

## Pulsfrequenzmodulierte Visible Light Communication für vernetzte LED-Beleuchtung

Florian Knobloch  
Fachhochschule Brandenburg  
Fachbereich Technik  
Magdeburger Str. 50  
14770 Brandenburg an der Havel  
florian.knobloch@fh-brandenburg.de

Sebastian Slomczyk  
FMN communications GmbH  
Development  
Grimmelallee 4c  
D-99734 Nordhausen  
sebastian.slomczyk@fmn.de

### 1. Abstract

**Für individualisierte Beleuchtungen, bedarf es einer Kommunikation zwischen den Leuchten. Hierfür kann LED-Licht genutzt werden. Für die optische kabellose Kommunikation im sichtbaren Lichtbereich (bzw. Visible Light Communication – VLC) kann eine diskrete Pulsfrequenzmodulation (PFM) für den Einsatz mit indirektem Licht genutzt werden. Ein Konzept zur Pulsfrequenzmodulation (PFM) wird vorgestellt und experimentell analysiert. Aufbau und Funktionsweise der PFM werden anhand einer Simulation des Empfängers vorgestellt. Daran anschließend wird in der Sicherungsschicht das Listen-Before-Talk-Verfahren zum koordinierten Kanalzugriff erläutert.**

**Key Words:** VLC, visible light communication, optical wireless network, light energy saving, PFM, pulse frequency modulation

### 2. Einleitung

Optische Freistrahübertragung ist eine attraktive und nützliche Technologie für die drahtlose Kommunikation über Beleuchtungstechnik. Immer wenn LED-Leuchtmittel eingesetzt werden, kann das Licht zusätzlich als Kommunikationsmedium genutzt werden. Dafür werden in der vorliegenden Arbeit gängige Methoden und

ein neu entwickelte Verfahren vorgestellt. Das neue Pulsfrequenzverfahren nutzt die hochfrequenten LED-Schaltzeiten aus. Darüber hinaus bietet die LED eine sehr gute elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gegenüber Störungen von und durch andere technischen Anlagen und sie kann eine positive Wirkung auf die menschliche Physiologie haben. Eine erfolgreiche Kommunikation kann nur sichergestellt werden, wenn alle Teilnehmer möglichst gleichberechtigt Daten versenden können und die übermittelten Daten korrekt sind. In den folgenden Kapiteln wird erläutert, welche Verfahren verwendet werden um diese Ziele zu erreichen.

#### 2.1 Übertragungsmethoden

Ein wesentliches Kriterium ist bei der optischen kabellosen Kommunikation im sichtbaren Lichtbereich die Möglichkeit der Dimmung der Helligkeit. Dimmung wird durch zwei Verfahren erreicht. Die einfachste Variante ist die Überlagerung eines Offsetpegels über das Datensignal [1][2]. Bei der zweiten Variante werden pulsformige Träger eingesetzt, wie die Pulsweitenmodulation (PWM) [3] [4]. Der Tastgrad regelt dabei die Helligkeit. Die Datenmodulationen hängen wesentlich von diesen beiden Verfahren ab. Sinusförmige Träger werden häufig auf einen DC-Anteil aufmoduliert. Digitale Modulationen wie On-Off-Keying (OOK) und Pulsphasenmodulation (PPM) verwenden die PWM-

Dimmung. Die Übertragung mittels Licht unterscheidet sich von elektromagnetischen Verfahren durch den fehlenden negativen Pegelwert. Positive Pegelwerte entsprechen der Lichtintensität. Eine Anzahl von Photonen kann nicht negativ sein. „Negative Zustände“ können nur durch eine zusätzliche Offsetüberlagerung herbeigeführt werden. Dies wird bspw. bei der DC-biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DCO-OFDM) durchgeführt. Alle IQ-basierten Verfahren mit sinusförmigen Trägern benötigen im optischen Bereich eine Offsetüberlagerung. Aus diesem Grund können in der optischen Datenübertragung nur Modulationen eingesetzt werden, die reellwertige, positive Signale erzeugen [5] [6][7] [8] [9]:

- On-Off keying (OOK)
- Puls-Phasen Modulation (PPM)
- Pulse-Amplitude Modulation (PAM)
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), bei VLC insbesondere
  - DC-biased optical OFDM (DCO-OFDM)
  - asymmetrically-clipped optical OFDM (ACO-OFDM)
  - unipolar OFDM (U-OFDM)

Im Bereich der Pulsmodulationen gibt OOK, PPM und PAM. Bei OOK und PPM wird das Zeitverhalten moduliert, bei PAM die Signalamplitude. Es existieren noch weitere Varianten wie Bi-Phase Modulation BPM und Orthogonal Pulsmodulation (OPM), welche nicht weiter betrachtet werden.

### 3. PHY Layer Konzept mit Pulsfrequenzmodulation

Die Pulsfrequenzmodulation (PFM) zählt zu den zeitbasierten Modulationen. Dabei wird die PWM-Frequenz moduliert. Für bspw. zwei Bitzustände 0 und 1 können zwei PWM-Frequenzen geschaltet werden. Die Rechteckfrequenzen können im Empfänger in die Bitwerte demoduliert werden. Dazu muss die Zeit zwischen den PWM-Flanken gemessen werden. Bei optischen Modulationen im sichtbaren Lichtbereich muss auf Helligkeitsschwankungen geachtet werden. Das menschliche Auge nimmt fla-

ckerndes Licht und Clipping Fehler störend war. Dadurch, dass beim Schalten der PWM-Frequenzen der Tastgrad unverändert bleibt, ändert sich nicht die Lichtintensität. Bei DC-basierten Modulationen schwankt die Lichtintensität um den Offsetanteil. Wird der Offset zur Dimmung sehr hoch oder niedrig (entsprechend sehr hell oder dunkel) eingestellt, bleibt nur ein geringer Modulationsgrad übrig. Die Leistung des LED-Treibers stellt die obere Grenze der Lichtleistung dar. Die untere Grenze resultiert durch das Fehlen eines Lichtstroms. Bei extrem hohen und niedrigen Dimmwerten können daher keine verzerrungsfreien amplitudenbasierte Modulationen durchgeführt werden. PFM nutzt verschiedene Frequenzen zur Datenmodulation im Bereich von 100 Hz bis ca. 1 MHz. Damit lassen sich theoretisch zusätzliche Frequenzmultiplexsysteme zur adaptiven Datenratenanpassung nutzen. Im Folgenden wird eine PFM vorgestellt, bei der die Datensignale über die Frequenz von pulsförmigen Rechteckträgern moduliert werden (diskrete Pulsfrequenzmodulation). Die Variation der Helligkeit erfolgt über den Tastgrad.

#### 3.1 Sender

Im vorliegenden Szenario aus Abbildung 1 wird eine linienförmige Anordnung der Leuchten gezeigt. Jede Leuchte fungiert als Sender und Empfänger. Sie strahlen eine kreisförmige Fläche auf den Boden ab. Die benachbarten Leuchten empfangen das reflektierte Licht, da Licht in alle Richtungen reflektiert. Im Szenario fungiert links ein Empfänger und daneben zwei Sender. Die Sender senden jeweils ein Bit 0 und ein Bit 1 parallel. Für Bit 0 wird eine PWM-Frequenz von 10 kHz und für Bit 1 16 kHz moduliert. Mit zunehmender Entfernung sinkt die empfangene Helligkeit. In Abbildung 2 wird der Zeitverlauf der drei gesendeten PWM-Signale dargestellt. Weil der Empfänger auch Licht aussendet, wird eine Signalfrequenz von  $f_{\text{sig1}} = 200 \text{ Hz}$  PWM Frequenz eingestellt. Es hat die größte empfangene Helligkeit von 100 lx, weil das eigene Licht am meisten reflektiert.

### Line Szenario

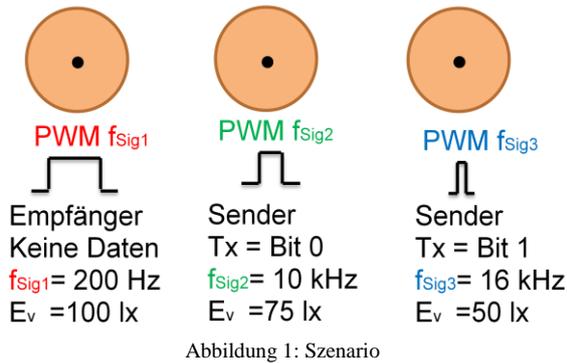


Abbildung 1: Szenario

Obwohl sie Licht aussendet, empfängt sie die anderen PWM-Frequenzen der benachbarten Sender.

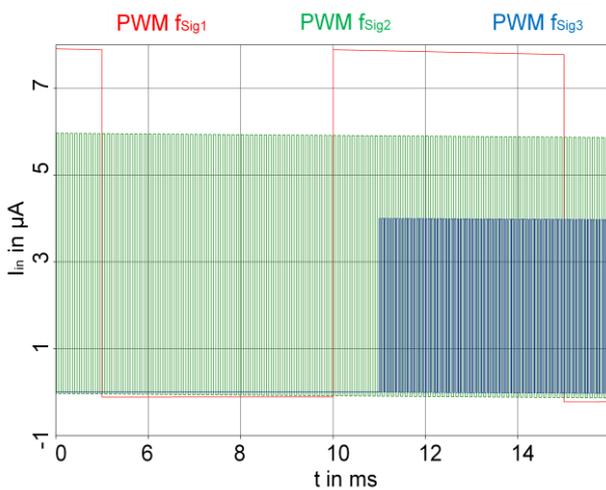


Abbildung 2: PWM Sendefrequenzen

Die PWM der Signalfrequenz  $f_{Sig2}$  wird nur mit 75 lx und  $f_{Sig3}$  aufgrund der größeren Entfernung mit 50 lx empfangen. Die Signalfrequenz  $f_{Sig3}$  wird erst ab einer Zeit von 11 ms dazu geschaltet. Das Licht wird über eine Fotodiode in einen Fotostrom umgewandelt. Dieser Eingangsstrom entspricht folgenden Werten:

- **PWM  $f_{Sig1}$**  = 200 Hz mit 8  $\mu\text{A}$
- **PWM  $f_{Sig2}$**  = 10 kHz mit 6  $\mu\text{A}$
- **PWM  $f_{Sig3}$**  = 16 kHz mit 4  $\mu\text{A}$  ab 11 ms

Im Szenario bleibt der PWM Tastgrad, zur Steuerung der Helligkeit, unverändert auf 50 %. Andere Tastgrade verändern nichts am Prinzip der PFM-Datenübertragung.

## 3.2 Empfänger

Der Empfänger wurde mit SPICE simuliert. In Abbildung 3 besteht er aus zwei Operationsver-

stärker des Typs OPA657 mit Transimpedanz- und Differentialverstärkung. Über eine symbolisch dargestellte Fotodiode des Typs BPW34 werden die drei PWM-Frequenzen zu den OPV Stufen geleitet.

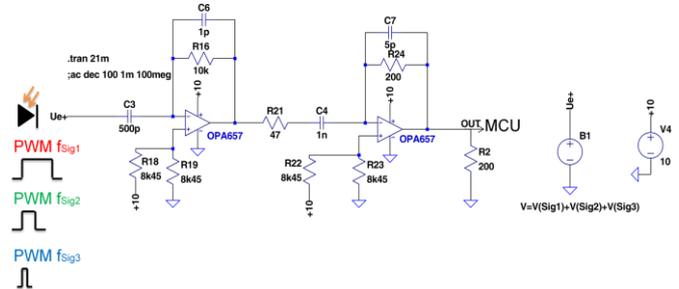


Abbildung 3: Empfängerschaltung

Der parallele Empfang entspricht einer Addition der Lichtpegel. Dies wird in Abbildung 4 gezeigt.

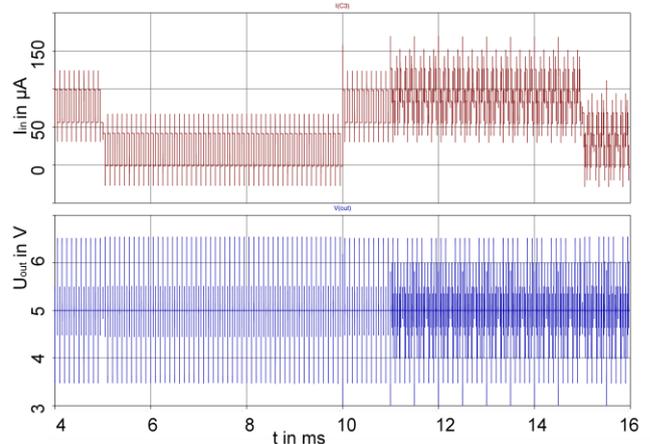


Abbildung 4: Simulation mit gesamtem Zeitverlauf

In der oberen Ansicht wird der empfangene Fotostrom rot markiert dargestellt. Man erkennt, dass die 200 Hz PWM überlagert wird von einer 10 kHz PWM und ab 11 ms zusätzlich mit einer 16 kHz PWM. In der unteren Ansicht wird blau markiert die verstärkte Ausgangsspannung nach den OPV Stufen gezeigt. Es fällt der ausgekoppelte Gleichanteil auf. Durch den Differentialverstärker werden nur die hochfrequenten Flanken der PWM verstärkt. Die PFM modulierten Signale können folgendermaßen charakterisiert werden:

### Eingangsstrom:

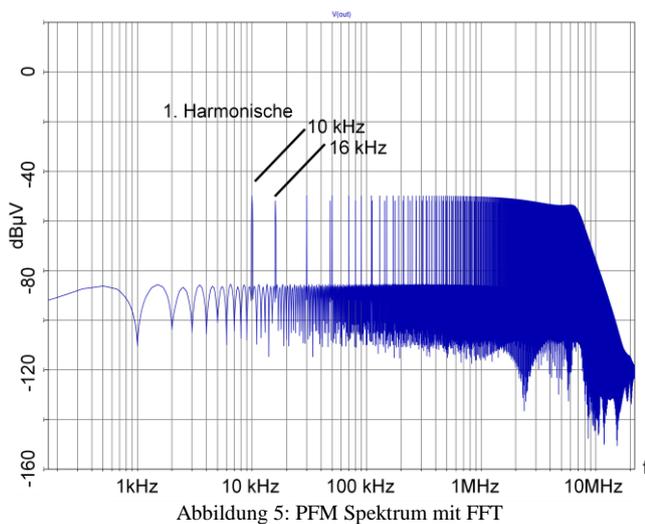
- Sieben diskrete Pegelwerte bei drei Leuchten
- Anzahl der Mehrbenutzerzugriffe erhöht Amplitude des Eingangsstroms

Ausgangsspannung:

- Flanken invertiert
- nach TIA Differentiator
- Steilheit = 79,2 V/ $\mu$ s

Die steilen Impulse der Ausgangsspannung  $U_{out}$  können anschließend von weiteren Recheneinheiten wie Mikrocontroller oder DSP zur Demodulation genutzt werden. Prinzipiell reicht eine Zeitmessung zwischen den dirac-ähnlichen Impulsen zur Bestimmung der PWM-Frequenz und damit des Bitstroms.

In Abbildung 5 wird das Spektrum des verstärkten Ausgangssignals  $U_{out}$  aus Abbildung 5 gezeigt.



Hier wird ersichtlich, dass auch über den Frequenzbereich die 10 und 16 kHz isoliert werden können. Die spektralen Anteile erscheinen zweigeteilt. Einmal der Bereich zwischen -50 und -88 dB und einmal  $< -88$  dB. Eine genaue Untersuchung dieses Phänomens ist Bestandteil weiterer Arbeiten.

## 4. Sicherungsschicht

Das OSI-7-Schichtenmodell wird meist als Referenzmodell für herstellerunabhängige Kommunikationssysteme verwendet. Jede Schicht bietet der darüber liegenden Schicht definierte Dienste an und nutzt seinerseits die Dienste der darunter liegenden Schicht.

Die Sicherungsschicht ist für den unverfälschten Datentransport über einen einzelnen Übermittlungsabschnitt zuständig. Die Flusssteuerung

überwacht die vollständige und richtige Übertragung der Daten von darüberliegenden Schichten. Gemäß IEEE kann die Sicherungsschicht in Media Access Control (MAC) und Logical Link Control (LLC) unterteilt werden. Im folgenden Abschnitt sollen einige Details der MAC Layer erläutert werden.

### 4.1 Licht als Shared Medium

Die Nutzung des sichtbaren Lichts zur Übertragung ähnelt der Verwendung von Funknetzen. Alle Netzwerkstationen haben Zugriff auf das Übertragungsmedium und teilen sich dieses. Der Sendebetrieb einer einzigen Station blockiert alle anderen, die sich in Reichweite befinden. Die Reichweite des Signals ist stark begrenzt, da der Empfangspegel quadratisch mit der Entfernung abnimmt. Eine Kollisionserkennung wie bei drahtgebunden Medien ist nicht möglich. Um Kollisionen zu vermeiden bedient man sich dem Verfahren „listen before talk“.

### 4.2 Listen Before Talk (LBT)

LBT ist eine Technik um zu überprüfen, ob der Übertragungskanal frei ist oder nicht. Dazu hört die sendewillige Station das Übertragungsmedium ab. Bleibt das Medium eine gewisse Zeit frei beginnt die Station mit der Übertragung. Wenn eine aktive Datenübertragung erkannt wird, wartet die Station ab und überprüft dann erneut ob das Übertragungsmedium frei ist. Alle Stationen im Netzwerk sollen die Möglichkeit haben, ihre Daten zu verschicken. Außerdem können in größeren Netzwerken mehrere Stationen gleichzeitig kommunizieren, wenn sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. In Netzwerken, die nach dem LBT-Verfahren funktionieren, gibt es allgemein zwei Probleme, das Hidden-Station-Problem und das Exposed-Node-Problem. Das Exposed-Node Problem verringert den maximal erzielbaren Datendurchsatz eines Netzwerkes, soll aber hier nicht weiter betrachtet werden.

Zur Erläuterung des Hidden-Station-Problems gehen wir von drei Stationen (A, B, C) aus (siehe Abbildung 6: Hidden-Station-Problem). Eine Station kann nur mit einer anderen kommunizie-

ren, wenn Sie sich innerhalb des eigenen Radius befindet. Station A und C können sich nicht gegenseitig empfangen. Station B kann beide Stationen empfangen. Station A sendet aktuell etwas an B. Möchte C ebenfalls etwas an B senden überprüft sie das Medium. Da Station C aber A nicht sieht geht sie davon aus, dass das Medium frei ist und beginnt mit dem Senden. Es kommt zu einer Kollision. In den weiteren Abschnitten wird deutlich, wie dieses Problem mittels des Ready-to-Send (RTS) und Clear-to-Send (CTS) Verfahrens verhindert werden kann.

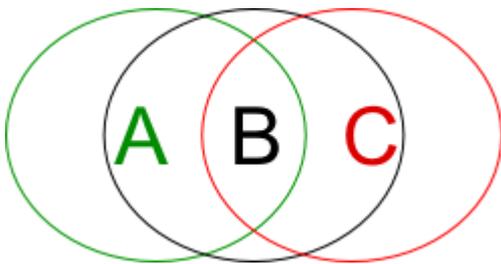


Abbildung 6: Hidden-Station-Problem

### 4.3 Realisierung LBT-Verfahren

Das für VLC eingesetzte Verfahren verwendet einen Mechanismus, den man als RTS/CTS bezeichnet. RTS steht für Request to Send, also die Anfrage mit dem Senden zu beginnen. CTS steht für Clear to Send, ist somit die Senderfreigabe. Die Abbildung 7: Ablauf des LBT-Algorithmus zeigt, welche Schritte notwendig sind, um das LBT-Verfahren in der gewünschten Form zu realisieren. Möchte eine Station (Sender) Daten versenden, erstellt sie ein Data Frame und prüft ob das Übertragungsmedium frei ist (Channel Idle). Falls nicht wird eine bestimmte Zeit (Backofftime) gewartet und danach erneut geprüft. Wenn das Übertragungsmedium frei ist, wird ein RTS Frame verschickt. Der Empfänger sollte den Empfang eines RTS Frames mit einem CTS Frame quittieren. Jetzt beginnt der Sender mit dem Datentransfer. Falls der Sender kein CTS Frame empfängt, wird wieder gewartet und ein neuer Versuch gestartet. Die Backofftime (bis zu einigen Millisekunden) ist eine zufällige Zeit, die nach jedem Wartezyklus neu initialisiert wird.

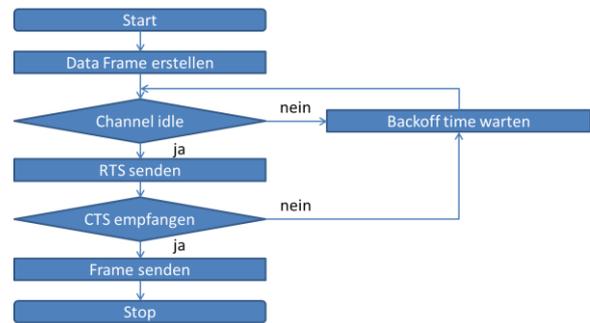


Abbildung 7: Ablauf des LBT-Algorithmus

### 4.4 Frameaufbau

Es gibt vier verschiedene Typen von Frames:

- RTS Frame
- CTS Frame
- Data Frame
- ACK Frame

Abbildung 8: Datenframe (Data Frame) zeigt exemplarisch welche Informationen ein Datenframe enthält. RTS, CTS und ACK Frame unterscheiden sich vom Datenframe nur darin, dass sie keine Daten enthalten und der Frametype ein anderer ist.

Die Dauer der Übertragung (Duration) ist abhängig von der Menge der Daten in einem Frame. Damit andere Stationen wissen, wie lang die Übertragung dauern wird, enthält jeder Frame zu Beginn diese Information. Das ermöglicht die Optimierung von Wartezyklen.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	n
Frame-type	Duration	Network ID	Destination-Address	Source-Address	Data					

- Frametype: Data
- Duration: Übertragungsdauer des Datenframes
- Network ID: ID der Netzwerkzugehörigkeit
- Destination Address: MAC-Adresse des Empfängers
- Source Address: MAC-Adresse des Senders
- Data: zu übertragende Nutzdaten

Abbildung 8: Datenframe (Data Frame)

### 4.5 Reaktion anderer Stationen

Abbildung 9: Kommunikation zwischen vier Stationen zeigt den Ablauf des RTS/CTS-Verfahrens mit zwei weiteren Stationen. Der Sender kommuniziert mit dem Empfänger und schickt dazu ein RTS Frame. Der Empfänger schickt als Bestätigung ein CTS Frame, welches durch den Sender empfangen wird. Danach be-

ginnt die Datenübertragung. Die Station X steht in direkter Nähe zum Sender und Empfänger und empfängt das RTS-Packet vom Sender. Daraufhin sperrt sich Station X selbstständig und unternimmt keine Übertragungsversuche in dieser Zeit (Duration). Station Y befindet sich nur in Reichweite des Empfängers. Eine Reaktion auf das RTS-Packet vom Sender kann nicht erfolgen. Station Y sperrt sich erst nach dem Empfang des CTS Frames vom Empfänger. Jetzt warten beide, Station X und Station Y, bis die Übertragung zwischen Sender und Empfänger abgeschlossen ist.

SIFS (Short Interframe Space) und DIFS (Distributed Coordination Function Interframe Space) sind Timer die zur korrekten Funktion (z.B. Sender/Empfängerumschaltung) des Verfahrens benötigt werden.

Grundsätzlich kann man sagen, dass alle Stationen, die den Sender nicht empfangen können jedoch den Empfänger, durch den Empfang des CTS Frames davon in Kenntnis gesetzt werden, dass der Empfänger jetzt kommuniziert. Alle Stationen setzen solange die Datenübertragung aus, wie der Sender sendet. Das verhindert die Störung der Übertragung durch andere Stationen wirkungsvoll. Das Hidden-Station-Problem wird somit aktiv verhindert.

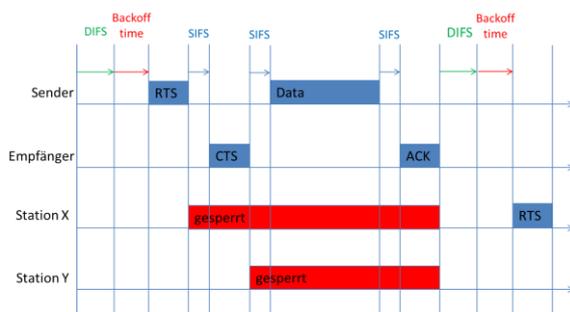


Abbildung 9: Kommunikation zwischen vier Stationen

## 5 Testergebnis

In den Abbildungen 10 und 11 wird eine praktisch durchgeführte PFM-Demodulation im Zeitbereich gezeigt. Am HAMEG-HMO1024-Oszilloskop werden vier Signale dargestellt:

- Gelb:** Lampe 1 mit  $f_1 = 7,8 \text{ kHz}$
- Blau:** Lampe 2 mit  $f_2 = 62 \text{ kHz}$
- Pink:** empfangenes Signal (invertiert)
- Grün:** demoduliertes Signal

Die PWM Frequenzen stimmen hier nicht mit der Simulation überein. Auch wurde der Tastgrad auf 10 % AN-Phase gesetzt.

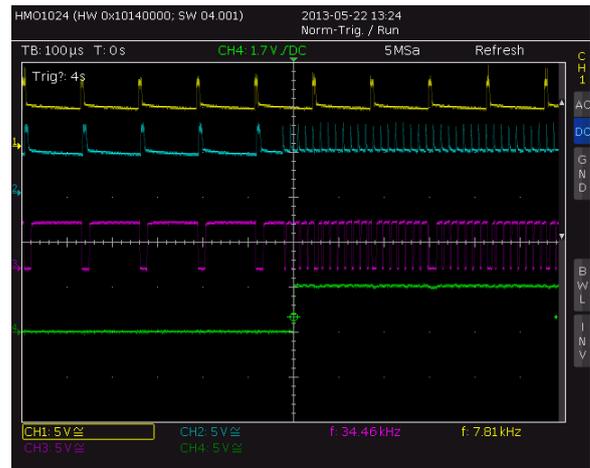


Abbildung 10: Bitwechsel auf 1

Das untere Signal setzt bei Empfang einer höheren Frequenz das Bit von 0 auf 1.

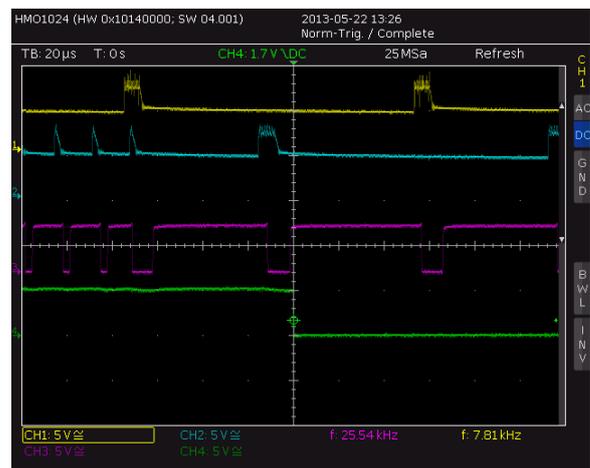


Abbildung 11: Bitwechsel auf 0

Im umgekehrten Fall wird eine 0 demoduliert. Die höhere Frequenz schaltet in eine niedrigere, damit weiß der Empfänger, dass das Bit 0 demoduliert werden soll. Je nach Leitungscodierung und Übertragungsprotokoll können die Bits invertiert sein. In Abbildung 12 wird ein Prototypaufbau der FH Brandenburg gezeigt.

Es sind links vier LED-Leuchten in einer Reihe angeordnet. Zum Vergleich des Größenverhältnisses steht rechts eine Straßenleuchte für Gehwegbeleuchtung. Eine VLC-Kommunikation mit PFM ist in dieser Anordnung möglich. Größere Reichweiten und Datenraten sind eine Frage der Optimierung der Sende- und Empfängermodule. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden Proto-

typen optimiert, die mit bis zu 38400 bit/s kommunizieren. Eine subjektive Störung durch Schwankungen der Helligkeit tritt nicht auf.



Abbildung 12: Prototypaufbau

## 6 Zusammenfassung

In diesem Paper wird ein Verfahren zur pulsfrequenzmodulierten Datenübertragung für die Kommunikation über sichtbares Licht (VLC) vorgestellt. Auf dessen Basis kann man mit PWM-Signalen Daten über das Licht übertragen. Dies wurde anhand eines typischen linienförmigen Anwendungsszenarios in LED-Strassenbeleuchtungsanlagen verdeutlicht. Zusätzlich zum PHY-Layer wurde das Listen Before Talk Verfahren zur koordinierten Zugriffskontrolle des Lichtkanals erläutert. Auf dem MAC Layer können nun weitere Schichten aufsetzen und diese zum Datenaustausch nutzen. Die Trennung in Schichten und die damit verbundenen begrenzten Aufgaben ermöglichen die Austauschbarkeit und begünstigen die Weiterentwicklung. Das diesem Paper zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung gefördert.

## 7 Referenzen

- [1] X. Yang, Z. Min, T. Xiongyan, W. Jian und H. Dahai, A post-processing channel estimation method for DCO-OFDM Visible Light Communication, *Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2012 8th International Symposium, 18-20 July 2012.
- [2] Y. Liu, C. Yeh und C. Chow, Alternating-Signal-Biased System Design and Demonstration for Visible Light Communication, *Photonics Journal*, IEEE, Aug. 2013.
- [3] J. Kim, K. Lee und H. Park, Power efficient visible light communication systems under dimming constraint, Sydney, NSW : *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2012 IEEE 23rd International Symposium on , 9-12 Sept. 2012 .
- [4] S. Rajagopal, R. Roberts und S.-K. Lim, IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support, *Communications Magazine*, IEEE , March 2012 .
- [5] R. Kraemer und M. Katz, „VLC,“ in *s Short-Range Wireless Communications*, John Wiley & Sons, 2009, p. 368.
- [6] „Purelifi modulation,“ 2014. [Online]. Available: <http://purelifi.co.uk/the-future-of-vlc-modulation-ofdm/>. [Zugriff am 28 02 2014].
- [7] „pureLiFi,“ 28 2 2014. [Online]. Available: <http://purelifi.co.uk/>.
- [8] O. Bouchet, P. Porcon, M. Wolf, L. Grobe, W. Joachim und S. Nerreter, „Visible-light communication system enabling 73 Mb/s data streaming,“ *Bd. Optical Wireless Communications*, 2010.
- [9] D. Giustiniano, N. O. Tippenhauer und S. Mangold, „Low-Complexity Visible Light Networking with LED-to-LED Communication,“ *IEEE Wireless Days*, 21 11 2012.