

Die intelligente Lampe

Jan Sebastian Götte,
Landesschule Pforta

8. Januar 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Konzept	2
2	Biologische Grundlagen	2
3	Technische Umsetzung	2
3.1	LED-Ansteuerung	2
3.1.1	Notwendigkeit der Stromregelung	2
3.1.2	Dimmen - Techniken	3
3.1.3	Funktionsweise der PWM	4
3.1.4	Pulsdichtemodulation	5
3.2	Generierung scheinbar linearer Helligkeitverläufe	5
3.3	Kommunikationsprotokoll	8
3.3.1	Master	8
3.3.2	Slave	8
3.4	Kompatible Steuergeräte	8
4	Grundlagen der Elektroenzephalographie	8
4.1	Biologisch	8
4.2	Elektrisch	8
4.3	Mathematisch und Informatisch	11
5	Arbeitsprozess der Platinenherstellung und Ergebnisse	11
A	Glossar	11
B	Literatur, Quellen etc.	13
C	Updates	24
D	Changelog	24

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 [99, 100].

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 Helligkeitsverläufe

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.

```
\PY{c+c1}{/usr/bin/env ruby}
```

```
\PY{n}{bits} \PY{o}{=} \PY{l+m+mi}{8}
```

```
\PY{n}{tbits} \PY{o}{=} \PY{l+m+mi}{16}
```

```
\PY{n+nb}{ts} \PY{o}{<<} \PY{n+no}{eos}
```

```
\PY{l+s+sh}{Logarithmic #\PYZob{ }outbits\PYZcb{ }-bit pwm #\PYZob{ }inbits\PYZcb{ }-bit look
```

```
\PY{l+s+sh}{Copyright 2010 by Jan Sebastian Götte (s@twopi.eu)}
```

```
\PY{l+s+sh}{ - - - - - LICENSE INFORMATION - - - - - }
```

```
\PY{l+s+sh}{This program is free software: you can redistribute it and/or modify}
```

```
\PY{l+s+sh}{it under the terms of the GNU General Public License as published by}
```

```
\PY{l+s+sh}{the Free Software Foundation, either 1.1 3 of the License, or}
```

```
\PY{l+s+sh}{(at your option) any later 1.1.}
```

```
\PY{l+s+sh}{This program is distributed in the hope that it will be useful,}
```

```
\PY{l+s+sh}{but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of}
```

```
\PY{l+s+sh}{MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the}
```

```
\PY{l+s+sh}{GNU General Public License for more details.}
```

```
\PY{l+s+sh}{You should have received a copy of the GNU General Public License}
```

```
\PY{l+s+sh}{along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.}
```

```
\PY{l+s+sh}{ - - - - - }
```

```
\PY{l+s+sh}{fndef \PYZus{ }\PYZus{ }GENERATED\PYZus{ }PWM\PYZus{ }LUT\PYZus{ }LOG\PYZus{ }#\PYZus{ }
```

```
\PY{l+s+sh}{efine \PYZus{ }\PYZus{ }GENERATED\PYZus{ }PWM\PYZus{ }LUT\PYZus{ }LOG\PYZus{ }#\PYZus{ }
```

```
\PY{l+s+sh}{nclude <avr/pgmspace.h>}
```

```

\PY{1+s+sh}{nst uint16\PYZus{}t log\PYZus{}pwm\PYZus{}lut[] PROGMEM = \PYZob{}}
\PY{1+s+sh}{(0...2**inbits).map \PYZob{}|i| (2.0**(i/(2**inbits.to\PYZus{}f)*outbits)).r

\PY{1+s+sh}{ndif//\PYZus{}\PYZus{}GENERATED\PYZus{}PWM\PYZus{}LUT\PYZus{}LOG\PYZus{}#\PY

\PY{n+no}{s}

```

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:

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

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

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

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

Hierzu siehe auch [67, 75, 107].

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. 100V 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.

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.

Den Teil des Elektroenzephalograph (EEG), der die Messsignale von den Elektroden in digitale Signale zur Weiterverarbeitung umwandelt wird als „analoges Front-End“ bezeichnet. Das analoge Front-End eines EEG sieht prinzipiell folgendermaßen aus: Auf die Elektroden folgt zunächst eine Schutzschaltung, die verhindert, dass auf den Benutzer des Gerätes bedenkliche Spannungen respektive Ströme einwirken. Auf diese Schutzschaltung folgt der Vorverstärker, der das Messsignal konditioniert und auf ein zur Weiterverarbeitung fähiges Spannungslevel bei geringem Spannungsquelleninnenwiderstand transformiert. Im Vorverstärker integriert sowie unmittelbar dahinter folgen analoge Filter, die das Signal auf die für die weitere Analyse interessante Bandbreite reduzieren. Schließlich folgt noch der Analog-Digital-Umsetzer (ADC), durch den die abschließende Umwandlung des aufbereiteten Messsignals in eine Folge digitaler Werte erfolgt.

Das analoge Front-End meiner *OpenMind* getauften Eigenentwicklung enthält als zentrales Element einen speziell für die Anwendung in EEGs entwickelten Mikrochip (IC). Der ADS1194 des Herstellers Texas Instruments enthält analoge Filter, Vorverstärker und ADC [94]. Der in meinem Design eingesetzte ADS1194 enthält 4 Eingangsschaltungen und wird in meinem Design eingesetzt, um die Signale von bis zu vier Elektroden aufzunehmen.

²dessen Schaltbild in gängiger Fachliteratur tatsächlich ein Strichmännchen ist

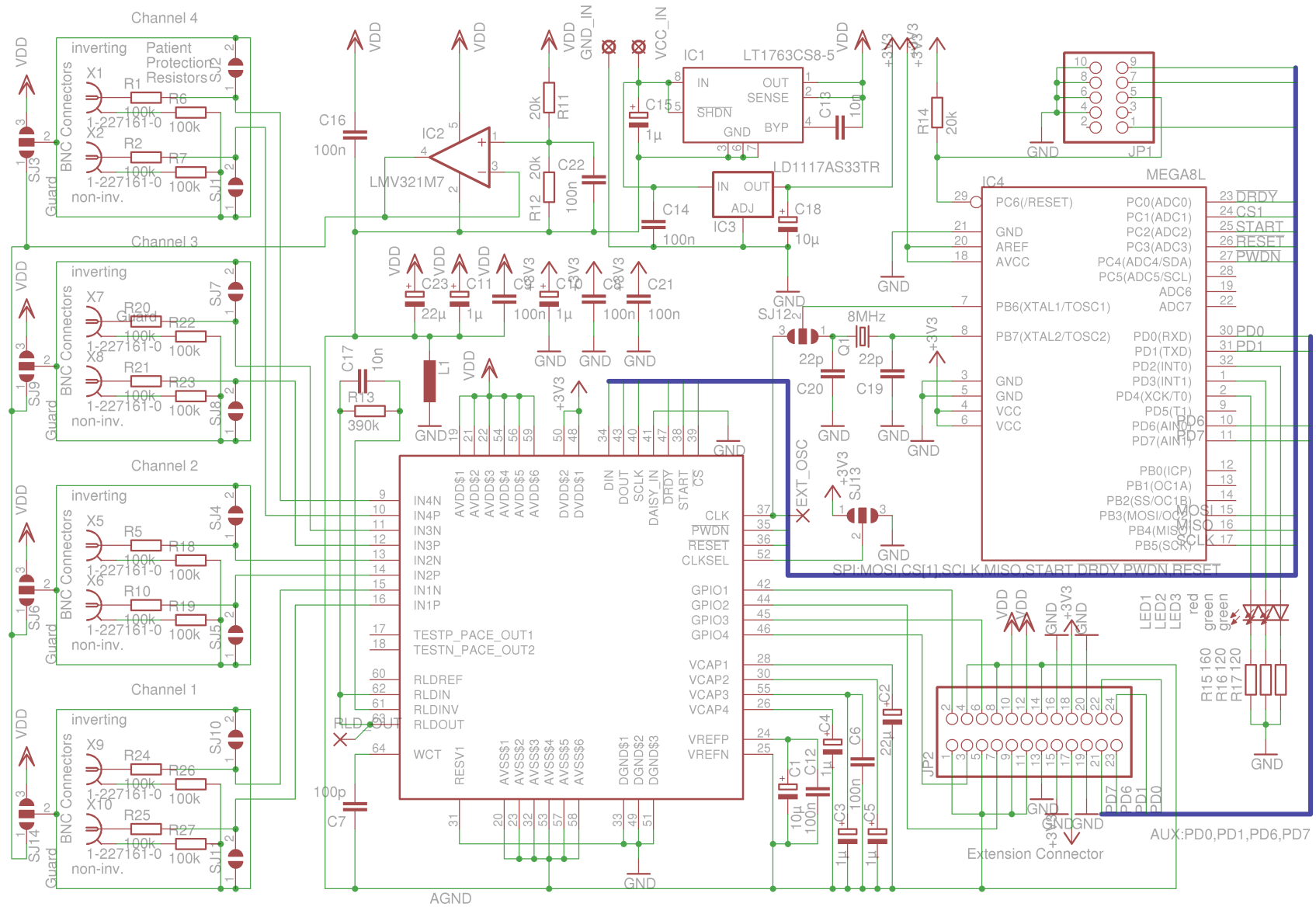


Abbildung 1: Der Schaltplan des EEG-Moduls

Die Sampling-Rate liegt im Bereich einiger hundert bis tausend $\frac{Sp}{s}$, die höchste für die Messung signifikante Frequenz liegt weit unter $100Hz$. Das Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem ist somit erfüllt und bei den gegebenen Frequenzen sind keine Probleme zu erwarten. Die Auflösung des ADC ist mit 16 Bit groß genug, um Offsetkorrektur und weitere Filtermaßnahmen in Software zu implementieren, wodurch keine weiteren analogen eingangsseitigen Filter notwendig sind.

4.3 Mathematisch und Informatisch

5 Arbeitsprozess der Platinenherstellung und Ergebnisse

A Glossar

Glossary

Fehlerstrom Unerwünschter, häufige gefährlicher, auf nicht intendiertem Wege fließender Strom, meist durch Lebewesen. 8

Flipflop Eine elektronische Speicherschaltung, siehe hierzu **FIXME**. 5, 8

Flussspannung Spannungsabfall innerhalb der LED in Durchlassrichtung. 3, 8

Hertz Einheit der Frequenz, entspricht nach dem SI (Système Internationale) $\frac{1}{s}$. 4, 8

Sampling Umwandlung eines kontinuierlichen, meist analogen Signals in diskrete Werte und – im Falle eines ADC oder DAC – die Umwandlung desselben in digitale Signale. 8

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, 8

Sperrschicht Übergang von positiv zu negativ dotiertem Halbleitermaterial. 3, 8

Überlauf Aktion eines Zählers oder einer Variable, beim Inkrement über sein/ihr Maximum auf sein/ihr Minimum zu Springen. 5, 8

Acronyms

ADC Analog Digital Converter, Analog-Digital-Umsetzer, in deutscher Fachliteratur teilweise als ADU bezeichnet. 8

DAC Digital Analog Converter, Digital-Analog-Umsetzer, in deutscher Fachliteratur teilweise als DAU bezeichnet. 4, 8

EEG Elektroenzephalograph. 8

IC Integrated Circuit, Integrierter Schaltkreis, umgangssprachlich Mikrochip. 8

LED Light Emmiting Diode, Leuchtdiode. 3-5, 8

PDM Pulse Density Modulation, Pulsdichtemodulation. 4, 5, 8

PWM Pulse Width Modulation, Pulsweitenmodulation. 4-6, 8

B Literatur, Quellen etc.

- [1] Mike Byrne) Analog Devices (Walt Kester, James Bryant. Grounding Data Converters and Solving the Mystery of “AGND” and “DGND”, 2009.
<http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-031.pdf>.
- [2] former Burr Brown) Bonnie Baker (Texas Instruments. Tuning in Amplifiers, 1996.
<http://www.ti.com/litv/pdf/sboa067>.
- [3] Bungard. Datenblatt Fotobeschichtetes Bungard FR4 Basismaterial.
<http://bungard.de/downloads/IPC4101D.pdf>.
- [4] Erik Cheever. Switched Capacitor Circuits, Accessed 2010.
<http://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Ref/FilterBkgrnd/SwitchedCap.html>.
- [5] Analog Devices. AD586 High Precision 5V Reference, 2005.
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD586.pdf.
- [6] Analog Devices. AD5227 64-Position Up/Down Control Digital Potentiometer, 2009.
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5227.pdf.

- [7] Analog Devices. AD5235 Nonvolatile Memory, Dual 1024-Position Digital Potentiometer, 2009.
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5235.pdf.
- [8] Analog Devices. Decoupling Techniques, 2009.
<http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-101.pdf>.
- [9] Analog Devices. Getting Started With SHARC Processors, 2010.
http://www.analog.com/static/imported-files/tech_docs/GettingStartedwithSharcpProcessors.pdf.
- [10] S. Avadhanula E. Steltz, M. Seeman and R.S. Fearing. Power Electronics Design Choice for Piezoelectric Microrobots, 2006.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.5538&rep=rep1&type=pdfcheck>.
- [11] Texas Instruments (former Burr Brown). Single-Supply Operation of Operational Amplifiers, 1986.
<http://focus.tij.co.jp/jp/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=sboa059&fileType=pdf>.
- [12] Texas Instruments (former Burr Brown). INA116 Ultra Low Input Bias Current Instrumentation Amplifier, 1995.
<http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=ina116&fileType=pdf&track=no>.
- [13] Texas Instruments (former Burr Brown). OPA128 Difet Electrometer-Grade Operational Amplifier, 1995.
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa128.pdf>.
- [14] Texas Instruments (former Burr Brown). TMS320F243/TMS320F241 DSP Controllers, 2006.
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f243.pdf>.
- [15] Texas Instruments (former Burr Brown). OPA129 Ultra-Low Bias Current Difet Operational Amplifier, 2007.
<http://www.ti.com/lit/gpn/opa129>.
- [16] Texas Instruments (former Burr Brown). OPA445 High Voltage FET-Input Operational Amplifier, 2008.
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa445.pdf>.

- [17] Kevin R. Hoskins. Data Acquisition Circuit Collection, 1994.
<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an62.pdf>.
- [18] Maxim IC. DS1085L 3.3V EconOscillator Frequency Synthesizer.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1085L.pdf>.
- [19] Maxim IC. MAX7409/7410/7413/7414 5th-Order, Lowpass, Switched-Capacitor Filters, 1998.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX7409-MAX7414.pdf>.
- [20] Maxim IC. ADC and DAC Glossary, 2000.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN641.pdf>.
- [21] Maxim IC. Operational Amplifier Inputs, 2000.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN717.pdf>.
- [22] Maxim IC. Programmable-Gain Amplifier, Using the MAX532 DAC, 2000.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN429.pdf>.
- [23] Maxim IC. Understanding Voltage-Reference Topologies and Specifications, 2000.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN719.pdf>.
- [24] Maxim IC. A Quick Guide To Voltage References, 2001.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1182.pdf>.
- [25] Maxim IC. Automatic Test Equipment on a Budget, 2001.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN761.pdf>.
- [26] Maxim IC. Force/Sense DAC Applications, 2001.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN807.pdf>.
- [27] Maxim IC. Minimizing Component-Variation Sensitivity in Single Op Amp Filters, 2001.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN738.pdf>.
- [28] Maxim IC. The ABCs of ADCs: Understanding How ADC Errors Affect System Performance, 2001.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN748.pdf>.
- [29] Maxim IC. DAC and Op Amp Generate Variable Negative Control Voltage, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1074.pdf>.
- [30] Maxim IC. Digital-Analog Converters Are a “Bit” Analog, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1055.pdf>.

- [31] Maxim IC. Effects of Digital Crosstalk in Data Converters, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1842.pdf>.
- [32] Maxim IC. Effects of Digital Crosstalk in Data Converters Part 2: Crosstalk on the Clock, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1841.pdf>.
- [33] Maxim IC. Effects of Digital Crosstalk in Data Converters Part 3: Digital Data Signal Crosstalk on the Clock, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1842.pdf>.
- [34] Maxim IC. Filter Basics: Anti-Aliasing, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN928.pdf>.
- [35] Maxim IC. Proper Layout and Component Selection Controls EMI, 2002.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN716.pdf>.
- [36] Maxim IC. A Beginner's Guide to Filter Topologies, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1762.pdf>.
- [37] Maxim IC. Analog Filter Design Demystified, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1795.pdf>.
- [38] Maxim IC. Boost Converter Generates Three Analog Rails, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2026.pdf>.
- [39] Maxim IC. Building a Power Supply That Works, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1897.pdf>.
- [40] Maxim IC. Demystifying Sigma-Delta ADCs, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1870.pdf>.
- [41] Maxim IC. Introduction to Common Printed Circuit Transmission Lines, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2093.pdf>.
- [42] Maxim IC. MAX1553/MAX1554 High-Efficiency, 40V Step-Up Converters for 2 to 10 White LEDs, 2003.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX1553-MAX1554.pdf>.
- [43] Maxim IC. MAX4194-MAX4197 Micropower, Single-Supply, Rail-to-Rail, Precision Instrumentation Amplifiers, 2003.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4194-MAX4197.pdf>.
- [44] Maxim IC. Selecting the Optimum Voltage Reference, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2879.pdf>.

- [45] Maxim IC. Simple Methods Reduce Input Ripple for All Charge Pumps, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2027.pdf>.
- [46] Maxim IC. Tips to Remember When Designing with Digital Potentiometers, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1956.pdf>.
- [47] Maxim IC. Understanding Integral Non-Linearity Errors, 2003.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2395.pdf>.
- [48] Maxim IC. Basic Switching-Regulator-Layout Techniques, 2004.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2997.pdf>.
- [49] Maxim IC. Digital-to-Analog Converters (DACs) for High-Performance Communications, 2004.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3176.pdf>.
- [50] Maxim IC. Exposed Pads: A Brief Introduction, 2004.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3273.pdf>.
- [51] Maxim IC. How to Increase the Bandwidth of Digital Potentiometers 10x to 100x, 2004.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3081.pdf>.
- [52] Maxim IC. MAX6143 High-Precision Voltage Reference with Temperature Sensor, 2004.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX6143.pdf>.
- [53] Maxim IC. Add USB to Anything, 2005.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3637.pdf>.
- [54] Maxim IC. Choosing a Low-Noise Amplifier, 2005.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3642.pdf>.
- [55] Maxim IC. How to Divide and Conquer the Divider: Practical Resistive Dividers, Made Easy, 2005.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3646.pdf>.
- [56] Maxim IC. Integrated DC Logarithmic Amplifiers, 2005.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3611.pdf>.
- [57] Maxim IC. The Basics of Anti-Aliasing: Using Switched-Capacitor Filters, 2005.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3494.pdf>.
- [58] Maxim IC. Equalizing Techniques Flatten DAC Frequency Response, 2006.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3853.pdf>.

- [59] Maxim IC. Isolating USB, 2006.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3891.pdf>.
- [60] Maxim IC. MAX4238/MAX4239 Ultra-Low Offset/Drift, Low-Noise, Precision SOT23 Amplifiers, 2006.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4238-MAX4239.pdf>.
- [61] Maxim IC. Practical USB Terminology, 2006.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3803.pdf>.
- [62] Maxim IC. 3-Pin Silicon Oscillator, 2007.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX7375.pdf>.
- [63] Maxim IC. An Introduction to Switch-Mode Power Supplies, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4087.pdf>.
- [64] Maxim IC. Current Sensing on a Negative Voltage Supply Rail, using a Precision Instrumentation Amplifier, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4050.pdf>.
- [65] Maxim IC. DACs vs. Digital Potentiometers: Which Is Right for My Application?, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4025.pdf>.
- [66] Maxim IC. Extend Current-Sense Amplifier's Input Range Down to 0V, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4078.pdf>.
- [67] Maxim IC. Logging the Linear Digital Potentiometer, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3996.pdf>.
- [68] Maxim IC. Operational Amplifiers Glossary of Key Terms, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4107.pdf>.
- [69] Maxim IC. Overvoltage Protection (OVP) for Sensitive Amplifier Applications, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4035.pdf>.
- [70] Maxim IC. Setup and Hold Times for High-Speed Digital-to-Analog Converters (DACs) Demystified, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4053.pdf>.
- [71] Maxim IC. Three is a Crowd for Instrumentation Amplifiers, 2007.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4034.pdf>.
- [72] Maxim IC. A Filter Primer, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN733.pdf>.

- [73] Maxim IC. Analog Multiplier Improves the Accuracy of High-Side Current-Sense Measurements, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4030.pdf>.
- [74] Maxim IC. Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4300.pdf>.
- [75] Maxim IC. Pots, Pans, Logs, and Linear Digital Pots Create Arbitrary Voltage Curves, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4346.pdf>.
- [76] Maxim IC. Rail Splitter, from Abraham Lincoln to Virtual Ground, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4344.pdf>.
- [77] Maxim IC. Wafer-level packaging (WLP) and its applications, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1891.pdf>.
- [78] Maxim IC. Well Grounded, Digital Is Analog, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4345.pdf>.
- [79] Maxim IC. Where Is Ground?, 2008.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4292.pdf>.
- [80] Maxim IC. Autozero Noise Filtering Improves Instrumentation Amplifier Output, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4179.pdf>.
- [81] Maxim IC. Design Guidelines for High-Performance, Multichannel, Simultaneous-Sampling ADCs in Data-Acquisition Systems (DAS), 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4359.pdf>.
- [82] Maxim IC. Frequently Asked Questions about Data Converters, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN801.pdf>.
- [83] Maxim IC. Inexpensive (Almost Free) Probe/Tweezers for Testing SMD Components, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4459.pdf>.
- [84] Maxim IC. Integrated Solutions Make Analog Filter Design Easy, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4422.pdf>.
- [85] Maxim IC. Logarithmic LED Panel Display Has 72dB Range, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4442.pdf>.

- [86] Maxim IC. MAX4208/MAX4209 Ultra-Low Offset/Drift, Precision Instrumentation Amplifiers with REF Buffer, 2009.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4208-MAX4209.pdf>.
- [87] Maxim IC. Methods for Calibrating Gain Error in Data-Converter Systems, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4494.pdf>.
- [88] Maxim IC. Minimize Voltage Offsets in Precision Amplifiers, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4348.pdf>.
- [89] Maxim IC. Murphy's Law and the Risks of Designing "Off Data Sheet", 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4429.pdf>.
- [90] Maxim IC. Same? Really the Same? Maybe? The Cross-Reference Challenge, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4425.pdf>.
- [91] Maxim IC. Saving Energy: Little Things Mean a Lot, 2009.
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4335.pdf>.
- [92] Texas Instruments. Amplifier and Data Converter Selection Guide, 2009.
<http://www.arrow.com/mktg/medical-source/ad-converter-guide.pdf>Link?
- [93] Texas Instruments. OPA615 Wide-Bandwidth, DC Restoration Circuit, 2009.
<http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=opa615&fileType=pdf>.
- [94] Texas Instruments. ADS1194/ADS1196/ADS1197 Low-Power, 8-Channel, 16-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements, 2010.
<http://www.ti.com/lit/gpn/ads1294>.
- [95] Texas Instruments. ADS1198ECG-FE ECG Front-End Performance Demonstration Kit User's Guide, 2010.
<http://www.ti.com/litv/pdf/sbau180>.
- [96] Texas Instruments. Analog Front-End Design for ECG Systems Using Delta-Sigma ADCs, 2010.
<http://www.ti.com/litv/pdf/sbaa160a>.
- [97] P. Copley Jim Williams, J. Brubaker, J. Guerrero, and F. Oprescu (Linear Technology). A Standards Lab Grade 20-Bit DAC with 0.1ppm/°C Drift, 2001.
<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an86f.pdf>.
- [98] ST Microelectronics. BAT20J High Efficiency Switching and Ultra Low Leakage Current Schottky Diode, 2004.
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/10312.pdf>.

- [99] Philips. Power Light Source LUXEON K2 Technical Datasheet DS51, 2008.
<http://www.philipslumileds.com/uploads/54/DS51-pdf>.
- [100] Philips. LUXEON® Rebel ES Technical Datasheet DS61, 2010.
<http://www.philipslumileds.com/uploads/17/DS61-pdf>.
- [101] NXP (Philips). 1PS70SB10; 1PS70SB14; 1PS70SB15; 1PS70SB16 Schottky barrier (double) diodes, 1999.
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1PS70SB10_14_15_16.pdf.
- [102] NXP (Philips). BAV199 Low-leakage double diode, 2001.
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BAV199.pdf.
- [103] NXP (Philips). BAS416 Low-leakage diode, 2004.
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BAS416.pdf.
- [104] NXP (Philips). BAS45AL Low-leakage diode, 2010.
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BAS45AL.pdf.
- [105] National Semiconductor. Current-Feedback Myths Debunked, 1992.
<http://www.national.com/an/0A/0A-20.pdf>.
- [106] National Semiconductor. LMF100 High Performance Dual Switched Capacitor Filter, 1999.
<http://www.national.com/pf/LM/LMF100.html>.
- [107] Uwe Siart. Das Dezibel – Definition und Anwendung, 2009.
<http://www.siart.de/lehre/dezibel.pdf>.
- [108] Jim Williams (Linear Technology). Component and Measurement Advances Ensure 16-Bit DAC Settling Time, 1998.
<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an74f.pdf>.
- [109] Linear Technology. LT1021 Precision Reference, 1995.
<http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1021fc.pdf>.
- [110] William C. Rempfer (Linear Technology). The Care and Feeding of High Performance ADCs: Get All the Bits You Paid For, 1997.
<http://cds.linear.com/docs/Application%20Note/an71.pdf>.
- [111] Wikipedia. Fast Fourier Transformation, 2011.
<http://en.wikipedia.org/wiki/FFT>.

- [112] Jim Williams. 20-bit DAC demonstrates the art of digitizing 1 ppm Part 1: exploring design options, 2001.
<http://www.edn.com/file/21715-74453.pdf>.
- [113] WIMA. WIMA FKP 1 Datenblatt.
http://www.wima.com/EN/WIMA_FKP_1.pdf.

C Updates

Die jeweils aktuellste Version dieser Arbeit, der Quelltexte und der Hardwareokumentation 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