TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

# KONZEPTION, AUFBAU UND INBETRIEBNAHME EINES SELBSTSTABILISIERENDEN EINACHSIGEN FAHRZEUGES

Bolorkhuu Dariimaa

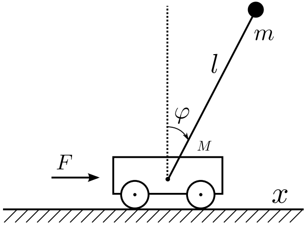
Dresden, 02.10.2014

# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

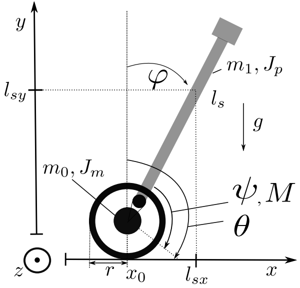
# Inverses Pendel auf Wagen

- unteraktuirtes System
- 2 generalisierte Koordinaten ($\varphi$, $x$)
- DOF: 2 (Wagenposition, Pendelwinkel)



# Inverses Pendel auf Rädern

- unteraktuirtes System
- 3 Koordinaten ($\psi$, $\varphi$, $\theta$)
- 1 holonome Zwangsbedingung
  $\theta = \psi + \varphi$
- DOF: 2 (Radposition, Pendelwinkel)

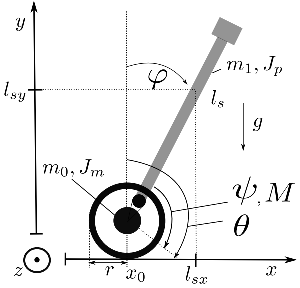


# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

# Herleitung der Bewegungsgleichungen

- Generalisierte Koordinaten
  $[\psi, \varphi]^T =: [q_1, q_2]^T =: \mathbf{q}$
- Schwerpunktskoordinaten
  $l_{sx} = r(q_1 + q_2) + l_s \sin(q_2)$
  $l_{sy} = \qquad l_s \cos(q_2)$




- $\varphi$ : Absolutwinkel des Pendels
- $\psi$ : Relativwinkel zwischen Rad und Pendel
- $\theta$ : Rollwinkel des Rades

Kinetische Energie

$$T(q,\dot{q}) = m_0 r^2 \frac{(\dot{q}_1+\dot{q}_2)^2}{2} + J_m \frac{(\dot{q}_1+\dot{q}_2)^2}{2} + J_p \frac{\dot{q}_2{}^2}{2} + \frac{m_1}{2}\left[(\frac{d}{dt} l_{sx})^2 + (\frac{d}{dt} l_{sy})^2\right]$$

Potenzielle Energie

$$U(q) = m_1 g\, l_{sy}$$

Lagrangsche Funktion

$$L = T - U$$

Lagrangsche Gleichung

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{q}_i}\right) - \frac{dL}{dq_i} = \tau_i, \qquad i = 1,2$$

## Matrizen-Darstellung

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

## Matrizen-Darstellung

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

- Massenmatrix

$$\begin{bmatrix} J^* & J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) \\ J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) & J^* + J_p + m_1 l_s^2 + 2 l_s m_1 r \cos(q_2) \end{bmatrix}$$

für $J^* = J_m + (m_0 + m_1) r^2$

Matrizen-Darstellung

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

- Massenmatrix

$$\begin{bmatrix} J^* & J^* + l_s m_1 r\cos(q_2) \\ J^* + l_s m_1 r\cos(q_2) & J^* + J_p + m_1 l_s^2 + 2 l_s m_1 r\cos(q_2) \end{bmatrix}$$

  für $J^* = J_m + (m_0 + m_1) r^2$
- Zentrifugal-/Corioliskräfte

$$\begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r\sin(q_2) \\ -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r\sin(q_2) \end{bmatrix}$$

Matrizen-Darstellung

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

- Massenmatrix

$$\begin{bmatrix} J^* & J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) \\ J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) & J^* + J_p + m_1 l_s^2 + 2 l_s m_1 r \cos(q_2) \end{bmatrix}$$

für $J^* = J_m + (m_0 + m_1) r^2$

- Zentrifugal-/Corioliskräfte

$$\begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r \sin(q_2) \\ -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

- Gelenkmomente durch Gravitation

$$\begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g l_s m_1 \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

Matrizen-Darstellung

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

- Massenmatrix

$$\begin{bmatrix} J^* & J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) \\ J^* + l_s m_1 r \cos(q_2) & J^* + J_p + m_1 l_s^2 + 2 l_s m_1 r \cos(q_2) \end{bmatrix}$$

für $J^* = J_m + (m_0 + m_1) r^2$

- Zentrifugal-/Corioliskräfte

$$\begin{bmatrix} C_1(q,\dot{q}) \\ C_2(q,\dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r \sin(q_2) \\ -l_s m_1 \dot{q}_2^2 r \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

- Gelenkmomente durch Gravitation

$$\begin{bmatrix} K_1(q) \\ K_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g l_s m_1 \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

- Antriebsgelenkmoment

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Partielle Linearisierung

Neuer virtueller Eingang

$$a = \ddot{q}_1$$

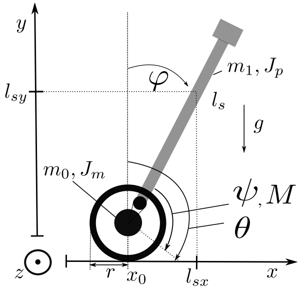
Unterlagerte Rückführung

$$\tau_1 = \left[M_{11}(q) - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)M_{21}(q)\right] a - M_{12}(q)M_{22}^{-1}(q)\left(C_2(q,\dot{q}) + K_2(q,\dot{q})\right) + C_1(q,\dot{q}) + K_1(q).$$

Partiallinearisiertes System

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= a \\ \ddot{q}_2 &= -M_{22}^{-1}(q)\left(C_2(q,\dot{q}) + K_2(q,\dot{q}) + M_{21}(q)\,a\right). \end{aligned}$$

# Partielle Linearisierung




- Zustandsvektor im $\mathrm{R}^4$
  $x := [x_1\ x_2\ x_3\ x_4]^T := [\psi\ \varphi\ \dot{\psi}\ \dot{\varphi}]^T$
- Das eingangsaffine System
  mit der Eingangsgröße $u = a$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

bzw.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_3 \\
\dot{x}_2 &= x_4 \\
\dot{x}_3 &= a \\
\dot{x}_4 &= -\ M_{22}^{-1}(x)\,(C_2(x,\dot{x}) + K_2(x,\dot{x}) + M_{21}(x)\,a)
\end{aligned}$$

# Linearisierung um die Ruhelage

Ruhelage

$$x_0 = [x_{1,0}\; x_{2,0}\; x_{3,0}\; x_{4,0}]^T = [0\,0\,0\,0]^T$$

In der Zustandsraumdarstellung

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_3 \\ \dot{\tilde{x}}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ b_4 \end{bmatrix} \tilde{u}$$

$$a_{42} = \frac{g l_s m_1}{J_p + J_m + l_s^2 m_1 + 2 l_s m_1 r + (m_0 + m_1) r^2}$$

$$b_4 = -\frac{J_m + l_s m_1 r + (m_0 + m_1) r^2}{J_p + J_m + l_s^2 m_1 + 2 l_s m_1 r + (m_0 + m_1) r^2}$$

In der allgemeinen Darstellung

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + b\tilde{u}, \qquad \tilde{x}(t_0) = x_0$$

# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

# Reglerentwurf

Die Kalmanische Steuerbarkeitsmatrix $S$

$$S = [b, Ab, A^2 b, A^3 b] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & b_4 & 0 & a_{42} b_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ b_4 & 0 & a_{42} b_4 & 0 \end{bmatrix}.$$

Determinante

$$\det(S) = -a_{42}^2 \cdot b_4^2, \qquad \Rightarrow \mathrm{Rg(S)} = 4.$$

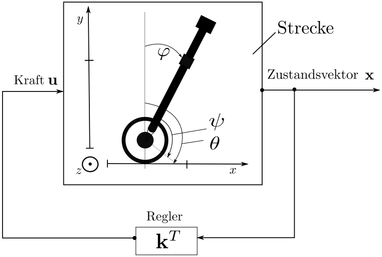
Die Polstellen der offenen Strecke

$$\det(sI - A) = 0$$

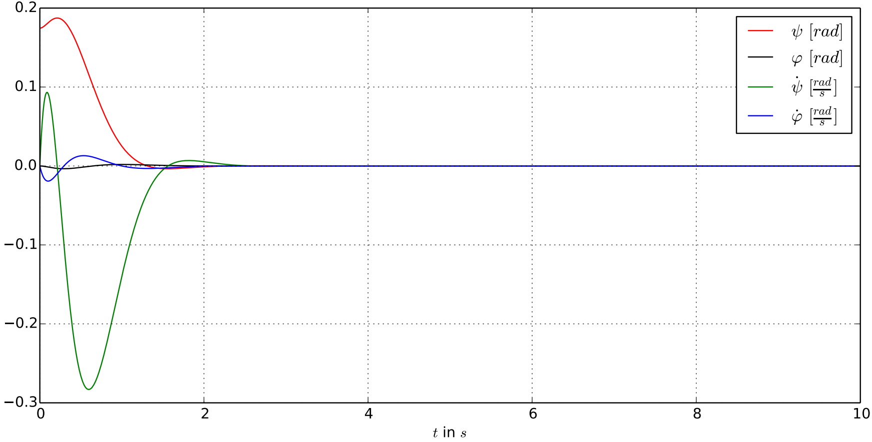
$$s_{1,2}^0 = 0, \qquad s_{3,4}^0 = \pm\sqrt{a_{42}}.$$

System ist instabil, Regler notwendig

- Gewünschte Pole
  $s_1 = s_2 = -5, \quad s_{3,4} = -3 \pm 3j$
- Charakteristische Polynom
  $\mathrm{CLCP} = (s+5)^2(s+3-3j)(s+3+3j)$
- Charakteristische Polynom
  des geregelten Systems
  $\mathrm{CLCP} = \det(sI - A - b(k_1, k_2, k_3, k_4))$
- Bestimmung von Reglerverstärkungen
  mittels Koeffizientenvergleich

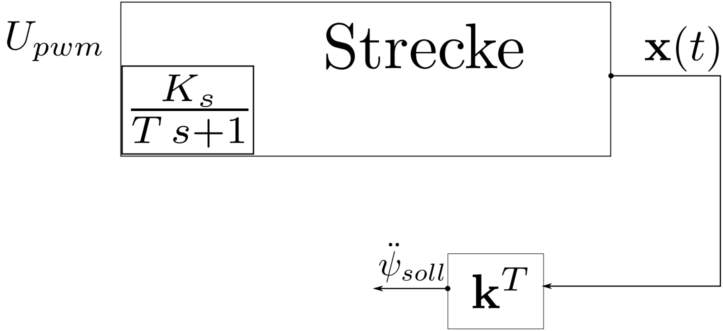


# Simulation

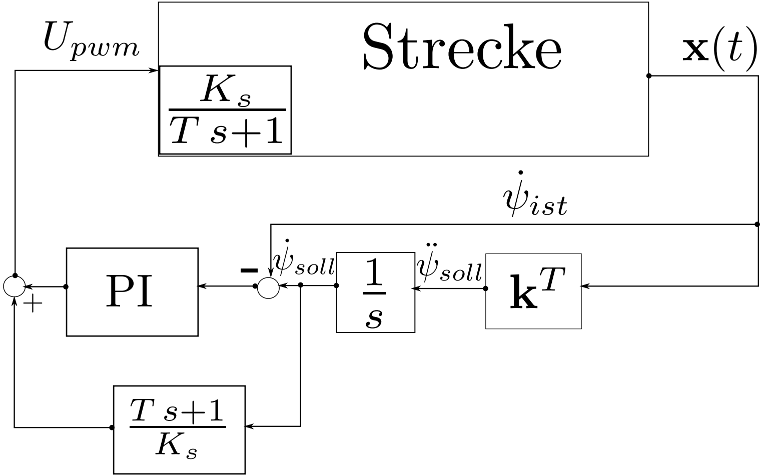


0.2
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
0
2
4
6
8
10
$t$ in $s$
$\psi$ $[rad]$
$\varphi$ $[rad]$
$\dot{\psi}$ $[\frac{rad}{s}]$
$\dot{\varphi}$ $[\frac{rad}{s}]$

# Struktur des Regelkreises



# Struktur des Regelkreises



# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

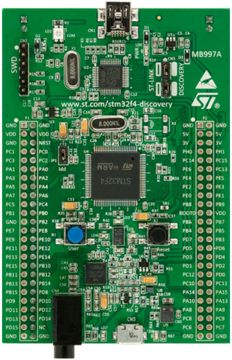
# Eingesetzter Mikrokontroller STM32F407

Gute Eigenschaften

- Systemtakt bis 168MHz ARM-Kern
- 1MB Flash, 512kByte Ram
- Gleitkommarechnung
  (Software, Hardware)
- viele Pins
- OpenSource
  - Compiler
  - Linker
  - Flasher

Nachteil

- relativ großen Strombedarf
  zum Vergleich AVR-Mikrokontrollern




Bildquelle: st.com

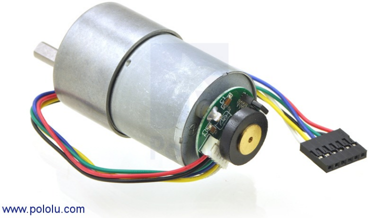
# Eingesetzte Motoren

Gute Eigenschaften

- Betriebsspannung ca. 12V
- Drehmoment 0.7767Nm
- eingebauter 64-Segmenten Encoder
- Getriebe mit 30:1 Übersetzung
- max. 5A Strom bei Festhalten der Motorachse

Nachteil

- richtungsabhängige Verstärkung




Bildquelle: pololu.com

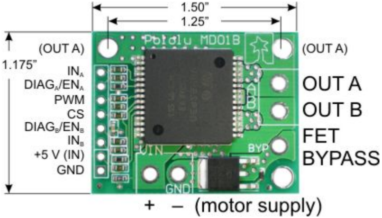
# Motortreiber (alt) VNH3SP30 H-Brücke

Gute Eigenschaften

- Betriebsspannung bis ca. 20V
- max. Spritzenstrom 10A
- thermisch belastbar

Nachteil

- kein eingebauter Shunt-Widerstand
- nur für einen Motor




Bildquelle: pololu.com

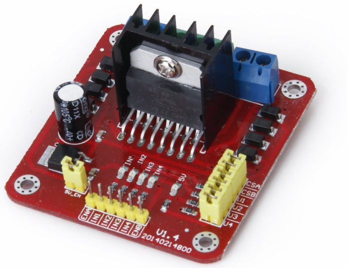
# Motortreiber (neu) L298N H-Brücke

Gute Eigenschaften

- Betriebsspannung bis ca. 15V
- max. Spritzenstrom ca. 1A
- wenig thermisch belastbar
- für 2 Motoren

Nachteil

- kein eingebauter Shunt-Widerstand

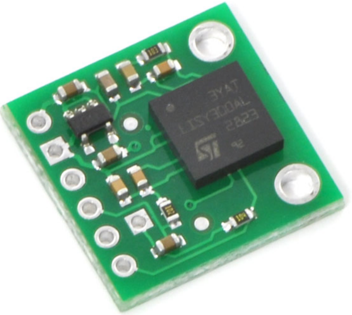


Bildquelle: amazon.de Nutzer: Generic

# Eingesetztes Gyroskop LISY300AL

Gute Eigenschaften

- Eingangsspannung 5V
- interne 3.3V Regler
- sehr empfindlich
- Sensitivity 3.3$mV/\circ/s$




Bildquelle: pololu.com

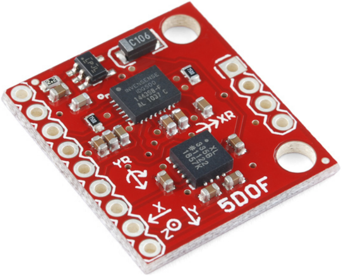
# Eingesetzter Beschleunigungssensor ADXL335 Gyroskop IDG500

Gute Eigenschaften

- Betriebsspannung 3.3V Regler
- Gyroscope-Sensitivity 2.0$mV/ \circ /s$
- ADXL335-Sensitivity 300$mV/g$

Nachteil

- Beschleunigungssensor verrauscht sta
- Kalman-Filter ursprunglich von http://tom.pycke.be/ eingesetzt




Bildquelle: sparkfun.com

# XBEE für drahtlose Kommunikation

Gute Eigenschaften

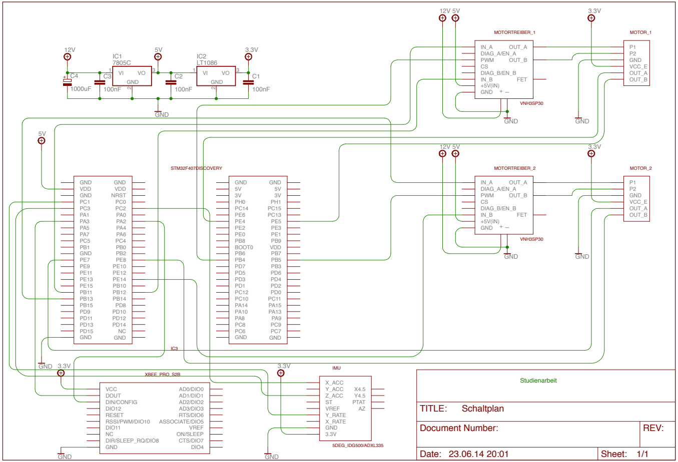
- Betriebsspannung 3.3V
- serielle Kommunikation über USART
- 1600m erreichbar laut Datenblatt
- Datendurchsatz von 1Mbps

Nachteile

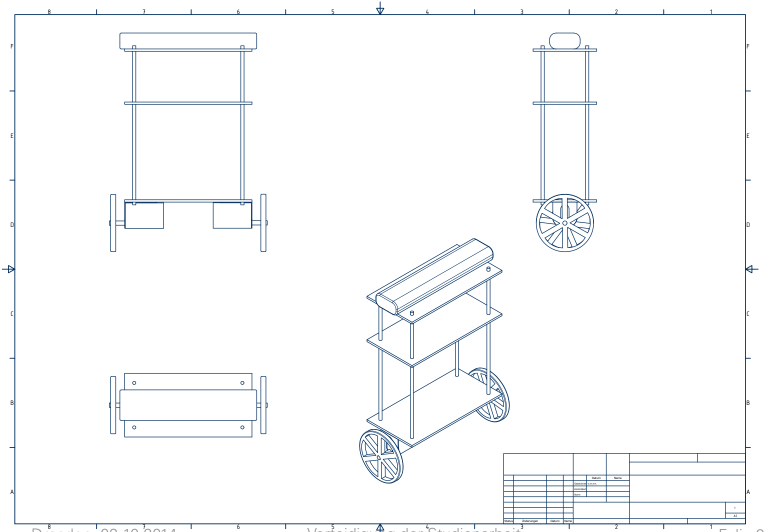
- 2 Stück benötigt


Bildquelle: de.rs-online.com

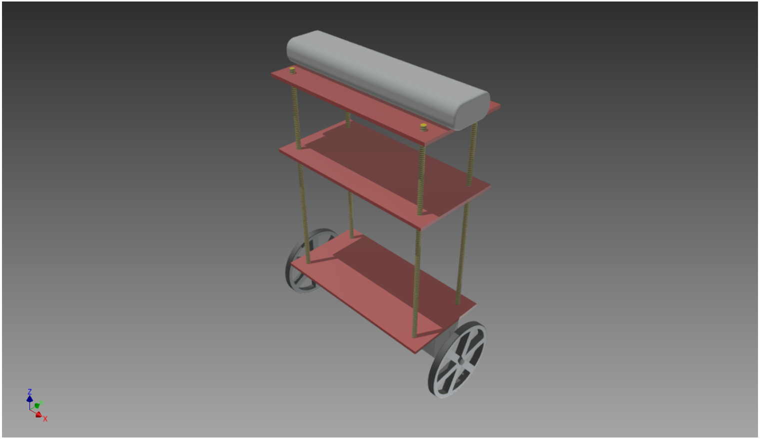
# Schaltplan


Studienarbeit
TITLE: Schaltplan
Document Number:
REV:
Date: 23.06.14 20:01
Sheet: 1/1
MOTORTREIBER_1
MOTORTREIBER_2
MOTOR_1
MOTOR_2
VNH3SP30
STM32F407DISCOVERY
IC1 7805C
IC2 LT1086
XBEE_PRO_S2B
IMU
5DEG_IDG500/ADXL335
12V
5V
3.3V
GND

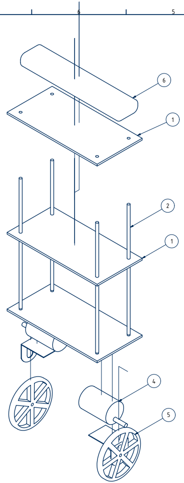
# Mechanischer Bauplan



# Mechanischer Bauplan



# Mechanischer Bauplan




| TEILELISTE | | | |
|---|---|---|---|
| OBJEKT | ANZAHL | BAUTEILNUMMER | BESCHREIBUNG |
| 1 | 3 | Platte | |
| 2 | 4 | Gewindestange | |
| 3 | 2 | Motorblech | |
| 4 | 2 | Motor | |
| 5 | 2 | Rad | |
| 6 | 1 | Batterie | |

explo-1

# Gliederung

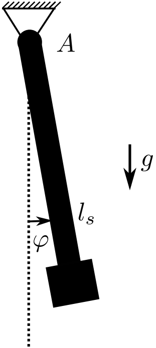
- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

# Parameteridentifikation: Trägheitsmoment $J_p$

Schwingungsversuch

- schwer zu messen
- $J_p = J_A - m_1 l_s^2$

  $\ddot{\varphi} + \underbrace{\frac{l_s m_1 g}{J_A}}_{w_0^2} \sin(\varphi) = 0$ für $sin(\varphi) \approx \varphi$
- $J_p = J_A - m_1 l_s^2 = \frac{l_s m_1 g T^2}{4\pi^2} - m_1 l_s^2$
- gemessen $T \approx 0.9s$ $\qquad J_p \approx 0.0091 kgm^2$



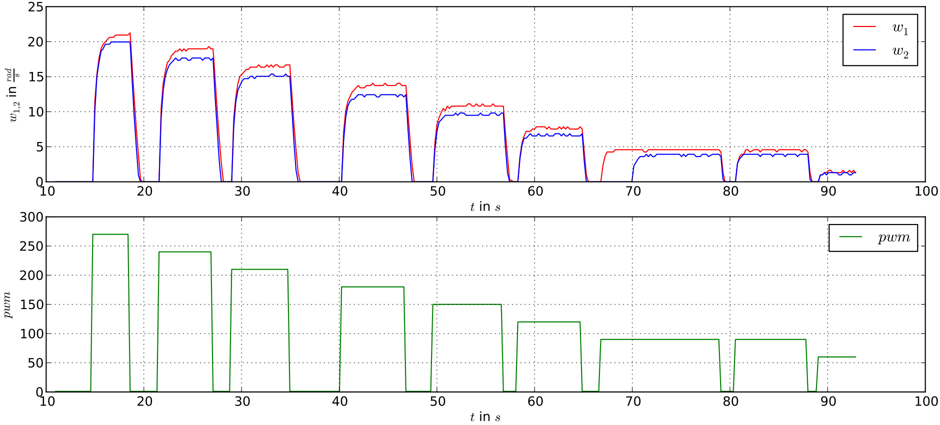
# Trägheitsmoment $J_m$ des Rades

betrachtet als sehr dünnen Vollzylinder

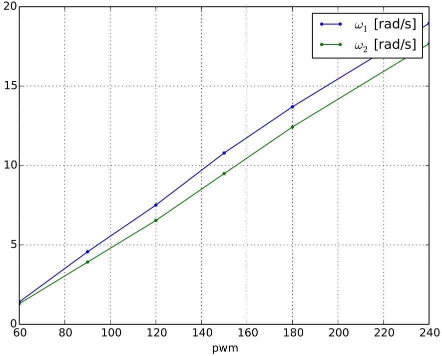
- $J_m = 2\frac{mr^2}{2} = mr^2 = 6.48 \cdot 10^{-5} kgm^2$

Bildquelle: pololu.com

# Identifikation der Motoren



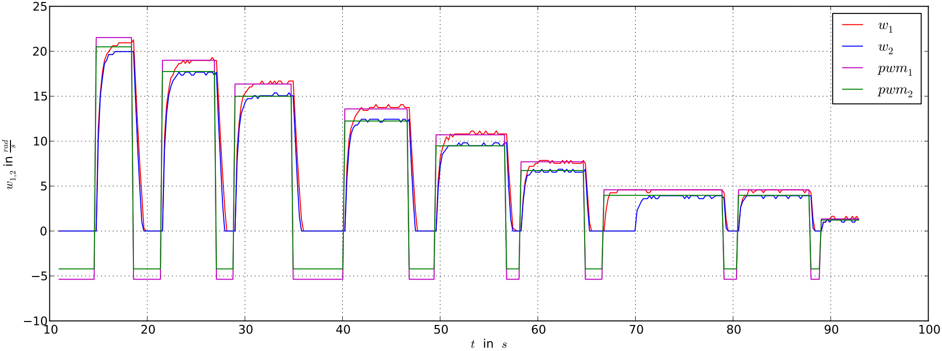
# Analyse der Regression “Methode der



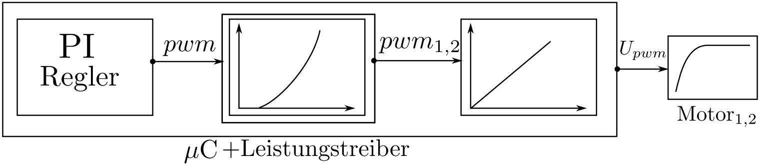

Stichproben

Gesuchte Polynom
$$
\begin{aligned}
pwm_1 &= 9.80666 \cdot 10^{-2} \cdot pwm - 4.241 \\
pwm_2 &= 9.18355 \cdot 10^{-2} \cdot pwm - 4.295.
\end{aligned}
$$

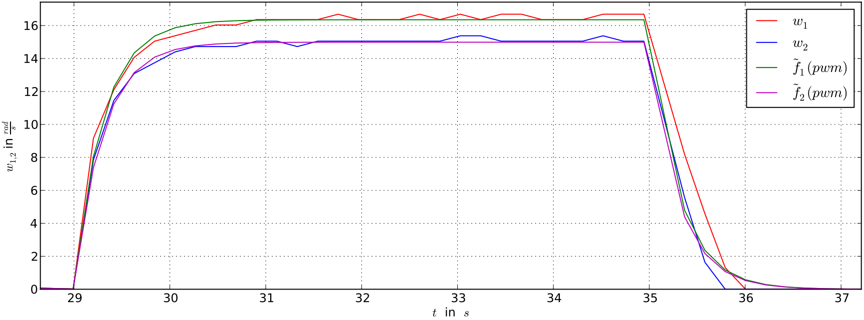
# Identifikation der Motoren



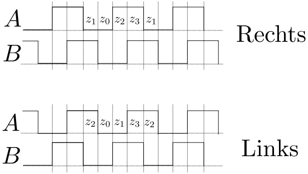
# Prinzip der PWM-Umrechnung



# Angenäherte Funktion $T = 0.3s$



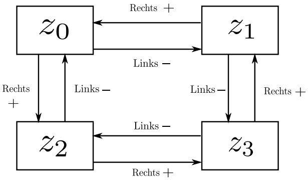
# Auswertung des Inkrementalgebers



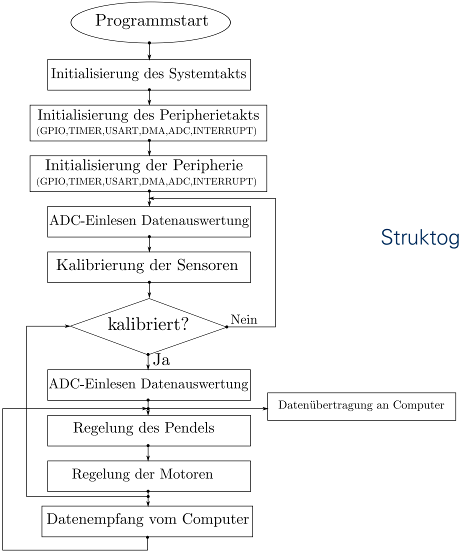

- $\pm 90°$ phasenverschobenes Signal
- Zuordnung der Signalfolgen
  $A \in \{0, 1\}, \quad B \in \{0, 1\}$
-

| Zustand | $A$ | $B$ | Kodierung |
|---|---|---|---|
| $z_0$ | 0 | 0 | 0 |
| $z_1$ | 0 | 1 | 1 |
| $z_2$ | 1 | 0 | 2 |
| $z_3$ | 1 | 1 | 3 |

- Rechts: $z_1 \rightarrow z_0 \rightarrow z_2 \rightarrow z_3 \rightarrow z_0 \ldots$
  Links : $z_2 \rightarrow z_0 \rightarrow z_1 \rightarrow z_3 \rightarrow z_2 \ldots$



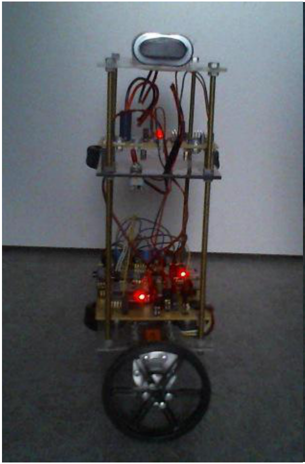
## Struktogramm der Software



# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

# Ergebnis



# Gliederung

- Einführung
- Modellbildung
- Reglerentwurf
- Mechanischer Aufbau und elektrische Komponenten
- Umsetzung
- Ergebnis
- Zusammenfassung und Ausblick

# Zusammenfassung und Ausblick

**Zusammenfassung:**

Der Zustadsregler ist etwas empfindlich gegenüber Parameterungenauigkeit. Mit einer I-Regler-Erweiterung funktioniert die Stabilisierung besser als zuvor. Die Reibung im Gelenkraum ist vernachläßigt. Die Modulierung der Reibung war nötig.

**Ausblick:**

Mit einer LQ-Regler könnte die Stabilisierung besser werden. Eine Optimierung der unterlagerten PI-Regelung kann benötigt werden.