

*Diplomarbeit*

# Schätzverfahren für adaptive Regelung von Hybridgetrieben

*Estimation Procedure for Adaptive Control of Hybrid Gearboxes*

*vorgelegt von*  
Koray Karci

*Studiengang*  
Maschinenbau

*Prüfer*  
Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny

*Betreuer*  
M.Sc. Michel Bauer

*Prüfungsdatum*  
30.09.2018



## **Kurzfassung**

Kurzfassung

## **Abstract**

Abstract

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>9</b>
<b>2 Modellierung</b>	<b>11</b>
2.1 Modellierung des Antriebsstranges . . . . .	11
2.2 Modellierung der Reibung an Kupplungen und Bremsen . . . . .	13
<b>3 Sensitivitätsanalyse</b>	<b>15</b>
3.1 Erstes Unterkapitel . . . . .	15
3.2 Zweites Unterkapitel . . . . .	15
<b>4 Beobachterentwurf</b>	<b>17</b>
4.1 Erstes Unterkapitel . . . . .	17
4.2 Zweites Unterkapitel . . . . .	17
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>19</b>
<b>A Anhang</b>	<b>21</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>23</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>25</b>



# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

DOF	Freiheitsgrade (Engl.: Degrees of Freedom)
E/A	Eingang/Ausgang
IMC	Internal Model Control
MPC	Modellprädiktive Regelung (Engl.: Model Predictive Control)

## Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$I$	A	Strom
$U$	V	Spannung
$T$	K	Temperatur
$\tau$	s	Zeitkonstante
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft
$u$		Regeleingang des zu regelnden Systems
$x$		Zustandsvektor
$y$		Regelausgang des zu regelnden Systems





# Kapitel 1

## Einleitung und Motivation

Dies ist die Einleitung und Motivation. Freitag



# Kapitel 2

## Modellierung

In diesem Kapitel wird ein für die Simulation verwendetes detailliertes Modell des Antriebsstrangs hergeleitet. Hierfür wird ein vorhandenes, starres Modell um Elastizitäten der Seitenwellen ergänzt. Für die Herleitung wird dabei der Lagrange Formalismus verwendet, welcher daher auch kurz beschrieben wird. Im weiteren werden aus dem detaillierten Modell vereinfachte Modelle hergeleitet, welche dem Entwurf der Beobachter im Kapitel 5 dienen.

### 2.1 Modellierung des Antriebsstranges

Zur Modellierung des Antriebsstranges wird zunächst die Getriebedynamik mittels der Newton-Euler Gleichungen berechnet. Dazu wird zu Beginn kurz auf die Herleitung dieser Gleichungen eingegangen. Danach wird dieses um die Elastizitäten der Seitenwellen ergänzt, woraus sich ein schwingfähiges System ergibt.

#### 2.1.1 Herleitung der Newton-Euler Gleichungen

Die Position und Orientierung von jedem Körper  $i$  eines holonomen Mehrkörpersystems mit  $p$  Körpern und  $f$  Freiheitsgraden, kann in Abhängigkeit der verallgemeinerten Koordinaten  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^f$  angegeben werden mit

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(\mathbf{y}, t) \quad i = 1(1)p \quad (2.1)$$

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{s}_i(\mathbf{y}, t). \quad (2.2)$$

Durch die zeitliche Ableitung dieser ergeben sich die translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten

$$\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{y}} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t} = \mathbf{J}_{Ti}(\mathbf{y}, t) \cdot \dot{\mathbf{y}} + \bar{\mathbf{v}}_i(\mathbf{y}, t) \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \dot{\mathbf{s}}_i = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{y}} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial t} = \mathbf{J}_{Ri}(\mathbf{y}, t) \cdot \dot{\mathbf{y}} + \bar{\boldsymbol{\omega}}_i(\mathbf{y}, t) \quad (2.4)$$

mit der Jacobi-Matrix der Translation  $\mathbf{J}_{Ti}$  und der Rotation  $\mathbf{J}_{Ri}$ . Die lokalen Geschwindigkeitsvektoren  $\bar{\mathbf{v}}_i(\mathbf{y}, t)$  und  $\bar{\boldsymbol{\omega}}_i(\mathbf{y}, t)$  treten nur bei Systemen mit rheonomen Bindungen auf. Nach erneuter zeitlicher Ableitung ergeben sich die Beschleunigungen

$$\mathbf{a}_i = \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{J}_{Ti} \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \dot{\mathbf{J}}_{Ti} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \dot{\bar{\mathbf{v}}}_i = \mathbf{J}_{Ti}(\mathbf{y}, t) \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \bar{\mathbf{a}}_i(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t) \quad (2.5)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{J}_{Ri} \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \dot{\mathbf{J}}_{Ri} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}}_i = \mathbf{J}_{Ri}(\mathbf{y}, t) \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \bar{\boldsymbol{\alpha}}_i(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t) \quad (2.6)$$

mit den lokalen Beschleunigungsvektoren  $\bar{\mathbf{a}}_i$  und  $\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i$ . Des weiteren lassen sich für die Dynamik eines Systems virtuelle Bewegungen definieren. Diese sind willkürliche, infinitesimale Bewegungen des Systems, welche mit den skleronomen und den rheonomen Bindungen verträglich sind. Für virtuelle Bewegungen an holonomen Bindungen gilt

$$\delta \mathbf{r} \neq \mathbf{0}, \quad (2.7)$$

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{0}, \quad (2.8)$$

$$\delta t = 0. \quad (2.9)$$

Damit lassen sich die virtuellen Bewegungen der einzelnen Körper  $i$  definieren zu

$$\delta \mathbf{r}_i = \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{y}} \cdot \delta \mathbf{y} = \mathbf{J}_{Ti}(\mathbf{y}, t) \cdot \delta \mathbf{y} \quad (2.10)$$

$$\delta \mathbf{s}_i = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial \mathbf{y}} \cdot \delta \mathbf{y} = \mathbf{J}_{Ri}(\mathbf{y}, t) \cdot \delta \mathbf{y}. \quad (2.11)$$

Die Kinetik eines Körpers  $i$  wird durch die Newtonschen- und Eulerschen-Gleichungen beschrieben. Die Newtonschen-Gleichungen eines Körpers  $i$  lassen sich angeben als

$$m_i \mathbf{a}_i(t) = \mathbf{f}_i(t) \quad (2.12)$$

wobei  $m_i$  die Masse des Körpers angibt und  $\mathbf{f}_i(t)$  die Summe der angreifenden Kräfte. Diese lassen sich wiederum einteilen in eingeprägte Kräfte  $\mathbf{f}^e$  und Reaktionskräfte  $\mathbf{f}^r$ . Die Eulerschen Gleichungen lauten

$$\mathbf{I}_i(t) \cdot \boldsymbol{\alpha}_i(t) + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i(t) \cdot \mathbf{I}_i(t) \boldsymbol{\omega}_i(t) = \mathbf{l}_i(t) \quad (2.13)$$

mit dem Trägheitstensor  $\mathbf{I}_i(t)$  und den äußeren Momenten  $\mathbf{l}_i(t)$  bezogen auf den Massenmittelpunkt des Körpers  $i$  im Inertialsystem und dem schiefssymmetrische 3x3-Tensor  $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_i(t)$ . Die äußeren Momenten  $\mathbf{l}_i(t)$  lassen sich äquivalent zum translatorischen Fall wieder in eingeprägte Momente  $\mathbf{l}^e$  und Reaktionsmomente  $\mathbf{l}^r$  aufteilen. Der schiefssymmetrische 3x3-Tensor ist für ein beliebigen Vektor

$$\mathbf{v} = [v_1 \quad v_2 \quad v_3]^T \quad (2.14)$$

definiert als

$$\tilde{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} 0 & -v_3 & v_2 \\ v_3 & 0 & -v_1 \\ -v_2 & v_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Darüber hinaus kann mit den virtuellen Bewegungen aus (2.10) und (2.11) die virtuelle Arbeit  $\delta \mathbf{W}$  definiert werden. Da es, wie in (2.8) definiert, in Richtung der Bindungen keine virtuellen Bewegungen geben kann, ergibt sich für die virtuelle Arbeit der Reaktionskräfte

$$\delta \mathbf{W}^r = \sum_{i=1}^p (\mathbf{f}_i^r \cdot \delta \mathbf{r}_i + \mathbf{l}_i^r \cdot \delta \mathbf{s}_i) = 0. \quad (2.16)$$

Mit den Gleichungen 2.12, 2.13 und der beschriebenen Aufteilung der äußeren Kräfte in eingeprägte Kräfte und Reaktionskräfte, folgt aus (2.17) das d'Alembertsche Prinzip für Mehrkörpersysteme

$$\sum_{i=1}^p [(m_i \mathbf{a}_i - \mathbf{f}_i^e) \cdot \delta \mathbf{r}_i + (\mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\alpha}_i + \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{l}_i^e) \cdot \delta \mathbf{s}_i] = 0. \quad (2.17)$$

Durch einsetzen der virtuellen Bewegungen (2.10) und (2.11) ergibt sich daraus

$$\delta \mathbf{y} \sum_{i=1}^p \left[ \mathbf{J}_{Ti}^T \cdot (m_i \mathbf{a}_i - \mathbf{f}_i^e) + \mathbf{J}_{Ri}^T \cdot (\mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\alpha}_i + \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{l}_i^e) \right] = 0. \quad (2.18)$$

Das Einsetzen der kinematischen Gleichungen (2.3) – (2.6) in ... führt zur Bewegungsgleichung für holonome Mehrkörpersysteme (MKS)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p \left[ \mathbf{J}_{Ti}^T \cdot m_i \cdot \mathbf{J}_{Ti} + \mathbf{J}_{Ri}^T \cdot \mathbf{I}_i \cdot \mathbf{J}_{Ri} \right] \ddot{\mathbf{y}} + \sum_{i=1}^p \left[ \mathbf{J}_{Ti}^T \cdot m_i \cdot \bar{\mathbf{a}}_i + \mathbf{J}_{Ri}^T \cdot \mathbf{I}_i \cdot \bar{\boldsymbol{\alpha}}_i + \mathbf{J}_{Ri}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \cdot \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \right] = \\ \sum_{i=1}^p \left[ \mathbf{J}_{Ti}^T \cdot \mathbf{f}_i^e + \mathbf{J}_{Ri}^T \cdot \mathbf{l}_i^e \right]. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Darin lässt sich die erste Summe zur Massenmatrix  $\mathbf{M}(\mathbf{y}, t)$ , die zweite Summe zum Vektor der verallgemeinerten Zentrifugal- und Corioliskräfte  $\mathbf{k}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t)$  und die dritte Summe zum Vektor der verallgemeinerten Kräfte  $\mathbf{q}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t)$  zusammenfassen, wodurch sich (2.19) schreiben lässt als

$$\mathbf{M}(\mathbf{y}, t) \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{k}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t) = \mathbf{q}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, t). \quad (2.20)$$

### 2.1.2 Berechnung der Getriebedynamik

Mit der allgemeinen Bewegungsgleichung für MKS (2.20) kann die Getriebedynamik berechnet werden. Das in dieser Arbeit betrachtete Getriebe besteht im wesentlichen aus vier hintereinander liegenden Umlaufgetrieben. Der schematische Aufbau eines Umlaufgetriebes ist in Abbildung ??? zu sehen. Dieses besteht aus dem Sonnenrad in der Mitte, den darum gleichmäßig verteilten Planetenrädern, welche auf dem Planetenträger drehbar gelagert sind und dem Hohlrad. Der Zusammenhang der einzelnen Drehzahlen ist gegeben durch die beiden Zwangsbedingungen

$$\text{Sonne} - \text{Planeten} : \quad r_S \omega_S - r_T \omega_T - r_P \omega_P = 0 \quad (2.21)$$

$$\text{Planeten} - \text{Hohlrad} : \quad r_H \omega_H - r_T \omega_T - r_P \omega_P = 0. \quad (2.22)$$

### 2.1.3 Erweiterung um elastische Seitenwellen

## 2.2 Modellierung der Reibung an Kupplungen und Bremsen



# Kapitel 3

## Sensitivitätsanalyse

Der Hauptteil kann aus mehreren Kapiteln bestehen. Hier soll auf die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Arbeit eingegangen werden. Dabei ist auf eine schlüssige und klare Strukturierung zu achten, die den roten Faden der Arbeit verdeutlicht.

Kurzer einleitender Text nach jedem Kapitelbeginn und vor Beginn der **sections**. Es stehen also nie zwei Überschriften direkt hintereinander. An dieser Stelle soll dem Leser ein Überblick über das folgende Kapitel gegeben werden.

Hier habe ich etwas geändert

### 3.1 Erstes Unterkapitel

Dies wurde bereits von Fliess et al. im Jahre 1995 gezeigt [**Fliess.1995**].

Mit `biblatex`-Befehlen: Dies wurde bereits von **Fliess.1995** im Jahre **Fliess.1995** gezeigt [**Fliess.1995**]. |

Das Logo des Instituts ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

### 3.2 Zweites Unterkapitel

#### 3.2.1 Neuer Abschnitt

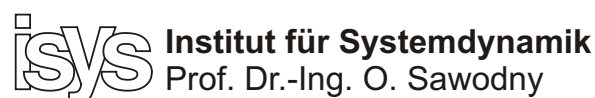


Abbildung 3.1: Put figure captions *below* the figure.

Tabelle 3.1: Put table captions *above* the table. Put units in header. Avoid vertical lines in a table.

Header	Header (unit)	Header (unit/frac)
Content 1	Content 2	Content 3
Content 1	Content 2	Content 3



# Kapitel 4

## Beobachterentwurf

Der Hauptteil kann aus mehreren Kapiteln bestehen. Hier soll auf die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Arbeit eingegangen werden. Dabei ist auf eine schlüssige und klare Strukturierung zu achten, die den roten Faden der Arbeit verdeutlicht.

Kurzer einleitender Text nach jedem Kapitelbeginn und vor Beginn der **sections**. Es stehen also nie zwei Überschriften direkt hintereinander. An dieser Stelle soll dem Leser ein Überblick über das folgende Kapitel gegeben werden.

Hier habe ich etwas geändert

### 4.1 Erstes Unterkapitel

Dies wurde bereits von Fliess et al. im Jahre 1995 gezeigt [**Fliess.1995**].

Mit `biblatex`-Befehlen: Dies wurde bereits von **Fliess.1995** im Jahre **Fliess.1995** gezeigt [**Fliess.1995**]. |

Das Logo des Instituts ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

### 4.2 Zweites Unterkapitel

#### 4.2.1 Neuer Abschnitt

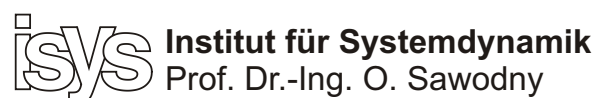


Abbildung 4.1: Put figure captions *below* the figure.

Tabelle 4.1: Put table captions *above* the table. Put units in header. Avoid vertical lines in a table.

Header	Header (unit)	Header (unit/frac)
Content 1	Content 2	Content 3
Content 1	Content 2	Content 3

## Kapitel 5

# Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick werden hier beschrieben.



# Anhang A

## Anhang

Im Anhang werden Ergebnisse aufgeführt, die zwar im Kontext der Arbeit wesentlich, jedoch nicht für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Beispielsweise sind dies detailliertere Messergebnisse, Herleitungen oder Datenblätter.



# Abbildungsverzeichnis

3.1	Put figure captions <i>below</i> the figure. . . . .	15
4.1	Put figure captions <i>below</i> the figure. . . . .	17





# Tabellenverzeichnis

3.1	Put table captions <i>above</i> the table. Put units in header. Avoid vertical lines in a table. . . . .	16
4.1	Put table captions <i>above</i> the table. Put units in header. Avoid vertical lines in a table. . . . .	18



## **Erklärung des Autors**

der Diplomarbeit mit dem Titel

### **Schätzverfahren für adaptive Regelung von Hybridgetrieben**

Hiermit versichere ich,

1. dass ich meine Arbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit den entsprechend gekennzeichneten Anteil der Arbeit selbständig verfasst habe,
2. dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe,
3. dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist,
4. dass ich die Arbeit weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht habe und
5. dass das elektronische Exemplar mit den anderen Exemplaren übereinstimmt.

Stuttgart, den 30.09.2018

Koray Karci