



## Interdisziplinäres Teamprojekt

# Parameterschätzung und Entwurf einer Modellprädiktiven Regelung eines autonomen Modellfahrzeuges

von

Hannes Heinemann  
Matrikelnummer: 184102

André Pieper  
Matrikelnummer: 184960

20. Februar 2015

Betreuer:

M. Sc. Juan Pablo Zometa \*

M. Sc. Michael Maiworm \*

## Kurzdarstellung

In diesem Bericht werden Werkzeuge und Verfahren aufgezeigt, um ein autonomes Modellauto im Maßstab 1:10 einer Fahrspur folgen und eine voreingestellte Distanz fahren zu lassen. Diese Arbeit wurde unter der Berücksichtigung der Teilnahme an dem internationalen studentischen Wettbewerbs Carolo-Cup [2], ausgetragen von der Technischen Universität Braunschweig, entworfen. Das studentische Teamprojekt der OvGU, welches am Carolo-Cup teilnimmt, fährt unter dem Namen oTTocar, an dem Studenten verschiedenster Fachrichtungen mitwirken. Die Betreuung und Zusammenarbeit erfolgt dabei durch die Fakultäten für Informatik, für Elektrotechnik und Informationstechnik und für Maschinenbau. Die Vorbereitung dieser Arbeit ist maßgeblich an das Teamprojekt [9] von Viktoria Wiedmeyer und Andreas Himmel geknüpft, auf das sich das verwendete Modell hauptsächlich bezieht.

---

\*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Institut für Automatisierungstechnik - IFAT, Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Parameterschätzung</b>	<b>3</b>
2.1	Messbare Parametern . . . . .	3
2.2	Bestimmung von Parametern mithilfe von Schätzverfahren . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Modellprädiktive Regelung</b>	<b>7</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>A</b>	<b>Zeugs</b>	<b>8</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>9</b>

## Tabellenverzeichnis

1	Direkt bestimmbare Parameter . . . . .	4
2	Ergebnisse der geschätzten Parameter. . . . .	7

## Abbildungsverzeichnis

1	Messng der Relation PWM-Stufe Servo zu Einschlagswinkel Räder . . . . .	4
---	---	---

## 1 Einleitung

Im Zuge der „digitalen Revolution“ (Fußnote), die durch das mooresche Gesetz(Fußnote) beschrieben wird und durch die fortschreitende Miniaturisierung, können immer komplexere und vielseitigere Aufgaben von Kleinstrechnern bearbeitet werden. Diese ermöglichen es uns eine Logik und Kombinatorik in kleinen, mobilen Geräten aufzubauen, die Menschen in ihrem Verhalten ähnelt und sie im Alltäglichen Verwendung findet. Dies können wir wiederum nutzen, um unsere Aufgaben auf die Maschinen zu verteilen und den Menschen zu entlasten. Eine Aufgabe ist dabei das Führen eines Fahrzeuges ohne menschliche Eingabe. Das autonome Fahren ist hierbei keine Fiktion mehr, wie in Film wie iRobot (Fußnote), oder Demolition Man(Fußnote) suggeriert wird, sondern der Prozess ist schon soweit fortgeschritten, dass er in unserer Gesellschaft angekommen ist. Dafür spricht zum einen, dass schon die ersten autonome Fahrzeuge des „EUREKA-PROMETHEUS-Projekts“ (Fußnote) vor gut 20 Jahren weit mehr als 1758 Km auf öffentlichen Straßen zurück gelegt haben. Und zum anderen, dass in den USA und Europa erste autonome Fahrzeuge für den Straßenverkehr zugelassen(Fußnote-das mit Nevada und der A9) und neue Gesetze dafür entworfen werden(Fußnote-das mit Dobrindt). Somit stellt sich nur noch die Frage, wann der Straßenverkehr auf autonome Fahrzeuge umgestellt und wie es am Ende realisiert wird.

Vor diesem Hintergrund findet der Carolo-Cup in Braunschweig seit nun mehr acht Jahren statt, welcher studentische Teams aller Fachrichtungen und Universitäten in einem Wettbewerb gegeneinander antreten lässt, um das beste Konzept und die beste Umsetzung eines autonomen Fahrzeuges zu präsentieren. Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg beteiligt sich ebenfalls an diesem Wettbewerb mit dem Projekt „oTToCAR“. Die einzelnen Disziplinen sind Einpark-, Spurverfolgungs- und Fahrspurwechselszenarien, wofür neben der Hardware- und Software-Entwicklung auch ein Regelungskonzept entwickelt werden muss. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer modellbasierenden Regelung für alle Szenarien und das dafür benötigte Modell mit der nötigen Parameterschätzung. In einer vorangegangenen Arbeit [9] wurde bereits ein Modell entwickelt, deren Parameter jedoch aufgrund eines fehlenden realen Fahrzeuges nie bestimmt werden konnten. Die jetzige Arbeit ist zeitlich später einzuordnen, in der ein fertiger Prototyp bereits zur Verfügung stand und die Parameterschätzung vollendet werden konnte.

## 2 Parameterschätzung

Um die unbekannten Parameter eines Modells schätzen zu können, wird zunächst ein valides Modell und einen Experimentierstand benötigt. Das Modell wird dem Bericht oTToCAR [9, Seite 12] entnommen, welches dort auch schon auf seine grundlegende physikalische Korrektheit mit Simulationen überprüft wurde. Das gegebene Modell besitzt dabei zwei Arten von Parametern. Zum einen sind es direkt bestimmbare Parameter, zum anderen sind es Parameter die nur durch modellbasierte Schätzverfahren ermittelt werden können. Um die Simulation mit dem realen Fahrzeug in seinem Verhalten vergleichen zu können, werden dabei Messungen von allen Zuständen benötigt. Da diese Experimente jedoch nicht immer einfach zu realisieren sind und um den technischen Aufwand der Messungen so gering wie möglich zu halten, sollten die zu messenden Zustände beschränkt und so gewählt werden, dass:

- sie charakteristisch für das Verhalten sind
- durch sie andere Zustände bestimmt werden können
- die wichtigsten Regelgrößen auch direkt gemessen werden

### 2.1 Messbare Parametern

Die direkte Bestimmung von Parametern erfolgt weitgehend durch die Messung der selbigen, oder deren Berechnung durch weiteren messbaren Größen. Im Falle der Eingangsgröße  $u_1$ , dem Einschlagswinkel der Räder, musste zum Beispiel das Ansteuerungssignal des Servomotors in einen Winkel für die Räder umgerechnet werden. Das Ansteuerungssignal ist hierbei ein 256-stufiges PWM-Signal, welches in eine Winkelangabe umgerechnet werden muss. Für die Versuchsanordnung wurde das Fahrzeug zuerst so erhöht, dass die Räder nicht mehr auf dem Boden auflagen. Diese Vorgehensweise war nötig, da bei Kontakt der Räder mit dem Boden bei einem stehenden Fahrzeug der Haftwiderstand so hoch ist, dass sich eine kleinere Winkeländerung ergeben und die Messung verfälschen würde. Denn bei schneller Fahrt verringert sich dieser Widerstand auf nahezu

Null und kann vernachlässigt werden. Für die Messung wurde längs an das linke Vorderrad eine Verlängerung befestigt und für jede Servoeinstellung eine Winkelauslenkung gemessen und die Kalibrierung des Servomotors vorgenommen.

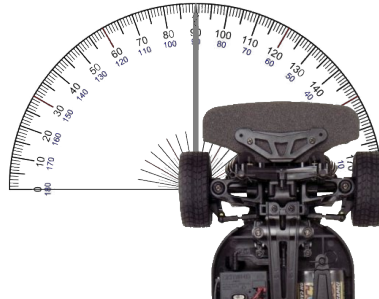


Abbildung 1: Messung der Relation PWM-Stufe Servo zu Einschlagswinkel Räder (aus [3] und [1])

Als Ergebnis dieses Experimentes kam heraus, dass die Erhöhung um eine PWM-Stufe des Servomotors konstant eine Drehung der Räder um  $0.0028 \text{ rad}$  entspricht. In der Tabelle ?? aufgeführten Größen wurden hingegen direkt am oTToCAR gemessen, bzw. das Trägheitsmoment aus einem CAD-Modell [8] berechnet.

Physikalische Größe	Exakter Wert	Einheit
Dichte der Luft	$\rho_L = 1,204$	$[\text{kg s}^{-1}]$
Erdbeschleunigung	$g = 9,806$	$[\text{m s}^{-2}]$
Masse	$m = 2,8$	$[\text{kg}]$
Radabstand	$l = 0,257$	$[\text{m}]$
Radius des Rades	$r = 0,0335$	$[\text{m}]$
Übersetzungsfaktor Drehzahl Motor $\rightarrow$ Räder	$\varepsilon = 5,52$	$[-]$

Tabelle 1: Direkt bestimmbare Parameter

## 2.2 Bestimmung von Parametern mithilfe von Schätzverfahren

Die verbliebenen zu ermittelnden Parameter erfordern weit umfangreichere Messungen, wie zum Beispiel die Parameter für den Rollwiderstand und die Schräglauflübersetzung der Räder, die sich auch nicht direkt messen lassen. Für die Suche nach geeigneten Parametersätzen wird dabei ein Schätzverfahren benötigt, das anhand von anderen direkt messbaren Größen, die von den gesuchten Parametern abhängig sind, die zu bestimmenden Parameter indirekt ermitteln kann.

### 2.2.1 Positionsbestimmung mittels Kamera

Die wohl charakteristischsten Messgrößen des Fahrzeuges sind seine Position und Geschwindigkeit. Anhand der gegebenen Zustandsgleichungen und aus logischen Überlegungen erkennt man eine starke Abhängigkeit zu allen gesuchten Parametern. Die Geschwindigkeitsmessung wird dabei intern vom Fahrzeug bereit gestellt. Sie wird ähnlich realisiert, wie die an einem Fahrrad. Durch auf den Rädern befestigte Neodymmagneten wird ein Magnetfeld aufgebaut, das durch Hall-Sensoren gemessen werden kann. Das Magnetfeld am Hall-Sensor ändert sich, sobald die Räder anfangen zu rotieren. Die Änderung des Magnetfeldes über die Zeit kann direkt in eine Geschwindigkeit umgerechnet werden. Eine Erhöhung der Anzahl von Magneten ermöglicht dabei eine beliebig hohe Auflösung der Geschwindigkeitsmessung.

(Bild)

Für die Positionsbestimmung wurde ein Testfeld gebaut und das Tracking mittels Kamera durchgeführt. Die technischen Anforderungen an das Tracking sind dabei ein ausreichend großes Testfeld, sowie eine geeignete Kamera zu wählen. Bei der Wahl der Kamera muss auf verschiedene Anforderungen Rücksicht genommen werden, die vor einer Beschaffung klar definiert werden müssen. In dem Fall eines sich schnell bewegenden Fahrzeuges ist die Bilderanzahl pro Sekunde sehr hoch zu gewichten, um Bewegungsunschärfe und fehlende Bewegungen zwischen zwei Bildern zu minimieren, welche die Messungen verfälschen können. Desweiteren spielt die Auflösung für Positionsgenauigkeit und die Schnittstellen der Kamera für hohe Datenraten eine große Rolle.

(Skizze vom Aufbau)

Nach dem Aufbau des Parcours und der Installation der Kamera, muss die Kamera kalibriert werden. Die Kalibrierung ist notwendig, um die Symmetrien, die durch den „Fischaugeneffekt“ der Linse und der perspektivischen Verzerrung entstehen, wieder herzustellen. Ein gängiges Verfahren zur Beseitigung der Linsenkrümmung und der perspektivischen Verzerrung ist die Kalibrierung mittels Schachbrettmuster. Die Beseitigung des Effektes der Linsenkrümmung wird mittels einer Vorwärtstransformation der Pixel des entkrümmten Bildes in das gekrümmte realisiert [10]. Der Algorithmus dahinter funktioniert folgendermaßen:

1. Generierung der Kamera-Matrix  $K$ , oder auch Matrix der intrinsischen Parameter mithilfe der „Camera Calibration Toolbox for Matlab“ [5]. Dabei charakterisieren die Einträge  $f_x, f_y$  die Brennweite und  $c_x, c_y$  bilden den Mittelpunkt der Linse auf dem Kamerabild.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Normierung der verzerrten Pixelkoordinaten (Koordinate  $z'$  entfällt):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} n_{h,1} & n_{h,1} & \dots & n_{h,1} & n_{h,1} & n_{h,2} & \dots & n_{h,2} & \dots & n_{h,i} \\ n_{b,1} & n_{b,2} & \dots & n_{b,j-1} & n_{b,j} & n_{b,1} & \dots & n_{b,j} & \dots & n_{b,j} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

mit

$n_h = 1, 2, 3, \dots$ , Höhe der Kameraauflösung

$n_b = 1, 2, 3, \dots$ , Breite der Kameraauflösung

3. Anwendung eines nichtlinearen Modells für die radiale Linsenkrümmung, um die verzerrten Koordinaten abzubilden. Dabei stammen die Parameter  $k_1, k_2$  (Koeffizienten der radialen Verzerrung) und  $p_1, p_2$  (Koeffizienten der tangentialen Verzerrung) ebenfalls aus Schritt 1 und wurden mit [5] berechnet.

$$x'' = x' \cdot (1 + k_1 \cdot r + k_2 \cdot r^2) + 2p_1 \cdot x'y' + p_2 \cdot (r + 2x'^2)$$

$$y'' = y' \cdot (1 + k_1 \cdot r + k_2 \cdot r^2) + 2p_2 \cdot x'y' + p_1 \cdot (r + 2y'^2)$$

mit

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

4. Anschließend werden Projektionen erstellt, mithilfe dieser durch lineare Interpolation ein entzerrtes Bild

erstellt werden kann.

$$\begin{aligned} u &= f_x \cdot x'' + c_x \\ v &= f_y \cdot y'' + c_y \end{aligned}$$

Anschließend wird die perspektivische Ansicht in eine orthogonale Draufsicht projiziert. Dafür müssen die Ecken eines Rechtecks, bzw. die Ecken des Parcours (falls alle Winkel rechteckig) auf dem Bild markiert und eine homographische Matrix gebildet werden, damit ein sogenannter „Top View“ des Bildes erstellt werden kann. Diese Vorgehensweise ist bekannt unter dem Namen „Inverse Perspective Mapping“ ([7] und [6]):

1. Generierung der extrinsischen Matrix  $T_{ext}$  mithilfe von [5]. Die Einträge stehen hierbei für die Translation in die entsprechende Richtung.

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

2. Ermittlung der Eckpunkte  $P_1, P_2, P_3$  in Pixelkoordinaten und  $P_4$  des Rechtecks/Parcours und der Seitenlängen in Pixeln oder Meter.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad P_n = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d(P_1 \rightarrow P_2) & d(P_3 \rightarrow P_4) \\ 0 & d(P_2 \rightarrow P_3) & d(P_4 \rightarrow P_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Rotation und Translation der Bildpunkte relativ zur Kameraposition mit anschließender Normierung und der Projektion in die Zielkoordinaten

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{rt} = R \cdot L + T * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{Target} = K \cdot X_{rt}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \\ X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \\ X_{rt|3,1} & \dots & X_{rt|3,4} \end{bmatrix}$$

4. Mit der gewonnenen Projektion  $X_{Target}$  lassen sich mit MATLAB unter der Verwendung von der Funktion *homography2d* [6], *maketform* und *imtransform* [4] das Bild im Anschluss perspektivisch entzerren.

(Workflow)

(Bilder vom Parcours vor der Entzerrung und danach und parallel dazu die Formeln für AntiKrümmung und AntiPerspektive, Programmlaufplan der Entzerrung + Tracking)

### 2.2.2 Synchronisierung interner und externen Messdaten

Nach der Aufnahme der externen und internen Messwerte, müssen diese für den ODE-Solver aufbereitet werden. Die Aufnahme der Messungen erfolgt dabei durch ein mächtiges Framework names ROS (Robot Operating

System), welches alle Messungen über einen Server koordiniert und den Zeitpunkte einer jeder Messung protokolliert. Da die externen Positionsdaten der Kamera einen Takt von 50 Hz und die internen der Geschwindigkeitsmessungen einen Takt von 100 Hz haben, sind diese nicht koexistent. Um diese Daten miteinander zu synchronisieren wurde die Methode der linearen Approximation gewählt, um zu jedem Zeitpunkt Messdaten vorrätig zu haben. Dies ermöglicht einen unkomplizierten Umgang der Daten in einem ODE-Solver.

(Formel)

### 2.2.3 Anwendung der Schätzverfahren

Die zur Schätzung benötigten Messwerte ...Die Benutzung von Schätzverfahren erfolgt mithilfe von zwei Optimierungsverfahren, inklusive einer für beide Verfahren einheitliche Kostenfunktion, zur redundanten Validierung eines gefundenen Satz von Parametern.

### 2.2.4 Ergebnisse

In der Anwendung der Schätzverfahren revidierten sich einige der Annahmen aus [9] und es mussten teilweise neue getroffen werden, um bessere Ergebnisse zu erreichen. Zum Beispiel wurde die Annahme getroffen, dass die Schräglauübersetzung  $C_\alpha$  von Vorder- und Hinterräder gleich ist. Jedoch ergaben sich bei einer Trennung der Schräglauübersetzung von Vorder- und Hinterräder eindeutig bessere Ergebnisse. Zudem musste ein weiterer Parameter  $\eta_M$  eingeführt werden, um den Wirkungsgrad des Drehmomentes zu beschreiben, welches vom Motor erzeugt auf die Räder geleitet wird. Somit ergaben sich folgende Parameter, die das Modell mit einer ausreichenden Genauigkeit beschreiben:

Physikalische Größe	Exakter Wert	Einheit
Kraftverteilung Vorder- zu Hinterrad	$\gamma = 0,5$	[-]
Reibungskoeffizient	$f_R = 1,857$	[-]
Schräglauübersetzung hinten	$C_{h,\alpha} = 0,93$	[-]
Schräglauübersetzung vorn	$C_{v,\alpha} = 1,1$	[-]
Wirkungsgrad Drehmoment Motor $\rightarrow$ Räder	$\eta_M = 0,55$	[-]
Zeitl. Verzögerung von $u_1$	$T_V = 0,1$	[s]

Tabelle 2: Ergebnisse der geschätzten Parameter.

(Bild Ergebnis Realität zu Simulation mit geschätzten Parametern, Aussage „ausreichend“ definieren - sprich das Modell kann dem realen System für 2 Meter exakt auf ... Metern folgen, dass reicht aus um die MPC für einen Zeithorizont von ... Sekunden bei der Geschwindigkeit von ... M/s zu auszulegen. Da wir auch nicht mehr von der Wahrnehmung erhalten, ergibt sich eine korrekte Vorhersage)

## 3 Modellprädiktive Regelung

Das hier muss Hannes bearbeiten.

## Literatur

- [1] Winkelmesser. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Protractor\\_Rapporteur\\_Degree\\_V1.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Protractor_Rapporteur_Degree_V1.jpg). Version: Juni 2010
- [2] Carolo-Cup Regelwerk 2015. Version: Juni 2014. <https://wiki.ifr.ing.tu-bs.de/carolocup/system/files/Hauptwettbewerb2015.pdf>. – Homepage Carolo-Cup: [www.carolo-cup.de](http://www.carolo-cup.de)

- 
- [3] Tamiya TT-01 Type-E (TT-01E) Chassis. <http://www.rcscrapyard.net/de/tamiya-tt-01-type-e.htm>. Version: Februar 2015
  - [4] EDDINS, S.: Spatial transformations: Defining and applying custom transforms / MathWorks. Version: August 2006. <http://blogs.mathworks.com/steve/2006/08/04/spatial-transformations-defining-and-applying-custom-transforms/>. 2006. – Forschungsbericht
  - [5] JEAN-YVES BOUGUET: Camera Calibration Toolbox for Matlab. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html). Version: Oktober 2004
  - [6] P. KOVESI: MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing. (2005), Februar. <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>
  - [7] S. TUOHY AND D.O’CUALAIN AND E. JONES AND M.GLAVIN: Distance Determination for an Automobile Environment using Inverse Perspective Mapping in OpenCV. In: ISSC (2010), June. <http://www.shanetuohy.com/fyp/Images/issc.pdf>
  - [8] T. ROSE, M. TRESELER: Entwicklung einer Karosserie für das oTToCar. (2014), November
  - [9] V. WIEDMEIER AND A. HIMMEL: oTToCAR, Interdisziplinäres Teamprojekt. (2013), November
  - [10] ZHENGYOU ZHANG: A Flexible New Technique for Camera Calibration / Microsoft Research, Microsoft Corporation. Version: Dezember 1998. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf>. 1998. – Forschungsbericht

## A Zeugs

Anhang.



## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich,

.....  
(Name, Vorname) (Matrikel-Nr.)

dass ich die vorliegende Projektarbeit mit dem Thema:

.....  
.....  
.....

selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Alle verwendeten Hilfsmittel und Quellen sind im Literaturverzeichnis vollständig aufgeführt und die aus den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift