Bachelorstudiengang

Automatisierungstechnik

Simulation eines Hubwerksgetriebe

Als Projektbericht eingereicht

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering (BSc)

von

Peböck Thomas - Weindl Daniel

Wels, Jänner 2026

Betreuung der Arbeit durch

Dr. Georg Hackenberg

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Hubwerksgetriebe aus dem Skript MMB4 von Dr. Witteeveen soll mit einem Csharp Programm simuliert werden. Dazu sind die einzelnen Komponenten des Getriebes zu modellieren und in einem Gesamtmodell zu verknüpfen. Die Simulation soll es ermöglichen, verschiedene Lastfälle durchzuspielen und die Auswirkungen auf die einzelnen Komponenten zu beobachten.

1.2.2. Beispiel: Hubwerksgetriebe mit masselosem Seil

Für das in Abbildung 7 dargestellte Hubwerk soll die die Bewegungsgleichung ermittelt werden. Alle Parameter sind gegeben. Das Schwerefeld wirkt in negative y Richtung und auf die Welle mit Index 2 wirkt das Antriebsmoment M_2.

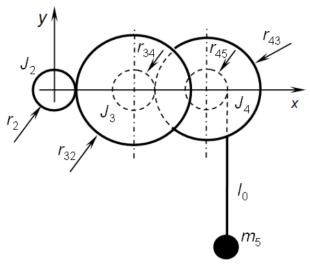


Abbildung 7: Hubwerksgetriebe

Abbildung 1.1: Aufgabe: Hubwerksgetriebe

1.2 Aufgabenverteilung

- Visualisierung des Hubwerkgetriebes - DW
- Modellierung der Bewegungsgleichung - TP
- Implementierung der Regelung - TP und DW
- Simulation des Gesamtsystems - TP und DW

1.3 Vorgehensweise

Die Idee besteht darin, mithilfe einer SFunctionContinuous eine Regelung zu simulieren. Die dabei berechneten Werte der Größe phi sollen anschließend in eine CSV-

Datei geschrieben werden, welche in weiterer Folge zur Visualisierung in OpenGL verwendet wird.

2 Modellbildung

2.1 Berechnung der Bewegungsgleichung

Die kinetische Energie des Hubwerksgetriebes schreibt sich als

$$T = \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\varphi}_3^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\varphi}_4^2 + \frac{1}{2}m_5\dot{y}_5^2$$

Aus der Forderung, dass die überstrichenen Bogenlängen beim Abwälzvorgang für beide involvierten Körper gleich sind, ergibt sich

$$\varphi_2 r_2 = -\varphi_3 r_{32} \;\Rightarrow\; \varphi_3 = -\varphi_2 \frac{r_2}{r_{32}}$$

$$\varphi_3 r_{34} = -\varphi_4 r_{43} \;\Rightarrow\; \varphi_4 = \varphi_2 \frac{r_2}{r_{32}} \frac{r_{34}}{r_{43}}$$

$$y_{55} = \varphi_4 r_{45} - l_0 \;\Rightarrow\; y_{55} = \varphi_2 \frac{r_2}{r_{32}} \frac{r_{34}}{r_{43}} r_{45} - l_0$$

Das Einsetzen des Quadrates der zeitlichen Ableitungen in die kinetische Energie liefert das reduzierte Massenträgheitsmoment J_{red}.

$$T = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_2^2 \left(J_2 + J_3 \left(\frac{r_2}{r_{32}} \right)^2 + J_4 \left(\frac{r_2 r_{34}}{r_{32} r_{43}} \right)^2 + m_5 \left(\frac{r_2 r_{34} r_{45}}{r_{32} r_{43}} \right)^2 \right) = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_2^2 J_{\mathrm{red}}$$

Die potentielle Energie ergibt sich zu

$$V = m_5 g \left(\varphi_2 \frac{r_2 r_{34} r_{45}}{r_{32} r_{43}} \right)$$

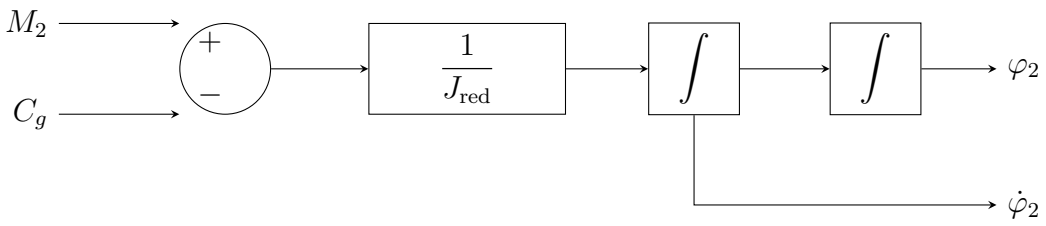
und unter Anwendung der Lagrange-Gleichung ergibt sich mit dem Antriebsmoment M_2 die Bewegungsgleichung

$$J_{\mathrm{red}}\ddot{\varphi}_2 + m_5 g \frac{r_2 r_{34} r_{45}}{r_{32} r_{43}} = M_2$$

Simulink arbeitet am einfachsten mit expliziten Integrationsketten:

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{1}{J_{\text{red}}} \left(M_2 - m_5 g \frac{r_2 r_{34} r_{45}}{r_{32} r_{43}} \right)$$

2.2 Blockschaltbild



3 Visualisierung

Das Hubwerksgetriebe soll so wie in der Aufgabenstellung abgebildet werden.

3.1 Erstellung der Rollen

Jede Rolle wird nach folgedenm Muster aufgebaut. Den größten Teil des Codes haben wir in die Hilfsmethode "DraxDiskXy ausgelagert.

```
1     SetMaterial(gl, 0f, 0f, 0.5f);
2     gl.PushMatrix();
3     gl.Translate(_x2, 0, 0);
4     gl.Rotate(_phi2 * 180.0 / Math.PI, 0, 0, 1);
5     DrawDiskXy(gl,_r2,_thickness2,_segments,0,0,0,↩
         DiskMarkerColor.Red,DiskMarkerDirection.PositiveX);
6     gl.PopMatrix();
```

3.2 Erstellung von Seil und Punktmaße

Die Erstellung der Punktmaße wurde auch in eine Hilfsmethode ausgelagert.

```
1     // ---------------- Seil ----------------
2     gl.Disable(OpenGL.GL_LIGHTING);
3     gl.Color(0, 0, 0);
4     gl.LineWidth(3.0f);
5     gl.Begin(OpenGL.GL_LINES);
6     gl.Vertex(x4+_r45, 0, ropeZ);   // Austritt an der Rolle
7     gl.Vertex(x4+_r45, ropeY, ropeZ);       // bewegte Masse
8     gl.End();
9     gl.Enable(OpenGL.GL_LIGHTING);
10    // ---------------- Punktmasse ----------------
11    SetMaterial(gl, 0, 0, 0);
12    DrawSphere(gl, 0.5, 30, 30, x4+_r45, ropeY - 0.4, ropeZ)↩
         ;
```

3.3 Ergebnis

Die Markierungen auf den Rollen lassen gut nachvollziehen dass die Rotationen richtig übertragen werden.

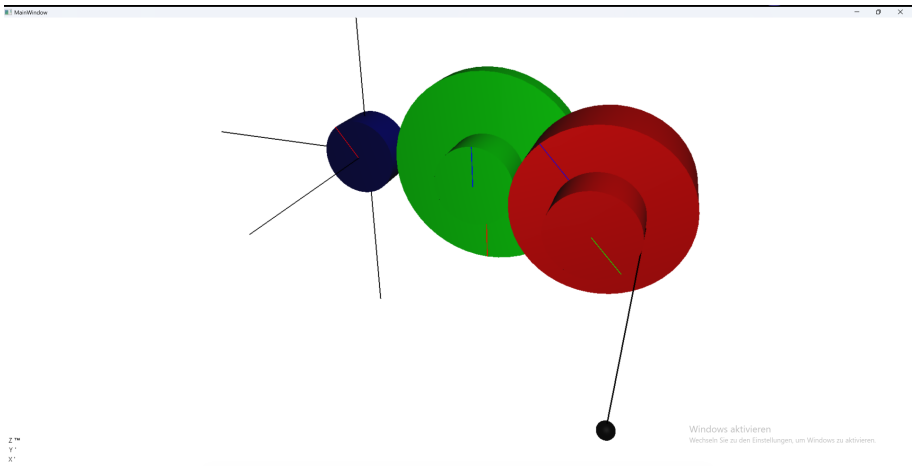


Abbildung 3.1: Ergebnis

4 Implementierung der Regelung

4.1 Umsetzung in Csharp

Die Bewegungsgleichung aus Gleichung (2.1) wird an dieser Stelle in einer SContinuousFunction umgesetzt. Hierzu wird das entsprechende Blockschaltbild nachgebildet, wie im nachfolgenden Code dargestellt.

```
1   public class Hubwerk : Example
2   {
3       public Hubwerk()
4       {
5           double _r2 = 2;
6           double _r32 = 5;
7           double _r34 = 2;
8           double _r43 = 4;
9           double _r45 = 2;
10          double m = 25;
11          double g = 9.81;
12          double jRed = 1.6;
13          double M2 = 50;
14          double a = (_r2 * _r34 * _r45) / (_r32 * _r43);
15
16          Block constantM = new ConstantBlock("Constant", ↩
                (M2/jRed));
17          Block constantC = new ConstantBlock("Constant", ↩
                ((m*g*a)/jRed));
18          Block sub = new SubtractBlock("Sub");
19          Block integrate1 = new IntegrateBlock("↩
                Integrate1", 0);
20          Block integrate2 = new IntegrateBlock("↩
                Integrate2", 0);
21          Block recordphi = new RecordBlock("Phi");
22          Block recordphidot = new RecordBlock("↩
                Winkelgeschwindigkeit");
23          Block recordphidotdot = new RecordBlock("↩
                Winkelbeschleunigung");
24
```

```
25              Model.AddBlock(constantM);
26              Model.AddBlock(constantC);
27              Model.AddBlock(sub);
28              Model.AddBlock(integrate1);
29              Model.AddBlock(integrate2);
30              Model.AddBlock(recordphi);
31              Model.AddBlock(recordphidot);
32              Model.AddBlock(recordphidotdot);
33
34              Model.AddConnection(constantM, 0, sub, 0);
35              Model.AddConnection(constantC, 0, sub, 1);
36              Model.AddConnection(sub, 0, integrate1, 0);
37              Model.AddConnection(integrate1, 0, integrate2, ↩
                    0);
38              Model.AddConnection(integrate2, 0, recordphi, 0)↩
                    ;
39              Model.AddConnection(integrate1, 0, recordphidot,↩
                     0);
40              Model.AddConnection(sub, 0, recordphidotdot, 0);
41          }
42      }
```

Wir lassen das Example Hubwerk builden:

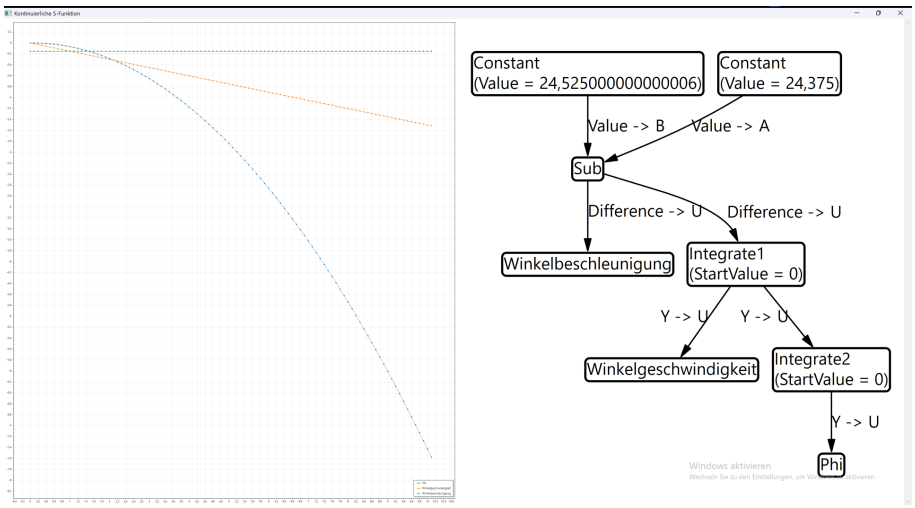


Abbildung 4.1

4.2 Extraktion von phi

Nach mehreren Tests wurde die Plausibilität der Modellbildung als bestätigt angesehen. Im nächsten Schritt soll die Liste der Variable phi in eine CSV-Datei exportiert werden.

Den Code dafür binden wir direkt nach dem Solver ein.

```
1
2  namespace SFunctionContinuous
3  {
4      /// <summary>
5      /// Interaction logic for MainWindow.xaml
6      /// </summary>
7      public partial class MainWindow : Window
8      {
9          public MainWindow()
10         {
11             InitializeComponent();
12
13             // Modell erstellen und loesen
14
15             //Example example = new PosServo();
16             Example example = new Hubwerk();
17
18             try
19             {
20                 Solver solution = new EulerExplicitSolver(↩
                       example.Model);
21                 solution.Solve(example.TimeStepMax, example.↩
                       TimeMax);
22             }
23             catch (Exception e)
24             {
25                 MessageBox.Show(e.Message);
26             }
27             // ================================
28             // CSV-EXPORT VON PHI (HIER!)
29             // ================================
30
31             RecordBlock phiBlock = example.Model.Blocks
```

```
32                  .OfType<RecordBlock>()
33                  .First(b => b.Name == "Phi");
34
35              string filePath = @"Z:\_source\Repositorys\↩
                    SSI_Hubwerksgetriebe\phi2.csv";
36
37              CultureInfo culture = CultureInfo.↩
                    InvariantCulture;
38              StringBuilder sb = new StringBuilder();
39
40              sb.AppendLine("phi");
41
42              foreach ((_, double phi) in phiBlock.Data)
43              {
44                  sb.AppendLine(phi.ToString(culture));
45              }
46
47              File.WriteAllText(filePath, sb.ToString());
48
49              // Graph-Visualisierung erstellen
50
51              Graph graph = new Graph();
52
53              foreach (Block f in example.Model.Blocks)
54              {
55                  graph.AddNode($"{f.GetHashCode()}").↩
                        LabelText = f.ToString();
56              }
57              foreach (Connection c in example.Model.↩
                    Connections)
58              {
59                  graph.AddEdge($"{c.Source.GetHashCode()}", c↩
                        .ToString(), $"{c.Target.GetHashCode()}")↩
                        ;
60              }
61
62              Graph.Graph = graph;
63
64              // Chart-Visualisierung erstellen
65
```

```
66              foreach (Block f in example.Model.Blocks)
67              {
68                  if (f is RecordBlock)
69                  {
70                      RecordBlock r = (RecordBlock)f;
71
72                      double[] t = new double[r.Data.Count];
73                      double[] u = new double[r.Data.Count];
74
75                      for (int i = 0; i < r.Data.Count; i++)
76                      {
77                          (double ti, double tu) = r.Data[i];
78
79                          t[i] = ti;
80                          u[i] = tu;
81                      }
82
83                      Scatter scatter = Chart.Plot.Add.Scatter↩
                            (t, u);
84
85                      scatter.LegendText = f.Name;
86                  }
87              }
88          }
89      }
90  }
```

Jetzt muss die Visualisierung nur noch auf die Liste zugreifen.

5 Simulation des Gesamtsystems

5.1 CSV laden

Die CSV-Datei wird direkt im Konstruktor geladen. Ueber den phiTimer wird in einem Intervall von 0,1 s jeweils eine neue Zeile aus der CSV eingelesen. Auf diese Weise wird das zuvor simulierte Modell an dieser Stelle visualisiert.

```
1         public MainWindow()
2         {
3             InitializeComponent();
4
5             // CSV laden
6             LoadPhi2FromCsv(@"Z:\_source\Repositorys\↩
                  SSI_Hubwerksgetriebe\phi2.csv");
7
8             // Timer starten
9             _phiTimer = new DispatcherTimer();
10            _phiTimer.Interval = TimeSpan.FromSeconds(0.1);
11            _phiTimer.Tick += PhiTimer_Tick;
12            _phiTimer.Start();
13        }
```

Ein Video der Visualisierung liegt dem Bericht bei.

6 Fazit

Durch die konsequente Trennung von Berechnung und Visualisierung war es möglich, beide Entwicklungsbereiche parallel zu beginnen und weitgehend unabhängig voneinander weiterzuentwickeln. Als einzige Schnittstelle zwischen diesen beiden Bereichen dient die CSV-Datei, über welche die berechneten Daten an die Visualisierung übergeben werden. Diese klare Trennung erwies sich als vorteilhaft für Struktur, Wartbarkeit und Parallelisierung der Entwicklungsarbeit.

Die Umsetzung stellte sich insgesamt als anspruchsvoller heraus als ursprünglich angenommen. Zwar wurde für die Visualisierung KI-Unterstützung herangezogen, dennoch waren zahlreiche manuelle Anpassungen notwendig. Insbesondere zeigte sich, dass ein grundlegendes Verständnis des erzeugten Codes sowie eine im Vorfeld durchdachte Softwarearchitektur unerlässlich sind, um die Ergebnisse zielgerichtet weiterentwickeln zu können.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit und Überprüfung der Rotationsbewegungen wurden an den Rollen gezielt Markierungen angebracht. Dadurch konnten die Bewegungsabläufe visuell überprüft und mit den berechneten Werten abgeglichen werden.

Die Kopplung von Logik und Visualisierung funktionierte insgesamt sehr gut, was maßgeblich darauf zurückzuführen ist, dass bereits im Vorfeld klare konzeptionelle Überlegungen zur Schnittstelle und zum Datenfluss angestellt wurden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Arbeiten über mehrere Disziplinen hinweg sowie deren Zusammenführung durch Code eine besonders anspruchsvolle, zugleich jedoch sehr interessante und lehrreiche Tätigkeit darstellt.