

Simulation technischer linearer und nichtlinearer Systeme mit MATLAB®/Simulink®

Josef Hoffmann / Franz Quint

ISBN: 978-3-11-034382-3

© 2014 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH

Abbildungsübersicht / List of Figures

Tabellenübersicht / List of Tables

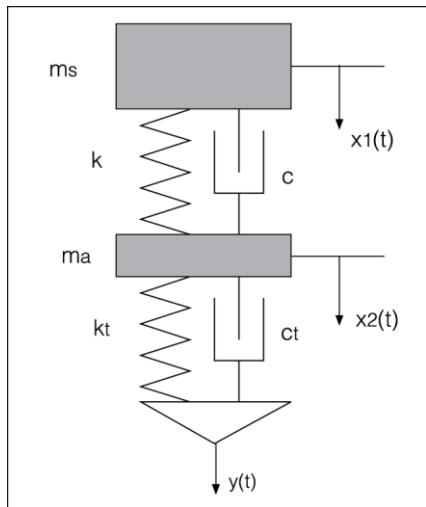


Abb. 1.1: Einfaches Modell einer Radaufhängung

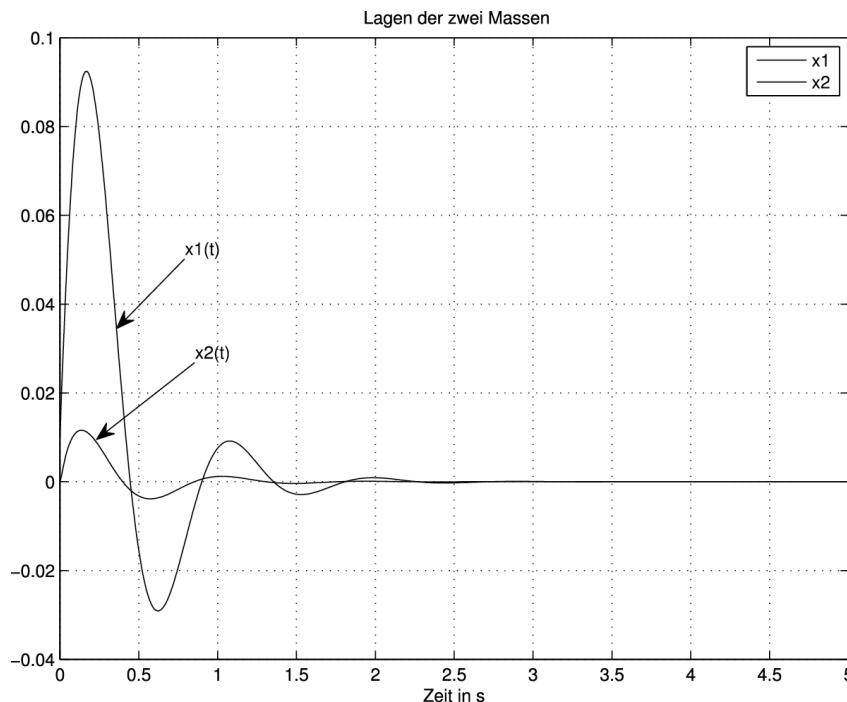


Abb. 1.2: Lagekoordinaten der Massen in der homogenen Lösung (rad_aufhaeng_1.m)

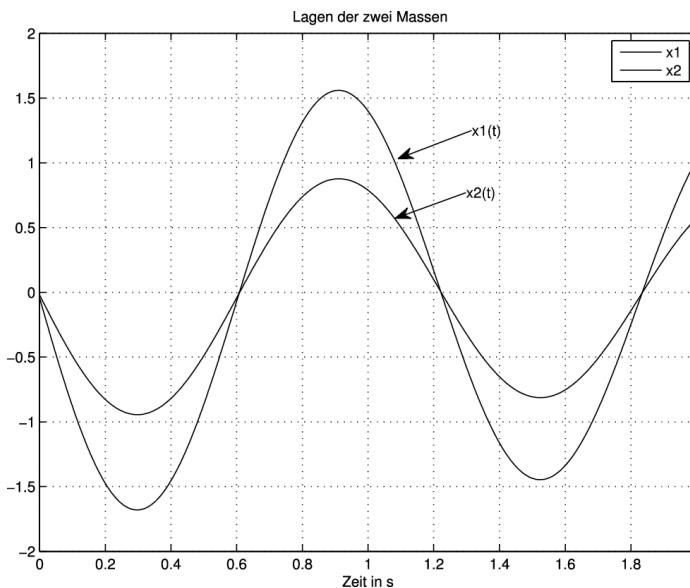


Abb. 1.3: Lagekoordinaten der Massen für die kleinere Eigenfrequenz (rad_aufhaeng_2.m)

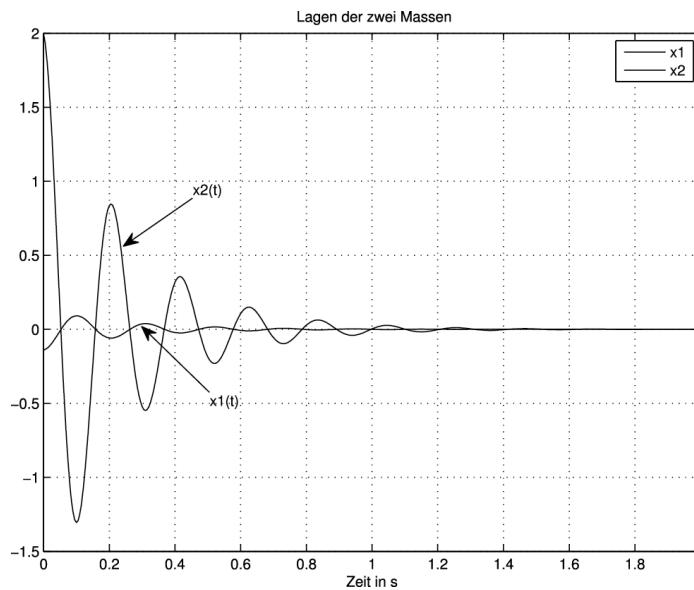


Abb. 1.4: Lagekoordinate der Massen für die größere Eigenfrequenz (rad_aufhaeng_2.m)

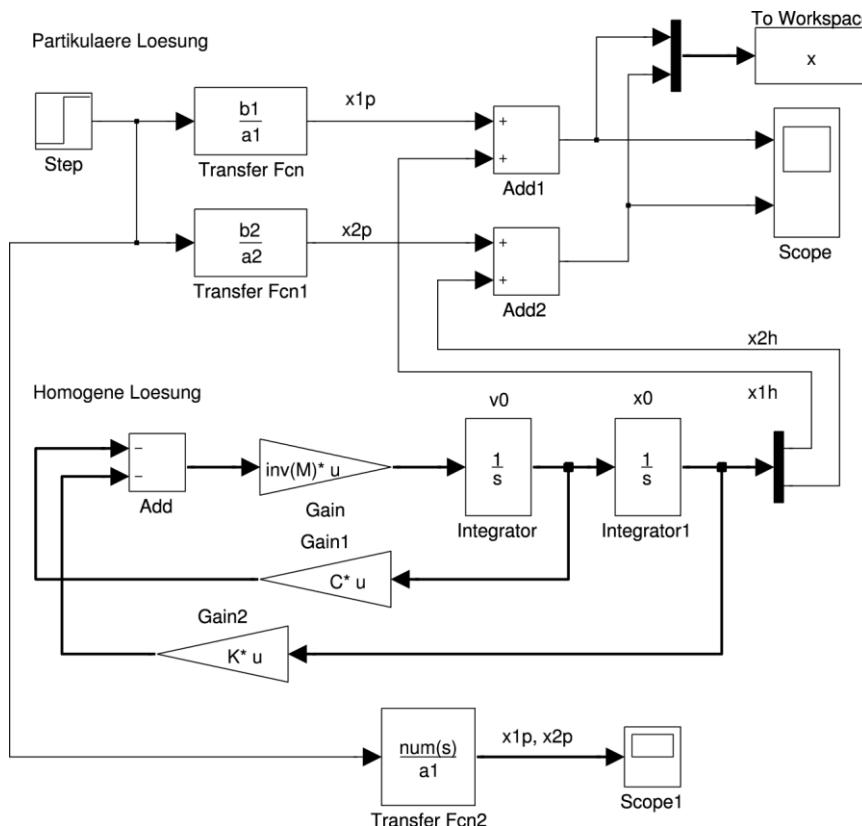


Abb. 1.5: Simulink-Modell zur Bestimmung der allgemeinen Lösung (rad_aufhaeng_3.m, rad_aufhaeng3.mdl)

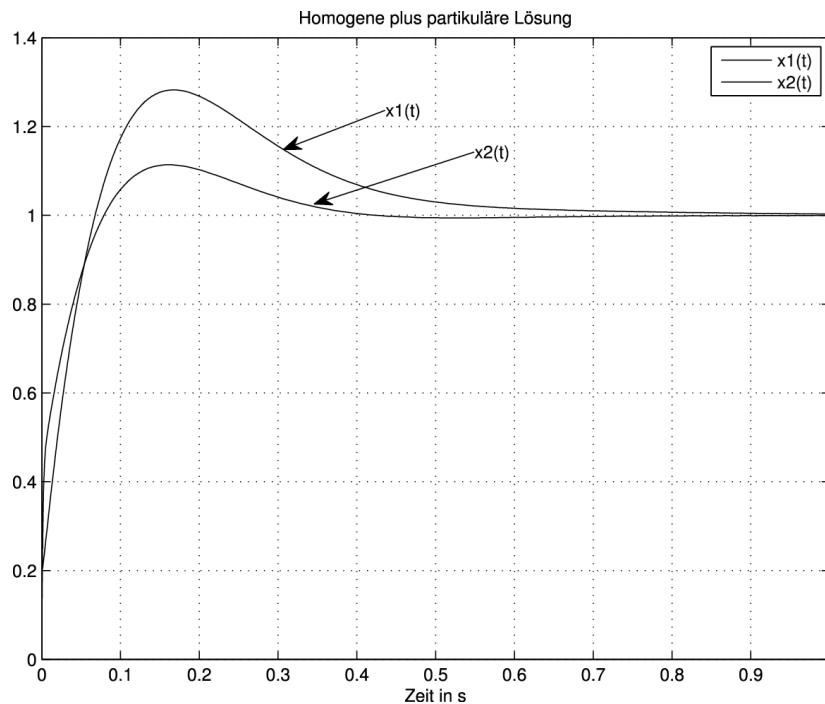


Abb. 1.6: Allgemeine Lösungen für die Lagekoordinaten der Massen (rad_aufhaeng_3.m, rad_aufhaeng3.mdl)

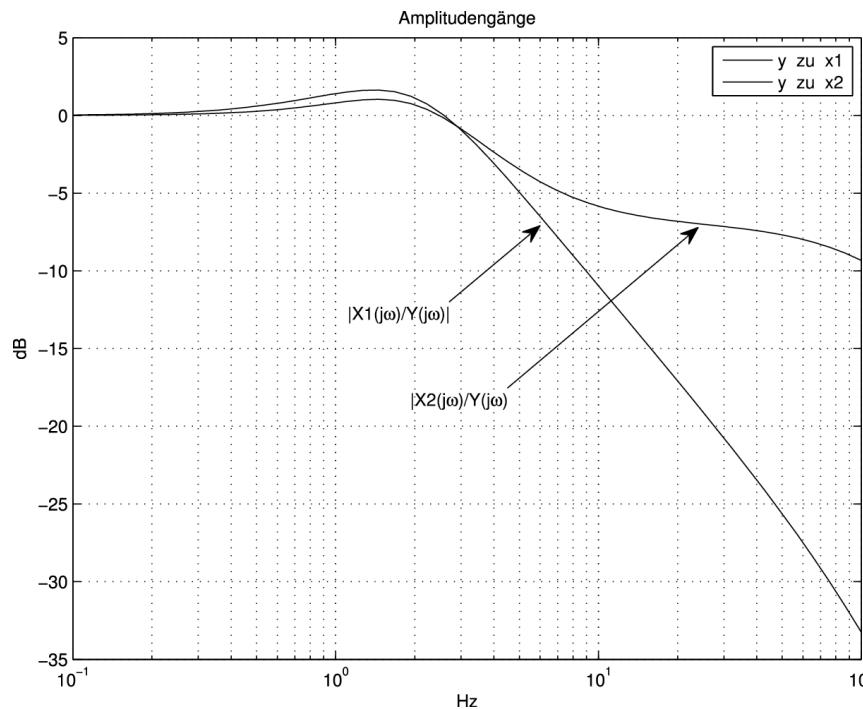


Abb. 1.7: Amplitudengänge der Übertragungsfunktionen (rad_aufhaeng_3.m, rad_aufhaeng3.mdl)

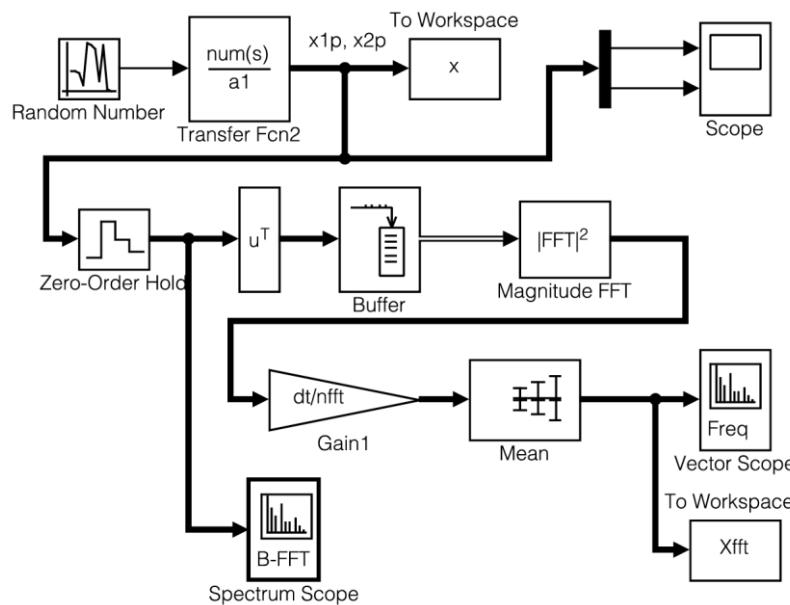


Abb. 1.8: Simulink-Modell der Untersuchung mit Zufallsanregung (rad_aufhaeng_4.m, rad_aufhaeng4.mdl)

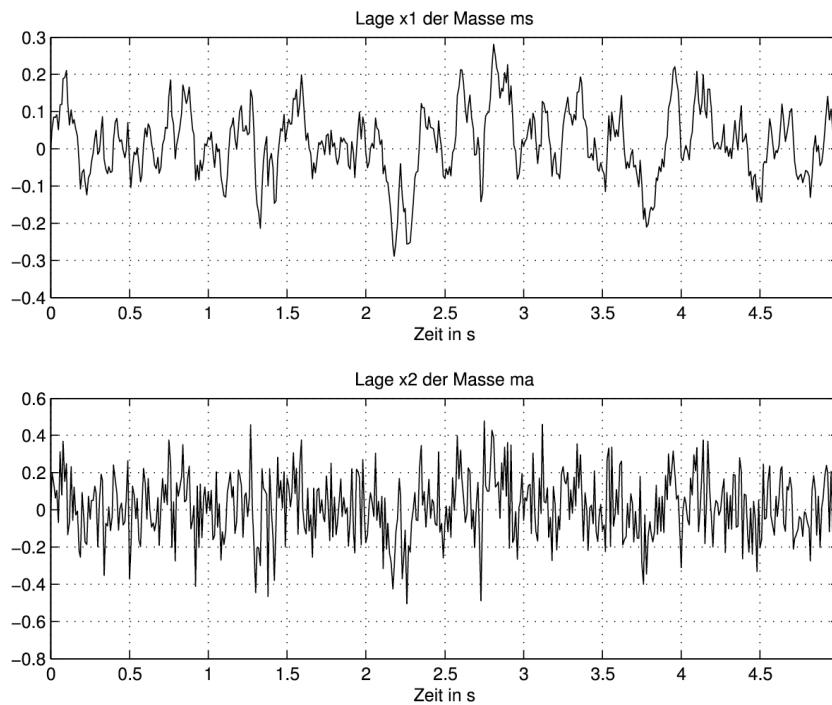


Abb. 1.9: Lagekoordinaten $x_1(t)$ und $x_2(t)$ der Massen für zufälliger Anregung mit unkorrelierter Sequenz
(rad_aufhaeng_4.m, rad_aufhaeng4.mdl)

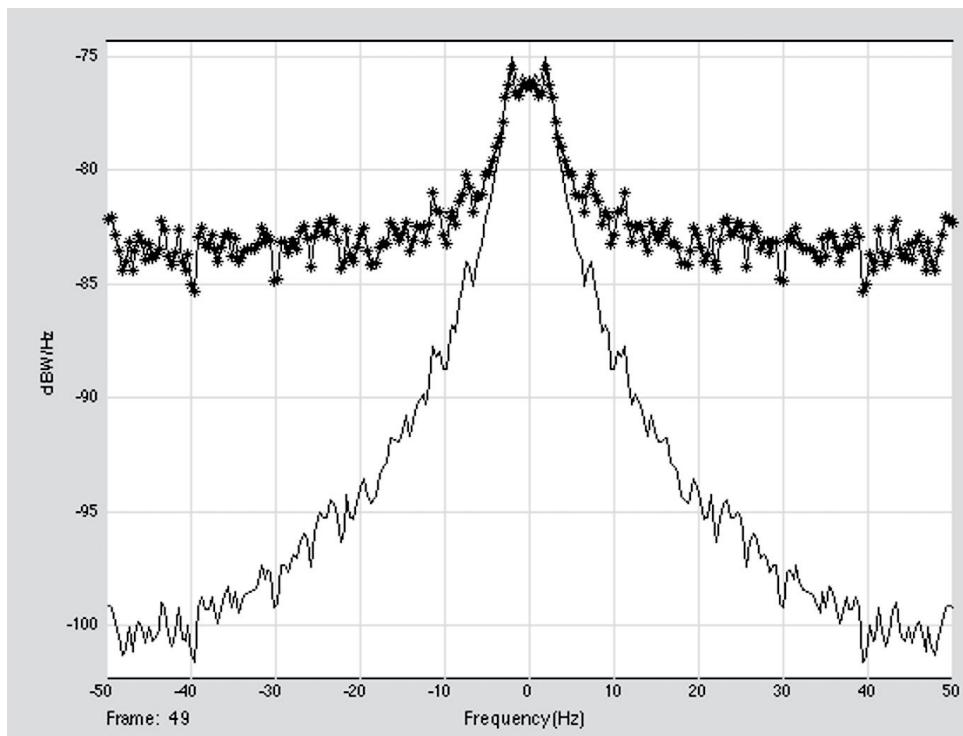


Abb. 1.10: Spektrale Leistungsdichten vom Spectrum-Scope (rad_aufhaeng_4.m, rad_aufhaeng4.mdl)

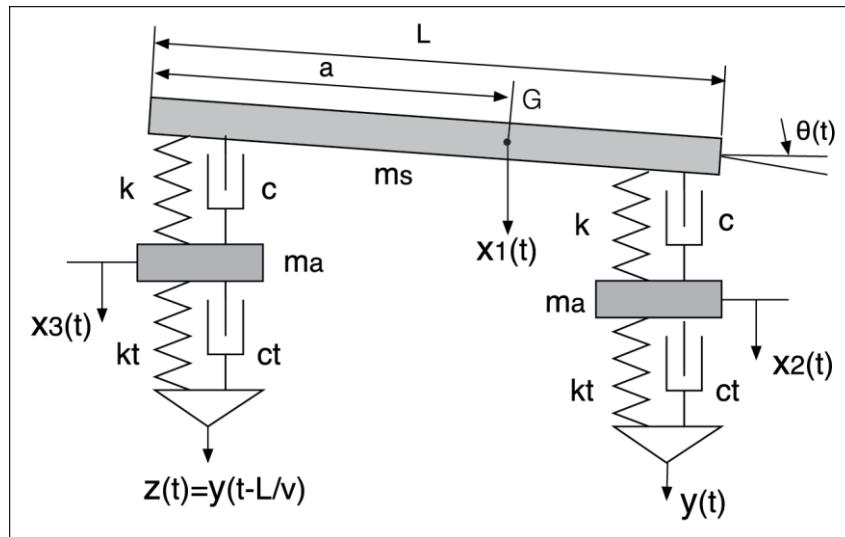


Abb. 1.11: Radaufhängung mit zwei Rädern

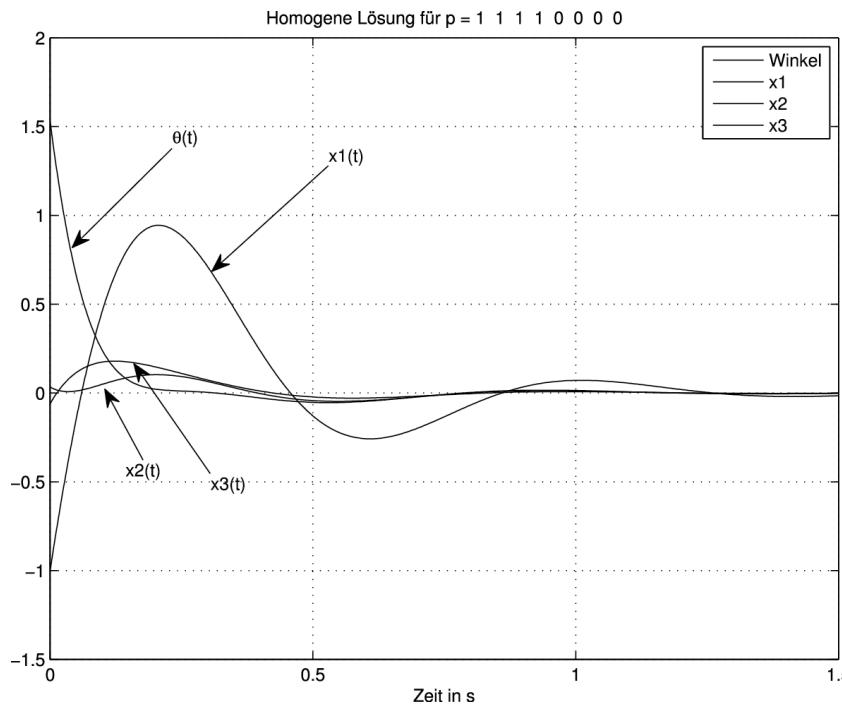


Abb. 1.12: Homogene Lösung (suspension_2.m, suspension2.mdl)

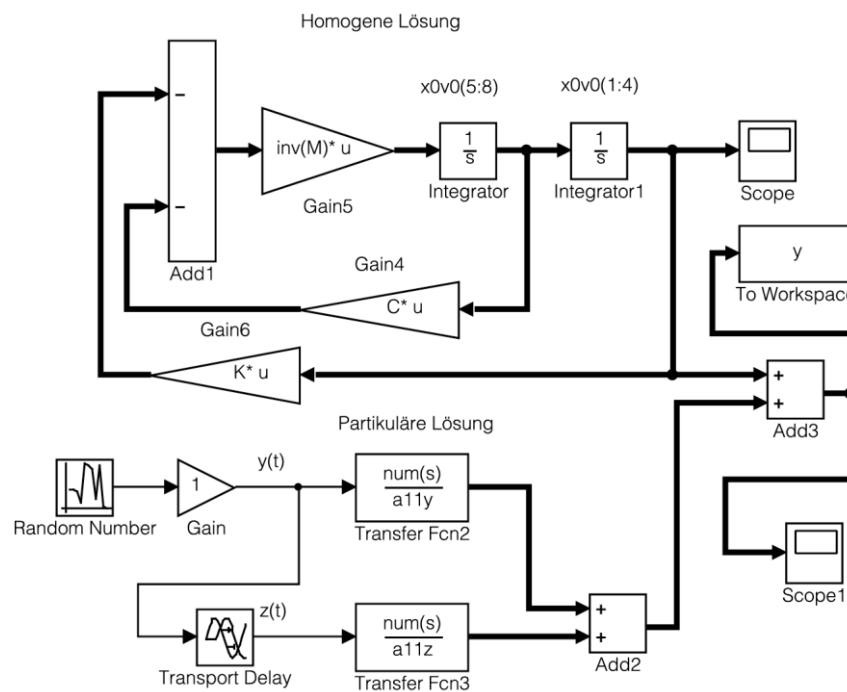


Abb. 1.13: Simulink-Modell der Untersuchung der Aufhängung mit zwei Achsen (suspension_2.m, suspension2.mdl)

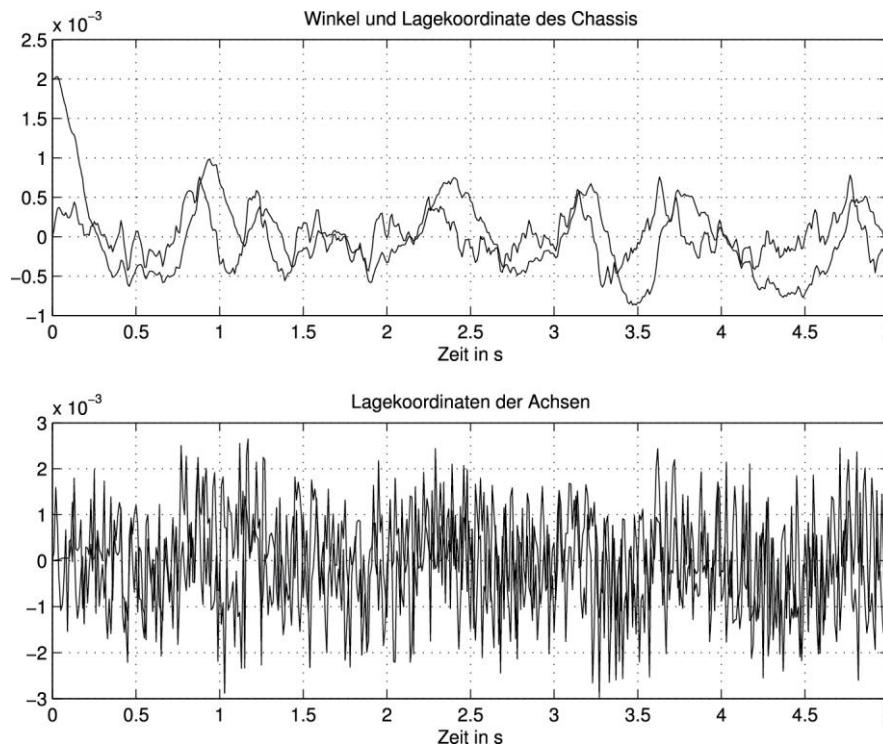


Abb. 1.14: a) Gesamtlösung mit den Variablen $\theta(t)$ und $x_1(t)$ b) mit den Variablen $x_2(t)$ und $x_3(t)$
(suspension_2.m, suspension2.mdl)

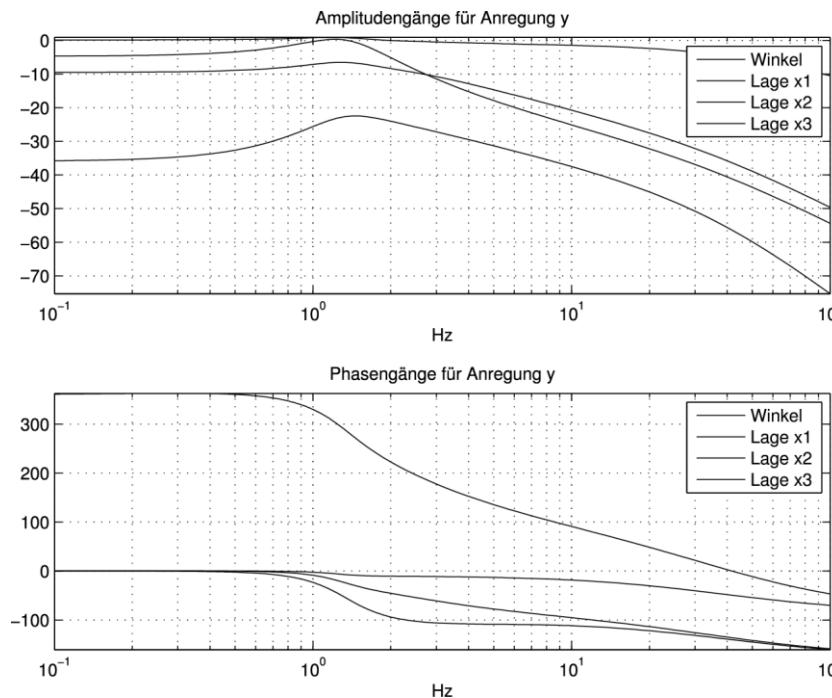


Abb. 1.15: Frequenzgänge von der Anregung $y(t)$ bis zu den Variablen des Systems (suspension_2.m, suspension2.mdl)

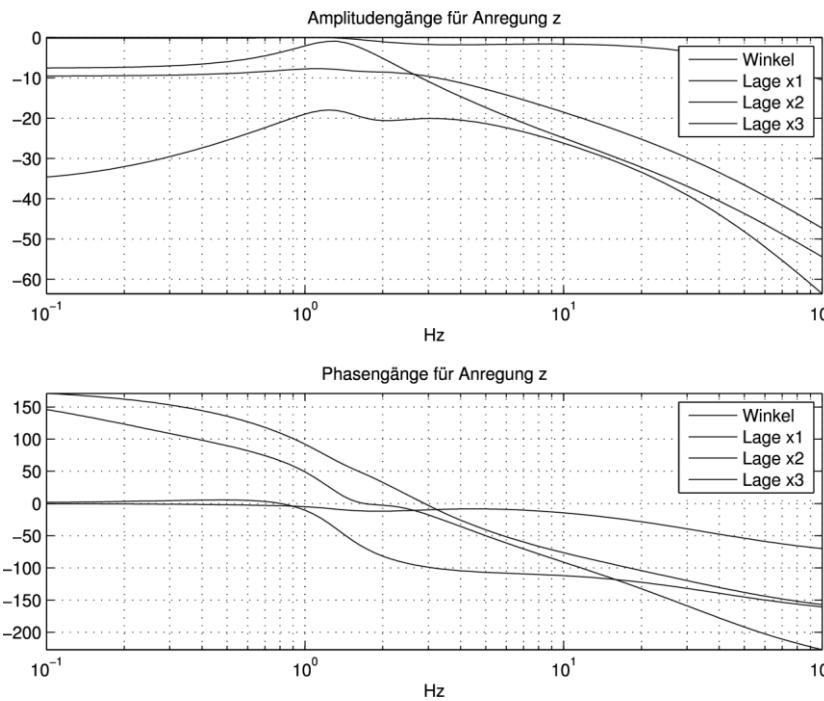


Abb. 1.16: Frequenzgänge von der Anregung $z(t)$ bis zu den Variablen des Systems (suspension_2.m, suspension2.mdl)

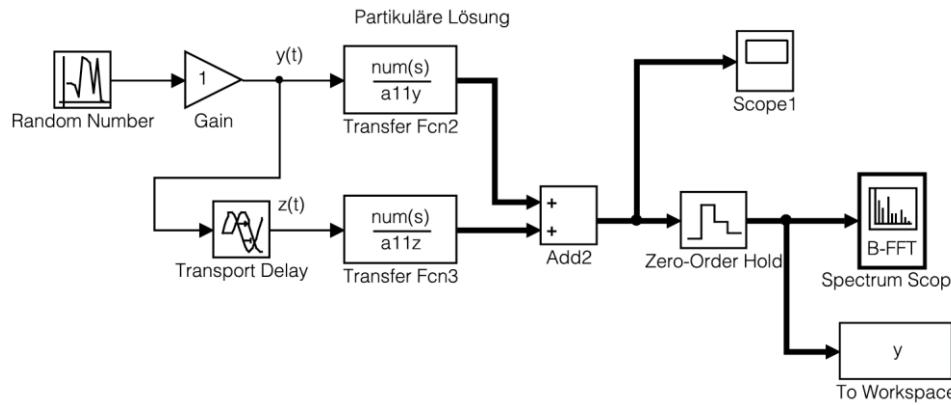


Abb. 1.17: Simulink-Modell der Untersuchung der spektralen Leistungsdichten (suspension_3.m, suspension3.mdl)

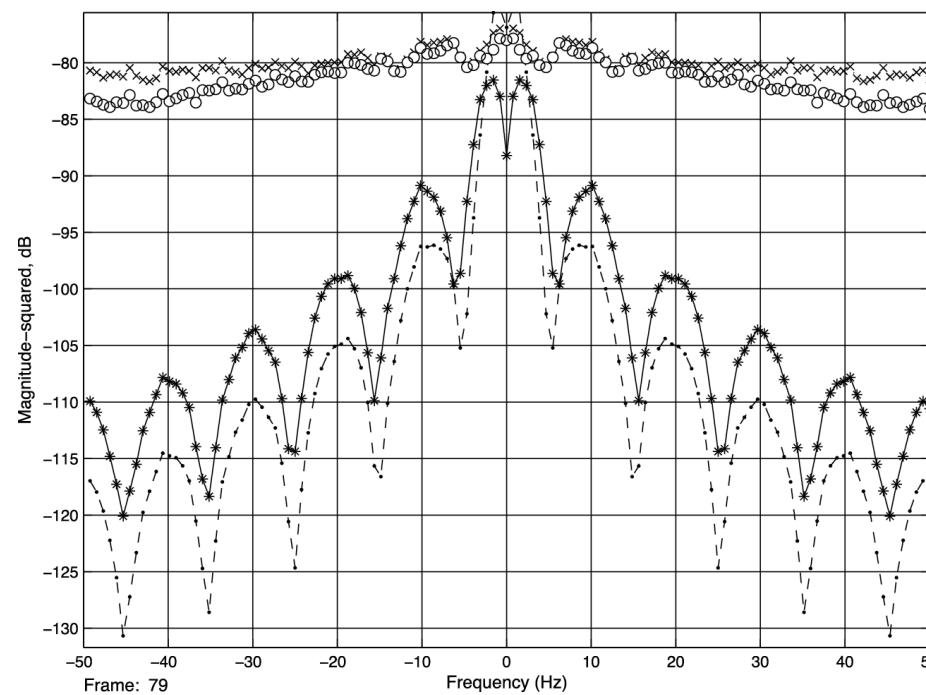


Abb. 1.18: Spektrale Leistungsdichten vom *Spectrum Scope* (suspension_3.m, suspension3.mdl)

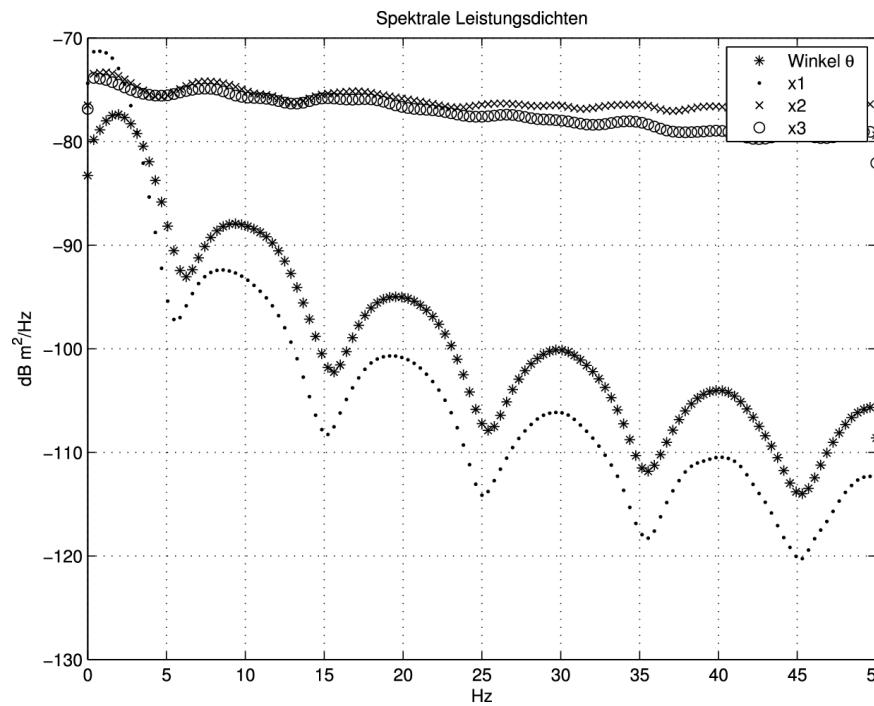


Abb. 1.19: Berechnete spektrale Leistungsdichten (suspension_3.m, suspension3.mdl)

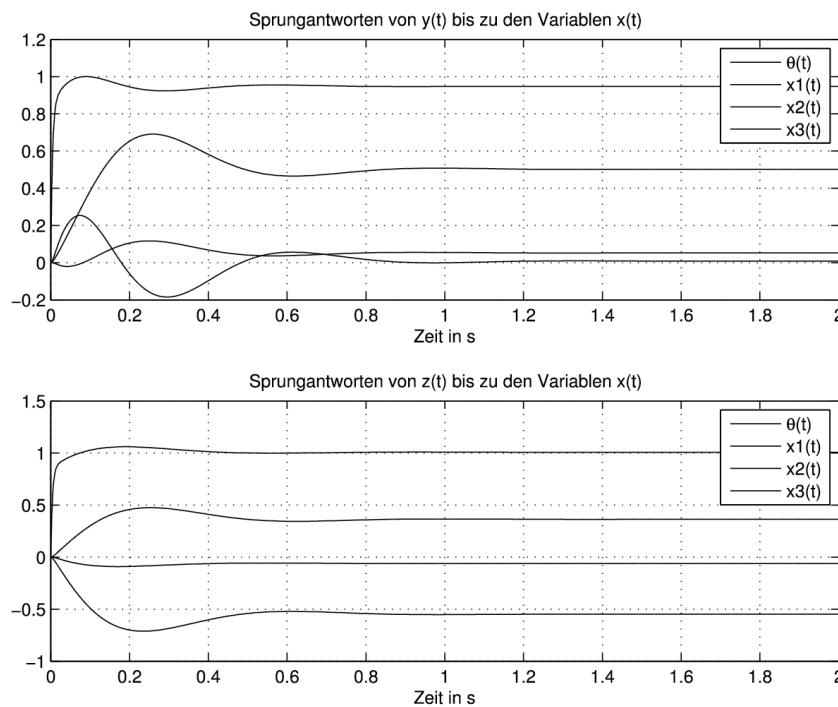


Abb. 1.20: a) Sprungantworten vom Eingang $y(t)$ b) Sprungantworten vom Eingang $z(t)$ (suspension_4.m)

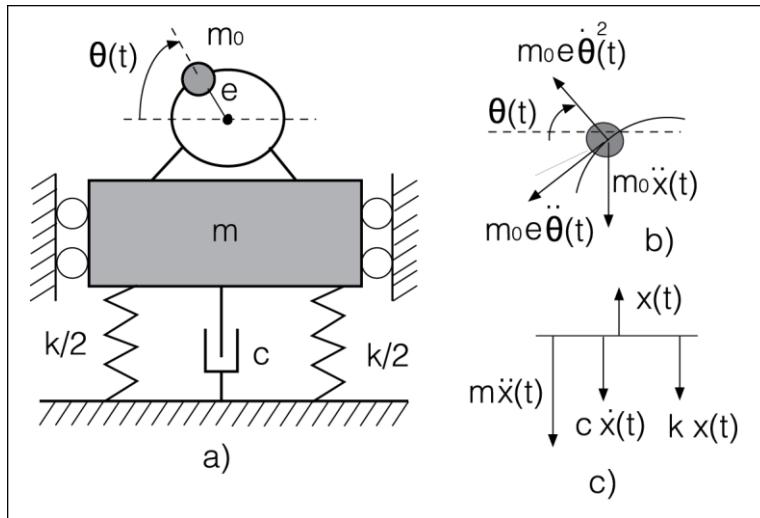


Abb. 1.21: a) Feder-Masse-System mit Unwuchtanregung b) Kräfte die auf die Unwuchtmasse wirken c) Kräfte die auf die Hauptmasse wirken

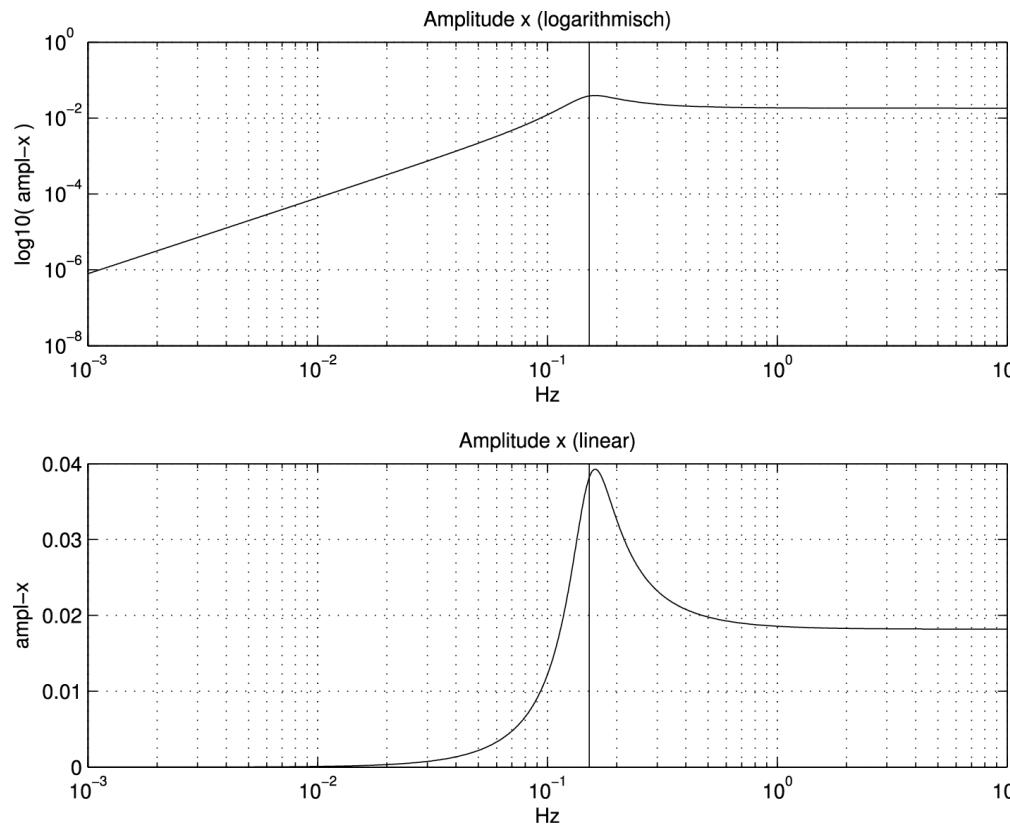


Abb. 1.22: Amplitude der Bewegung abhängig von ω (unwucht_1.m)

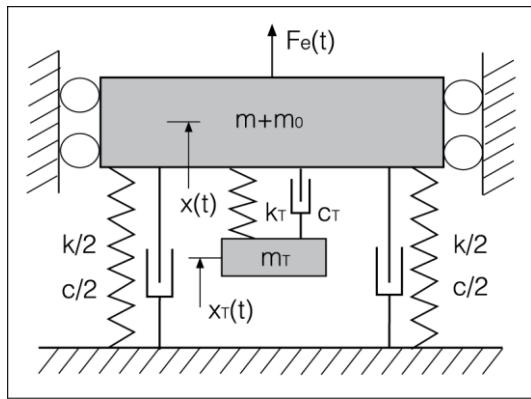


Abb. 1.23: Das System mit der Unwuchtkraft und mit Tilger

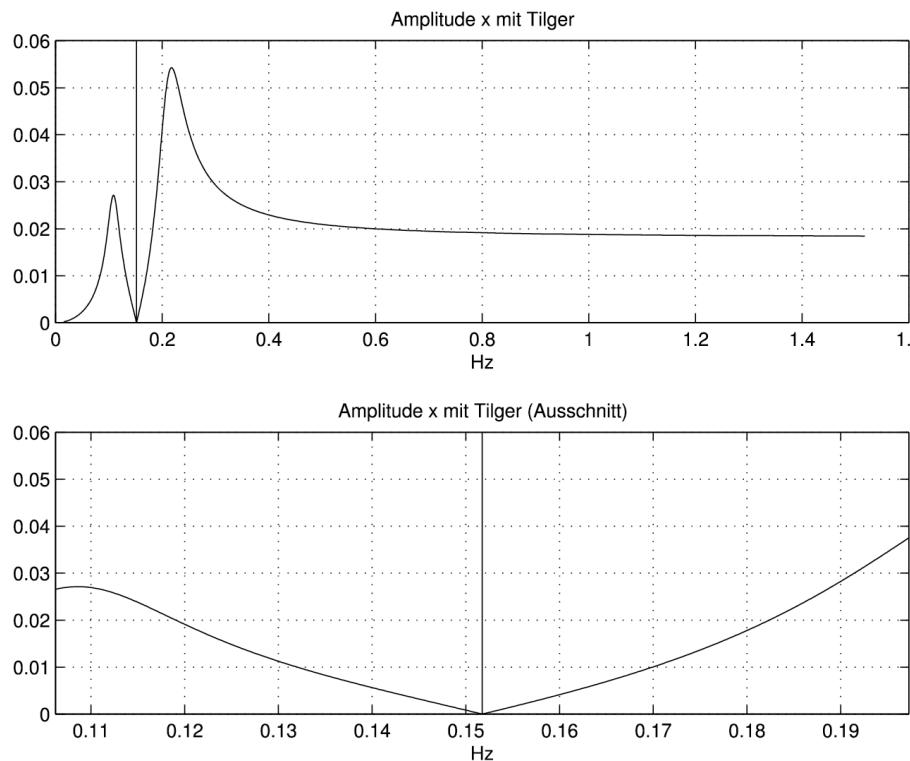


Abb. 1.24: Amplitude der Hauptmasse mit Tilger abhängig von ω (unwucht_2.m)

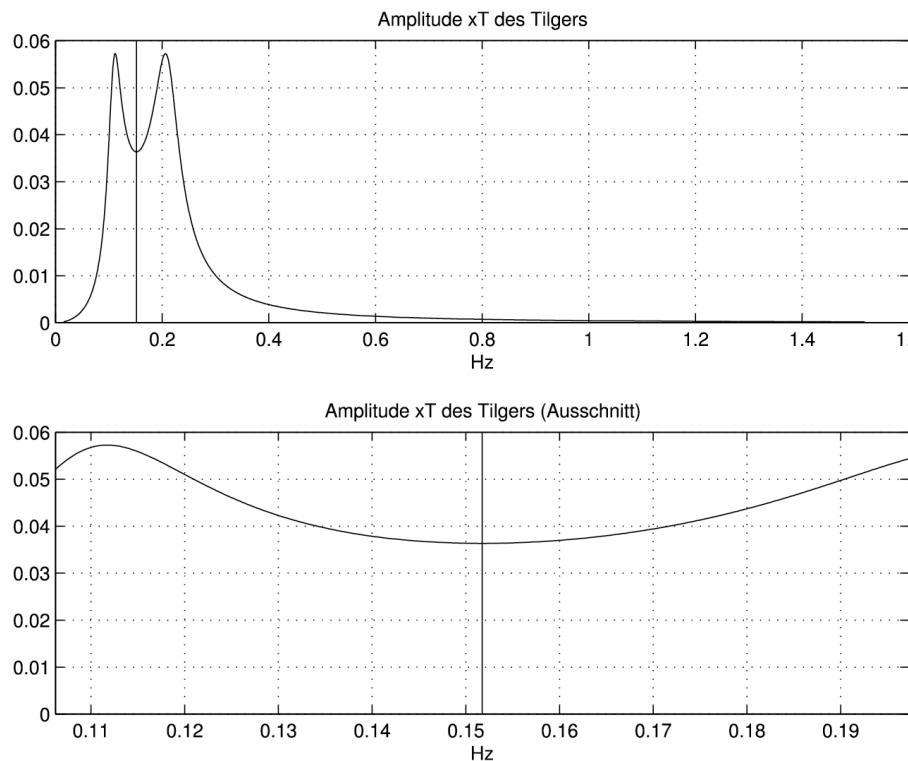


Abb. 1.25: Amplitude der Masse des Tilgers abhängig von ω (unwucht 2.m)

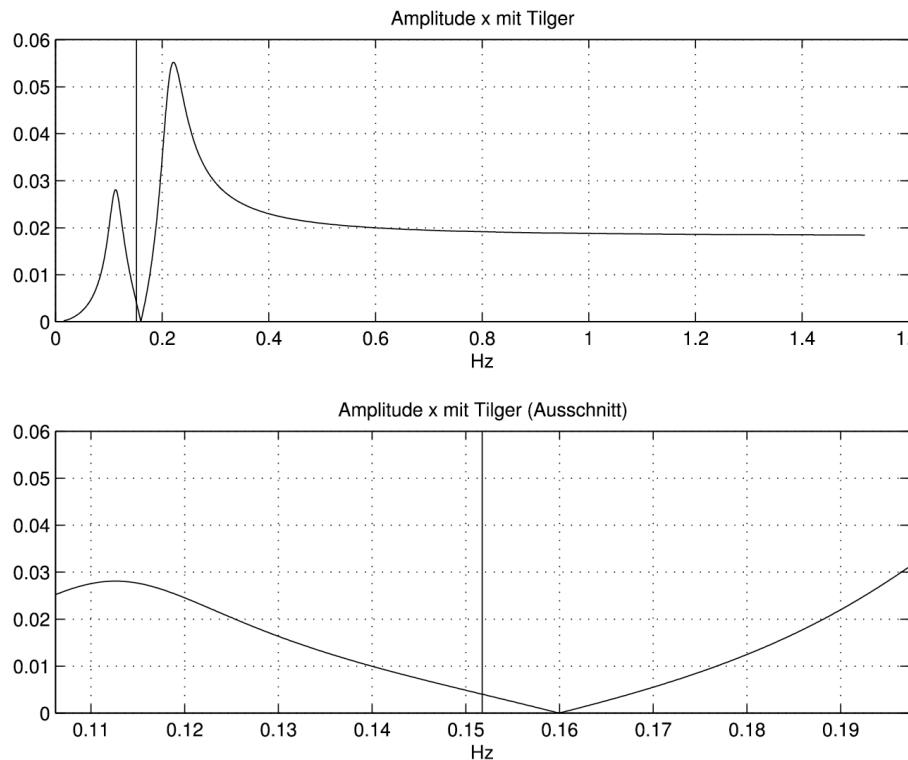


Abb. 1.26: Amplitude der Hauptmasse mit Tilger abhängig von ω , wenn die Anpassung der Tilgerfrequenz nicht genau ist (unwucht_2.m)

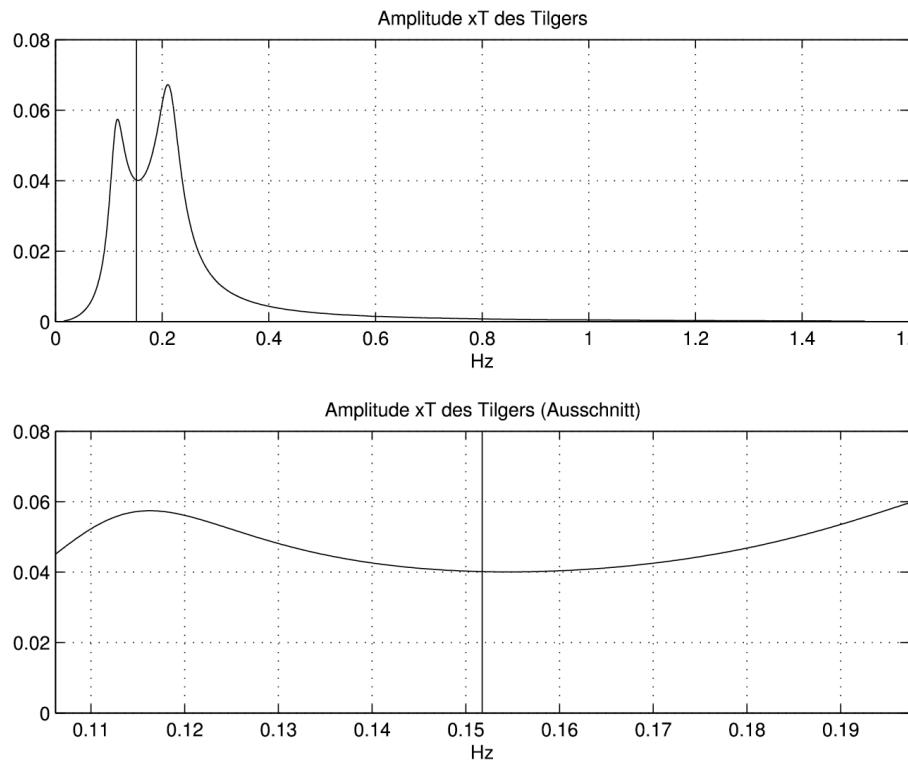


Abb. 1.27: Amplitude der Masse des Tilgers abhängig von ω , wenn die Anpassung der Tilgerfrequenz nicht genau ist (unwucht_2.m)

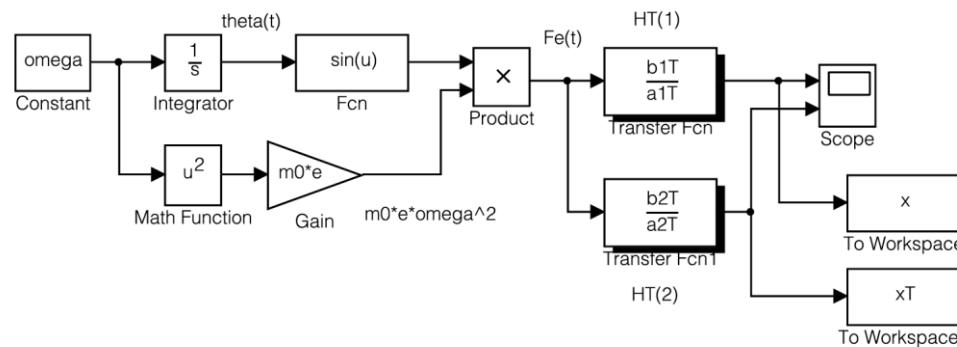


Abb. 1.28: Simulink-Modell des Feder-Masse-Systems mit Tilger (unwucht_3.m)

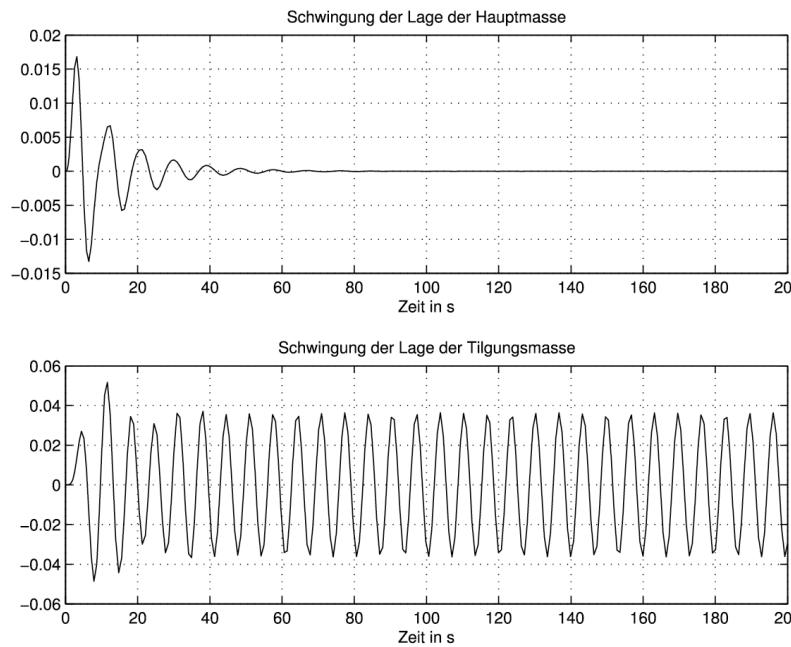


Abb. 1.29: Schwingung der Hauptmasse und der Tilgungsmasse bei angepasster Tilgereigenfrequenz (unwucht_3.m)

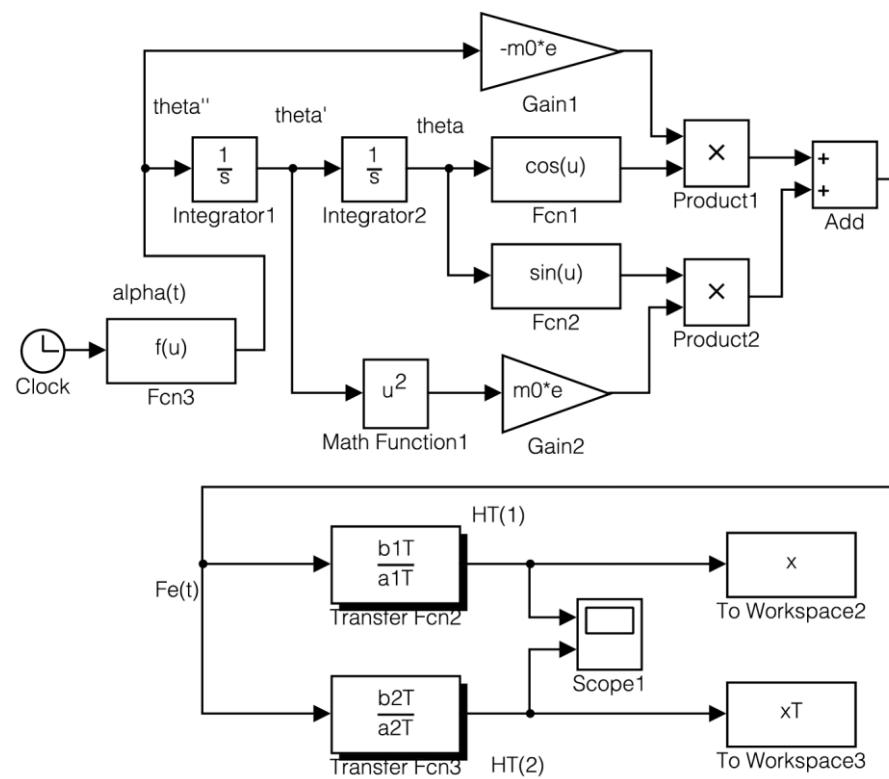


Abb. 1.30: Simulink-Modell der Untersuchung des Anlaufs des Systems mit Unwucht (unwucht_4.m, unwucht4.mdl)

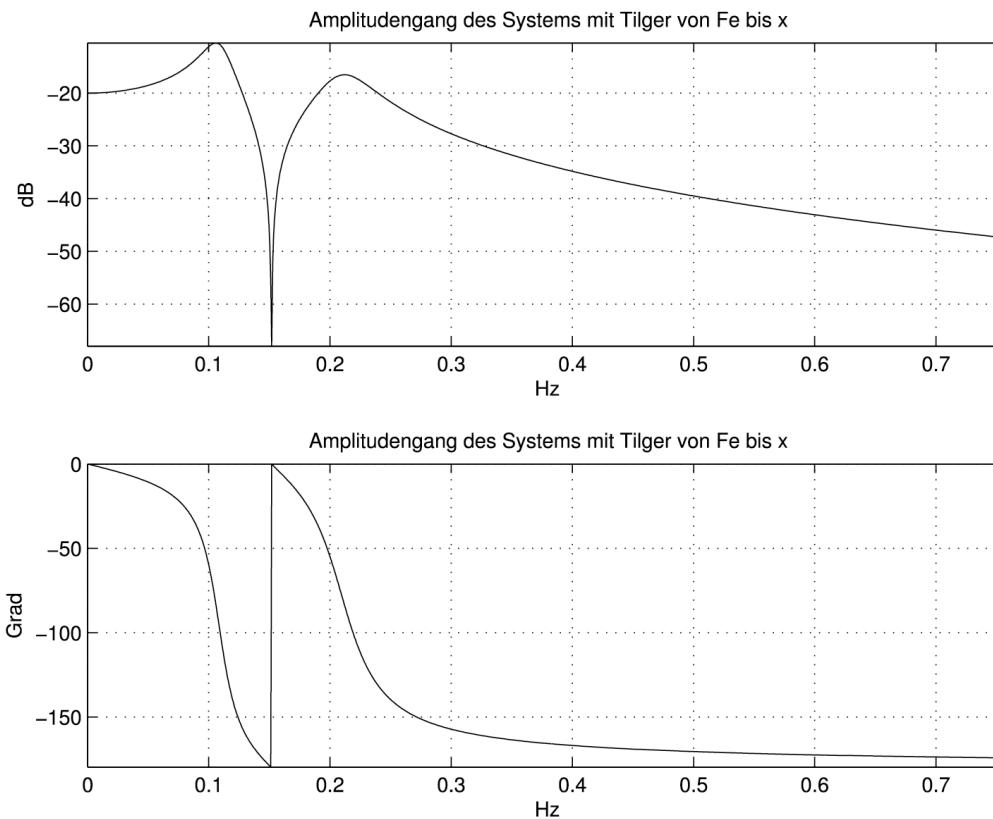


Abb. 1.31: Frequenzgang von der Anregung $F_e(t)$ bis zur Lage der Hauptmasse $x(t)$ (unwucht_4.m, unwucht4.mdl)

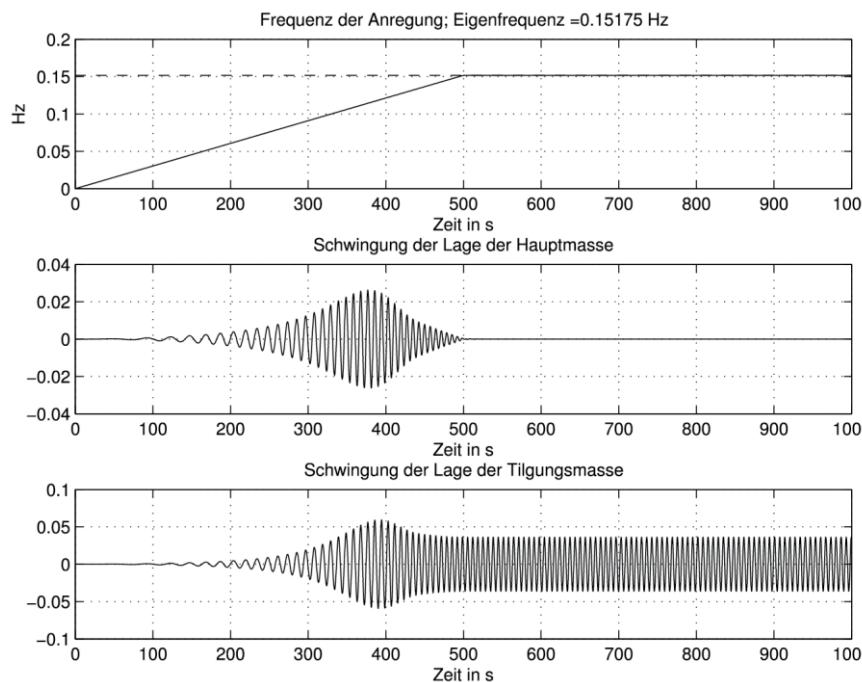


Abb. 1.32: a) Frequenzänderung der Anregung b) Lage der Hauptmasse c) Lage der Tilgungsmasse
(unwucht_4.m, unwucht4.mdl)

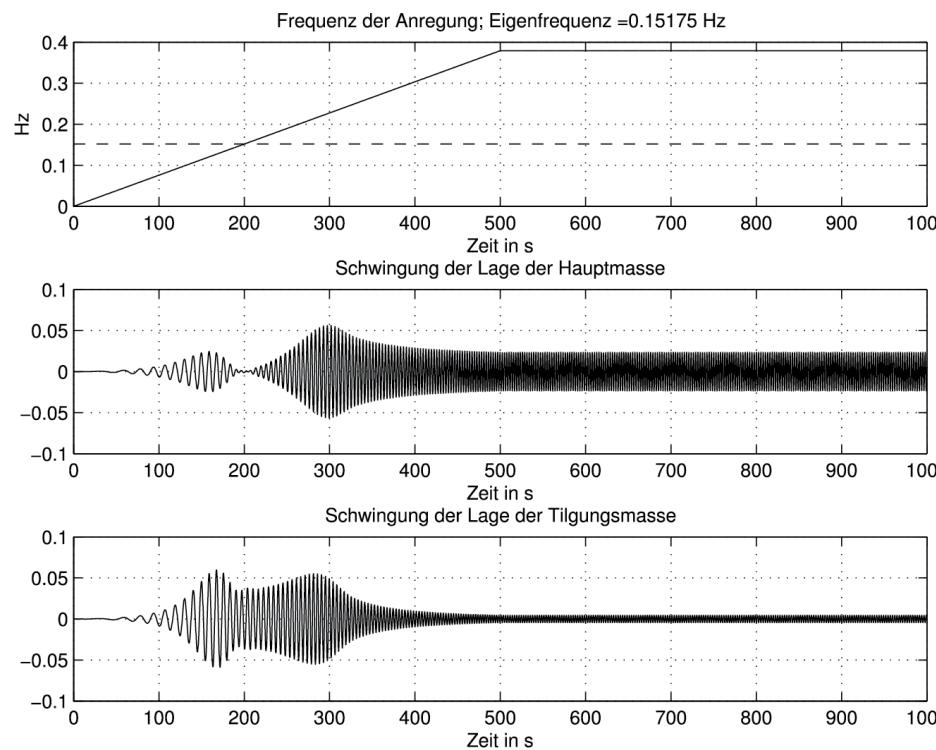


Abb. 1.33: a) Frequenzänderung der Anregung mit $f_r > f_0$ b) Lage der Hauptmasse c) Lage der Tilgungsmasse (unwucht_4.m, unwucht4.mdl)

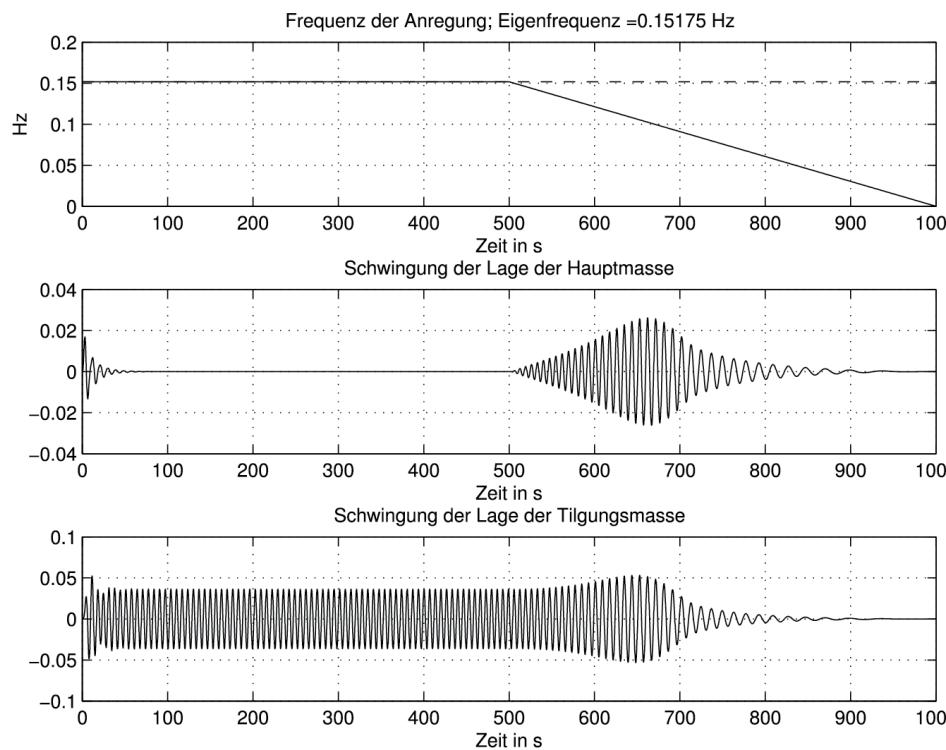


Abb. 1.34: a) Frequenzänderung der Anregung beim Auslauf mit $f_r = f_0$ b) Lage der Hauptmasse c) Lage der Tilgungsmasse
(unwucht_5.m, unwucht5.mdl)

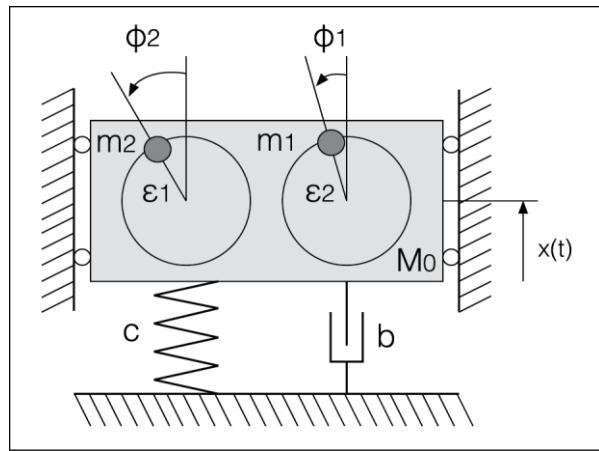


Abb. 1.35: Mechanisches System mit Unwuchttrotoren

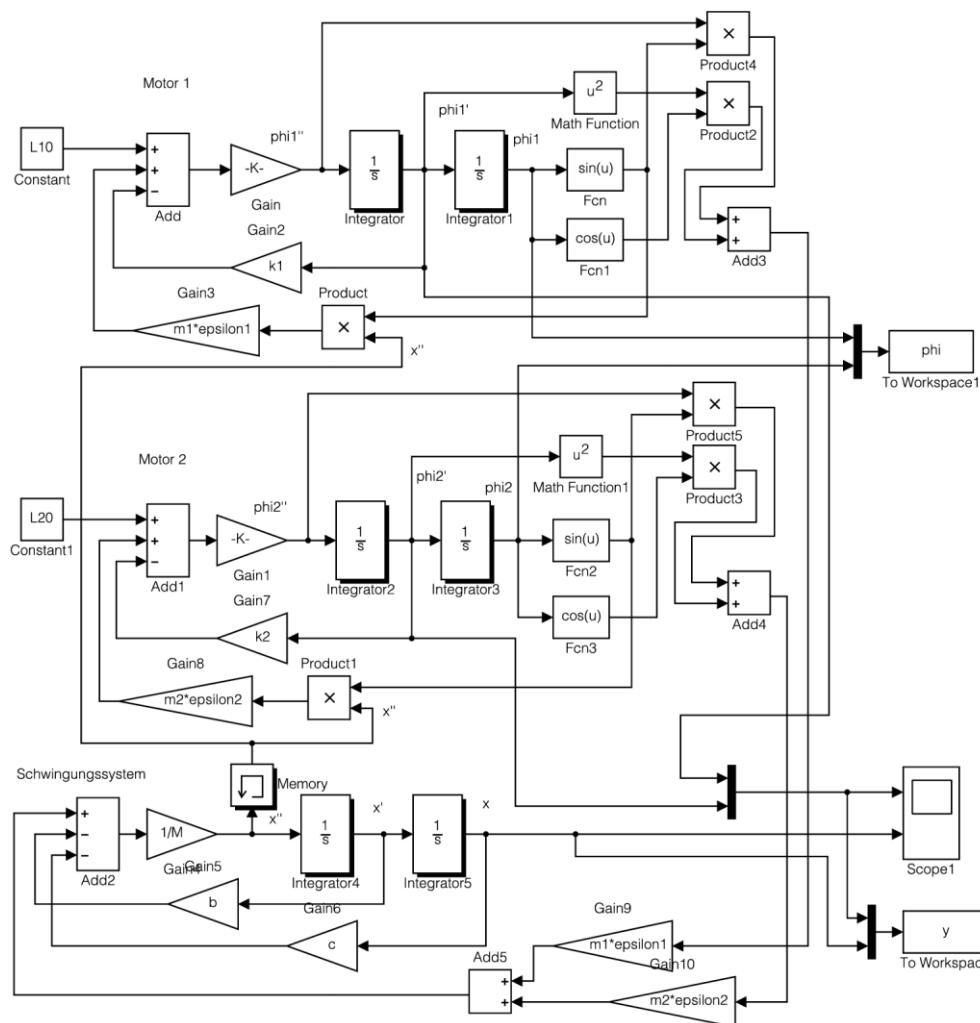


Abb. 1.36: Simulink-Modell der Selbstsynchronisation von zwei Unwuchttrotoren (unwucht_synchro1.m, unwucht_synchro_1.mdl)

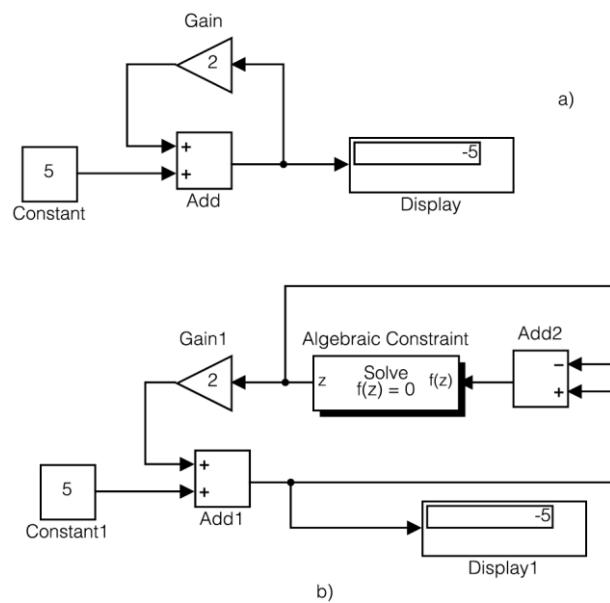


Abb. 1.37: Simulink-Modell einfacher algebraischen Schleifen (algebraisch_schl_1.mdl)

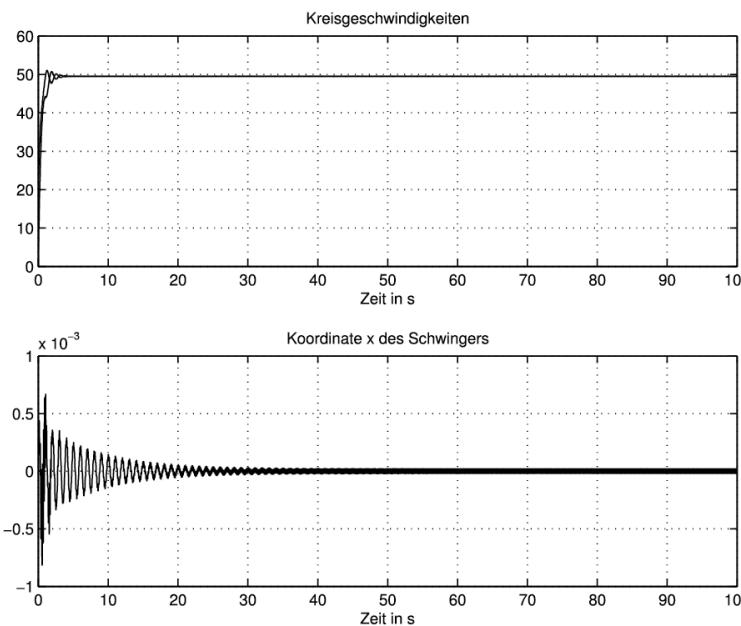


Abb. 1.38: Kreisgeschwindigkeiten der Motoren und Koordinate $x(t)$ des Schwingers (algebraisch_schl_1.mdl)

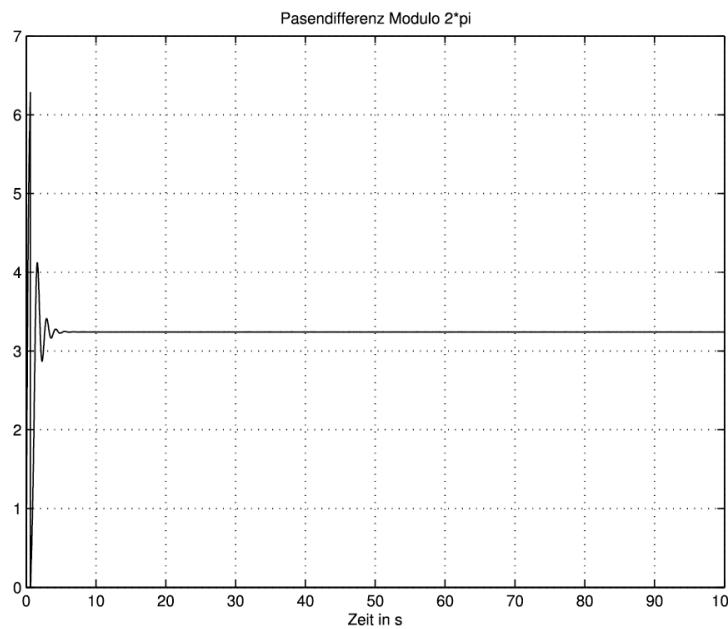


Abb. 1.39: Phasendifferenz Modulo 2π (algebraisch_schl_1.mdl)

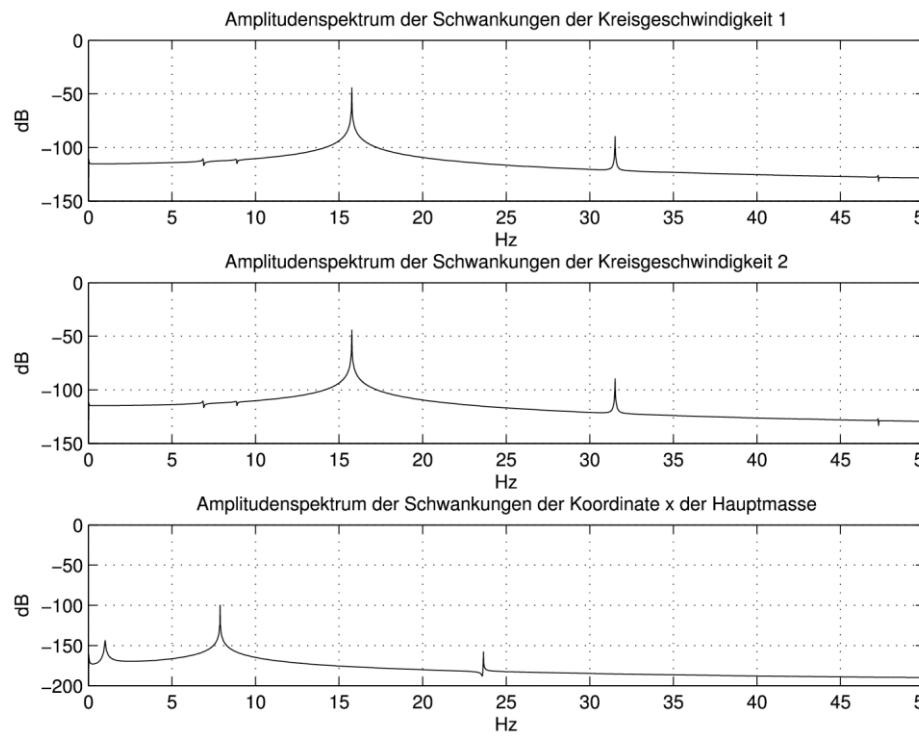


Abb. 1.40: Amplitudenspektren der Schwingungen der Kreisgeschwindigkeiten und der Koordinate x des Schwingers
(algebraisch_schl_1.mdl)

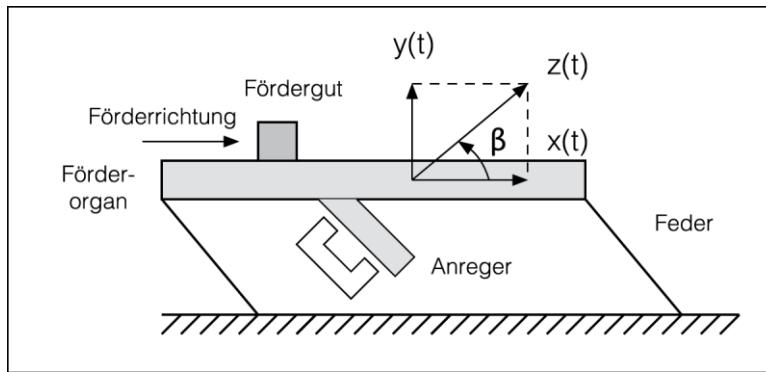


Abb. 1.41: Skizze eines Linearförderers

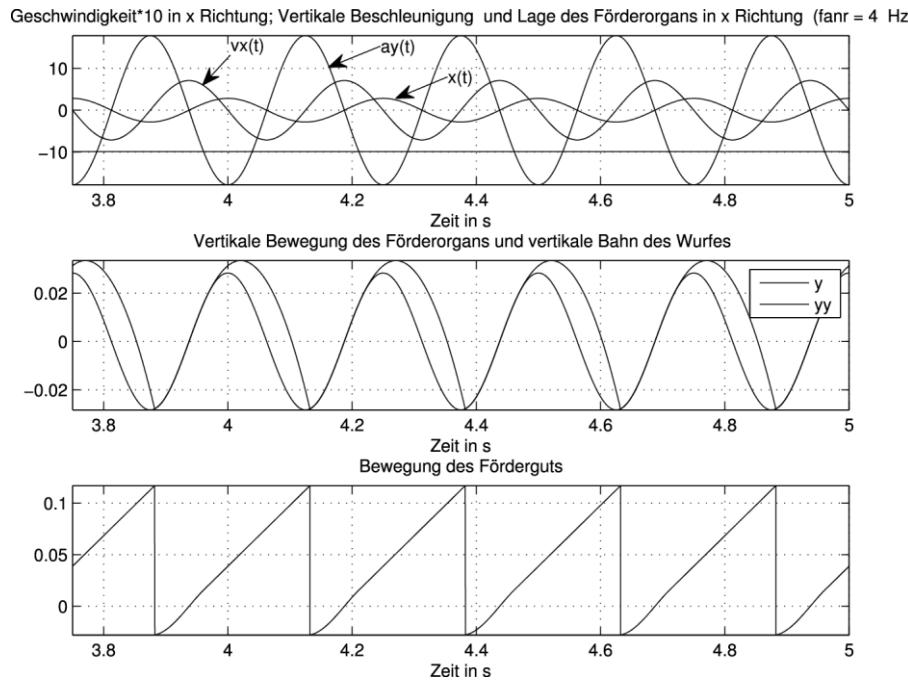


Abb. 1.42: a) Geschwindigkeit mal 10 in x-Richtung; Vertikale Beschleunigung und Lage des Förderorgans in x-Richtung mal 100 b) Vertikale Bewegung des Förderorgans und vertikale Bahn des schiefen Wurfs c) Bewegung des Förderguts (wurf_12.m)

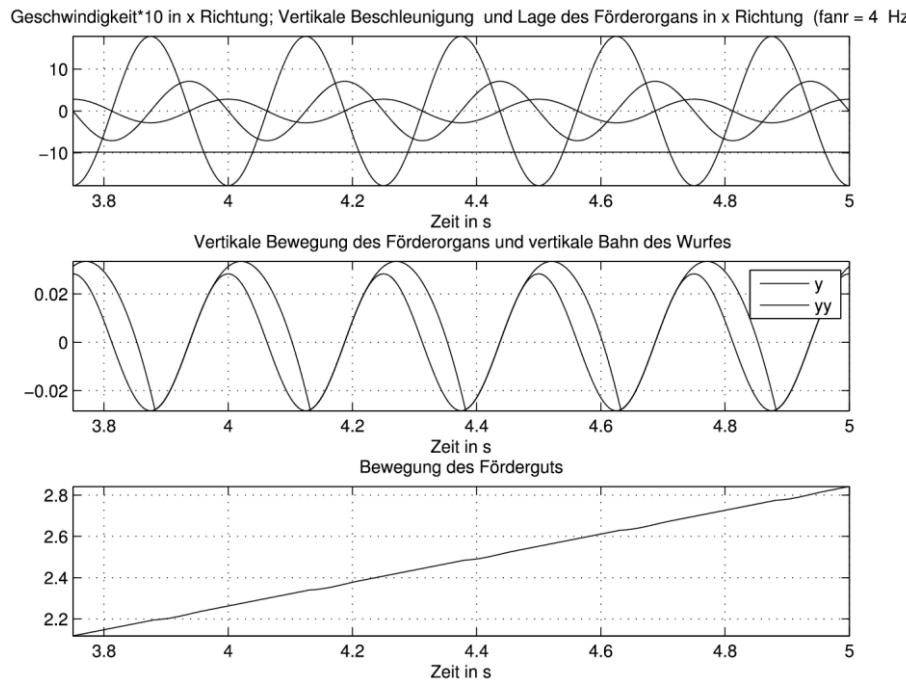


Abb. 1.43: a) Geschwindigkeit mal 10 in x-Richtung; Vertikale Beschleunigung und Lage des Förderorgans in x-Richtung mal 100 b) Vertikale Bewegung des Förderorgans und vertikale Bahn des schießen Wurfs c) Bewegung eines Förderguts über mehrere Perioden (wurf_13.m)

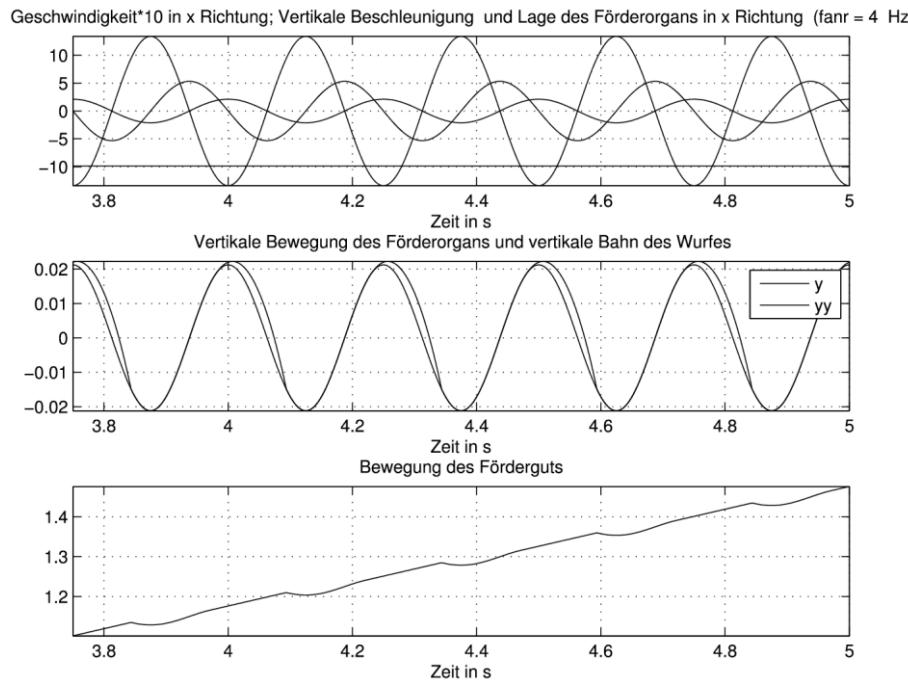


Abb. 1.44: a) Geschwindigkeit mal 10 in x-Richtung; Vertikale Beschleunigung und Lage des Förderorgans in x-Richtung mal 100 b) Vertikale Bewegung des Förderorgans und vertikale Bahn des schießen Wurfe c) Bewegung eines Förderguts über mehreren Perioden (wurf_13.m)

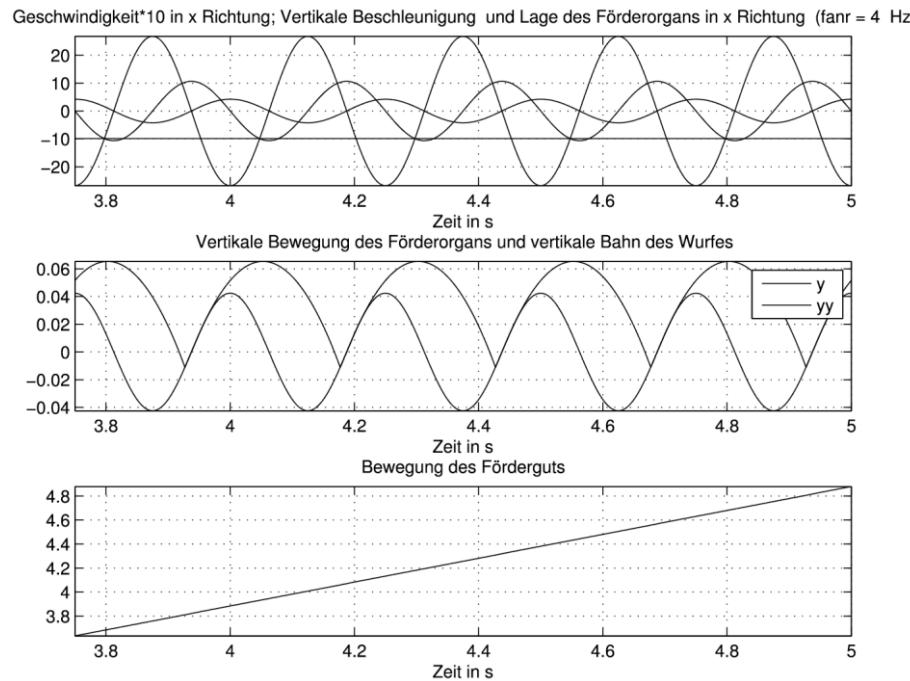


Abb. 1.45: a) Geschwindigkeit mal 10 in x-Richtung; Vertikale Beschleunigung und Lage des Förderorgans in x-Richtung mal 100 b) Vertikale Bewegung des Förderorgans und vertikale Bahn des schießen Wurfs c) Bewegung eines Förderguts über mehrere Perioden (wurf_13.m)

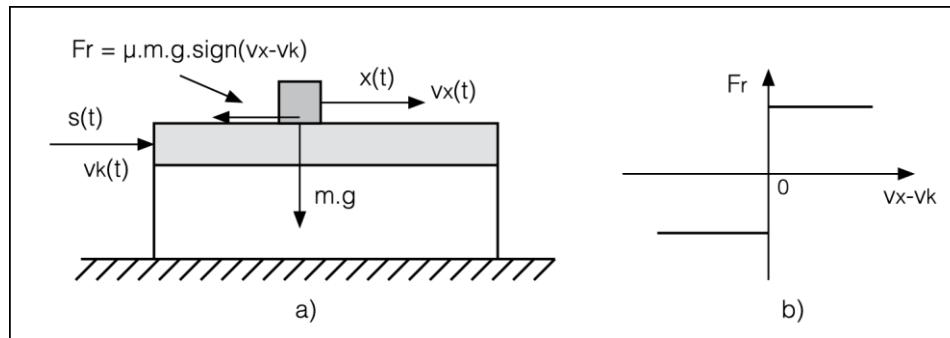


Abb. 1.46: a) Skizze der Förderung b) Abhängigkeit der Reibungskraft von der relativen Geschwindigkeit des Fördergutes

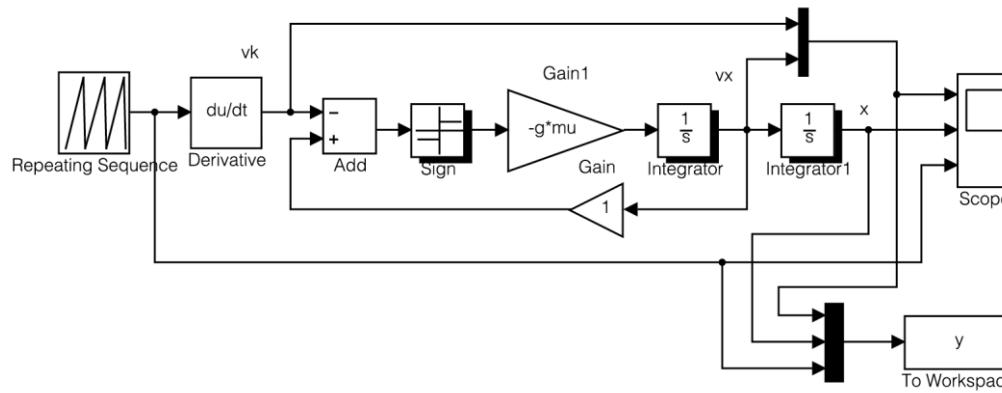


Abb. 1.47: Simulink-Modell der Förderung mit Haft- und Gleitreibung (foerderband_1.m, foerderband1.mdl)

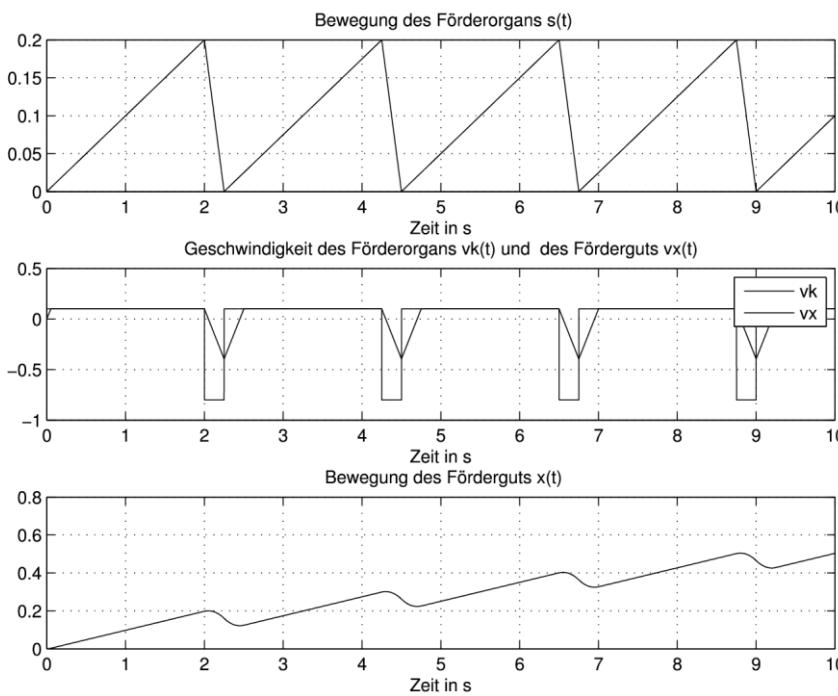


Abb. 1.48: Ergebnisse der Simulation der Förderung mit Haft- und Gleitreibung (foerderband_1.m, foerderband1.mdl)

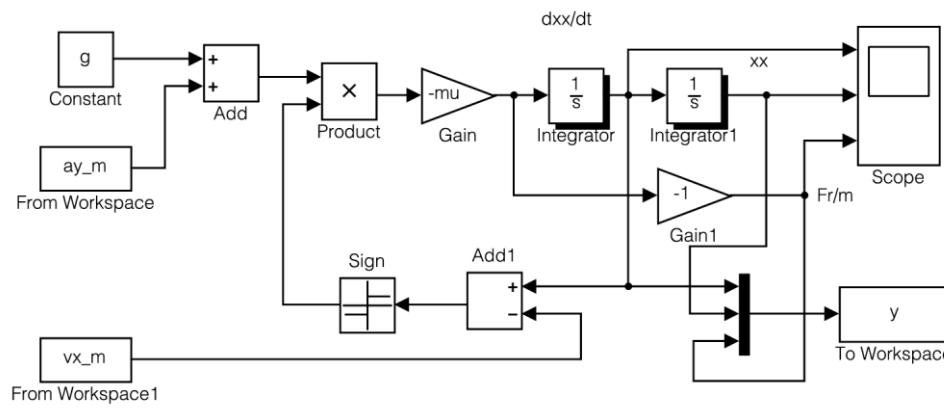


Abb. 1.49: Simulink-Modell für die Untersuchung des Gleitprinzips (foerder_haft_gleit_1.m, foerder_haft_gleit1.mdl)

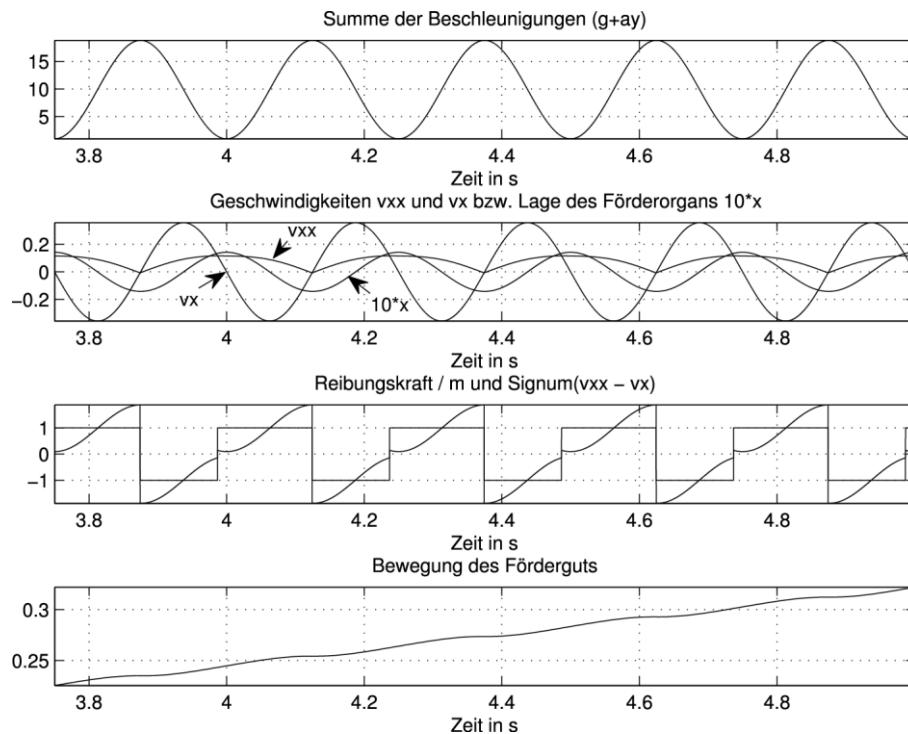


Abb. 1.50: Ergebnisse der Simulation der Förderung nach dem Gleitprinzip (foerder_haft_gleit_1.m, foerder_haft_gleit1.mdl)

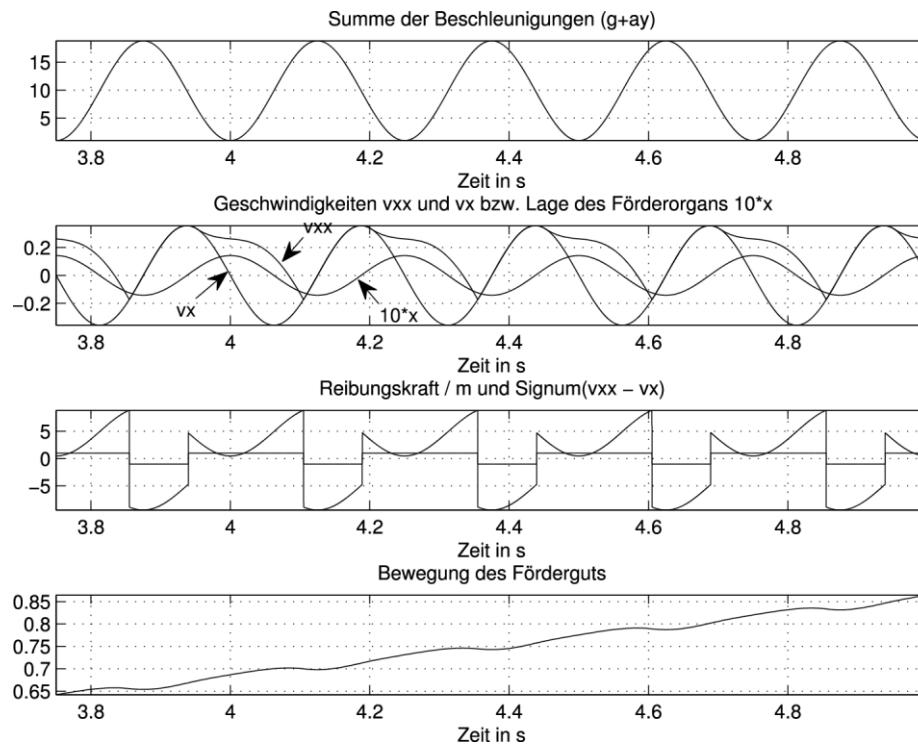


Abb. 1.51: Ergebnisse der Simulation der Förderung nach dem Gleitprinzip für $\mu = 0, 5$
(foerder_haft_gleit_1.m, foerder_haft_gleit1.mdl)

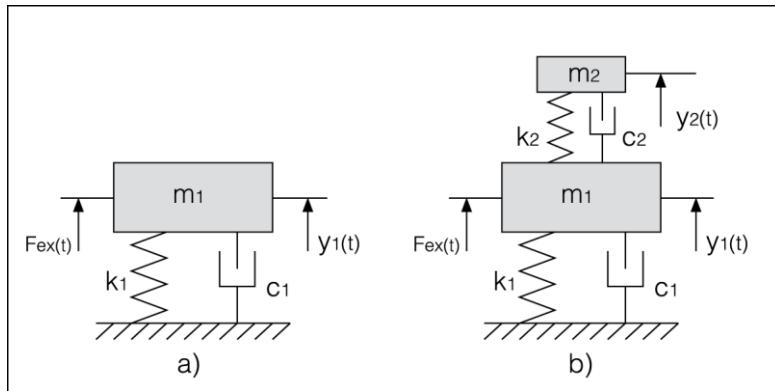
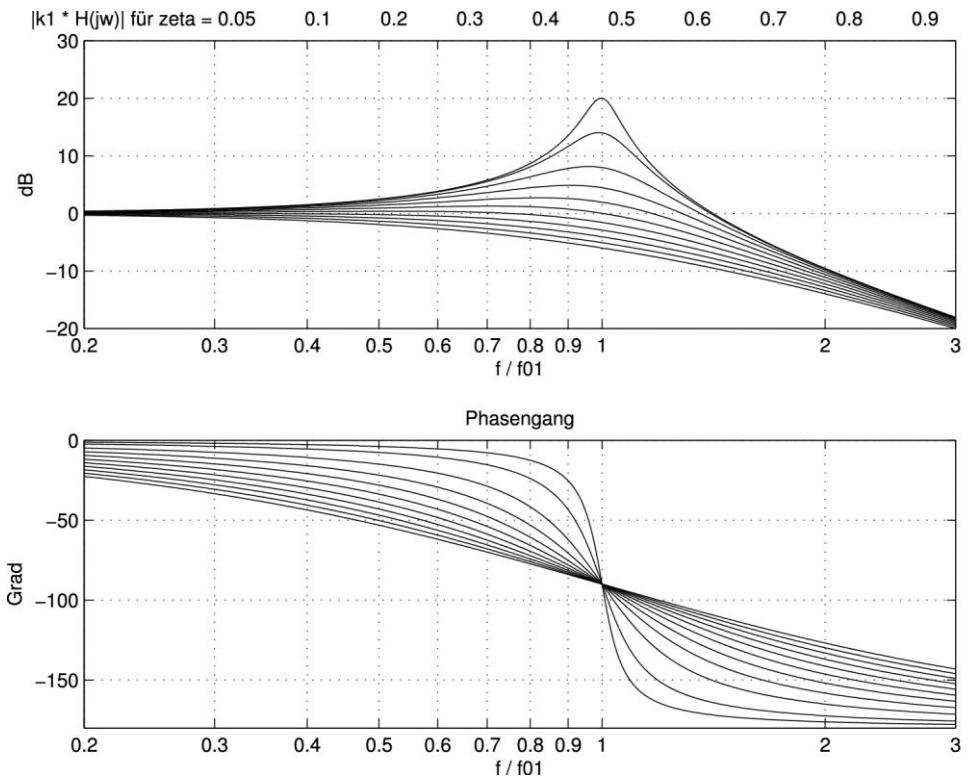


Abb. 1.52: a) Einfaches Feder-Masse-System b) Zweimassenschwinger mit dem zweiten Feder-Masse-System als Tilger



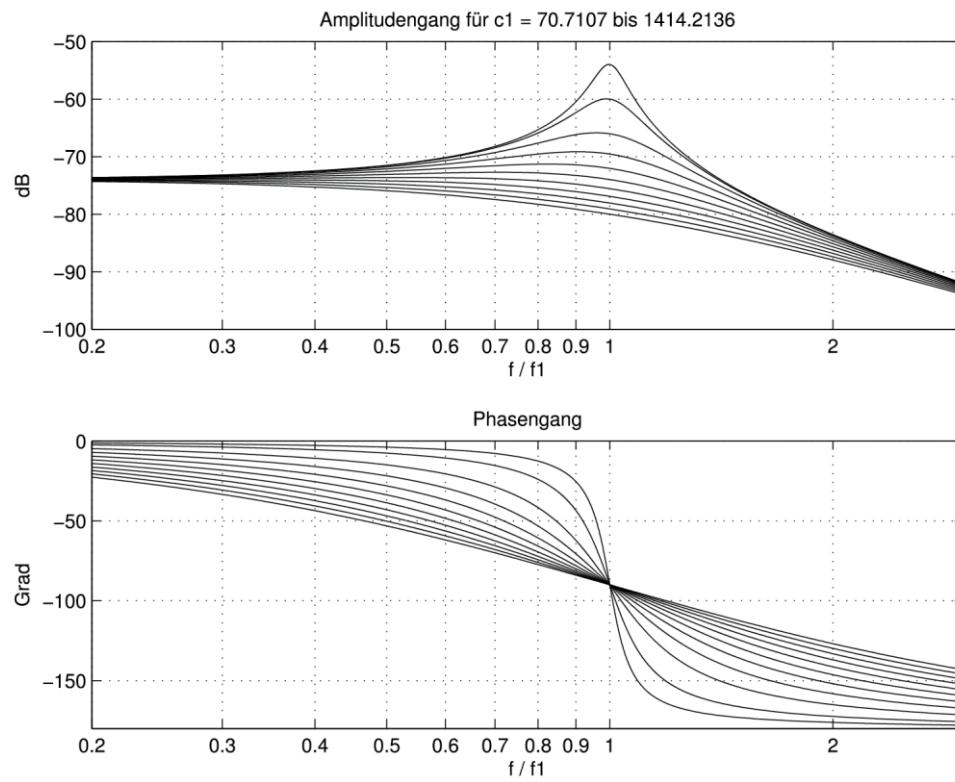


Abb. 1.54: Frequenzgang für nicht normierte Funktion $H(j\omega)$ (feder_masse_11.m)

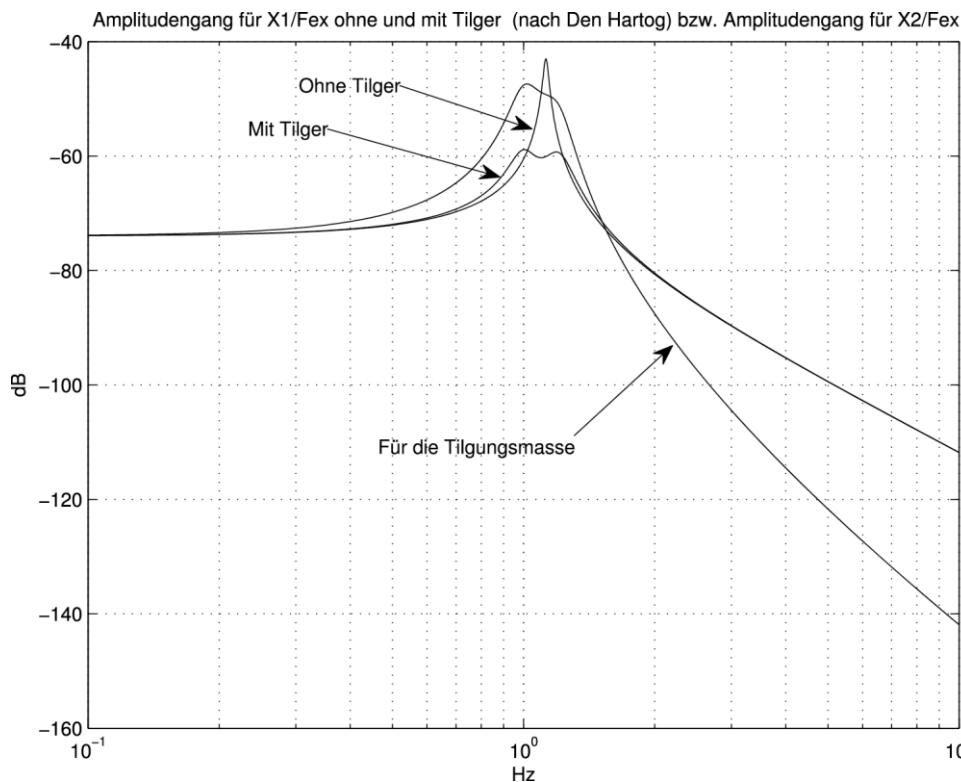


Abb. 1.55: Amplitudengang ohne und mit Tilger bzw. Amplitudengang für die Bewegung des Tilgers (feder_masse_1.m)

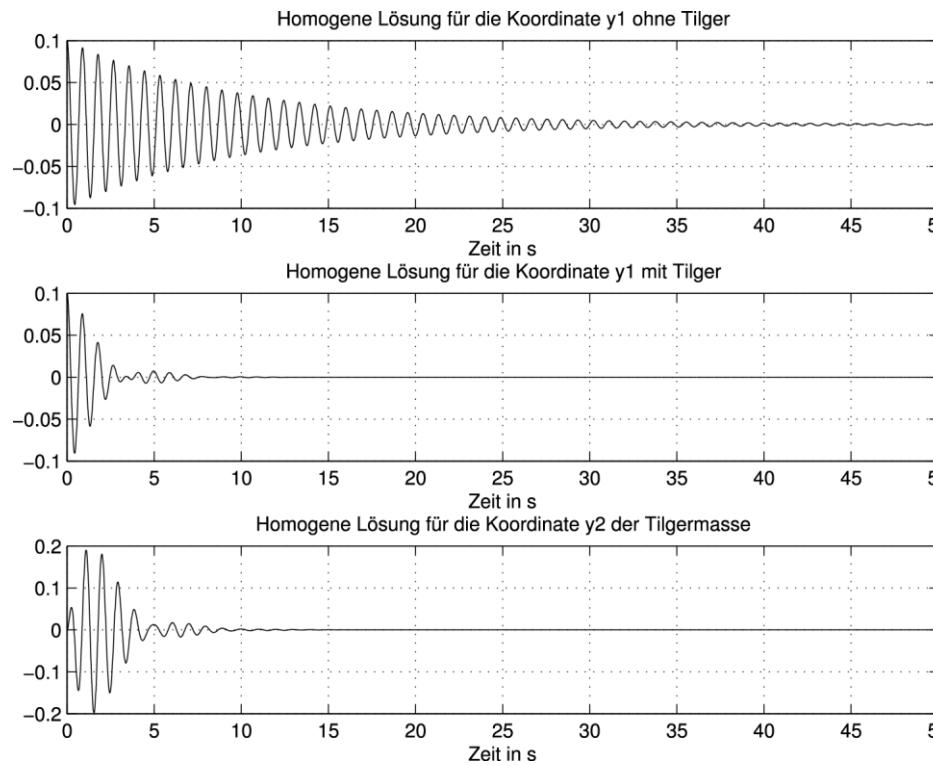


Abb. 1.56: Homogene Lösung für die Koordinate der Hauptmasse ohne Tilger, mit Tilger und für die Koordinate der Tilgermasse (feder_masse_1.m)

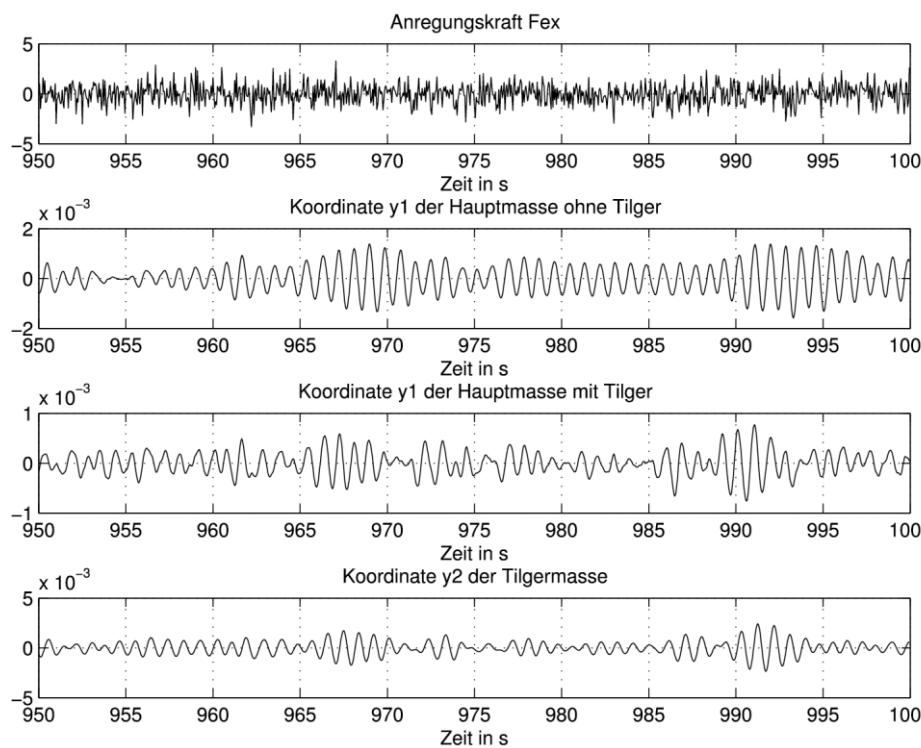


Abb. 1.57: Die Antworten auf zufälliger unabhängiger Anregung (feder_masse_1.m)

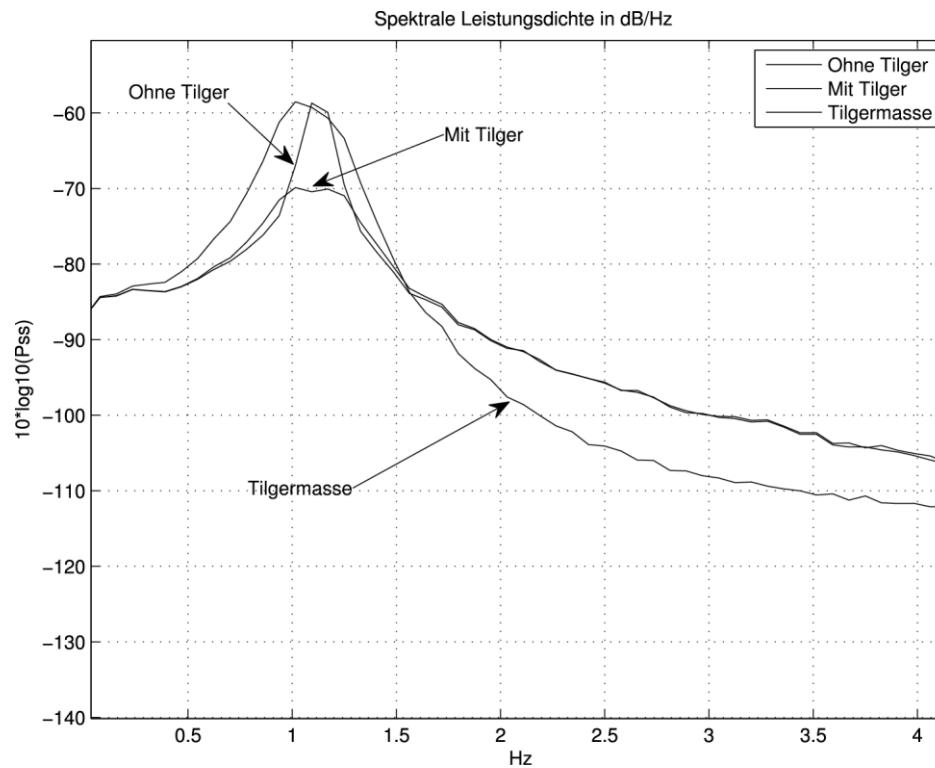


Abb. 1.58: Spektrale Leistungsdichten (feder_masse_1.m)

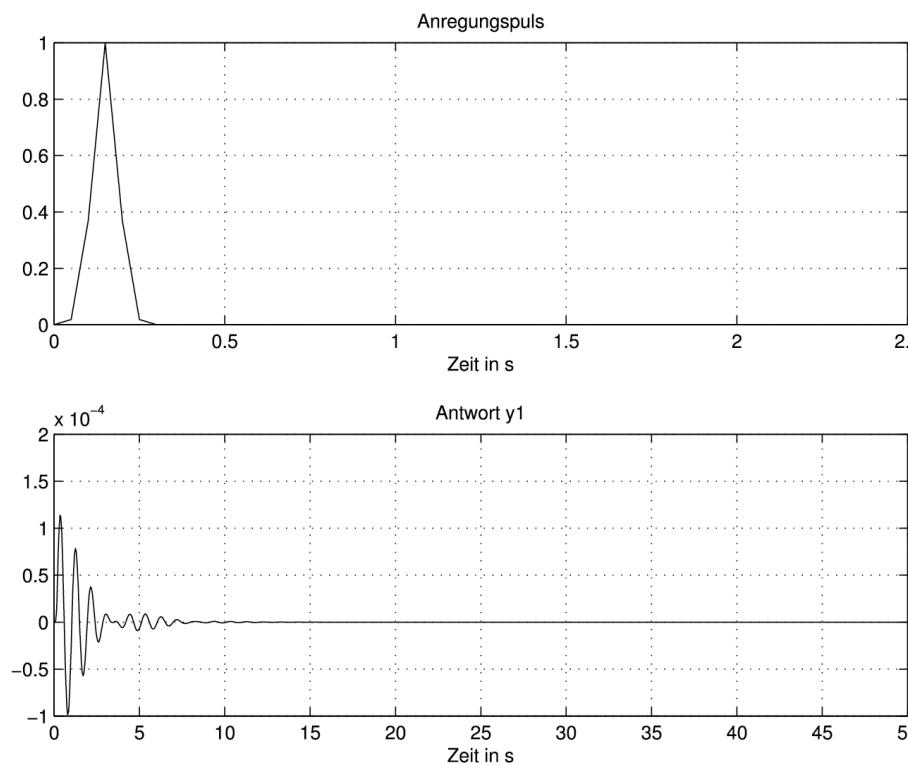


Abb. 1.59: Anregungspuls und Antwort für die Koordinate der Lage der Masse m_1 (feder_masse_13.m)

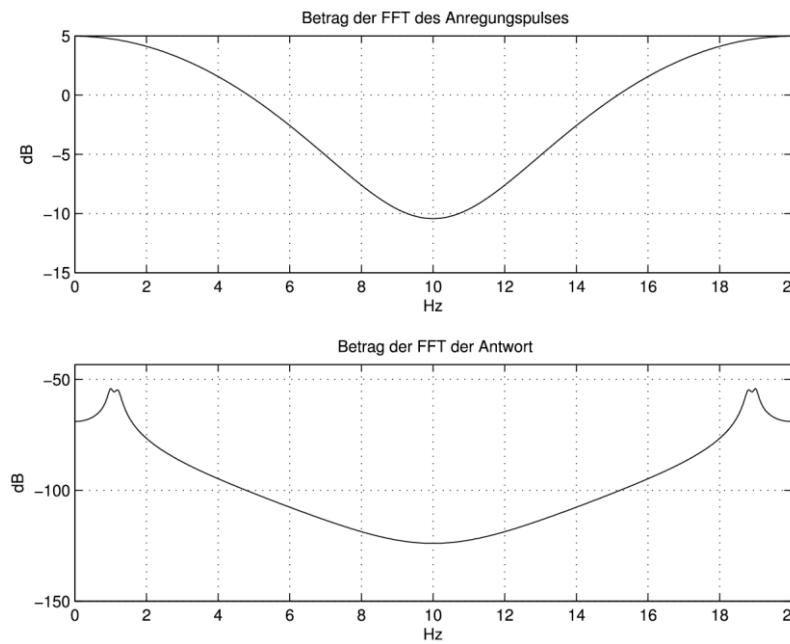


Abb. 1.60: Beträge der DFT des Anregungspulses und der Antwort (feder_masse_13.m)

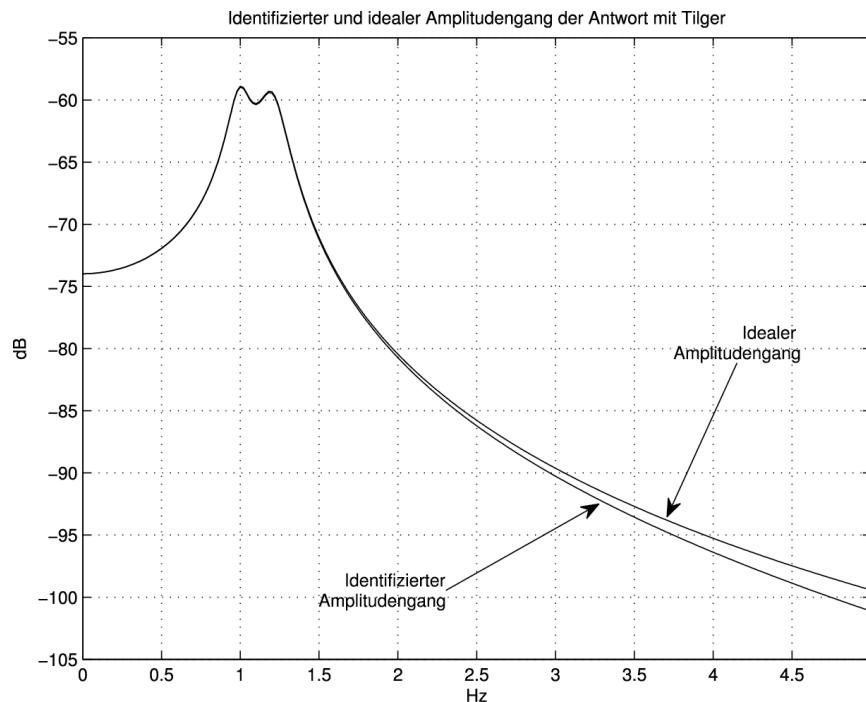


Abb. 1.61: Beträge des identifizierten und idealen Amplitudengangs (feder_masse_13.m)

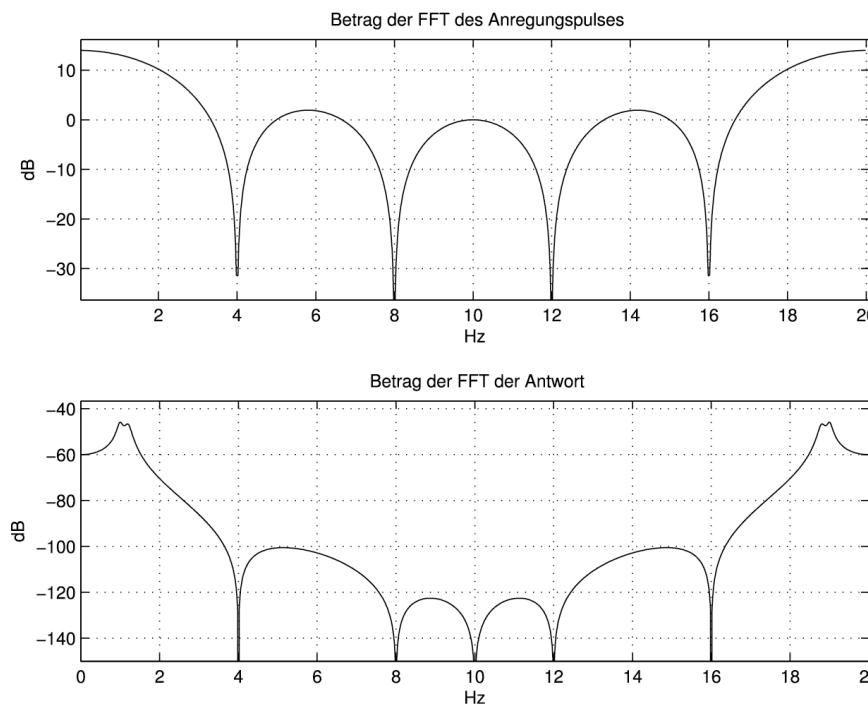


Abb. 1.62: Beträge der DFT des rechteckigen Anregungspulses und der Antwort (feder_masse_13.m)

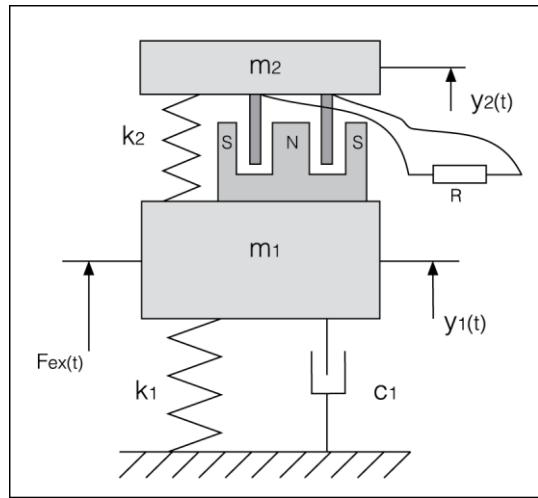


Abb. 1.63: Tilgung mit elektrischem Dämpfer

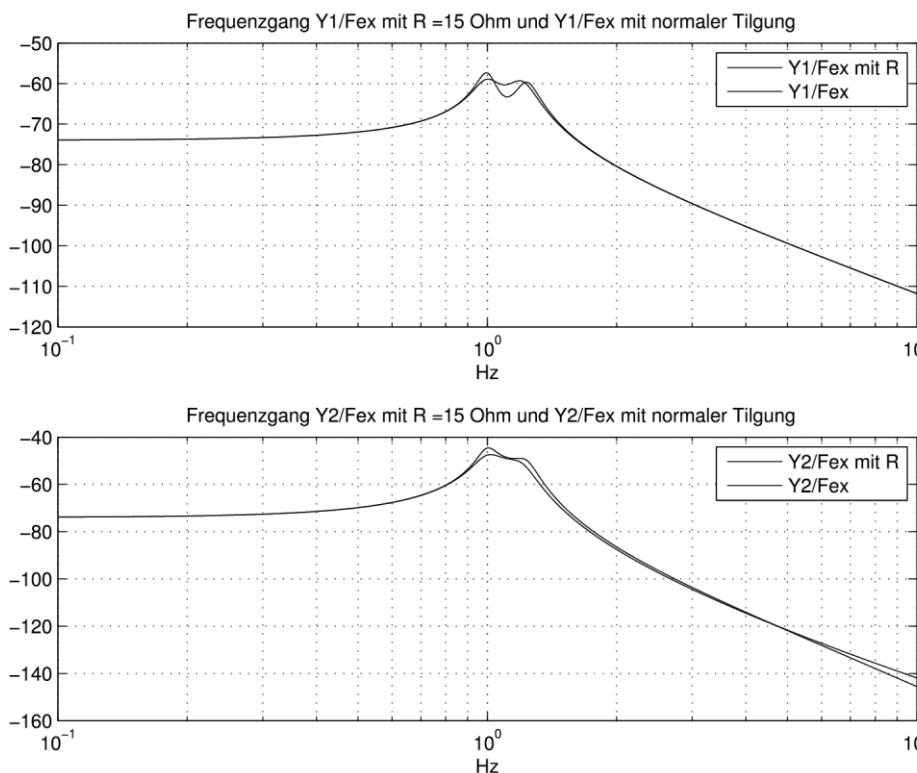


Abb. 1.64: Amplitudengänge für den elektrischen Tilger und den mechanischen Tilger (vibration_control_1.m)

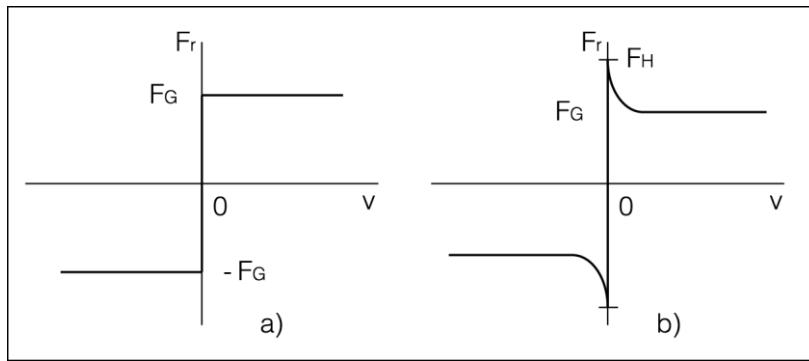


Abb. 1.65: a) Einfaches Modell der Gleitreibung b) Das Stribeck-Modell der Gleitreibung

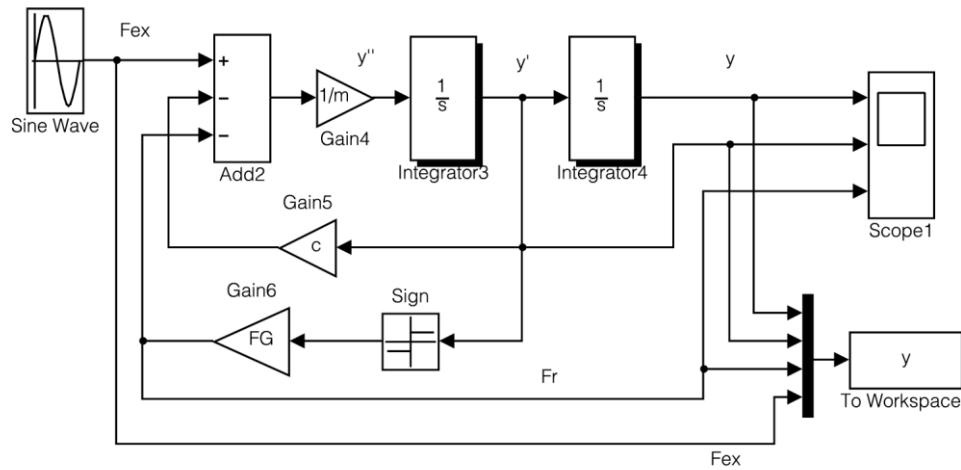


Abb. 1.66: Simulink-Modell des Systems mit Coulombsche Reibung (coulomb_1.m, coulomb1.mdl)

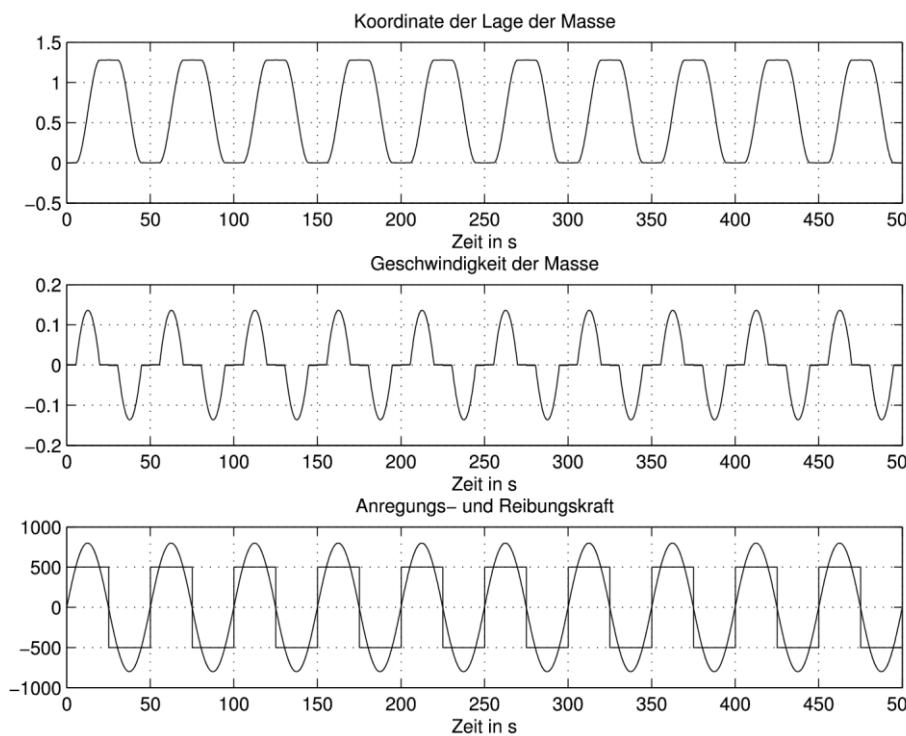


Abb. 1.67: a) Koordinate der Lage der Masse b) Geschwindigkeit der Masse c) Sinusförmige Anregungs- und Reibungskraft für fixe Schrittweite (coulomb_1.m, coulomb1.mdl)

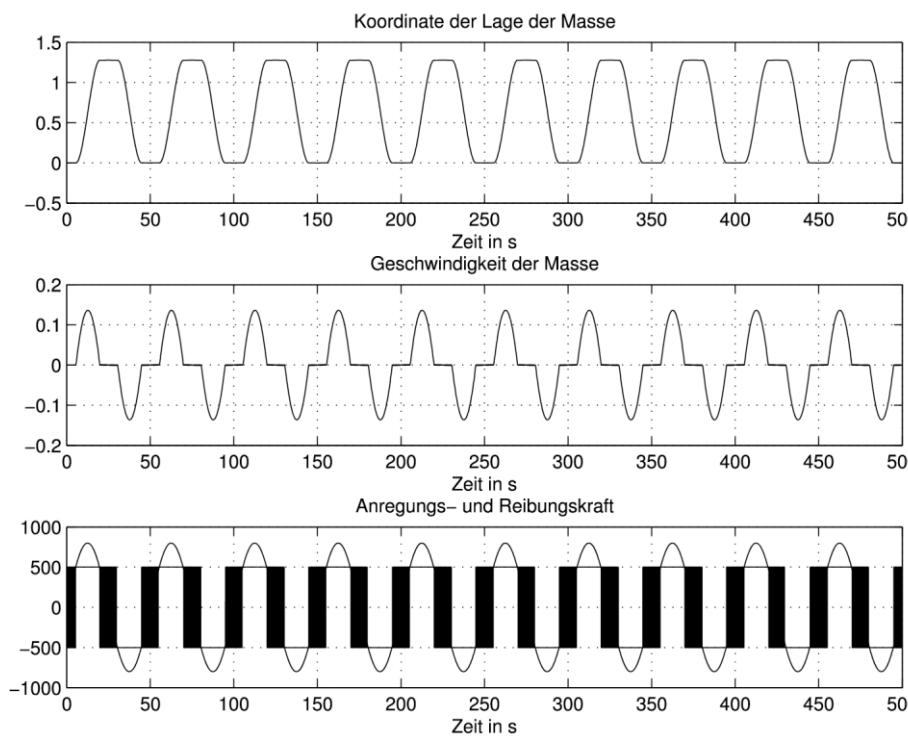


Abb. 1.68: a) Koordinate der Lage der Masse b) Geschwindigkeit der Masse c) Sinusförmige Anregungs- und Reibungskraft für variable Schrittweite (coulomb_1.m, coulomb1.mdl)

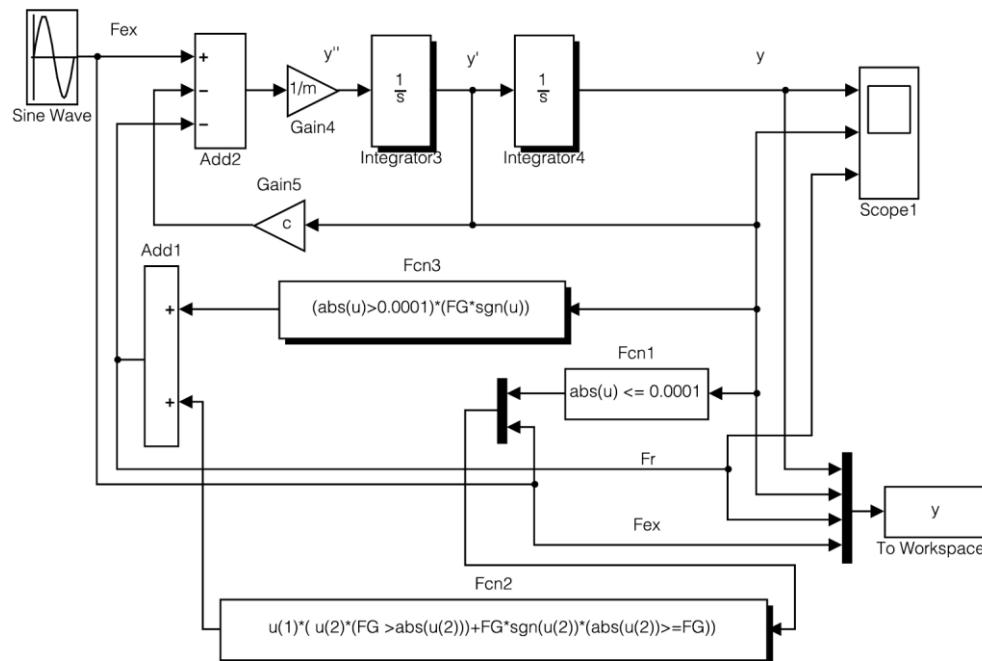


Abb. 1.69: Simulink-Modell mit Abfragen des Zustandes der Geschwindigkeit null (coulomb_2.m, coulomb2.mdl)

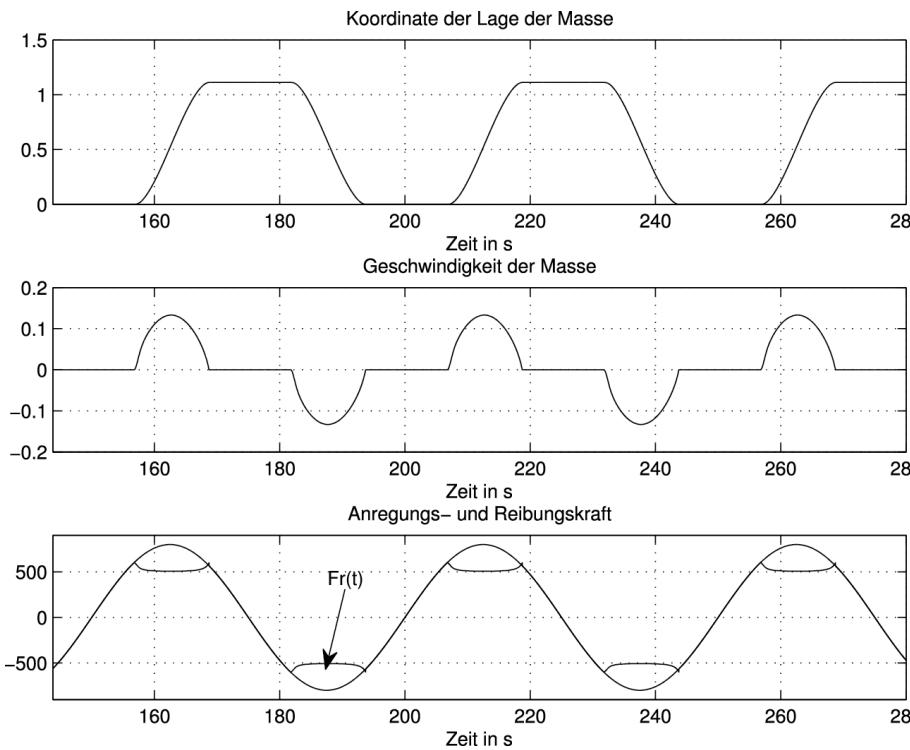


Abb. 1.70: a) Koordinate der Lage der Masse b) Geschwindigkeit der Masse c) Sinusförmige Anregungs- und Reibungskraft mit Stribeck-Kennlinie (coulomb_3.m, coulomb3.mdl)

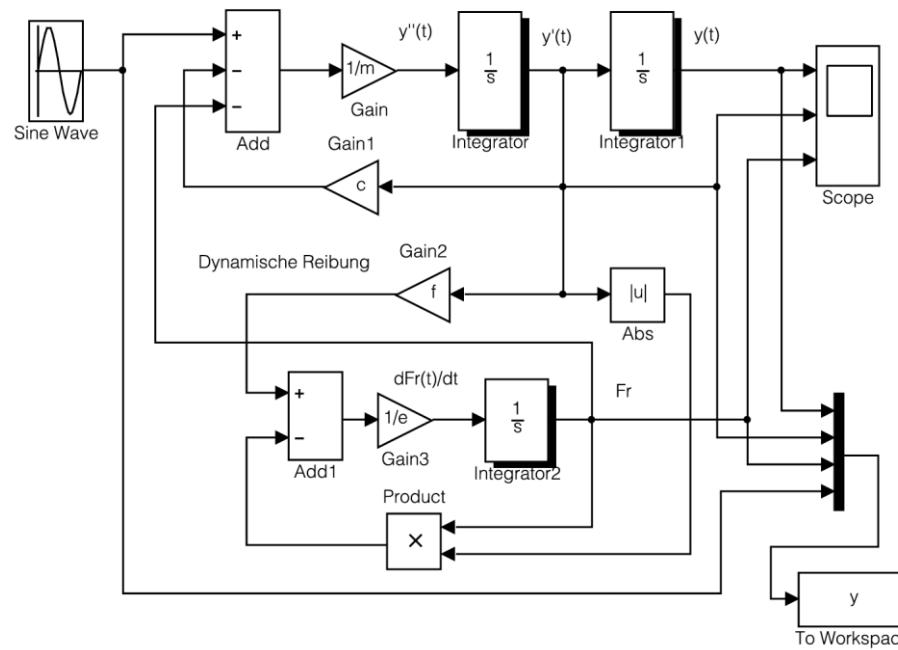


Abb. 1.71: Simulink-Modell des Systems mit Dahl-Reibungskraft (coulomb_5.m, coulomb5.mdl)

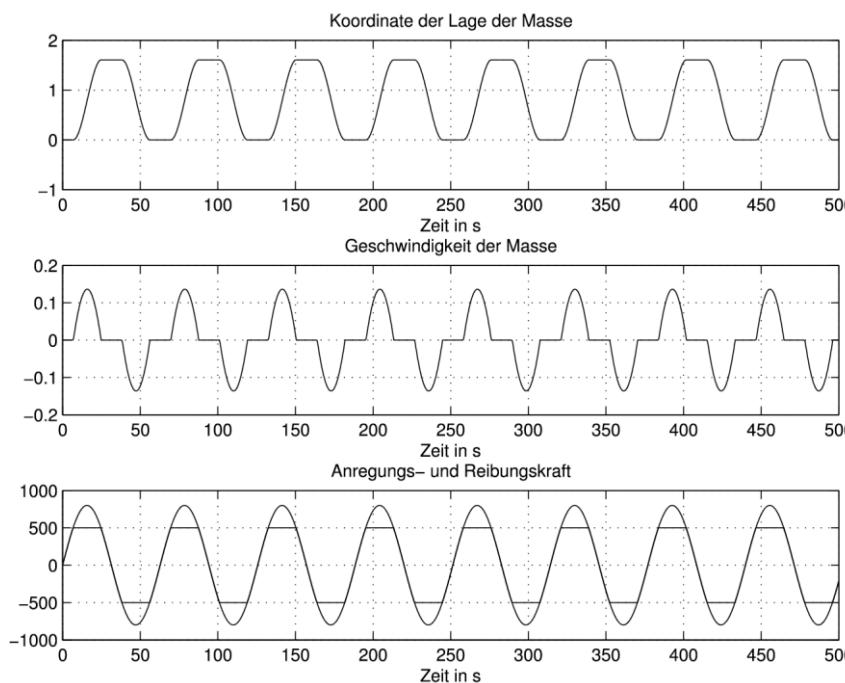


Abb. 1.72: Ergebnisse der Simulation mit Dahl-Reibungskraft (coulomb_5.m, coulomb5.mdl)

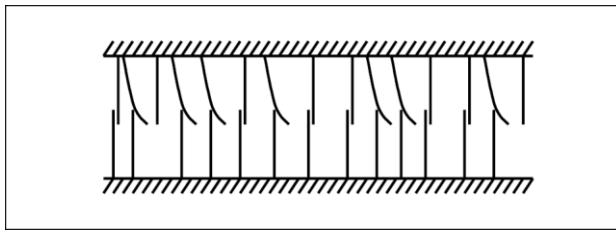


Abb. 1.73: Die Reibungskontakte zwischen zwei Flächen in Form von Borsten

| Parameter | Wert | Einheiten |
|------------|-----------------|-----------|
| σ_0 | 100000 | [N/m] |
| σ_1 | $\sqrt{100000}$ | [Ns/m] |
| σ_2 | 0,4 | [Ns/m] |
| F_c | 1 | [N] |
| F_s | 1,5 | [N] |
| v_s | 0,001 | [m/s] |

Tabelle 1.1: Beispiel für die Parameter des Modells

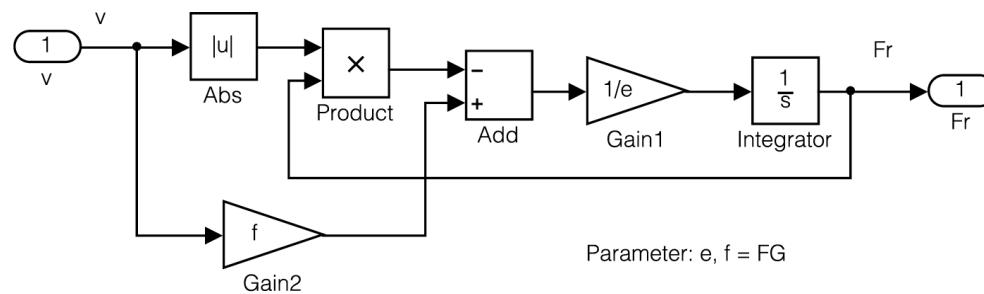


Abb. 1.74: Das Dahl-Modell (dinamische_modelle.mdl)

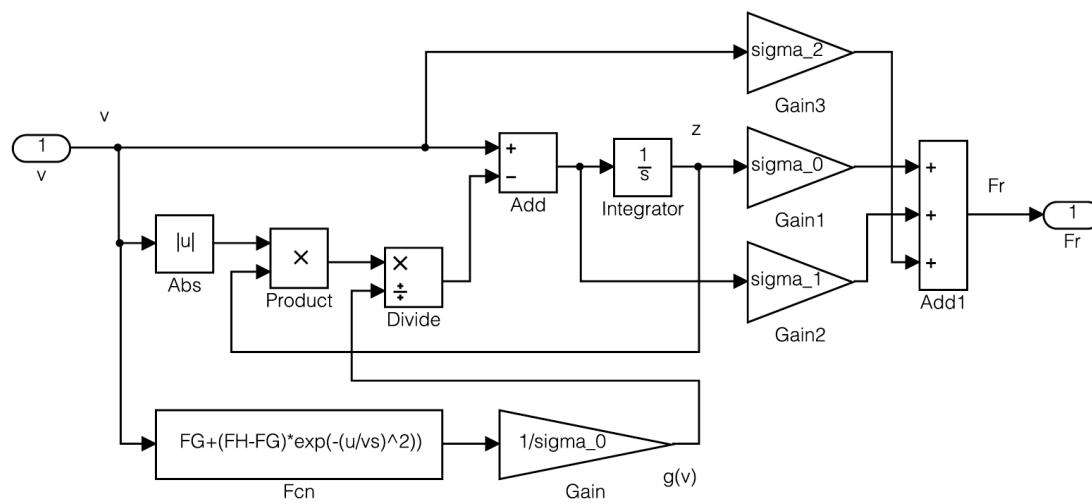


Abb. 1.75: Das LuGre-Modell (dinamische_modelle.mdl)

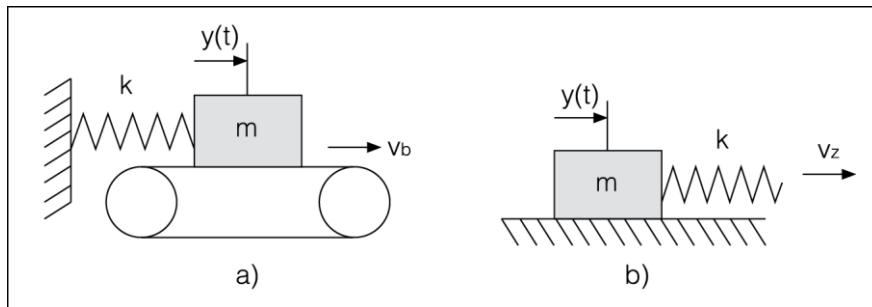


Abb. 1.76: Systeme mit Slip-Stick-Verhalten

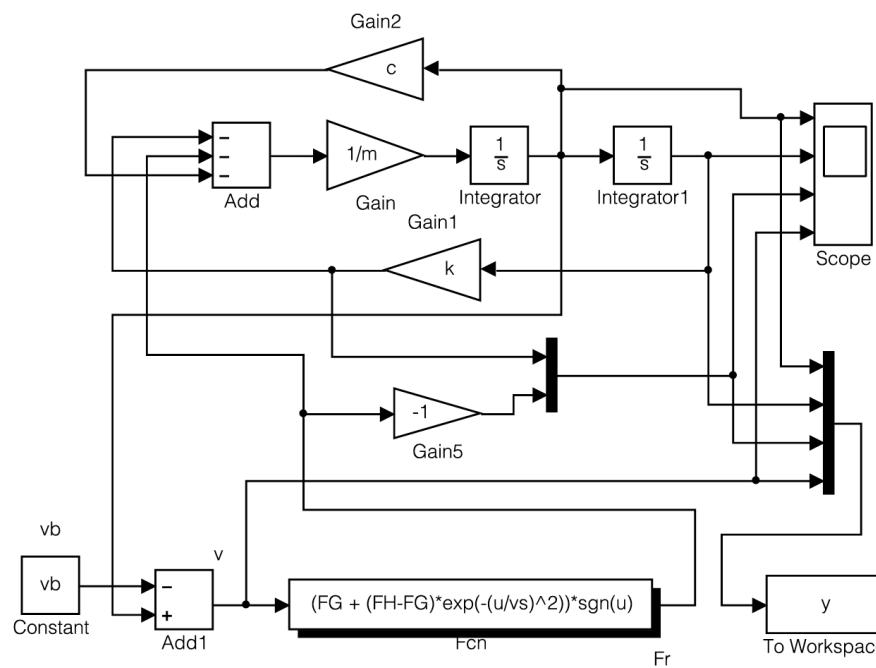


Abb. 1.77: Simulink-Modell für das erste System mit Stribeck-Reibungskraft (slip_stick_3.m, slip_stick3.mdl)

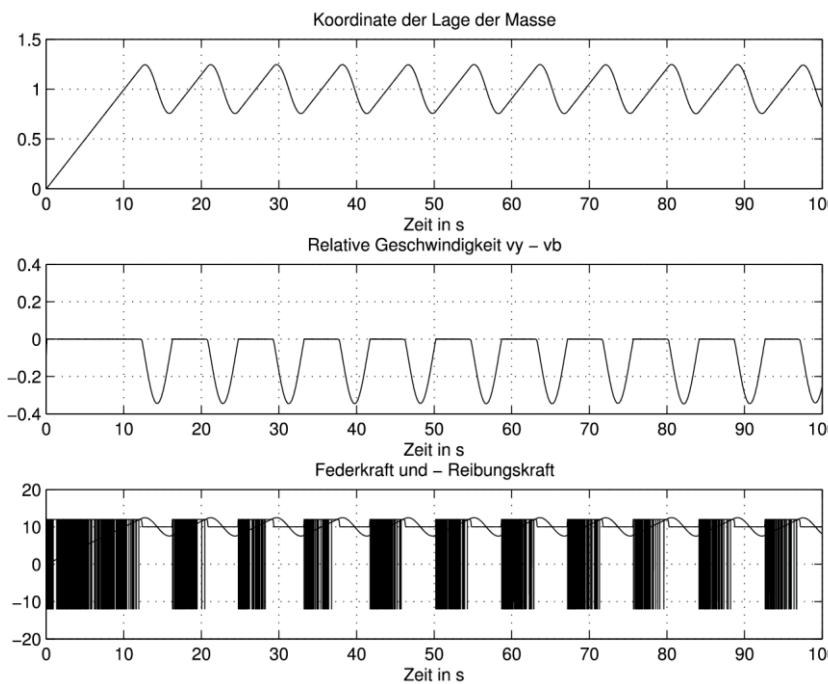


Abb. 1.78: Ergebnisse für eine Reibungskraft nach Stribeck-Kennlinie (slip_stick_3.m, slip_stick3.mdl)

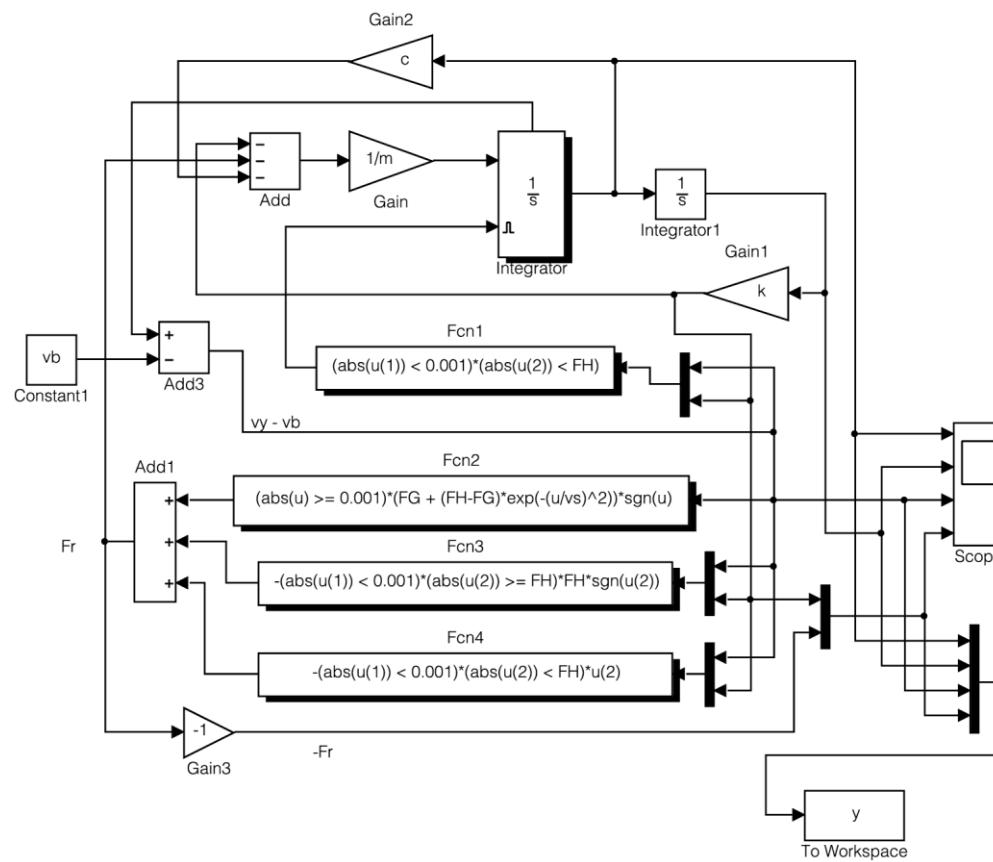


Abb. 1.79: Simulink-Modell für das erste System mit Stribeck-Reibungskraft und Zustandsabfragen
(slip_stick 31.m, slip_stick31.mdl)

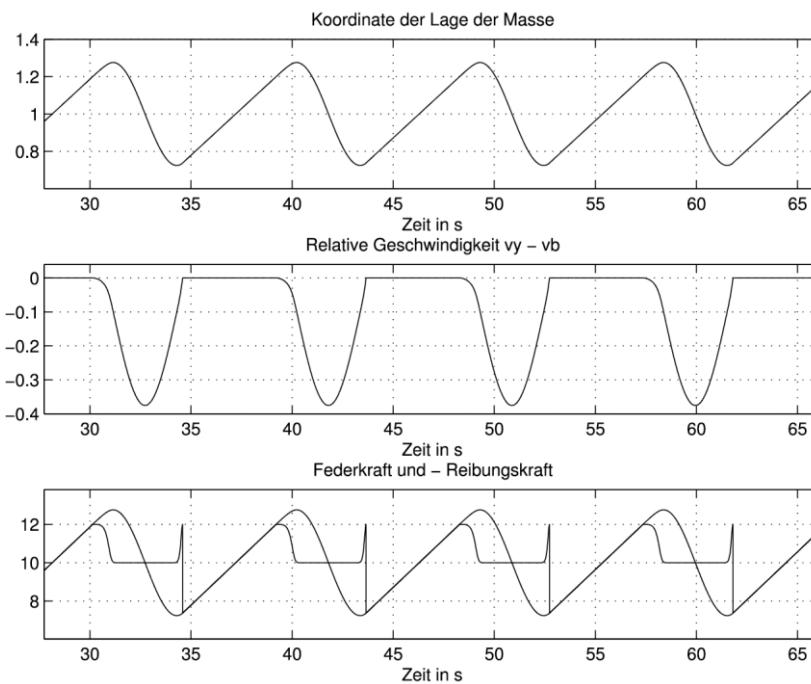


Abb. 1.80: Ergebnisse der Simulation mit gesteuertem Integrator und Abfragen im Haftzustand
(`slip_stick_31.m`, `slip_stick31.mdl`)

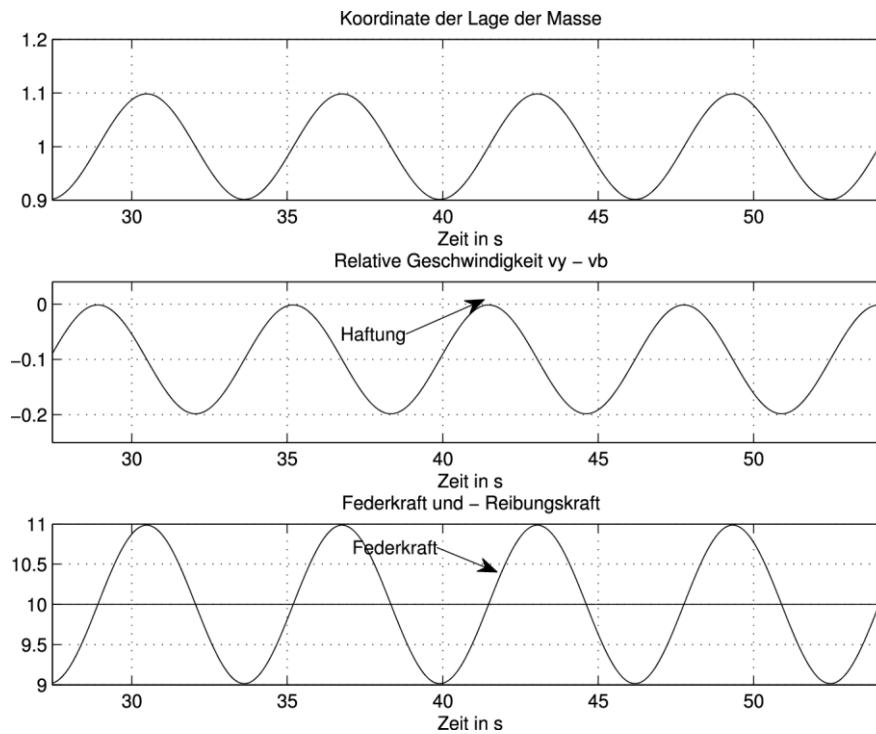


Abb. 1.81: Ergebnisse der Simulation mit Dahl-Reibungskraftmodell (slip_stick_s_1.m, slip_stick_s1.mdl)

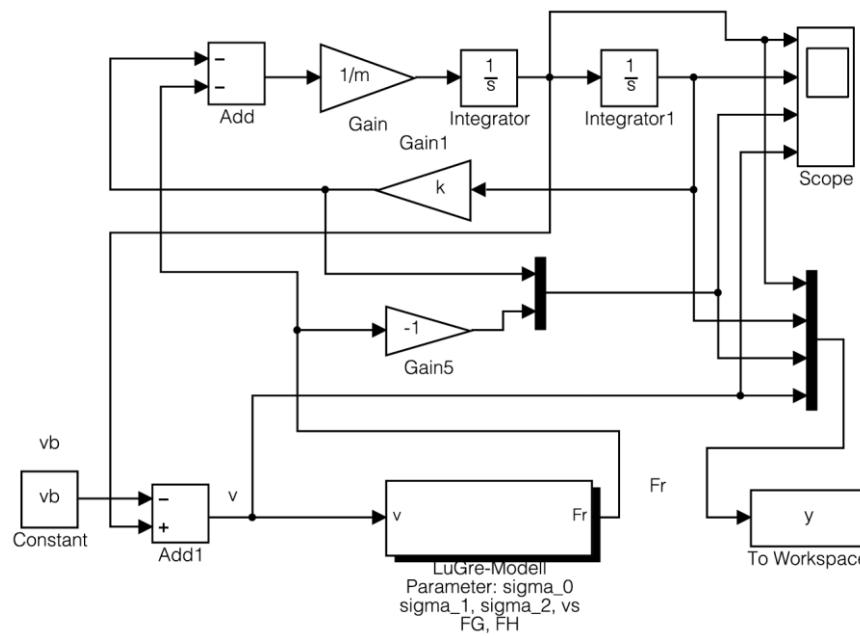


Abb. 1.82: Simulink-Modell mit LuGre-Reibungskraftmodell (slip_stick_s_1.m, slip_stick_s1.mdl)

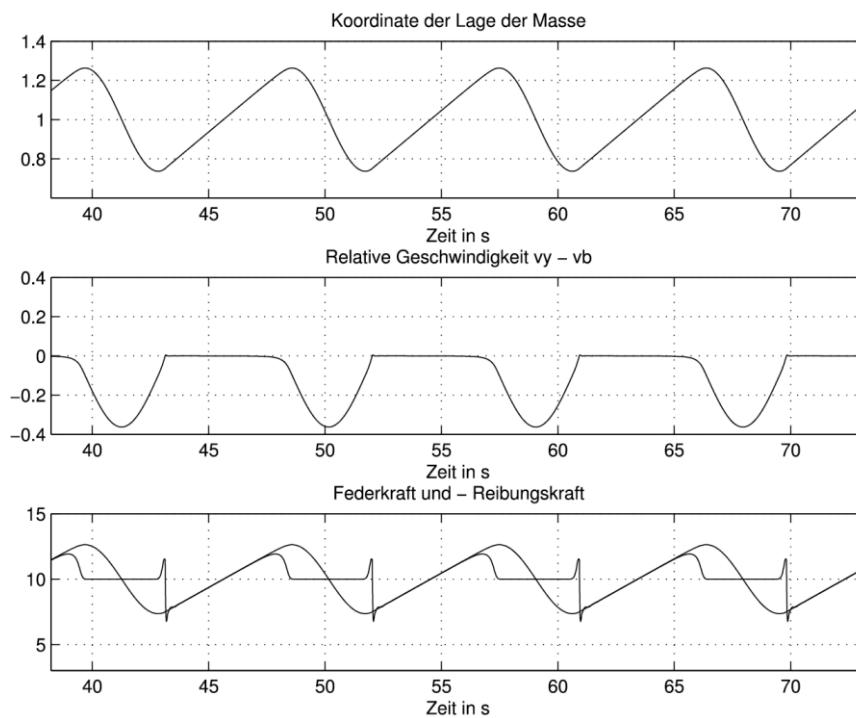


Abb. 1.83: Ergebnisse der Simulation mit LuGre-Reibungskraftmodell (slip_stick_s_12.m, slip_stick_s12.mdl)

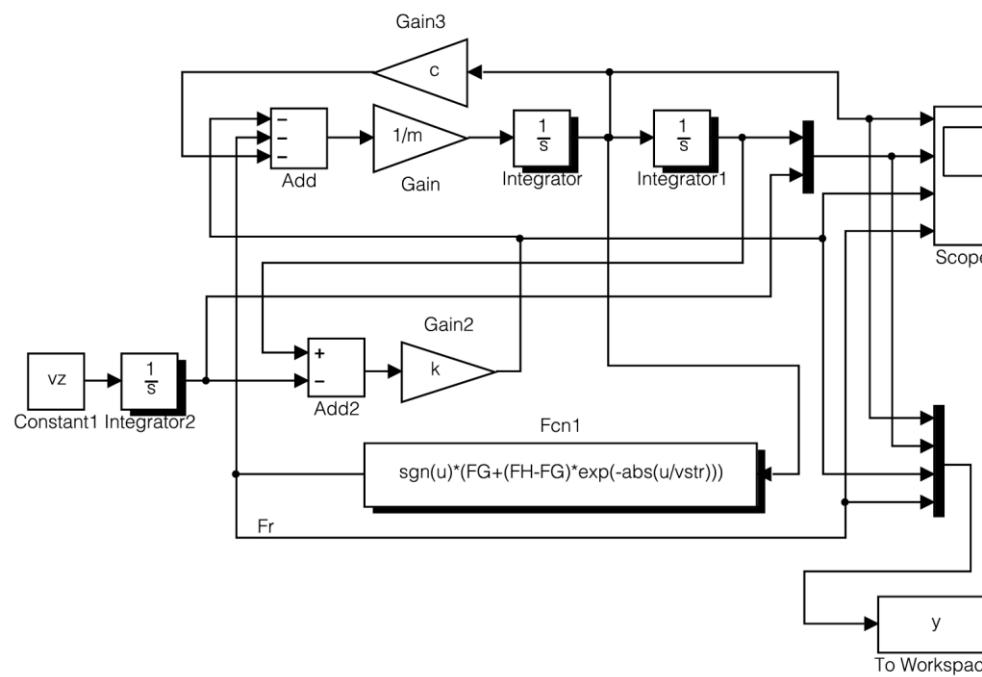


Abb. 1.84: Simulink-Modell des Systems aus Abb. 1.76b (slip_stick_1.m, slip_stick1.mdl)

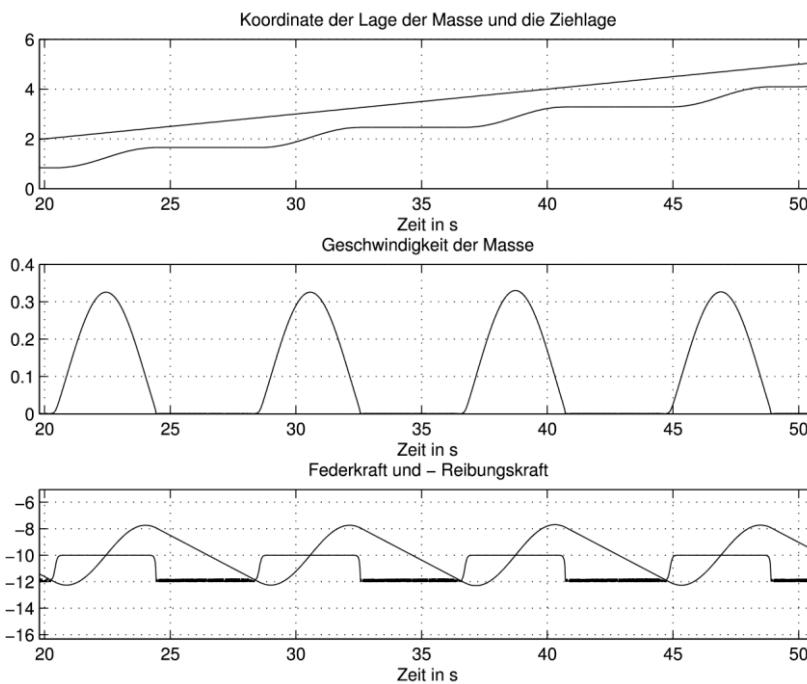


Abb. 1.85: Ergebnisse der Simulation mit Stribeck-Kennlinie für die Reibungskraft (slip_stick_1.m, slip_stick1.mdl)

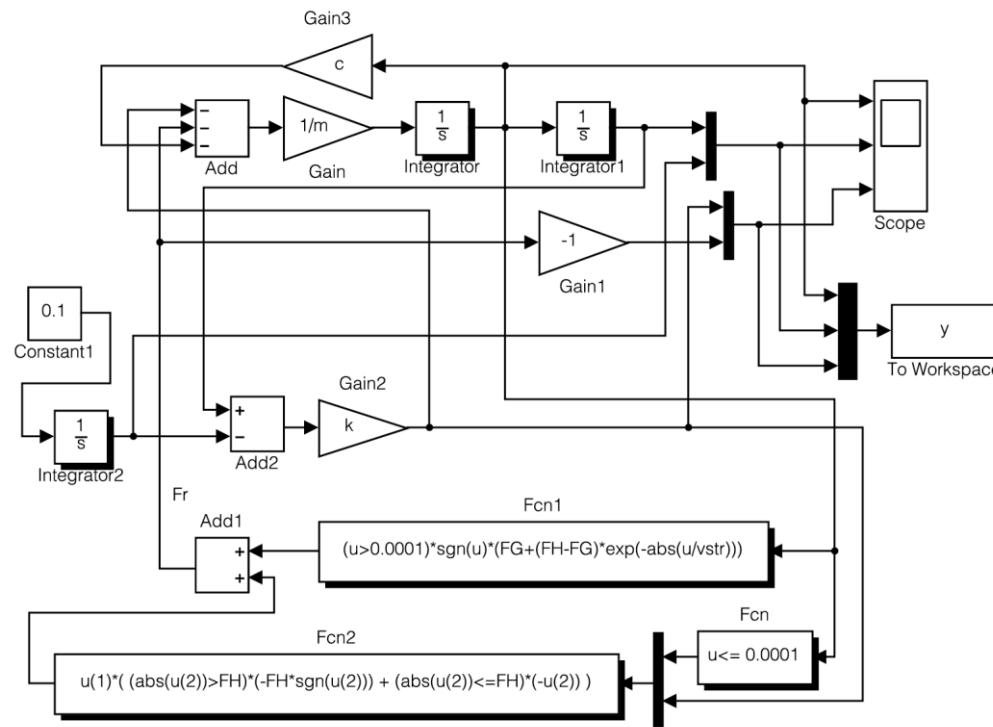


Abb. 1.86: Simulink-Modell des Systems aus Abb. 1.76b mit Definition der Reibungskraft im Haftzustand (slip_stick_2.m, slip_stick2.mdl)

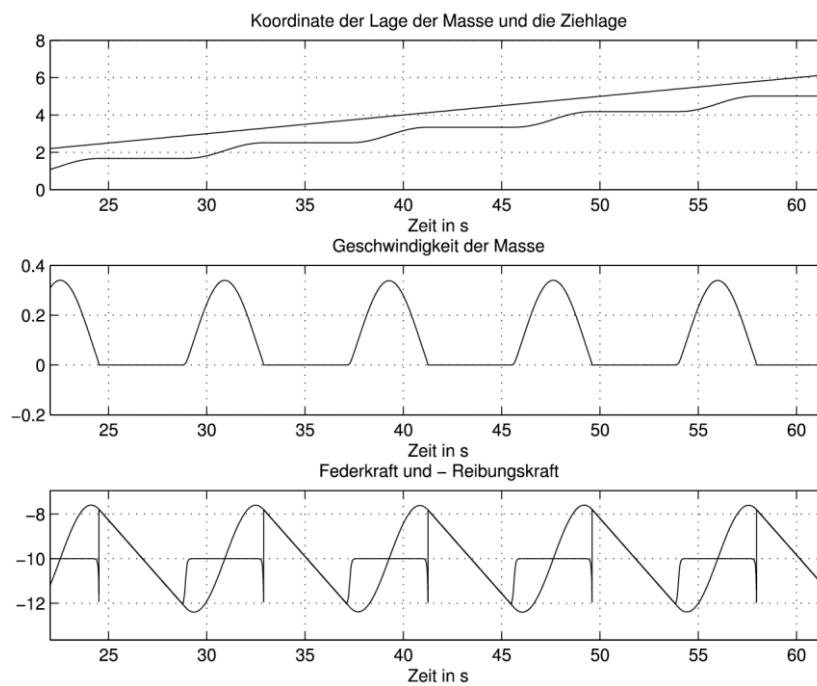


Abb. 1.87: Ergebnisse der Simulation mit Definition der Reibungskraft im Haftzustand (slip_stick_1.m, slip_stick1.mdl)

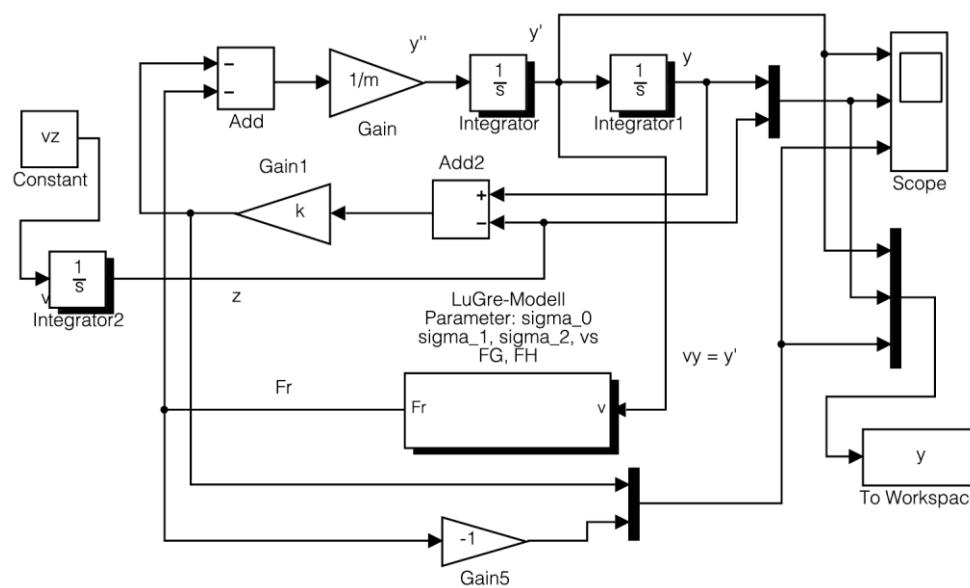


Abb. 1.88: Simulink-Modell mit LuGre-Modell für die Reibungskraft (slip_stick_21.m, slip_stick21.mdl)

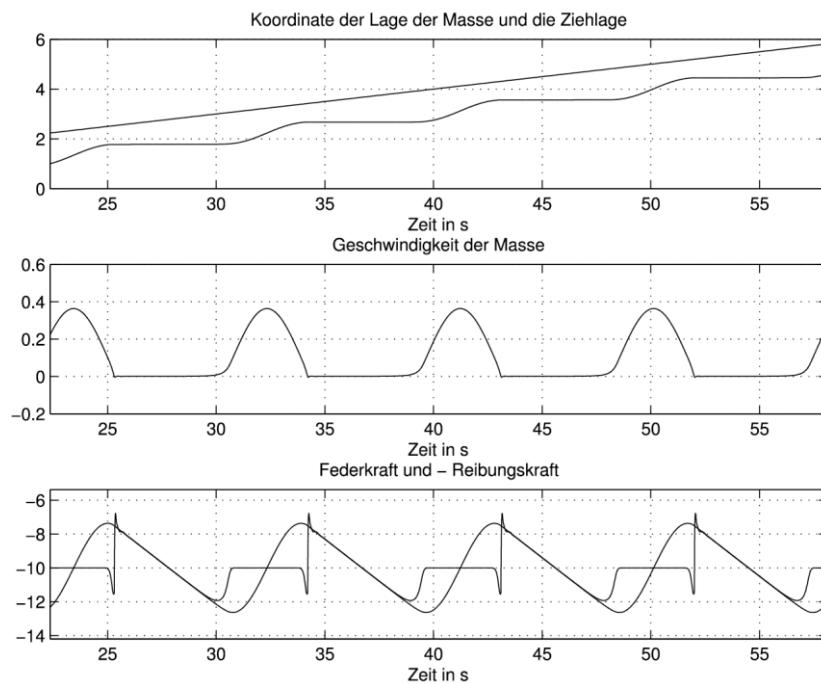


Abb. 1.89: Ergebnisse der Simulation mit LuGre-Modell für die Reibungskraft (slip_stick_21.m, slip_stick21.mdl)

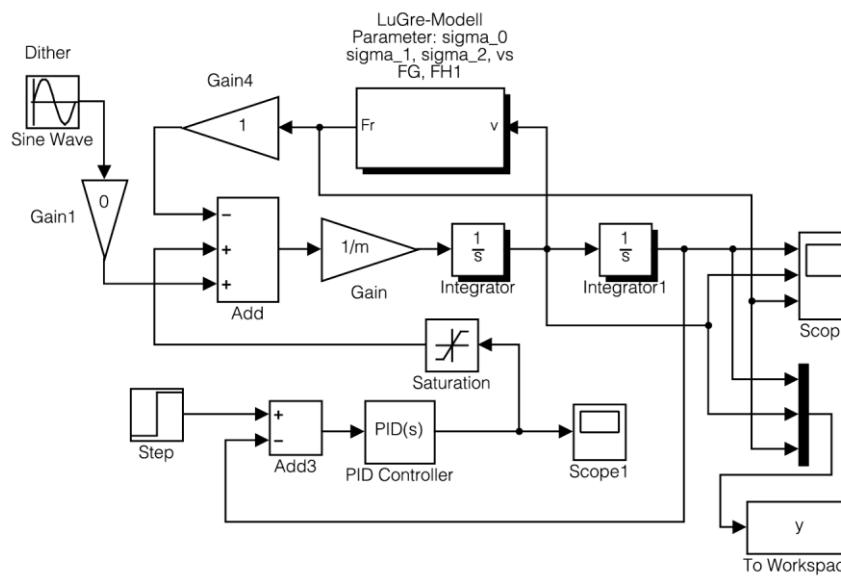


Abb. 1.90: Simulink-Modell der Positionsregelung (position_reg_1.m, position_reg1.mdl)

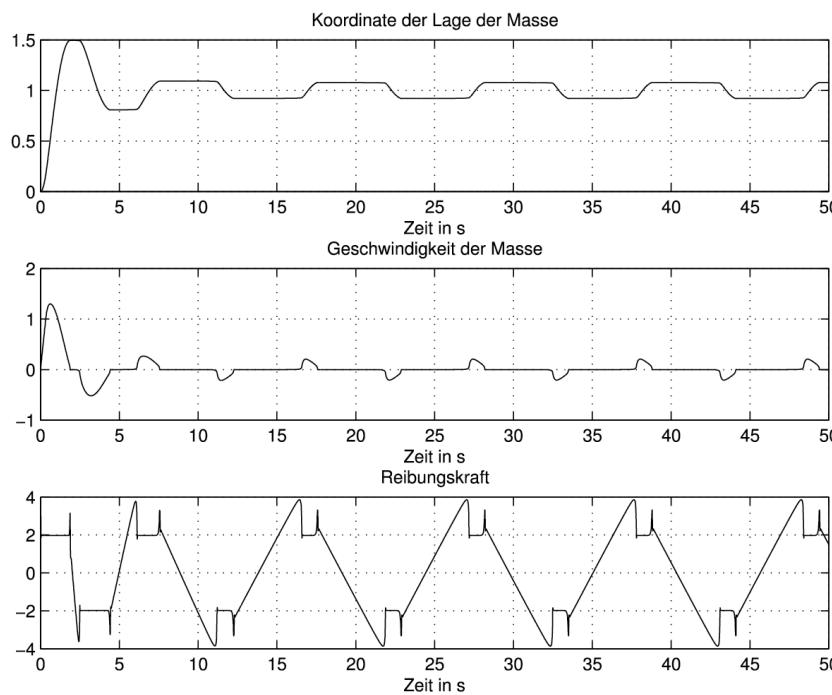


Abb. 1.91: Ergebnisse der Positionsregelung (position_reg_1.m, position_reg1.mdl)

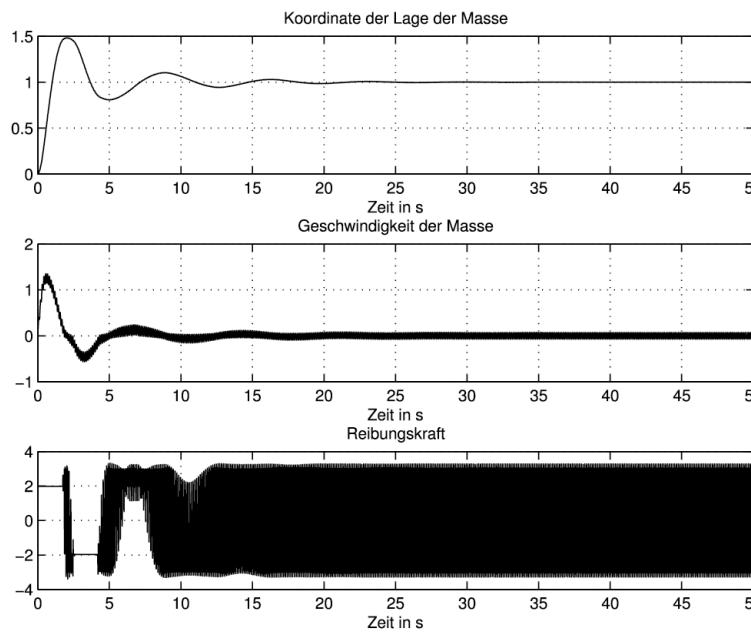


Abb. 1.92: Ergebnisse der Positionsregelung mit Dither-Signal (position_reg_1.m, position_reg1.mdl)

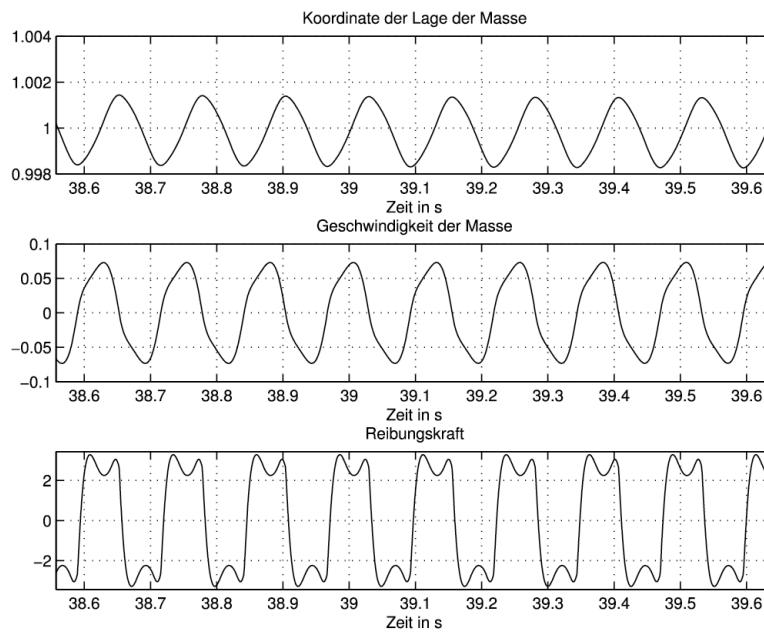


Abb. 1.93: Ergebnisse der Positionsregelung mit Dither-Signal (Ausschnitt) (position_reg_1.m, position_reg1.mdl)

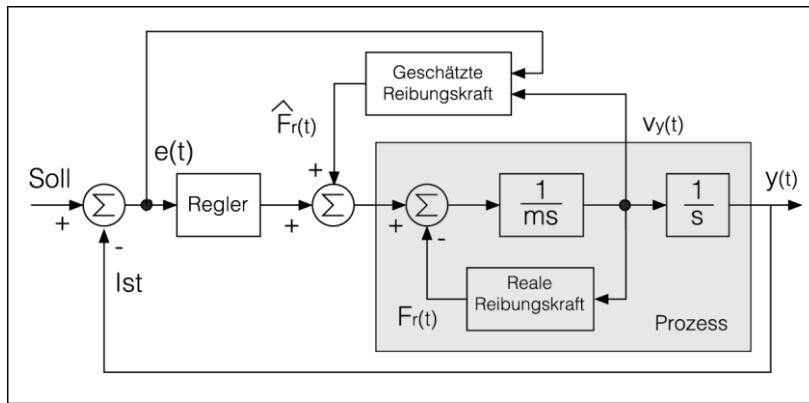


Abb. 1.94: Blockschema der Modell-Basierte-Reibungskompensation (position_reg_1.m, position_reg1.mdl)

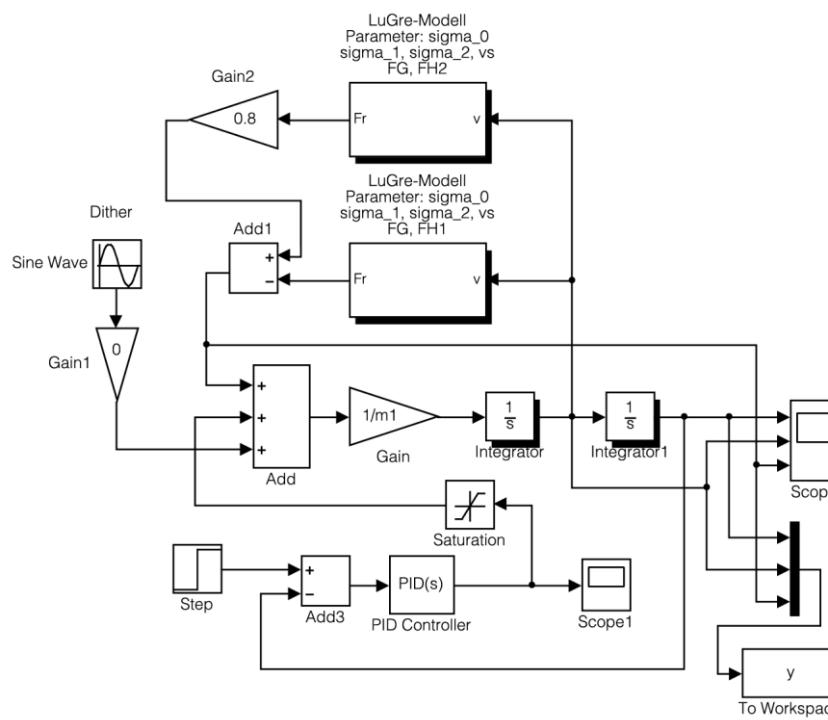


Abb. 1.95: Einfaches Simulink-Modell der Modell-Basierten-Reibungskompensation (position_reg_2.m, position_reg2.mdl)

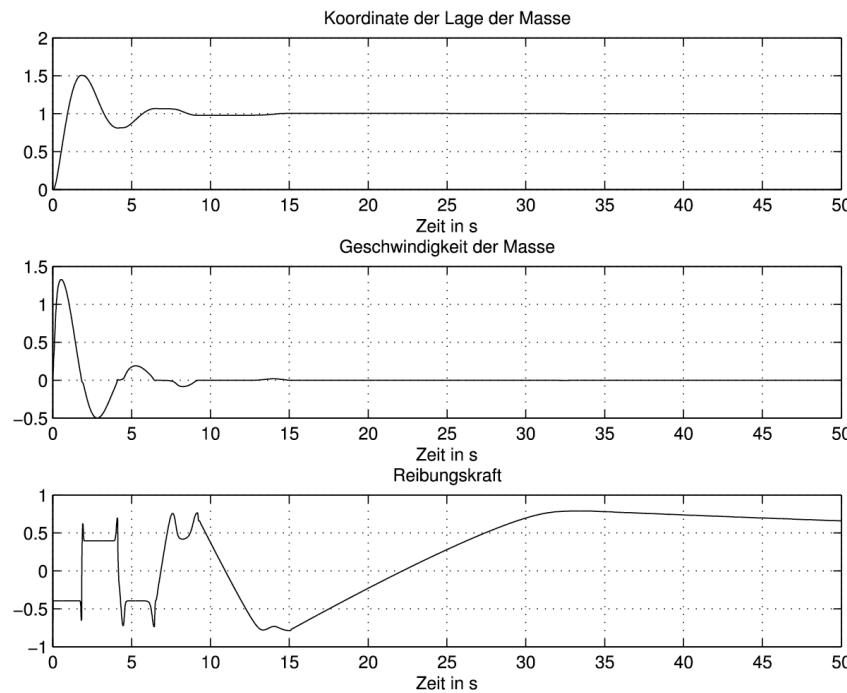


Abb. 1.96: Ergebnisse der Modell-Basierten-Reibungskompensation (position_reg_2.m, position_reg2.mdl)

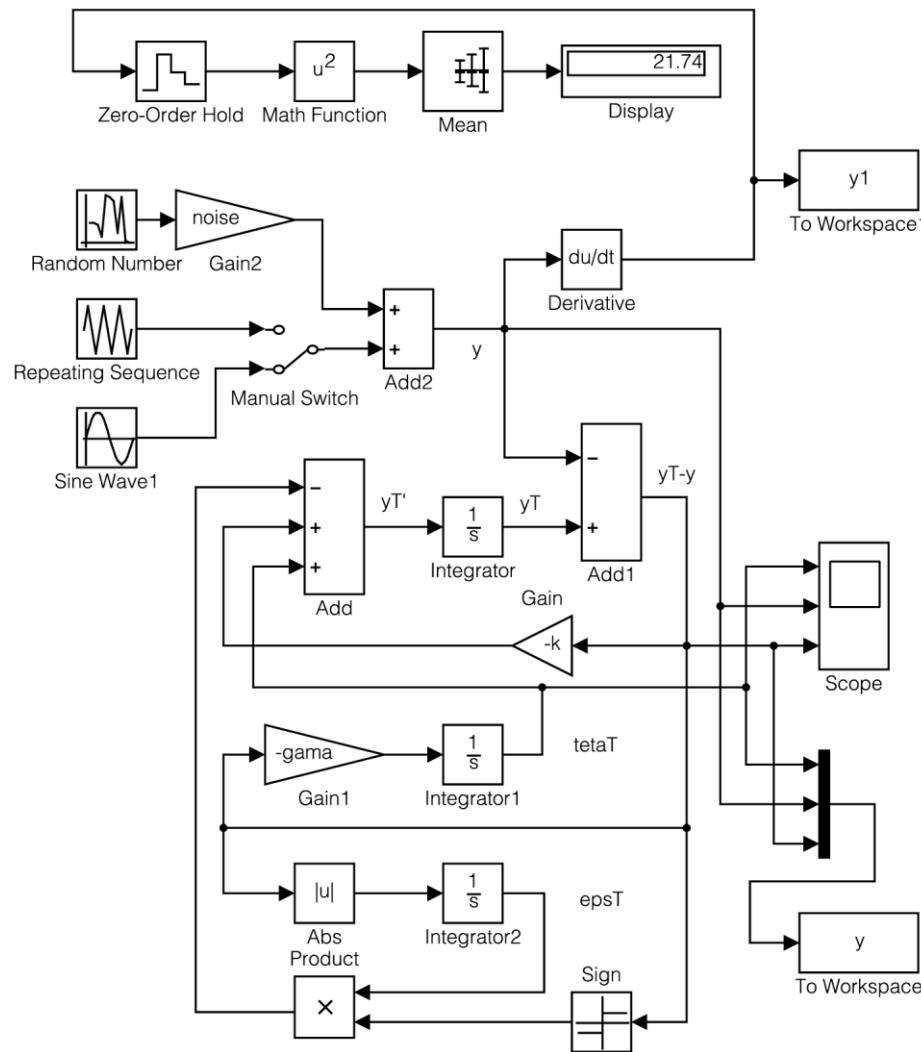


Abb. 1.97: Simulink-Modell zur Untersuchung des Beobachters (diff_filter_1.m, diff_filter1.mdl)

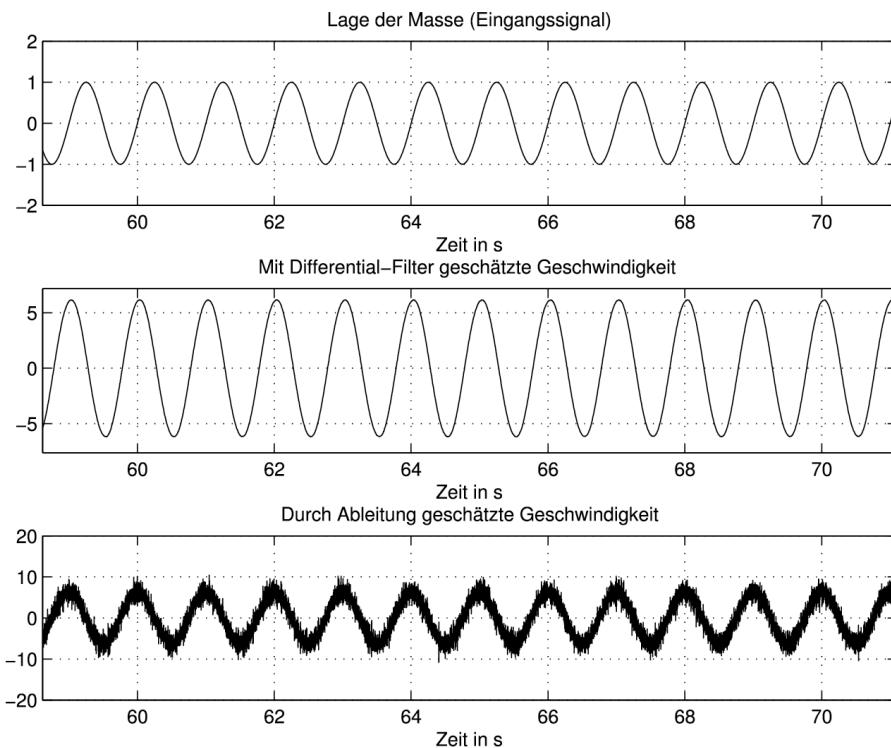


Abb. 1.98: Ergebnisse der Simulation des Beobachters für sinusförmige Anregung (Ausschnitt)
(diff_filter_1.m, diff_filter1.mdl)

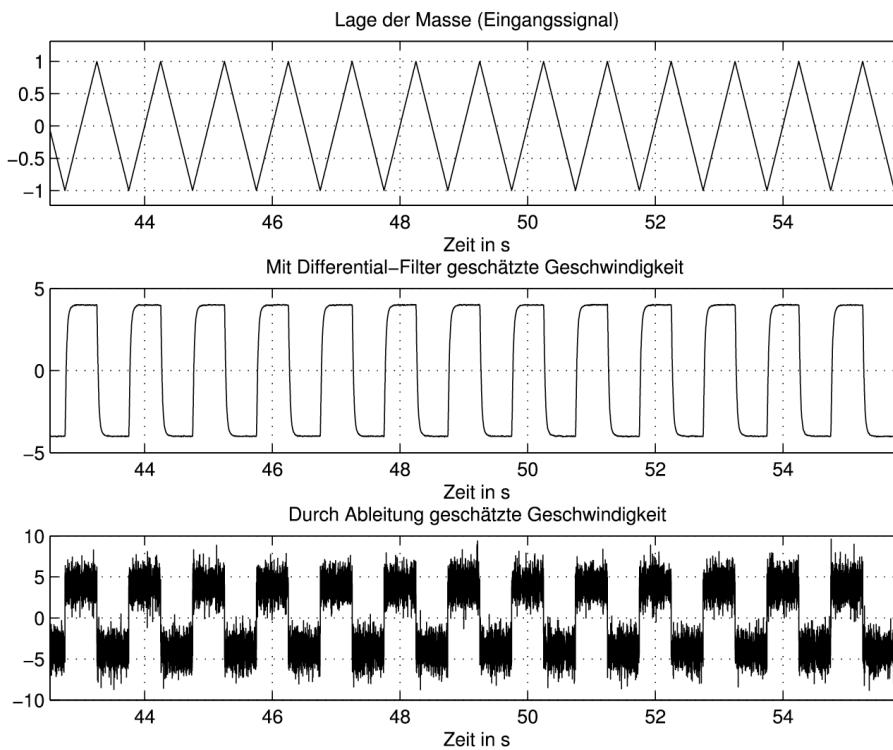


Abb. 1.99: Ergebnisse der Simulation des Beobachters für dreieckige Anregung (Ausschnitt)
(diff_filter_1.m, diff_filter1.mdl)

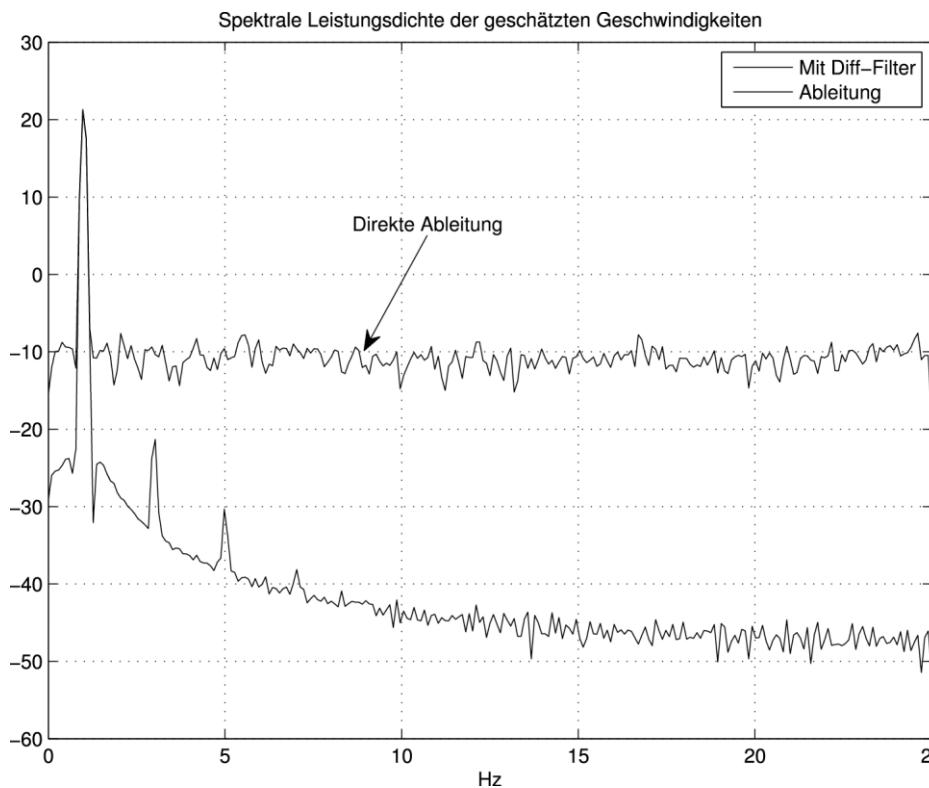


Abb. 1.100: Spektrale Leistungsdichten der geschätzten Geschwindigkeiten für sinusförmige Anregung
(diff_filter_1.m, diff_filter1.mdl)

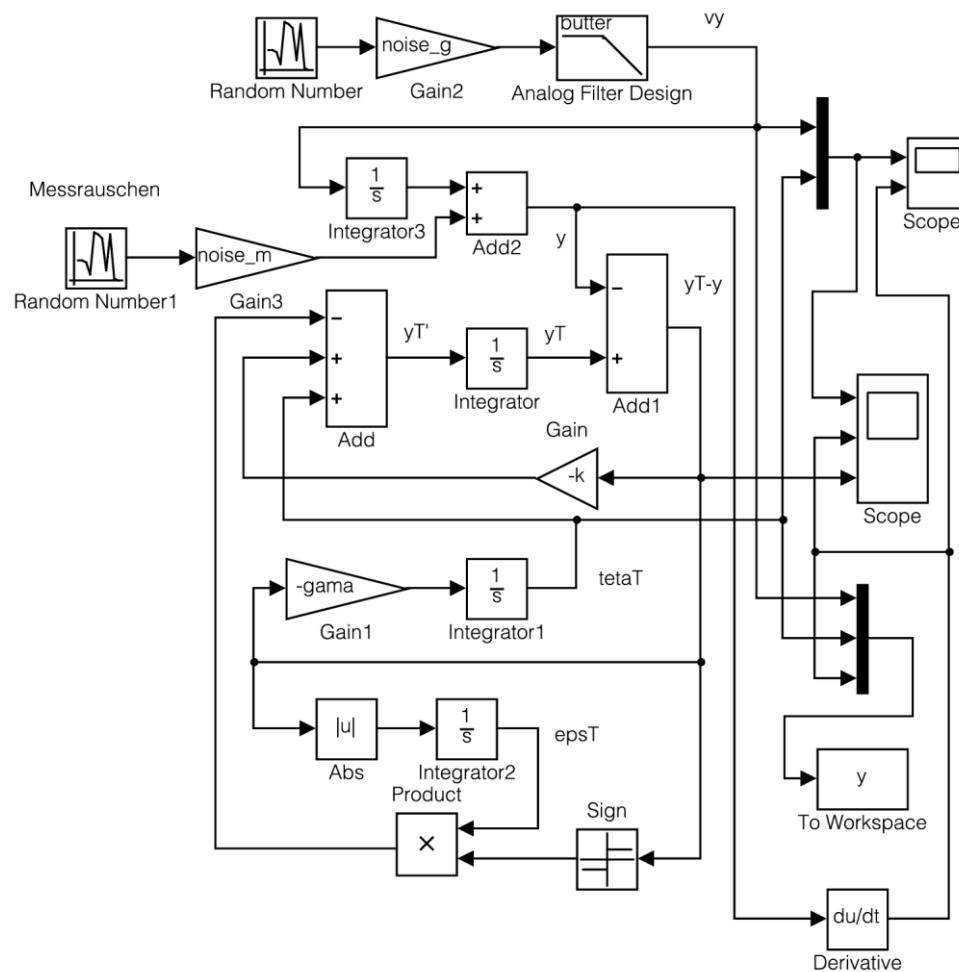


Abb. 1.101: Simulink-Modell für die Untersuchung des Beobachters mit bandbegrenztem Signal
(diff_filter_2.m, diff_filter2.mdl)

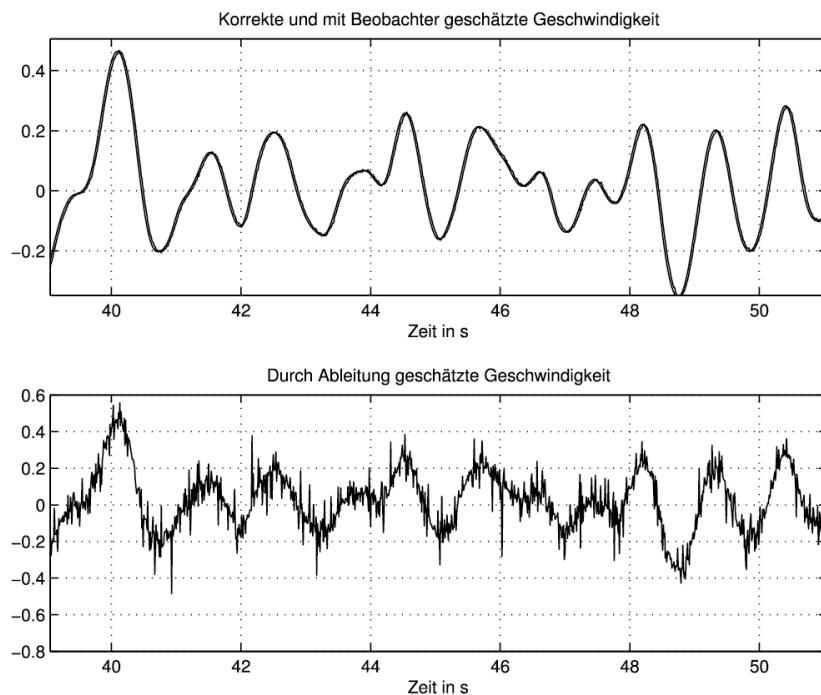


Abb. 1.102: Ergebnisse für eine Bandbreite von 1 Hz und Schrittweite der Simulation von 0,01 s
(diff_filter_2.m, diff_filter2.mdl)

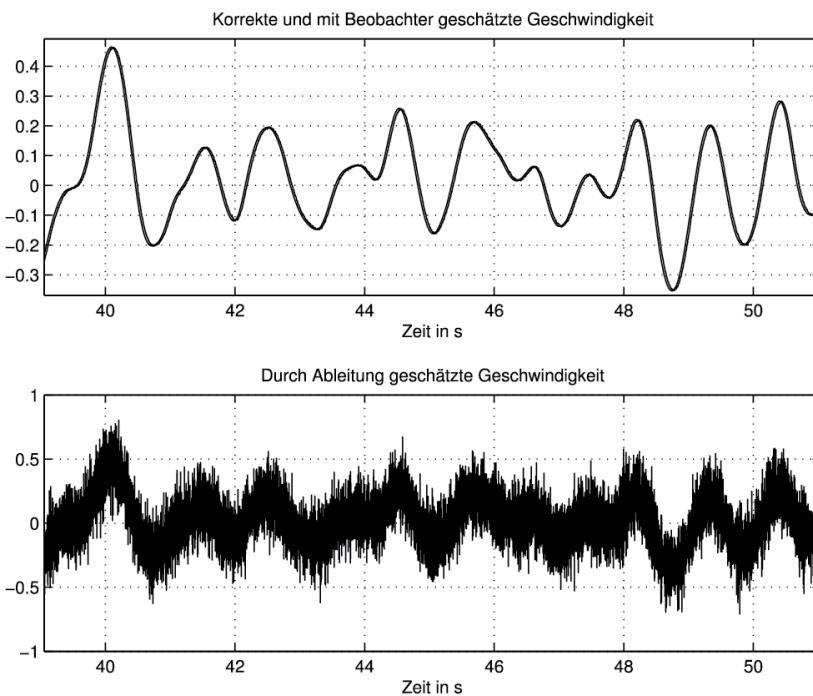


Abb. 1.103: Ergebnisse für eine Bandbreite von 1 Hz und Schrittweite der Simulation von 0,001 s
(diff_filter_2.m, diff_filter2.mdl)

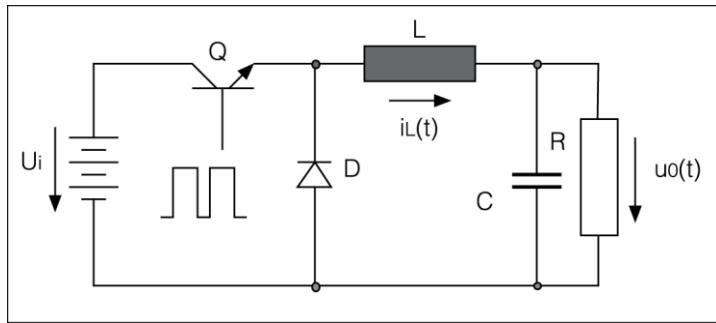


Abb. 2.1: Schaltung des Abwärtswandler (Buck-Wandlers)

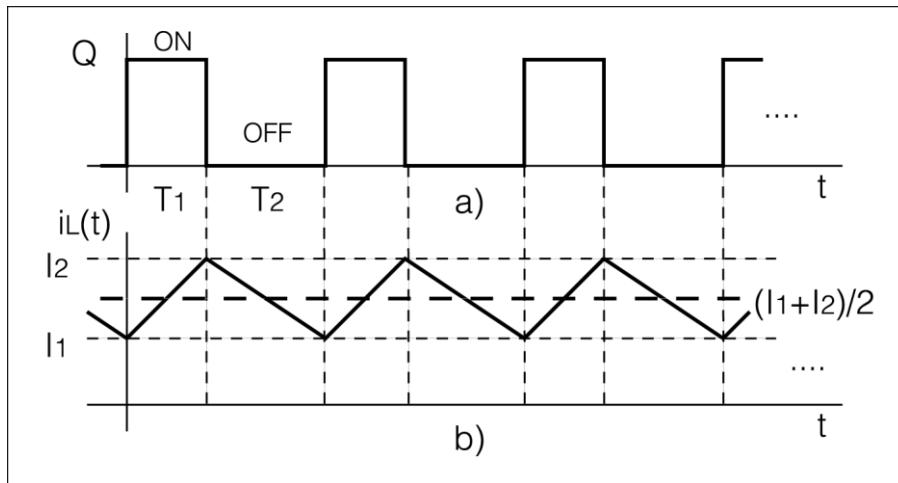


Abb. 2.2: Strom der Induktivität für $C \rightarrow \infty$

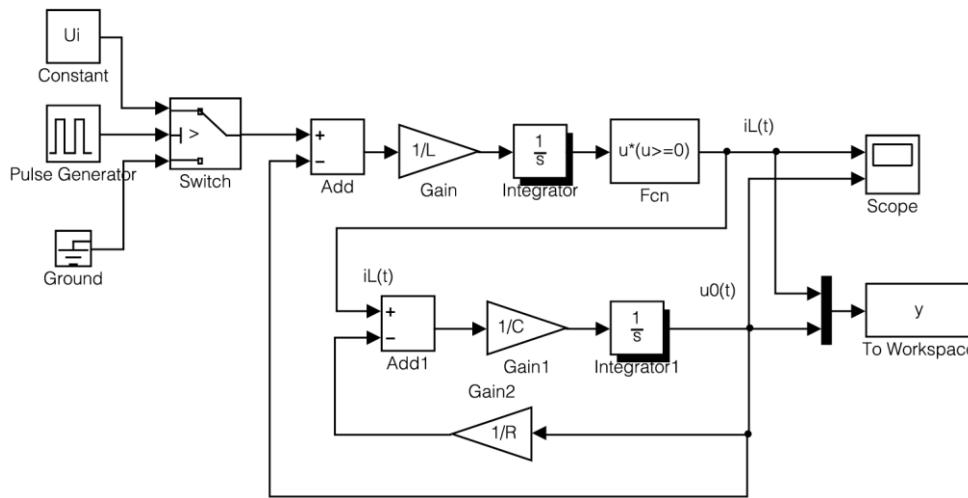


Abb. 2.3: Simulink-Modell des DC-DC-Wandlers (buck_down_1.m, buck_down1.mdl)

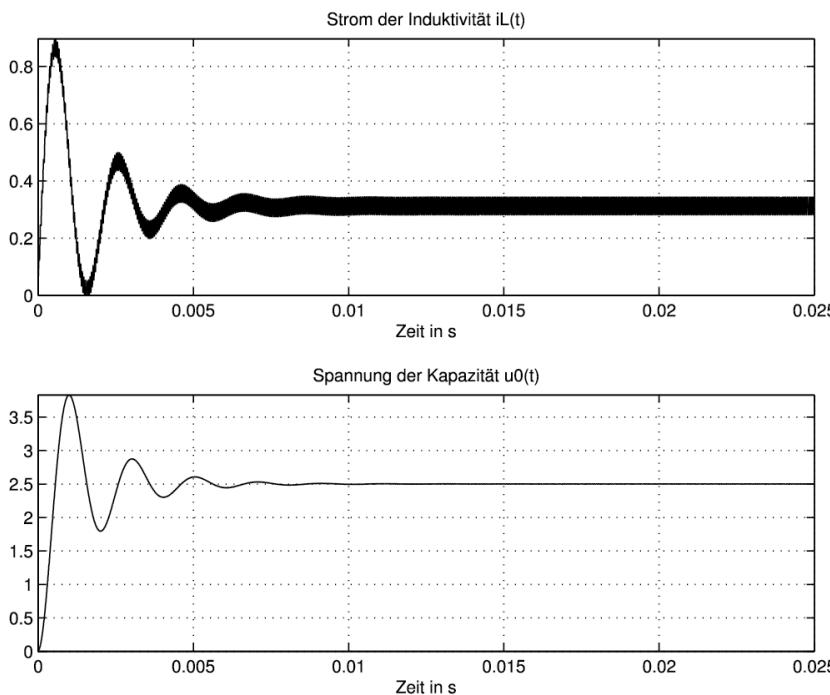


Abb. 2.4: Strom $i_L(t)$ und Spannung $u_0(t)$ des DC-DC-Wandlers (buck down_1.m)

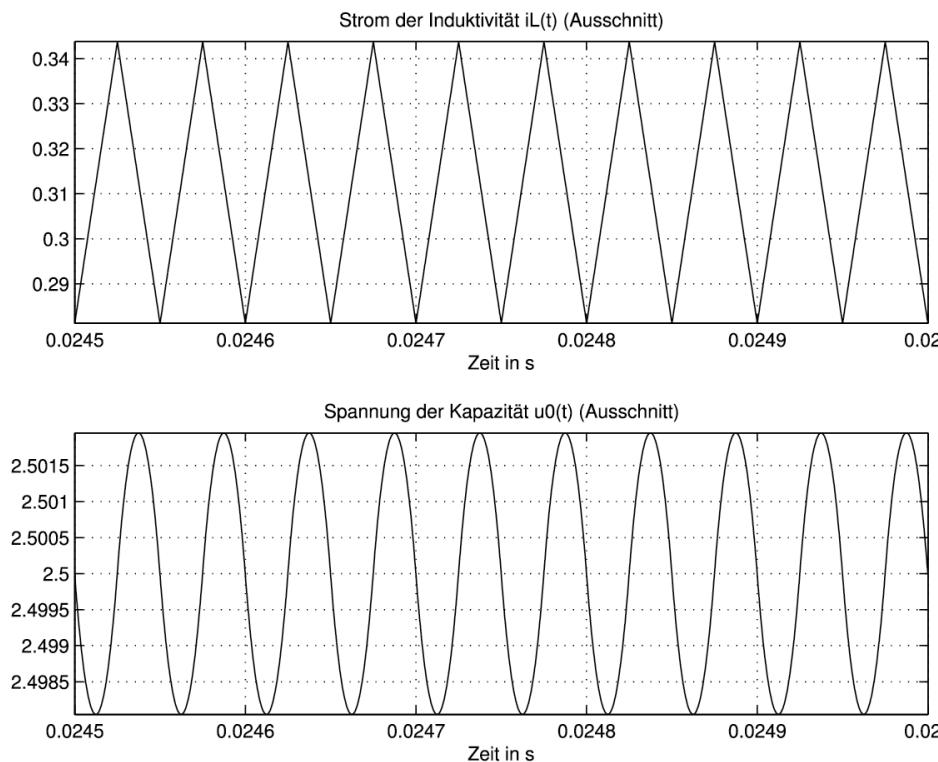


Abb. 2.5: Strom $i_L(t)$ und Spannung $u_0(t)$ des DC-DC-Wandlers (Ausschnitt) (buck_down_1.m)

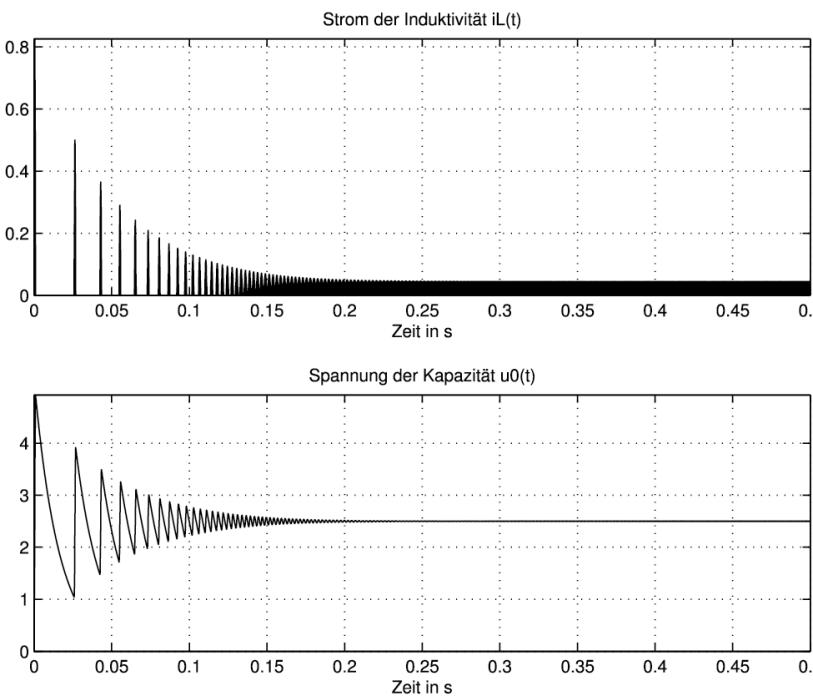


Abb. 2.6: Strom $i_L(t)$ und Spannung $u_0(t)$ des DC-DC-Wandlers im lückenbehafteten Betrieb (buck_down_1.m)

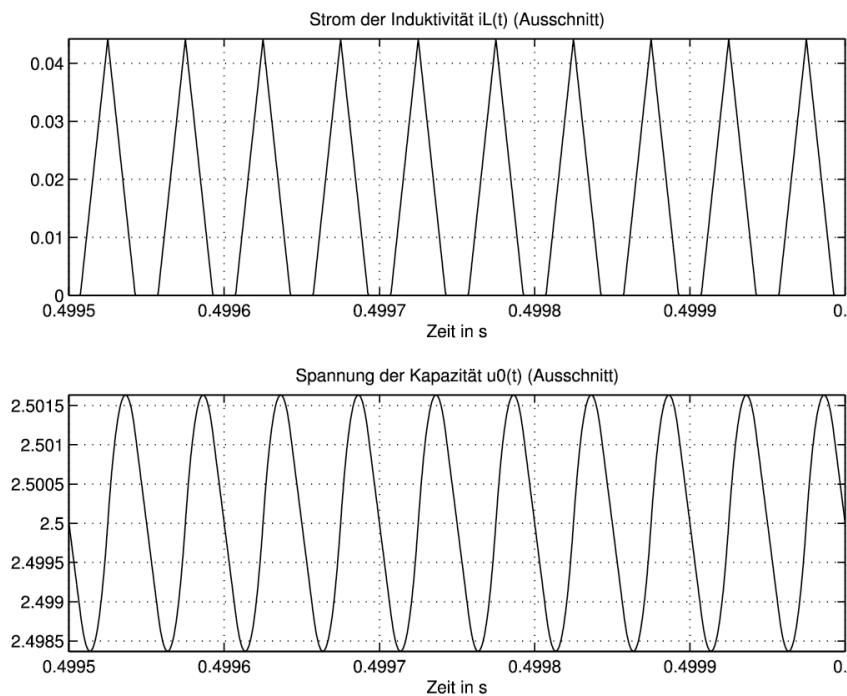


Abb. 2.7: Strom $i_L(t)$ und Spannung $u_0(t)$ des DC-DC-Wandlers im lückenbehafteten Betrieb (Ausschnitt) (buck_down_1.m)

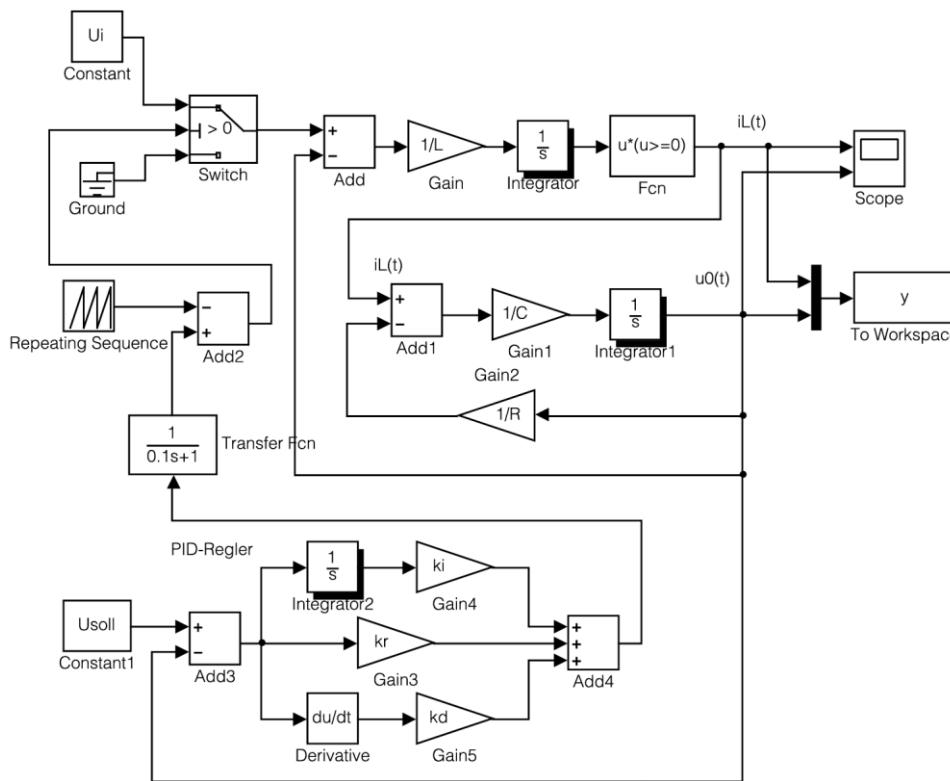


Abb. 2.8: Simulink-Modell des DC-DC-Wandlers mit PID-Spannungsregler (buck_down_2.m, buck_down2.mdl)

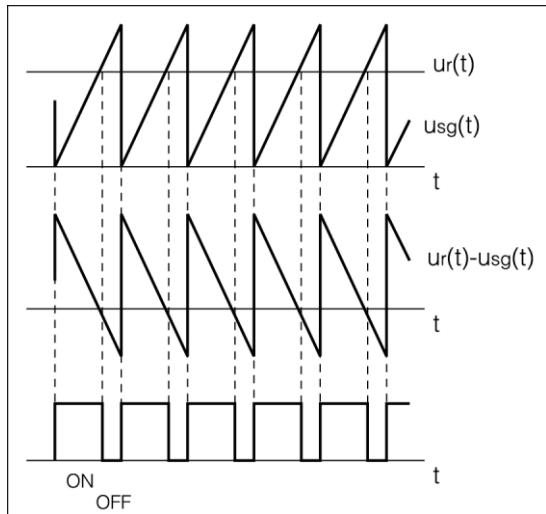


Abb. 2.9: Steuerung des Tastverhältnisses über die Spannung $u_r(t)$ (buck_down_2.m, buck_down2.mdl)

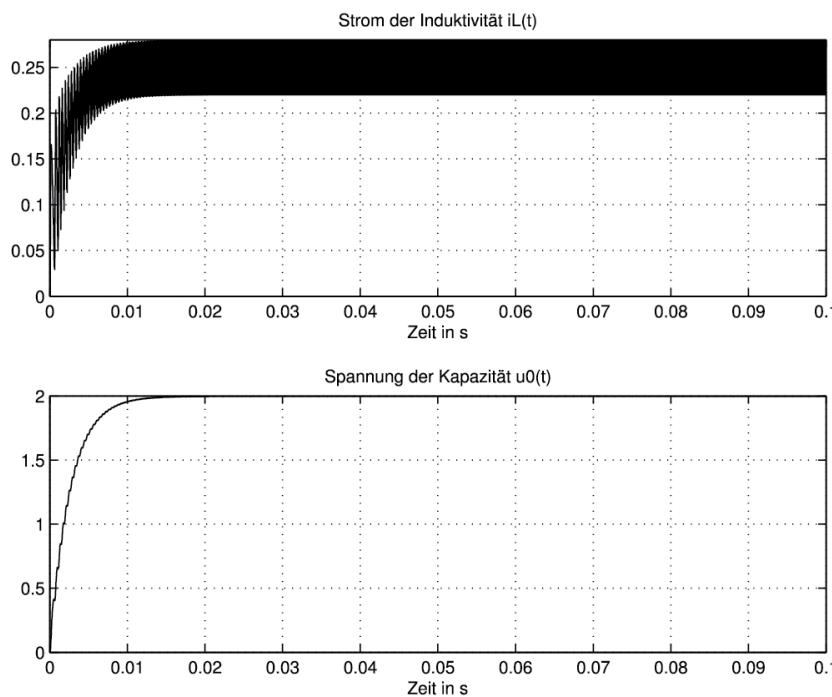


Abb. 2.10: Einschwingen der Variablen für eine Sollspannung von 2 V (buck_down_2.m, buck_down2.mdl)

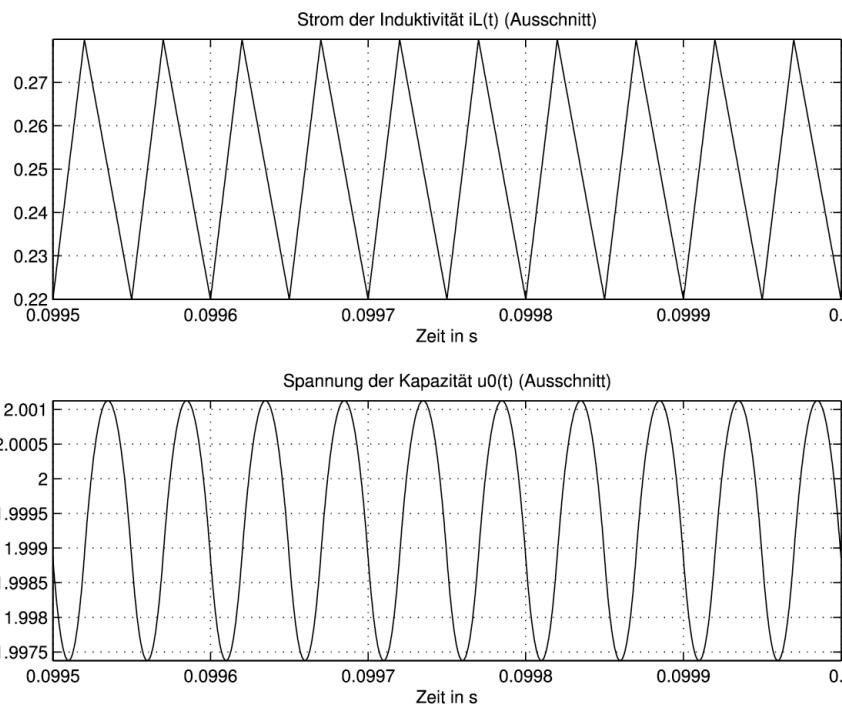


Abb. 2.11: Der Strom $i_L(t)$ und Spannung $u_0(t)$ für eine Sollspannung von 2 V im stationären Zustand
(buck_down_2.m, buck_down2.mdl)

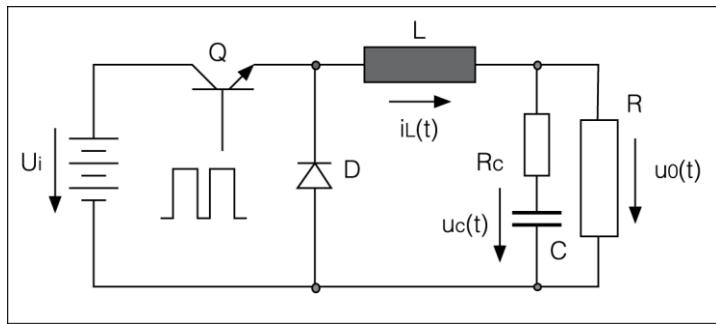


Abb. 2.12: Step-Down-Wandler mit nicht idealem Kondensator

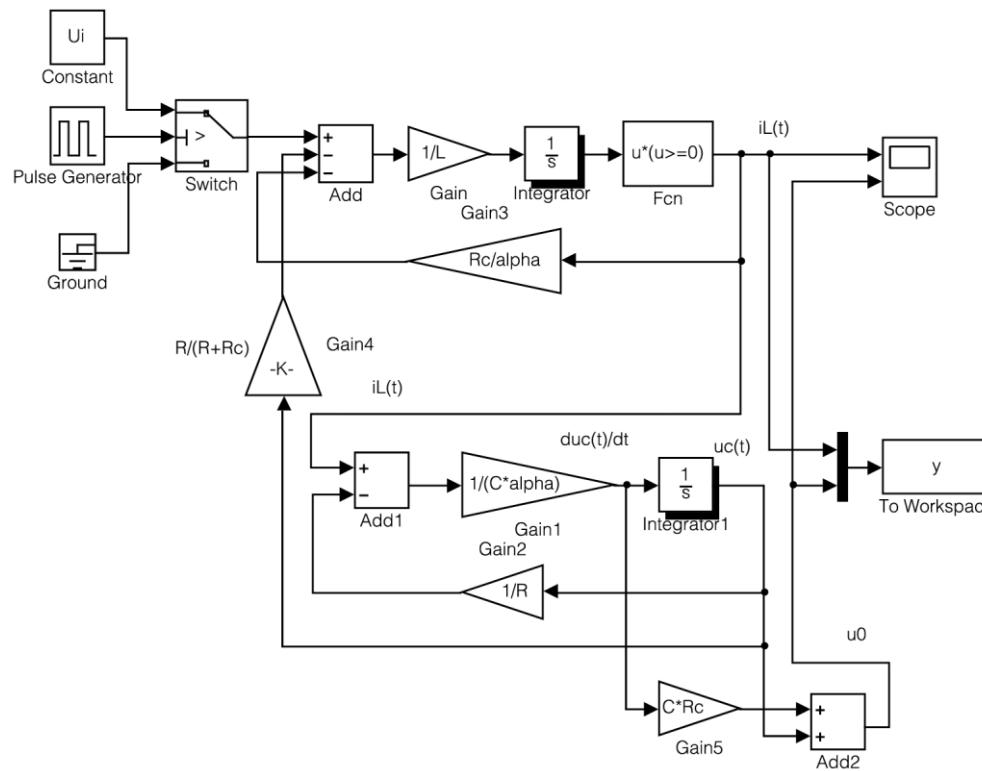


Abb. 2.13: Simulink-Modell des Wandlers mit nicht idealem Kondensator (buck_down3.m, buck_down_3.mdl)

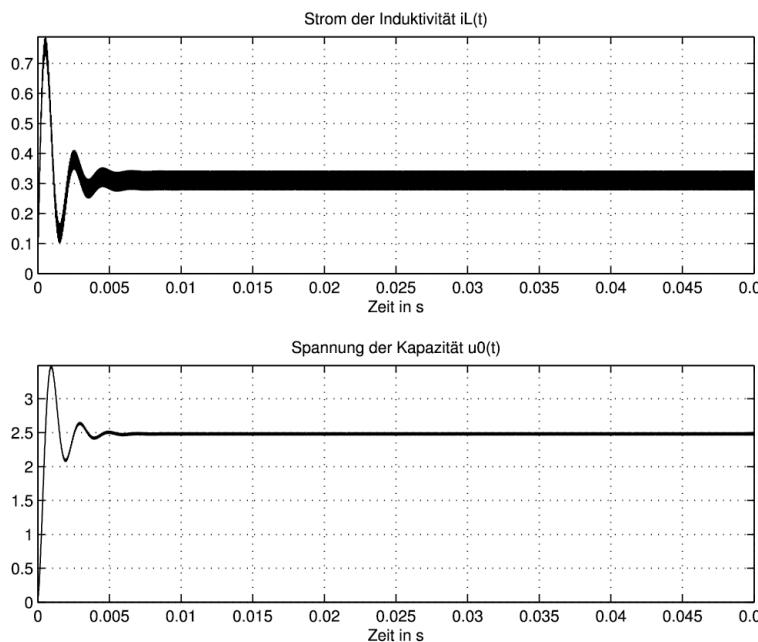


Abb. 2.14: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des Wandlers mit nicht idealem Kondensator
(buck_down_3.m, buck_down3.mdl)

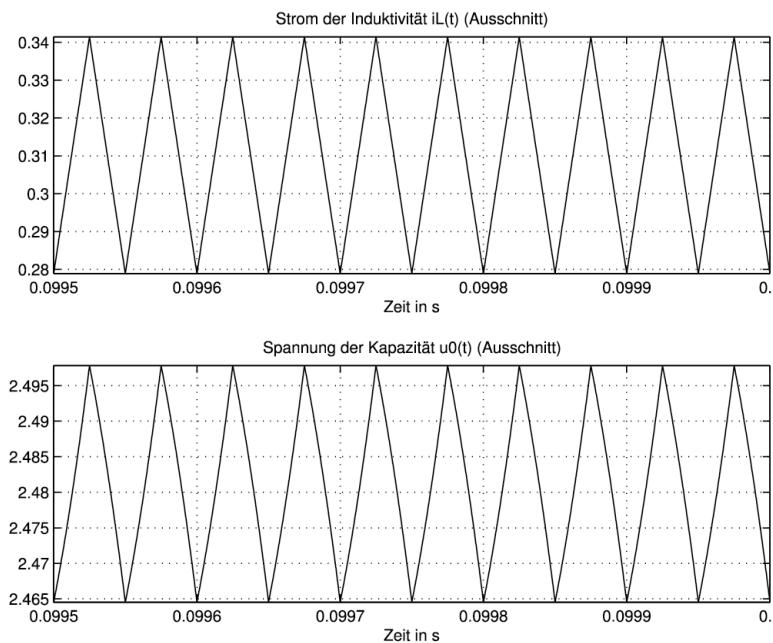


Abb. 2.15: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des Wandlers mit nicht idealem Kondensator (Ausschnitt)
(buck_down_3.m, buck_down3.mdl)

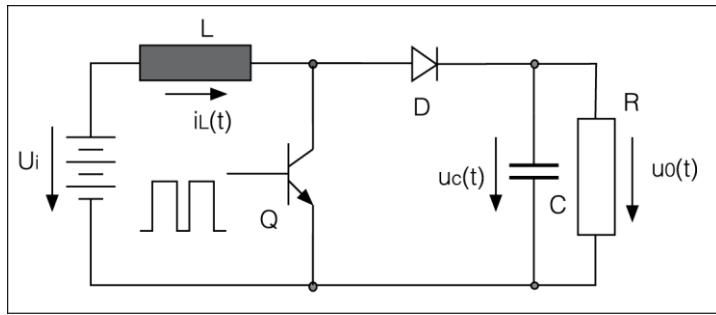


Abb. 2.16: Step-Up-Wandler mit idealem Kondensator

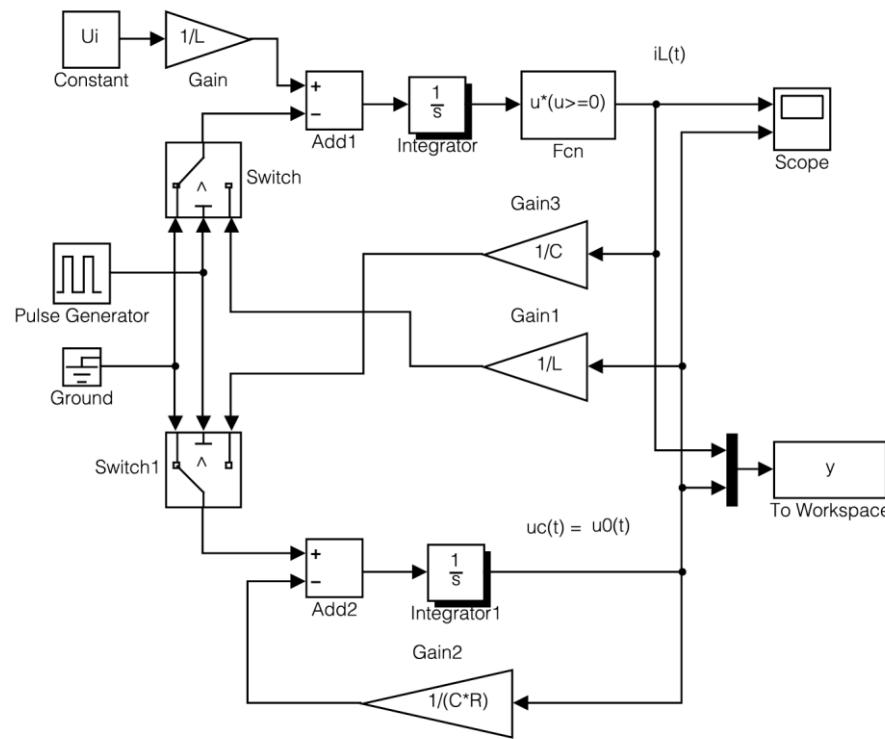


Abb. 2.17: Simulink-Modell des DC-DC-Step-Up-Wandlers (boost_up1.m, boost_up_1.mdl)

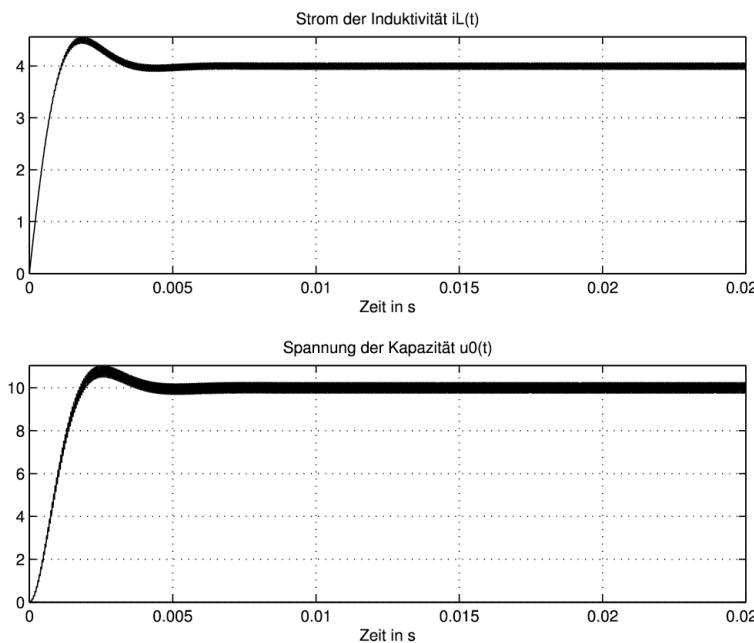


Abb. 2.18: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des DC-DC-Step-Up-Wandlers (boost_up1.m, boost_up_1.mdl)

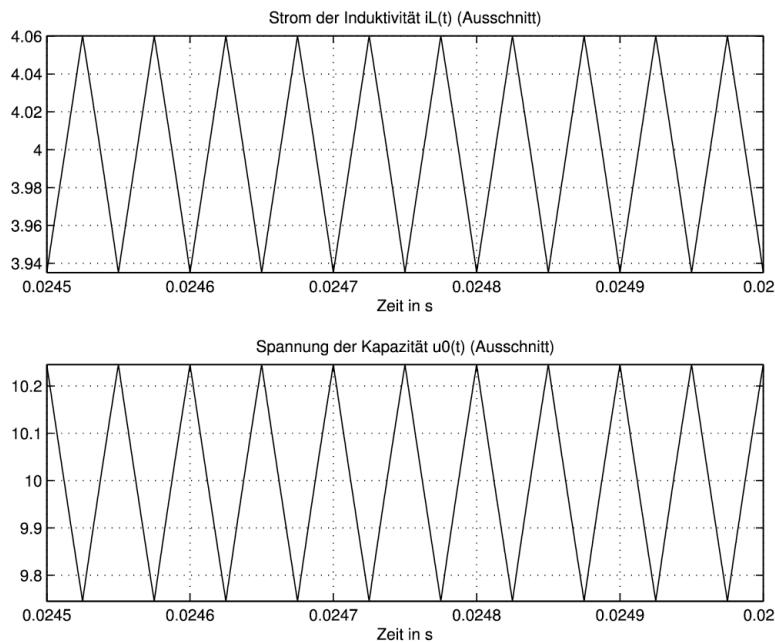


Abb. 2.19: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des DC-DC-Step-Up-Wandlers (Ausschnitt)
(boost_up1.m, boost_up_1.mdl)

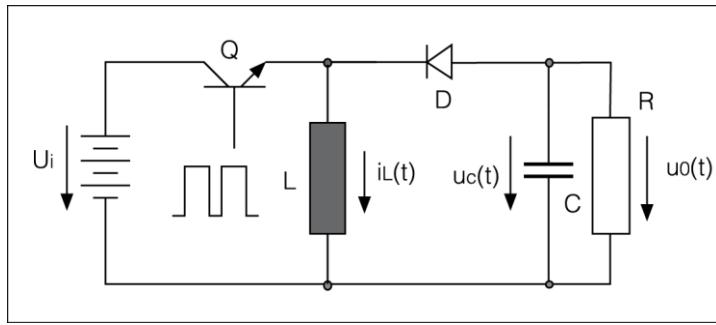


Abb. 2.20: Step-Up-Wandler mit idealem Kondensator

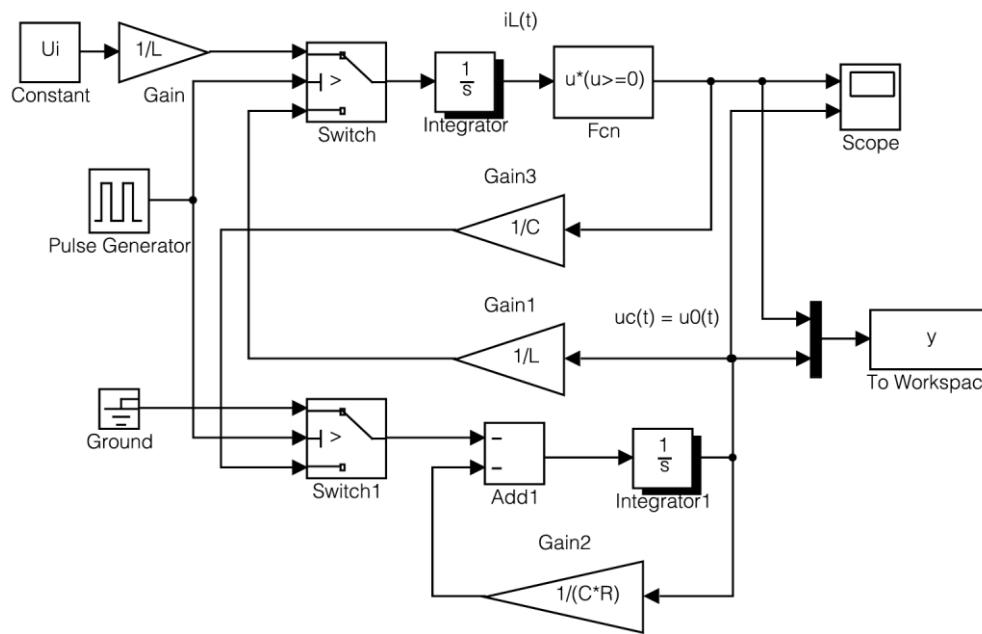


Abb. 2.21: Simulink-Modell des Invertierender-Wandlers (buck_boost1.m, buck_boost1.mdl)

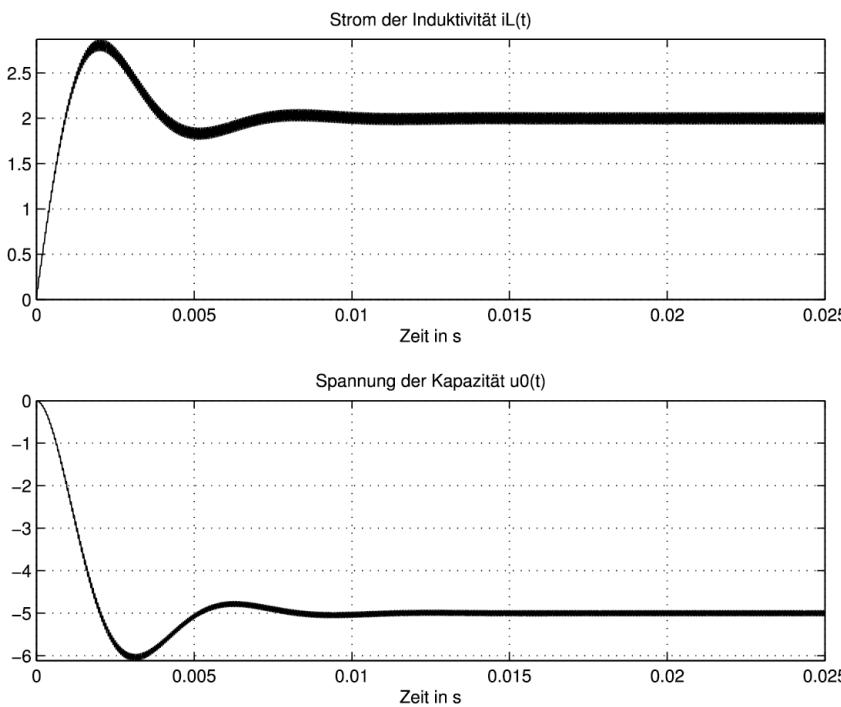


Abb. 2.22: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des Invertierender-Wandlers (buck_boost1.m, buck_boost1.mdl)

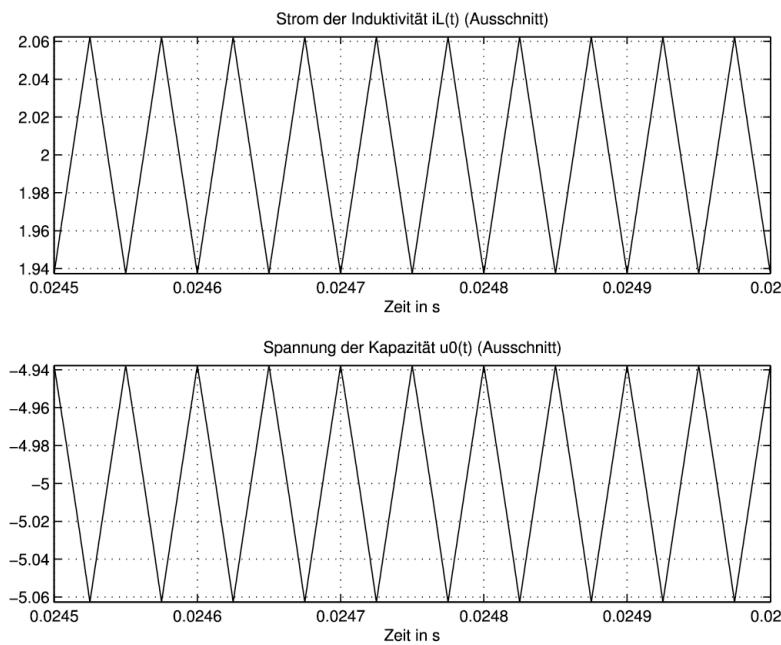


Abb. 2.23: Strom $i_L(t)$ und Ausgangsspannung $u_0(t)$ des Invertierender-Wandlers (Ausschnitt)
(buck_boost1.m, buck_boost1.mdl)

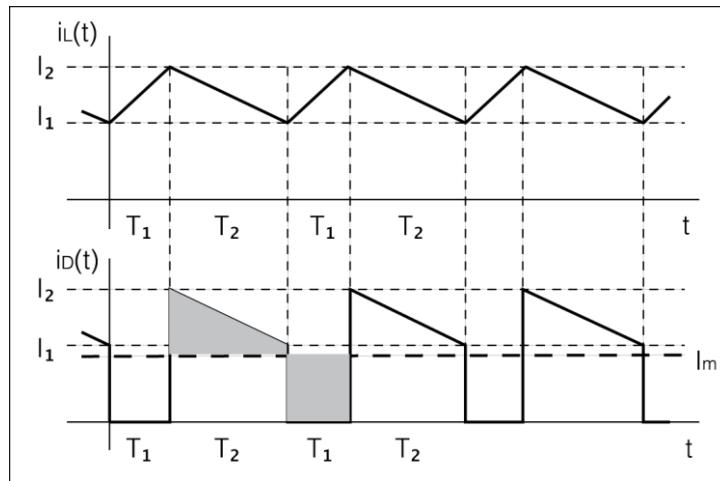


Abb. 2.24: Strom $i_L(t)$ und Strom der Diode

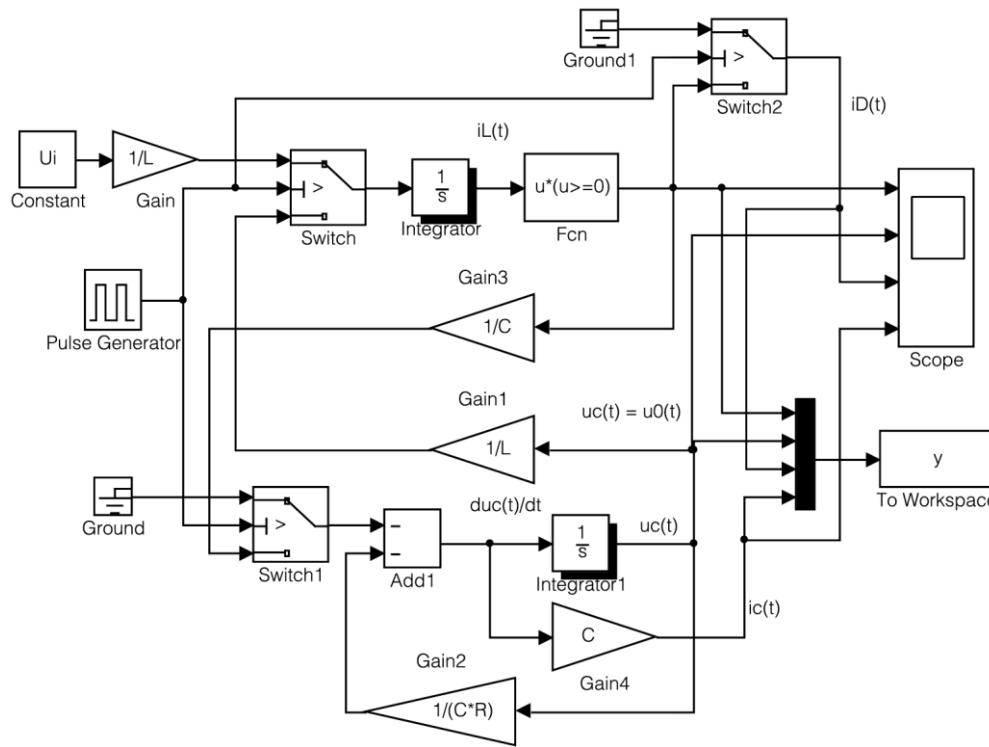


Abb. 2.25: Simulink-Modell des Invertierender-Wandlers in dem auch der Strom der Diode und der Kapazität simuliert werden (buck_boost2.m, buck_boost2.mdl)

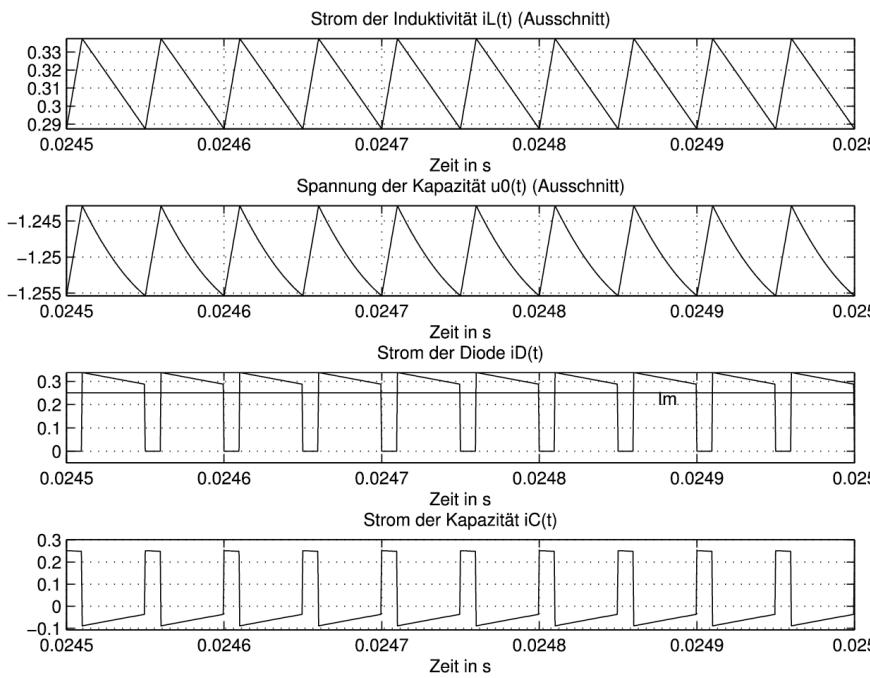


Abb. 2.26: Ergebnisse die den Strom der Diode und der Kapazität enthalten (buck_boost2.m, buck_boost2.mdl)

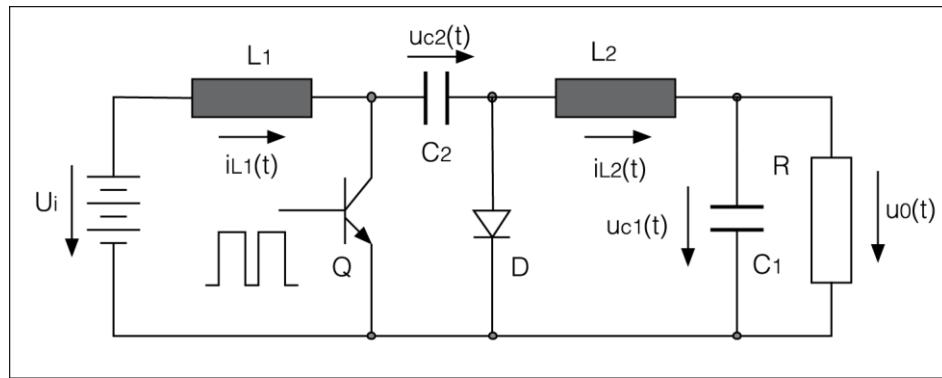


Abb. 2.27: Schaltung des DC-DC-Cuk-Wandlers

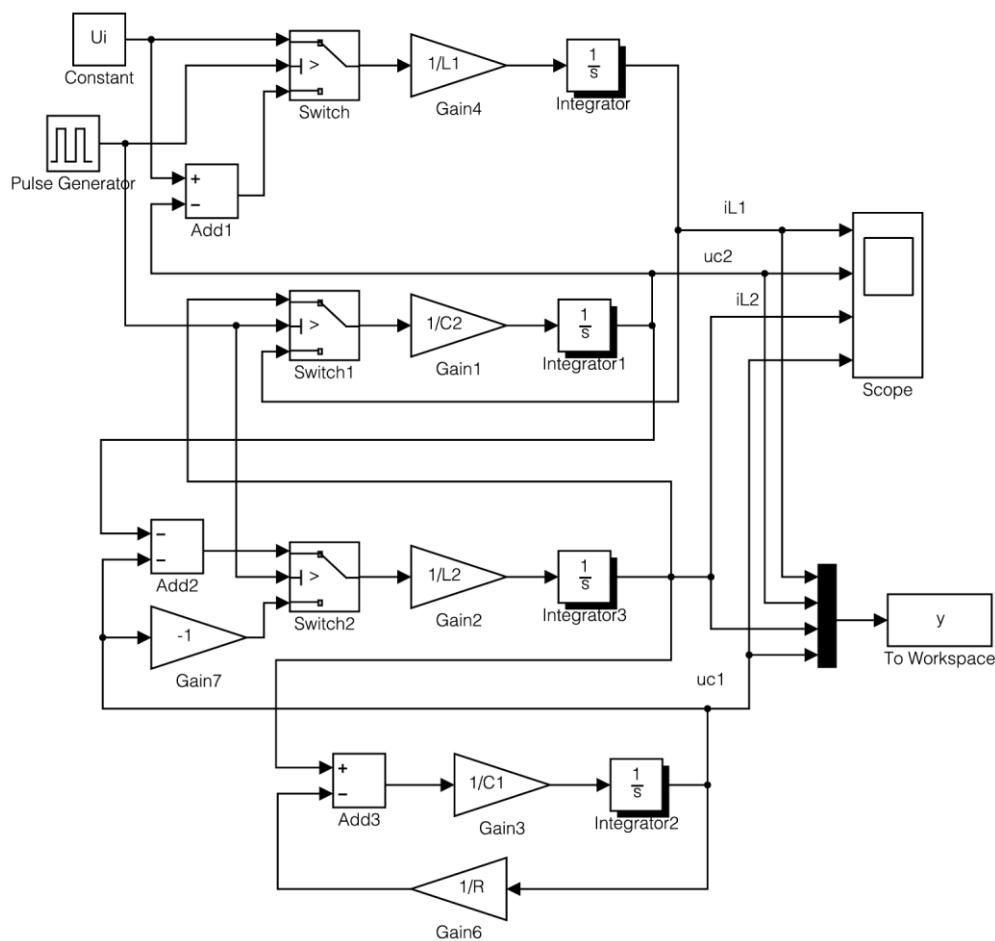


Abb. 2.28: Simulink-Modell des DC-DC-Cuk-Wandlers (cuk1.m, cuk_1.mdl)

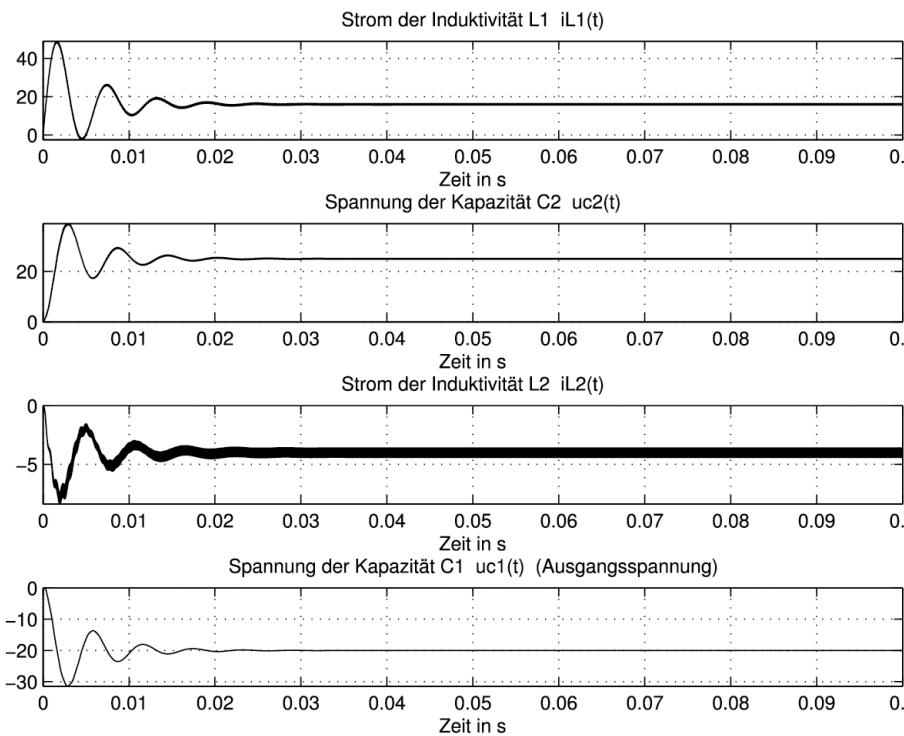


Abb. 2.29: Zustandsvariablen des DC-DC-Cuk-Wandlers (cuk1.m, cuk_1.mdl)

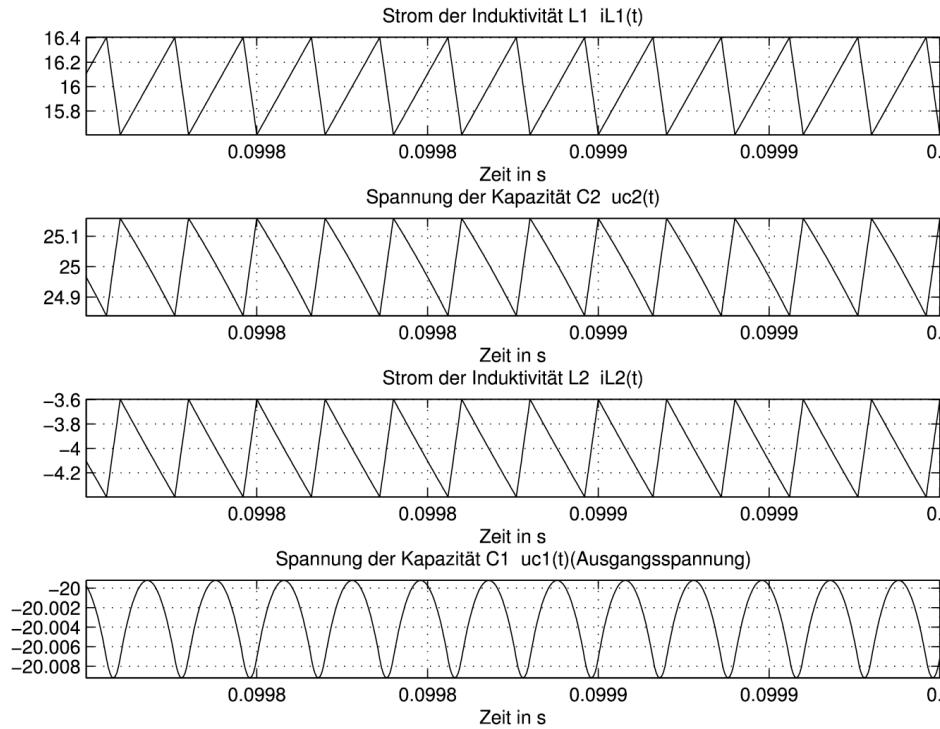


Abb. 2.30: Zustandsvariablen des DC-DC-Cuk-Wandlers (Ausschnitt im stationären Zustand (cuk1.m, cuk_1.mdl)

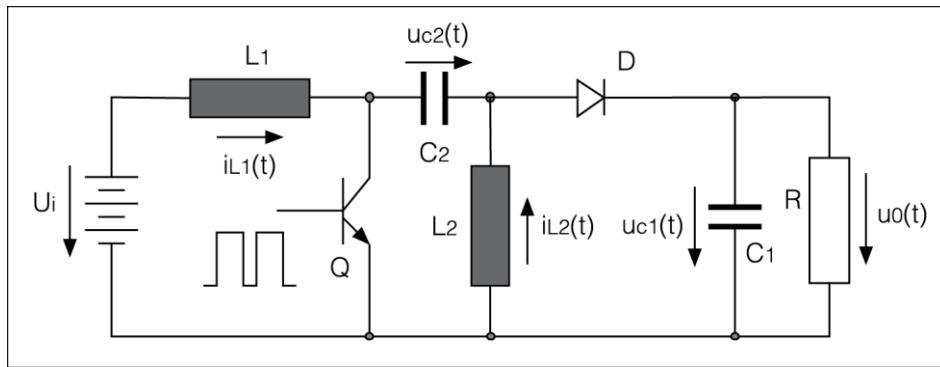


Abb. 2.31: DC-DC-SEPIC-Wandler mit nicht gekoppelten Induktivitäten

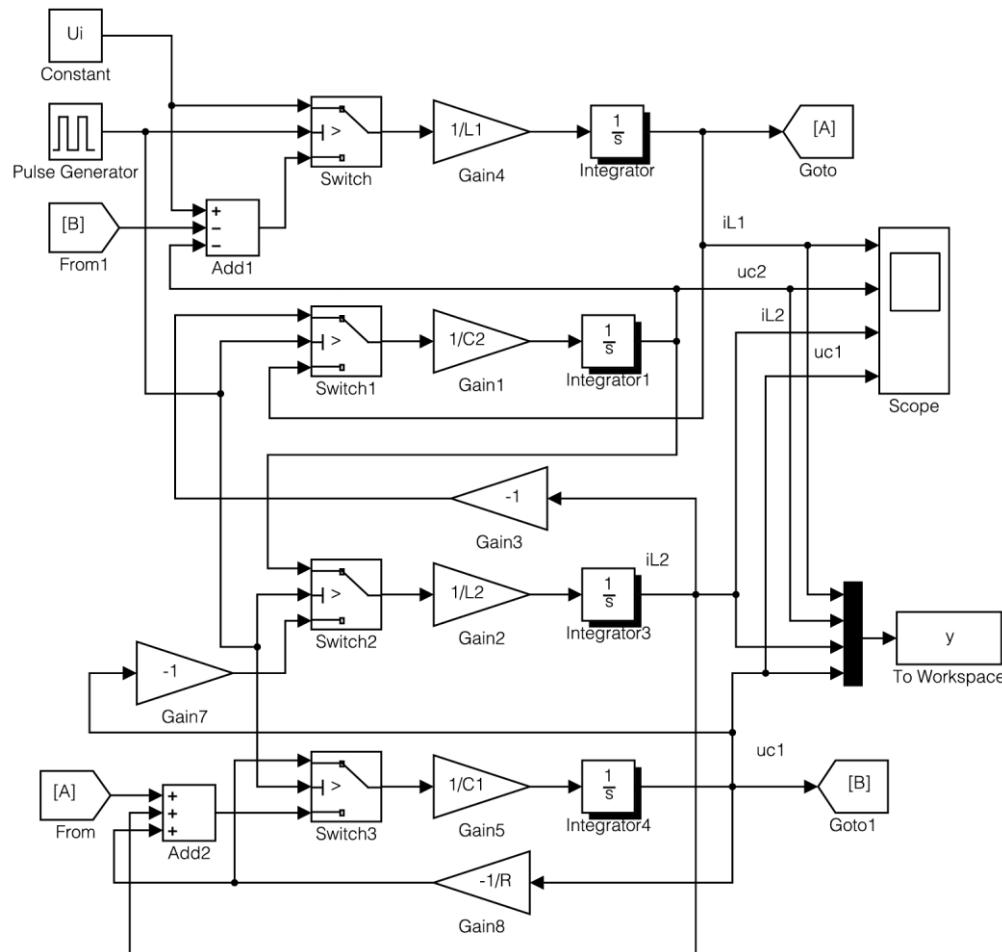


Abb. 2.32: Simulink-Modell des DC-DC-Sepic-Wandlers (sepic1.m, sepic_1.mdl)

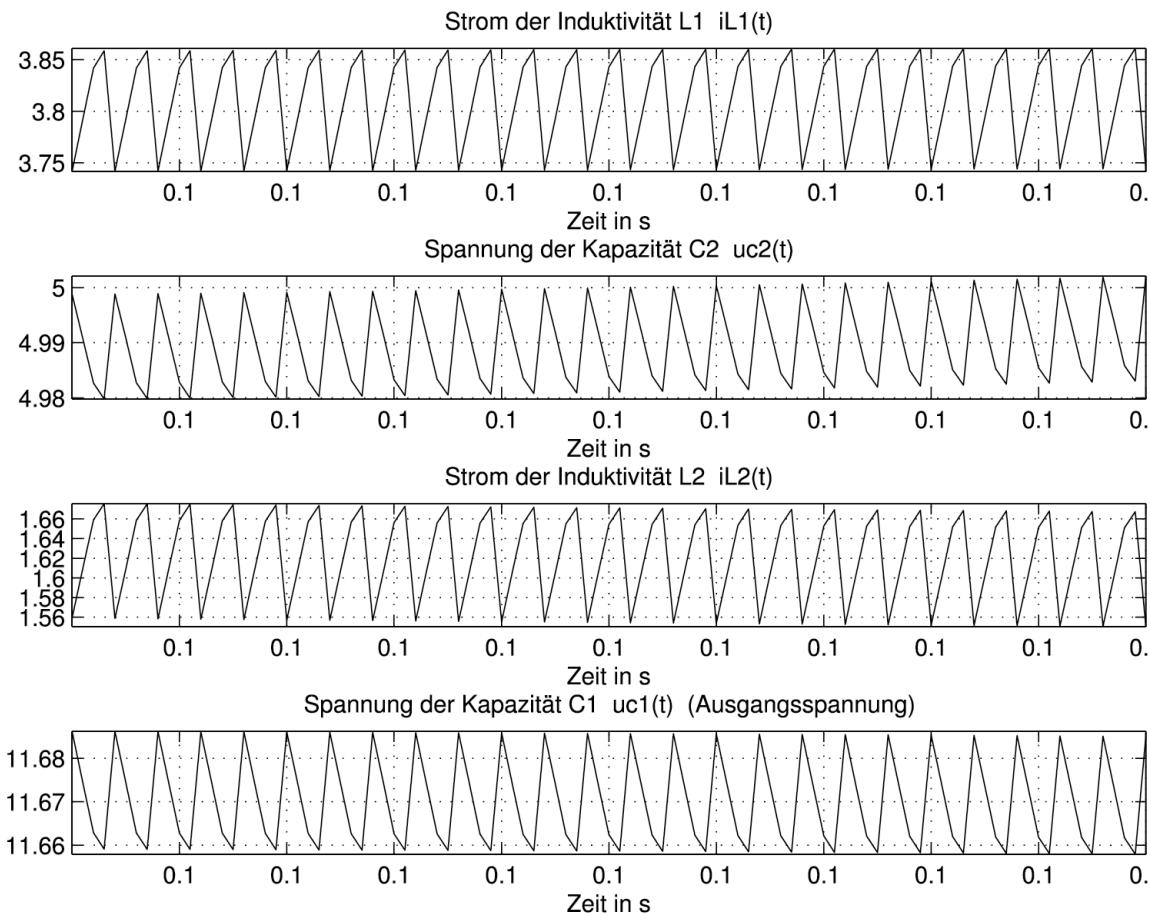


Abb. 2.33: Zustandsvariablen des DC-DC-Sepic-Wandlers (sepic1.m, sepic_1.mdl)

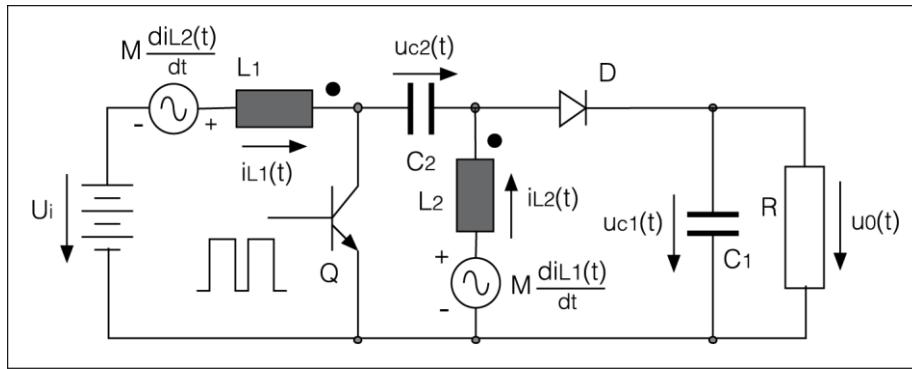


Abb. 2.34: DC-DC-SEPIC-Wandler mit gekoppelten Spulen der Induktivitäten

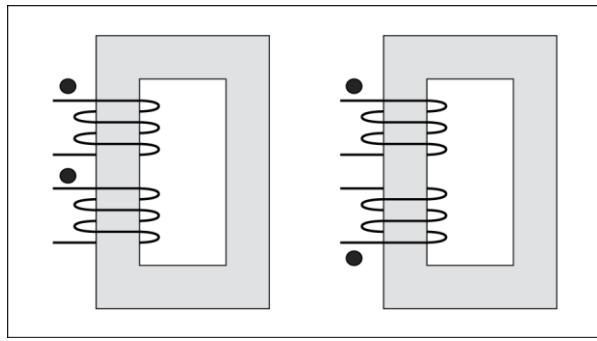


Abb. 2.35: Wicklungssinn zweier gekoppelter Spulen

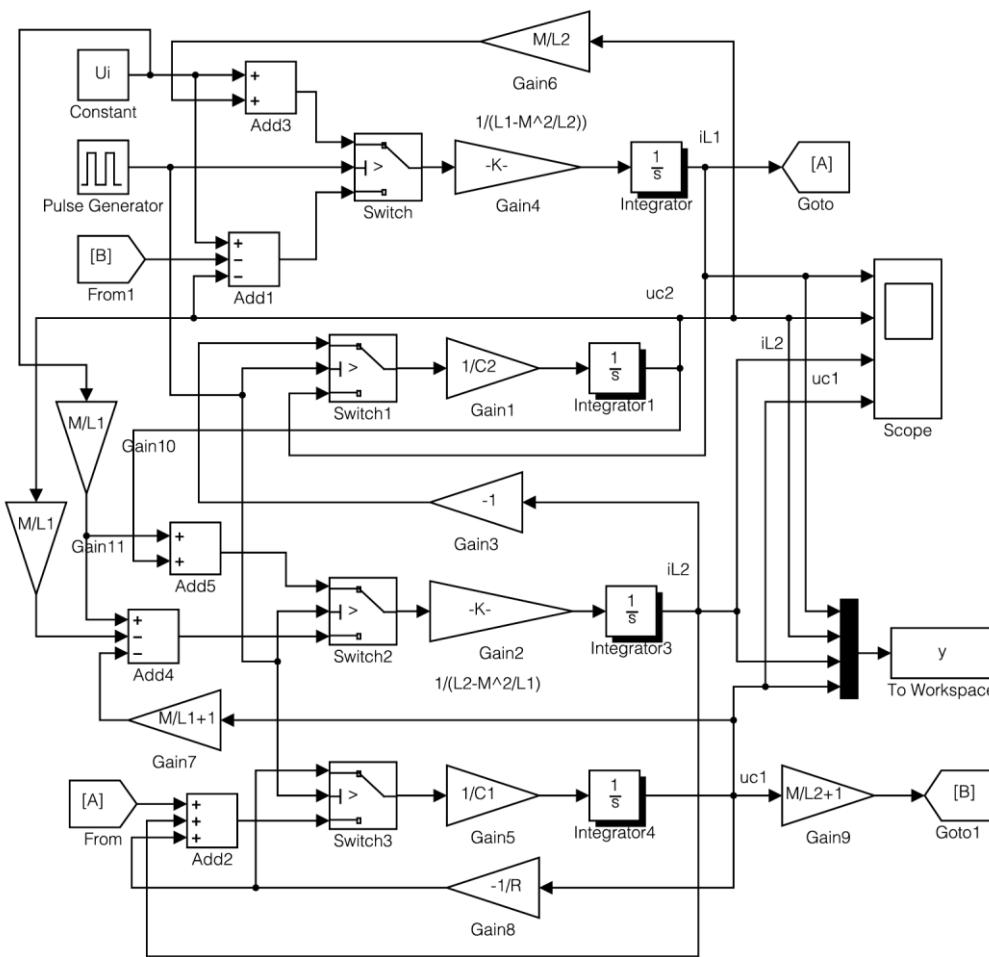


Abb. 2.36: Simulink-Modell des Wandlers mit gekoppelten Spulen der Induktivitäten (sepic2.m, sepic_2.mdl)

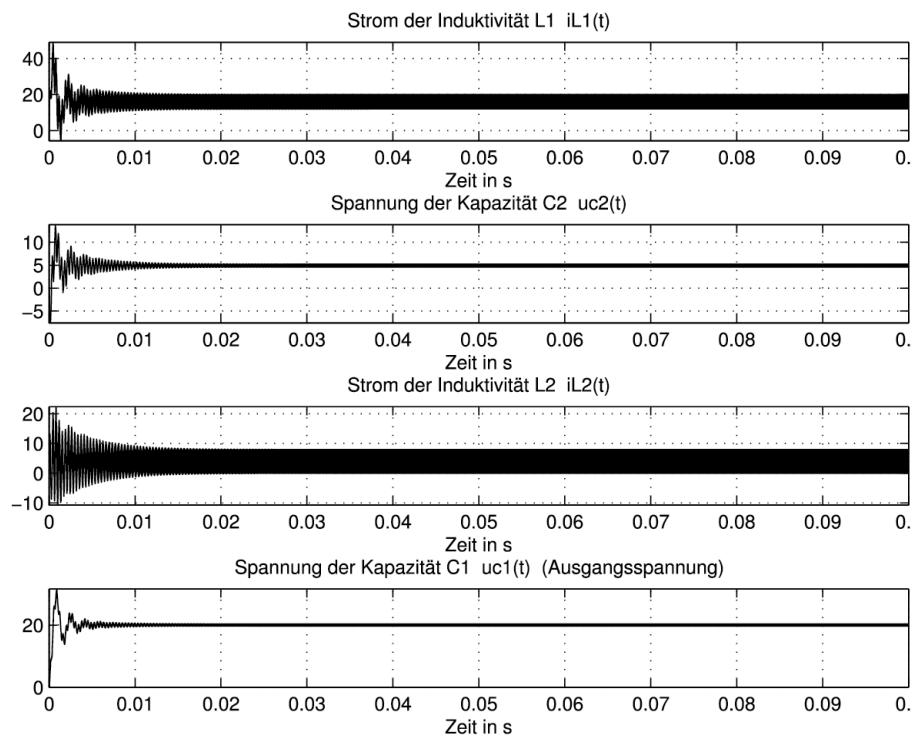


Abb. 2.37: Zustandsvariablen des Wandlers mit gekoppelten Spulen der Induktivitäten (sepic2.m, sepic_2.mdl)

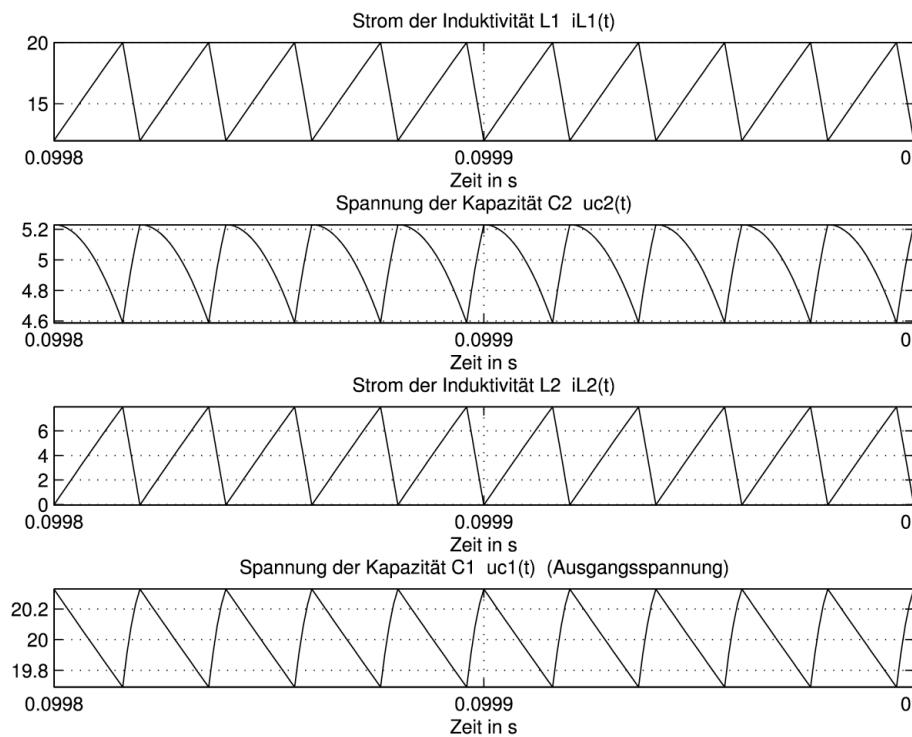


Abb. 2.38: Zustandsvariablen des Wandlers mit gekoppelten Spulen der Induktivitäten (Ausschnitt) (sepic2.m, sepic_2.mdl)

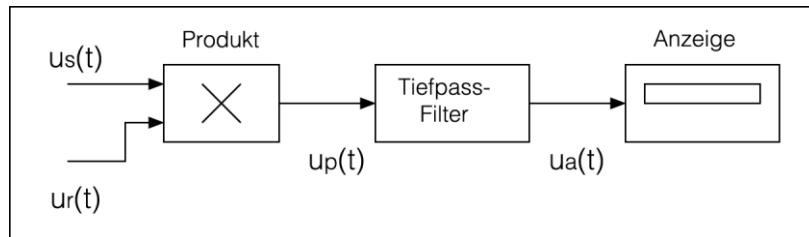


Abb. 2.39: Block-Schema des Lock-In-Verfahrens

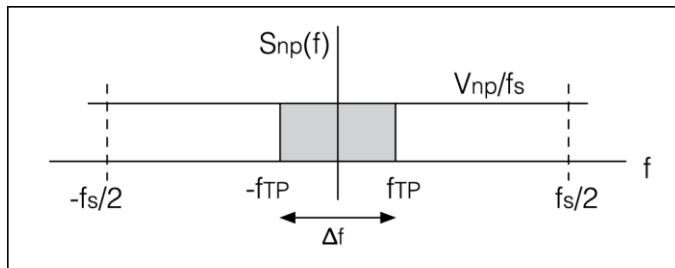


Abb. 2.40: Spektrale Leistungsdichte $S_{np} = V_{np}/f_s$ nach dem Multiplizierer und Berechnung der Varianz am Ausgang des Tiefpassfilters aus der geschwärzten Fläche

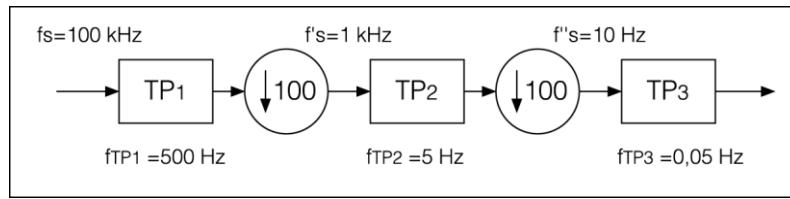


Abb. 2.41: Tiefpassfilterung in mehreren Stufen

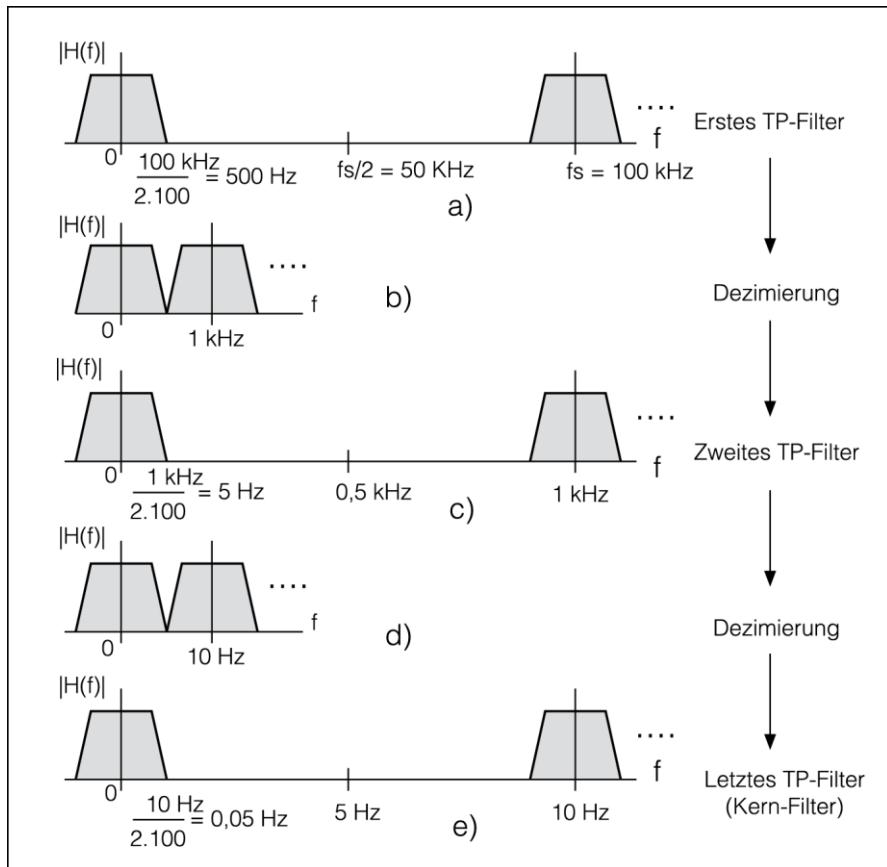


Abb. 2.42: Amplitudengänge der Tiefpassfilterung in mehreren Stufen

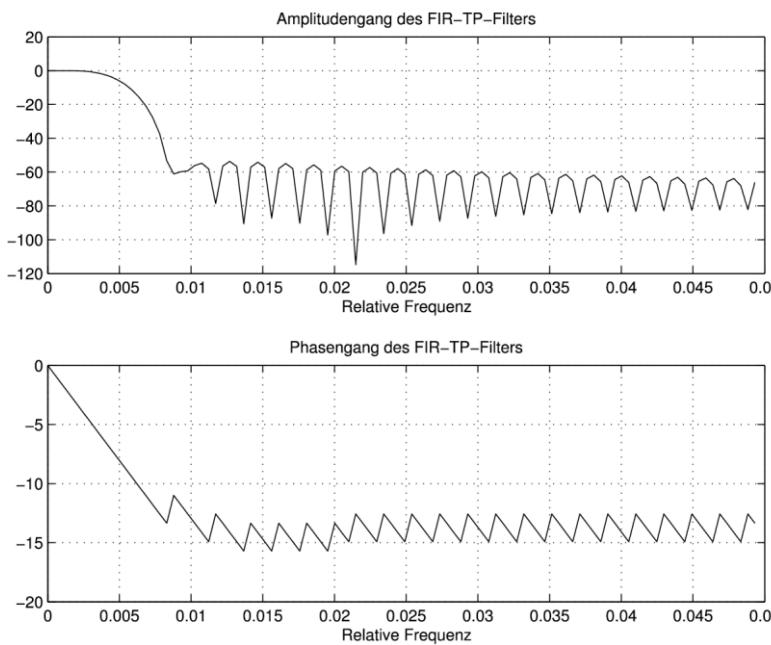


Abb. 2.43: Frequenzgang des FIR-Tiefpassfilters (TP_1.m)

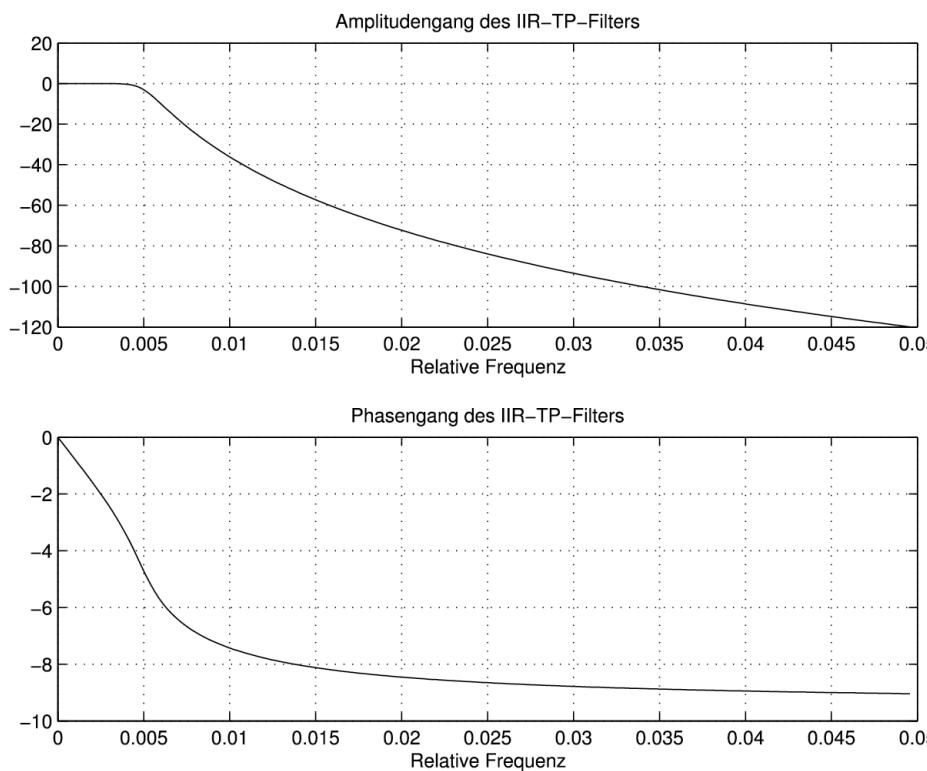


Abb. 2.44: Frequenzgang des IIR-Tiefpassfilters (TP_1.m)

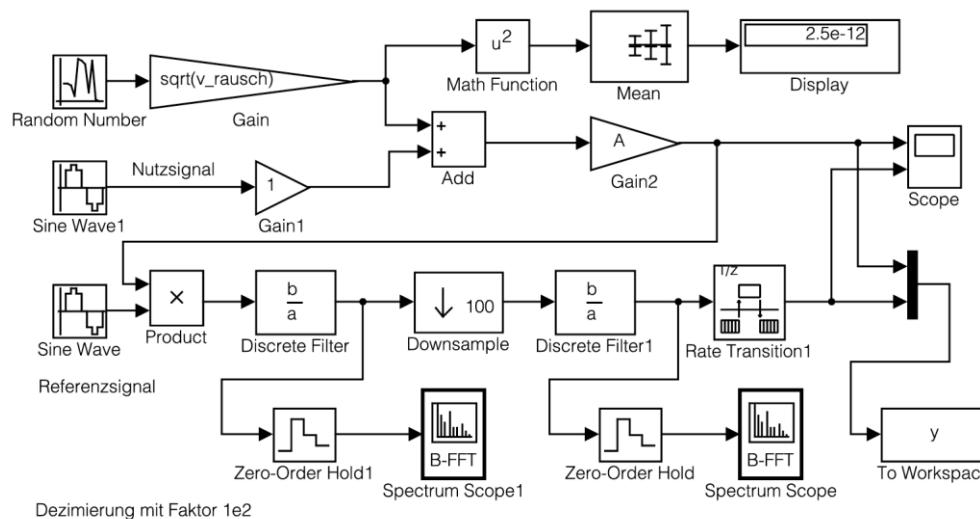


Abb. 2.45: Simulink-Modell des Lock-In-verstärkers (lock_in01.m, lock_in_01.mdl)

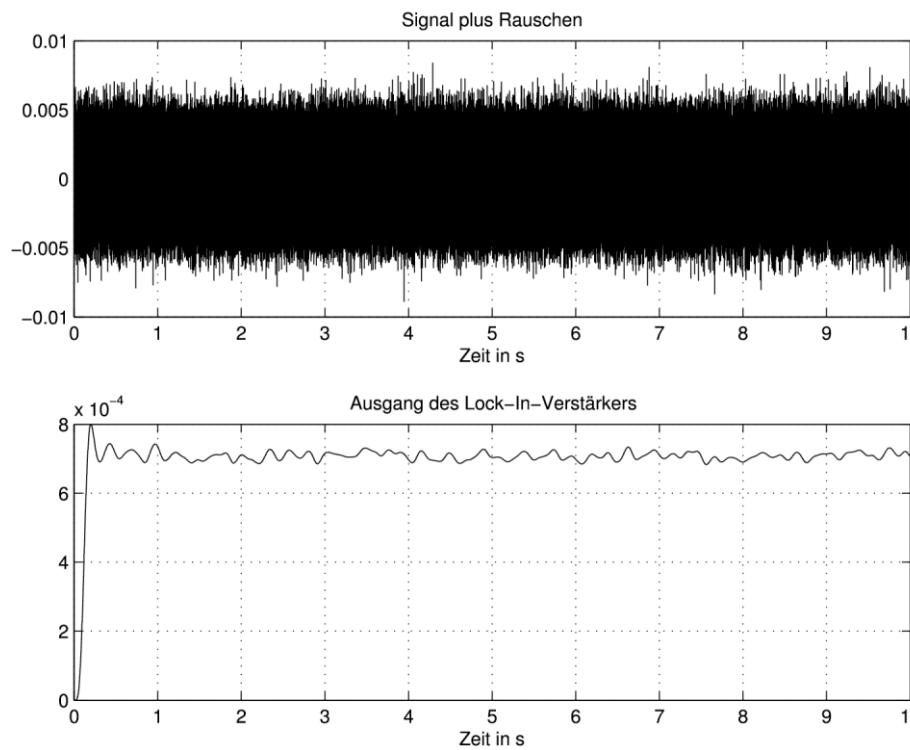


Abb. 2.46: Verrauschtet Eingangssignal und Ausgang des Lock-In-Verstärkers (lock_in01.m, lock_in_01.mdl)

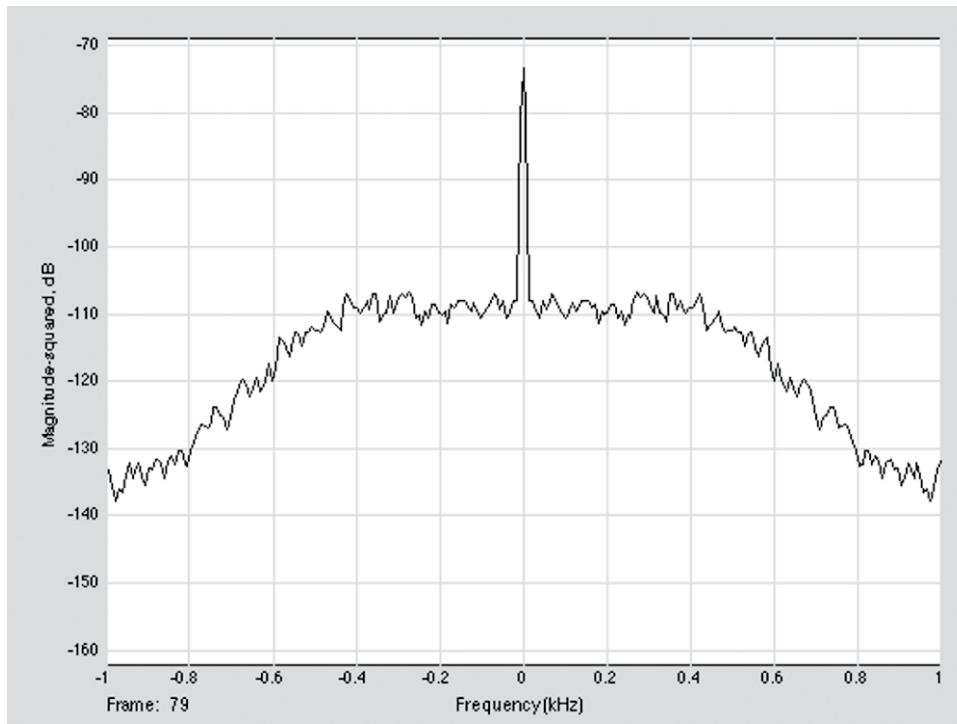


Abb. 2.47: Spektrale Leistungsdichte nach dem Multiplizierer (lock_in01.m, lock_in_01.mdl)

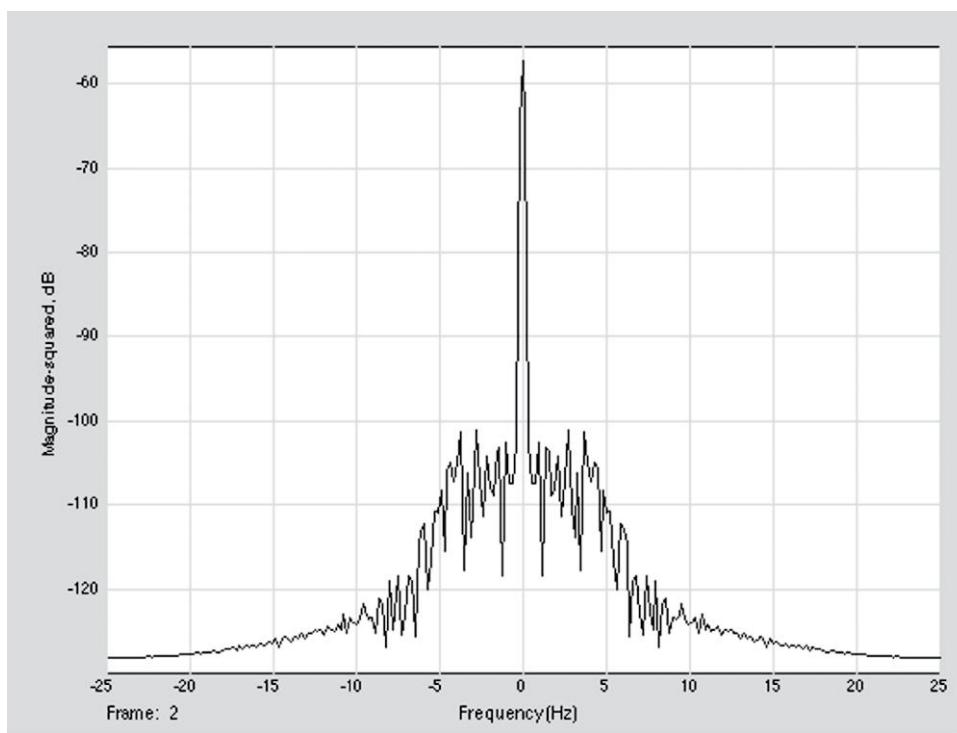


Abb. 2.48: Spektrale Leistungsdichte am Ausgang (lock_in01.m, lock_in_01.mdl)

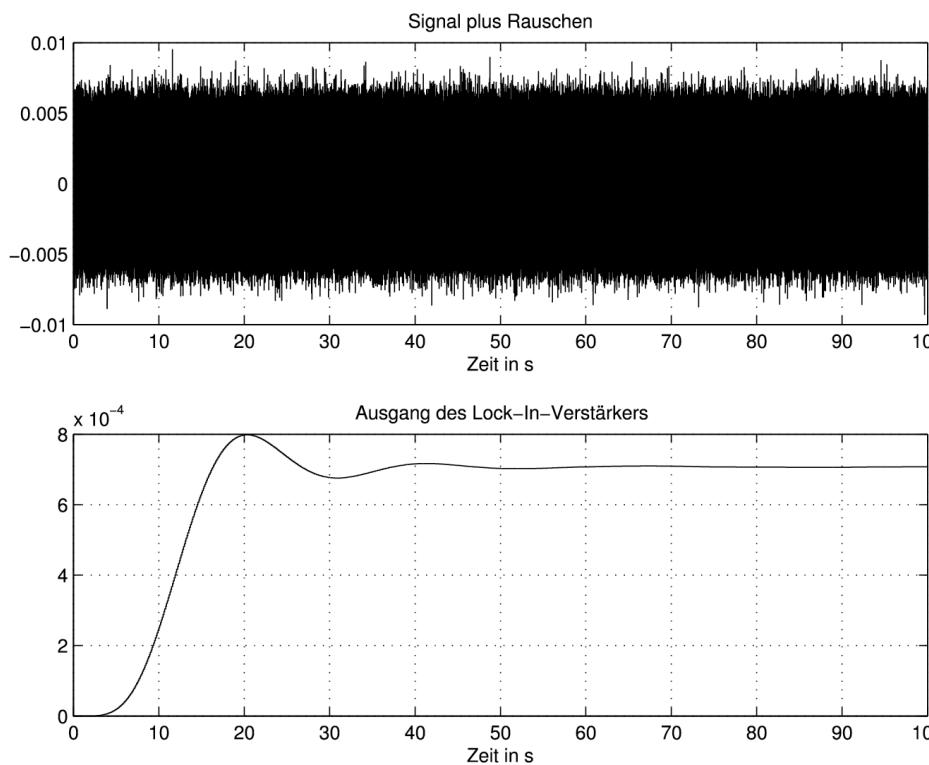


Abb. 2.49: Verrausches Eingangssignal von $1 \mu\text{V}$ Effektivwert und Ausgang des Lock-In-Verstärkers
(lock_in02.m, lock_in_02.mdl)

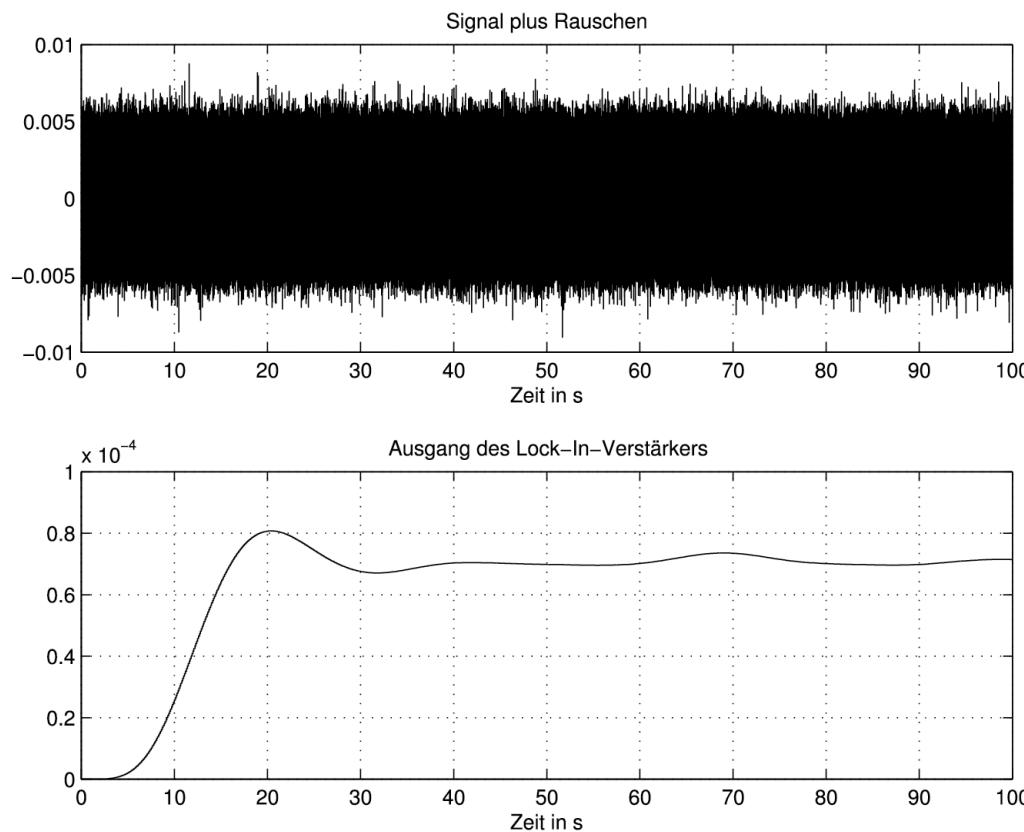


Abb. 2.50: Verrausches Eingangssignal von 100 nV Effektivwert und Ausgang des Lock-In-Verstärkers
(lock_in02.m, lock_in_02.mdl)

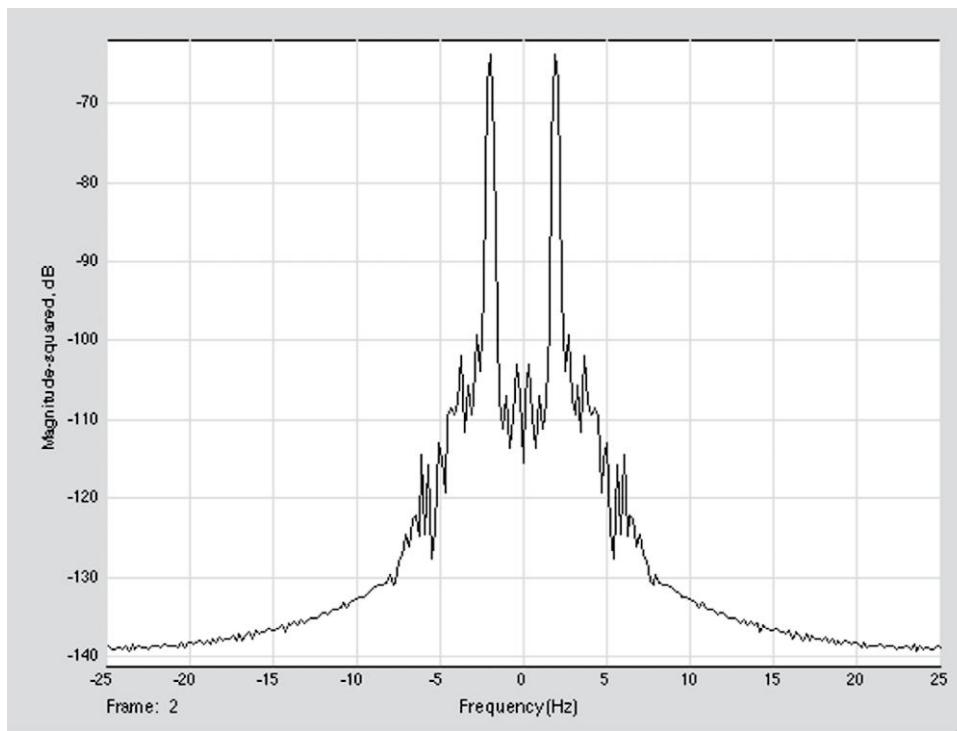


Abb. 2.51: Spektrale Leistungsdichte des Ausgangs für eine Differenz der Frequenzen von 2 Hz
(lock_in011.m, lock_in_011.mdl)

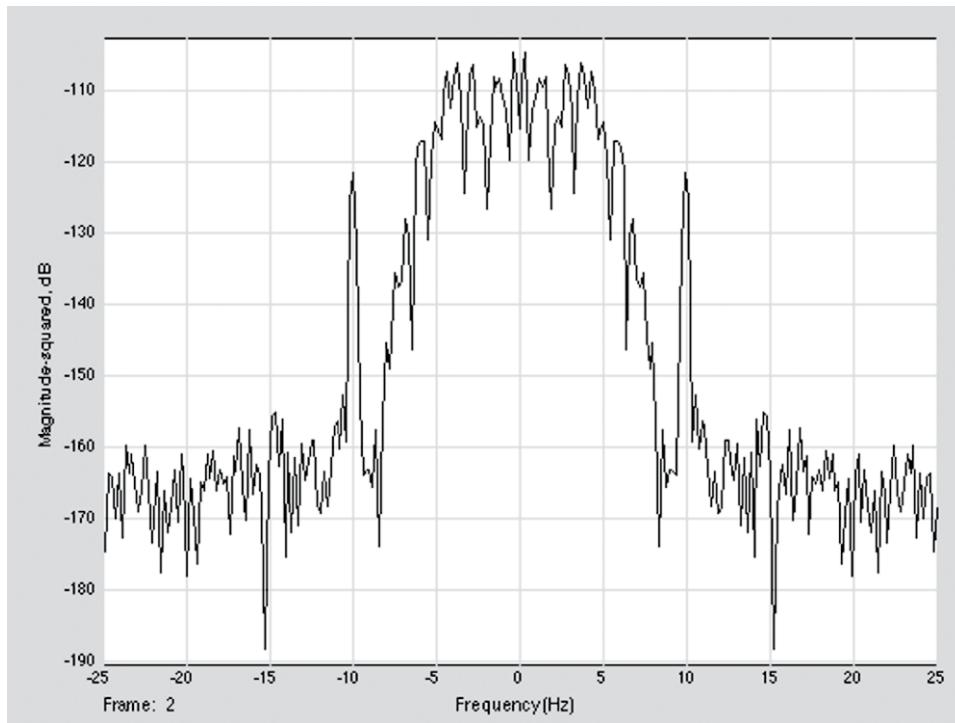


Abb. 2.52: Spektrale Leistungsdichte des Ausgangs für eine Differenz der Frequenzen von 10 Hz
(lock_in011.m, lock_in_011.mdl)

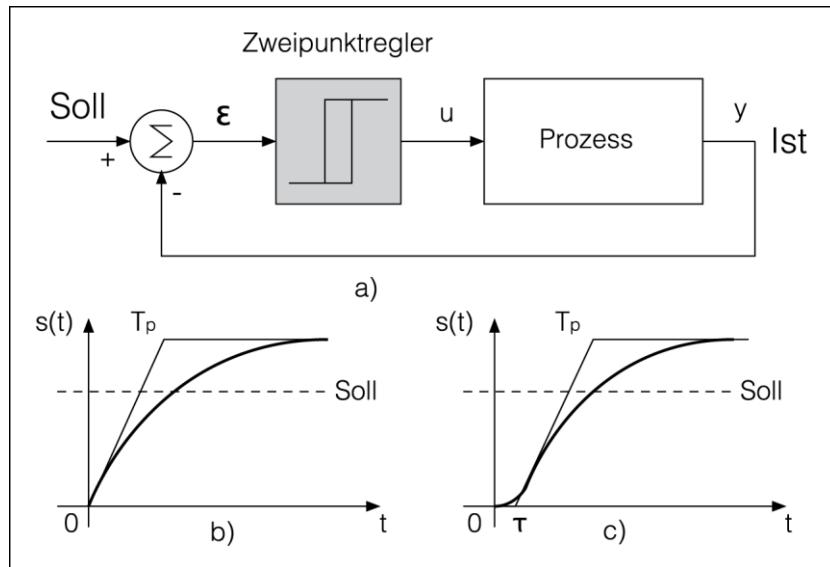


Abb. 3.1: a) Blockschaltung der Zweipunktregelung b) Sprungantwort eines Prozesses erster Ordnung mit Zeitkonstante T_p
c) Sprungantwort eines Prozesses höherer Ordnung mit Zeitkonstante T_p und Totzeit τ

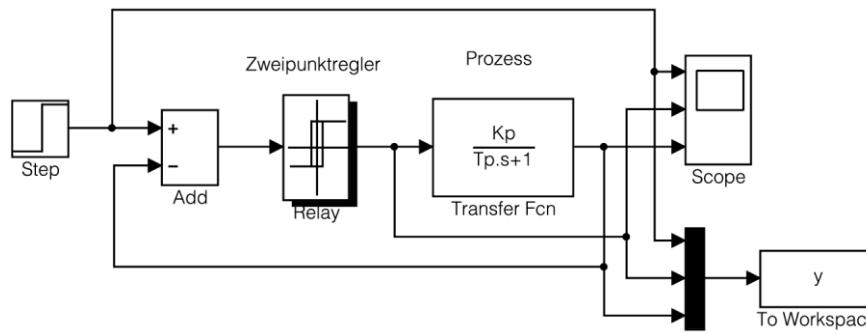


Abb. 3.2: Simulink-Modell der Zweipunktregelung eines Prozesses mit Verzögerung erster Ordnung
(zweipunkt_1.m, zweipunkt1.mdl)

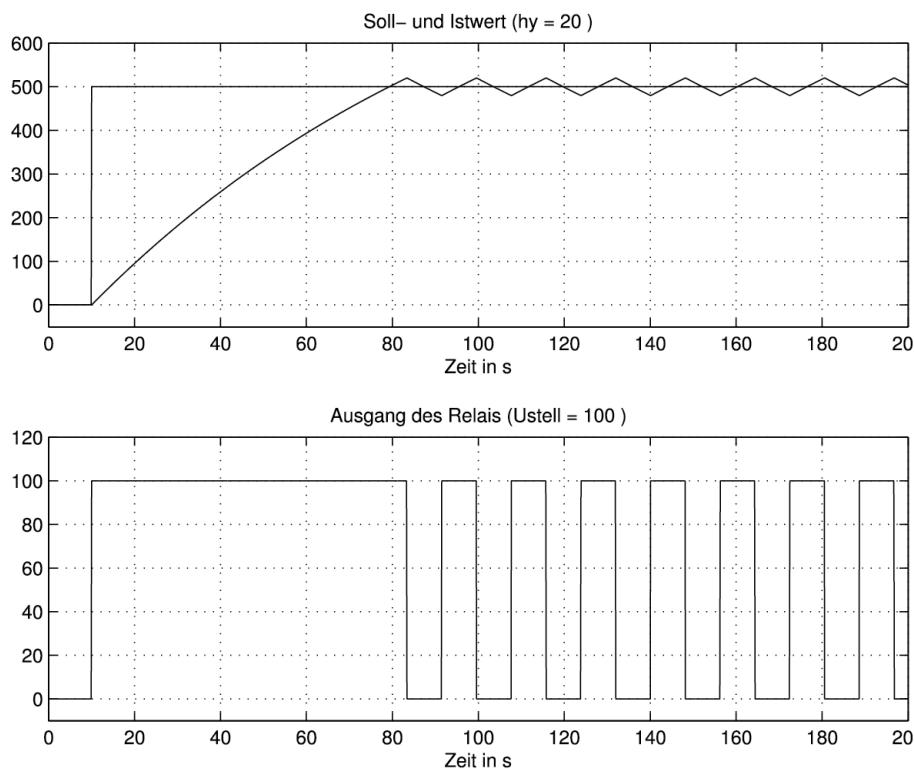


Abb. 3.3: Variablen der Zweipunktregelung des Prozesses mit Verzögerung erster Ordnung
(zweipunkt_1.m, zweipunkt1.mdl)

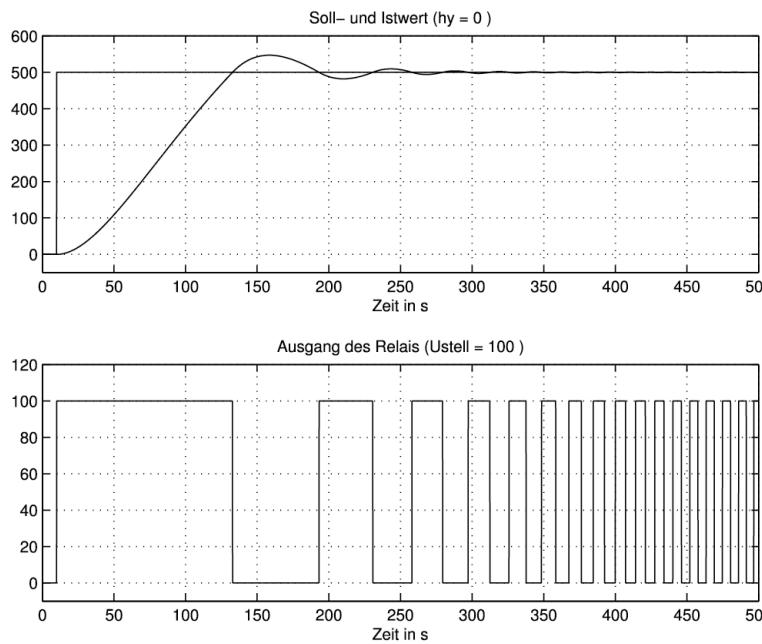


Abb. 3.4: Variablen der Zweipunktregelung des Prozesses mit zwei Verzögerungen erster Ordnung
(zweipunkt_2.m, zweipunkt2.mdl)

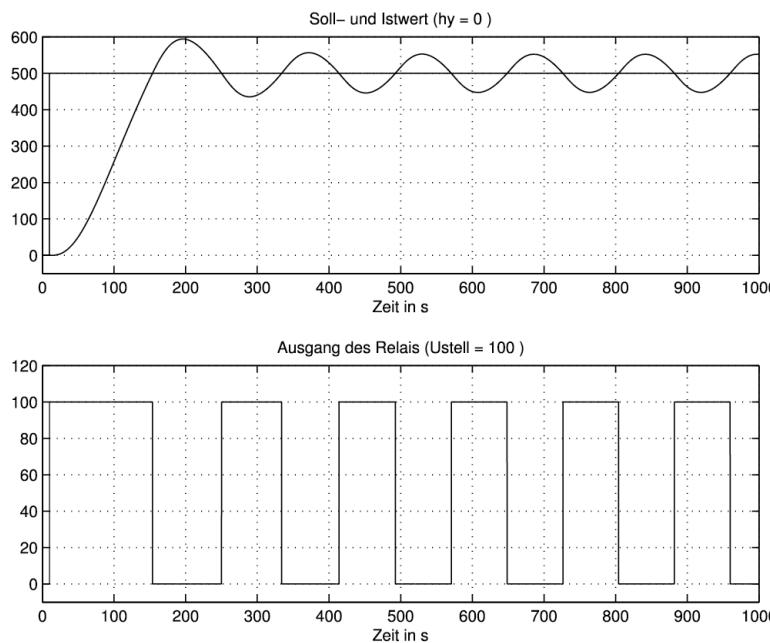


Abb. 3.5: Variablen der Zweipunktregelung des Prozesses mit drei Verzögerungen erster Ordnung
(zweipunkt_3.m, zweipunkt3.mdl)

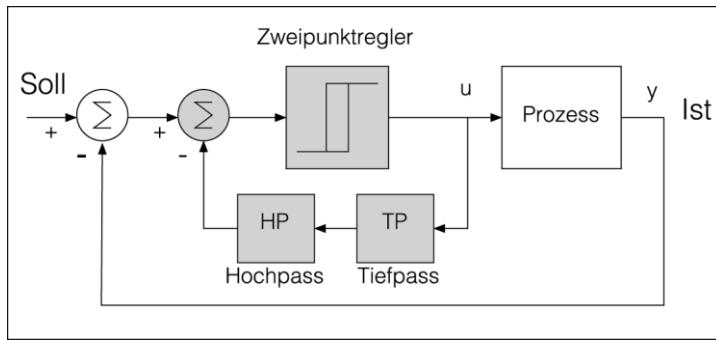


Abb. 3.6: Zweipunktregler mit Hysterese und verzögerter und nachgebender Rückführung

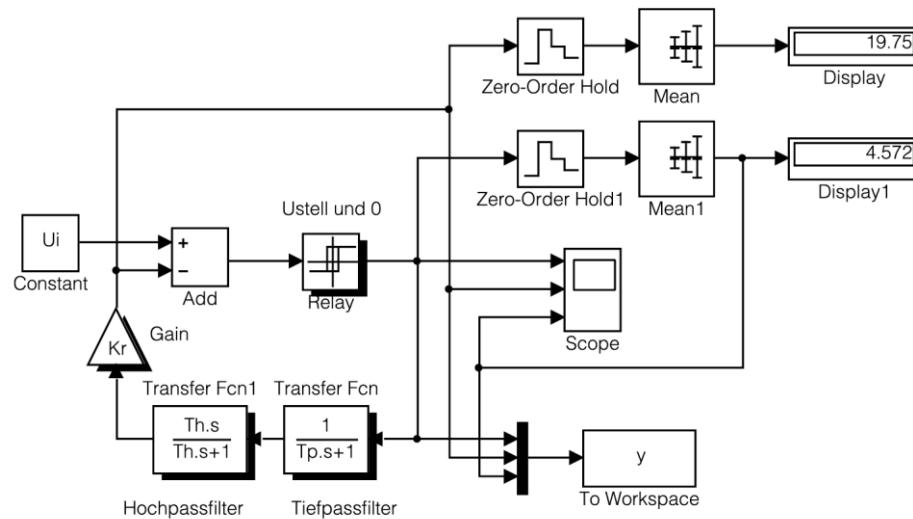


Abb. 3.7: Regler mit Relais und Rückführung über Tief- und Hochpassfilter (regulator_1.m, regulator1.mdl)

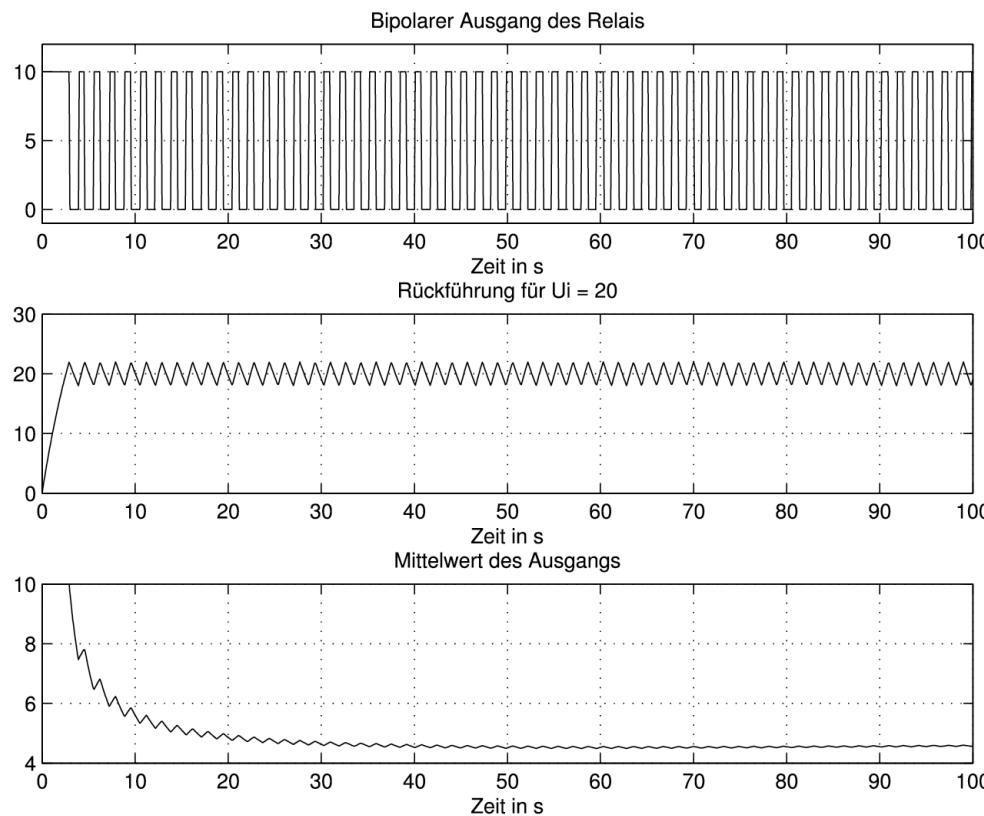


Abb. 3.8: Variablen des Reglers mit Rückführung über Tiefpassfilter für $U_i = 20$
(regulator_1.m, regulator1.mdl)

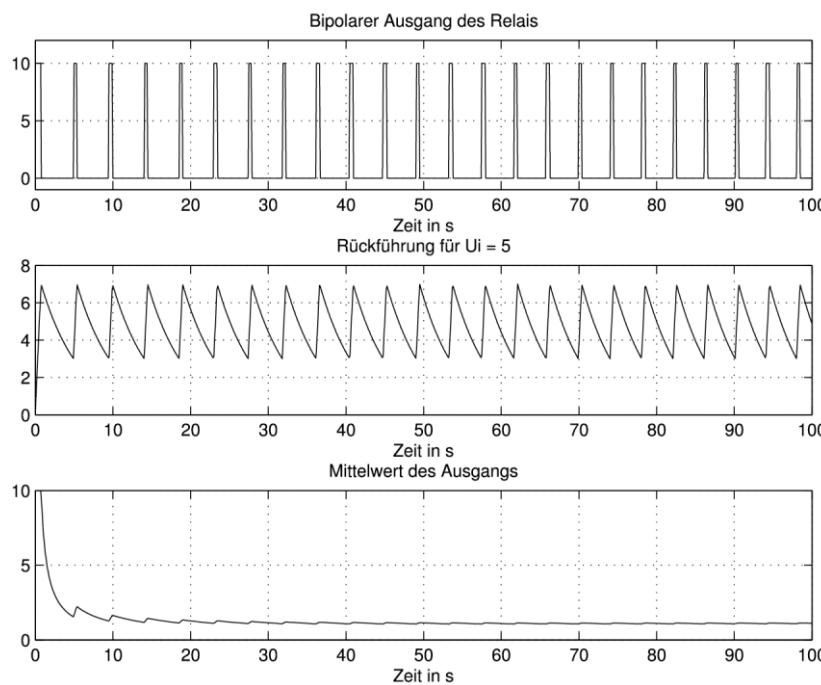


Abb. 3.9: Variablen des Reglers mit Rückführung über Tiefpassfilter für $U_i = 5$ (regulator_1.m, regulator1.mdl)

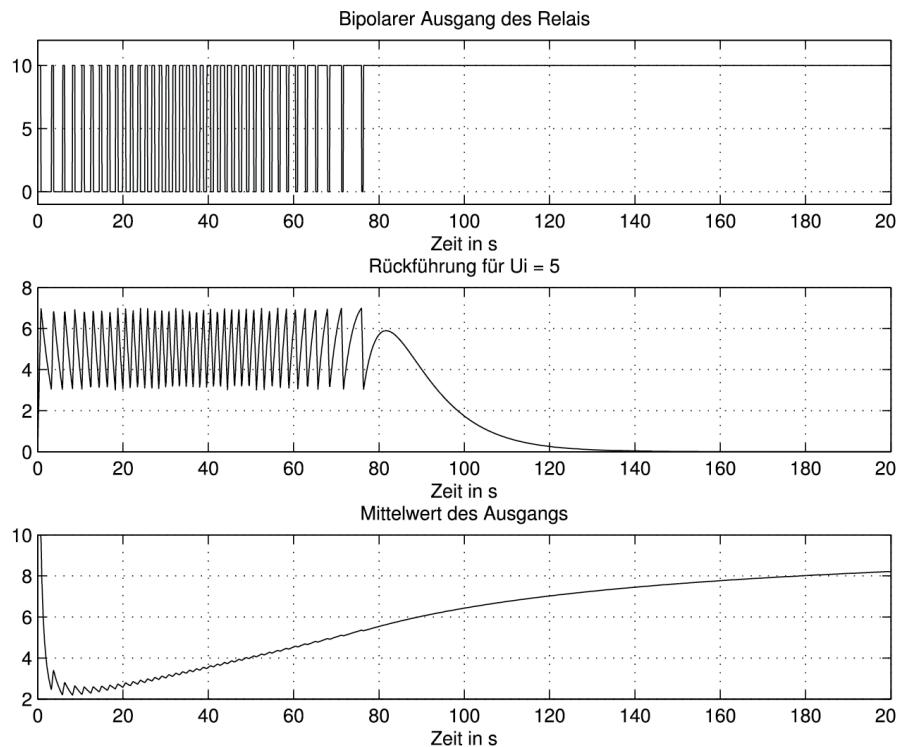


Abb. 3.10: Variablen des Reglers mit Rückführung über Tief- und Hochpassfilter für $U_i = 5$ (regulator_1.m, regulator1.mdl)

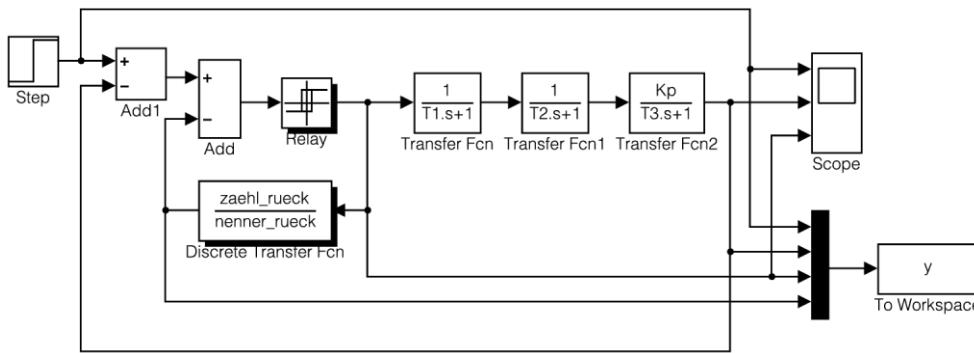


Abb. 3.11: Simulink-Modell des Systems mit Zweipunktregler mit Hysterese und verzögerter und nachgebender Rückführung (zweipunkt_31.m, zweipunkt31.mdl)

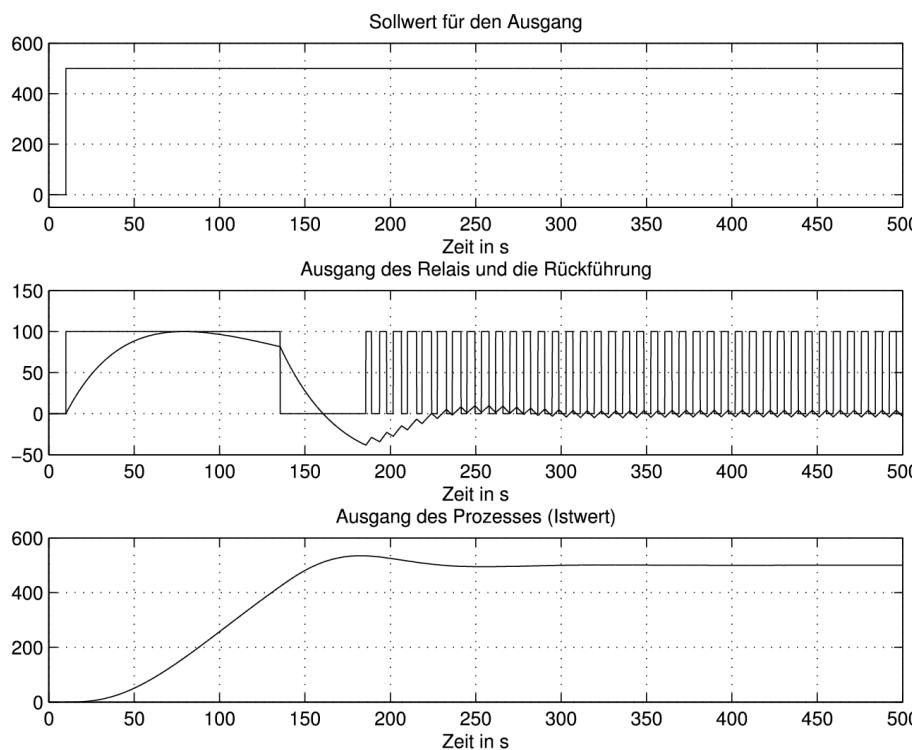


Abb. 3.12: a) Sollwert b) Ausgang des Relais und die Rückführung c) Ausgang des Prozesses (Istwert)
(zweipunkt_31.m, zweipunkt31.mdl)

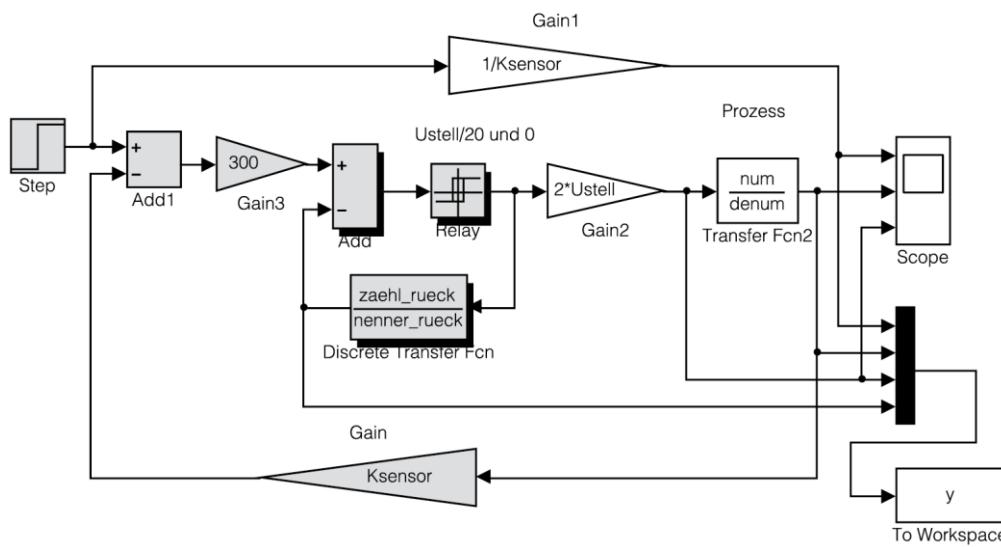


Abb. 3.13: Simulink-Modell des Systems mit Mikrokontroller-Regler (zweipunkt_32.m, zweipunkt32.mdl)

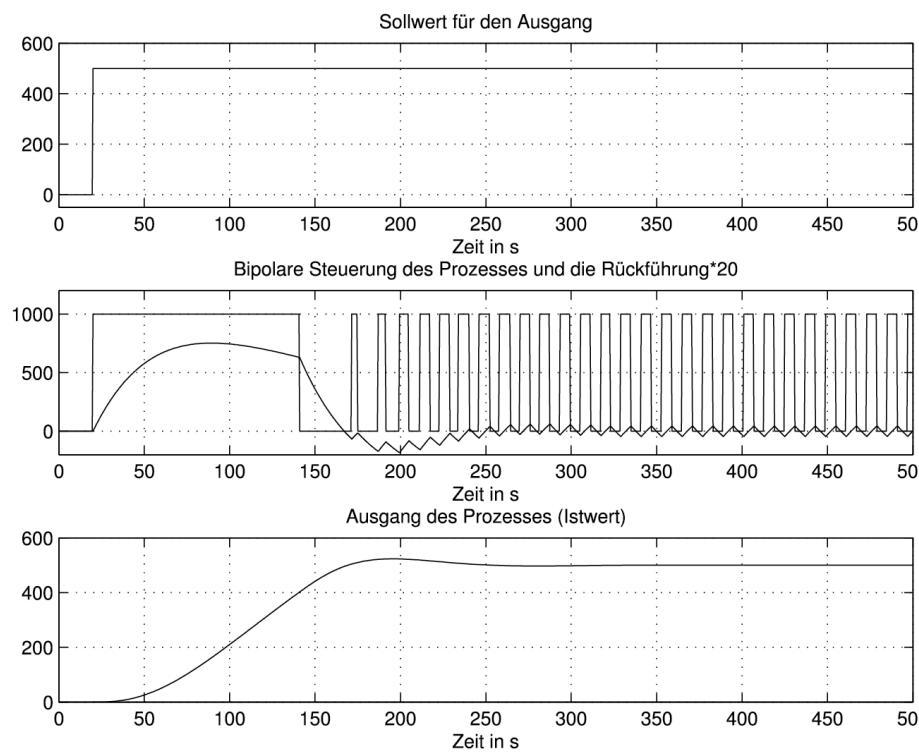


Abb. 3.14: a) Sollwertsprung b) Zweipunkt Steuerung und die Rückführung c) Antwort (Istwert)
(zweipunkt_32.m, zweipunkt32.mdl)

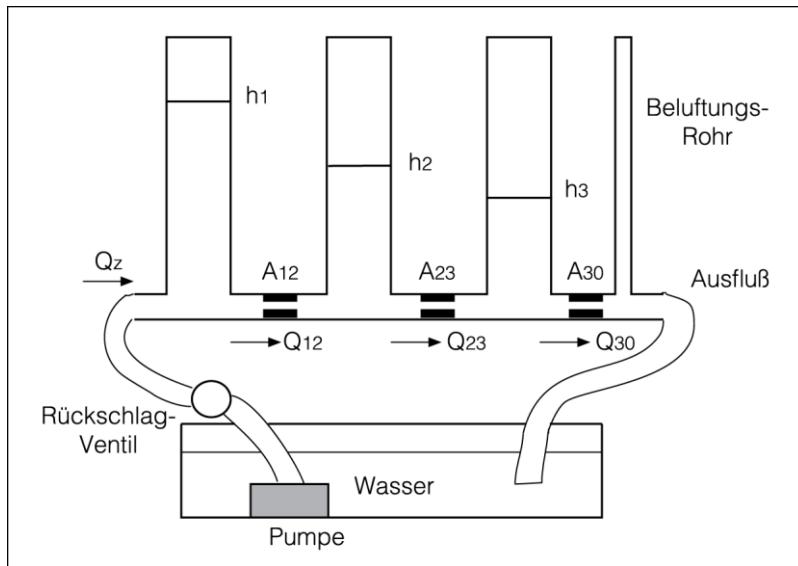


Abb. 3.15: Dreitanksystem

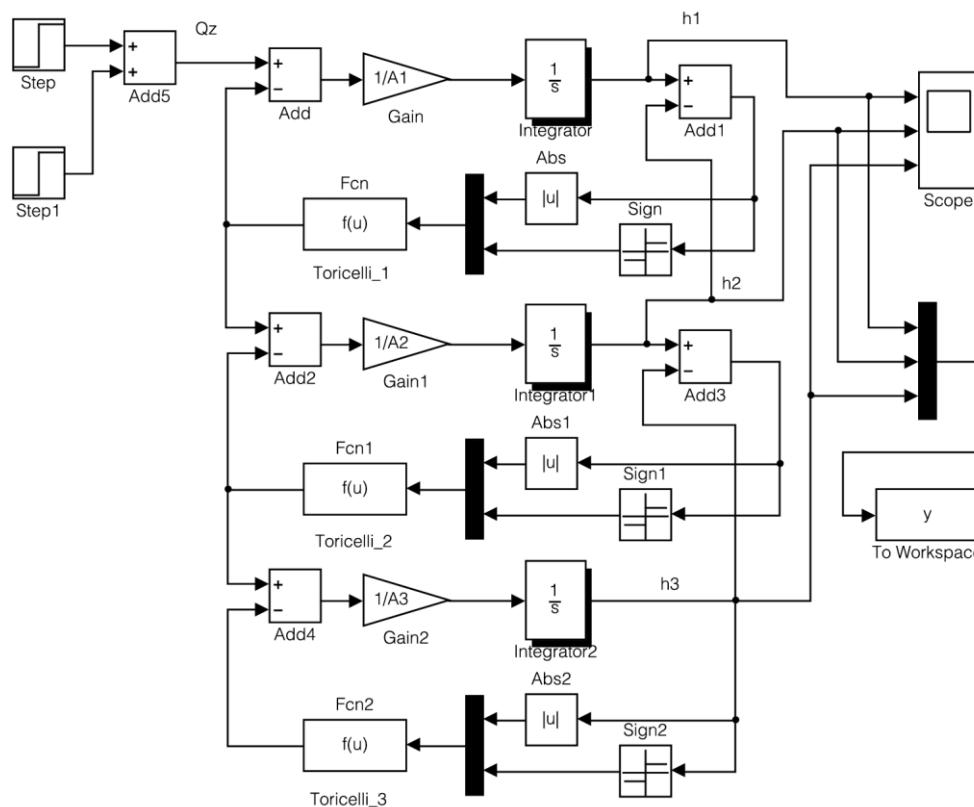


Abb. 3.16: Simulink-Modell des Dreitanksystem (fuellstnd_1.m, fuellstnd1.mdl)

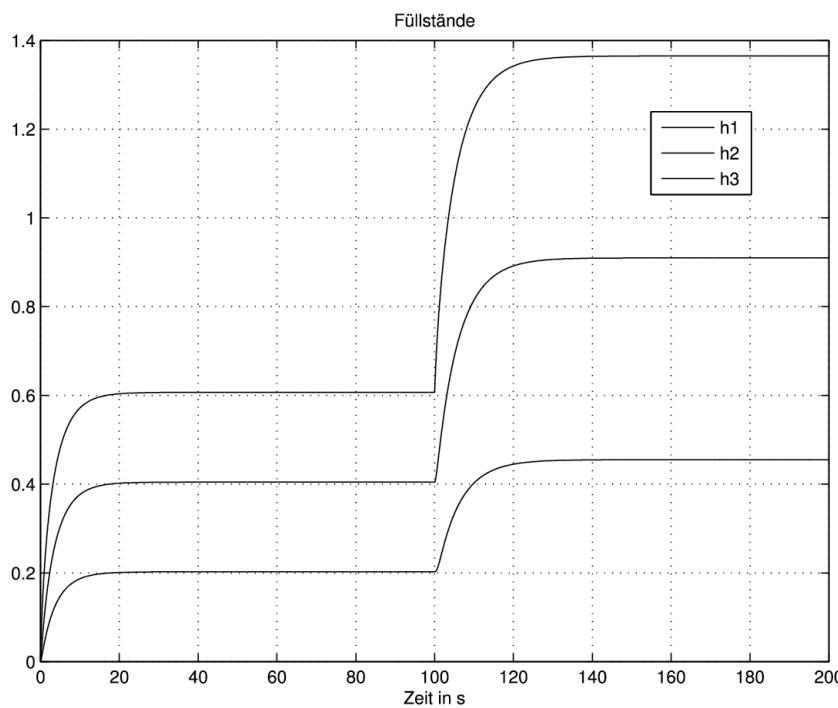


Abb. 3.17: Füllstände des Dreitanksystems (fuellstnd_1.m, fuellstnd1.mdl)

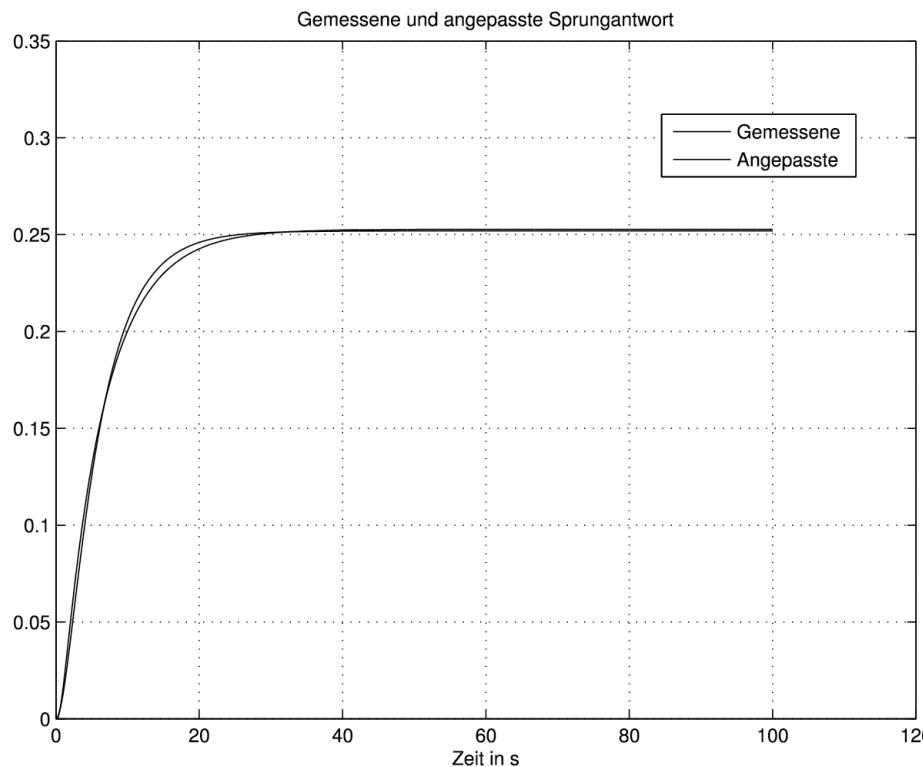


Abb. 3.18: Gemessene und angepasste Sprungantwort (fuellstnd_1.m, fuellstnd1.mdl)

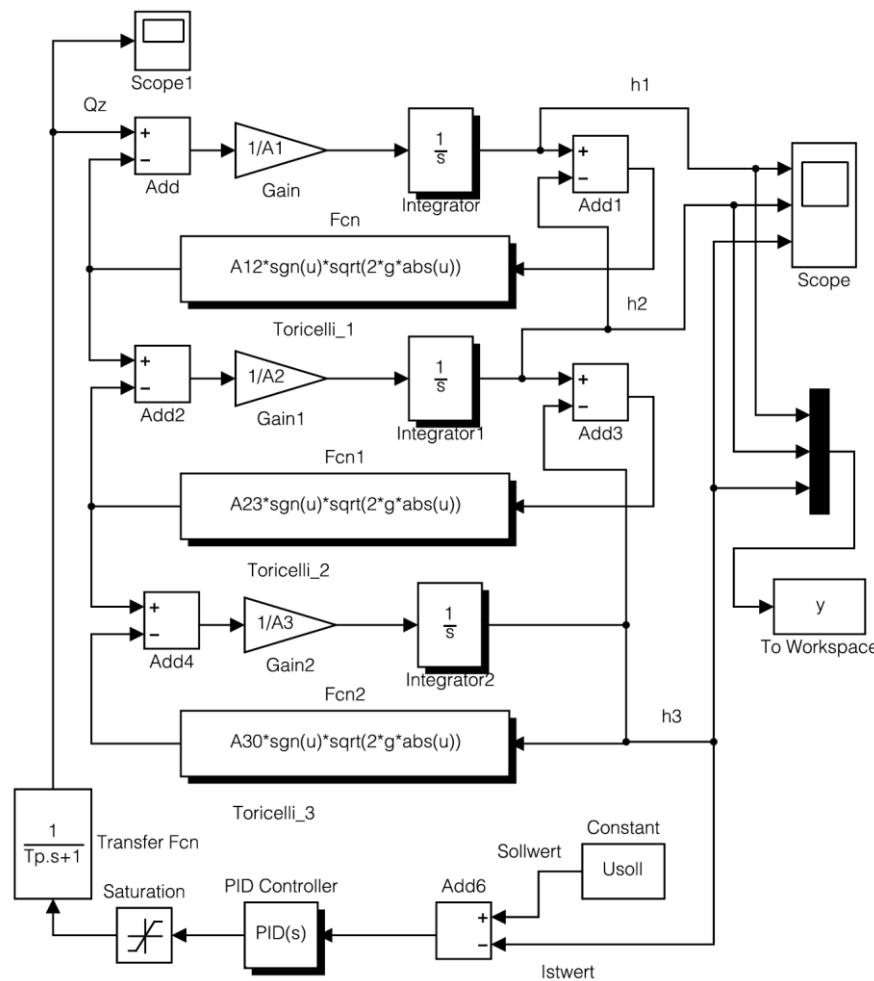


Abb. 3.19: Simulink-Modell des Füllstandsregelung (fuellstnd_2.m, fuellstnd2.mdl)

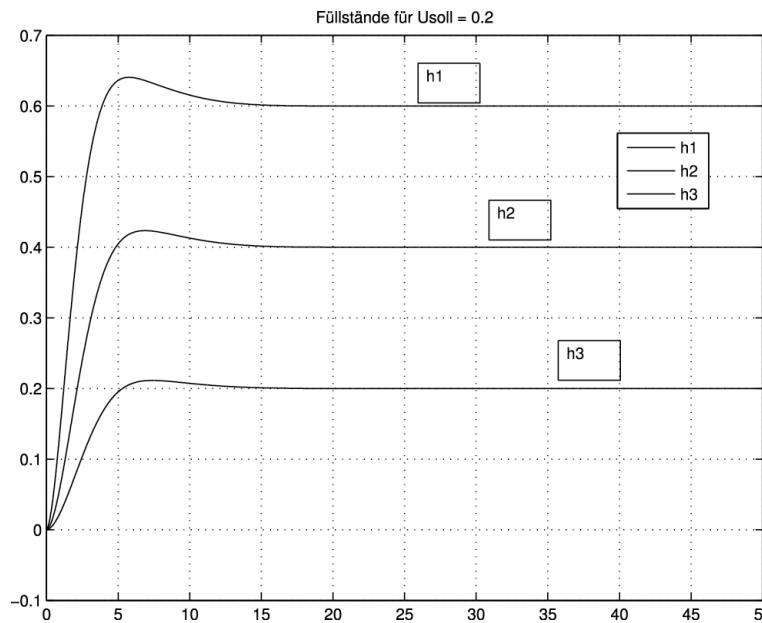


Abb. 3.20: Füllstände für Usoll = 0.2 (fuellstnd_2.m, fuellstnd2.mdl)

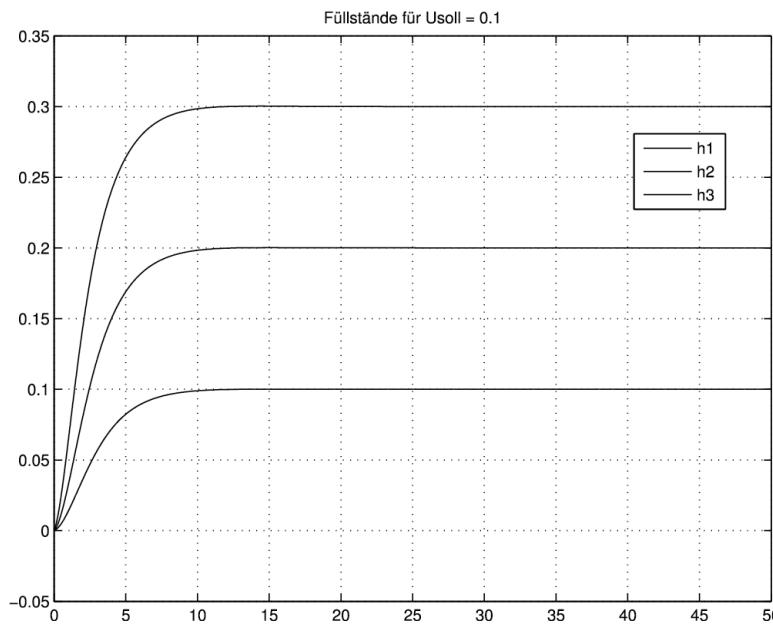


Abb. 3.21: Füllstände für Usoll = 0.1 (fuellstnd_2.m, fuellstnd2.mdl)

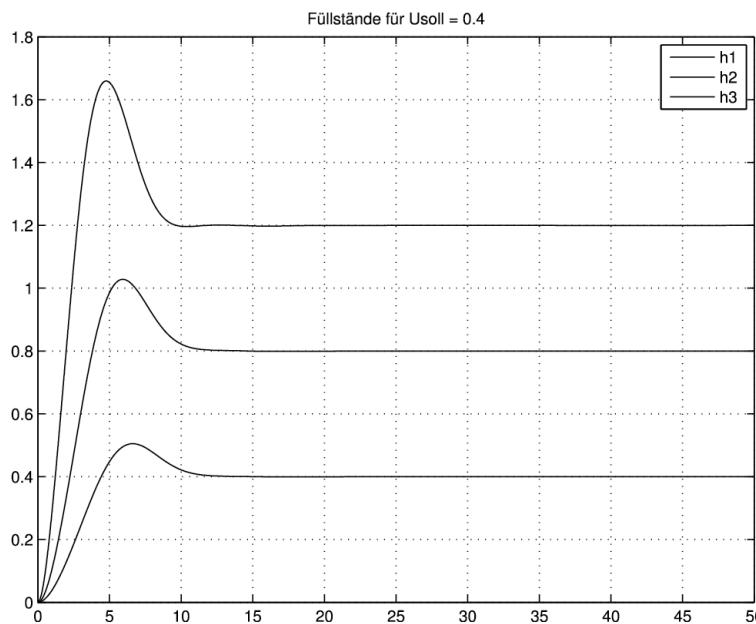


Abb. 3.22: Füllstände für Usoll = 0.4 (fuellstnd_2.m, fuellstnd2.mdl)

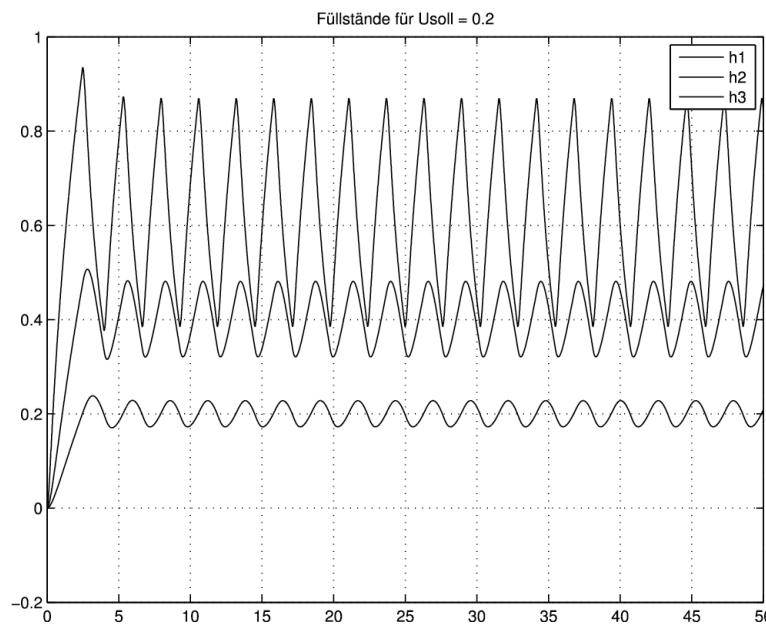


Abb. 3.23: Füllstände für $U_{\text{soll}} = 0.2$ und Zweipunktregelung (fuellstnd_21.m, fuellstnd21.mdl)

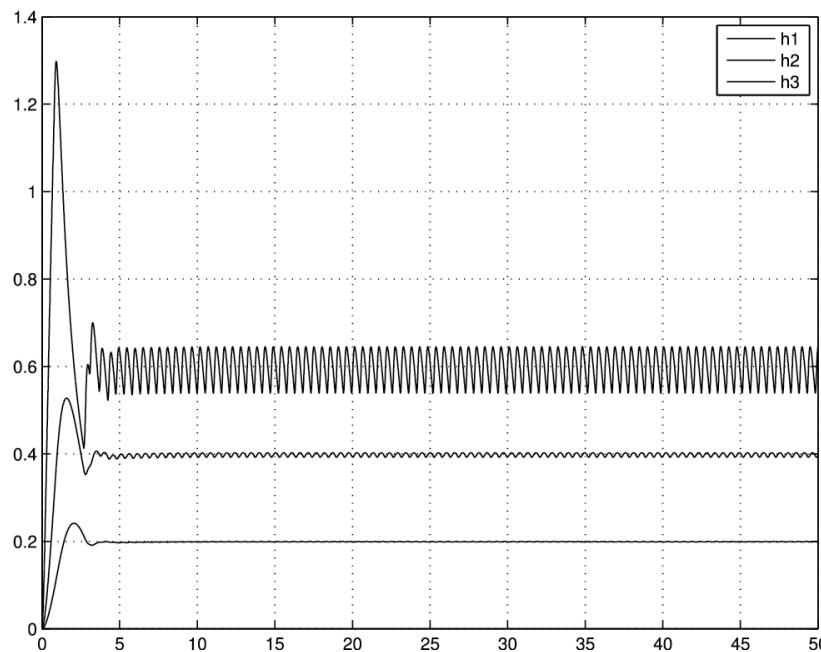


Abb. 3.24: Füllstände für $U_{\text{ soll}} = 0.2$ und Zweipunktregelung mit verzögerter und nachgebender Rückführung
(fuellstnd_3.m, fuellstnd3.mdl)

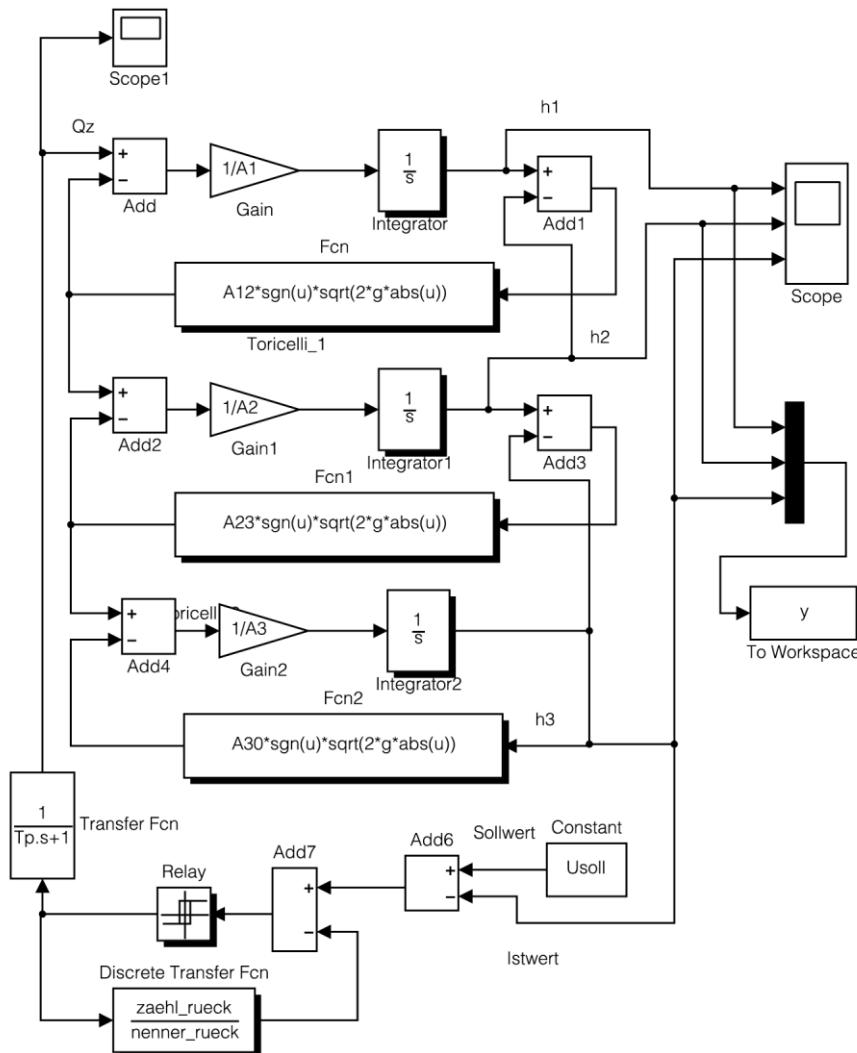


Abb. 3.25: Simulink-Modell der Zweipunktregelung mit verzögerter und nachgebender Rückführung
(fuellstnd_3.m, fuellstnd3.mdl)

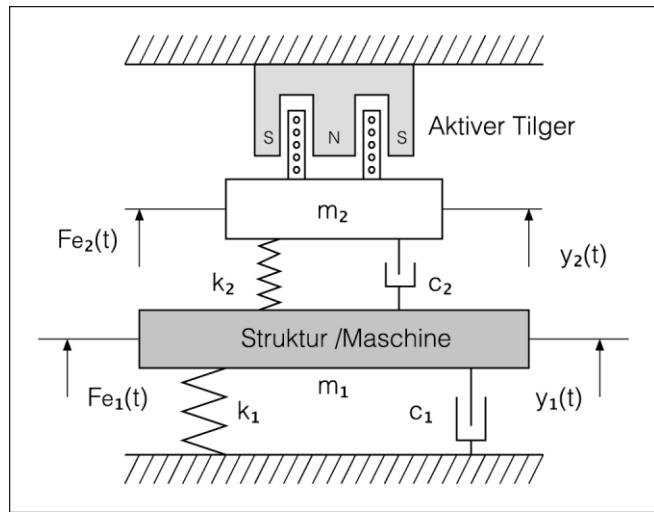


Abb. 3.26: Aktives Tilgungssystem

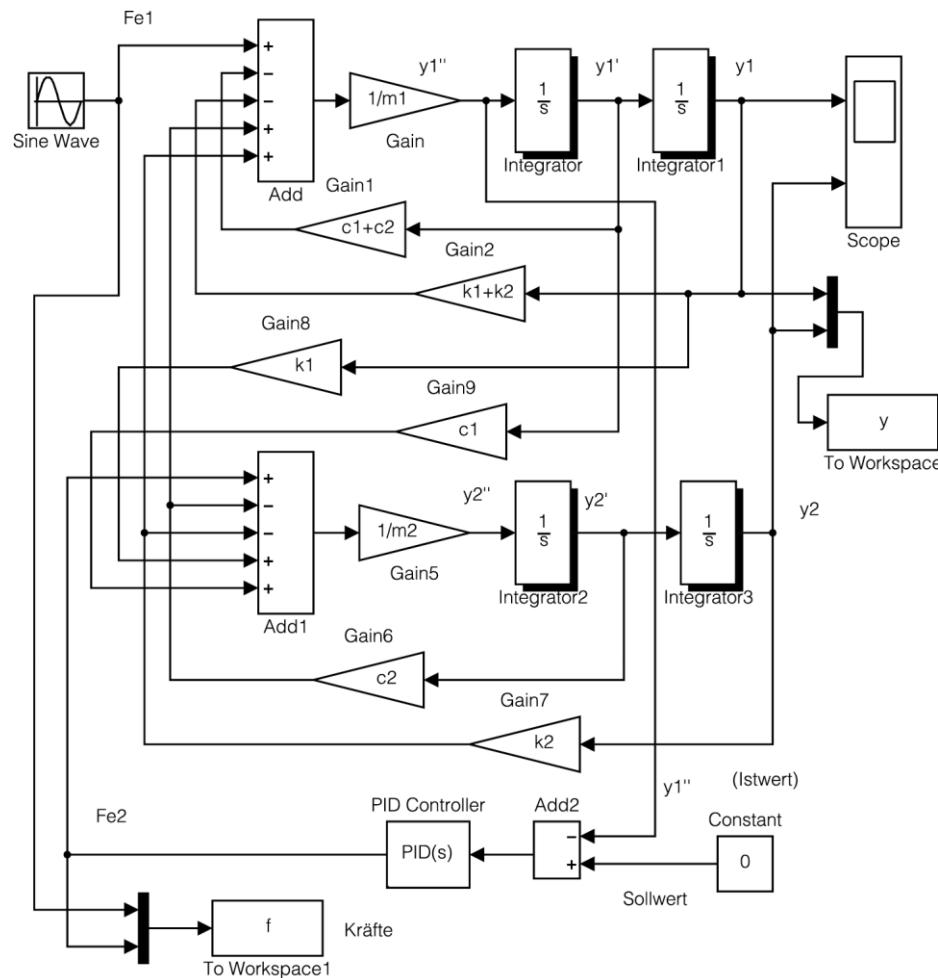


Abb. 3.27: Simulink-Modell der aktiven Tilgung (aktiv_tilger_1.m, aktiv_tilger1.m.mdl)

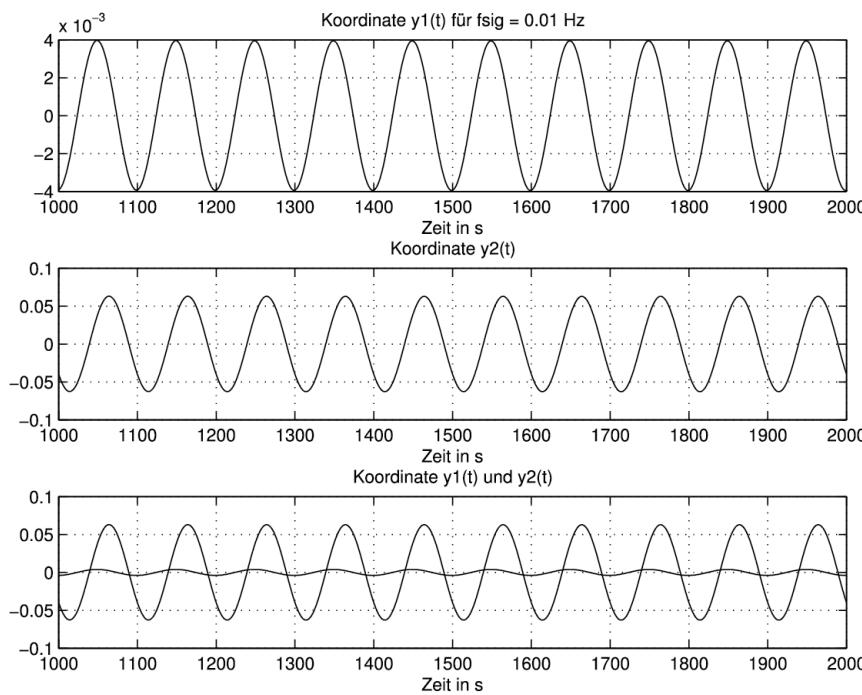


Abb. 3.28: a) Bewegung der Struktur ($y_1(t)$) b) Bewegung der Tilgungsmasse ($y_2(t)$) c) Beide Bewegungen
(aktiv_tilger_1.m, aktiv_tilger1.m.mdl)

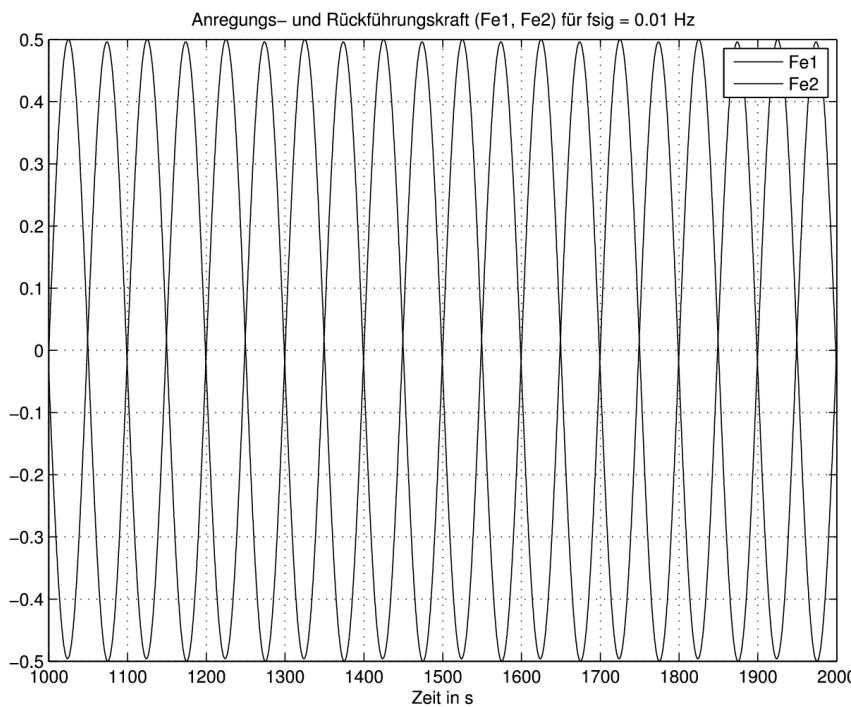


Abb. 3.29: Anregungskraft ($F_{e1}(t)$) und aktive Kompensationskraft ($F_{e2}(t)$) (aktiv_tilger_1.m, aktiv_tilger1.m.mdl)

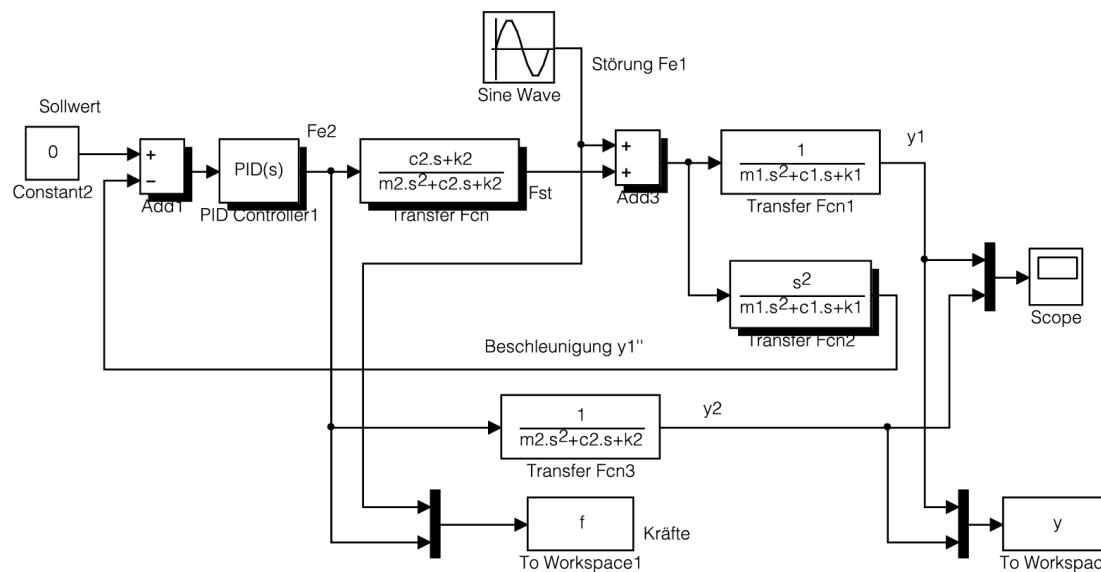


Abb. 3.30: Simulink-Modell des vereinfachten Systems (aktiv_tilger_12.m, aktiv_tilger12.m.mdl)

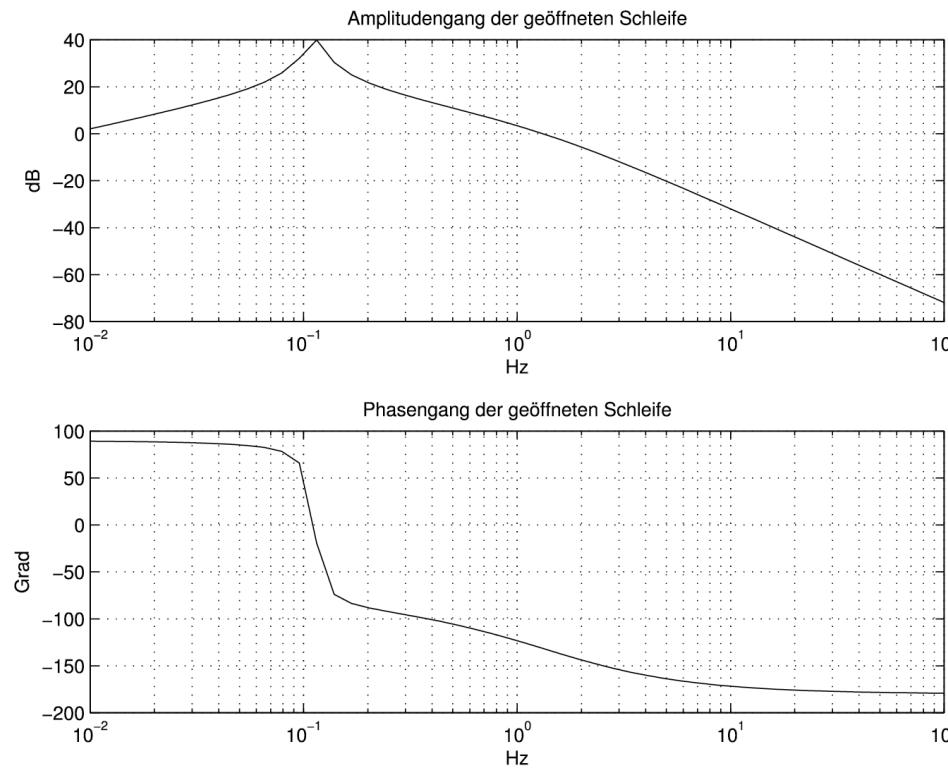


Abb. 3.31: Frequenzgang der geöffneten Schleife (aktiv_tilger_12.m, aktiv_tilger12.m.mdl)

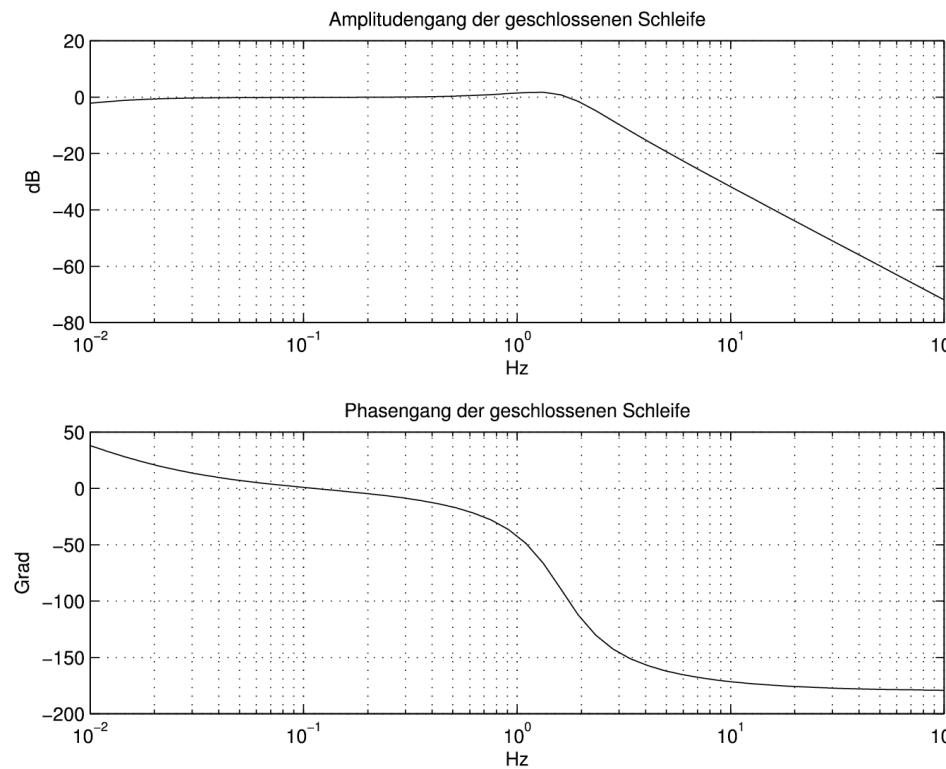


Abb. 3.32: Frequenzgang der geschlossenen Schleife (aktiv_tilger_12.m, aktiv_tilger12.m.mdl)

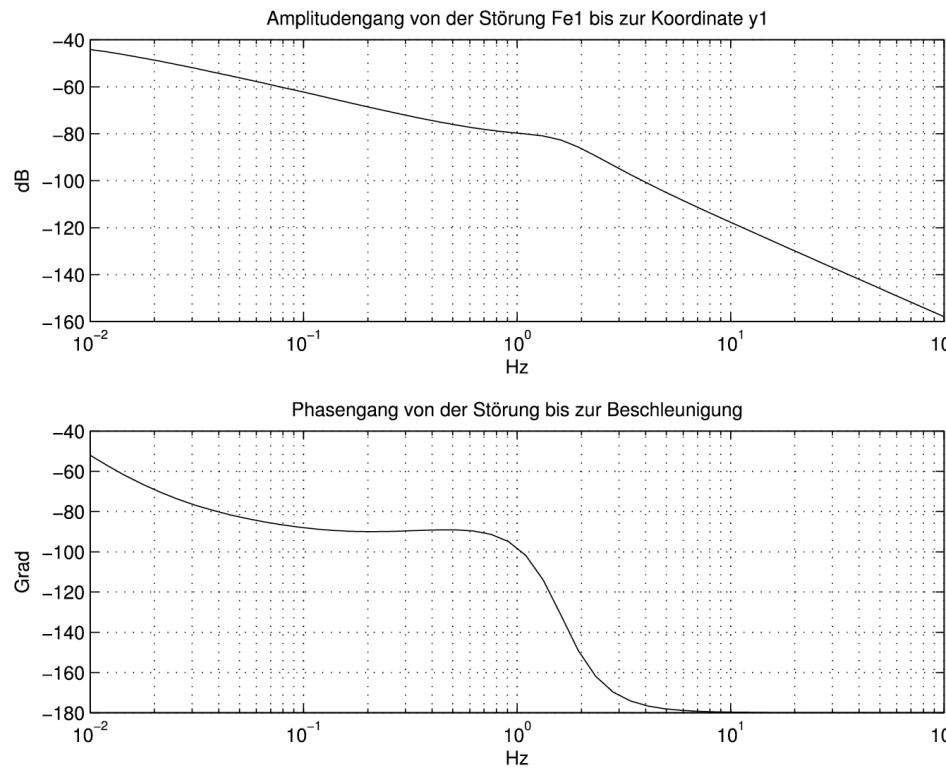


Abb. 3.33: Frequenzgang von der Störungskraft $F_{e1}(t)$ bis zur Lage $y_1(t)$ (aktiv_tilger_12.m, aktiv_tilger12.m.mdl)

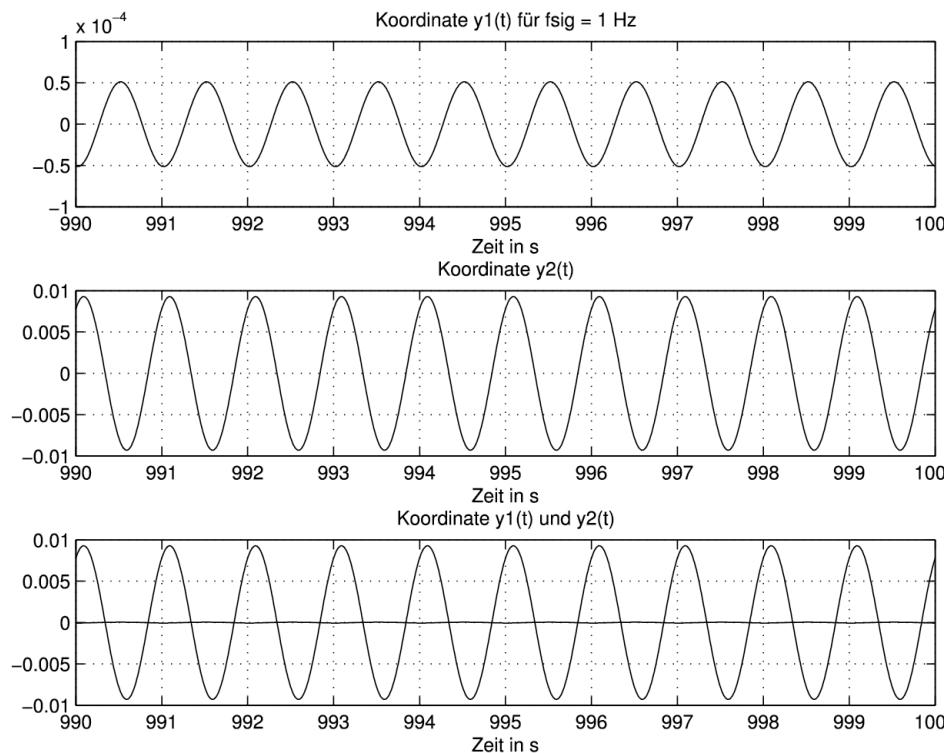


Abb. 3.34: Koordinaten der Lage $y_1(t)$ und der Lage $y_2(t)$ (aktiv_tilger_12.m, aktiv_tilger12.m.mdl)

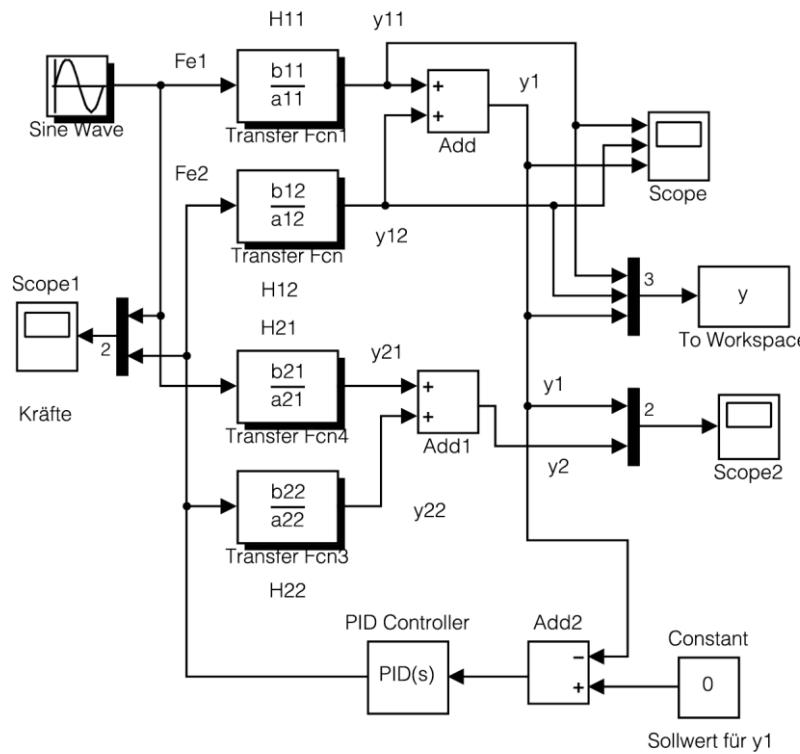


Abb. 3.35: Simulink-Modell des Systems modelliert mit Übertragungsfunktionen (aktiv_tilger_3.m, aktiv_tilger3.mdl)

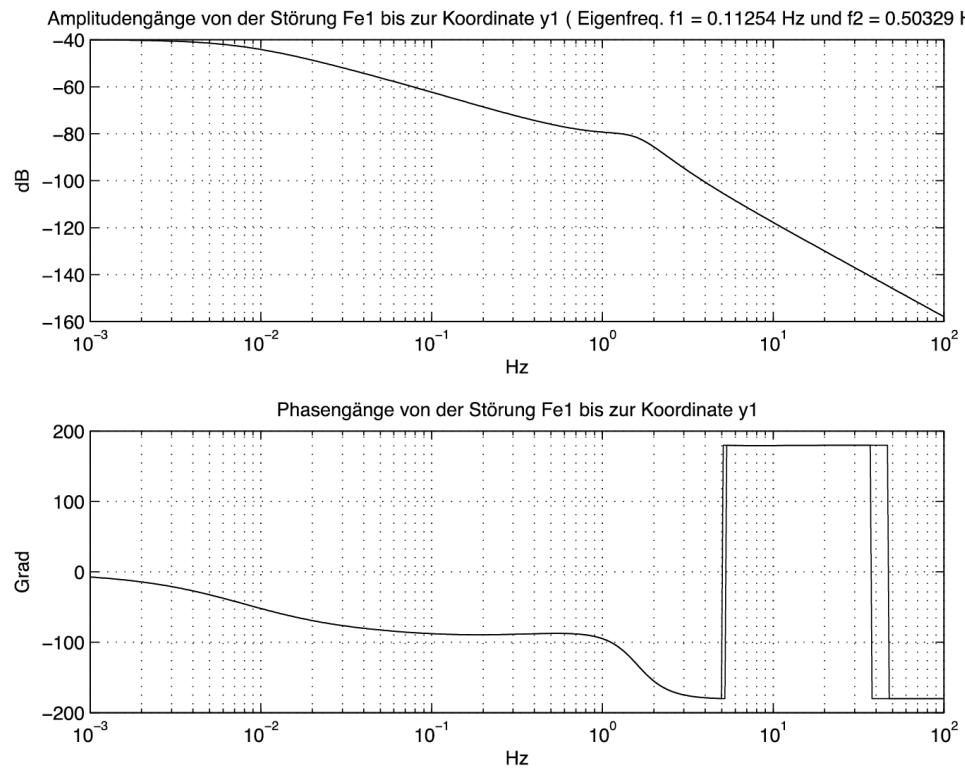


Abb. 3.36: Frequenzgänge von der Störung $F_{e1}(t)$ bis zur Koordinate der Lage $y_1(t)$ mit und ohne Vereinfachungen (aktiv_tilger_3.m, aktiv_tilger3.mdl)

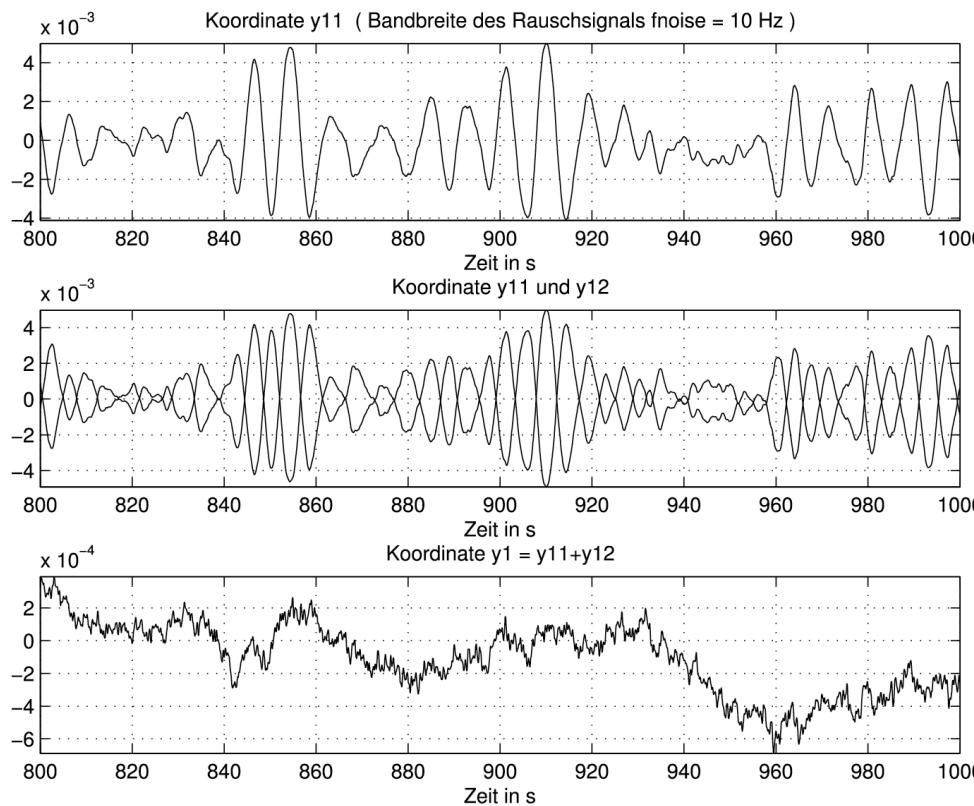


Abb. 3.37: Signale der Simulation für zufälliger Anregungskraft $F_{e1}(t)$ (aktiv_tilger_3.m, aktiv_tilger3.mdl)

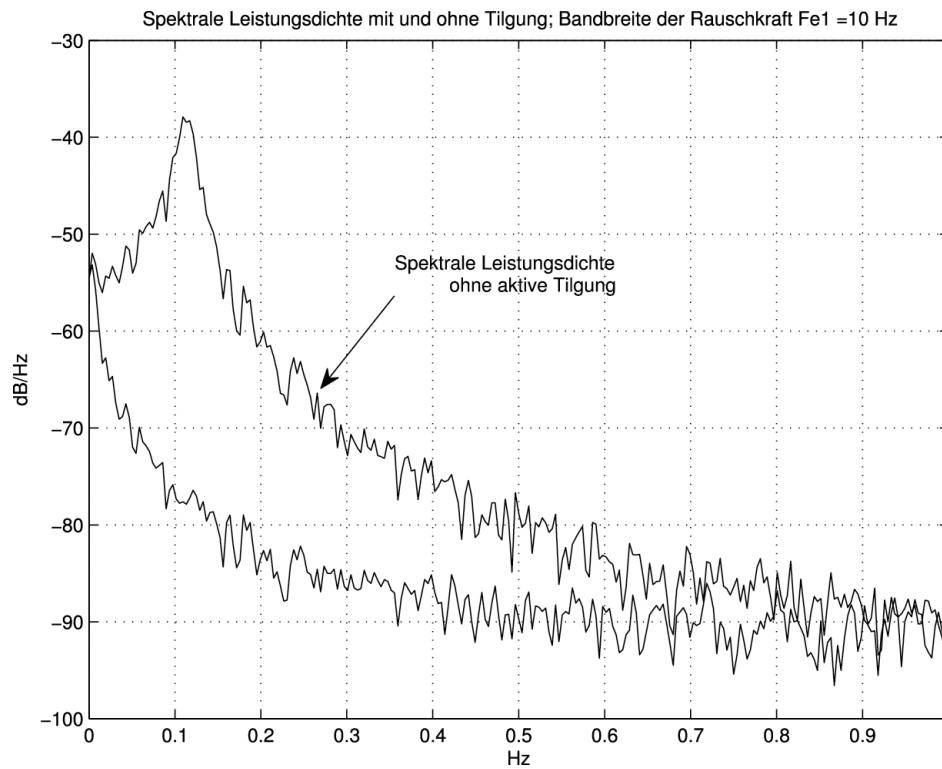


Abb. 3.38: Spektrale Leistungsdichten für zufällige Anregungskraft $F_{e1}(t)$ mit und ohne aktive Tilgung
(aktiv_tilger_3.m, aktiv_tilger3.mdl)

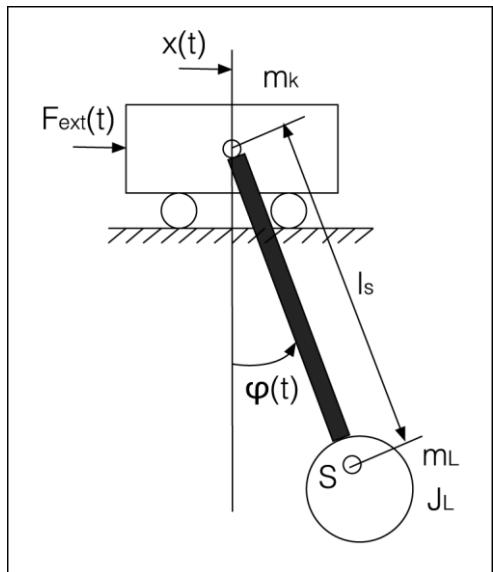


Abb. 3.39: Laufkatze mit Pendellast

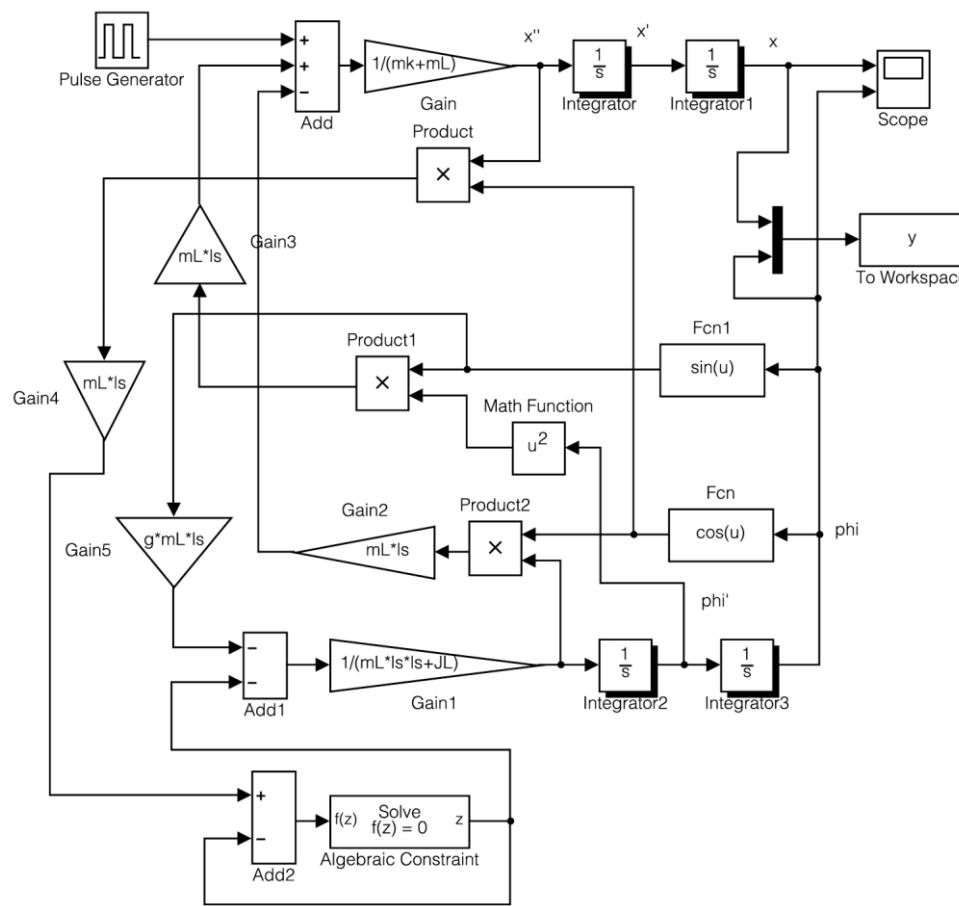


Abb. 3.40: Simulink-Modell der Laufkatze mit Pendellast (laufkatze_1.m, laufkatze1.mdl)

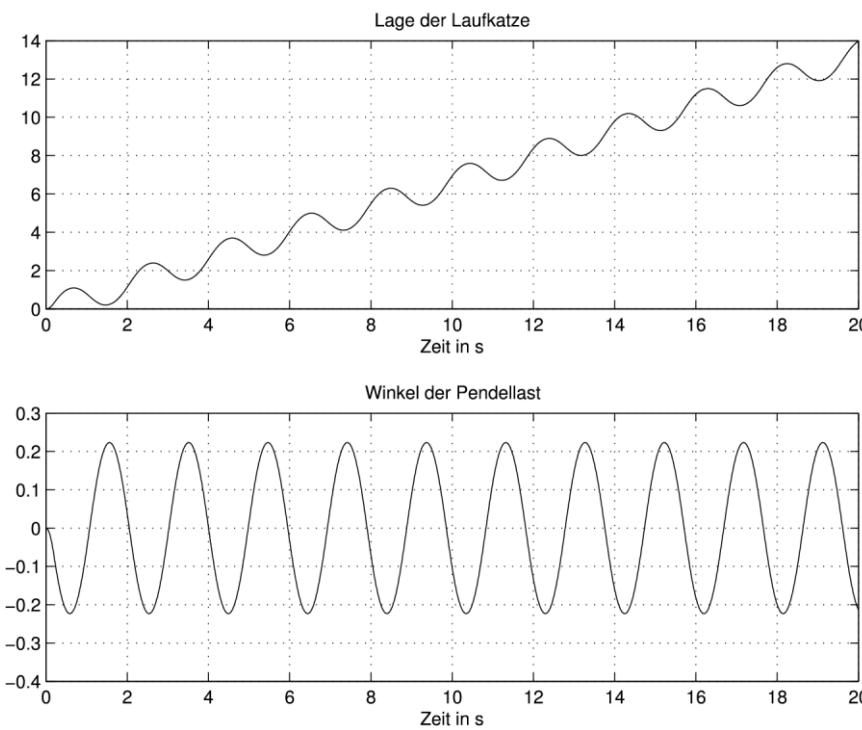


Abb. 3.41: Koordinate $x(t)$ der Laufkatze und Winkel $\phi(t)$ des Pendels (laufkatze_1.m, laufkatze1.mdl)

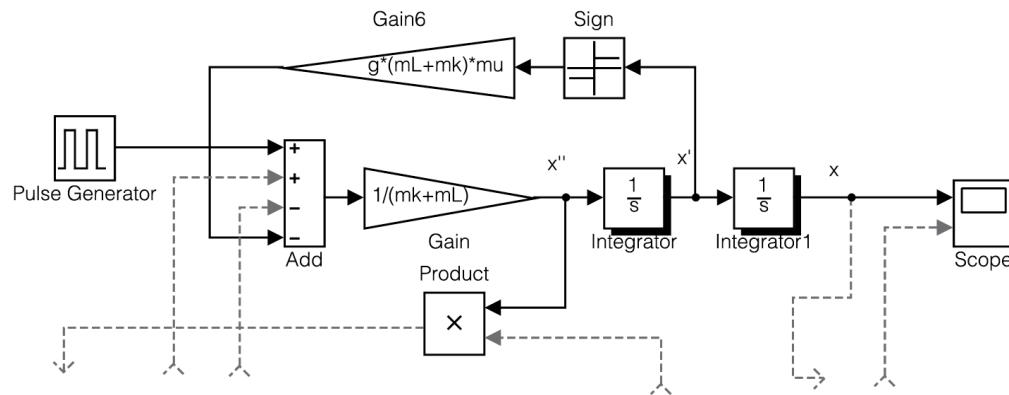


Abb. 3.42: Modelländerung für den Fall mit Gleitreibung (laufkatze_10.m, laufkatze10.mdl)

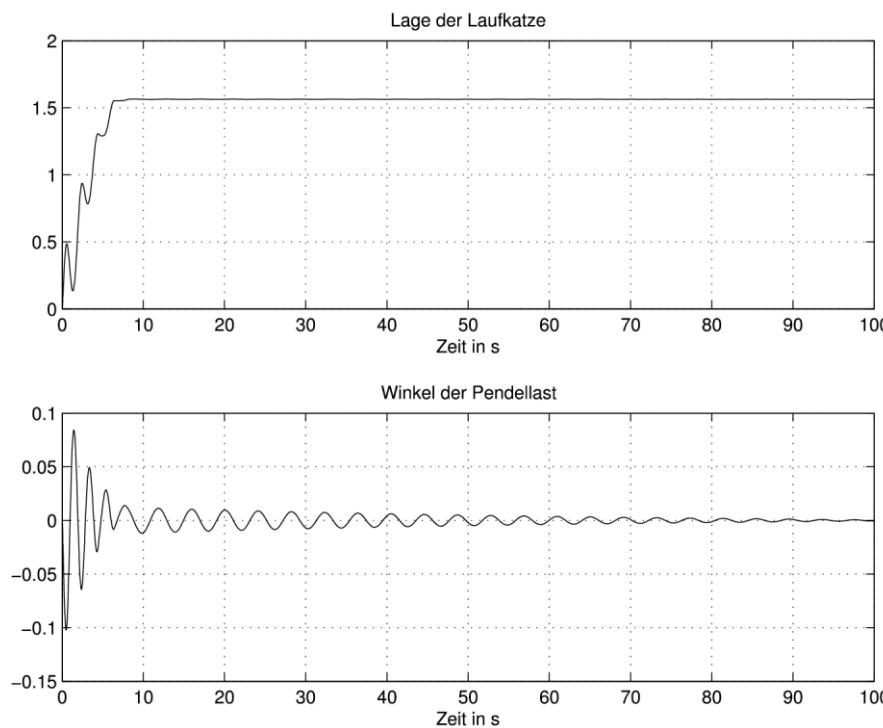


Abb. 3.43: Koordinate $x(t)$ der Laufkatze und Winkel $\varphi(t)$ des Pendels für den Fall mit Gleitreibung
(laufkatze_10.m, laufkatze10.mdl)

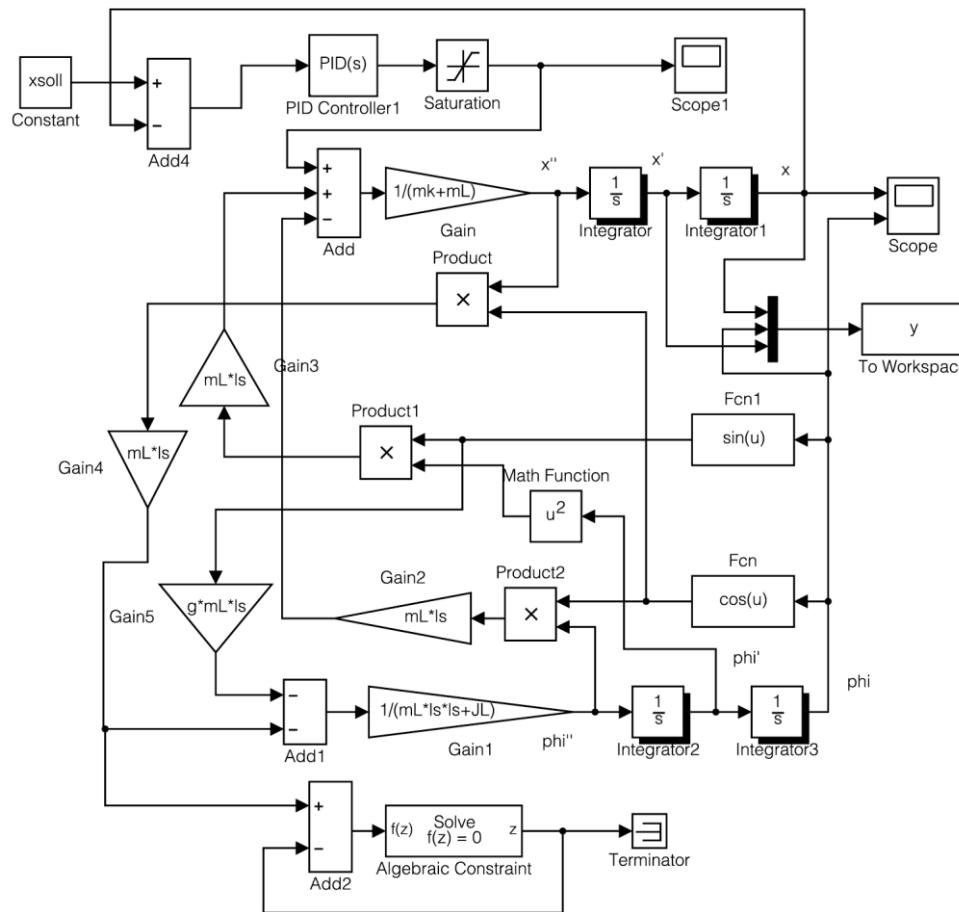


Abb. 3.44: Simulink-Modell der Positionsregelung der Laufkatze ohne Reibung (laufkatze_2.m, laufkatze2.mdl)

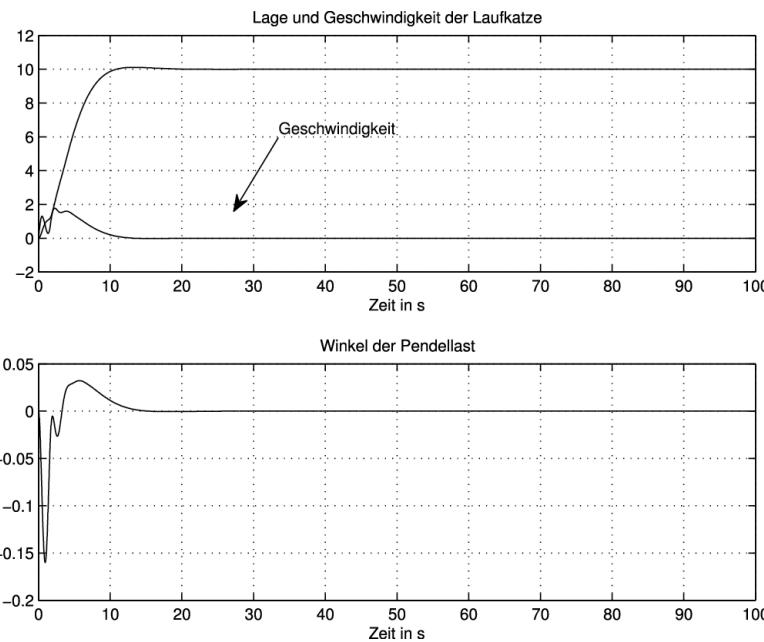


Abb. 3.45: Koordinate der Lage und die Geschwindigkeit der Laufkatze zusammen mit dem Winkel des Pendels (laufkatze_2.m, laufkatze2.mdl)

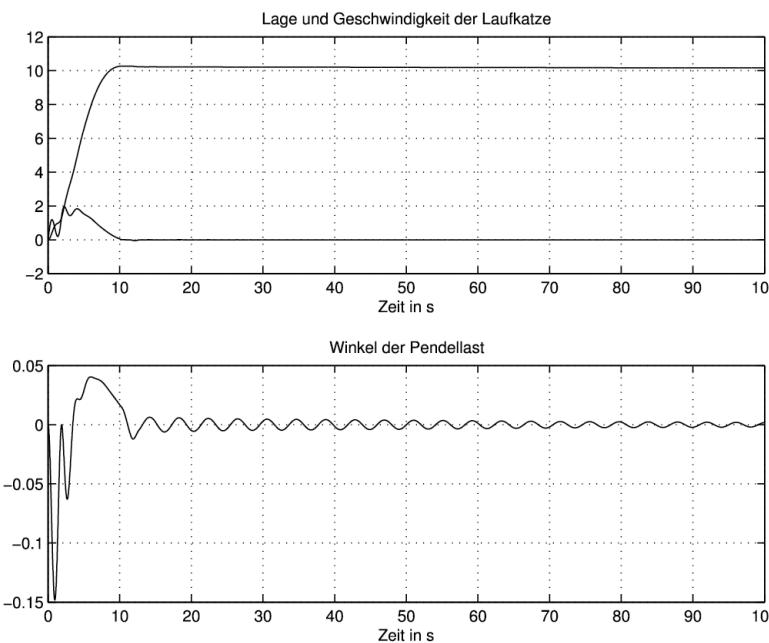


Abb. 3.46: Koordinate der Lage und die Geschwindigkeit der Laufkatze zusammen mit dem Winkel des Pendels für den Fall mit Gleitreibung (laufkatze_20.m, laufkatze20.mdl)

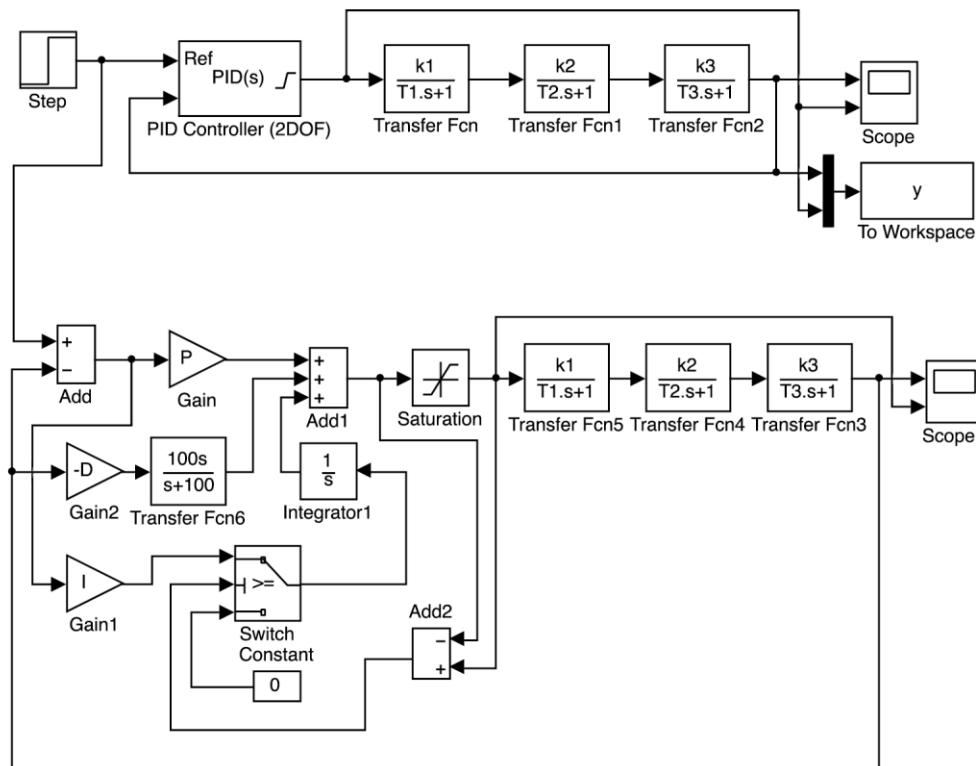


Abb. 3.47: Simulink-Modell des Systems mit Anti-Windup über die *Clamping*-Lösung (PID_windup1.m, PID_windup_1.mdl)

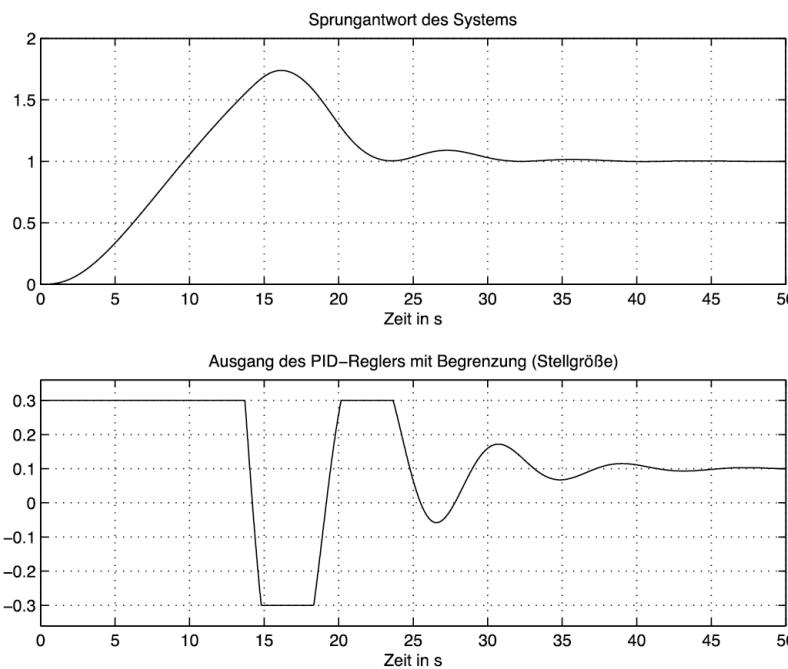


Abb. 3.48: Sprungantwort ohne Anti-Windup (PID_windup1.m, PID_windup_1.mdl)

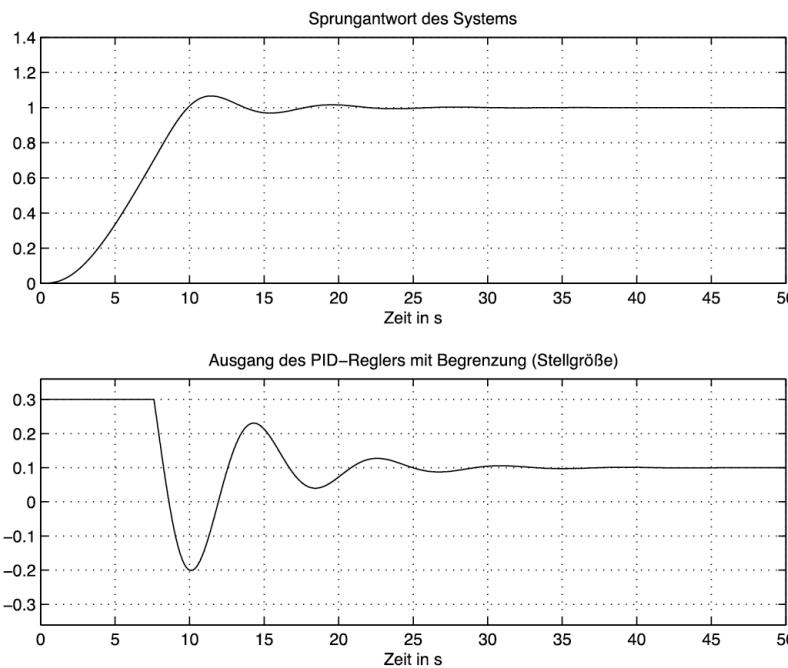


Abb. 3.49: Sprungantwort mit Anti-*Windup* und *Clamping*-Lösung (PID_windup1.m, PID_windup_1.mdl)

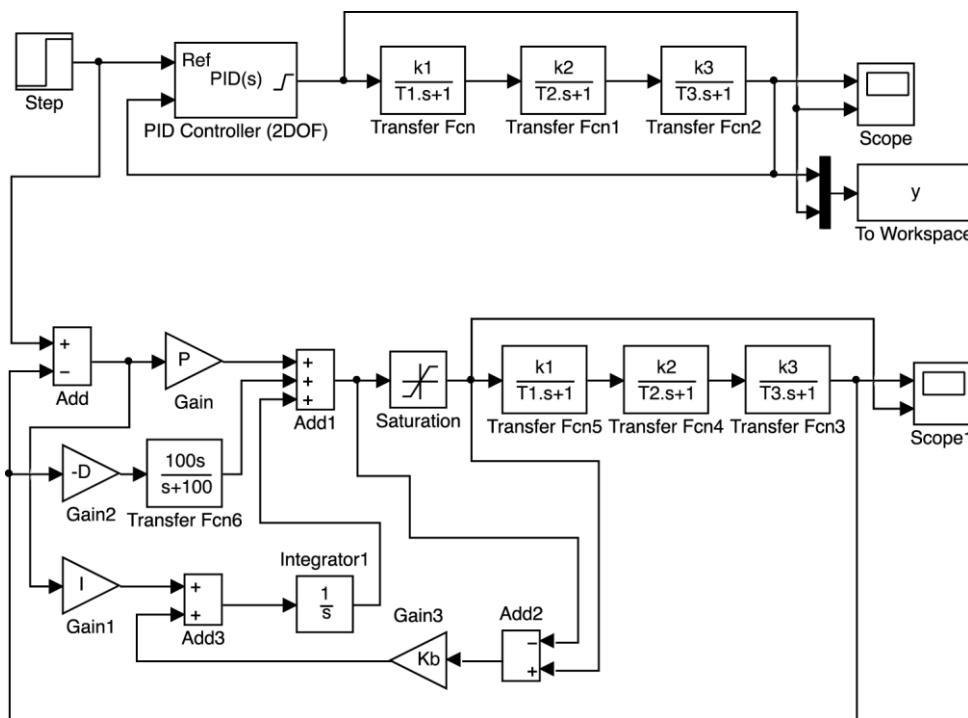


Abb. 3.50: Simulink-Modell des Systems mit Anti-Windup über die *Back-Calculation*-Lösung
(PID_windup1.m, PID_windup_11.mdl)

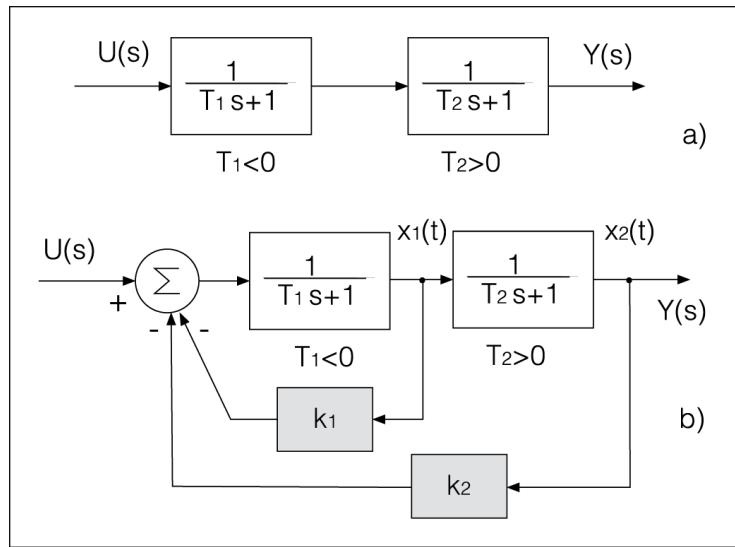


Abb. 3.51: a) Beispiel für einen Prozess, dessen Pole mit Hilfe der Struktur b) an beliebiger Stelle zu platzieren sind

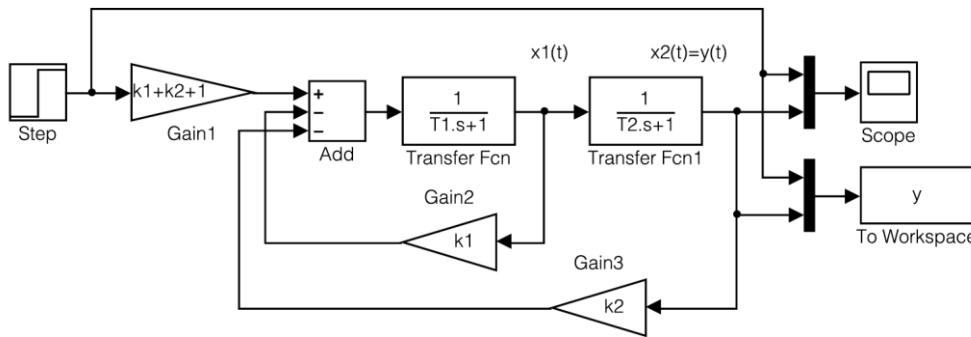


Abb. 3.52: Simulink-Modell für das System mit Rückkopplung für die Polplatzierung (pol_1.m, pol1.mdl)

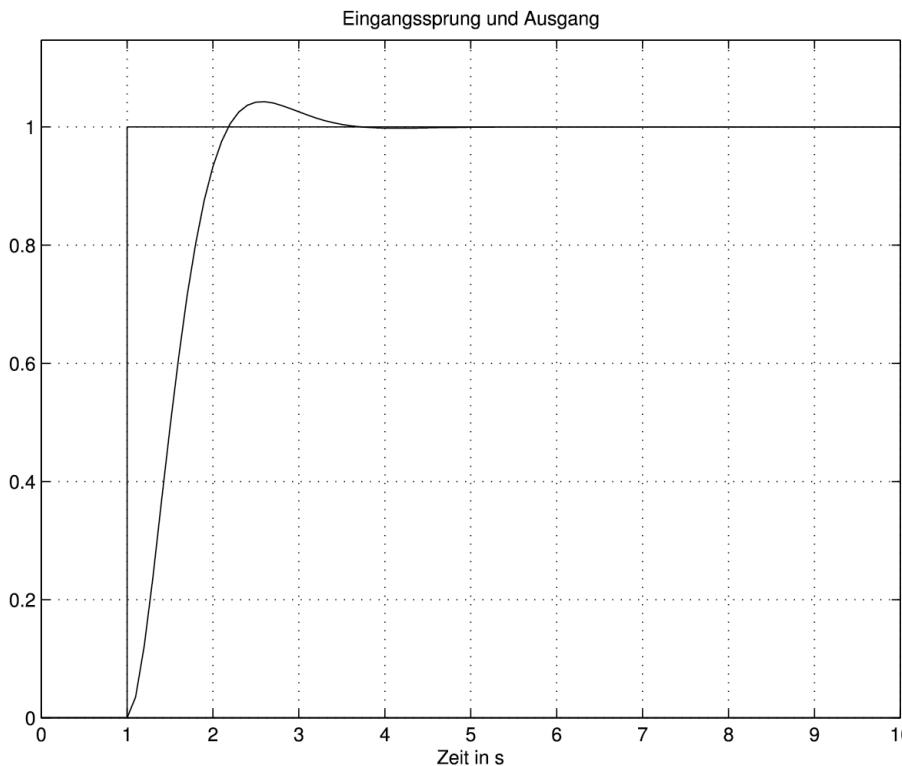


Abb. 3.53: Die Sprungantwort des Systems mit Polplatzierung (pol_1.m, pol1.mdl)

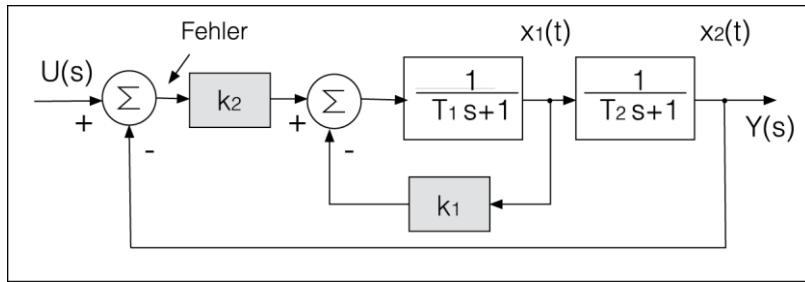


Abb. 3.54: Das durch Polplatzierung korrigierte System als Regelungssystem aufgebaut

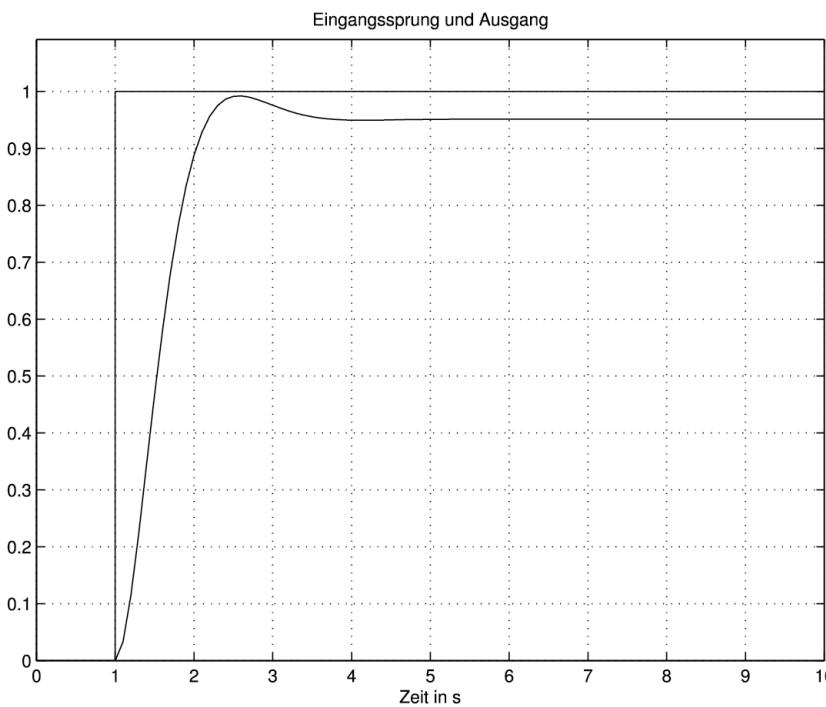


Abb. 3.55: Die Sprungantwort des korrigierten Systems als Regelungssystem aufgebaut (pol_2.m, pol2.mdl)

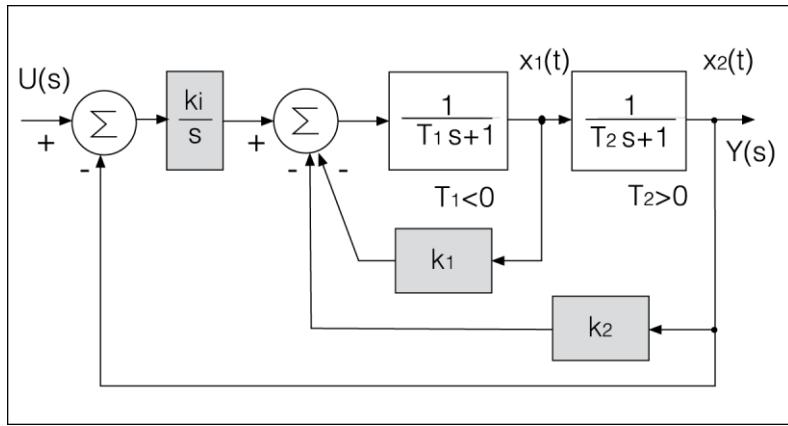


Abb. 3.56: Struktur des korrigierten Systems als Regelungssystem mit I-Anteil aufgebaut

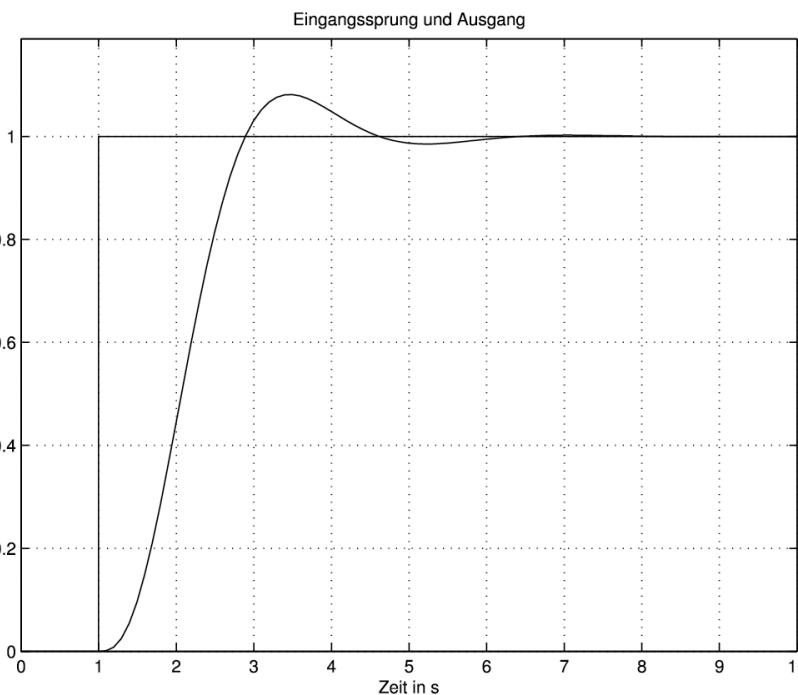


Abb. 3.57: Die Sprungantwort des korrigierten Systems als Regelungssystem mit I-Anteil aufgebaut (pol_3.m, pol3.mdl)

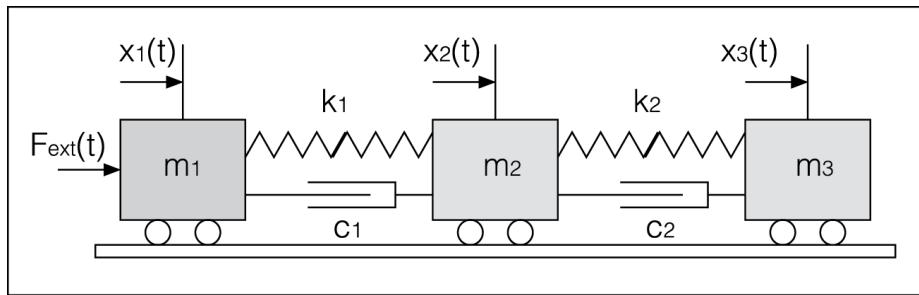


Abb. 3.58: Prozess für das Servosystem

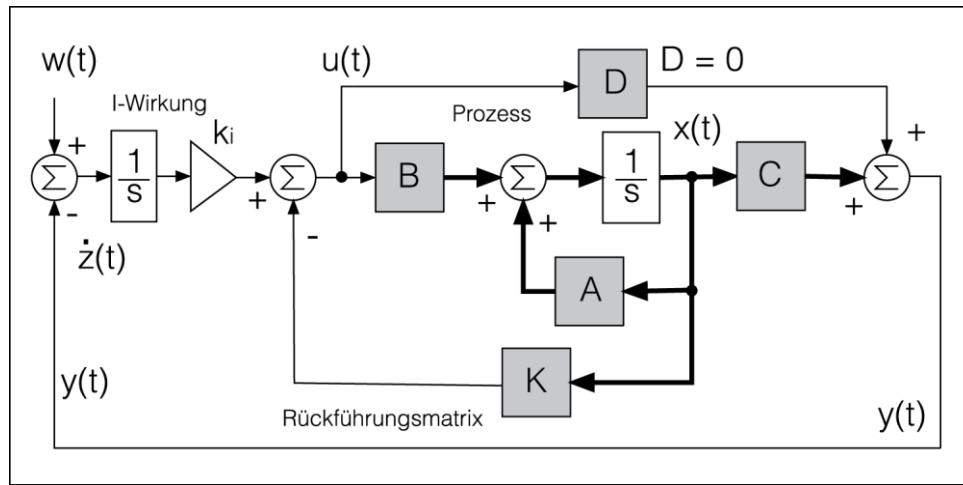


Abb. 3.59: Struktur des Servosystems mit Rückführung für die Polplatzierung und I-Wirkung (pol_4.m, pol4.mdl)

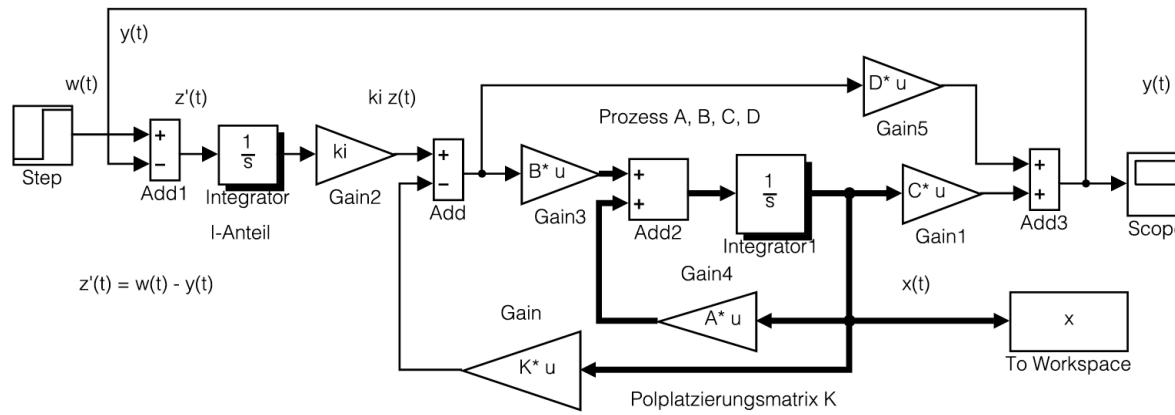


Abb. 3.60: Simulink-Modell für das Servosystem mit Rückkopplung für die Polplatzierung und I-Wirkung (pol_4.m, pol4.mdl)

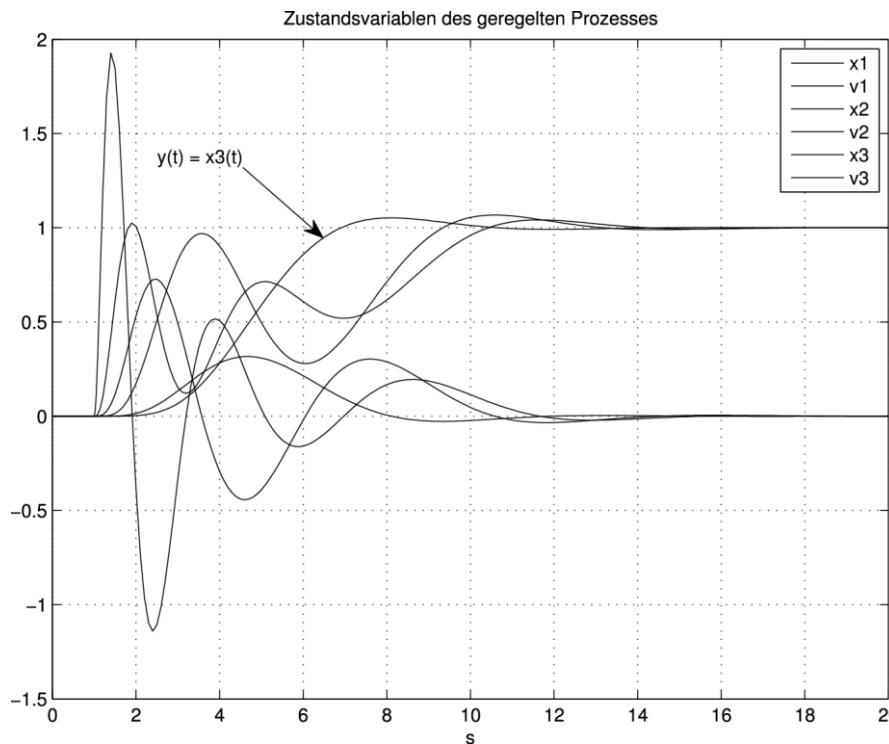


Abb. 3.61: Die sechs Zustandsvariablen des geregelten Prozesses (pol_4.m, pol4.mdl)

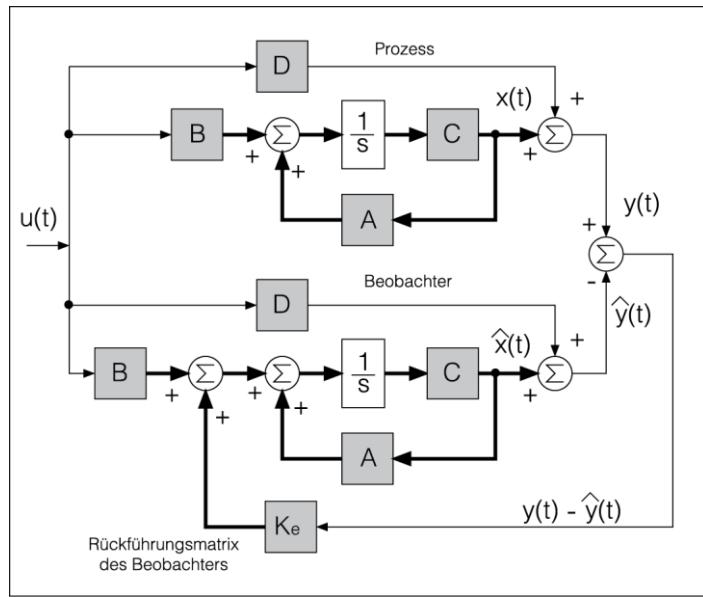


Abb. 3.62: Struktur eines Beobachters

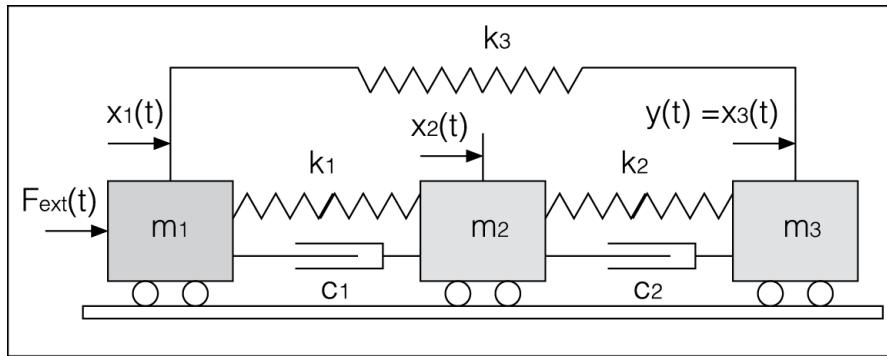


Abb. 3.63: Prozess der beobachtbar ist

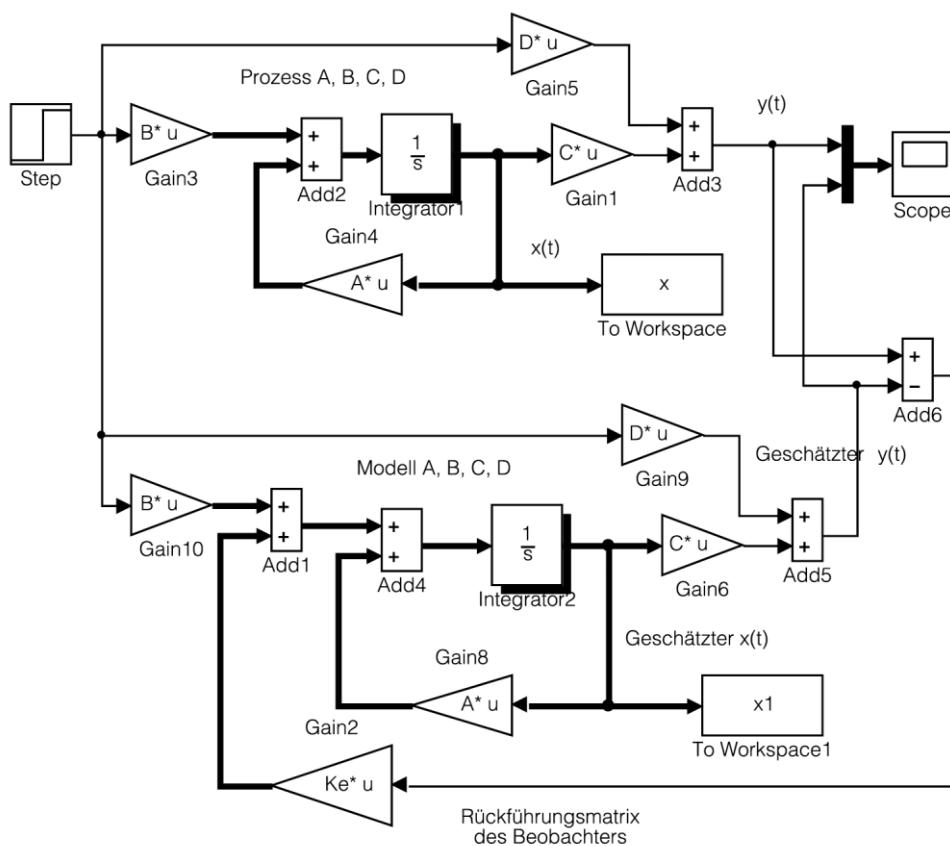


Abb. 3.64: Simulink-Modell für den Prozess mit Beobachter (beobachter_1.m, beobachter1.mdl)

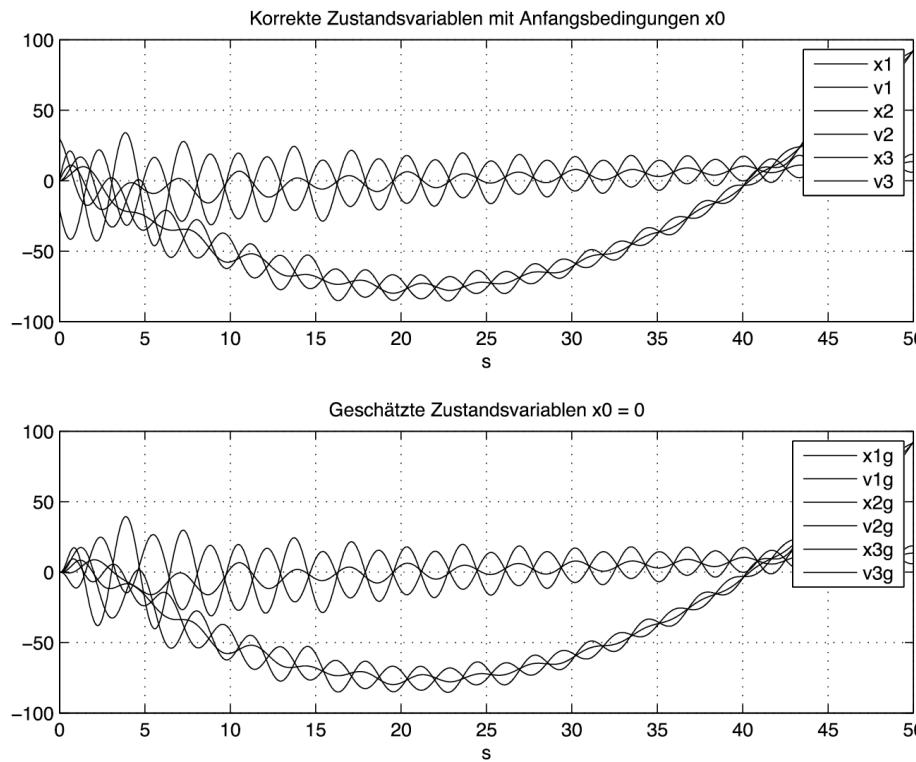


Abb. 3.65: Korrekte und geschätzte Zustandsvariablen (beobachter_1.m, beobachter1.mdl)

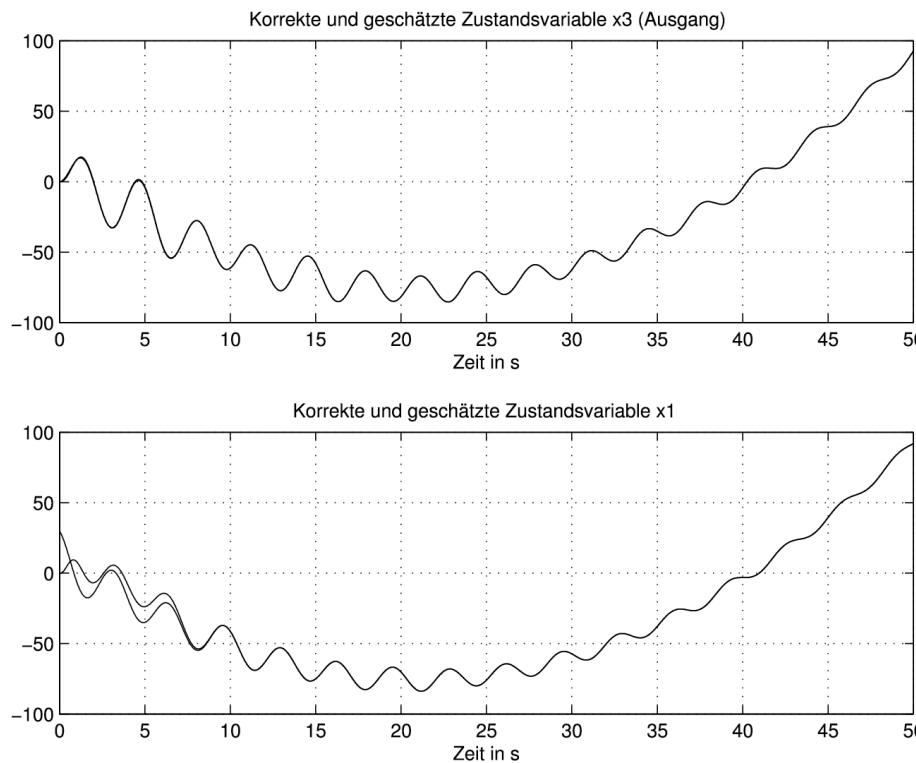


Abb. 3.66: Korrekte und geschätzte Zustandsvariable $y(t) = x_3(t)$ bzw. $x_1(t)$ (beobachter_1.m, beobachter1.mdl)

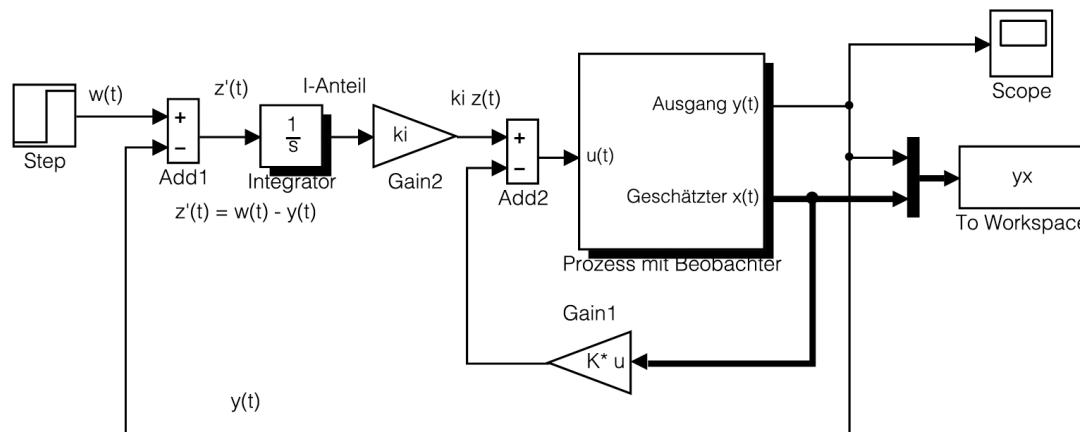


Abb. 3.67: Simulink-Modell für den Prozess mit Beobachter und Positionsregelung mit I-Anteil
(beobachter_2.m, beobachter21.mdl)

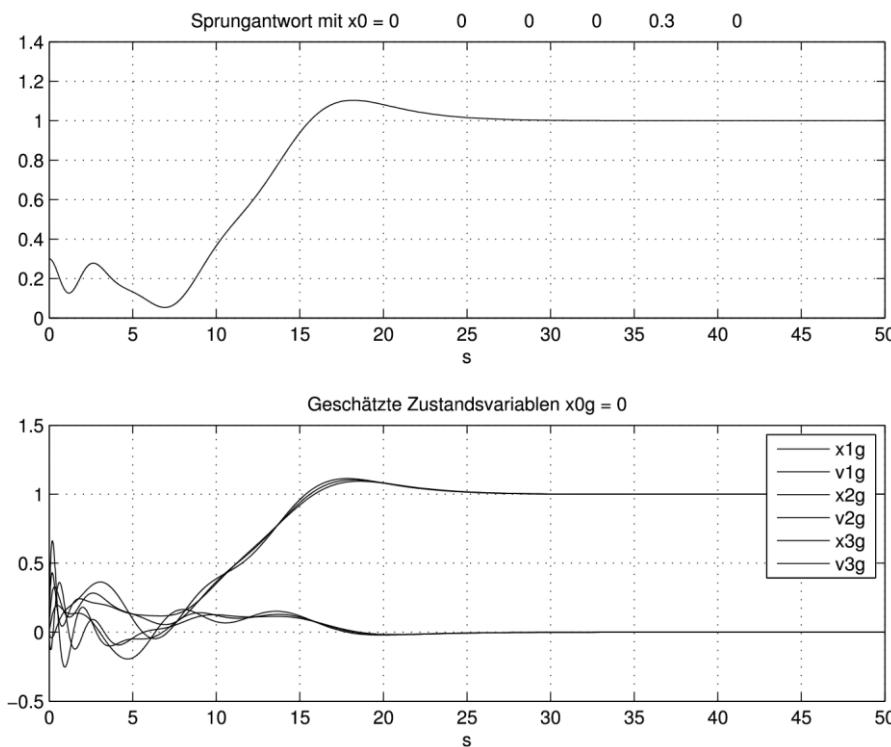


Abb. 3.68: Sprungantwort des Servosystems mit $x(0) \neq 0$ (beobachter_2.m, beobachter21.mdl)

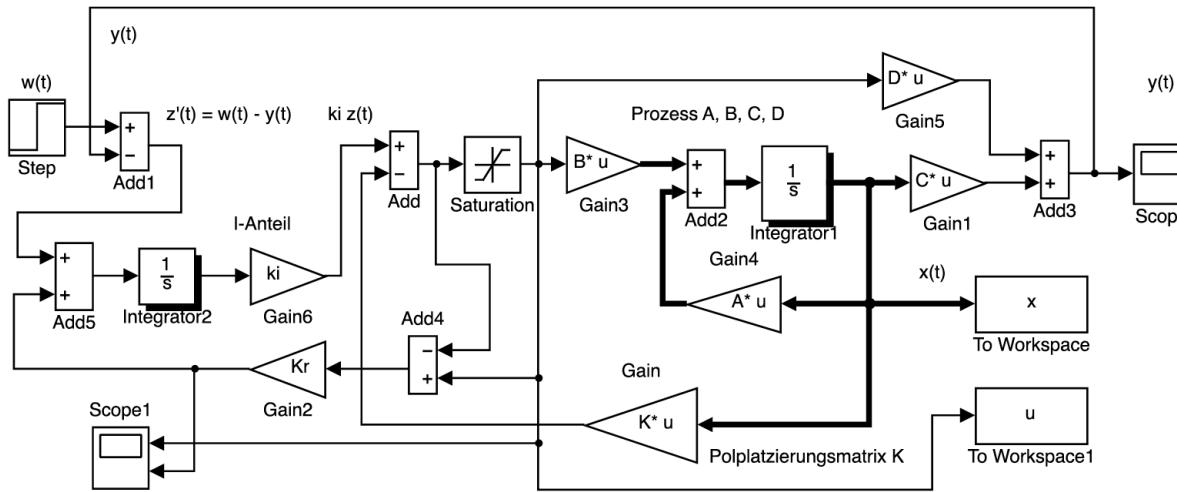


Abb. 3.69: Simulink-Modell der Zustandsregelung mit Anti-Windup-Lösung (pol 41.m, pol41.mdl)

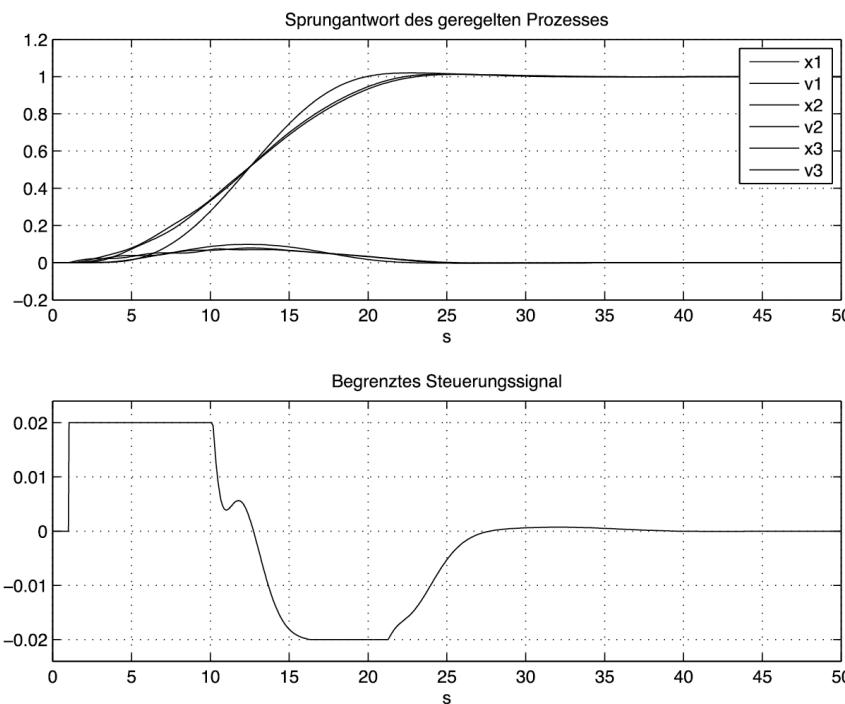


Abb. 3.70: Sprungantwort des Servosystems mit Anti-Windup-Lösung (pol_41.m, pol41.mdl)

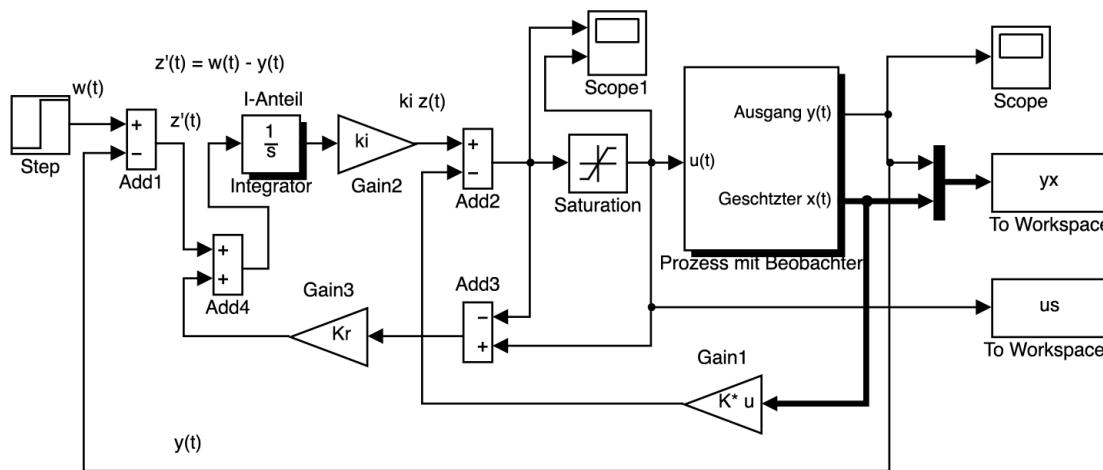


Abb. 3.71: Simulink-Modell der Zustandsregelung mit Beobachter und Anti-*Windup*-Lösung
(beobachter_22.m, beobachter22.mdl)

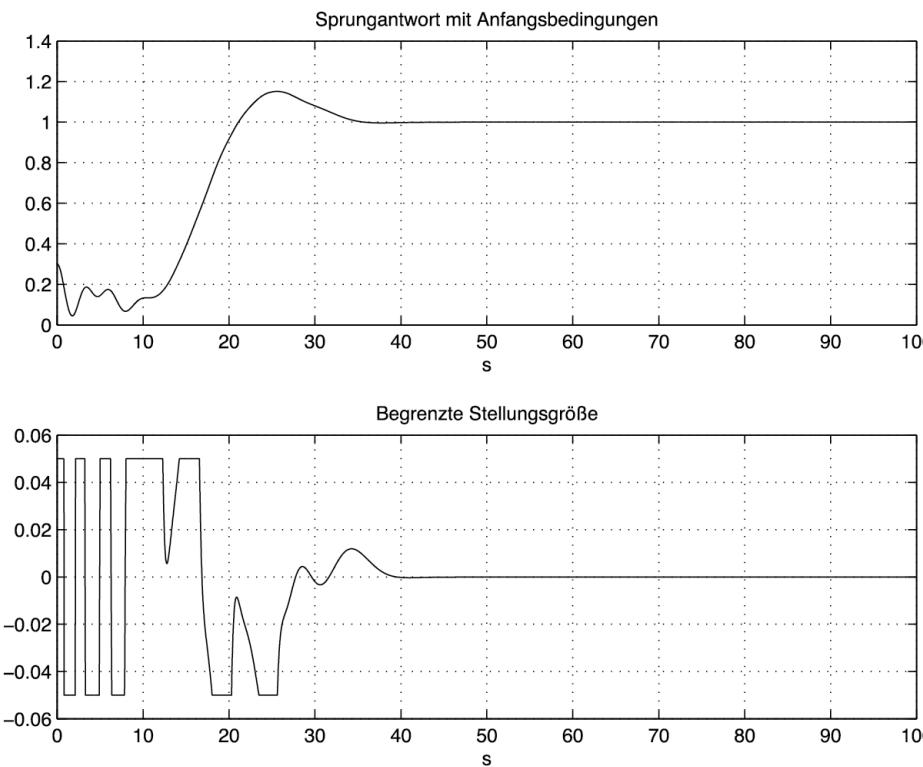


Abb. 3.72: Sprungantwort der Zustandsregelung mit Anti-*Windup*-Lösung (beobachter_22.m, beobachter22.mdl)

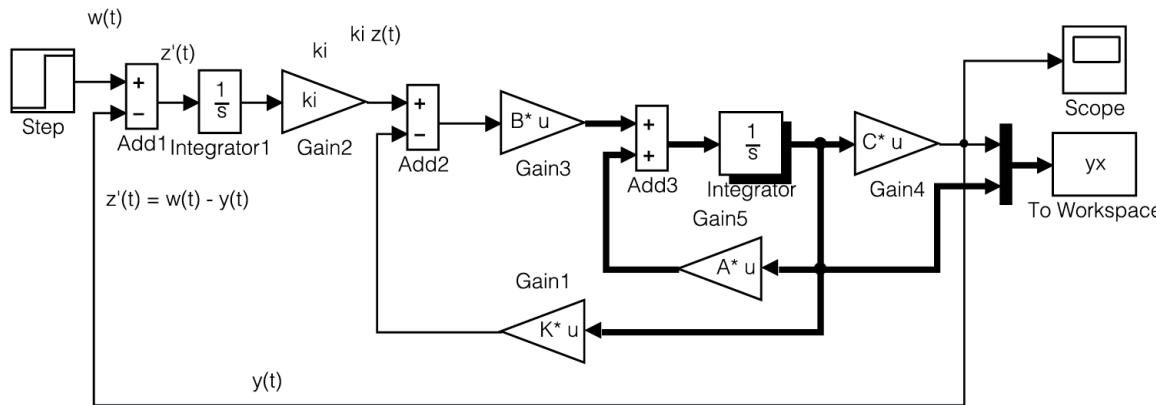


Abb. 3.73: Simulink-Modell der LQR-Servoregelung mit I-Wirkung (LQR_1.m, LQR1.mdl)

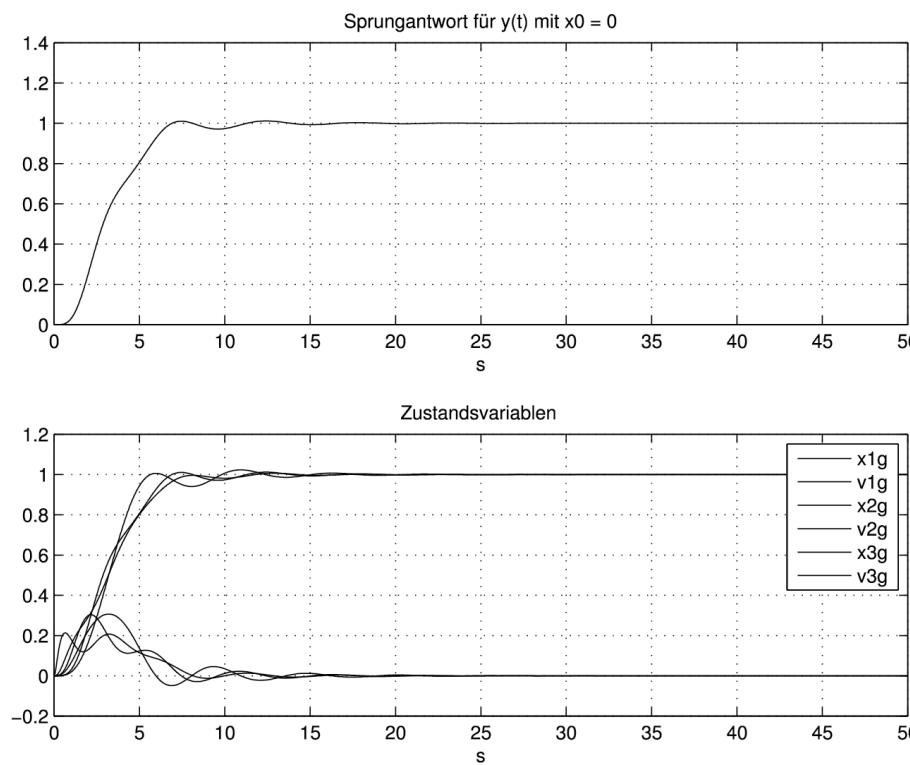


Abb. 3.74: Sprungantwort der LQR-Servoregelung und die Zustandsvariablen des Prozesses (LQR_1.m, LQR1.mdl)

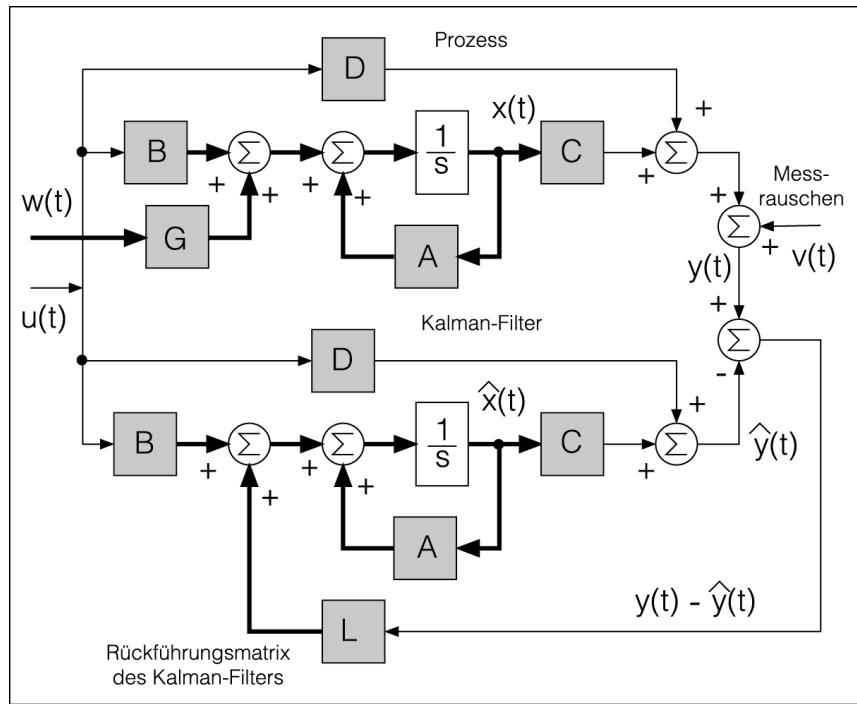


Abb. 3.75: Struktur eines Kalman-Filters zur Schätzung der Zustandsvariablen eines SISO-Prozesses

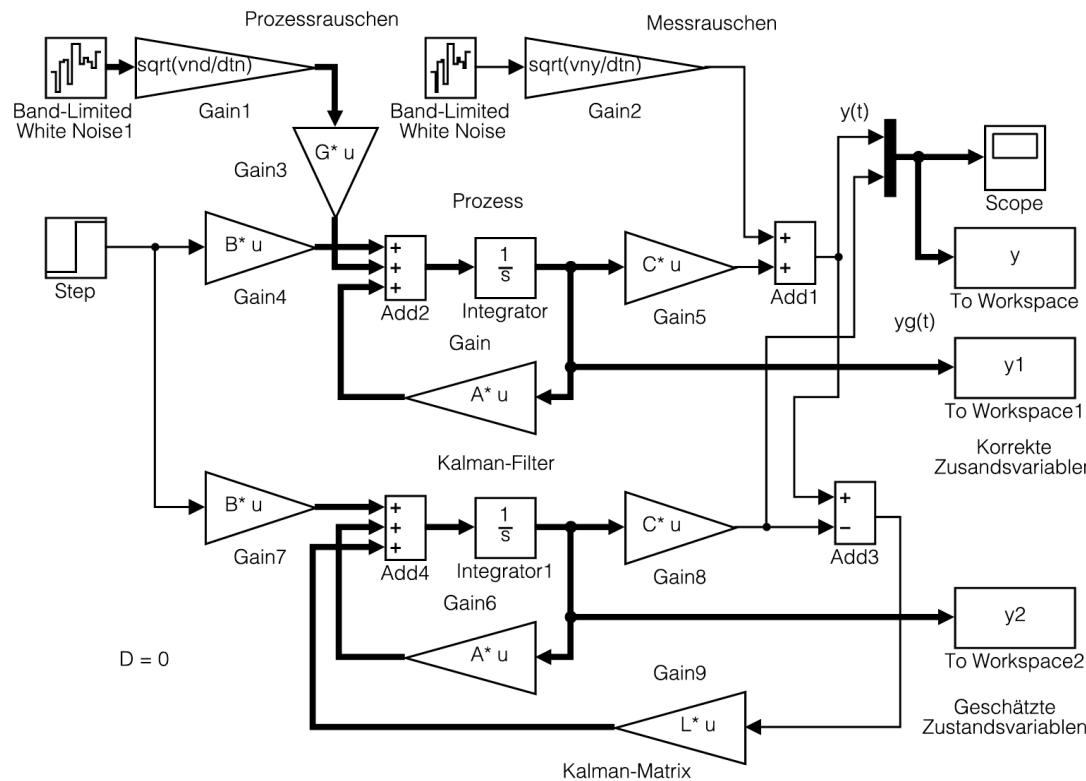


Abb. 3.76: Simulink-Modell des Kalman-Filters (kalman_1.m, kalman1.mdl)

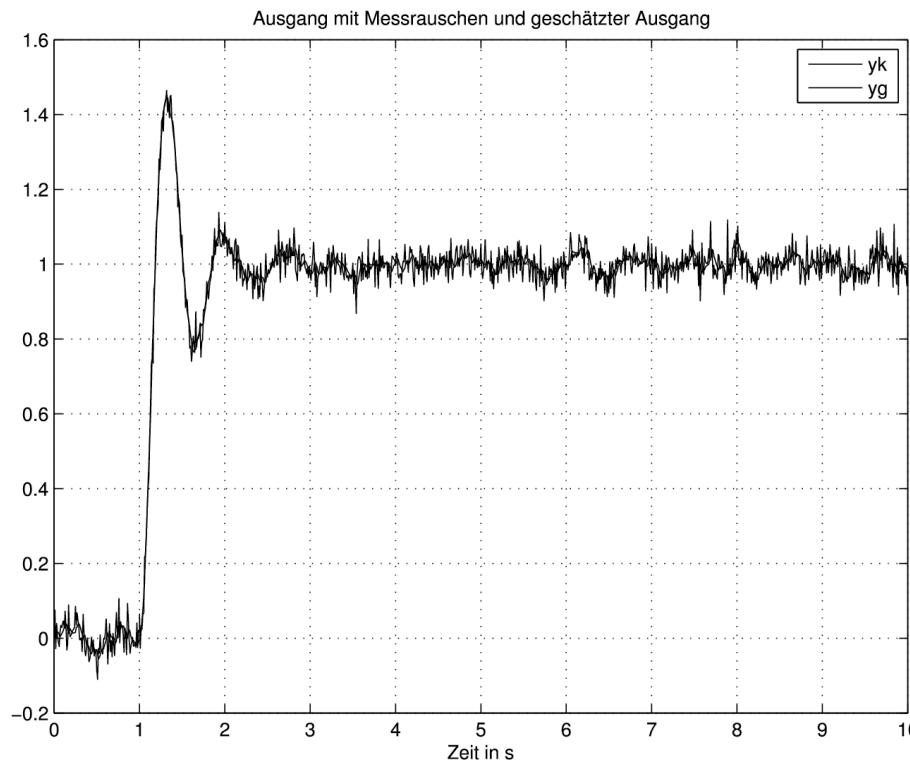


Abb. 3.77: Gemessener und geschätzter Ausgang (kalman_1.m, kalman1.mdl)

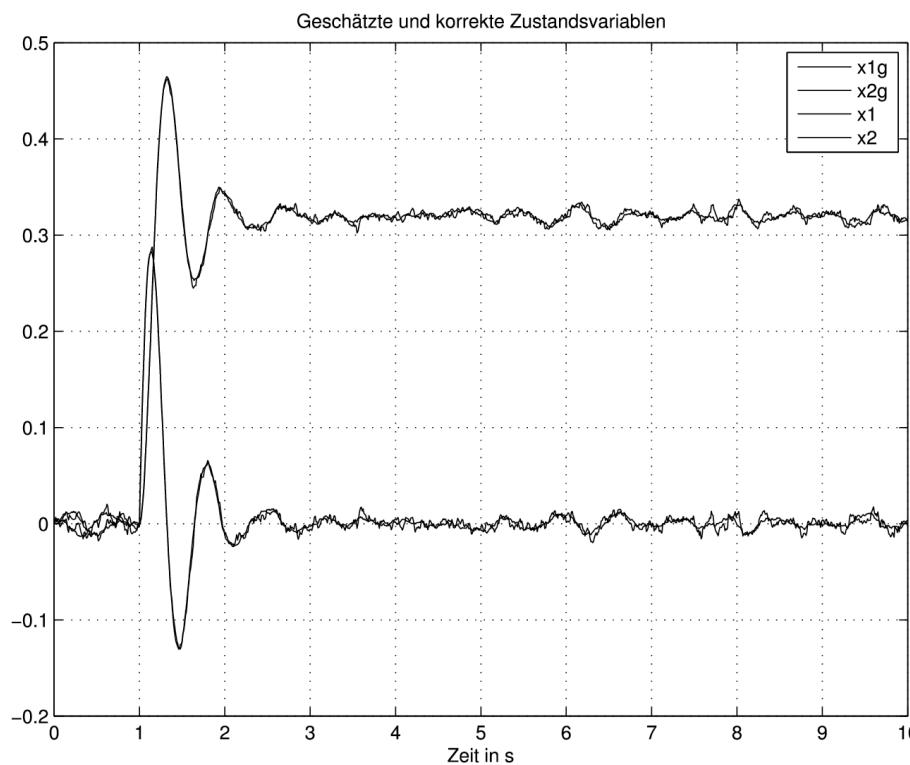


Abb. 3.78: Geschätzte und korrekte Zustandsvariablen (kalman_1.m, kalman1.mdl)

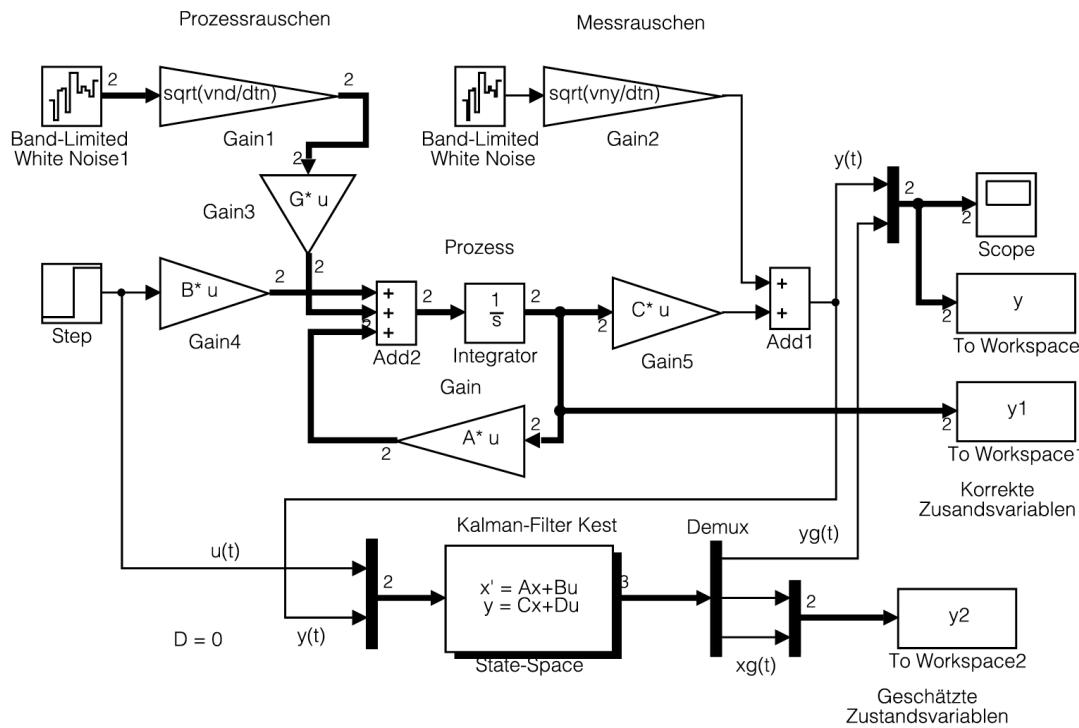


Abb. 3.79: Simulink-Modell des Kalman-Filters mit Zustandsmodell $Kest$ in einem State-Space-Block implementiert (kalman_10.m, kalman10.mdl)

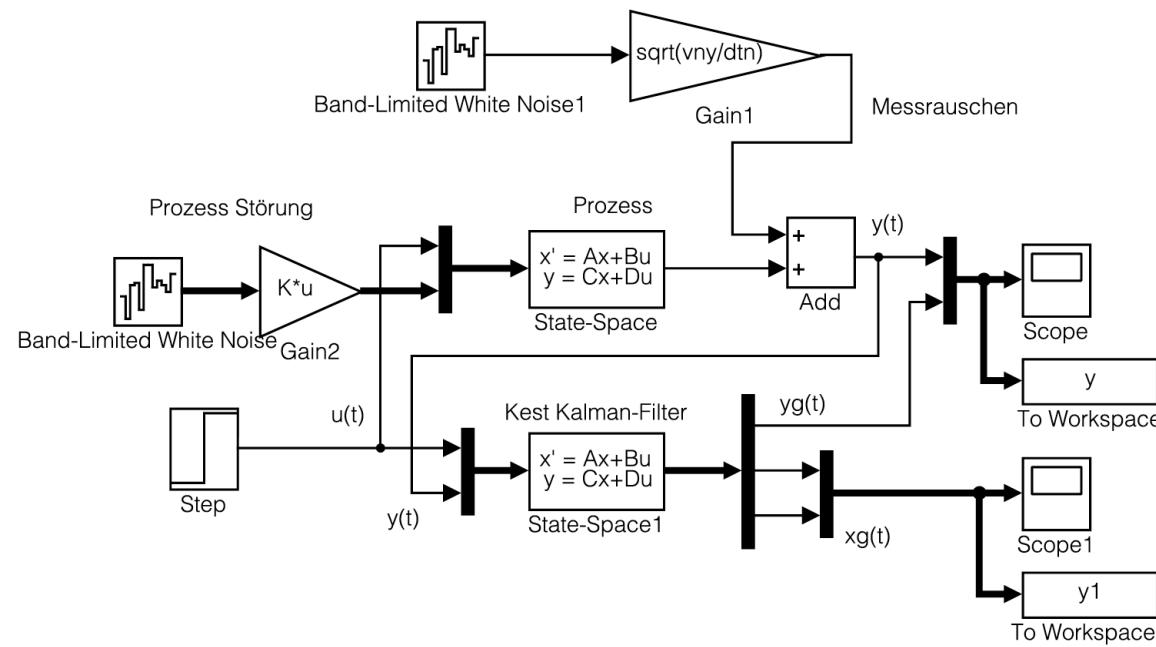


Abb. 3.80: Simulink-Modell des Kalman-Filters mit dem Prozess in einem *State-Space*-Block implementiert (kalman_11.m, kalman11.mdl)

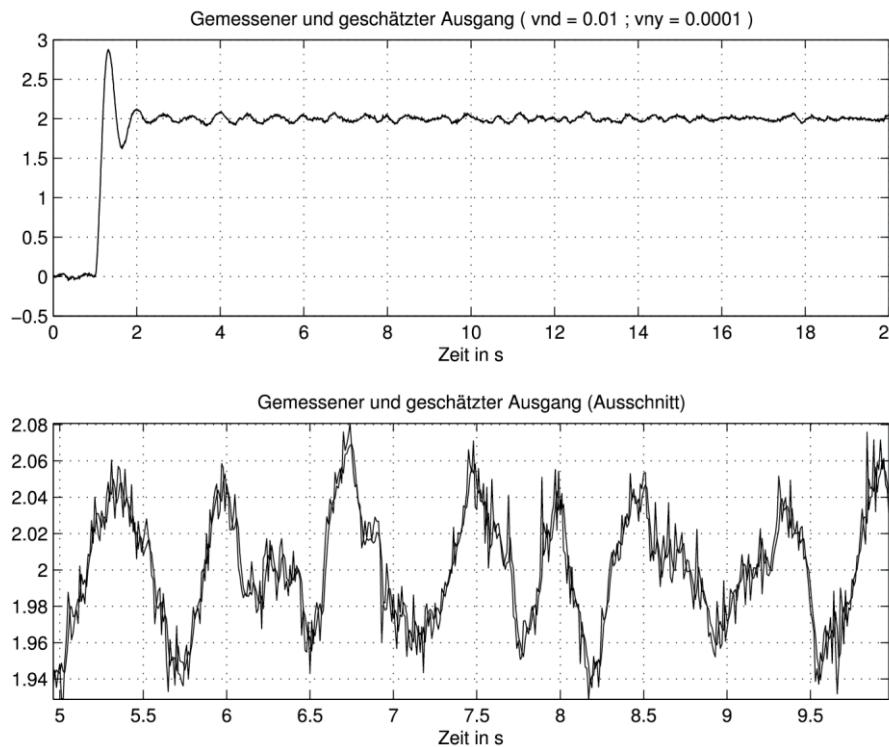


Abb. 3.81: a) Der mit Messrauschen überlagerter Ausgang $y(t)$ und der mit Kalman-Filter geschätzter Ausgang $\hat{y}(t)$ b) Einen Ausschnitt davon (kalman_11.m, kalman11.mdl)

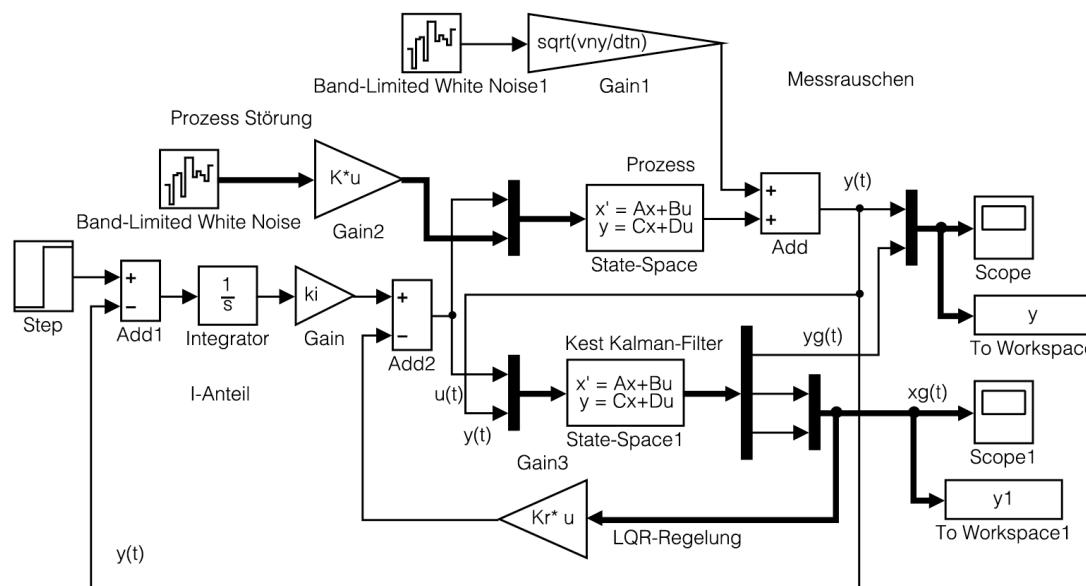


Abb. 3.82: Simulink-Modell der LQR-Regelung mit Kalman-Filter für die Schätzung der Zustandsvariablen
(kalman_12.m, kalman12.mdl)

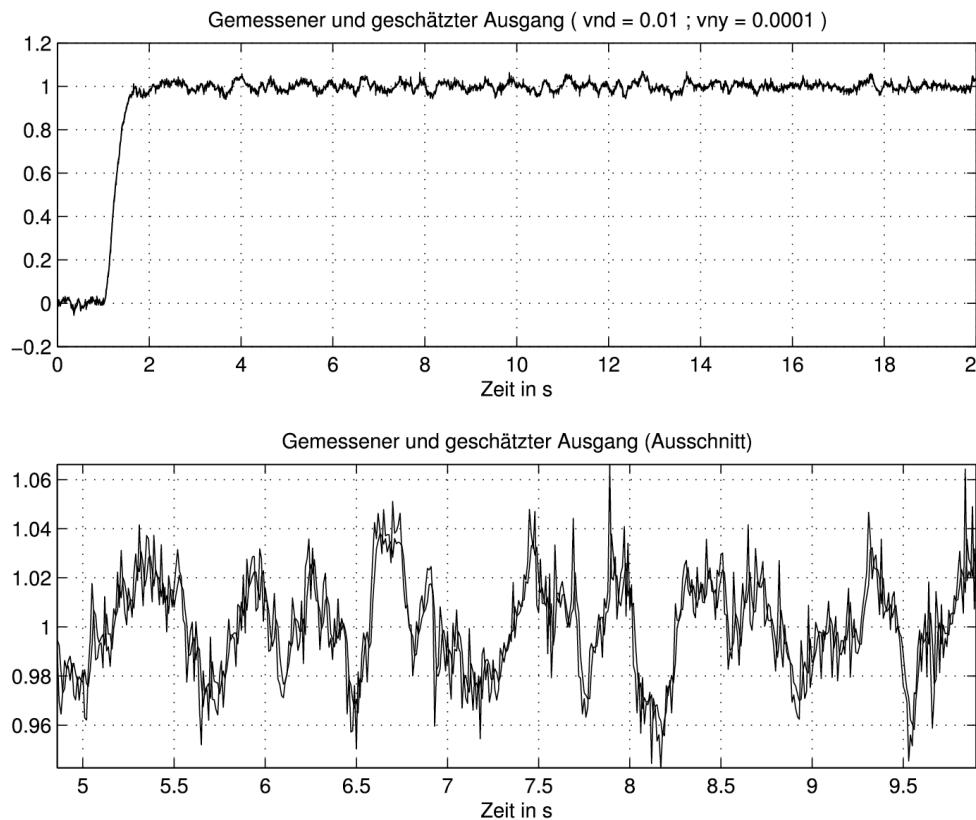


Abb. 3.83: a) Der mit Messrauschen überlagerter, geregelter Ausgang $y(t)$ und der mit Kalman-Filter geschätzter Ausgang $\hat{y}(t)$ b) Ein Ausschnitt davon (kalman_12.m, kalman12.mdl)

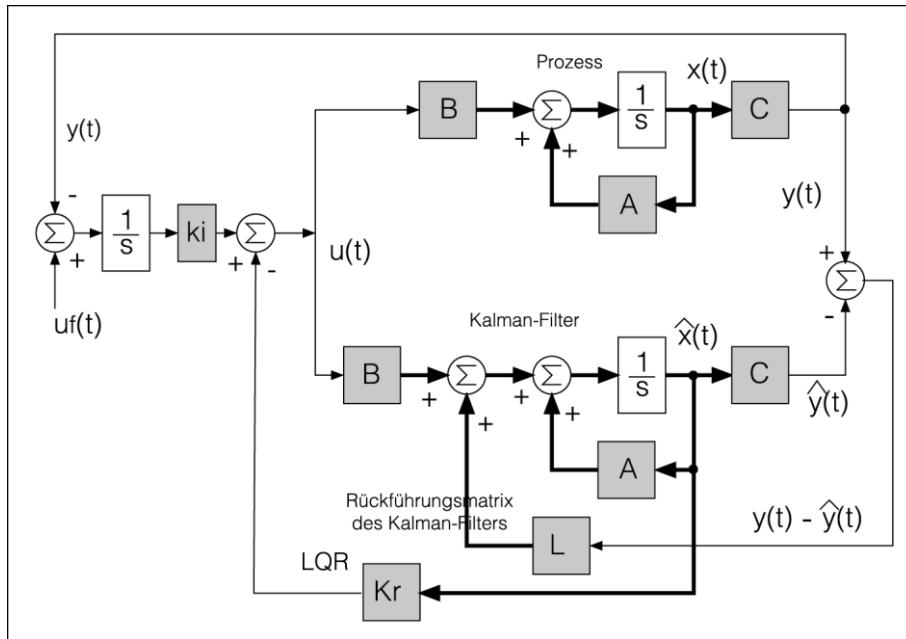


Abb. 3.84: Struktur des Systems ohne Prozess-Störung und ohne Messrauschen

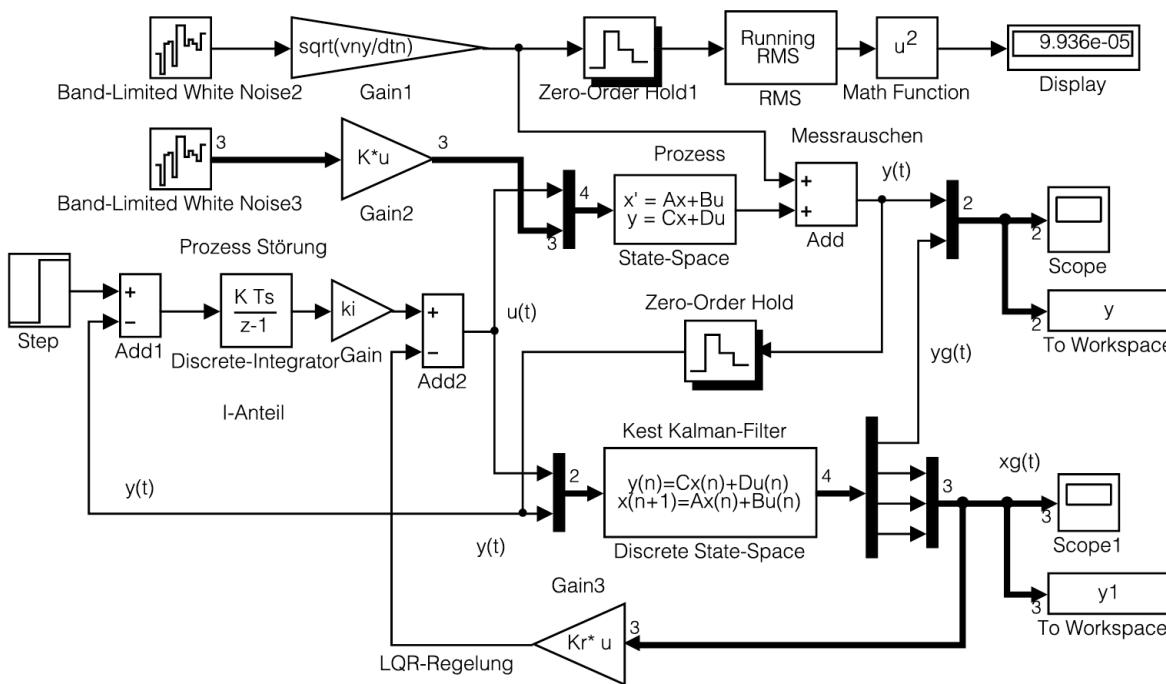


Abb. 3.85: Simulink-Modell der LQR-Regelung mit zeitdiskretem Kalman-Filter (kalman_1d.m, kalman1d.mdl)

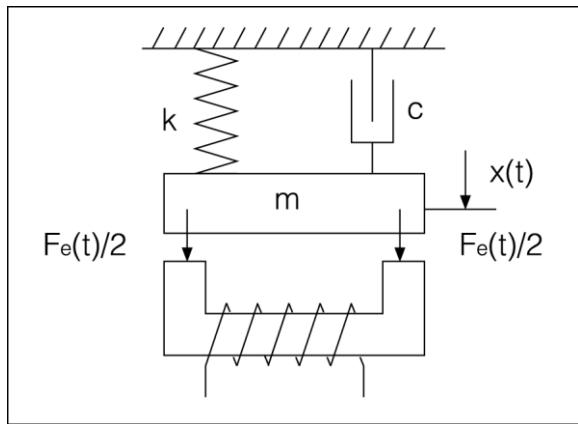


Abb. 3.86: Einfaches Feder-Masse-System

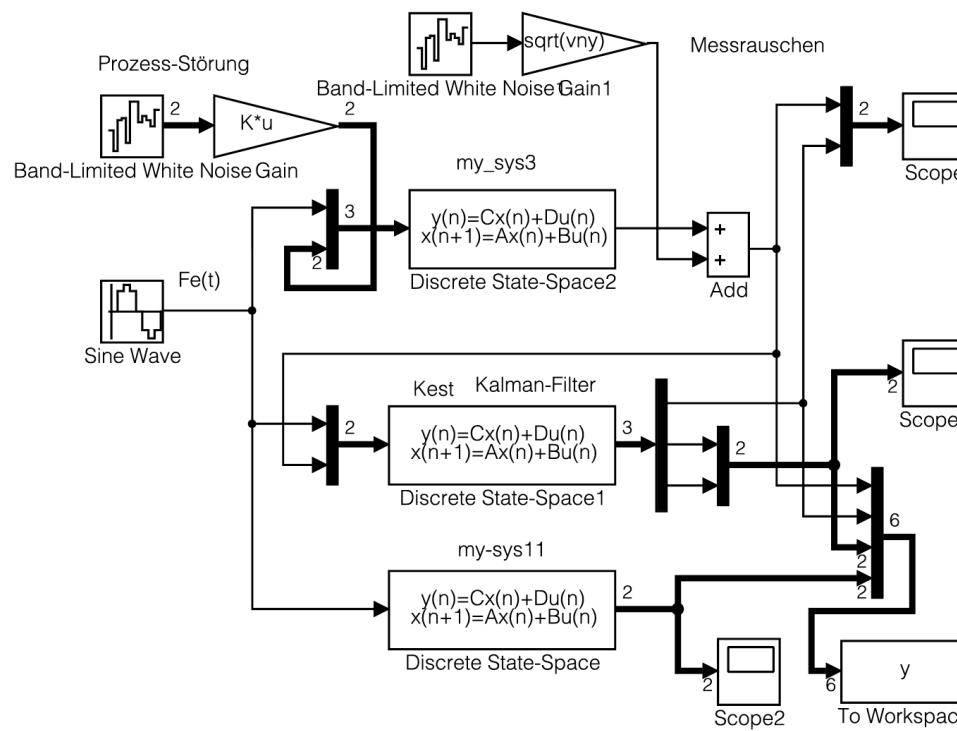


Abb. 3.87: Simulink-Modell der Schätzung der Zustandsvariablen aus der Beschleunigung (kalman_2d.m, kalman2d.mdl)

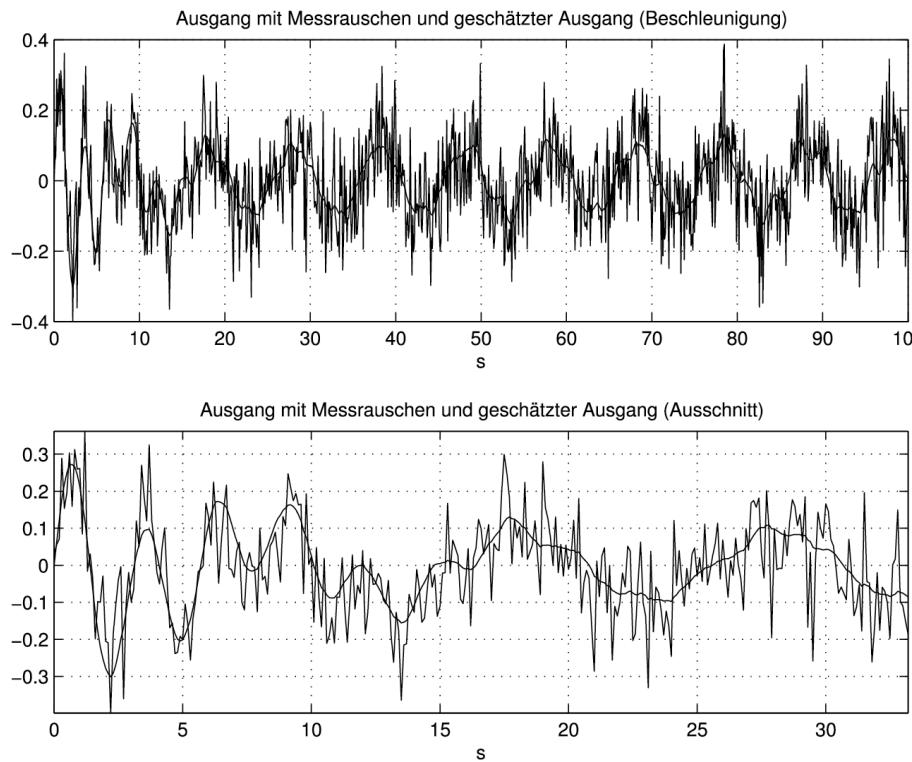


Abb. 3.88: Ausgang mit Messrauschen und geschätzter Ausgang (Beschleunigung) (kalman_2d.m, kalman2d.mdl)

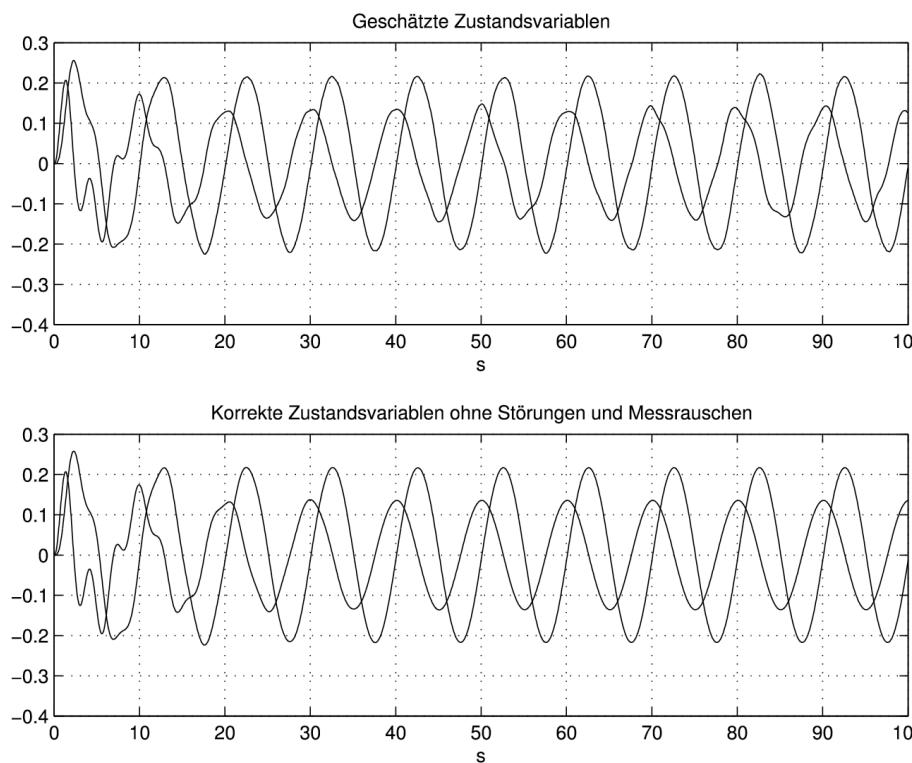


Abb. 3.89: a) Geschätzte Zustandsvariablen des Prozesses b) Korrekte Zustandsvariablen (kalman_2d.m, kalman2d.mdl)

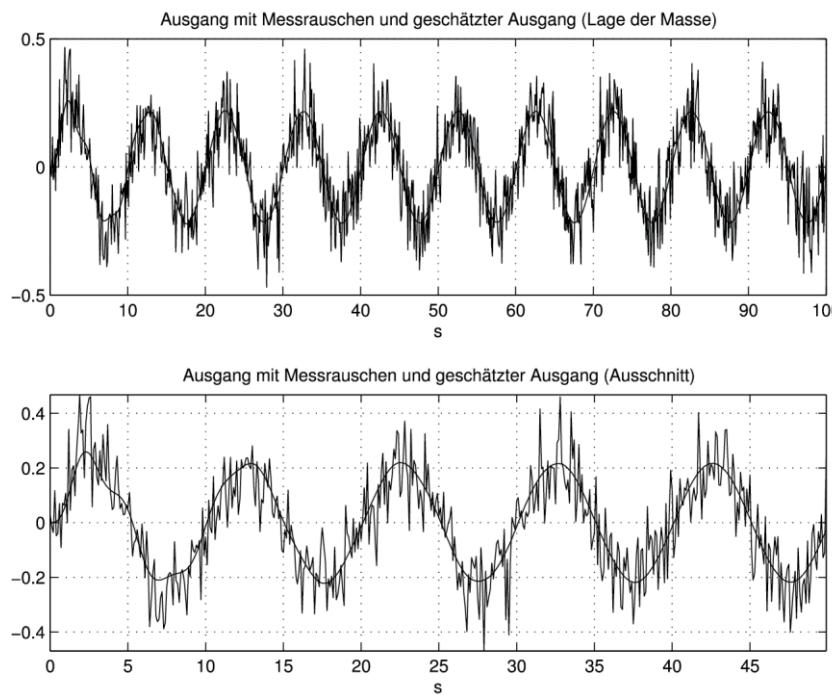


Abb. 3.90: Ausgang mit Messrauschen und geschätzter Ausgang (Lage der Masse) (kalman_3d.m, kalman3d.mdl)

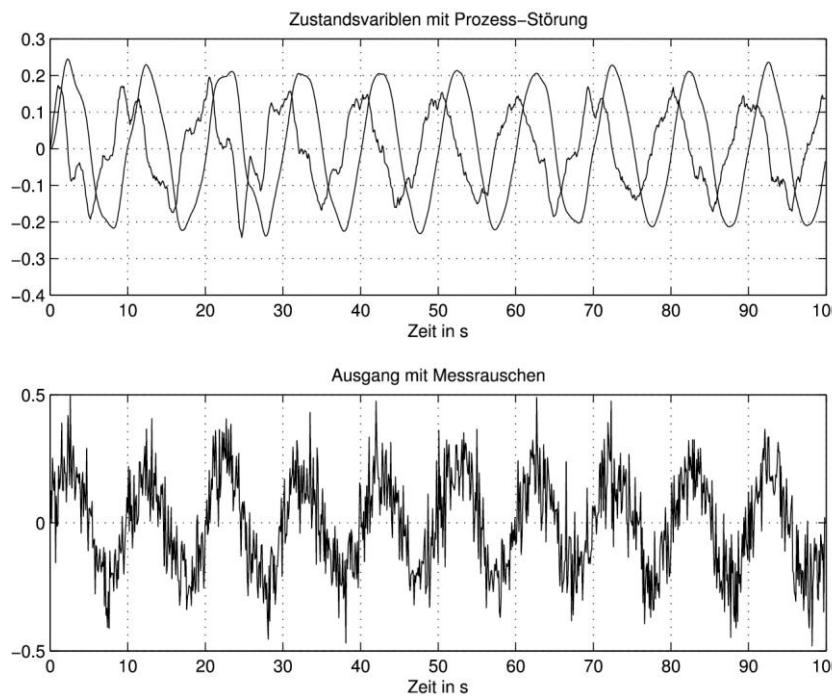


Abb. 3.91: Zustandsvariablen mit Prozess-Störung und Ausgang mit Messrauschen (Lage der Masse) für $vnd=0,01$ und $vny=0,01$ (kalman_4d.m, kalman4d.mdl)

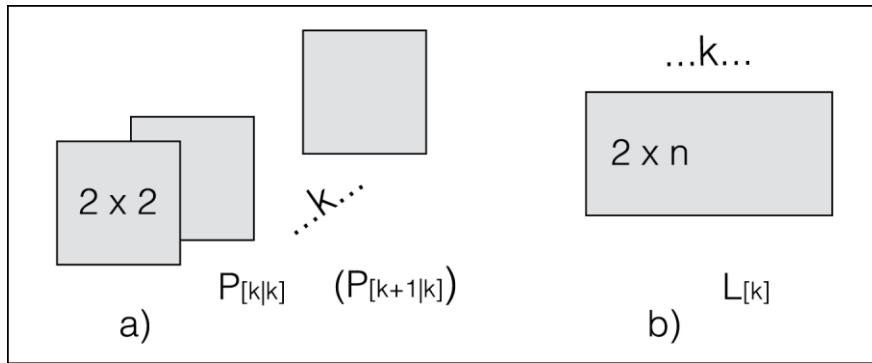


Abb. 3.92: Mehrdimensionales Feld für die Zwischenspeicherung der Kovarianzmatrizen $P[k|k]$ und $P[k + 1|k]$ der Schätzfehler und für die Matrix $L[k]$ (kalman_4d.m, kalman4d.mdl)

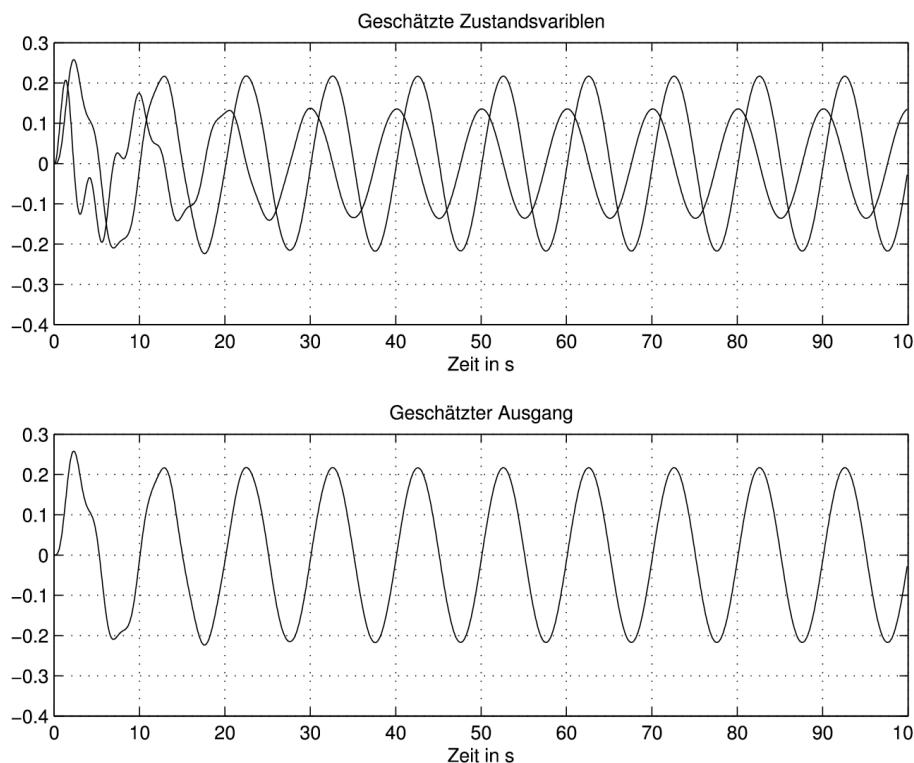


Abb. 3.93: Geschätzte Zustandsvariablen und geschätzter Ausgang für $vnd=0,01$ und $vny=0,01$
(kalman_4d.m, kalman4d.mdl)