



Bachelorarbeit

Hardware/Software Codesign

Julian-Benedikt Scholle
3. Juni 2014

Betreuer

Dr. Ing. Sebastian Zug
Dipl.-Inform Christoph Steup

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Anforderungsanalyse	7
2.0.1	Anforderungen an die Platine	7
2.0.2	Resultat aus den Anforderungen	8
3	Stand der Technik	9
4	Motorstrommessung am Shunt	11
4.1	Problem	11
4.2	Prinzip der Strommessung	11
4.3	Anforderungen	11
4.4	Bestimmung des Filtertyps	12
4.5	Die Filterschaltung	12
4.6	Dimensionierung des Verstärkers	13
4.7	Anforderungen an den Filter	13
4.8	Filterentwurf	14
4.8.1	Bestimmung des Filtertyps	14
4.8.2	Butterworth	15
4.8.3	Bestimmung der Grenzfrequenz	15

1

Einleitung

Anforderungsanalyse

2.0.1 Anforderungen an die Platine

Laut Regelwerk sind alle Teams zur Verwendung eines elektrischen Antriebs verpflichtet. Die Anzahl der angetriebenen Räder ist nicht vorgeschrieben, des Weiteren muss das Auto durch Akkus mit Strom versorgt werden. Die Übertragung von Daten ist während der Dauer der Disziplinen nicht gestattet.

Fahrzeugabmessungen

Es ist ein vierrädriges Fahrzeug mit 2 Achsen im Maststab 1:10 vorzusehen. Die Spurweite, gemessen von Reifenmitte zu Reifenmitte, muss mindestens 16 cm betragen. Der Radstand muss mindestens 20 cm betragen. Die Höhe des Fahrzeuges darf 30 cm nicht überschreiten, über das Fahrzeug hinausragende flexible Antennen sind gestattet. Zur Abnahme des Fahrzeuges, muss es durch ein 40 cm Breites und 30 cm Hohes Tor fahren.

RC-Modus

In Notsituationen muss es möglich sein, das Fahrzeug mit Hilfe einer Funkfernbedienung anzuhalten und manuell zu steuern. Eine solche Notsituation tritt ein, wenn das Auto seine Aufgabe aufgrund eines Fahrfehlers oder anderem Fehlverhalten nicht mehr autonom fortführen kann. Der RC-Modus muss per Fernbedienung eingeschaltet und ausgeschaltet werden, bei Aktivierung des RC-Modus muss das Fahrzeug unverzüglich angehalten werden. Während des Wettbewerbs darf die Geschwindigkeit des Autos $0,3 \frac{m}{s}$ nicht überschreiten. Da das 2,4-GHz Band bereits durch die Vorort genutzte Kamertechnik belegt ist, können diese Frequenzen nicht für den RC-Modus genutzt werden. Der RC-Modus muss durch eine blaue Leuchte an der höchsten Stelle des Fahrzeuges angezeigt werden, welche mit einer Frequenz von 1-Hz blinkt.

Signalleuchten

Durch die Anlehnung des Wettbewerbes an den realen Straßenverkehr muss das Auto über alle in echten Auto vorhandene Signalleuchten besitzen. Dazu gehören 3 rote Bremslichter am Heck des Autos sowie jeweils 2 gelbe Blinker Rechts und Links am Fahrzeug. Die Blinkfrequenz der Blinker muss 1-Hz betragen.

Verkleidung

Um eine schnelle Wartung und Überprüfung zu ermöglichen muss die Fahrzeug Abdeckung jederzeit schnell und einfach entfernt werden können. Des Weiteren muss die dem Schutzgrad IP 11 entsprechen.

2.0.2 Resultat aus den Anforderungen

Aufgrund der Anforderungen der elektrischen Antriebes und des Maststabes von 1:10 kann als Grundaufbau des Autos ein gängiges Ferngesteuertes Auto aus dem freien Handel genutzt werden. Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wurden dabei im Team diskutiert und die Wahl fiel dabei auf das “TT-01R Type E” welches allen Anforderungen genügt. Tamiya ist seit langen ein im Modellbau etablierter Hersteller so das hier Ersatzteile lange verfügbar sein sollten.

Im Bausatz des TT-01R Type E ist bereits ein Elektromotor samt Reglerelektronik enthalten. Leider verbaut Tamiya Motoren von vielen verschiedenen Herstellern, zu denen es leider kein Datenblatt gibt. Einige Recherchen ergaben allerdings das alle Motoren Nachbauten eines “Mabuchi RS-540SH” sind, von welchem ein Datenblatt existiert [2]

3

Stand der Technik

4

Motorstrommessung am Shunt

4.1 Problem

An einem mit PWM angesteuertem DC-Motor soll eine Strommessung mit Hilfe eines Shuntwiderstandes durchgeführt werden. Aufgrund der PWM Ansteuerung muss der DC-Anteil aus dem Signal herausgefiltert werden!

4.2 Prinzip der Strommessung

Die Messspannung wird über einen Shuntwiderstand zur Masse gemessen! Aufgrund nicht vorhandener Datenblätter des Motors wird von einem Experimentel Ermittelten maximalen Strom des Motors ausgegangen. Dieser beträgt bei einer Betriebsspannung von 20V ca. 20A. Da einen Shunt mit einer maximalen Belastbarkeit von 2 Watt eingesetzt wird, darf der maximale Spannungsabfall am Shunt 100mV nicht überschreiten. Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich dadurch ein Widerstand von $0,005\Omega$ für den Shunt. Shuntwiderstände in der Größe sind problemlos zu bekommen. Da es sich hier um eine Worst Case Rechnung handelt, wird der zusätzliche Widerstand des Shuntwiderstandes und der damit verringerte Strom bewusst ignoriert.

Die über den Shuntwiderstand gemessene Spannung soll über den ADC Eingang des Mikrocontrollers eingelesen werden. Vorher jedoch muss das Signal gefiltert werden, da der Strom durch die Ansteuerung mittels der Pulsweitenmodulation nicht konstant ist!

4.3 Anforderungen

Die maximale Auflösung des Mikrocontrollers soll ausgenutzt werden. Der ADC des Mikrocontrollers arbeitet mit einer Auflösung von 10 Bit und einer Referenzspannung von 5V. Um die Auflösung des ADC aus-

zunutzen muss das Signal, aufgrund unseres Spannungsabfalls verstärkt werden.

Als Anforderung ergibt sich außerdem, dass der maximale Ripple des Endsignals kleiner ist als der Quantisierungsfehler des ADC. So ist es möglich auf eine zusätzliche Digitale Filterung weitgehend zu verzichten. Die kleinstmögliche zu erfassende Spannung des ADC beträgt $\frac{5}{2^{10}} = 4,88mV$. Diesen Wert sollte der Ripple des Endsignals nicht überschreiten. Aus einem möglichst kleinem Ripple resultiert eine möglichst hohe Filterordnung bzw. eine niedrige Grenzfrequenz. Allerdings soll U_{DC} einer Änderung des Mittelwertes, also einer Änderung des Tastverhältnisses, möglichst schnell folgen. Diese Anforderung widerspricht der vorherigen so dass ein Kompromiss gefunden werden muss.

4.4 Bestimmung des Filtertyps

Aufgrund des sehr niedrigen Spannungspegels am Shunt, ist es nötig das Signal zu verstärken. Da zum Verstärken des Signals aktive elektronische Elemente notwendig sind, z.B. ein Operationsverstärker, wird an dieser Stelle gleich ein aktiver Filter verwendet. Dieser gibt uns die Möglichkeit des Messsignal zu verstärken und gleichzeitig zu filtern. Da wir als unser Signal im optimalen Fall eine Gleichspannung darstellt müssen wir die Hochfrequenten Anteile unseres Signals herausfiltern, dies geschieht mit Hilfe eines Tiefpasses. Es gibt im Grunde 2 übliche aktive Tiefpässe, den Tiefpass mit Mehrfachgegenkopplung und den Sallen-Key Filter. Ersterer verwendet einen invertierenden Verstärker, dieser invertiert das Messsignal. Da der μ Controller jedoch nur mit positiven Spannungen umgehen kann müsste man hier mit einer negativen Referenzspannung arbeiten, was den Schaltungsaufwand unnötig vergrößern würde. Der Sallen-Key Tiefpass benutzt einen nicht invertierenden Verstärker, welcher diesen Nachteil nicht hat. So dass ab dieser Stelle ein Sallen-Key Tiefpass entworfen wird.

4.5 Die Filterschaltung

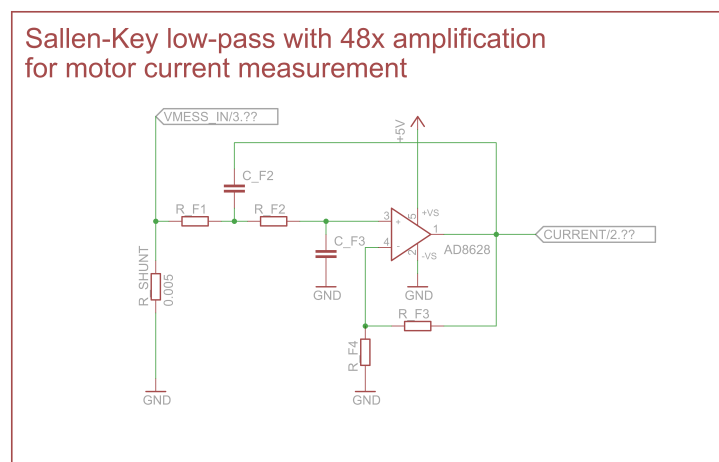


Abbildung 4.1: Spannung am Shunt + PWM

4.6 Dimensionierung des Verstärkers

In bisherigen Rechnungen wurde ein maximaler Spannungsabfall von 100mV am Shunt errechnet. Da der Messbereich des voll ADC ausgenutzt werden soll, ist es nötig das Messsignal zu verstärken. Hierzu wird ein Nichtinvertierender Verstärker benutzt. Da der Messbereich des ADC bis 5V reicht, wird hier eine 50 fache Verstärkung angestrebt.

Für einen Nichtinvertierenden Verstärker ergibt sich dann:

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$
$$50 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$
$$49 \cdot R_1 = R_2$$

Wobei $R_1 = 47k\Omega$ und $R_2 = 1k\Omega$ gewählt werden, was eine Verstärkung von 48 ergibt.

4.7 Anforderungen an den Filter

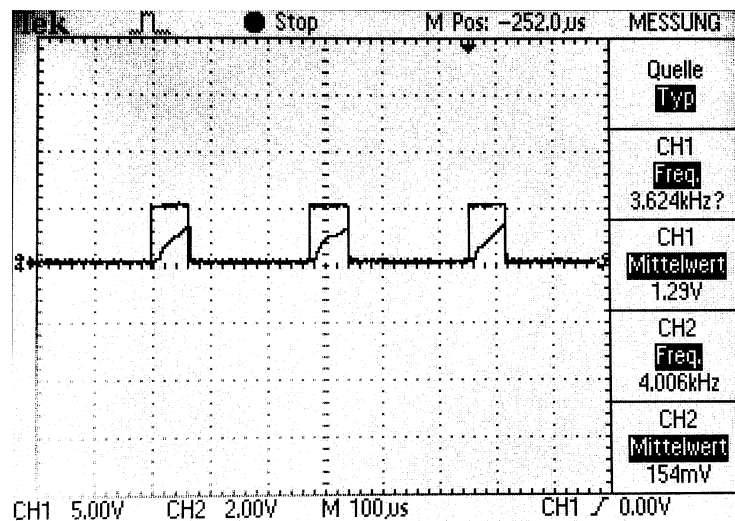


Abbildung 4.2: Spannung am Shunt + PWM

Da dem Messsignal wie in Abbildung 4.2 zu erkennen, die PWM Frequenz zu Grunde liegt wird sich bei der Dimensionierung des Filters einer Idee nach [1] bedient, nach der die maximale Amplitude des Ripples der Grundschiwingung bei einem Tastverhältnis von 0,5 entspricht. Die Amplitude der Grundschiwingung ergibt sich aus dem ersten Koeffizienten der Fourierreihe einer Rechteckschiwingung.

$$A_1 = K \cdot \frac{1}{\pi} [\sin(\pi p) - \sin(2\pi(1 - \frac{p}{2}))] \quad (4.1)$$

Wobei p dem Tastverhältnis und K der maximale Amplitude des Ursprungssignals entspricht [1]. K entspricht den errechneten 100mV multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor 48, also 4,8V und p wird zu 0,5

angenommen. Mit (4.1) ergibt sich für die Amplitude der Grundschiwingung $A_1 = K \cdot \frac{2}{\pi} = 3,056V$. A_1 soll auf $< 4,88mV$ gedämpft werden. Als Sperrfrequenz Ω_s wir hier die PWM Frequenz angesetzt für $H(\omega = 2\pi f_{PWM})$ gilt also:

$$H(\omega = 2\pi f_{PWM}) \leq \frac{4,88mV}{3,056V} \hat{=} 20 \cdot \log\left(\frac{4,88mV}{3,056V}\right) = -55,9dB \quad (4.2)$$

Da des Projekt mölicht kostensparend durchgeführt werden soll, also Bauteilsparend, wird an dieser Stelle von den üblichen Konventionen zur dimensionierung von Filtern abgewichen. Statt eine fixe Grenzfrequenz festzulegen und die benötigte Filterordnung zu bestimmen, wird die Filterordnung vorgegeben und die Grenzfrequenz variiert.

4.8 Filterentwurf

4.8.1 Bestimmung des Filtertyps

Des Filtertyp muss in Zweierlei hinblich bestimmt werden. Einmal im hinblich auf die Schaltung und seinem Frequenzgang. Im groben gibt es 2 mögliche Tiefpassfilterschaltungen, den Sallen-Key Tiefpass mit nicht invertierendem OPV und dem aktiven Tiefpass mit Mehrfachgegenkoppung (invertierender OPV). Der aktive Tiefpass mit Mehrfachgegenkoppung benötigt allerdings negative Spannungsniveaus die auf der Treiberplatine nicht zur verfügung stehen, deshalb wird an dieser Stelle nur der Sallen-Key Tiefpass behandelt. Was den Frequenzgang angeht gibt es viele Filtercharakteristiken, eine Auswahl an häufig verwendeten Charakteristiken wird hier verglichen.

Filtercharakteristiken	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
Butterworth-Filter	Maximal flacher Verlauf des Betragsfrequenzganges im Durchlassbereich, Dämpfung im Sperrbereich monoton verlaufend	Gutes Amplitudenverhalten im Durchlass- und Sperrbereich	Geringe Flankensteilheit im Übergangsbereich

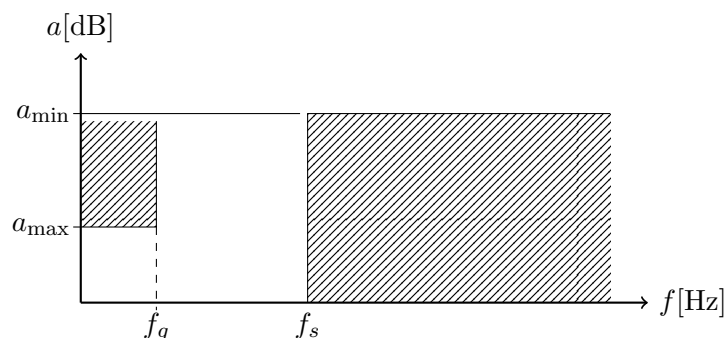


Abbildung 4.3: Tiefpass
Toleranzfeld

Für unsere Schaltung wird ein Sallen Key Tiefpass 2. Ordnung entworfen. Die PWM-Frequenz f_{PWM} beträgt 3,9kHz. Die Sperrfrequenz entspricht der PWM Frequenz, also der Frequenz unserer Grundschwingung. Ω entspricht der mit der Grenzfrequenz normierten Frequenz $\Omega = \frac{f}{f_g}$. Nach (4.2) ergibt sich für Abbildung 4.3 $f_s = f_{PWM} = 3,9kHz$, $a_{min} = 55,9dB$ und a_{max} wird auf 3dB festgelegt.

4.8.2 Butterworth

4.8.3 Bestimmung der Grenzfrequenz

$$n \geq \frac{\log \sqrt{\frac{e^{2a_{min}} - 1}{e^{2a_{max}} - 1}}}{\log \Omega_s} \quad (4.3)$$

Die Filterordnung nach Butterworth wird nach (4.3) bestimmt. Umgestellt nach Ω_s ergibt sich:

$$\Omega_s \leq \left(\frac{e^{2a_{min}} - 1}{e^{2a_{max}} - 1} \right)^{\frac{1}{2n}} \quad (4.4)$$

Für die Berechnung der Sperrfrequenz Ω_s müssen a_{min} und a_{max} in Neper umgerechnet werden. Wobei:

$$1dB = \frac{\ln 10}{20} Np = 0,115129255 Np$$

Damit ergibt sich für $a_{min} = 55,9dB \cdot \frac{\ln 10}{20} = 6,45 Np$ und für $a_{max} = 3dB \cdot \frac{\ln 10}{20} = 0,345 Np$. Die Filterordnung wird auf 2 festgelegt.

$$\Omega_s \leq \left(\frac{e^{2 \cdot 6,45 Np} - 1}{e^{2 \cdot 0,345 Np} - 1} \right)^{\frac{1}{2n}} = 35,8 \quad (4.5)$$

Die Grenzfrequenz f_g ergibt sich jetzt aus:

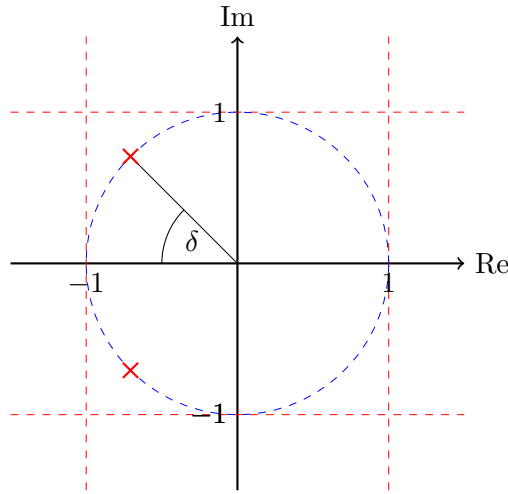
$$\frac{f_s}{\Omega_s} \leq \frac{3,9kHz}{35,8} = 108,9Hz \quad (4.6)$$

Filterentwurf

Im vorherigen Abschnitt wurde berechnet dass die Grenzfrequenz der Filters kleiner als 108,9Hz sein muss. Im Folgenden wird nun ein Sallen-Key Filter 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 150Hz entworfen.

Finaler Entwurf

Betrachten wir das Polstellen-Nullstellendiagramm eines Butterworth Filters 2. Ordnung.



Charakteristisch für den Butterworthfilter ist das sich die Polstellen auf einer Kreisbahn befinden. Auf die Grenzfrequenz normiert hat dieser beim Butterworthfilter den Radius eins. Bei einem Butterworth 2. Ordnung befinden sie sich genau bei $\delta = 45^\circ$. Das Interessante am Polstellen-Nullstellendiagramm ist, dass sich Polfrequenz Ω_P und Polgüte Q_P einfach ablesen lassen. Die Polfrequenz Ω_P ist der Betrag der normierten Polstelle, welche beim Butterworth immer eins ist (sie entspricht der Grenzfrequenz). Die Polgüte ist abhängig von δ und ergibt sich zu: $Q_P = \frac{1}{2 \cos \delta}$. Für unseren Butterworthfilter ergeben sich also $Q_P = 0,707$ und $\Omega_P = 1$

Übertragungsfunktion eines Sallen-key Tiefpasses

$$A(P) = \frac{A_0}{1 + \omega_g(R_2C_2 + R_1C_2 + R_1C_2(1 - A_0))P + \omega_g^2 R_1R_2C_1C_2P^2}$$

mit

$$A_0 = \frac{R_6}{R_5} - 1$$

Die Bauteilwerte erhält man durch einen Koeffizientenvergleich mit der entnormierten Übertragungsfunktion eines Tiefpasses zweiter Ordnung:

$$A(P) = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{\omega_g \Omega_P Q_P} s + \frac{1}{\omega_g^2 \Omega_P^2} s^2}$$

nach den Koeffizientenvergleich ergibt sich

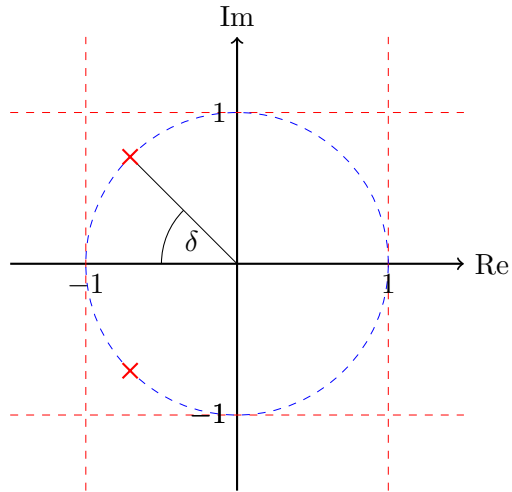
$$C_1 < \frac{C_2 * (1 + 4Q_P^2(A_0 - 1))}{4Q_P^2}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\omega_g \Omega_P Q_P} \cdot \frac{C_2 + \sqrt{C_2^2 - 4Q_P^2 C_2 (C_1 + C_2(1 - A_0))}}{C_2(C_1 - C_2(A - 0_1))}$$

$$R_2 = \frac{1}{2\omega_g \Omega_P Q_P} \cdot \frac{C_2 + \sqrt{C_2^2 - 4Q_P^2 C_2 (C_1 + C_2(1 - A_0))}}{C_1 C_2}$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1(R_1 + R_2) + R_1 C_2(1 - A_0)}$$

$$\Omega_p = \frac{1}{\omega_g \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$



Literaturverzeichnis

- [1] David M. Alter. Using pwm output as a digital-to-analog converter on a tms320f280x digital signal controller. Technical report, Texas Instruments, 2008.
- [2] Mabuchi Motor. Rs-540sh. http://www.mabuchi-motor.co.jp/cgi-bin/catalog/e_catalog.cgi?CAT_ID=rs_540sh, Mai 2014. Online; accessed 20-Mai-2014.