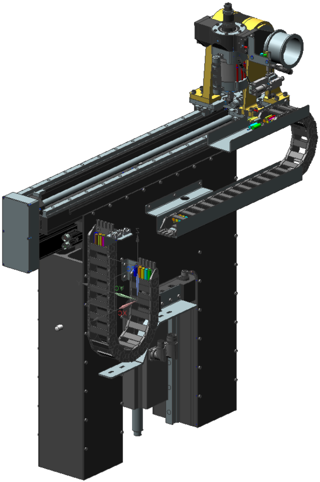
3DCSM - Body Handling

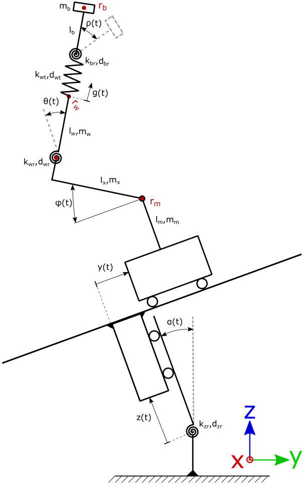
Institute of Automation and Control Engineering
UMIT, Hall in Tirol, Austria

Erstellen eines dynamischen Modells für das Body-Handling

- Abbildung des dynamischen Systemverhaltens, statische Aspekte stehen dabei im Hintergund
- Das Modell mit Abstraktion des Motors über Momentenvorgabe ist verfügbar
- Die um das Motormodell ergänzte Modellstruktur ist fertiggestellt
- Die Modelle sind dokumentiert

- Ziel: Einfache und möglichst genau dynamische Abbildung des realen Systems
- Rechtfertigung für ein ebenes Modell: Kein Freiheitsgrad in x-Richtung





Generalisierte Koordinaten des Modells

$$\boldsymbol{q} = [y(t), z(t), \varphi(t), \theta(t), \alpha(t), g(t), \rho(t)]^T$$

Geometrische Parameter in m

$$l_m = 0.1 \qquad l_z = 0.701$$
$$l_x = 0.079 \qquad l_w = 0.06 \qquad l_b = 0.0286$$

Massen in kg

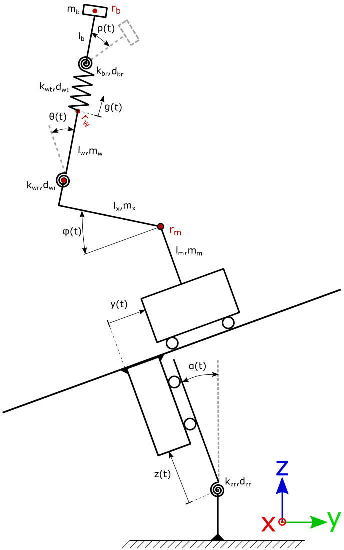
$$m_m = 7.62 \qquad m_x = 4.87 \qquad m_w = 2.37$$
$$m_b = 0.024 \qquad m_z = 77.3$$

Massenträgheitsmomente um X-Achse in kgm^2

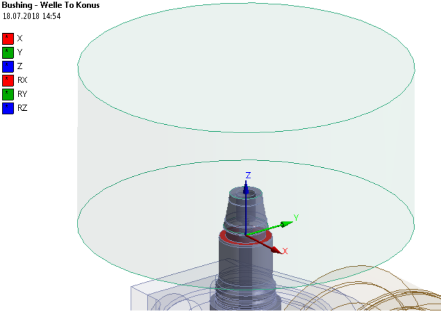
$$J_x = 0.0126 \qquad J_w = 0.0138 \qquad J_y = 0.063$$
$$J_b = 0.0000077 \qquad J_z = 7.191$$

Federkonstanten

$$k_{wr} = 217.19 \frac{kNm}{rad} \qquad k_{br} = 34.9 \frac{kNm}{rad}$$
$$k_{wt} = 6069 \frac{kN}{m} \qquad k_{zr} = 2902.4 \frac{kNm}{rad}$$



Steifigkeit Body Holder + Konusverbindung



Steifigkeit von Body Holder und der Konusverbindung Body Holder / Body wurde als Steifigkeitsmatrix in einer virtuellen Schnittstelle unterhalb des Konus abgebildet.
Dadurch können externe Lasten direkt auf den Kontaktflächen des Konus aufgebracht werden

Stiffness Coefficients

Stiffness	Per Unit X (mm)	Per Unit Y (mm)	Per Unit Z (mm)	Per Unit θx (rad)	Per Unit θy (rad)	Per Unit θz (rad)
Δ Force X (N)	32661					
Δ Force Y (N)	0,	32661				
Δ Force Z (N)	0,	0,	6069,6			
Δ Moment X (N·mm)	0,	0,	0,	3,4899e+007		
Δ Moment Y (N·mm)	0,	0,	0,	0,	3,4899e+007	
Δ Moment Z (N·mm)	0,	0,	0,	0,	0,	3,4899e+007

Auslenkung Bodyholder infolge externer Kraft

$$k_{Mx} = 34.9\frac{kNm}{rad}, F_{ext} = 20N, l = 0.075m, r = 0.0286m$$

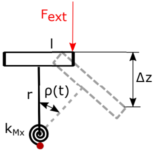
$$M_{ext} = 0.075 \cdot 20 = 1.5Nm, \quad \rho = \frac{M_{ext}}{k_{Mx}} = 42\mu rad$$

$$\Delta z = \rho \cdot l = \mathbf{3.15\mu m} \quad \Delta y = \rho \cdot r = \mathbf{1.20\mu m}$$

Auslenkung Bodyholder infolge Trägheit

$$M_g = m_b \cdot g \cdot r = 6.7\text{Nmm}, \quad \rho = \frac{M_g}{k_{Mx}} = 0.193\mu rad$$

$$\Delta y = \rho \cdot r = \mathbf{5.52nm}$$



Eigenfrequenz

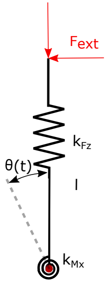
$$f_0 = \mathbf{5687.2Hz} \quad \text{mit leichtem Bodyholder } m_b = 0.024kg$$

- Axialkraft Bodyholder (Konussteifigkeit)

$$k_{Fz} = 6069\frac{kN}{m}, \quad F_{ext} = 20N, \quad \Delta z = \frac{F_{ext}}{k_{Fz}} = \mathbf{3.3\mu m}$$

$\boldsymbol{f_0 = 2515.4Hz}$ mit leichtem Bodyholder $0.024kg$

- Verkippung RotBody-Achse (ausschließlich aufgrund der Lagersteifigkeit, Welle selbst als Starrkörper angenommen)



$$k_{Mx} = 217.19\frac{kNm}{rad}, \quad F_{ext} = 20N, \quad l = 0.06m$$

$$M_{ext} = 0.06 \cdot 20 = 1.2Nm, \quad \theta = \frac{M_{ext}}{k_{Mx}} = 5.525\mu rad$$

$$\Delta y = \theta \cdot l = \mathbf{0.33\mu m}$$

$f_0 = \mathbf{516.5Hz}$ ohne Bodyholder

- Biegung RotX-Achse

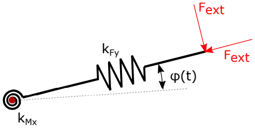
$$k_{Mx} = 315\frac{kNm}{rad}, \quad F_{ext} = 20N, \quad l = 0.079m$$

$$M_{ext} = 0.079 \cdot 20 = 1.58Nm$$

$$\varphi = \frac{M_{ext}}{k_{Mx}} = 5\mu rad$$

$$\Delta y = \theta \cdot l = \mathbf{0.396\mu m}$$

$$f_0 = \mathbf{543.9Hz}$$ nur mit Masse m_x ohne m_w, m_b



- RotX Axialkraft

$$k_{Fy} = 57597\frac{kN}{m}, \quad F_{ext} = 20N$$

$$\Delta y = \frac{F_{ext}}{k_{Fy}} = \mathbf{0.35\mu m}$$

$$f_0 = \mathbf{547.34Hz}$$ ebenfalls nur mit Masse m_x

Aufstellen der kinetischen und den potentiellen Energien

$$T_t = \frac{1}{2}\left(m_m v_{com_m}^2 + m_d v_{com_d}^2 + m_w v_{com_w}^2 + m_b v_{com_b}^2\right)$$

$$T_r = \frac{1}{2}\left(J_z \dot{\alpha}^2 + J_x(\dot{\alpha} + \dot{\varphi})^2 + J_w(\dot{\alpha} + \dot{\varphi} + \dot{\theta})^2 + J_b(\dot{\alpha} + \dot{\varphi} + \dot{\theta} + \dot{\rho})^2\right)$$

$$U_t = \frac{1}{2} k_{wt} g(t)^2$$

$$U_r = \frac{1}{2}\left(k_{zr}\alpha(t)^2 + k_{wr}\theta(t)^2 + k_{br}\rho(t)^2\right)$$

Lagrange-Gleichung

$$L = T_t + T_r - (U_t + U_r)$$

Dissipationsfunktionen:

$$D_t = \frac{1}{2} d_{wt}\dot{g}(t)^2, \quad D_r = \frac{1}{2}\left(d_{zr}\dot{\alpha}(t)^2 + d_{wr}\dot{\theta}(t)^2 + d_{br}\dot{\rho}(t)^2\right)$$

$$D_{ges} = D_t + D_r$$

Generalisierte Kräfte:

$$Q = [F_y, F_z, M_\varphi, 0, 0, 0, 0]^T$$

Lagrange Gleichung 2. Art:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}} + \frac{\partial D_{ges}}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}} = Q$$

$$M = \frac{\partial}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}, \quad C = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}}\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}, \quad F = \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}}, \quad D = \frac{\partial D}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}$$

$$M\ddot{\boldsymbol{q}} + C\dot{\boldsymbol{q}} - F = Q - D$$

$$\Rightarrow \ddot{\boldsymbol{q}} = -M^{-1}C\dot{\boldsymbol{q}} + M^{-1}F + M^{-1}Q - M^{-1}D$$

- Zur Simulation des Systems werden die Bewegungsdifferentialgleichungen in Form von DGL 1. Ordnung übergeben

- Ziel: Darstellung der Position des Bodies

Transformationsmatrizen

$$T_{0y} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & z_{Feder} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{ym} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi & \sin\varphi & y(t) + rx_{y0} \\ \sin\varphi & \cos\varphi & z(t) + rx_{z0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

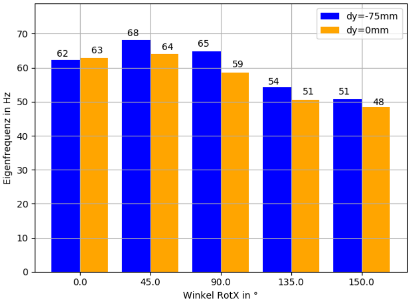
$$T_{mw} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & lx_y \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & lx_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{wb} = \begin{bmatrix} \cos\rho & -\sin\rho & dy \\ \sin\rho & \cos\rho & l_w + g(t) + l_b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{0b} = T_{0y} \cdot T_{ym} \cdot T_{mw} \cdot T_{wb}$$

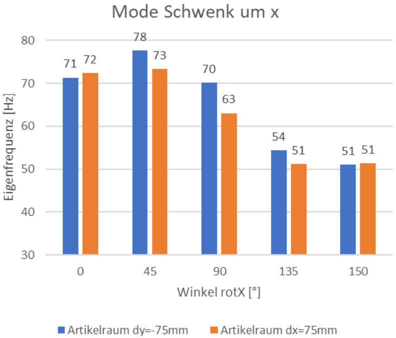
Ausgangspunkt: Ursprung $\boldsymbol{r_0} = [0,0]^T$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{r_b} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{0b} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{r_0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Eigenfrequenzen in Abhängigkeit verschiedener Stellungen der RotX-Achse



Simulation



FEM-Simulation

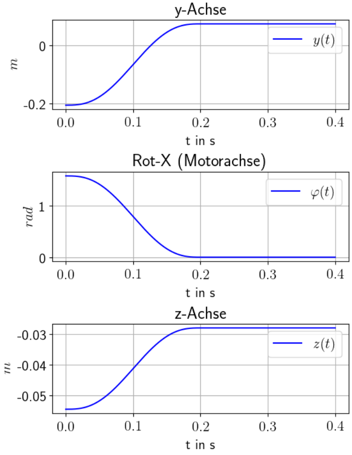
- Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde kein Regler verwendet. Achsen wurden starr ausgelegt.

Gilt für alle Simulationsszenarien

- Simulationszeit: $t_0 = 0, \quad T = 400ms$
- Bewegungsdauer: $200ms$
- Ausgangs- und Zielposition sind identisch. Die Orientierung der RotX-Achse wird jedoch geändert.

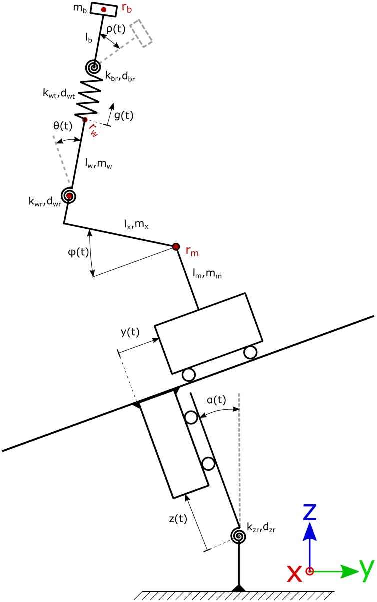
$$ee(t) = [y(t), z(t), \varphi(t)]$$
$$ee(t=0) = [0.04m, 0.826m, 90°]$$
$$ee(t=T) = [0.04m, 0.826m, 0°]$$

- PID Regler für jede Achskoordinate (sehr steif ausgelegt)
- Regelung mit Vorsteuerung und computed torque
- Vorgabe Bestückposition und -orientierung für t_0 und T, Umrechnung und Bahnplanung in Gelenkskoordinaten

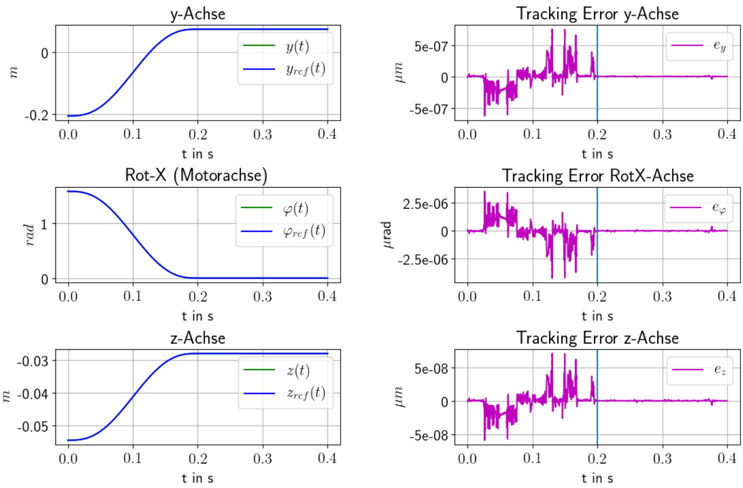


Übersicht der Simulationsszenarien

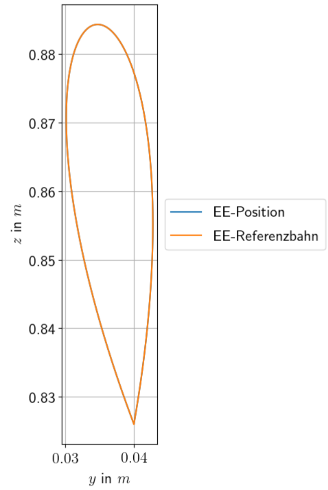
- Simulation 1: Starres System
- Simulation 2: Nur der Unterbau schwingt, restliches System ist starr (nur Biegefeder k_{zr})
- Simulation 3: Unterbau und RotBody-Achse sind schwingungsfähig (Biegefedern k_{zr} und k_{wr})
- Simulation 4: Vorsteuerung mit Input-shaping

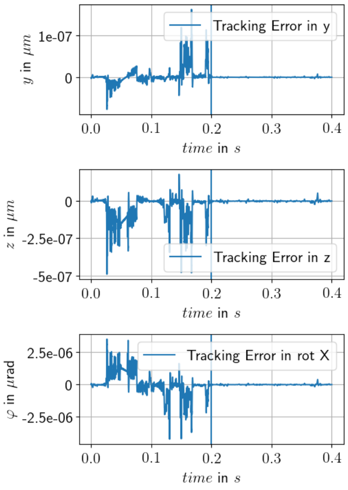


Fehlergrößenverlauf für die Simulation des starren Systems

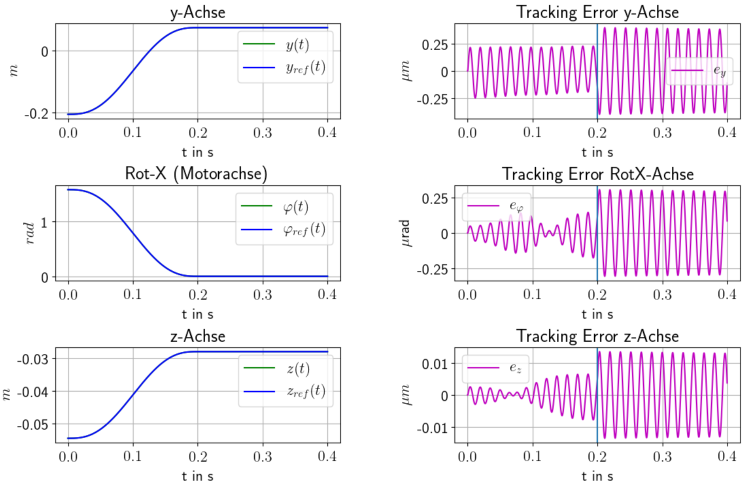


Bahnverlauf des Bestückpunktes in der Ebene (links), Fehlerverlauf der Bestückposition und -orientierung zur Referenzbahn (rechts)

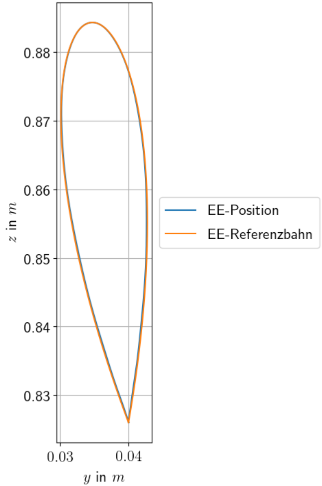


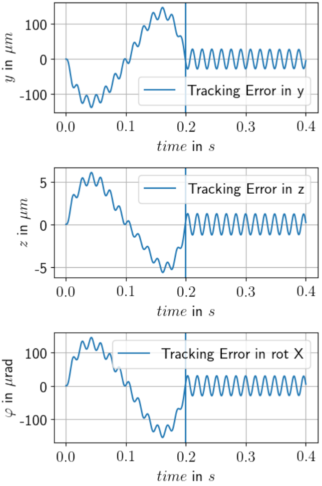


Fehlergrößenverlauf für die Simulation mit schwingendem Unterbau durch die Biegefeder k_{zr}

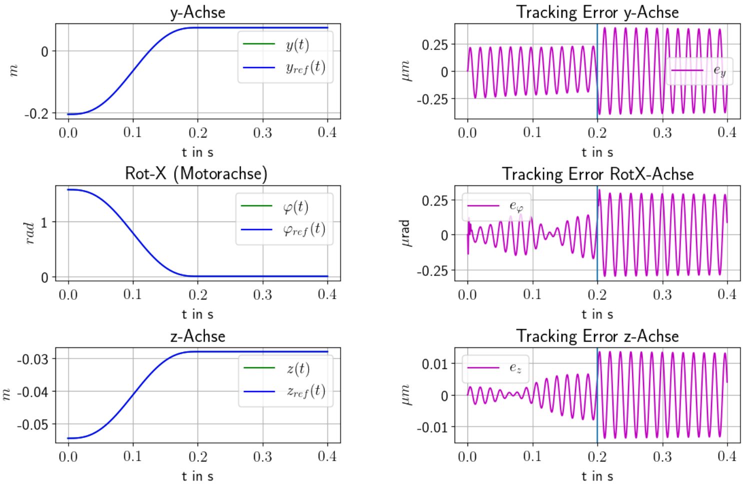


Bahnverlauf des Bestückpunktes in der Ebene (links), Fehlerverlauf der Bestückposition und -orientierung zur Referenzbahn (rechts)

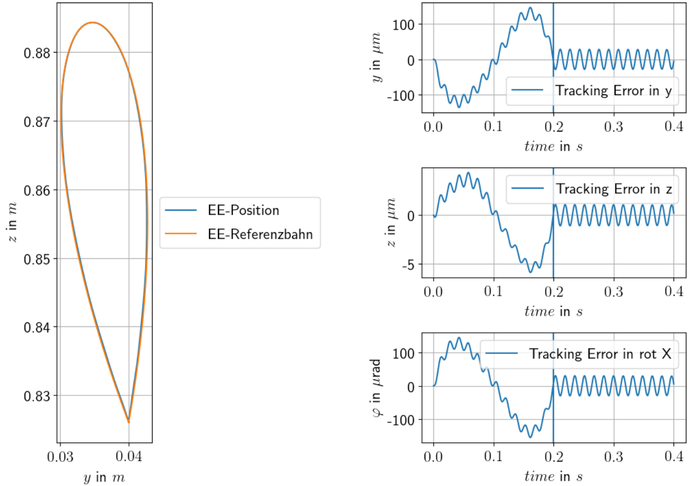




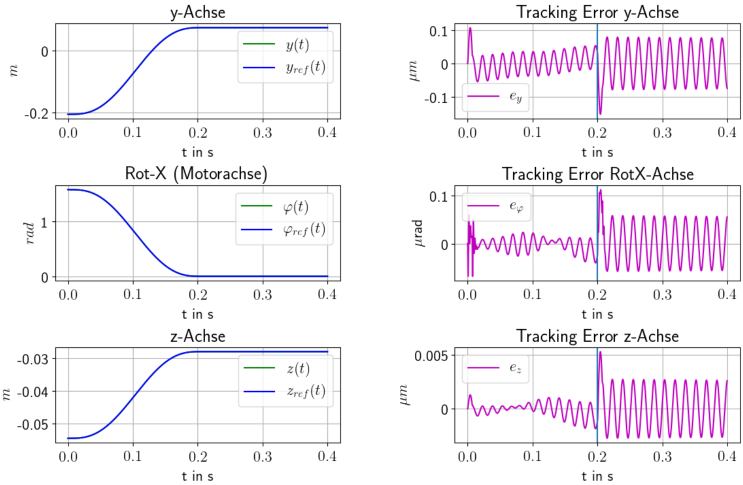
Fehlergrößenverlauf für die Simulation mit schwingendem Unterbau und schwingender RotBody-Achse



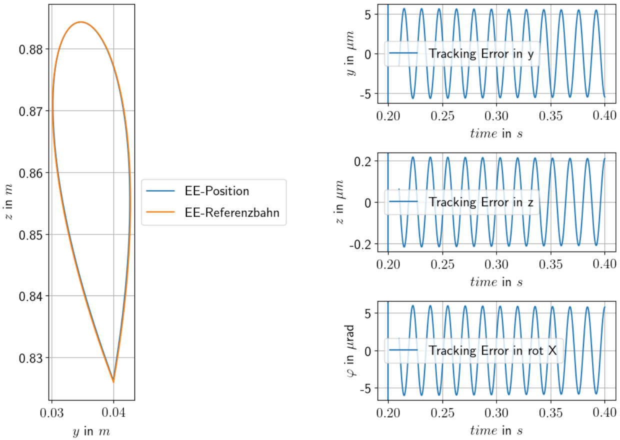
Bahnverlauf des Bestückpunktes in der Ebene (links), Fehlerverlauf der Bestückposition und -orientierung zur Referenzbahn (rechts)



Fehlergrößenverlauf für die Simulation mit schwingendem Unterbau und schwingender RotBody-Achse



Bahnverlauf des Bestückpunktes in der Ebene (links), Fehlerverlauf der Bestückposition und -orientierung zur Referenzbahn (rechts)



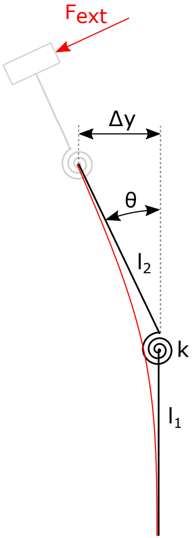
- $10Hz$ Fehler an Eigenfrequenz

Problem:

- Deviationsanteile der Steifigkeitsmatrix sind für die Rot-Body-Achse nicht vernachlässigbar

Lösung:

- Annahme: Für das dynamische Verhalten sind die einwirkenden Momente sehr gering
- Idee: Verformung durch nur eine Drehfeder abbilden, wobei die Position und die Steifigkeit der Feder so gewählt wird, dass das gewünschte Verhalten erreicht wird
- 2. Schritt: Abstimmung der beiden Stäbe auf die Gesamtmasse, Gesamtlänge, resultierender Schwerpunkt und Eigenfrequenz



Die nächsten sinnvollen Schritte vom jetzigen Stand des Modells aus:

1. Elektrischer Teil des Motormodells implementieren
2. Daten für Spindelantrieb berücksichtigen (Steigung, Gesamtübersetzung)
3. Parameteridentifikation am Aufbau