
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

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Ziele der Arbeit	5
1.3	Anforderungsliste	5
1.4	Vorgehen der Arbeit	6
2	Aufbau des Prüfstands und Grundlagen	7
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
3	Erster Prototyp und verwendete Bauteile	13
3.1	H-Brücke	13
	Abbildungsverzeichnis	15



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 Hinsicht 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/UVF), Dekalibrierung
FF	Schnittstellen	CAN, 8-12VDC Versorgung (max XA), Programmierschnittstelle (für Updates & Bugfixes)
W	Wartbarkeit	Sicherung wechseln im eingebauten Zustand
BF	kompakte Baugröße	
BF	Effizienz (gemittelt über einen Schaltvorgang)	elektrischer Wirkungsgrad > 90 %
FF	Temperaturbeständigkeit	bis 105°C
BF	Aktorüberschwingen	Toleriert, solange kein unbeabsichtigter Gangwechsel
W	Schaltgabelkraft am Anschlag	möglichst gering
FF	Standby	Standbyleistungsaufnahme < 5W

Tabelle 1.1: Anforderungsliste

1.4 Vorgehen der Arbeit

Nachdem in der oben stehenden Anforderungsliste die Ziele der vorliegenden Arbeit definiert wurden, soll nun das weitere Vorgehen zum Erreichen der Zielsetzung erläutert werden. Zunächst werden in Kapitel 2 der Stand des Prüfstands vor Beginn des ADPs sowie wichtige Grundlagen als Basis für die weitere Bearbeitung und zum besseren Verständnis dargelegt. In Kapitel 3 werden die verschiedenen Bauteile, die für die eingebettete Elektronik benötigt werden, und ihre Funktionen beschrieben. Außerdem wird der erste Prototyp und sein Entwicklungsprozess beschrieben. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Implementierung der Funktionalität in Matlab Simulink BLABLABLA In Kapitel 5 soll schließlich das endgültige Platinendesign vorgestellt werden.

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.

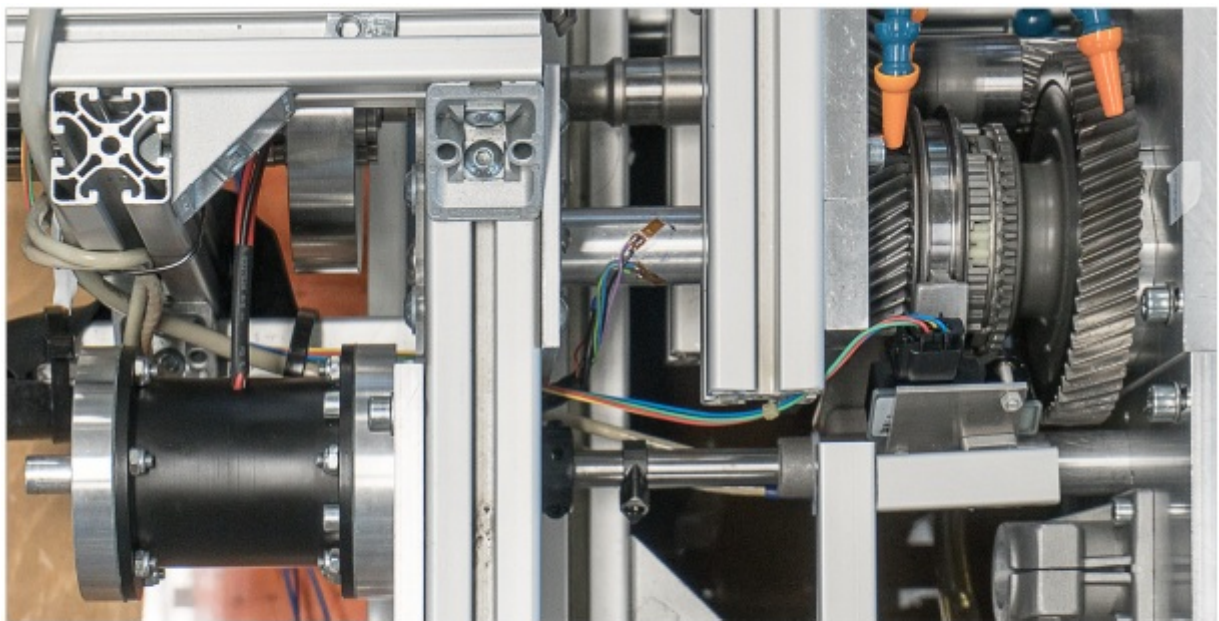


Abbildung 2.1: Prüfstand

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 (Handschaftgetriebe) 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

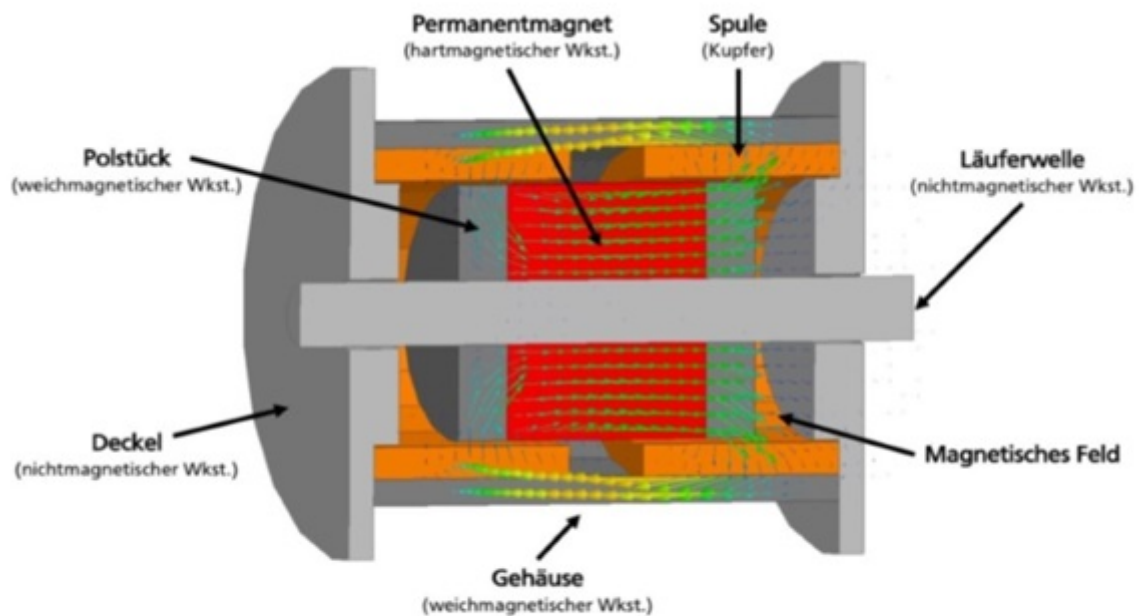


Abbildung 2.3: Querschnitt Tauchspulenaktor

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.

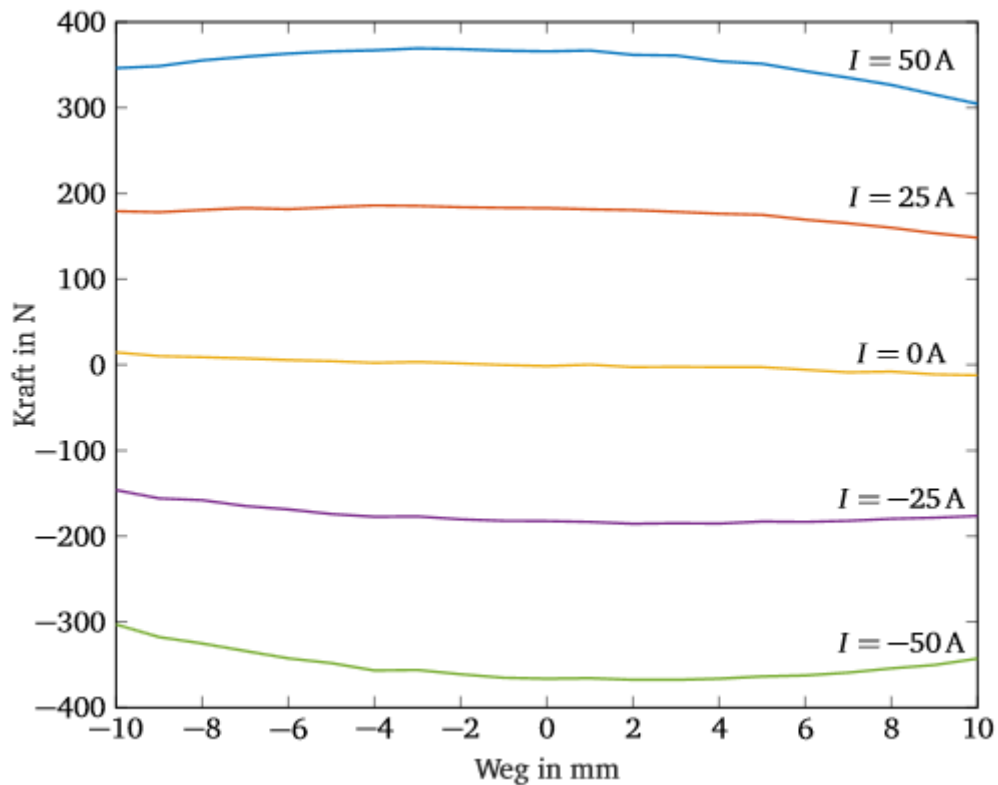
2.1.5 Autobox

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 Überspringen aufwies. In einer anschließenden iterativen Optimierung mit Störgrößenkompensation wurden die Regelparameter zu $K_P = 2,6\%/mm$, $K_I = 20\%/smm$ und $K_D = 1,6\%Vs/mm$ bestimmt. Der Verlauf der Sprungantwort ist in nachstehender Abbildung (2.6) 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

Ein Mikrocontroller (*MCU: microcontroller unit*) ist ein hochintegrierter Halbleiterchip, der ein komplettes Mikrorechnersystem enthält. Prozessoren, Speicher, Ein- und Ausgabegeräte sind somit auf einem kleinen Chip enthalten der zum Ziel hat, Steuerungs- und Kommunikationsaufgaben möglichst simpel mit wenig Bauelementen zu bearbeiten.

In Abbildung 2.7 ist der typische Aufbau eines Mikrocontroller dargestellt. Die Schnittstellen zur Peripherie sind durch einen Betriebsspannungsanschluss, einen Takteingang, an den in der Regel ein Quarz angeschlossen wird, sowie die Portleitungen gegeben. Bei den Ports wird zwischen Eingangskanälen (*Input Port*), die digitale Signale lesen, und Ausgangskanälen (*Output Port*, die digitale Signale setzen beziehungsweise löschen, unterschieden. Des weiteren können I/O Pins digital oder analog sein, wobei analoge Signale mithilfe eines Analog/Digital Wandlers (AD-Wandler) zuerst in digitale Signale umgewandelt werden müssen, damit der Mikrocontroller sie verarbeiten kann. Eine Spezialform von Eingangskanälen sind die Interrupt-Pins, die bei bestimmten Ereignissen Unterbrechungen des laufenden Programms verursachen, um temporär einen anderen Vorgang zu bearbeiten.

Intern sind die einzelnen Bausteine, die im folgenden kurz erläutert werden, über ein Bussystem verbunden. Der Prozessor (*CPU: central processing unit*) führt Berechnungen und logische Operationen durch. Der Taktgenerator gibt die Arbeitsfrequenz an, also wie schnell der CPU arbeiten soll. Der Arbeitsspeicher (*RAM: random access memory*) speichert temporär Daten, die aber spätestens nach dem Entfernen der Betriebsspannung gelöscht werden. Der Festspeicher (*ROM: read only memory*) behält seinen Speicherinhalt auch nach dem Entfernen der Betriebsspannung und enthält auf-

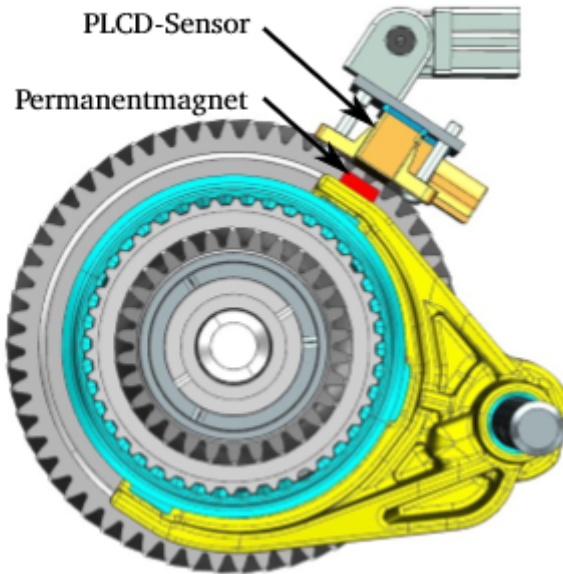


Abbildung 2.5: Einbauposition PLCD Sensor an der Schaltgabel

grund dessen das Programm sowie Einstellungen und wichtige Daten. Im Vergleich zum RAM hat er eine langsame Schreibgeschwindigkeit. Der Timer hilft dabei, Anzahlen von Ereignissen zu zählen oder Zeitabstände zu messen, indem er Spannungswechsel an einem Eingangskanal zählt.

Die genaue Ausführung des Chips kann je nach Aufgabentyp variieren, sodass eine Vielzahl an verschiedenen Mikrocontrollern erhältlich ist. Diese unterscheiden sich meistens in der Größe des Speichers, in der Anzahl der Anschlüsse beziehungsweise Schnittstellen, in der Bitbreite, in den Taktraten sowie in der Bauform. Typischerweise werden Mikrocontroller in eingebetteten Systemen (*embedded systems*) verwendet, bei denen die Steuereinheit direkt im System selbst integriert ist. Übliche Anwendungen für Mikrocontroller sind Roboter, Handys, Temperaturregler oder Motorsteuerungen (Quelle: Brinkschulte).

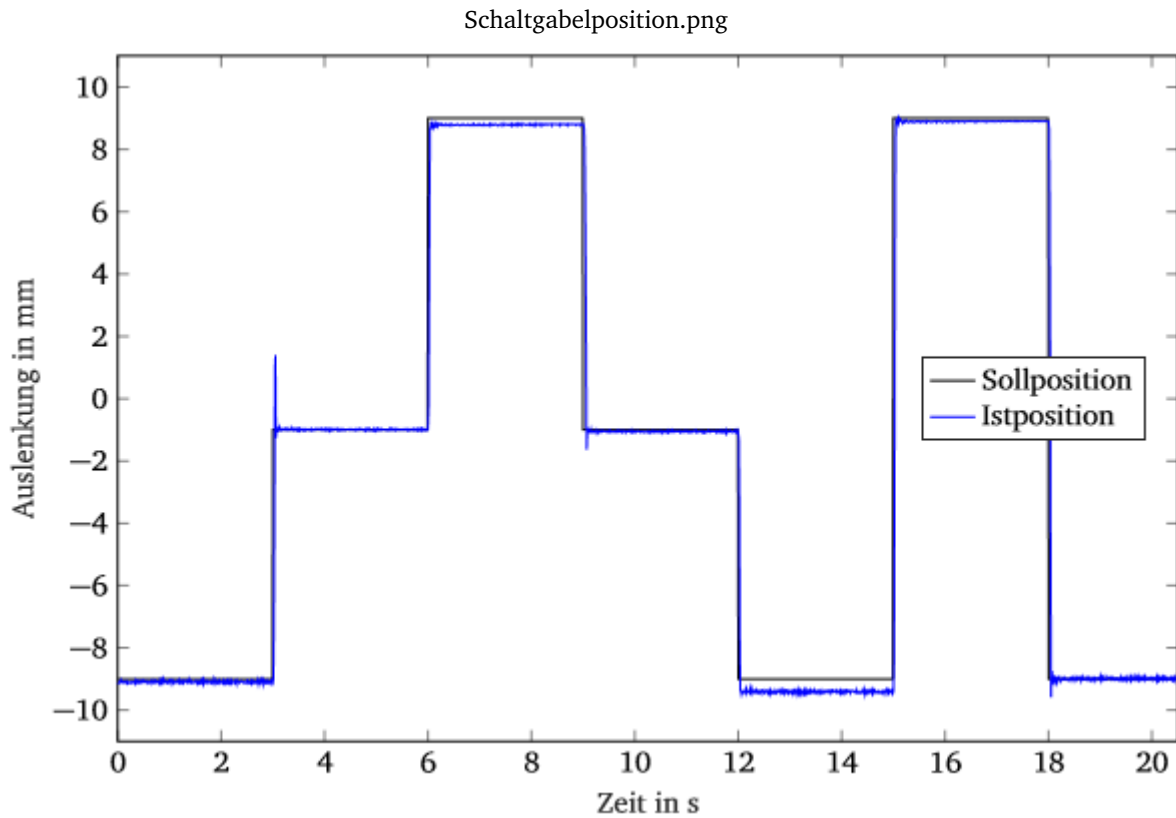
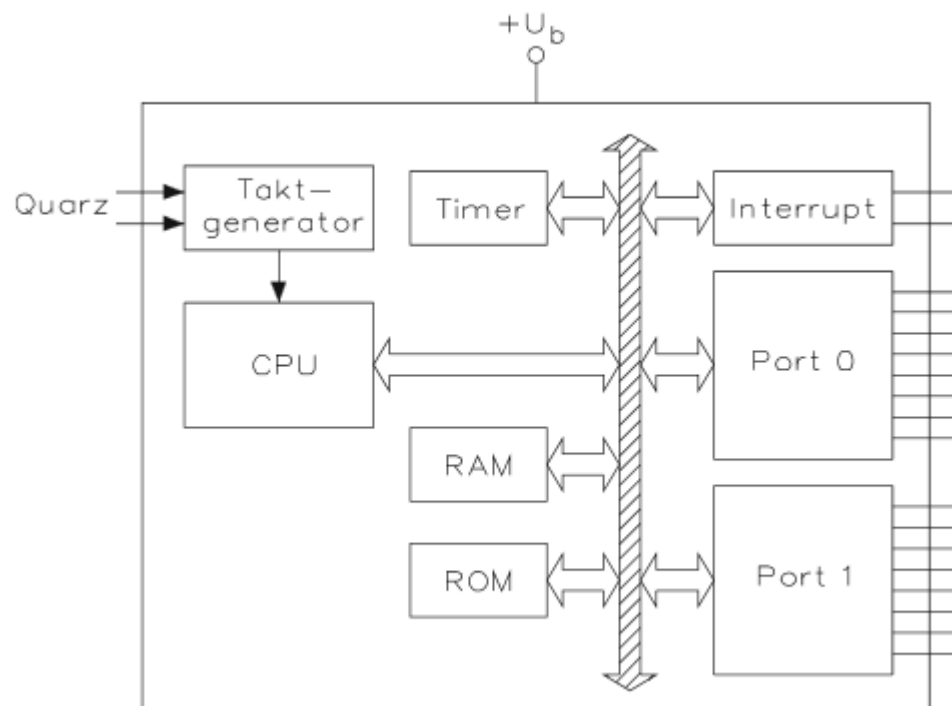


Abbildung 2.6: Sprungantwort Schaltgabelposition



Mikrocontroller.png

Abbildung 2.7: Blockschaftbild eines typischen Mikrocontrollers (Quelle: Bernstein)

3 Komponentenauswahl und Schaltungsdesign

3.1 H-Brücke

Zur Ansteuerung des Aktors wird eine H-Brücke verwendet. Als Halbbrücken dienen zwei BTN8982 (Datenblatt in Anhang !!!) mit jeweils einem p-channel highside MOSFET und einem n-channel lowside MOSFET mit bereits integrierten Schutzmechanismen wie Abschaltung bei zu geringer Spannung oder Übertemperatur beinhalten. Die Halbbrücken sind für Ströme bis zu 55 Ampere sowie Spannungen bis zu 40 Volt ausgelegt und sind temperaturbeständig bis 150° Celsius. Das Blockdiagramm dieser Halbbrücken ist in nachstehender Abbildung dargestellt. In dem Blockdiagramm sind bereits

Halbbruecken.jpg

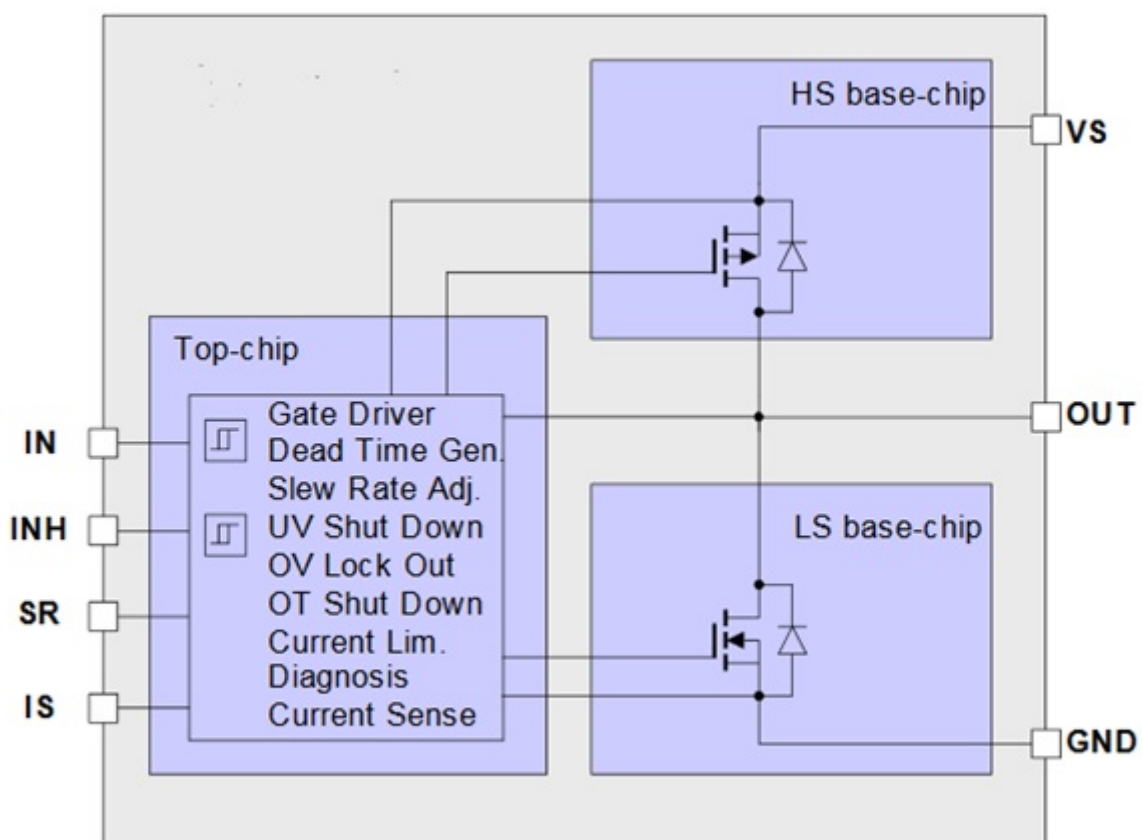


Abbildung 3.1: Blockdiagramm Halbbrücken

die PINs der Halbbrücken zu erkennen. Diese sollen nun in Tabelle 3.1 nochmal aufgezählt und ihre Funktionen erklärt werden.

Der Status Pin liefert dabei für eine Halbbrücke im High Switch Mode eine zum fließenden Versorgungsstrom proportionale Spannung, für eine Halbbrücke im Low Switch Mode keine Spannung oder Strom und im Fehlbetrieb eine konstante unabhängige Spannung.

Die Brückenschaltung orientiert sich an der Schaltung des zuvor verwendeten Motortreibers sowie an der vorgeschlagenen Schaltung aus dem Datenblatt der Halbbrücken und erlaubt, dass sich der Motor je nach Durchschalten in beide Richtungen drehen kann. Im ersten Entwicklungsschritt wurde die geplante Schaltung auf einem Steckbrett getestet und anstatt des Aktors zwei LEDs in die Brückenschaltung eingebaut. Die Schaltung wurde an die jeweiligen Pins des Mikrocontroller angeschlossen und testweise mit einer 8 Volt Batterie versorgt. Mit einem Testskript wurde die Funktionalität

Pin Nummer	Bezeichnung	Erläuterung	Anschluss an
1	GND (Ground)	Erdung	Ground MCU
2	IN (Input)	definiert die Schalterstellung (1 = High Switch Mode; 0 = Low Switch Mode)	O-Pin MCU
3	INH (Inhibit)	1: Betriebsmodus, 0: Schlafmodus	O-Pin MCU
4, 8	OUT (Output)	Ausgang der Brückenschaltung	Aktor
5	SR (Slew Rate)	Einstellen der Steigung der Spannungsantwort	kurzgeschlossen
6	IS (Status)	Strommessung & Fehlererkennung	I-Pin MCU
7	VS (Supply)	Stromversorgung	Batterie

Tabelle 3.1: Pinverteilung Halbbrücken

nachgewiesen und erste PWM-Signale zur Einstellung unterschiedlicher Helligkeit der LEDs gesendet. Für den ersten allgemeinen Prototypen wurde die geplante Schaltung auf einer Lochrasterplatine verwirklicht, die mit THT- Bauteilen (*through hole technology* bestückt wurde, welche anschließend verlötet wurden. Beim Test dieses Prototypen wurden einige Fehlerquellen erkannt, die durch die neuen Erkenntnisse behoben werden konnten. Dazu gehörte BLABLA

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
2.6	Sprungantwort Schaltgabelposition	12
2.7	Blockschaltbild eines typischen Mikrocontrollers (Quelle: Bernstein)	12
3.1	Blockdiagramm Halbbrücken	13