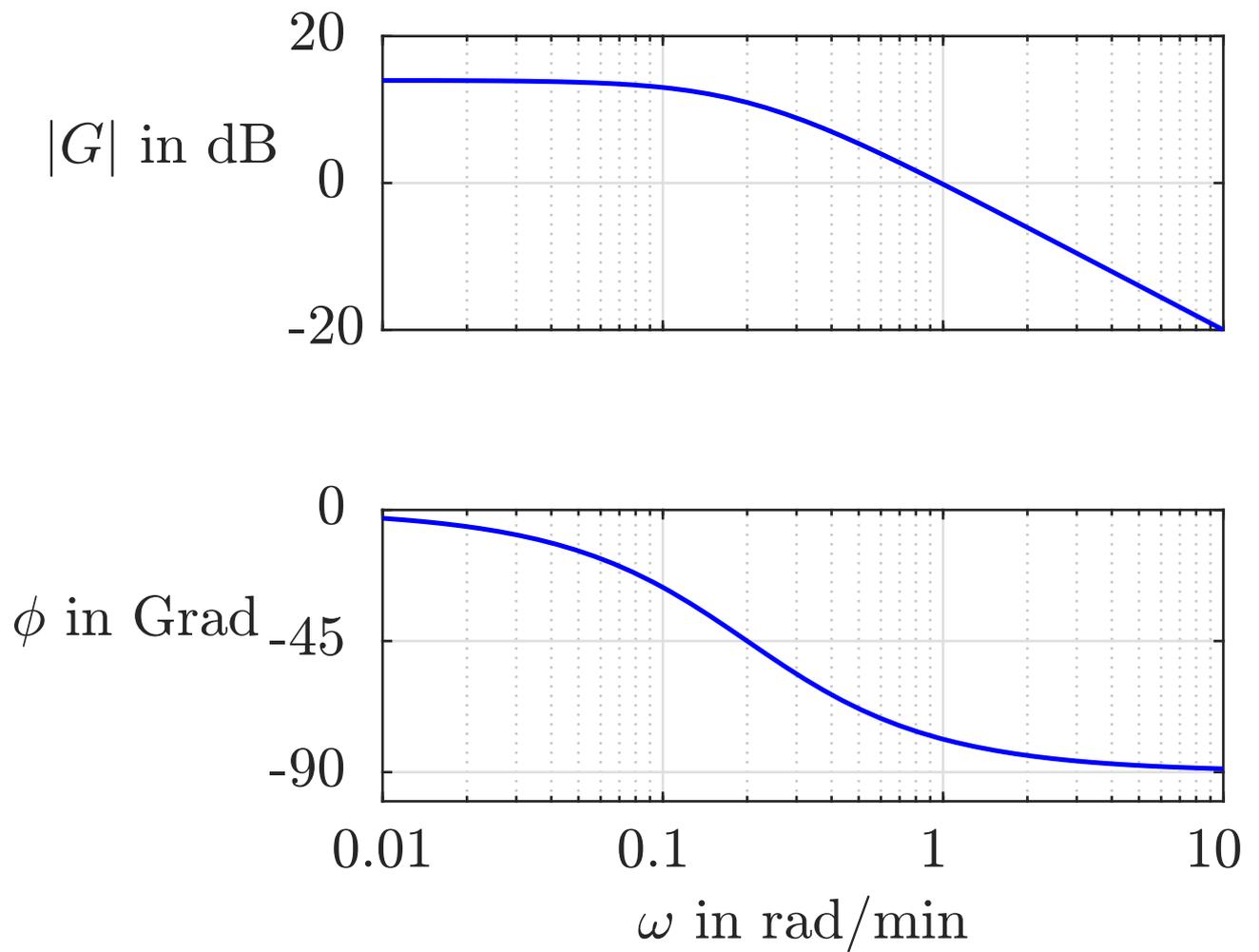


Abb. 6.72: Bodediagramm des Raumes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

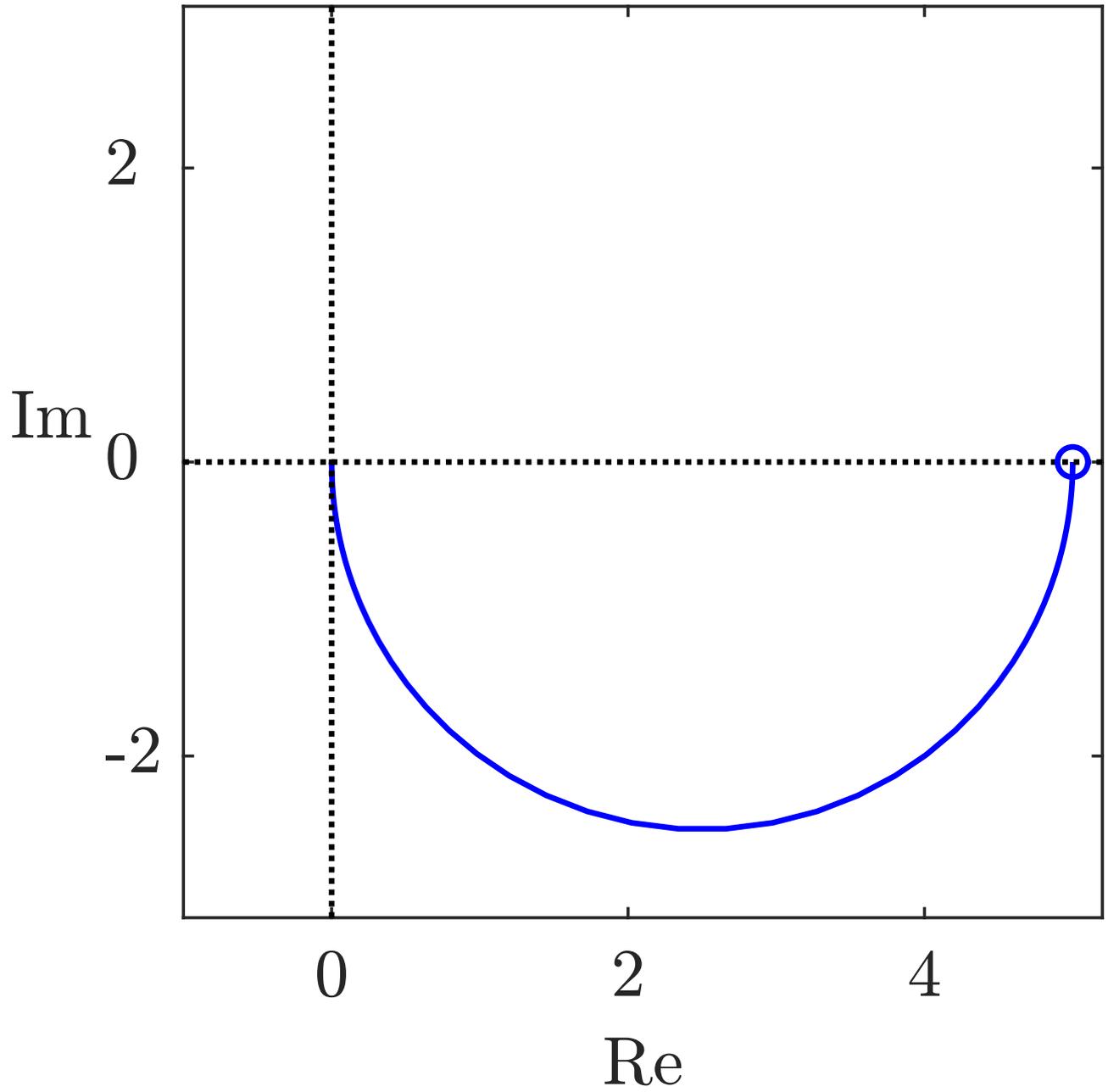


Abb. 6.73: Ortskurve des Raumes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

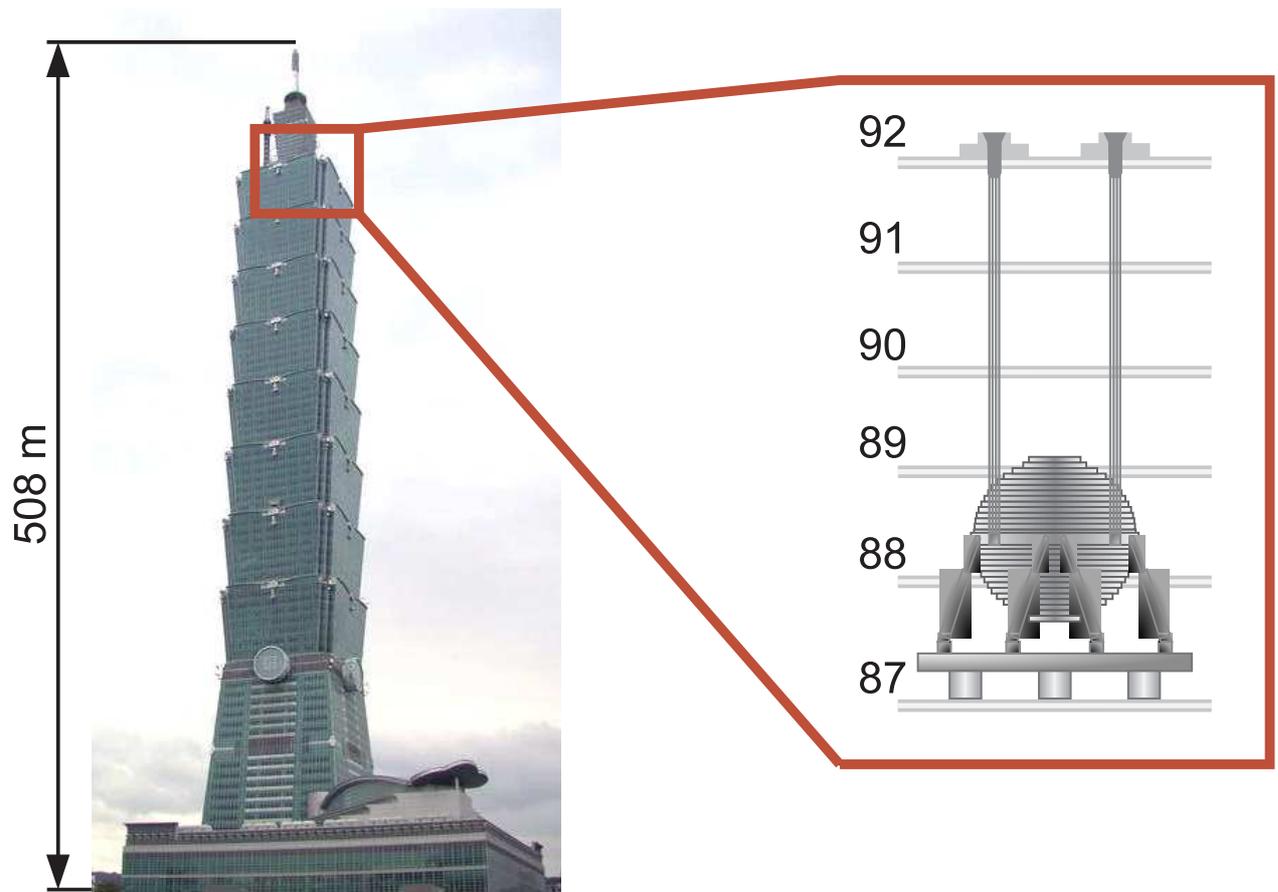


Abb. 6.74: Schwingungstilgung am Hochhaus

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

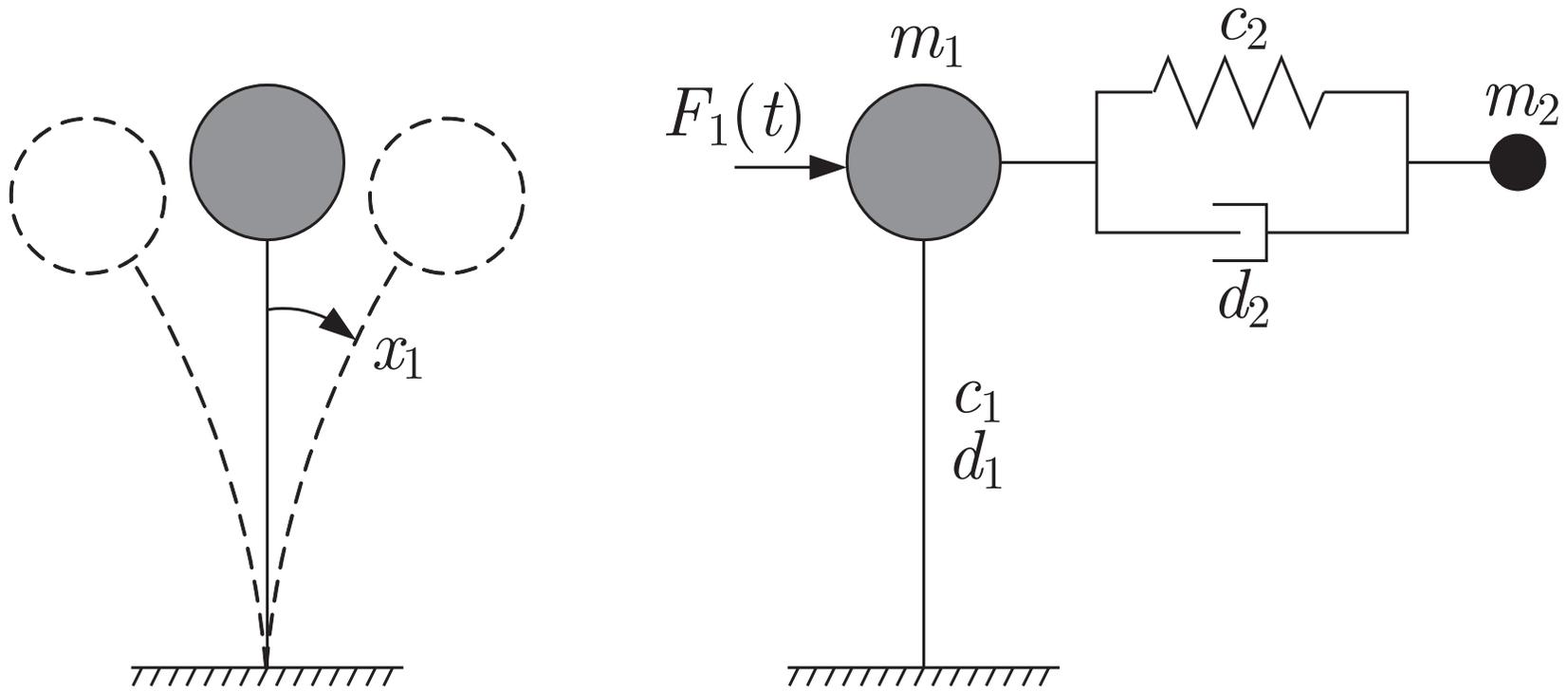


Abb. 6.75. Modellierungsansatz

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

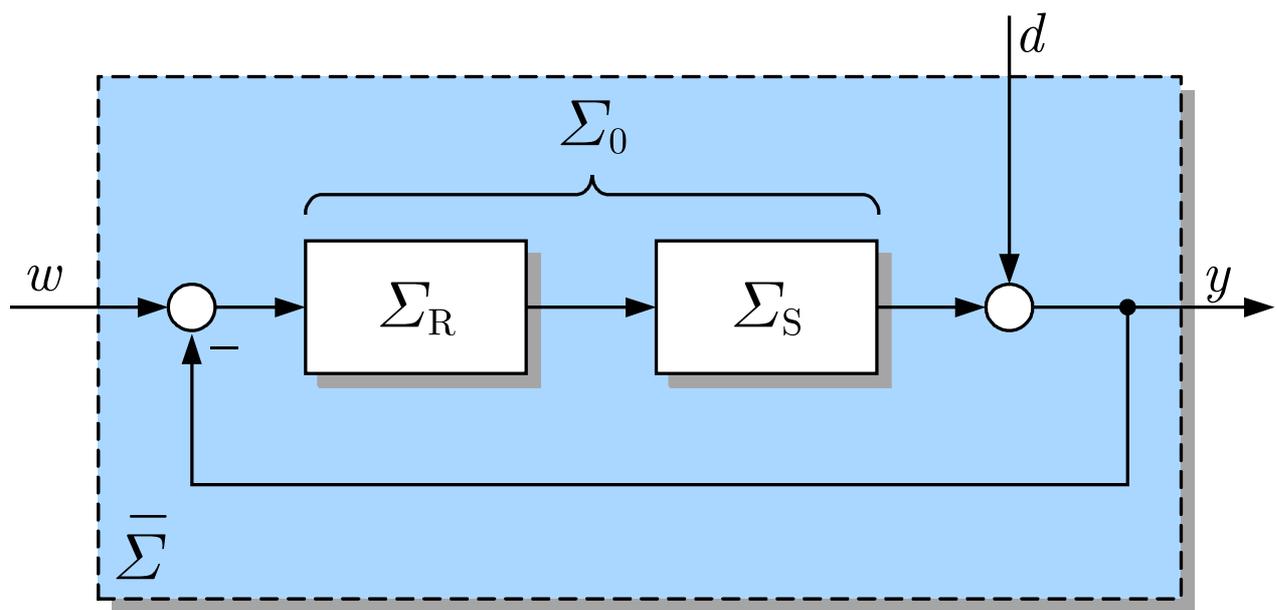


Abb. 7.1: Standardregelkreis

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

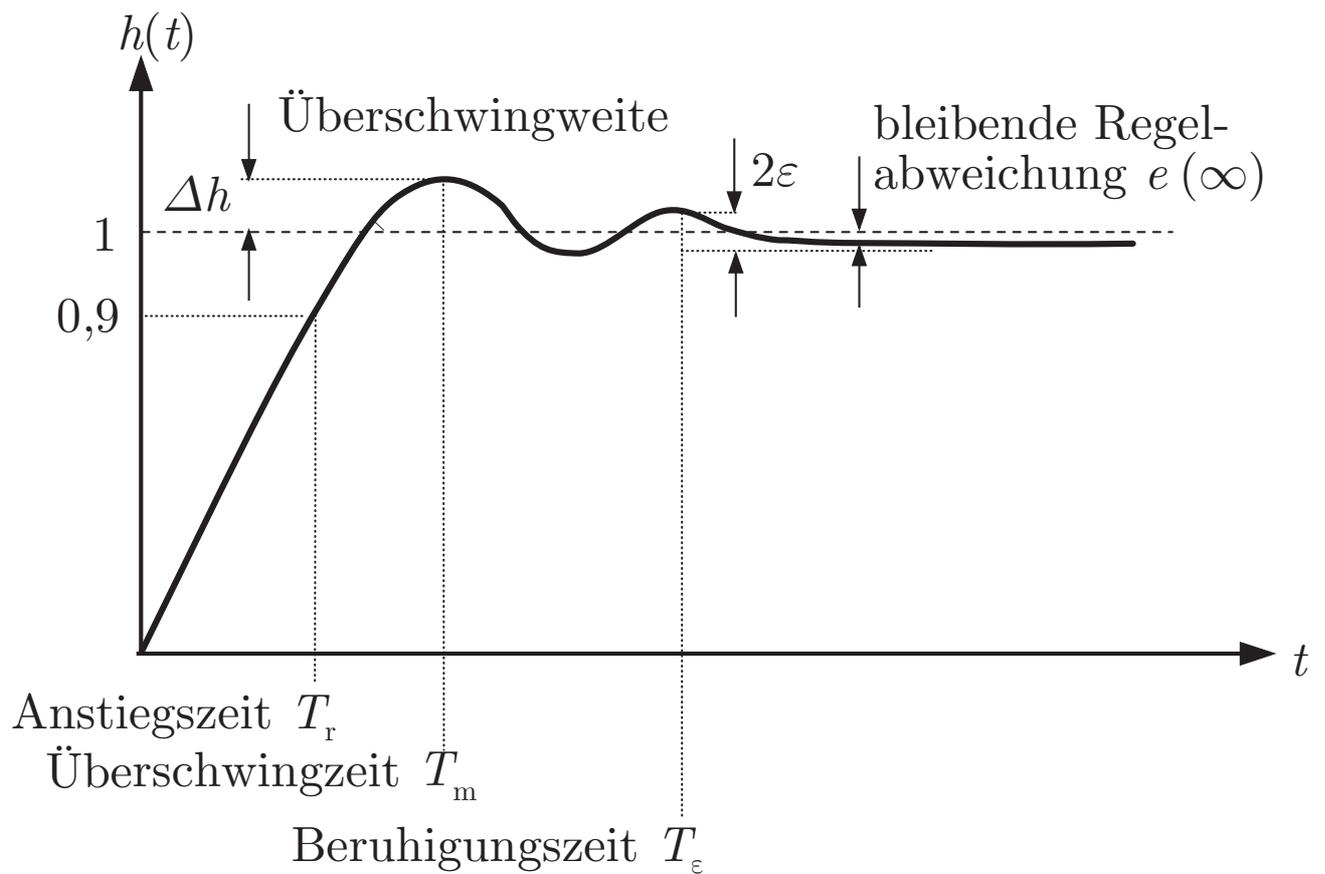


Abb. 7.2: Führungsübergangsfunktion des Regelkreises mit Kennzeichnung wichtiger Kennwerte

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

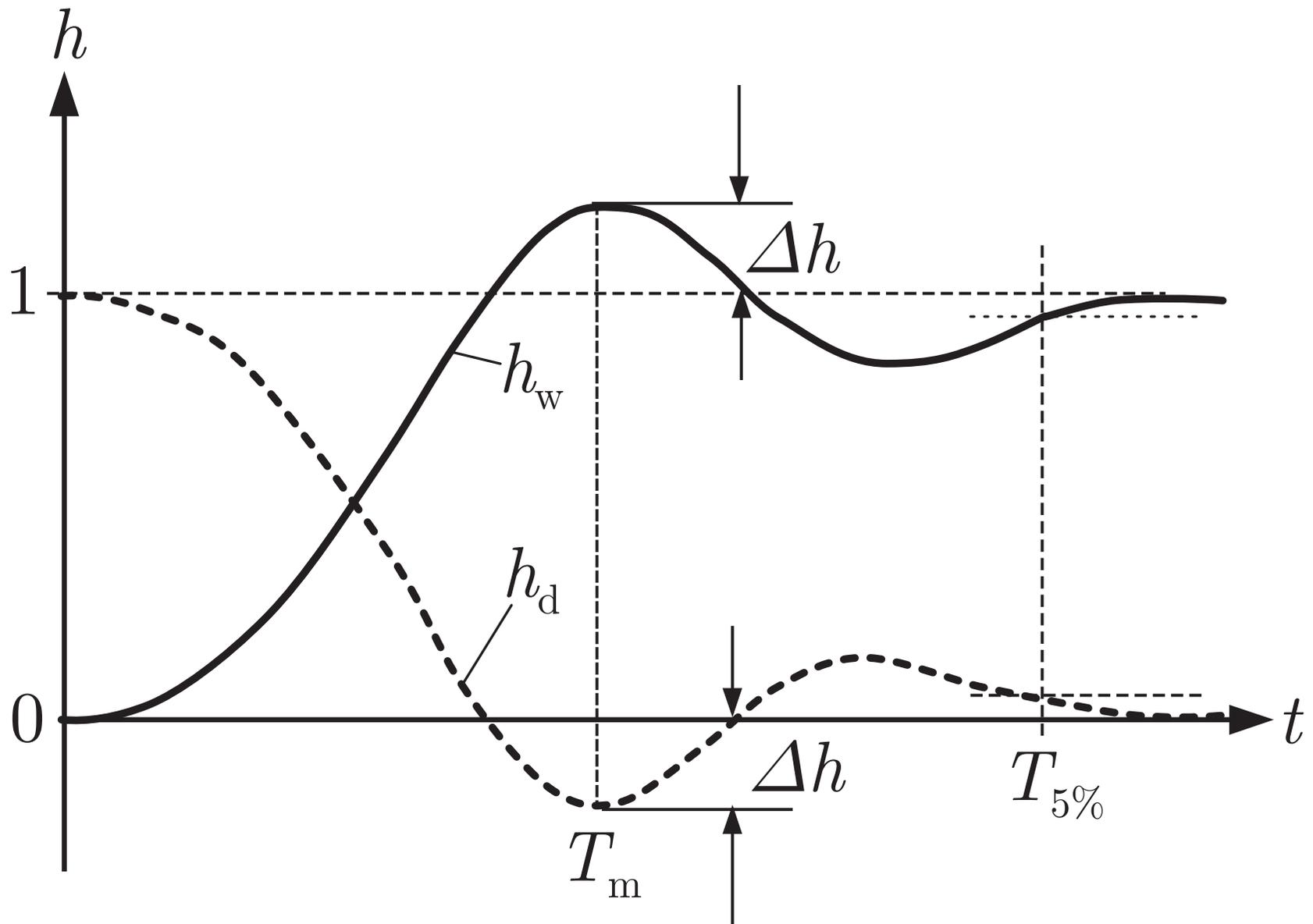


Abb. 7.3. Übergangsfunktionen bei sprungförmiger Störung bzw. Führung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

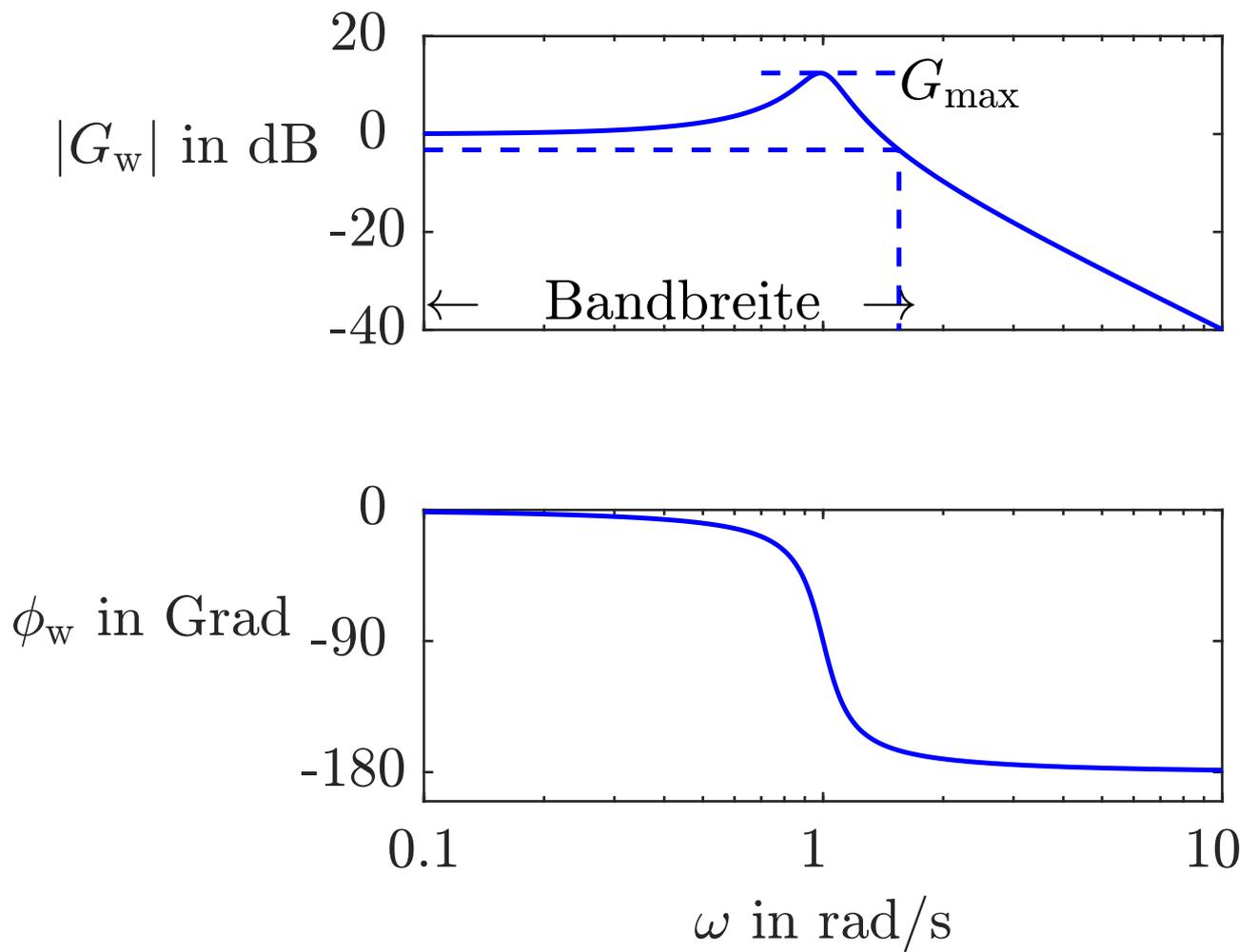


Abb. 7.4: Bodediagramm des Führungsfrequenzgangs mit Kennzeichnung wichtiger Kennwerte

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

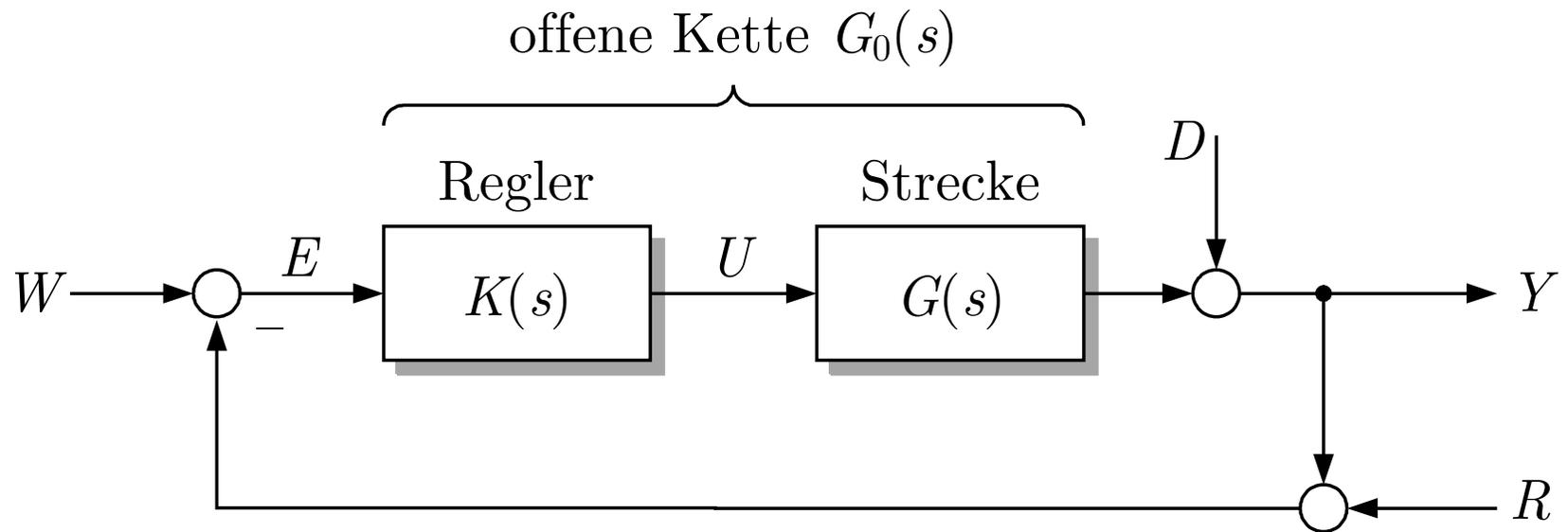


Abb. 7.5. Standardregelkeis

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

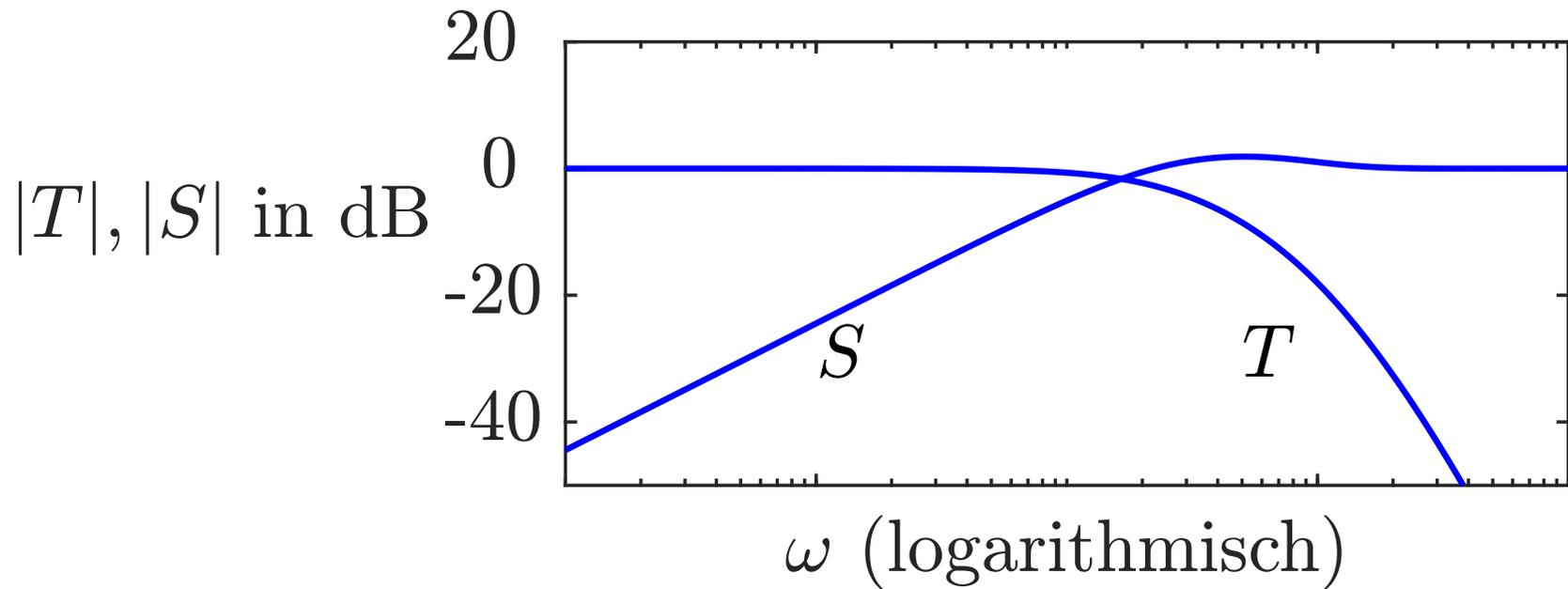


Abb. 7.6. Beispiel für die Amplitudengänge von $S(j\omega) = G_d(j\omega)$ und $T(j\omega) = G_w(j\omega)$

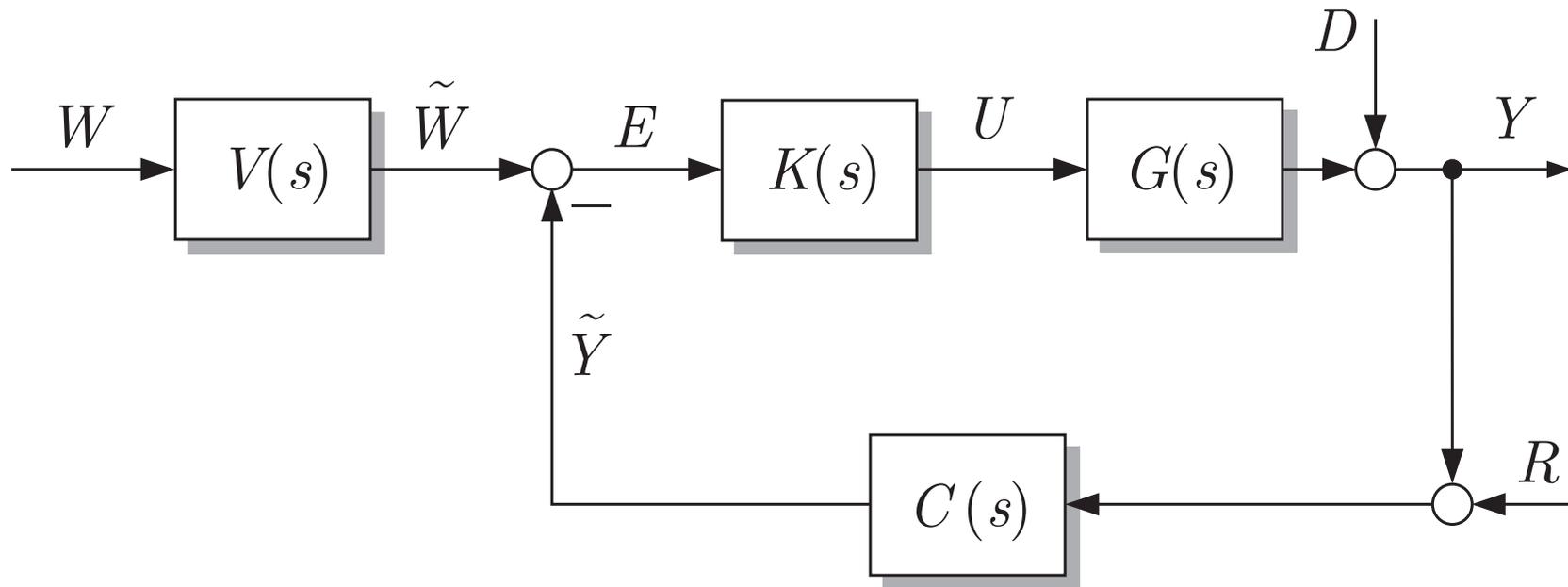


Abb. 7.7. Erweiterter Standardregelkreis

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

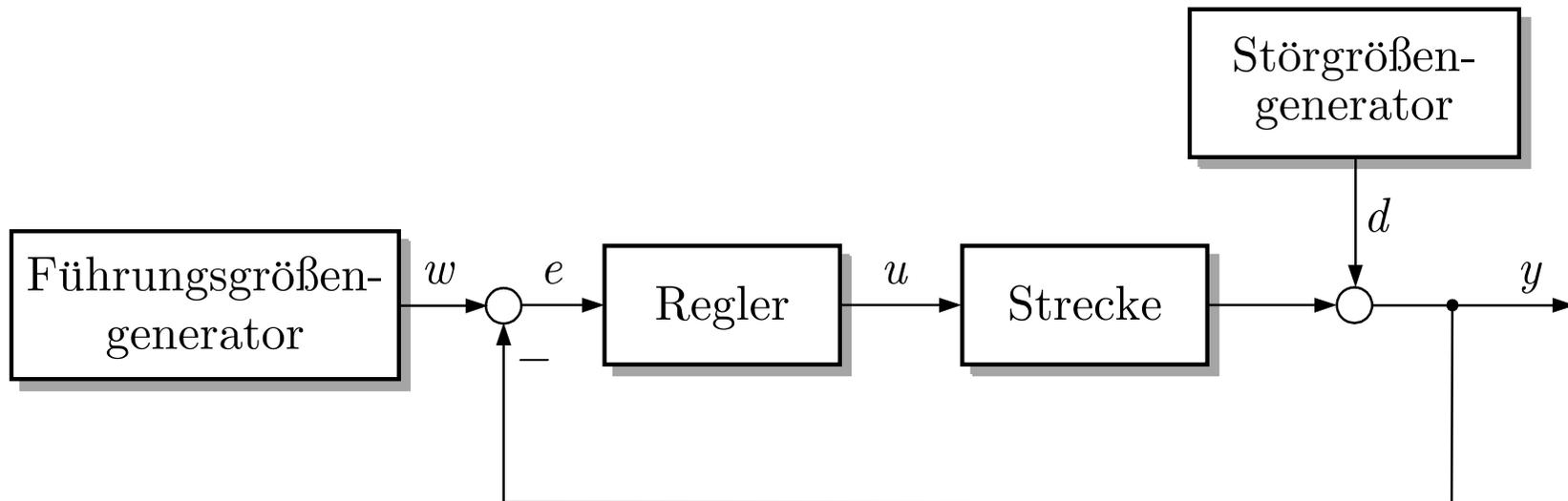


Abb. 7.8. Standardregelkreis mit Führungsgrößengenerator und Störgrößengenerator

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

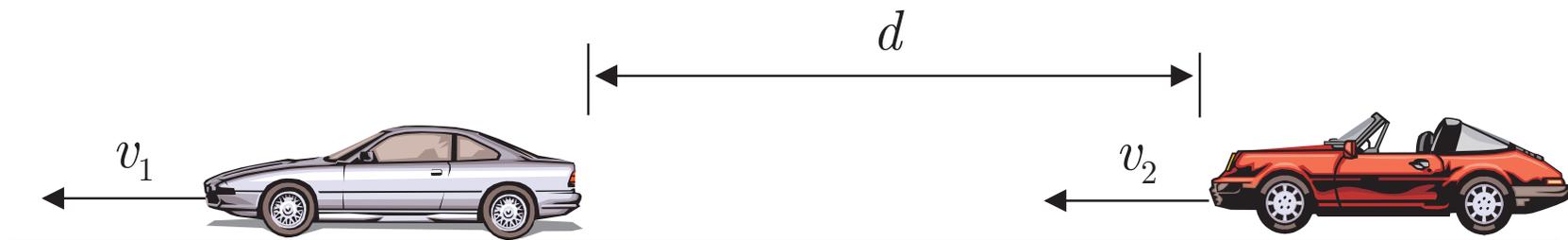


Abb. 7.9. Abstandsregelung für Fahrzeuge

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

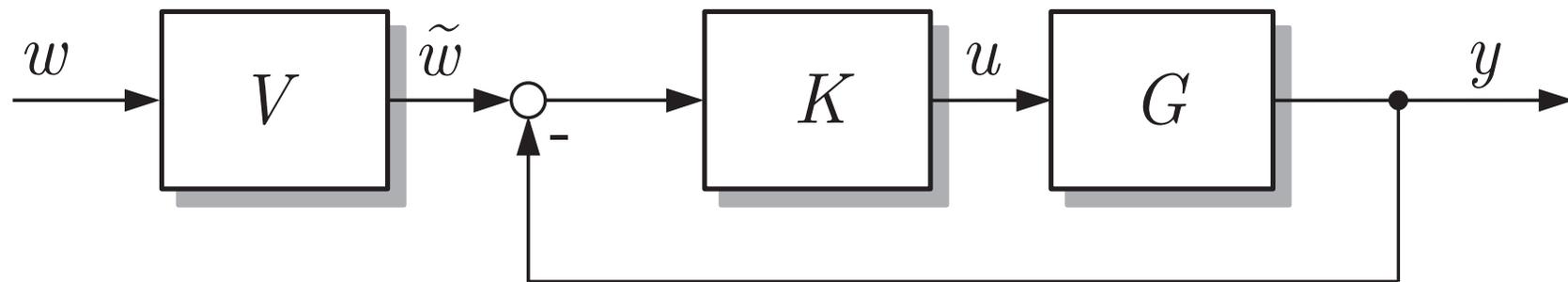


Abb. 7.10. Regelkreis mit Vorfilter

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

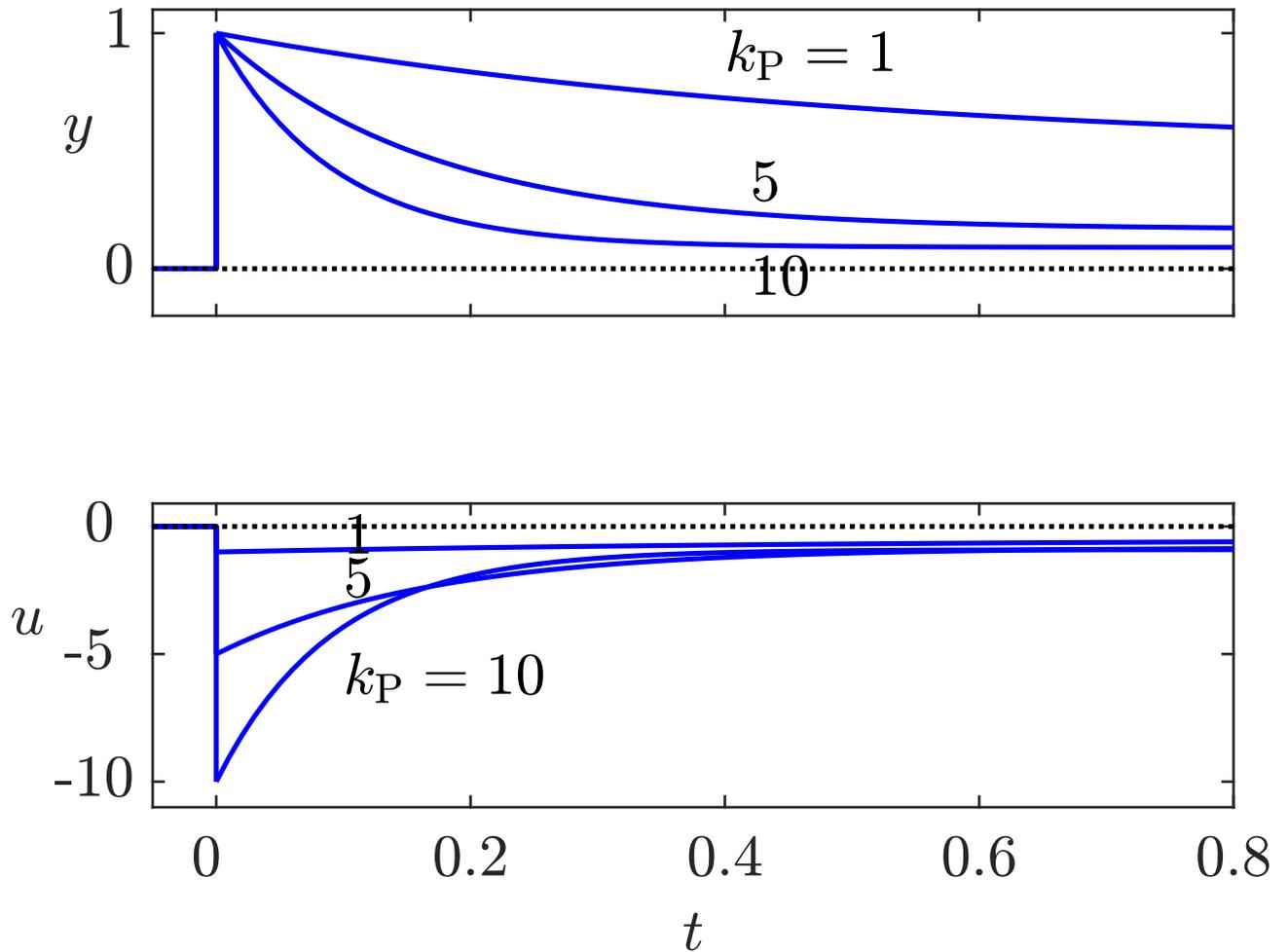


Abb. 7.11: Störübergangsfunktion eines Regelkreises mit Proportionalregler ($k_P = 1, 5$ und 10)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

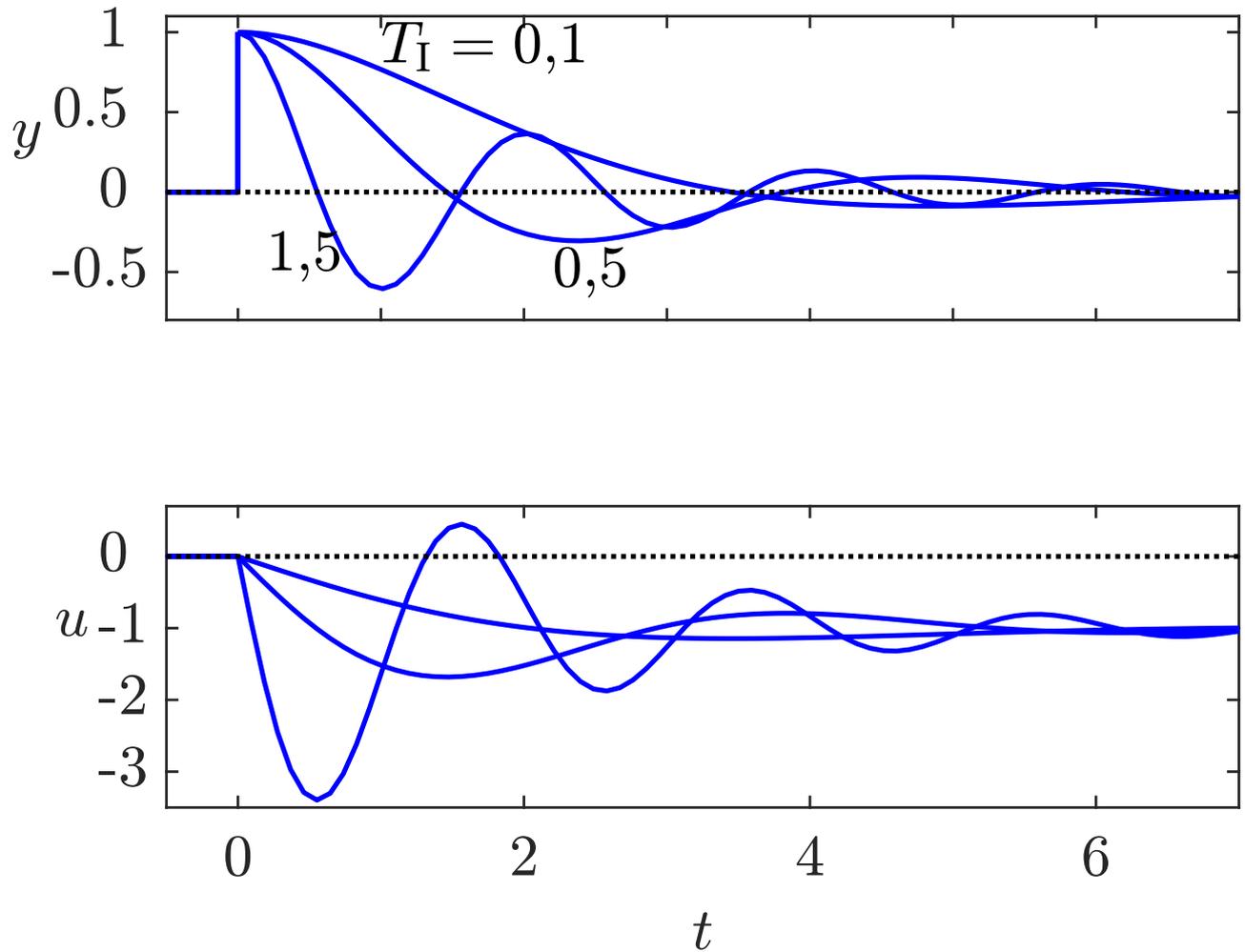


Abb. 7.12: Störübergangsfunktion eines Regelkreises mit I-Regler ($T_I = 0,1, 0,5$ und $1,5$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

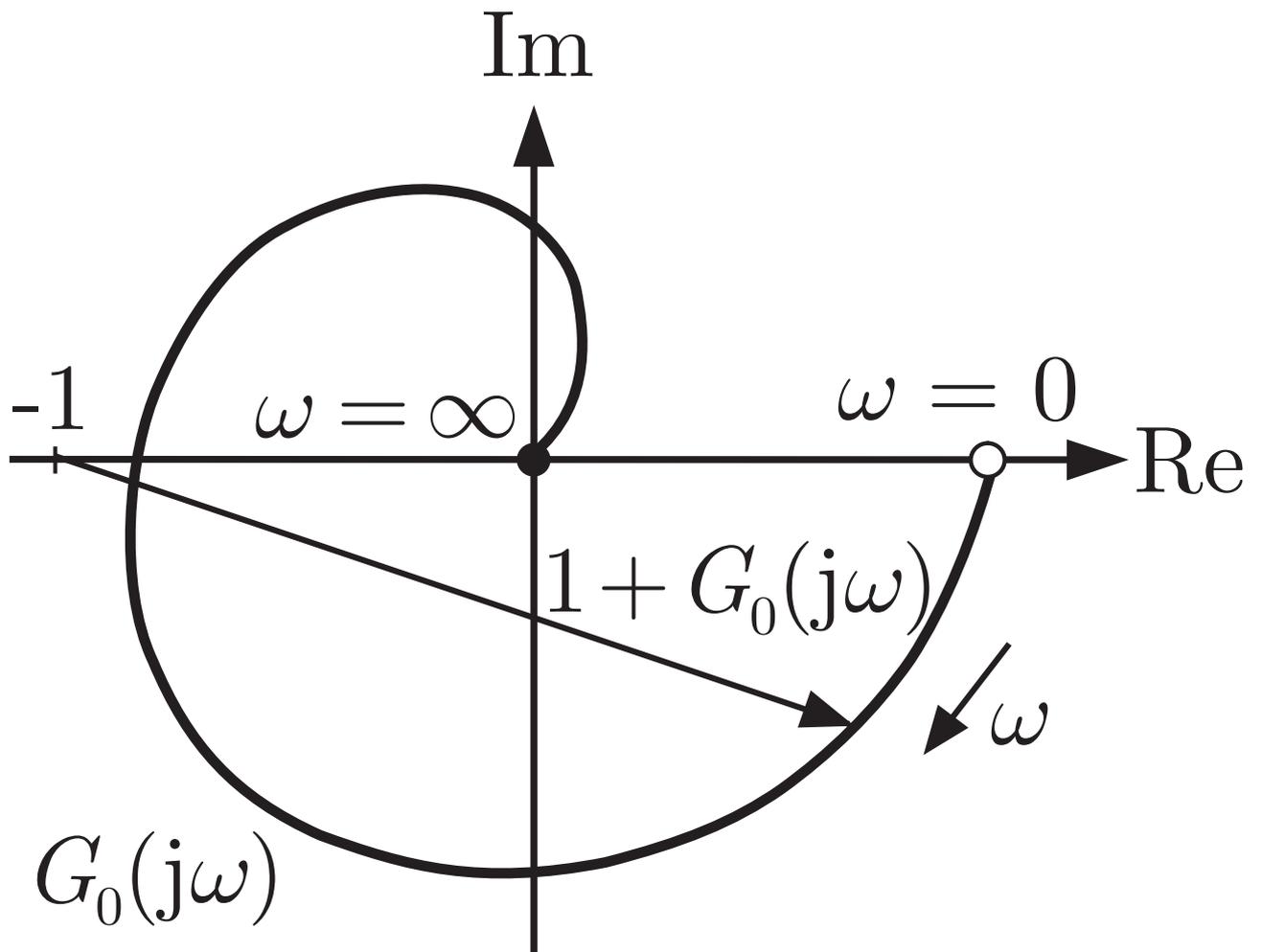


Abb. 7.13: Typischer Verlauf der Ortskurve der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

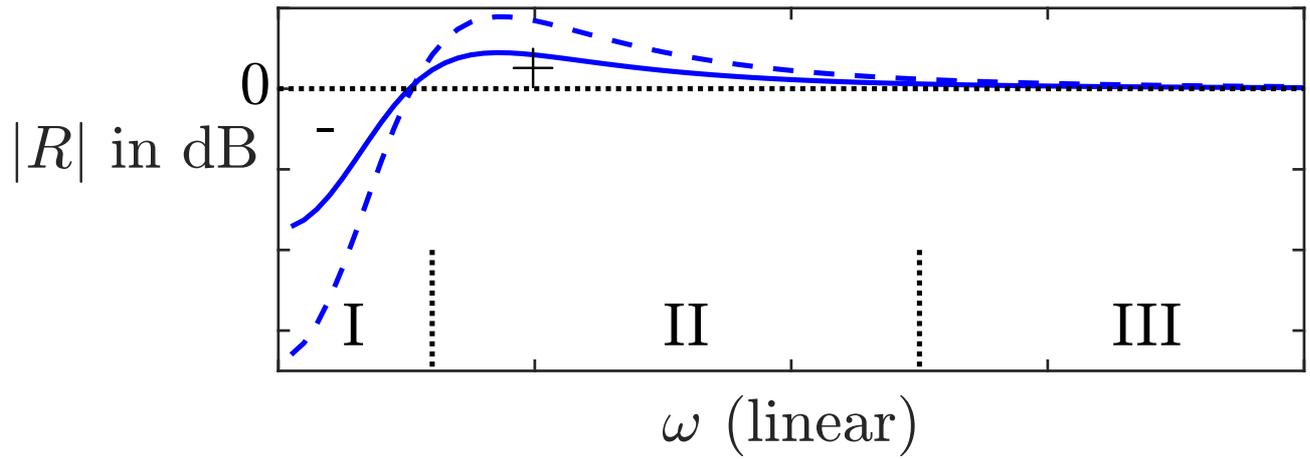


Abb. 7.13: Betrag des Regelfaktors $R(j\omega)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

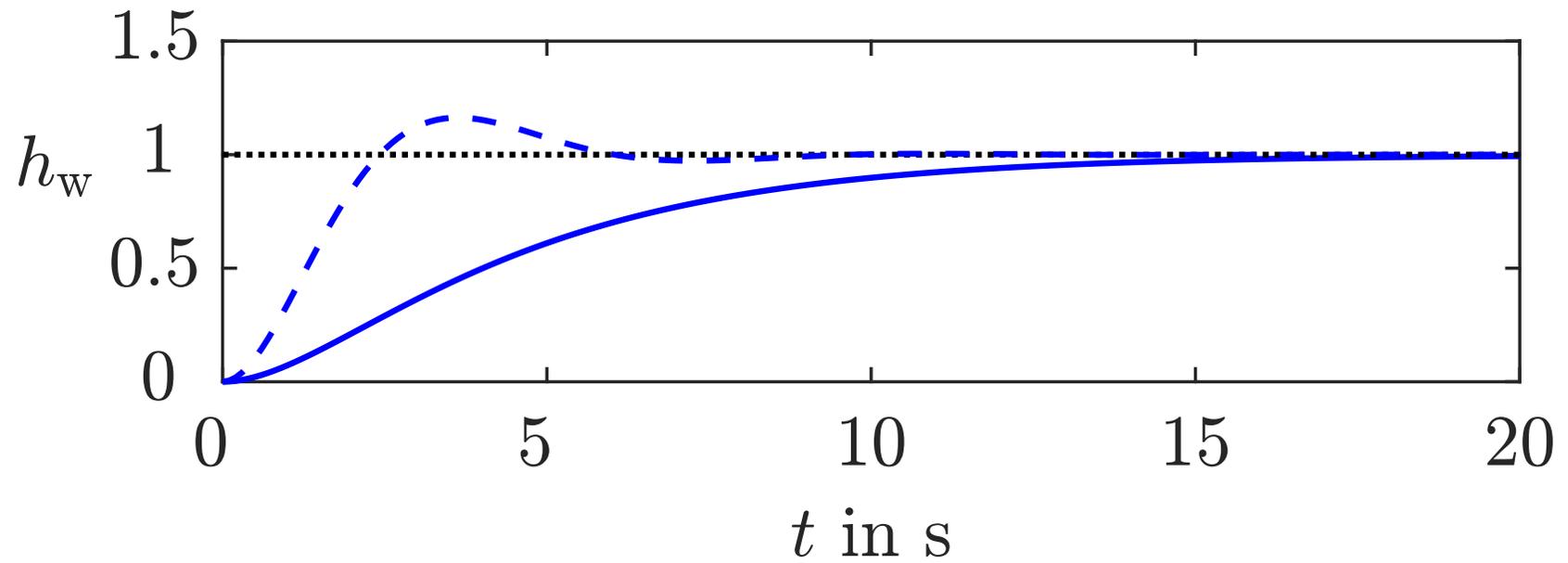


Abb. 7.14. Führungsübergangsfunktion des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

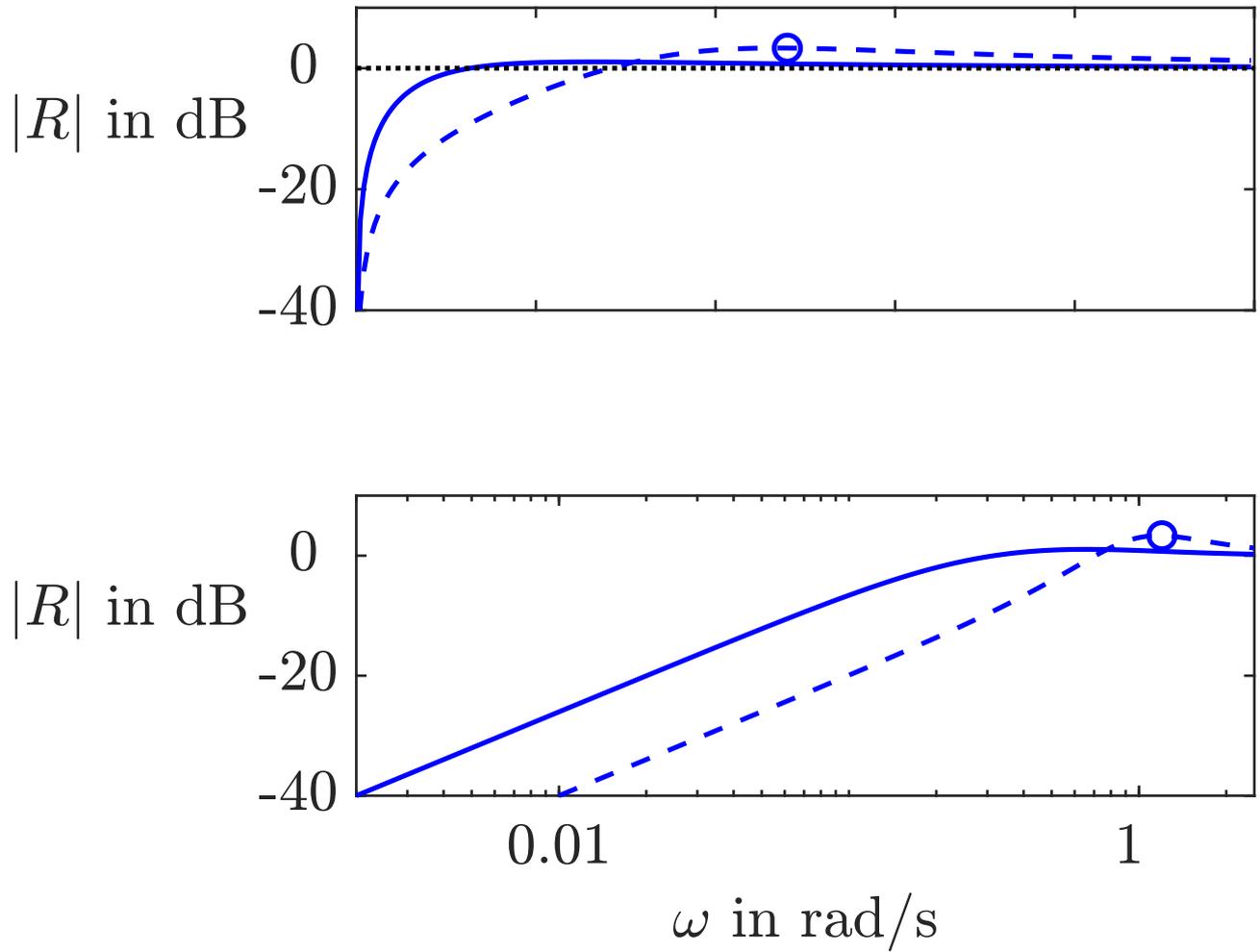


Abb. 7.15: Regelfaktor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

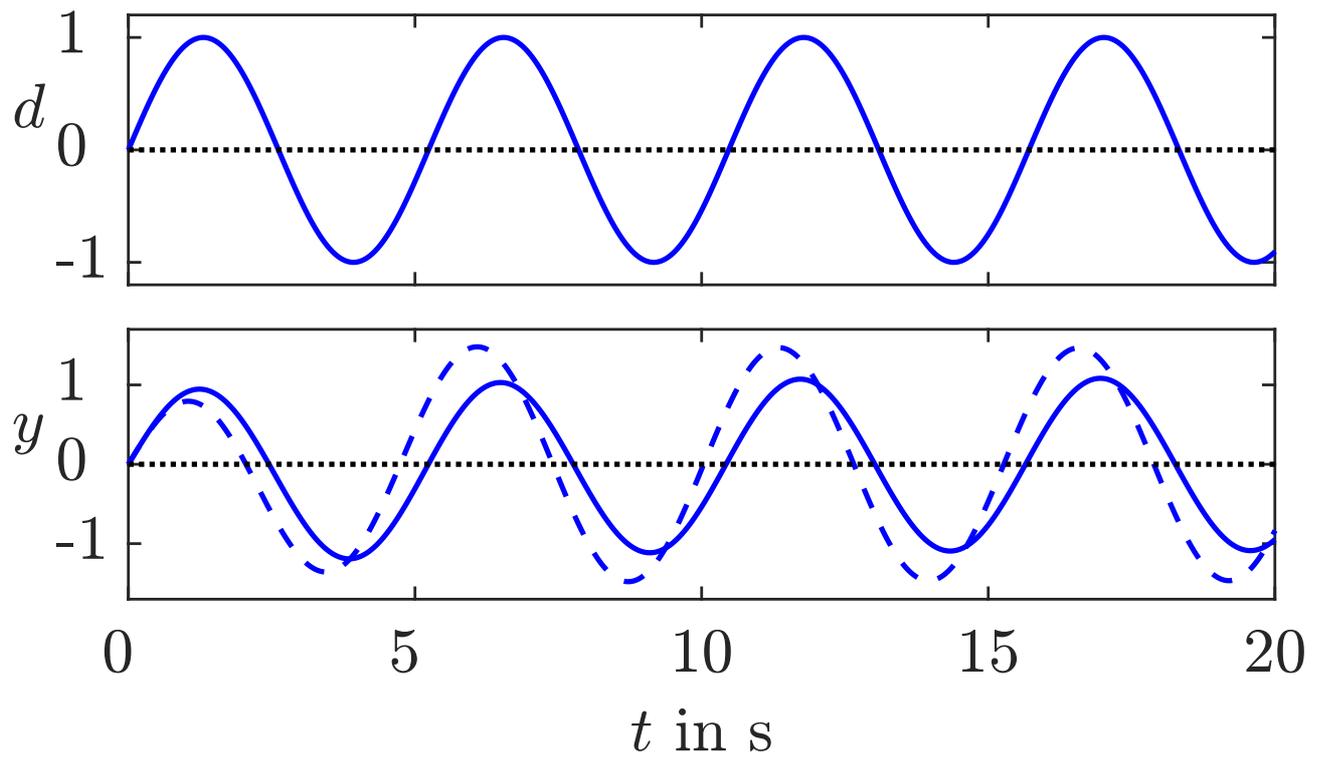


Abb. 7.16: Verhalten des Regelkreises bei sinusförmiger Störung für $T_I = 5$ s (—) und $T_I = 1$ s (- - -)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

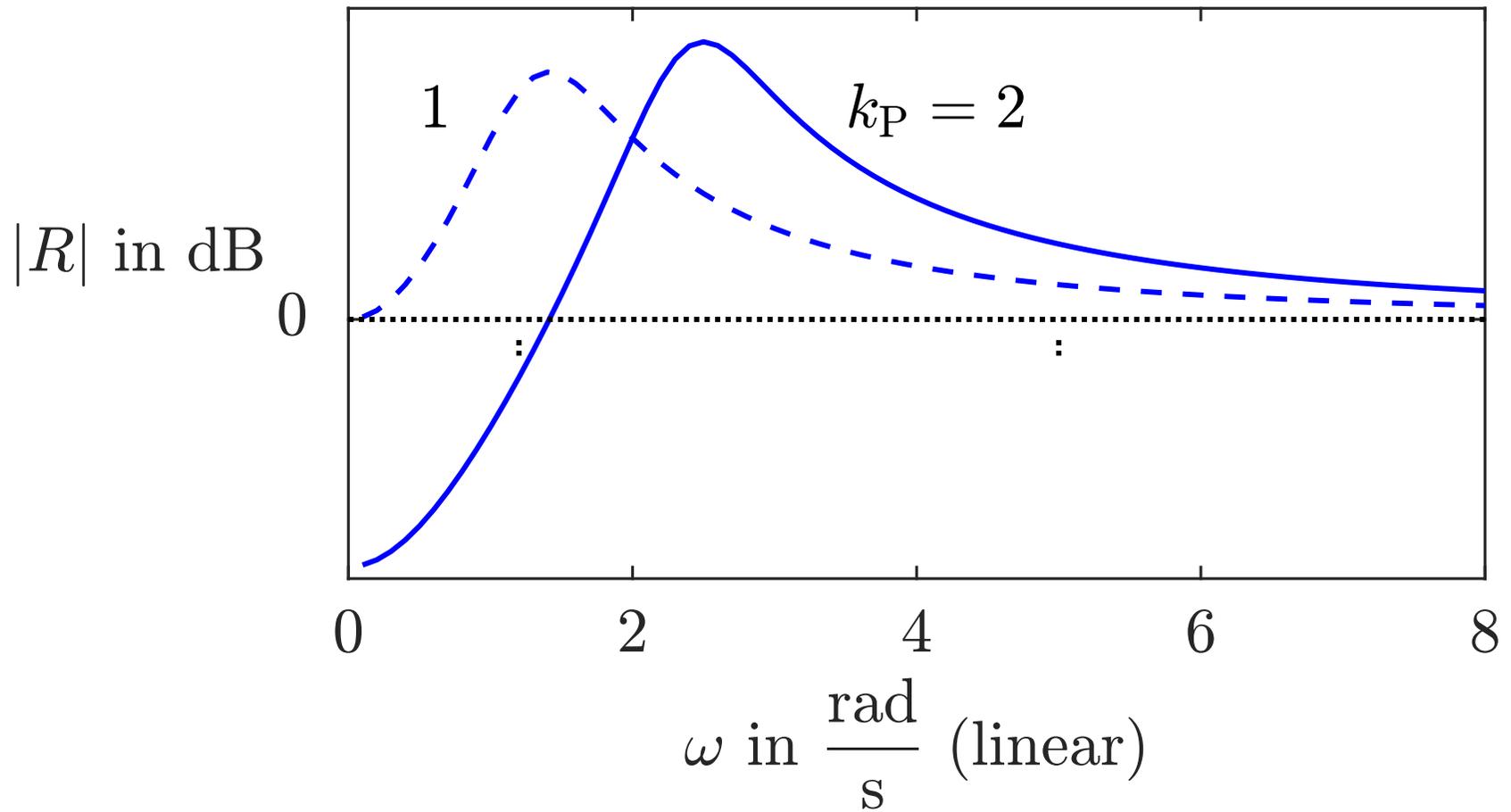


Abb. 7.17. Betrag des Regelfaktors $R(j\omega)$ bei instabiler Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

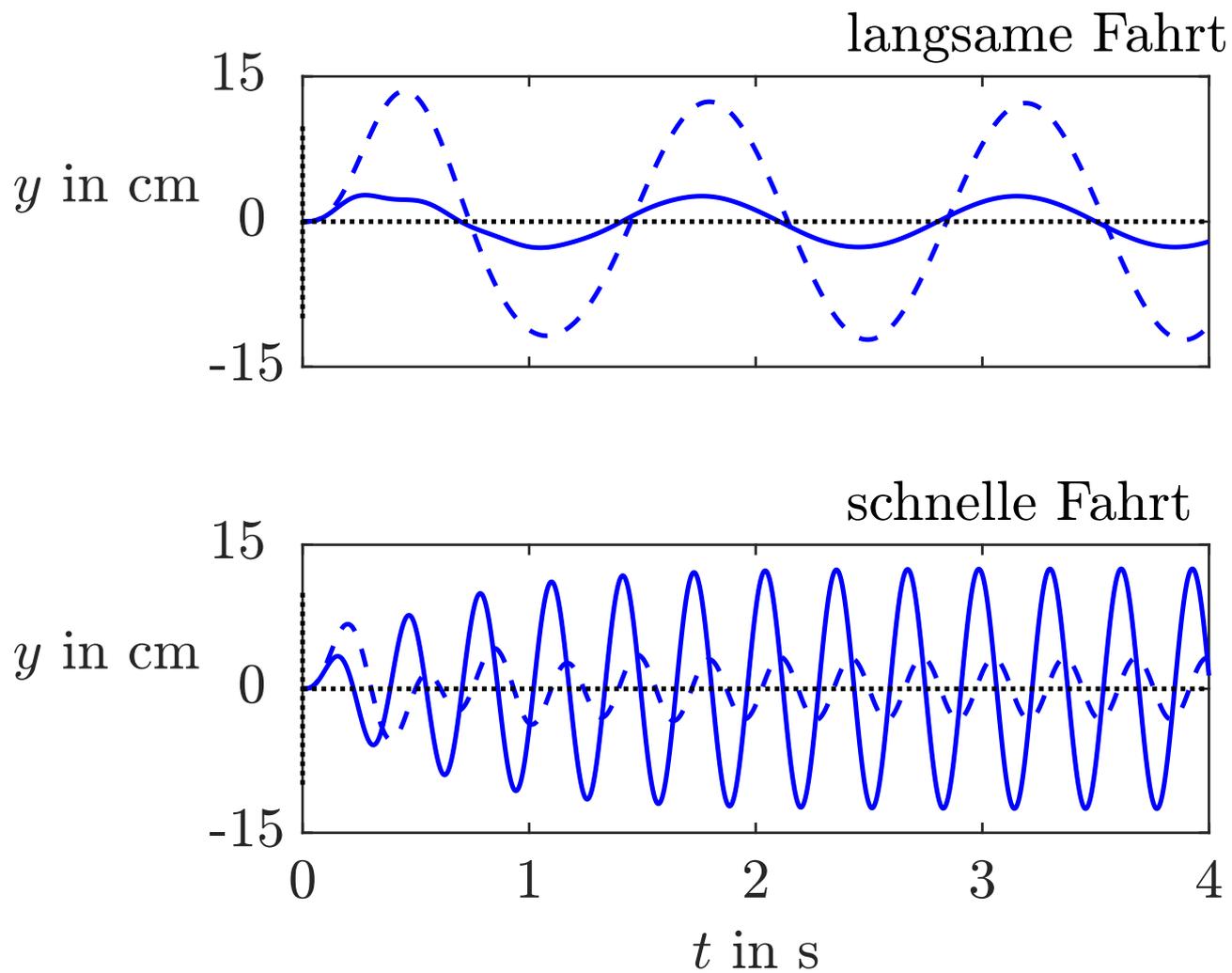


Abb. 7.18: Verhalten des Fahrzeugs bei sinusförmiger Störung (- - - ohne aktive Dämpfung, — mit aktiver Dämpfung)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

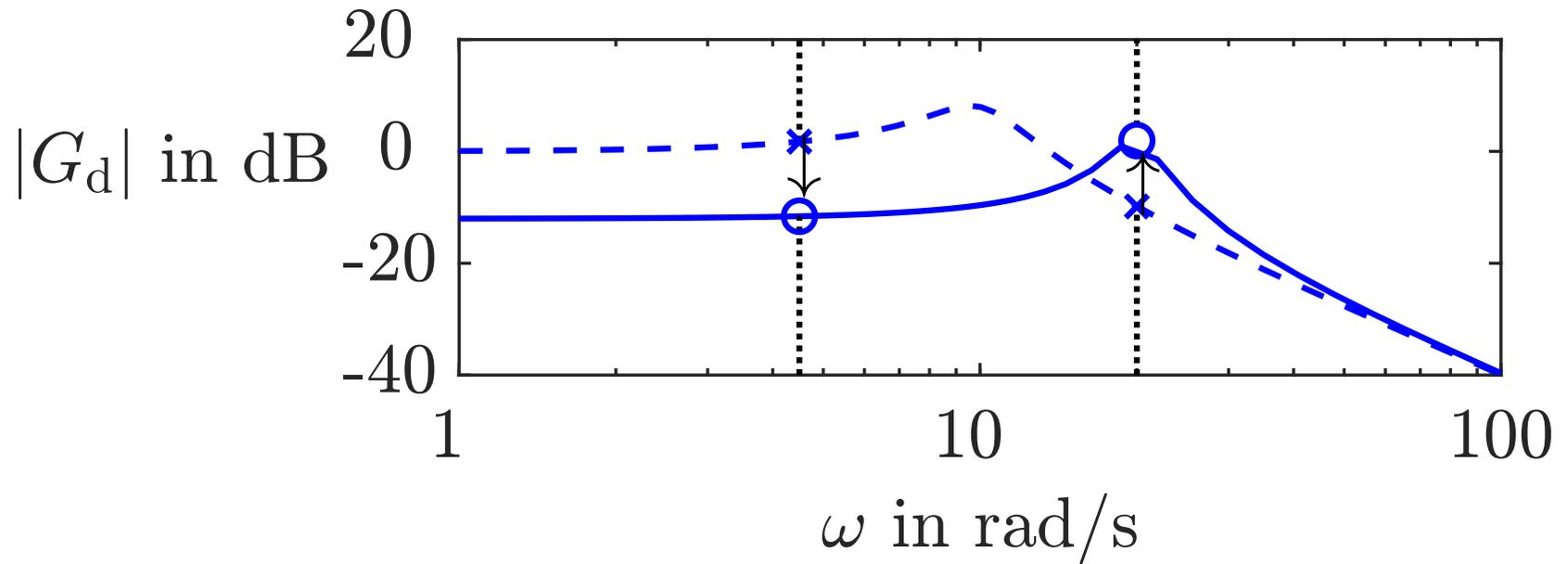


Abb. 7.19. Verschiebung der Störübertragungsfunktion durch die Regelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

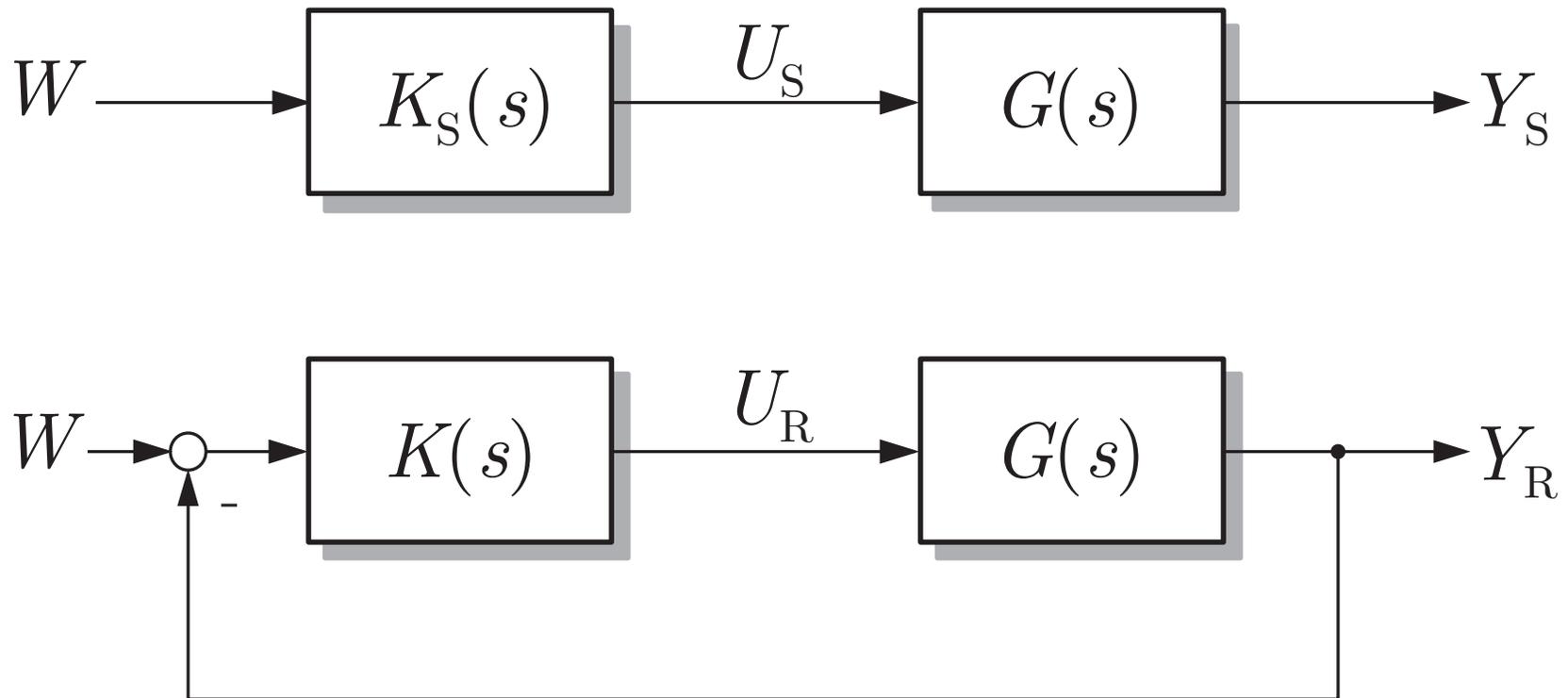


Abb. 7.20. Steuerkette und Regelkreis

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

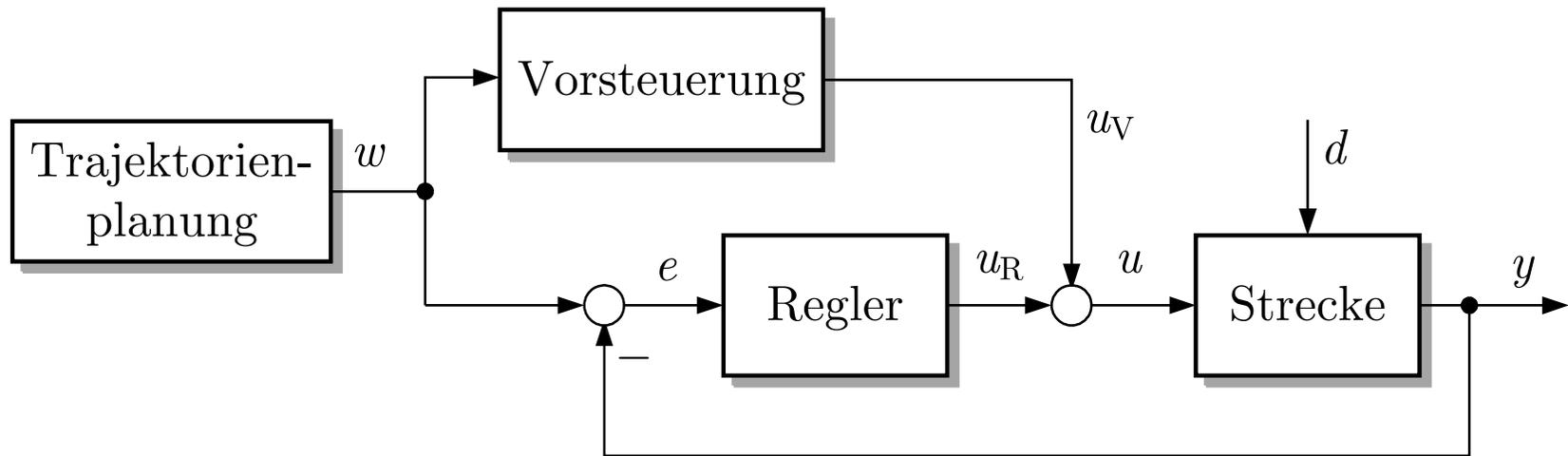


Abb. 7.21. Folgeregelung mit Trajektorienplanung und Vorsteuerung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



Abb. 7.22. Trajektorienplanung und Vorsteuerung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

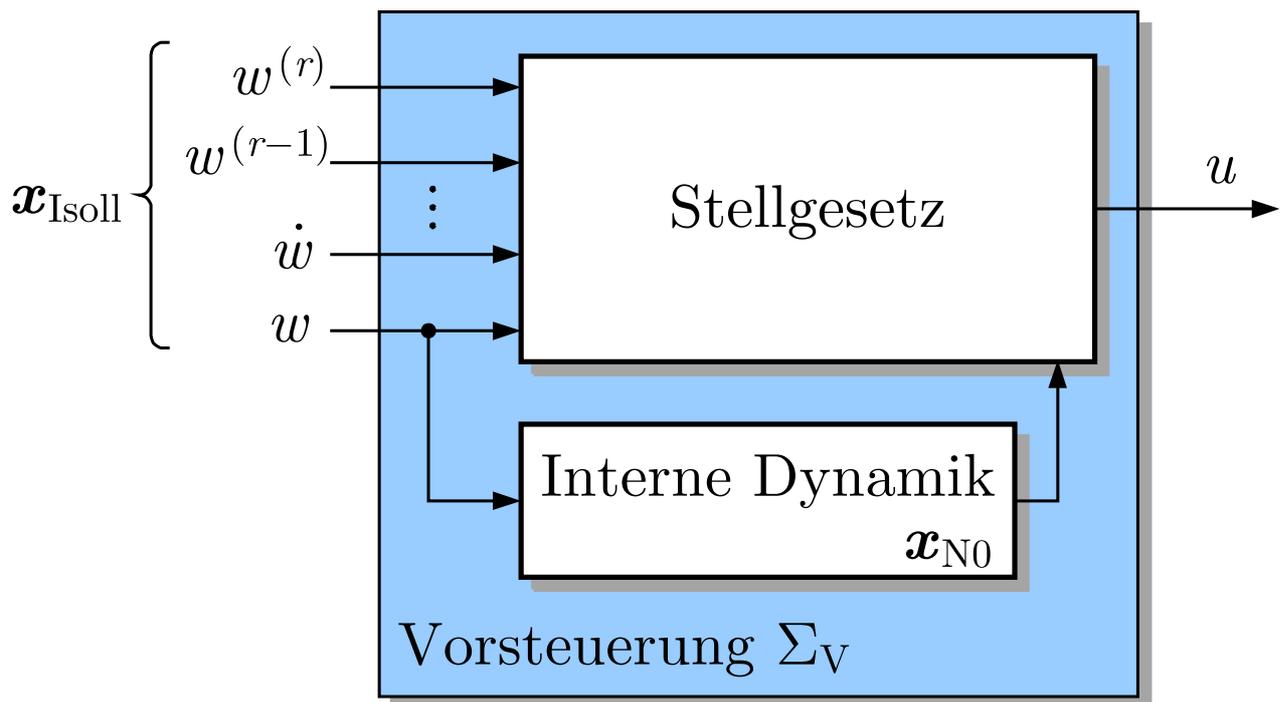


Abb. 7.23: Struktur der Vorsteuerung (7.58)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

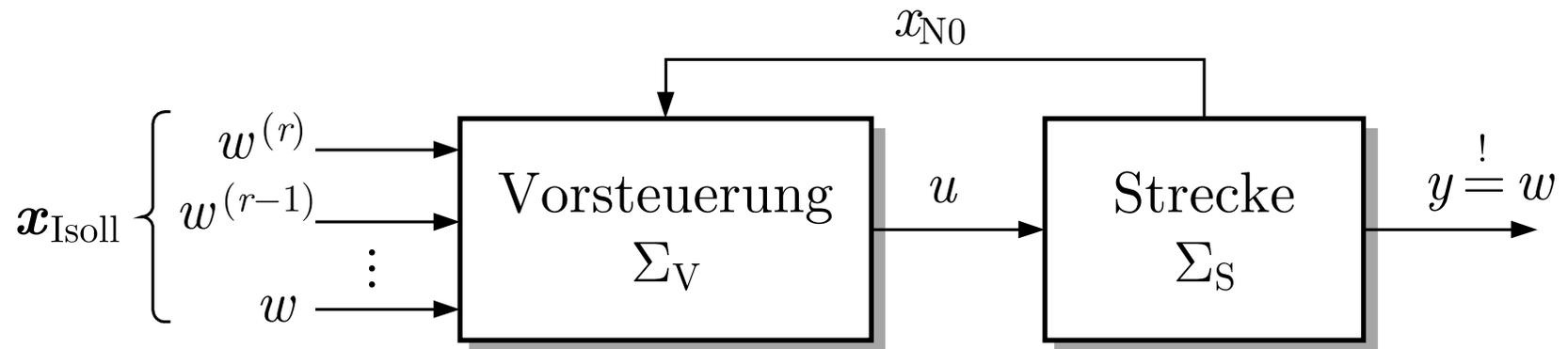


Abb. 7.24. Vorsteuerung: Steuerung in der offenen Wirkungskette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

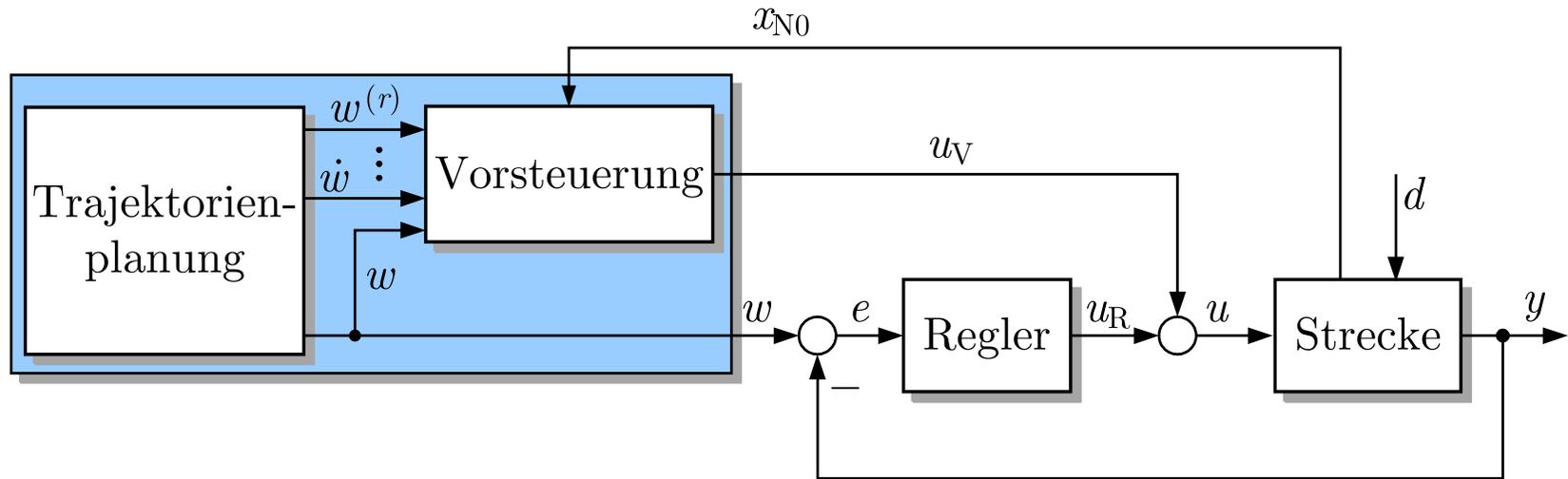


Abb. 7.25. Realisierung des Regelkreises mit Vorsteuerung und Trajektorienplanung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

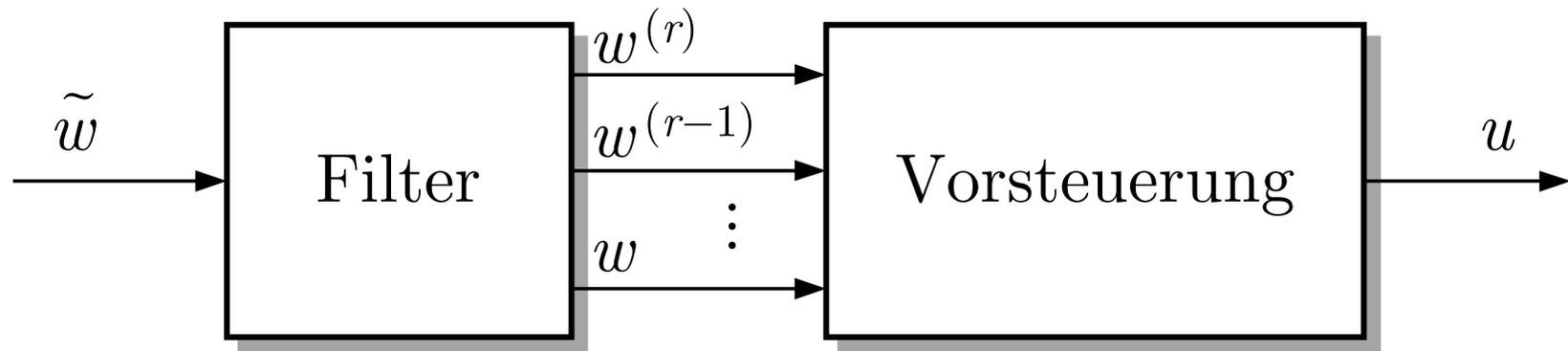


Abb. 7.26. Vorsteuerung für Servoregelungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

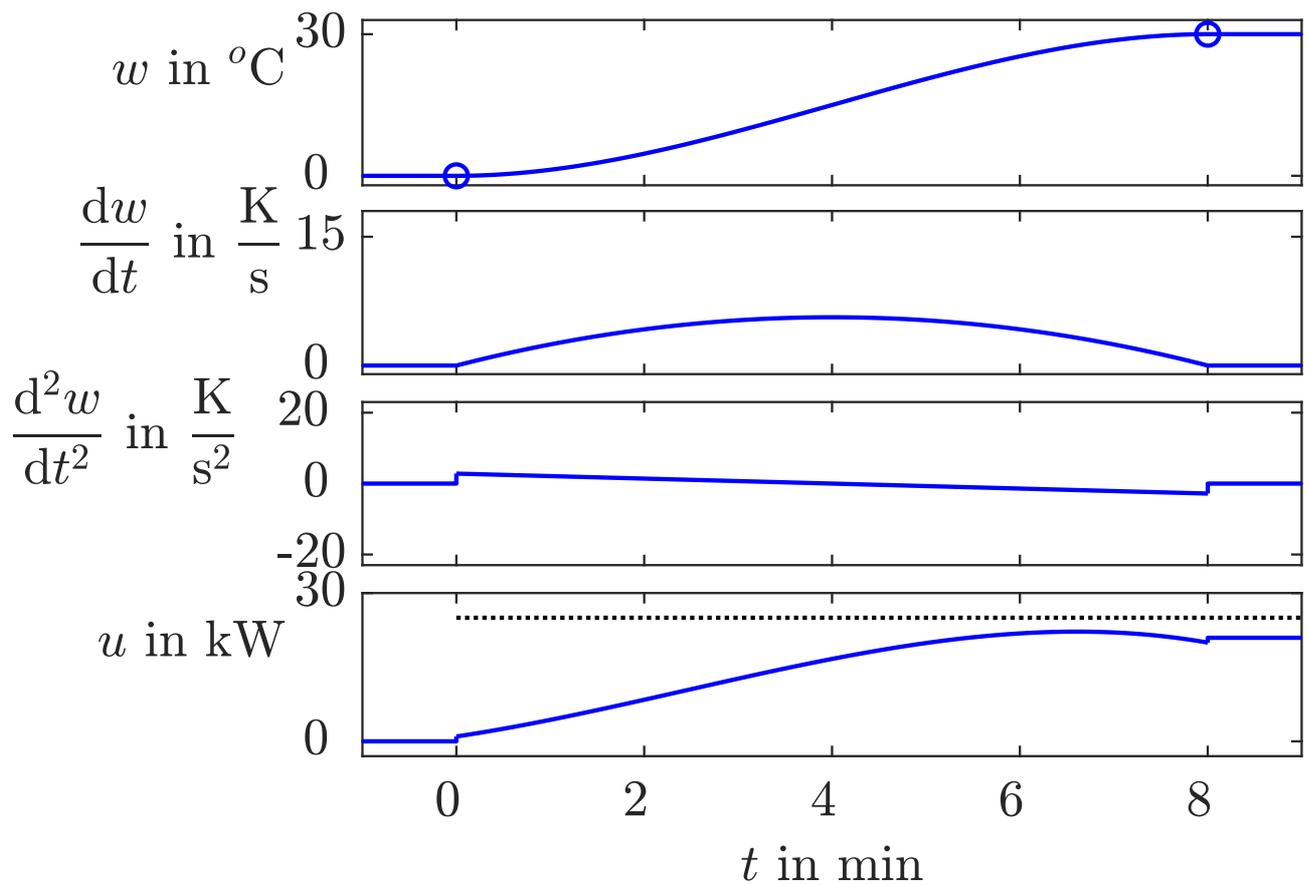


Abb. 7.27: Solltrajektorie $w(t)$, $\dot{w}(t)$ und $\ddot{w}(t)$ sowie Stellgröße $u(t)$ für den Rührkesselreaktor bei $t_e = 8$ min

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

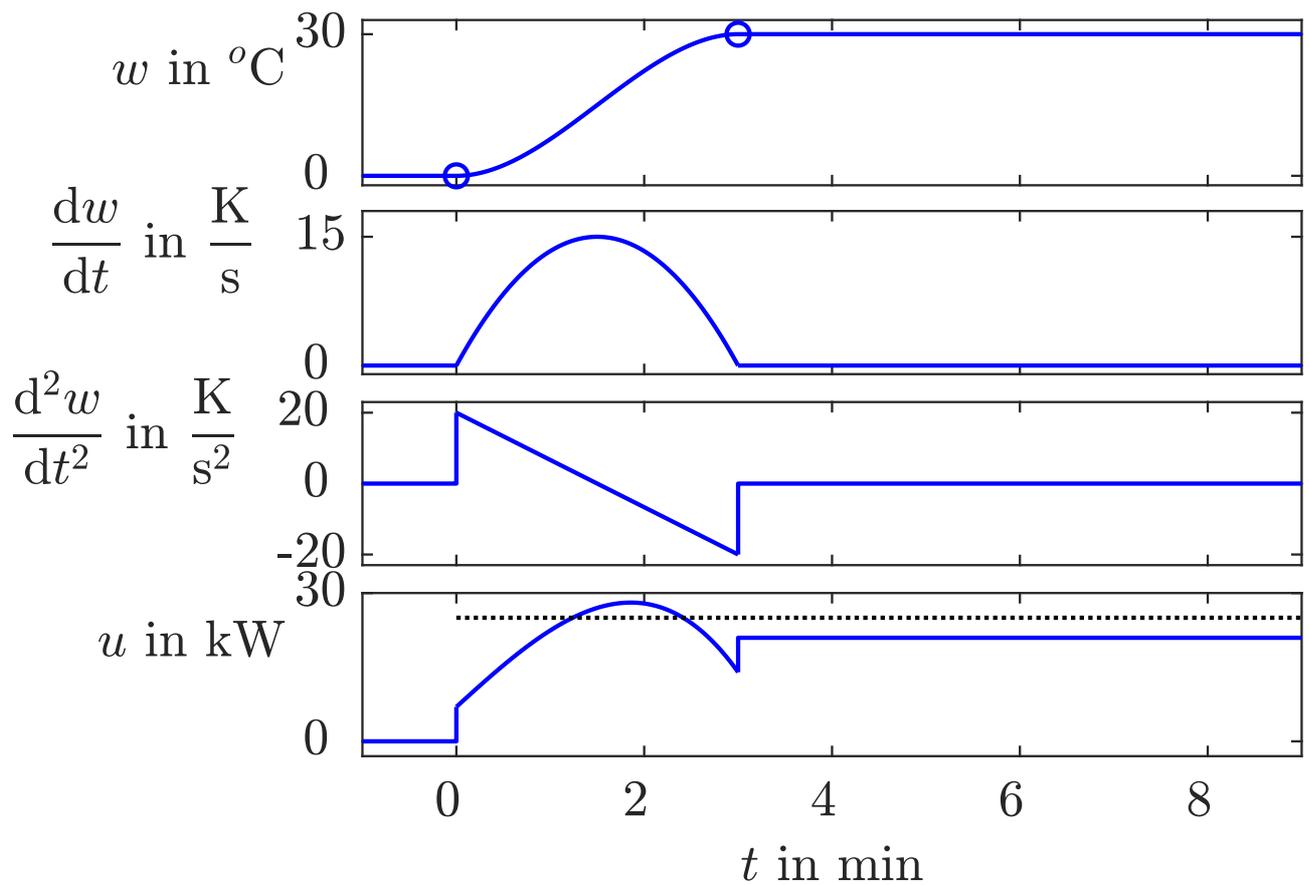


Abb. 7.28: Solltrajektorie $w(t)$, $\dot{w}(t)$ und $\ddot{w}(t)$ sowie Stellgröße $u(t)$ für den Rührkesselreaktor bei $t_e = 3$ min

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

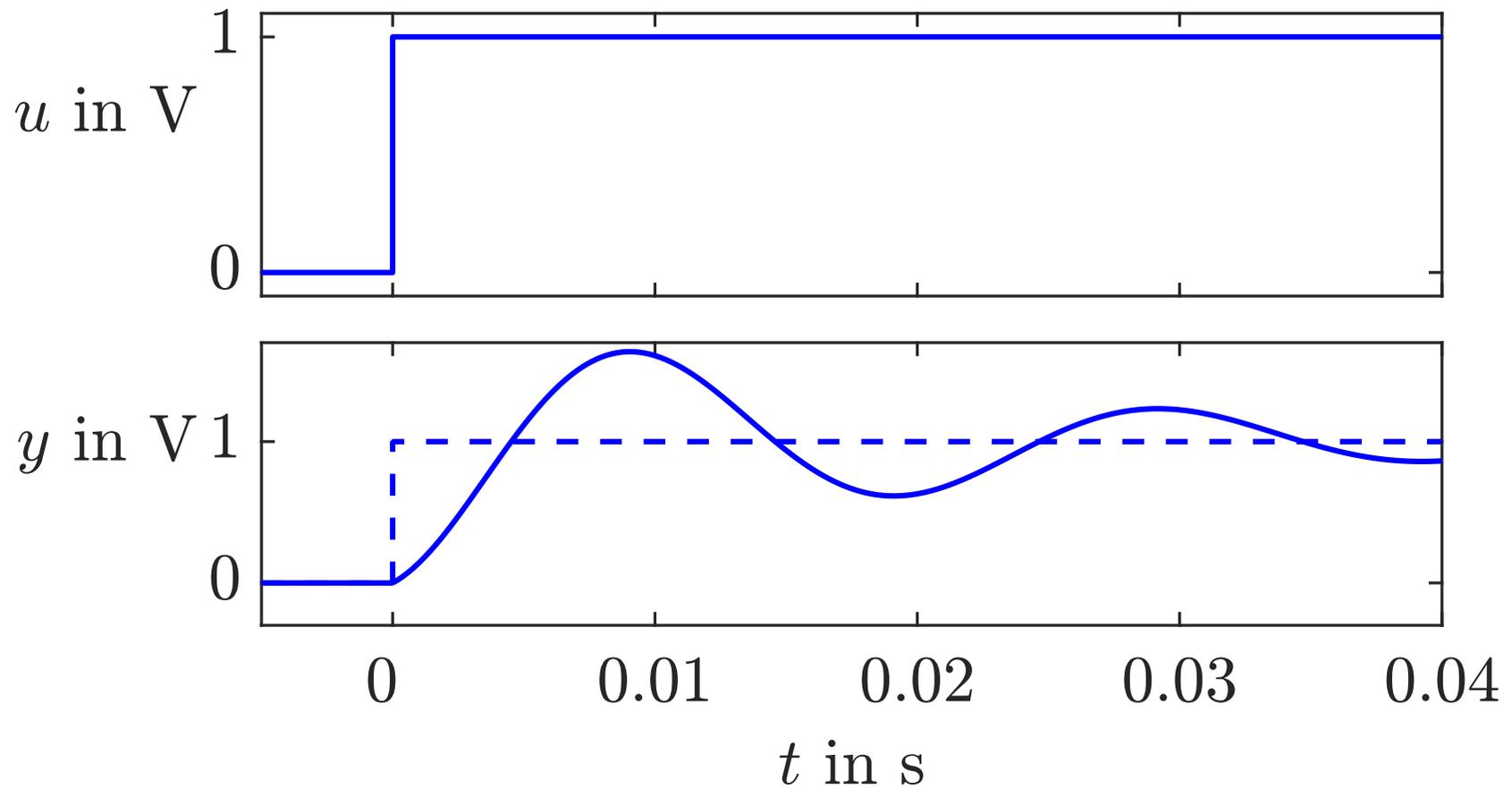


Abb. 7.29. Umsteuerung des Reihenschwingkreises mit konstanter Stellgröße

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

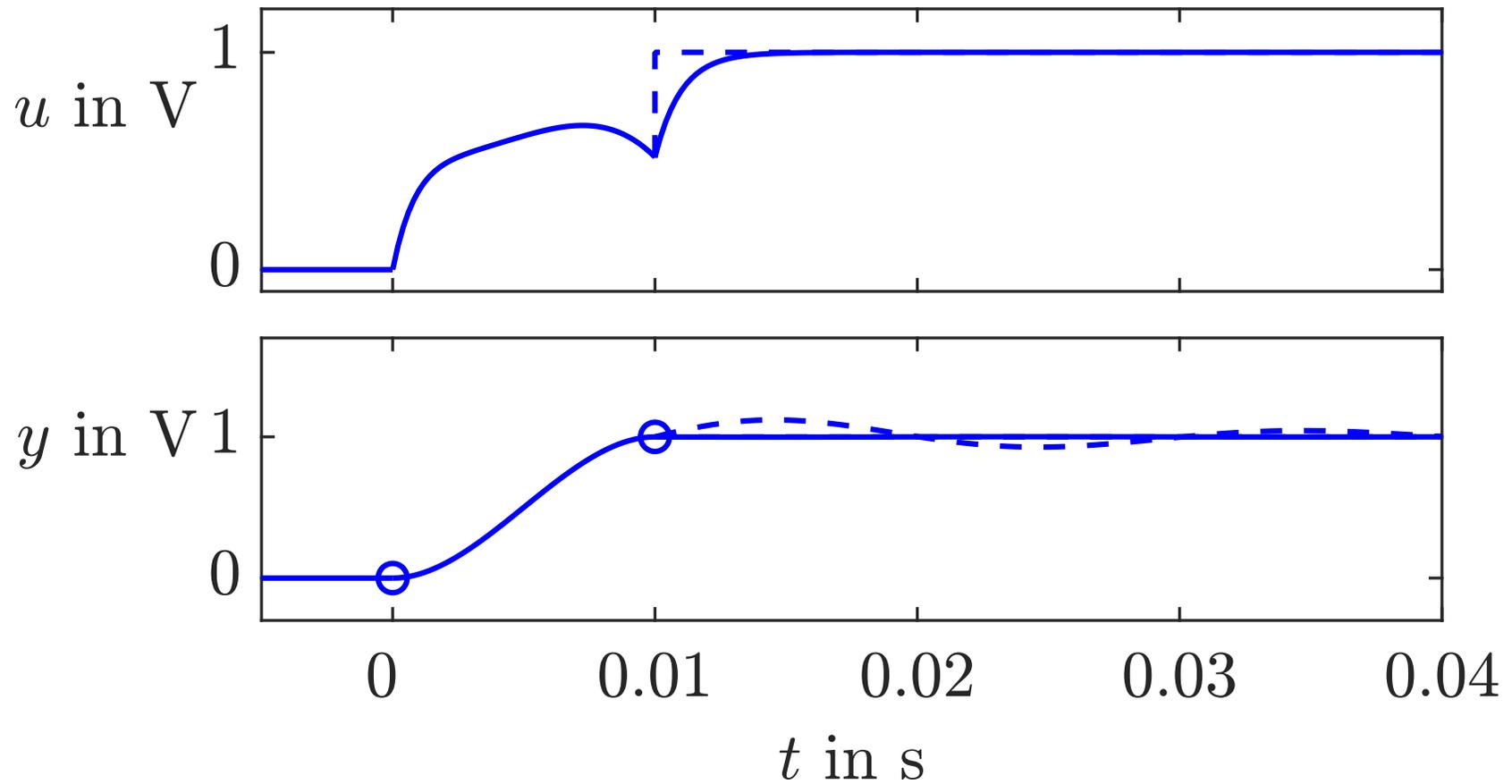


Abb. 7.30. Stationäres Verhalten bei veränderlicher und bei konstanter Stellgröße

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

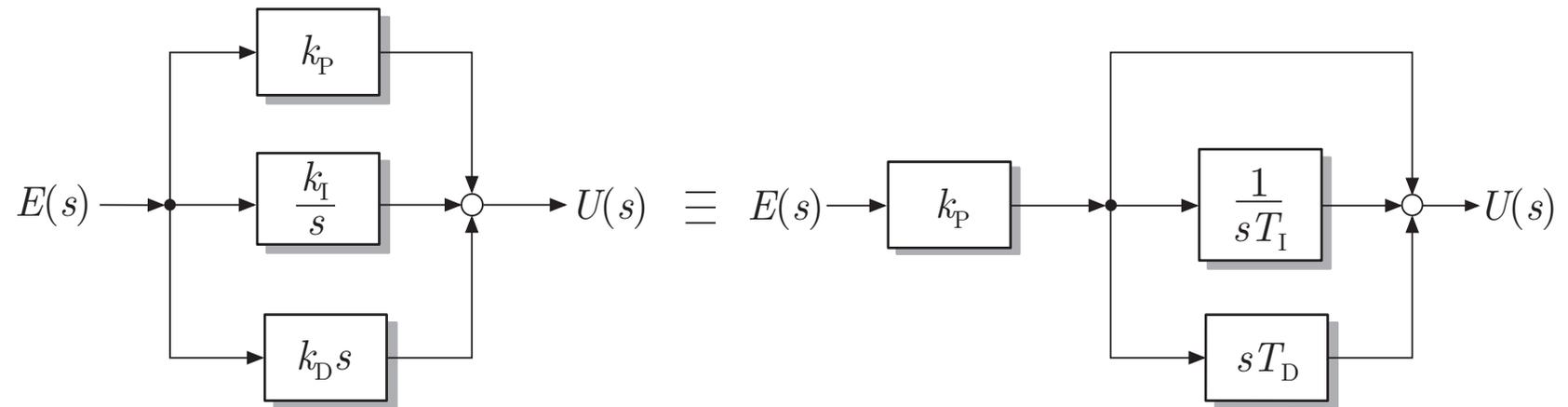


Abb. 7.31. Struktureller Aufbau eines PID-Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

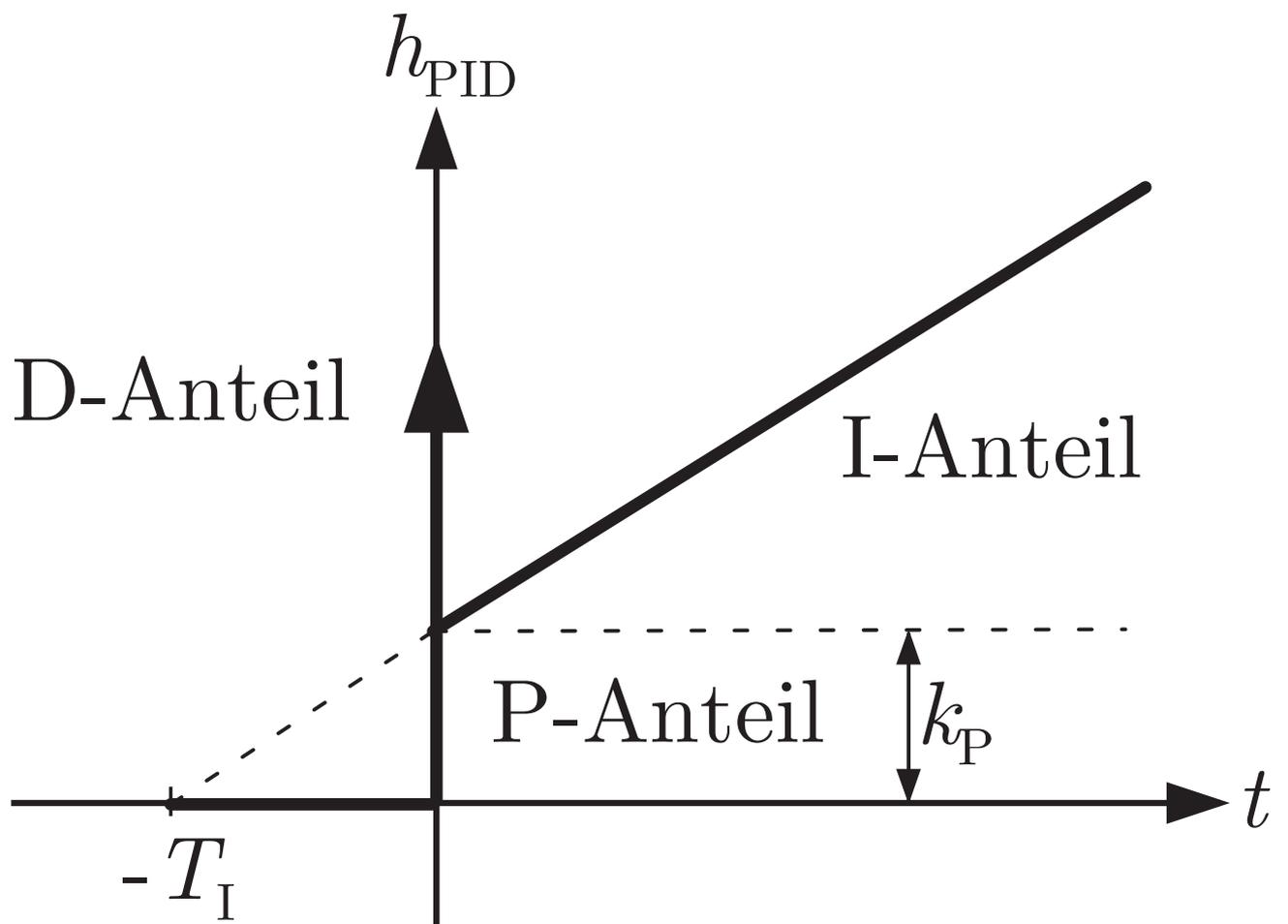


Abb. 7.32: Übergangsfunktion eines PID-Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

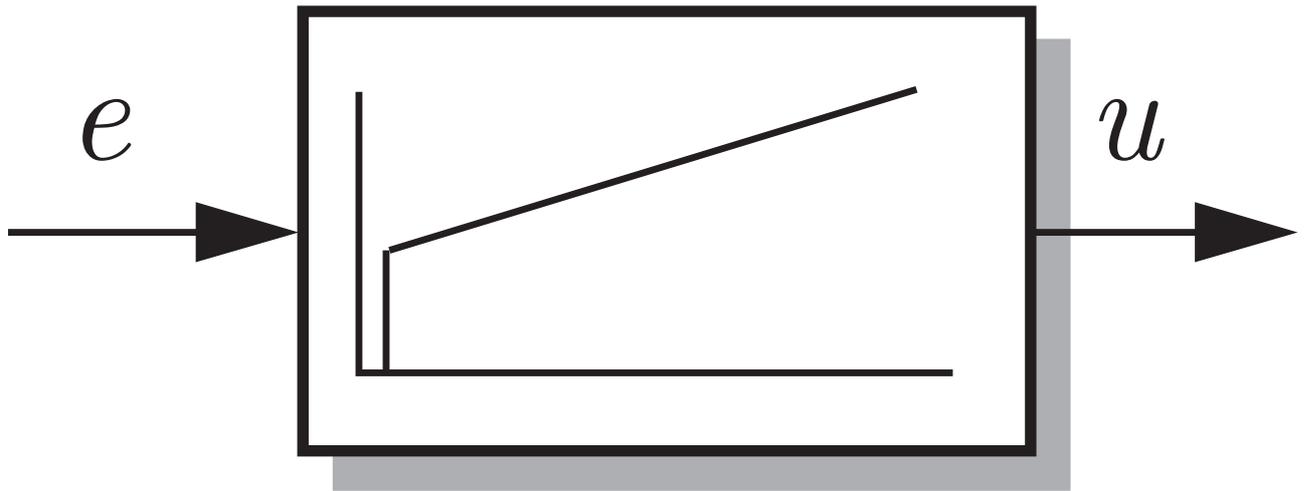


Abb. 7.33: Symbol des PI-Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

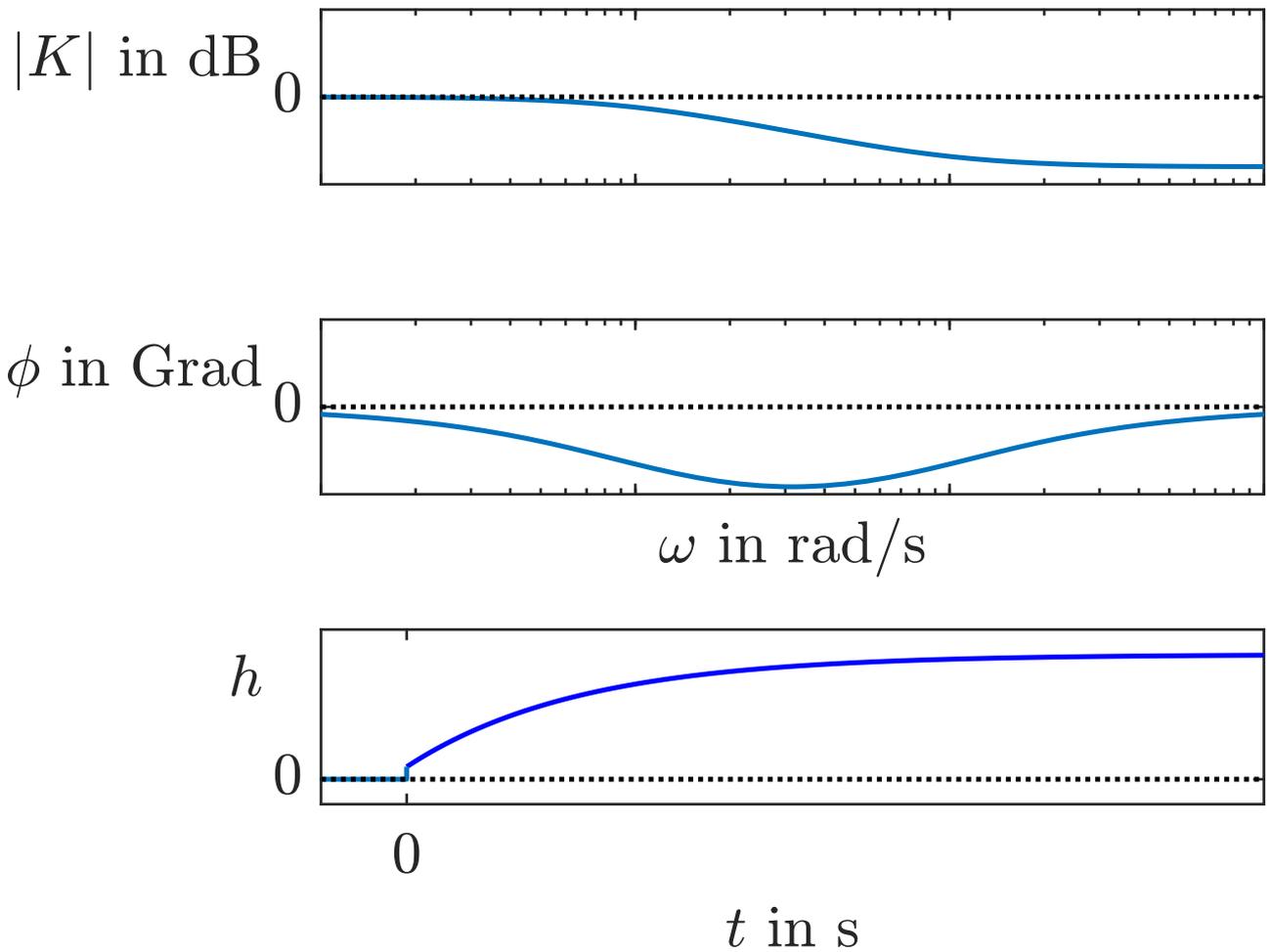


Abb. 7.34: Bodediagramm und Übergangsfunktion eines phasenabsenkenden Korrekturgliedes ($T = 10 \text{ s}$, $T_D = 1 \text{ s}$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

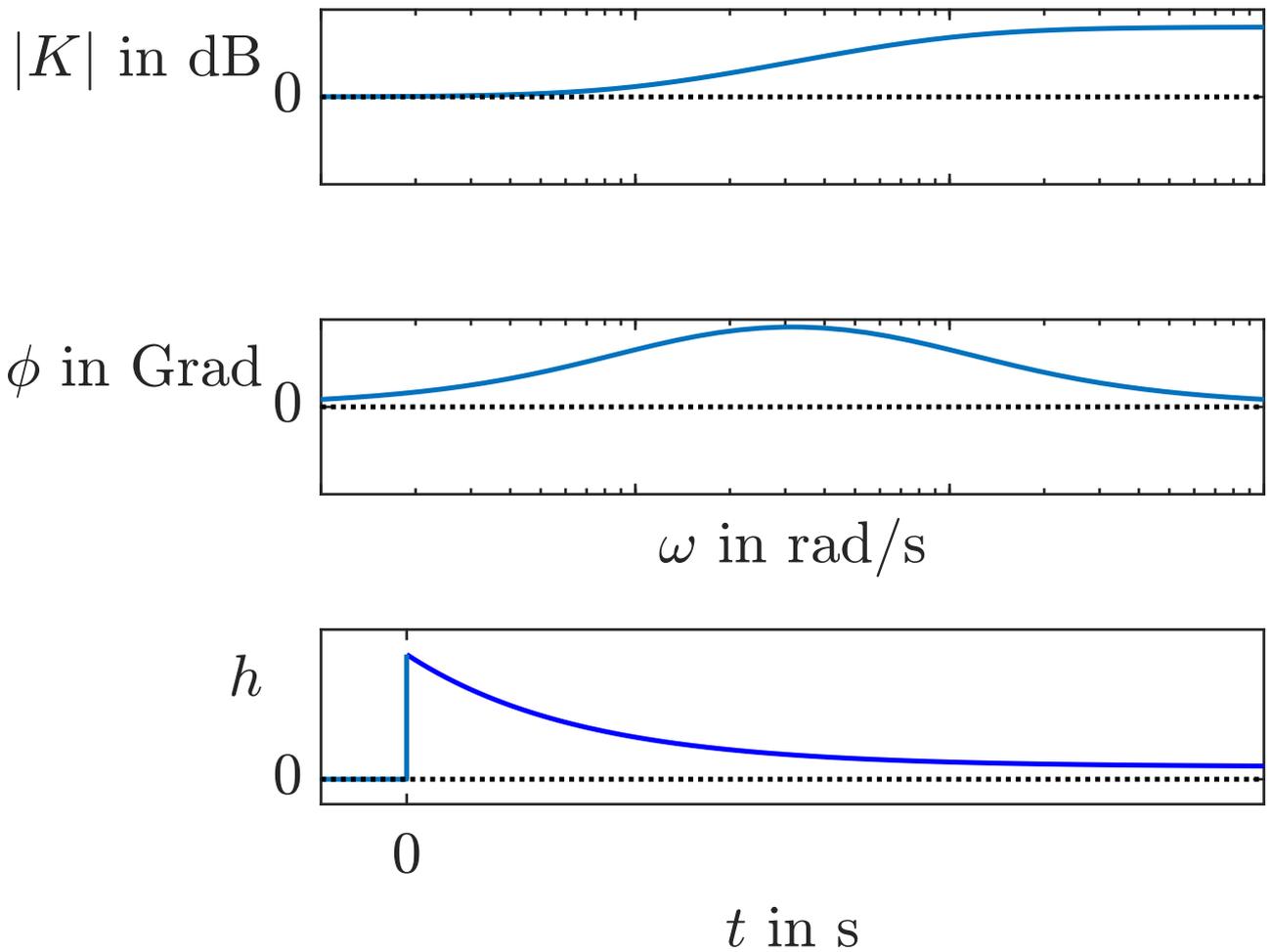


Abb. 7.35: Bodediagramm und Übergangsfunktion eines phasenhebenden Korrekturgliedes ($T_1 = 1$ s, $T_D = 10$ s)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

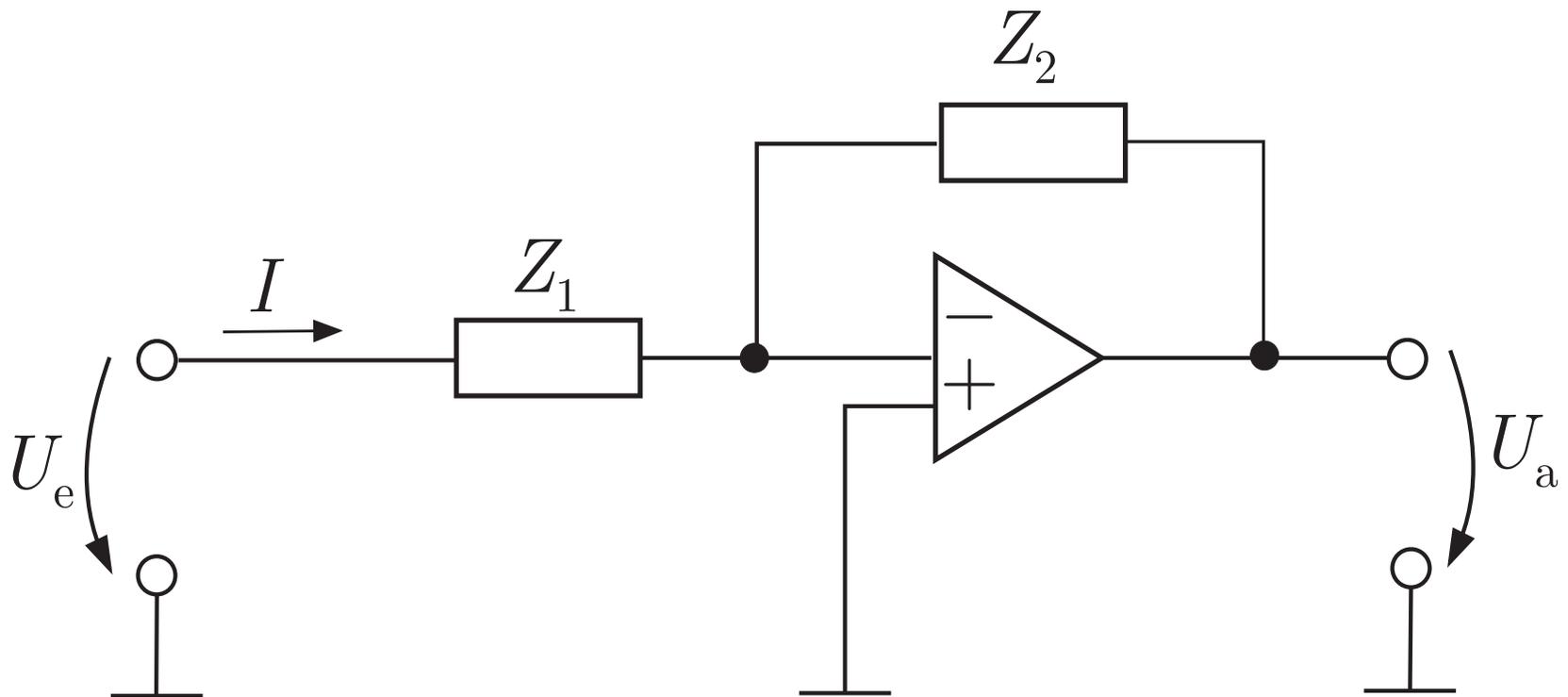


Abb. 7.36. Technische Realisierung von Reglern durch eine Operationsverstärkerschaltung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

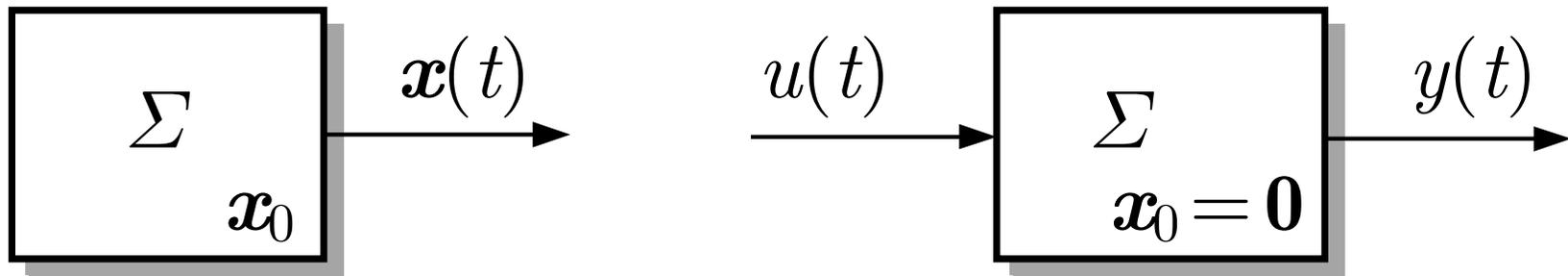


Abb. 8.1. Stabilitätsdefinitionen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

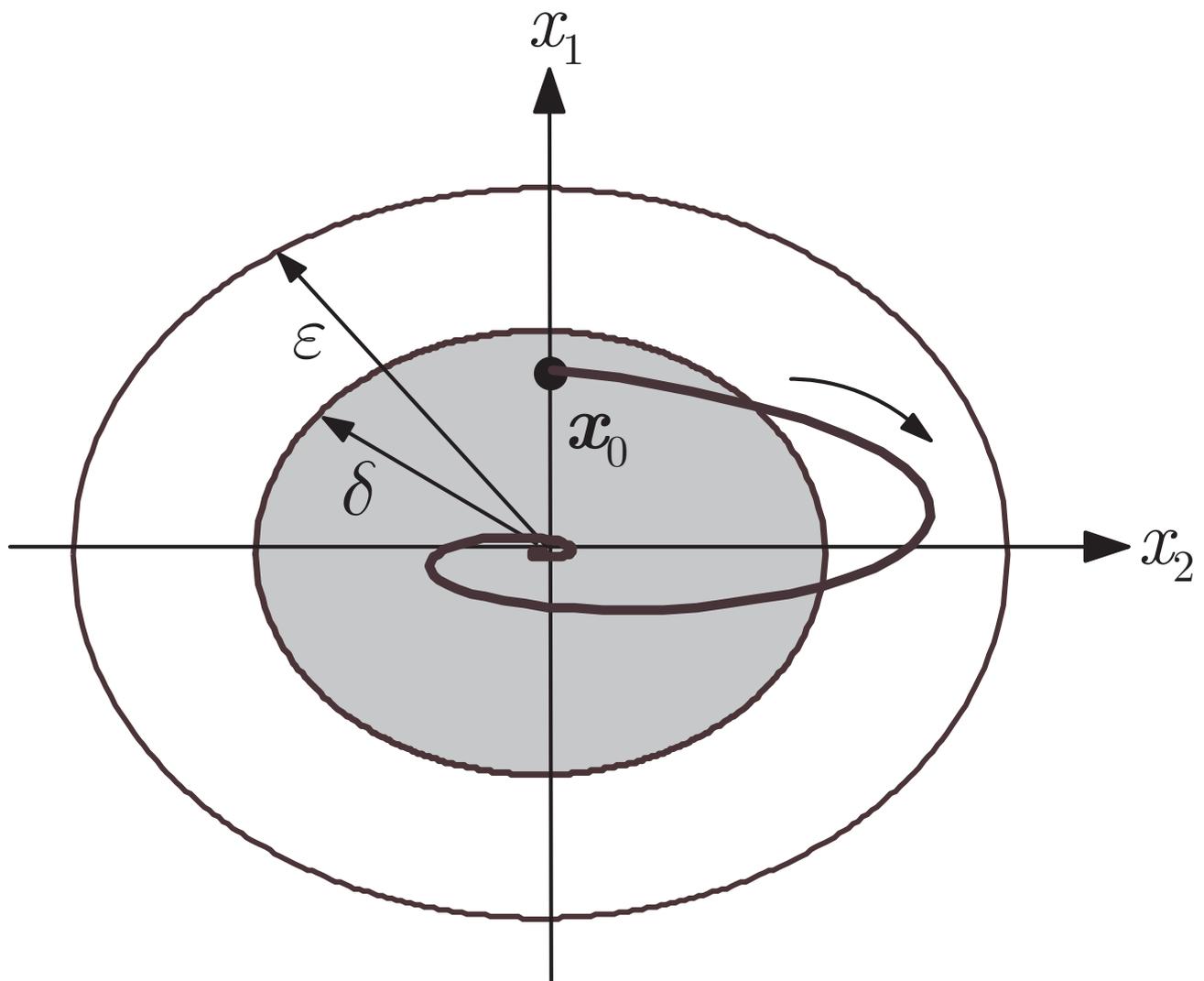


Abb. 8.2: Trajektorie eines asymptotisch stabilen Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

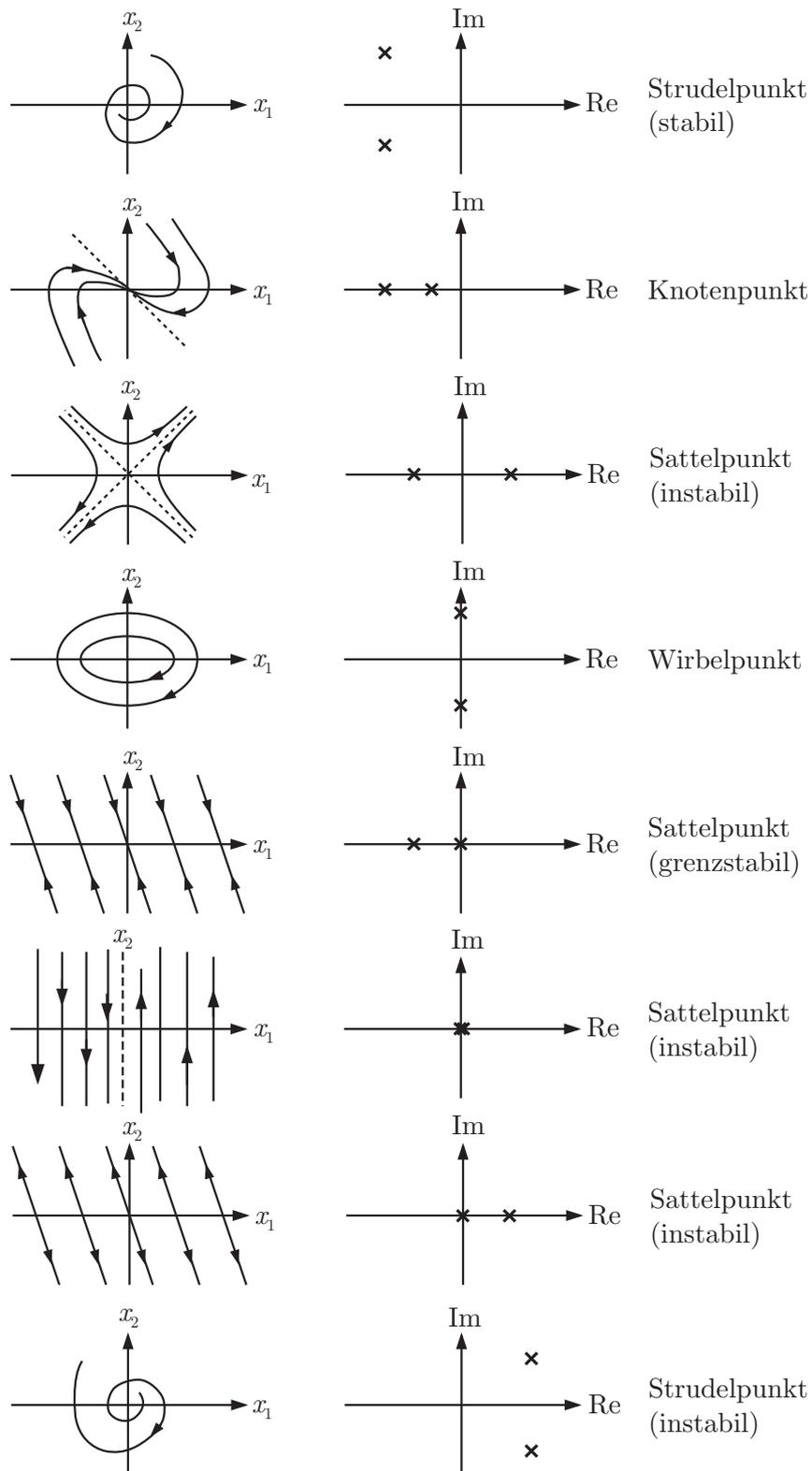


Abb. 8.3. Phasenporträts linearer Systeme zweiter Ordnung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

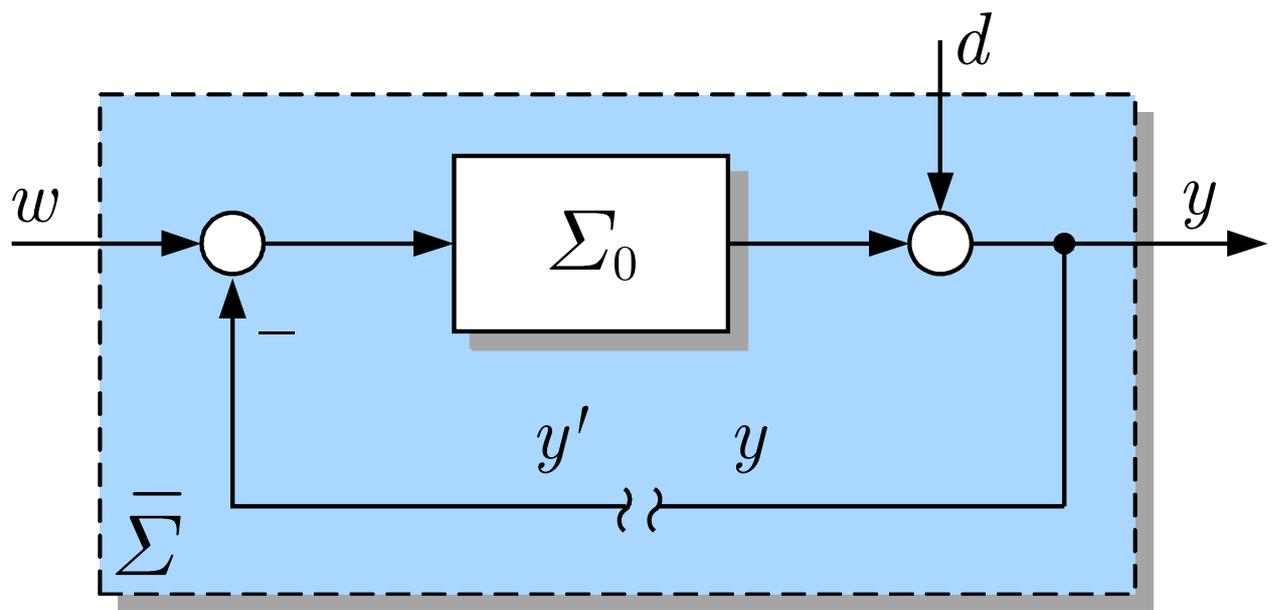


Abb. 8.4: Stabilitätsuntersuchung des Regelkreises $\bar{\Sigma}$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

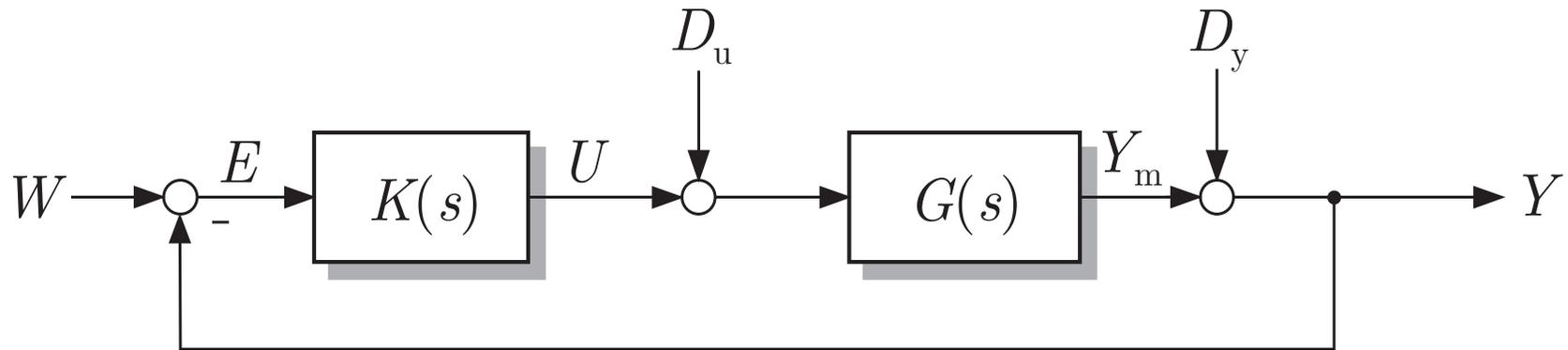


Abb. 8.5. Regelkreis mit Angabe der bei der inneren Stabilität untersuchten Signale

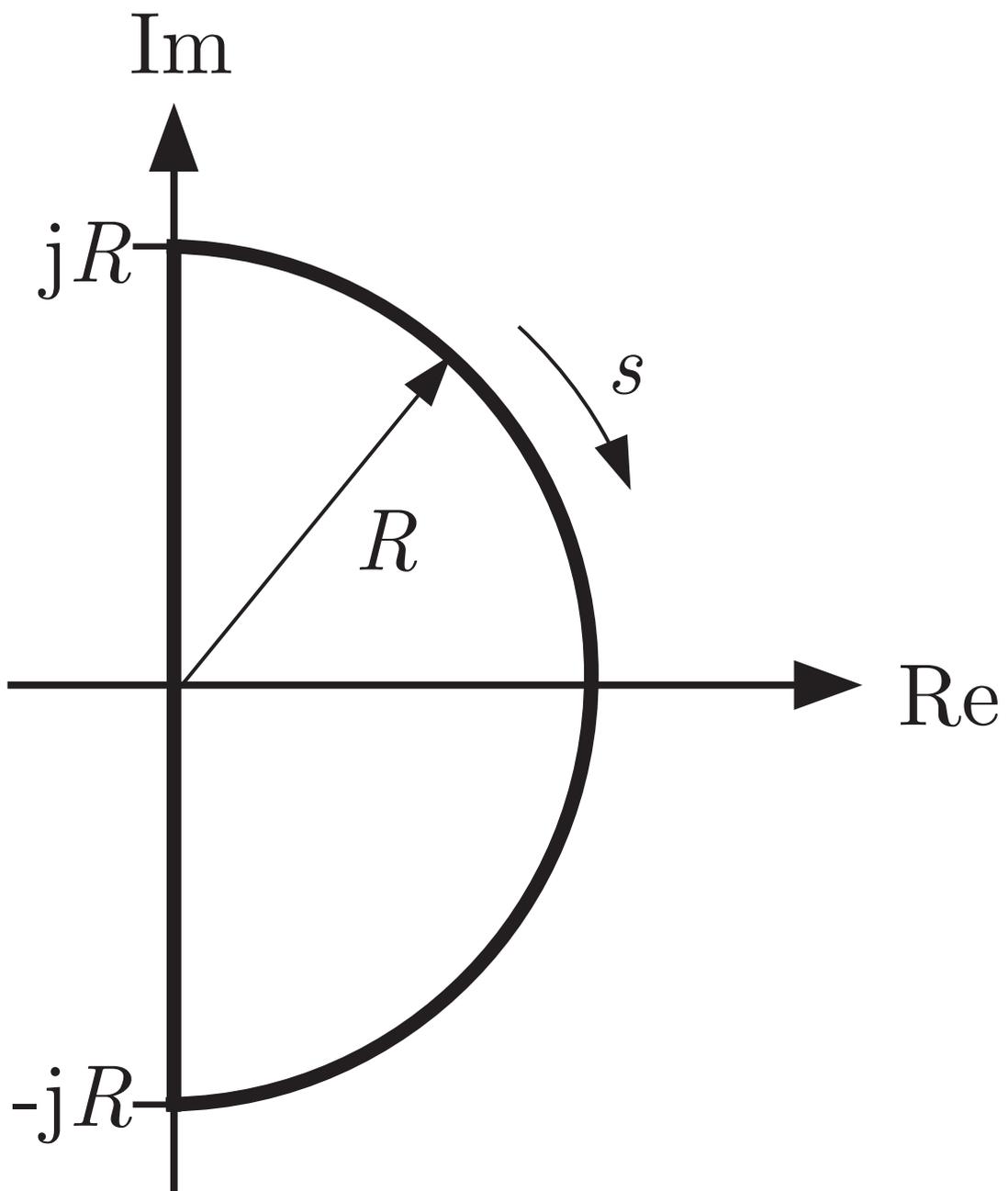


Abb. 8.6. Nyquistkurve \mathcal{D}

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

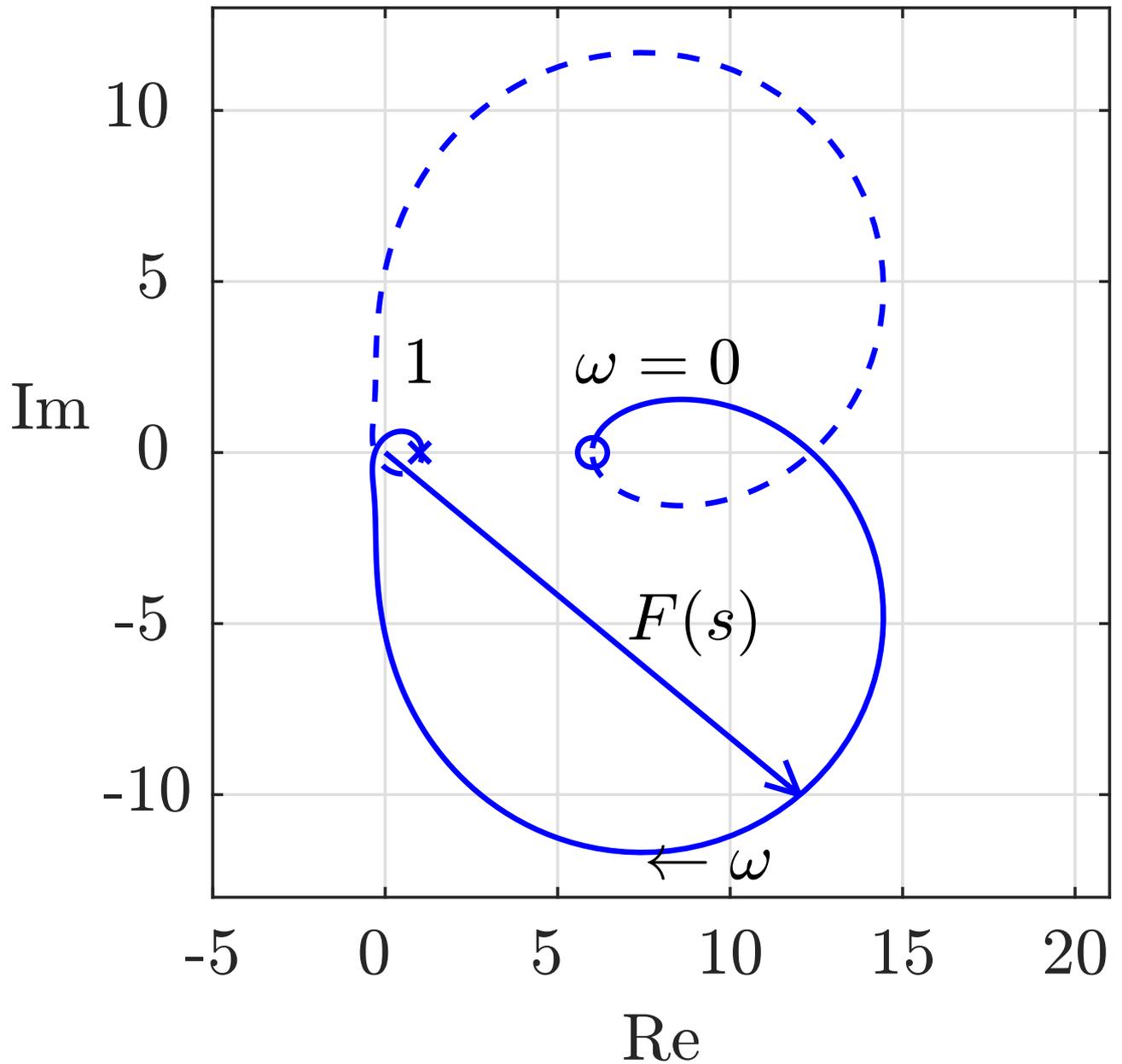


Abb. 8.6: Abbildung der Nyquistkurve durch die Rückführdifferenzfunktion $F(s)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

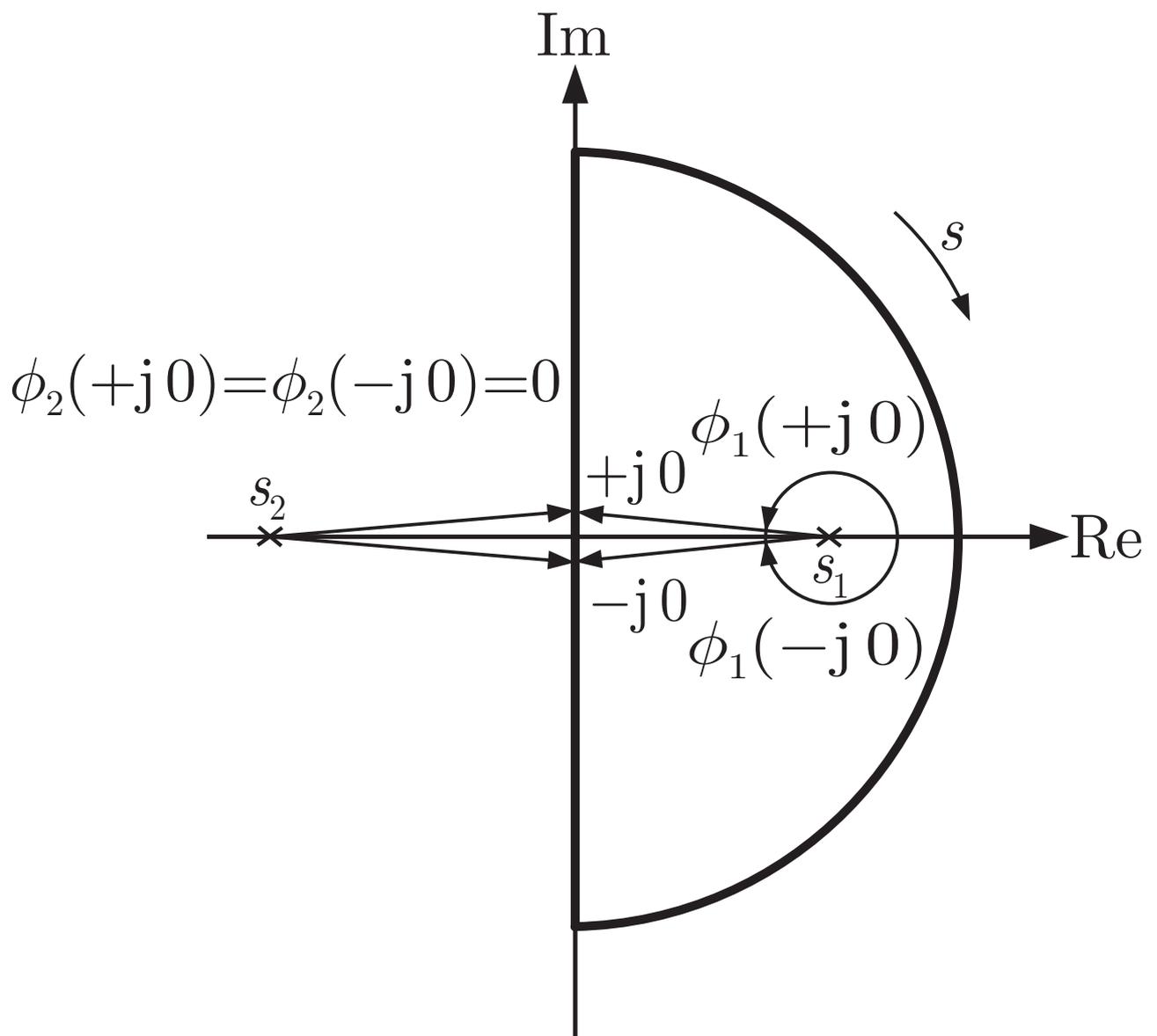


Abb. 8.7: Darstellung der Argumentänderungen für je einen Pol in der rechten und der linken komplexen Halbebene

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

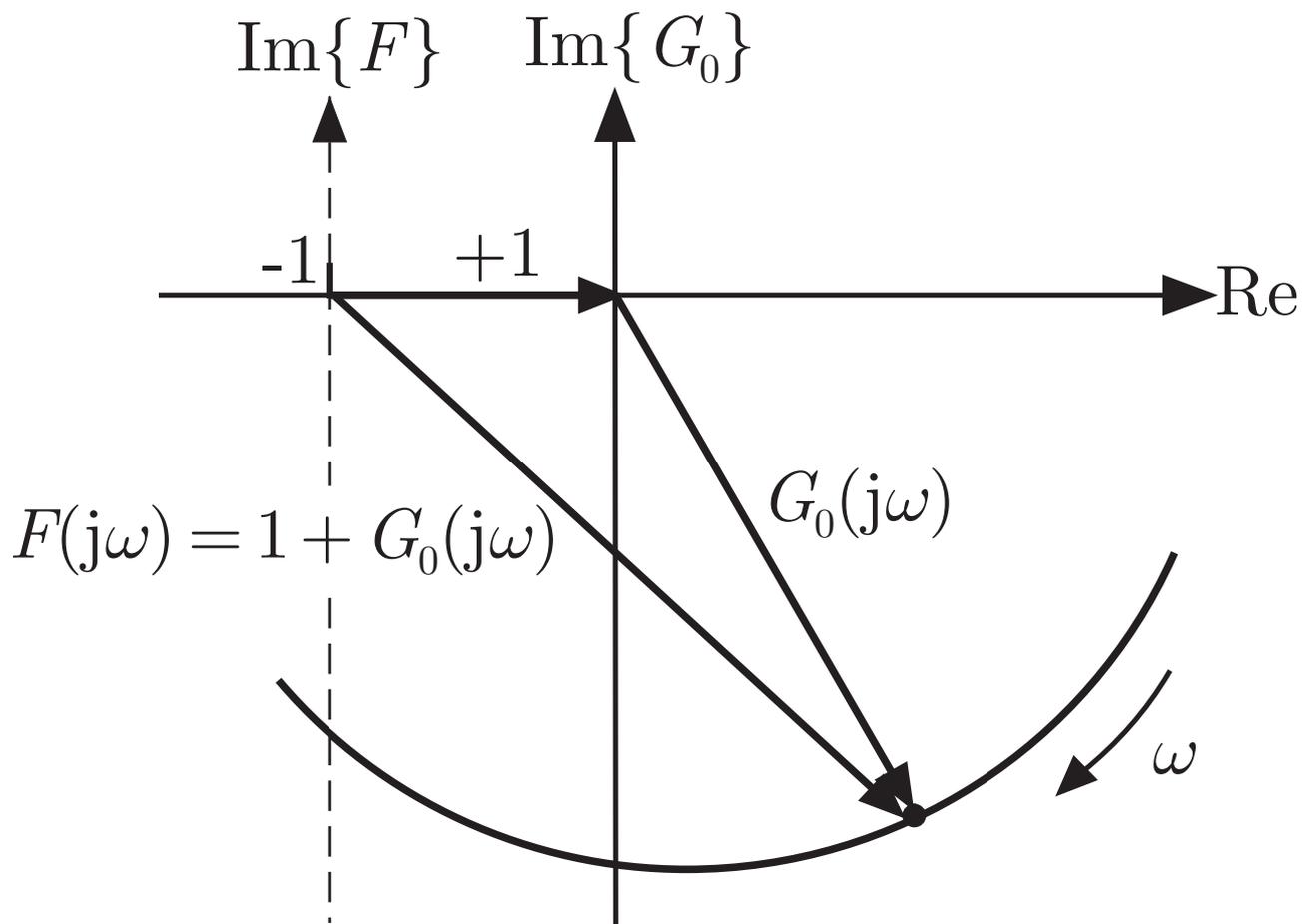


Abb. 8.8: Zusammenhang von $F(j\omega)$ und $G_0(j\omega)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

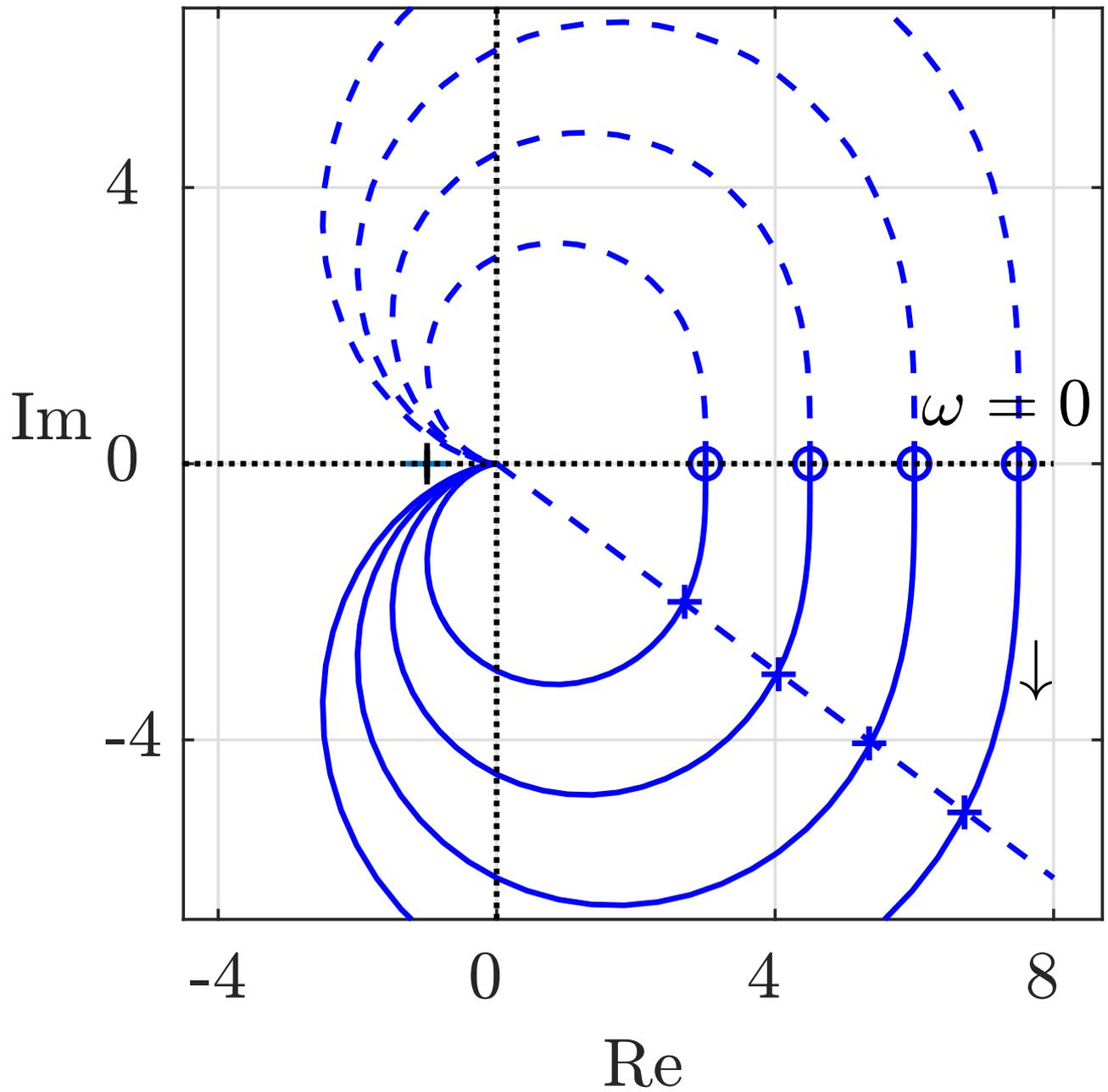


Abb. 8.9: Ortskurve einer offenen Kette zweiter Ordnung für veränderte Reglerverstärkung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

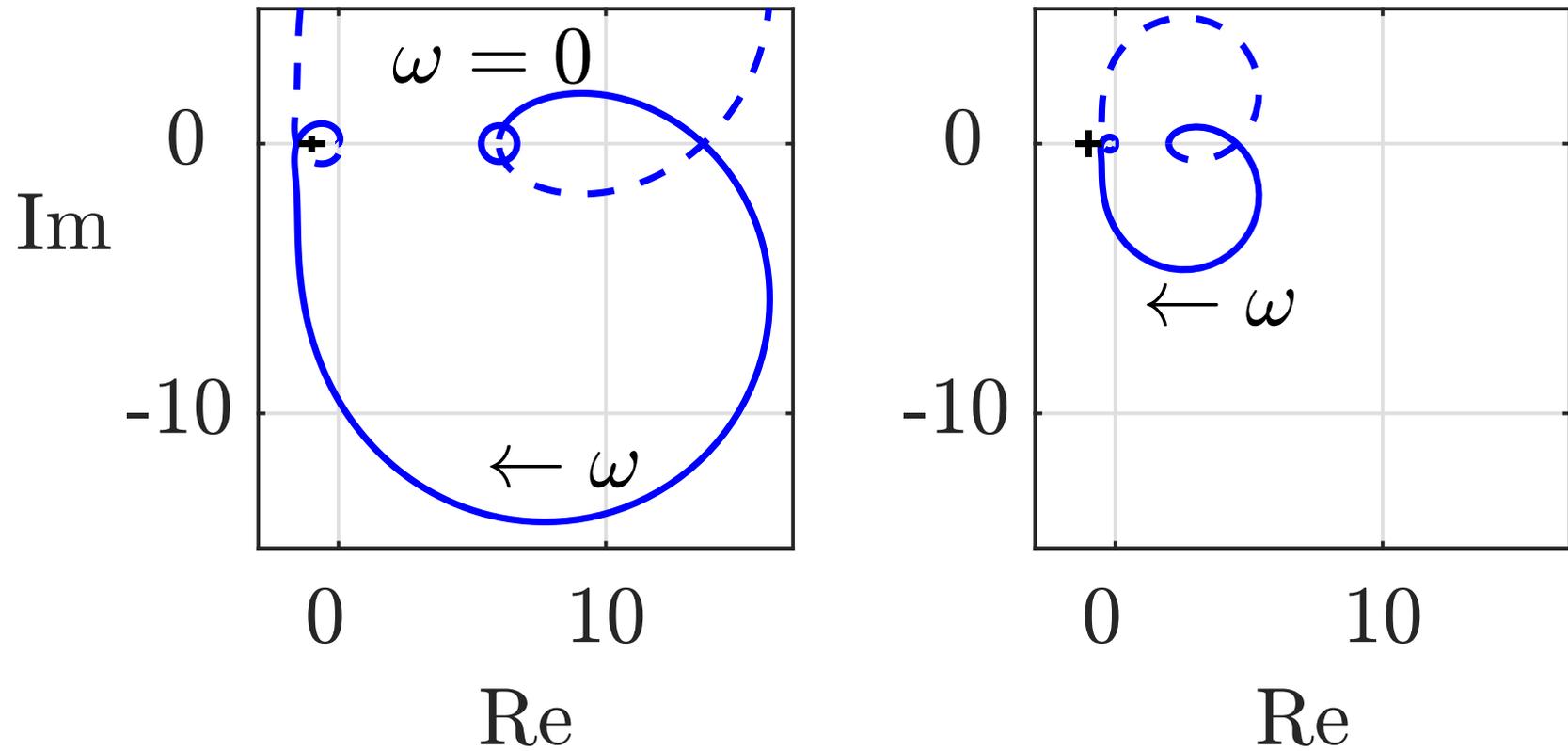


Abb. 8.10. Ortskurve der offenen Kette fünfter Ordnung für $k_P = 120$ (links) und $k_P = 40$ (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

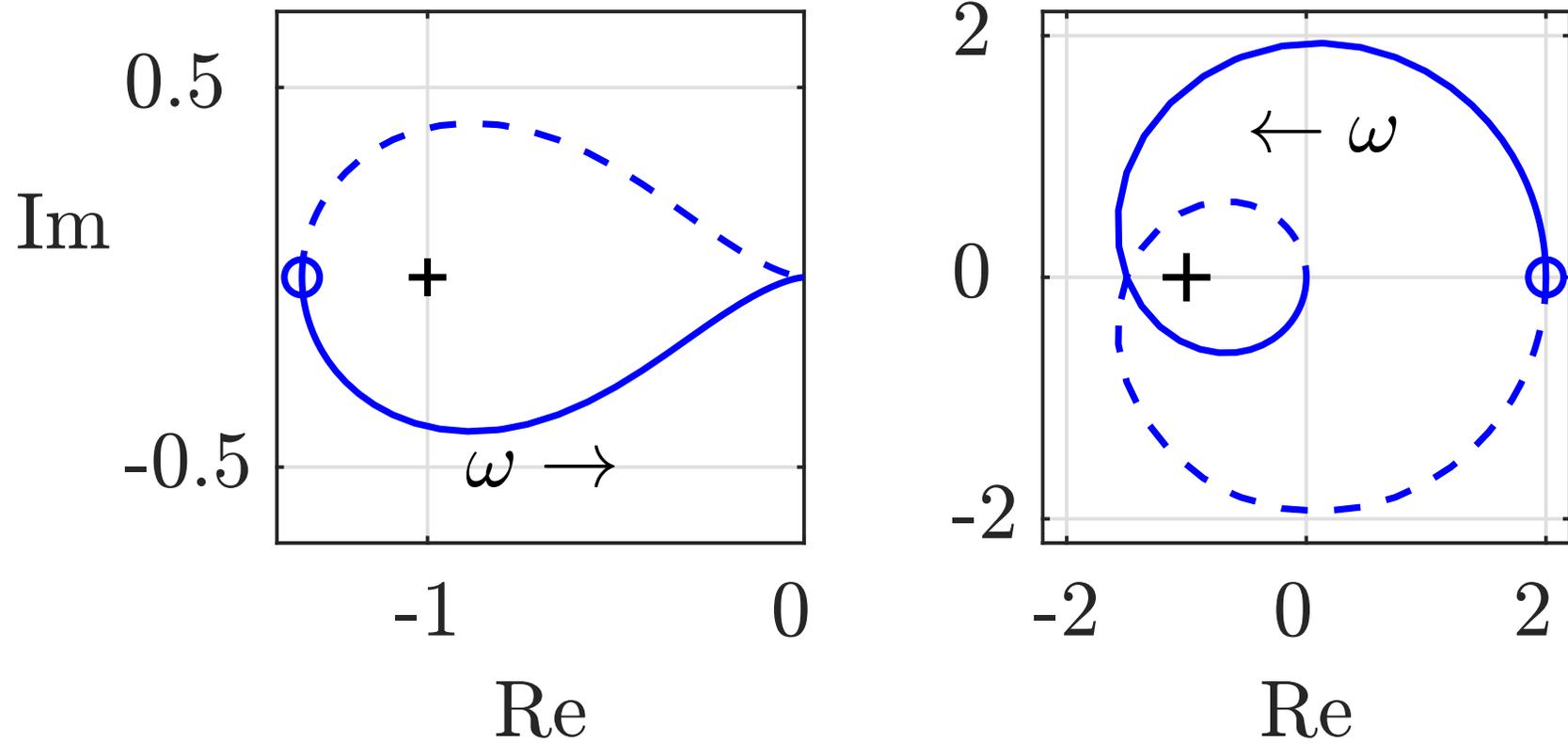


Abb. 8.11. Ortskurve zweier instabiler offener Ketten, die zu stabilen Regelkreises führen (links: ein instabiler Pol; rechts: zwei instabile Pole)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

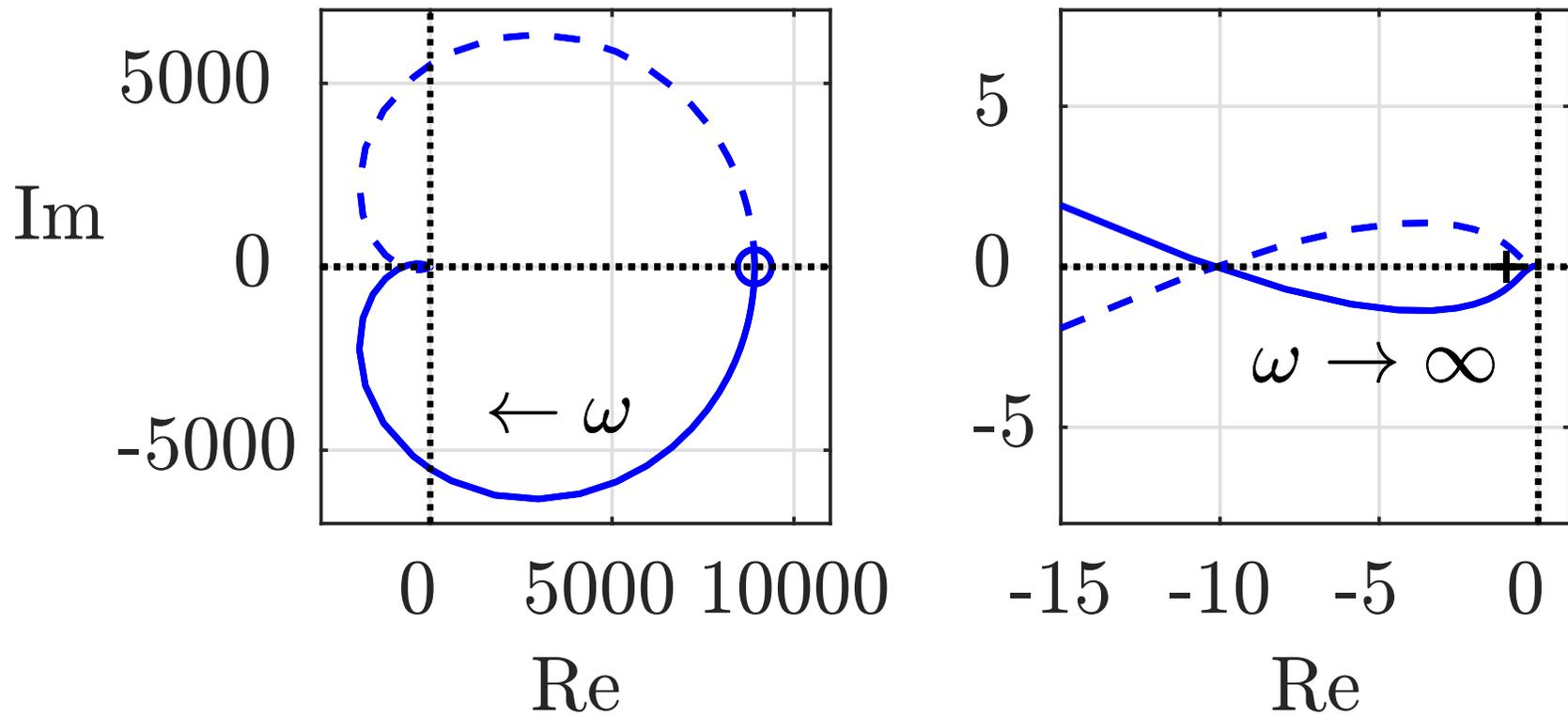


Abb. 8.12. Ortskurve einer offenen Kette siebenter Ordnung (Gesamtbild (links) und Ausschnitt (rechts))

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

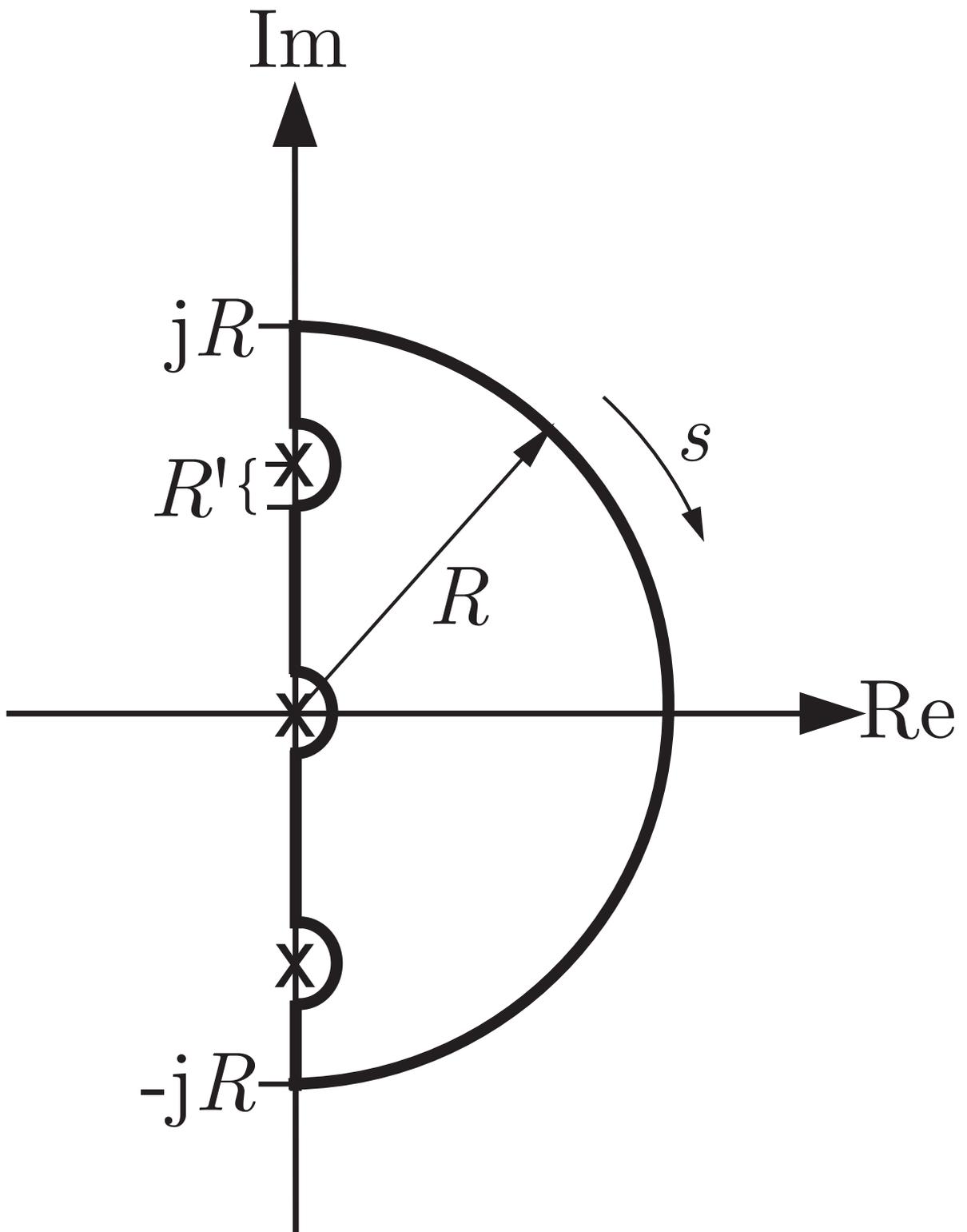


Abb. 8.13. Modifizierte Nyquistkurve für offene Ketten mit Polen auf der Imaginärachse

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

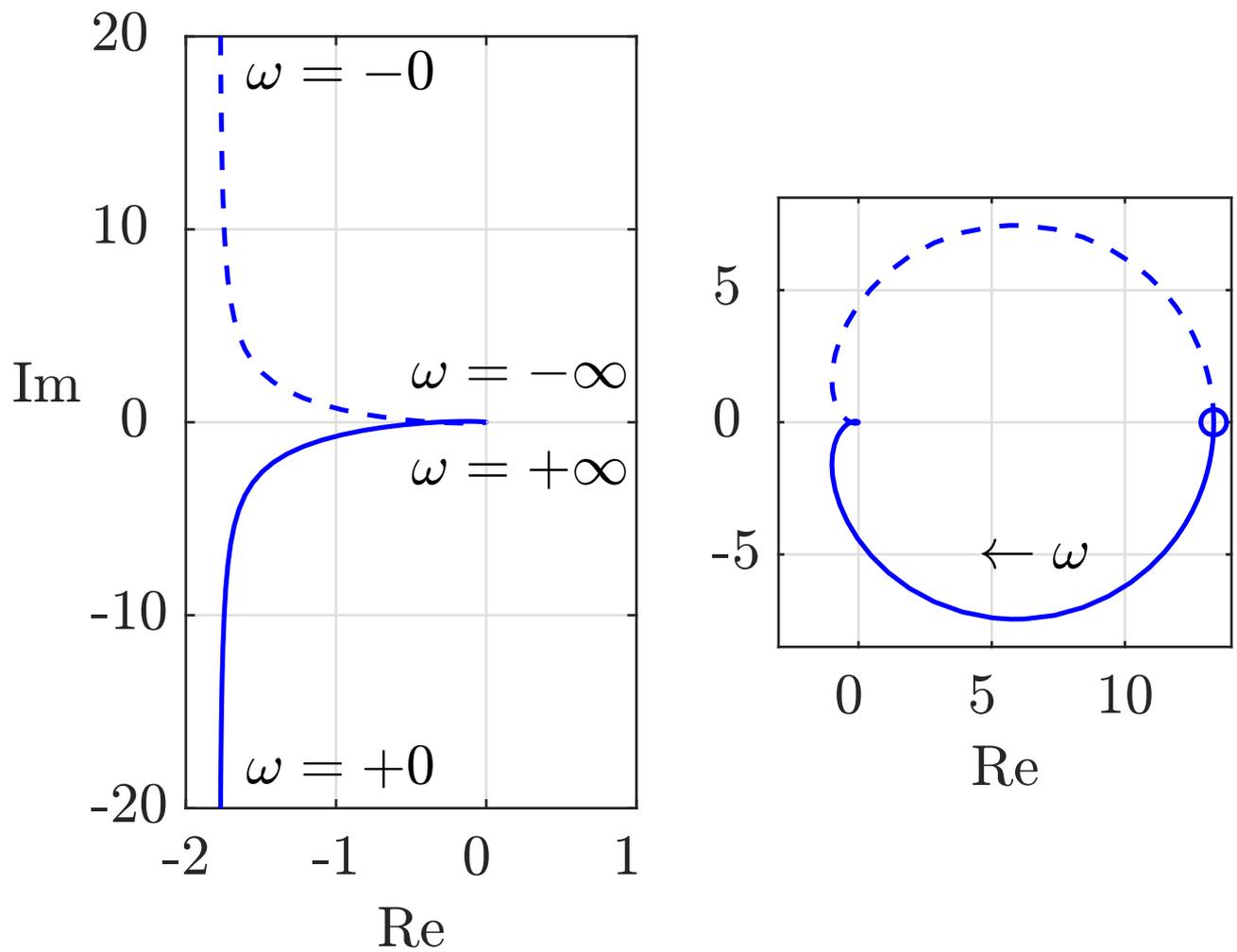


Abb. 8.14: Ortskurve einer I-Kette (links) und einer Kette mit Pol $s_1 = -0,1$ (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

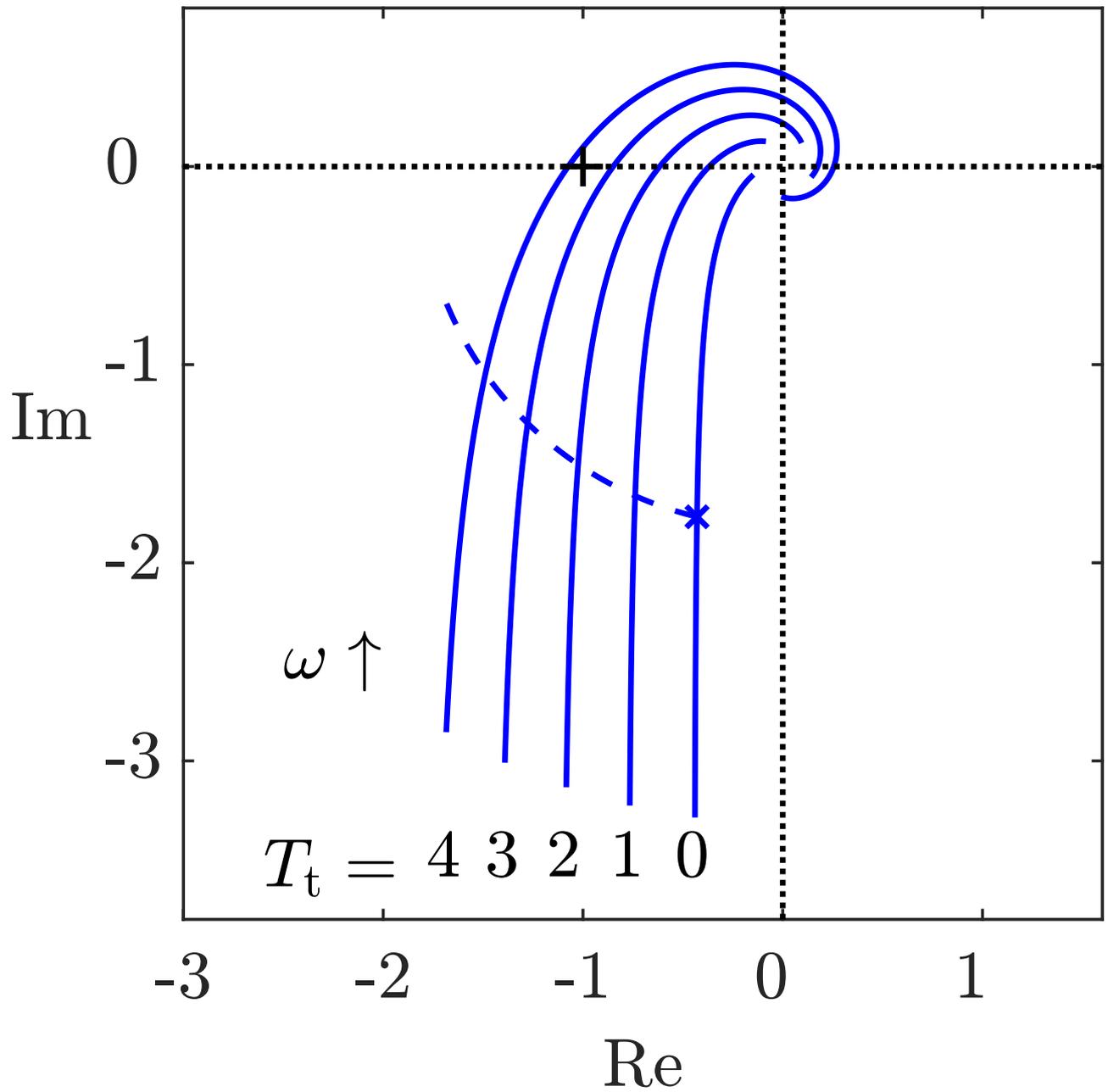


Abb. 8.15: Ortskurve einer I-Kette mit Totzeit $T_t = 0 \dots 4$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

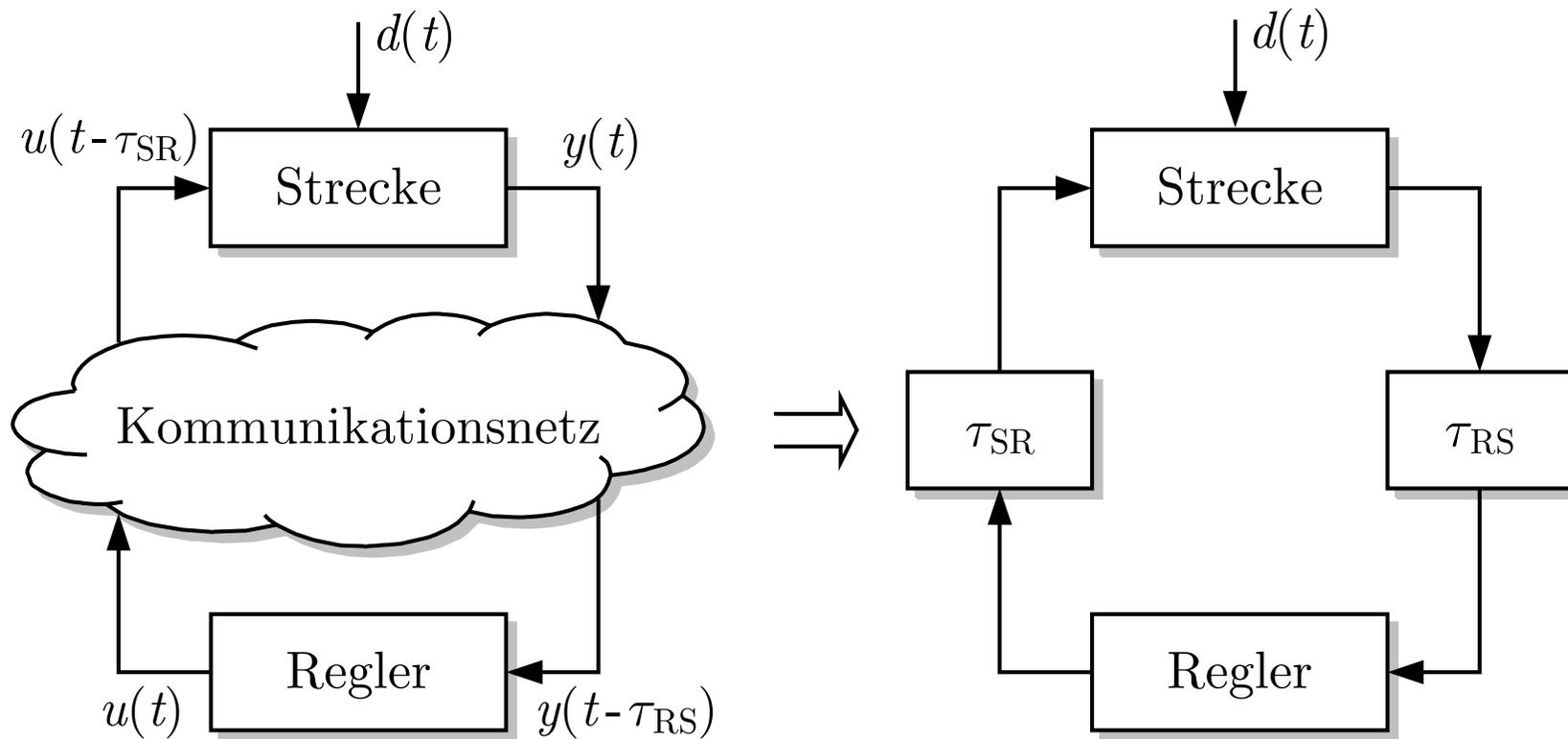


Abb. 8.16. Realisierung einer Regelung mit Hilfe eines digitalen Kommunikationsnetzes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

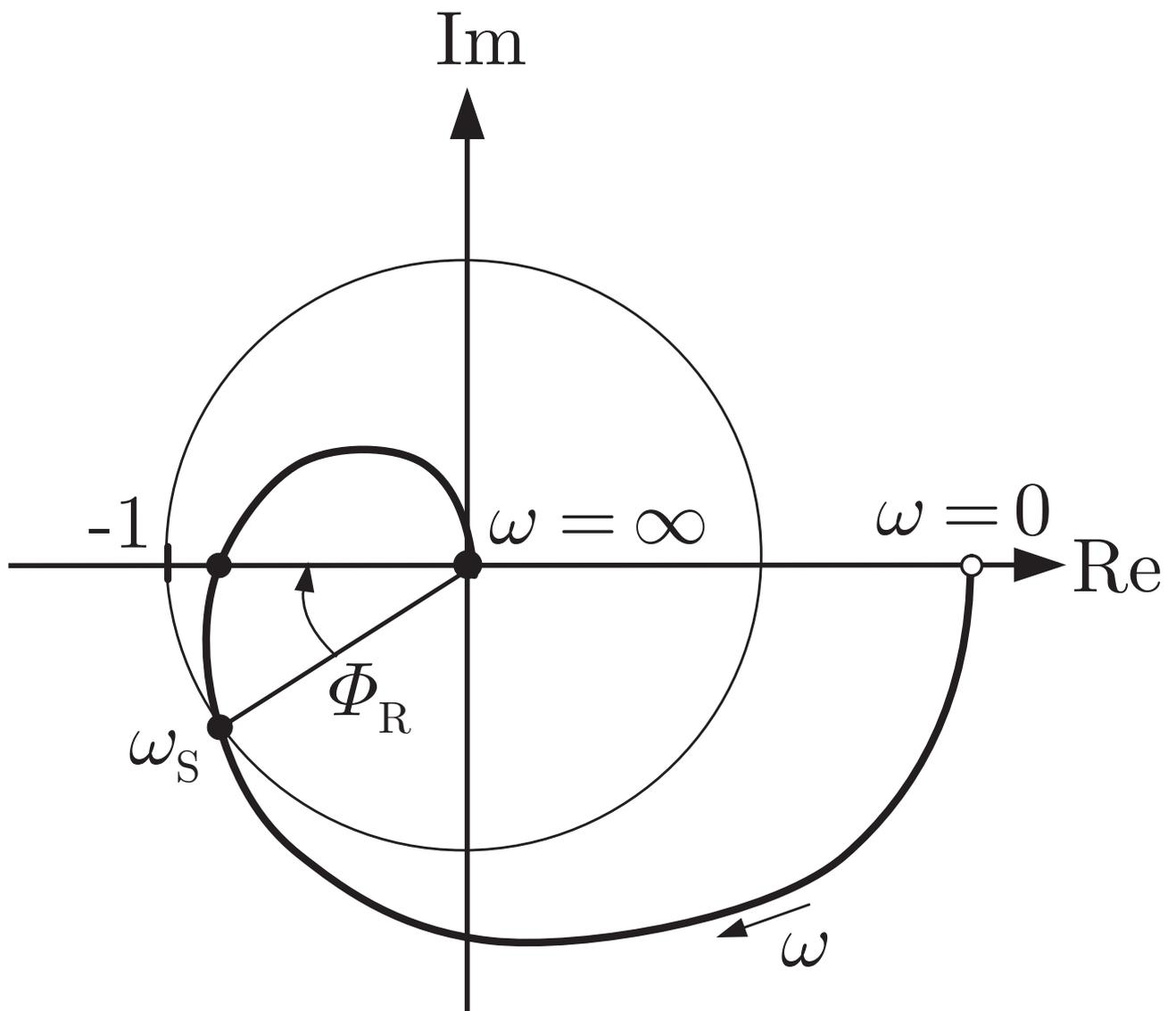


Abb. 8.17: Phasenrand einer Ortskurve

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

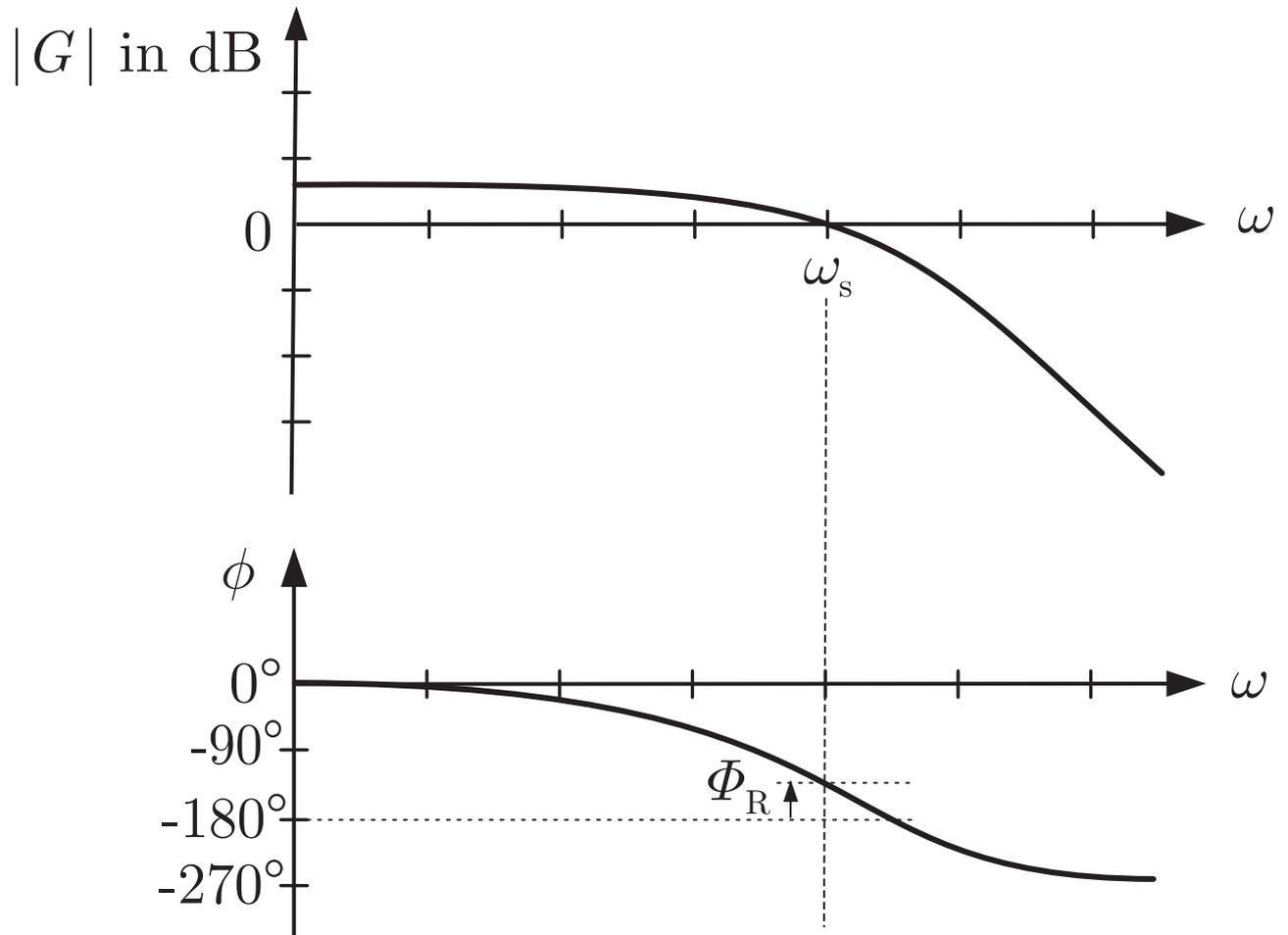


Abb. 8.18: Phasenrand im Bodediagramm

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

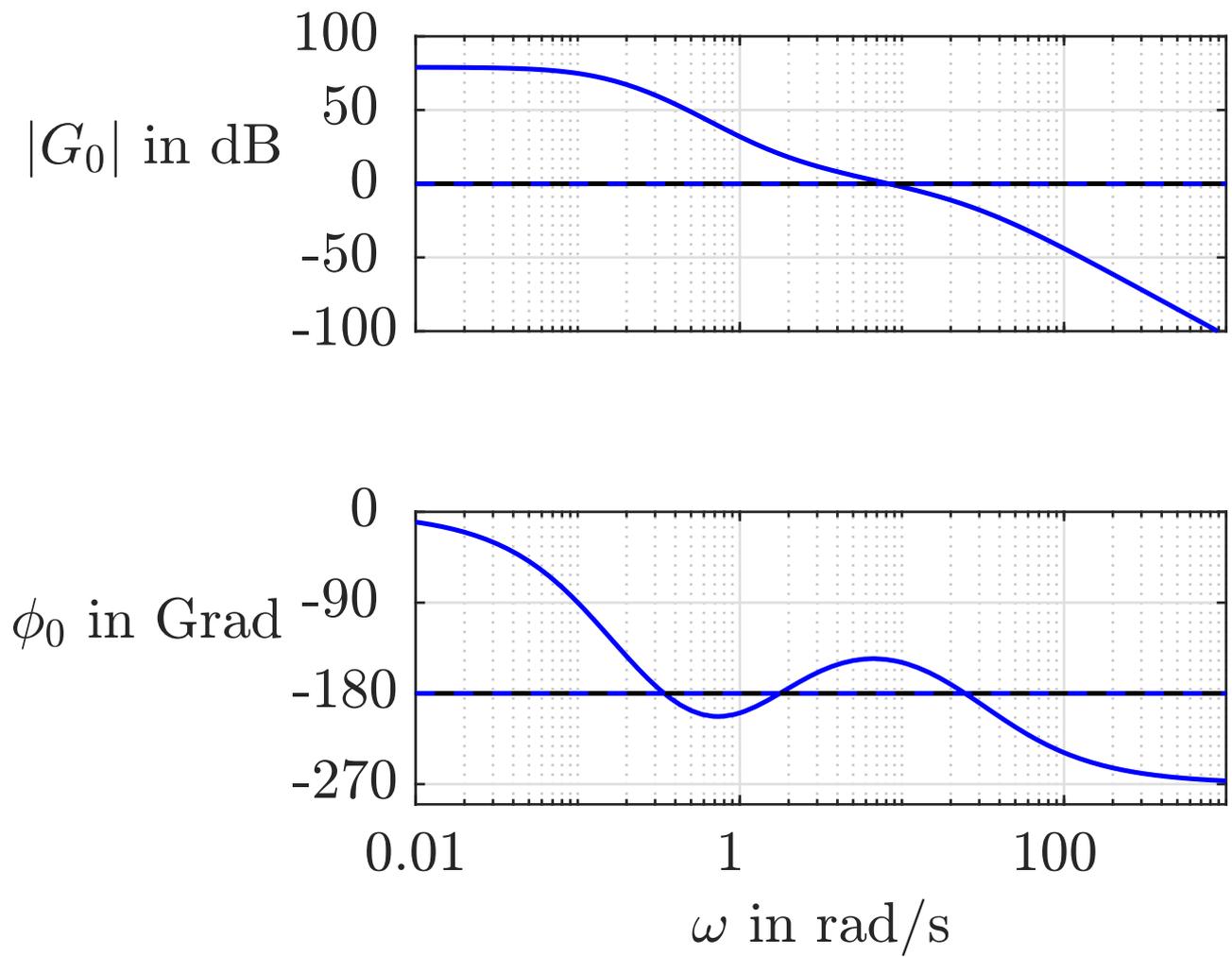


Abb. 8.19: Bodediagramm eines Systems mit positivem Phasenrand

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

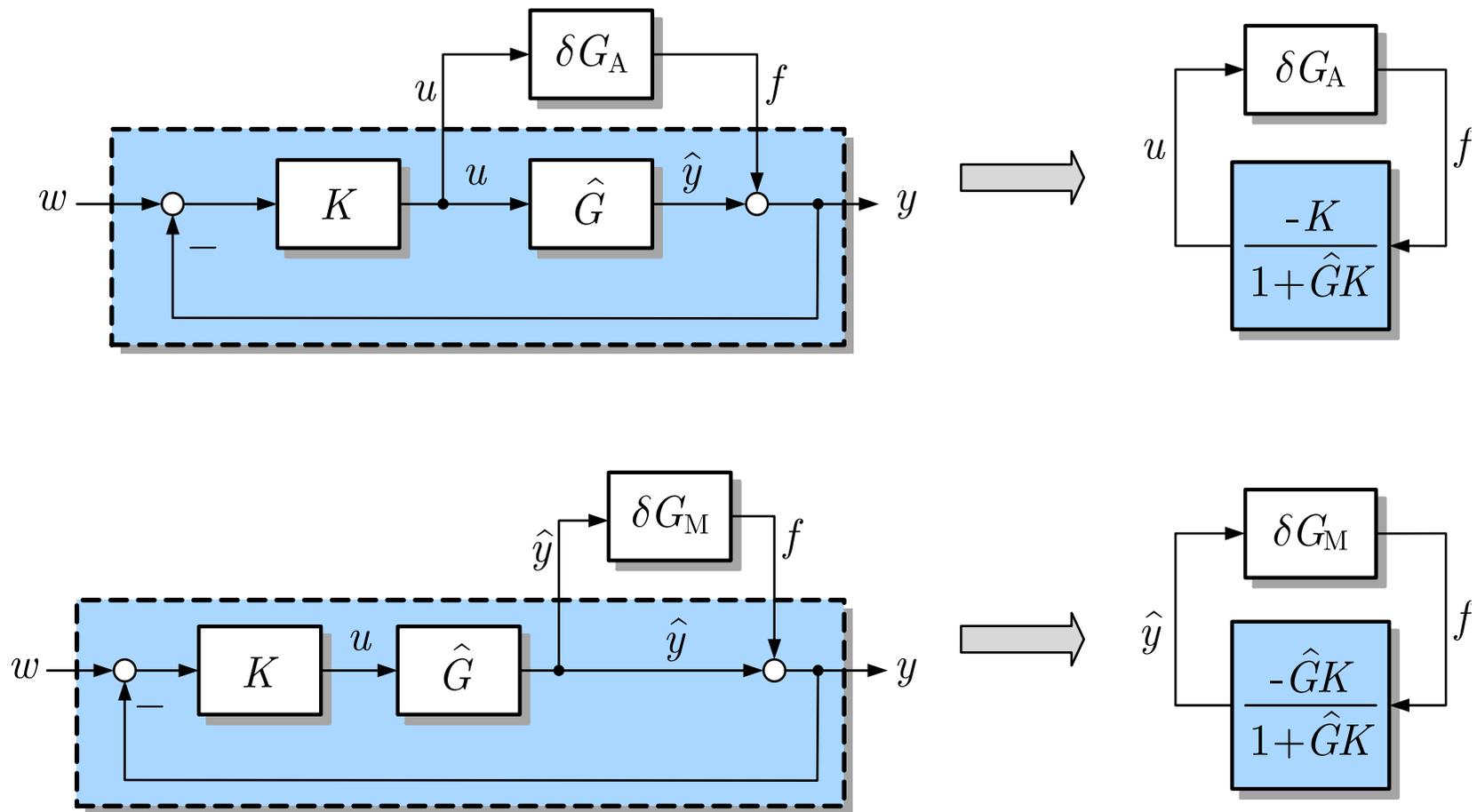


Abb. 8.20. Regelkreis mit additiver bzw. multiplikativer Modellunbestimmtheit

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

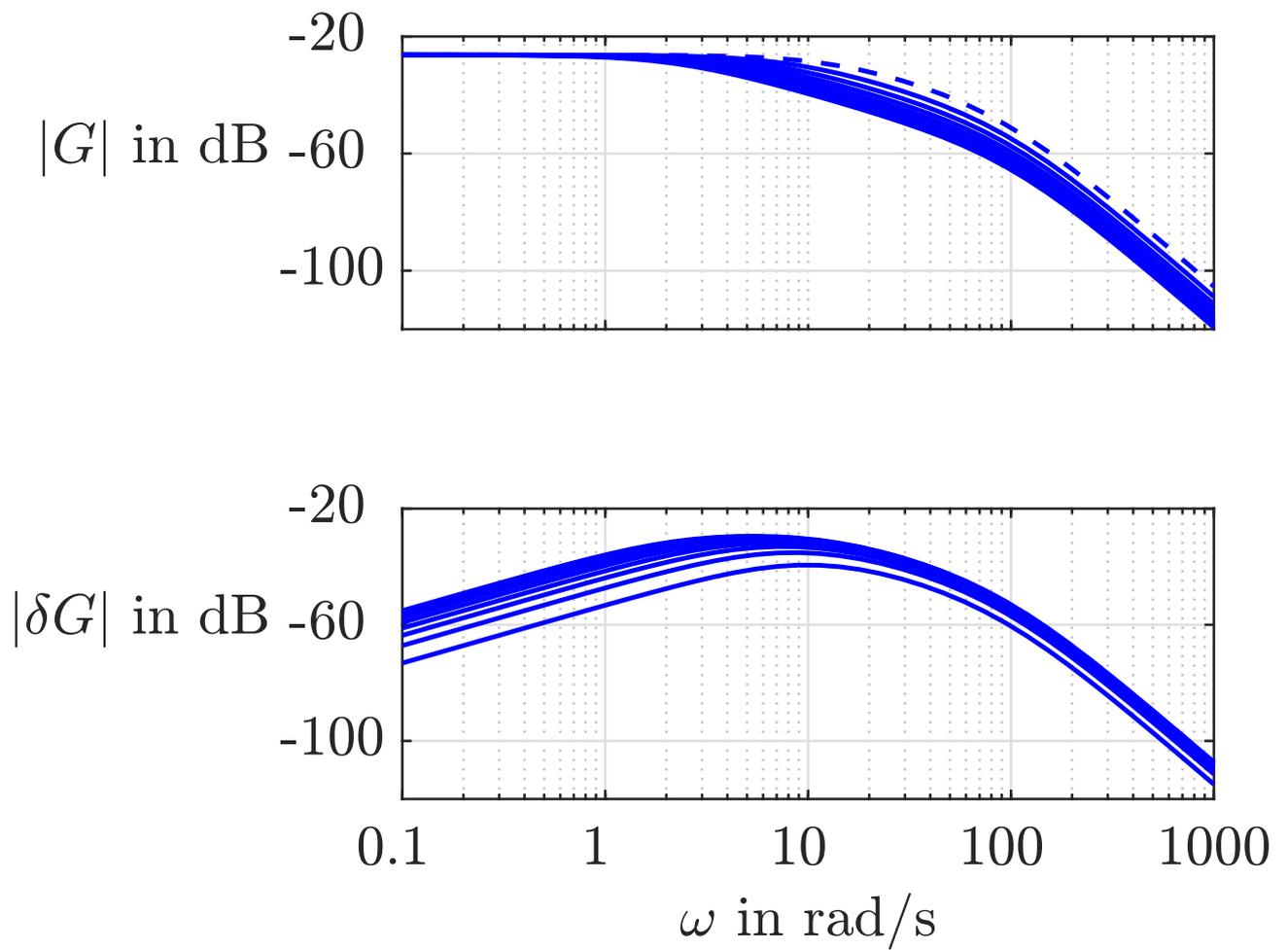


Abb. 8.21: Modell des Gleichstrommotors bei verändertem Trägheitsmoment J

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

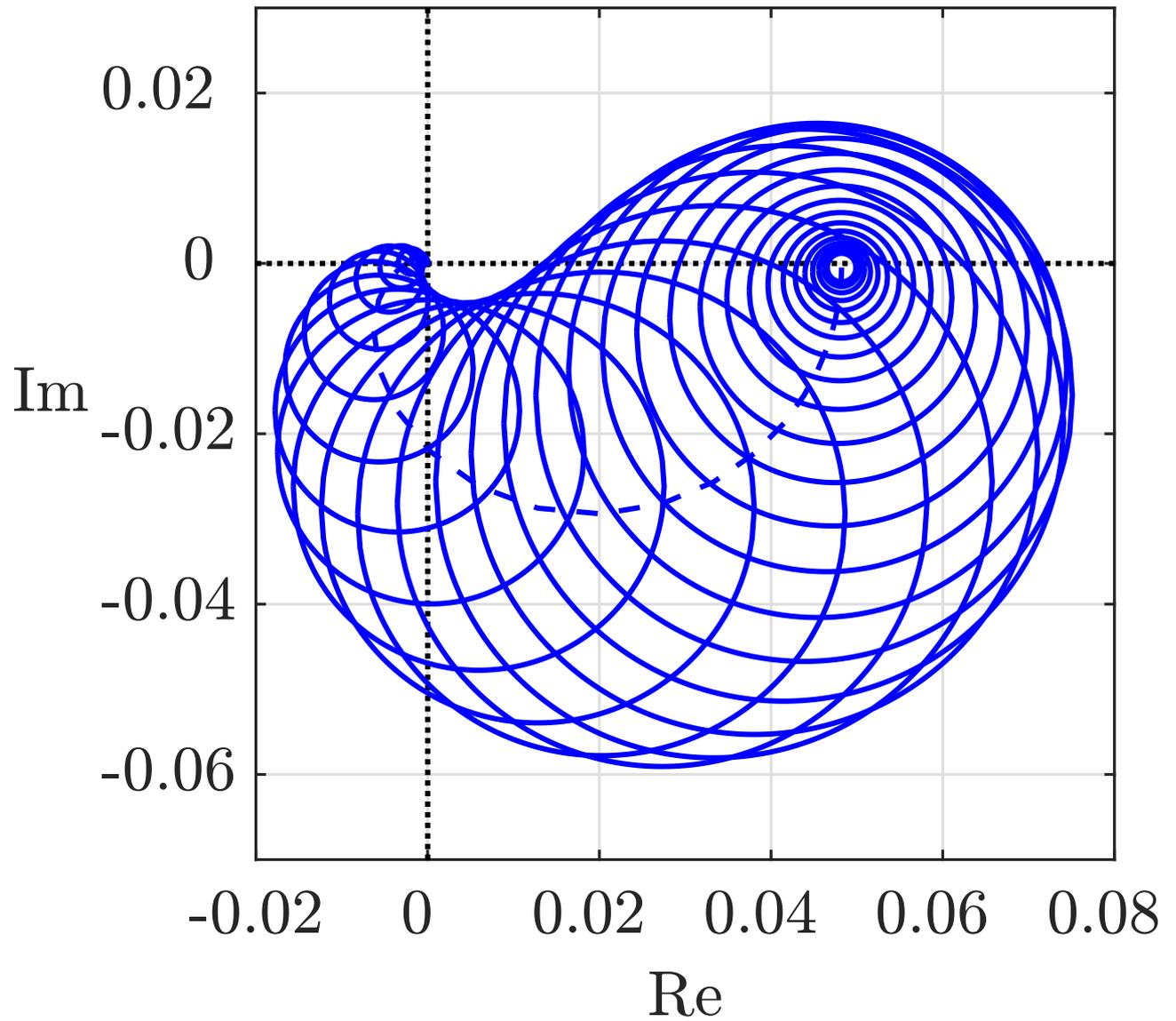


Abb. 8.22: Toleranzband für die Ortskurve des Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

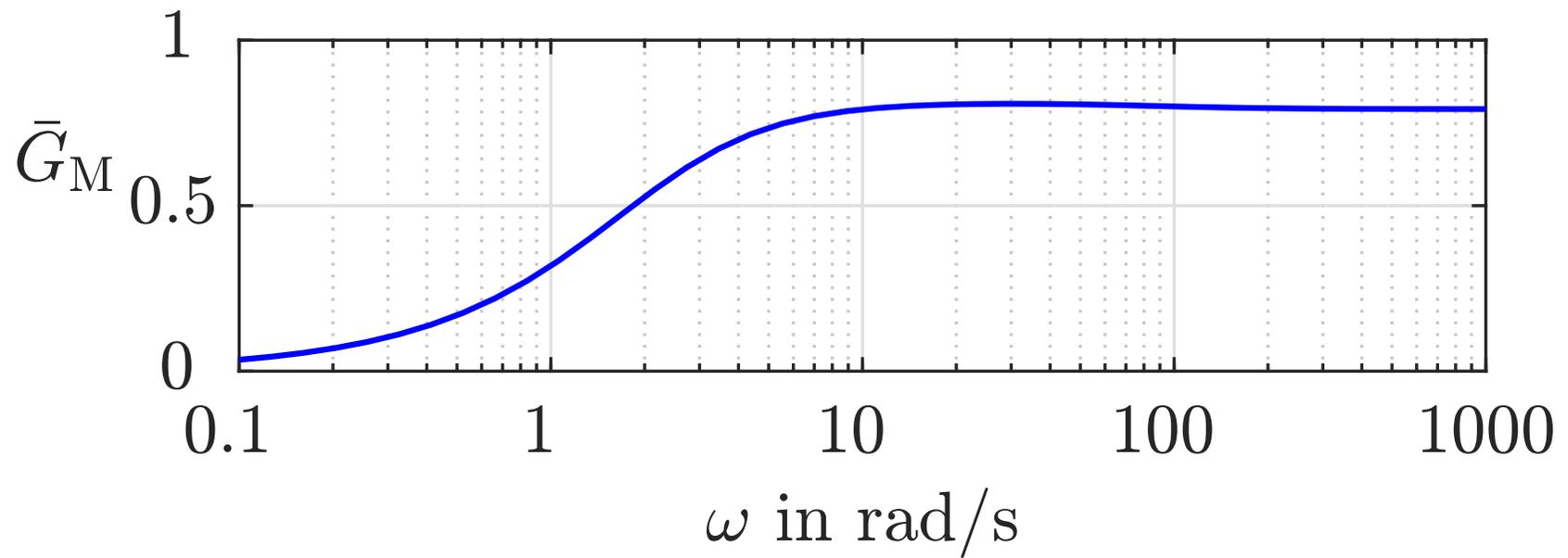


Abb. 8.23. Fehlerschranke $\bar{G}_M(j\omega)$ für das Regelstreckenmodell

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

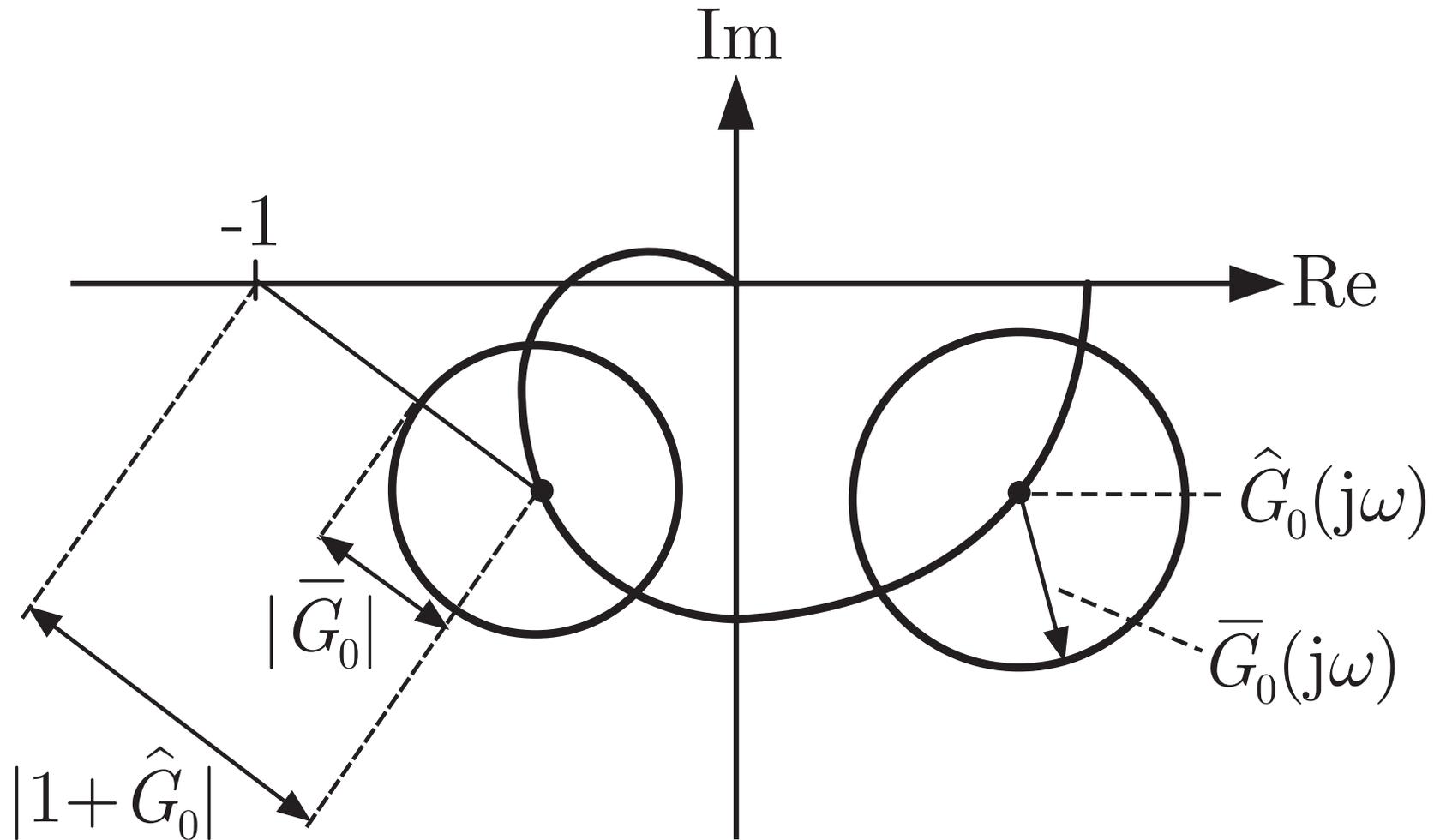


Abb. 8.24. Untersuchung der robusten Stabilität

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

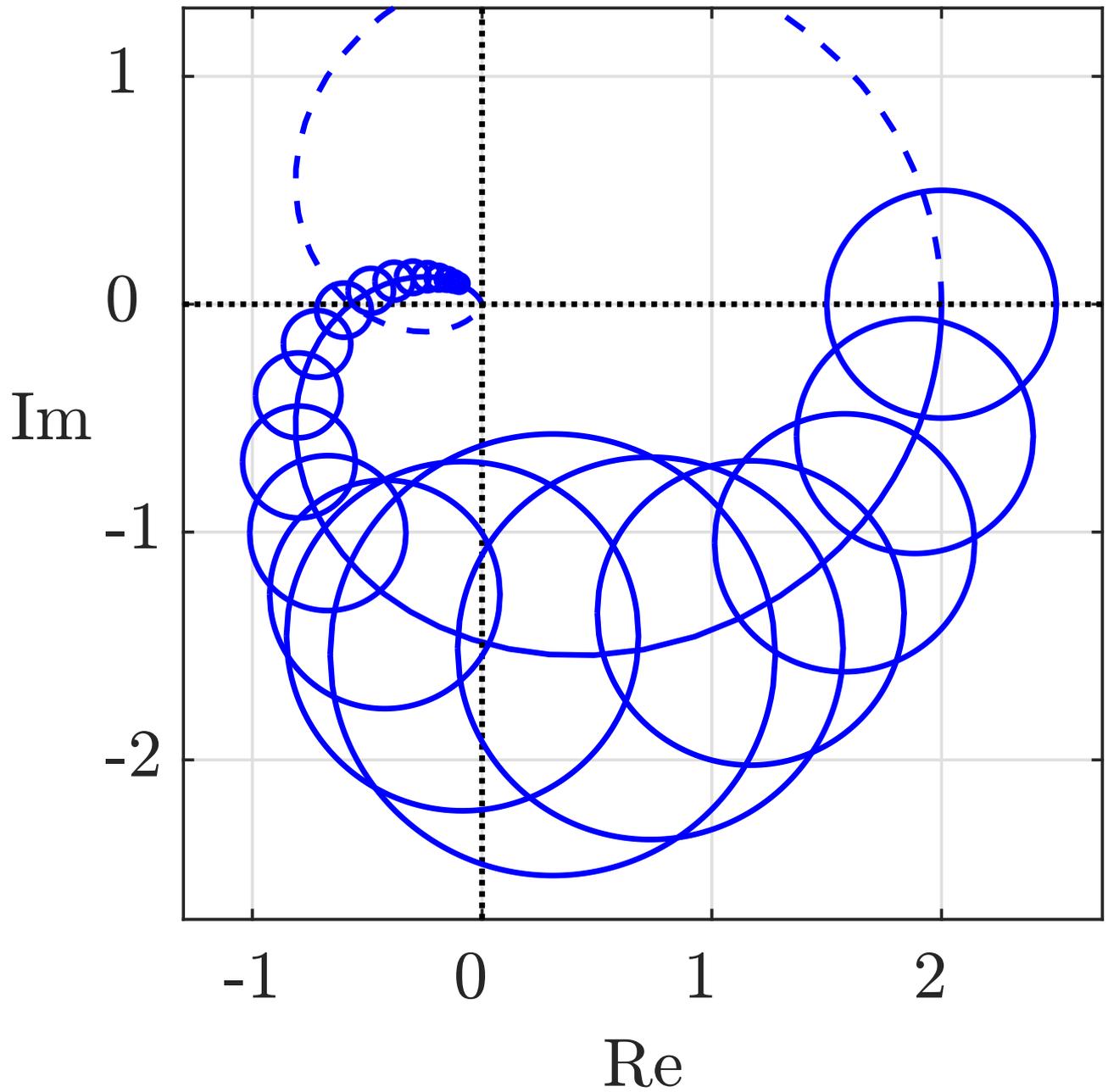


Abb. 8.25: Toleranzband für die Ortskurve eines Systems dritter Ordnung mit Modellunbestimmtheiten

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

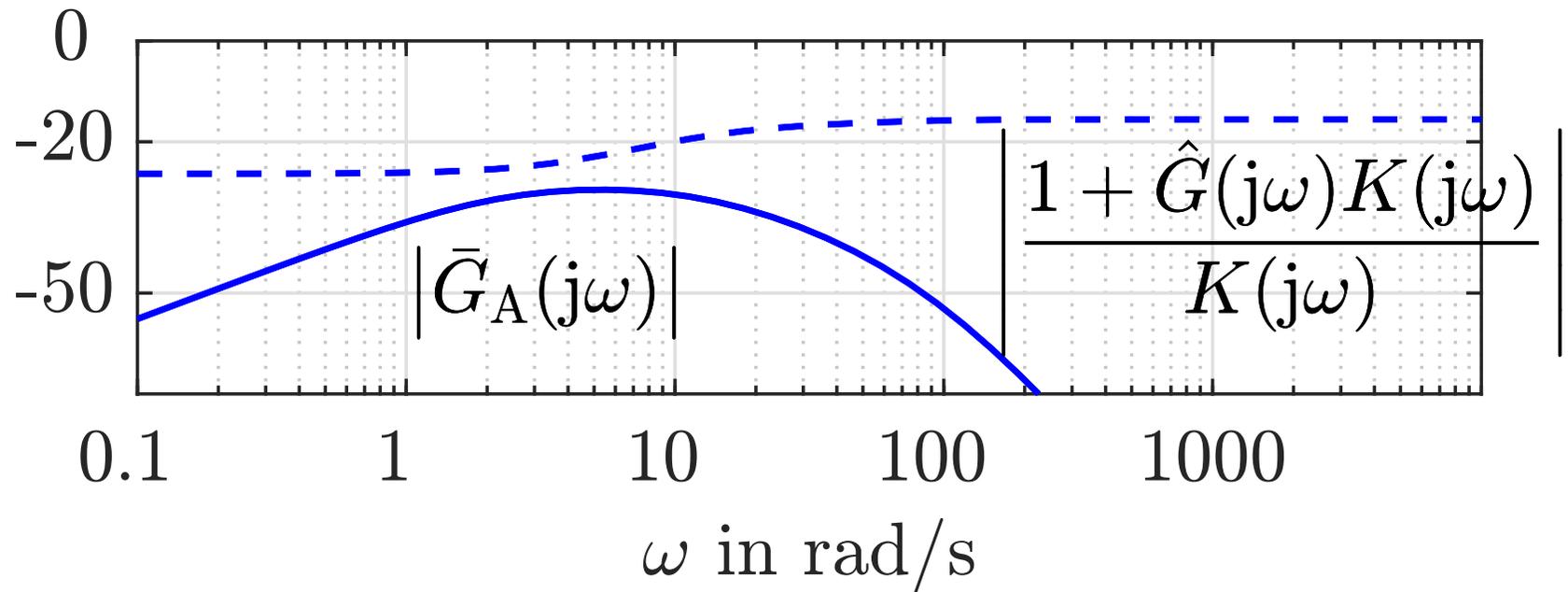


Abb. 8.26. Prüfung der Stabilitätsbedingung (8.50)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

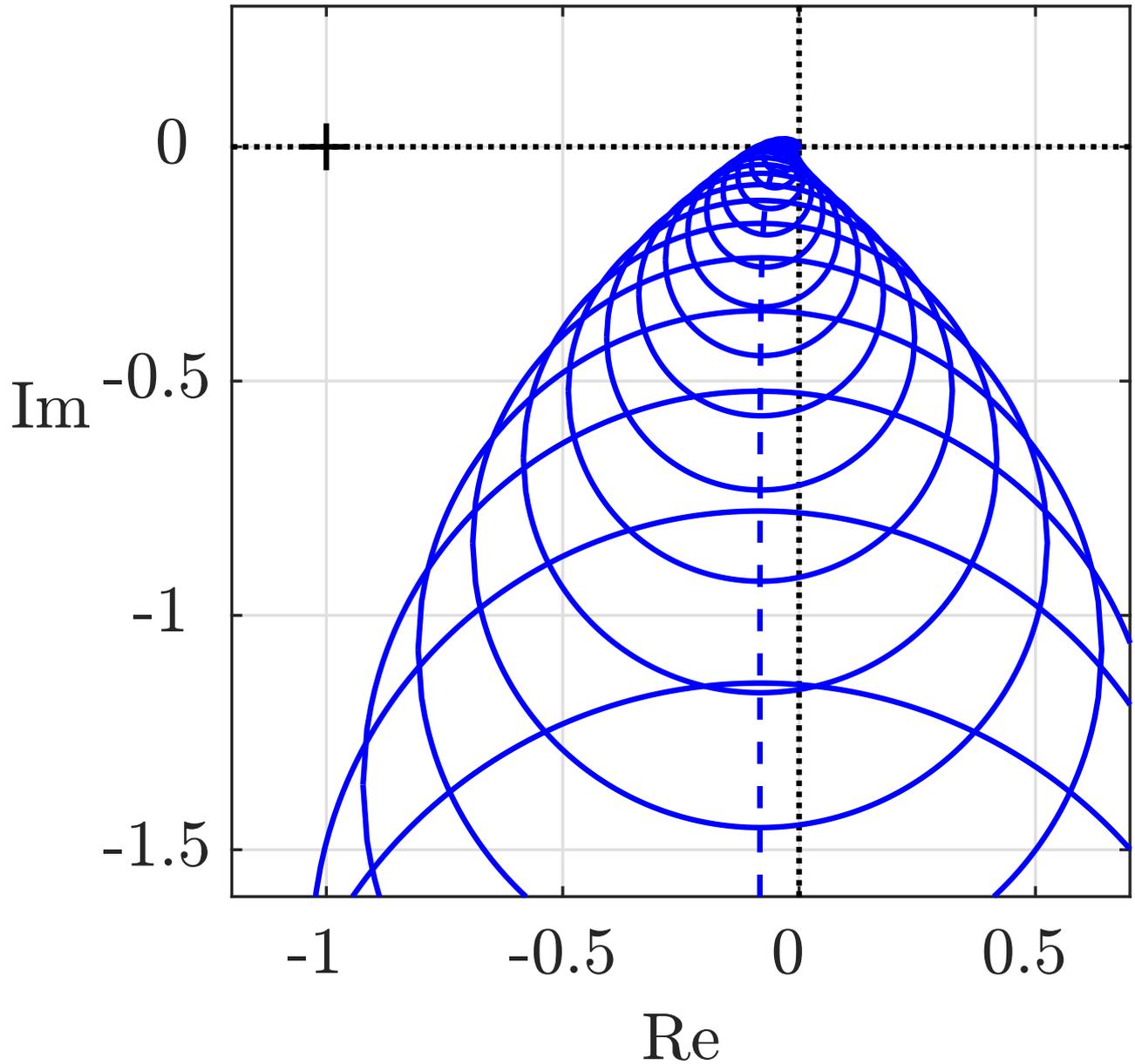


Abb. 8.27: Toleranzband für die Ortskurve der offenen Kette des Motorregelkreises $f\tilde{A}_{\frac{1}{4}}^r$ $J = 0,1, \dots, 0,5$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

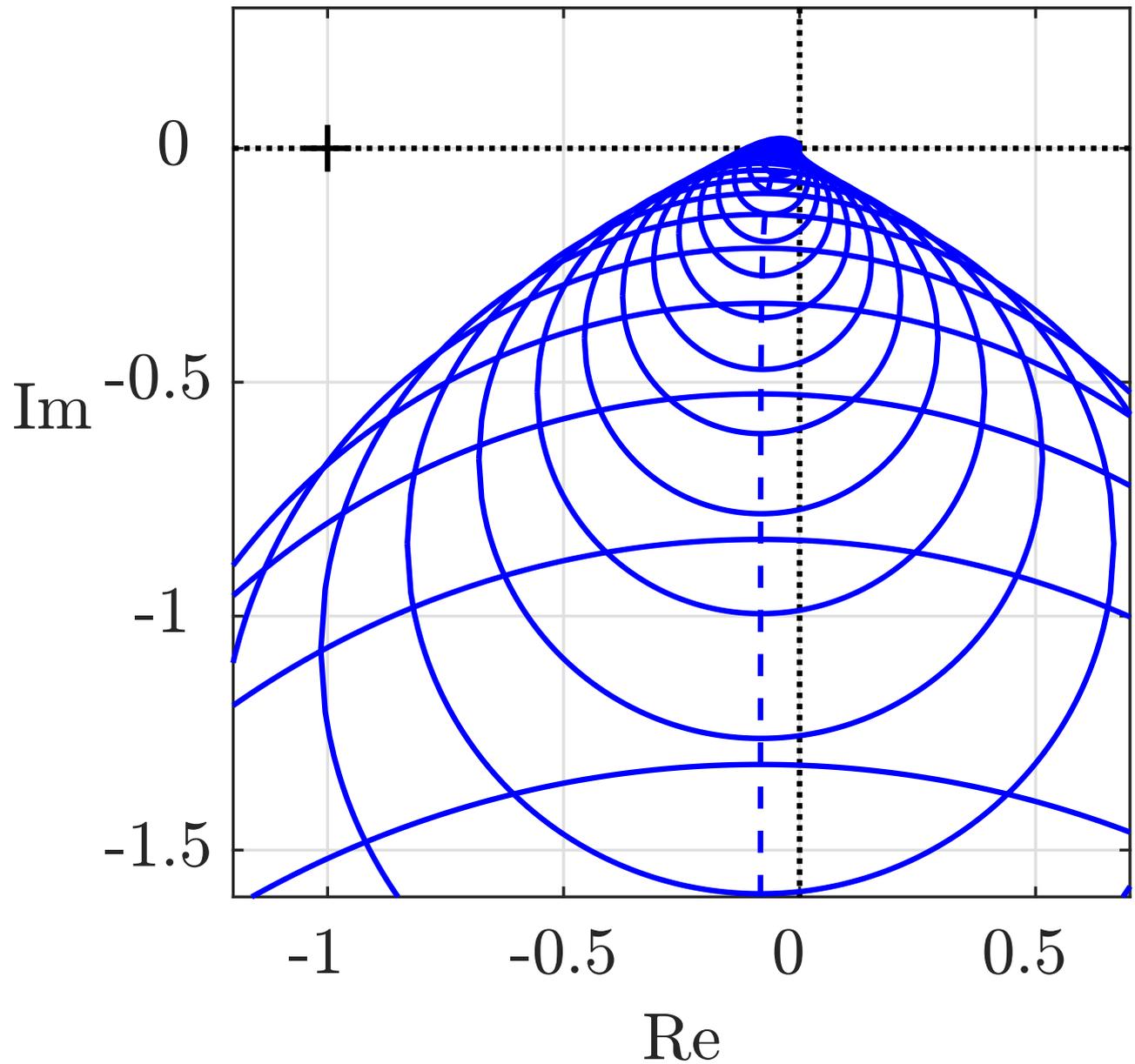
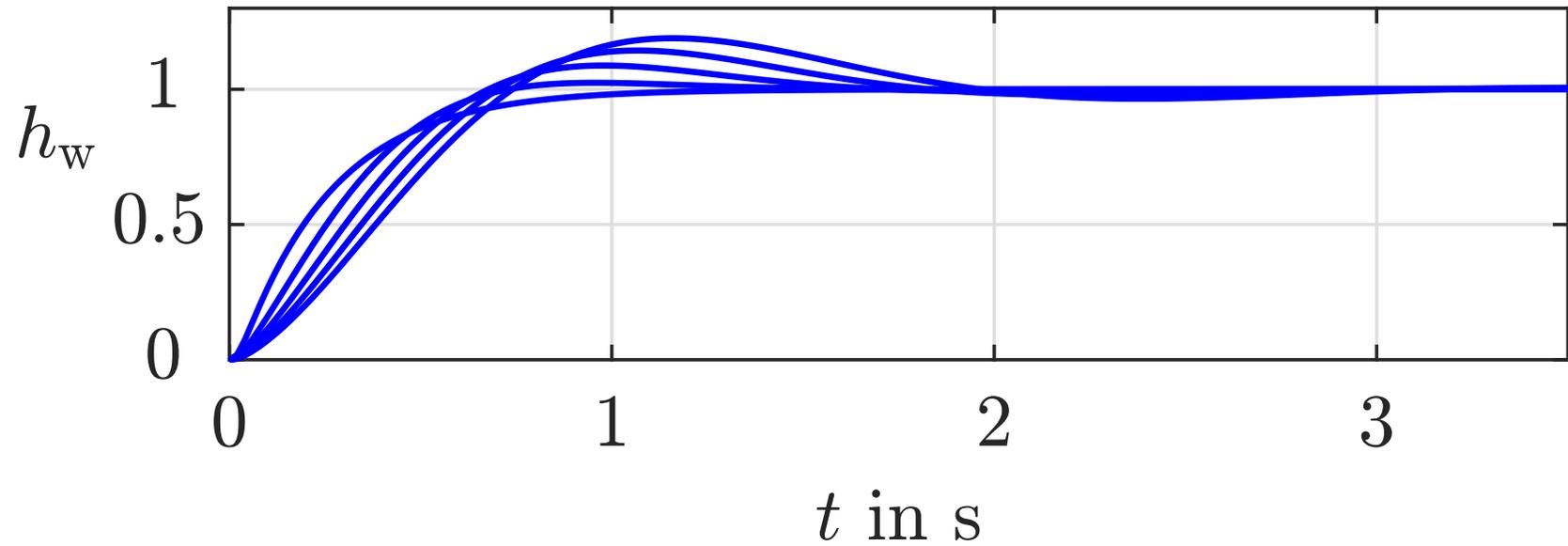


Abb. 8.27: Toleranzband für die Ortskurve der offenen Kette des Motorregelkreises $f\tilde{A}_{\frac{1}{4}}^r$ $J = 0, 1, \dots, 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. 8.28. Schar der Führungsübergangsfunktionen des geregelten Motors
bei $J = 0,1, \dots, 0,5$**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

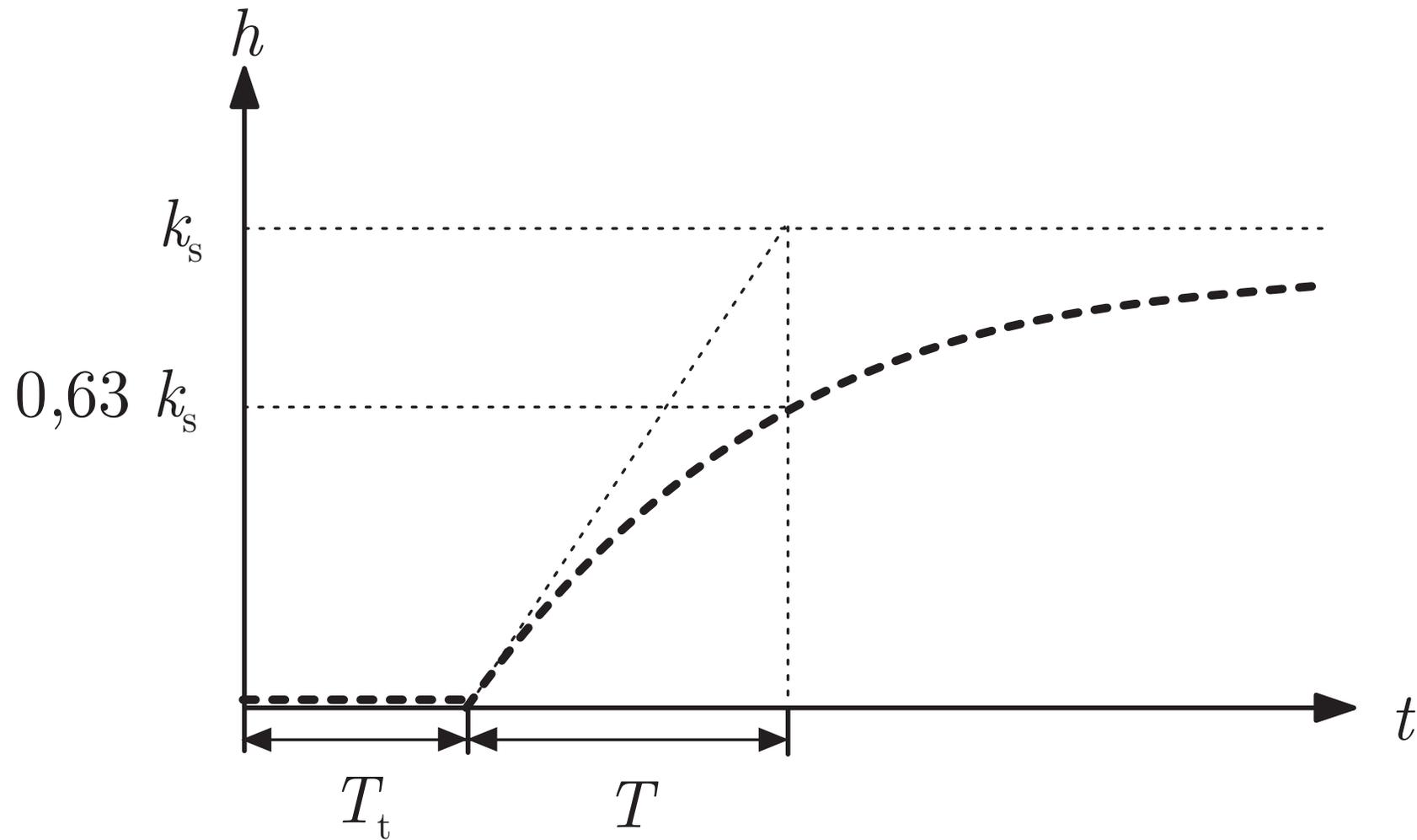


Abb. 9.1. Übergangsfunktion eines PT₁T_t-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

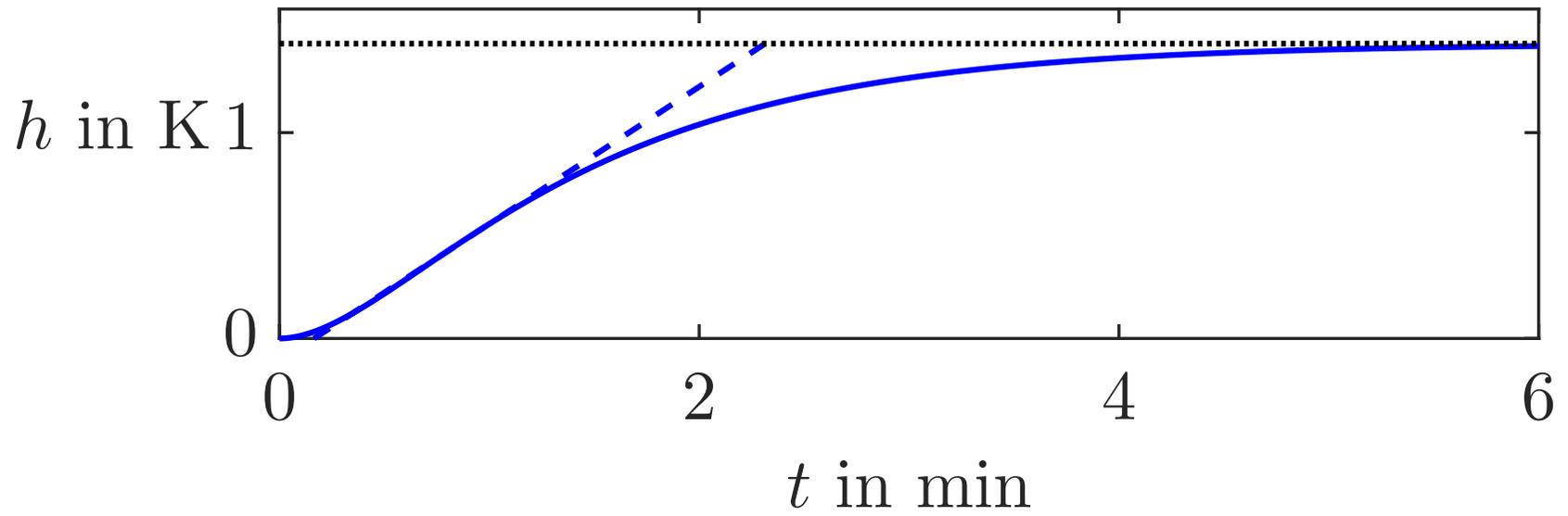


Abb. 9.2. Übergangsfunktion der Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

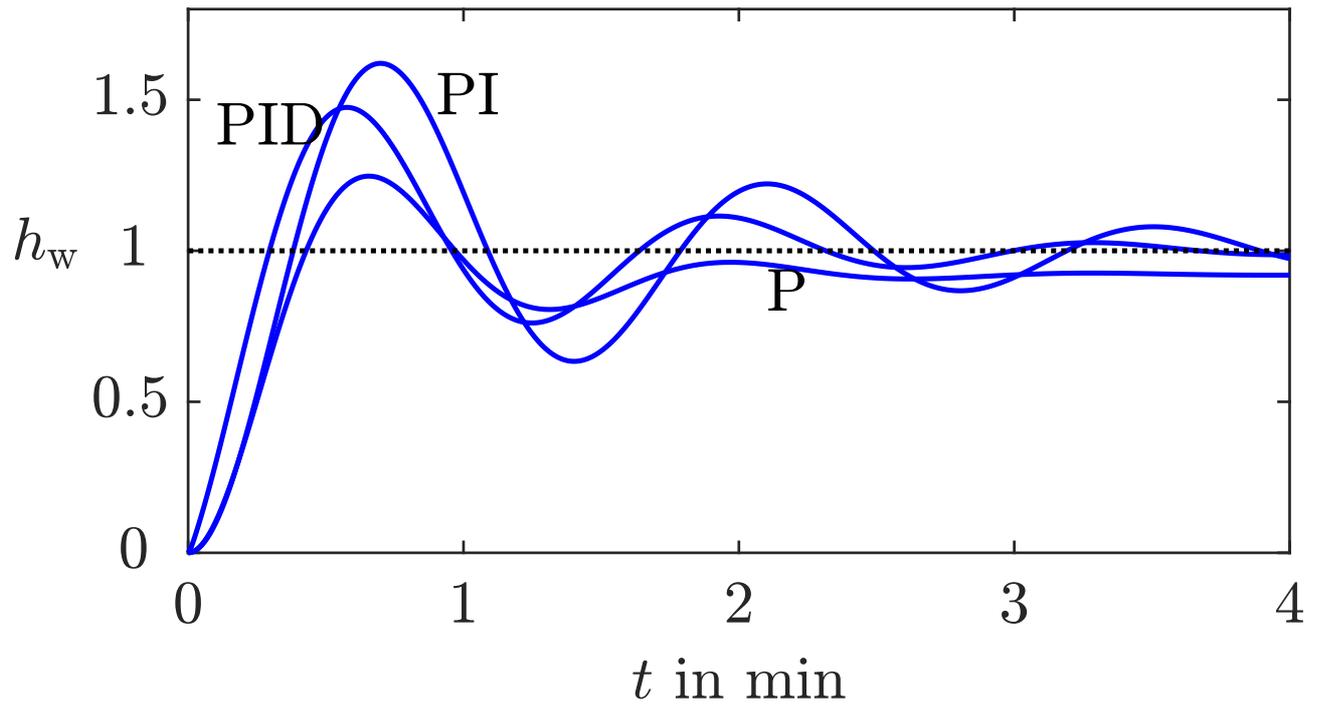


Abb. 9.3: Führungsübergangsfunktion des Temperaturregelkreises für unterschiedliche Reglertypen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

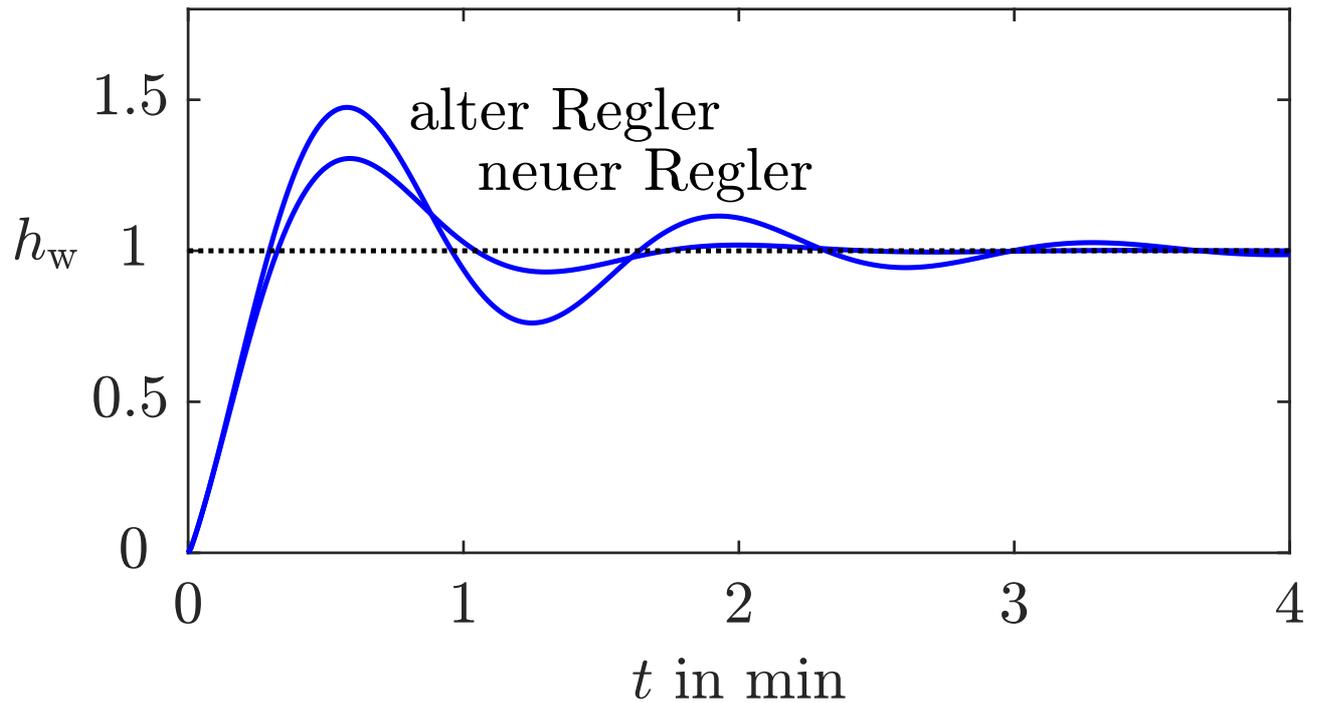


Abb. 9.3: Führungsübergangsfunktion des Temperaturregelkreises für PID-Regler mit unterschiedlicher Nachstellzeit T_I

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

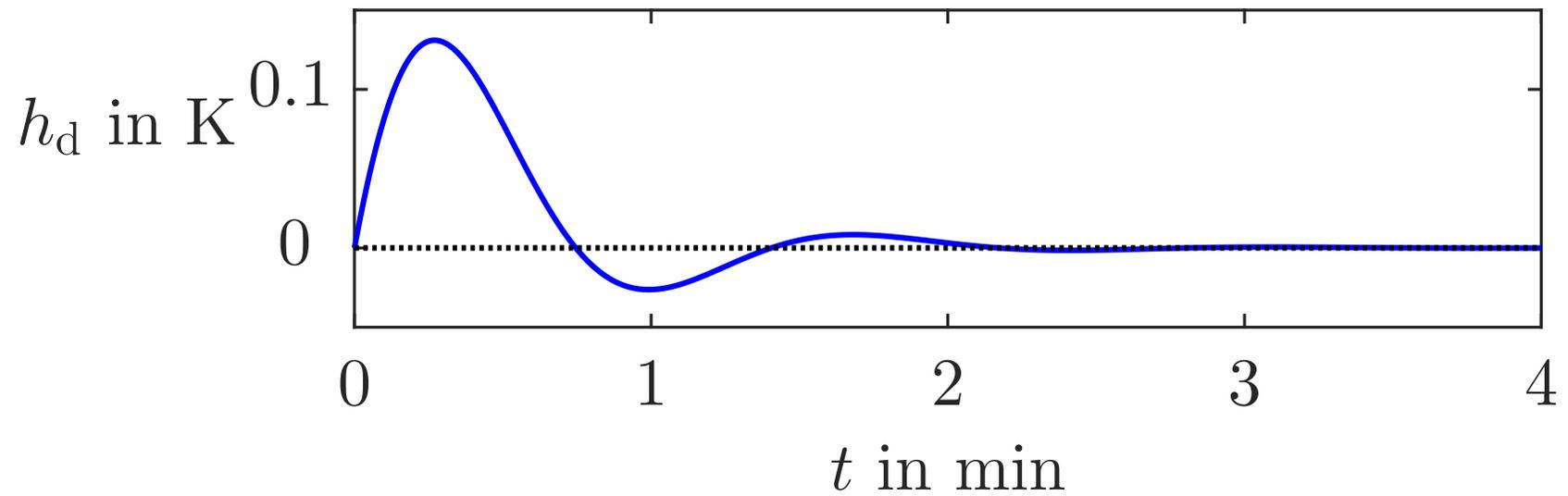


Abb. 9.4. Störübergangsfunktion des Temperaturregelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

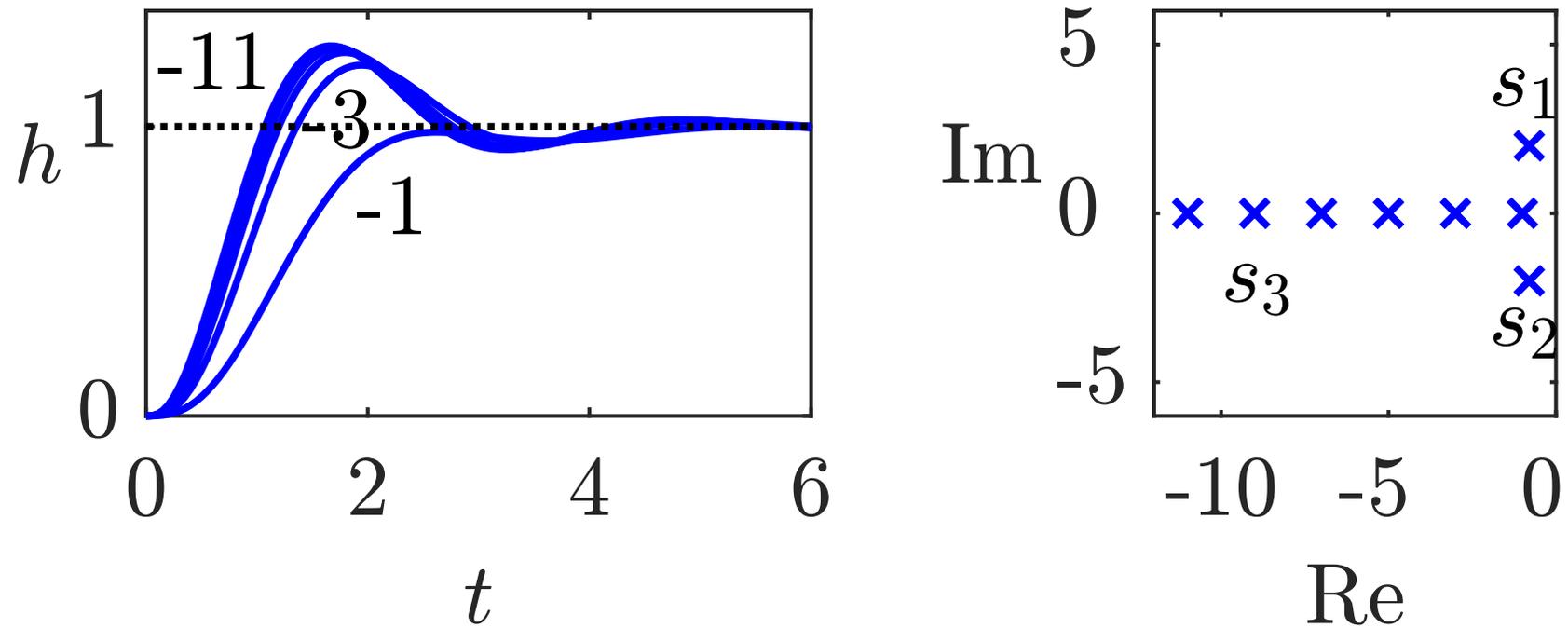


Abb. 10.1. Übergangsfunktion eines Systems dritter Ordnung für unterschiedliche Lage des Pols s_3

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

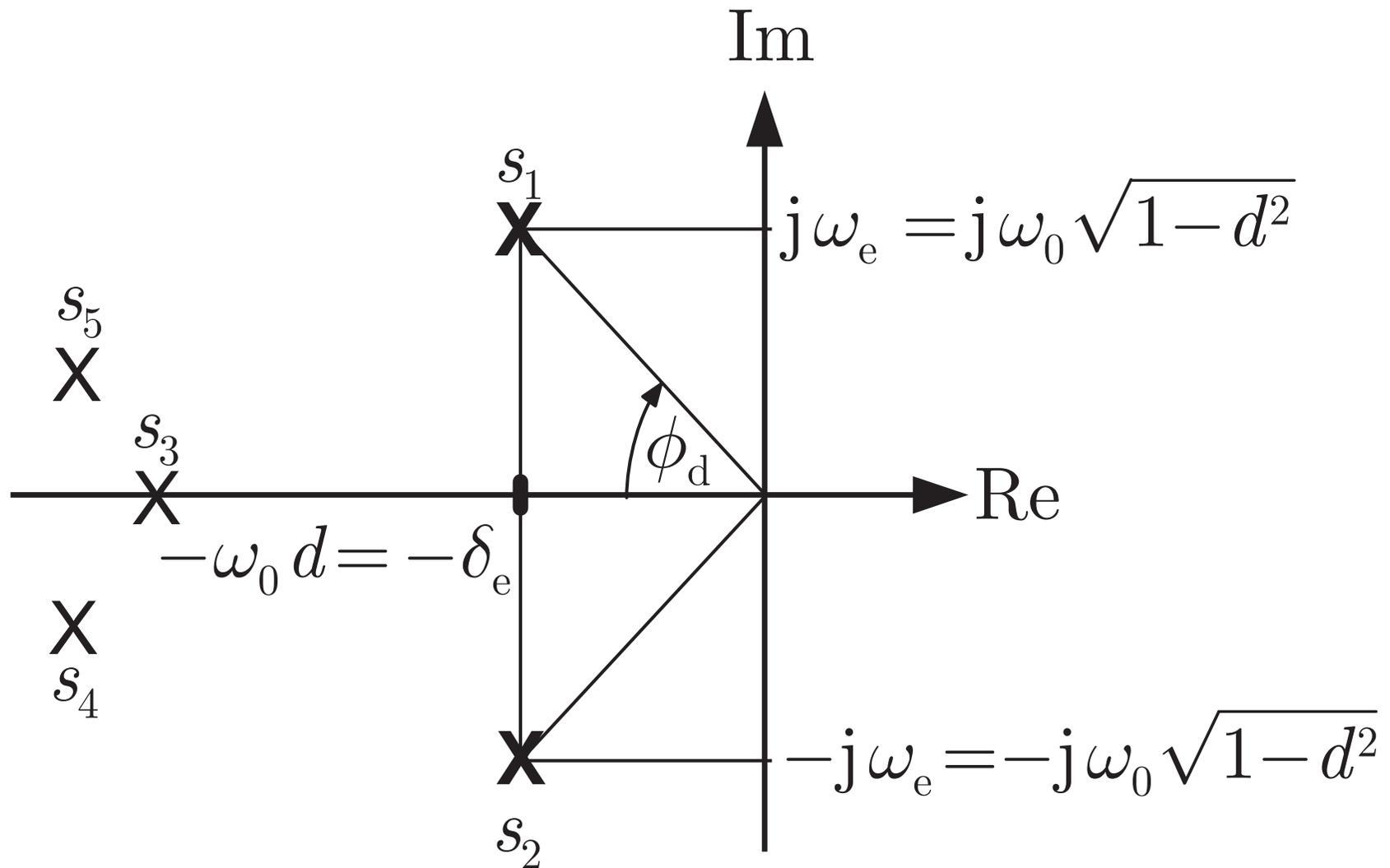


Abb. 10.2. PN-Bild eines Regelkreises mit dominierendem Polpaar

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

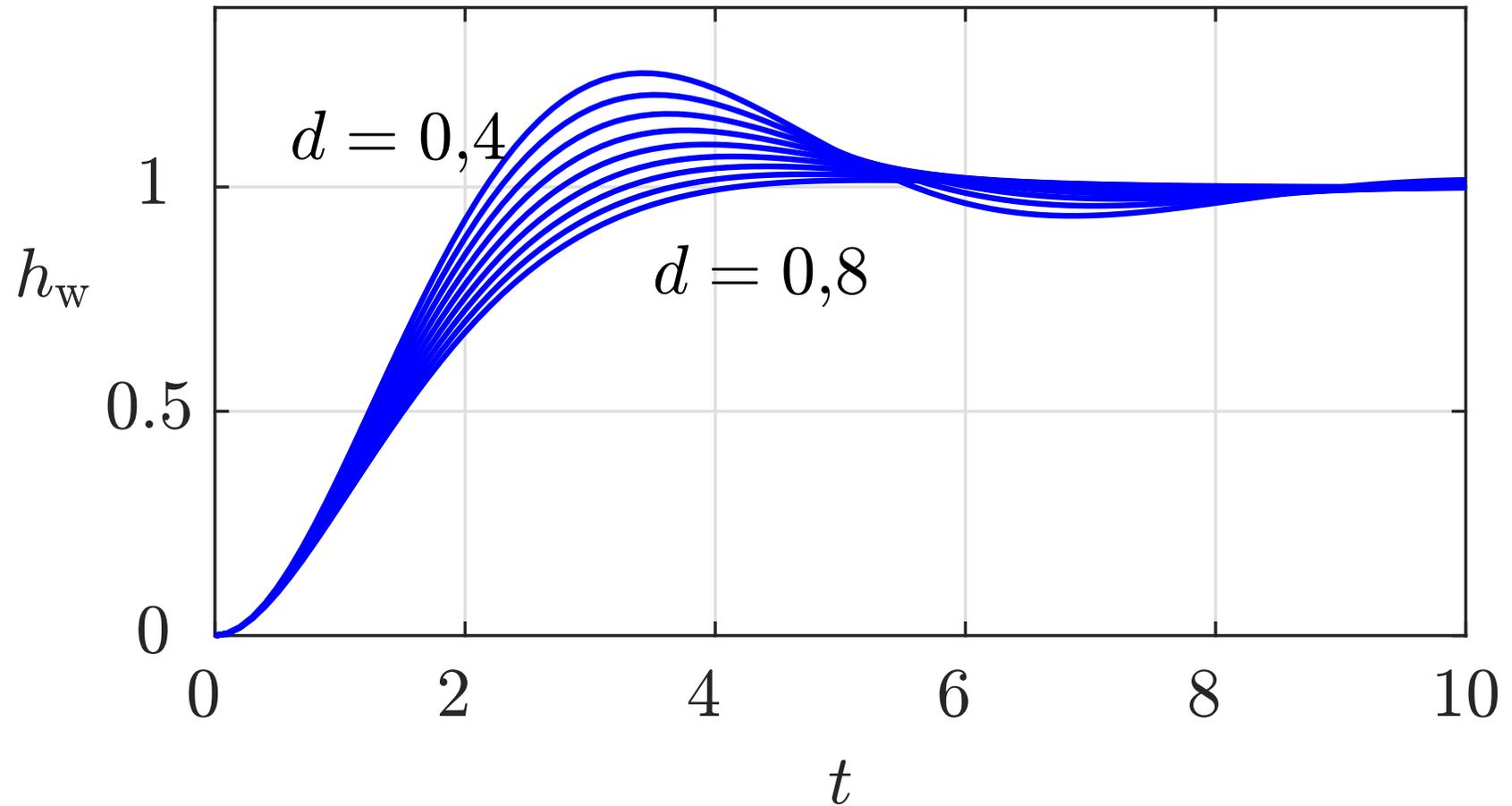


Abb. 10.3. Führungsübergangsfunktion $\hat{h}_w(t)$ des Regelkreises für Dämpfungsfaktor $d = 0,4 \dots 0,8$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

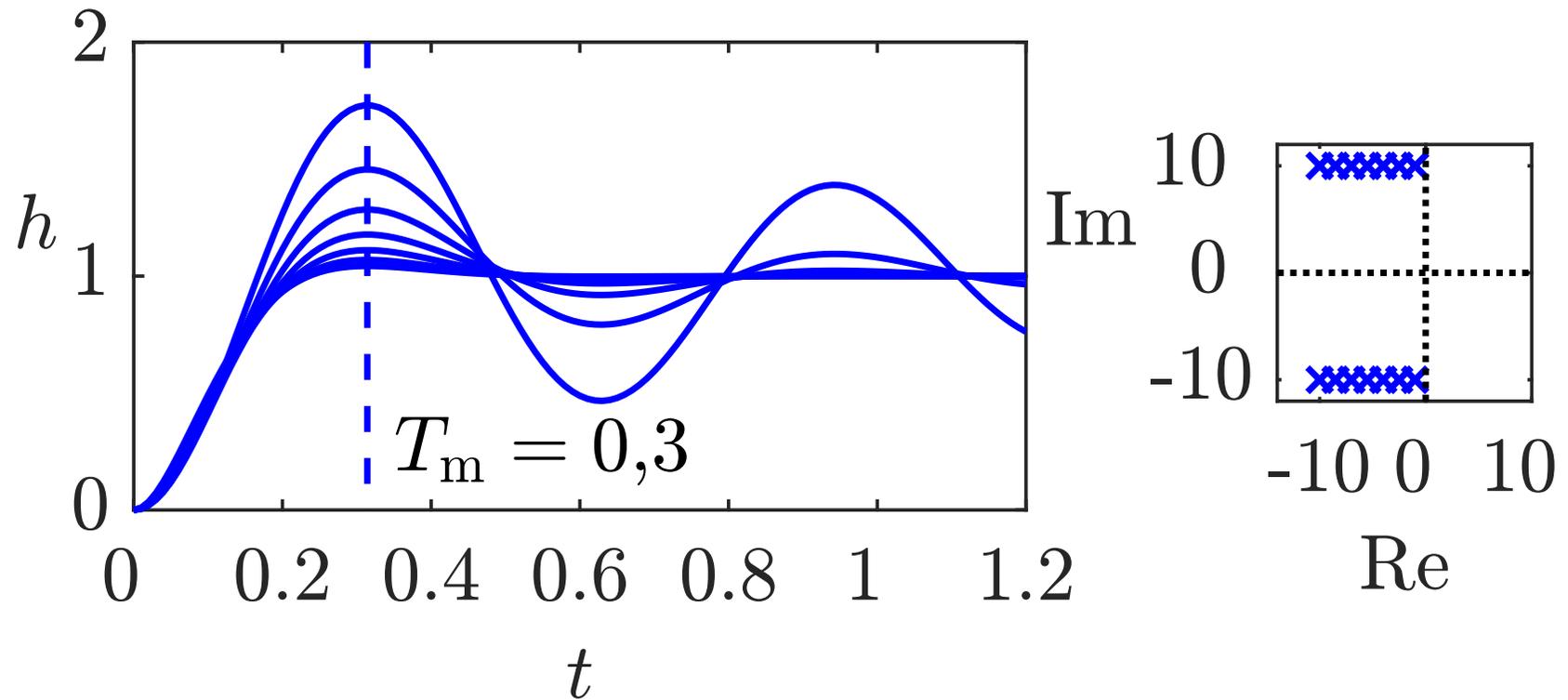


Abb. 10.4. Übergangsfunktion eines Schwingungsgliedes mit Polen bei $\omega_e = 10$ und $\delta_e = 1, \dots, 10$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

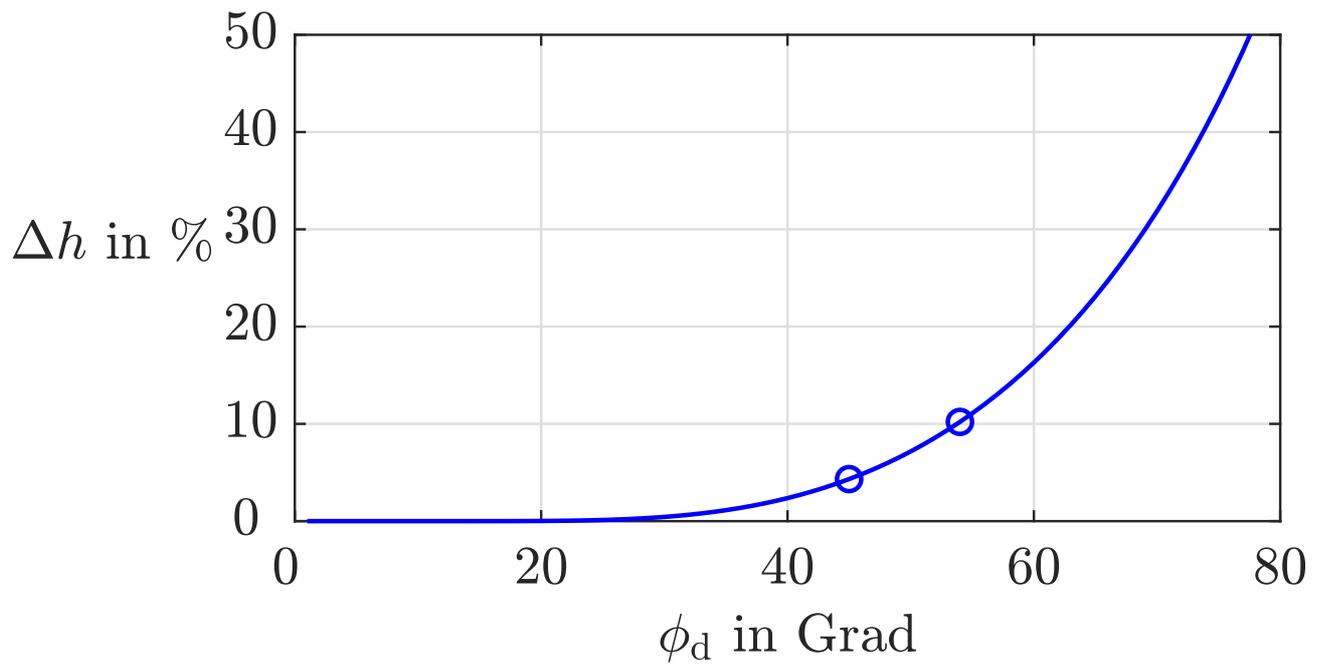


Abb. 10.5: Abhängigkeit der Überschwingweite Δh vom Winkel ϕ_d

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

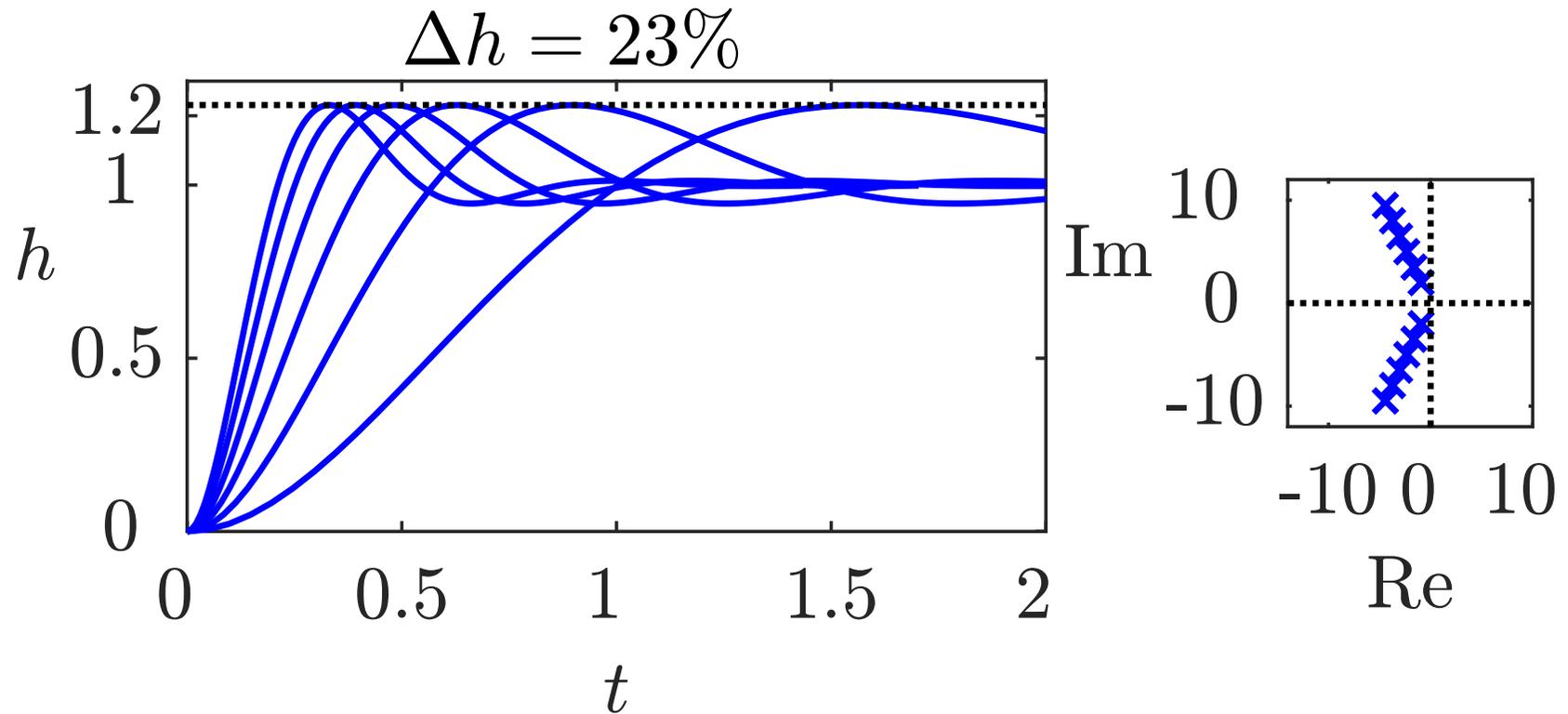


Abb. 10.6. Übergangsfunktion eines Schwingungsgliedes mit Polen auf den Dämpfungsgerade mit $\phi_d = 65^\circ$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

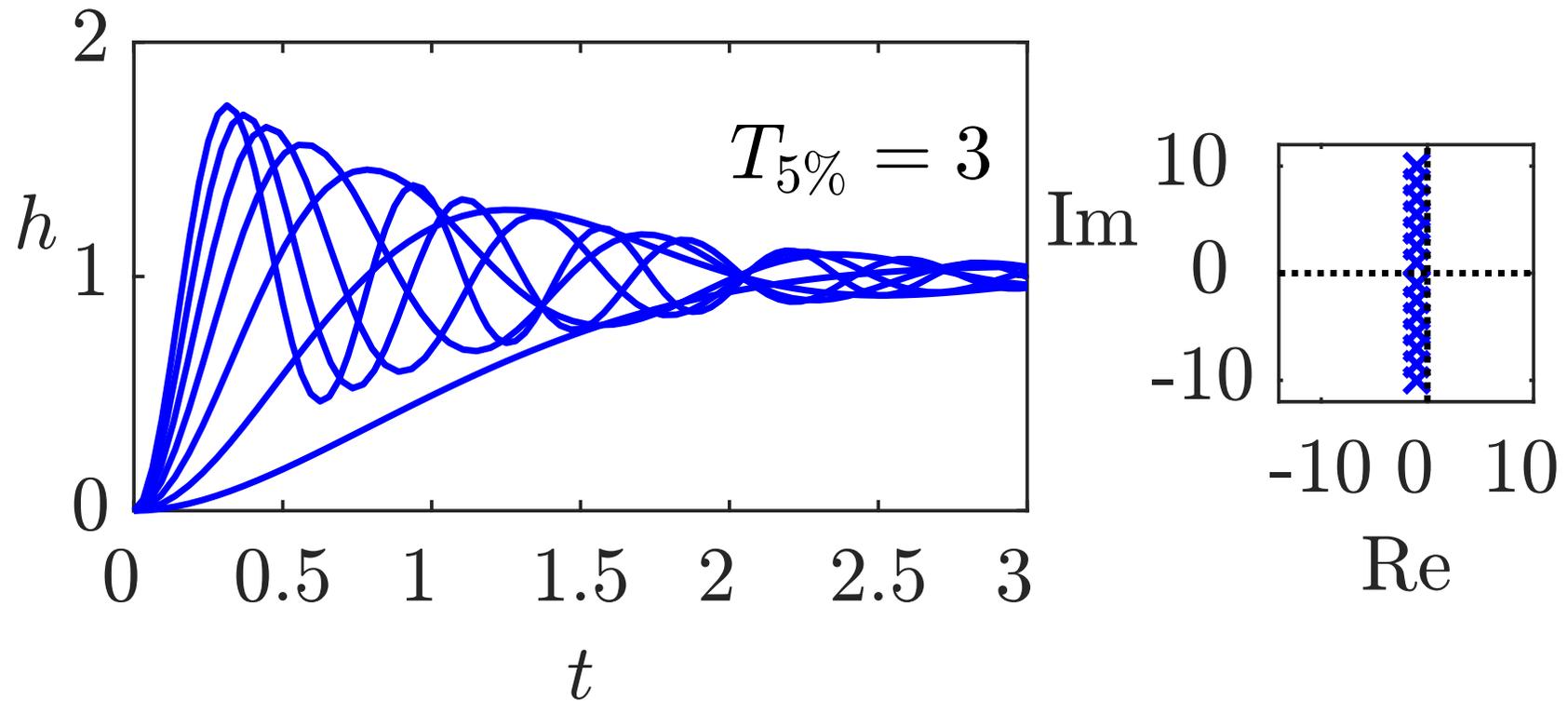


Abb. 10.7. Übergangsfunktion eines Schwingungsgliedes mit Polen bei $\delta_e = 1$ und $\omega_e = 1, \dots, 10$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

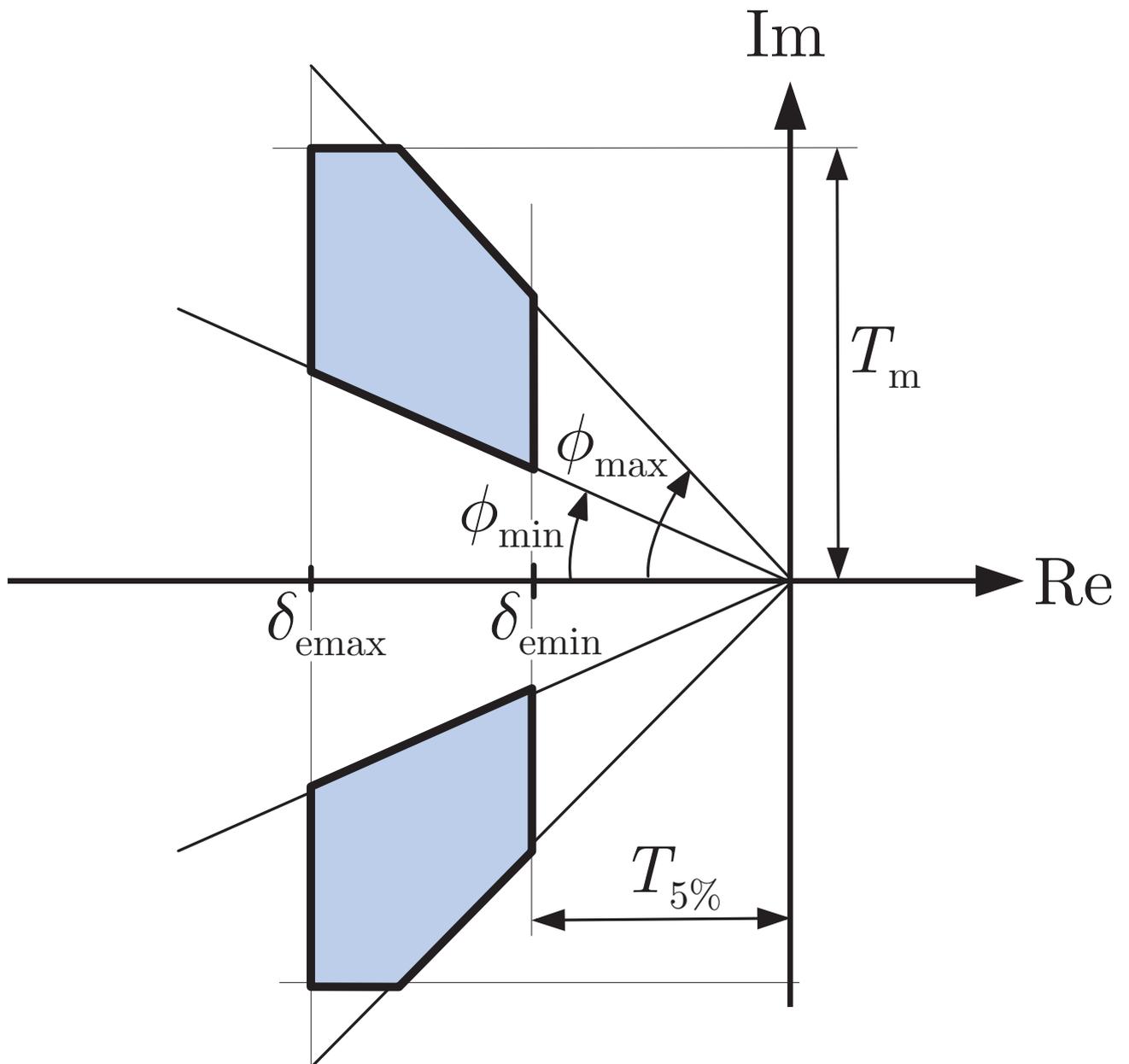
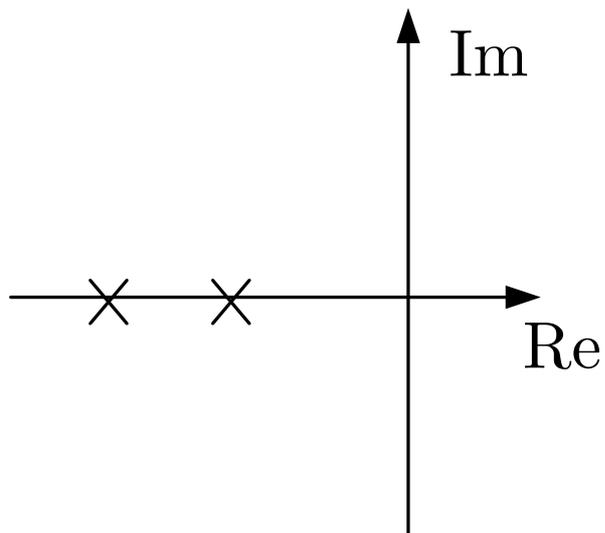
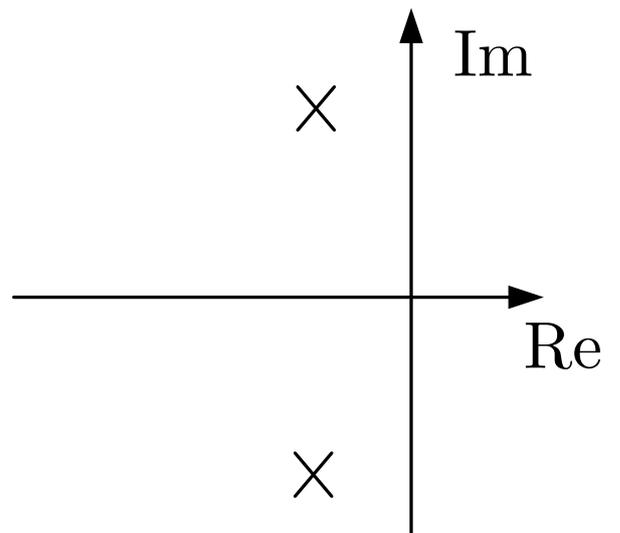


Abb. 10.8: Gebiete für die angestrebte Lage des dominierenden Polpaares des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



kann überschwingen



schwingt

Abb. 10.9: Reelles und konjugiert-komplexes Polpaar

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

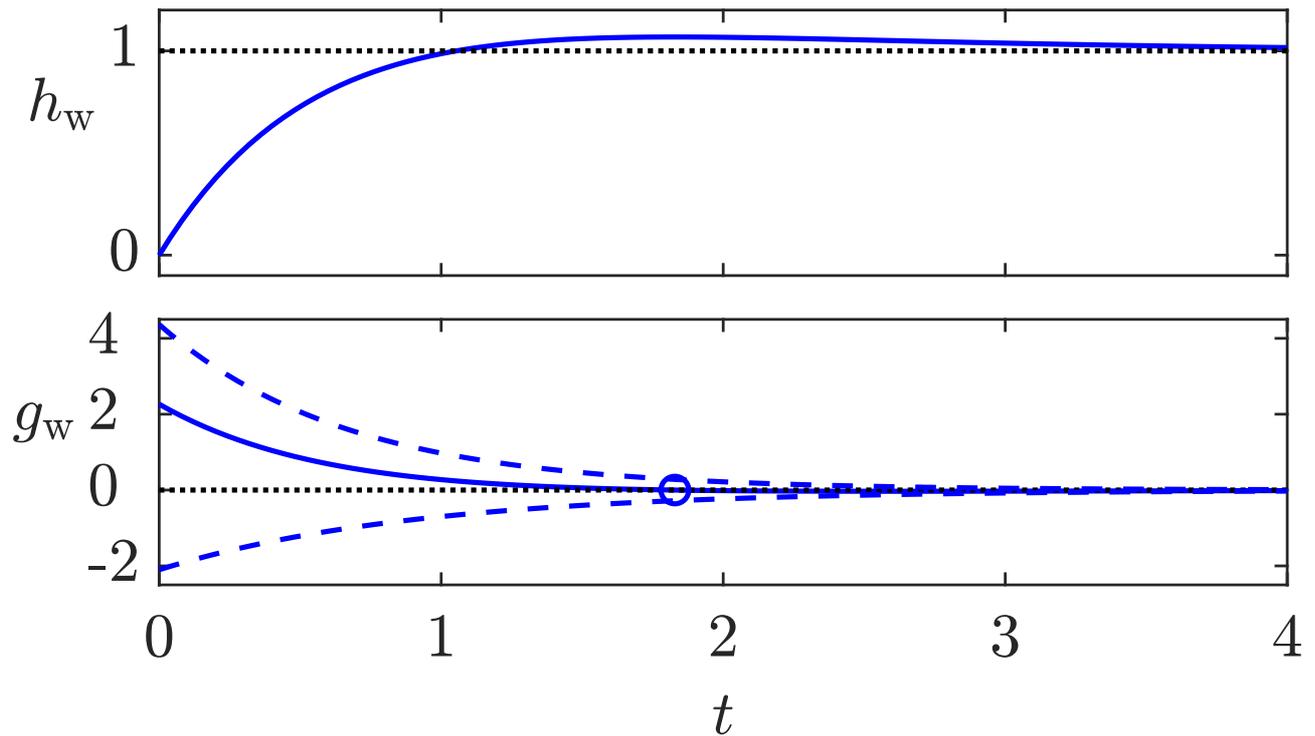


Abb. 10.10: Übergangsfunktion und Gewichtsfunktion eines Systems mit zwei reellen Polen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

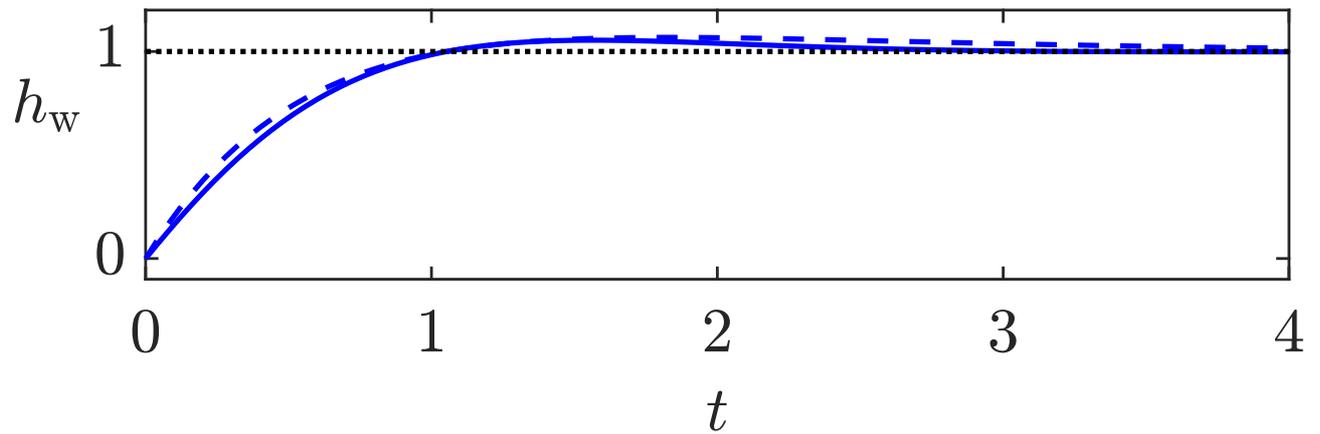


Abb. 10.11: Vergleich zweier System mit reellen bzw. konjugiert-komplexen Polen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

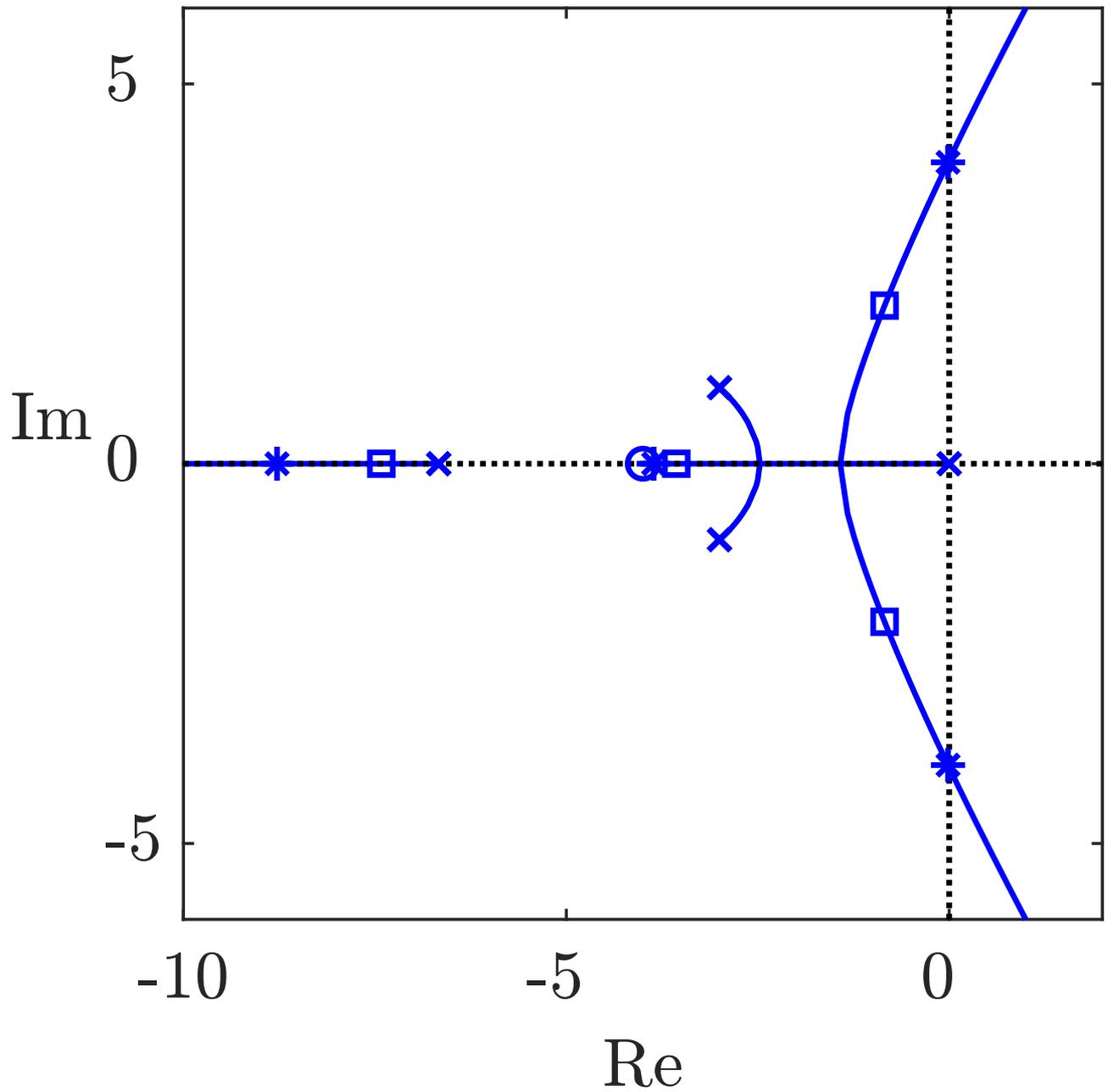


Abb. 10.12: Wurzelortskurve eines Regelkreises
 (□ für $k = 0,25$, * für $k_{\text{krit}} = 2$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

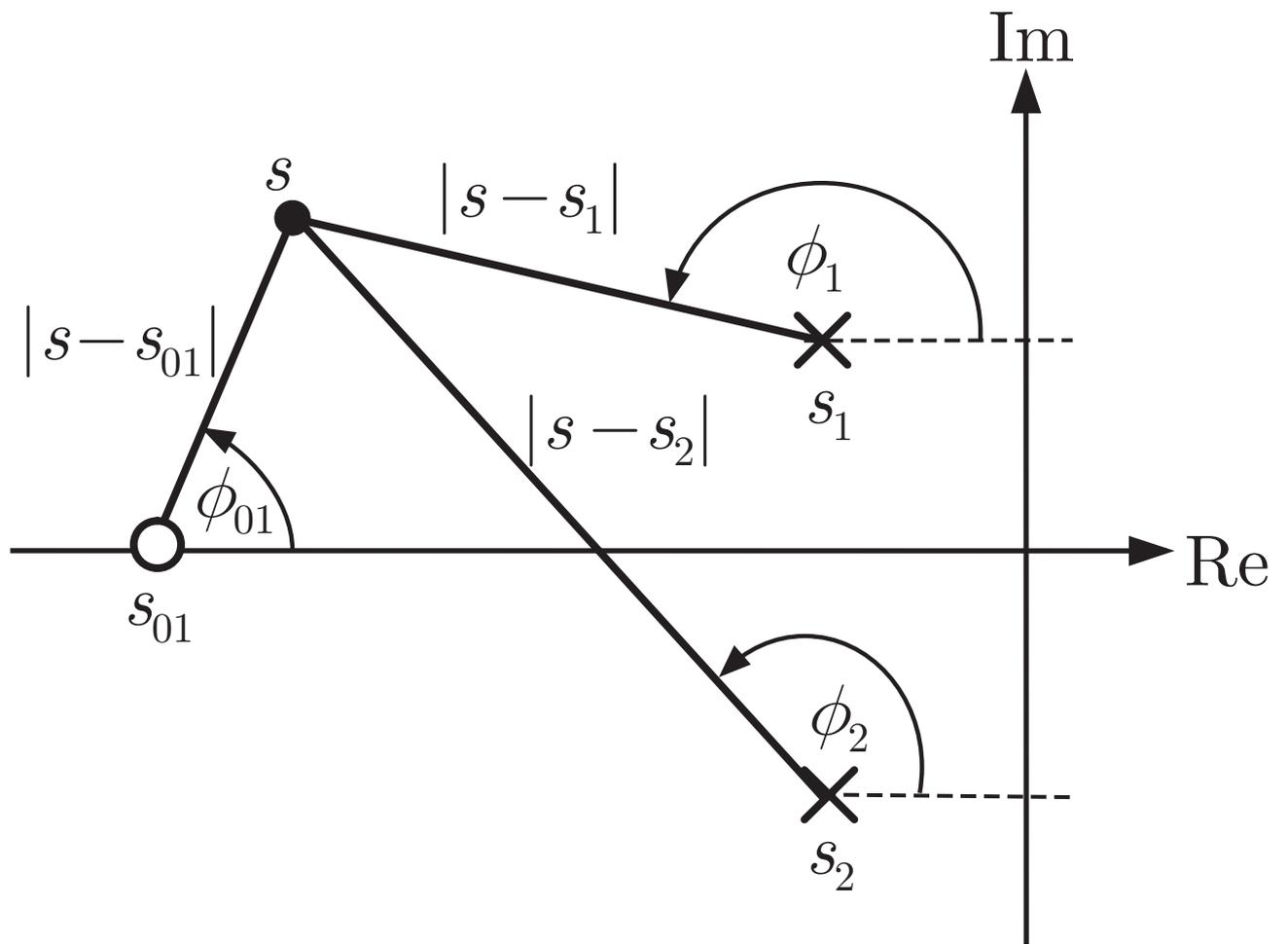


Abb. 10.13: Analyse der Wurzelortskurve

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

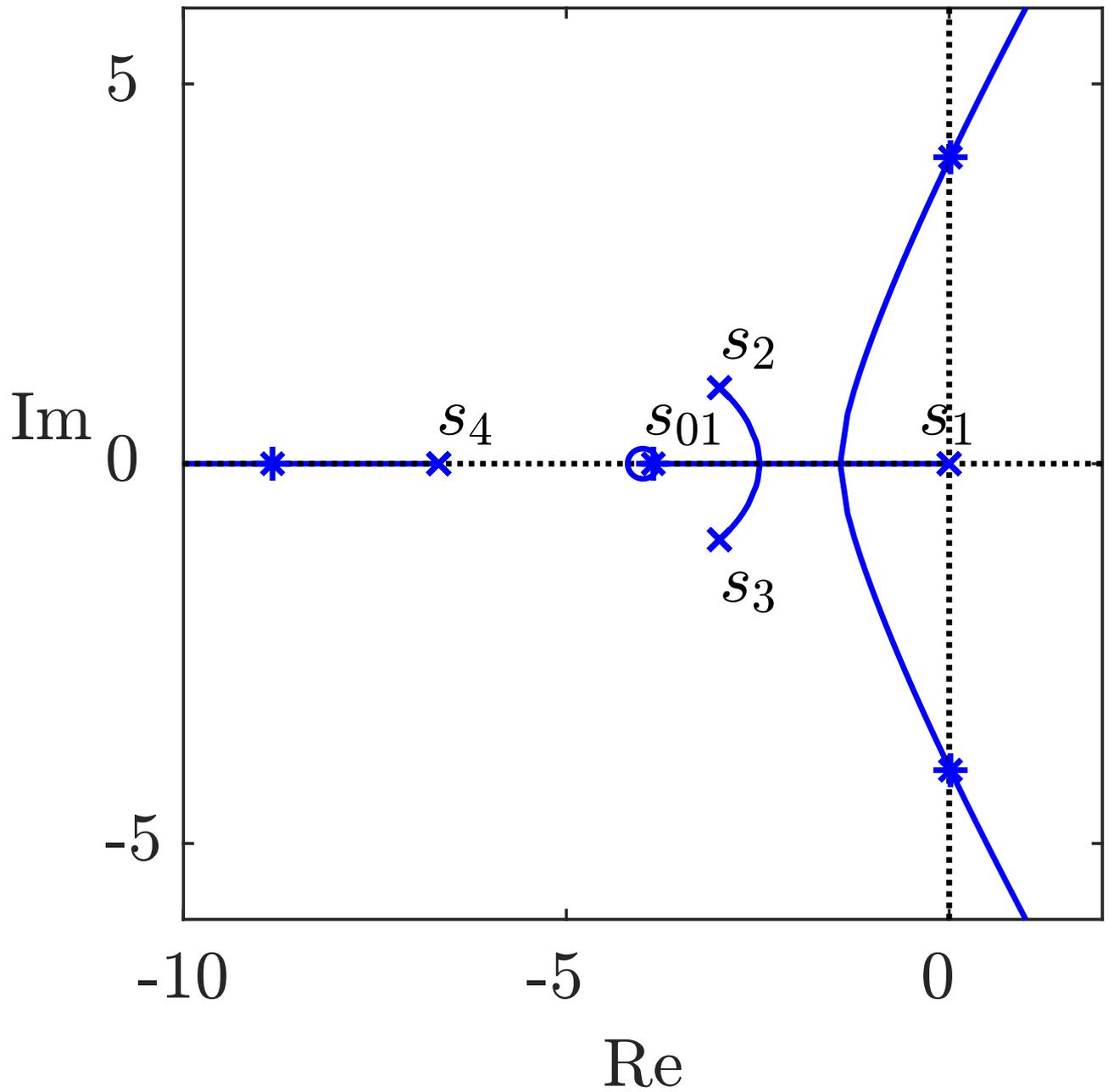


Abb. 10.14: Wurzelortskurve mit Markierung der Pole * des Regelkreises bei der kritischen Reglerverstärkung $k_{P_{krit}}$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

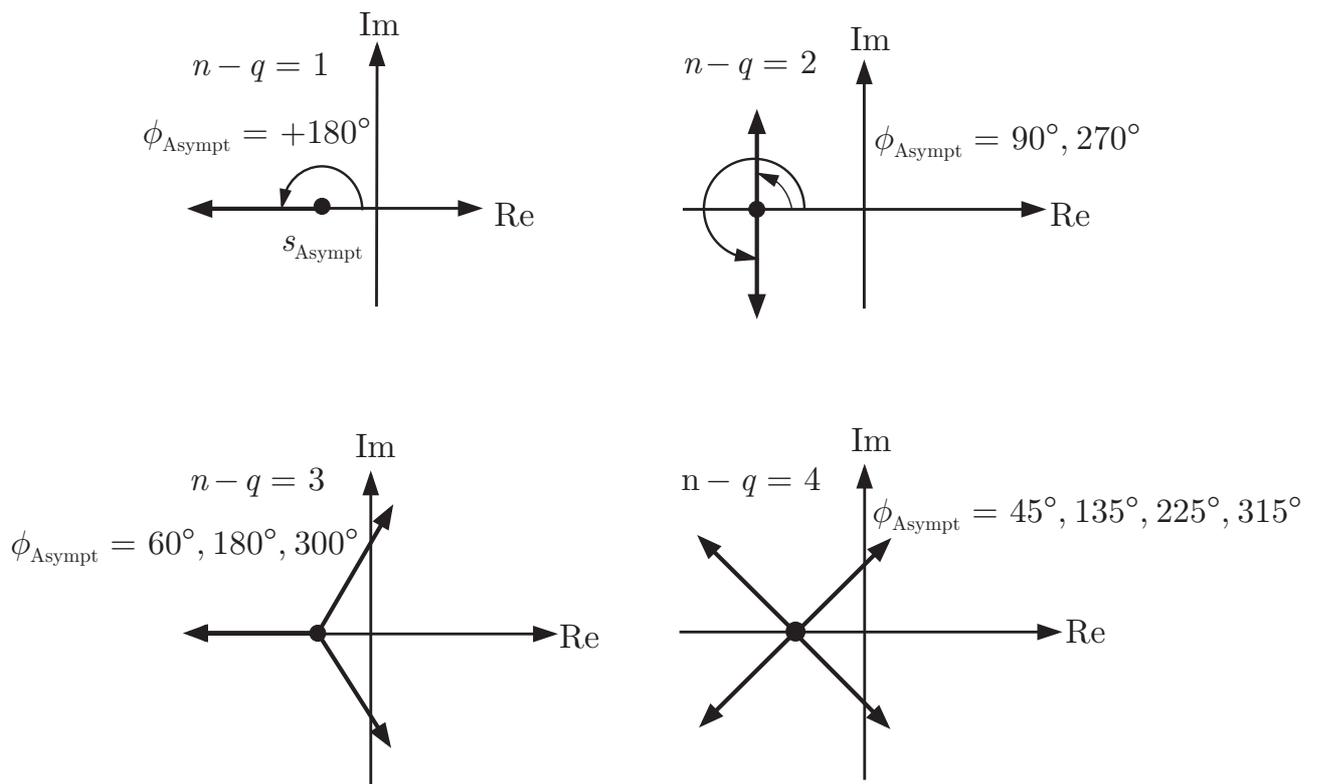


Abb. 10.15: Asymptoten der Wurzelortskurve für unterschiedlichen Polüberschuss der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

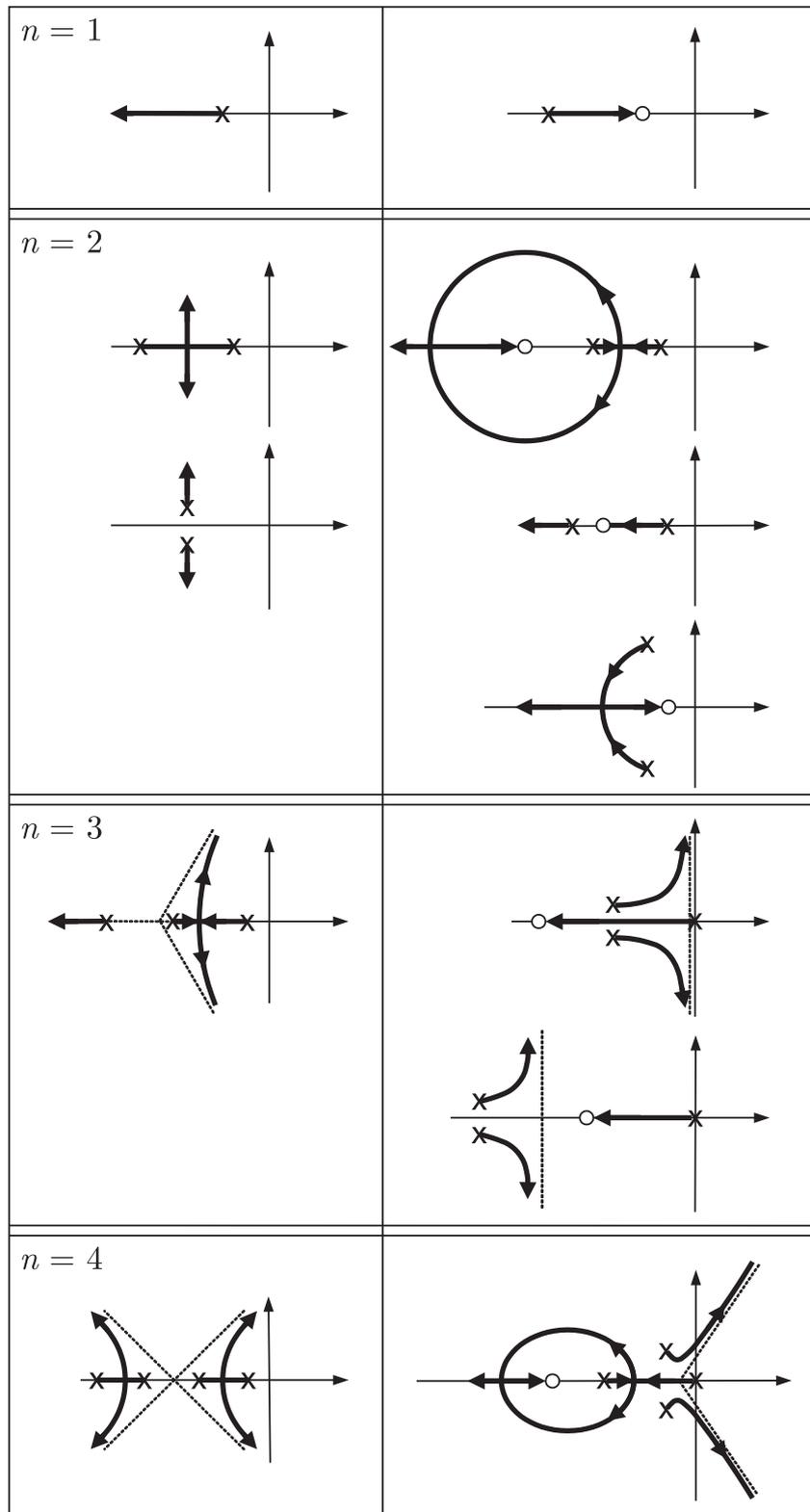


Abb. 10.16. Typischer Verlauf von Wurzelortskurven

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

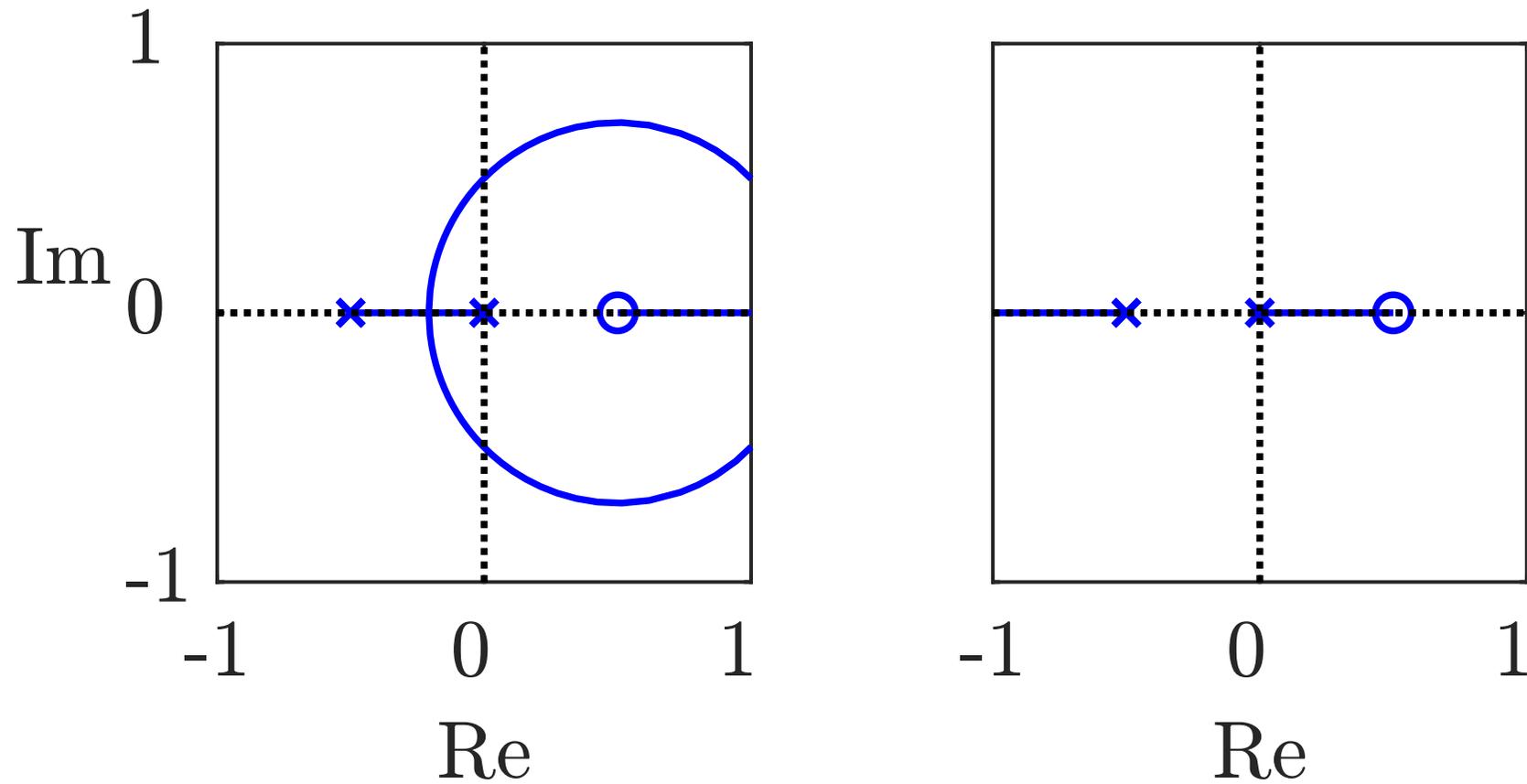


Abb. 10.17. Wurzelortskurve eines nichtminimalphasigen Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

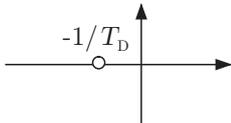
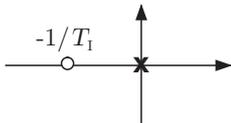
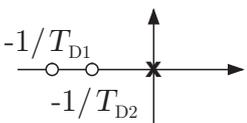
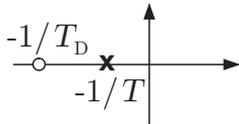
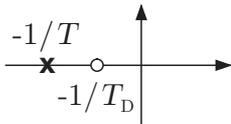
Regler bzw. Korrekturglied	Übertragungsfunktion	PN-Bild
PD (ideal)	$k_P (T_D s + 1)$	
PI	$k_P \frac{T_I s + 1}{T_I s}$	
PID	$k_P \frac{(T_{D1} s + 1)(T_{D2} s + 1)}{T_I s}$	
phasenabsenkendes Korrekturglied	$\frac{T_D s + 1}{T s + 1} \quad T > T_D$	
phasenanhebendes Korrekturglied	$\frac{T_D s + 1}{T s + 1} \quad T < T_D$	

Abb. 10.18: PN-Bilder wichtiger Regler und Korrekturglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

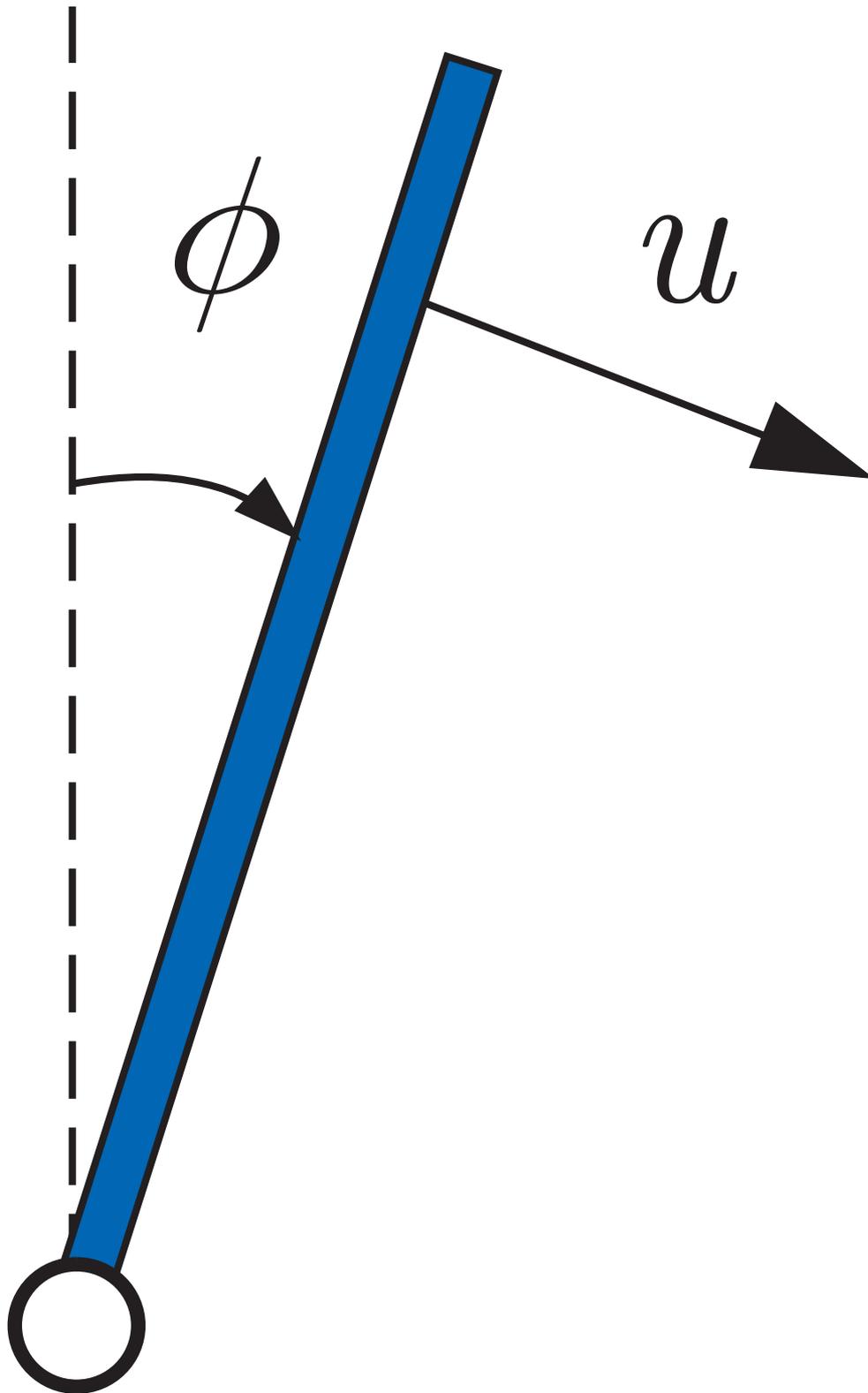


Abb. 10.19. Invertiertes Pendel

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

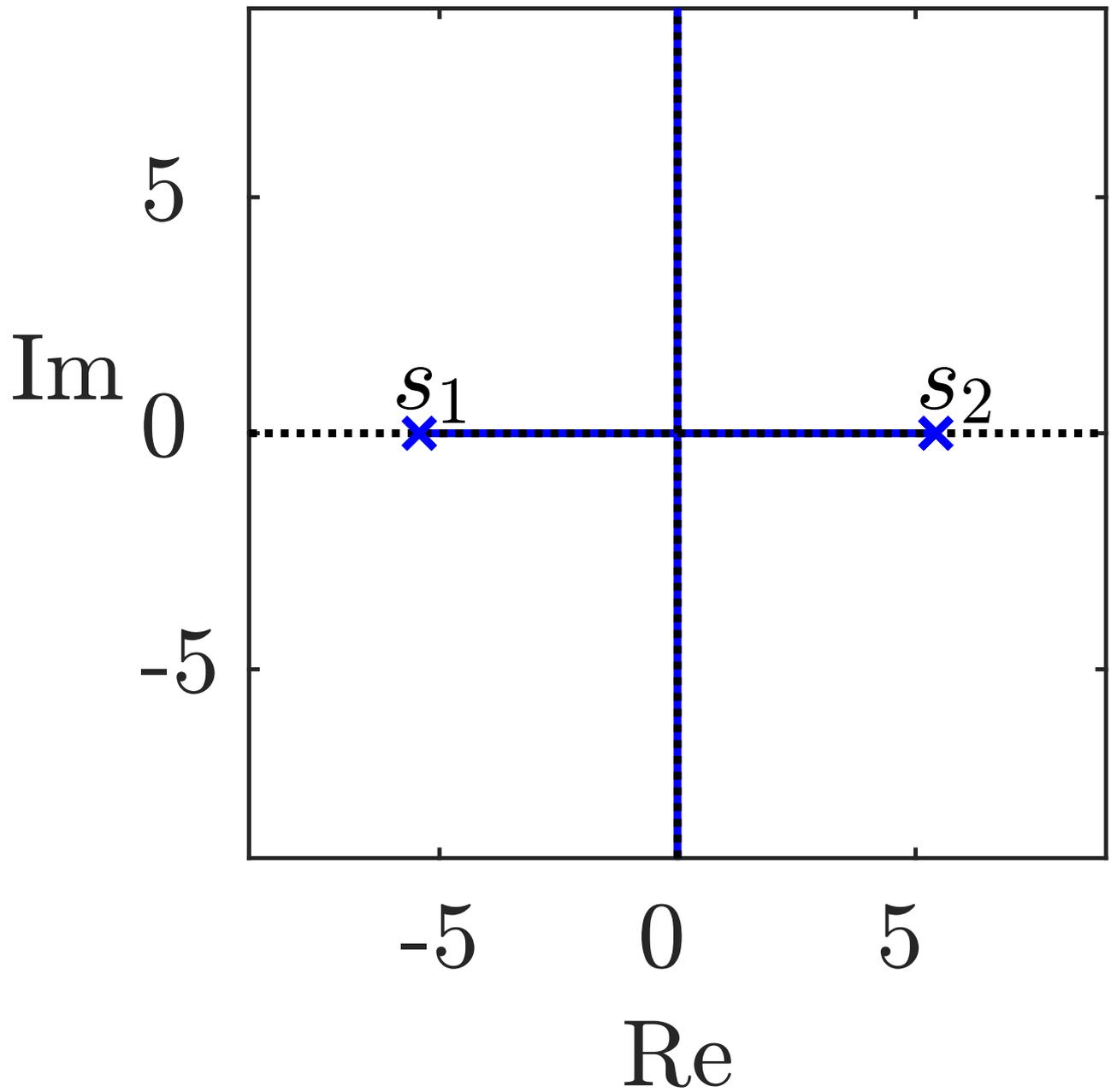


Abb. 10.20: Wurzelortskurve des Pendels mit P-Regler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

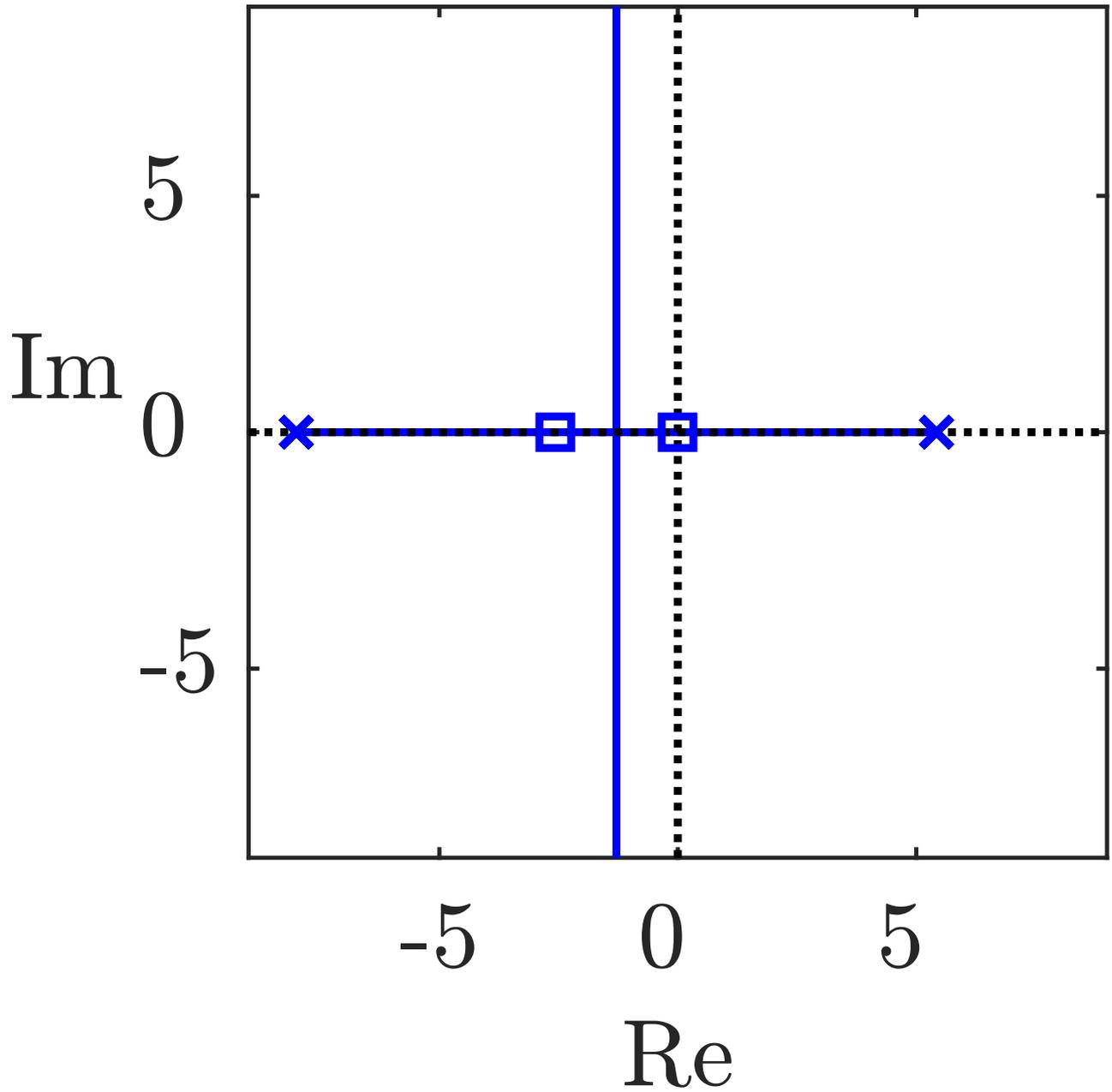


Abb. 10.20: Wurzelortskurve des Pendels mit Korrekturglied (Pole \square für die kritische Verstärkung)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

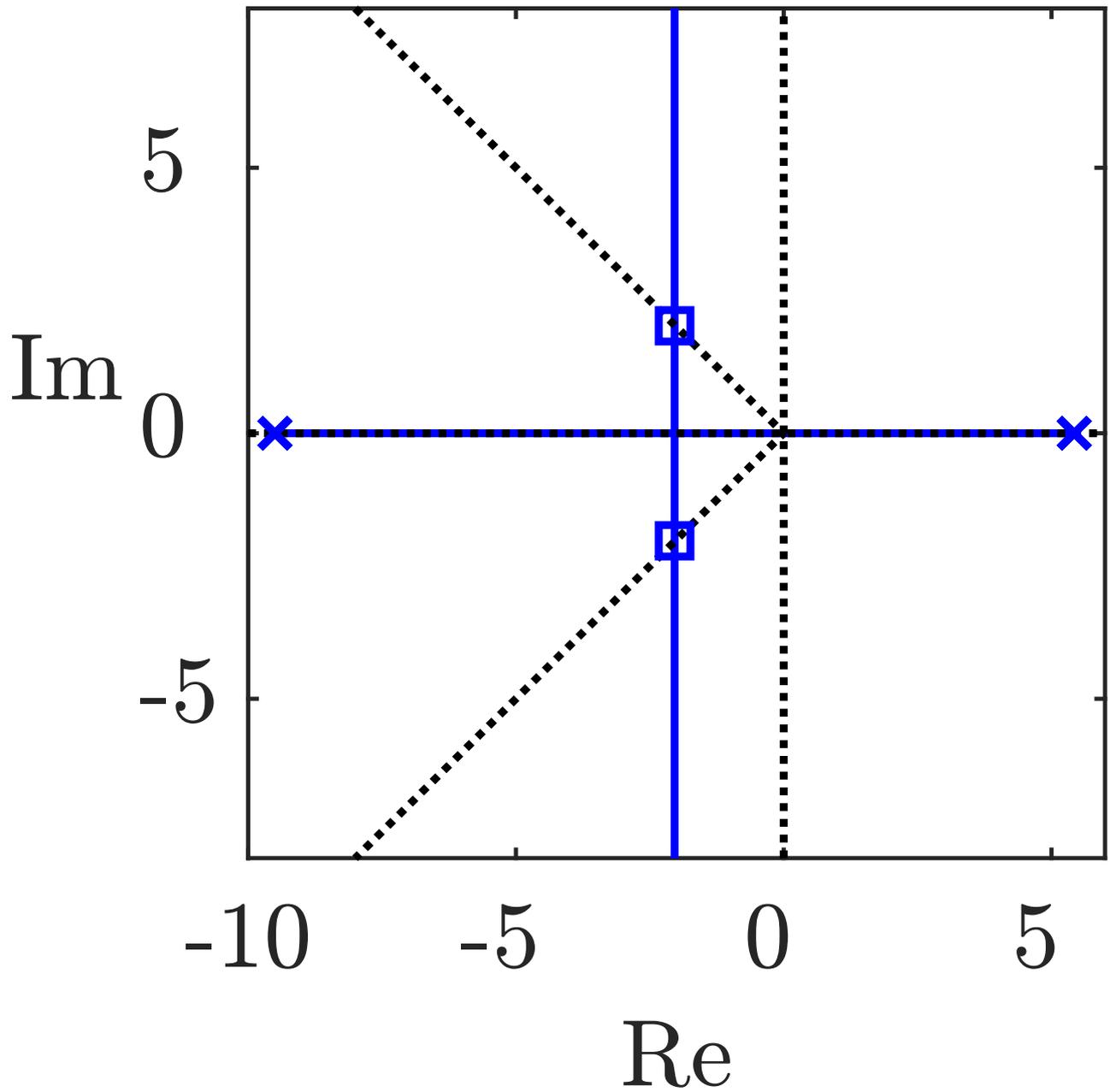


Abb. 10.21: Wurzelortskurve bei genauer Kompensation des Regelstreckenpols durch die Nullstelle des Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

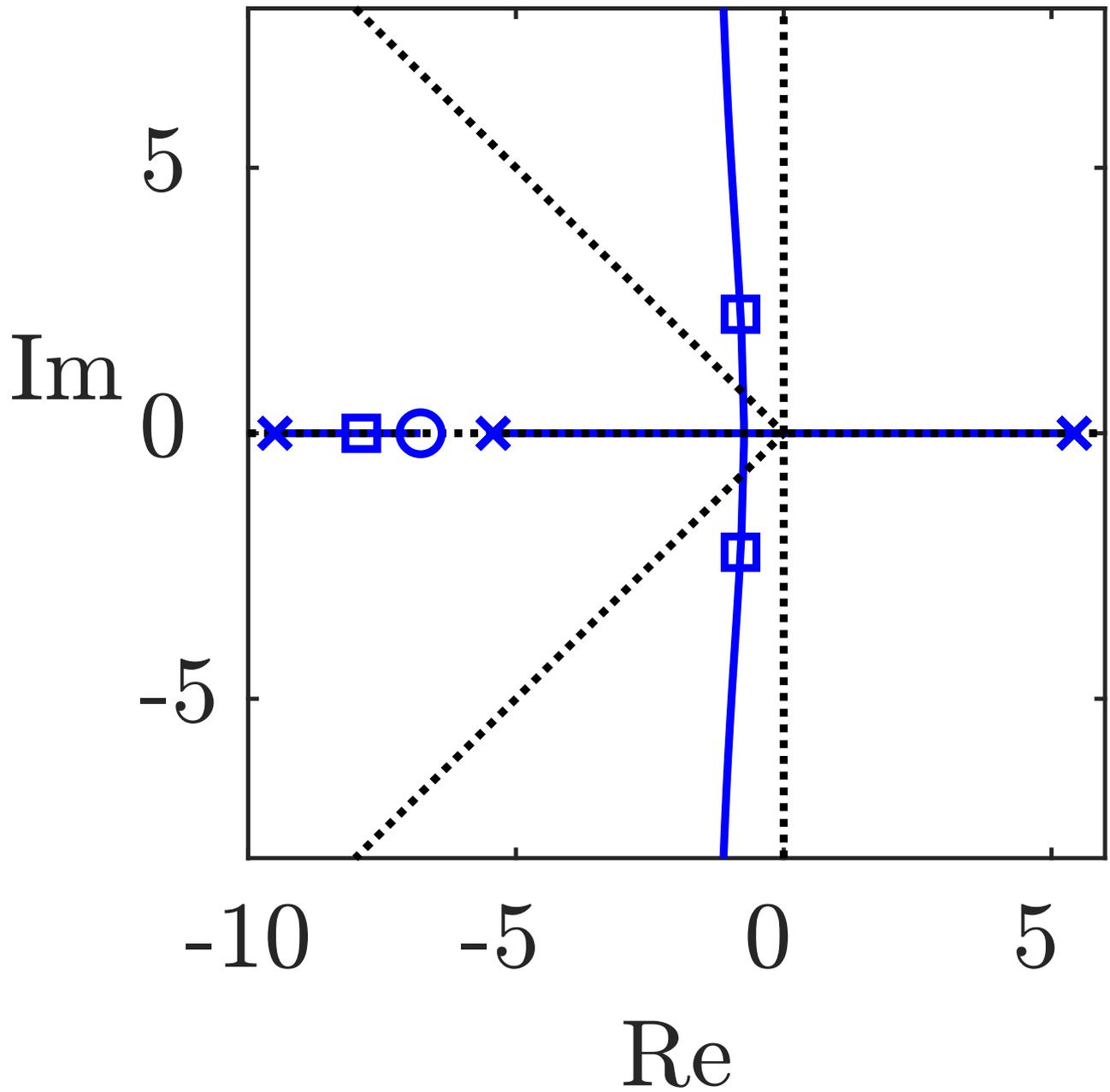


Abb. 10.21: Wurzelortskurve bei ungenauer Kompensation des Regelstreckenpols durch die Nullstelle des Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

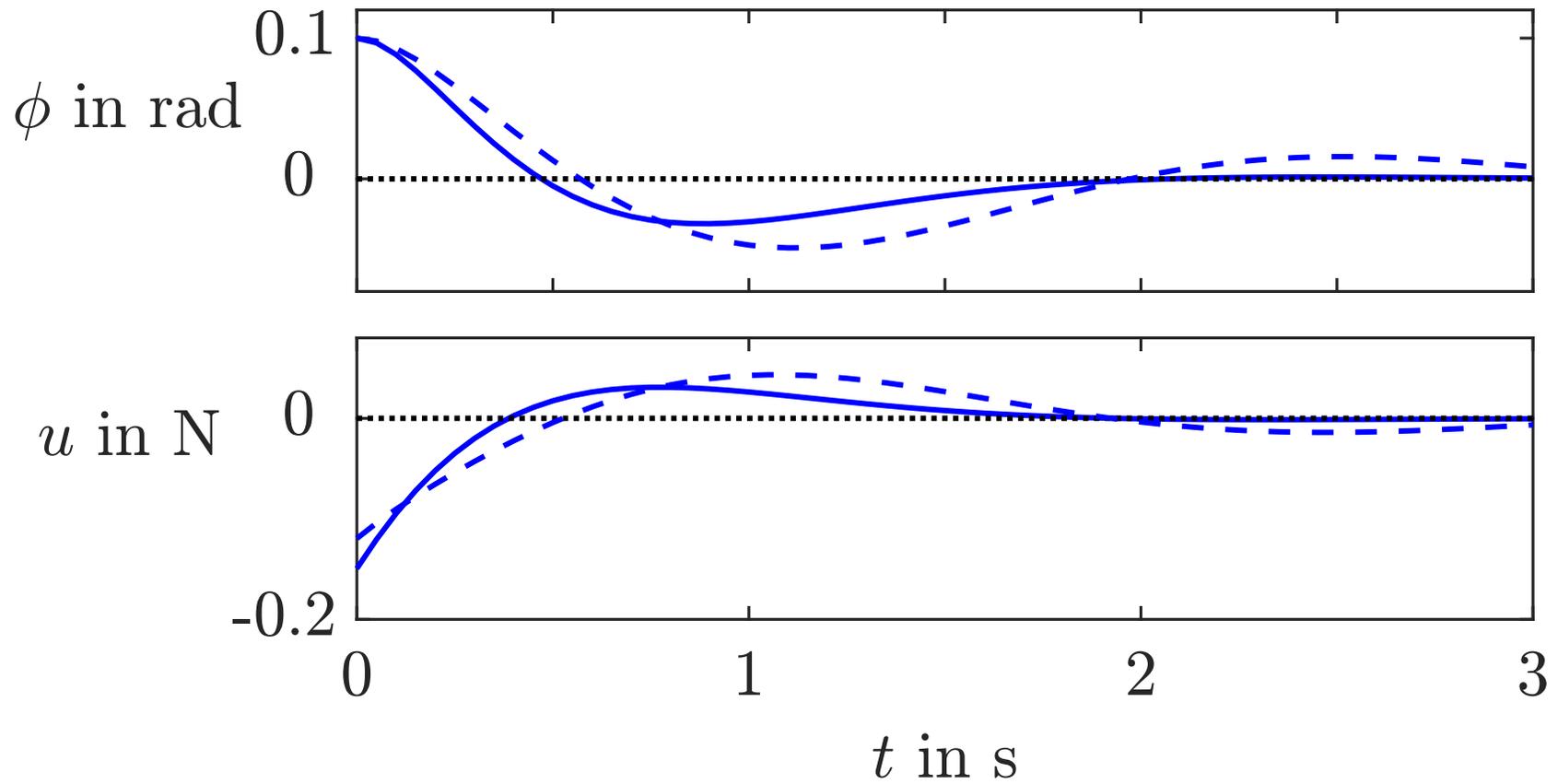


Abb. 10.22. Eigenbewegung des Regelkreises bei $\phi(0) = 0,1$ rad

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

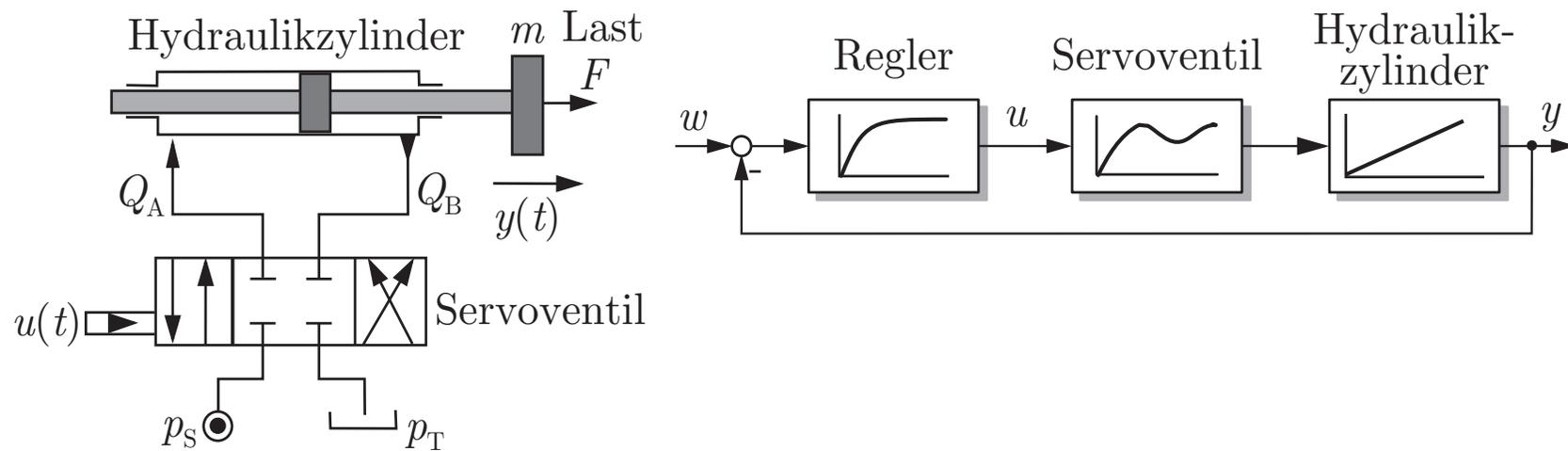


Abb. 10.23. Hydraulischer Schaltplan und Regelkreis des Ruderstellsystems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

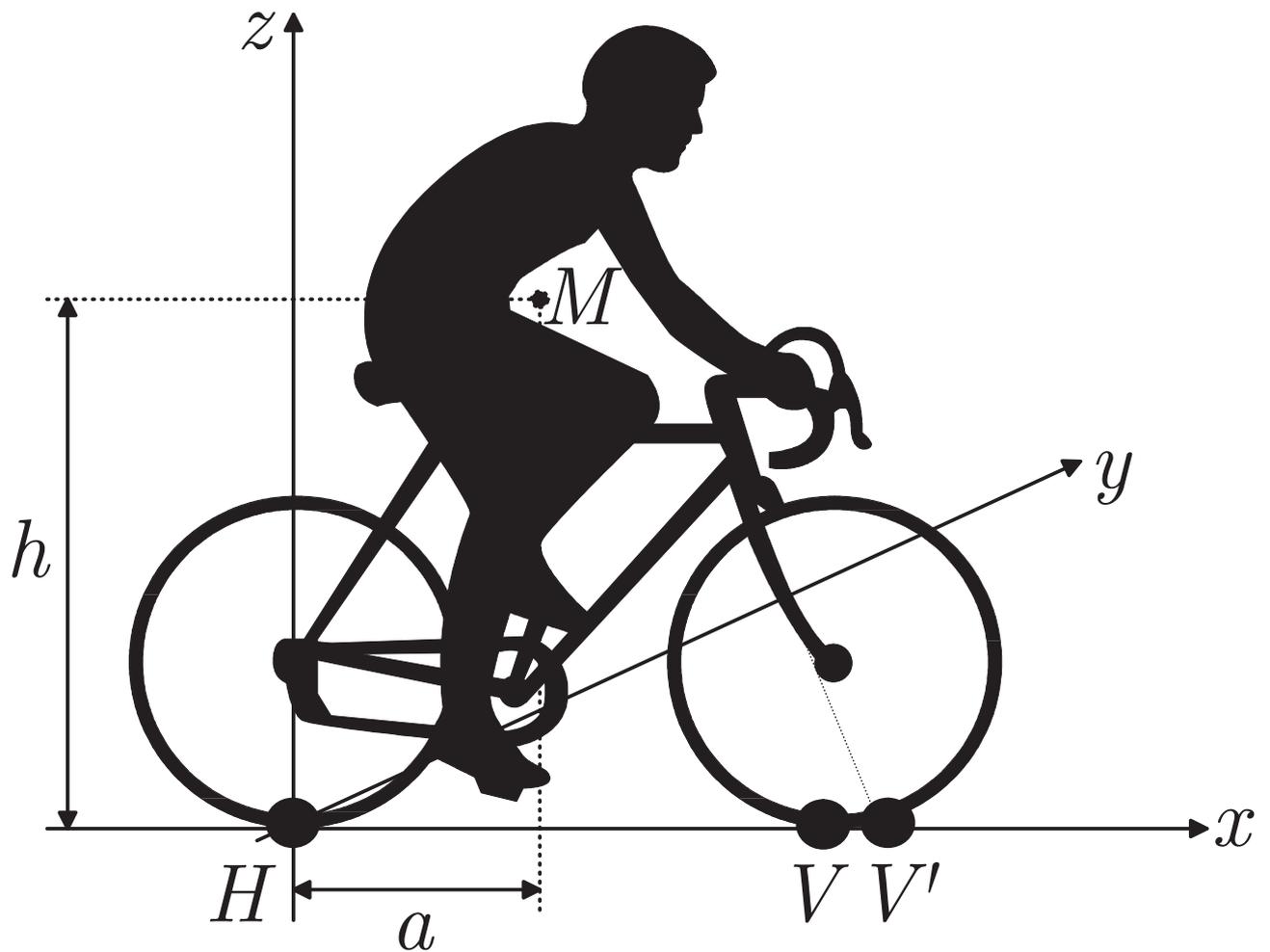


Abb. 10.24: Fahrradfahrer (links) und Fahrradkinematik in der x/y -Ebene (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

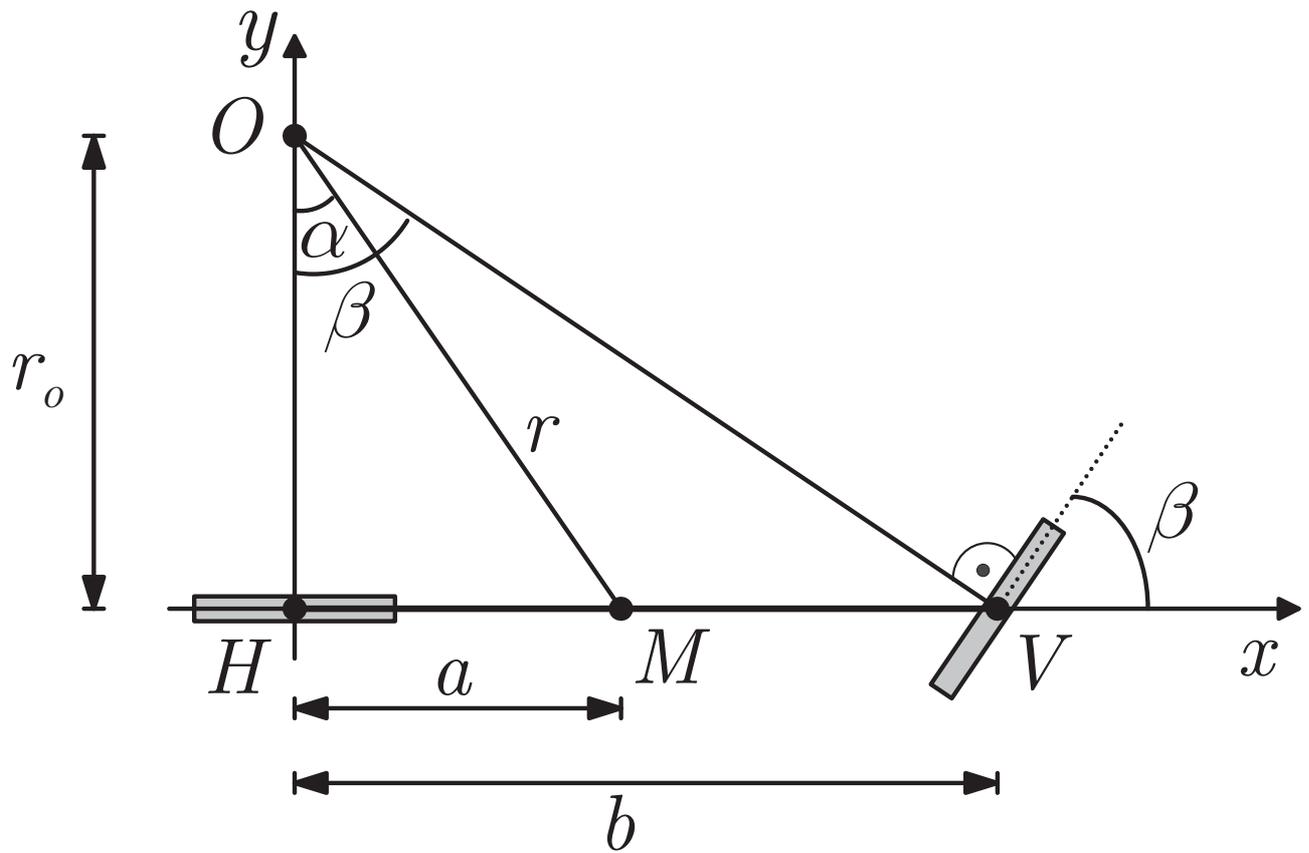


Abb. 10.24: Fahrradfahrer (links) und Fahrradkinematik in der x/y -Ebene (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

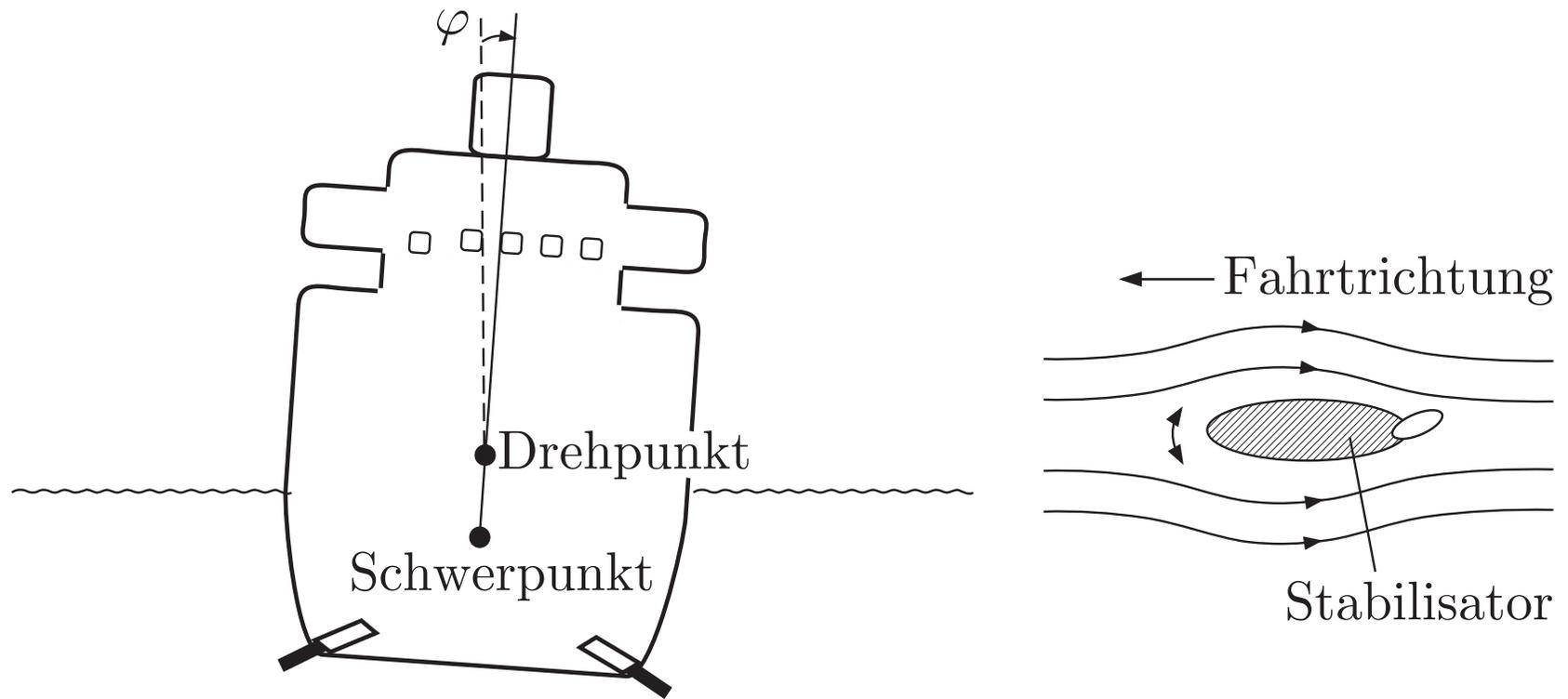


Abb. 10.25. Rollbewegung eines Schiffes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

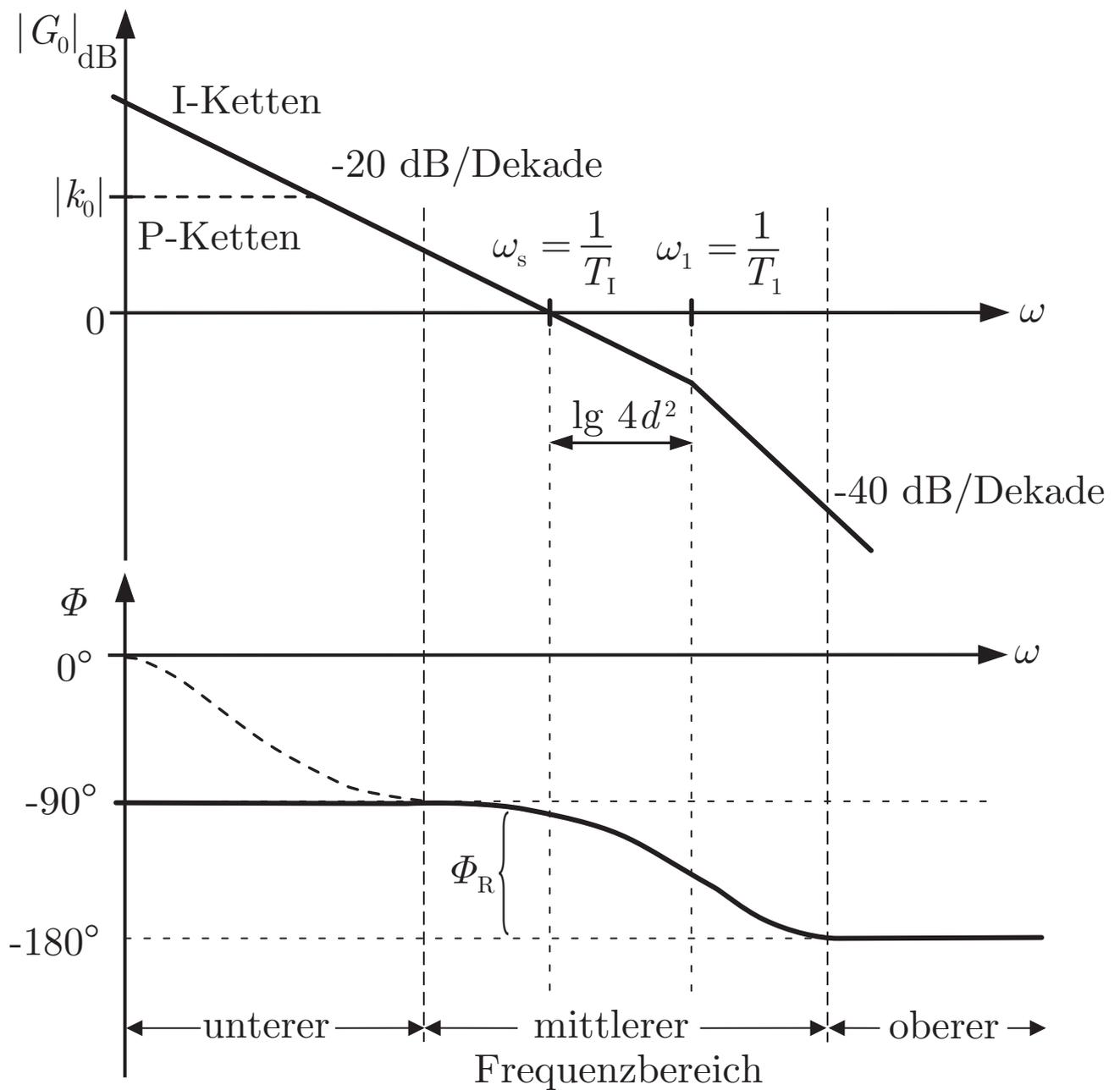


Abb. 11.1: Bodediagramm der offenen Kette Σ_0

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

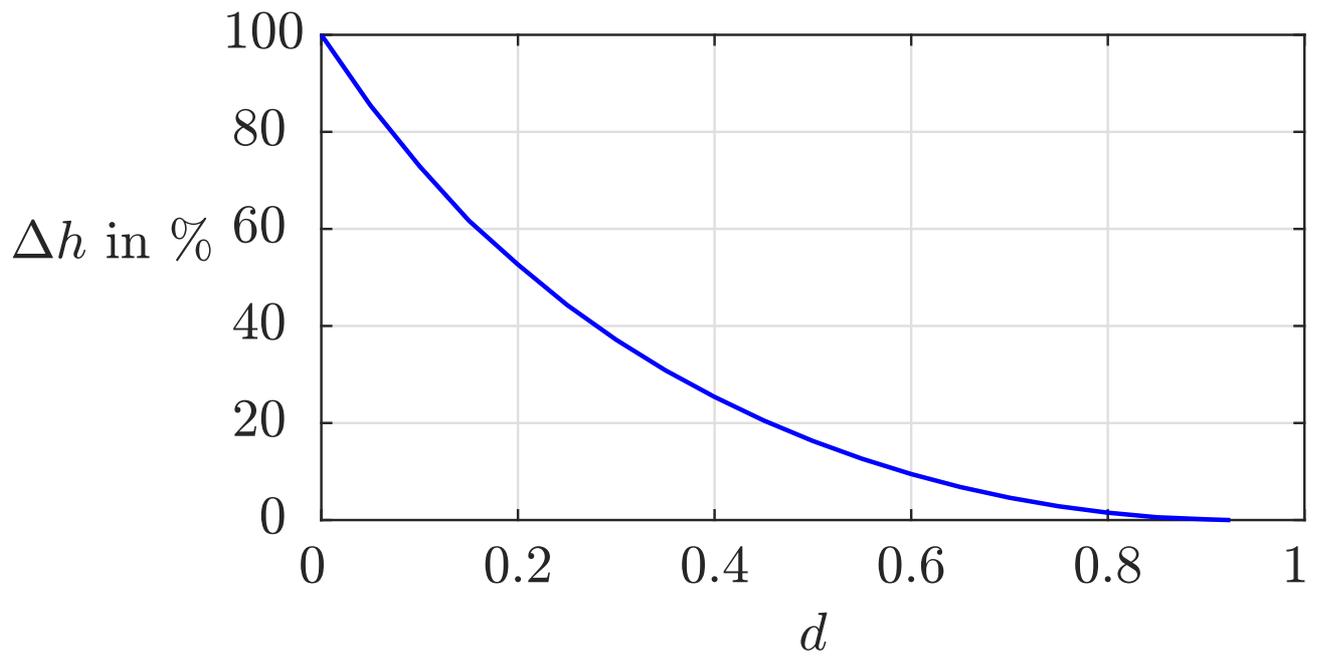


Abb. 11.2: Abhängigkeit der Überschwingweite Δh von der Dämpfung d

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

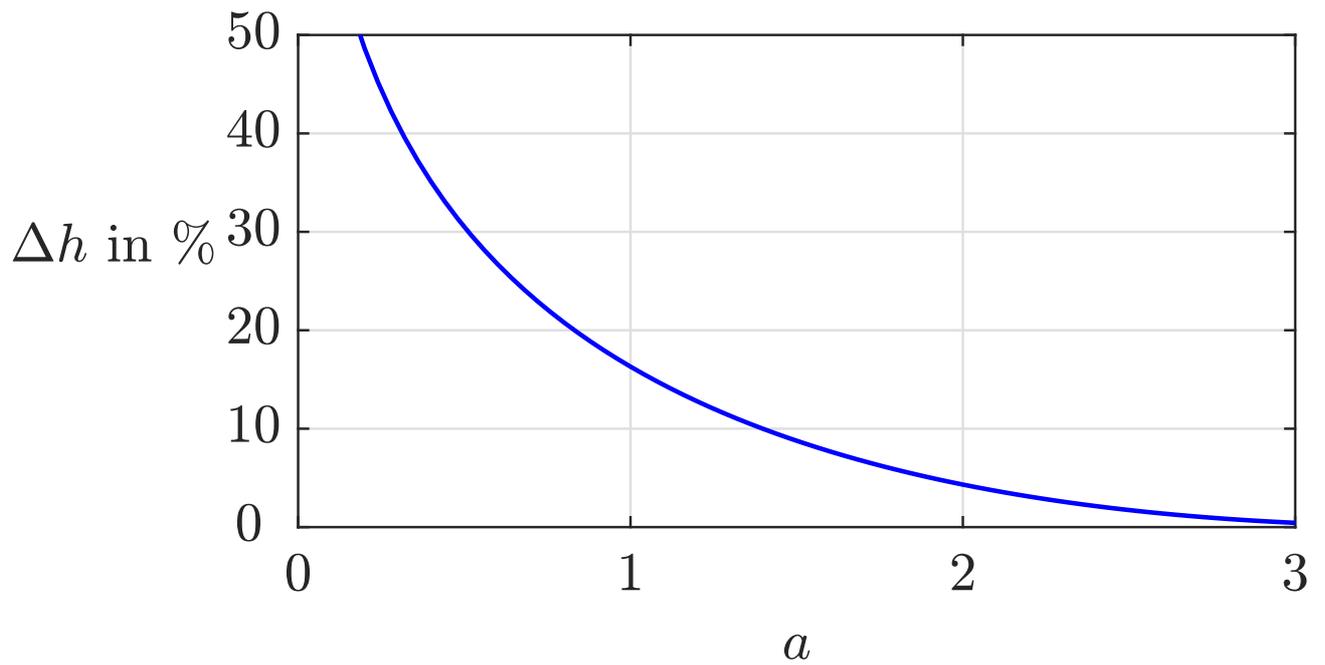


Abb. 11.3: Abhängigkeit der Überschwingweite Δh vom Einstellfaktor a

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

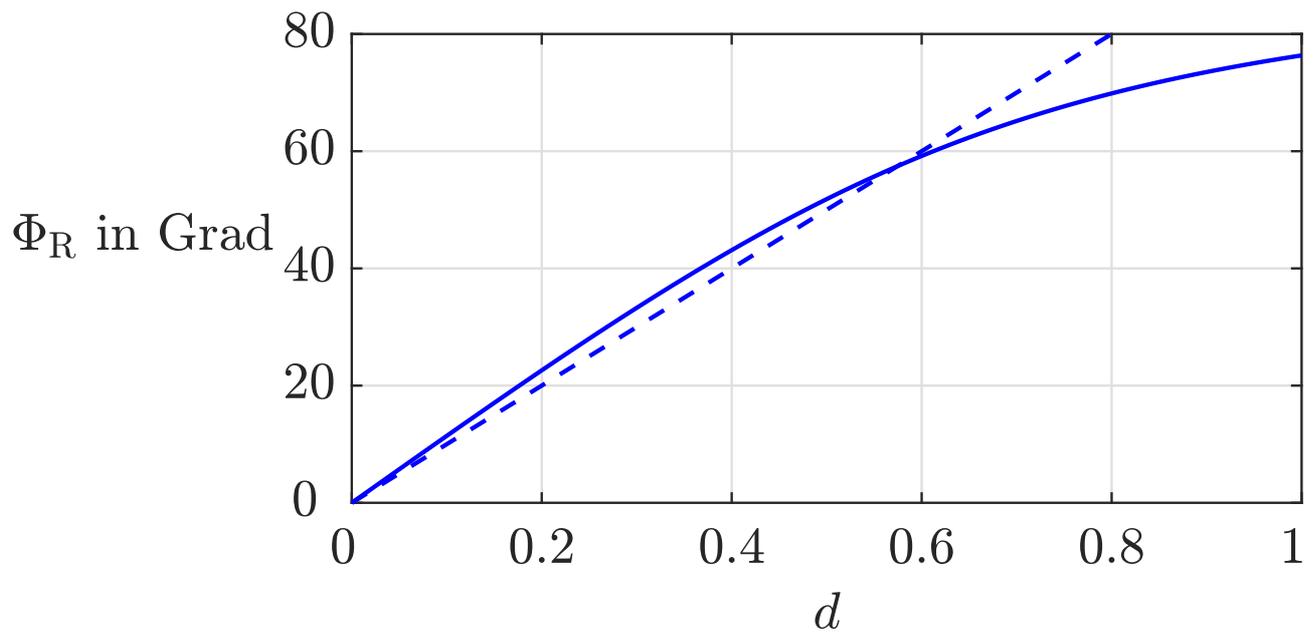


Abb. 11.4: Zusammenhang zwischen Phasenrand Φ_R und Dämpfung d

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

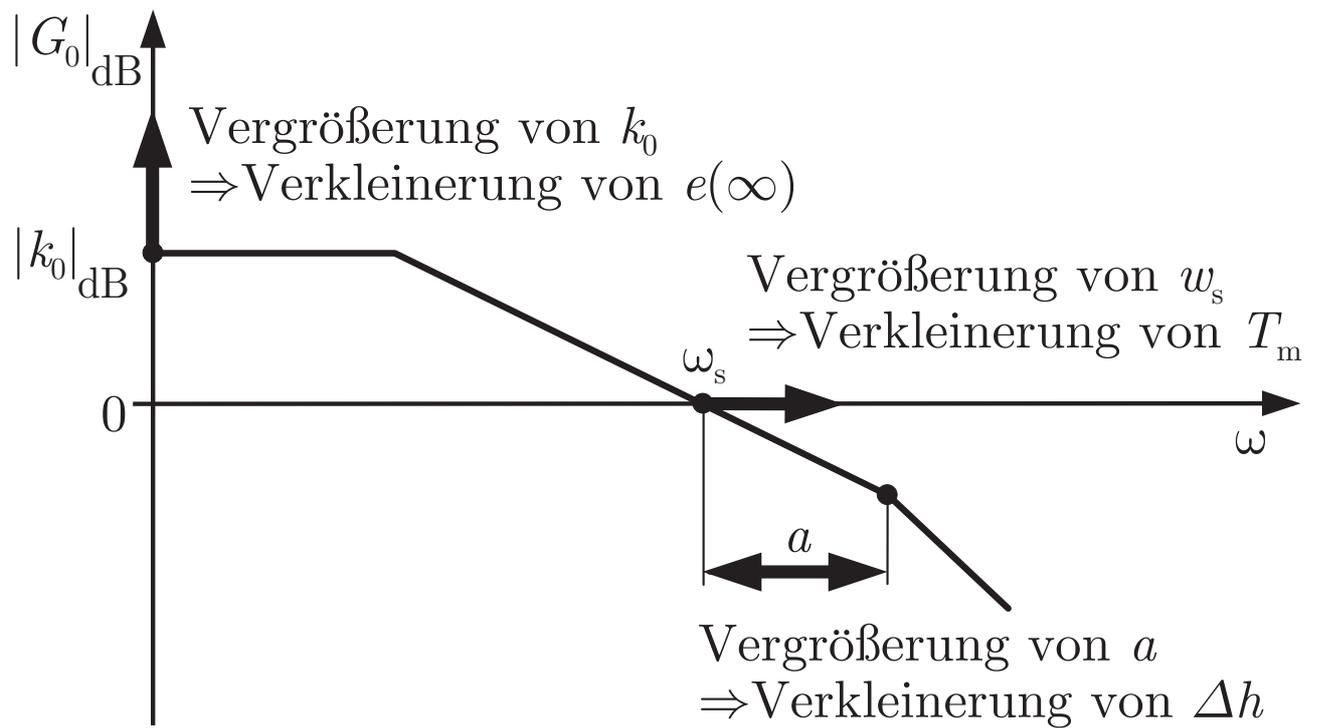


Abb. 11.5: Zusammenfassung der Entwurfskriterien

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

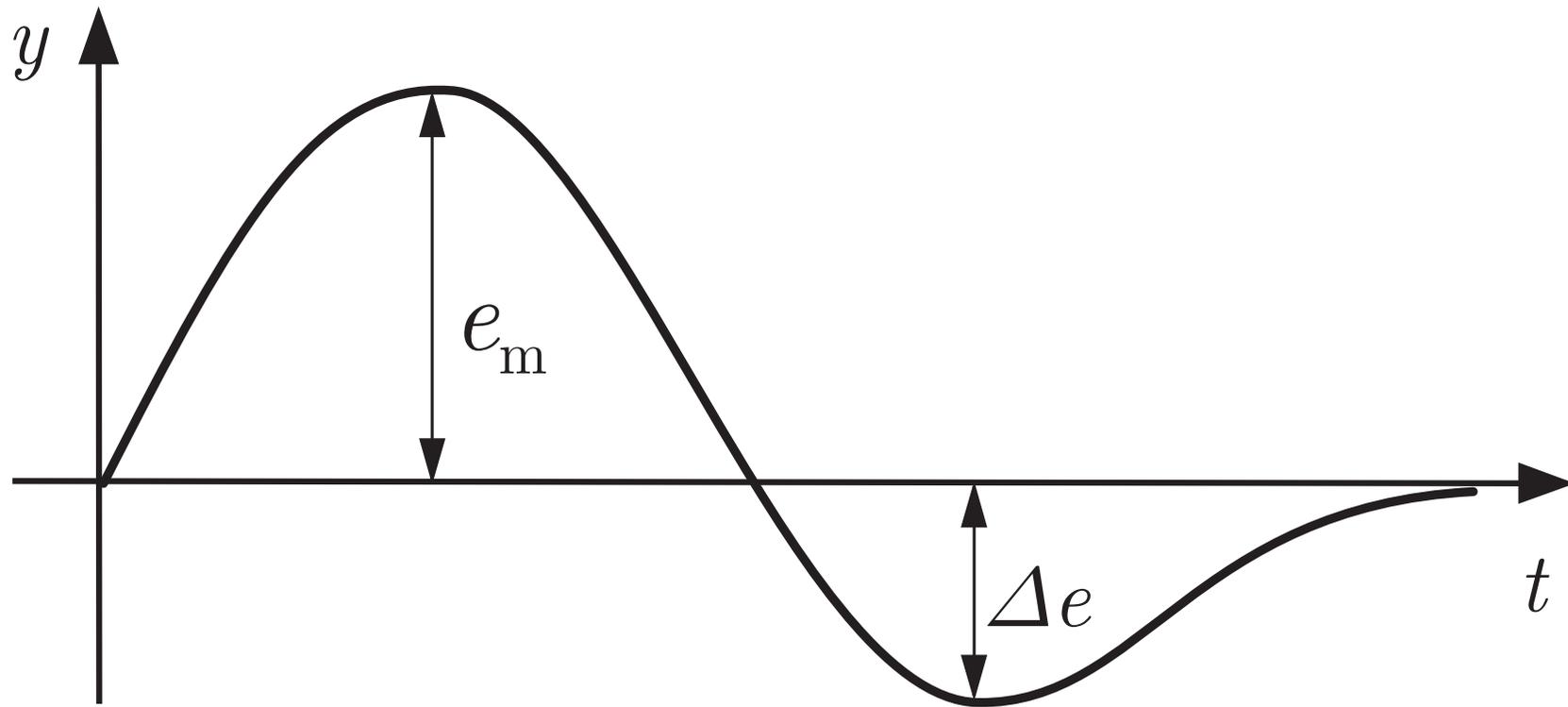


Abb. 11.6. Störverhalten des Regelkreises bei verzögerter Störung am Streckenausgang

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

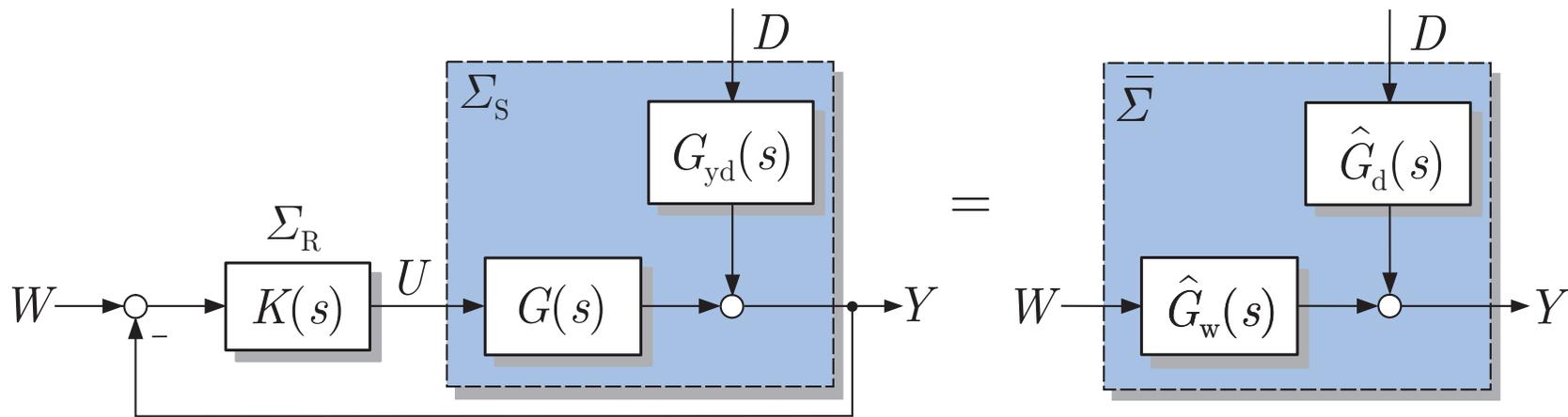


Abb. 11.7. Regelkreis $\bar{\Sigma}$ mit der auf den Ausgang der Regelstrecke transformierten Störung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

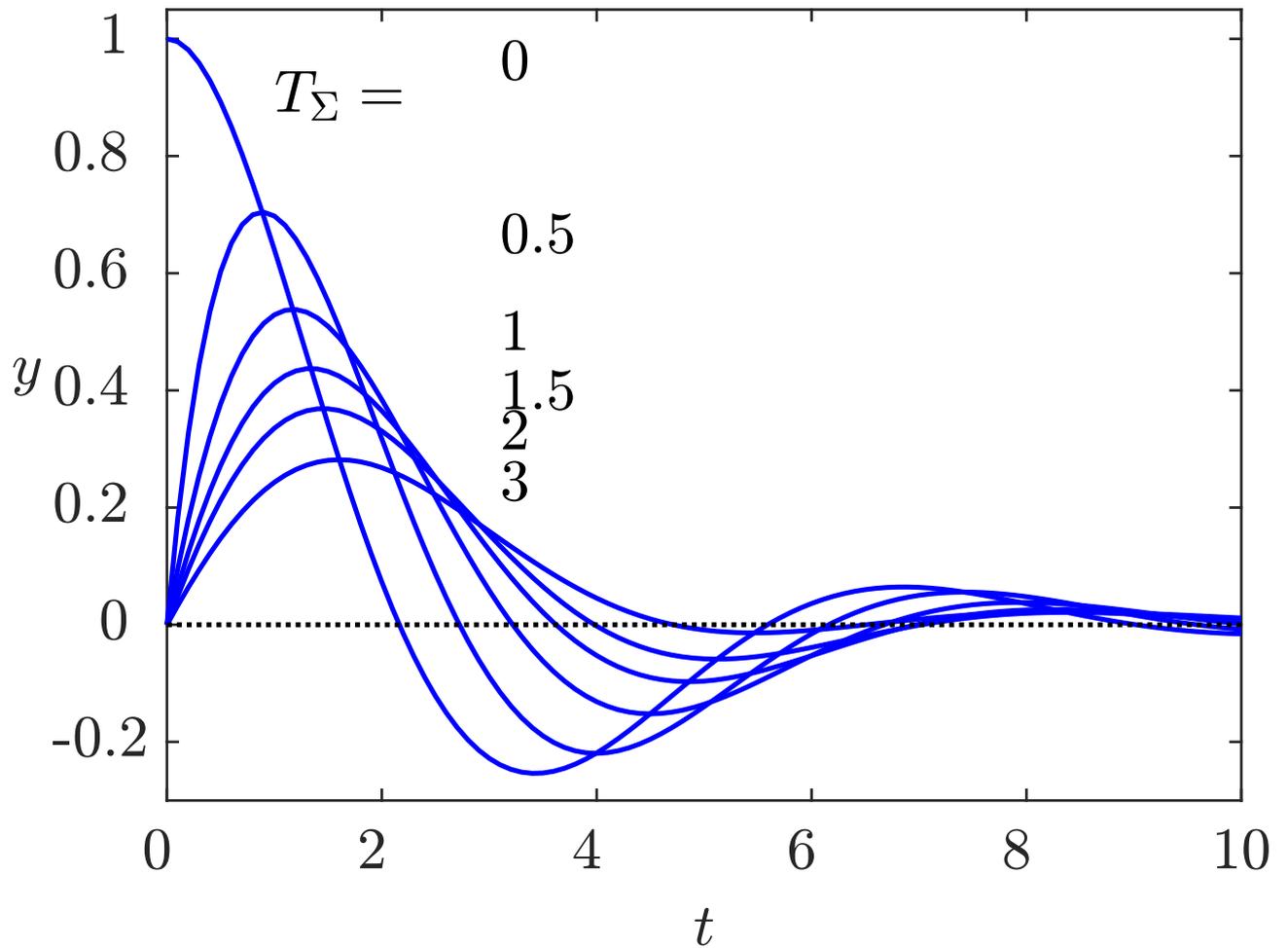


Abb. 11.8: Störübergangsfunktion bei verzögerter Störung ($d = 0,4$, $T = 1$, $k_{yd} = 1$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

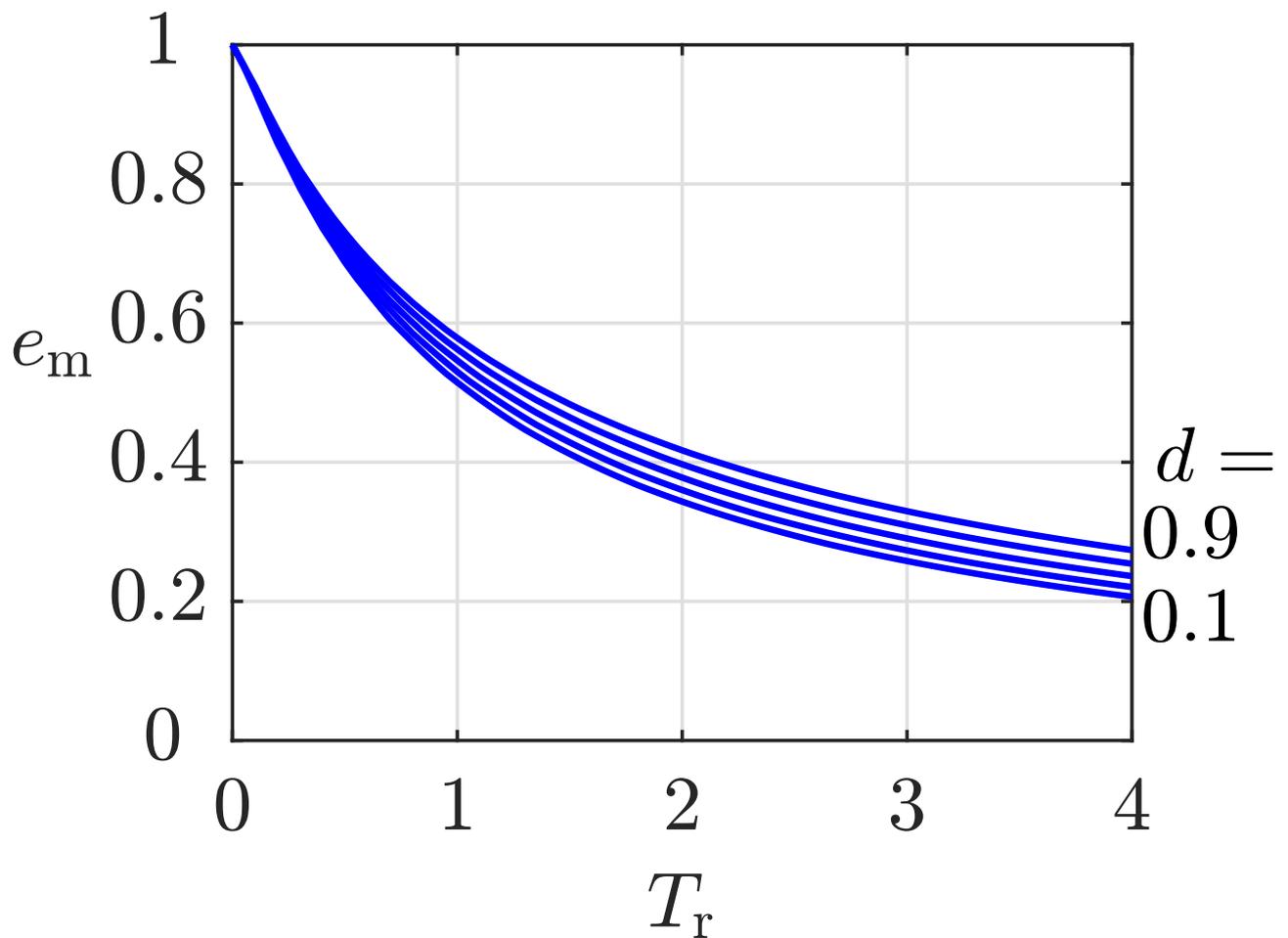


Abb. 11.9: e_m und Δe in Abhängigkeit von $T_r = \frac{T_\Sigma}{T}$ und dem Parameter d bei $k_{yd} = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

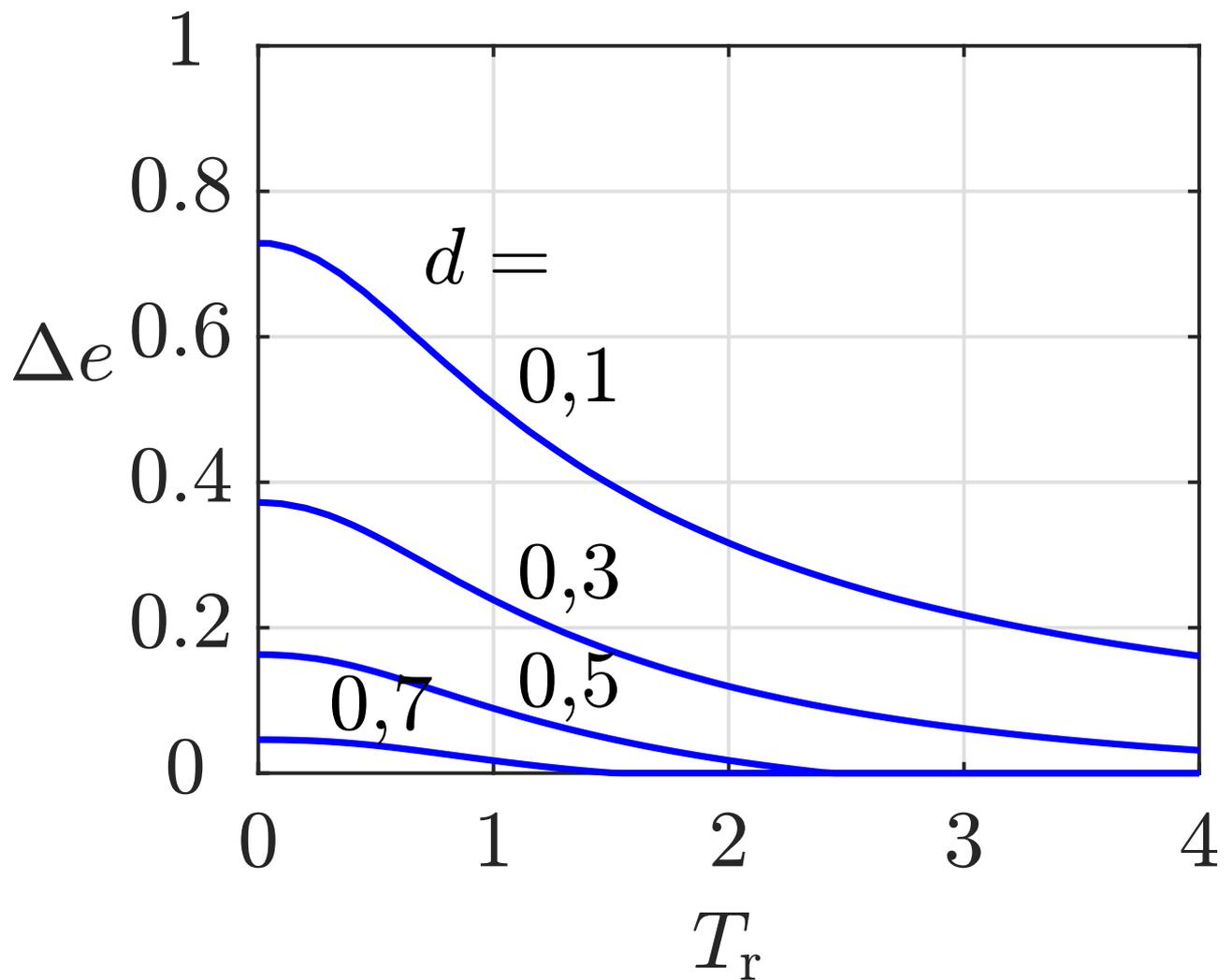


Abb. 11.9: e_m und Δe in Abhängigkeit von $T_r = \frac{T_\Sigma}{T}$ und dem Parameter d bei $k_{yd} = 1$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

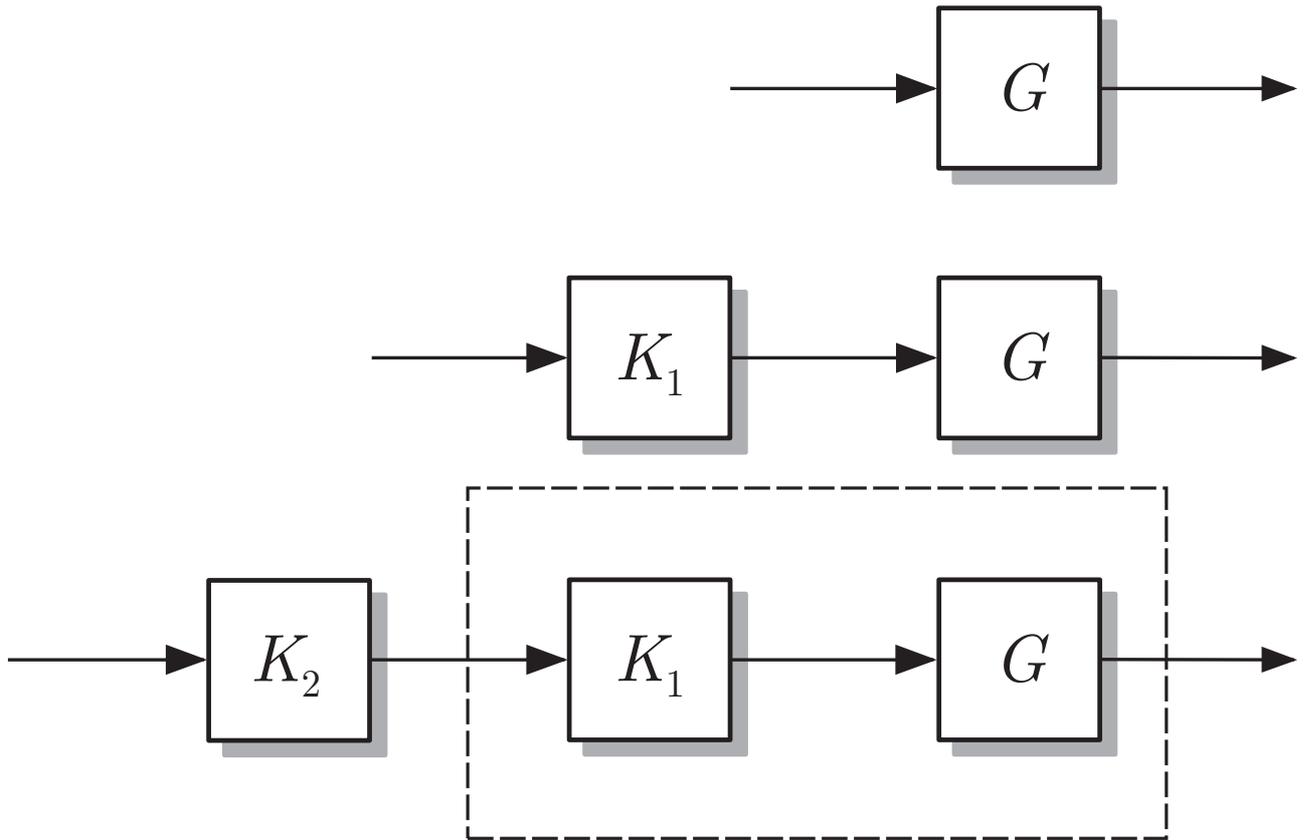


Abb. 11.10: Entwurfsschritte

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

Regler bzw. Korrekturglied	Übertragungsfunktion	Bodediagramm
PD (ideal)	$k_p (T_D s + 1)$	
PI	$k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$	
PID	$k_p \frac{(T_{D1} s + 1)(T_{D2} s + 1)}{T_I s}$ $T_{D2} < T_{D1}$	
phasenabsenkendes Korrekturglied	$\frac{T_D s + 1}{T s + 1}$ $T > T_D$	
phasenanhebendes Korrekturglied	$\frac{T_D s + 1}{T s + 1}$ $T < T_D$	

Abb. 11.11: Frequenzkennlinien wichtiger Regler und Korrekturglieder

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

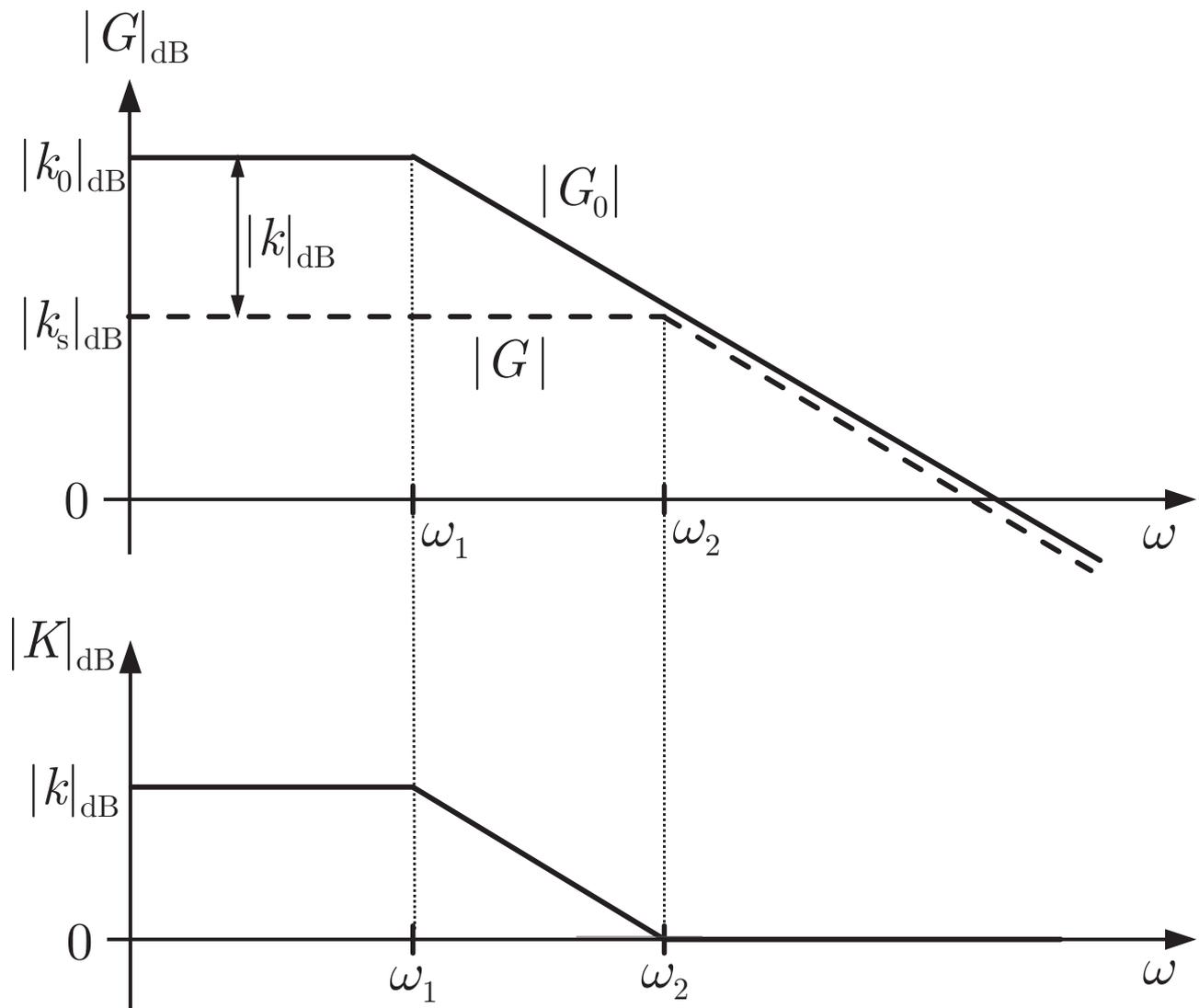


Abb. 11.12: Verbesserung des statischen Verhaltens mit Hilfe eines integrierenden Korrekturgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

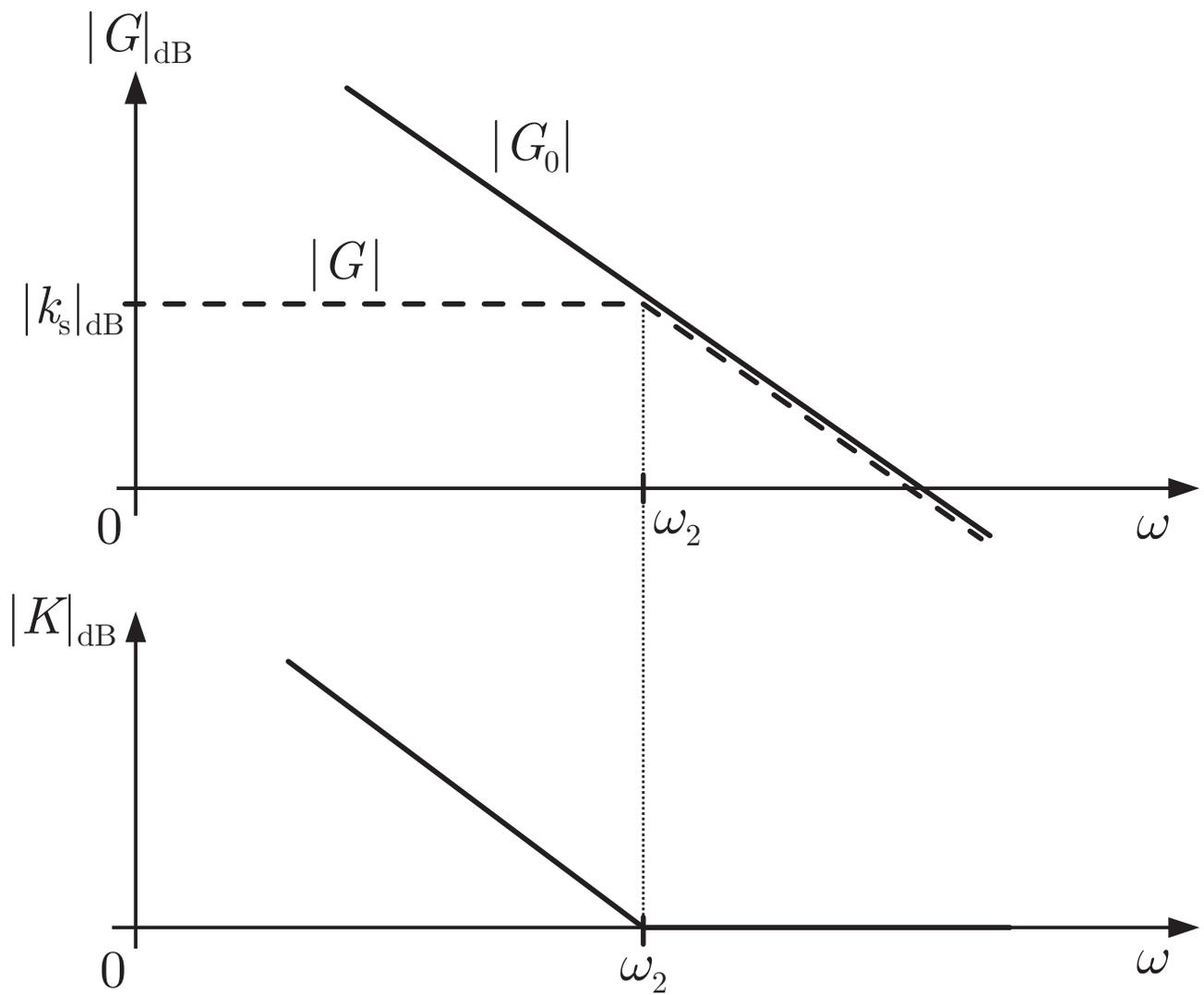


Abb. 11.13: Verbesserung des statischen Verhaltens durch Verwendung eines PI-Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

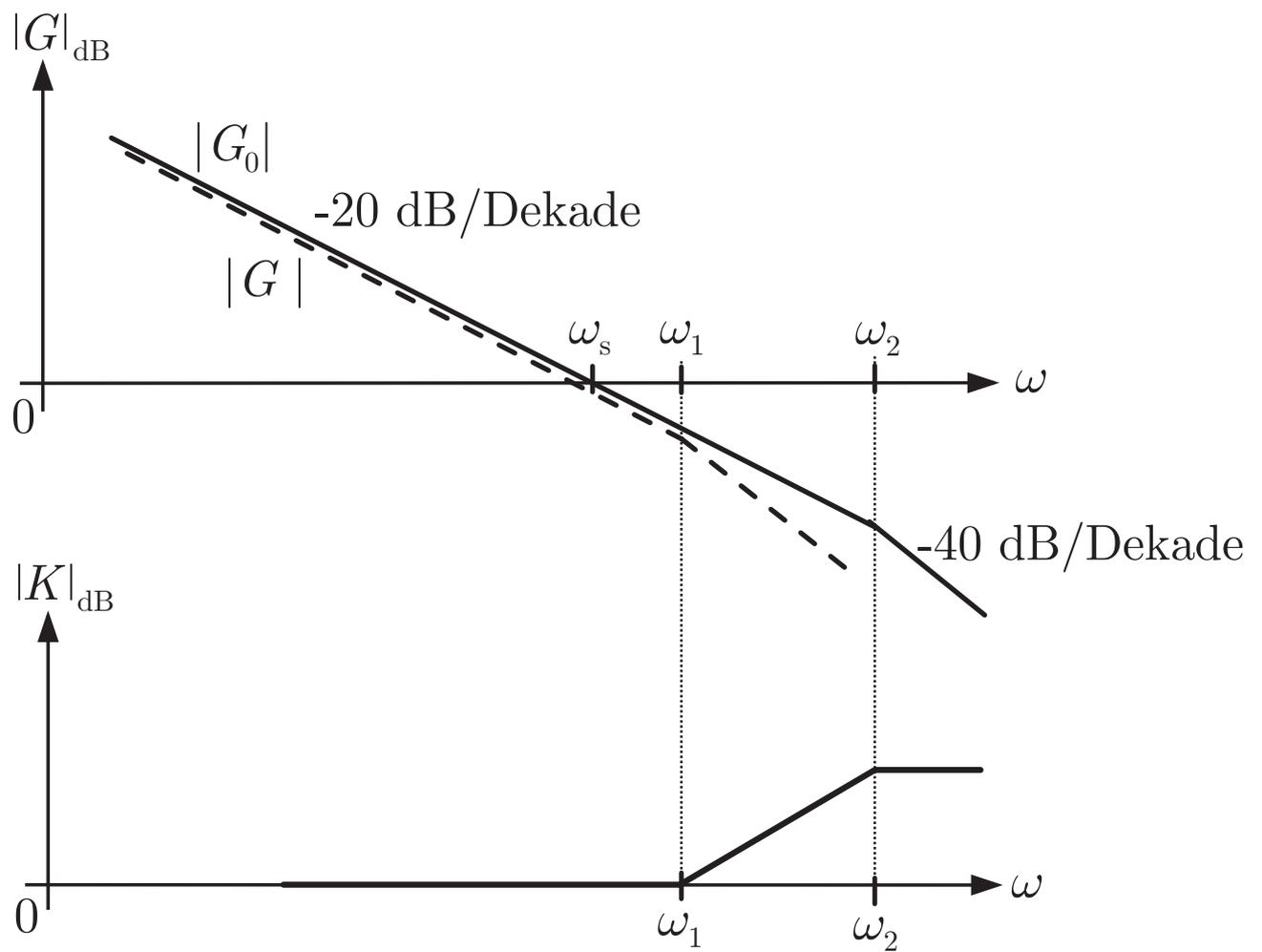


Abb. 11.14: Verbesserung des Übergangsverhaltens mit Hilfe eines differenzierenden Korrekturgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

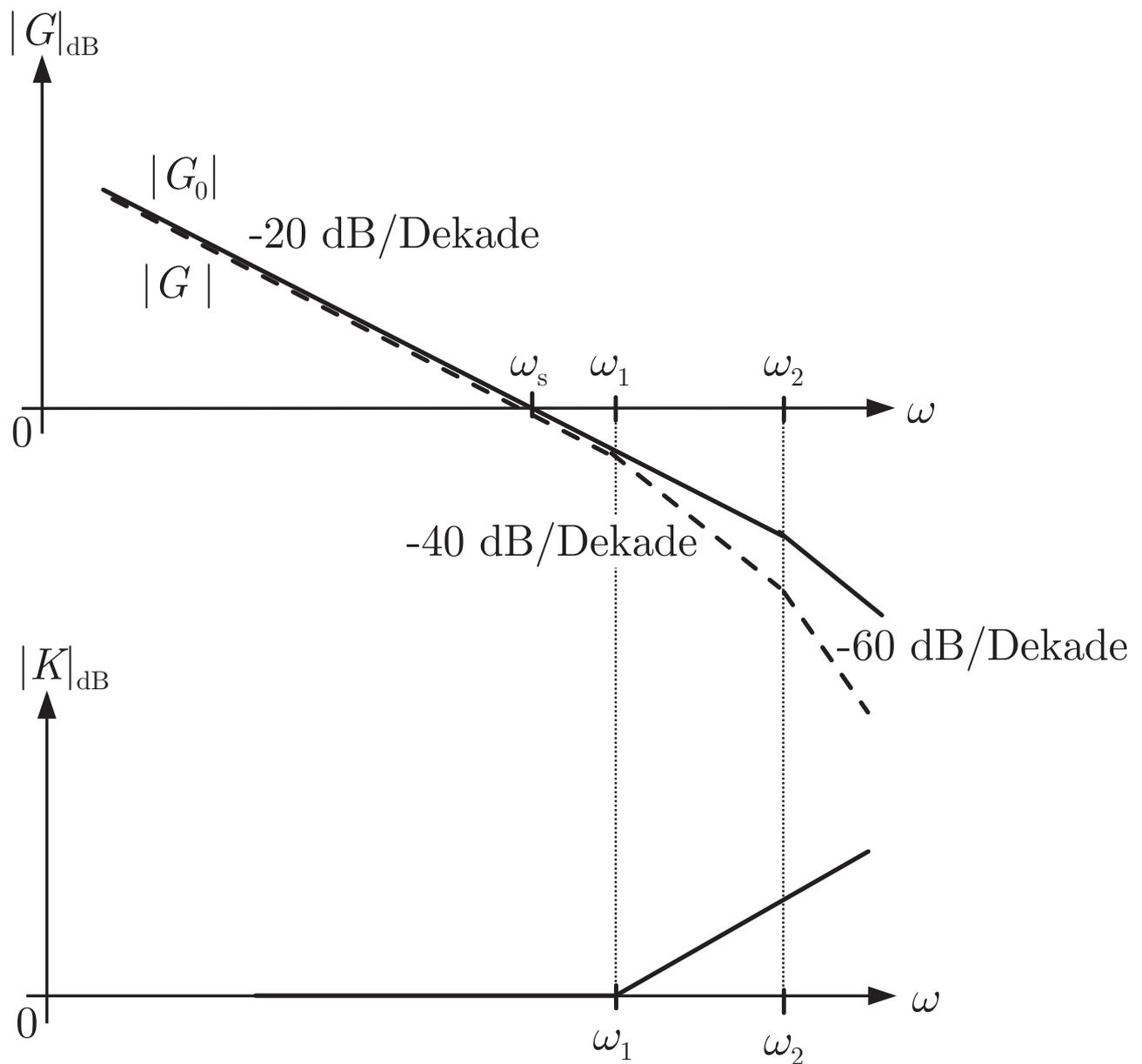


Abb. 11.15: Verbesserung des Übergangsverhaltens durch Verwendung eines PD-Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

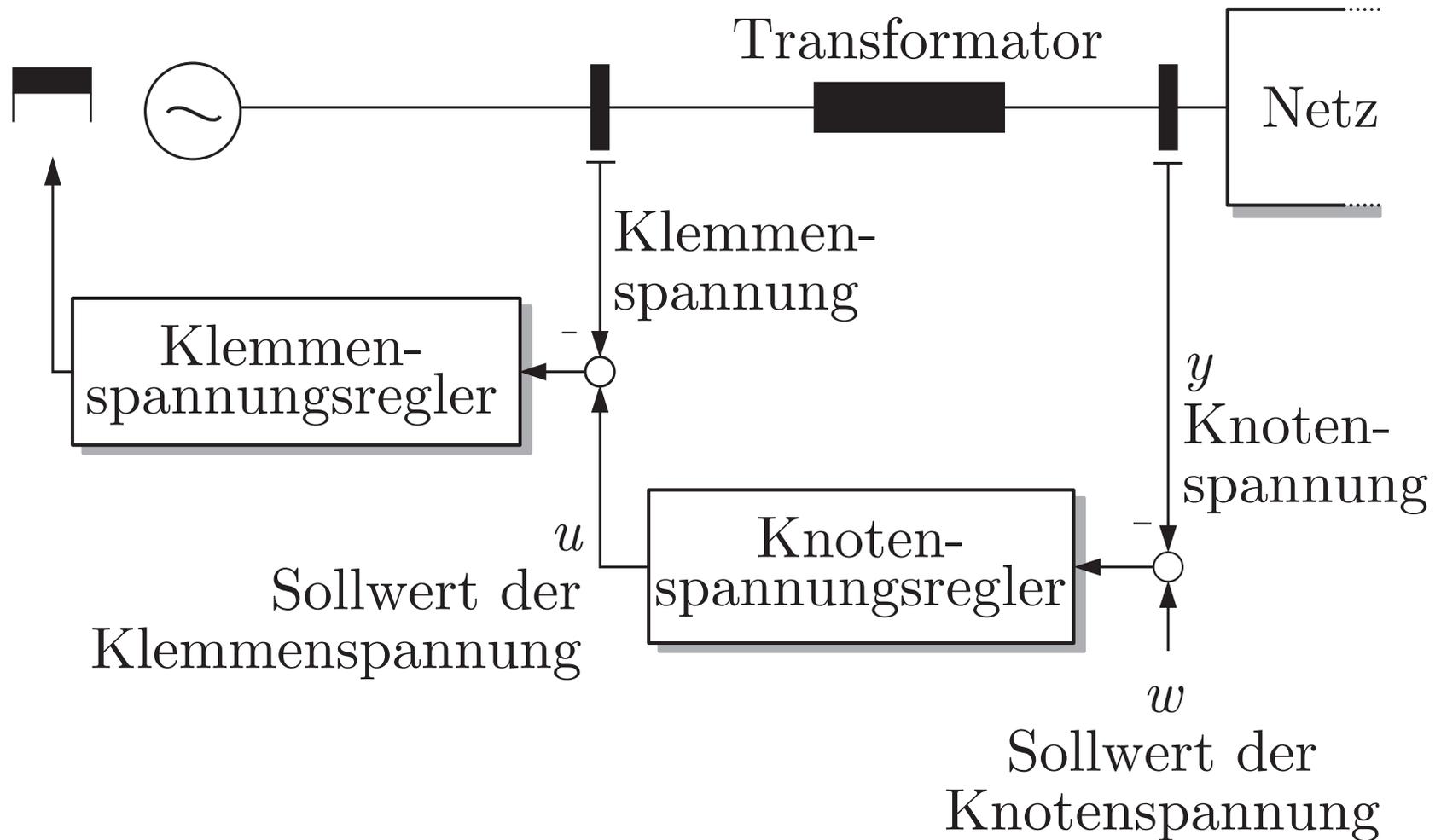


Abb. 11.16. Knotenspannungsregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

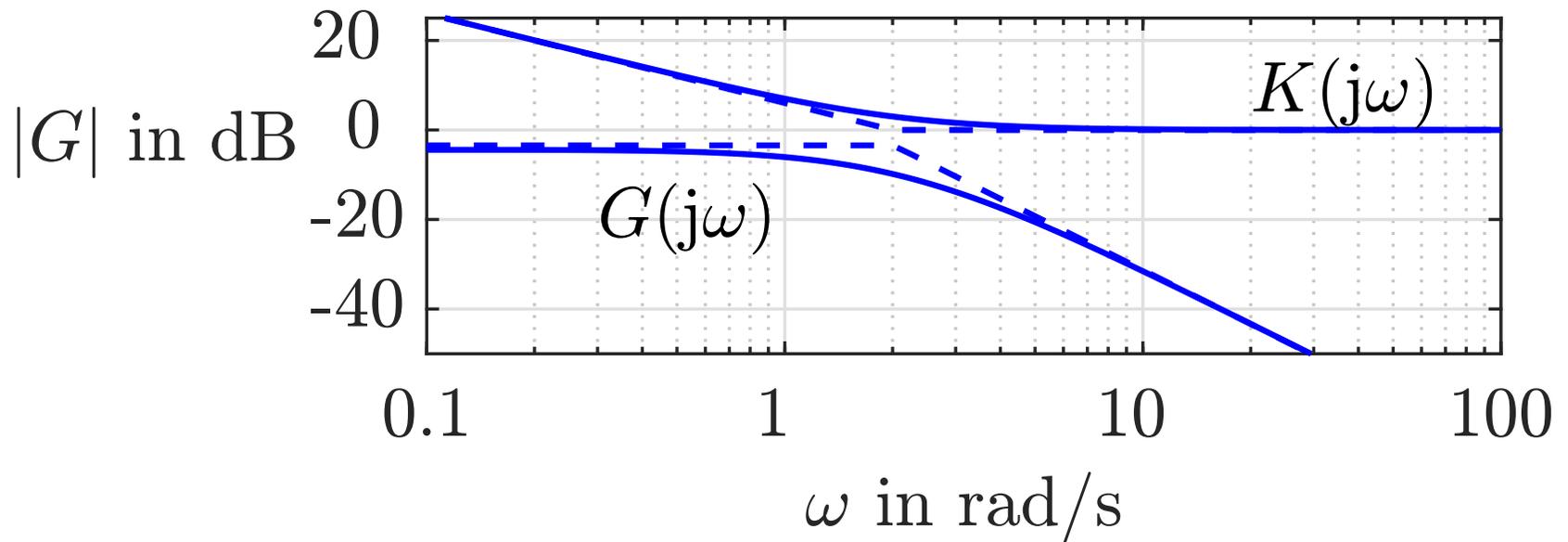


Abb. 11.17. Bodediagramm der Regelstrecke (untere Kurven) und des Reglers (obere Kurven)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

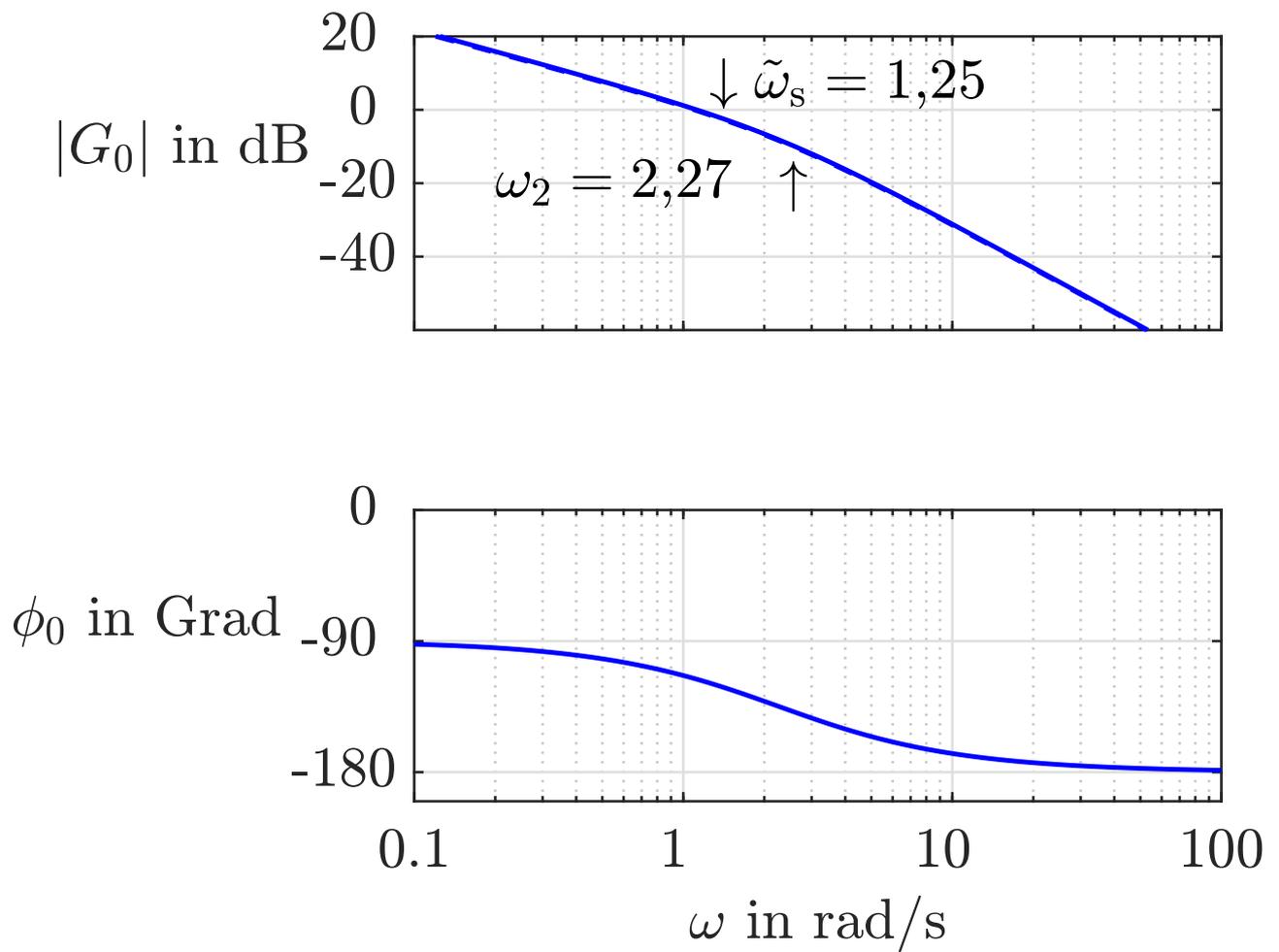


Abb. 11.18: Bodediagramm der offenen Kette mit PI-Regler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

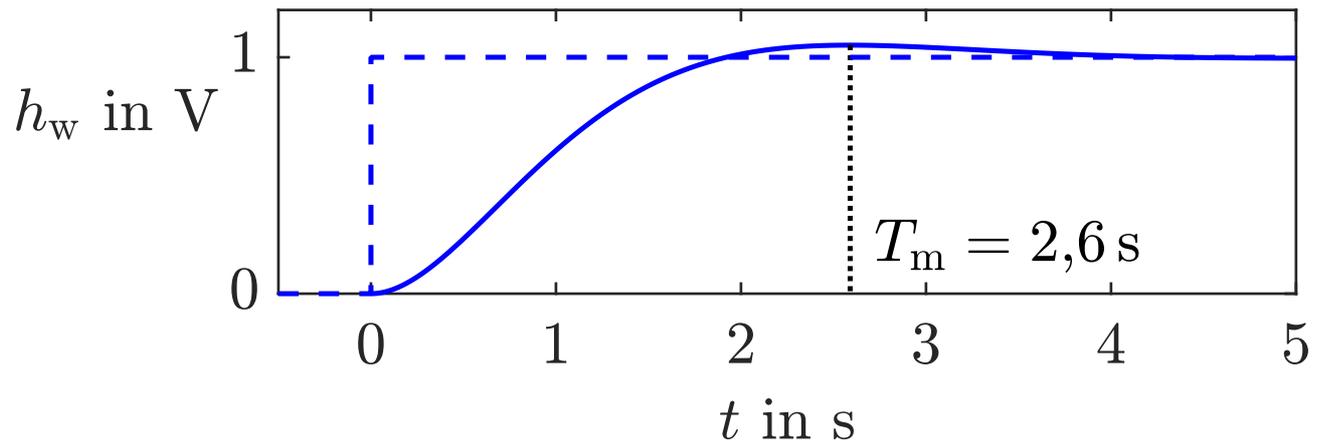


Abb. 11.19: Führungsübergangsfunktion des PI-geregelten Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

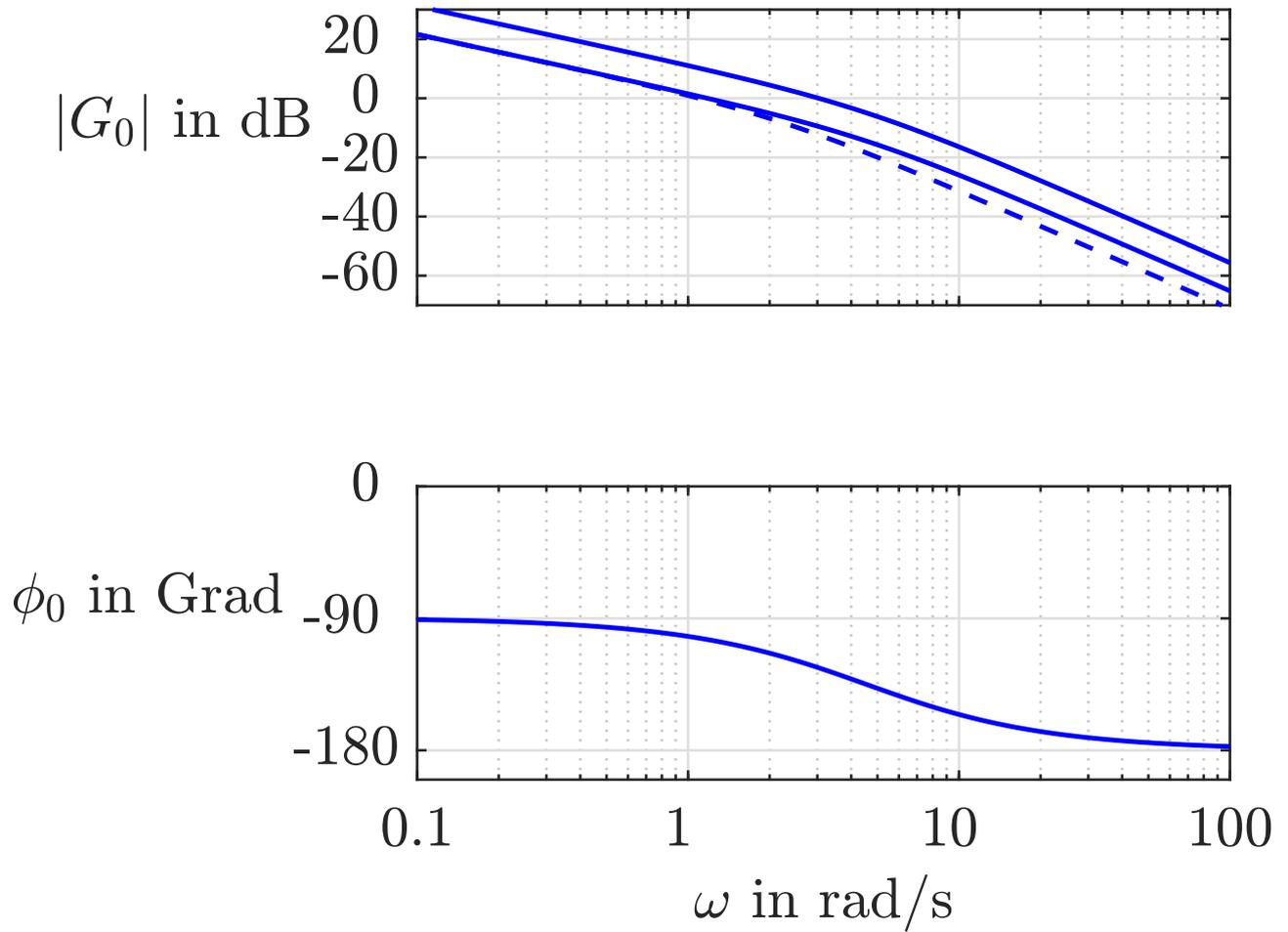


Abb. 11.20: Bodediagramm der offenen Kette mit PI-Regler und Korrekturglied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

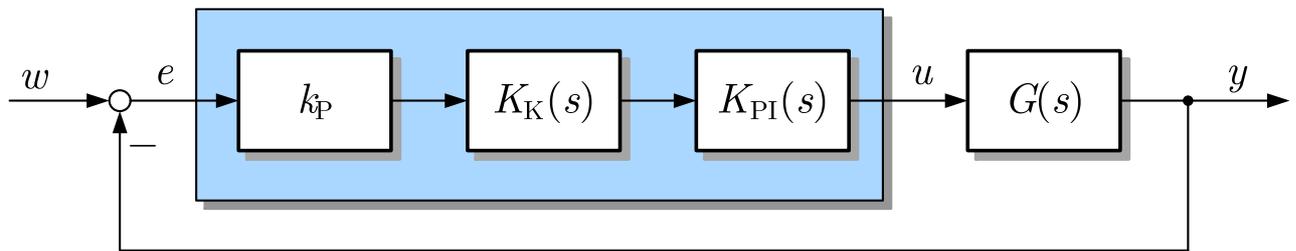


Abb. 11.21: Knotenspannungsregelkreis

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

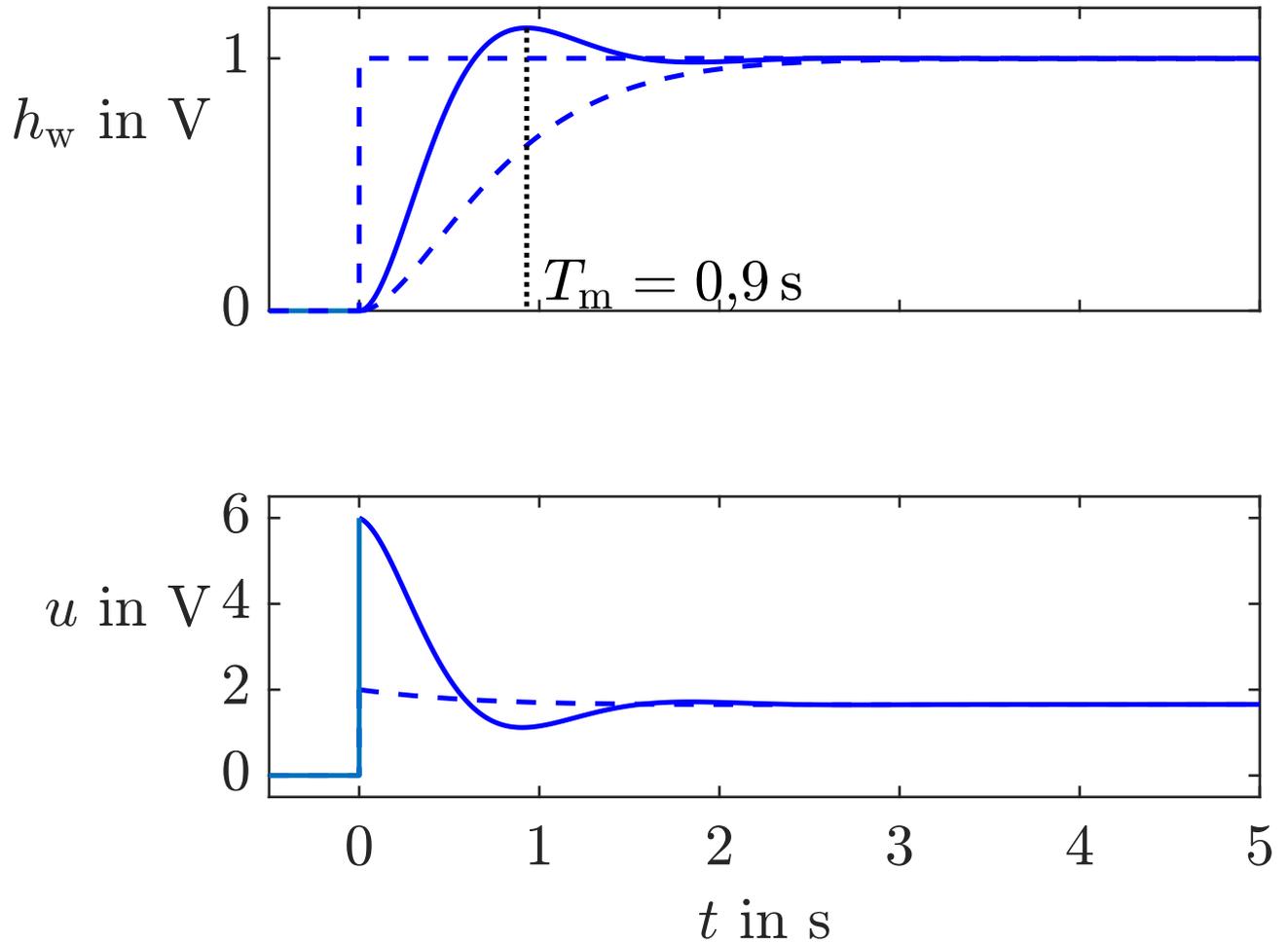


Abb. 11.22: Führungsübergangsfunktion des Regelkreises mit PI-Regler und Korrekturglied (- - -) sowie mit Korrekturglied und Verstärkungsanhebung (—)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

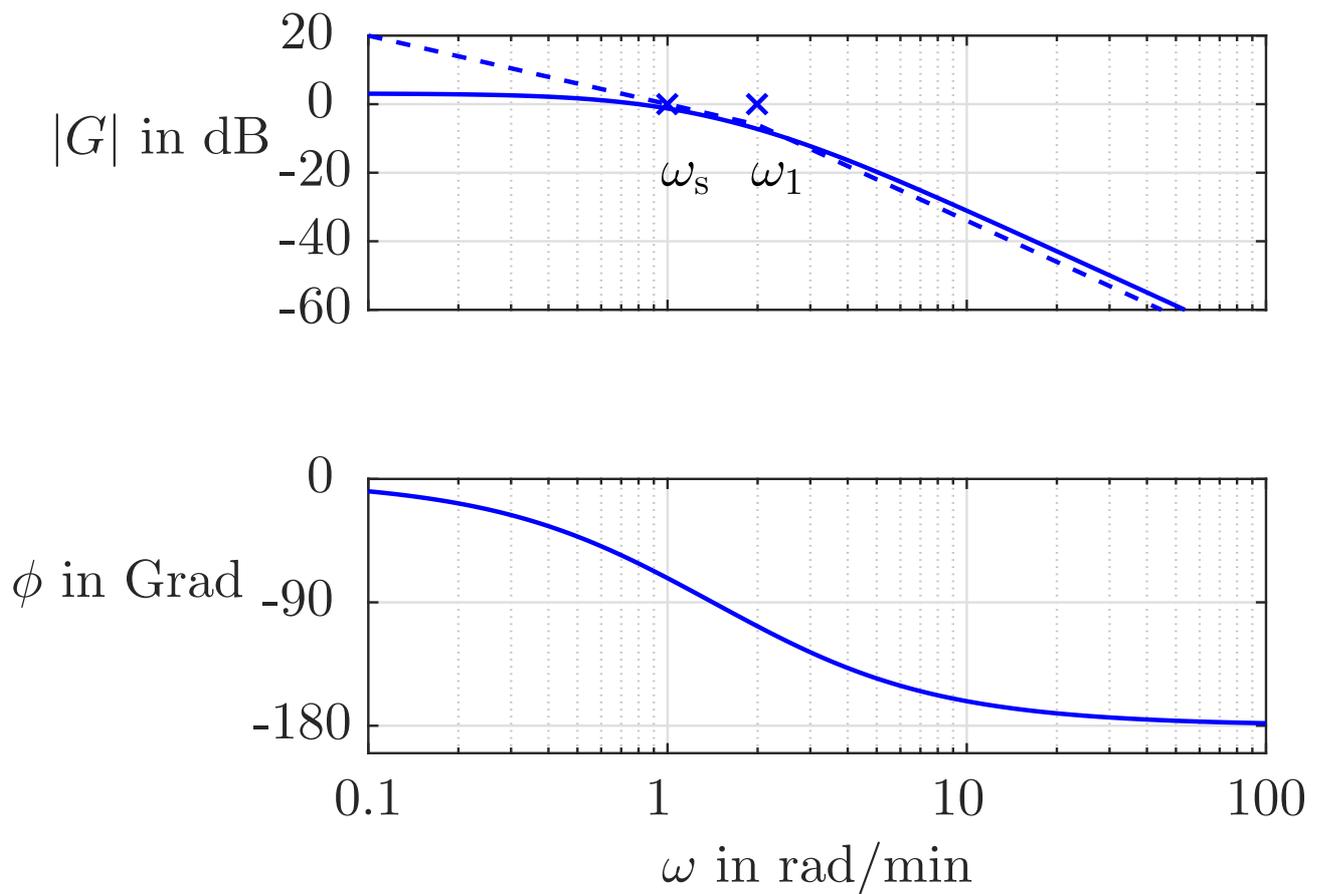


Abb. 11.23: Bodediagramm der Regelstrecke — und gewünschter Amplitudengang der offenen Kette - - -

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

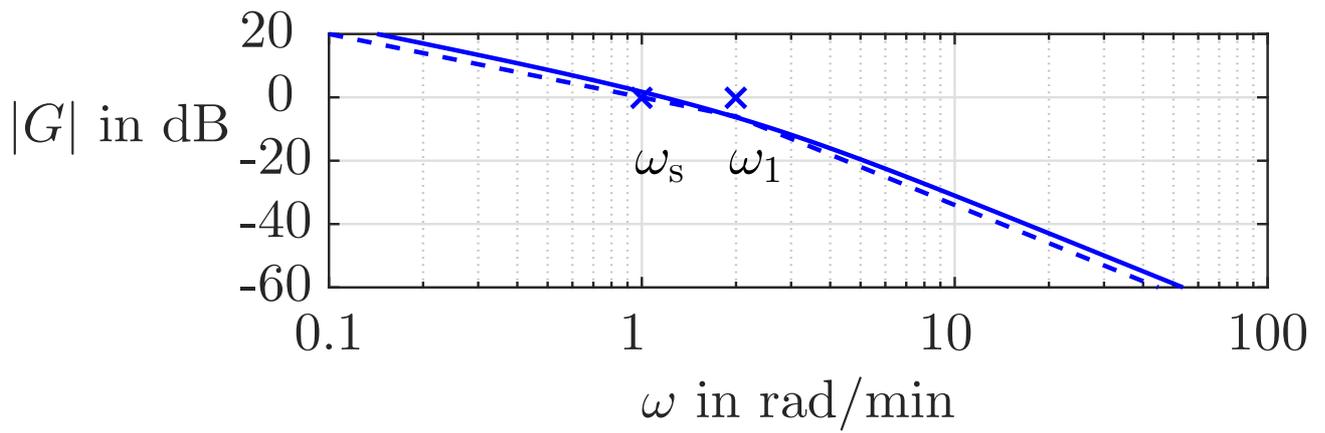


Abb. 11.24: Amplitudengang der offenen Kette mit PI-Regler (11.16) — und gewünschter Amplitudengang - -

-

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

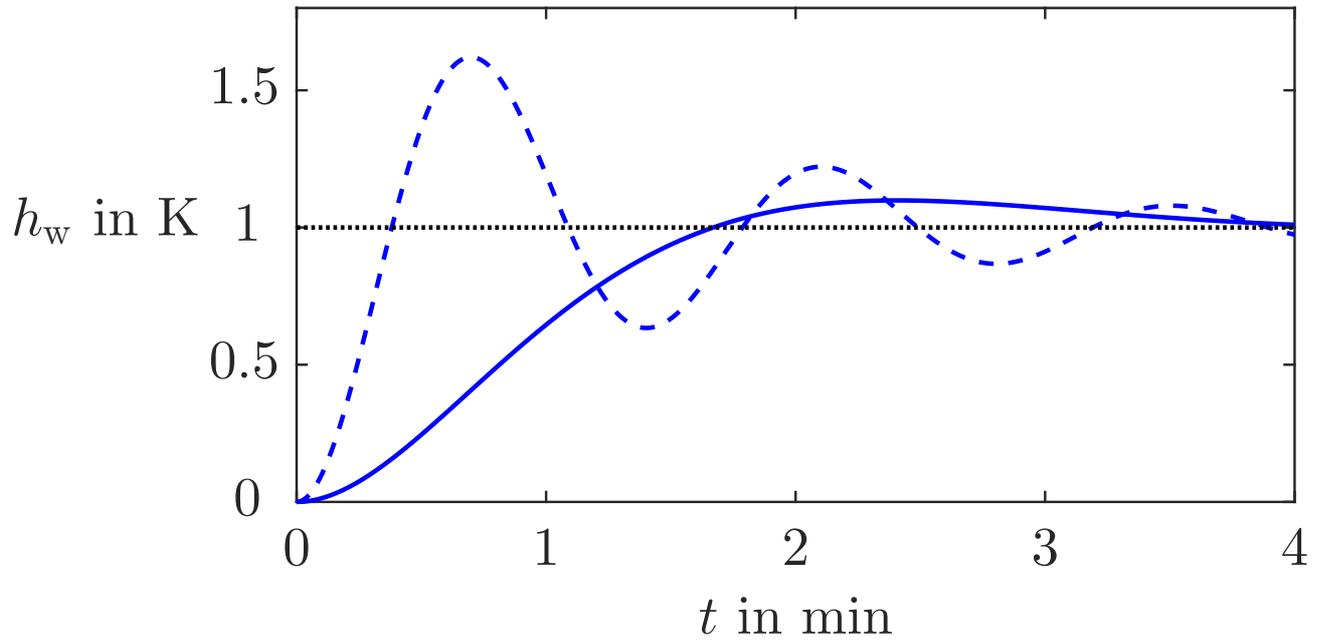


Abb. 11.25: Führungsübergangsfunktion des Temperaturregelkreises mit dem PI-Regler (11.16)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

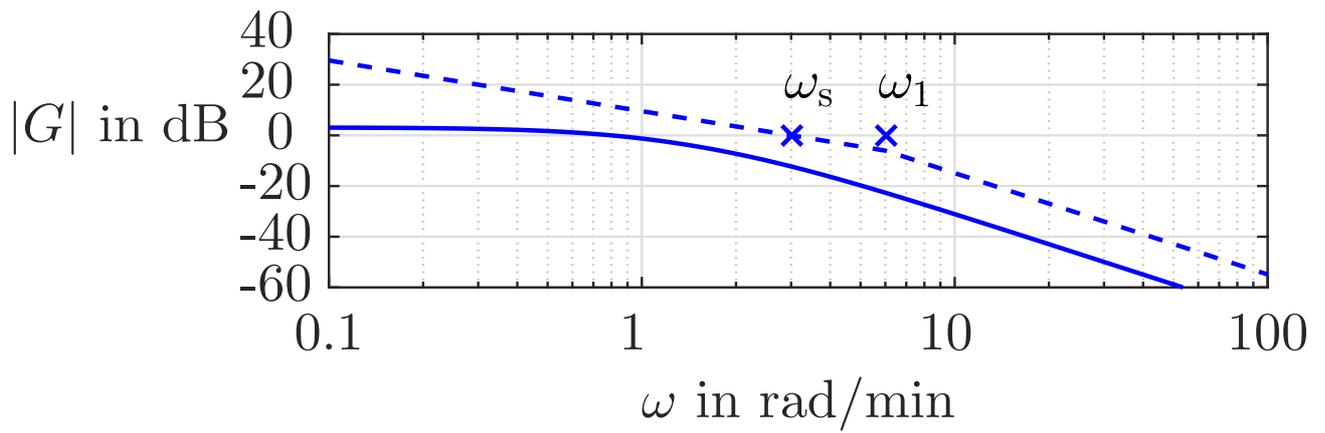


Abb. 11.26: Vergleich von Regelstrecke und gewünschter offener Kette für die verschärften Güteforderungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

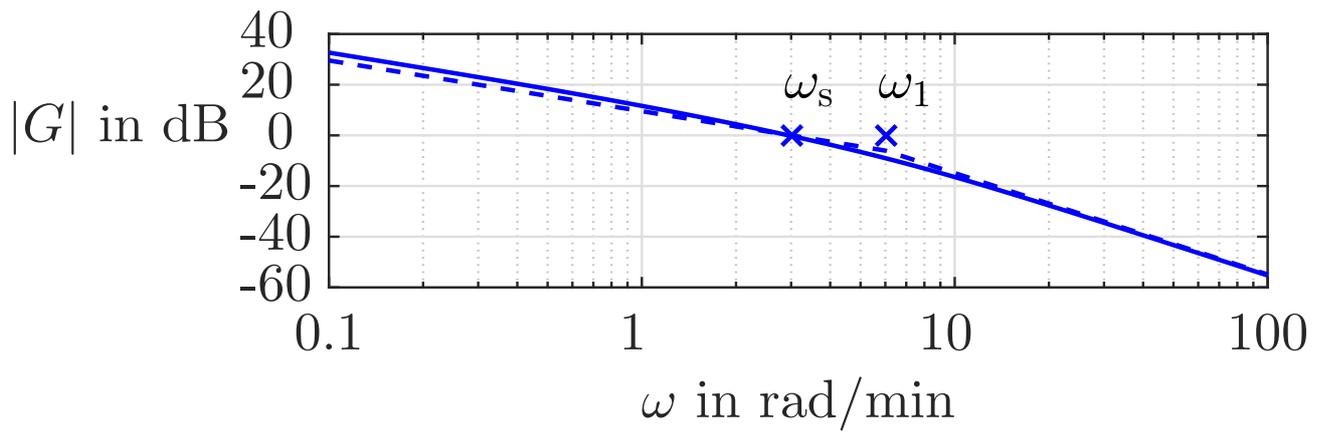


Abb. 11.27: Amplitudengang der offenen Kette mit dem Regler $K_{PI}(s)K_{Korr}(s)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

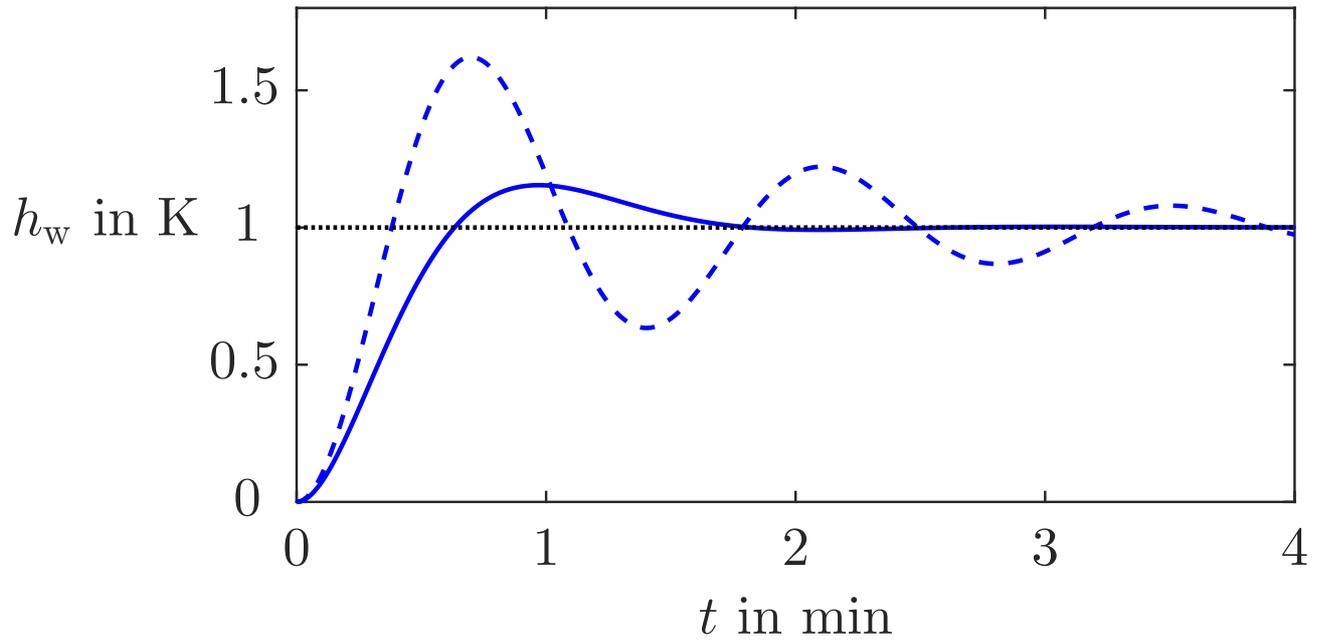


Abb. 11.28: Führungsübergangsfunktion des Temperaturregelkreises für die verschärften Güteforderungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

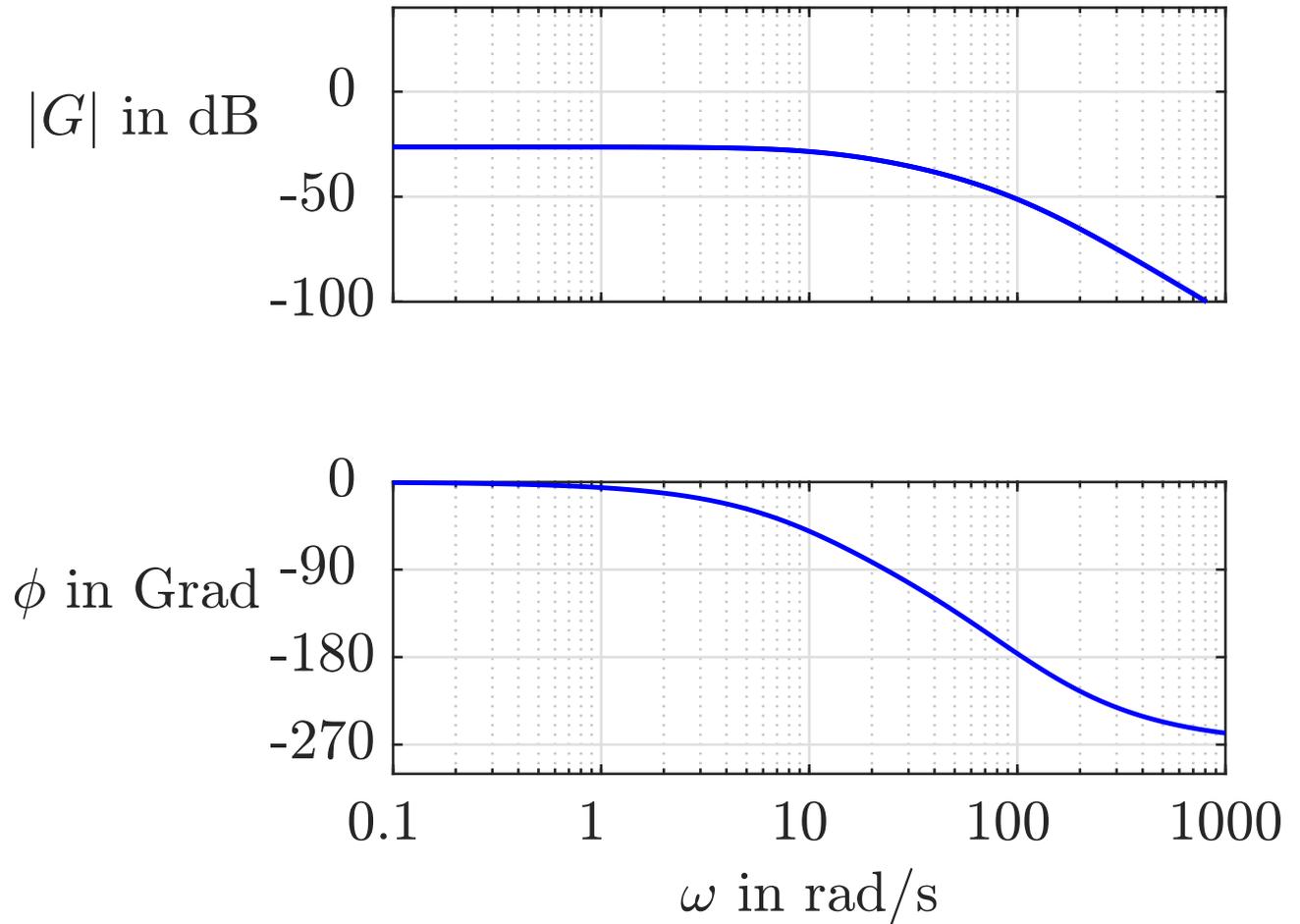


Abb. 11.29: Bodediagramm des Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

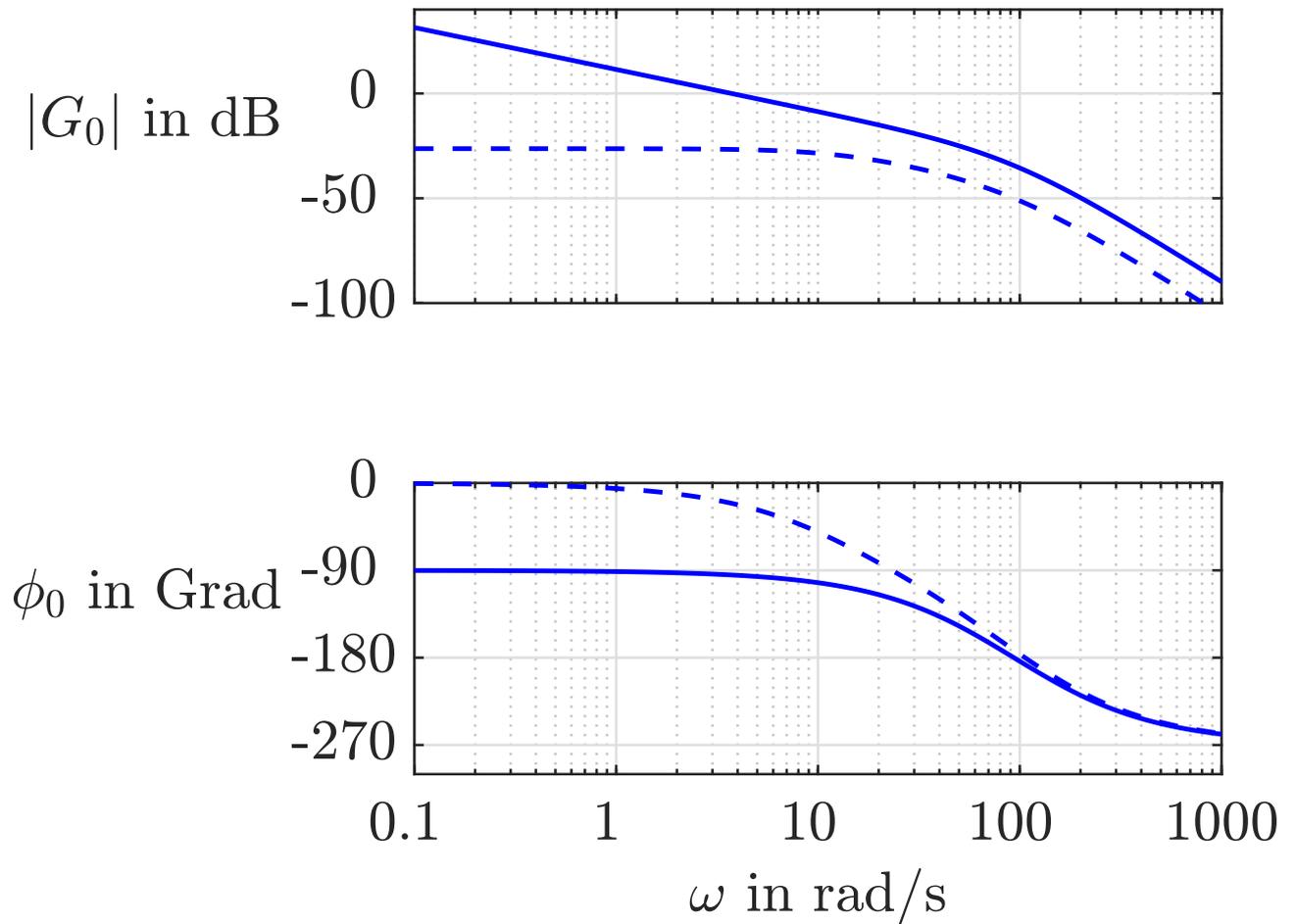


Abb. 11.30: Bodediagramm der offenen Kette bestehend aus Gleichstrommotor und PI-Regler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

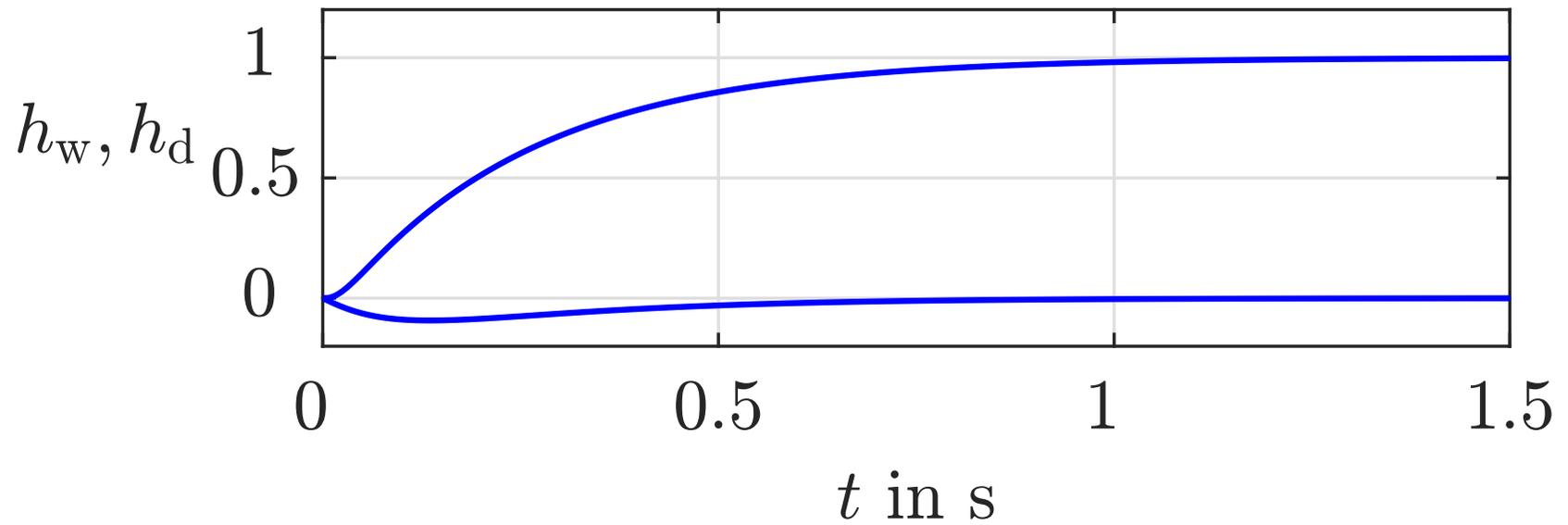
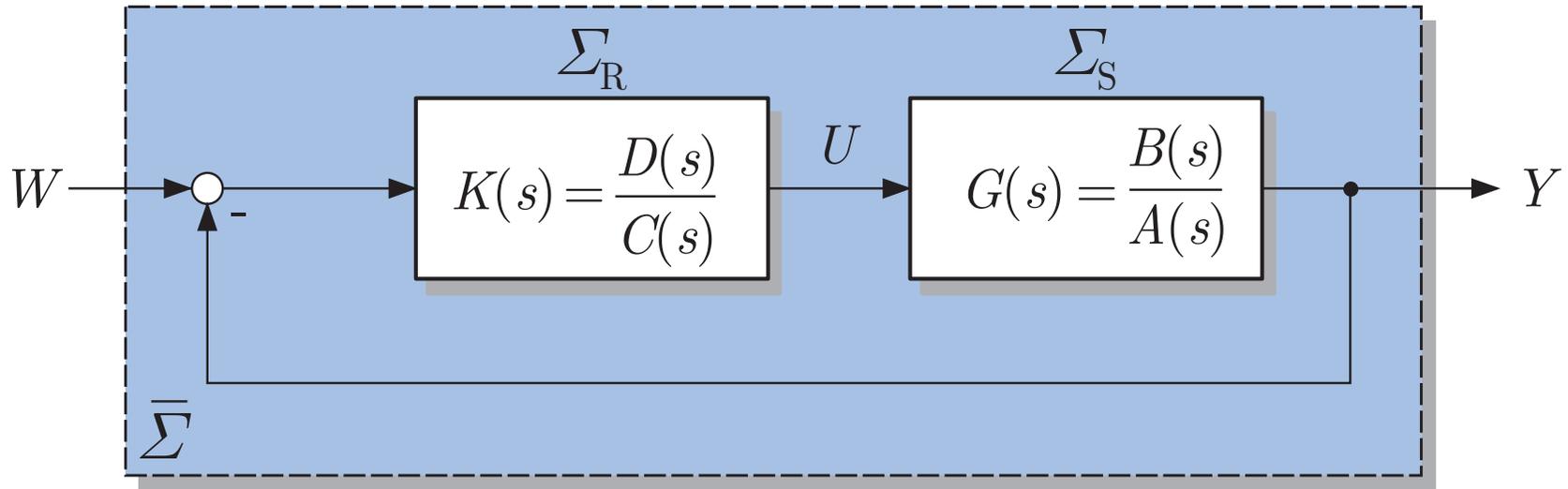


Abb. 11.31. Führungsübergangsfunktion und Störübergangsfunktion des geregelten Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



$$G_w(s) = M(s) = \frac{\bar{B}(s)}{\bar{A}(s)}$$

Abb. 12.1. Idee des Entwurfsverfahrens

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

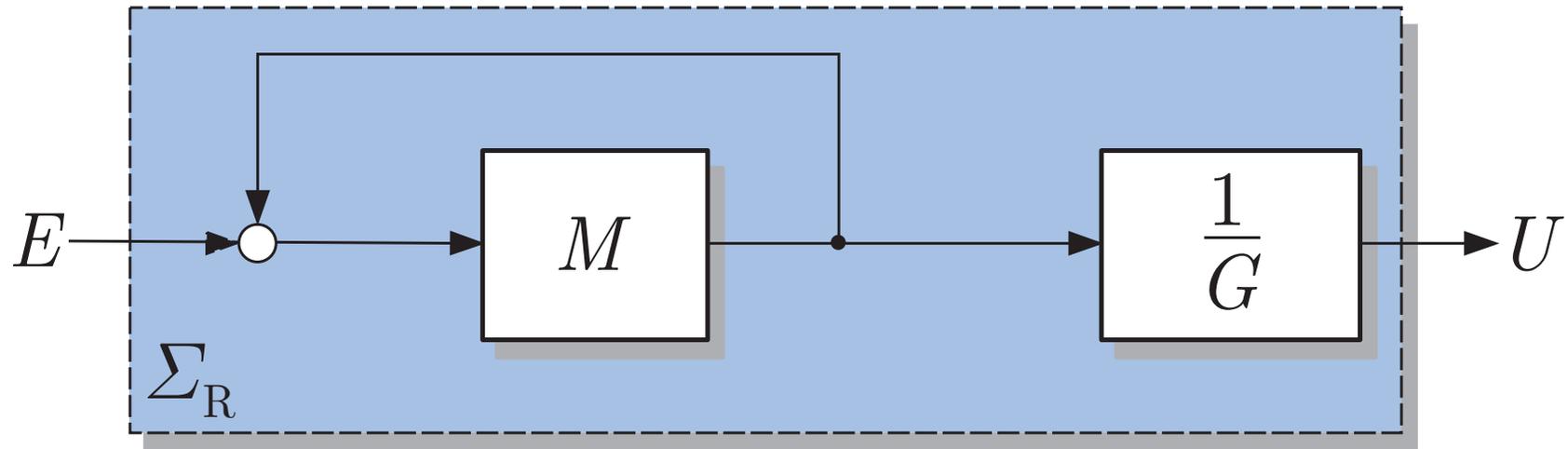


Abb. 12.2. Struktur des Kompensationsreglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

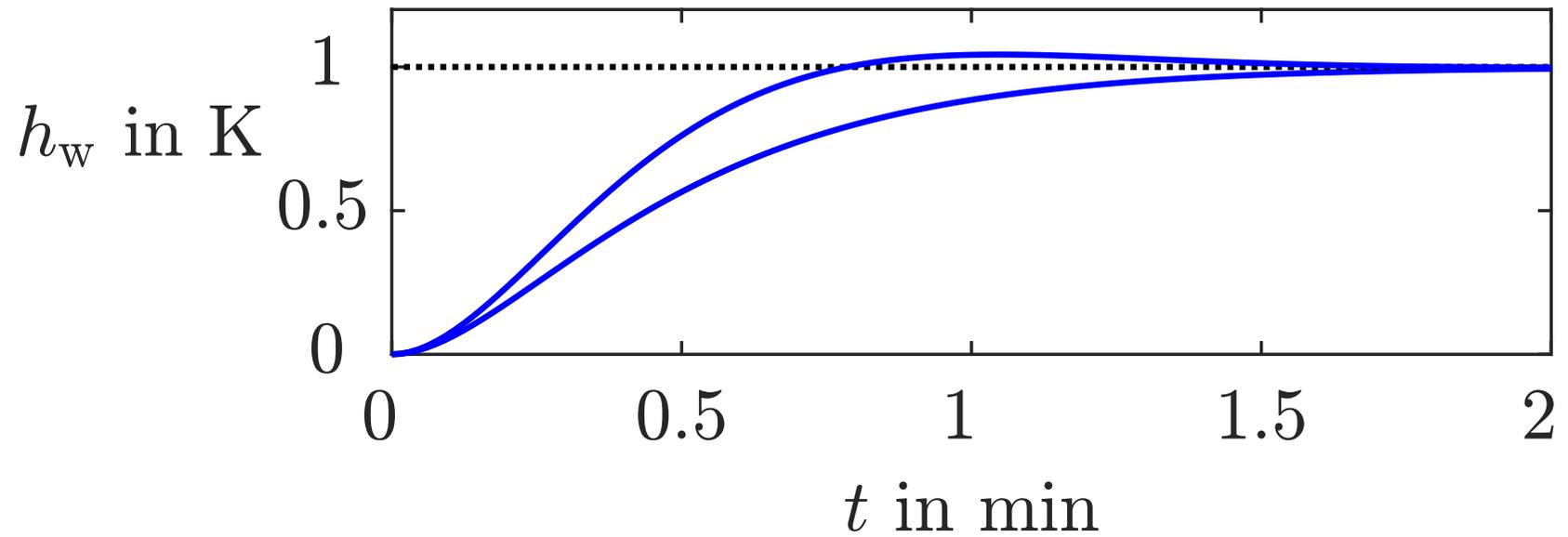


Abb. 12.3. Führungsübergangsfunktionen der entworfenen Temperaturregelkreise

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

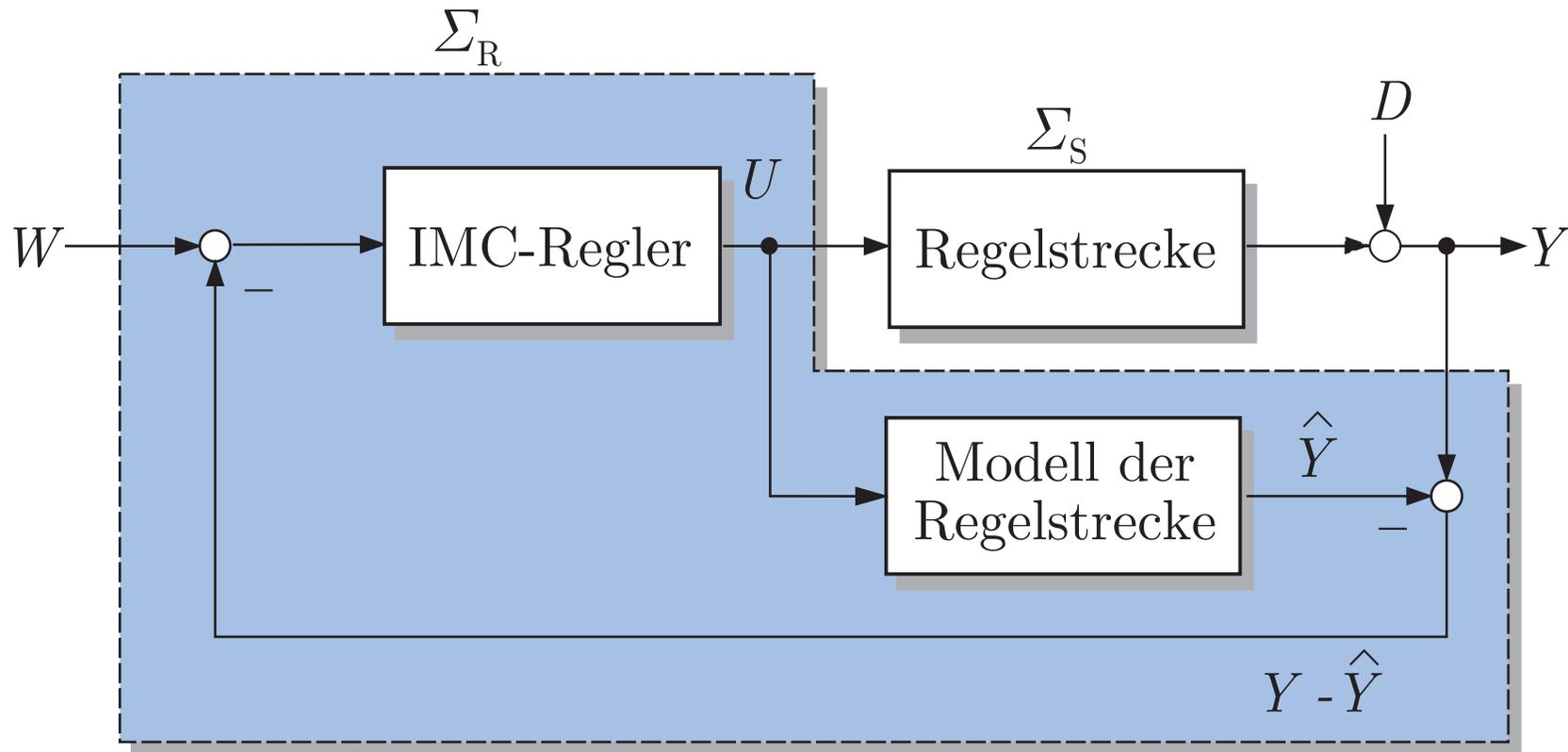


Abb. 12.4. Struktur des IMC-Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

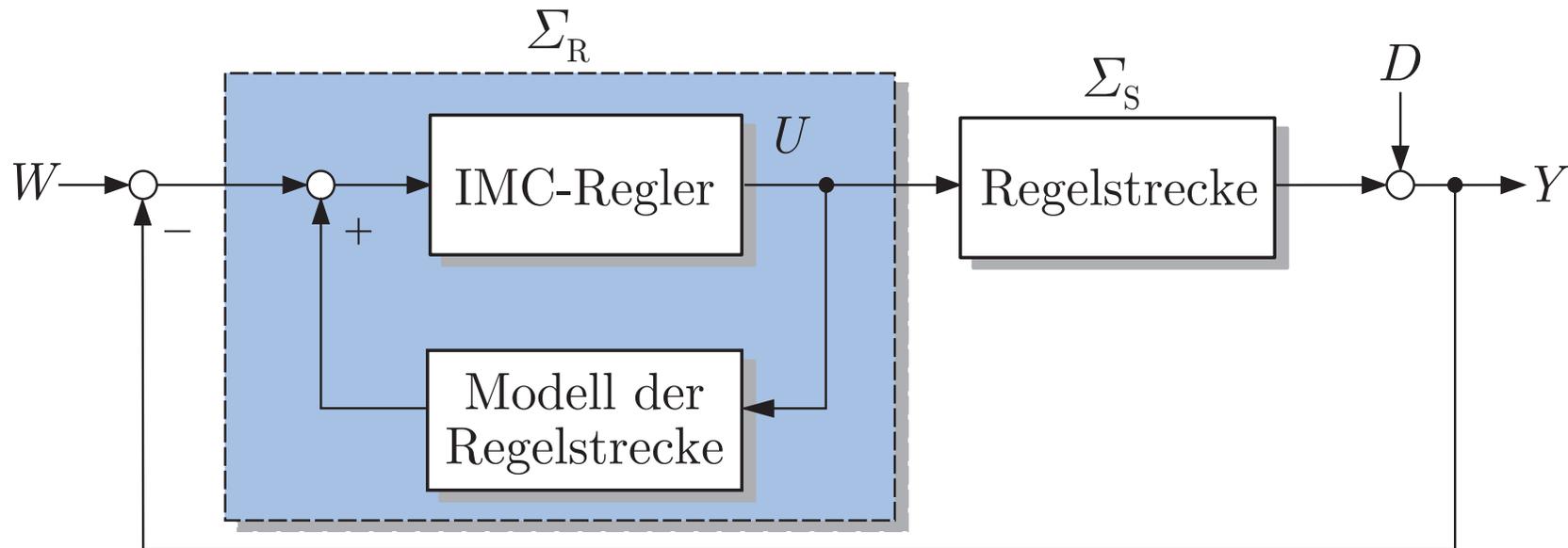


Abb. 12.5. Umgeformtes Blockschaltbild des IMC-Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

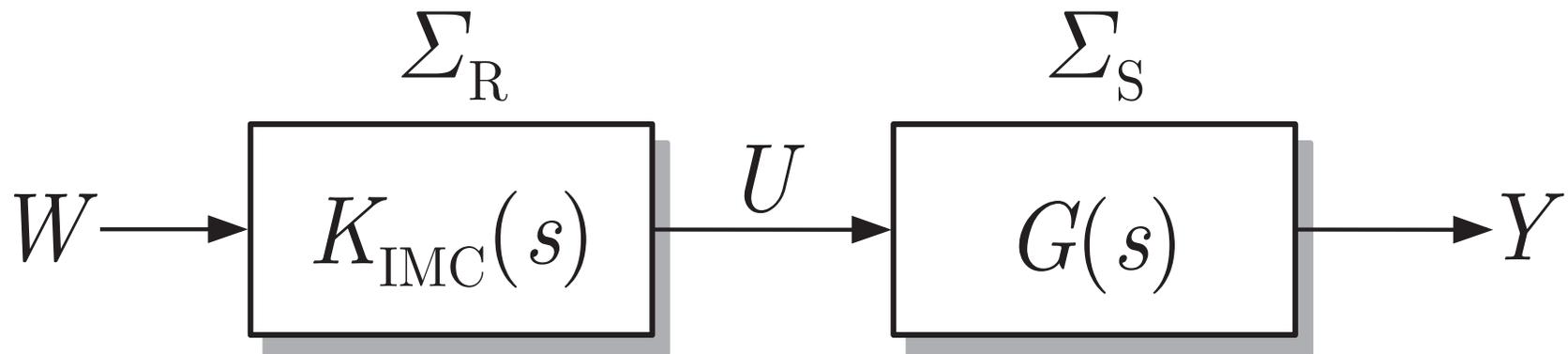


Abb. 12.6. Umgeformter IMC-Regelkreis für $G(s) = \hat{G}(s)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

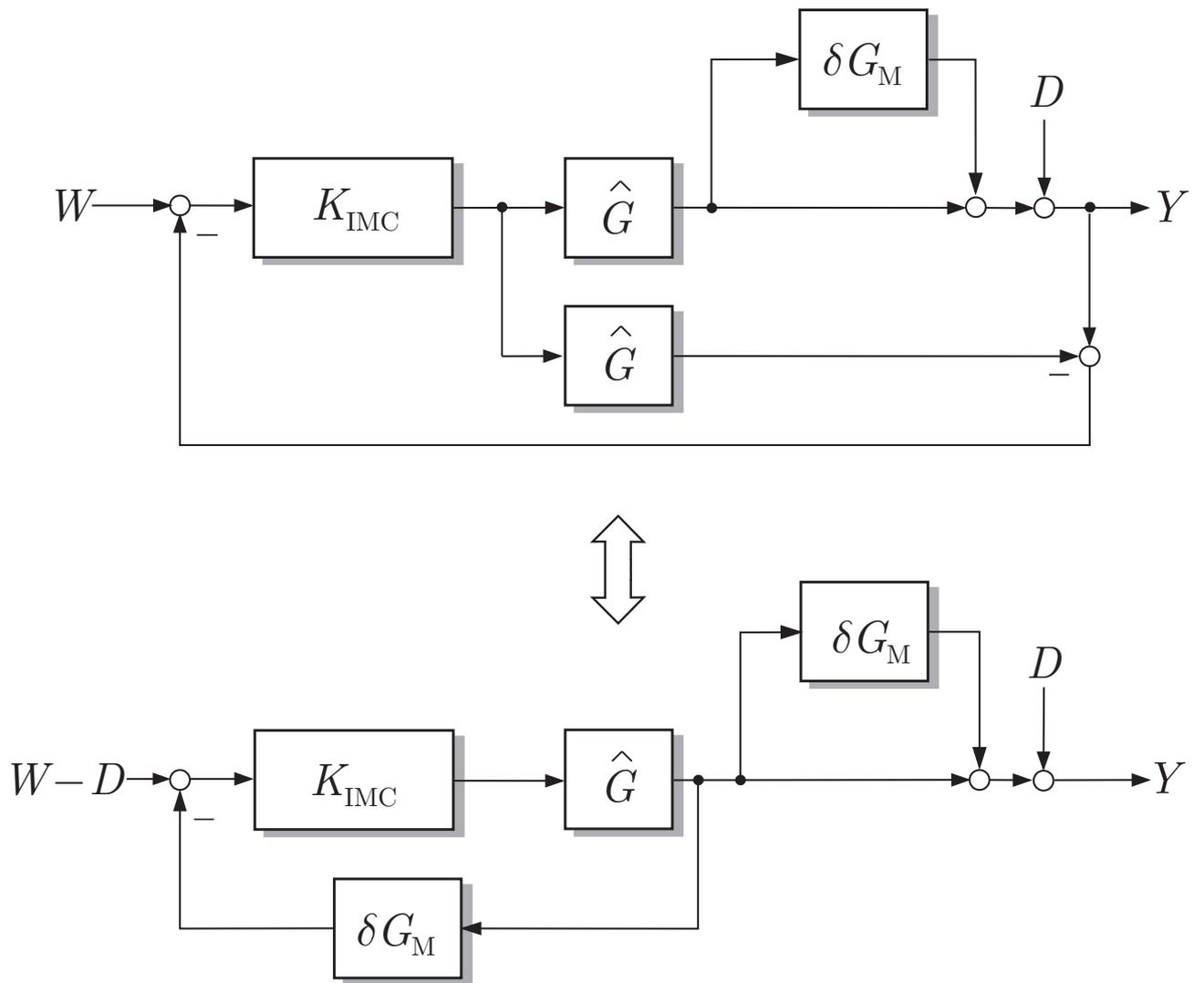


Abb. 12.7: Zwei äquivalente Darstellungen des IMC-Regelkreises mit Näherungsmodell

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

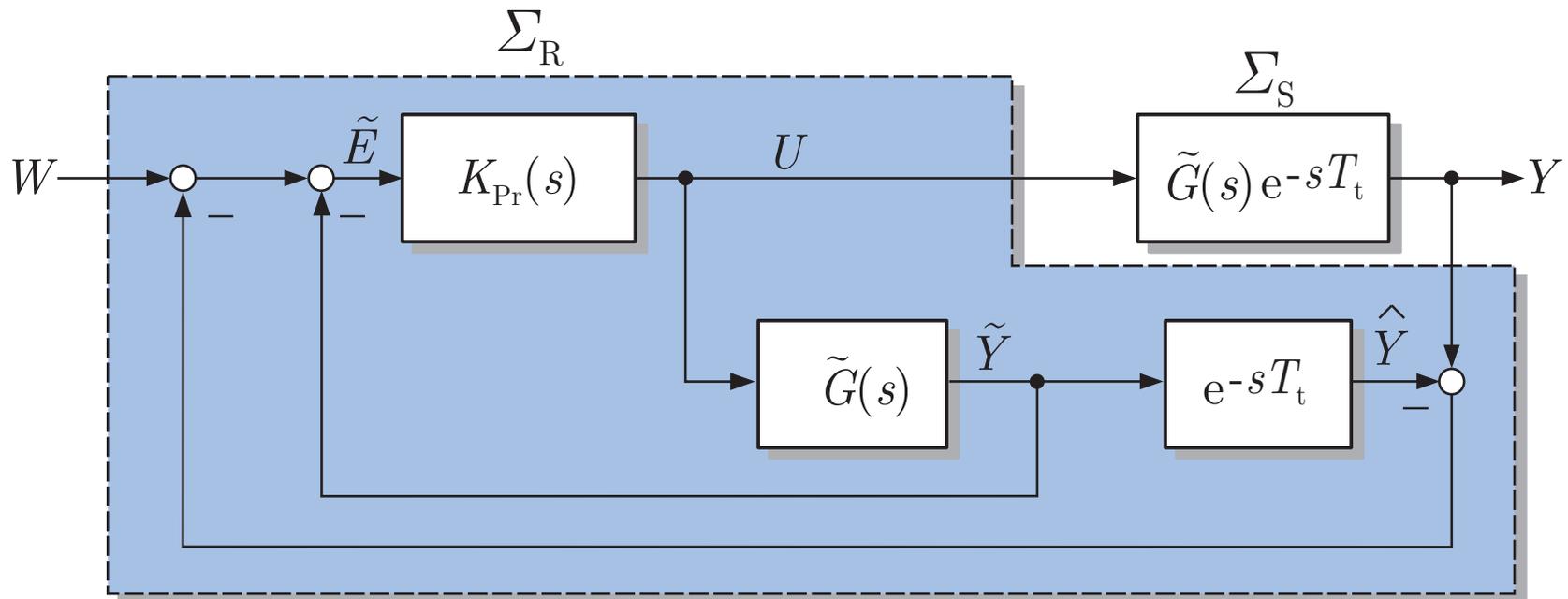


Abb. 12.8. Grundidee des Smithprädiktors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

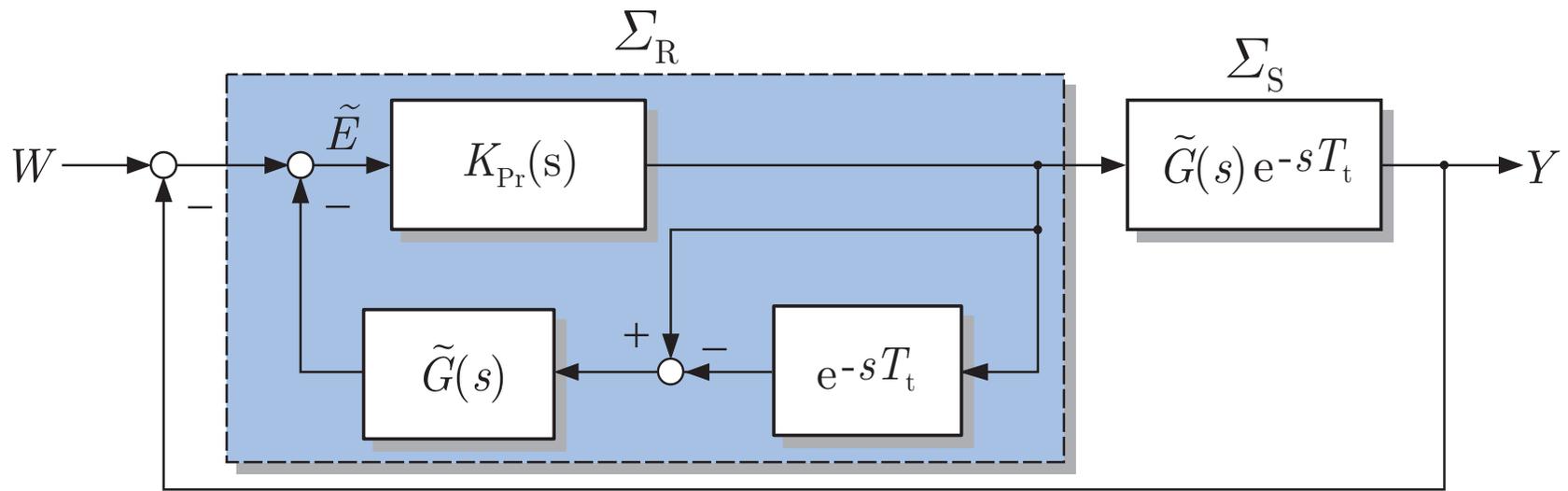


Abb. 12.9. Smithprädiktor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

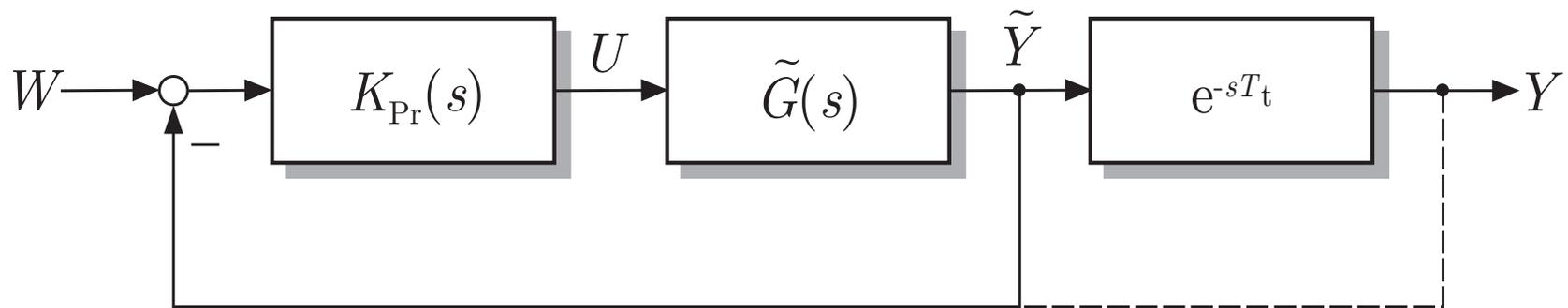


Abb. 12.10. Blockschaltbild des Regelkreises, der durch den Smithprädiktor erzeugt werden soll

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

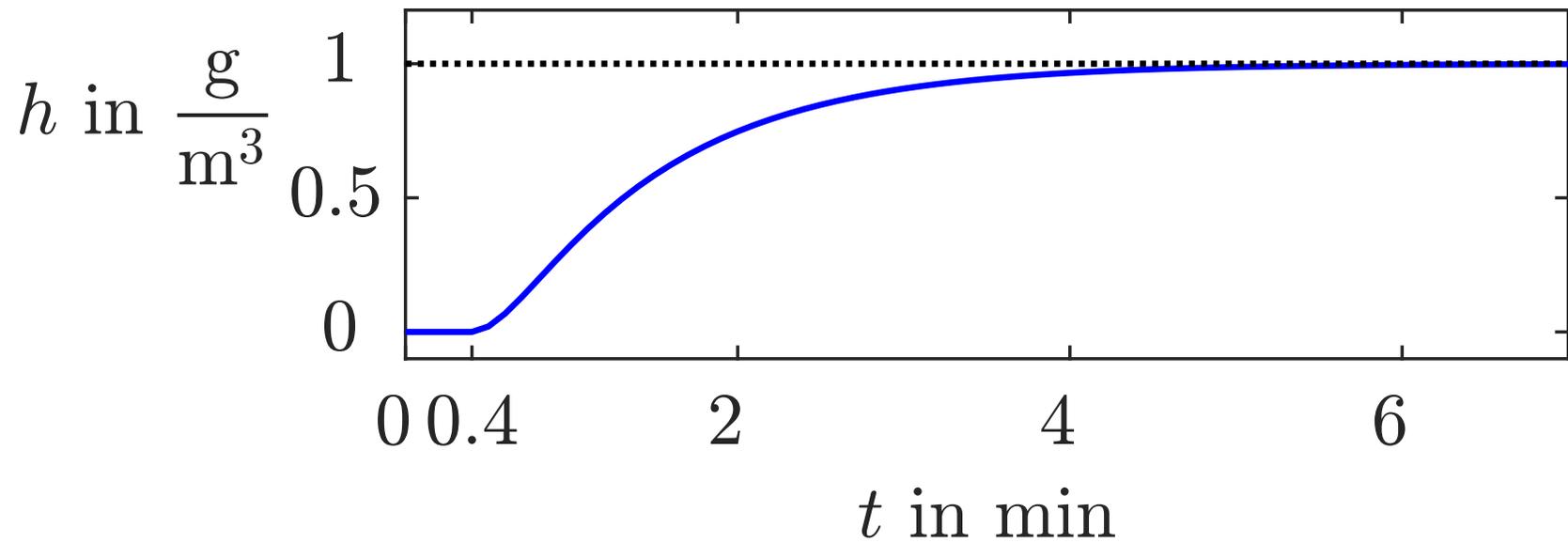


Abb. 12.11. Übergangsfunktion der Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

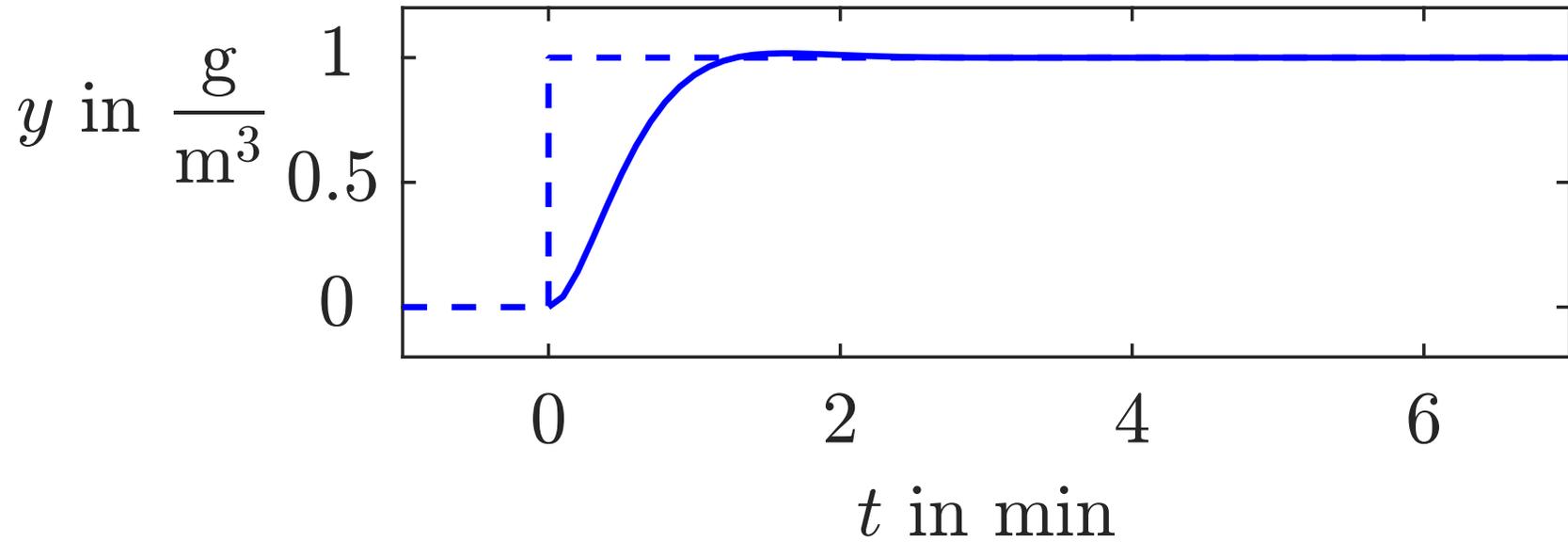


Abb. 12.12. Führungsübergangsfunktion des PI-geregelten Systems ohne Totzeit

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

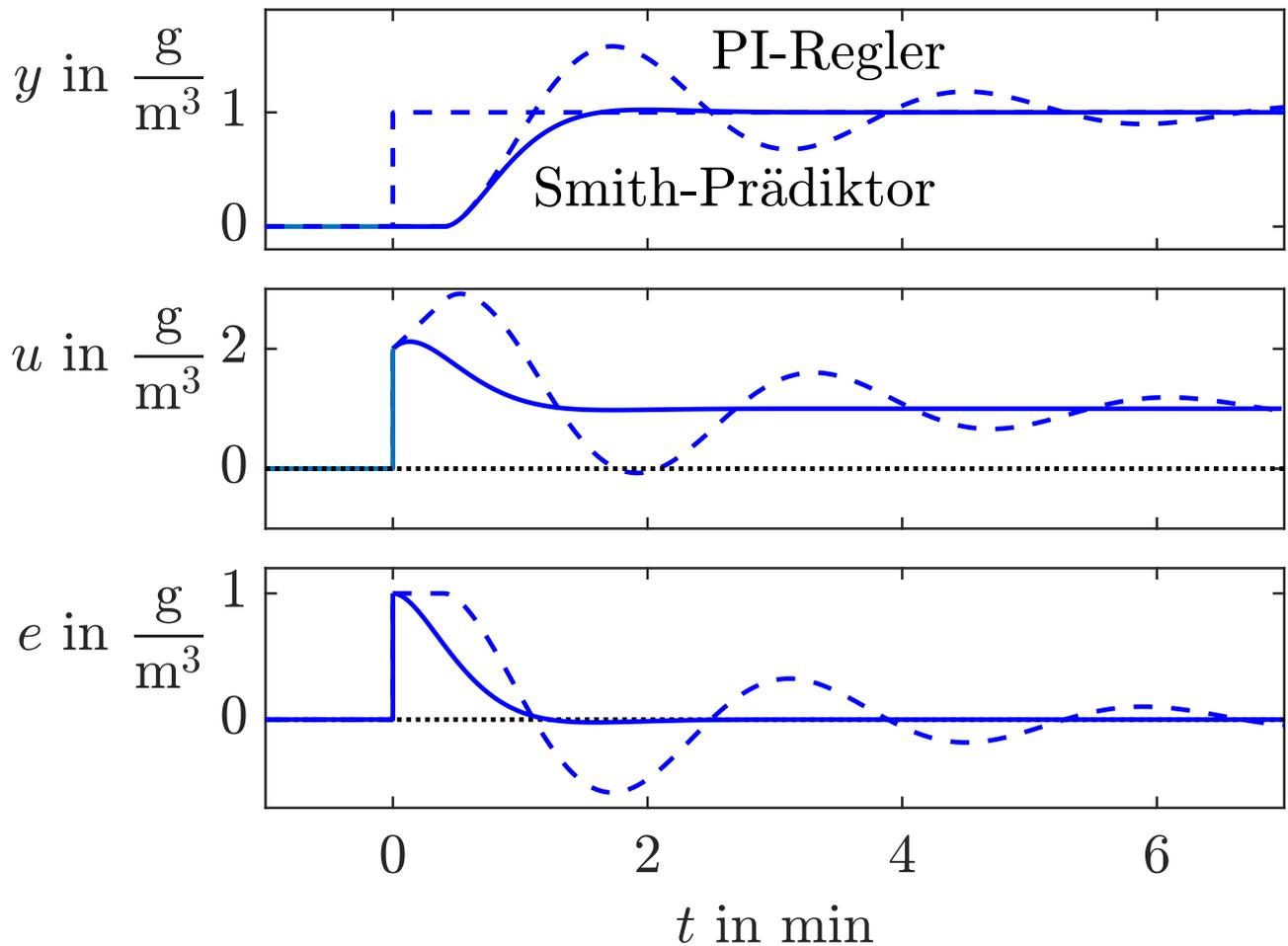


Abb. 12.13: Führungsübergangsfunktion des geregelten Reaktors bei Verwendung des PI-Reglers (- - -) bzw. des Smithprädiktors (—)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

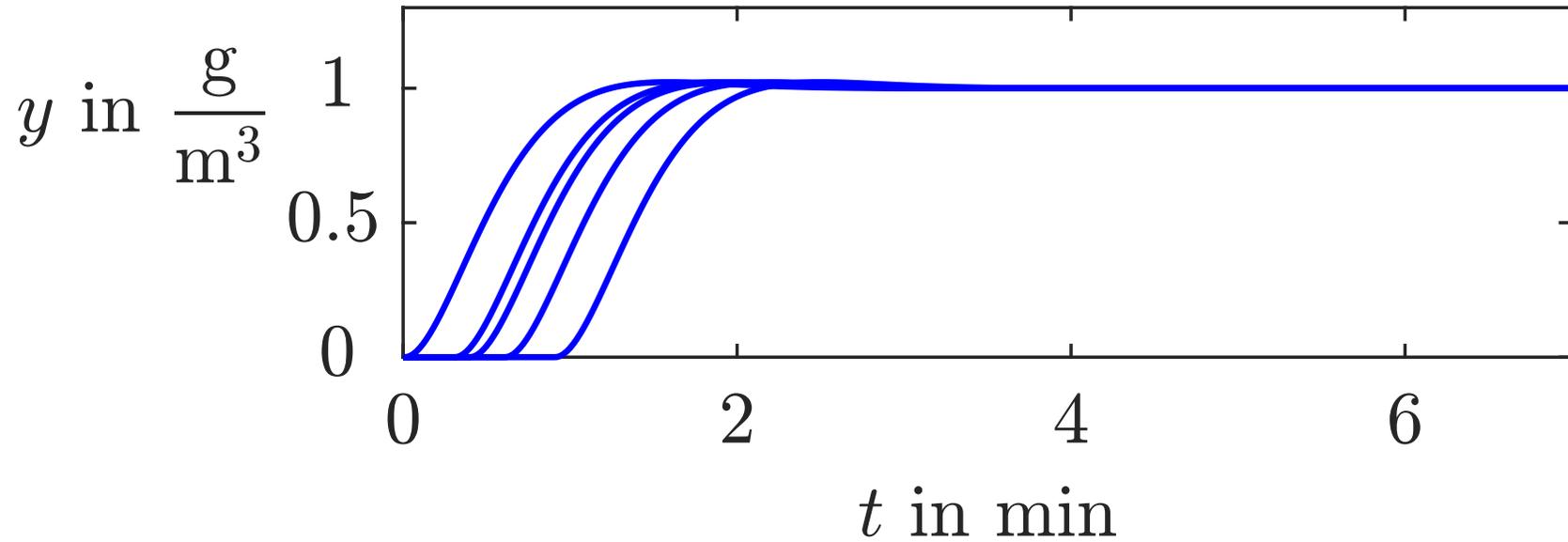


Abb. 12.14. Führungsübergangsfunktion des geregelten Reaktors mit Smithprädiktor bei unterschiedlichen Totzeiten

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

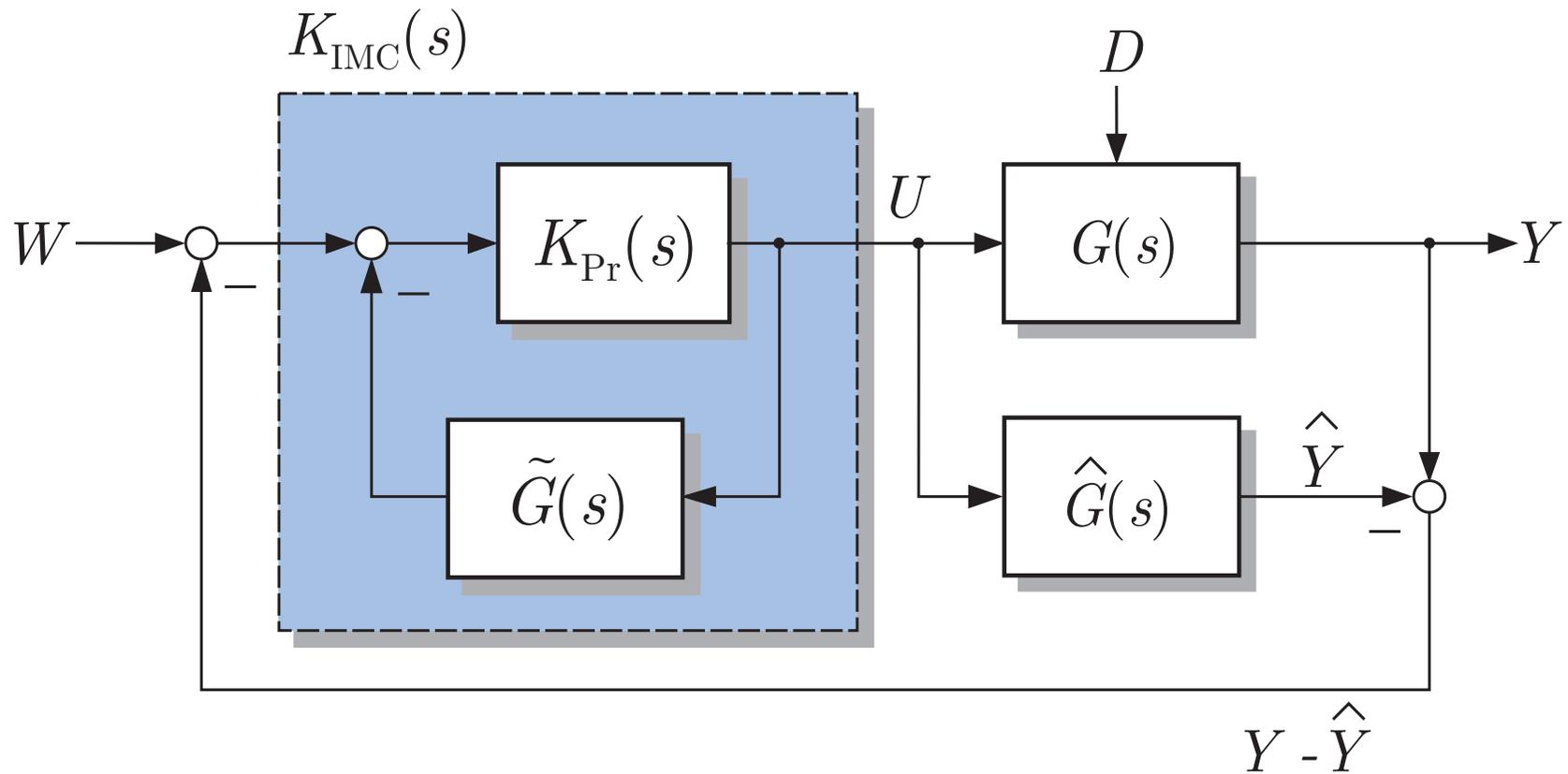


Abb. 12.15. Darstellung des Smithprädiktors als IMC-Regler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

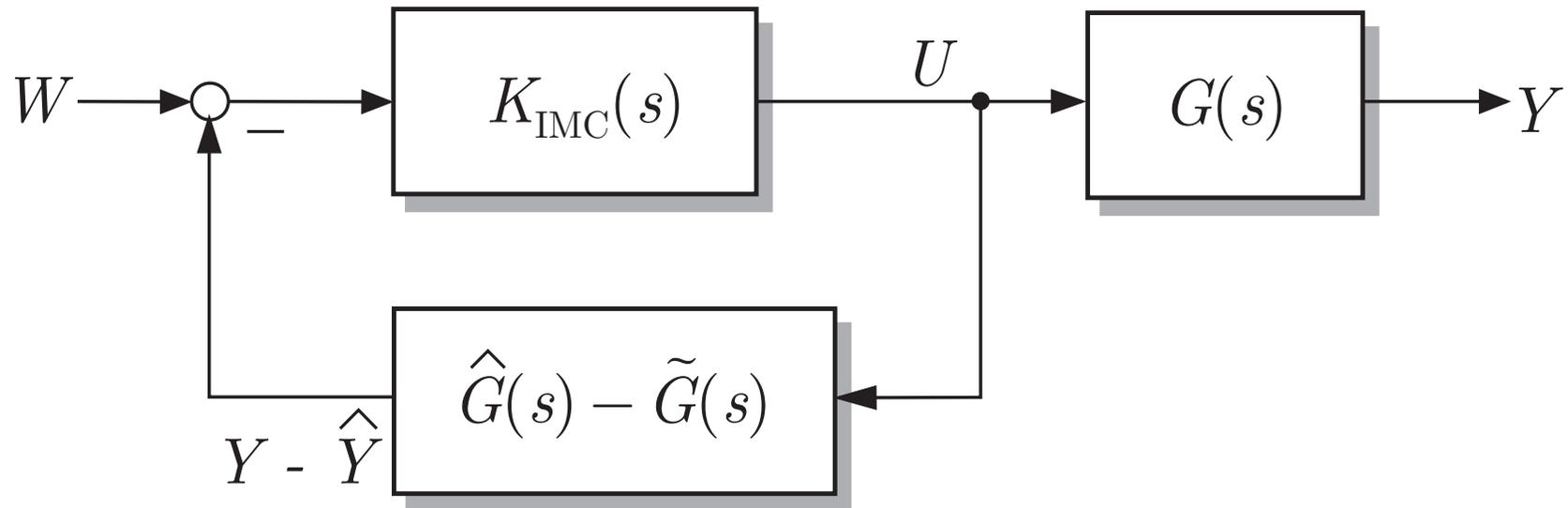


Abb. 12.16. Smithprädiktor-Regelkreis mit Modellunbestimmtheiten

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

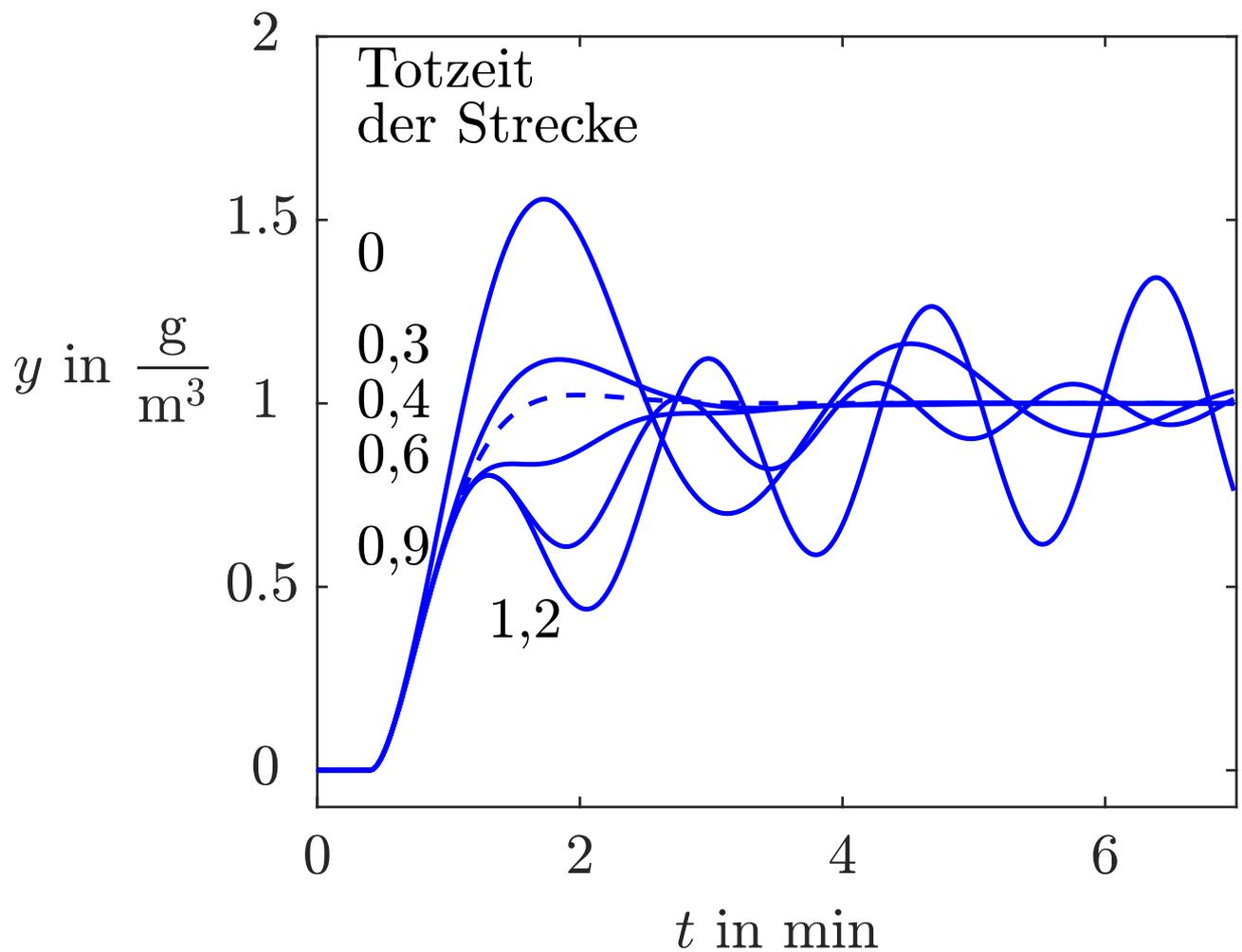


Abb. 12.17: Führungsübergangsfunktion des geregelten Reaktors, wenn der Smithprädiktor mit fehlerbehaftetem Modell realisiert wird

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

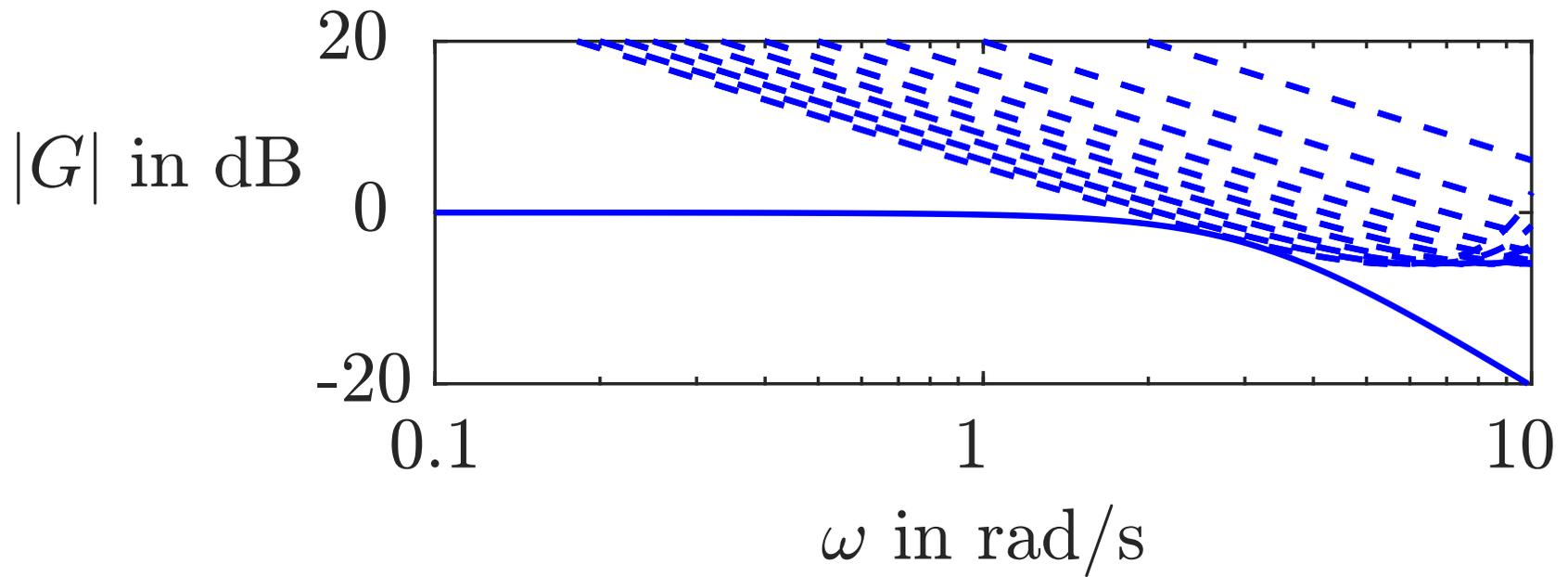


Abb. 12.18. Amplitudengang zur Überprüfung der robusten Stabilität des Smithprädiktor-Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

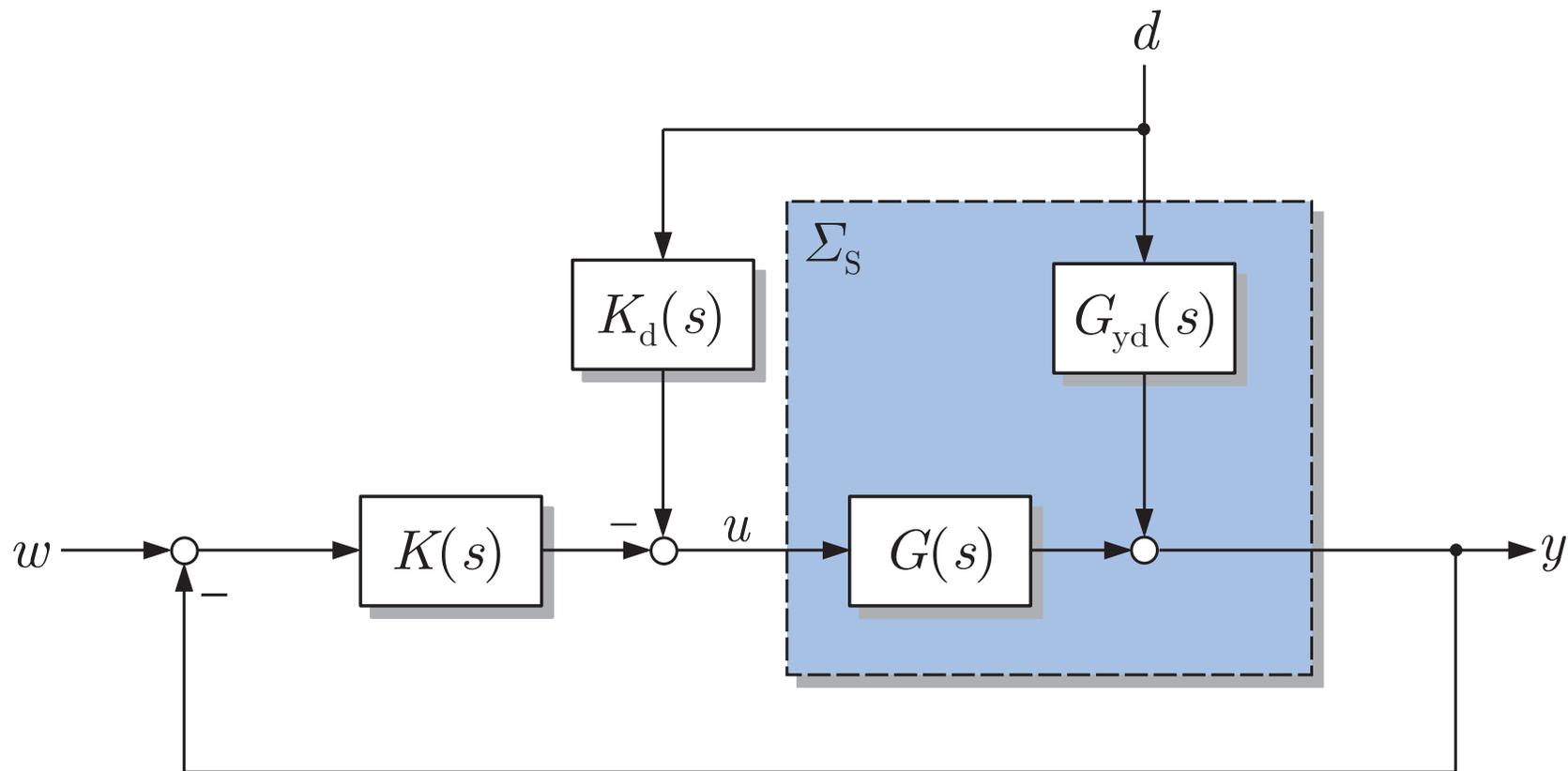


Abb. 13.1. Blockschaltbild einer Störgrößenaufschaltung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

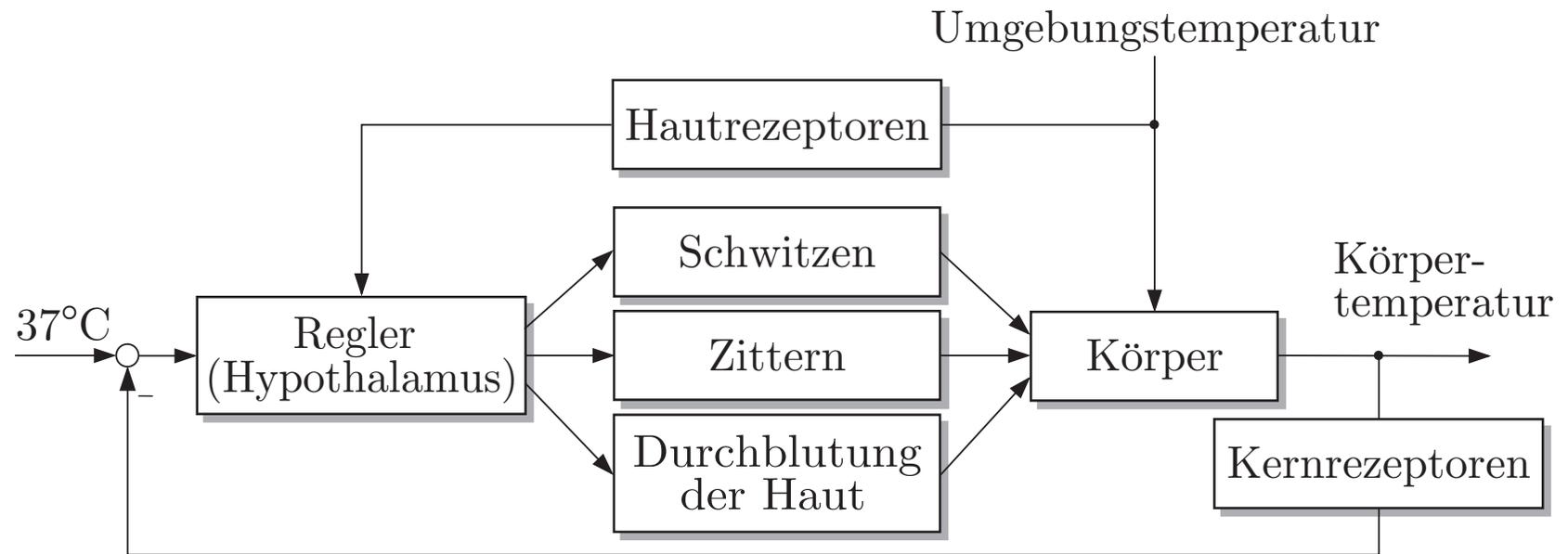


Abb. 13.2. Regelung der Körperkerntemperatur beim Menschen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

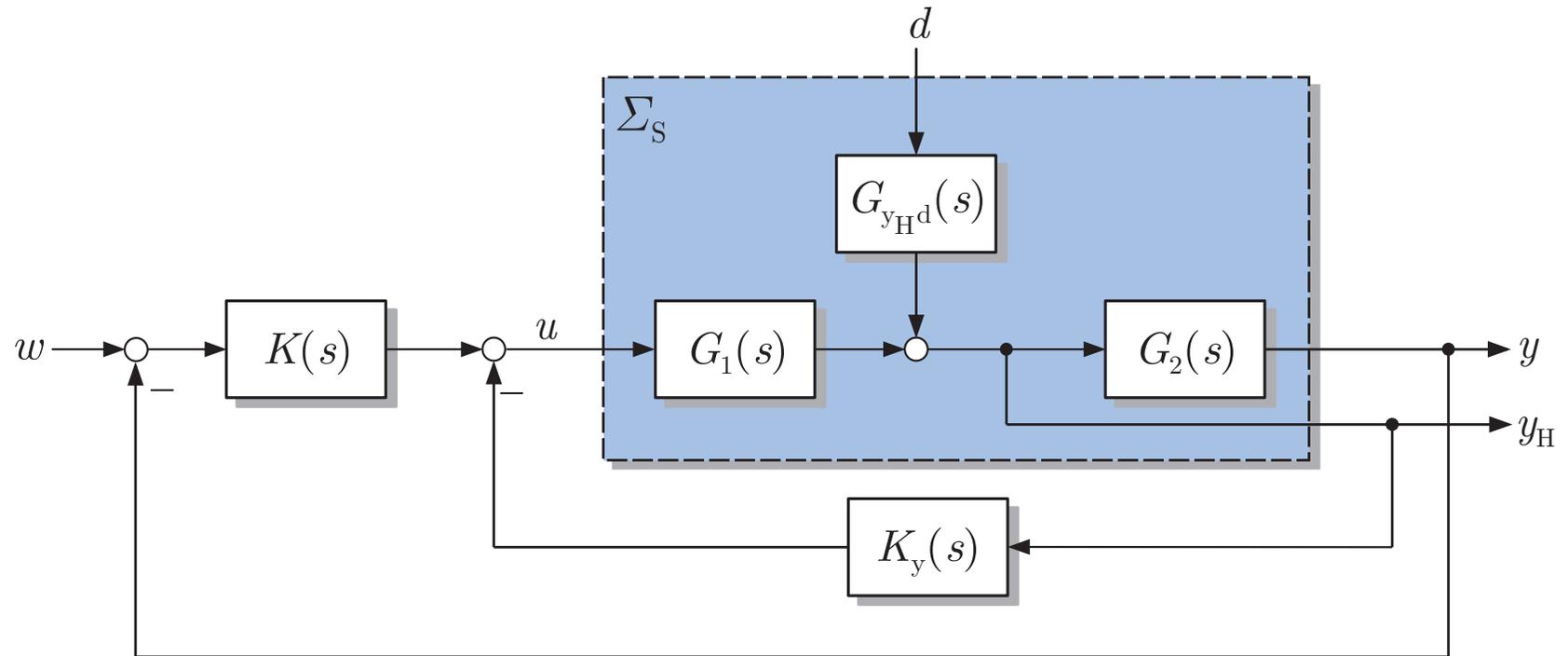


Abb. 13.3. Regelung mit Hilfsregelgröße

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

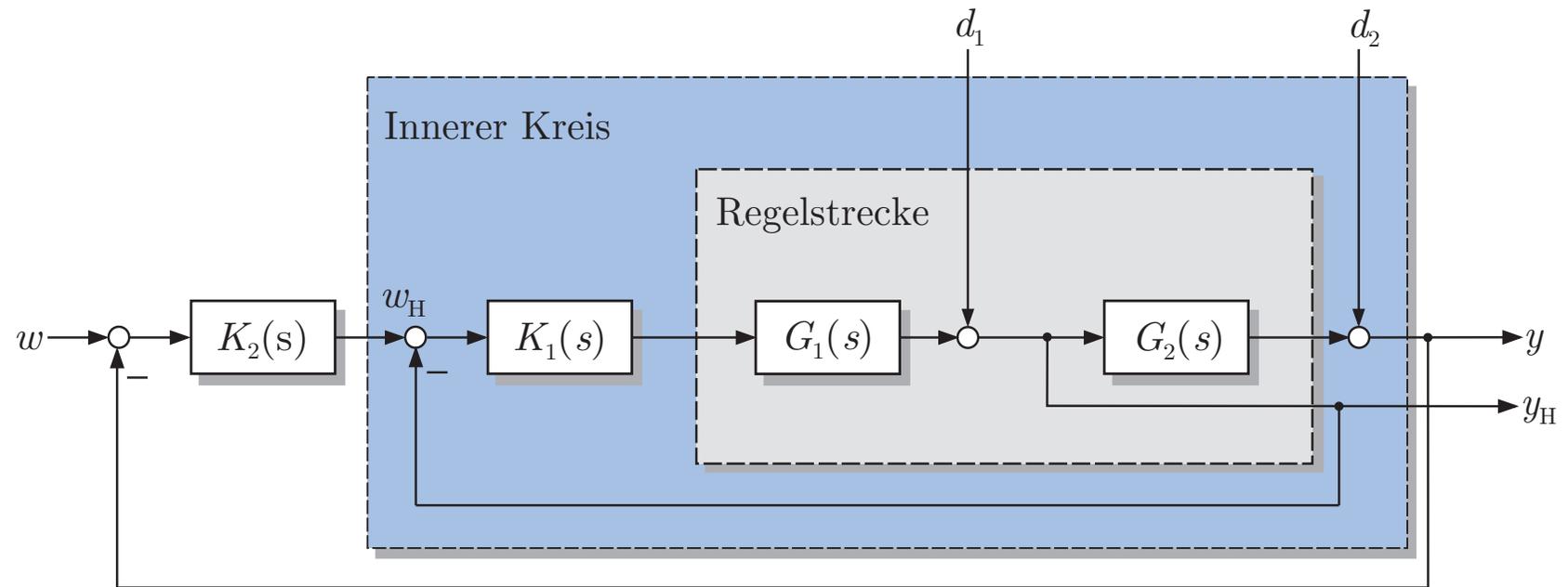


Abb. 13.4. Kaskadenregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

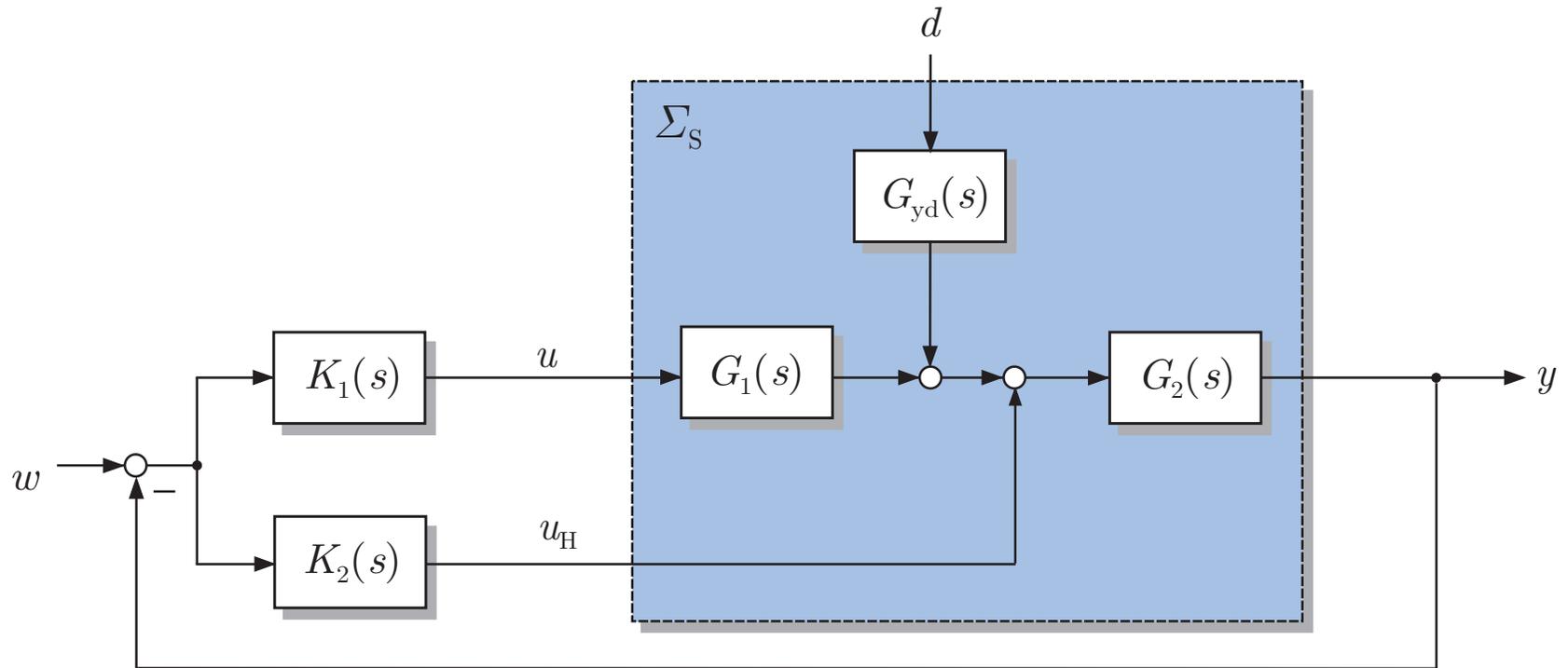


Abb. 13.5. Regelung mit Hilfsstellgröße

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

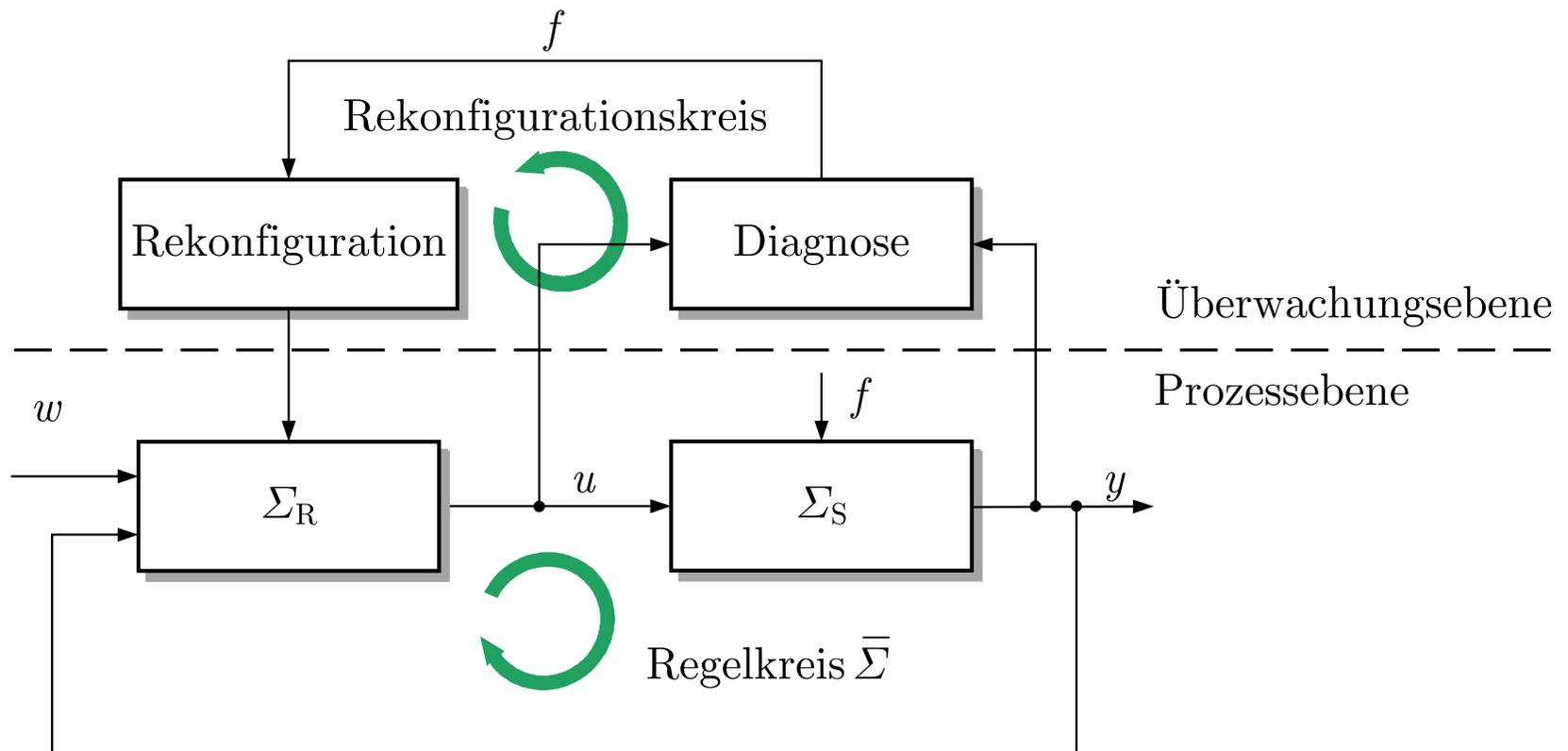


Abb. 13.6. Struktur fehlertoleranter Steuerungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

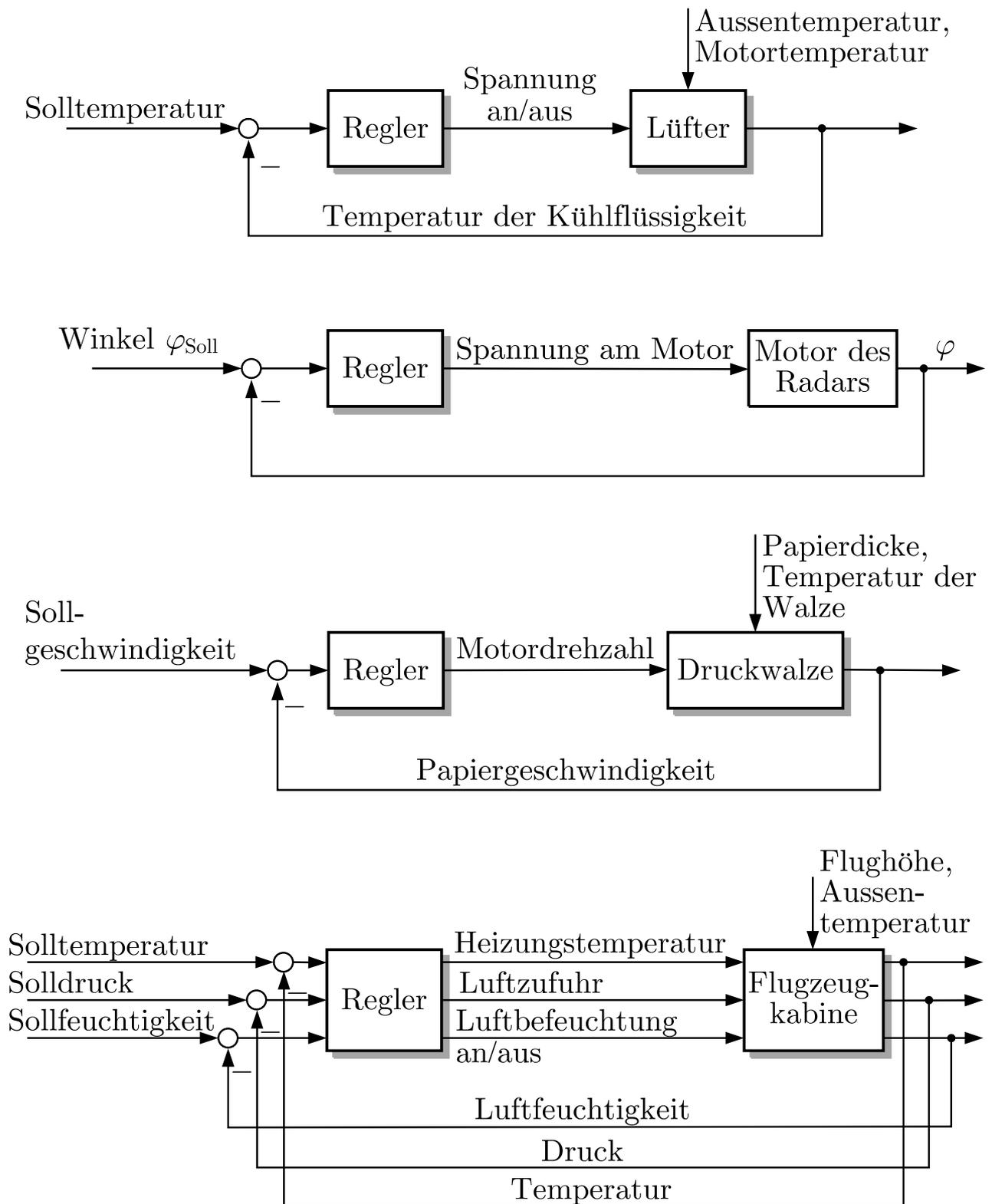


Abb. A.1: Blockschaltbilder der Regelkreise

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

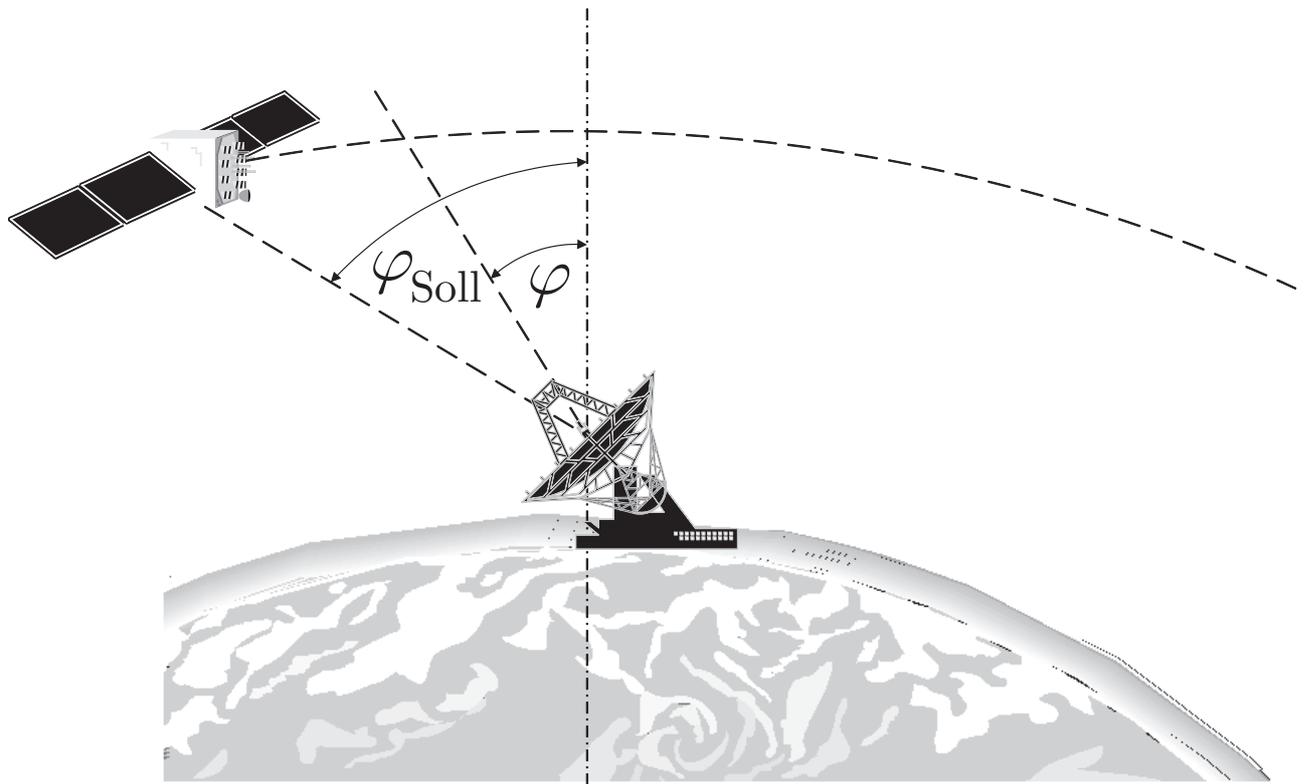


Abb. A.2: Verfolgung eines Satelliten mit einem Radar

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

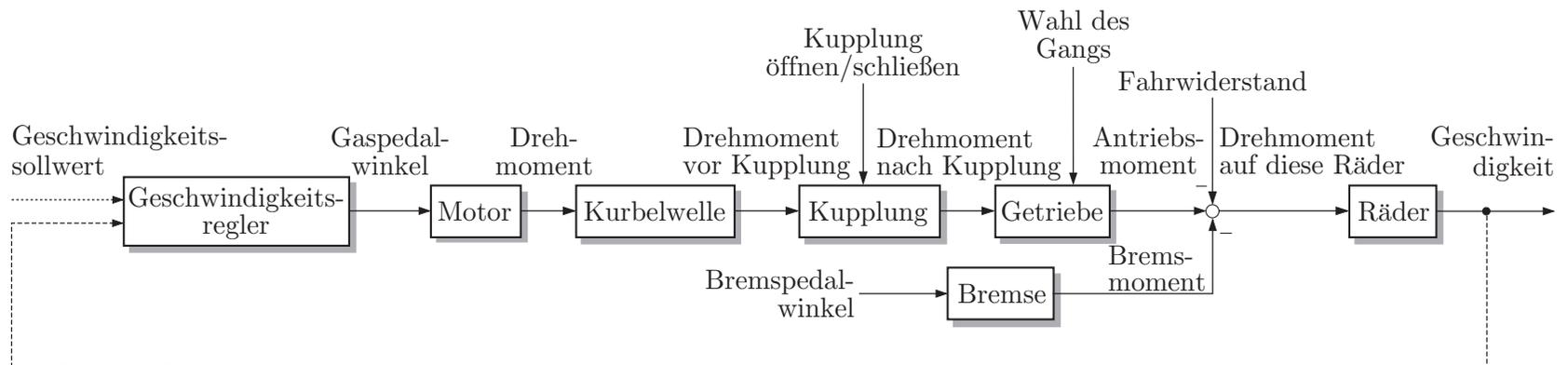


Abb. A.3. Blockschaltbild des Antriebsstranges

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

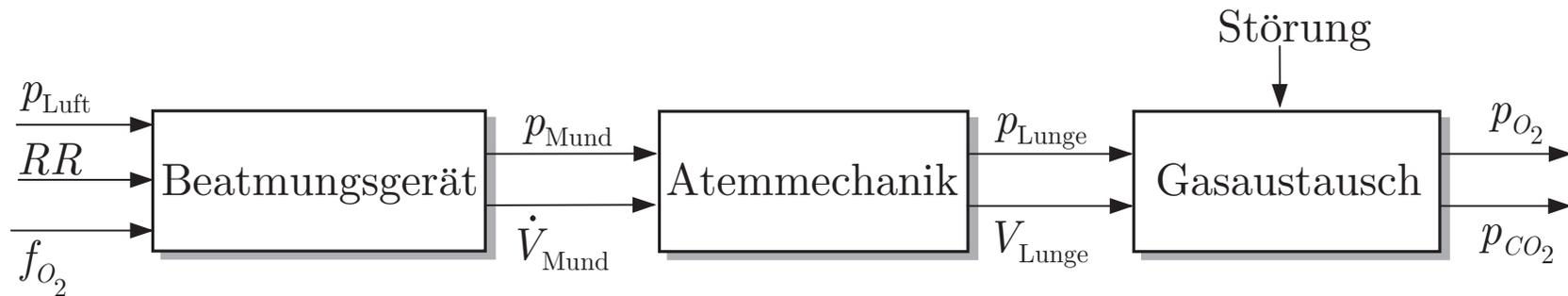


Abb. A.4. Blockschaltbild der künstlichen Beatmung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

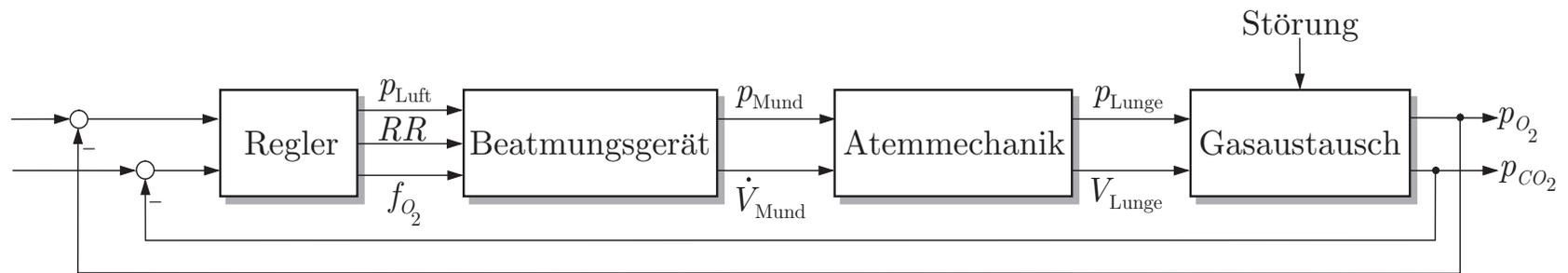


Abb. A.5. Erweitertes Blockschaftbild der künstlichen Beatmung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

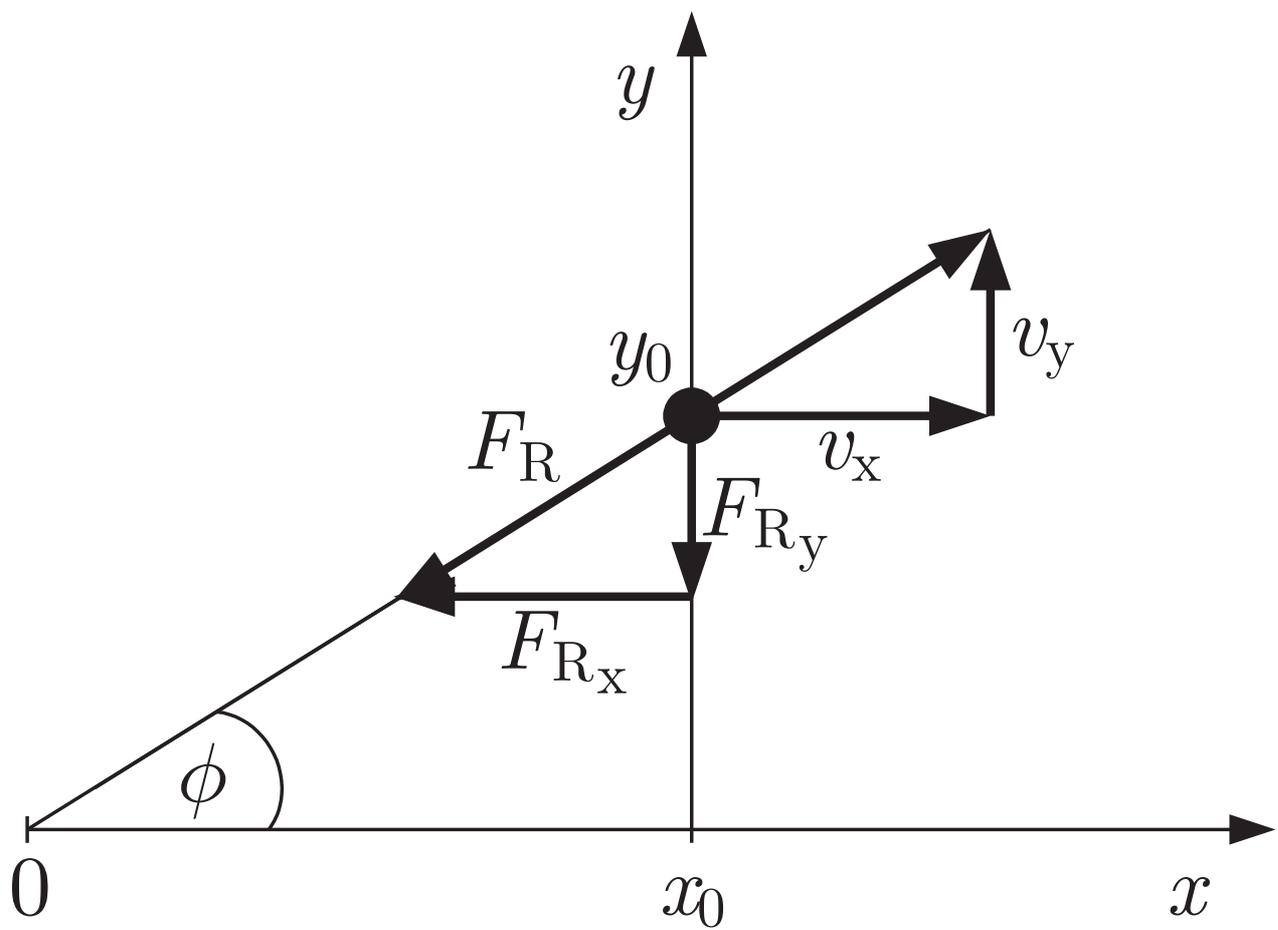


Abb. A.6: Kräfte und Geschwindigkeiten am Golfball

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

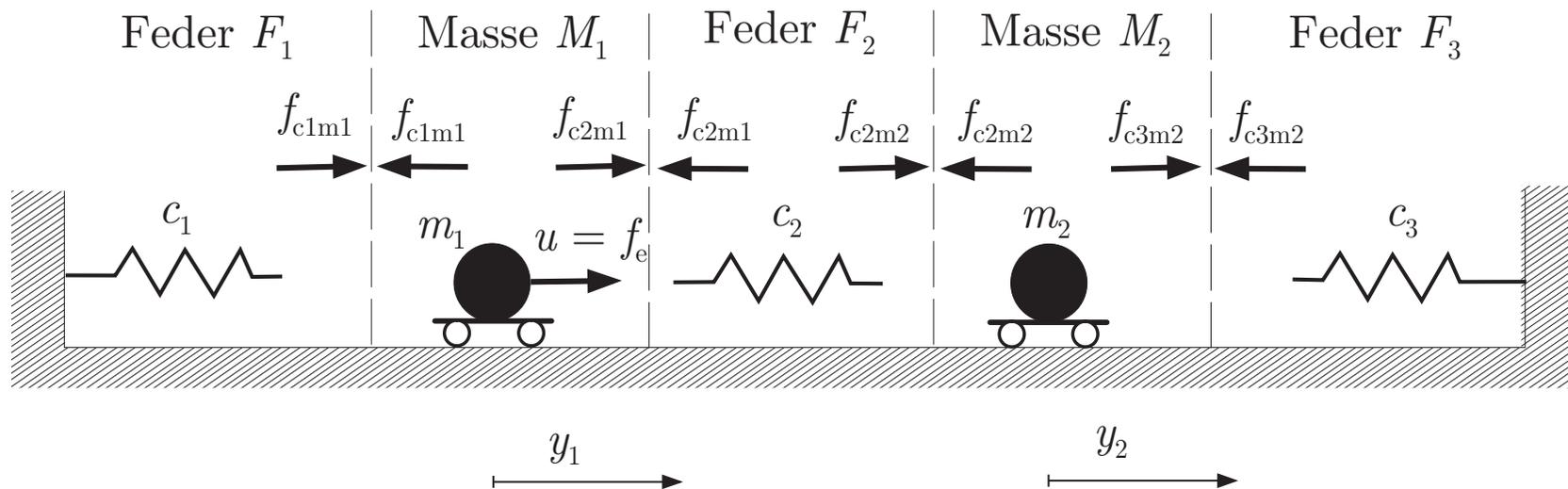


Abb. A.7. Schnittbild des Feder-Masse-Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

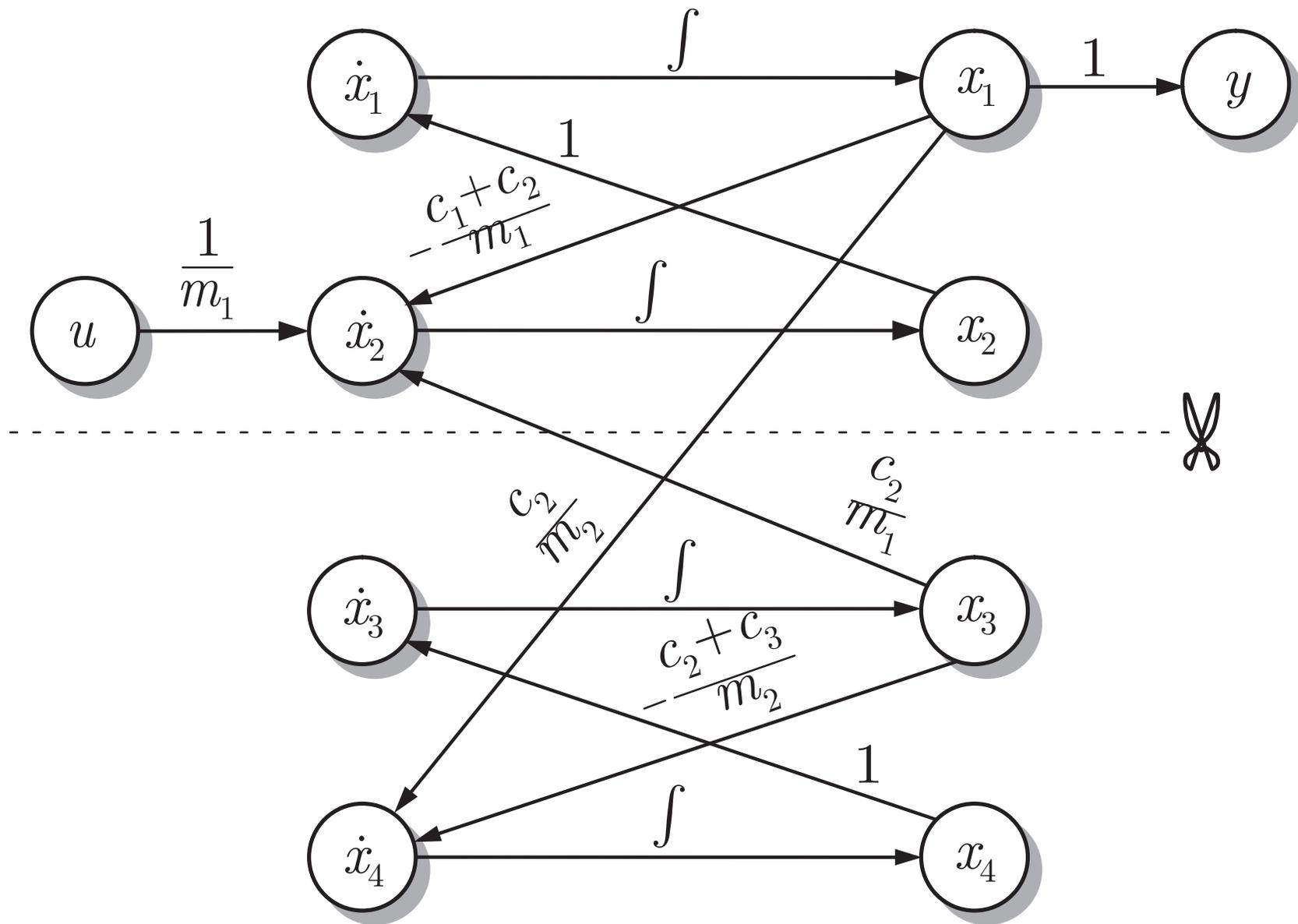


Abb. A.8. Signalflussgraph des Feder-Masse-Systems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

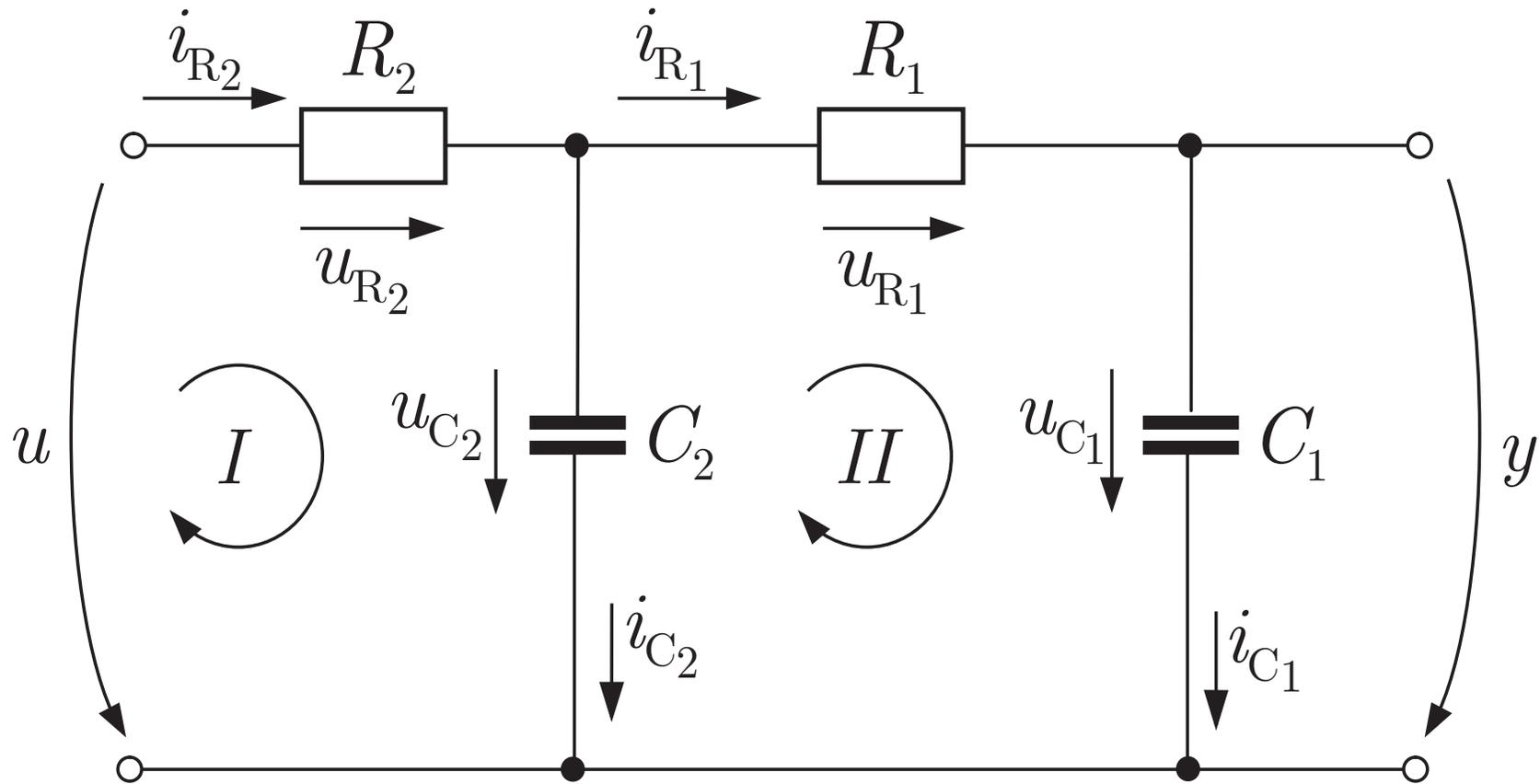


Abb. A.9. RC-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

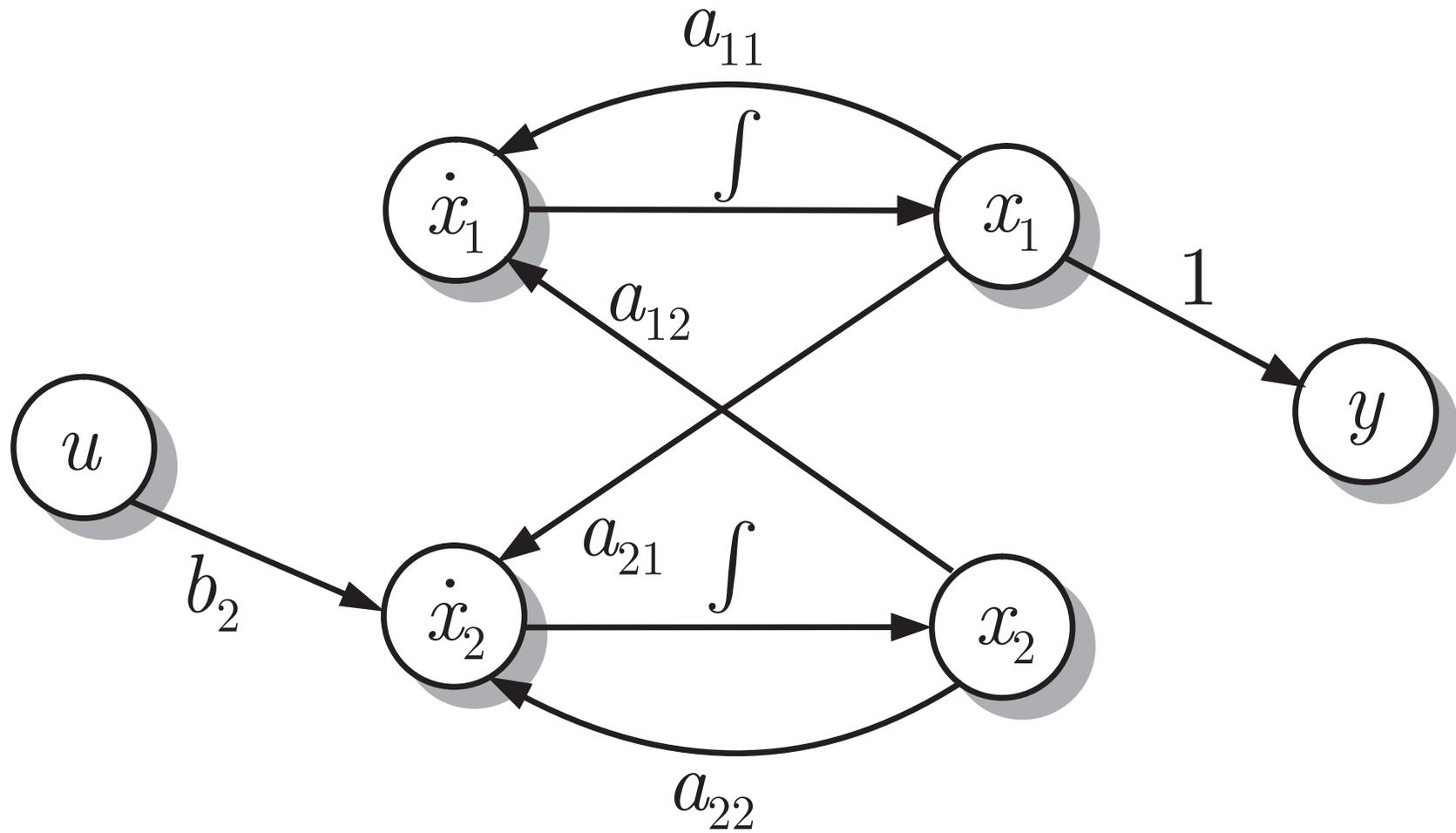


Abb. A.10. Signalflussgraph des RC-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

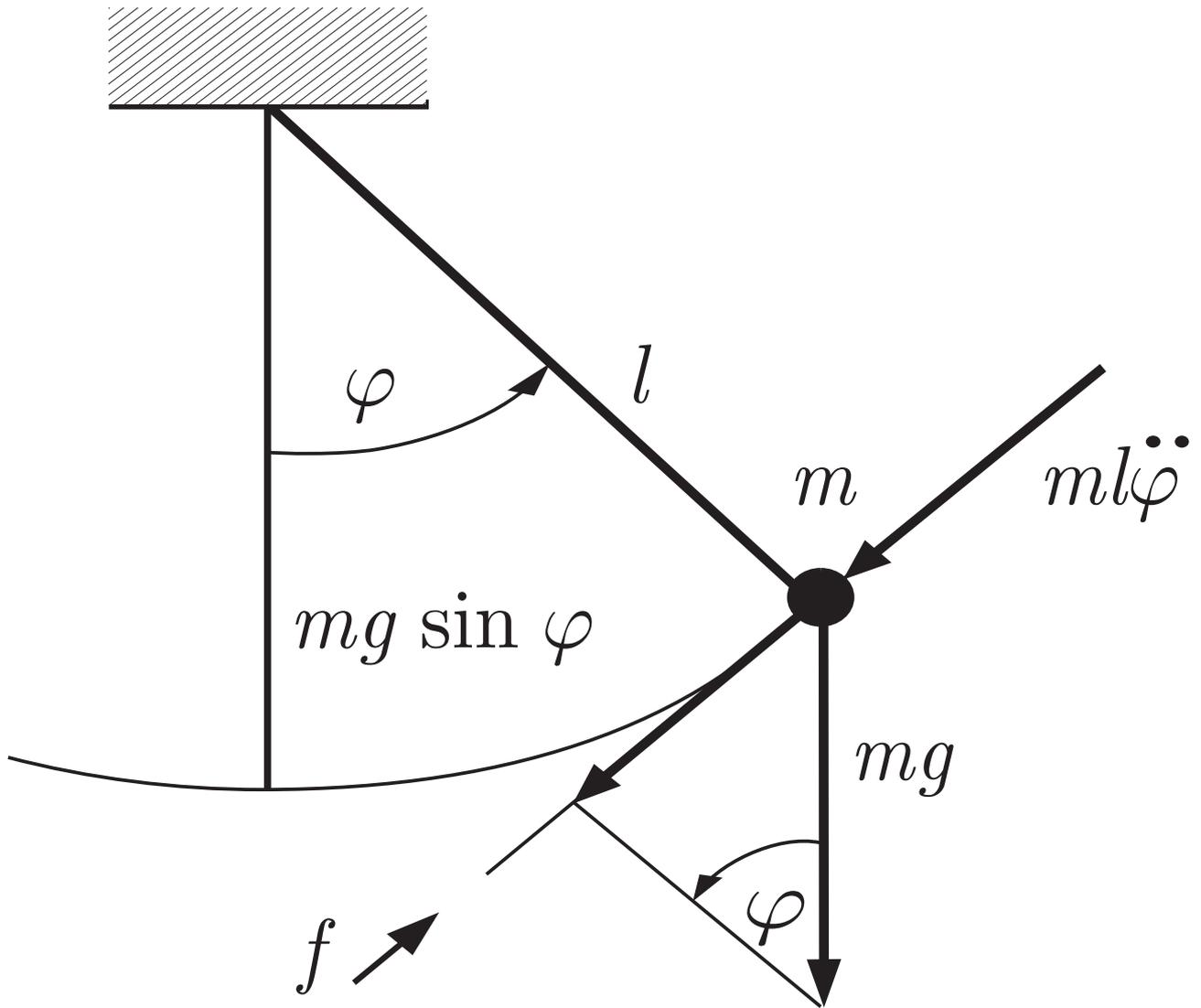


Abb. A.11: Kräftegleichgewicht am Pendel

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

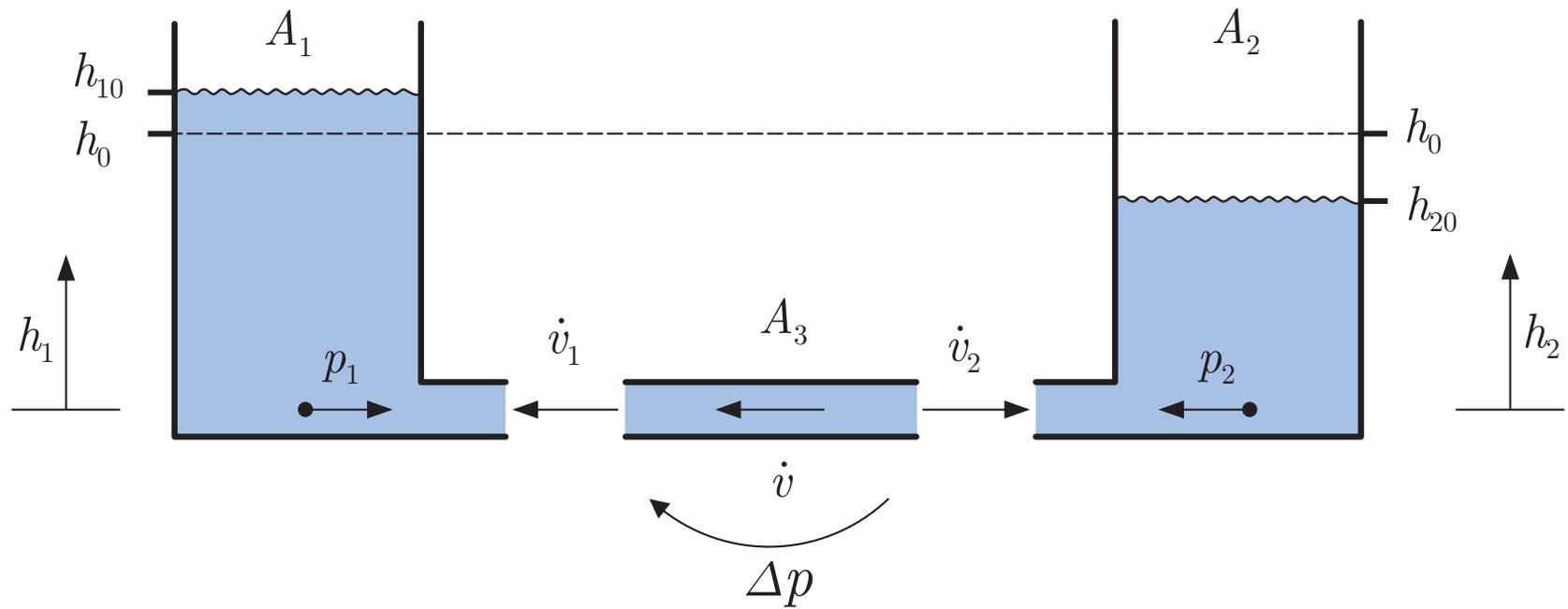


Abb. A.12. Zweitanksystem

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

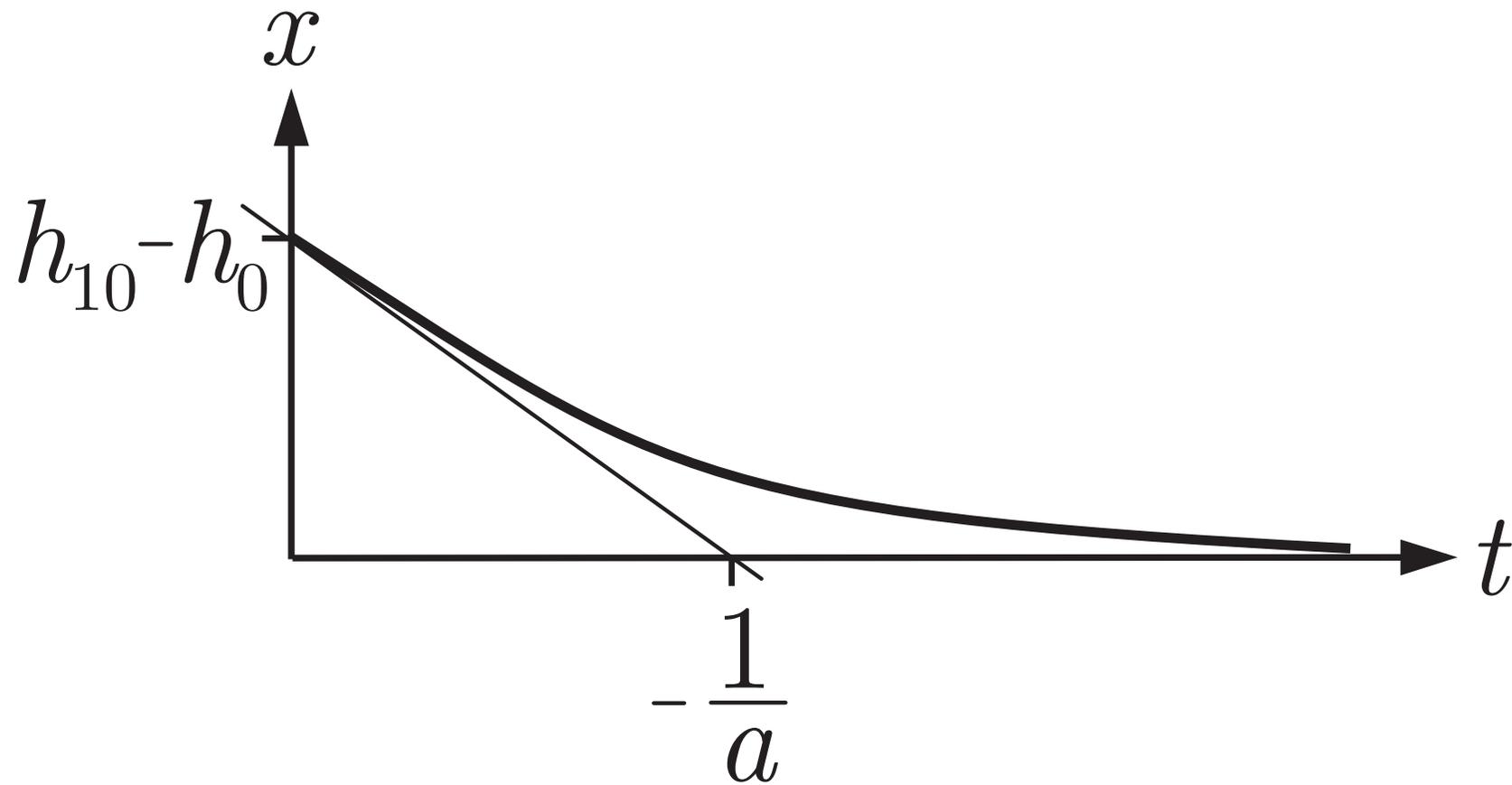


Abb. A.13. Eigenbewegung des Zweitanksystems

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

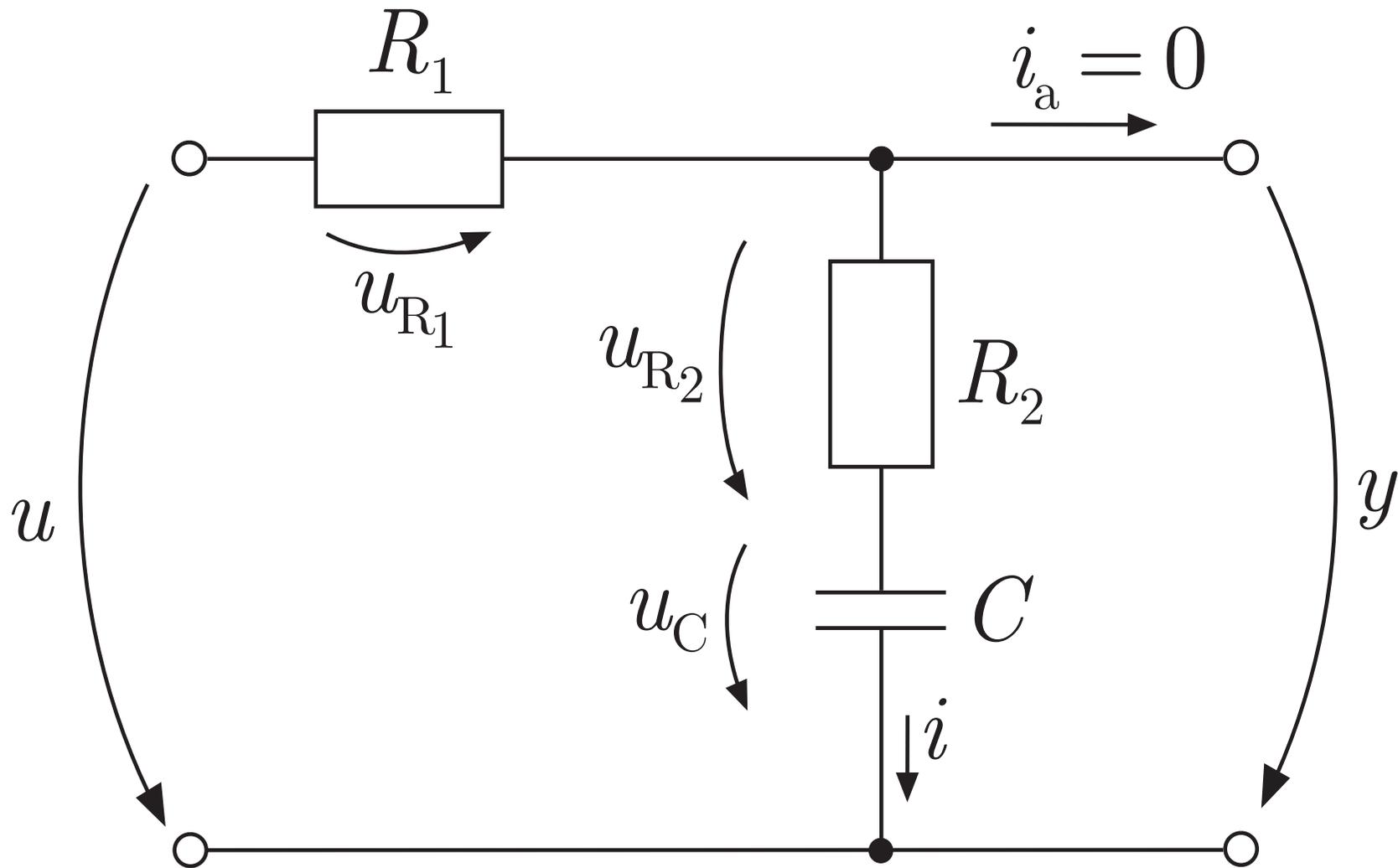


Abb. A.14. RC-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

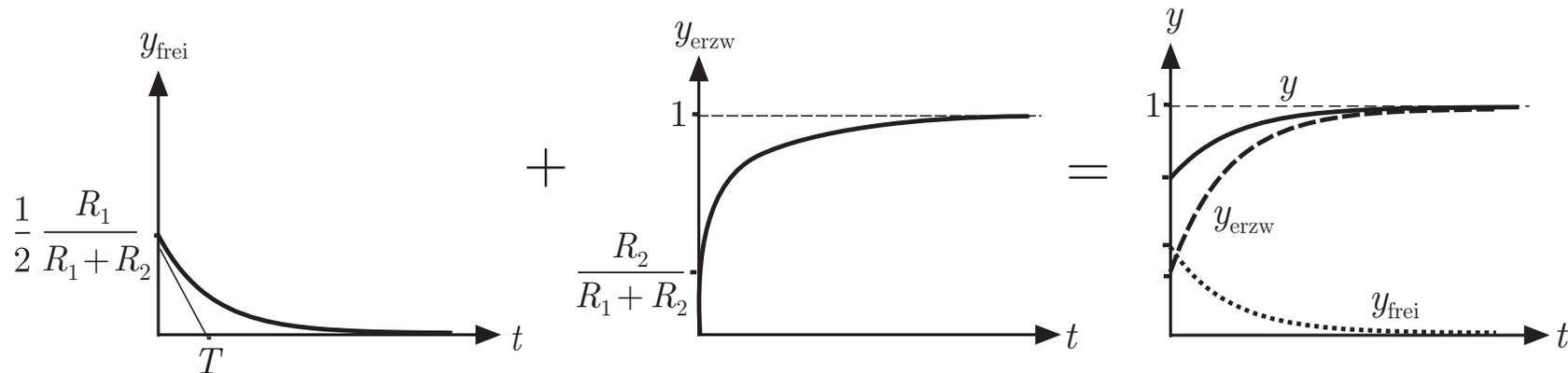


Abb. A.15. Überlagerung von Eigenbewegung und erzwungener Bewegung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

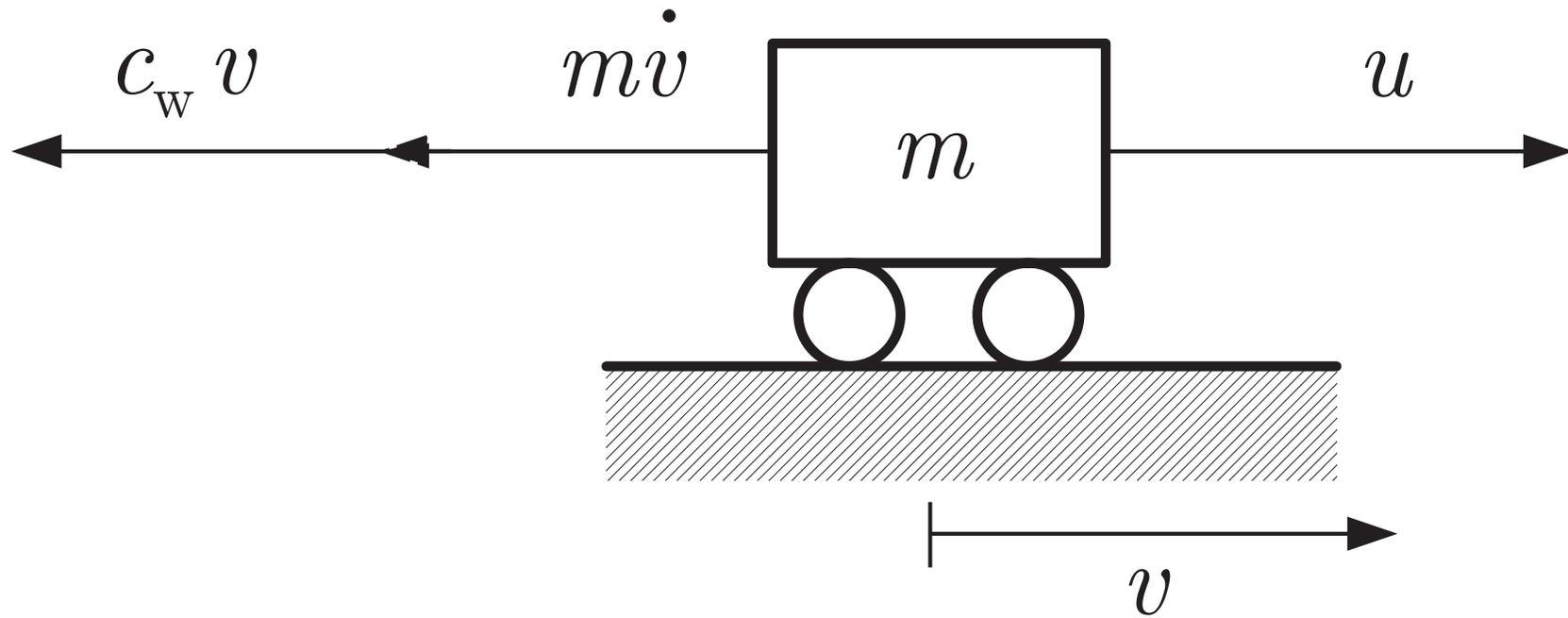


Abb. A.16. Kräftegleichgewicht am Fahrzeug

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

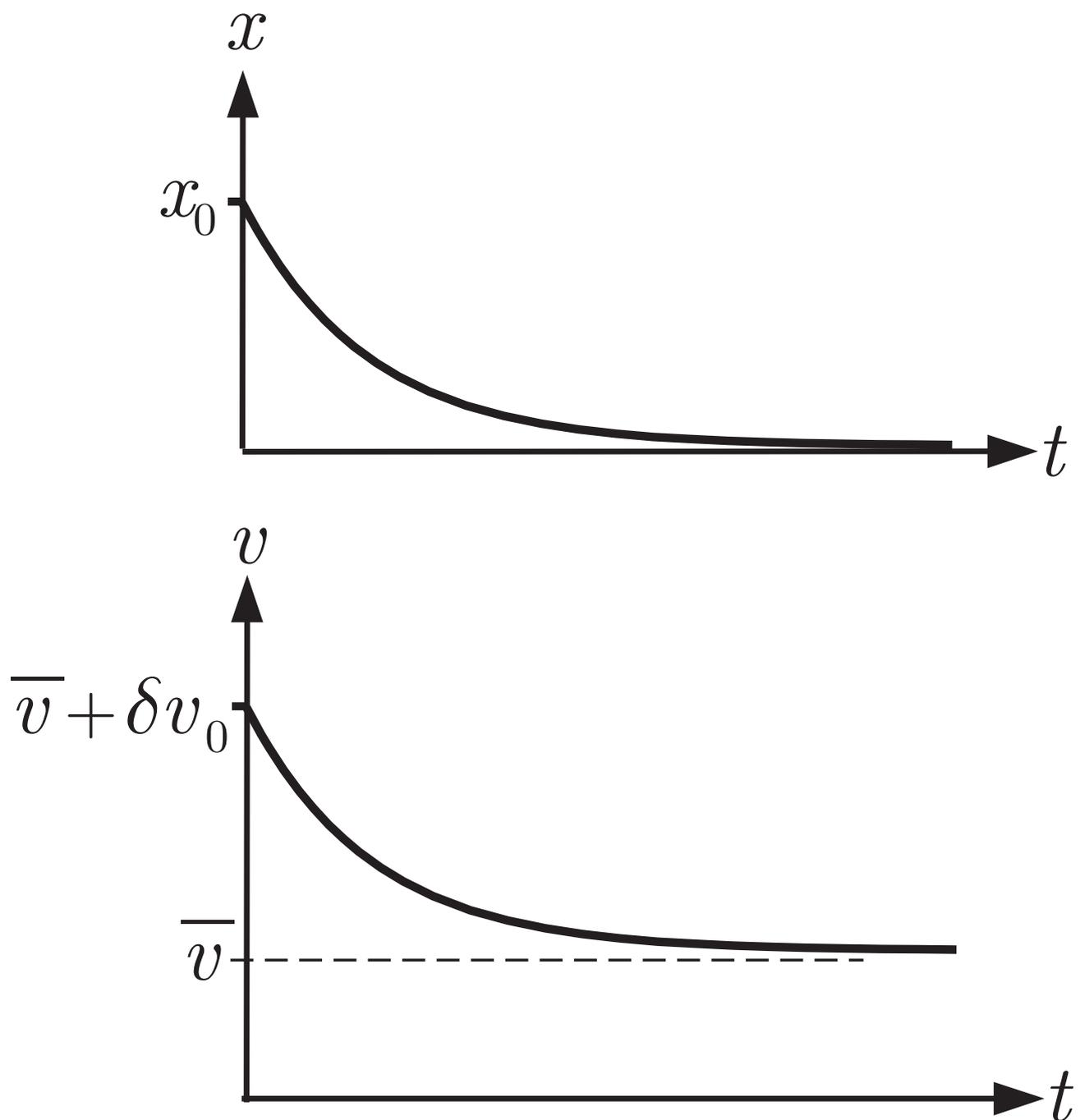


Abb. A.17: Eigenbewegung des Fahrzeugs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

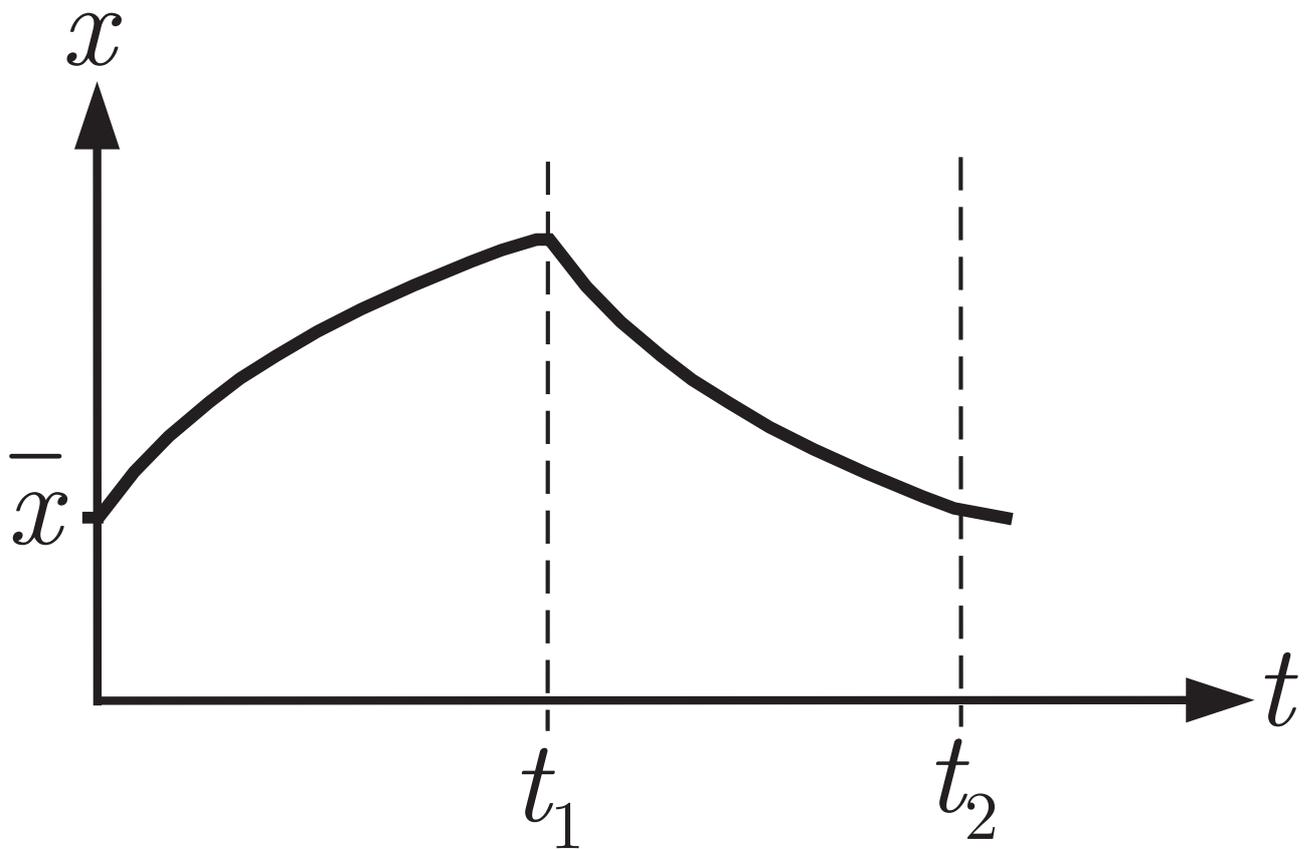


Abb. A.18: Erzwungene Bewegung des Fahrzeugs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

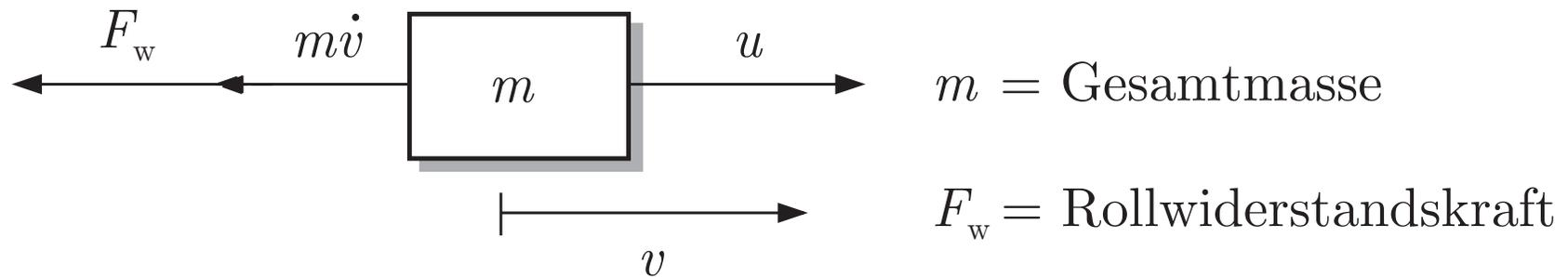


Abb. A.19. Kräftegleichgewicht an der fahrenden Eisenbahn

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

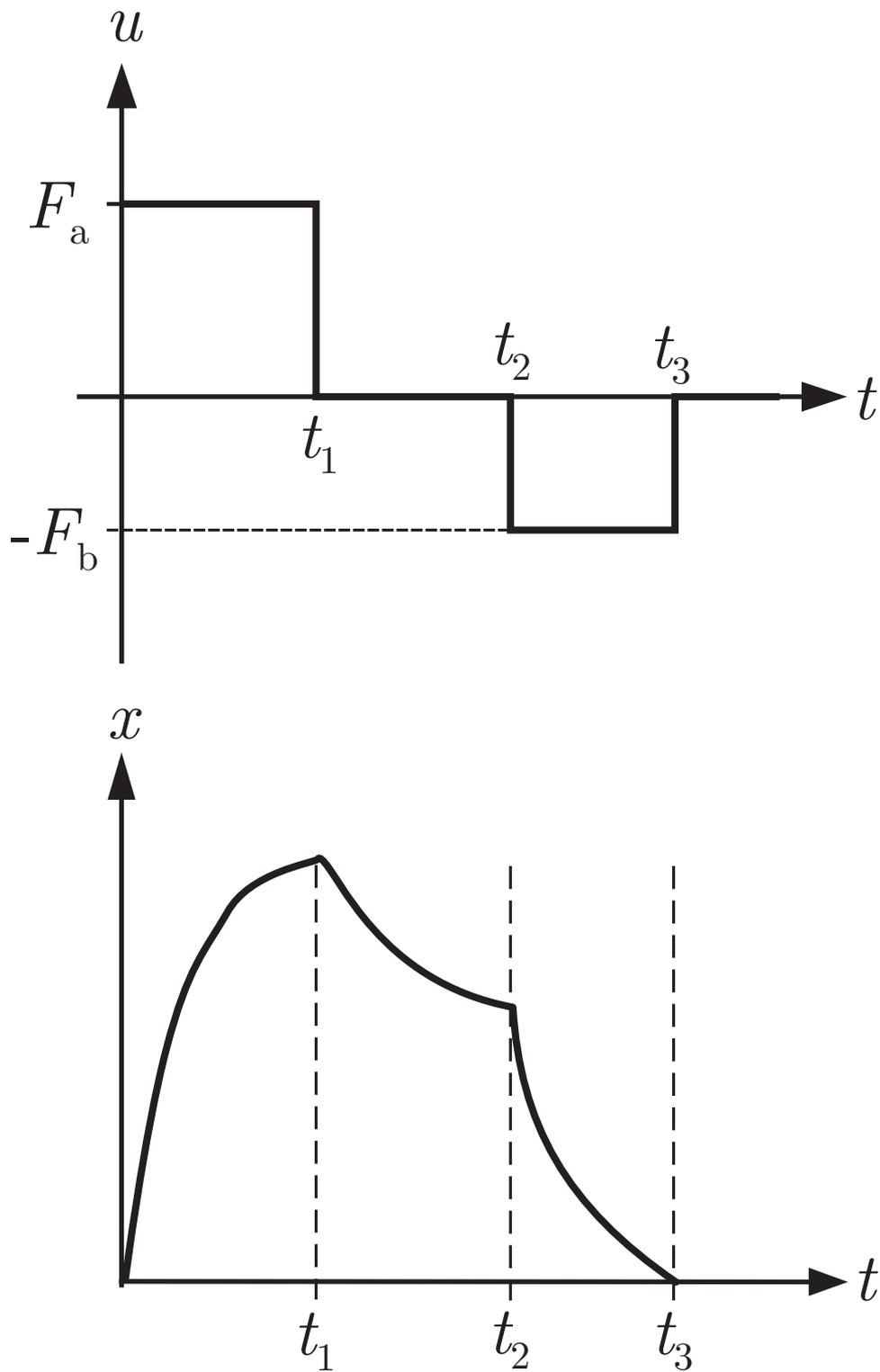


Abb. A.20. Eingangsgröße (oben) und Geschwindigkeitsverlauf (unten) der Eisenbahn

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

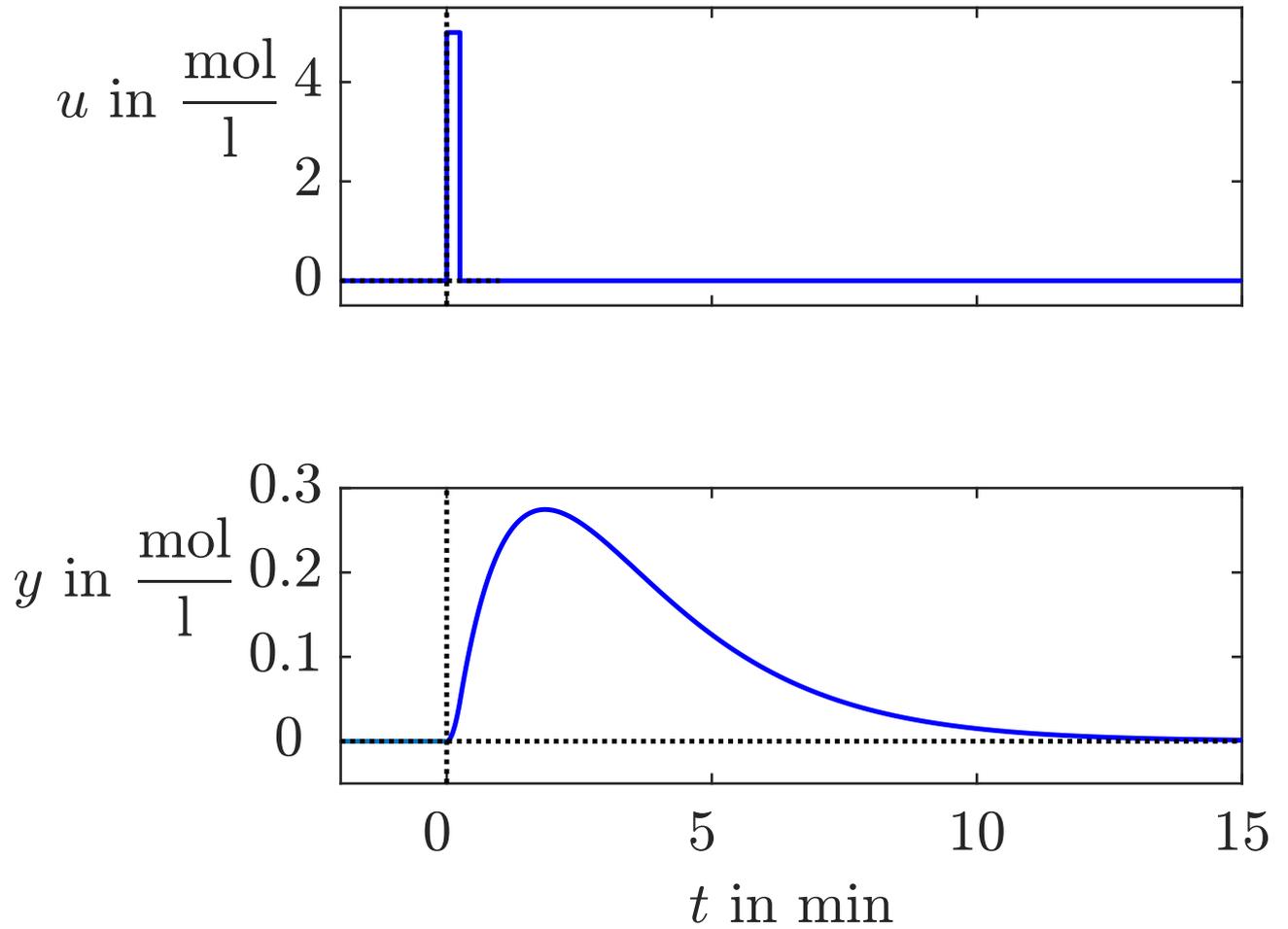


Abb. A.21: Ausgangsgröße des Behältersystems bei impulsförmiger Erregung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

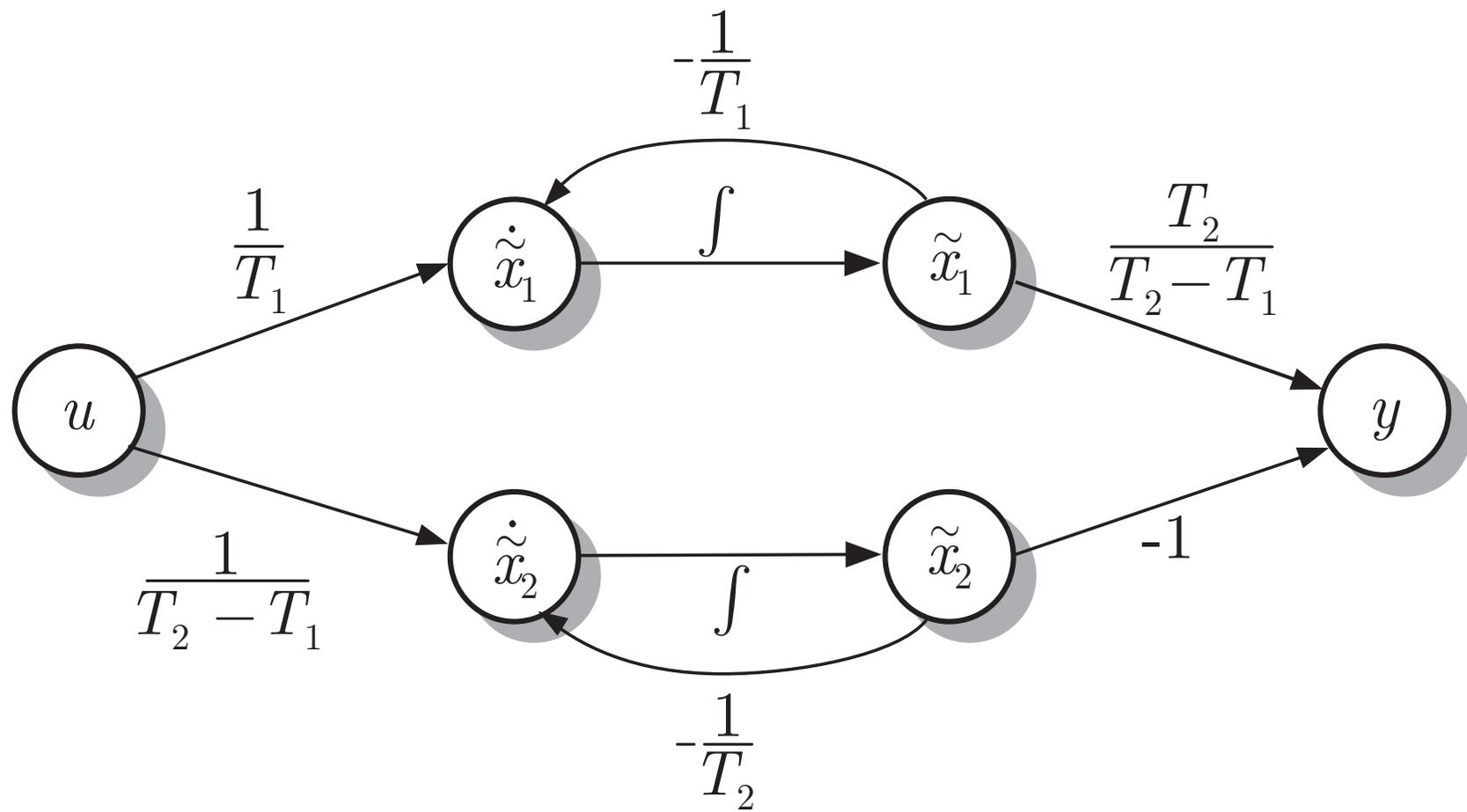


Abb. A.22. Signalflussgraph

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

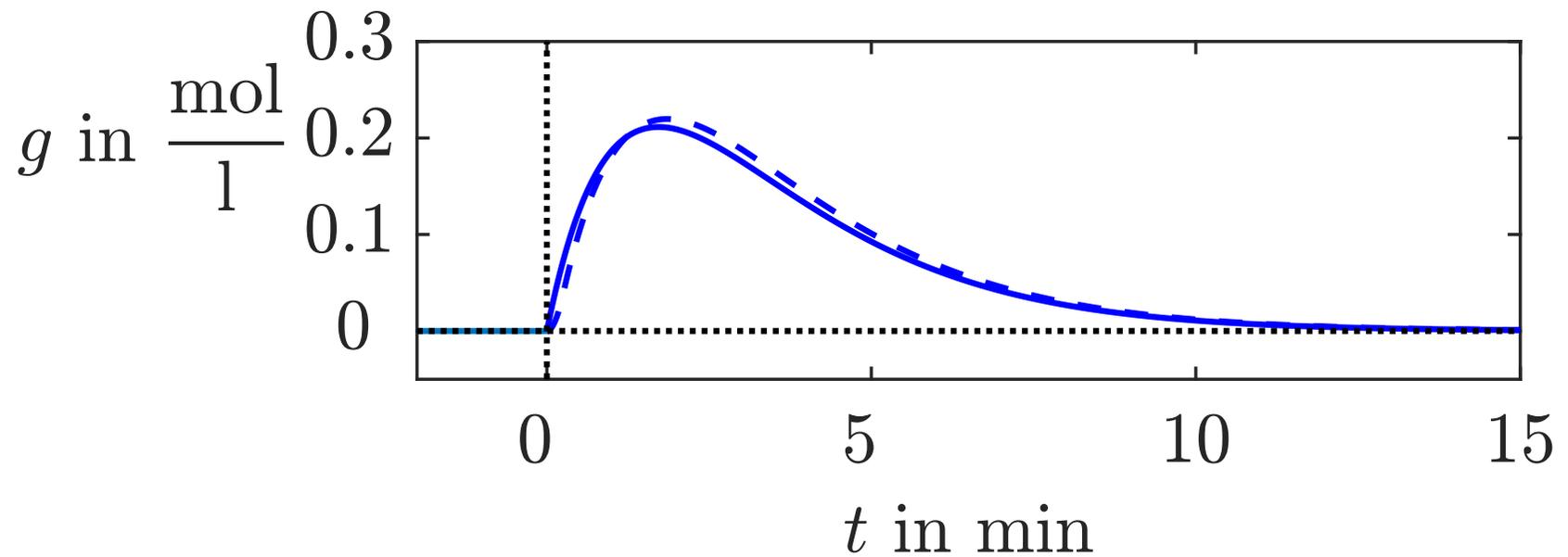


Abb. A.23. Vergleich der Gewichtsfunktion mit der Ausgangsgröße des Behältersystems bei impulsförmiger Erregung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

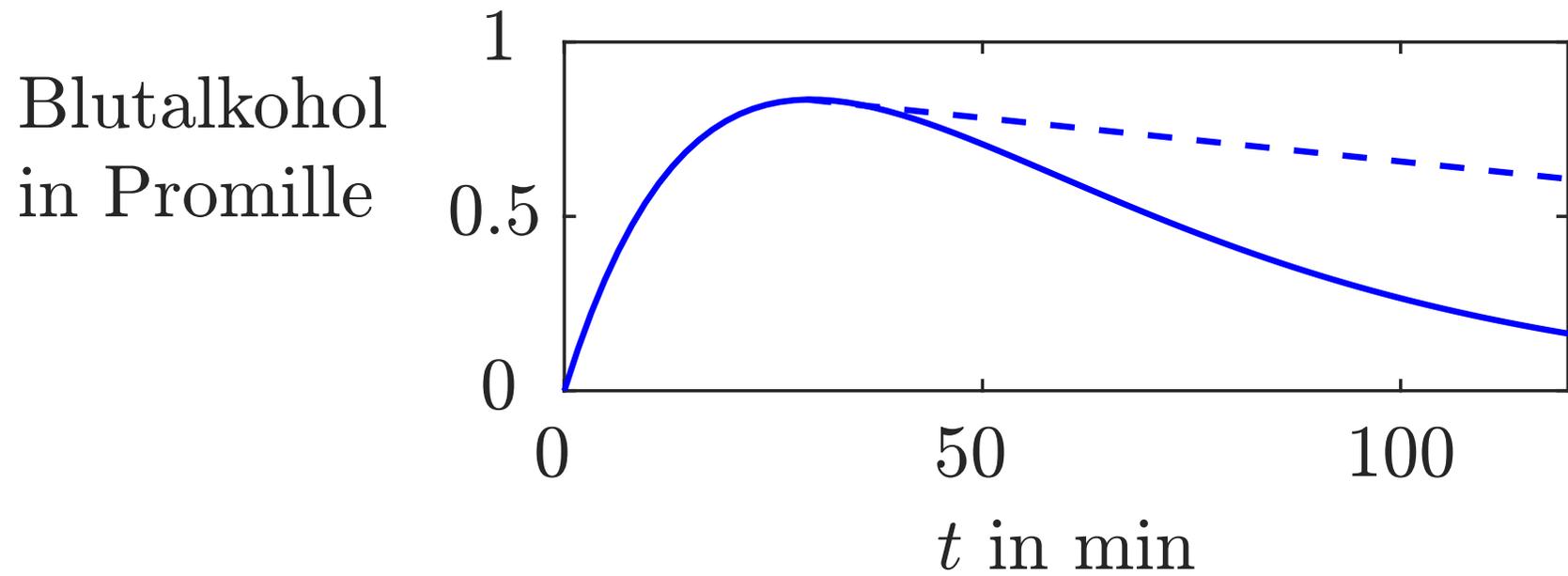


Abb. A.24. Verlauf des Blutalkoholspiegels

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

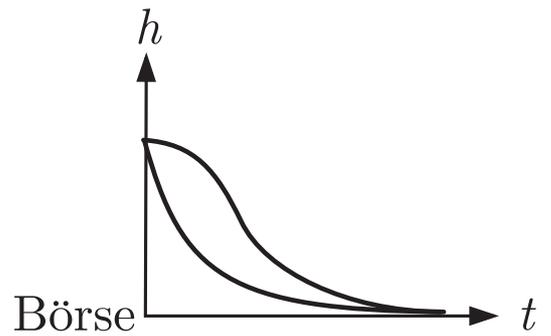
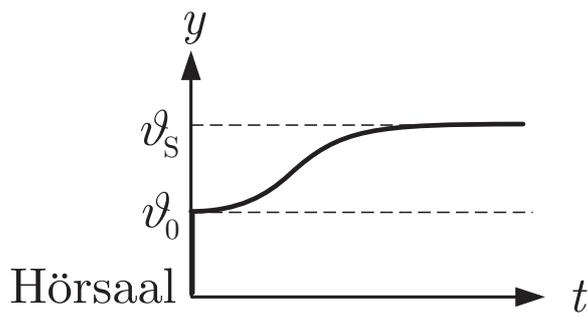
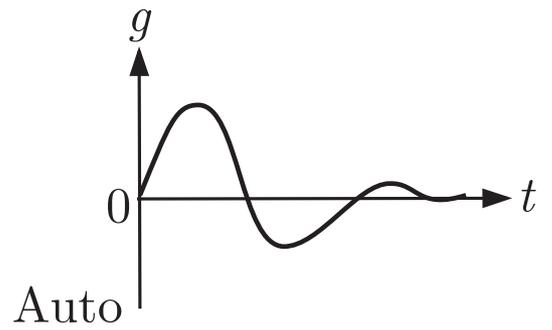
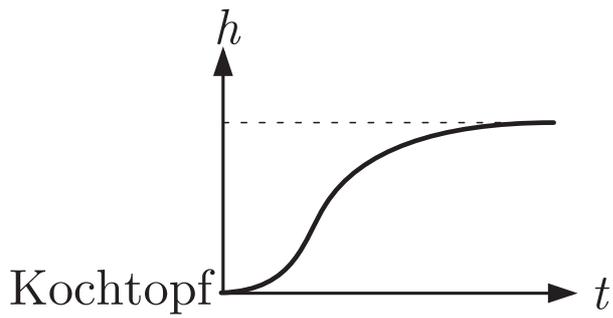
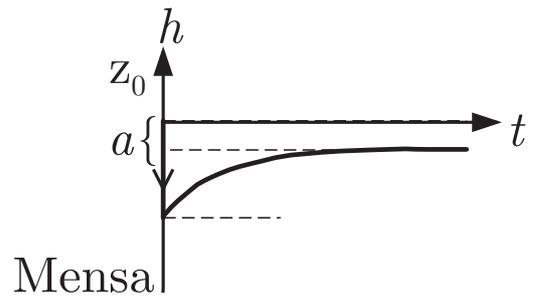
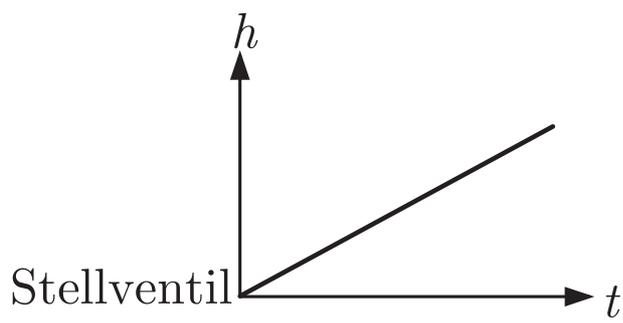


Abb. A.25: Qualitativer Verlauf der Übergangsfunktionen bzw. der Gewichtsfunktion

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

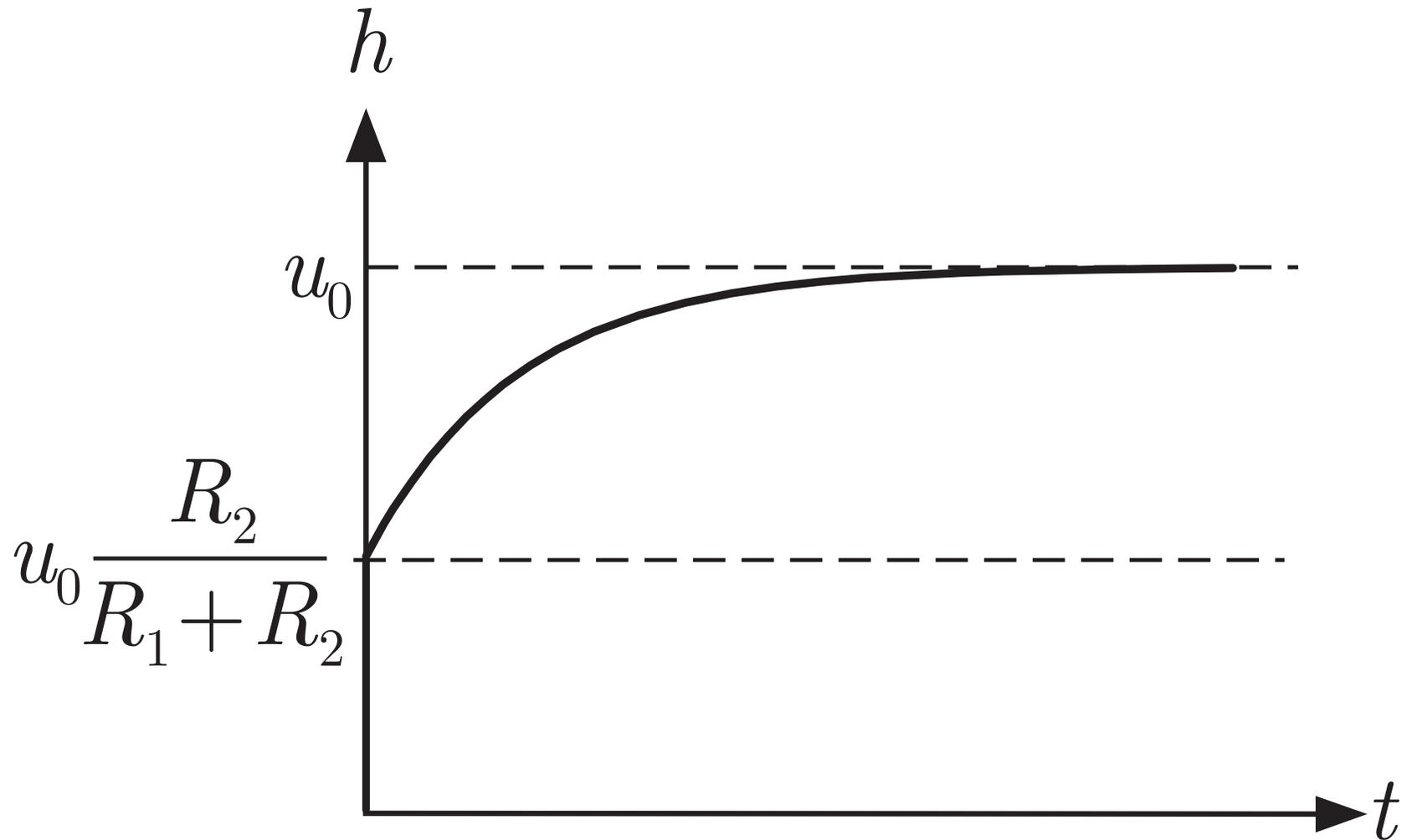


Abb. A.26. Übergangsfunktion des RC-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

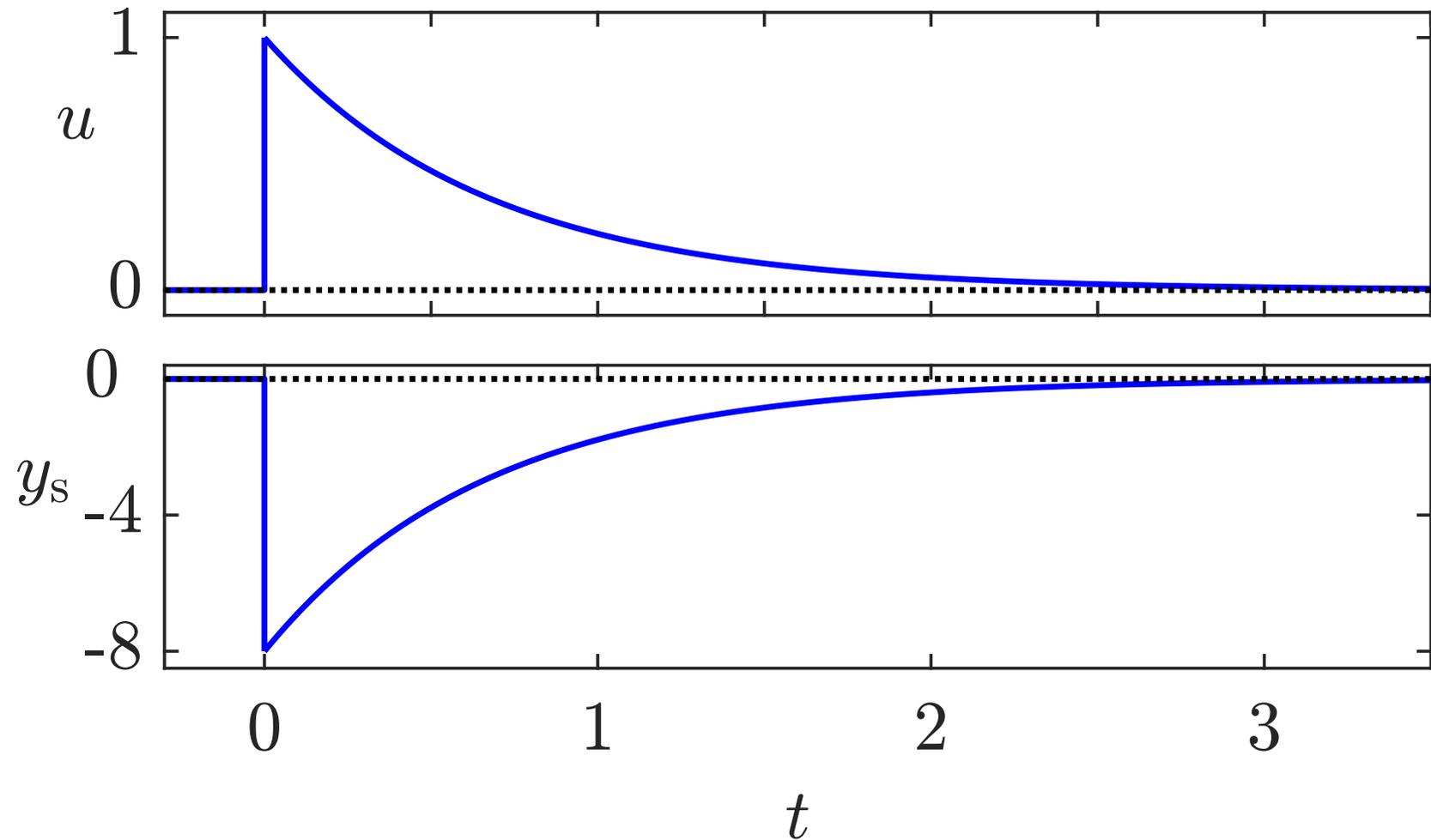


Abb. A.27. Stationäres Verhalten des PT_2 -Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

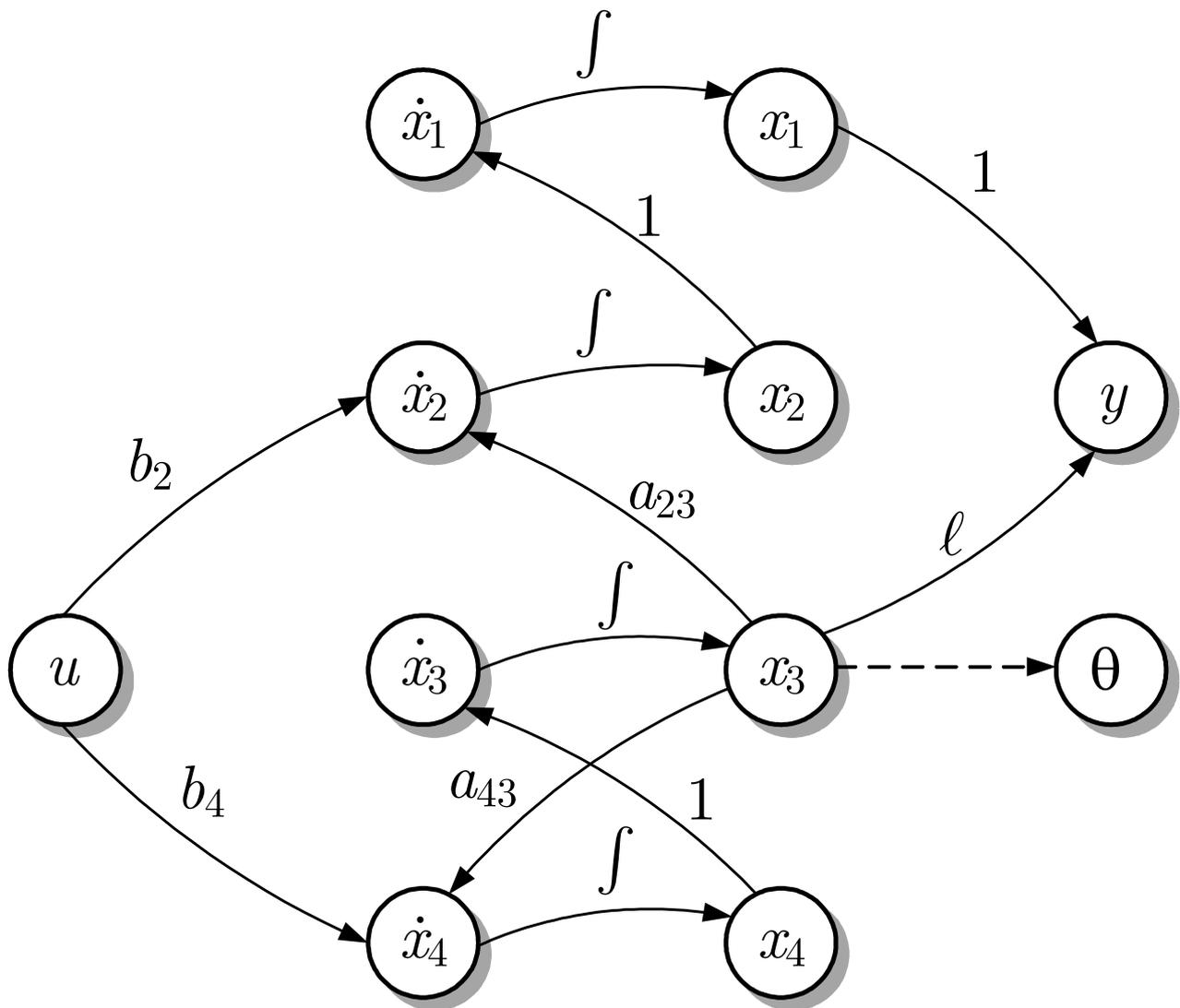


Abb. A.28: Signalflussgraph der Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

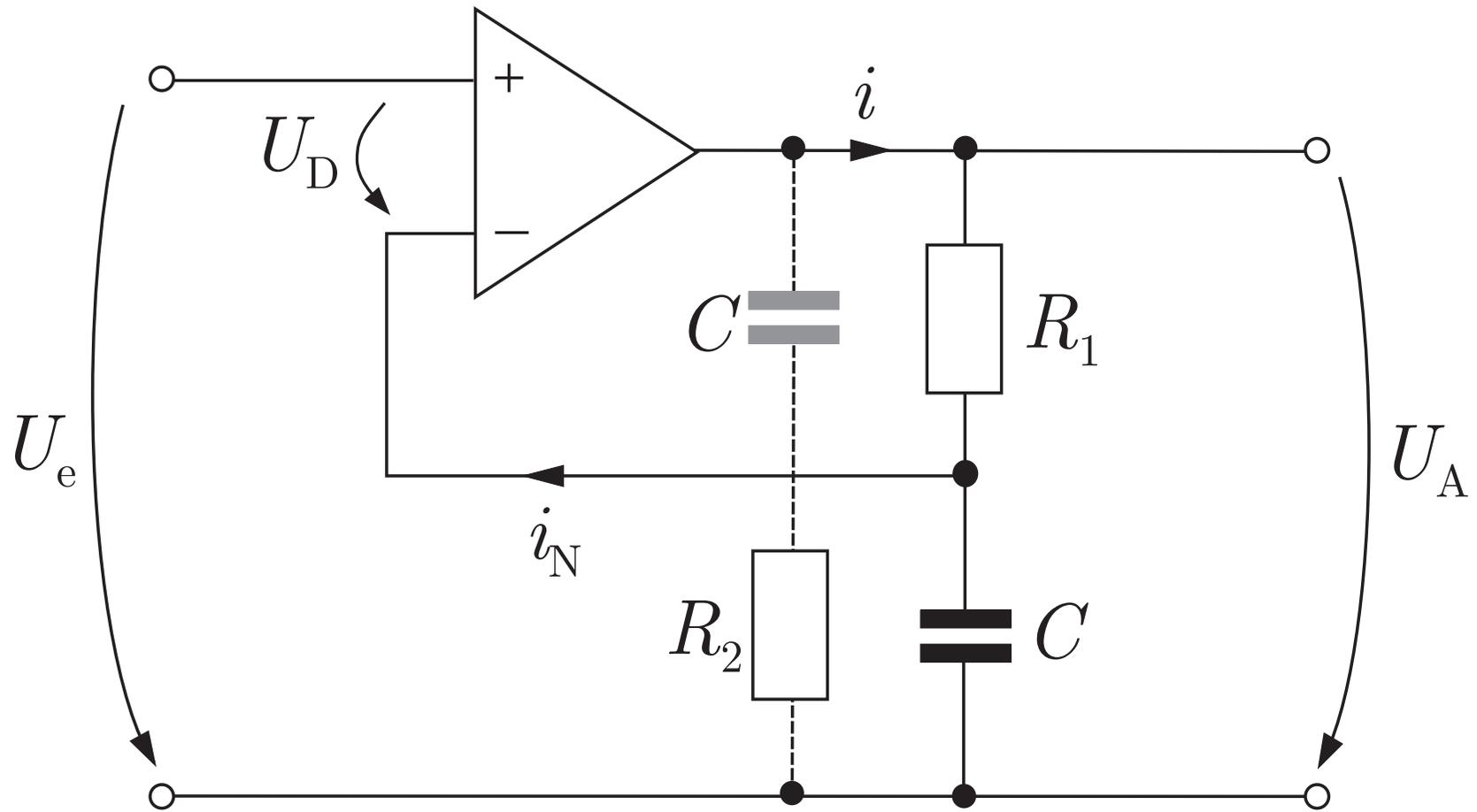


Abb. A.29. Beschaltung des Operationsverstärkers mit dynamischen Elementen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

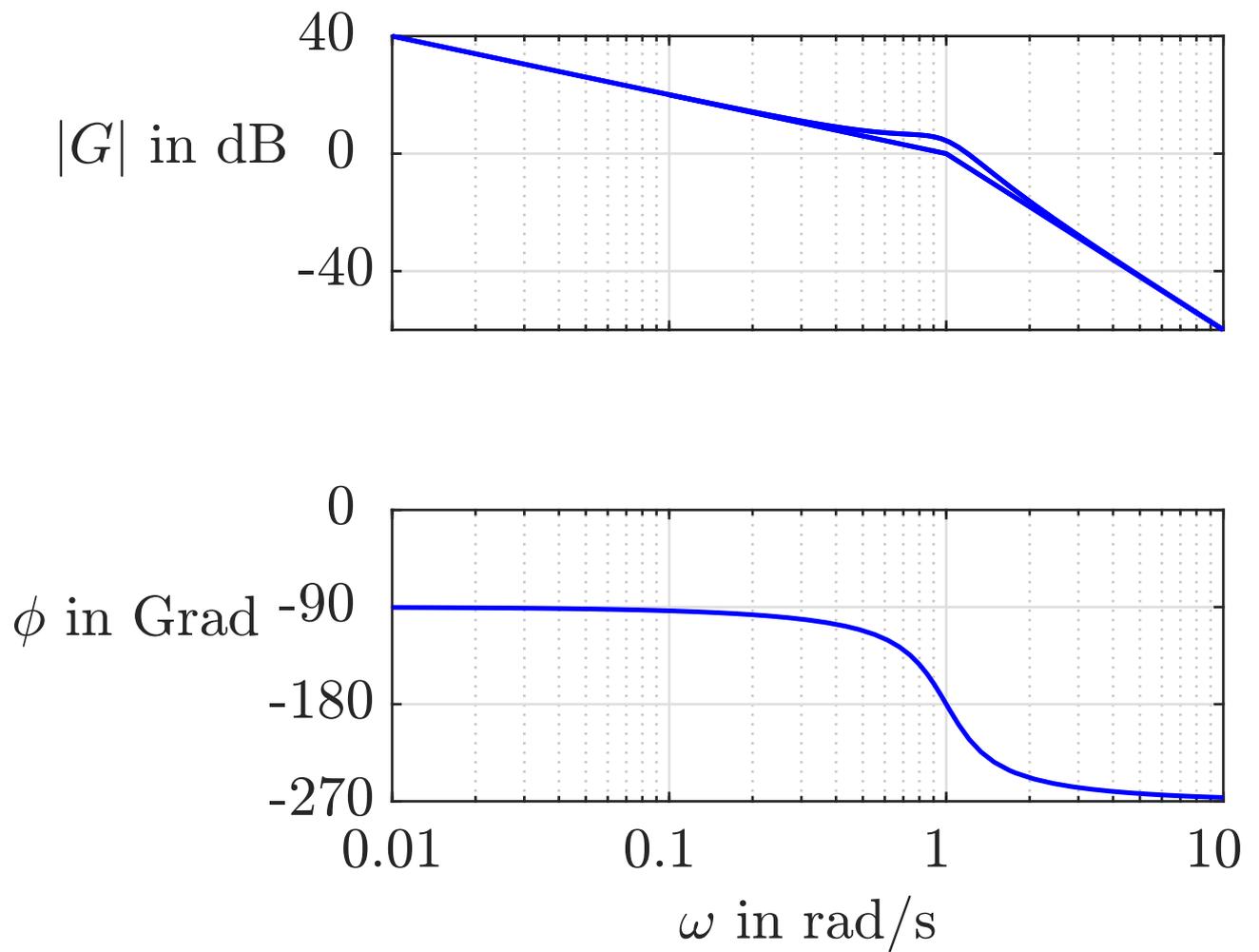


Abb. A.30: Geradenapproximation des hydraulischen Stellantriebs

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

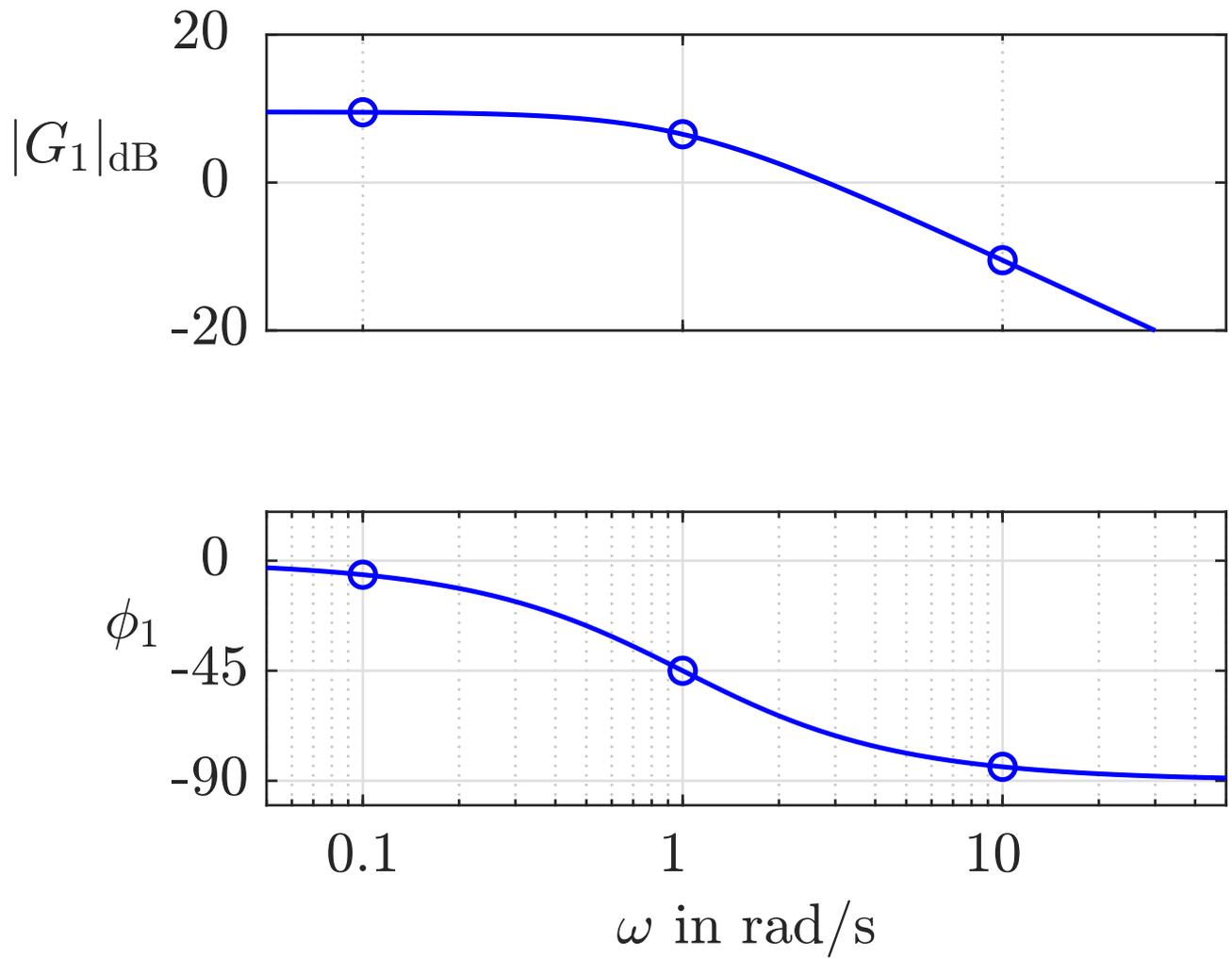


Abb. A.31: Bodediagramm des PT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

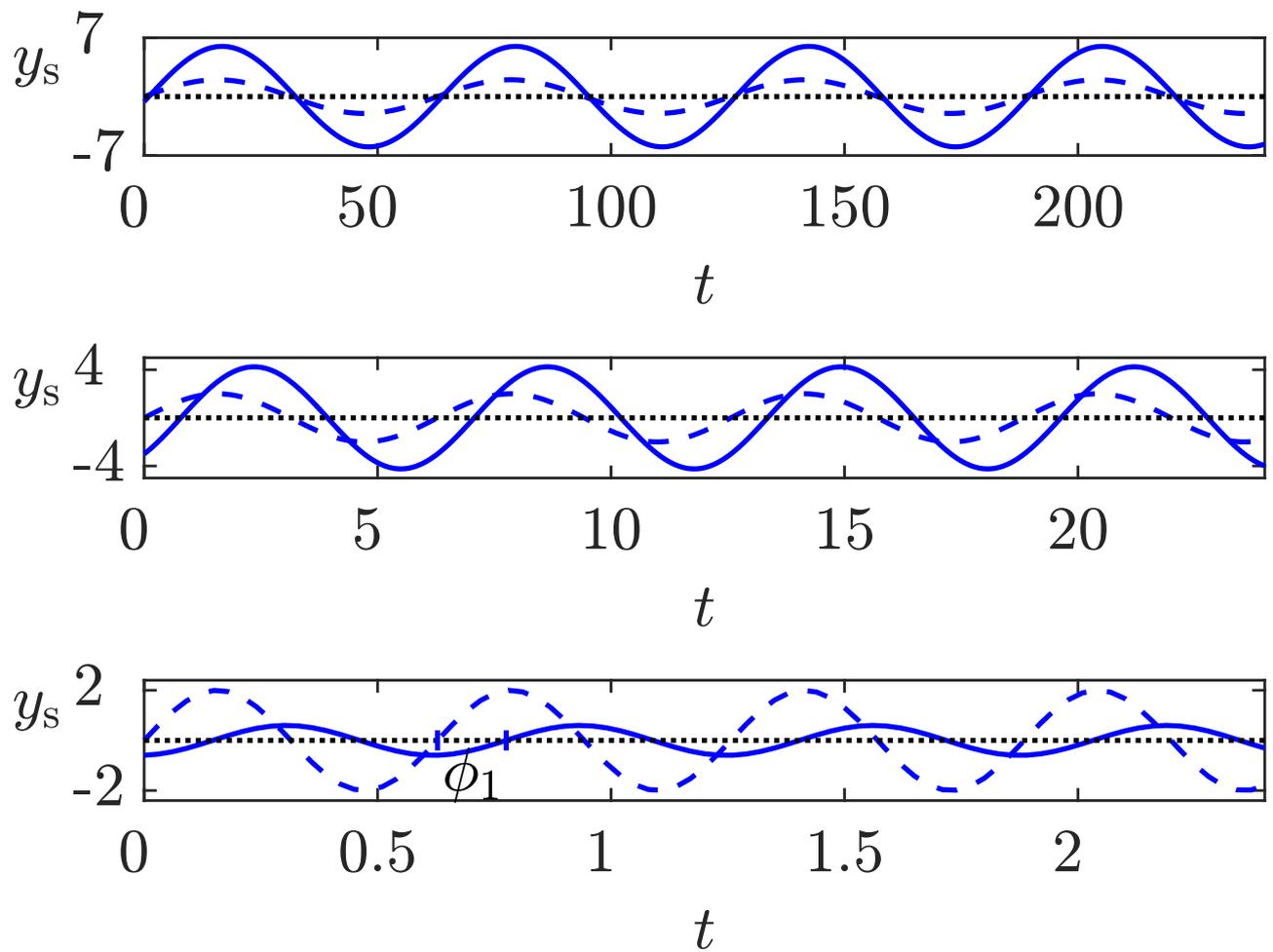


Abb. A.31: Atationäres Verhalten des PT₁-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

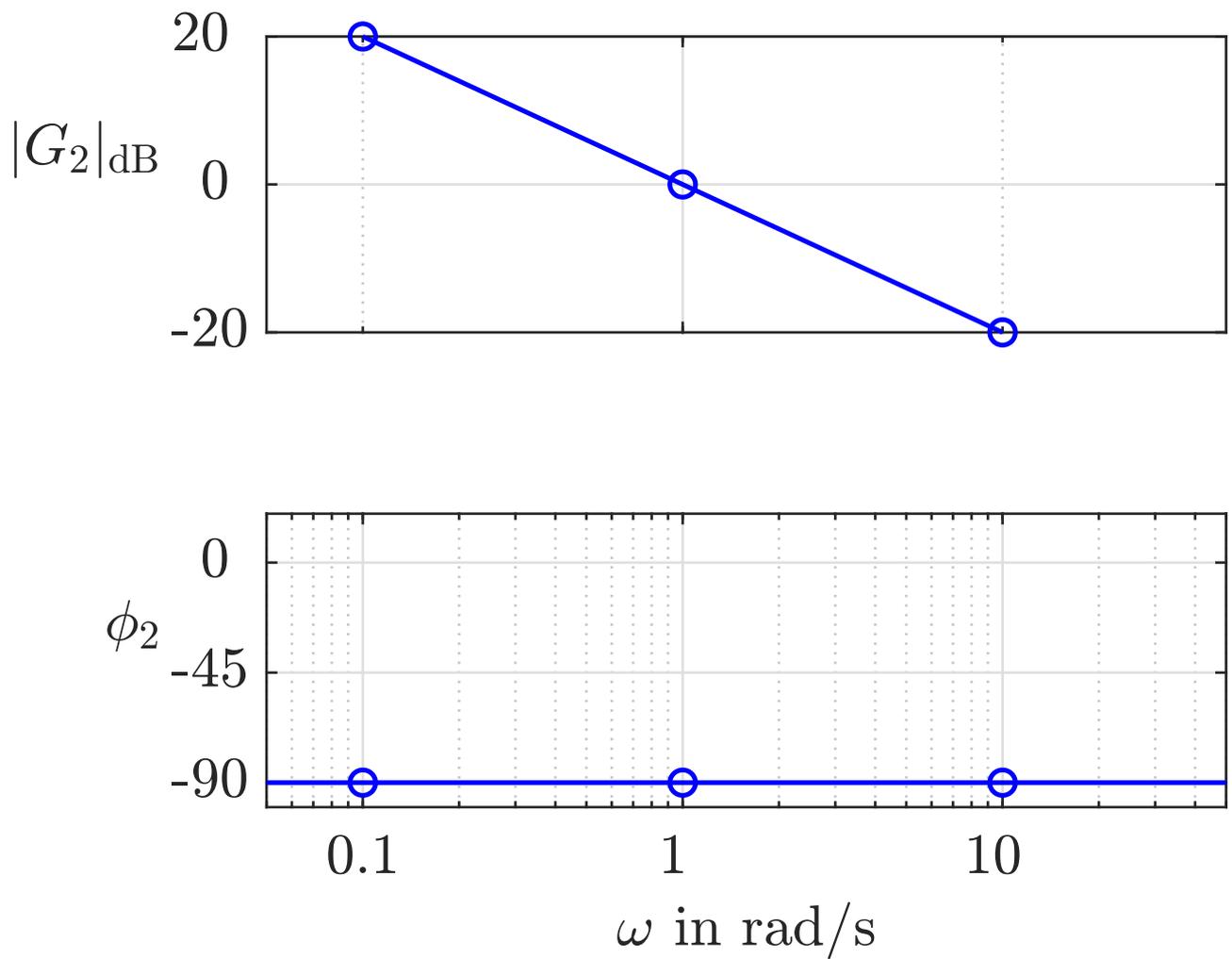


Abb. A.32: Bodediagramm und stationäres Verhalten des I-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

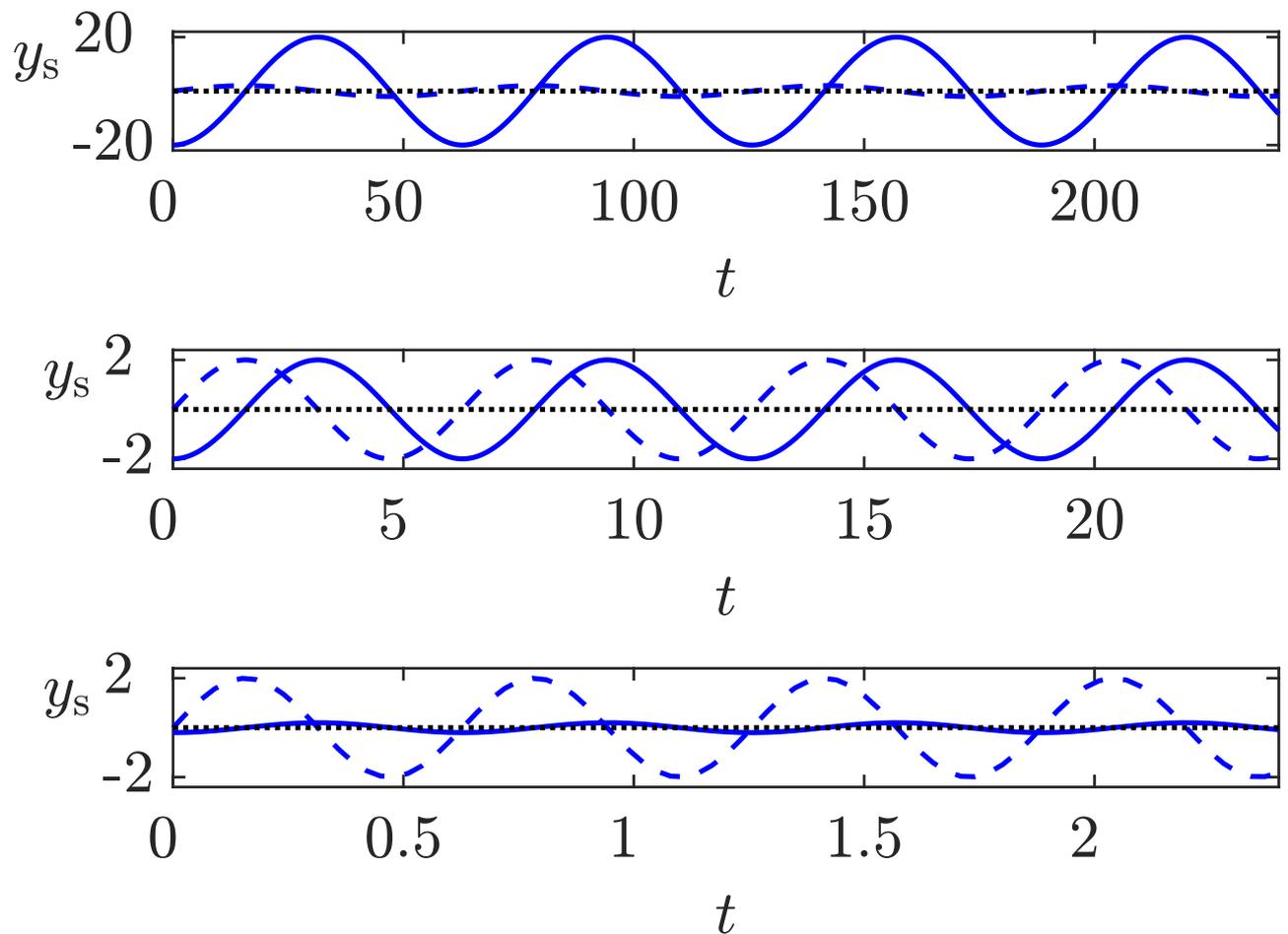


Abb. A.32: Bodediagramm und stationäres Verhalten des I-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

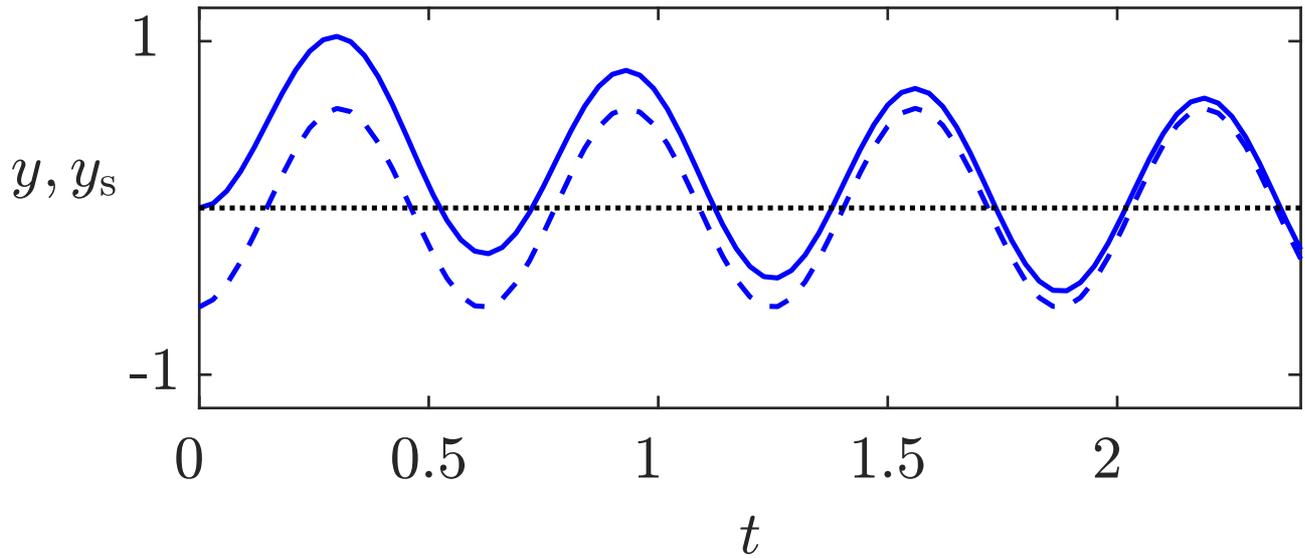


Abb. A.33: Vergleich von stationärem Verhalten (- - -) und erzwungener Bewegung (—) für das PT_1 -Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

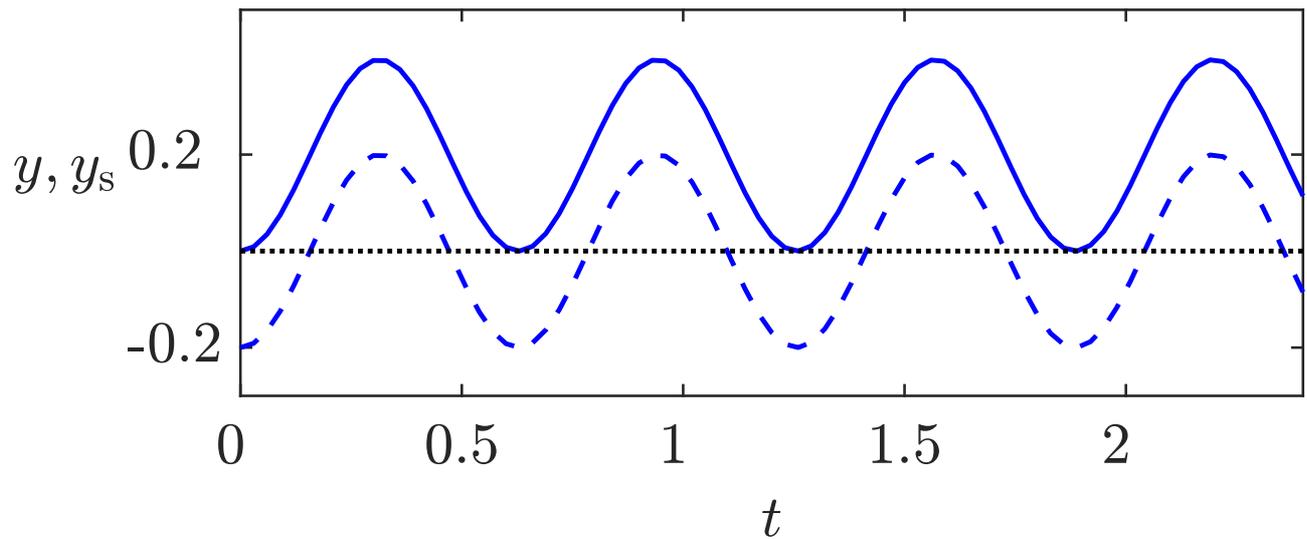


Abb. A.33: Vergleich von stationärem Verhalten (- - -) und erzwungener Bewegung (—) für das I-Glied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

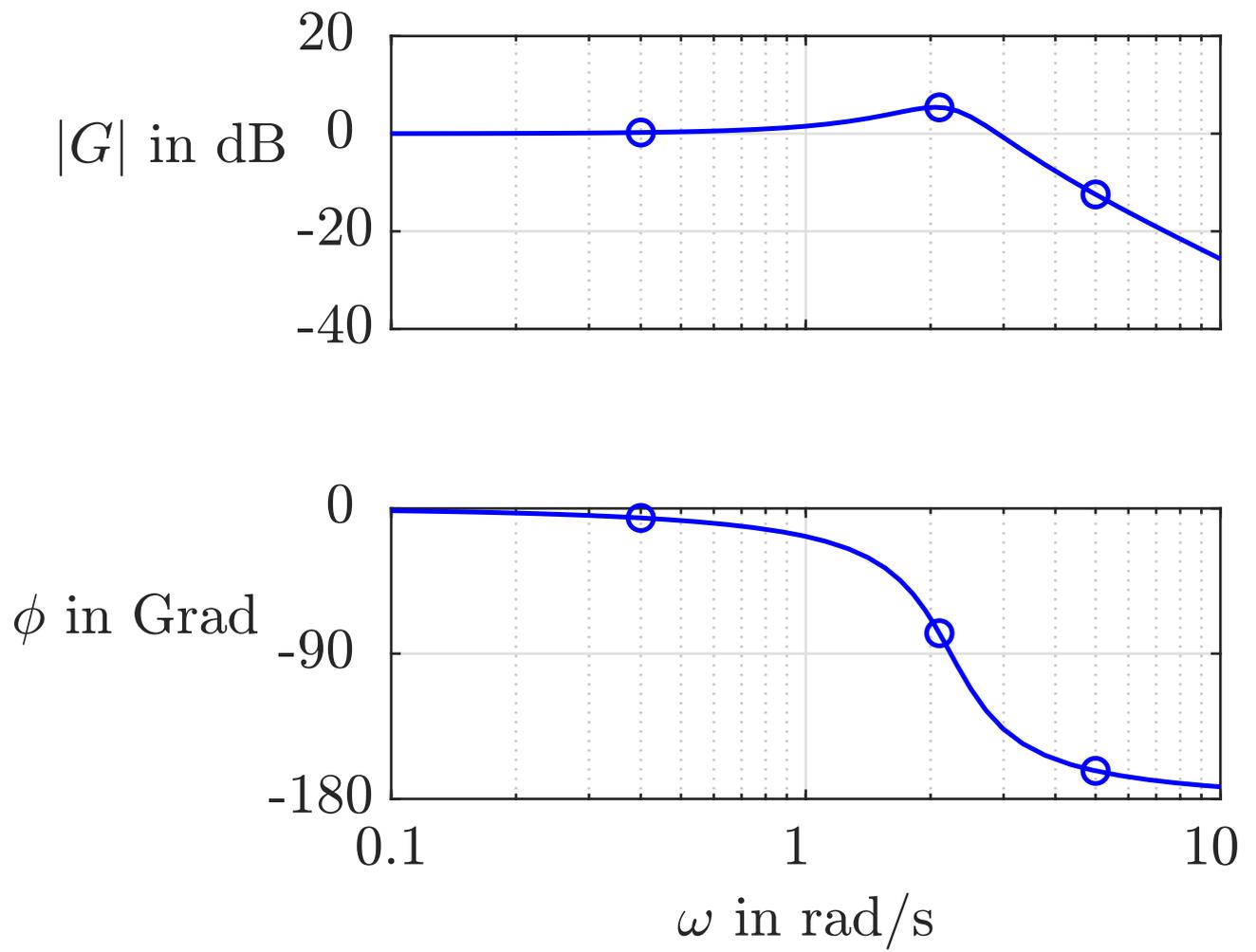


Abb. A.34: Bodediagramm des Feder-Masse-Schwingers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

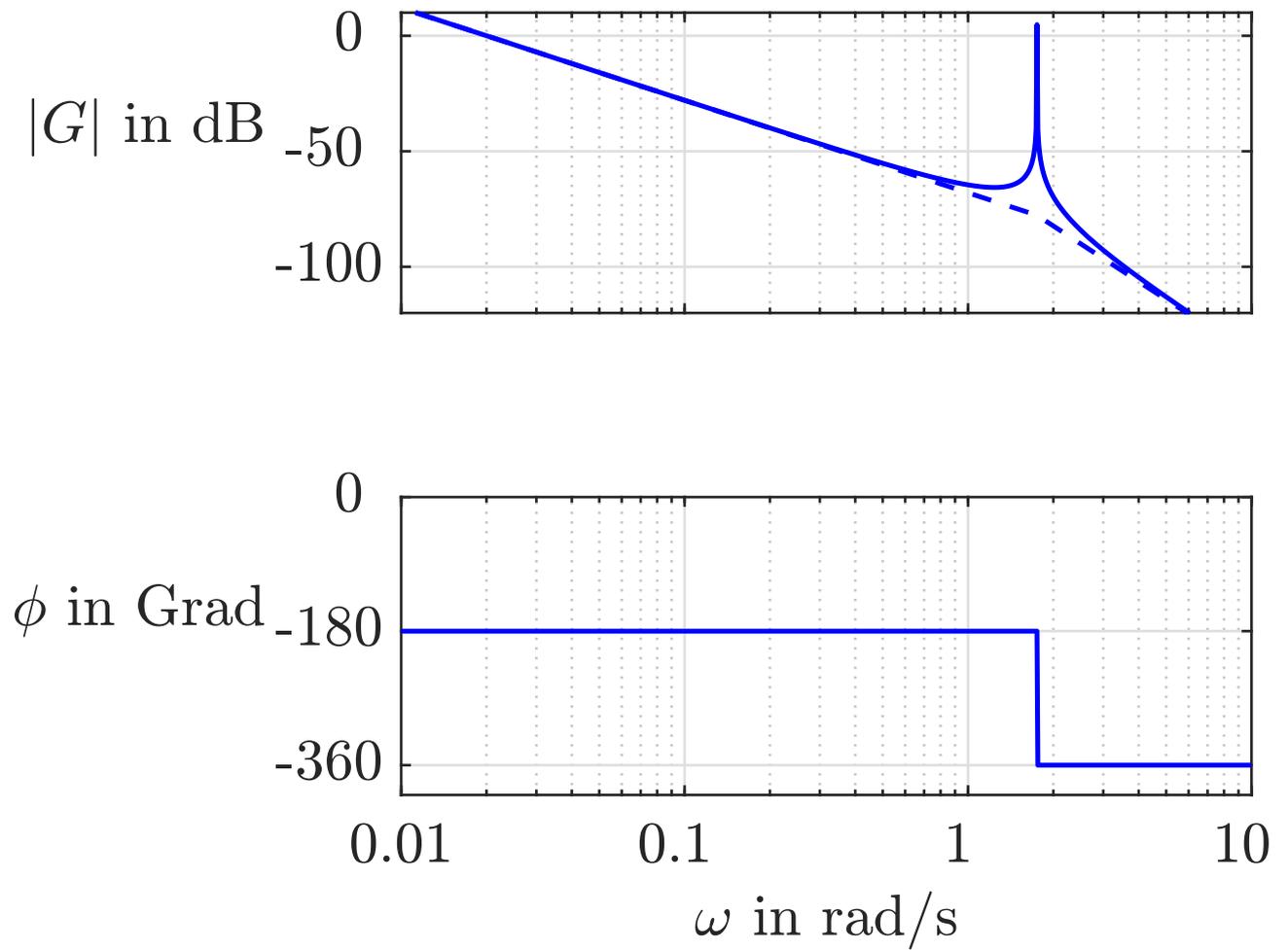


Abb. A.35: Bodediagramm der Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

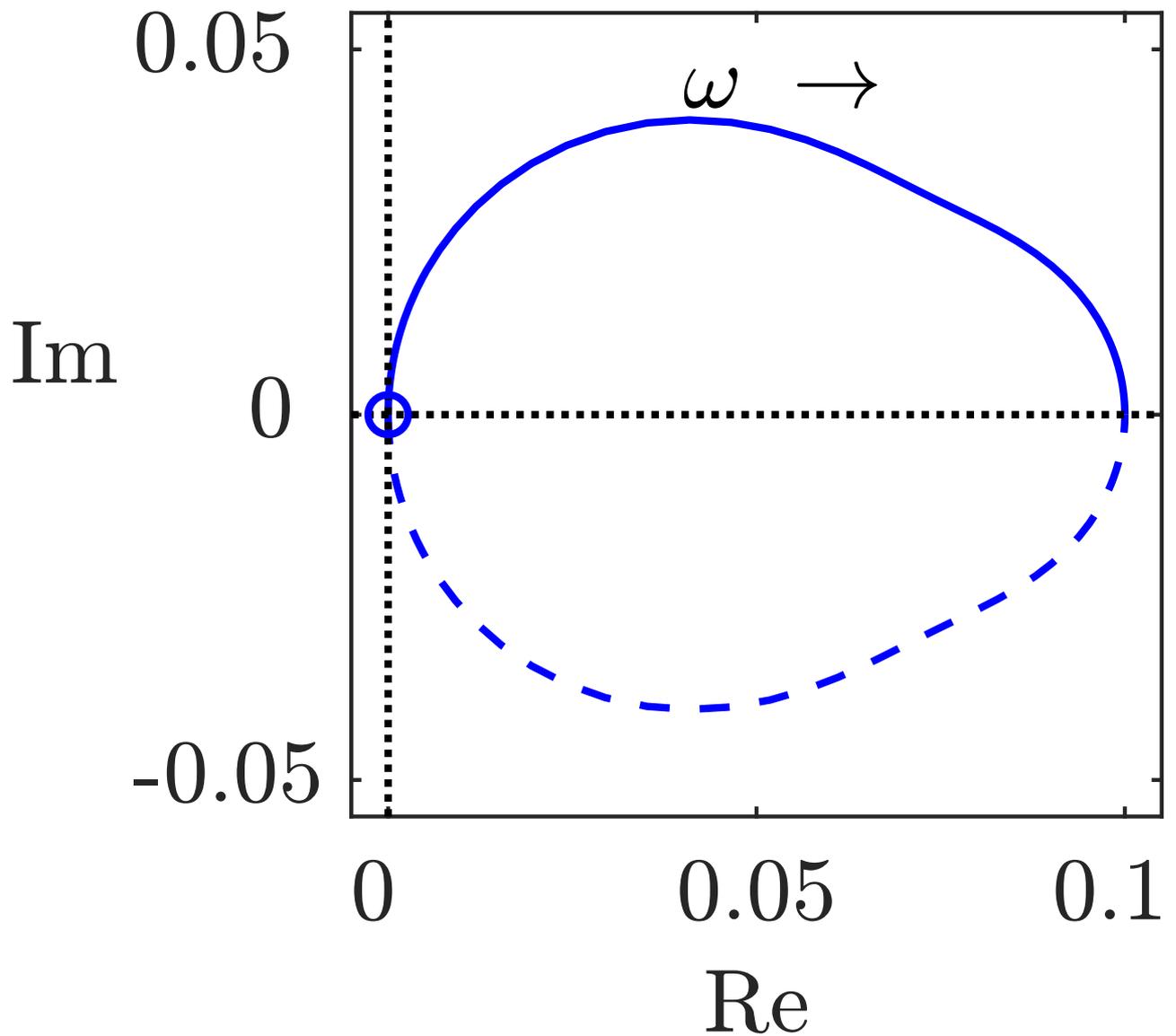


Abb. A.36: Ortskurve des RC-Gliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

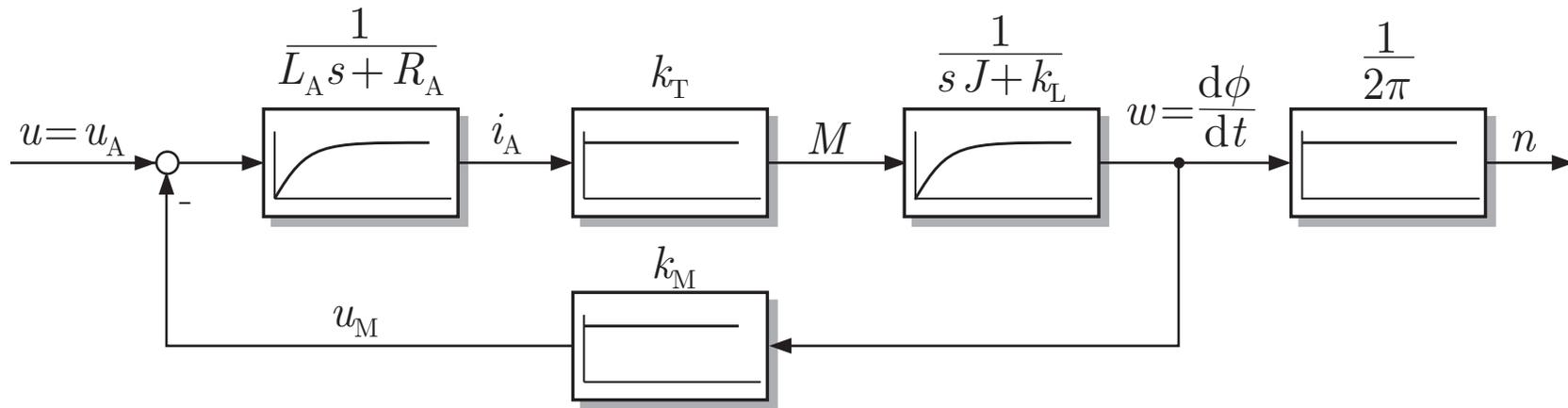


Abb. A.37. Blockschaltbild des Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

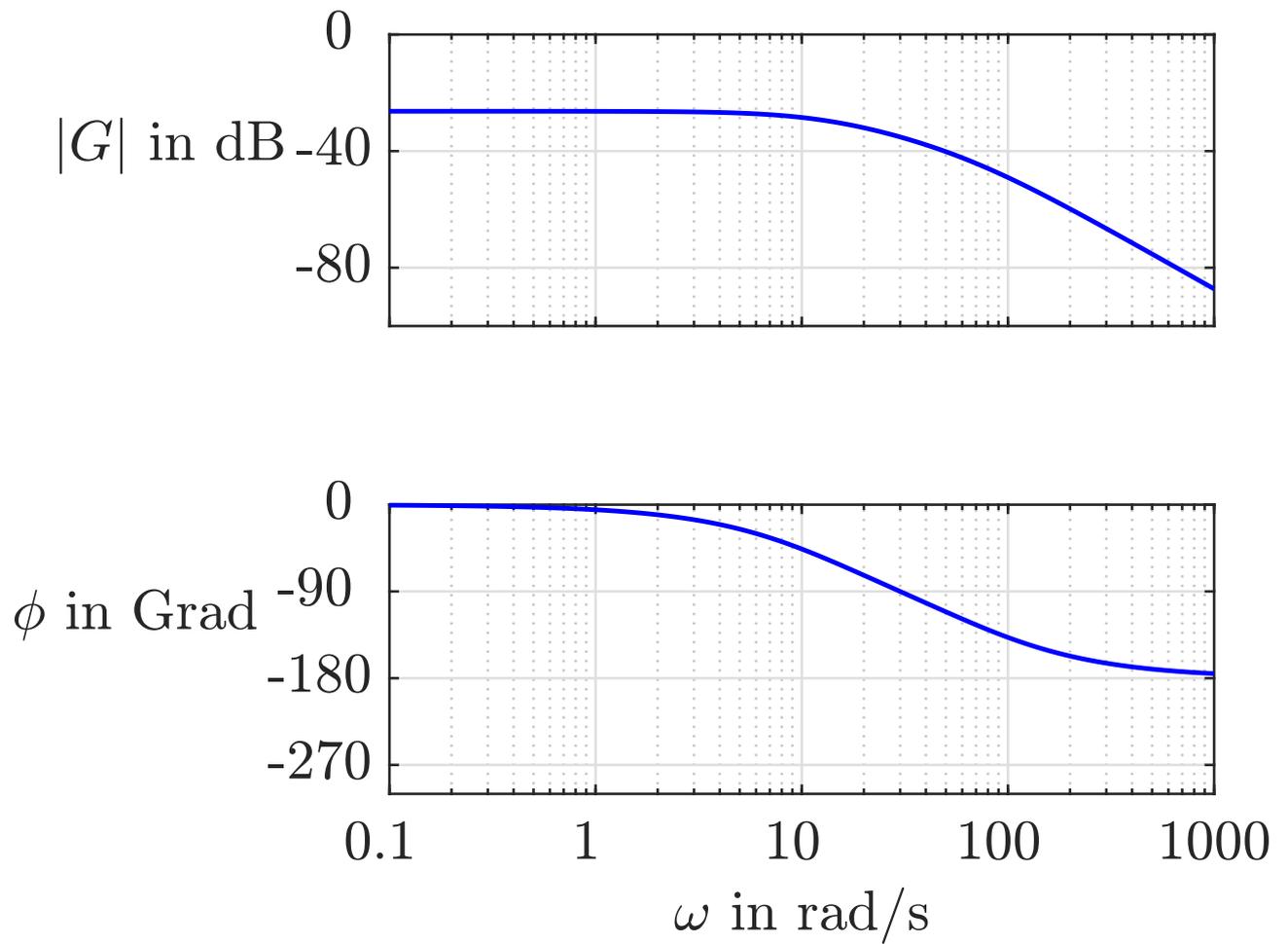


Abb. A.38: Bodediagramm des Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

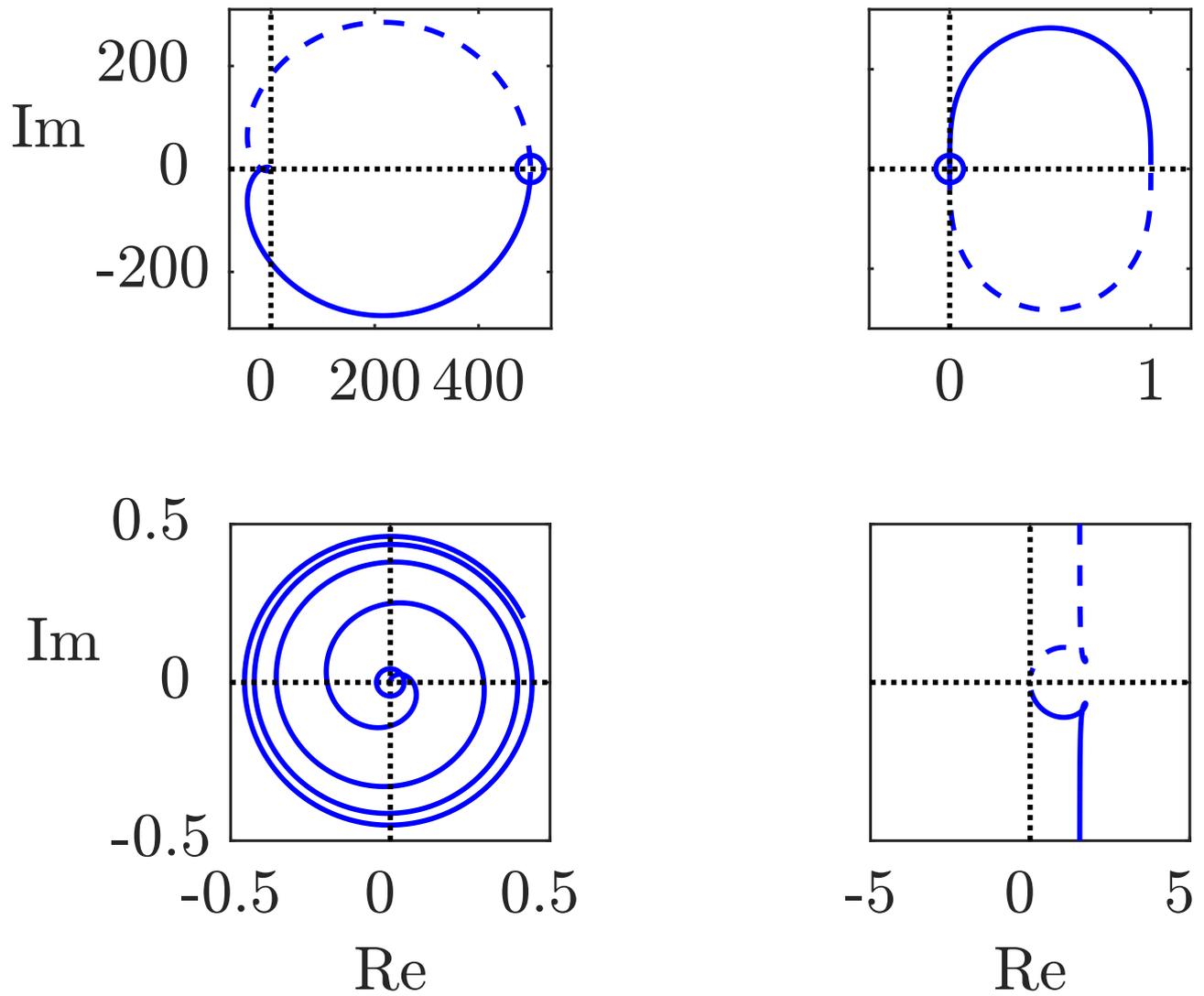


Abb. A.39: Ortskurven der vier Systeme

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

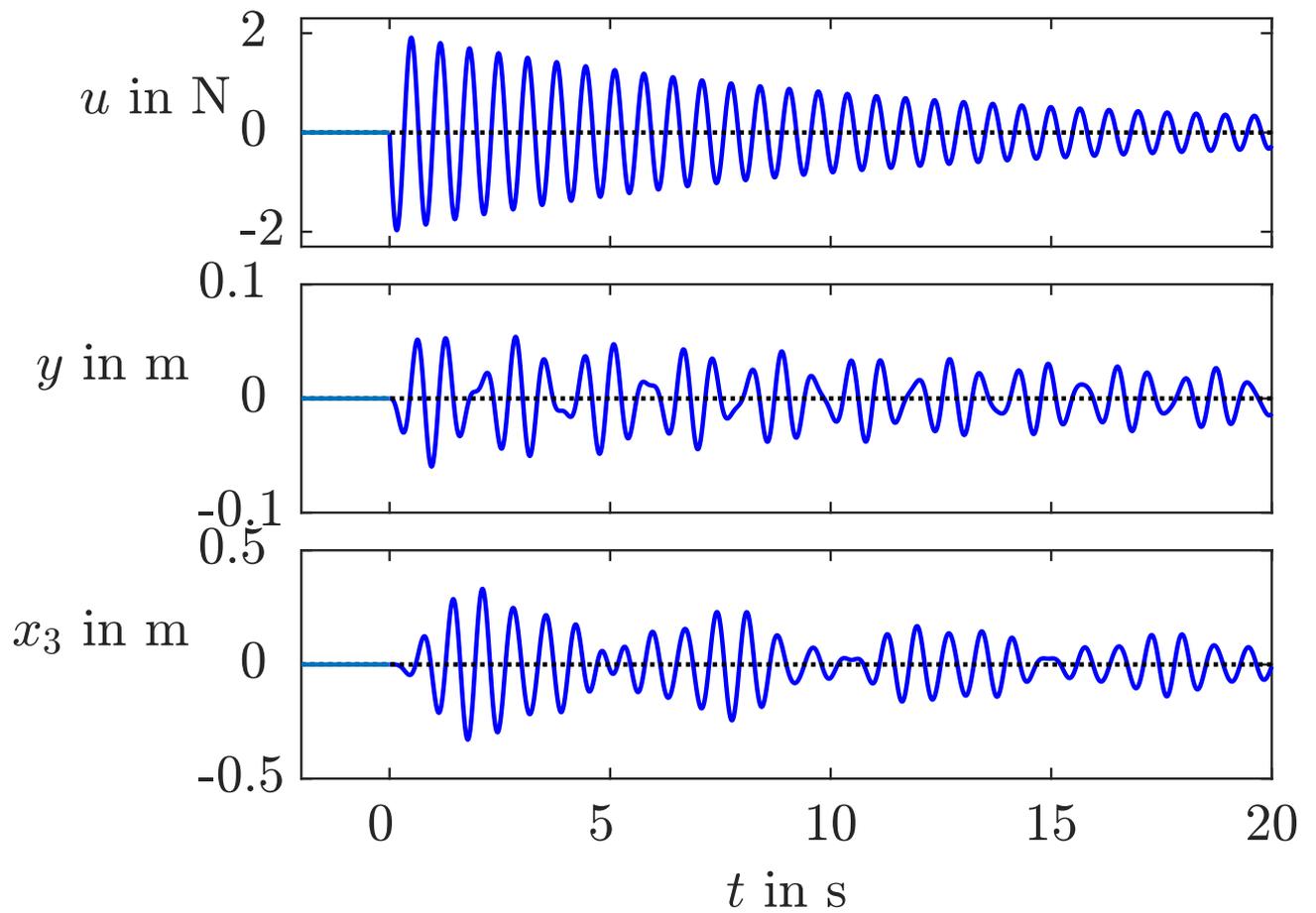


Abb. A.40: Verhalten des Hochhauses bei sinusförmiger Erregung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

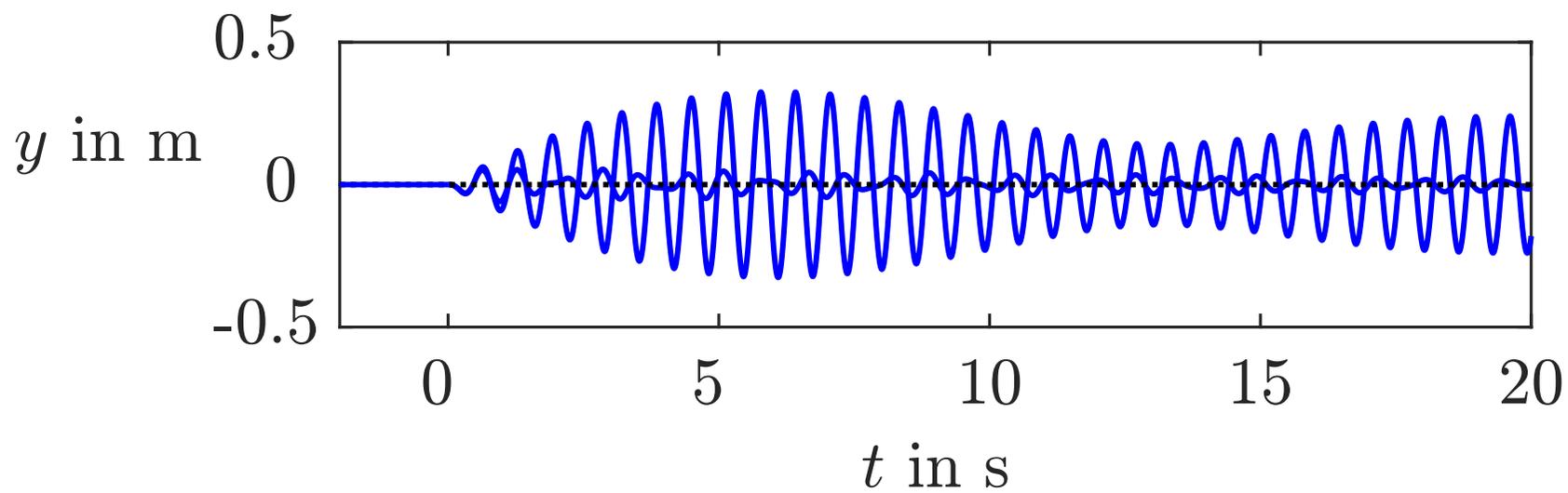


Abb. A.41. Vergleich des Verhaltens mit und ohne Dämpfer

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

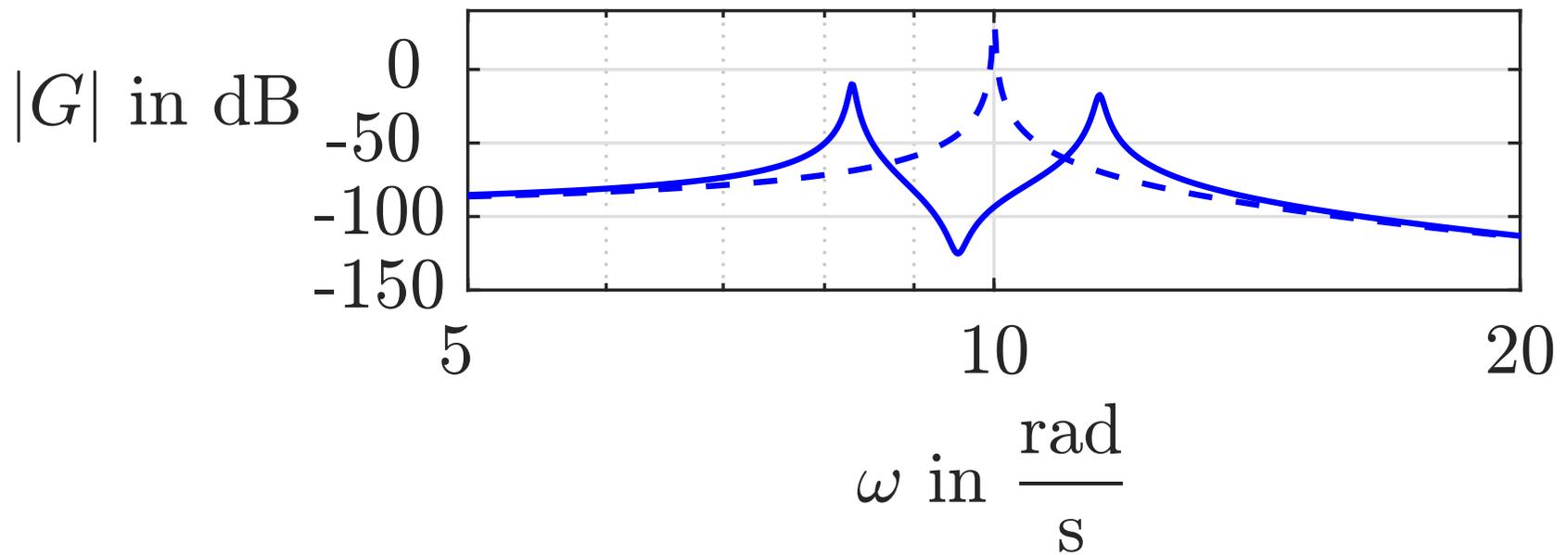


Abb. A.42. Vergleich des Amplitudenganges mit und ohne Dämpfer

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

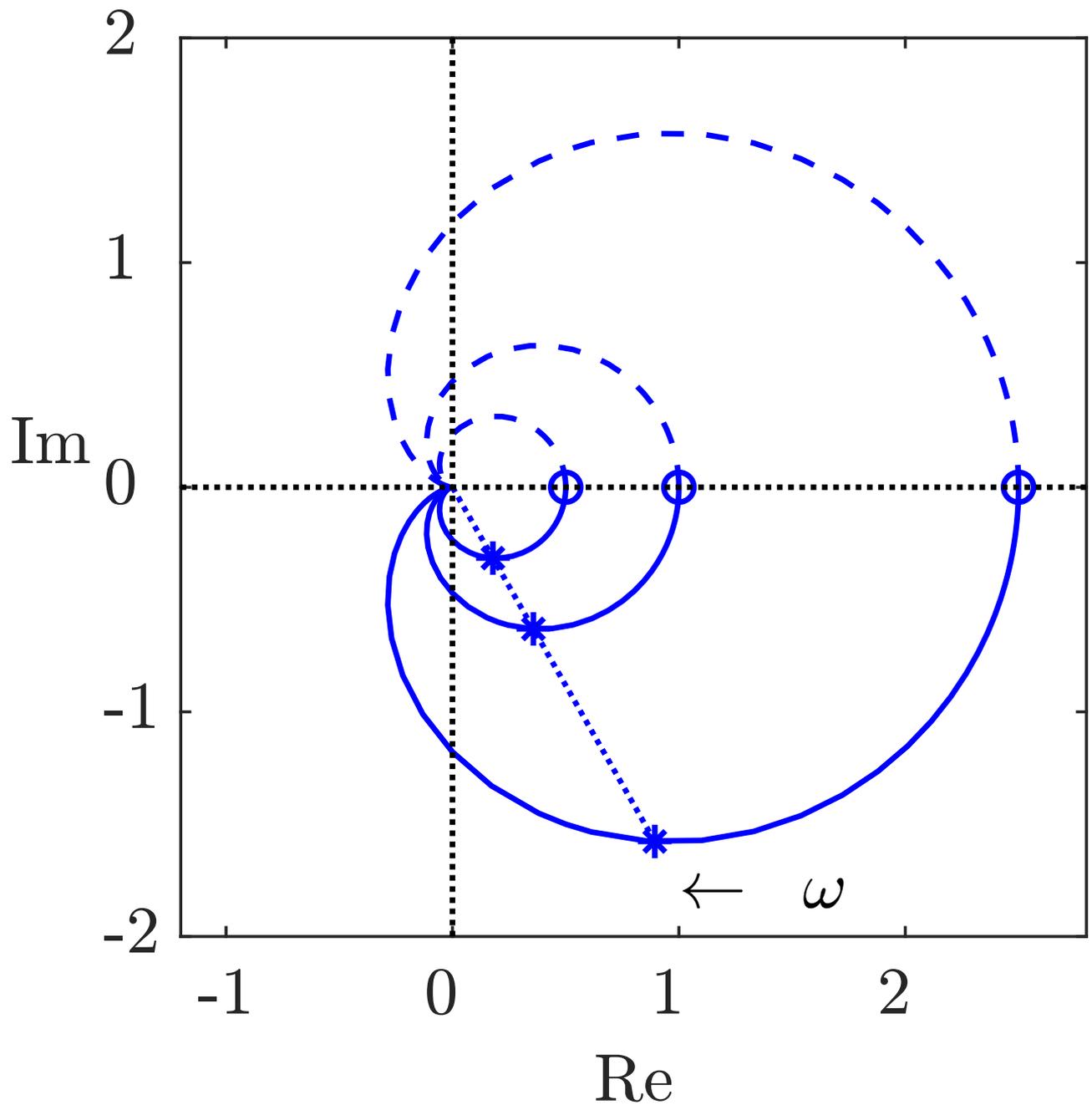


Abb. A.43: Ortskurve der Regelstrecke für $k = 1, 2$ und 5

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

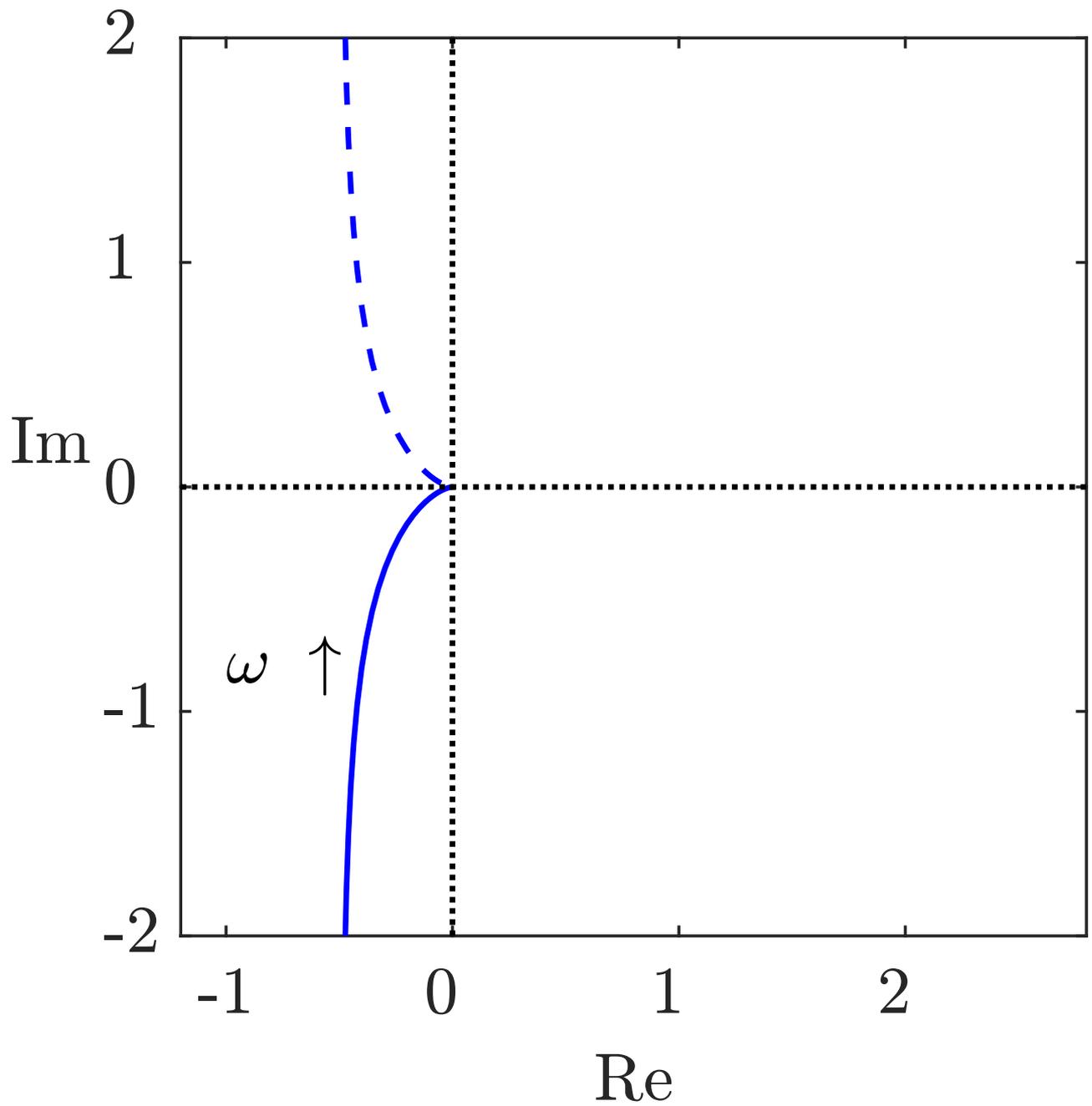


Abb. A.43: Ortskurve der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

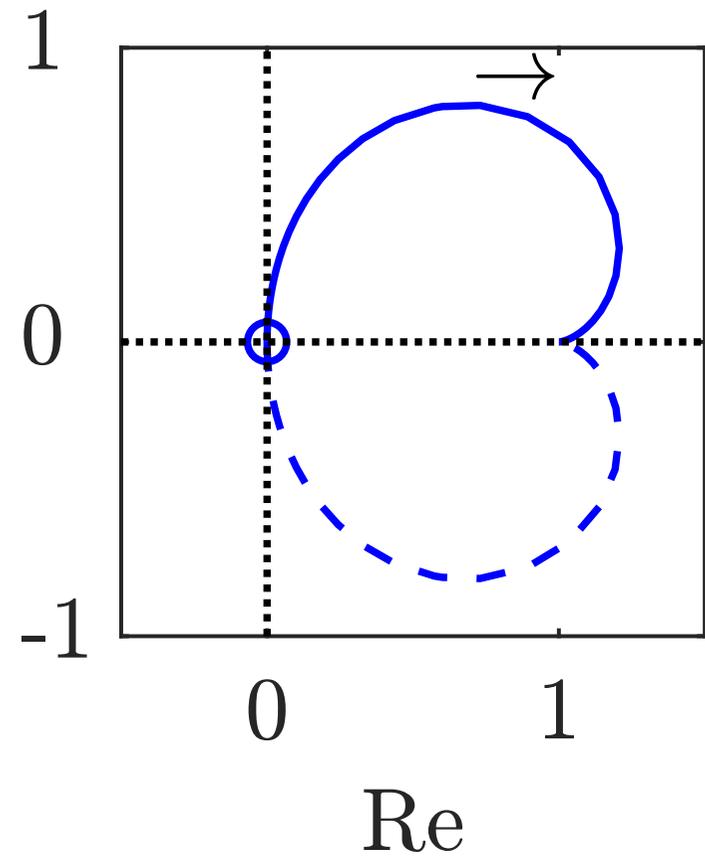
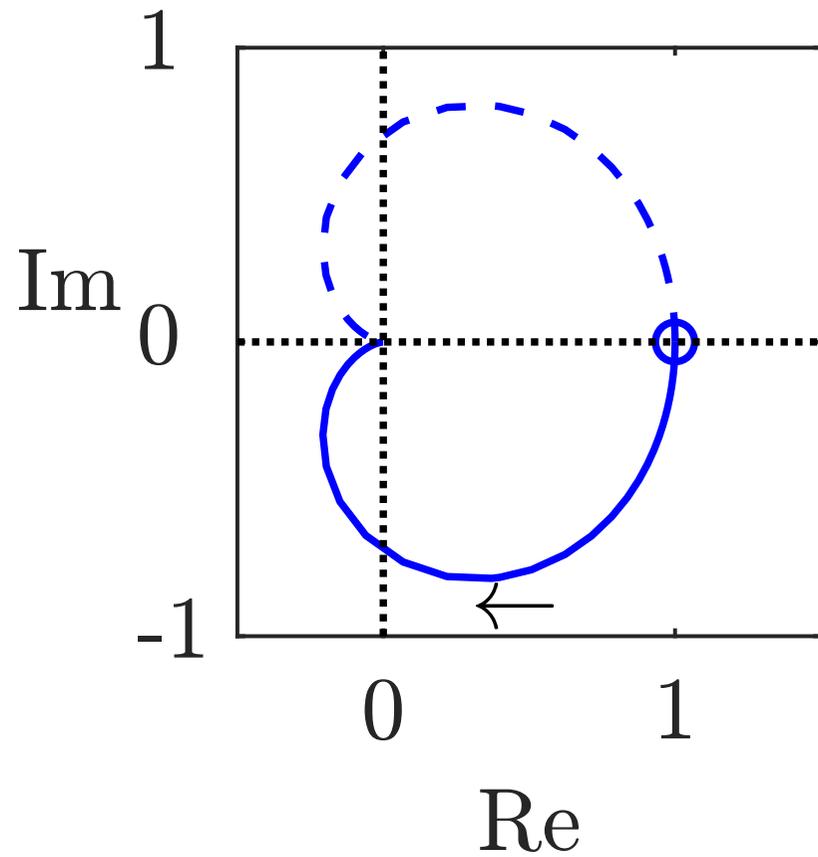


Abb. A.44. Ortskurve des Führungs- bzw. Störverhaltens des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

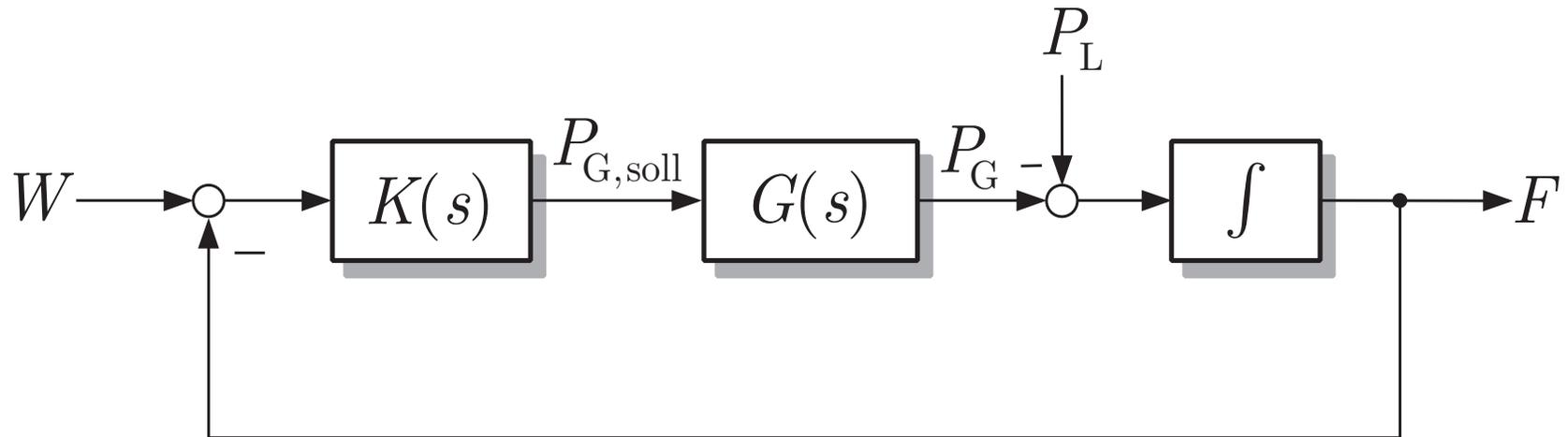


Abb. A.45. Blockschaltbild der Frequenzregelung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

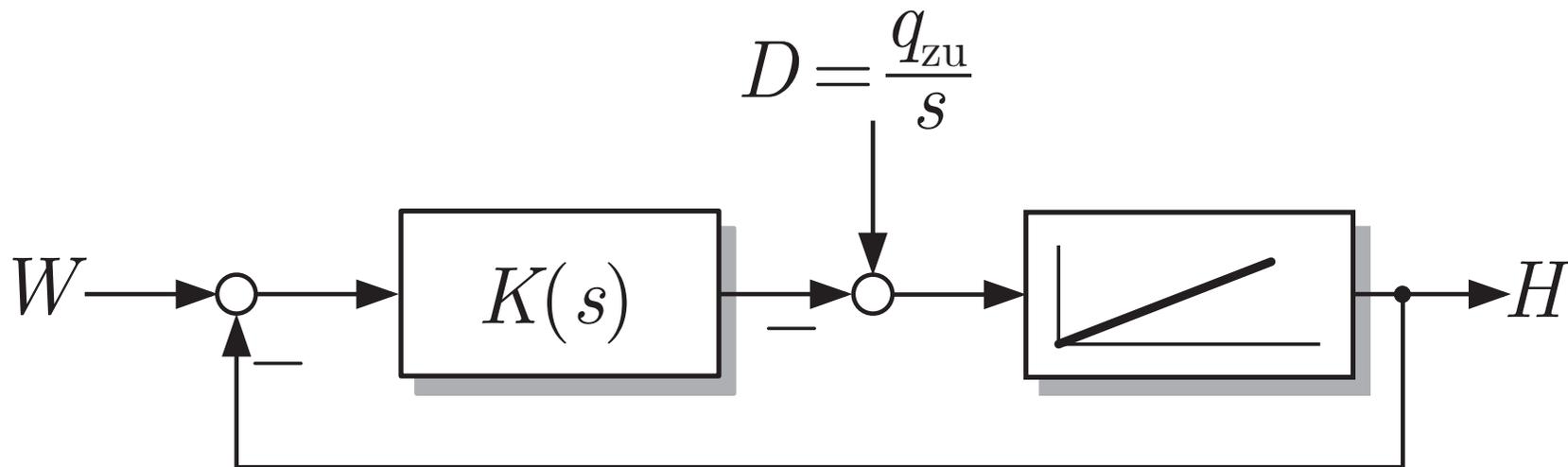


Abb. A.46. Regelkreis für die Talsperre

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

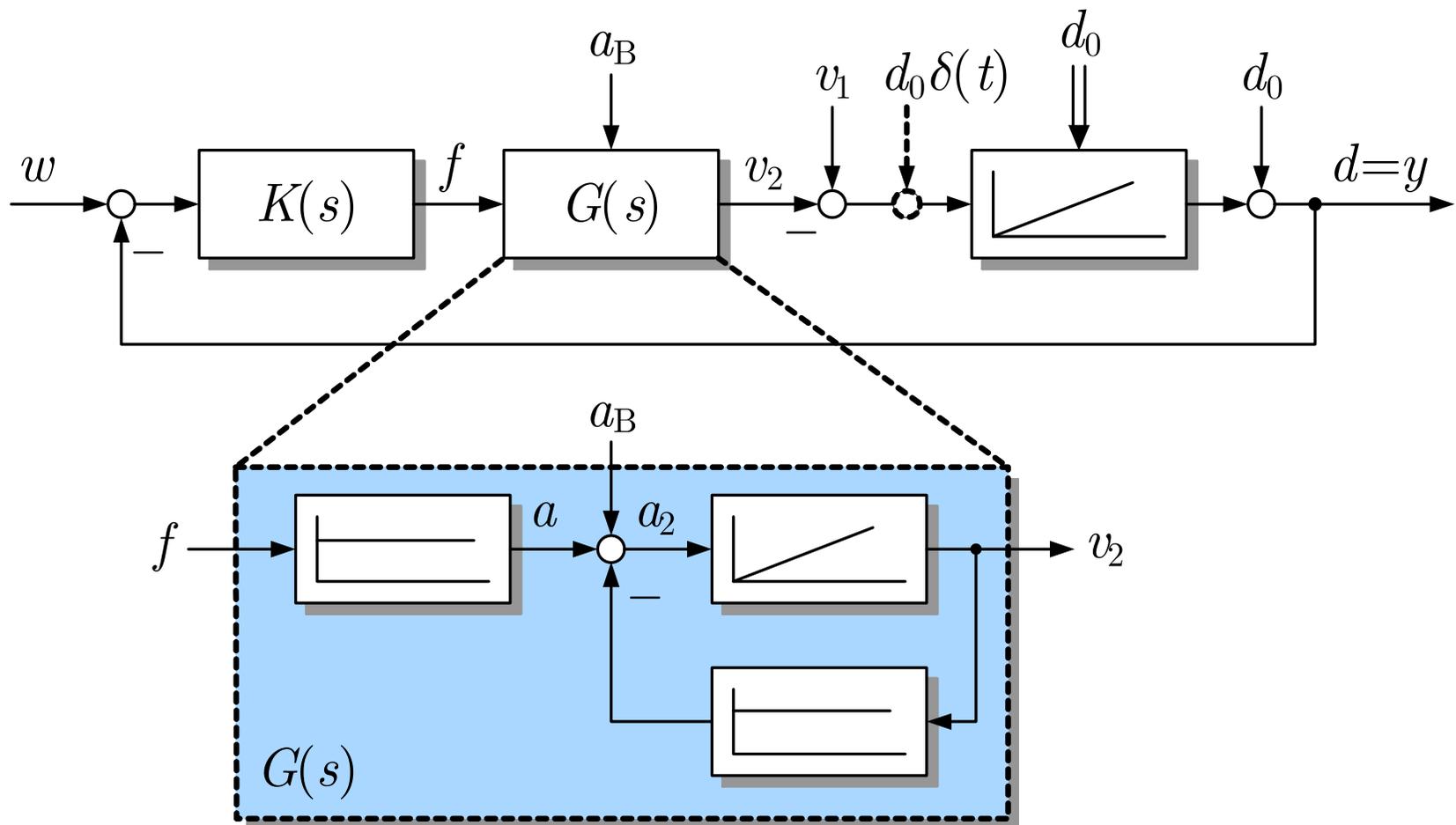


Abb. A.47. Regelung des Fahrzeugabstandes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

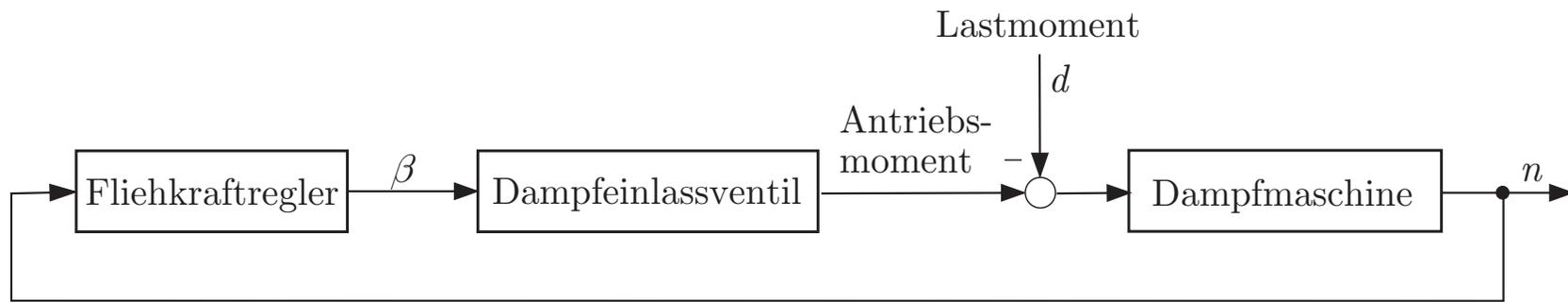


Abb. A.48. Regelkreis der Dampfmaschine

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

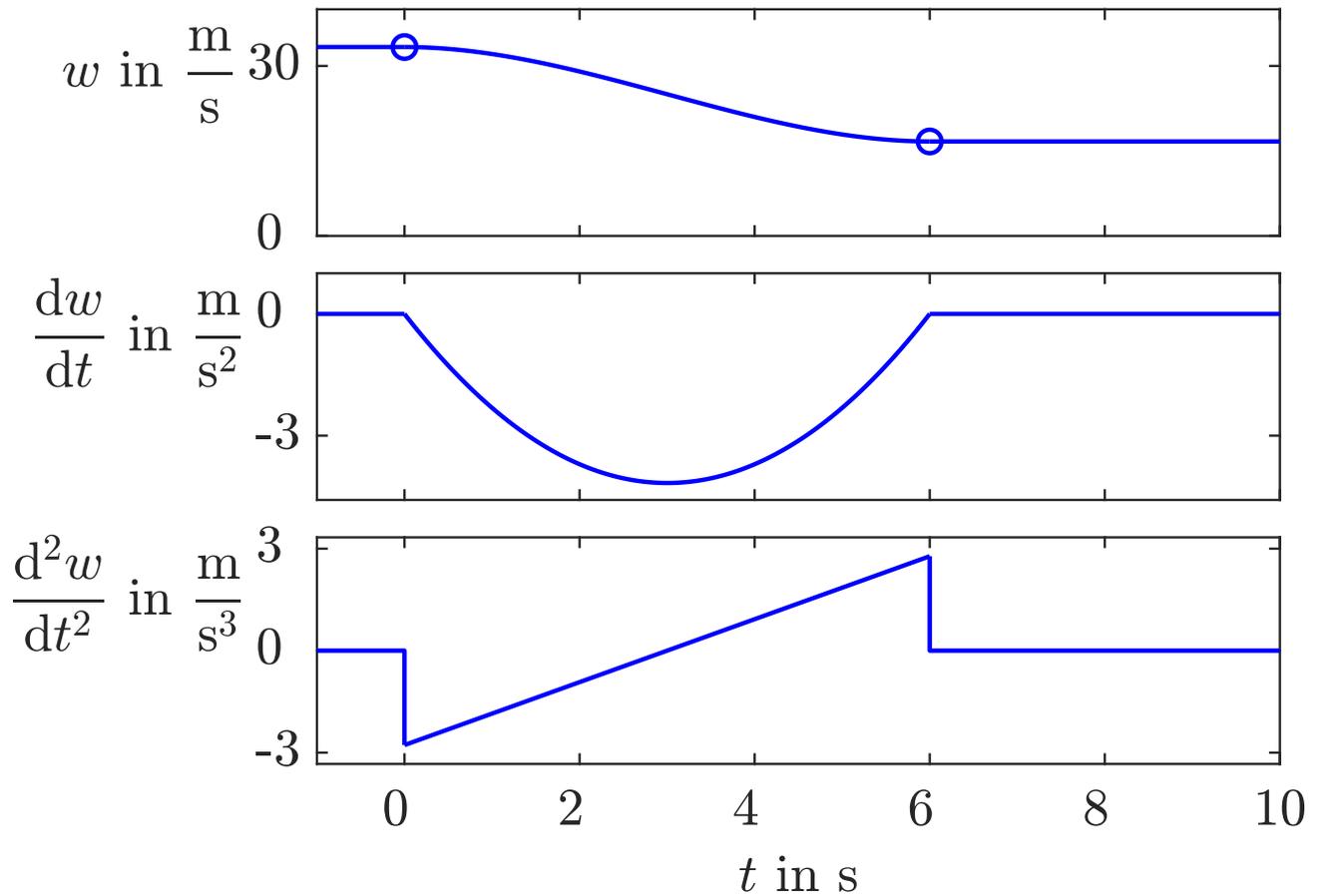


Abb. A.49: Solltrajektorie $w_{[0,6]}$ und Ableitungen $\dot{w}(t)$, $\ddot{w}(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

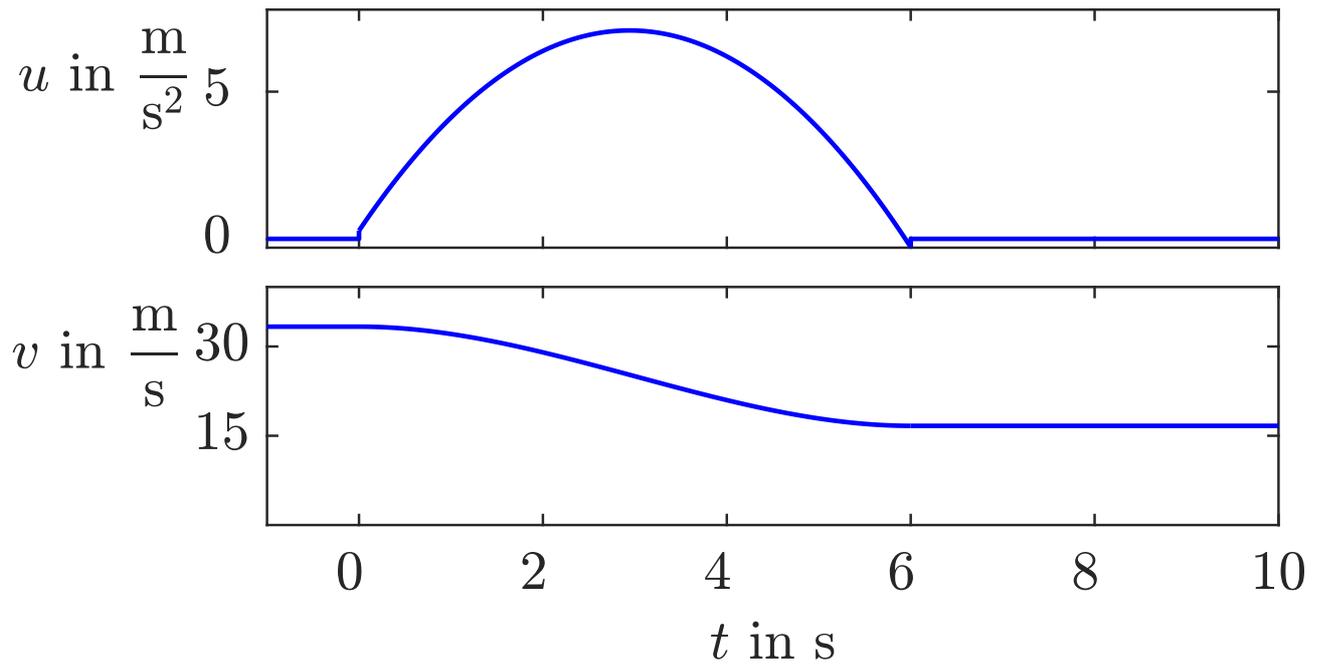


Abb. A.50: Stellgröße $u_{[0,6]}$ und Geschwindigkeit $v(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

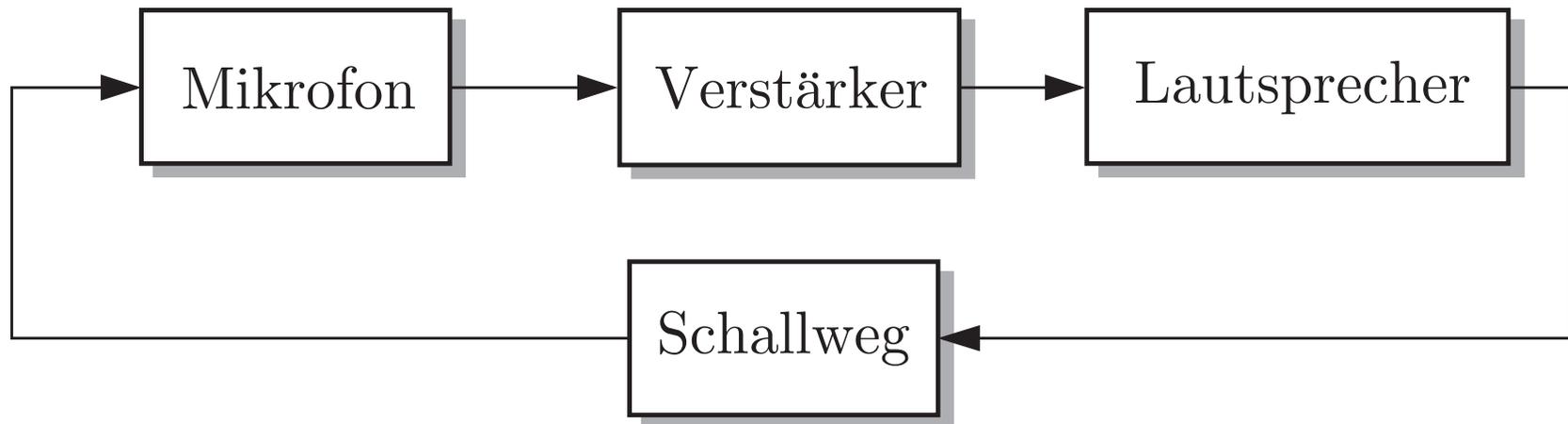


Abb. A.51. Blockschaltbild der Lautsprecheranlage

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

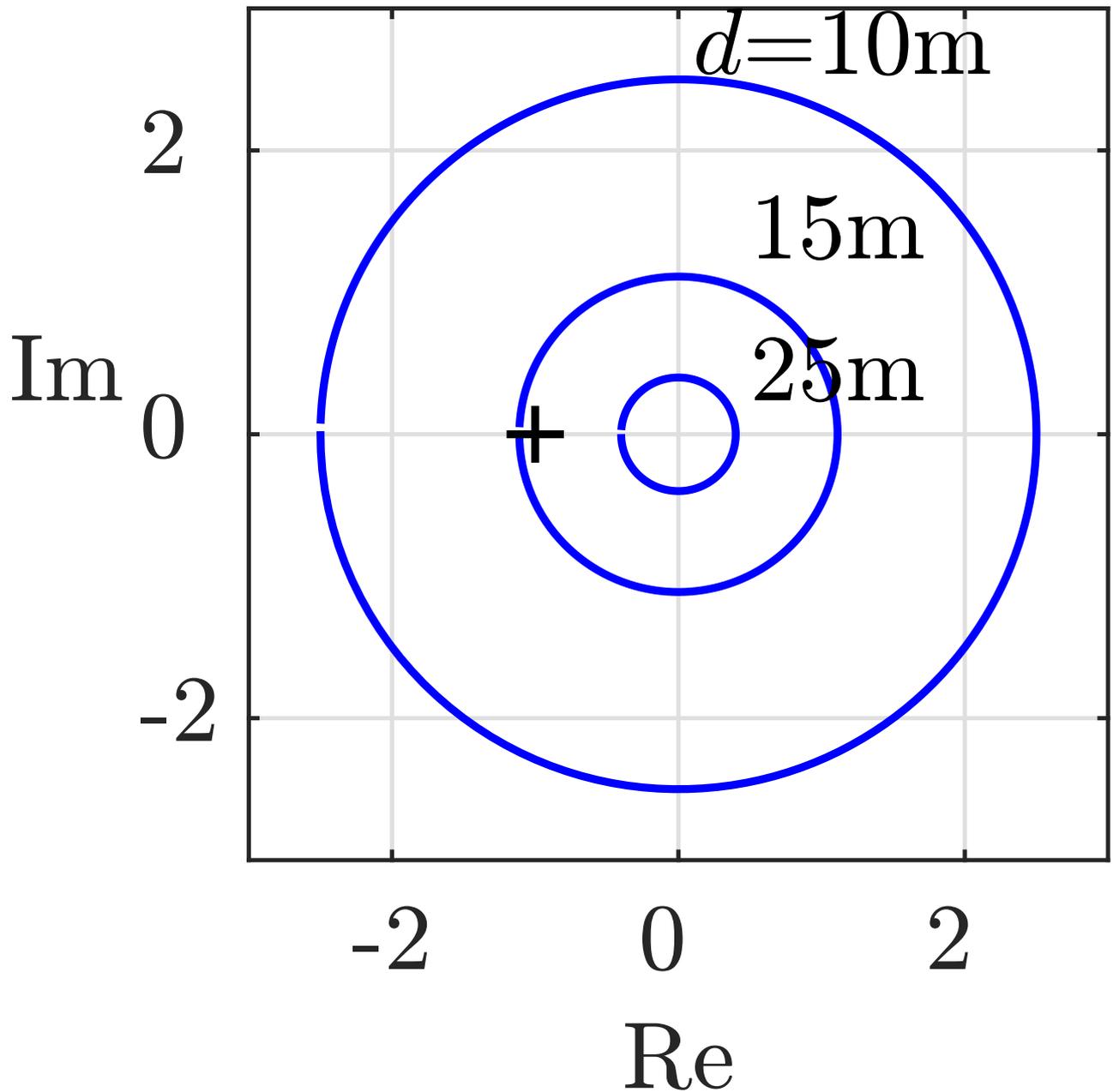
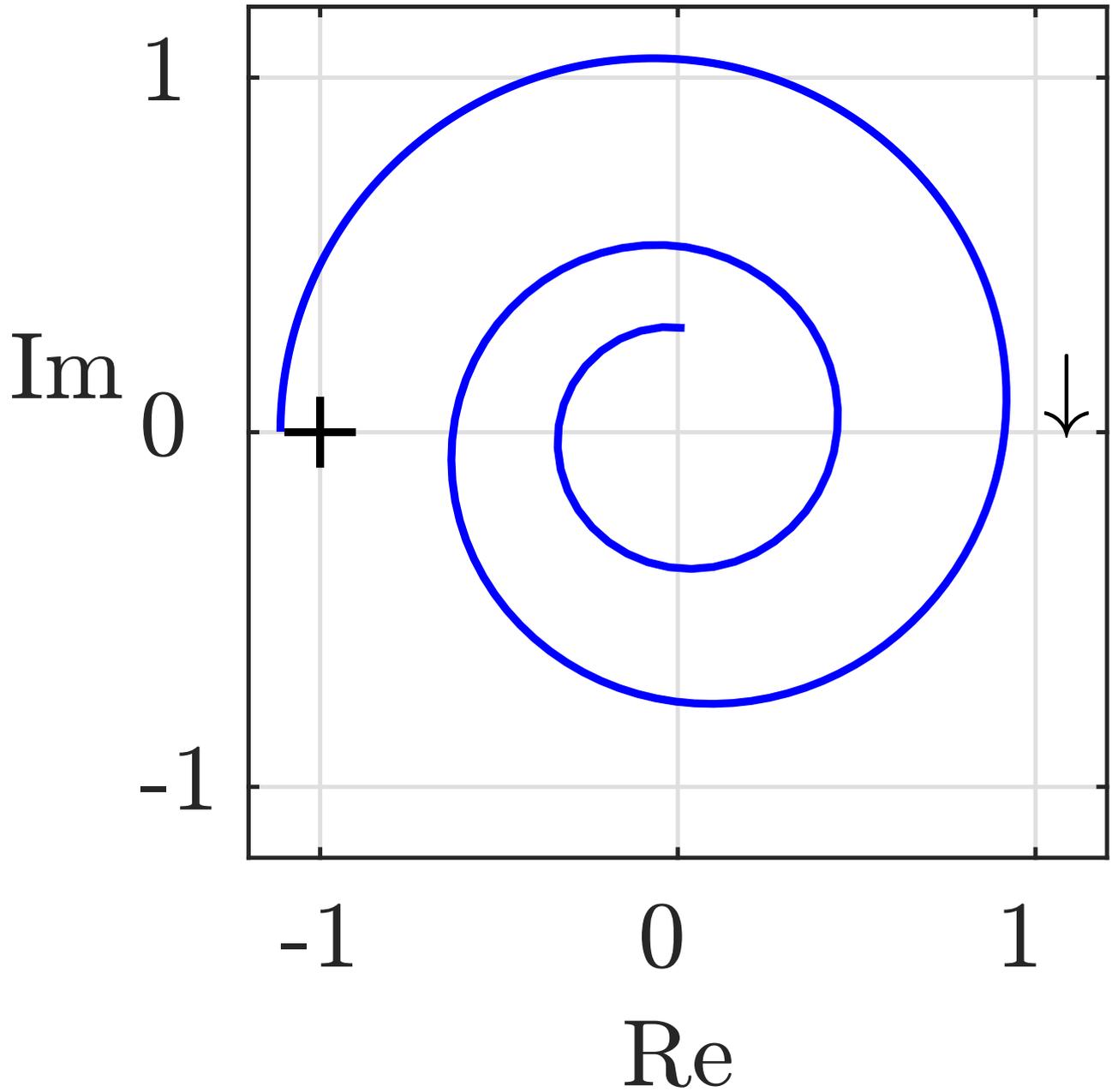


Abb. A.52: Ortskurve der offenen Kette der Lautsprecheranlage für unterschiedliche Mikrofon-Lautsprecher-Entfernungen

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. A.52: Ortskurve der Telefon-Radio-Anordnung
für $d = 0.3$**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

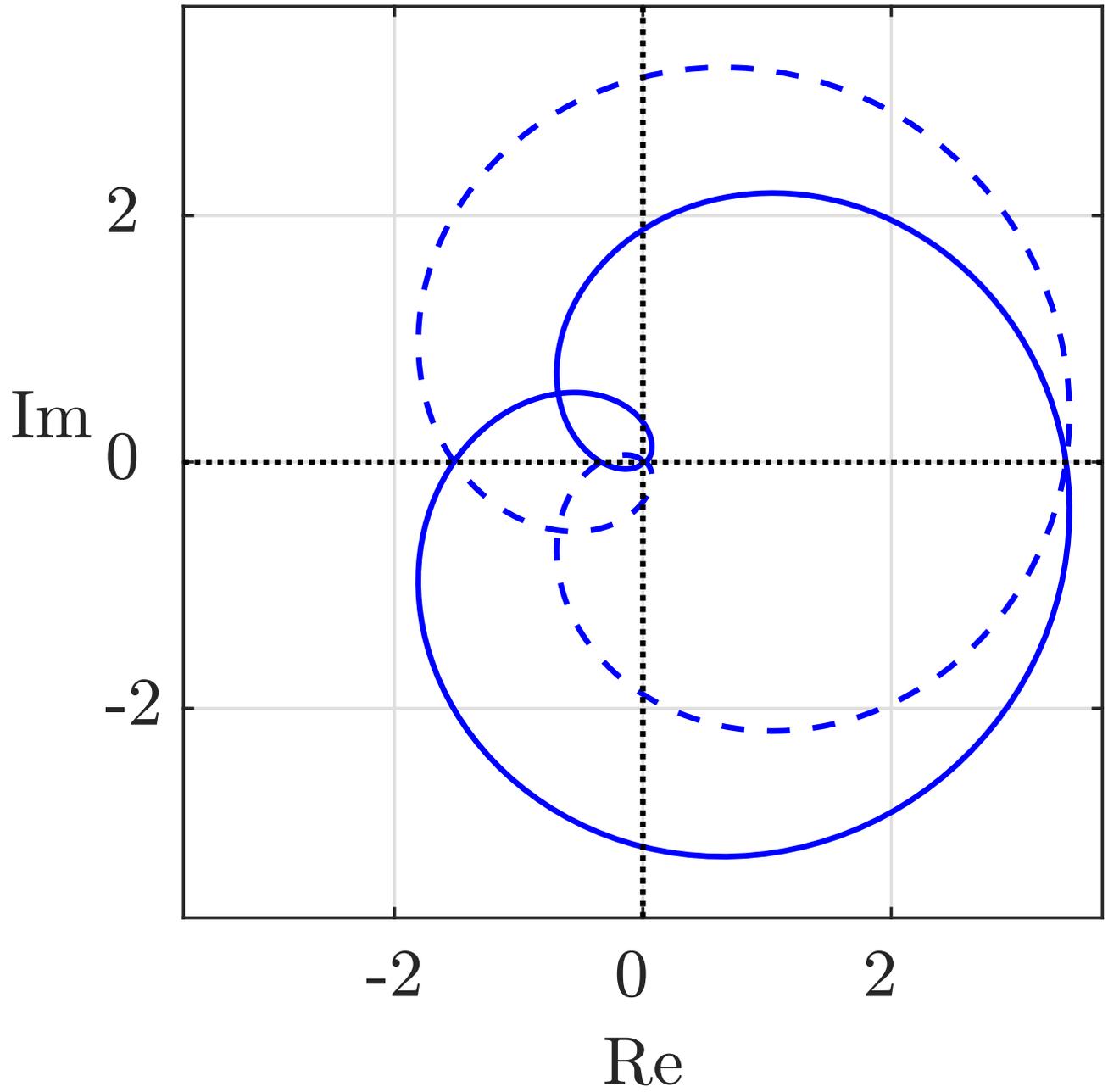


Abb. A.53: Ortskurve und Bodediagramm der D-Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

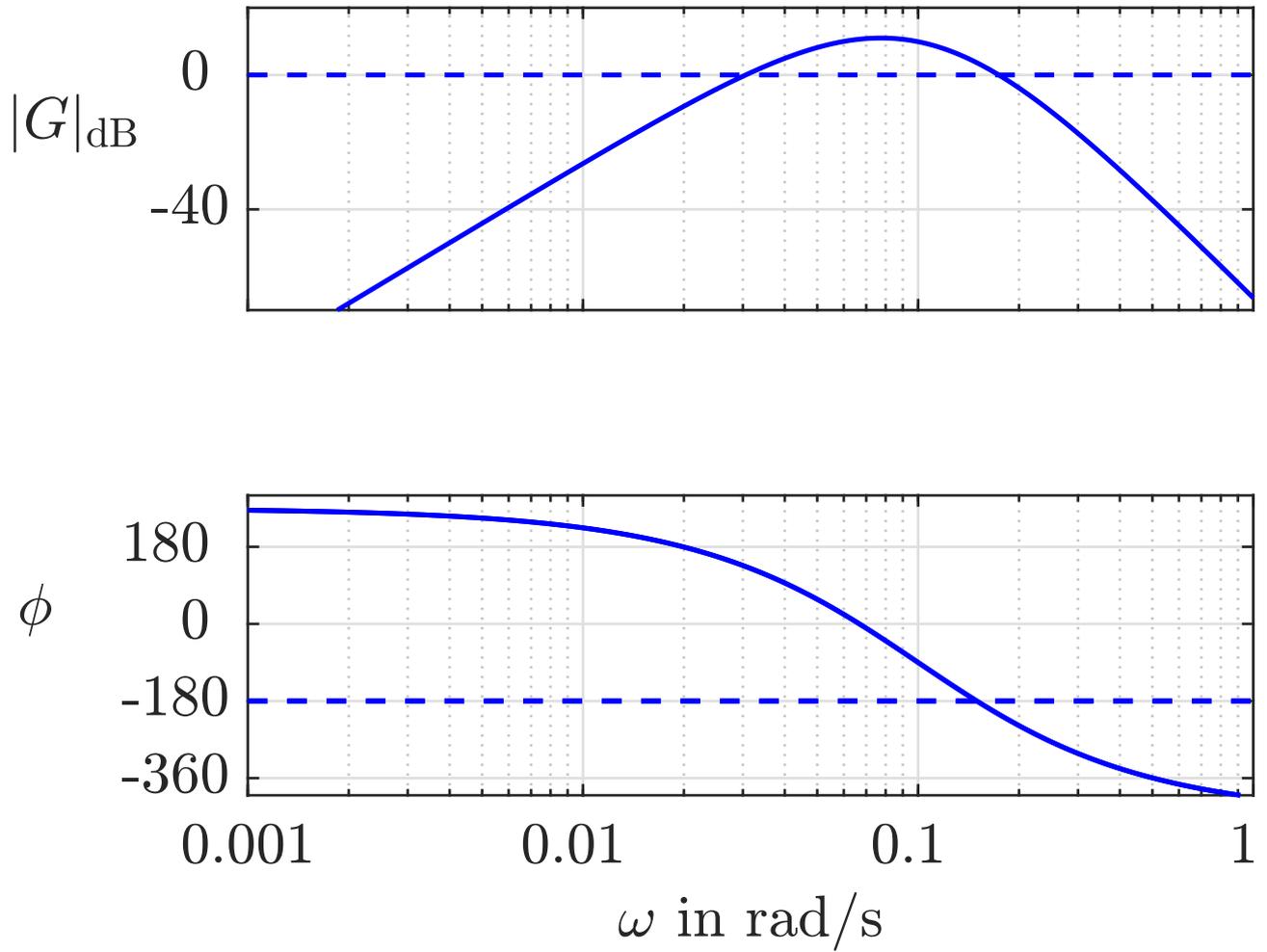


Abb. A.53: Ortskurve und Bodediagramm der D-Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

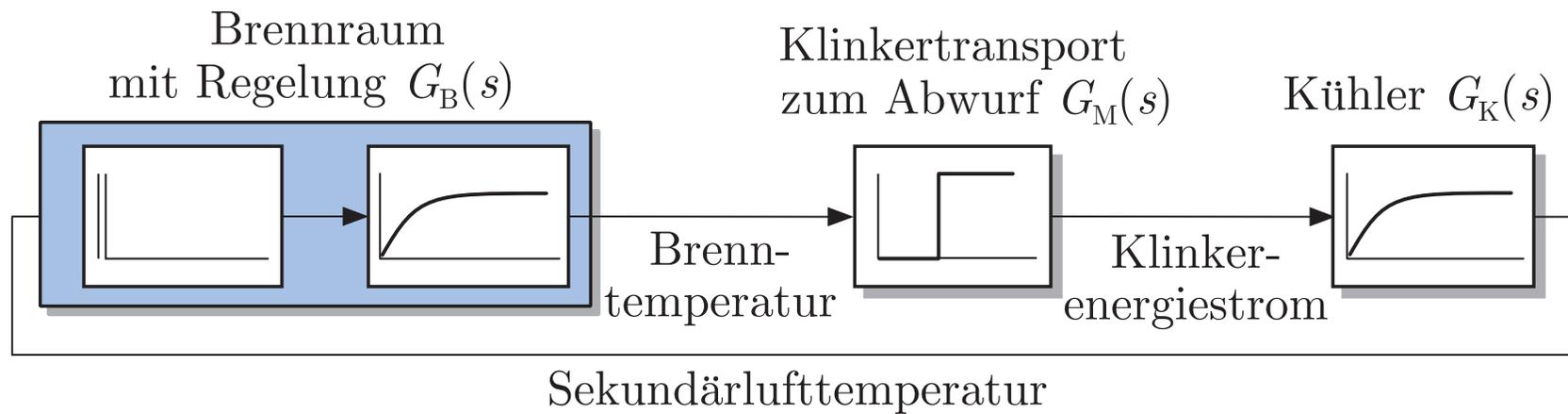
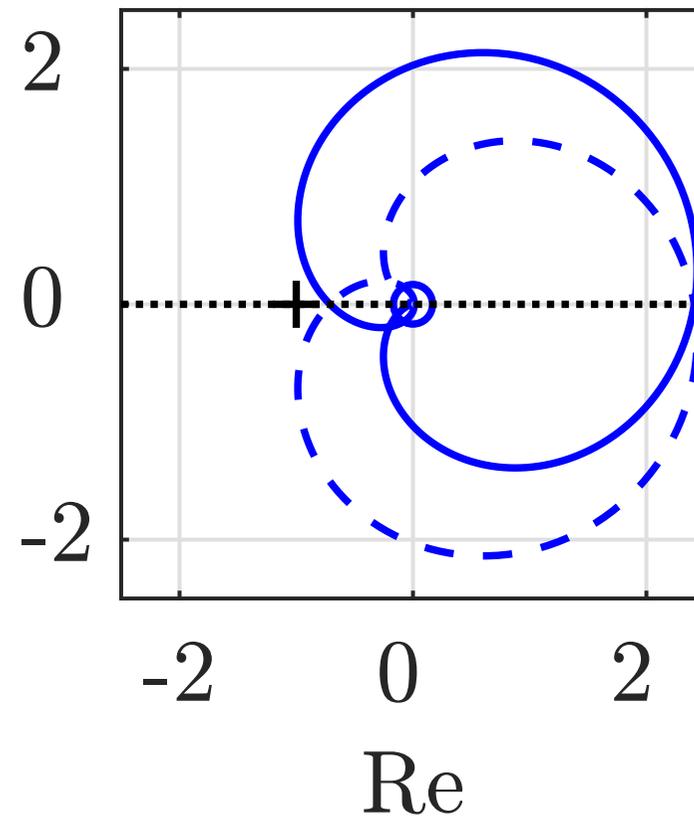
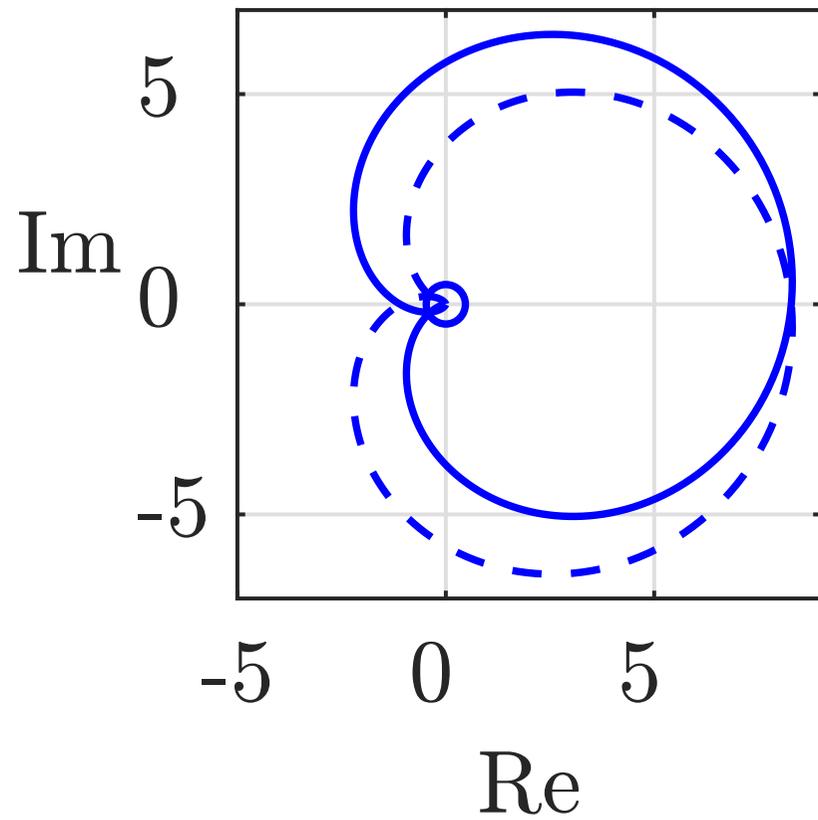


Abb. A.54. Vereinfachtes Blockschaltbild der Anordnung Drehrohrofen - Klinkerkühler

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. A.55. Ortskurve der Anordnung
Drehrohrofen – Klinkerkühler**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

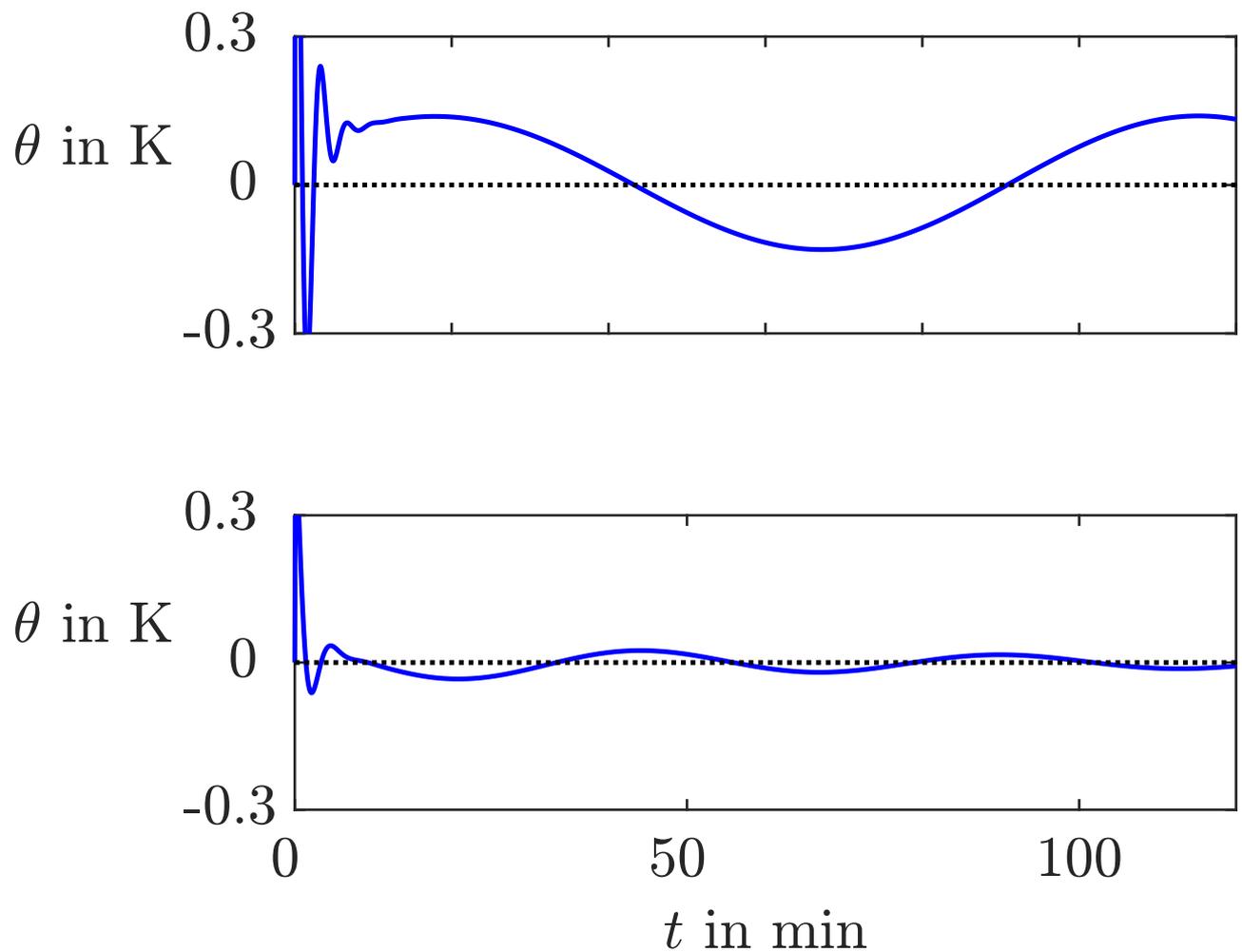


Abb. A.56: Sekundärlufttemperatur bei impulsförmiger Erregung (oben: unregelt; unten: mit Sekundärlufttemperaturregelung)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

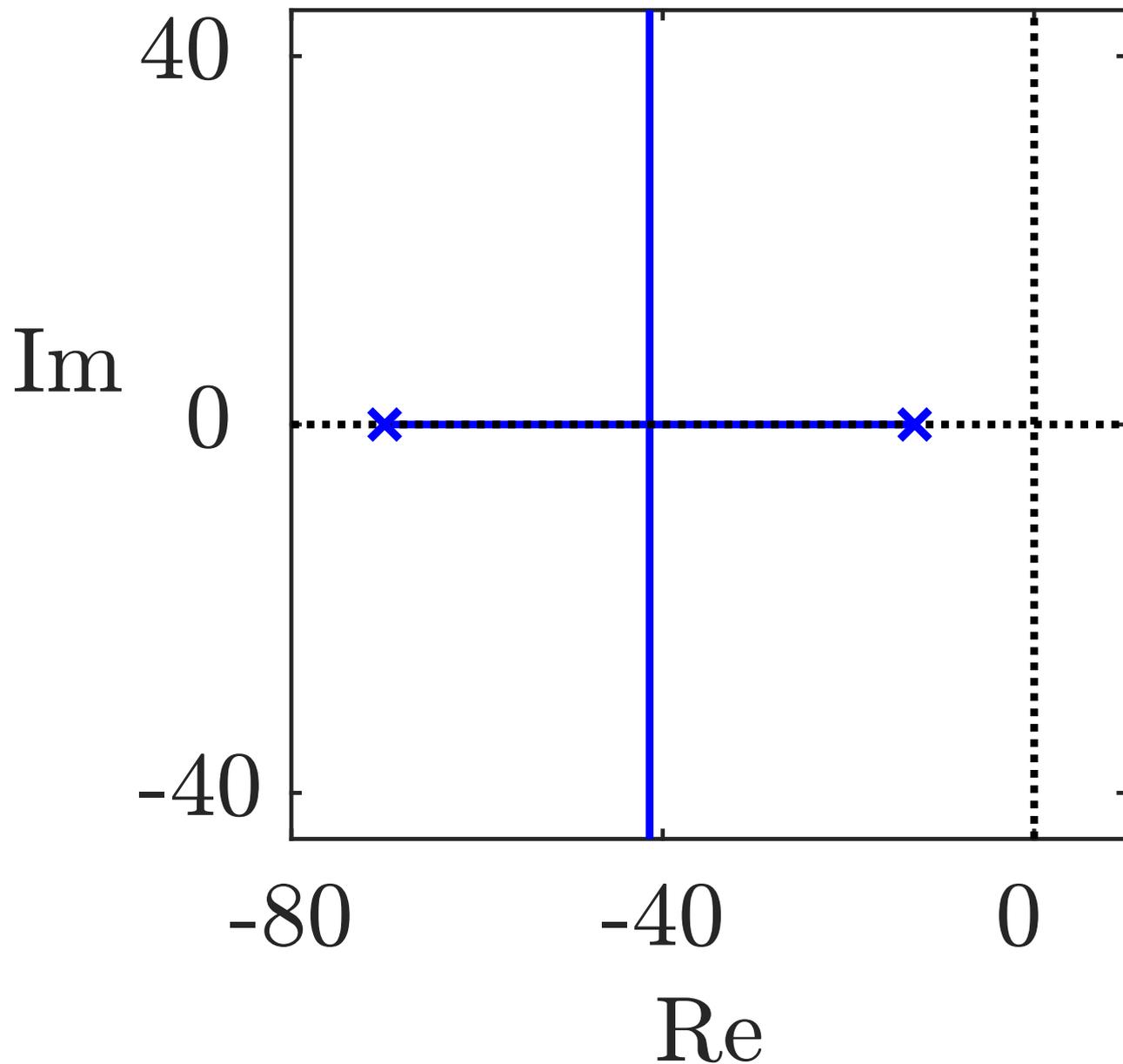


Abb. A.57: Wurzelortskurve des P-geregelten Gleichstrommotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

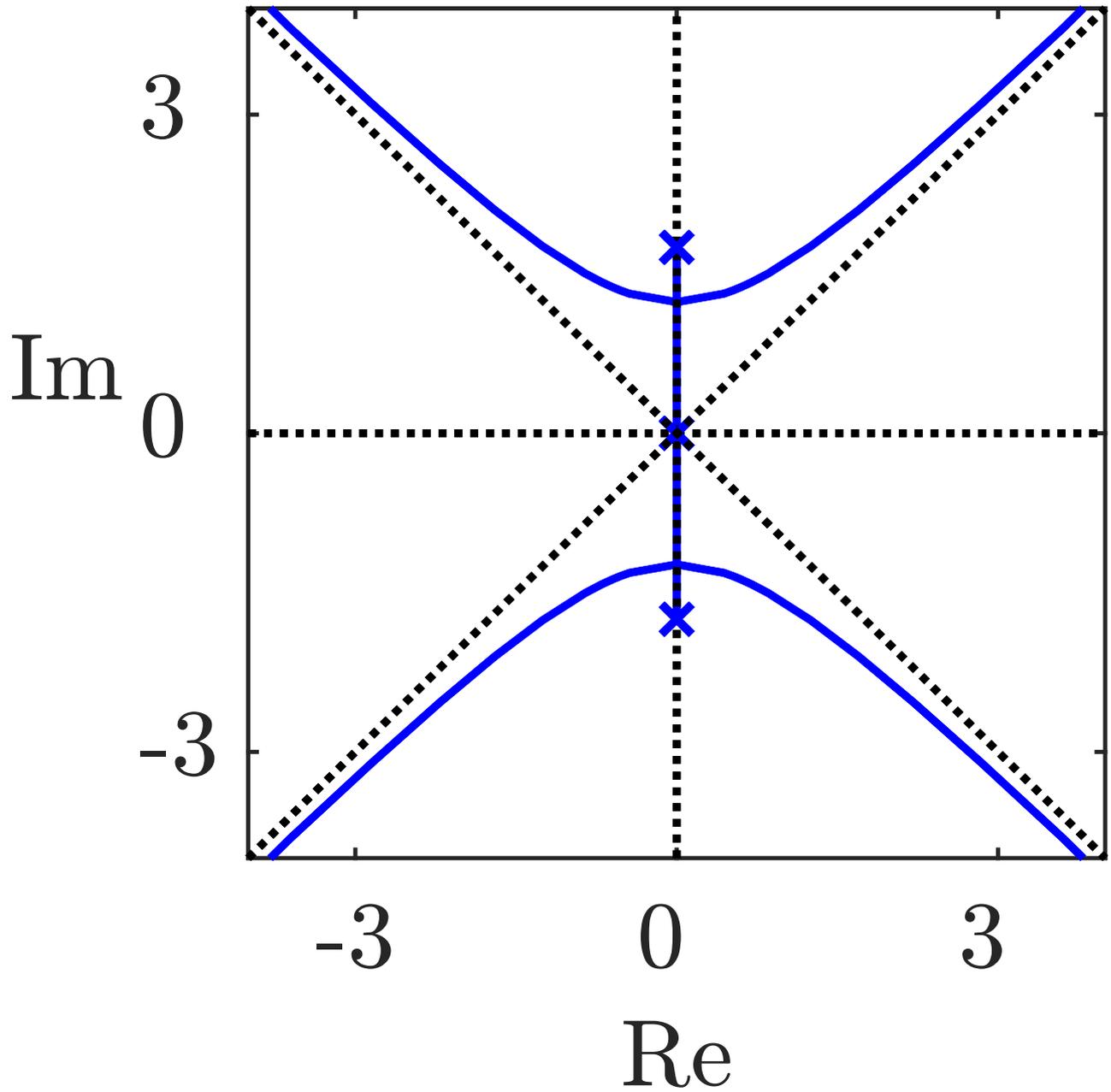


Abb. A.57: Wurzelortskurve der P-geregelten Verladebrücke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

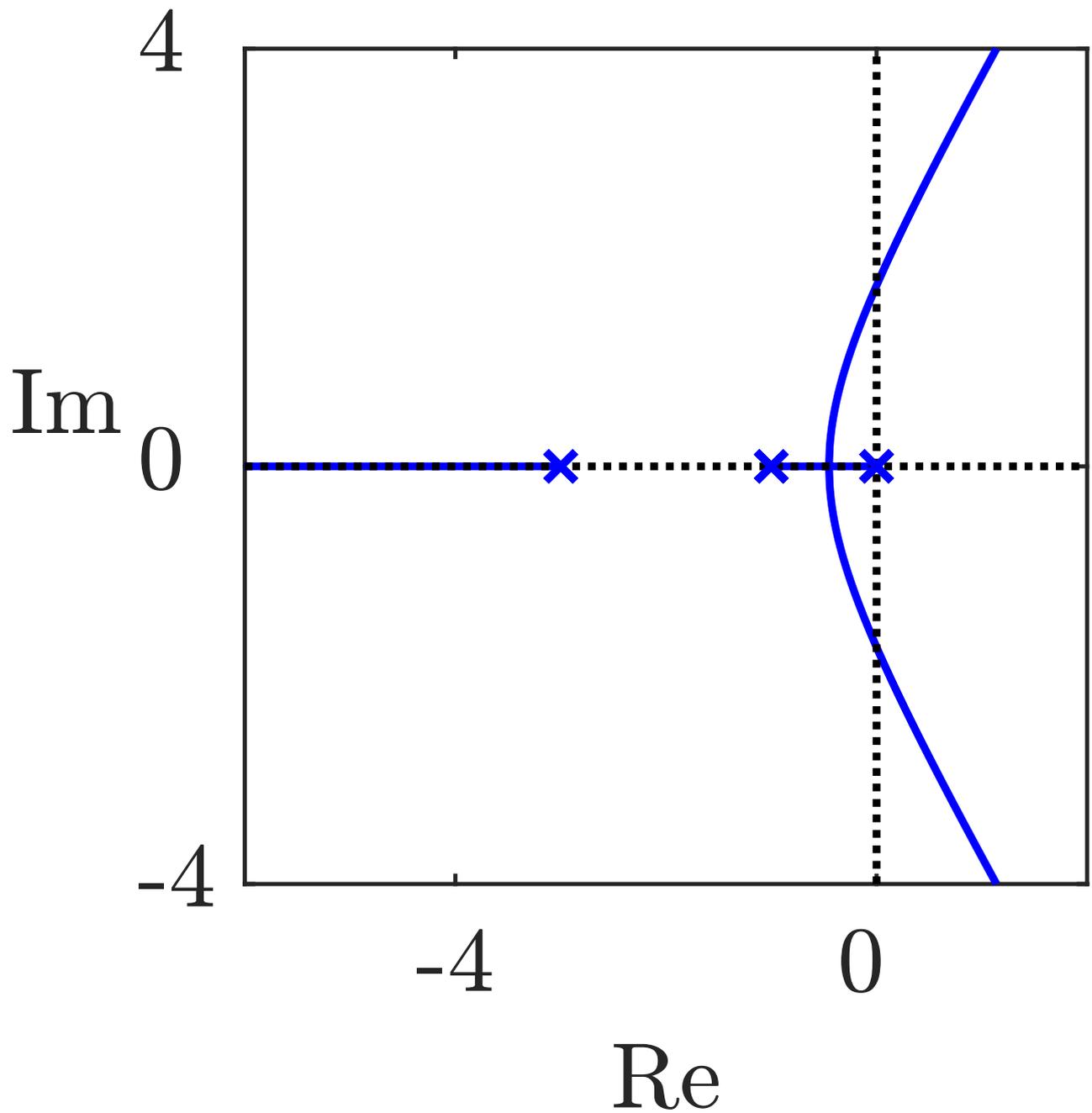


Abb. A.58: Wurzelortskurve für das P-geregelte System

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

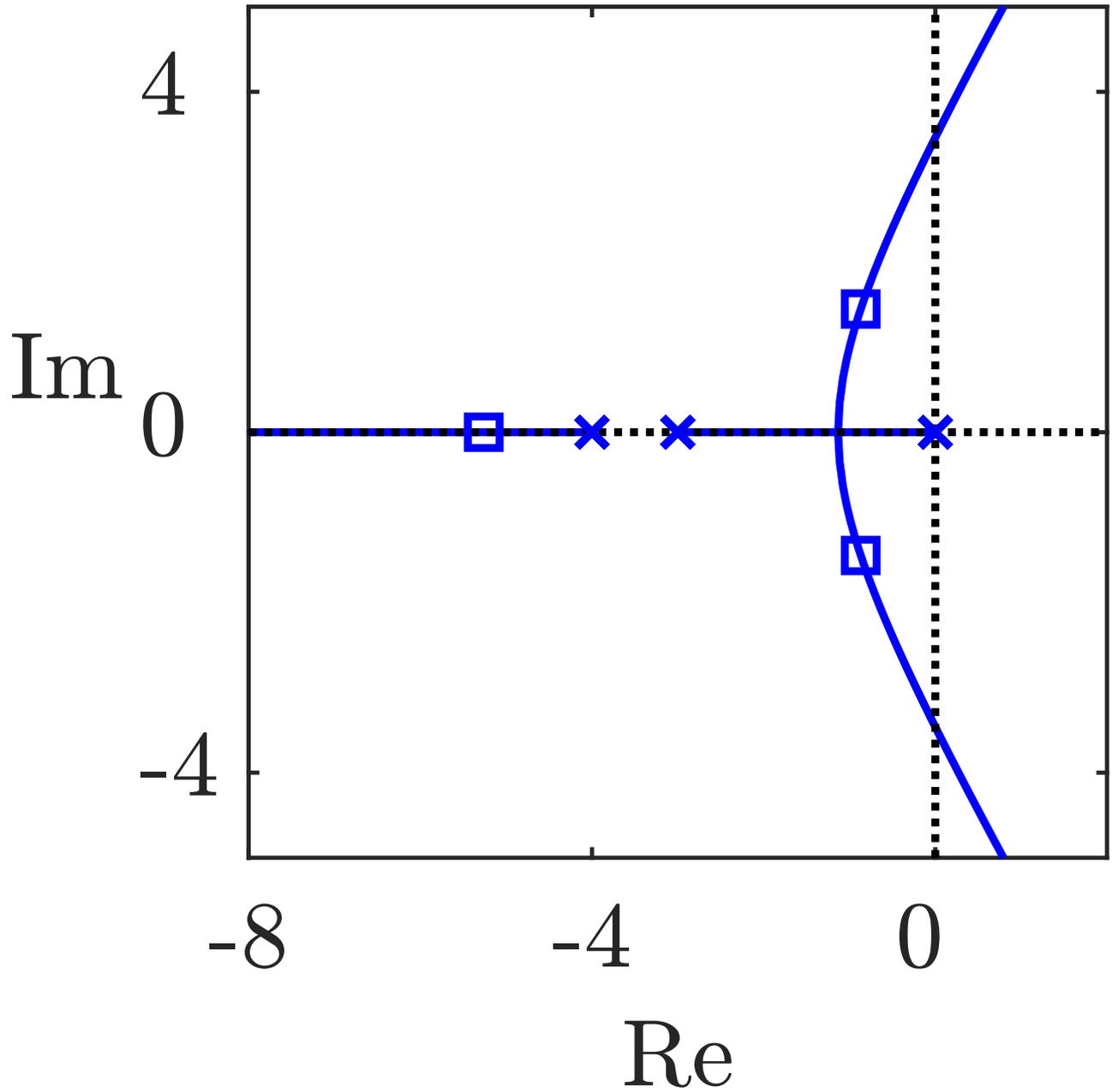


Abb. A.58: Wurzelortskurve für den Regelkreis mit dynamischem Regler (Pole \square für $k = 15$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

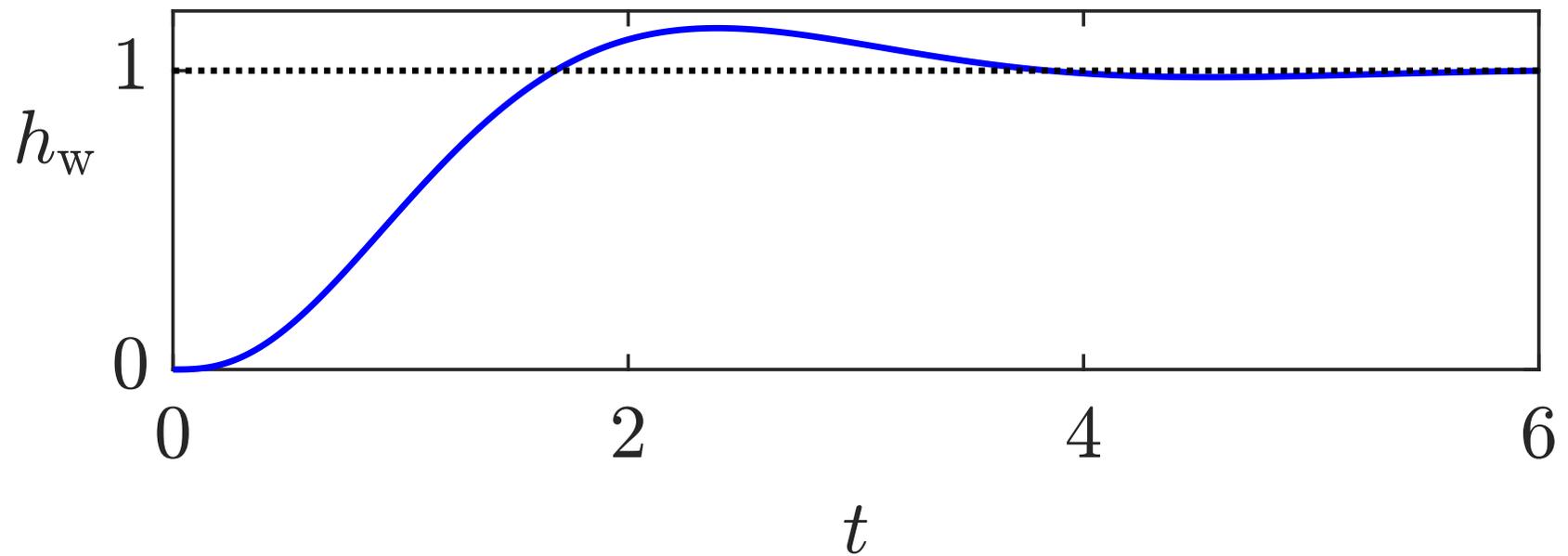


Abb. A.59. Führungsübergangsfunktion des Regelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

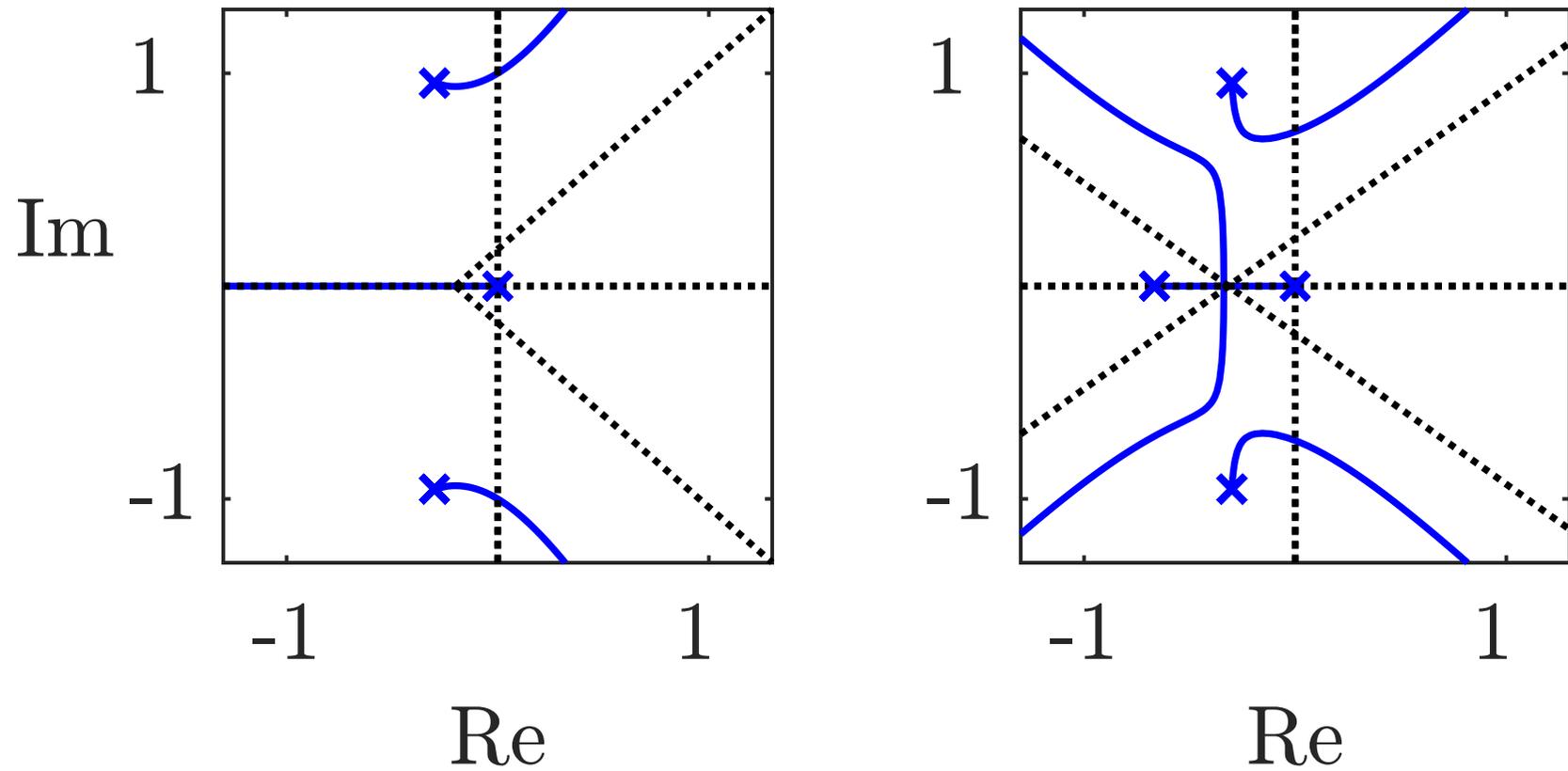


Abb. A.60. Wurzelortskurve des Hydraulikantriebs mit P-Regler (links) und mit PT₁-Regler (rechts)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

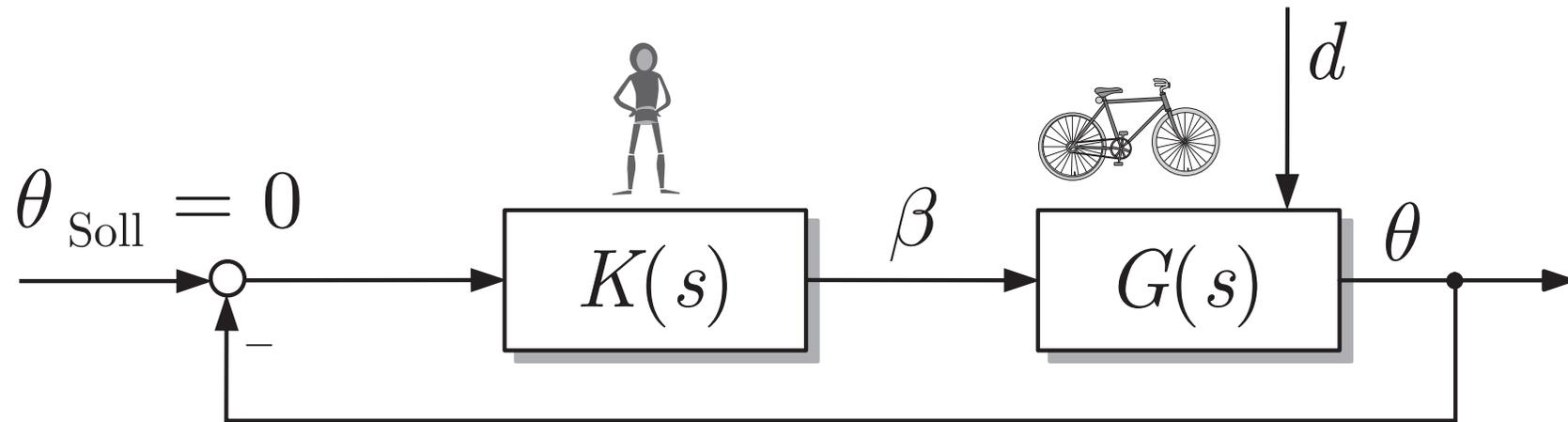


Abb. A.61. Fahrrad als Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

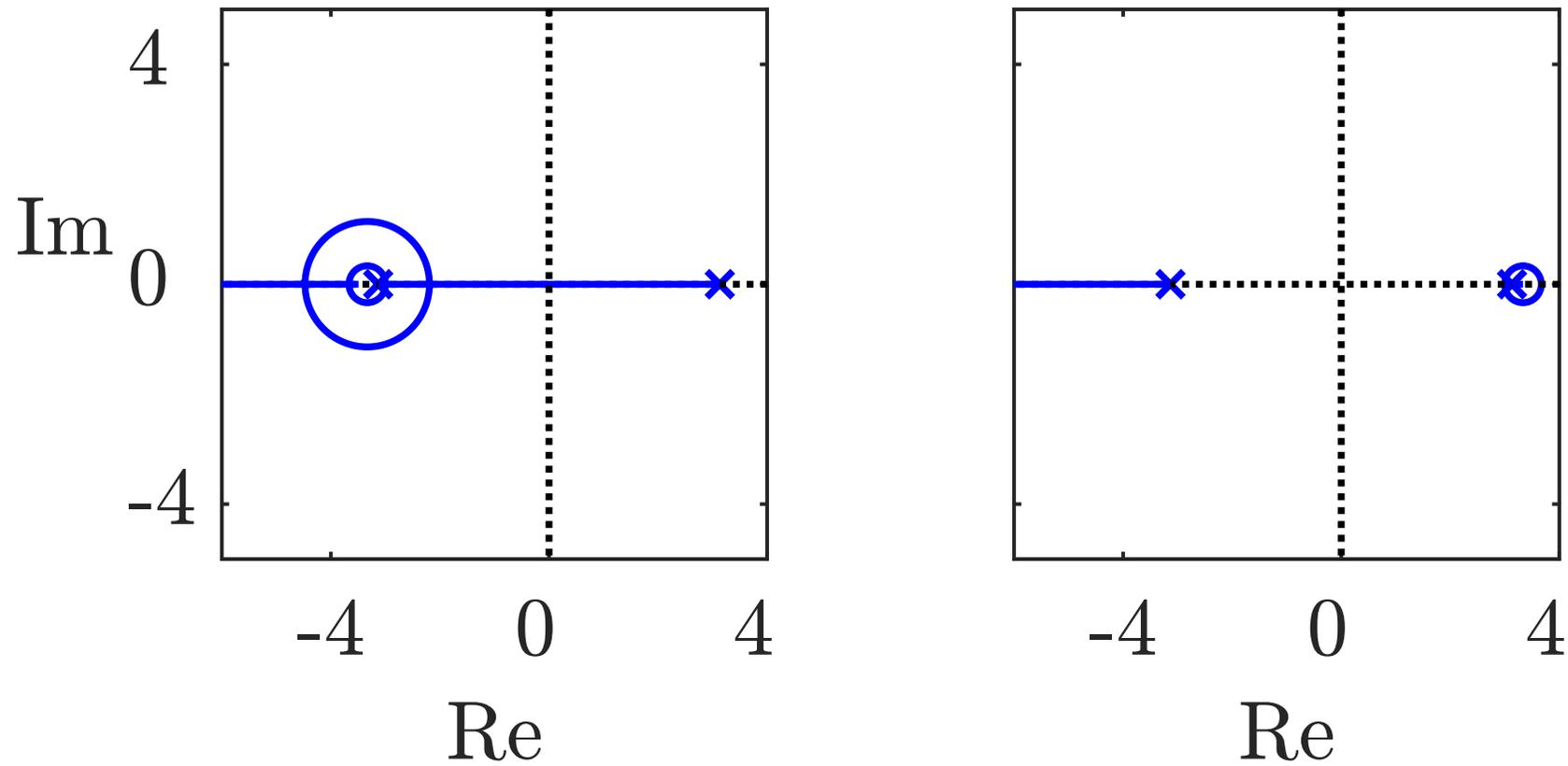


Abb. A.62. Wurzelortskurve für P-Regelung (links: Vorderradlenkung, rechts: Hinterradlenkung)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

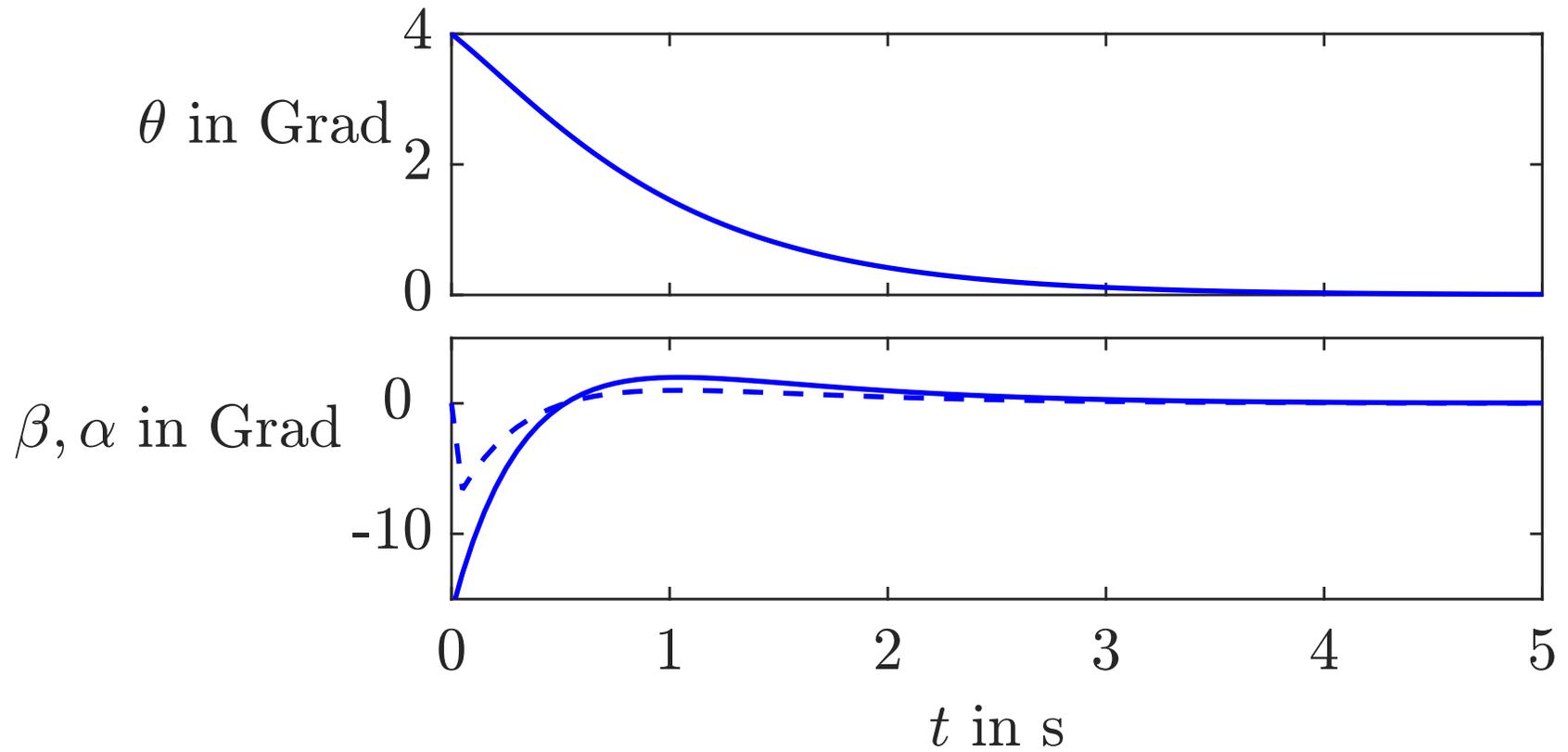


Abb. A.63. Verhalten des geregelten Fahrrades mit Vorderradlenkung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

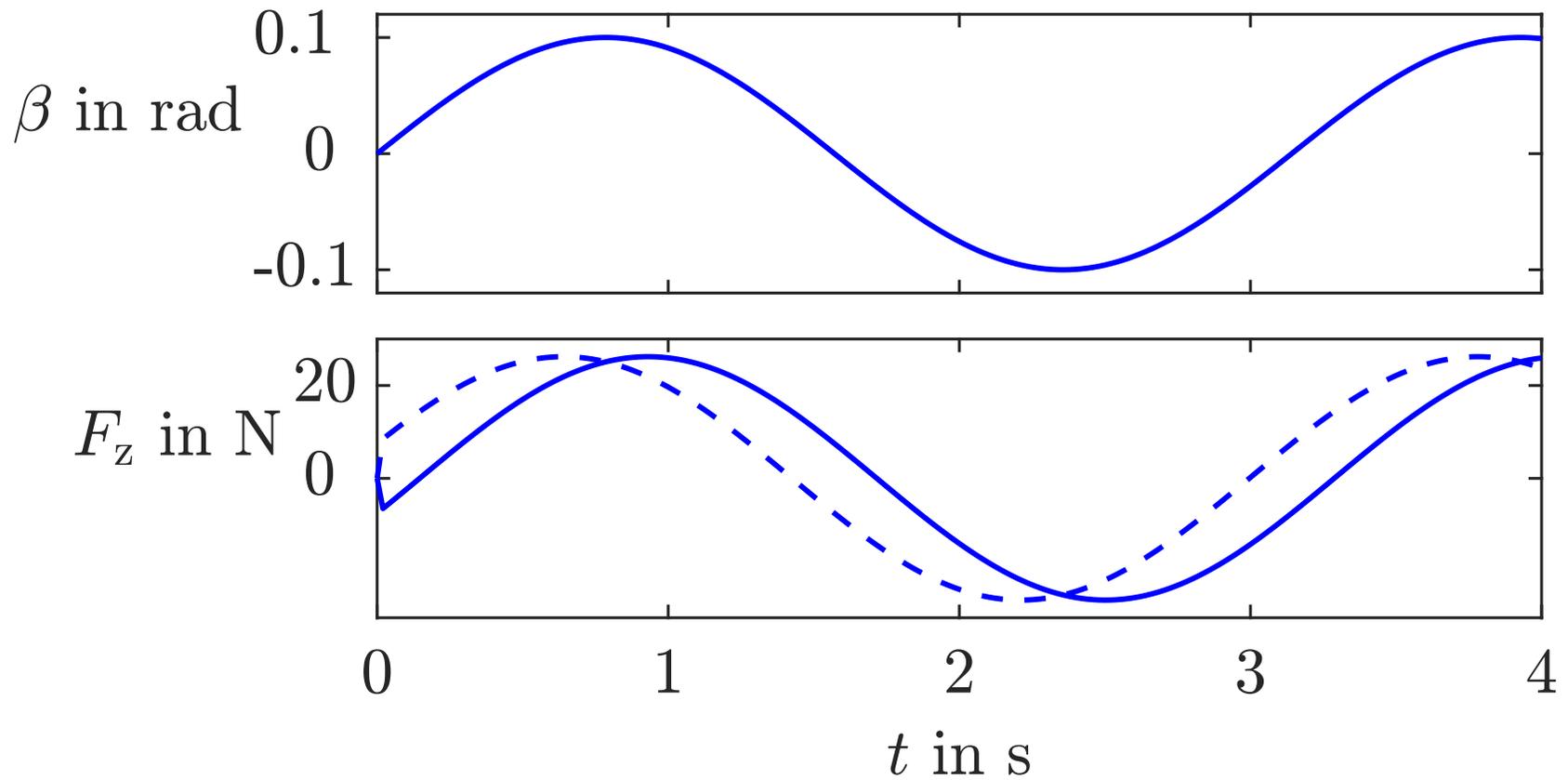


Abb. A.64. Lenkwinkel β und Kraftverlauf F_z bei Vorder- und Hinterradlenkung im Vergleich

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

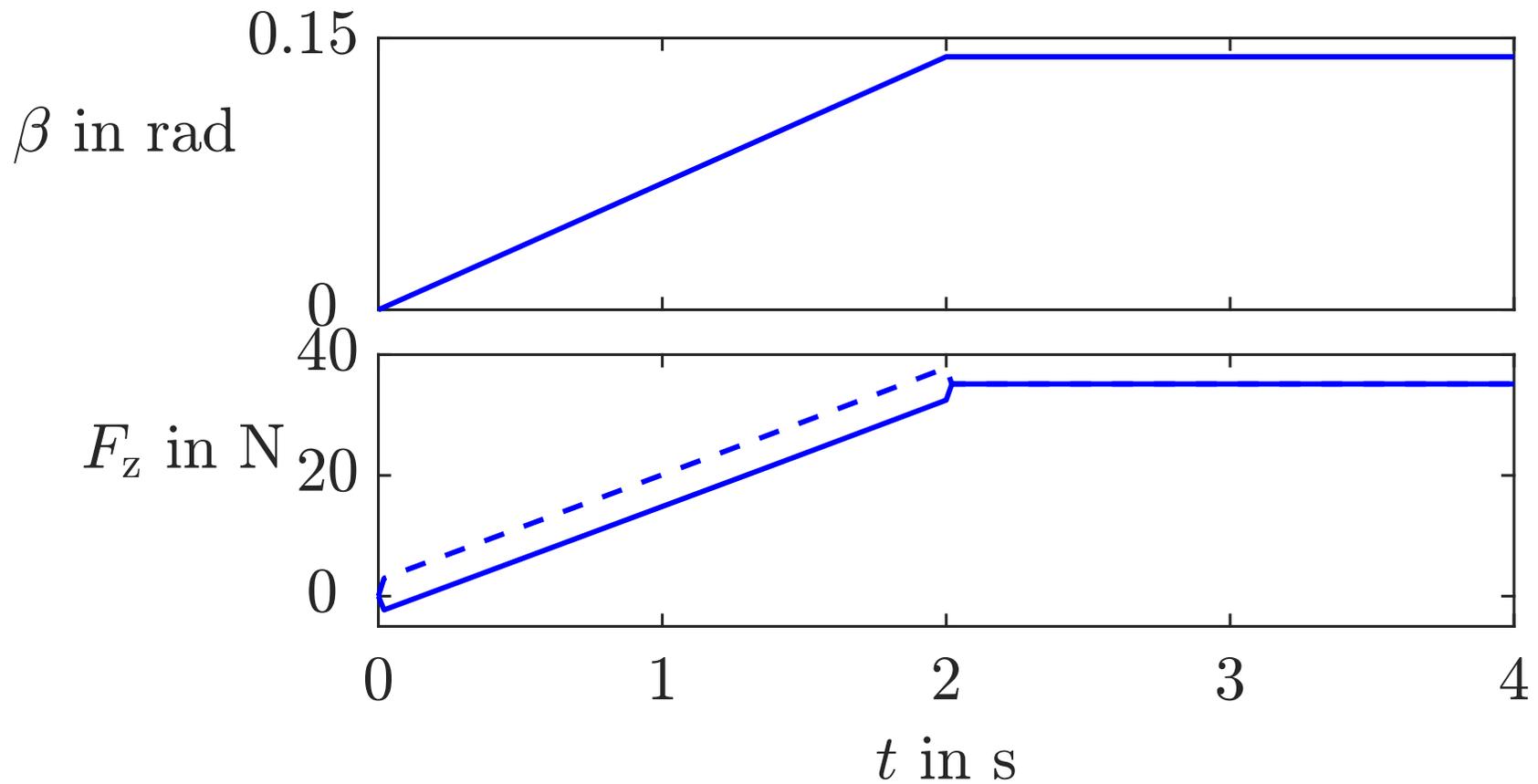


Abb. A.65. Lenkwinkel β und Kraftverlauf F_z bei rampenförmiger Lenkwinkelveränderung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



Abb. A.66. Experimentalfahrrad

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

Seite 699

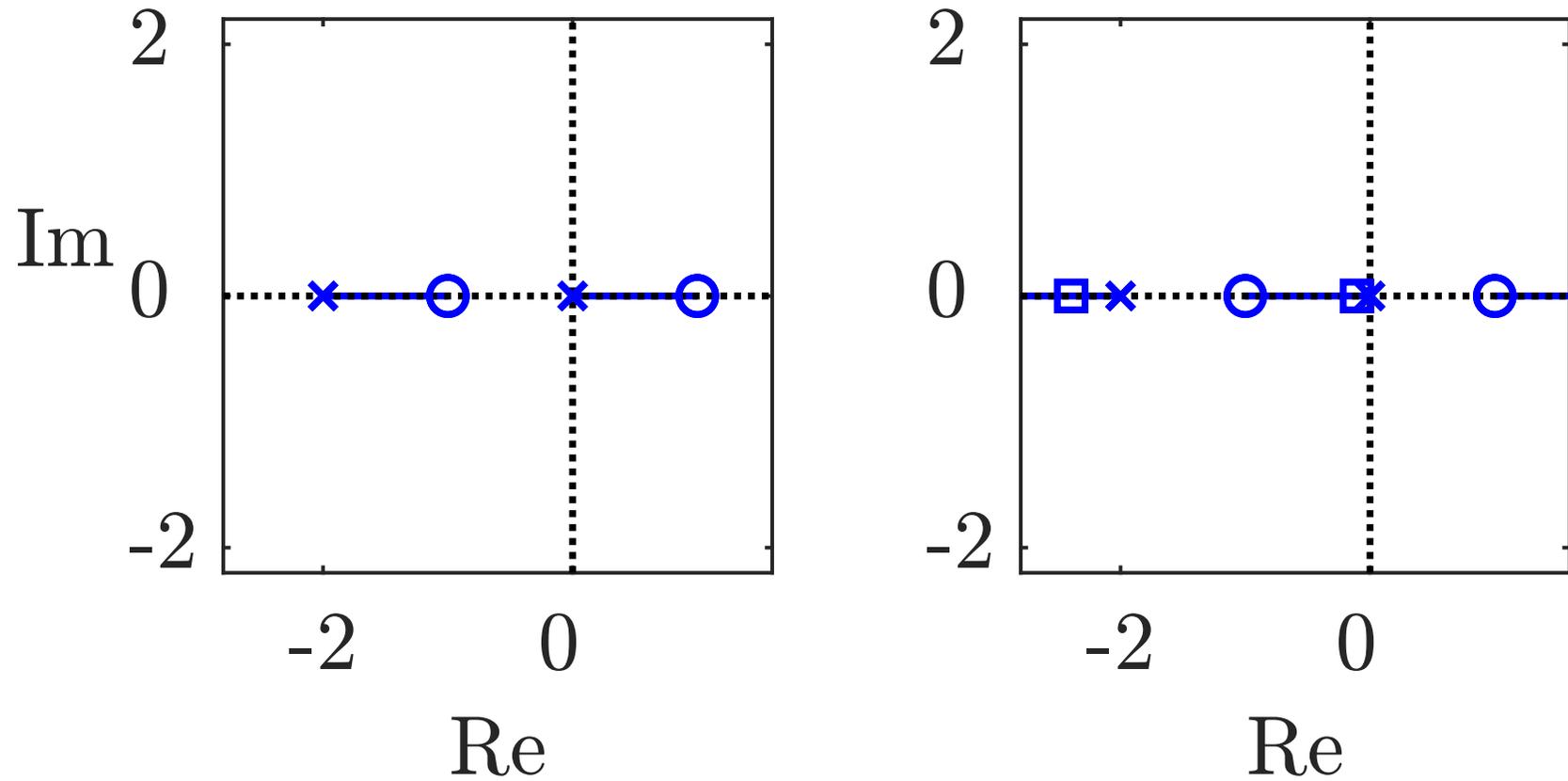


Abb. A.67. Wurzelortskurve für positive Reglerverstärkung k_P (links) und für negative Reglerverstärkung k_P (rechts; Pole \square für $k_P = 0,2$)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

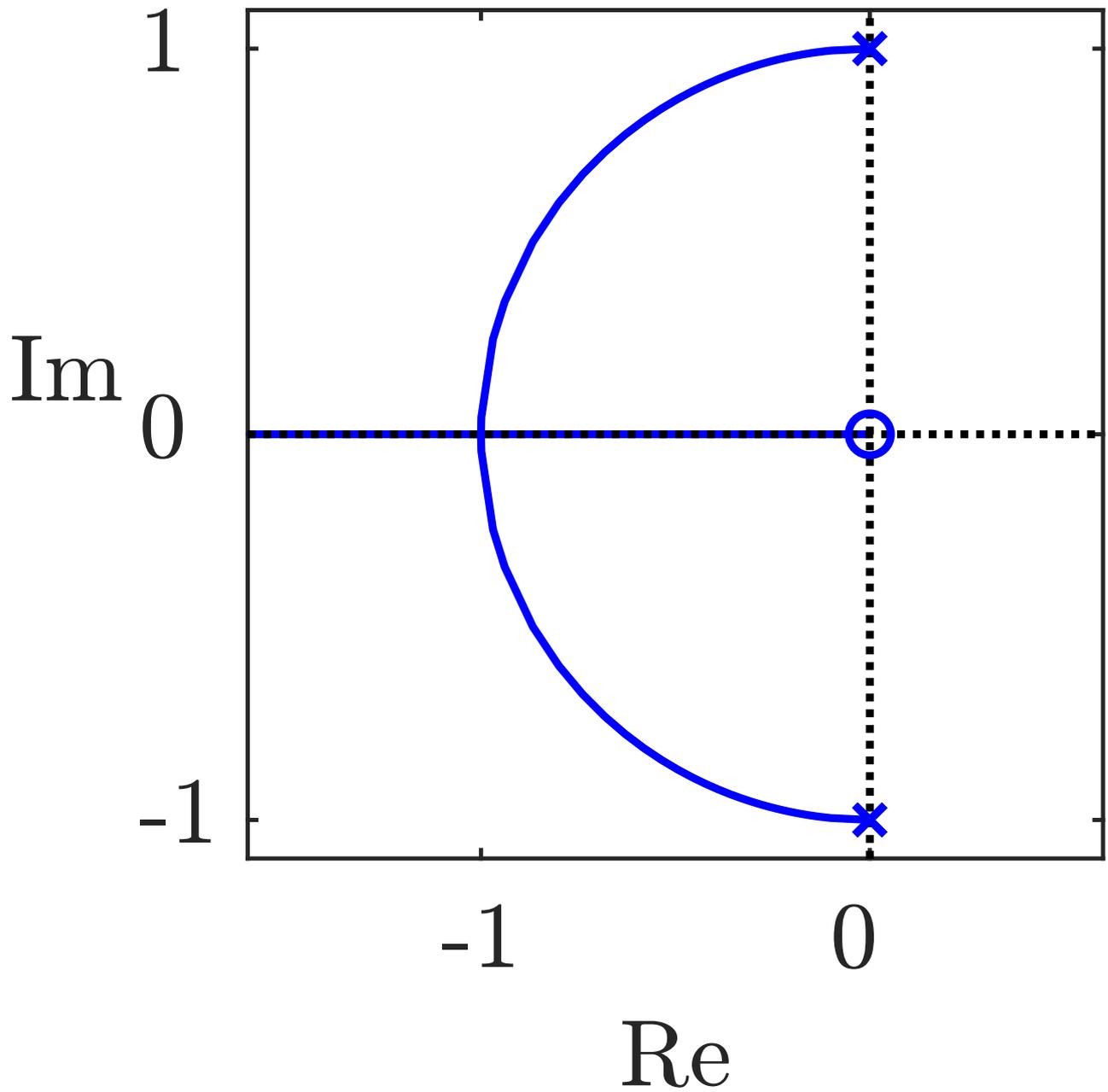


Abb. A.68: Wurzelortskurve zur Bestimmung des kritischen Widerstandes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

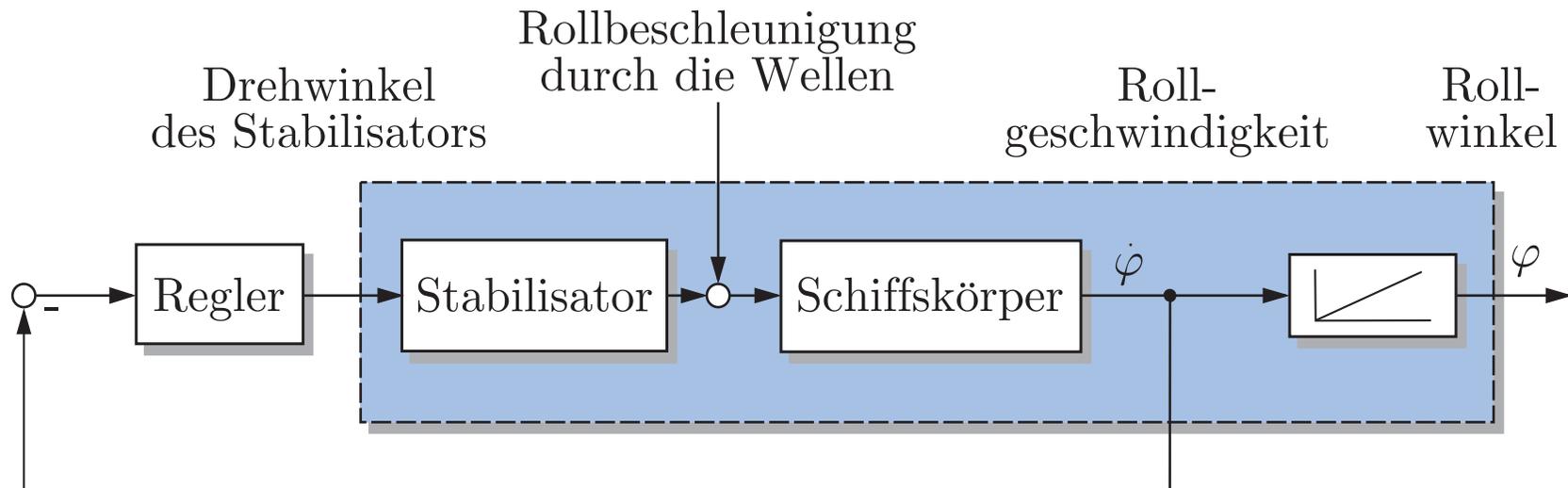


Abb. A.69. Blockschaltbild des Stabilisators

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

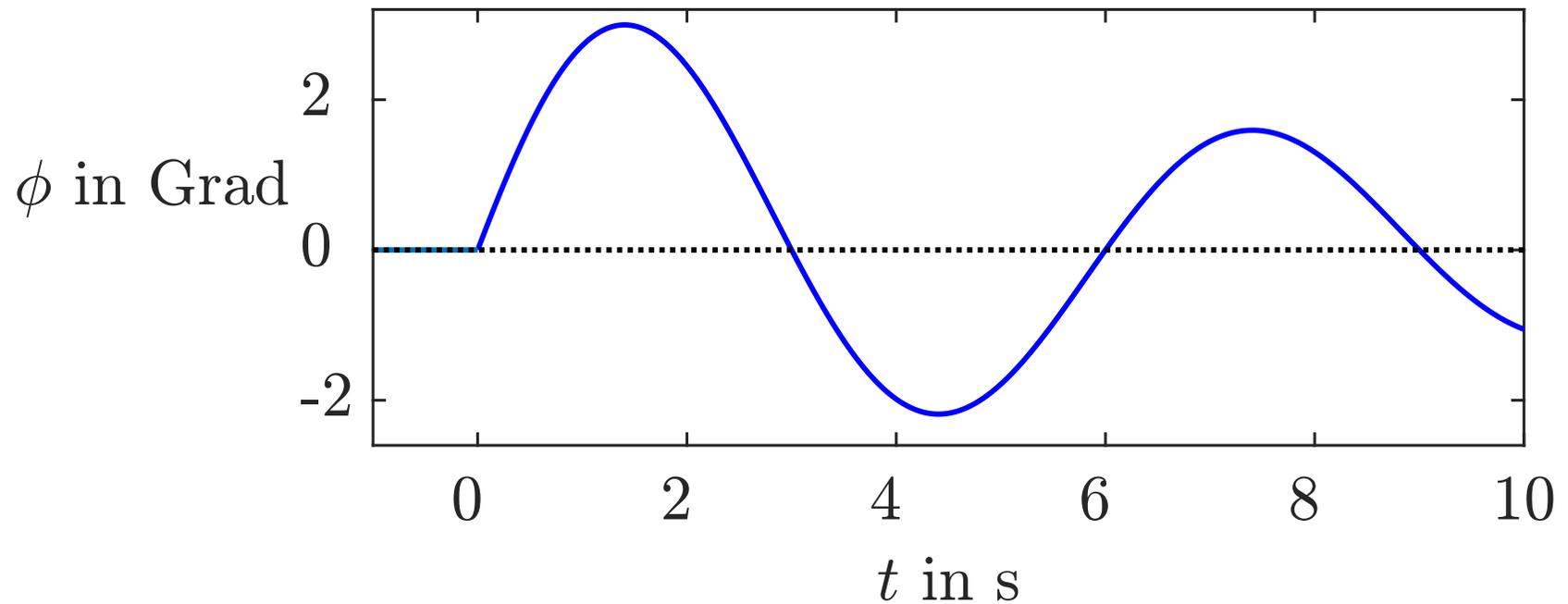
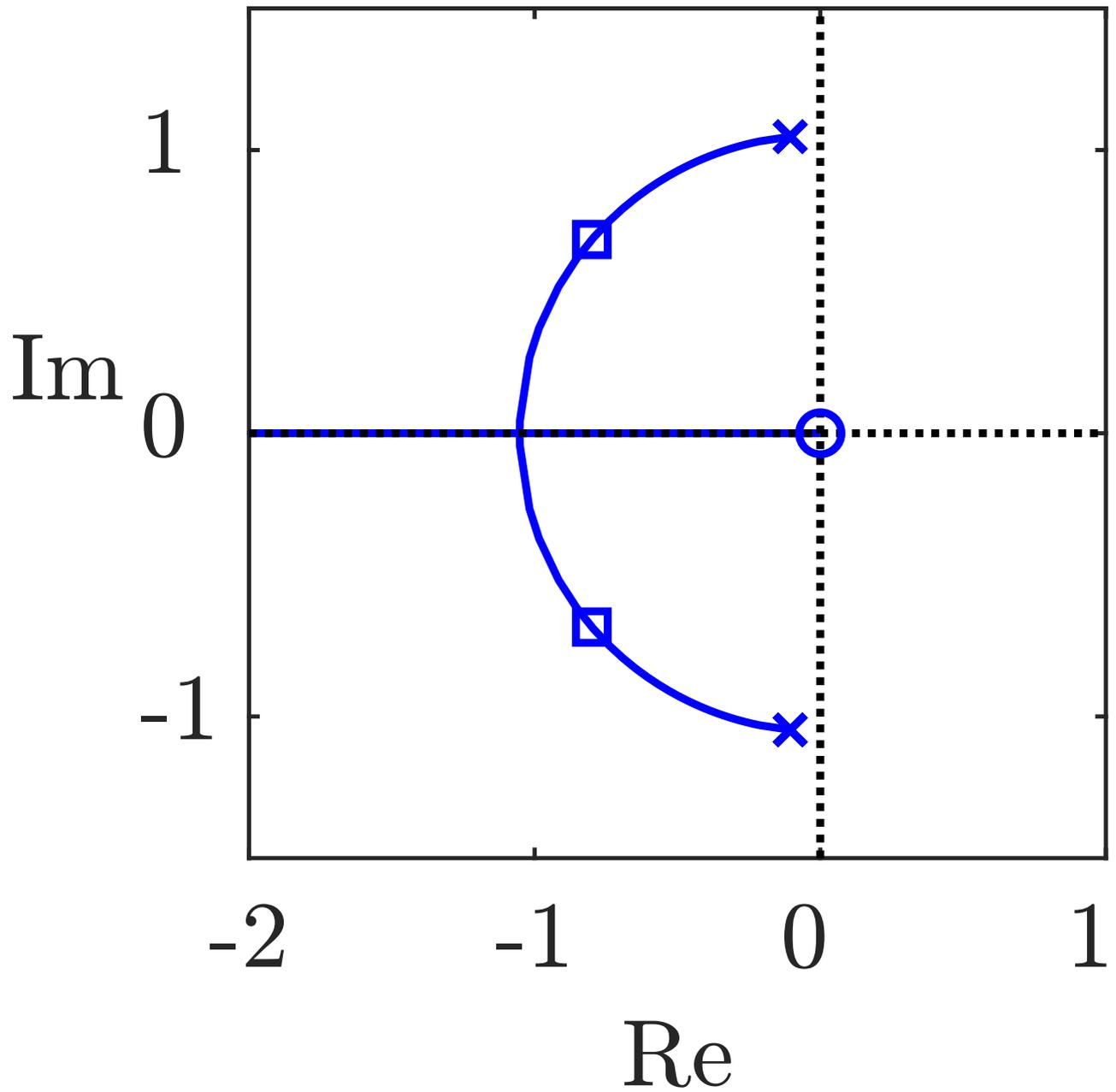


Abb. A.70. Rollbewegung des unregulierten Schiffes bei impulsförmiger Anregung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020



**Abb. A.71: Wurzelortskurve des Stabilisatorregelkreises
(Pole \square bei $k = 0,35$)**

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

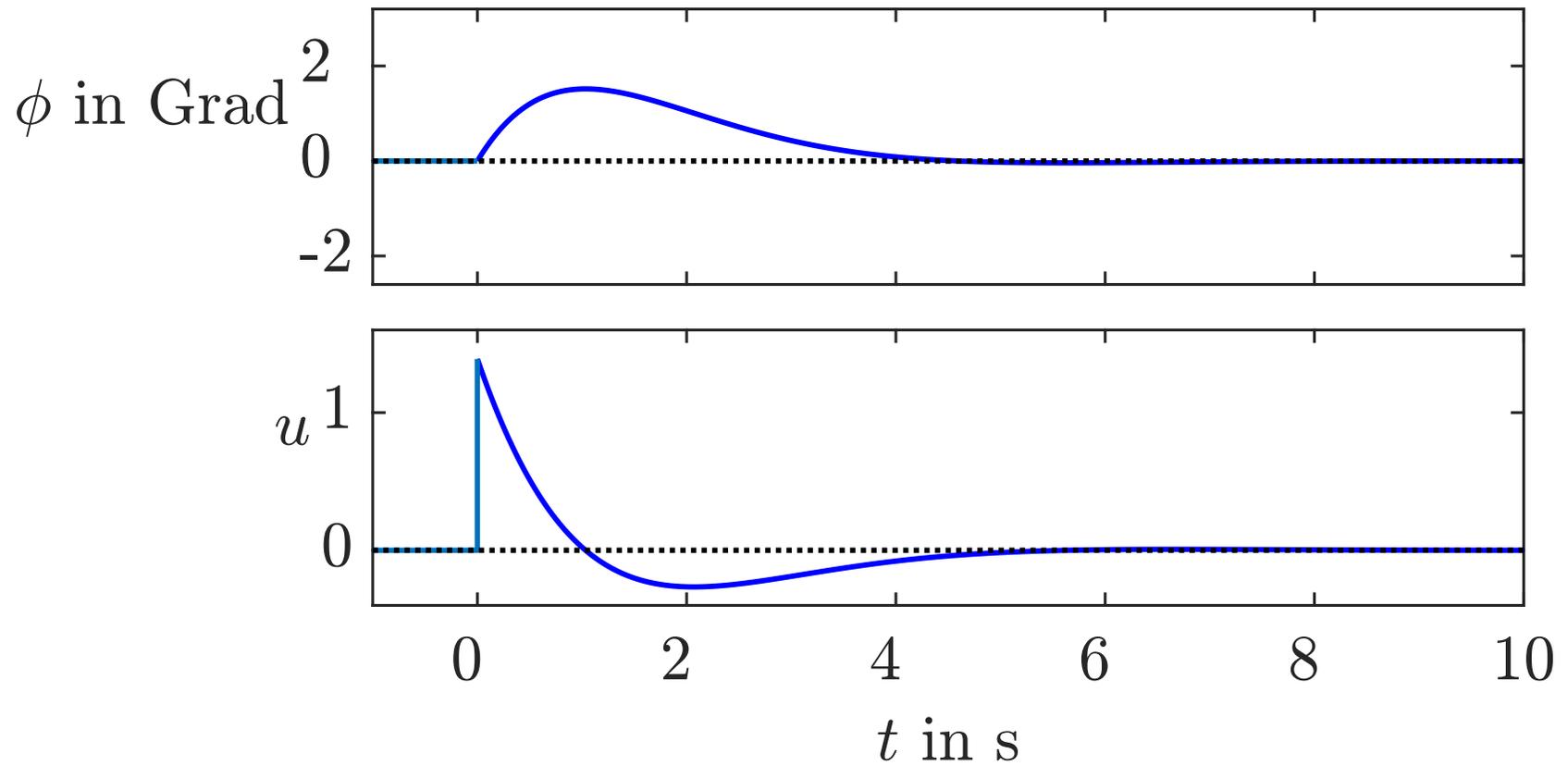


Abb. A.72. Bewegung des stabilisierten Schiffes bei impulsförmiger Anregung

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

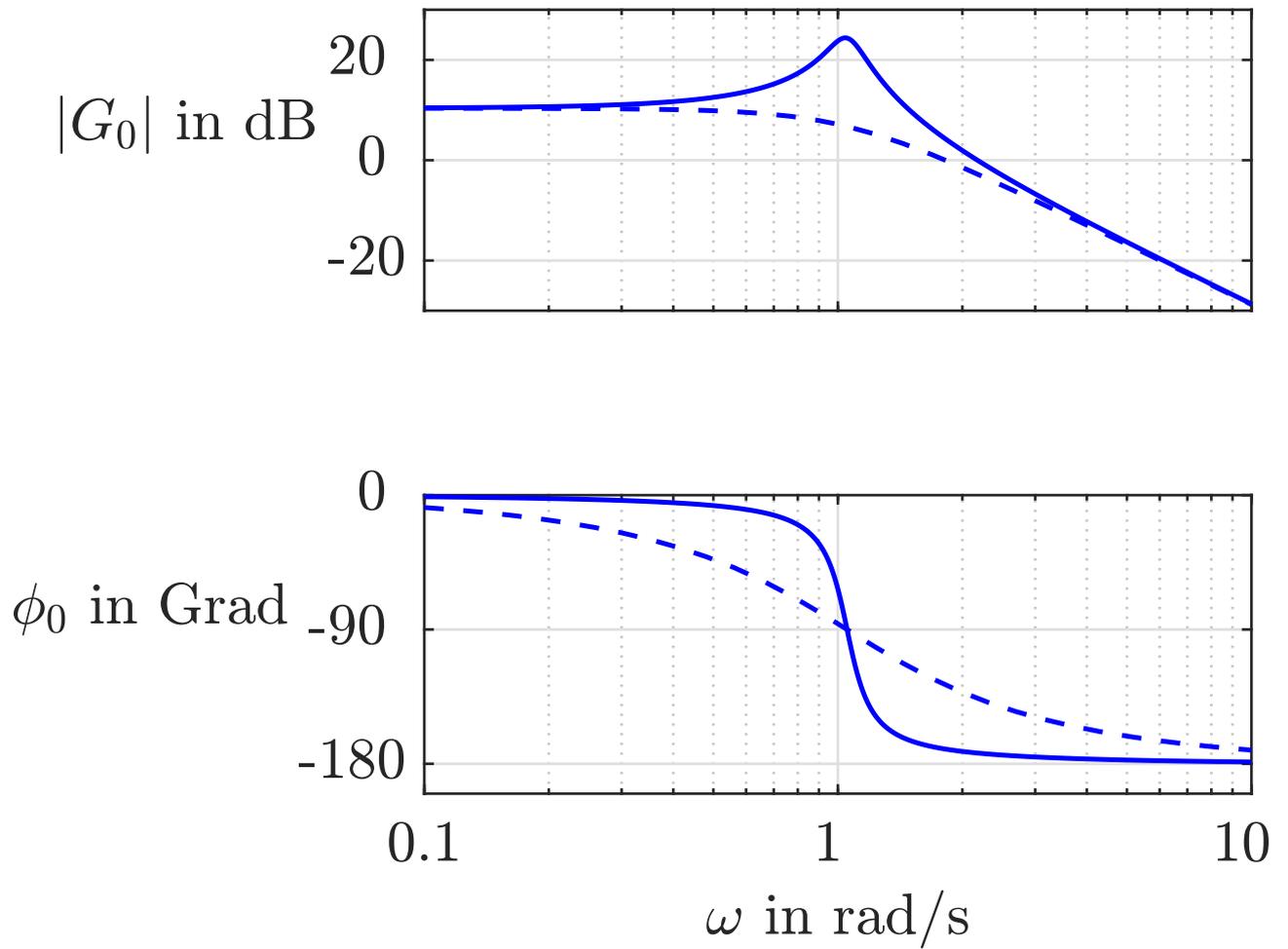


Abb. A.73: Bodediagramm des unregelmäßig (—) und des stabilisierten Schiffes (- - -)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

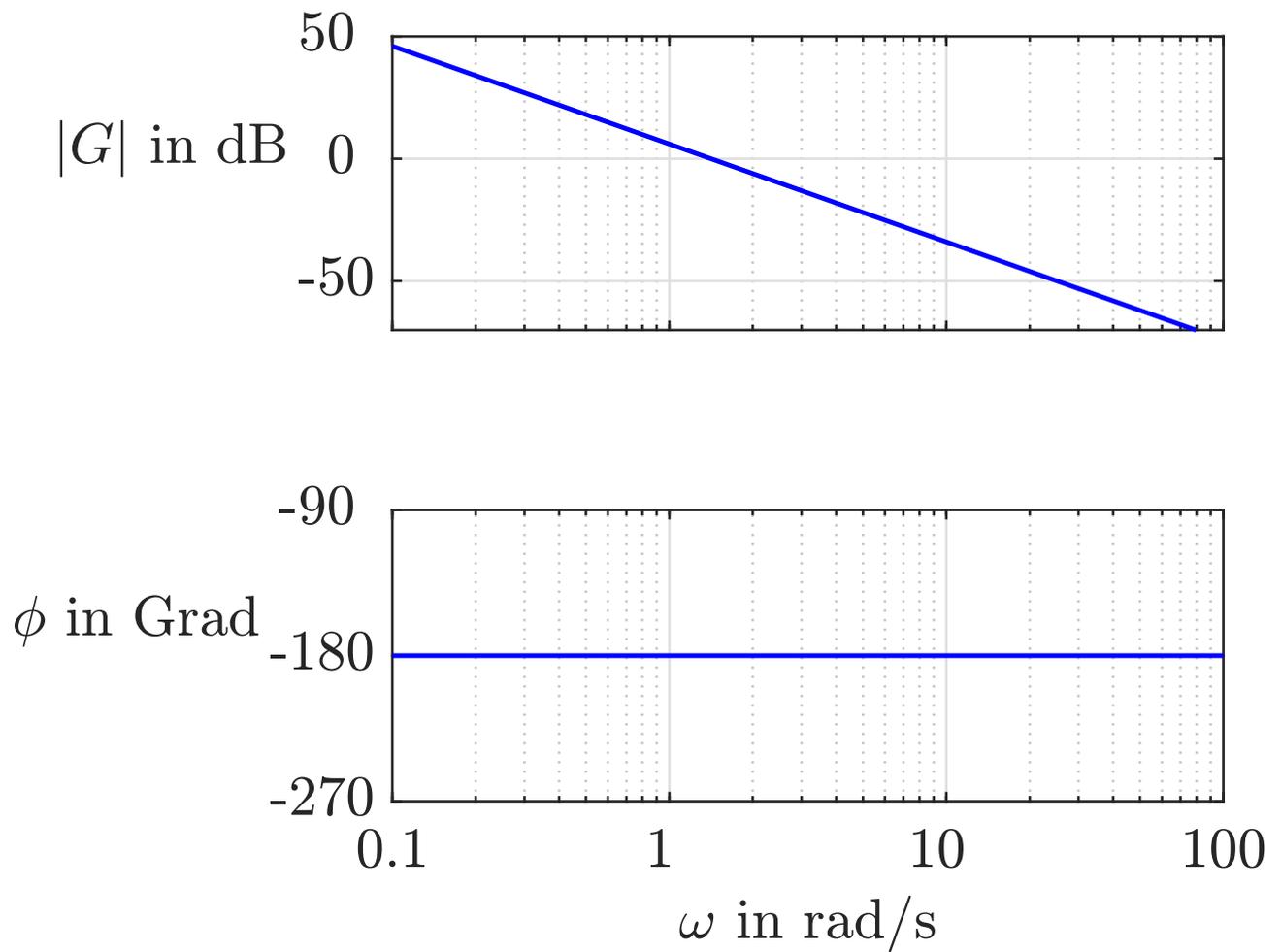


Abb. A.74: Bodediagramm des Flugzeugs als Regelstrecke

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

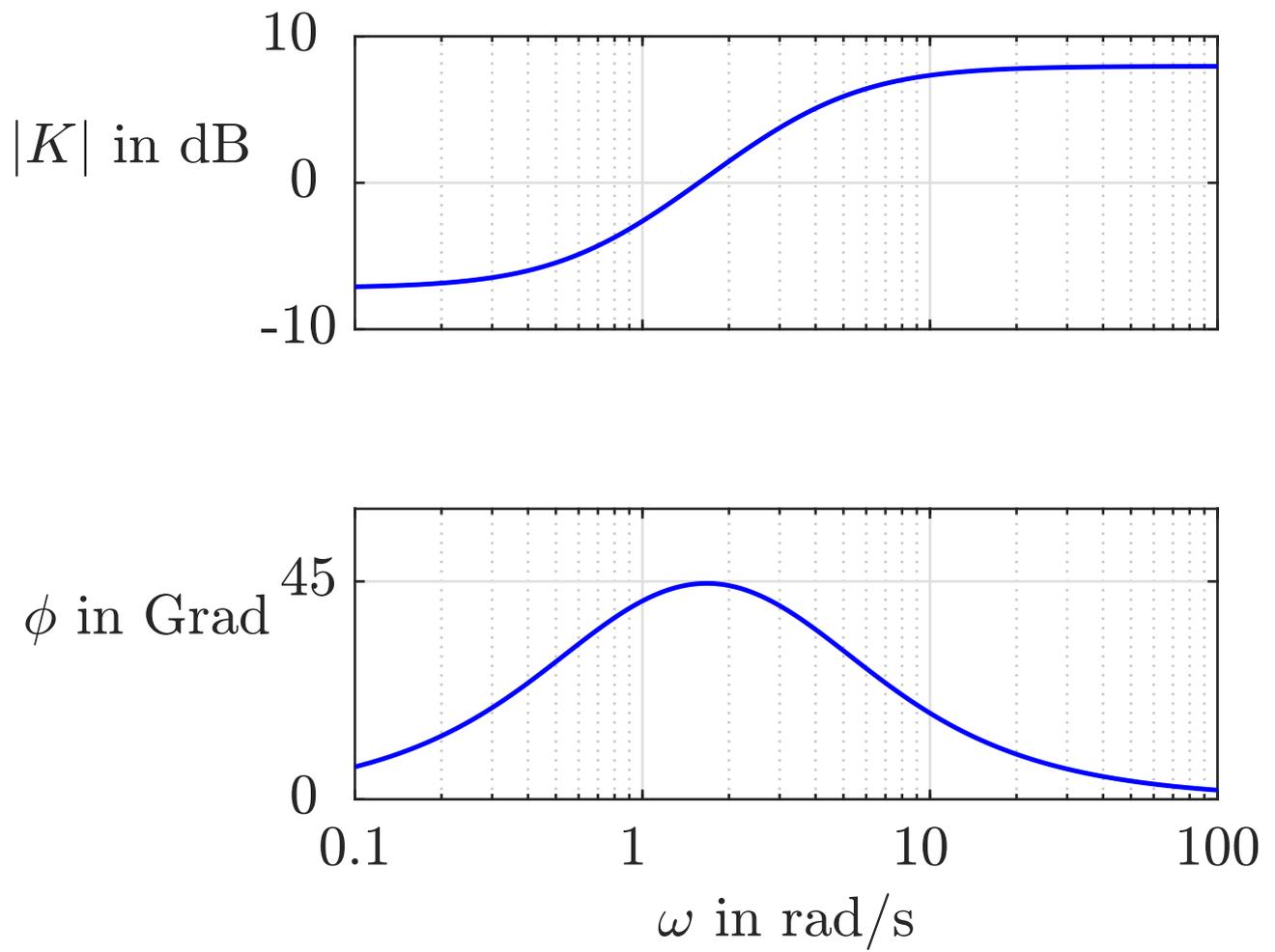


Abb. A.75: Bodediagramm des Reglers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

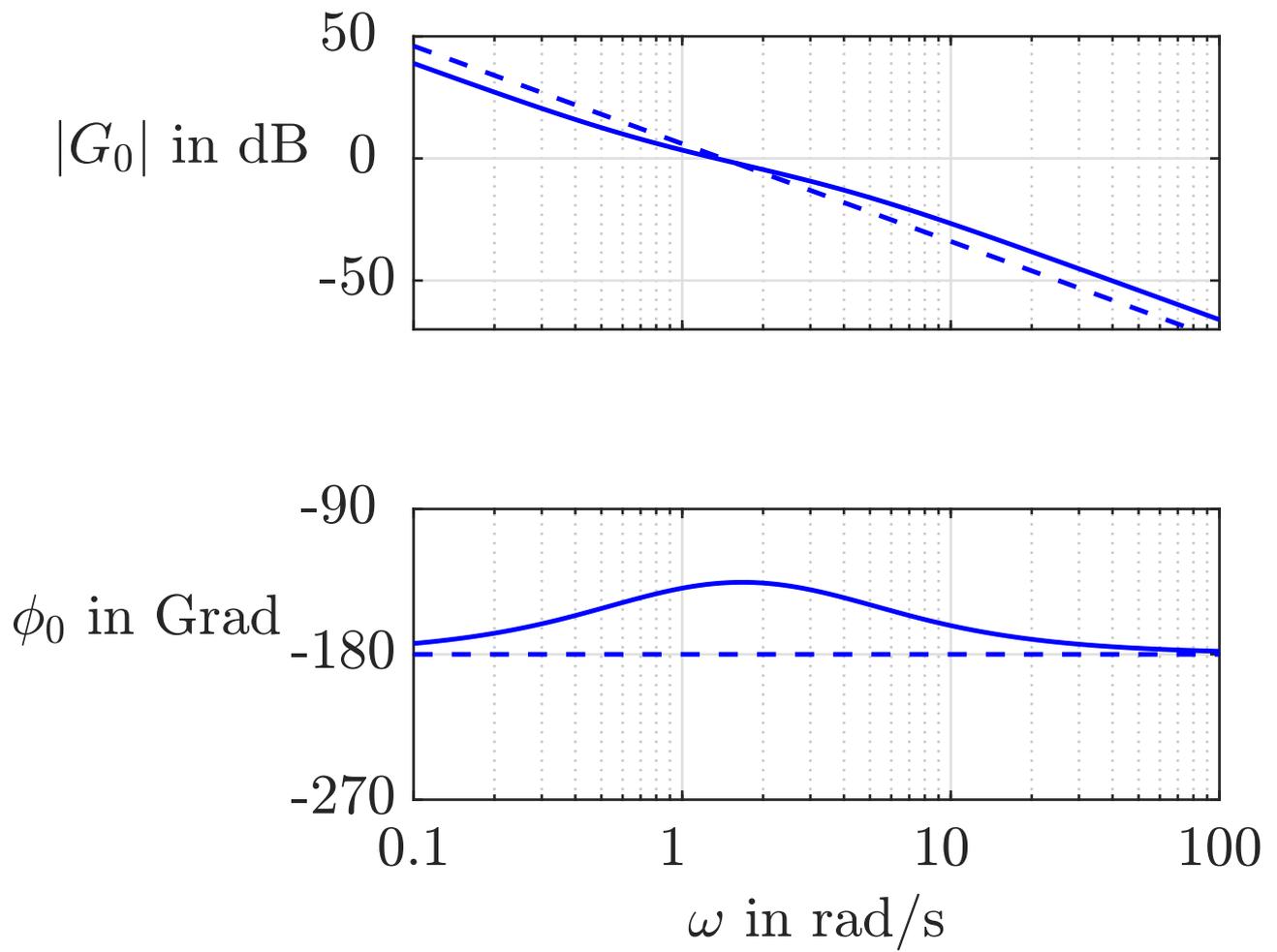


Abb. A.76: Bodediagramm der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

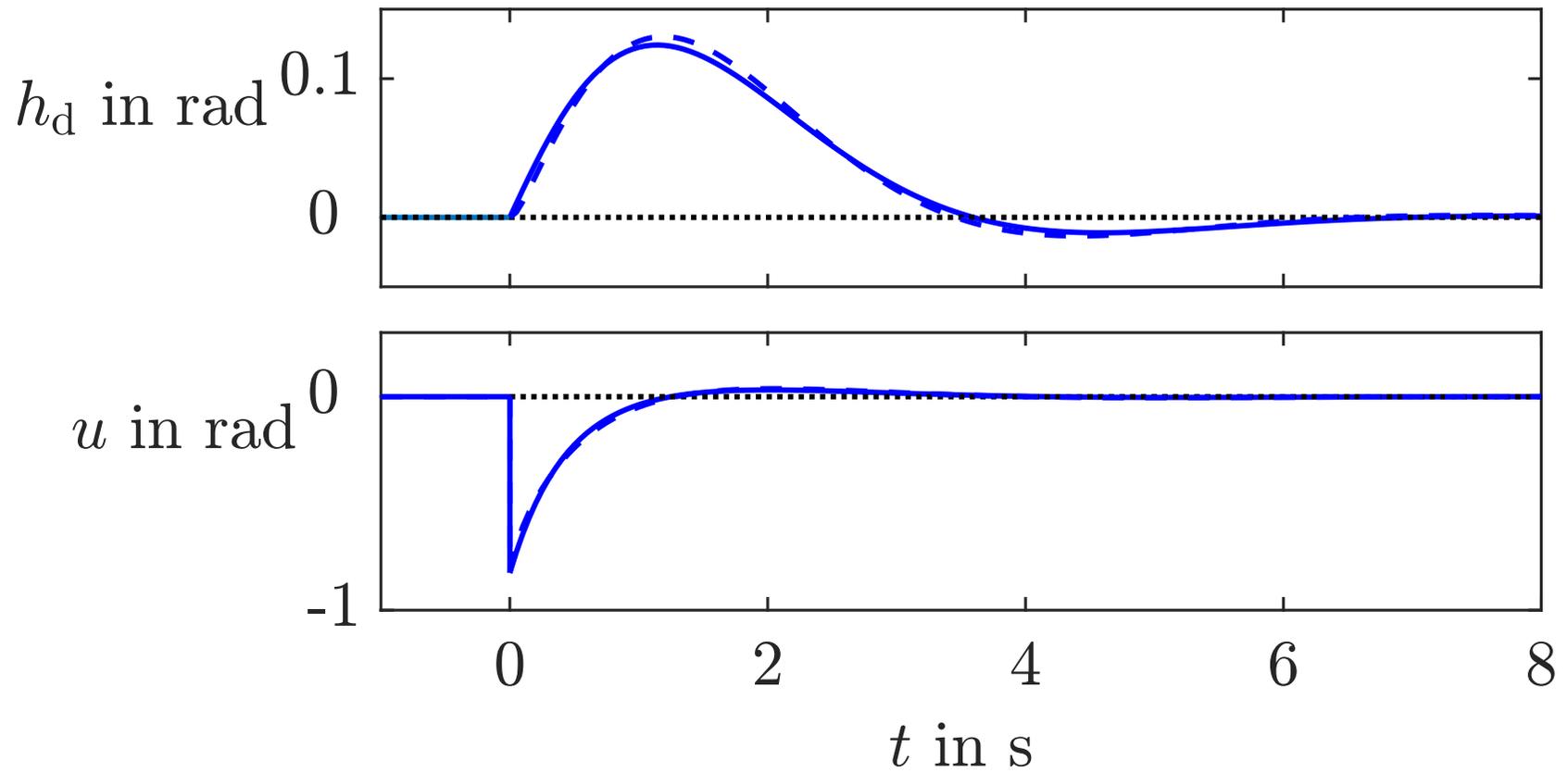


Abb. A.77. Störverhalten des Flugregelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

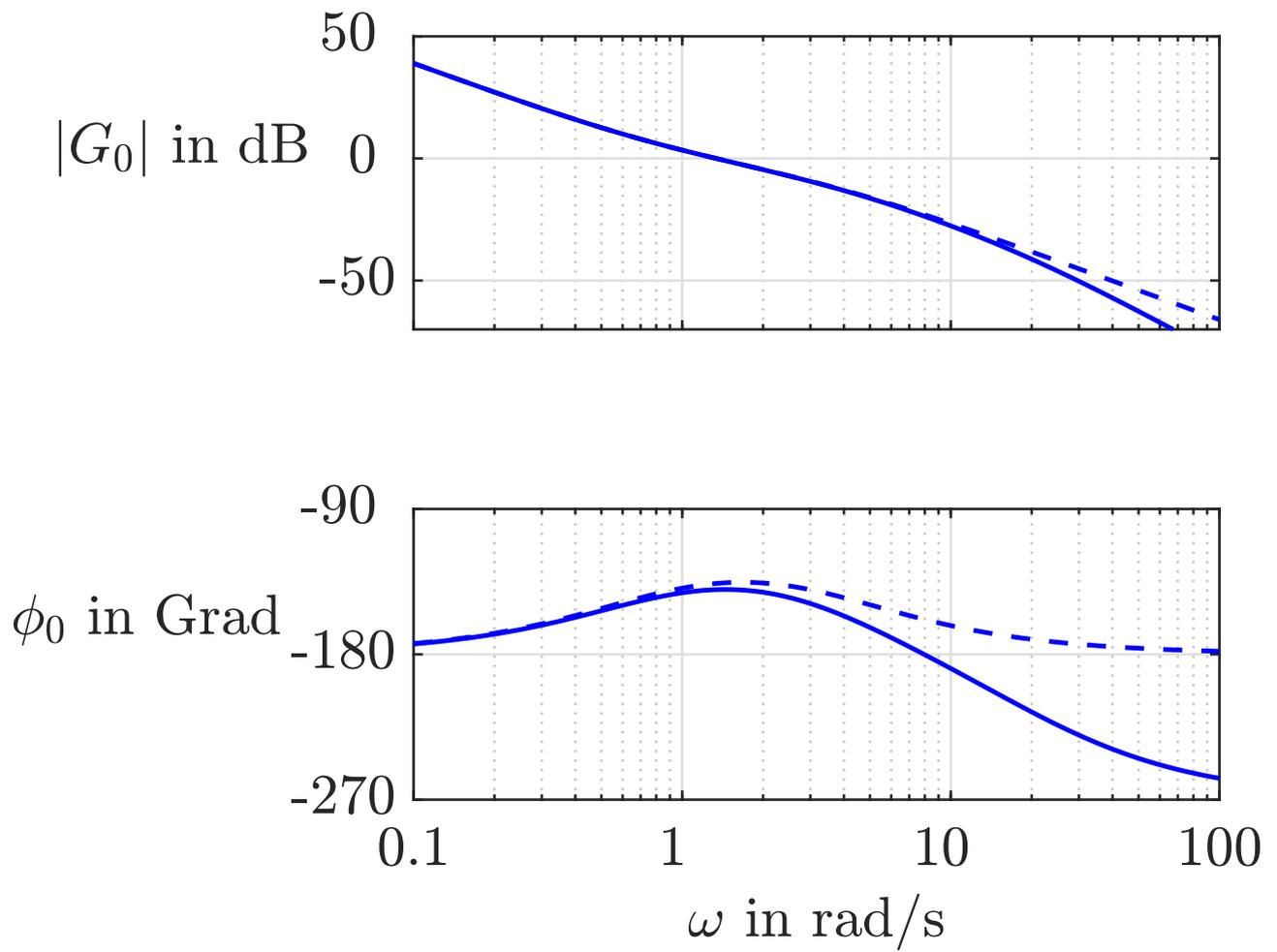


Abb. A.78: Bodediagramm der offenen Kette bei Berücksichtigung des Messgliedes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

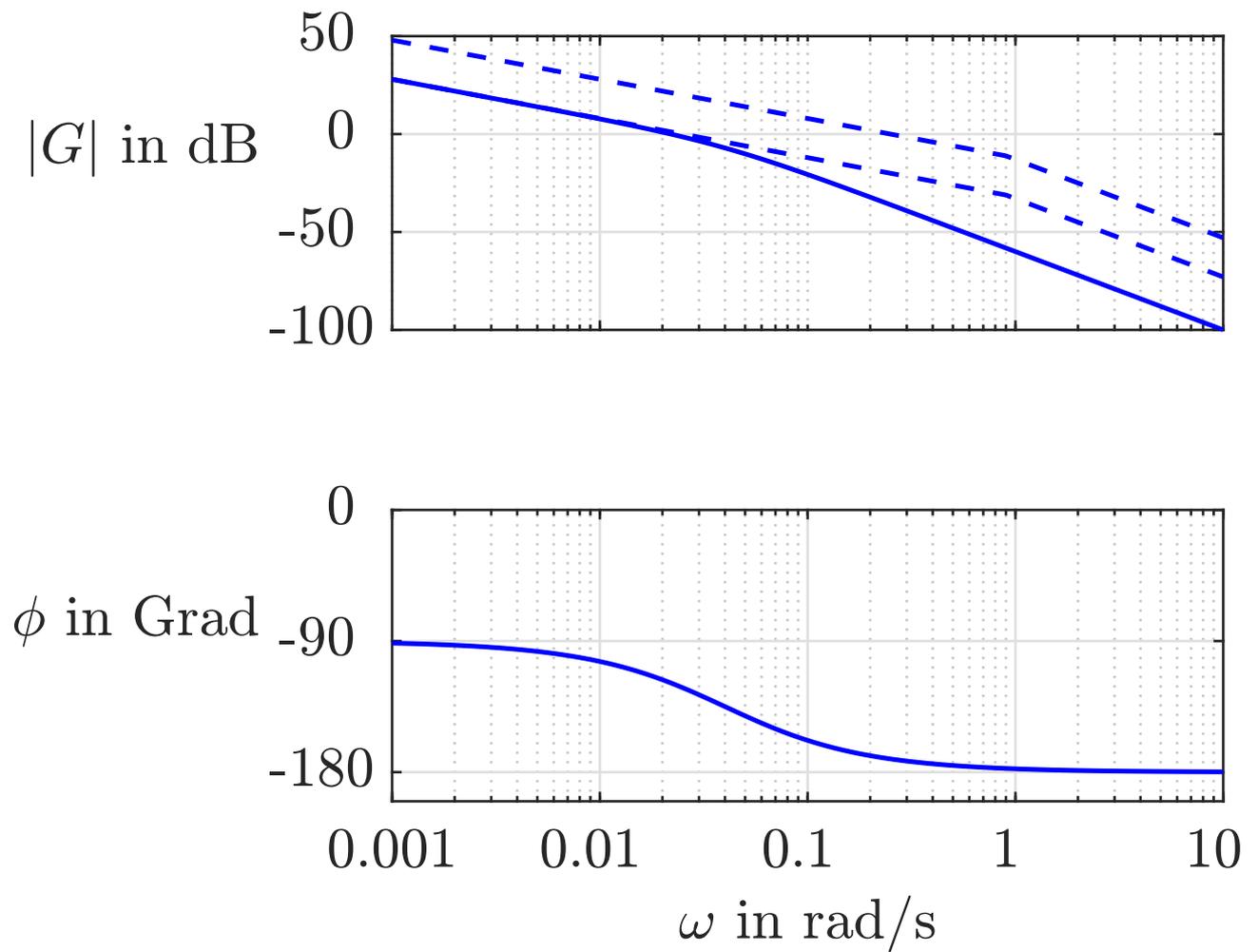


Abb. A.79: Bodediagramm der Regelstrecke und gewünschter Amplitudengang der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

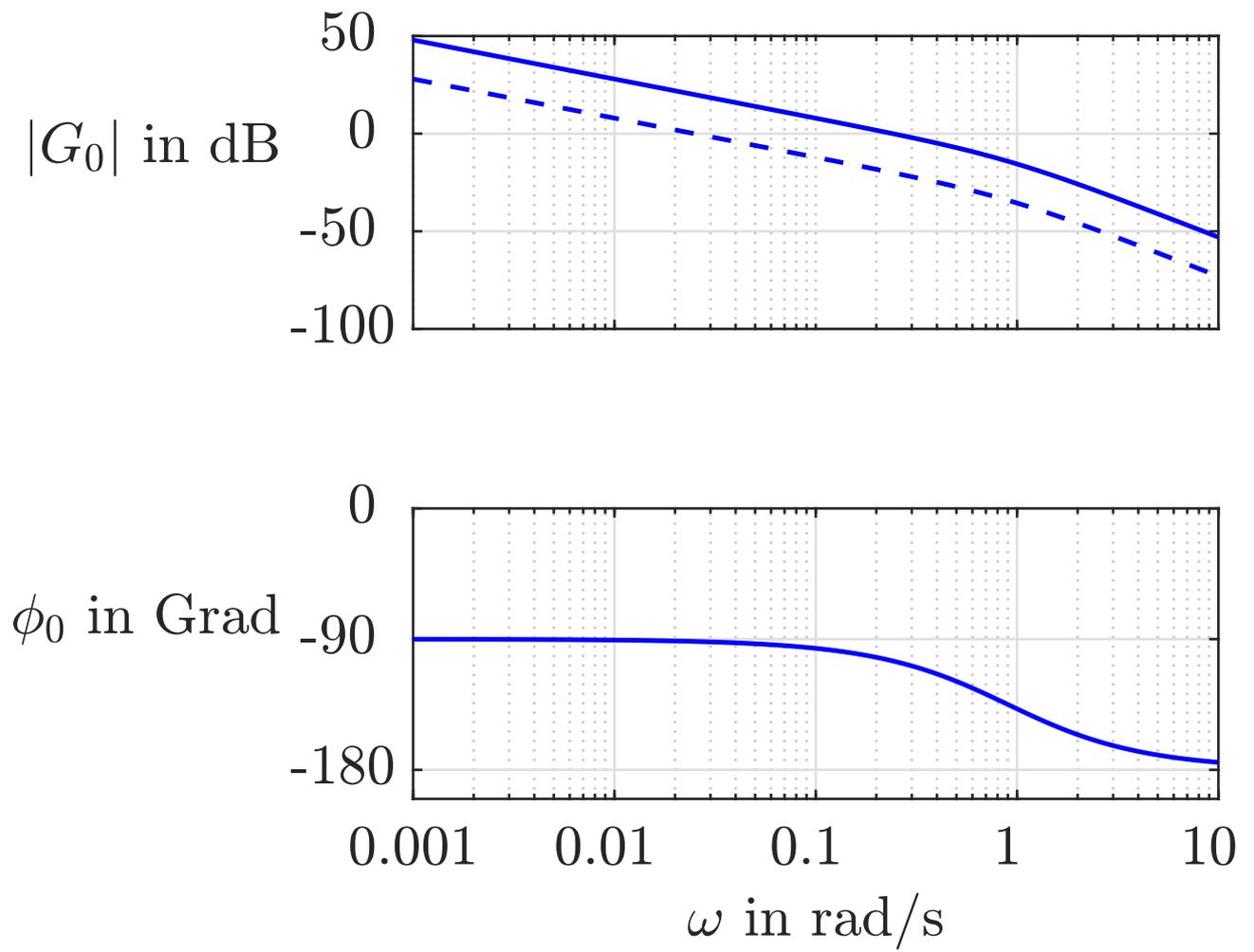


Abb. A.80: Bodediagramm der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

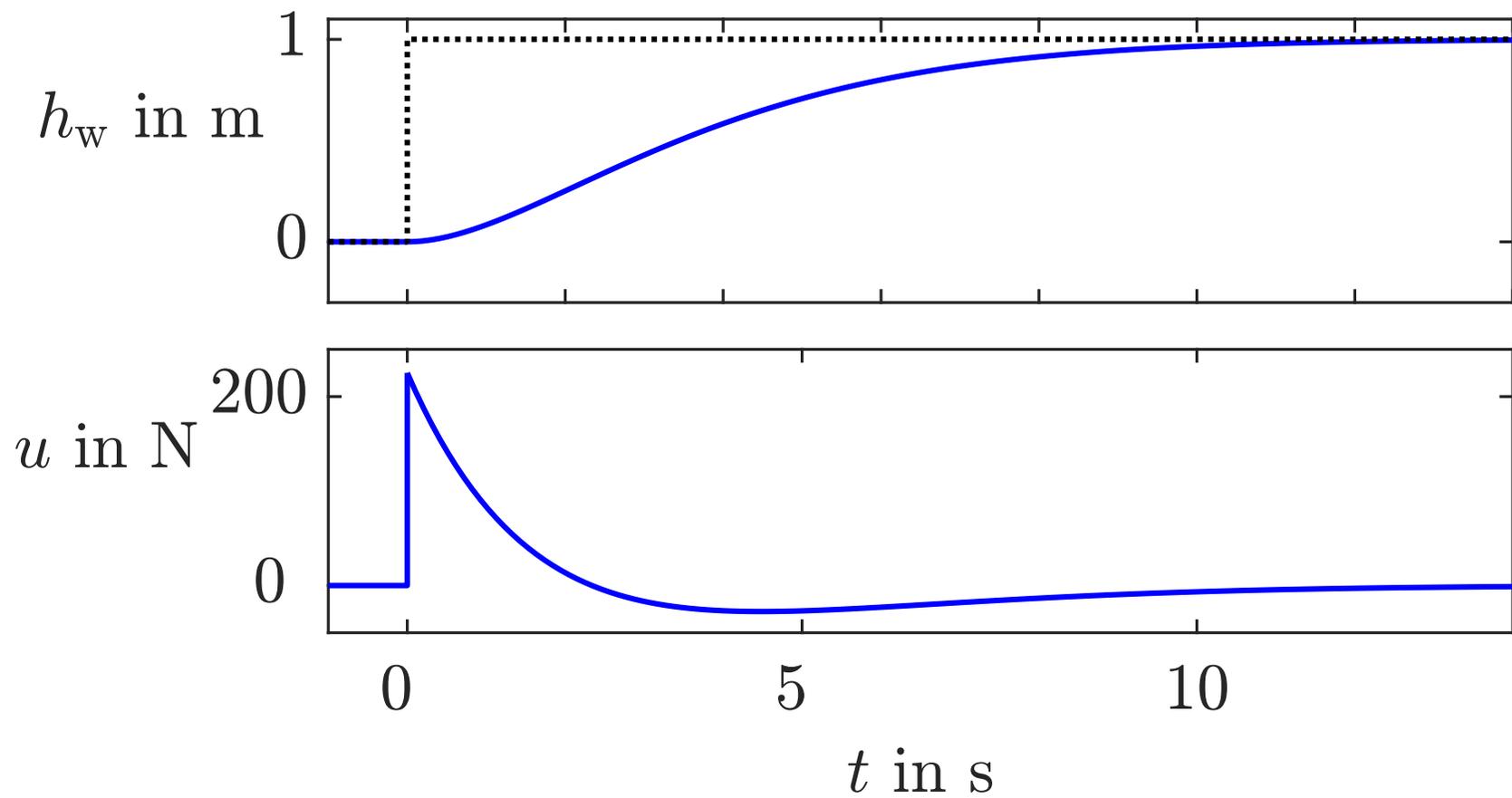


Abb. A.81. Führungsübergangsfunktion des Abstandsregelkreises

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

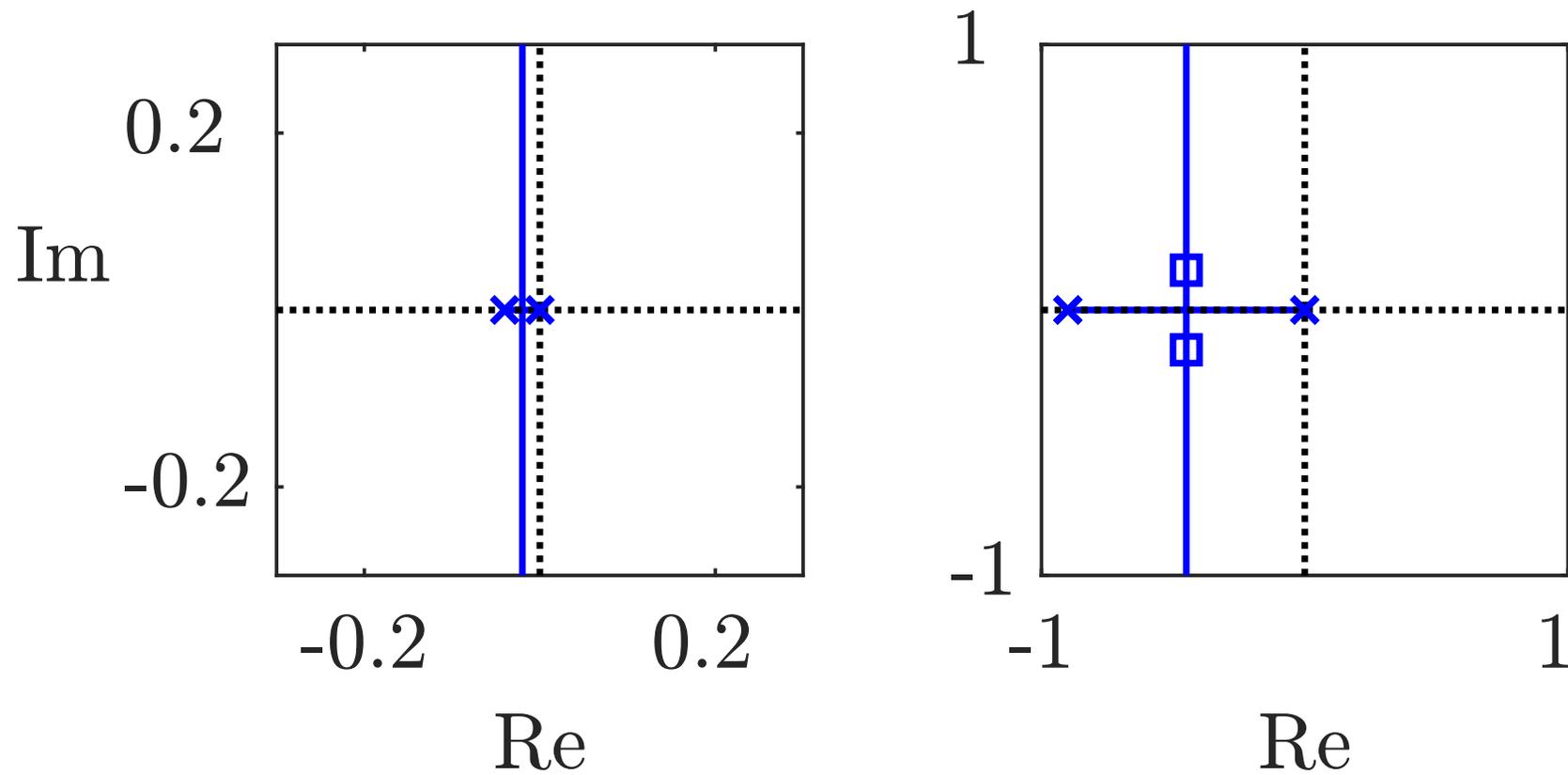


Abb. A.82. Wurzelortskurve mit P-Regler bzw. mit differenzierendem Korrekturglied

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

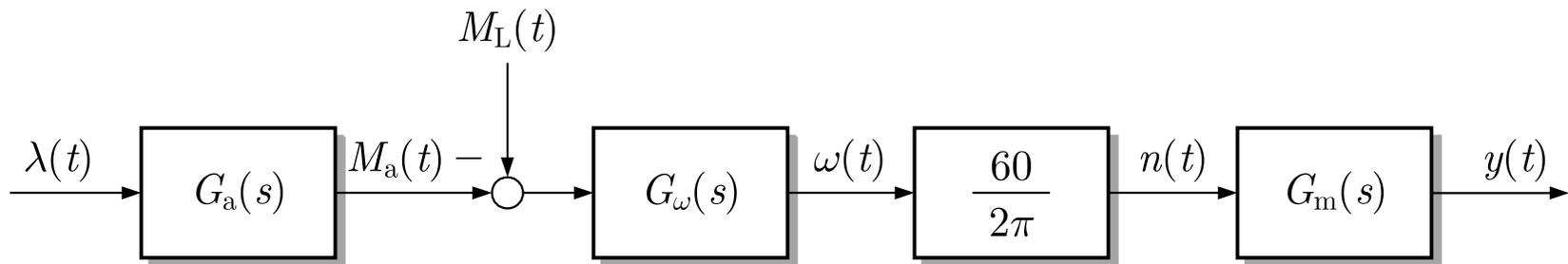


Abb. A.83. Blockschaltbild des Verbrennungsmotors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

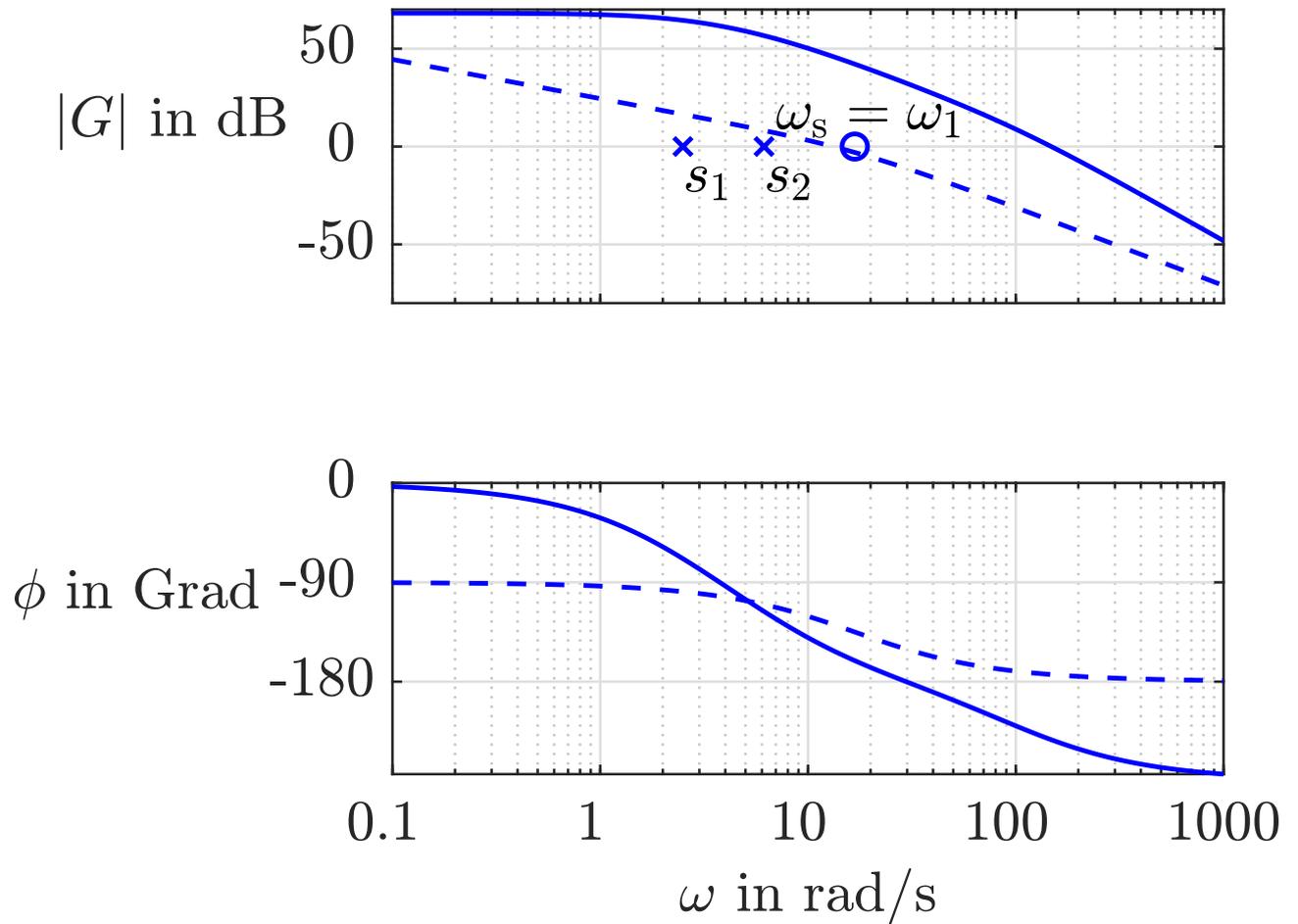


Abb. A.84: Bodediagramm der Regelstrecke (—) und der gewünschten offenen Kette (- - -)

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

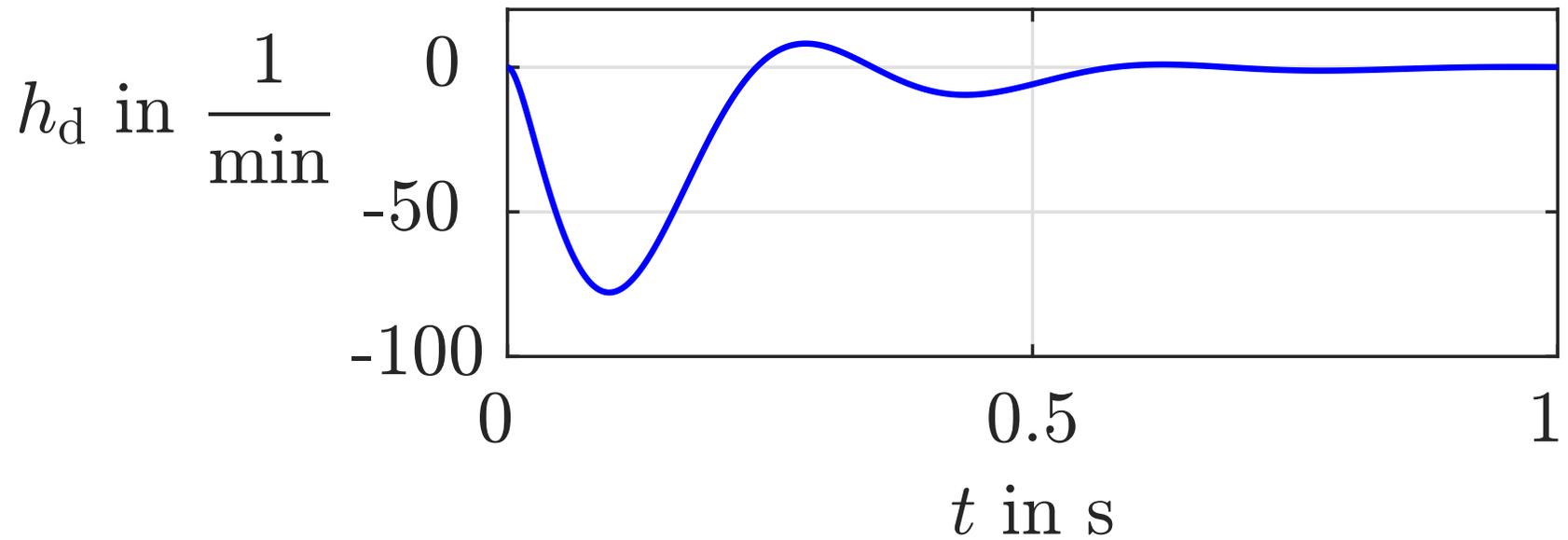


Abb. A.85. Störverhalten des Leerlaufdrehzahlregelkreises bei Laständerung $M_L(t) = \bar{d}\sigma(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

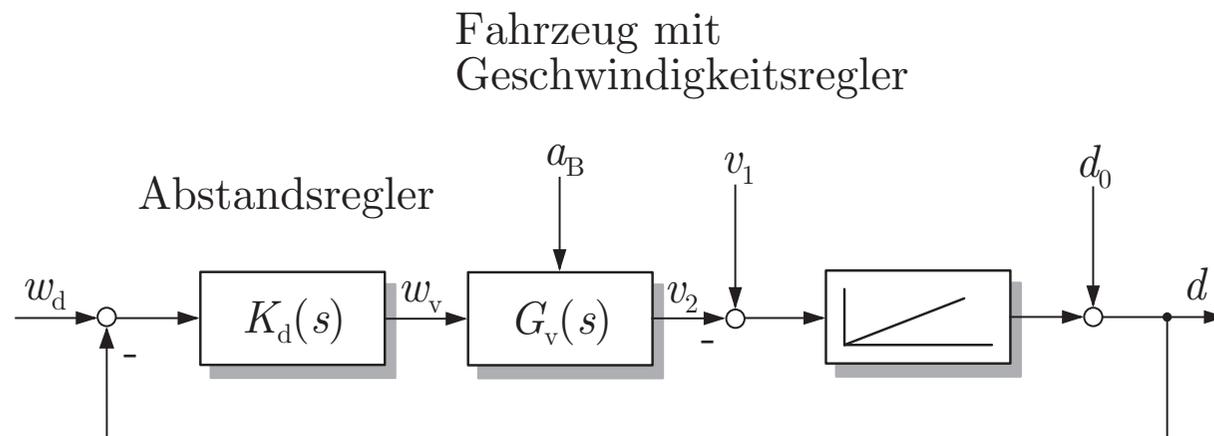
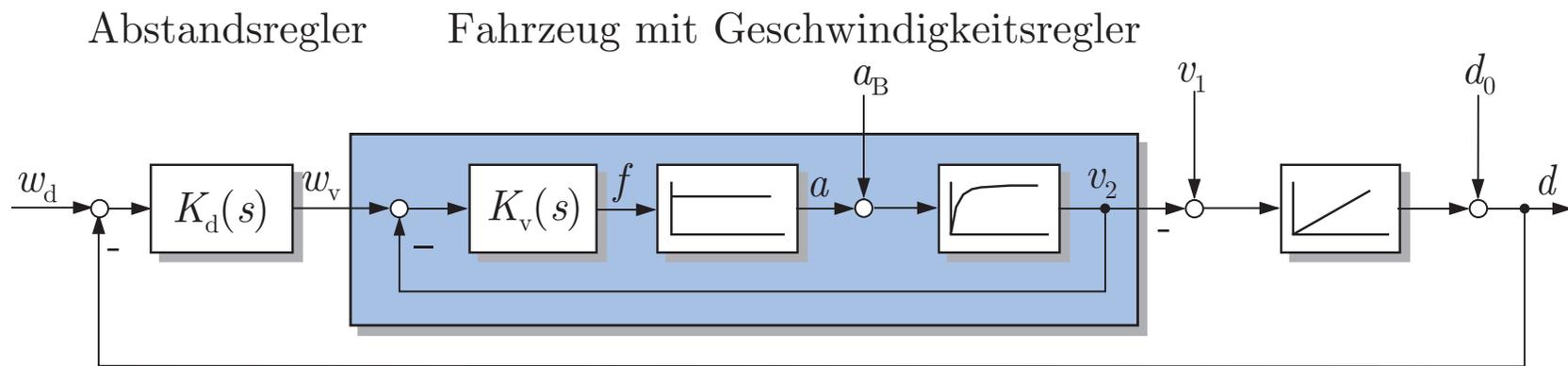


Abb. A.86. Kaskadenregelung des Fahrzeugabstandes

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

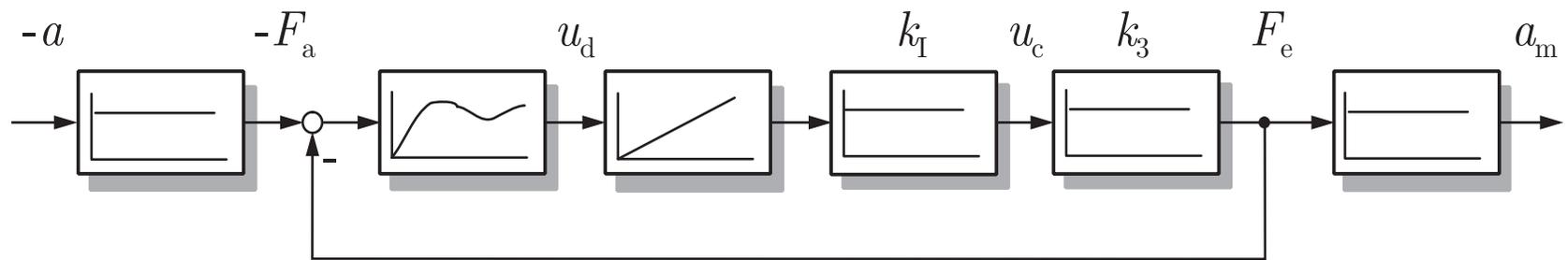


Abb. A.87. Umgezeichnetes Blockschaltbild des Sensors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

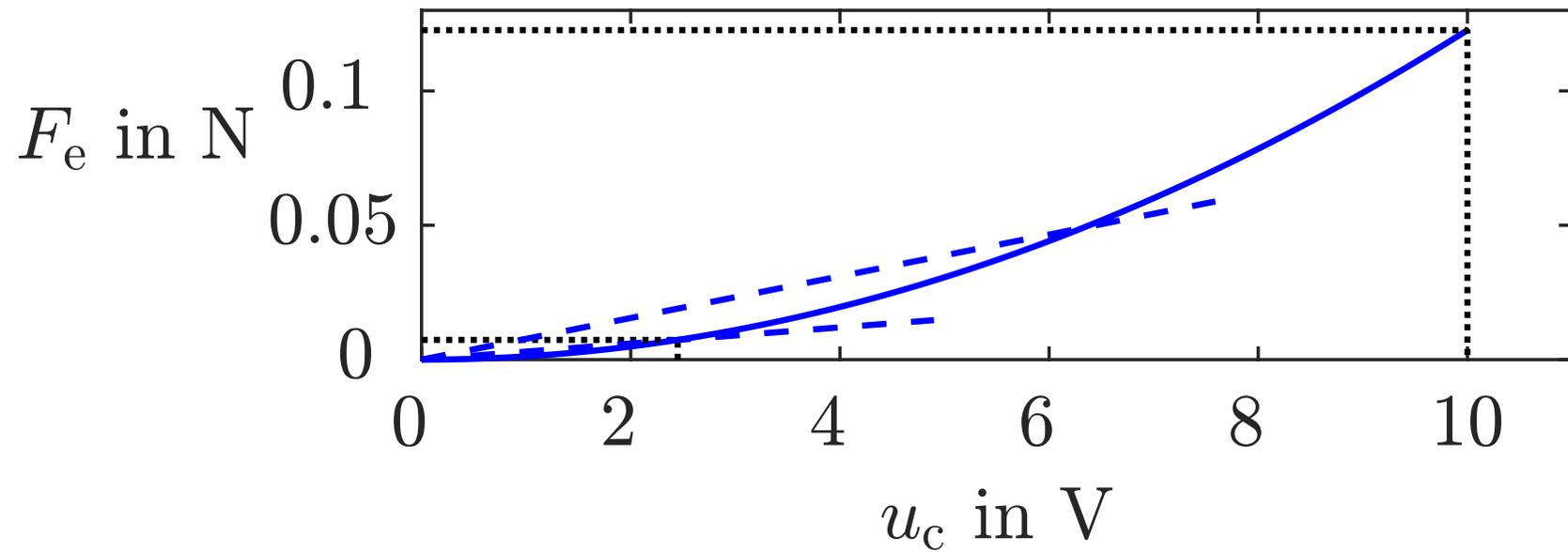


Abb. A.88. Linearisierung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen u_c und F_e

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

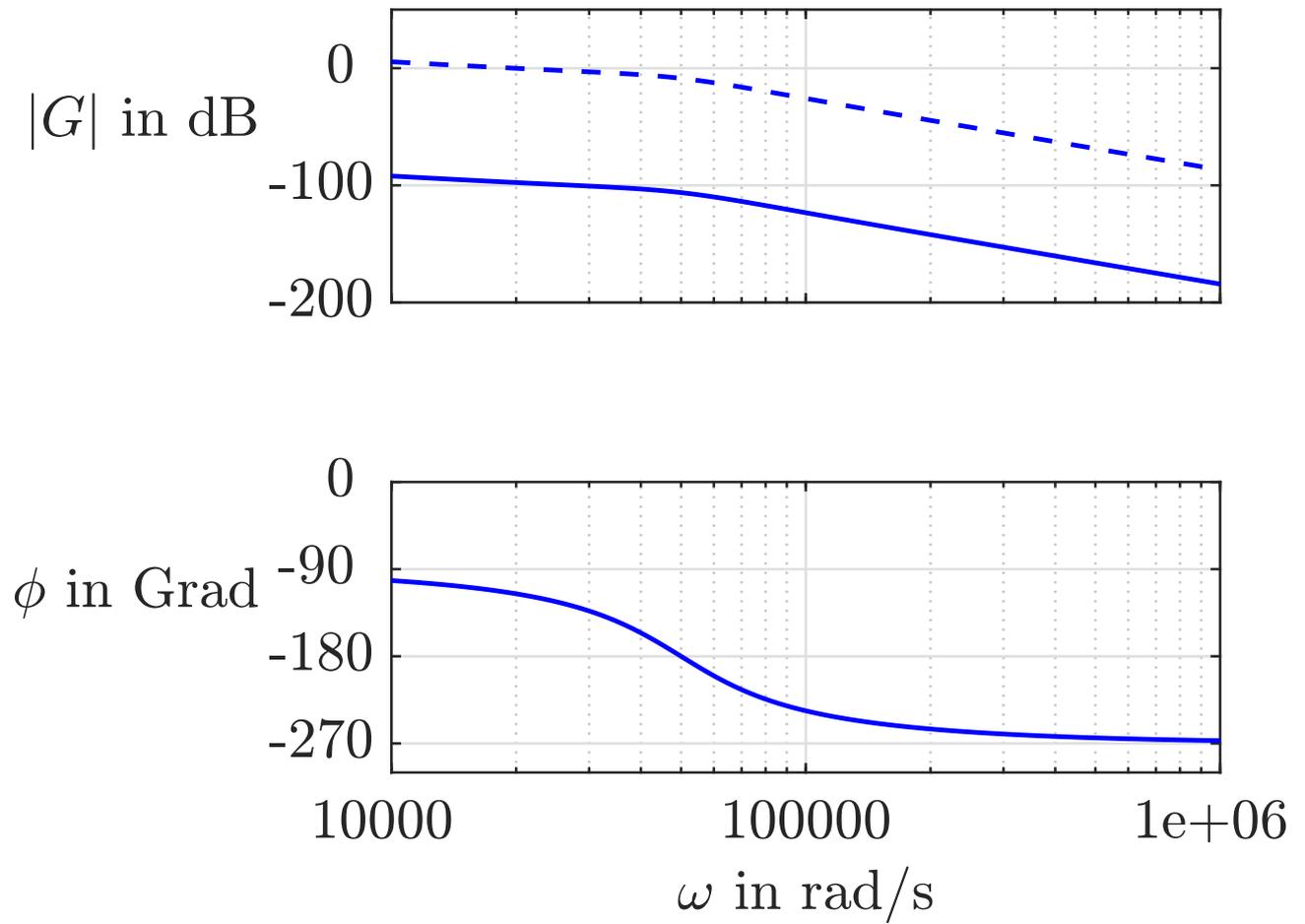


Abb. A.89: Frequenzkennlinien der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

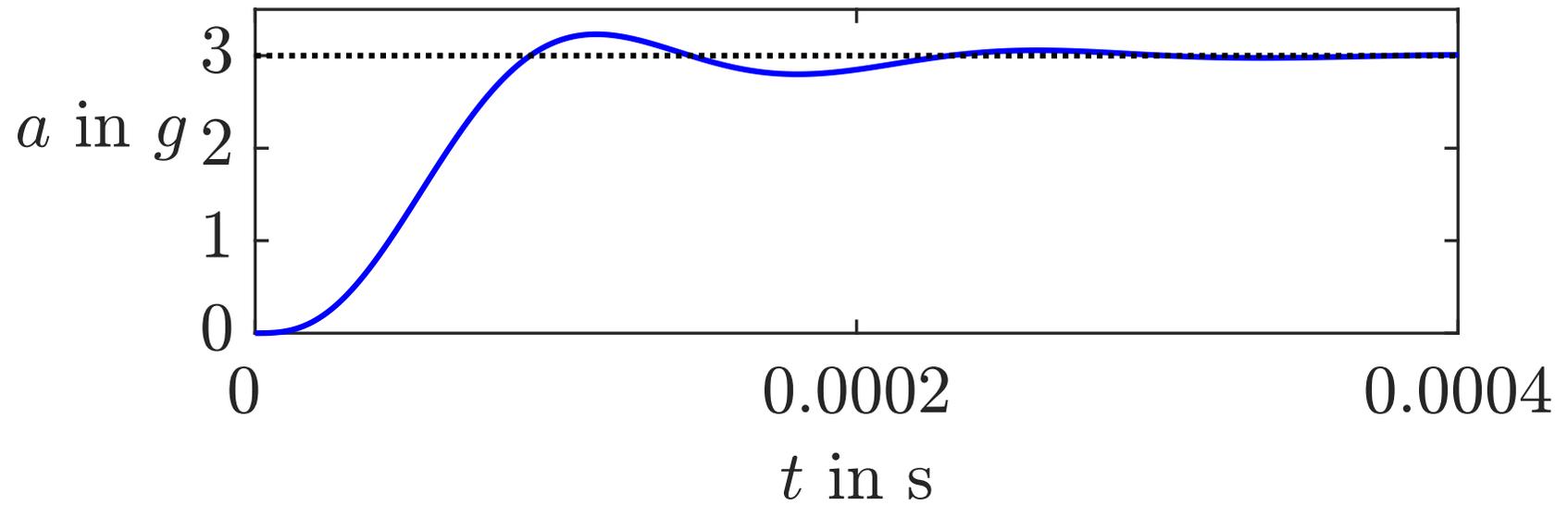


Abb. A.90. Messergebnis bei Beschleunigung $3g$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

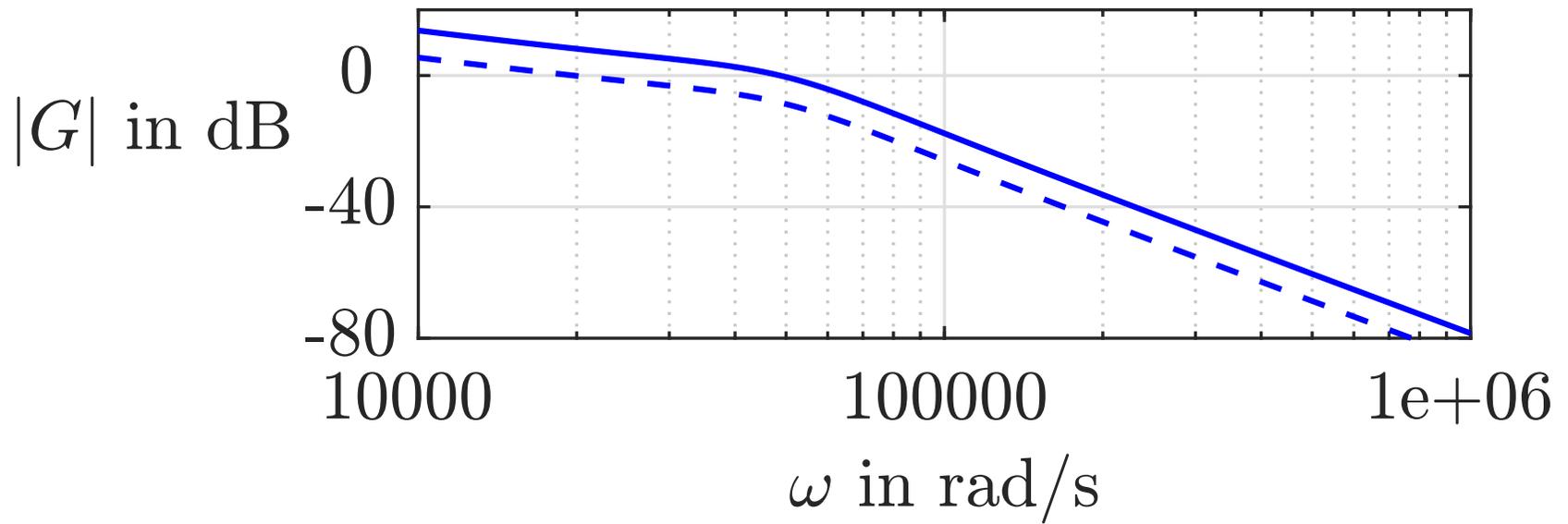


Abb. A.91. Verschiebung des Amplitudenganges der offenen Kette

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

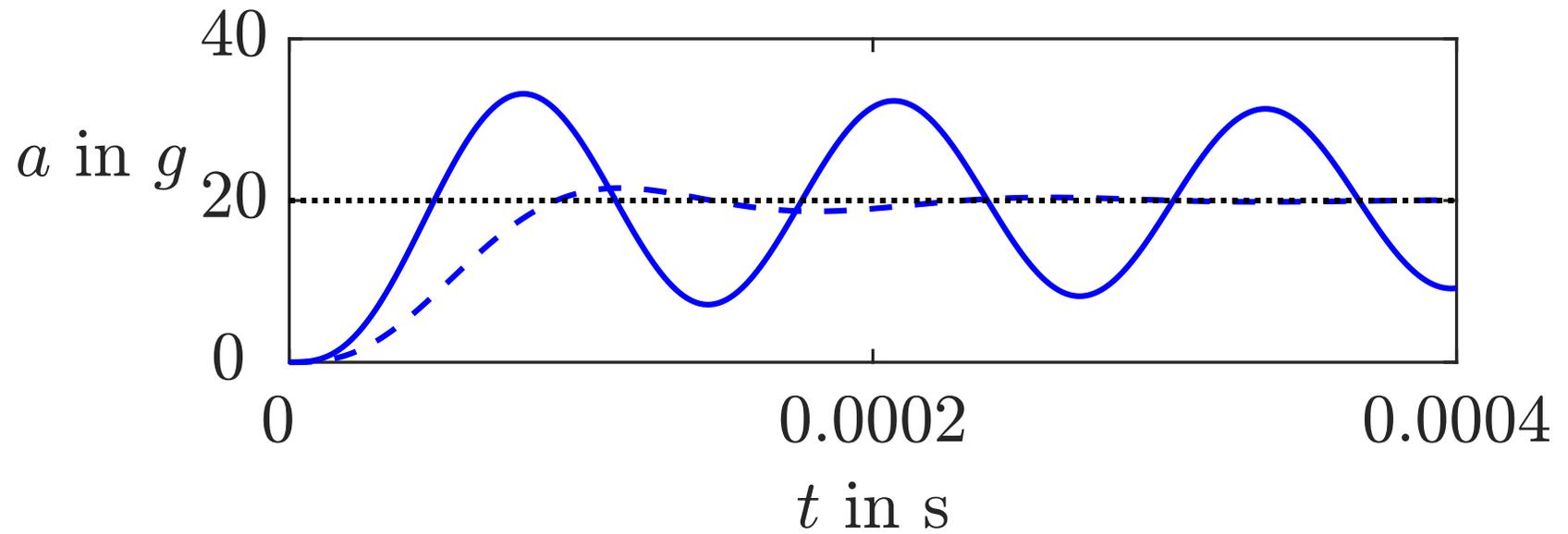


Abb. A.92. Messergebnis bei $a(t) = 20g\sigma(t)$

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

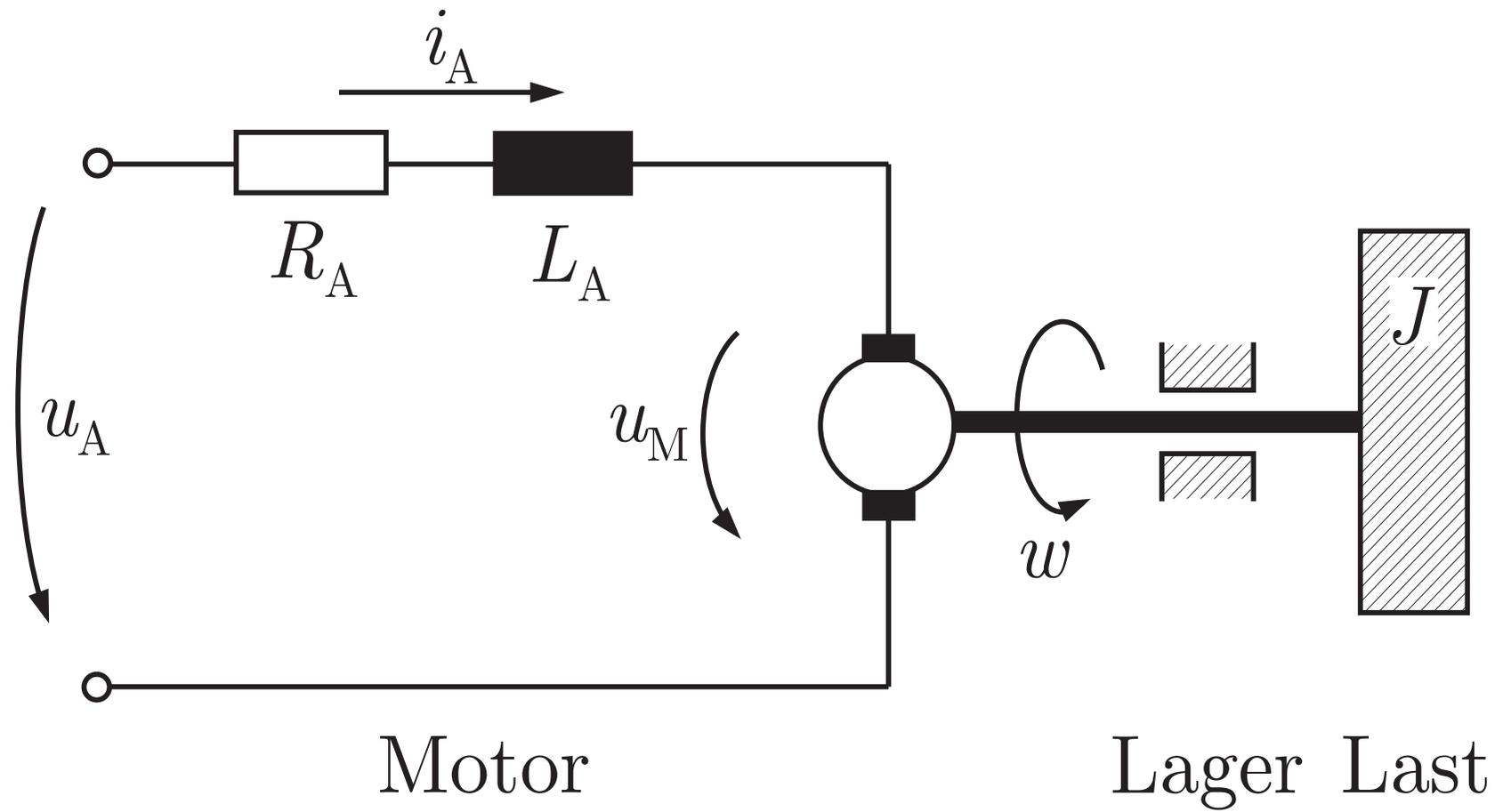


Abb. A4.1. Gleichstrommotor

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

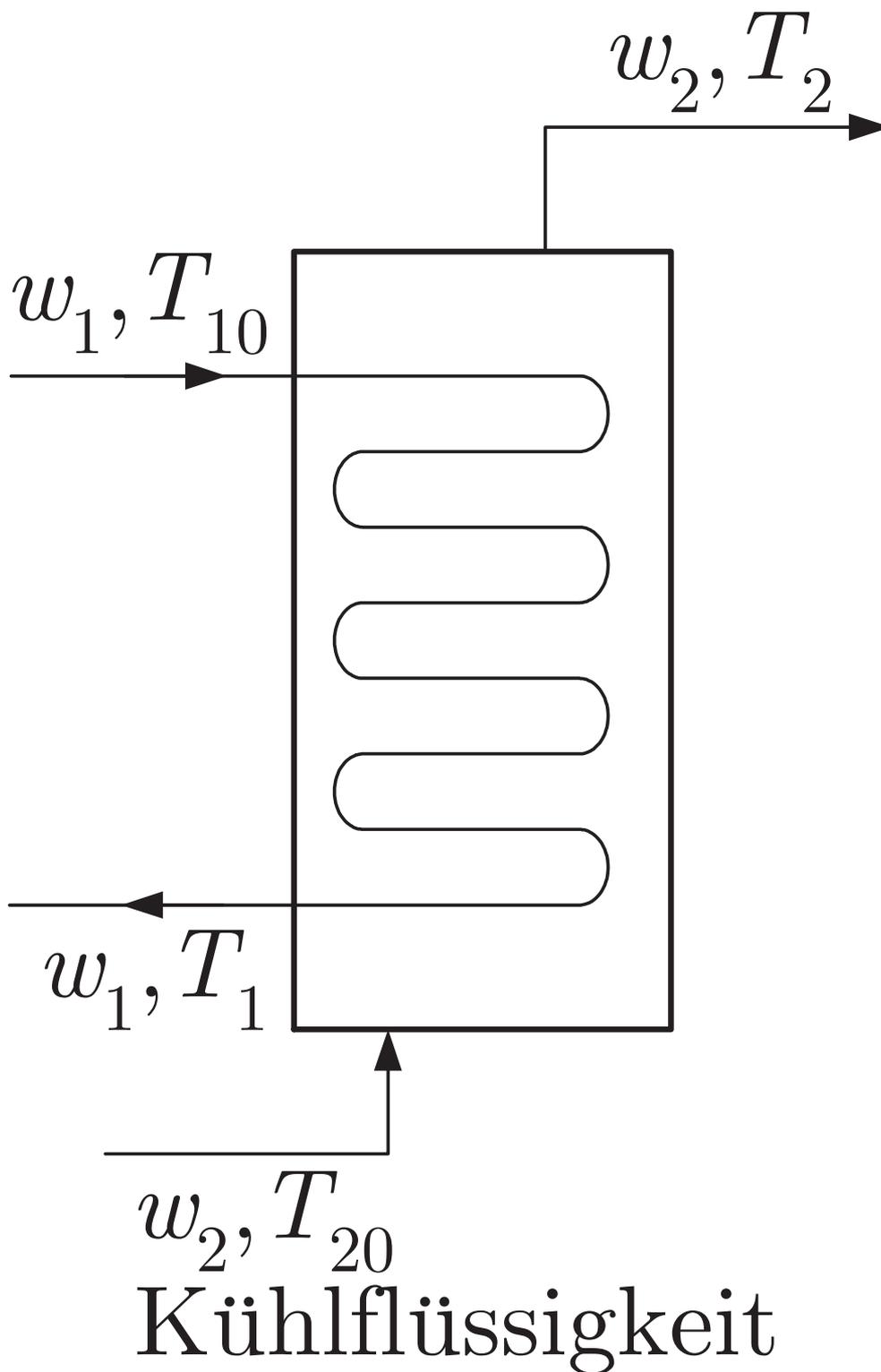


Abb. A4.2. Wärmeübertrager

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

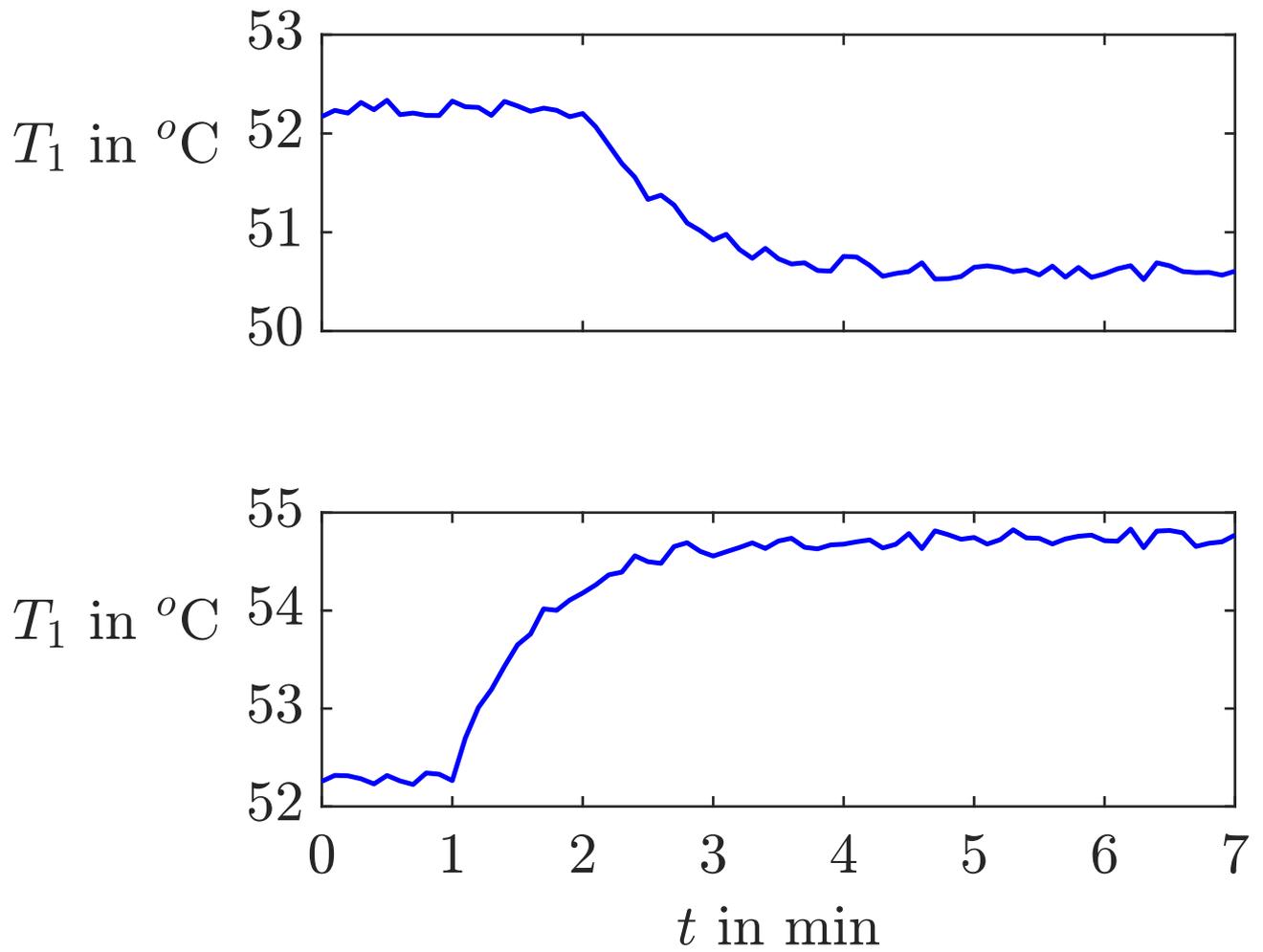


Abb. A4.3: Ergebnisse der zwei Experimente mit dem Wärmeübertragers

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

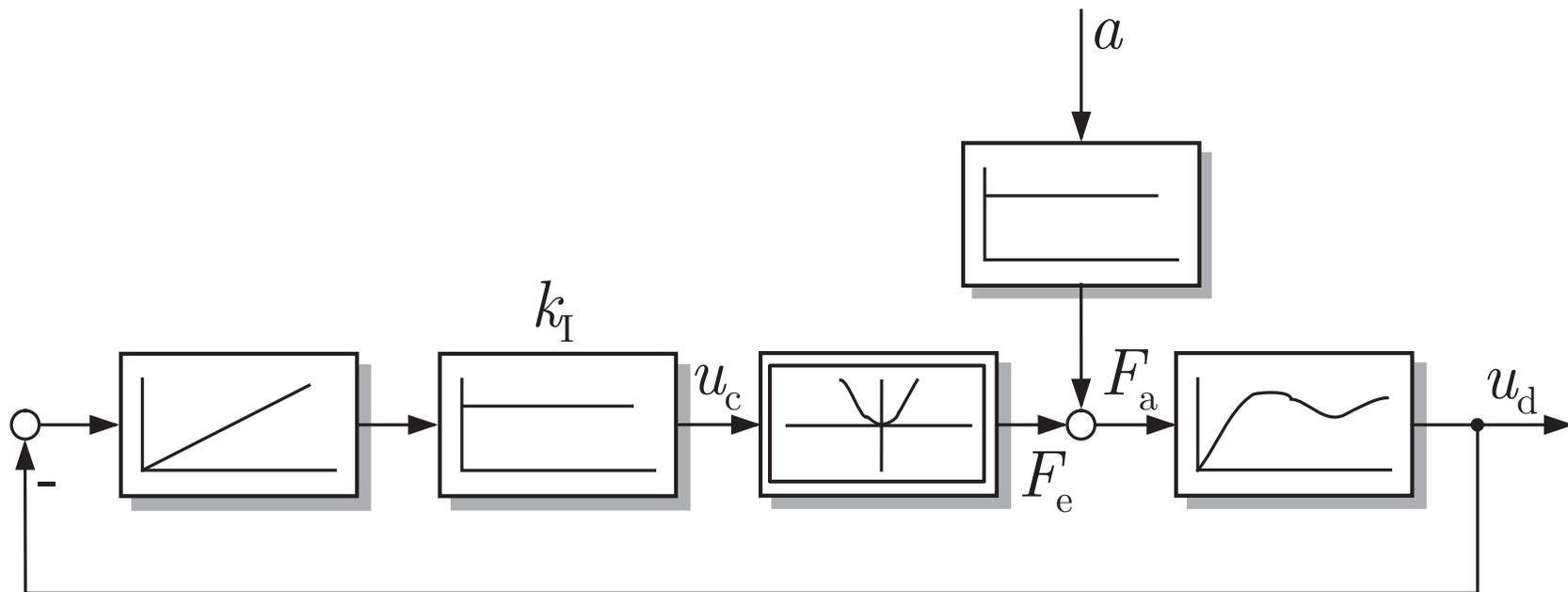


Abb. A4.4. Kompensationskreis des Airbag-Sensors

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

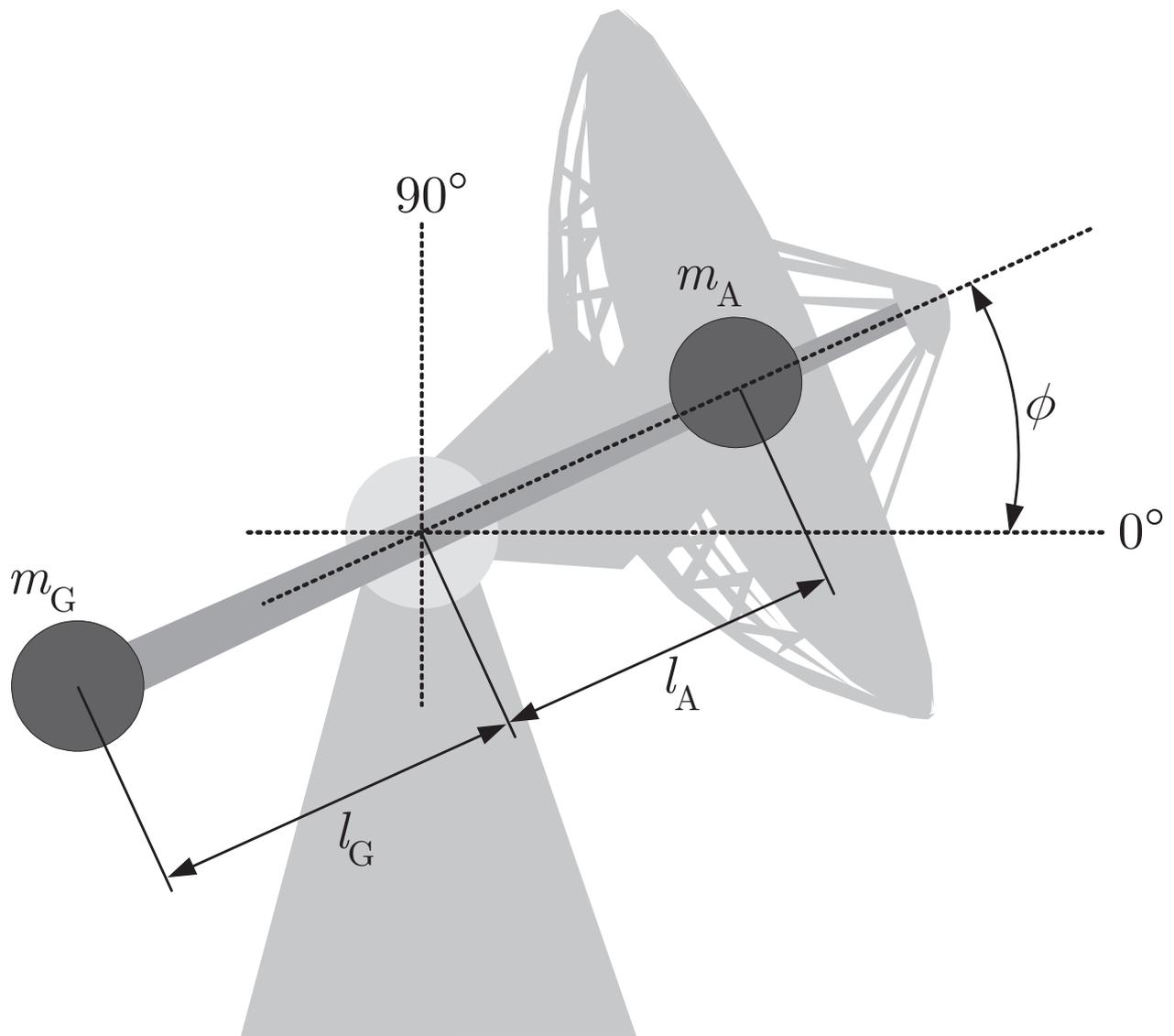


Abb. A4.5: Elevation der Antenne

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020

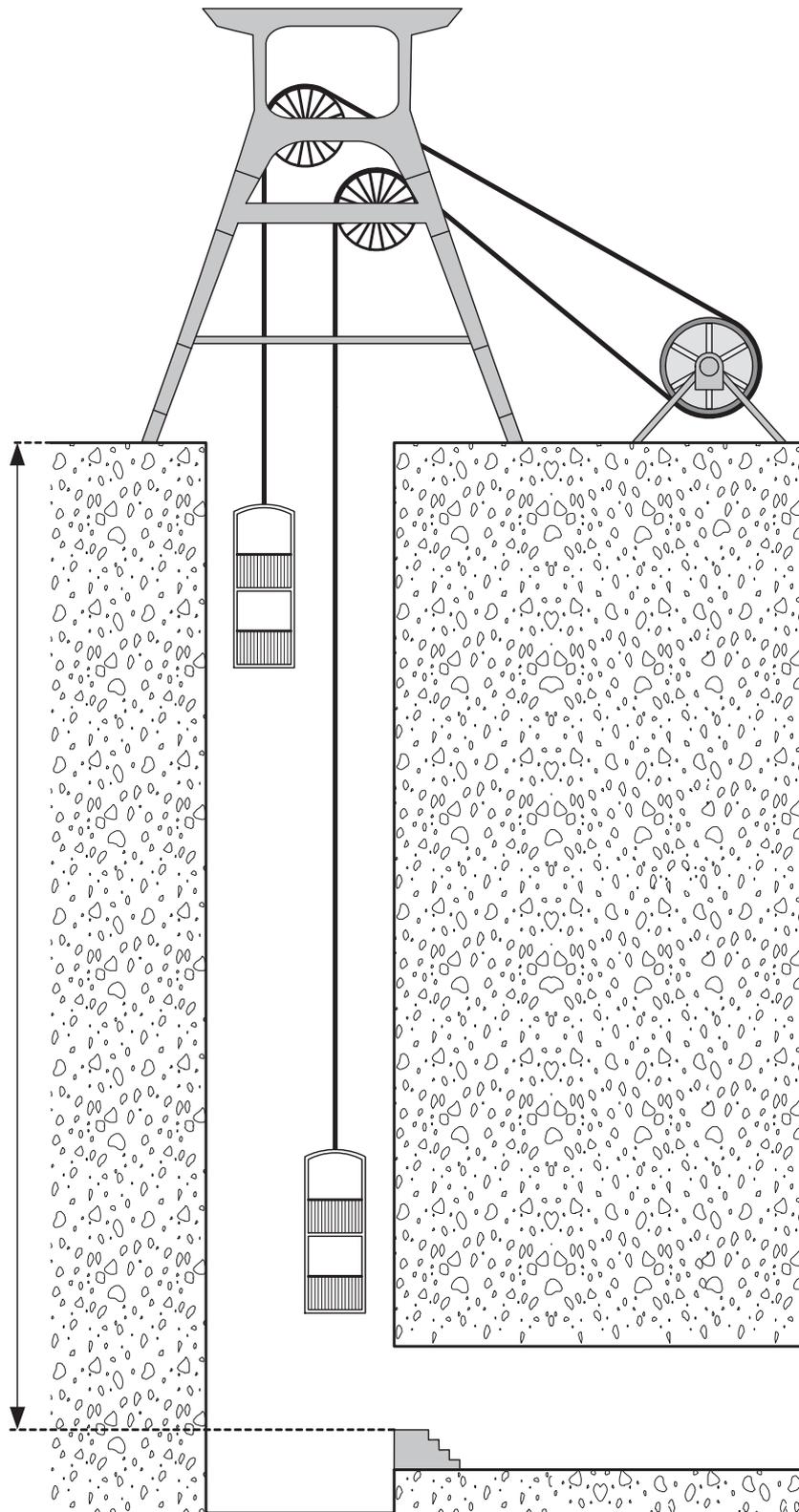


Abb. A4.6. Aufzug im Schacht Lohberg

J. Lunze: Regelungstechnik, Band 1, Springer-Verlag 2020