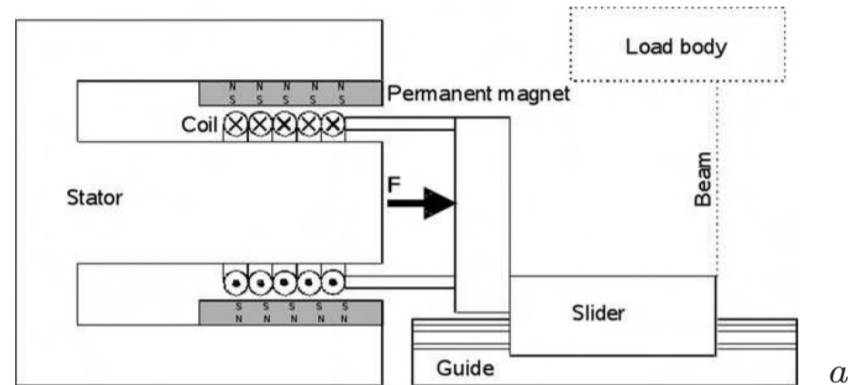


## ZIELSETZUNG DER HAUSARBEIT

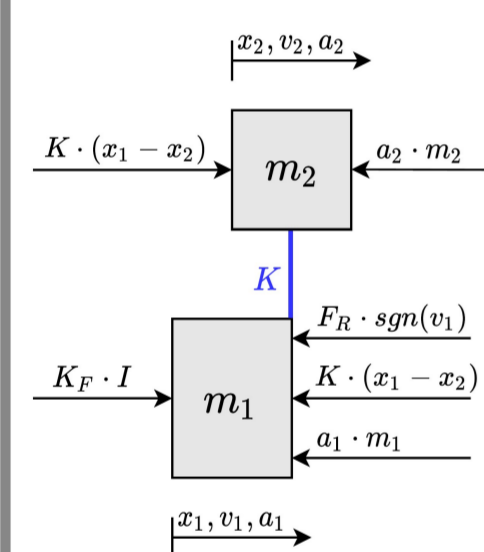
Im Modul „Anwendung Numerischer Software“ soll für einen Schwingspulenmotor der optimale Steuerungsverlauf mit dem Ziel einer minimalen Transferzeit berechnet/simuliert werden. Hierzu wird die Software AMPL mit dem Solver IPOPT verwendet.

## PHYSIKALISCHES MODELL

**Mechanisch.** Die Differentialgleichungen, welche das mechanische Verhalten des Versuchsaufbaus mit der gelben Masse beschreiben, können mithilfe der folgenden Abbildungen entwickelt werden.

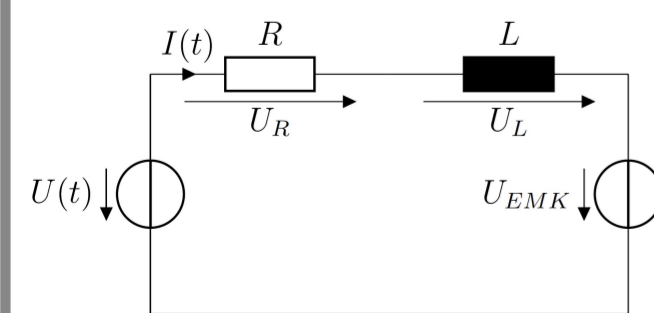


Der physikalische Aufbau lässt sich auf die nebenstehende Abbildung reduzieren. Enthalten ist die Reibkraft durch die Führung, die Federkraft durch den Balken, die antreibende Kraft durch die Spule, sowie die Trägheitskräfte der Massen. Die Reibkraft wirkt entgegen der Bewegungsrichtung, dies wird durch die  $sgn(x)$ -Funktion berücksichtigt.



**Elektrisch.** Aus dem Ersatzschaltbild der Spule kann ebenfalls eine DGL entnommen werden um das elektrische Steuersignal mit den mechanischen Kenngrößen zu koppeln.

Der Quellspannung wirkt der Spannungsabfall am Ohm'schen Widerstand, der Spannungsabfall an der Induktivität und die, durch die Bewegung der Spule im Magnetfeld, induzierte Spannung entgegen (Gegen-Elektromotorische Kraft).



<sup>a</sup>„Optimal Control of Servo Actuators with Flexible Load and Coulombic Friction“. doi:10.3166/EJC.17.1929.

## MODELLVEREINFACHUNGEN

Um den Rechenaufwand der Software zu reduzieren, werden einige Vereinfachungen vorgenommen. Die Haftreibung für  $v_1 = 0$  wird nicht berücksichtigt. Linearführungen weisen vernachlässigbar kleine Haftreibungen auf. Außerdem wird angenommen, dass die Masse  $m_1$  keine negative Geschwindigkeit erreicht, hierdurch wird die  $sgn(x)$ -Funktion nicht benötigt. Dies macht das Gesamtsystem differenzierbar. Des Weiteren wird die Dämpfung und die Masse des Biegebalkens vernachlässigt. Darüber hinaus wird nur mit geringen Auslenkungen des Balkens gerechnet, wodurch sich die Massen nur eindimensional bewegen.

## RANDBEDINGUNGEN

Der Systemzustand wird durch den Zustandsvektor  $\vec{x}(t)$  bestehend aus den Orten  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  den Geschwindigkeiten  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  den Massen  $m_1$ ,  $m_2$  und dem Spulenstrom  $I(t)$  beschrieben. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  ruht das System im Koordinatenursprung und zum Zeitpunkt  $t = t_f$  soll das System nach einem Hub beider Massen von 10mm ebenfalls ruhen.

## DISKRETISIERUNG

Um das DGL-System mit einer numerischen Software zu lösen, muss es in diskrete Zeitabschnitte zerlegt werden. Hierzu wird das Euler-Schritt Verfahren verwendet. Daraus resultiert das folgende diskretisierte DGL-System.

$$\begin{aligned} x_{1,i+1} &= x_{1i} + h \cdot v_{1i} \cdot t_{fi} \\ v_{1,i+1} &= v_{1i} + h \cdot \frac{1}{m_1} \cdot [K_F \cdot I_i - K \cdot (x_{1i} - x_{2i}) - F_R] \cdot t_{fi} \\ x_{2,i+1} &= x_{2i} + h \cdot v_{2i} \cdot t_{fi} \\ v_{2,i+1} &= v_{2i} + h \cdot \frac{K}{m_2} \cdot (x_{1i} - x_{2i}) \cdot t_{fi} \\ I_{i+1} &= I_i + h \cdot \frac{1}{L} \cdot [U_i - R \cdot I_i - K_S \cdot v_{1i}] \cdot t_{fi} \\ t_{f,i+1} &= t_{fi} \end{aligned}$$

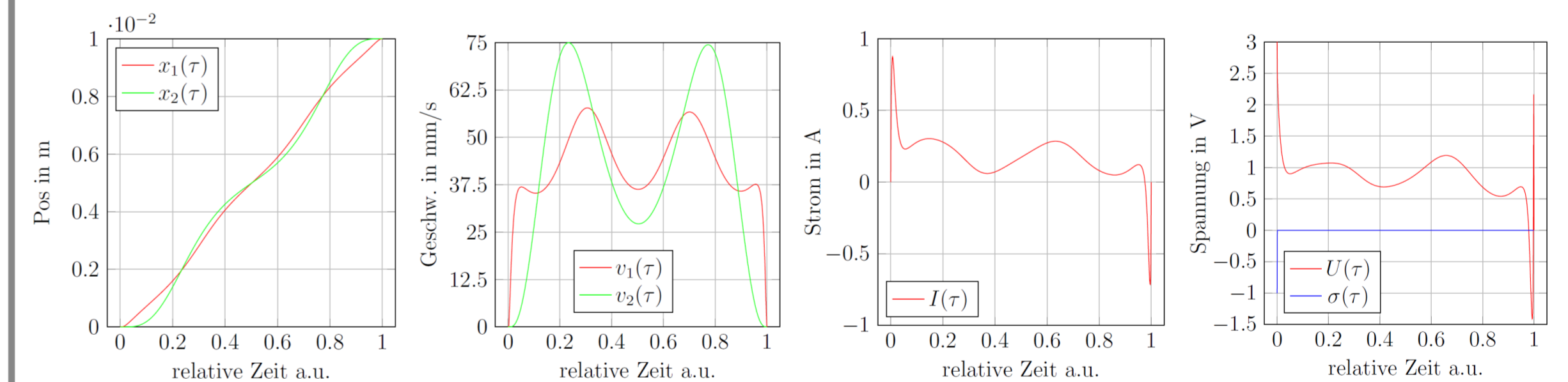
## PRAKTISCHER AUFBAU & ANWENDUNGSBEISPIELE



Der Motor auf der linken Abbildung wird für Servo-Achsen von Drahtbond-Maschinen, Wafer-Stepper-Anlagen und zur hochpräzisions Positionierung von Laserschneidern in der Herstellung von Mikro-Elektrisch-Mechanischen Systemen (MEMS) verwendet. Da solche Aktuatoren ebenfalls in Lautsprechern verwendet werden, werden sie auch Voice-Coil-Motoren genannt (Schwingspulen-Motoren). Auf der rechten Abbildung ist ein Linearmotor zu sehen, welcher aus drei verketteten Schwingspulen-Motoren besteht, wobei alle drei Spulen nur eine Masse bewegen. Mit diesem Aufbau können deutlich größere Hübe realisiert werden. Aus diesem Grund werden sie z.B. in Werkzeugmaschinen und Positioniersystemen eingesetzt. Aufgrund des breiten Anwendungsgebietes besteht ein Interesse, die Transferzeit der jeweiligen Motoren zu optimieren um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

<sup>a</sup>„Optimal Control of Servo Actuators with Flexible Load and Coulombic Friction“. doi:10.3166/EJC.17.1929.

## ERGEBNISSE UND AUSBLICK



Bei diesem Durchlauf wurde die Steuerspannung auf maximal  $\pm 3$  V begrenzt. Bei höheren Steuerspannungen werden die Abweichungen der Simulationsergebnisse zum Realversuch gemäß dem Paper<sup>a</sup> zu groß. Aufgrund der Modellvereinfachung ohne die  $sgn(x)$ -Funktion wird hier die zusätzliche Randbedingung gesetzt, dass die Geschwindigkeit  $v_1$  der Masse  $m_1$  nicht negativ werden darf. Insgesamt wird eine Transferzeit von  $t_f = 0,233$  s bei einem Hub von 10 mm bis zum Stillstand beider Massen benötigt. Aus dem rechten Diagramm kann entnommen werden, dass bis auf den Anfangszustand eine Singulärsteuerung vorliegt, da die Schaltfunktion  $\sigma(t)$  über die Transferzeit konstant bei 0 verläuft. Zwei weitere Fälle mit anderen Randbedingungen sind in dem ausführlichen Handout zur Hausarbeit aufgeführt und diskutiert. Dort ist ebenfalls eine reine Bang-Bang Steuerung zu sehen. Auf Grundlage der Hausarbeit kann nun ein Simulationsmodell für den Linearmotor aus der rechten Abbildung im Abschnitt „Praktischer Aufbau & Anwendungsbeispiele“ aufgebaut werden. Der praktische Aufbau ist Teil der Hausarbeit und daher bereits vorhanden.

<sup>a</sup>„Optimal Control of Servo Actuators with Flexible Load and Coulombic Friction“. doi:10.3166/EJC.17.1929.