

# Entwicklung und Test einer eingebetteten Elektronik für einen innovativen Schaltaktor

Malte Breitenbach, Johannes Faupel, Jonas Tautz, Johanna Vetter



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Mechatronische Systeme im  
Maschinenbau  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht



---

# Zusammenfassung

Hier könnte Ihr Abstract stehen.



---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                           | <b>5</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .                        | 5         |
| 1.2      | Ziele der Arbeit . . . . .                  | 5         |
| 1.3      | Anforderungsliste . . . . .                 | 5         |
| <b>2</b> | <b>Aufbau des Prüfstands und Grundlagen</b> | <b>7</b>  |
| 2.1      | Grundlagen des Prüfstandes . . . . .        | 7         |
| 2.1.1    | Getriebe allgemein . . . . .                | 7         |
| 2.1.2    | Getriebe des Prüfstands . . . . .           | 8         |
| 2.1.3    | Aktor . . . . .                             | 8         |
| 2.1.4    | Aktoransteuerung . . . . .                  | 9         |
| 2.1.5    | Autobox . . . . .                           | 9         |
| 2.1.6    | Positionsmessung und -regelung . . . . .    | 9         |
| 2.2      | Grundlagen Löten . . . . .                  | 10        |
| 2.3      | Mikrocontroller . . . . .                   | 10        |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                | <b>13</b> |



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

## 1.2 Ziele der Arbeit

Auch das Institut für Mechatronische Systeme (IMS) der TU Darmstadt nimmt sich dieser Aufgabe an und arbeitet im Rahmen des Projektes Speed4E, dass einen elektrifizierten Antriebsstrang mit Peak-Antriebsdrehzahlen von bis zu  $50.000/min$  zum Ziel hat, an einem innovativem Schaltaktor. Im Verlauf vorheriger Arbeiten wurde bereits ein Tauchspulenaktor ausgelegt sowie eine Elektronik für ihn entwickelt. Das Ziel dieser Arbeit ist es nun, die bisherigen Funktionen auf einen Mikrocontroller zu implementieren sowie eine eingebettete Elektronik zu entwerfen, die den Aktor zu einem Smart Actuator transformiert. Des Weiteren sollen Sicherheits- und Überwachungsfunktionen für den Aktor entwickelt werden und Statusmeldungen per CAN gesendet werden.

## 1.3 Anforderungsliste

Um das übergeordnete Ziel weiter zu spezifizieren wurde zunächst eine Anforderungsliste erstellt. In dieser sind alle Forderungen an das Endprodukt gesammelt, sie dient damit als Basis und Referenz für die Produktentwicklung. Die Liste ist hierbei dynamisch, das heißt sie kann im Verlauf des Entwicklungsprozesses verändert oder ergänzt werden. Die formulierten Anforderungen werden schließlich noch nach Priorität kategorisiert und einer der vier folgenden Anforderungsarten (Quelle: Pahl (2004): Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung S. 189.) zugeteilt: Festforderungen (FF) sind unter allen Umständen einzuhalten. Eine Erfüllung ist für eine erfolgreiche Lösung notwendig. Bereichsforderungen (BF) geben einen Toleranzbereich an, innerhalb dessen sich der schlussendlich erreichte Wert befinden muss. Zielforderungen (ZF) geben an, welcher Wert (auch im Hinblick auf spätere Entwicklungen) angestrebt wird. Wünsche (W) sollten nach Möglichkeit erfüllt werden, sind aber keine Voraussetzung.

| Relevanz | Anforderung   | Erläuterung  |
|----------|---|--|
| FF       | Benutzerfreundliche Kommunikation durch CAN Schnittstelle | Empfang von Befehlen, Senden von Statusmeldungen                                       |
| FF       | Nichtflüchtige Kalibrierung                               | Eine Kalibrierung ist nur einmalig und zur Rekalibrierung notwendig                    |
| BF       | Schaltzeit  | < 100 ms (Latenz zwischen Senden des Befehls und vollständig ausgeführtem Gangwechsel) |
| FF       | Selbstständige Fehlererkennung                            | Überstrom, Temperatur, Eingangsspannung (OVP/UVP), Dekalibrierung                      |
| FF       | Schnittstellen  | CAN, 8-12VDC Versorgung (max XA), Programmierschnittstelle (für Updates & Bugfixes)    |
| W        | Wartbarkeit   | Sicherung wechseln im eingebauten Zustand  |

**Tabelle 1.1:** Anforderungsliste





---

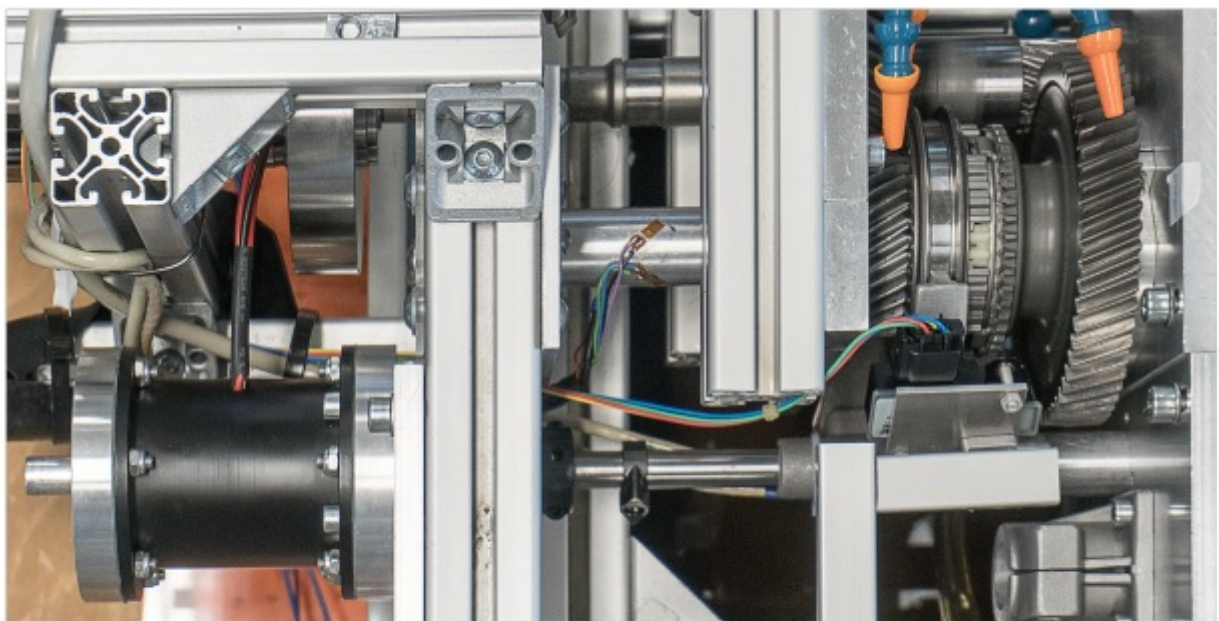
## 2 Aufbau des Prüfstands und Grundlagen

---

### 2.1 Grundlagen des Prüfstandes

---

In diesem Kapitel wird der verwendete Schaltaktorikprüfstand des IMS vorgestellt, an dem die Entwicklung des Smart Actuators stattgefunden hat. Die Konstruktion des Prüfstandes erfolgte in vorangegangenen Arbeiten und wurde seitdem stetig weiterentwickelt. An ihm werden Schaltaktoriksysteme für Fahrzeugantriebe untersucht. Abbildung 2.1 zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Subsysteme des Prüfstandes. Im Folgenden erfolgt zunächst die Vorstellung des mechanischen Aufbaus, woraufhin der elektronische Aufbau anschließt.



**Abbildung 2.1:** Prüfstand

---

#### 2.1.1 Getriebe allgemein

---

Ein Getriebe ist im Automobil dafür zuständig, die Drehzahl des Motors in ein Drehmoment umzuwandeln, welches die Räder antreibt. Da Motoren nur einen kleinen Bereich von Motordrehzahlen abdecken werden mehrstufige Getriebe verwendet, die verschiedene Raddrehzahlen durch unterschiedliche Übersetzungsverhältnisse bereitstellen können. Das Einstellen des jeweiligen Ganges kann dabei per Hand (Handschatgetriebe) oder automatisiert über einen Aktor (Schaltaktorik) erfolgen. Im Fahrzeuggetriebe, beispielhaft dargestellt in 2.2 ist die Eingangswelle, welche durch den Motor angetrieben wird, über eine Zahnradverbindung fest mit der Vorgelegewelle verbunden. Auf ihr sind noch weitere fest fixierte Zahnräder angebracht, deren Anzahl mit den verfügbaren Gängen übereinstimmt. Diese greifen jeweils in Losräder auf der Abtriebswelle. Um einen bestimmten Gang einzulegen muss nun das jeweilige Losrad für den Moment fest mit der Abtriebswelle verbunden werden, sodass nur diese Zahnverbindung ein Drehmoment überträgt. Dies geschieht über eine formschlüssige Verbindung mit einer Schaltmuffe, die über die durch den Aktor angetriebene Schaltgabel in Position gebracht wird.



Abbildung 2.2: Fahrzeuggetriebe

### 2.1.2 Getriebe des Prüfstands

Der Prüfstand besitzt zwei Gänge, in die über eine Schaltgabel geschaltet werden kann. Eine Bewegung der Schaltgabel nach links legt Gang 1 über eine mechanische Synchronisierung ein, während mit Hilfe einer Bewegung nach rechts die Schaltung des Ganges 2 durch eine Klauenkupplung erfolgt. Somit können sowohl Schaltaktoriksysteme mit als auch ohne Synchronring untersucht werden. Die Bewegung der Schaltgabel wird durch einen Linearaktor ermöglicht, welcher von außen an das Item-Profil verschraubt ist. In diesem ist eine Tauchspule verbaut, die die benötigten Kräfte auf die Läuferstange aufbringt. Über eine starre Wellenkupplung sind Läuferstange und Schaltgabel miteinander verbunden, wodurch die Kräfte auf die Schaltgabel übertragen werden und Schaltvorgänge ermöglicht werden.

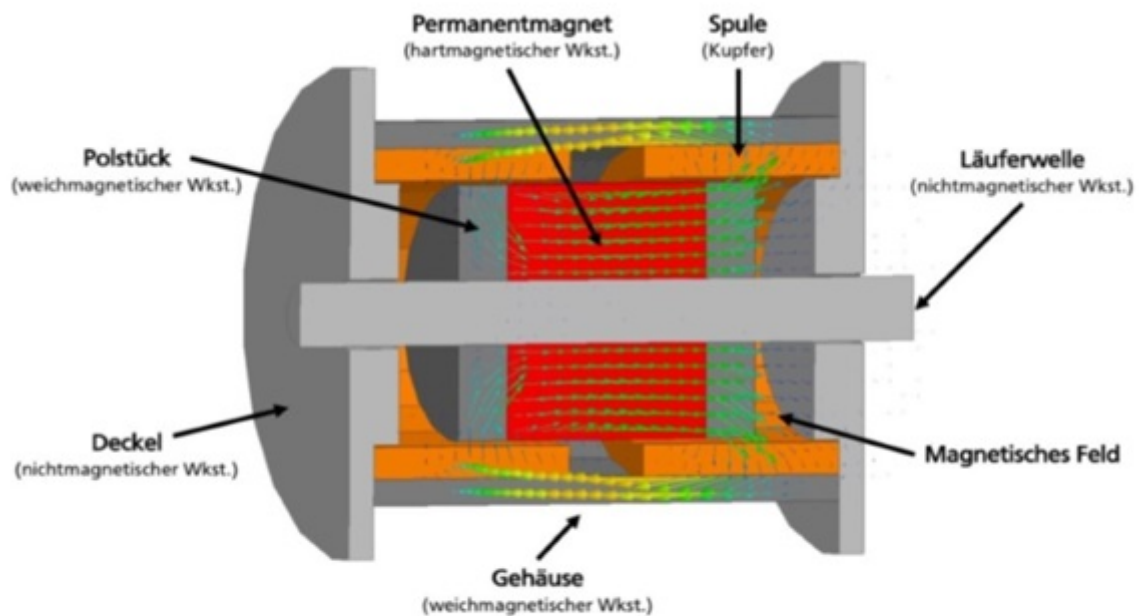
### 2.1.3 Aktor

Der in dem Prüfstand verbaute Tauchspulenaktor wurde von Oliver Hahn im Rahmen seiner Bachelorthesis entwickelt und konstruiert. Er übernimmt die Aufgabe, die Schaltgabel über die Schaltstange translatorisch zu verschieben. Sein Querschnitt ist in folgender Abbildung schematisch dargestellt.

Sein Aufbau ist zylindrisch und kann in den ortsfesten Stator und den beweglichen Läufer unterteilt werden. Der Stator des Aktors besteht aus zwei in Reihe geschalteten Kupferspulen, welche fest in dem Gehäuse aus Weicheisen liegen und nach oben und unten mit Deckeln aus Aluminium fixiert werden. Der Läufer besteht aus einer nichtmagnetischen Läuferwelle, auf der sich fünf Permanentmagneten aus Neodym-Eisen-Bor befinden, welche mit Hilfe von zwei Polstücken aus Weicheisen axial auf der Läuferstange montiert sind. Werden nun die Kupferspulen von Strom durchflossen, so wirkt eine vom Magnetfeld der Permanentmagneten induzierte Lorentzkraft orthogonal auf sie. Diese Kraft ist abhängig von der Stromstärke  $I$ , der magnetischen Flussdichte der Permanentmagneten  $B$  und der vom Magnetfeld durchsetzten Leiterlänge  $l$ :

$$F = I * l * B$$

Da die Spulen jedoch fest im Gehäuse verbaut sind, wirkt eine entgegengerichtete Kraft auf die Permanentmagneten, die auf der axial verschiebbaren Läuferwelle lagern. Diese Kraft bewirkt dann eine translatorische Bewegung der Welle und somit auch der Schaltgabel. Die Richtung der translatorischen Bewegung kann dabei über die Richtung des in den Spulen fließenden Stromes, der Betrag der Kraft über den Betrag des Stromes eingestellt werden. Anhand von Abbildung



**Abbildung 2.3:** Querschnitt Tauchspulenaktor

2.4 ist zu erkennen, dass die Kraft-Weg Kennlinien des Aktor innerhalb des Nutzungsbereichs von -10 Millimeter bis +10 Millimeter bei verschiedenen Stromstärken annähernd linear verlaufen.

#### 2.1.4 Aktoransteuerung

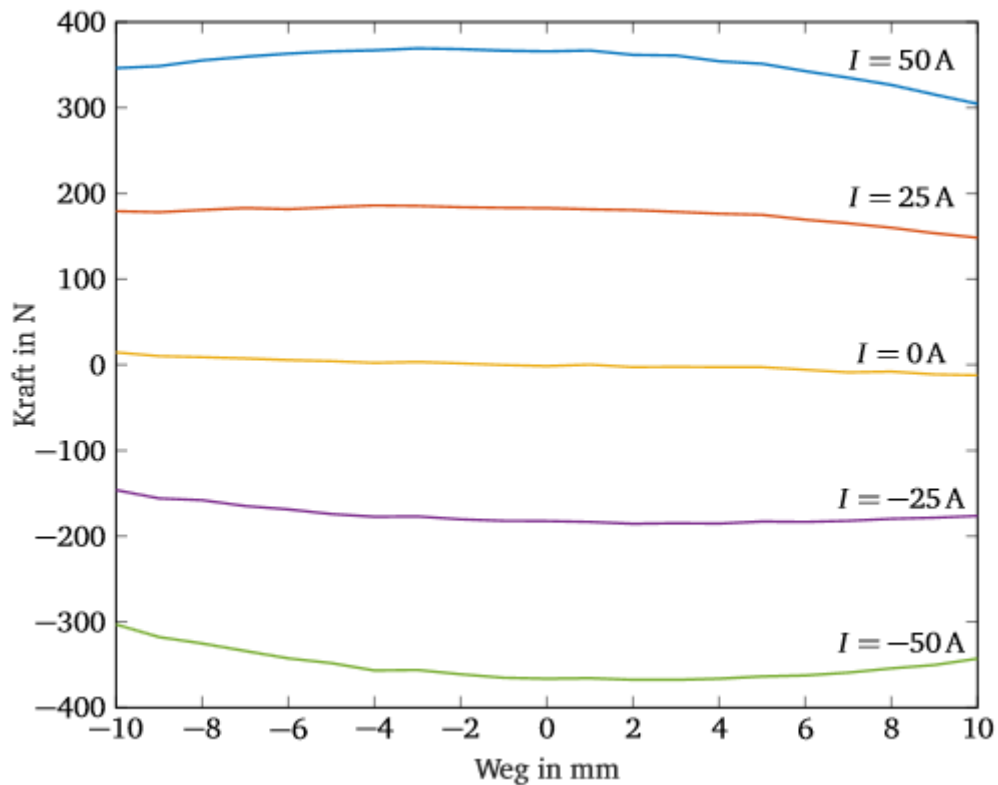
Zur Aktoransteuerung wird ein Arduino IBT2 Motortreiber verwendet, die Stromversorgung erfolgt über ein Manson SBC-2130 Battery Charger im Power Supply Mode. Der Motortreiber besteht aus zwei BTS7960 MOSFETs, die je nach Vorgabe des pulsdauermodulierten Signals (PWM-Frequenz) eine Spannung von bis zu 13,8V an den Aktor durchschalten.

#### 2.1.5 Autobox

#### 2.1.6 Positionsmessung und -regelung

Die Position der Läuferstange wird über einen PLCD-25M Sensor gemessen, dessen berührungslose PLCD (permanent-magnetic linear contactless displacement) Technologie die magnetische Sättigung nutzt. Der weichmagnetische Kern des Sensors ist über seine komplette Länge von einer Primärspule umgeben. Auf der Schaltgabel ist ein Permanentmagnet befestigt, welcher je nach Position zu einer lokalen Sättigung des weichmagnetischen Kerns führt. Über zwei Auswertungsspulen am Rand des Sensors kann nun die Position der Sättigungszone entlang der Sensorachse über eine induzierte Spannung bestimmt werden.

Der Sensor wird an die MicroAutoBox zwecks Spannungsversorgung sowie zur Durchführung der Kalibrierung angeschlossen. Die Kalibrierung wurde in (Quelle) entwickelt und erfolgt bisher bei jedem Start. Die bisherige Regelung der Schaltgabelposition wurde in einem vorherigen Advanced Design Project ausgelegt. Dazu wurden mithilfe des Ziegler-Nichols-Verfahren zunächst Parameter für einen PID-Regler ermittelt, welcher allerdings noch zu große Totzeiten und ein Überschwingen aufwies. In einer anschließenden iterativen Optimierung mit Störgrößenkompensation wurden die Regelparame-ter zu  $K_P = 2,6\%/mm$ ,  $K_I = 20\%/s\cdot mm$  und  $K_D = 1,6\%Vs/mm$  bestimmt. Der Verlauf der Sprungantwort ist in nachstehender Abbildung dargestellt.



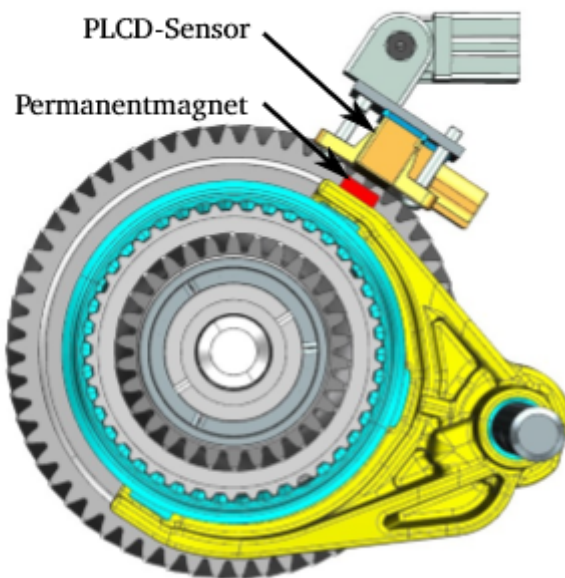
Aktor.png

**Abbildung 2.4:** Kraft-Weg-Strom Kennlinien des Tauchspulenaktors

## 2.2 Grundlagen Löten

Löten gehört zu den Fügeverfahren und bezeichnet das Verbinden zweier Metalle durch eine Metalllegierung unter Einfluss von Wärme (Quelle: TdF Skript). Die Metalllegierung wird dabei als Lot bezeichnet und hat eine geringere Schmelztemperatur (Liquidustemperatur) als die beiden zu verbindenden Metalle (Solidustemperatur). Durch das Löten entsteht eine feste, korrosionsbeständige sowie strom- und wärmeleitende Verbindung. Lötverfahren werden nach Arbeitstemperatur eingeteilt: es wird unterschieden in Weichlöten (bis 450°C), Hartlöten (450°C - 900°C) und Hochtemperaturlöten (über 900°C). Im Rahmen dieses Projektes wurde das Verfahren Weichlöten mit LötKolben angewendet, um die elektrischen Bauteile auf der Platine anzubringen. Dazu konnten die vom Institut bereitgestellten Lötstationen und -materialien verwendet werden.

## 2.3 Mikrocontroller



**Abbildung 2.5:** Einbauposition PLCD Sensor an der Schaltgabel



---

# Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Prüfstand . . . . .  | 7  |
| 2.2 | Fahrzeuggetriebe . . . . .                                 | 8  |
| 2.3 | Querschnitt Tauchspulenaktor . . . . .                     | 9  |
| 2.4 | Kraft-Weg-Strom Kennlinien des Tauchspulenaktors . . . . . | 10 |
| 2.5 | Einbauposition PLCD Sensor an der Schaltgabel . . . . .    | 11 |