

Die intelligente Lampe

Jan Sebastian Götte,
Landesschule Pforta

8. Januar 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Konzept	3
2	Biologische Grundlagen	3
3	Technische Umsetzung	3
3.1	LED-Ansteuerung	3
3.1.1	Notwendigkeit der Stromregelung	3
3.1.2	Dimmen - Techniken	4
3.1.3	Funktionsweise der PWM	4
3.1.4	Pulsdichtemodulation	5
3.2	Generierung scheinbar linearer Helligkeitverläufe	5
3.3	Kommunikationsprotokoll	6
3.3.1	Master	6
3.3.2	Slave	6
3.4	Kompatible Steuergeräte	6
4	Grundlagen der Elektroenzephalographie	6
4.1	Biologisch	6
4.2	Elektrisch	6
4.3	Mathematisch und Informatisch	8
5	Arbeitsprozess der Platinenherstellung und Ergebnisse	8
A	Glossar	8
B	Literatur, Quellen etc.	8
C	Updates	9
D	Changelog	9

1 Konzept

2 Biologische Grundlagen

3 Technische Umsetzung

3.1 LED-Ansteuerung

3.1.1 Notwendigkeit der Stromregelung

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Light Emitting Diode, Leuchtdiode (LED) zeigt recht deutlich, dass es nicht möglich ist, diese ohne externe Regelung an einer Spannungsquelle – wie den meisten handelsüblichen Netzteilen – zu betreiben. Eine direkt an eine niederohmige Spannungsquelle angeschlossene LED würde sofort von einem extrem hohem Strom durchflossen werden, durch den bei gegebener Flussspannung ΔU der LED nach $P = U \cdot I$ eine große Leistung an der LED anfallen würde, die die LED erhitzen und letztlich innerhalb eines Sekundenbruchteils thermisch zerstören würde. Die Sperrschicht einer Hochleistungs-LED darf nicht über 150°C erhitzt werden [1, 2].

Die zwei gängigsten Methoden der Stromregelung sind Vorwiderstände und Konstantstromquellen. Vorwiderstände werden nach $R = \frac{U}{I}$ bemessen, wobei I der gewünschte Strom an der LED ist und sich U als Differenz der Betriebsspannung V_{CC} und der Flussspannung der LED:

$$R = \frac{V_{CC} - \Delta U_{LED}}{I_{LED}} \quad (1)$$

Die überschüssige Leistung fällt am Vorwiderstand ab, weshalb sich diese Ansteuerung nicht für hohe Spannungsdifferenzen oder hohe Ströme eignet.

$$P_{R_v,tot} = (V_{CC} - \Delta U_{LED}) \cdot I_{LED} \quad (2)$$

Beim Betrieb einer weißen 2,1W-Hochleistungs-LED mit einer Flussspannung von 3,0V bei 700mA an einer Spannungsquelle von $V_{CC} = 24V$ mit Vorwiderstand fielen an diesem knapp 15W Verlustleistung an. Weitere Nachteile der Verwendung von Vorwiderständen sind, dass Hochleistungswiderstände zum einen relativ teuer sind und zum anderen üblicherweise mit Toleranzen zwischen 5 und 10% gefertigt werden. Eine solche Toleranz stört bei der Ansteuerung einer einzelnen LED nicht weiter, sollen jedoch mehrere LEDs als Array betrieben werden, merkt man selbst Helligkeitsunterschiede von 1% bereits.

Alternativ und bei der Ansteuerung von Hochleistungs-LEDs weiter verbreitet ist die Konstantstromquelle. Eine Konstantstromquelle besteht aus einem Strom-Spannungs-Wandler, einem Stromregler, einer Referenz und einem Fehlerverstärker. Unabhängig von Last und Betriebsspannung sowie Innenwiderstand der Spannungsquelle stellt sich durch die Konstantstromquelle dem Namen gemäß ein sehr konstanter, von der Genauigkeit des Strom-Spannungs-Wandlers (meist ein spezieller, niederohmiger Messwiderstand – Shunt genannt) abhängiger Strom ein. Im Gegensatz zum Vorwiderstand lässt sich die Konstantstromquelle relativ einfach mit einem Trimpotentiometer kalibrieren.

3.1.2 Dimmen - Techniken

Das Dimmen bezeichnet die Einstellung der Helligkeit der Lampe. LEDs lassen sich gut dimmen, indem man den Strom reguliert. Man kann den Strom prinzipiell analog oder digital steuern. Eine analoge Regelung besteht aus einer Modifikation der Stromquelle, im Falle der Konstantstromquelle kann dies durch ein analoges oder digitales Potentiometer¹ oder das Inkorporieren eines einem DAC entnommenen analogen Signals im Fehlerverstärker.

Beide Techniken sind relativ Störanfällig (da analoge Signale wesentlich aufmerksamerem Schaltungsdesigns bedürfen) und haben das Problem, dass DACs und besonders digitale Potentiometer relativ teuer sind.

Digital lässt sich eine Helligkeitsregelung durch so genannte Pulsweitenmodulation (PWM) oder Pulsdichtemodulation (PDM) erreichen. Ich werde zunächst auf die PWM eingehen, da ihr Konzept meiner Meinung nach einfacher zu verstehen ist, um dann auf die Pulsdichtemodulation einzugehen.

3.1.3 Funktionsweise der PWM

Pulsweitenmodulation beschreibt eine Gruppe von Verfahren, bei denen die an einer Last anliegende Leistung eingestellt wird, indem die Last, die bei konstanter Stromzufuhr eine als konstant anzunehmende Leistung zeigt, mit hoher Frequenz ein- und ausgeschaltet wird. Im Konkreten Fall wird die LED mit einer Frequenz von einigen hundert Hertz angesteuert. Sie wird am Anfang jeder Periode der Dauer T ausgeschaltet und nach einer bestimmten Zeit t_E wieder eingeschaltet. Über die Periode gemittelt beträgt die Leistung der LED P_{LED} bei gegebener Vollast-Leistung P_V gemittelt $P_{LED} = \frac{t_E}{T} \cdot P_V$. Durch die hohe Schaltfrequenz ist das die Leistung, die die LED für ein menschliches Auge scheinbar abstrahlt.

¹So genannte digitale Potentiometer verhalten sich genau genommen nicht wie Potentiometer. Technisch sind sie Digital-Analog-Umsetzer (DACs), die einen digitalen Wert in einen Widerstand umwandeln.

Eine PWM kann überall dort zur Leistungsregelung verwendet werden, wo zwischen dem Ausgangssignal der PWM-Steuerung und dem letztendlich durch den Aktor beeinflussten System ein Tiefpass mit einer hinreichend unterhalb der PWM-Frequenz f_{PWM} liegenden Grenzfrequenz ist — wie im Falle der LED das Auge, das zwischen der rein technisch gesehen „flackern- den“ LED und der weiteren Signalverarbeitung im Gehirn als Tiefpass mit einer Grenzfrequenz im Bereich 20 - 30 Hz liegt.

Die Technische Umsetzung der Pulsweitenmodulation mit einem digitalen Eingangssignal sieht meist wie in gezeigt aus: Ein Zähler zählt von 0 zu seinem Maximum, das der Auflösung der PWM entspricht, im Falle eines digitalen Systems üblicherweise 2^n , wobei n die Anzahl der Bits des PWM-Steuersignals ist. Der Wert des Zählers wird durch einen digitalen Komparator kontinuierlich mit dem eingestellten Wert verglichen, und bei einem „Match“, also in dem Fall, dass Zählerstand und eingestellter Leistungswert übereinstimmen, wird ein ausgangsseitiges Flipflop getriggert. Beim Überlauf des Zählers wird dieses Flipflop wieder zurückgesetzt.

Die oben beschriebene PWM-Technik ist nur eine mehrere möglicher Varianten. Da es eine große Anzahl derselben gibt und deren Theorie sehr komplex ist und diese Arbeit keine Abhandlung über Pulsweitenmodulationen sein soll, seien dem geneigten Leser die im Literaturverzeichnis aufgezählten Quellen wärmstens empfohlen.

3.1.4 Pulsdichtemodulation

Bei der PDM wird ähnlich wie bei der PWM die durchschnittliche Einschaltzeit – im englischen „on-time“ – der Last moduliert, indem die Leistung zwischen 0% und 100% oszilliert. Bei der Pulsdichtenmodulation ist das Steuersignal im Gegensatz zu dem der PWM wesentlich hochfrequenter.

3.2 Generierung scheinbar linearer Helligkeitverläufe

Das menschliche Auge hat eine nichtlineare Wahrnehmungscharakteristik. Nicht nur werden, wie bekannt sein sollte, verschiedene Wellenlängen mit unterschiedlicher Empfindlichkeit wahrgenommen, es werden auch verschiedene Strahlungsintensitäten mit unterschiedlicher Empfindlichkeit wahrgenommen. Der Zusammenhang zwischen realer und wahrgenommener Helligkeit ist nicht linear. Bei relativ geringer absoluter Helligkeit ist die Empfindlichkeit für kleinste Helligkeitsänderungen wesentlich größer als bei großen absoluten Helligkeiten. Zeichnet man die ungefähre Kennlinie auf ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang.

Effekt dieser nichtlinearen Kennlinie ist, dass eine einfache lineare Steigerung der abgestrahlten Leistung wie sie bei einer nach dem oben beschriebenen Prinzip arbeitenden PWM

durch ein Erhöhen des Leistungswertes um einen konstanten Summanden von Zyklus zu Zyklus erreicht werden könnte, in dunkleren Bereichen als wesentlich schneller ändernd als in hellen erscheint. Während die Helligkeitsänderung im Bereich maximaler Helligkeit über einen gegebenen Zeitraum als nichtexistent erscheinen kann, dimmt dieser Algorithmus im gleichen Zeitraum von 0% auf scheinbar halbe Helligkeit.

Abhilfe für diesen Umstand lässt sich durch die Transformation eines rohen Helligkeitswertes, der der optisch wahrgenommenen Helligkeit entspricht nach einer logarithmischen Skala auf den Wertebereich der PWM. Dies kann z.B. nach folgender Formel geschehen:

$$2^{\left(\frac{v}{2^n} \cdot k\right)} \quad (3)$$

$$v := \text{Eingabewert auf einer linearen Skala} \quad (4)$$

$$n := \text{„Breite“ des Eingabewertes in Bit} \quad (5)$$

$$k := \text{„Breite“ des Ausgabewertes in Bit} \quad (6)$$

3.3 Kommunikationsprotokoll

3.3.1 Master

3.3.2 Slave

3.4 Kompatible Steuergeräte

4 Grundlagen der Elektroenzephalographie

4.1 Biologisch

4.2 Elektrisch

Hirnströme lassen sich auf der Kopfhaut noch mit einer Amplitude von ca. $100\mu V$ messen. Die Messung solcher Spannungen ist kein allzu einfaches Unterfangen. Problematisch an der Messung solch kleiner Hirnströme ist noch, dass durch den hohen scheinbaren Innenwiderstand die zur Messung nutzbare Stromstärke extrem gering ist (nA -Bereich) und somit der Innenwiderstand der Messschaltung extrem hoch sein muss.

```

#!/usr/bin/env ruby

inbits = 8
outbits = 16

puts <<eos
/*
 * Logarithmic #{outbits}-bit pwm #{inbits}-bit lookup table
 *
 * Copyright 2010 by Jan Sebastian Götte (s@twopi.eu)
 * - - - - - LICENSE INFORMATION - - - - -
 * This program is free software: you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation, either 1.1 3 of the License, or
 * (at your option) any later 1.1.
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
 * - - - - -
 */

#ifndef __GENERATED_PWM_LUT_LOG_#{inbits}_#{outbits}__
#define __GENERATED_PWM_LUT_LOG_#{inbits}_#{outbits}__

#include <avr/pgmspace.h>

const uint16_t log_pwm_lut[] PROGMEM = {
  #{(0...2**inbits).map {|i| (2.0*(i/(2**inbits.to_f)*outbits)).round }.join(", ")}
};

#endif//__GENERATED_PWM_LUT_LOG_#{inbits}_#{outbits}__

eos

```

Abbildung 1: Ein Ruby-Script, dass auf Basis dieser Formel eine C-Headerdatei mit einer Lookup-Tabelle für alle Eingabehelligkeitswerte generiert

Da an besagter Messschaltung ein Mensch angeschlossen ist² sind besondere—wiewohl nicht unbedingt notwendige—Schutzschaltungen einzuplanen. In der konkreten Umsetzung sind das einige $100k\Omega$ -Schutzwiderstände, die den maximalen Fehlerstrom auf unbedenkliche Werte begrenzen.

4.3 Mathematisch und Informatisch

5 Arbeitsprozess der Platinenherstellung und Ergebnisse

A Glossar

Glossary

Flussspannung Spannungsabfall innerhalb der LED in Durchlassrichtung. 3, 4

Shunt Niederohmiger ($0.01 - 1\Omega$) Messwiderstand, der zur Strommessung verwendet wird. Der durch den Widerstand fließende Strom wird indirekt durch die am Widerstand abfallende Spannung gemessen. Der Widerstand sollte möglichst klein – gegenüber dem Lastwiderstand in jedem Falle klein – sein, um den Spannungsabfall am Widerstand und den Messfehler sowie die Verlustleistung (bei hohen Strömen) gering zu halten.. 4

Sperrschicht Übergang von positiv zu negativ dotiertem Halbleitermaterial. 3, 4

Acronyms

LED Light Emmiting Diode, Leuchtdiode. 3, 4

PWM Pulsweitenmodulation. 4

B Literatur, Quellen etc.

- [1] Philips. Power Light Source LUXEON K2 Technical Datasheet DS51, 2008.
<http://www.philipslumileds.com/uploads/54/DS51-pdf>.

²dessen Schaltbild in eingängiger Fachliteratur tatsächlich ein Strichmännchen ist

- [2] Philips. LUXEON® Rebel ES Technical Datasheet DS61, 2010.
<http://www.philipslumileds.com/uploads/17/DS61-pdf>.
- [3] Wikipedia. Fast Fourier Transformation, 2011.
<http://en.wikipedia.org/wiki/FFT>.

C Updates

Die jeweils aktuellste Version dieser Arbeit, der Quelltexte und der Hardwaredokumentation ist unter der Adresse <http://github.com/jaseg/RGBulb> zu finden. Die Repositories der einzelnen Unterprojekte sind unter den folgenden Adressen zu finden:

<https://github.com/jaseg/OpenMind>

<https://github.com/jaseg/BUZ2-Master>

<https://github.com/jaseg/BUZ2-Slave>

D Changelog

Version	Anmerkungen
0.1	Arbeitsversion