
Versuch I, Modellbildung und Simulation eines Doppelpendel-Systems

Andreas Jentsch, Ali Kerem Sacakli

Praktikumsbericht – Praktikum Matlab/Simulink II



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK
UND MECHATRONIK

rtm

1.1 Doppelpendel-System

Im Praktikum Matlab/Simulink II werden weiterführende Konzepte der Regelungstechnik basierend auf einem Doppelpendel-System erarbeitet. In diesem Versuch geht es um die Modellierung des Doppelpendelsystems durch verschiedene Modellierungsmöglichkeiten.

Der erarbeitete Code für die symbolische Lösung der Bewegungsgleichungen für das Doppelpendel-System sieht wie folgt aus:

Listing 1.1: Code des Doppelpendel-Modells

```
1 clear all
  clc
  %% Variablen
  % Parameter
  syms m1 l1 J1 m2 l2 J2 Rp1 Rp2 g t positive;

6
  % Koordinaten
  syms phi1 dphi1 ddphi1 phi2 dphi2 ddphi2 real;

  % Momente
11 syms M real;

  %% Zu ersetzende Größen

16 % Reibungen
  MR1 = Rp1 * dphi1;
  MR2 = Rp2 * (dphi2 - dphi1);

  % Trägheitsmomente
21 J1 = 1 / 12 * m1 * l1^2;
  J2 = 1 / 12 * m2 * l2^2;

  % Pendelkoordinaten
  x1 = l1 / 2 * sin(phi1);
26 dx1 = l1 / 2 * dphi1 * cos(phi1);

  y1 = -l1 / 2 * cos(phi1);
  dy1 = l1 / 2 * dphi1 * sin(phi1);

31 x2 = 2*x1 + l2 / 2 * sin(phi2);
```

```

dx2 = 2*dx1 + l2 / 2 * dphi2 * cos(phi2);

y2 = 2*y1 - l2 / 2 * cos(phi2);
dy2 = 2*dy1 + l2 / 2 * dphi2 * sin(phi2);
36
%% Mechanik

T1 = 1/2 * m1 * (dx1^2 + dy1^2) + 1/2 * J1 * dphi1^2;
T2 = 1/2 * m2 * (dx2^2 + dy2^2) + 1/2 * J2 * dphi2^2;
41
T = T1 + T2;

U = g * (m1 * y1 + m2 * y2);

46 %Generalisierte Kräfte

Qphi1 = M - MR1;
Qphi2 = -MR2;

51 %Lagrangegleichung

L = T-U;

%% Herleitung der Ableitung nach generalisierter Koordinate
56
% dL/dphi1
L_phi1 = jacobian(L, phi1);

% dL/ddphi1
61 L_dphi1 = jacobian(L, dphi1);

% dL/dhpi2
L_phi2 = jacobian(L, phi2);

66 % dL/ddphi2
L_dphi2 = jacobian(L, dphi2);

% d(L_dphi1)/dt und d(L_dphi2)/dt

71 % Variablen ohne t durch Variablen mit t ersetzen

```

```

L_dphi1_t = subs(L_dphi1,{phi1,dphi1,phi2,dphi2},...
    {'phi1(t)', 'dphi1(t)', 'phi2(t)', 'dphi2(t)'});

L_dphi2_t = subs(L_dphi2,{phi1,dphi1,phi2,dphi2},...
76     {'phi1(t)', 'dphi1(t)', 'phi2(t)', 'dphi2(t)'});

%Berechnung der Zeitableitung
dL_dphi1_t = diff(L_dphi1_t, t);
dL_dphi2_t = diff(L_dphi2_t, t);

81
%Variablen mit t
Var_t = {'phi1(t)', 'dphi1(t)', 'diff(phi1(t),t)', 'diff(dphi1(t),t)'→
    ←',...
        'phi2(t)', 'dphi2(t)', 'diff(phi2(t),t)', 'diff(dphi2(t),t)'→
    ←'};

86 %Variablen ohne t
Var_ot = {phi1, dphi1, dphi1, ddphi1, phi2, dphi2, dphi2, ddphi2};

dL_dphi1_t = subs(dL_dphi1_t, Var_t, Var_ot);
dL_dphi2_t = subs(dL_dphi2_t, Var_t, Var_ot);

91

%% Berechnung der LAGRANGEschen Gleichungen

Sol = solve([dL_dphi1_t - L_phi1 == Qphi1, dL_dphi2_t - L_phi2 == →
    ←Qphi2],...
96     [ddphi1, ddphi2]);
Sol.ddphi1=simplify(Sol.ddphi1);
Sol.ddphi2=simplify(Sol.ddphi2);

```

1.2 Implementierung des Modells durch verschiedene Modellierungsmöglichkeiten

Das im vorherigen Kapitel dargestellte Modell wird mit folgenden drei Modellierungsmöglichkeiten implementiert:

- Fcn-Blocks,
- MATLAB-Function-Blocks
- einer M-File S-Function

Im folgenden Abschnitt wird für jede Implementierung das Simulink-Schaltbild mit dem zugehörigen Code zur Simulation vorgestellt.

1.2.1 Fcn-Blocks

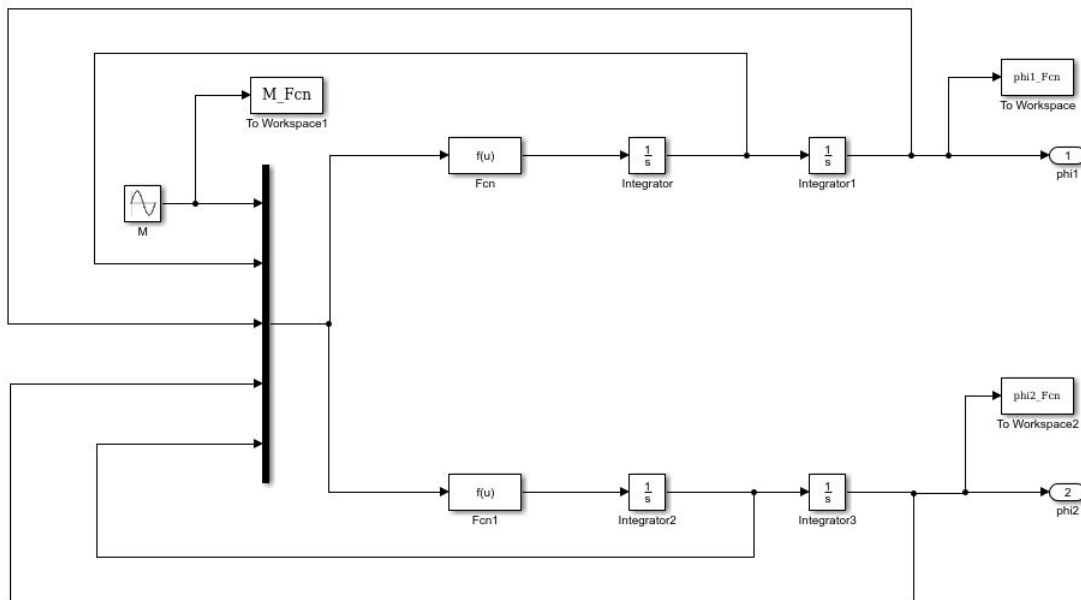


Figure 1.1: Implementierung mit Fcn-Blöcken

Dabei lautet die Funktion von **Fcn**:

$$-(6*(4*Rp1*u(2)*l2-4*u(1)*l2+6*Rp2*u(2)*l1*cos(u(3)-u(4))-6*Rp2*u(5)*l1*cos(u(3)-u(4))+(3*g*l1*l2*m2*sin(u(3)-2*u(4)))/2+(3*u(2)^2*l1^2*l2*m2*sin(2*u(3)-2*u(4)))/2+2*u(5)^2*l1*l2^2*m2*sin(u(3)-u(4))+2*g*l1*l2*m1*sin(u(3))+(5*g*l1*l2*m2*sin(u(3)))/2))/(l1^2*l2*(8*m1+15*m2-9*m2*cos(2*u(3)-2*u(4))))$$

und für den **Fcn1** Block lautet die Funktion:

$$(6*(4*Rp2*u(2)*l1*m1-6*u(1)*l2*m2*cos(u(3)-u(4))+12*Rp2*u(2)*l1*m2-4*Rp2*u(5)*l1*m1-12*Rp2*u(5)*l1*m2+6*u(2)^2*l1^2*l2*m2^2*sin(u(3)-u(4))-$$

$$\frac{3 * g * l1 * l2 * m2^2 * \sin(u(4)) + (3 * u(5)^2 * l1 * l2^2 * m2^2 * \sin(2 * u(3) - 2 * u(4))) / 2 + 3 * g * l1 * l2 * m2^2 * \sin(2 * u(3) - u(4)) + 6 * Rp1 * u(2) * l2 * m2 * \cos(u(3) - u(4)) + 2 * u(2)^2 * l1^2 * l2 * m1 * m2 * \sin(u(3) - u(4)) - (g * l1 * l2 * m1 * m2 * \sin(u(4))) / 2 + (3 * g * l1 * l2 * m1 * m2 * \sin(2 * u(3) - u(4))) / 2)}{(l1 * l2^2 * m2 * (8 * m1 + 15 * m2 - 9 * m2 * \cos(2 * u(3) - 2 * u(4)))}$$

1.2.2 Matlab-Function-Block

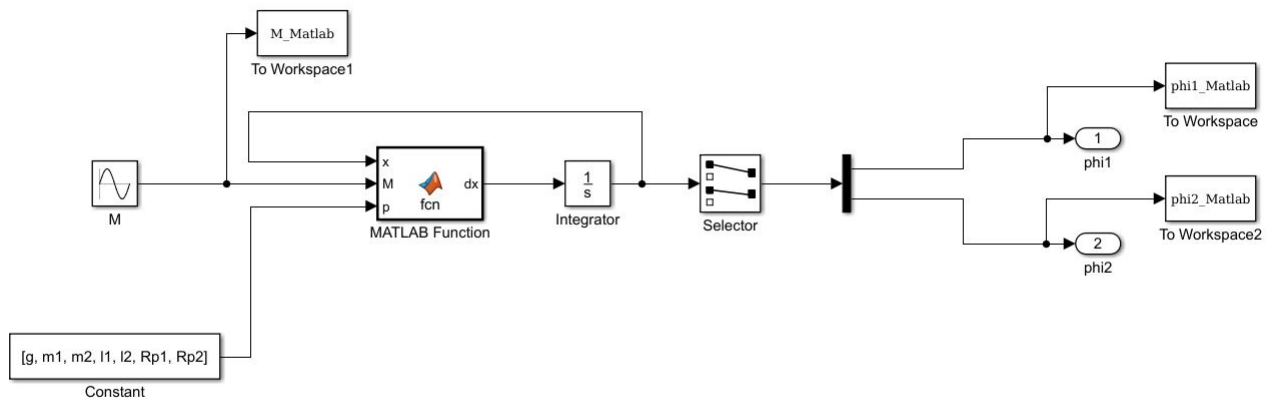


Figure 1.2: Implementierung mit einem Matlab-Function-Block

Der Code des Matlab-Fcn-Blocks ist wie folgt:

Listing 1.2: Code für das Matlab-Function-Block

```
function dx = fcn(x,M,p)
2  %#codegen

% Zustände definieren
phi1 = x(1);
dphi1 = x(2);
7  phi2 = x(3);
dphi2 = x(4);

% Parameter definieren
g = p(1);
12  m1 = p(2);
m2 = p(3);
l1 = p(4);
l2 = p(5);
Rp1 = p(6);
17  Rp2 = p(7);

% Bewegungsgleichungen des Modells
ddphi1 = -(6*(4*Rp1*dphi1*l2 - 4*M*l2 + 6*Rp2*dphi1*l1*cos(phi1 -
    <phi2) - 6*Rp2*dphi2*l1*cos(phi1 - phi2) + (3*g*l1*l2*m2*sin(phi1->
```

```

    ← - 2*phi2))/2 + (3*dphi1^2*l1^2*l2*m2*sin(2*phi1 - 2*phi2))/2 + →
    ←2*dphi2^2*l1*l2^2*m2*sin(phi1 - phi2) + 2*g*l1*l2*m1*sin(phi1) +→
    ← (5*g*l1*l2*m2*sin(phi1))/2))/((l1^2*l2*(8*m1 + 15*m2 - 9*m2*cos→
    ←(2*phi1 - 2*phi2)));

```

```

22 dphi2 = (6*(4*Rp2*dphi1*l1*m1 - 6*M*l2*m2*cos(phi1 - phi2) + 12*Rp2→
    ←*dphi1*l1*m2 - 4*Rp2*dphi2*l1*m1 - 12*Rp2*dphi2*l1*m2 + 6*dphi1→
    ←^2*l1^2*l2*m2^2*sin(phi1 - phi2) - 3*g*l1*l2*m2^2*sin(phi2) + →
    ←(3*dphi2^2*l1*l2^2*m2^2*sin(2*phi1 - 2*phi2))/2 + 3*g*l1*l2*m2→
    ←^2*sin(2*phi1 - phi2) + 6*Rp1*dphi1*l2*m2*cos(phi1 - phi2) + 2*→
    ←dphi1^2*l1^2*l2*m1*m2*sin(phi1 - phi2) - (g*l1*l2*m1*m2*sin(phi2→
    ←))/2 + (3*g*l1*l2*m1*m2*sin(2*phi1 - phi2))/2))/((l1*l2^2*m2*(8*→
    ←m1 + 15*m2 - 9*m2*cos(2*phi1 - 2*phi2)));

```

```

% Zustandsraummodell

```

```

dx = [dphi1; ddphi1; dphi2; ddphi2];

```

1.2.3 Level 2 M-File-S-Function

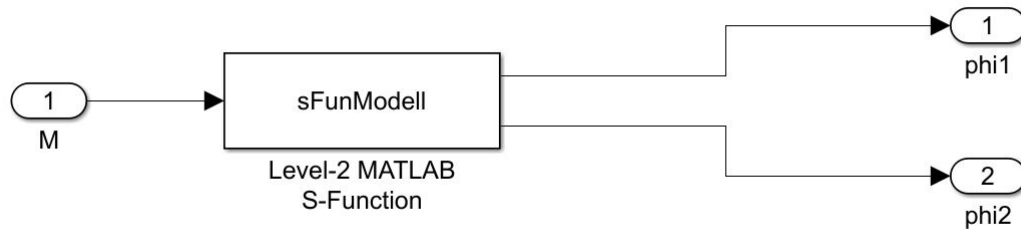


Figure 1.3: Implementierung mit einem Matlab-Function-Block

Die Implementierung des Codes für die S-Function ist wie folgt:

Listing 1.3: Code für das Matlab-Function-Block

```
function sFunModell(block)

    setup(block);

5  end

% →
% ← ***** →
% ←
% Initialisierung
10 % →
% ← ***** →
% ←

function setup(block)

    % Anzahl der Ein-/Ausgänge
    block.NumInputPorts = 1;
15    block.NumOutputPorts = 2;

    % Eigenschaften des Eingangs
    block.InputPort(1).Dimensions = 1;
    block.InputPort(1).DatatypeID = 0; % double
20    block.InputPort(1).Complexity = 'Real';
```

```

block.InputPort(1).DirectFeedthrough = false;
block.InputPort(1).SamplingMode = 'Sample';

% Eigenschaften des 1. Ausgangs
25 block.OutputPort(1).Dimensions = 1;
block.OutputPort(1).DatatypeID = 0; % double
block.OutputPort(1).Complexity = 'Real';
block.OutputPort(1).SamplingMode = 'Sample';

30 % Eigenschaften des 2. Ausgangs
block.OutputPort(2).Dimensions = 1;
block.OutputPort(2).DatatypeID = 0; % double
block.OutputPort(2).Complexity = 'Real';
block.OutputPort(2).SamplingMode = 'Sample';

35 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Anzahl der Zustände
40 block.NumContStates = 4;

% Anzahl der Parameter
block.NumDialogPrms = 7;

45 % Abtastzeit definieren -> zeitkontinuierlich
block.SampleTimes = [0 0];

50 % weitere Methoden registrieren
block.RegBlockMethod('InitializeConditions', →
    @InitializeConditions);
block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);
block.RegBlockMethod('Derivatives', @Derivatives);
55 block.RegBlockMethod('Terminate', @Terminate);

end

```

```

60 % →
    ← ***** →
    ←
    % Anfangsbedingungen setzen
    % →
    ← ***** →
    ←
    function InitializeConditions(block)

65     block.ContStates.Data = [0, 0, 0, 0];

    end

70 % →
    ← ***** →
    ←
    % Ausgänge berechnen
    % →
    ← ***** →
    ←
    function Outputs(block)

75     % Zustände auslesen
    x      = block.ContStates.Data;

    block.OutputPort(1).Data = x(1);
    block.OutputPort(2).Data = x(3);

80
    end

    % →
    ← ***** →
    ←

85 % Ableitungen berechnen
    % →
    ← ***** →
    ←
    function Derivatives(block)

```

```

% Parameter auslesen
90  g = block.DialogPrm(1).Data;
    m1 = block.DialogPrm(2).Data;
    m2 = block.DialogPrm(3).Data;
    l1 = block.DialogPrm(4).Data;
    l2 = block.DialogPrm(5).Data;
95  Rp1 = block.DialogPrm(6).Data;
    Rp2 = block.DialogPrm(7).Data;

% Zustände auslesen
    x      = block.ContStates.Data;
100  phi1   = x(1);
    dphi1  = x(2);
    phi2   = x(3);
    dphi2  = x(4);

105  % Eingang auslesen
    M = block.InputPort(1).Data(1);

110  % Ableitungen berechnen
    ddphi1 = -(6*(4*Rp1*dphi1*l2 - 4*M*l2 + 6*Rp2*dphi1*l1*cos(phi1 -
        phi2) - 6*Rp2*dphi2*l1*cos(phi1 - phi2) + (3*g*l1*l2*m2*
        sin(phi1 - 2*phi2))/2 + (3*dphi1^2*l1^2*l2*m2*sin(2*phi1 -
        2*phi2))/2 + 2*dphi2^2*l1*l2^2*m2*sin(phi1 - phi2) + 2*g*l1*
        l2*m1*sin(phi1) + (5*g*l1*l2*m2*sin(phi1))/2))/(l1^2*l2*(8*
        m1 + 15*m2 - 9*m2*cos(2*phi1 - 2*phi2)));

115  ddphi2 = (6*(4*Rp2*dphi1*l1*m1 - 6*M*l2*m2*cos(phi1 - phi2) +
        12*Rp2*dphi1*l1*m2 - 4*Rp2*dphi2*l1*m1 - 12*Rp2*dphi2*l1*m2 +
        6*dphi1^2*l1^2*l2*m2^2*sin(phi1 - phi2) - 3*g*l1*l2*m2^2*
        sin(phi2) + (3*dphi2^2*l1*l2^2*m2^2*sin(2*phi1 - 2*phi2))/2 +
        3*g*l1*l2*m2^2*sin(2*phi1 - phi2) + 6*Rp1*dphi1*l2*m2*cos(
        phi1 - phi2) + 2*dphi1^2*l1^2*l2*m1*m2*sin(phi1 - phi2) - (g*
        l1*l2*m1*m2*sin(phi2))/2 + (3*g*l1*l2*m1*m2*sin(2*phi1 -

```

```
←phi2))/2)))/(l1*l2^2*m2*(8*m1 + 15*m2 - 9*m2*cos(2*phi1 - 2*→  
←phi2)));
```

```
% Ableitungen zuweisen
```

```
120 block.Derivatives.Data = [dphi1; ddphi1; dphi2; ddphi2];
```

```
end
```

```
125 % →
```

```
←*****→
```

```
←
```

```
% Aufräumen (wenn nötig)
```

```
% →
```

```
←*****→
```

```
←
```

```
function Terminate(block)
```

```
end
```

1.2.4 Vergleich der Modellierungsmöglichkeiten

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Modelle werden mit einem Anregungssignal

$$M(t) = 0.1 \sin(t)$$

und der Anfangsbedingung ($\varphi_1(t=0) = \varphi_2(t=0) = 0$ rad) simuliert. Dabei werden die Winkel φ_1 und φ_2 in Abhängigkeit vom Anregungssignal zum einen für eine Simulationsdauer von 10s und 2s dargestellt.

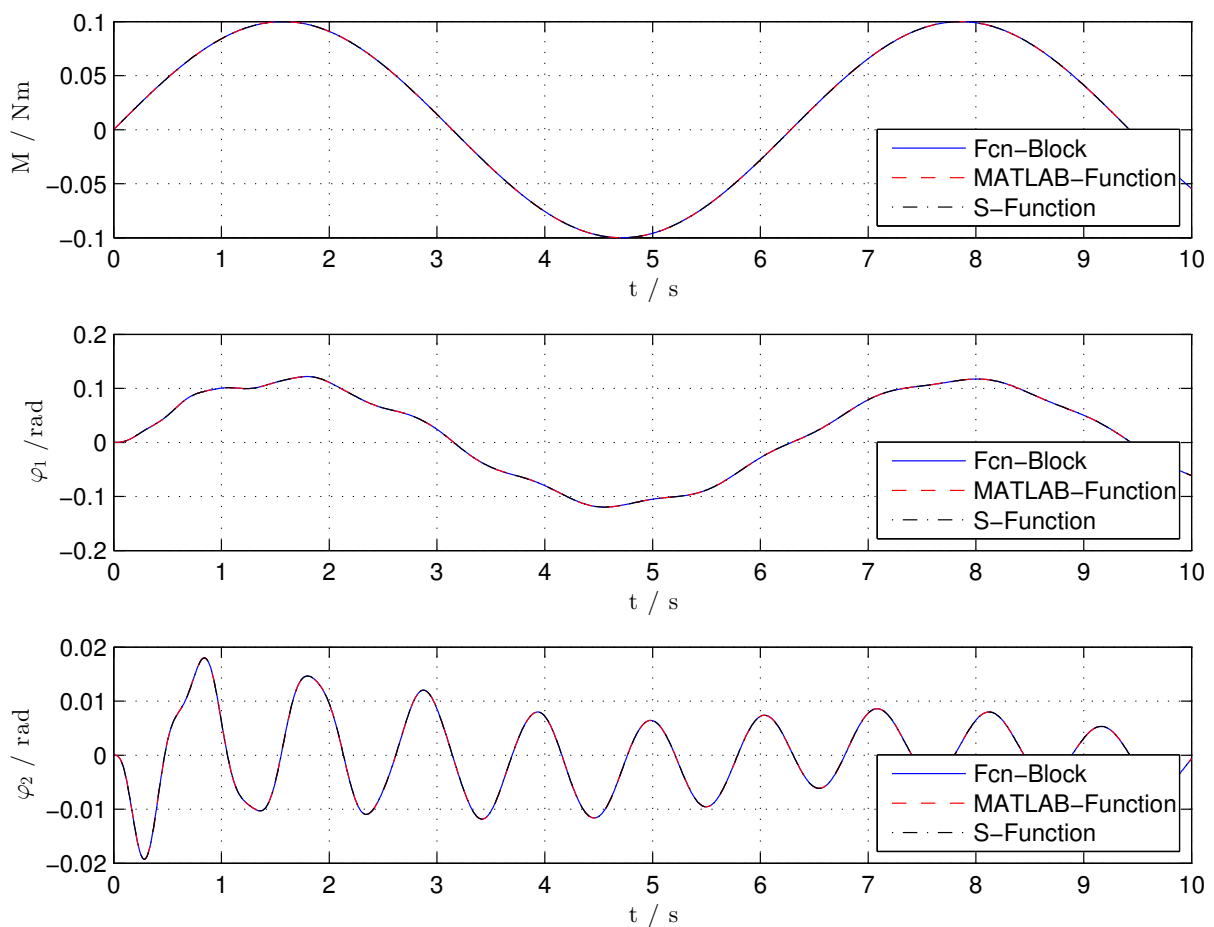


Figure 1.4: Vergleich der Modellierungsmöglichkeiten bei einer Simulationsdauer von 10s

Alle drei behandelten Modellierungsmöglichkeiten sind für die nichtlineare Modellierung geeignet. Bei gleicher Simulationseinstellung sind daher identische Ergebnisse zu erwarten. Wie die Abbildungen zeigen, erfüllen die Ergebnisse diese Erwartung.

Der Verlauf der Winkel in Abhängigkeit des Anregungssignals ist plausibel. Für den Winkel φ_1 ist ein ähnlicher Verlauf wie das Anregungsmoment, nur mit einer kleiner Verzögerung durch die Trägheitsmomente, zu erwarten, da das Anregungsmoment direkt auf die Drehachse in φ_1 wirkt und somit einen ähnlichen Verlauf erzwingt. Der Winkel φ_2 ist dagegen frei gelagert und

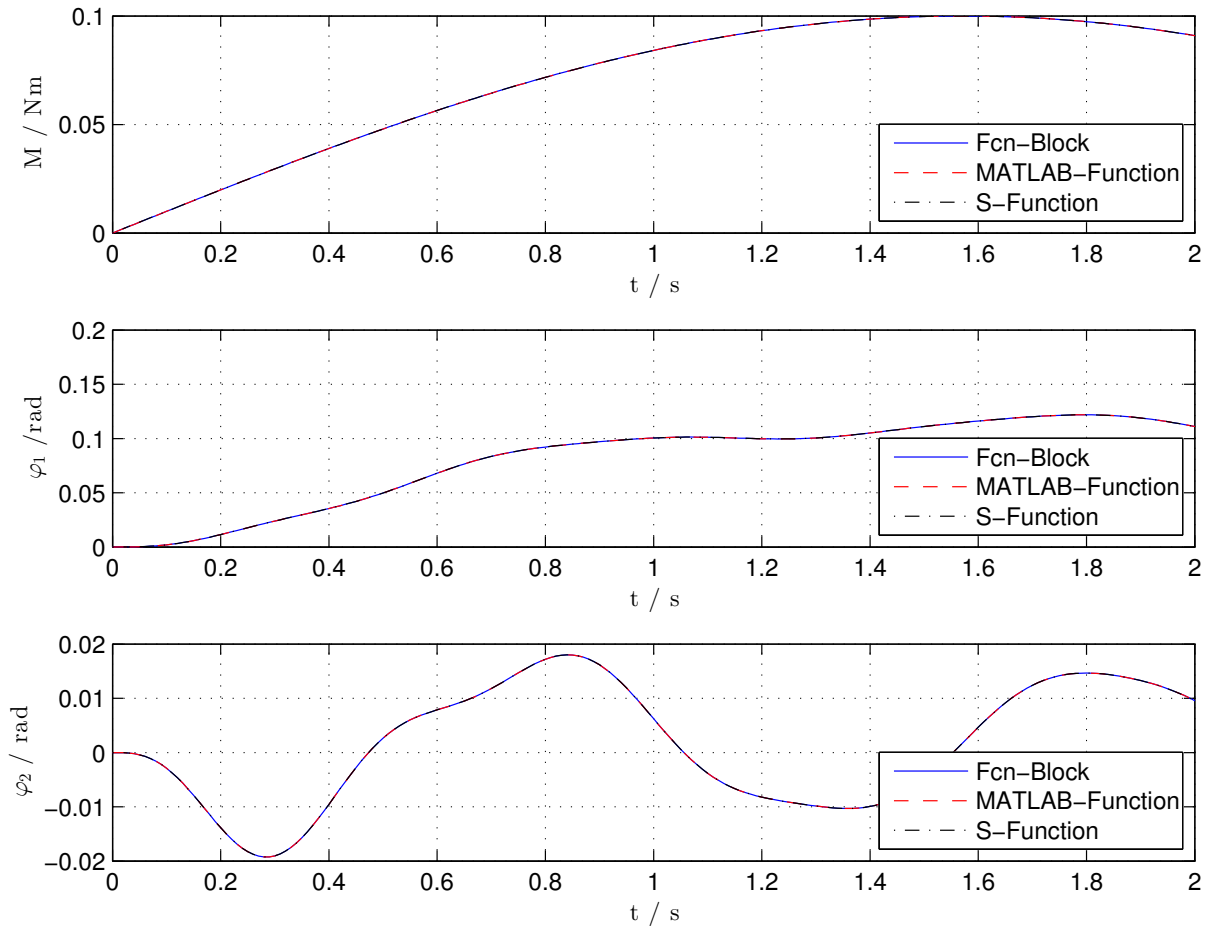


Figure 1.5: Vergleich der Modellierungsmöglichkeiten bei einer Simulationsdauer von 2s

ist nur durch ein Reibmoment begrenzt. Folglich ist anstatt eines zur Anregung synchronen Verlaufs ein frei schwingendes Verhalten zu erwarten. Das heißt, dass der zweite Pendel auch in entgegengesetzter Richtung schwingen kann. Dies ist in der Darstellung der Ergebnisse für eine Simulationsdauer von 2s besonders am Anfang zu erkennen. Durch die Trägheit schwingt der zweite Pendel anfänglich in die negative φ_2 -Richtung.