

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/280733402>

# Zusatzfunktionen und Mehrwertdienste mit LED-Beleuchtung: Visible-Light Communications

Conference Paper · November 2011

CITATIONS  
0

READS  
179

3 authors, including:




[Klaus-Dieter Langer](#)  
Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut  
139 PUBLICATIONS 2,114 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

 OWICELLS [View project](#)

 Multi-Service Access Everywhere (MUSE) [View project](#)

# **Zusatzfunktionen und Mehrwertdienste mit LED-Beleuchtung: Visible-Light Communications**

Dipl.-Ing. **K.-D. Langer**, Dr.-Ing. J. Vučić, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Berlin; fil. dr J. W. Walewski, Siemens AG, Corporate Technology, München

## **Kurzfassung**

Die Freiraumkommunikation mit Licht stellt eine interessante Zusatzfunktion für LED dar, die auch zu einer größeren und schnelleren Verbreitung dieser Technologie führen könnte. In diesem Artikel stellen wir das Arbeitsprinzip dar, gehen auf die damit verbundene aktuelle Forschung und Entwicklung ein, und diskutieren anschließend zahlreiche mögliche Anwendungsgebiete sowie den Stand der internationalen Standardisierung.

## **1. Historie und Motivation der Informationsverteilung mit LED-Licht**

Es ist inzwischen ein Allgemeinplatz, dass unsere moderne Kommunikationsinfrastruktur ohne optische Kommunikation nicht möglich wäre, denn ohne optische Übertragungstechnik und Glasfasern wäre der ständig wachsende Datendurchsatz im Internet nicht zu bewältigen. Aber auch in vielen anderen Gebieten finden optische Kommunikationsmethoden Anwendung. Beispiele hierfür sind der MOST-Bus für Medienkommunikation in Kraftfahrzeugen und der IrDA-Standard, welcher sich v.a. in Japan einer hohen Verbreitung erfreut. Die letztgenannte Anwendung hebt sich von der vorher genannten dadurch ab, dass sich die optische Strahlung hier ungehindert im freien Raum ausbreitet.

Während IrDA optische Strahlung im nahen infraroten Spektralbereich verwendet, ist auch schon seit langem die optische Freiraumkommunikation mit sichtbarer Strahlung bekannt, d.h. mit Licht. Frühe Beispiele hierfür sind die Signalisierung mit Feuer und das Photophone von Graham Bell (1880) [1]. Durch den überragenden Erfolg von Radiotechnologien, und durch deren intrinsischen Vorteile verblieb die optische Freiraumkommunikation mit Licht allerdings bisher eine Nischentechnologie. Eine dieser Nischenanwendungen nutzte die Abhörsicherheit der optischen Übertragungstechnik, nämlich die sogenannte Richtübermittlung

während des zweiten Weltkrieges [2].

Andere Ansätze, wie die Freiraumkommunikation mittels Leuchtstoffröhren, sind zwar in der einschlägigen Patentliteratur wohl dokumentiert (siehe z.B. [3]), erlebten aber nie einen kommerziellen Durchbruch. Das Interesse an dieser Art von Freiraumkommunikation erwachte jedoch wieder, als LED im sichtbaren Bereich mit zunehmend höherer Leistung abstrahlten. Waren diese LED anfänglich noch auf Signalisierungsanwendungen beschränkt, so zeichnete sich um die Jahrtausendwende ab, dass LED in wenigen Jahren auch weitgehend Beleuchtungsfunktionen würden übernehmen können. Wie vorher bei den Leuchtstoffröhren waren hier erneut Anwendungen von Interesse, die neben der Leuchtfunktion der LED auch die Freiraumübertragung von Daten umfassen [4]. Zu dieser Zeit wurde auch ein gängiger Begriff für diese Art von Kommunikation geprägt: Visible-Light Communications (VLC). Hauptgründe für das wiedererwachte Interesse sind die leichte Modulierbarkeit von LED mittels des Treiberstroms, aber auch die Modulationsbandbreite (typischerweise im MHz-Bereich).

Was die Attraktivität dieser Technologie angeht, so werden in der technischen Literatur häufig die folgenden Vorteile gegenüber Radiotechnologien genannt:

- Das benutzte Spektrum ist lizenzfrei und unreguliert.
- Elektromagnetische Interferenz mit Radiowellen ist nicht existent.
- Licht wird durch undurchsichtige Materialien sehr gut abgeschirmt und kann außerdem durch strahlformende Elemente sehr leicht örtlich konzentriert werden. Dadurch lassen sich sehr leicht kleine, abhörsichere „Funkzellen“ bewerkstelligen.

## **2. Prinzip der Informationsverteilung mit LED-Licht**

Das Funktionsprinzip von VLC ist äußerst simpel: die von einer Lichtquelle ausgesendete Lichtmenge wird zeitlich so variiert, dass damit die zu übertragende Information codiert wird. Eine Funktionsskizze mit einer weißen LED als Lichtquelle ist in Bild 1 (links) dargestellt. Eine Treiberschaltung ändert den Betriebsstrom der LED anhand des zu übertragenden Signals. Ein eingängiges Beispiel hierfür ist das sogenannte On-Off-Keying (OOK). Soll eine logische „0“ übertragen werden, so wird wenig (oder kein) Licht ausgestrahlt, während für eine logische „1“ ein höherer (oder maximaler) Lichtpegel ausgestrahlt wird. Es sind natürlich auch andere aus der Nachrichtentechnik bekannte Modulationsformate anwendbar, beispielsweise Puls-Positionsmodulation (PPM) [5] und diskrete Multitöne (DMT) [6].

Obwohl es nicht Teil der Definition von VLC ist, wird in der technischen Literatur oftmals implizit davon ausgegangen, dass die LED derart moduliert werden, sodass für das menschi-

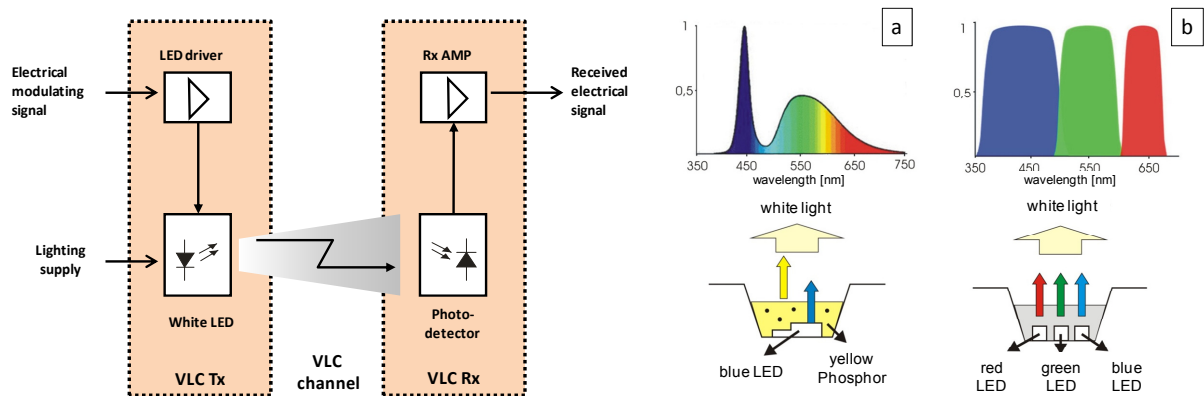


Bild 1: Funktionsprinzip von VLC (links) und zwei Typen der Weißlicht-LED (rechts).

che Auge kein wahrnehmbares Flackern entsteht. Um dies zu bewerkstelligen, wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen (siehe beispielsweise [7], [8], [9]).

Das ausgesandte Licht breitet sich durch den Freiraum aus und wird am Empfangsort (VLC Rx) von einem Photodetektor – beispielsweise einer PIN-Diode oder einer Avalanche Photodiode (APD) – nachgewiesen. Um die Lichtausbeute des Detektors zu erhöhen, wird oftmals eine Sammelloptik davor angebracht [10]. Anstelle von Photodetektoren können auch andere lichtempfindliche Sensoren verwendet werden, z.B. Bildsensoren (Charge-Coupled Devices, CCD), wie sie sich in jeder Kamera befinden. Bildsensoren können Helligkeitsschwankungen von Bildpunkten mithilfe der Bildsignalverarbeitung erkennen. Insofern ist eine präzise örtliche Auflösung und simultaner Empfang von mehreren Lichtquellen möglich. Allerdings begrenzt die notwendige Signalverarbeitung die Datenrate auf den Bereich von deutlich unter 1 Mb/s für Bildsensoren im Konsumenten-Elektronik-Bereich, während sich Photodetektoren eher für Hochgeschwindigkeitsanwendungen eignen. Weitere Details zur Anwendung von Bildsensoren finden sich z.B. in [11]; siehe auch Kapitel 4.

Angesprochen werden im Folgenden ausschließlich LED, die für Beleuchtungs- und Signalisierungszwecke bestimmt sind. Bei den Weißlicht-LED muss zwischen zwei Typen unterschieden werden: der wohl am weitesten verbreiteten blauen LED, welche mit einer (gelben) Phosphorschicht überzogen ist, und der aus drei einzelnen LED bestehenden RGB-Variante (Bild 1 rechts). Bei der Ph-basierten LED begrenzt das träge Verhalten der Ph-Komponente die Modulationsbandbreite auf den unteren MHz-Bereich. Wir haben demonstriert, dass sich die Bandbreite um eine Größenordnung erhöhen lässt, wenn man den Ph-Anteil aus dem optischen Spektrum durch ein optisches Filter (vor dem Detektor) entfernt. Dadurch ergibt sich ein Potenzial zur Übertragung von mehreren 100 Mb/s im Innenbereich [12], [13]. Gleichwohl stellt die resultierende Bandbreite des LED-Chips (10 - 20 MHz, auch auf den RGB-Typ zu-

treffend) eine Herausforderung für die Realisierung hoher Übertragungsraten dar.

Die folgenden Kapitel beschreiben den Stand der Technik von VLC (Kapitel 3) sowie wesentliche Anwendungsgebiete kombinierter LED-Beleuchtung und Datenübertragung (Kapitel 4). Kapitel 5 adressiert den Stand der Standardisierung. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

### 3. Stand der Technik LED-basierter Drahtloskommunikation

Im einfachsten Fall kann die Übertragung analoger elektrischer Signale direkt nach dem in Bild 1 skizzierten Prinzip erfolgen. Voraussetzung bei allen Übertragungsmethoden und -protokollen ist, dass die Systembandbreite ausreicht. So wurde beispielsweise mit einem bidirektionalen Übertragungssystem, das in einer Richtung weißes und in der Gegenrichtung infrarotes Licht verwendet, der direkte Einsatz in einer 10BaseT-Ethernetverbindung demonstriert [14], Bild 2. Ein eigenes Übertragungsprotokoll für die drahtlose Strecke war hierbei nicht erforderlich. Die Bandbreite von phosphor-basierten Weißlicht-LED setzt der Übertragungsgeschwindigkeit allerdings enge Grenzen.

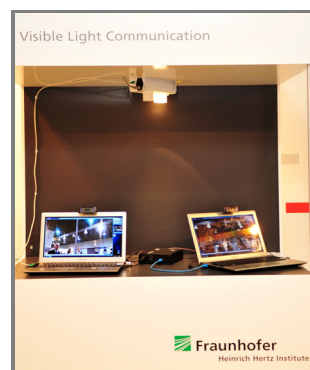


Bild 2: Voll-Duplex Videoverbindung (10 Mb/s Ethernet) mittels VLC (downlink) und Infrarot (uplink), demonstriert auf der Internationalen Funkausstellung Berlin 2011.

Eine Steigerung der Datenrate erfordert daher mindestens den Einsatz von Fehlerkorrekturverfahren (FEC). Mit dieser Maßnahme konnten bei OOK-Übertragung, 1000 Lux am Empfangsort, und Verwendung eines PIN-Empfängers Datenraten von 125 Mb/s, bzw. mit einem APD-Empfänger sogar 230 Mb/s erzielt werden [15]. Bild 3 zeigt, dass dank FEC auch bei deutlich geringerer Helligkeit noch Datenraten von 100 Mb/s und mehr möglich sind.

Sollen mit der begrenzten Modulationsbandbreite der für Beleuchtungszwecke konstruierten LED noch höhere Datenraten erzielt werden, so ist eine spektral effizientere Modulation erforderlich, wie sie beispielsweise auch in der DSL- und der Funktechnik Anwendung findet.

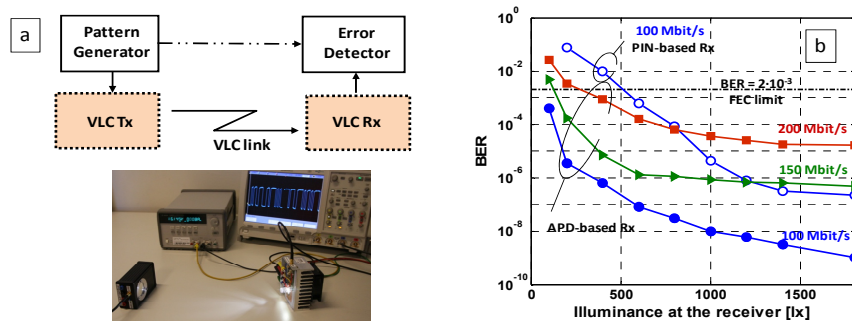


Bild 3: Versuch zur binären Übertragung bei 125 und 230 Mb/s.

Der Einsatz von DMT erlaubt 230 Mb/s mit einem einfachen PIN-Empfänger [16], während mithilfe eines APD-Empfängers sogar 513 Mb/s erreicht werden konnten [6]. Diese in Bild 4 skizzierten Versuche wurden mittels Off-line-Processing durchgeführt, einem anerkannten Verfahren, das keine Hardware-Implementierung von Modulator und Demodulator erfordert. Stattdessen wird das Sendesignal mithilfe eines entsprechend programmierten Signalgenerators erzeugt. Empfängerseitig werden die detektierten Signale aufgezeichnet und Off-line mit geeigneter Software ausgewertet.

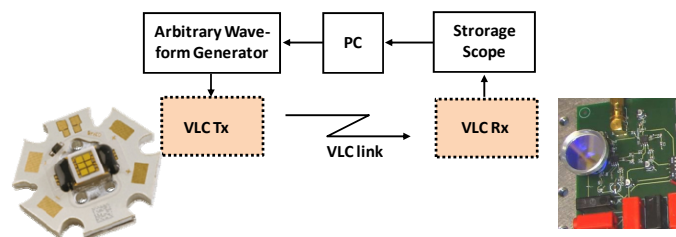


Bild 4: Übertragungsexperiment mit phosphorierter LED bei einer Rekorddatenrate von 513 Mb/s.

Weißlicht-LED, die auf RGB-Chips basieren, erlauben die Übertragung im Wellenlängen-Multiplex (WDM) mit allen drei Farben. Dies eröffnet die Möglichkeit einer Separierung von Diensten oder Nutzern, und natürlich eine entsprechende Steigerung der gesamten Übertragungskapazität. Unlängst haben wir mithilfe einer kommerziell erhältlichen RGB-LED und

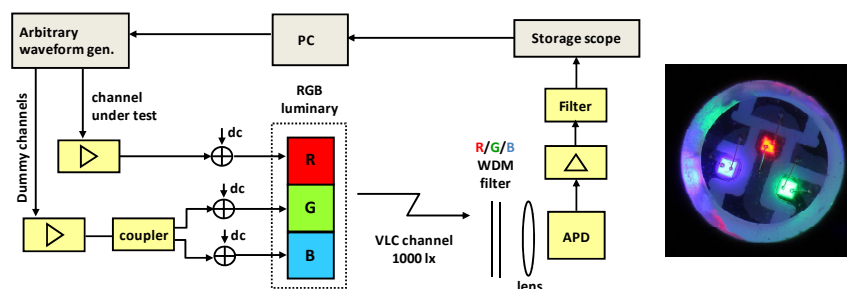


Bild 5: Schematischer Aufbau des Experiments zur Mehrkanalübertragung im Wellenlängenmultiplex mittels RGB-LED-Modul. Erzielt wurden 294, 223 u. 286 Mb/s (R,G,B).

WDM eine Übertragungsrate von insgesamt 803 Mb/s demonstriert [17]. Wie im Bild 5 dargestellt ist, wurden in diesem Versuch (mit Off-line Processing) Daten auf allen drei Kanälen gleichzeitig ausgestrahlt, und sequentiell wurde jeweils ein Kanal mit entsprechendem Farbfilter vor dem Empfänger ausgewertet. In der Praxis arbeiten derartige Systeme also mit drei individuellen Sendern und Empfängern. Erwähnenswert ist, dass es sich bei sämtlichen Schlüsselkomponenten dieses Versuchs um kommerziell verfügbare Produkte handelt.

Ein vollständiges Demonstrationssystem wurde im Rahmen des EU-Vorhabens OMEGA entwickelt und der Öffentlichkeit präsentiert [18] [19]. Das System arbeitet mit einer Datenrate von 100 Mb/s (netto) und kann z.B., wie in Bild 6 illustriert, simultan 4 HD-Video-Ströme (je ~20 Mb/s) über Deckenlampen verteilen. 16 LED-Lampen versorgen dabei eine Fläche von ~10 m<sup>2</sup>. DMT-Modulator und -Demodulator, FEC, sowie die gesamte Synchronisation und ein speziell entwickeltes MAC-Protokoll wurden dafür in FPGA-Technik implementiert [14].

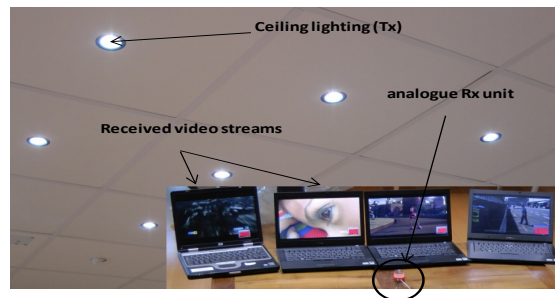


Bild 6: Verteilung von Videosignalen mit DMT-modulierten Signalen bei 100 Mb/s über die Raumbelichtung, demonstriert in den Orange-Labs (Rennes, Frankreich) [14].

Bezüglich der Reichweite ist zu sagen, dass die erwähnten Experimente und Demonstrationen allesamt bei einer Beleuchtungsstärke von 400 - 1000 Lux am Empfänger durchgeführt wurden. Dieser Wert entspricht den Beleuchtungsanforderungen von Arbeitsplätzen. D.h. die Distanz zwischen Lampe und beleuchteter Fläche lässt sich übertragungstechnisch stets überbrücken, wenn der Empfangsort entsprechend einem Arbeitsplatz ausgeleuchtet ist. Die Link-Länge hängt natürlich stark von der Datenrate ab.

#### 4. Anwendung kombinierter LED-Beleuchtung und Datenübertragung

Vier große Anwendungsbereiche für VLC sind die lokale Informationsverteilung, die Navigation, optisches WLAN und die Unterwasserkommunikation. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten [20], und ganz bestimmt ist das Anwendungspotenzial von VLC noch nicht vollständig erfasst. Beispiele für die vier genannten Bereiche werden im Folgenden grob adressiert.

Die lokale Informationsverteilung kann z.B. Erläuterungen zu LED-beleuchteten Exponaten in Ausstellungen, Museen usw. liefern (Bild 7 links). Prädestiniert für derartige Anwendungen, die mit relativ geringer Bitrate auskommen, sind Bildsensor-Empfänger. Eine Integration in Geräte wie Handys, die ohnehin damit ausgerüstet sind, liegt sehr nahe. In ähnlicher Weise können LED-basierte Leuchtreklamen Informationen zu den beworbenen Gegenständen verbreiten.

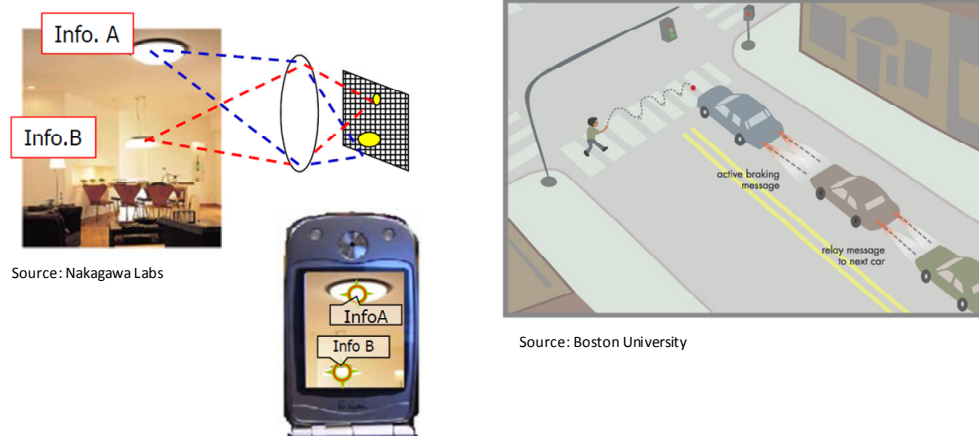


Bild 7: Anwendungsbeispiele für lokale und ortsbezogene Informationsverteilung [11], [21].

Denkbar sind ferner Assistenzsysteme, z.B. für sehbehinderte Personen, denen Verkehrsampeln per VLC signalisieren können, dass die Fußgängerampel auf grün bzw. rot geschaltet ist. Ein weiteres, in Bild 7 (rechts) dargestelltes Anwendungsbeispiel ist der Informationsaustausch zwischen Kraftfahrzeugen mithilfe ihrer Front- und Heckscheinwerfer.

Verkehrsampeln und -zeichen auf LED-Basis können auch zur Fahrzeugnavigation beitragen, indem sie neueste Verkehrsinformationen verbreiten, sowie zu bevorzugende Wege bzw. Alternativrouten. Für ähnliche Zwecke können Leuchttürme wichtige Information für die Schifffahrt verbreiten (aus Sicherheitsgründen auch redundant zu Funksignalen), Bild 8 (links). Geeignet ist VLC auch zur Flugzeugnavigation auf dem Rollfeld, wo Leuchtmarkierungen bisher nur zur visuellen Orientierung der Piloten dienen. Ein weiteres Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Navigation ist die Verbreitung von GPS-Signalen an Orten, wo kein direkter Empfang solcher Funksignale möglich ist, z.B. in U-Bahn-Stationen (Bild 8 (rechts)). Auch könnte die Beleuchtung in Gebäuden mithilfe von VLC die Navigation von Personen ermöglichen, und in Notfallsituation als Leitsystem zu den Notausgängen dienen.

In bestimmten Bereichen der lokalen Drahtloskommunikation kann die Optik ebenfalls eine Alternative zur funkbasierten WLAN-Technik bieten. So lassen sich beispielsweise sehr leicht eng begrenzte drahtlose Kommunikationszellen einrichten, bei denen die Abwärtsrichtung mit VLC realisiert wird, und die Rückrichtung mit infrarotem Licht, Bild 9 (links). Denkbar



Source: A. Rümpel



Source: Jcornelius



Bild 8: Anwendungsbeispiele für optische Navigation.

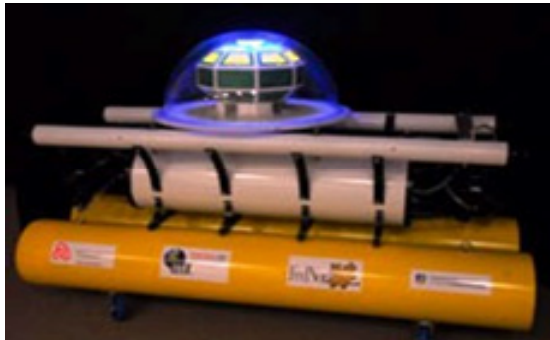
sind unter anderem ultra-schnelles Streaming hoher Datenvolumen (z.B. Inhalte von Katalogen) auf mobile Empfänger, die an Messebesucher verteilt werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich optische WLANs mit wenig Aufwand sehr störfest und abhörsicher gestalten lassen, gibt es zahlreiche weitere Anwendungsgebiete, z.B. bei Bankautomaten oder in der Fertigungstechnik und der Serienproduktion. Entstehen z.B. beim Test fertiger bzw. halbfertiger Produkte auf Fließbändern große Datenmengen, oder sind große Datenvolumen zum Testen erforderlich, lassen sich diese per optischem WLAN mit sehr hohen Datenraten schnell und lokal begrenzt zuführen bzw. abrufen, Bild 9 (rechts).



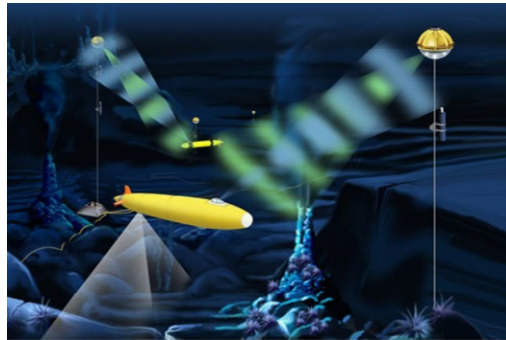
Bild 9: Anwendungsbeispiele für optisches WLAN.

Auf dem Gebiet der Unterwasserkommunikation hat VLC ein Alleinstellungsmerkmal, denn hochratige Datenübertragung ist im Wasser nur mit Licht möglich. Das Dämpfungsminimum von Wasser befindet sich im blau-grünen Spektralbereich; allerdings ist die Reichweite mit LED-basierten Lichtquellen auch in diesem Bereich auf einige zehn Meter begrenzt. Denkbar ist damit z.B. ein schneller Austausch großer Datenmengen zwischen Tauchern, zwischen

unbemannten Drohnen (z.B. zur Rohstoffsuche) und Unterwasser-Docking-Stationen, von wo aus die Daten per Festverbindung zur Wasseroberfläche und schließlich zum Ziel gelangen können, Bild 10. Ebenso könnten automatische U-Boote mit VLC Steuerungsinformationen austauschen [22]. Ein weiteres großes Einsatzgebiet ist die Off-shore-Technik, beispielsweise die Erdöl- und Erdgasförderung.



Source: Penguinasi



Source: Woods Hole Oceanographic Institution

Bild 10: Anwendungsbeispiele für optische Unterwasserkommunikation [23], [24].

## 5. Standardisierung

Einer der Hauptgründe für Standardisierung ist Interoperabilität und die damit verbundene Aussicht auf eine große Marktdurchdringung. In den letzten Jahren wurden mehrere VLC-Standardisierungsaktivitäten zu Ende geführt sowie neu begonnen. Da VLC am frühesten in Japan Interesse geweckt hatte, wurden dort auch die ersten VLC-Standards veröffentlicht und verabschiedet. Dabei wurden mehrere VLC-Standards auf schon existierende IrDA-Standards aufgesetzt. Dieses Vorgehen hat den großen Vorteil, dass IrDA mit wenigen Modifikationen in VLC-Module umgewandelt werden. Außerhalb Japans sind die Standardisierungsbemühungen der IEEE 802.15 erwähnenswert, welche dieses Jahr in dem neuen Standard IEEE 802.15.7 mündeten. Dieser Standard zeichnet sich durch einen komplexen PHY mit neuen Modulationsansätzen, und durch eine explizite Adressierung der Dimming-Problematik aus. Weitere Informationen zu diesen Standards sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Zu den oben aufgeführten Standards ist noch nennenswert, dass der PHY von IEEE 802.15.7, welcher bei niedrigen Bitraten arbeitet, sich teilweise das Modulationsspektrum mit den VLCC-IrDA-Standards teilt. Infolgedessen kann es beim Betrieb beider Geräteklassen in naher Umgebung zu Störungen in der Datenübertragung kommen.

Erwähnenswert ist auch, dass aufgrund einer historischen Entscheidung der IEC LED für die Freiraumkommunikation wie Laserprodukte klassifiziert werden, was zu der paradoxen

Situation führen kann, dass eine VLC-Lampe mit einem Laserschutz-Aufkleber zu versehen ist [25]. Bemühungen der IEEE 802.18, dieses Problem zu beheben [26], haben bisher zu keiner Lösung geführt.

Tabelle 1: Übersicht zu VLC-Standardisierungsaktivitäten.

Organisation	Anwendungsgebiet	Datenrate	Geographischer Geltungsbereich	Jahr	Literatur	Kommentar
JEITA	Niedrige Datenraten, Punkt zu Punkt	b/s – Mb/s	Japan	2007	[27]	CP-1221: Grundlagen und Modulationsfrequenzen
JEITA	Niedrige Datenraten, Punkt zu Punkt	4,8 kb/s	Japan	2007	[27]	CP-1222
IrDA und VLCC	Halb-Duplex Hochgeschwindigkeits-Links; Punkt zu Multi-Punkt	576 kb/s – 4 Mb/s	Global	2009	[28], [29]	Mobil-zu-Mobil sowie Mobil-Infrastruktur
IrDA und VLCC	Niedrige Datenrate; Punkt zu Multipunkt	300 b/s – 9,6 kb/s	Global	2009	[28], [29]	Auch für diffuse Übertragung
ICSA	WLAN in Innenräumen	10 Mb/s	Japan	Unbekannt	[30]	Voll-Duplex mittels WDM (VLC + IR)
IEEE 802.15.7	Nicht spezifiziert	~ 22 kb/s – 96 Mb/s	Global	2011	[31], [32]	“Tabula-rasa“-Ansatz

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Freiraumkommunikation mit LED-Licht bietet Anwendungen, die mit der primären Funktion von LED, nämlich der Signalisierung und Beleuchtung, problemlos vereinbar sind. Des Weiteren lassen sich diese interferenzfrei mit anderen Methoden der Freiraumkommunikation (Infrarot-Licht und Radiowellen) kombinieren. Wie wir in diesem Übersichtsartikel belegen konnten, gibt es eine reiche Auswahl an Anwendungsbeispielen für diese Technik, mit beispielhaften Vorteilen wie Abhörsicherheit, Interferenzfreiheit, und der Möglichkeit, mit hoher Geschwindigkeit unter Wasser zu kommunizieren. Solche Anwendungen könnten zu synergetischen Alleinstellungsmerkmalen für LED-Beleuchtung und Signalisierung führen, und somit neue Argumente für einen Beleuchtungsmarkt liefern, der durch einen sehr großen Preisdruck gekennzeichnet ist.

Trotz technischer Reife gibt es natürlich bei VLC noch Neues zu entdecken und zu erforschen. Weltweite Forschungsbemühungen und Aktivitäten adressieren dabei u.a. die Verwendung von OLED [33], intelligente Modulationsverfahren [34], die Steuerung von Verkehrsflüssen, sowie die Hochgeschwindigkeitskommunikation mit sichtbarem Laserlicht [14].

## Literatur

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Photophone>
- [2] <http://www.laud.no/ww2/lispr/index.htm>
- [3] M.W. Smith, "Modulation and coding for transmission using fluorescent tubes," WO 95/11558, 1995.
- [4] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible communication utilizing plural white-light LEDs as lighting," Proc. PIMRC, pp. F81–F85, 2001.
- [5] H. Sugiyama, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Experimental investigation of modulation method for visible-light communications," IEICE Trans. Commun., Vol. E89-B, No. 12, pp. 3393-3400, 2006.
- [6] J. Vüćić, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer, and J.W. Walewski, "513 Mbit/s Visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED," J. Lightwave Technology, Vol. 28, No. 24, pp. 3512-3518, 2010.
- [7] J. Riedl und J. Walewski, "Verfahren und Vorrichtung zur Übertragung von Daten," EP 2101424A1, 2008.
- [8] J. Walewski, "Verfahren zur flackerfreien Übertragung digitaler Daten in einem optischen Freiraum-Übertragungssystem," DE102008011823B4, 2008.
- [9] G. Ntogari, T. Kamalakis, J.W. Walewski, and T. Sphicopoulos, "Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone," J. Opt. Commun. Netw., Vol. 3, No. 1, pp. 56-65, 2011.
- [10] R. Ramirez-Iniguez and R.J. Green, "Optical antenna design for indoor optical wireless communication systems," Int. J. Commun. Syst. 2005, Vol 18, pp. 229-245, 2005.
- [11] S. Haruyama, "Visible light communication activities in Japan," Int. Symp. on Emerging Short Range Comm., Beijing, China, 2011.
- [12] J. Grubor, S.C.J. Lee, K.-D. Langer, T. Koonen, J. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," Proc. ECOC 2007, Vol. 6, post-deadline paper PD3.6.
- [13] J. Grubor, O.C. Gaete Jamett, J.W. Walewski, S. Randel, K.-D. Langer, "High-speed wireless indoor communication via visible light," ITG Fachber. 198, pp. 203-208, 2007.
- [14] K.-D. Langer et al., "Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs," Proc. ICTON 2011, Tu.D5.2.
- [15] J. Vučić, et al., "230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs," Proc. OFC/NFOEC, 2010, paper OThH3.
- [16] J. Vučić, et al., "White light wireless transmission at 200+ Mbit/s net data rate by use of discrete-multitone modulation," IEEE PTL, Vol. 21, pp. 1511-1513, 2009.
- [17] J. Vučić et al., "803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," OFC 2011, OWB6.

- [18] Projekt OMEGA, <http://www.ict-omega.eu/>
- [19] OMEGA wireless optical prototypes, [http://www.youtube.com/watch?v=AqdARFZd\\_78](http://www.youtube.com/watch?v=AqdARFZd_78), 2011.
- [20] R. Roberts, L. Taylor, T. Bae, "VLC Application Definitions and Summary", <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0125-08-0007-vlc-application-definitions-and-summary.xls>, 2009.
- [21] <http://www.uclight.ucr.edu/>, 2010.
- [22] F Schill, U. R. Zimmer, Jochen Trumpf, "Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications," Proc. ACRA, 2004.
- [23] <http://www.penguinasi.com>
- [24] Woods Hole Oceanographic Institution, "Optical system promises to revolutionize undersea communications," Press release 2010, <http://www.whoi.edu/>
- [25] W. Horak, J.W. Walewski, "In the safety limbo: simultaneous illumination and optical wireless communications with light-emitting diodes," Int. Laser Safety Conf., Reno, NV, 2009.
- [26] M. Lynch (im Auftrag von IEEE 802.18), "Reminder to IEC TC 76 concerning LED radiation safety", <https://mentor.ieee.org/802.18/dcn/10/18-10-0011-01-0000-reminder-to-iec-tc-76-concerning-led-radiation-safety.doc>, 2010.
- [27] S. Haruyama, "Japan's Visible Light Communications Consortium and its standardization activities," <https://mentor.ieee.org/802.15/file/08/15-08-0061-01-0vlc-japan-s-visible-light-communications-consortium-and-its.pdf>, 2008.
- [28] A. Singh, "VLCC releases standard based on IrDA core specification," InfoTech Spotlight, <http://it.tmcnet.com/topics/it/articles/52362-vlcc-releases-standard-based-irda-core-specification.htm>, 2009.
- [29] T. Matsumura: VLC channel models in VLCC, <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0065-01-0007-channel-models-in-vlcc.pdf>, 2009.
- [30] <http://www.vlcc.net>, 2010
- [31] E. Won "PHY and MAC standard for short-range wireless optical communication using visible light," <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/08/15-08-0656-03-0vlc-par-document.rtf>, 2008.
- [32] R. Roberts, L. Taylor, T. Bae, "VLC application definitions and summary," <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0125-06-0007-vlc-application-definitions-and-summary.xls>, 2009.
- [33] J.W. Park, D.C. Shin, and S.H. Park, "Large-area OLED lightings and their applications," Semicond. Sci. Tech. 26, doi:10.1088/0268-1242/26/3/03400, [http://iopscience.iop.org/0268-1242/26/3/034002/pdf/0268-1242\\_26\\_3\\_034002.pdf](http://iopscience.iop.org/0268-1242/26/3/034002/pdf/0268-1242_26_3_034002.pdf), 2011.
- [34] R. Mesleh et al., "Optical spatial modulation," J. Opt. Commun. Netw. 3, 234-244, 2011.