

Neuer Brennpunkt zur optischen Datenübertragung erschienen

LED-Licht zur Datenübertragung – ein gesundheitlich unbedenkliches WLAN?

**Eine Zusammenstellung bedeutsamer Aspekte zu VLC bzw. LiFi
Kurzfassung unseres neuen Brennpunktes „Ausgabe 241“ von Dr. Klaus Scheler**

Gibt es zum bekannten WLAN eine Alternative, deren Strahlung nicht gesundheitsschädlich ist? Im Jahr 2011 stellte Prof. Harald Haas auf YouTube in einer TED¹-Konferenz² LiFi, eine Kommunikation über Licht, vor. Ein faszinierender Gedanke, denn an Licht ist unser Organismus gewöhnt. Ist hier eine Alternative zur Mikrowellentechnologie des Mobilfunks in Sicht? diagnose:funk recherchierte und entdeckte, dass das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut in Berlin auch diese Technologie entwickelt. Der Abgeordnete im Landtag Baden-Württemberg Thomas Marwein (GRÜNE) lud mit uns im Juni 2013 den Berliner Projektleiter Anagnostis Paraskevopoulos ein. Dieser demonstrierte vor Ärzten und Ministeriumsvertretern die VLC-Technik (Visible Light Communication), damals noch im Versuchsstadium. Die Landesregierung Baden-Württemberg finanzierte daraufhin ein Pilotprojekt auf der Insel Mainau, die Stadt Stuttgart eines im Hegel-Gymnasium. Beide Projekte wurden mit technischem Erfolg abgeschlossen und trugen zur Serienreife bei. Heute, ca. 10 Jahre später, kann man die Technologie kaufen. Beim Hamburger Sportverein (HSV) ist sie im Pressezentrum im Einsatz.

Doch ist sie wirklich nicht gesundheitsschädlich? Der Physiker Dr. Klaus Scheler wurde von uns beauftragt, hierzu die Studienlage zu VLC/LiFi und LED-Licht zu recherchieren. Sein Review, der als diagnose:funk Brennpunkt erscheint, liegt nun mit einer klaren Aus-

sage vor: Wenn technische Bedingungen eingehalten werden, vor allem in Bezug auf die Minimierung des Blaulichtanteils von LED-Licht und die Vermeidung gesundheitsbelastender Flimmerfrequenzen, ist VLC/LiFi (Überbegriff Optical Wireless Communication (OWC)) für den Menschen nach heutigem Stand des Wissens biologisch verantwortbar.

Einführung

Visible Light Communication (VLC) oder Light-Fidelity (LiFi) ist eine neue Datenübertragungstechnik auf der Basis des Lichtes von Leuchtdioden (LEDs) (Abb. 1). Dazu werden mit Hilfe hochfrequenter Intensitätsmodulation des Lichtstroms (z. B. Ein- und Ausschalten mit Frequenzen oberhalb von 12,5 MHz) Daten übertragen. Dies ist für das Auge nicht wahrnehmbar. Die optische Kommunikation (Optical Wireless Communication (OWC)) ist eine technische Alternative zur mikrowellenbasierten Funktechnik (Abb. 2): Datenraten von mehr als 100 Mbit/s können bereits heute übertragen werden. Vor allem Bereiche mit ständiger Beleuchtung, wie Schulen, Großraumbüros, Labore, medizinische Bereiche oder der öffentliche Fern- und Nahverkehr, bieten ein großes Anwendungsfeld.

Die VLC-Technik nutzt die LED-Raumbeleuchtung. Als Übertragungsmedium zum Download dient das sichtbare Licht. Sender sind die Lampen (Abb. 1). Sensoren der Endgeräte lesen die Daten aus. Der Upload

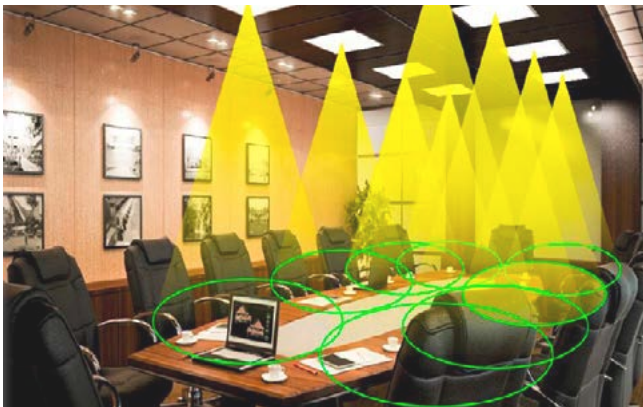


Abb. 1: VLC: Licht als Datenüberträger

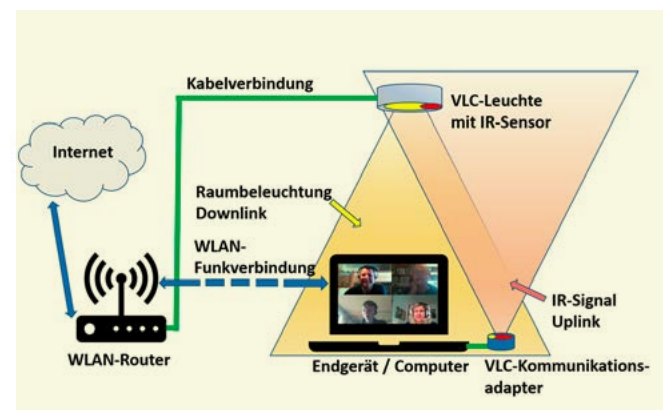


Abb. 2: Datenübertragung mit Funk-WLAN vs. VLC

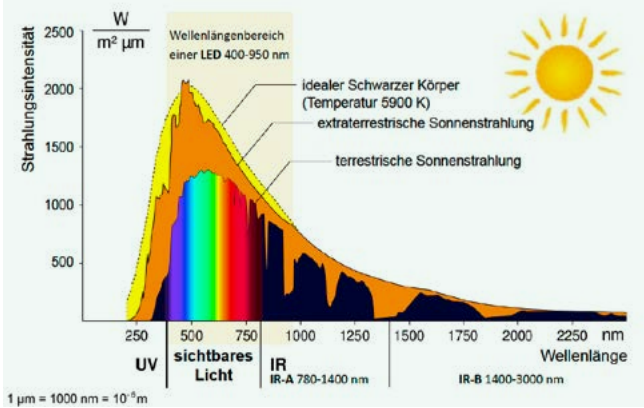


Abb. 3: Das natürliche elektromagnetische Sonnenspektrum
aus: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10287551>

erfolgt über einen Infrarotsender am Gerät zurück an einen Empfänger in der Leuchte (Abb. 2). Mit weißen, phosphorbeschichteten LEDs lassen sich so Datenraten von 100 MBit/s bis zu 500 MBit/s erzielen. Unter Laborbedingungen wurden schon bis 1 GBit/s³ erreicht. Die Firma Signify⁴ bietet unter der Bezeichnung TruLifi 6002 ein System für den Inneneinsatz an. Es arbeitet nur mit infrarotem Licht in beiden Richtungen und erreicht bis zu 150 MBit/s. Weitere Anbieter sind z. B. PureLifi⁵ Oledcomm⁶ und aeroLifi⁷. Besonders für Schulen ist OWC eine wichtige Alternative für den Schutz der Kinder und Jugendlichen vor der Dauerbelastung durch Mikrowellenstrahlung des Funk-WLAN. Ob auch mit OWC gesundheitliche Risiken verbunden sind, ist noch nicht endgültig erforscht. Die bisherige Forschung zeigt aber, unter welchen Bedingungen Belastungen zu erwarten sind. Durch bestimmte Einschränkungen bei der verwendeten Technik können Belastungen reduziert und wahrscheinlich sogar ganz vermieden werden.

Biologische Wirkungen von LED-Licht

Das Licht der verwendeten LEDs befindet sich im sichtbaren Bereich zwischen 400 nm (blaues Licht) und 780 nm (rot-violettes Licht) bzw. im infraroten Bereich bis 950 nm (Abb. 3). Diese Wellenlängen sind auch im Sonnenlicht mit hoher Intensität enthalten (bis zu 1000 W/m²). Hieran sind wir evolutionär angepasst. Was die natürliche Strahlung der Sonne im Organismus bewirkt, ist bereits gut erforscht.

Insbesondere ist das Auge durch UV und Blaulicht gefährdet. Dies gilt grundsätzlich auch für die blauen Strahlungsanteile von künstlichem LED-Licht (Abb. 3).

Will man nun Daten über das Licht transportieren, ist eine weitere Komponente zu beachten: Natürliches Licht entspricht einem unstrukturierten Rauschen. Jede Datenübertragung ist notwendig mit der sog. Modulation des Trägermediums verbunden (z. B. als Pulsung/Taktung), die sich im LED-Licht als Flimmern zeigt. Inwieweit moduliertes Licht biologisch eine Bedeutung hat oder andere bzw. zusätzliche Wirkungen hervorruft als natürliches Licht (gleicher Wellenlänge und Intensität), ist die entscheidende Frage.

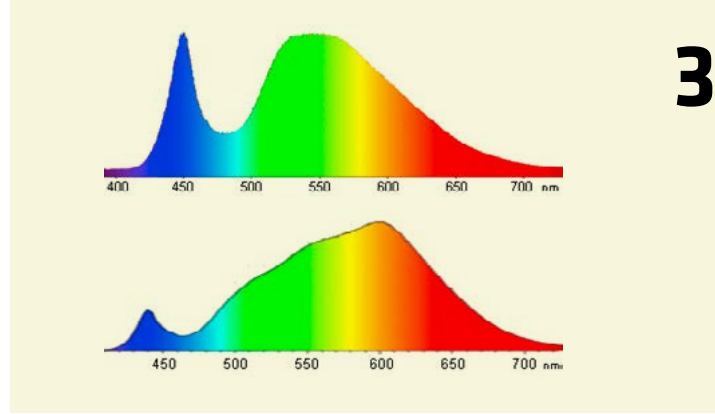


Abb. 4: Spektrum von kalt-weißem LED-Licht
Spektrum von warm-weißem LED-Licht

Biologische Wirkungen von weißem LED-Licht

Die Wahl weißer LEDs zur Datenübertragung ist bei einem hohen Blaulichtanteil kritisch (Abb. 4), da dieser Farbanteil Sinneszellen im Auge schädigen kann und die Produktion des Hormons Melatonin (am Abend) hemmt, was sich negativ auf den Schlafzyklus auswirkt. Erst ausreichend erzeugtes Melatonin führt zu einem erholsamen Schlaf (daher auch Schlafhormon genannt) und stellt darüber hinaus eine wichtige Unterstützung des Immunsystems dar.

Der Blaulichtanteil der bei der Datenübertragung verwendeten LEDs ist daher durch technische Maßnahmen zu reduzieren oder es müssen andere Schutzmaßnahmen, wie die Nutzung gelb getönter Brillen, erwo-gen werden. Technische Lösungen hierfür sind bekannt, ggf. bei reduzierter Datenrate (vgl. Brennpunkt).

Biologische Wirkungen von infrarotem LED-Licht

Die energetischen, insbesondere die thermischen Wirkungen von Infrarotstrahlung auf biologische Organismen sind gut erforscht. Die natürliche Leistungsflussdichte des infraroten Anteils im Sonnenlicht (780-950 nm), der auch z. B. von einer Infrarot-LED genutzt wird, liegt bei » 67,7 W/m². Künstlich erzeugte Infrarotwellen in diesem Wellenlängenbereich werden ab etwa 50 W/m² unter dem Begriff Low Level Light Therapy (LLLT) als wirksame Therapie eingesetzt.

Die Eindringtiefe von optischen und infraroten Lichtwellen ins Auge veranschaulicht Abb. 5. An der Netzhaut kommt im Wesentlichen das sichtbare und infrarote Licht an. Alle anderen Wellen werden durch die vor der Netzhaut liegenden Augenteile bereits vollständig absorbiert.

Das Licht der verwendeten LEDs könnte theoretisch bei genügender Intensität thermische Netzhautschädigungen zur Folge haben: Bleibt die Temperatur des bestrahlten Gewebes unterhalb eines Schwellenwertes, so ist keine Schädigung zu befürchten. Dennoch kann schwache, aber langfristig einwirkende Infrarotstrahlung, eine Trübung der Augenlinse (Katarakt) verursachen. Beobachtet wurde das u. a. bei Arbeitern in Metallschmelzen oder bei Glasbläsern nach 10 bis 30 Jahren. Daher wurde ein Expositionsgrenzwert von 100

W/m² für IR-Strahlung aus IR-A und IR-B festgelegt: Unterhalb dieses Wertes wird nach heutiger Kenntnis eine Kataraktbildung vermieden. Diese Strahlungsintensitäten werden mit heutigen OWC-Systemen bei Weitem nicht erreicht. Photochemische Reaktionen treten aufgrund der niedrigen Energie der Photonen einer IR-Strahlung nicht auf.

Die Sichtung der Studienlage bezüglich biologischer Wirkungen von infrarotem LED-Licht in der Haut ergab keine Anhaltspunkte für ein Gefährdungspotenzial, solange die Strahlungsintensitäten unter 50 W/m² bleiben, was in der Regel der Fall ist. Dass sich Mobilfunkstrahlung und Licht in ihrer biologischen Wirkung bei gleicher Leistung so extrem unterschiedlich auswirken, liegt vor allem daran, dass Wassermoleküle die Energie der Mikrowellen sehr viel stärker aufnehmen (absorbieren) können. Stark vereinfacht ausgedrückt ist eine (dünne) Schicht Wasser für Licht nahezu „durchsichtig“. Für den Mikrowellenbereich dagegen nicht. Auch in Zellen gebundenes Wasser absorbiert daher die Energie von Mobilfunkwellen bedeutend besser als die von optischen und infraroten Wellen. Das heißt: Wasser wird bei gleicher Leistungsflussdichte und Bestrahlungsdauer unter Bestrahlung mit Mikrowellen viel heißer als unter Bestrahlung mit Infrarotwellen. Handelsübliche IR-LEDs und sogar High-Power-IR-LEDs (bis 10 W) sind daher thermisch irrelevant.

Biologische Wirkungen der Modulation von LED-Licht

Der für gesundheitliche Beeinträchtigungen maßgebliche Parameter bei der Lichtmodulation ist die Frequenz des Lichtflimmerns, das bei jeder Modulation unvermeidlich entsteht, wenn man mit einem Trägermedium Informationen übertragen will.

Je nach Übertragungsverfahren werden unterschiedliche Modulationen bei VLC und LiFi benutzt und es kommt zu unterschiedlichen Taktungen/Pulsungen und Flimmern.

Beim On-Off-Keying (On = 1, Off = 0) wird die LED mit einer Frequenz im MHz-Bereich ein- und ausgeschaltet, was zu einem entsprechend hochfrequentem Flimmern führt. Man könnte auch von einer Lichtpulsung sprechen. Beim OFDM-Verfahren dagegen, das aktuell bei VLC und LiFi verwendet wird, werden ganze Datenpakete zunächst kodiert und dann als Ganzes gesendet. Die Datenpakete werden durch eine kurze Dunkelphase voneinander isoliert. Dies führt wiederum zu einem Flimmern. Bei einer genutzten Bandbreite von z. B. 100 MHz ergibt sich dabei eine Flimmerfrequenz von

156.250 Hz (vgl. Brennpunkt).

Man könnte vermuten, dass beim OFDM-Verfahren ein einzelnes OFDM-Signal (Datenpaket) bereits eine biologische Information darstellt – was durchaus möglich sein kann – und fragen, ob dadurch biologische bedeutsame Effekte ausgelöst werden können. Dagegen spricht, dass sich die Information von Datenpaket zu Datenpaket in schneller Folge ändert. Eine biologische Wirksamkeit erfordert aber entsprechend der LLLT-Forschung, dass die gleiche(!) Information eine gewisse Zeitlang (mehrere Sekunden bis Minuten) wiederholt wird und mit gewisser Intensität auf den Körper einwirkt, was beim OFDM-Verfahren nicht der Fall ist. Der schnelle Wechsel der Informationen bei aufeinanderfolgenden Datenpaketen wirkt daher wie eine zufällige Schwankung der Lichtintensität (Rauschen). Daher kann man annehmen, dass nur die auftretenden Flimmerfrequenzen neben den Intensitäten eine biologische relevante Rolle spielen können.

Eine weitere Flimmerfrequenz kann bei der Datenübertragung entstehen, wenn Download und Upload auf der gleichen Frequenz erfolgen, also mit derselben Verbindung, die wechselseitig genutzt wird (TDD-Verfahren). Dies kann – wie beim DECT-Telefon – eine Pulsung bzw. ein Flimmern von z. B. 100 Hz bedeuten. Geschieht der Wechsel von Download und Upload auf verschiedenen Frequenzen (FDD-Verfahren), also über zwei getrennte Verbindungen, kommt es zu keiner weiteren Flimmerfrequenz bei den einzelnen LEDs.

Wir wissen heute: Im Flimmerbereich bis 200 Hz können biologisch unerwünschte Wirkungen auftreten. Oberhalb von 200 Hz (in manchen Studien wird auch 500 Hz genannt) sind durch Lichtflimmern die Effekte in der Netzhaut und damit die biologischen Wirkungen sehr schwach, mit wachsender Frequenz gehen sie gegen Null. Jedenfalls ist ein Flimmern dann nicht mehr neuronal wahrnehmbar. Solange die Flimmerfrequenz oberhalb von 2 kHz = 2.000 Hz liegt, sind keine nach-

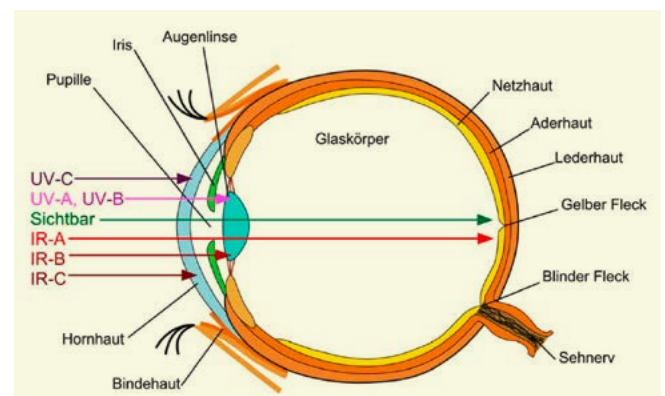


Abb. 5: Eindringtiefe von optischer und Infrarotstrahlung in das Auge. Quelle: Fachverband für Strahlenschutz e.V. (2010)

teiligen biologischen Wirkungen bekannt. Das bedeutet: Nutzt man das FDD-Verfahren, liegen die Flimmerfrequenzen bei der Datenübertragung somit mindestens um den Faktor 75 höher. Damit ist FDD bezüglich der Flimmerwirkung auf das Auge und damit auf das Gehirn nach aktuellem Sachstand unkritisch. Wird das TDD-Verfahren genutzt, muss darauf geachtet werden, dass der Wechsel von Download und Upload mit mindestens 2 kHz geschieht. Daher ergibt sich für die Wahl der Modulationsverfahren die generelle Forderung, dass Flimmerfrequenzen oberhalb von 2 kHz liegen müssen!

Zusammenfassung

Es gibt drei Themen in der Diskussion um VLC- bzw. IR-Strahlung: Intensität, Lichtfarbe/Frequenz und Modulationen. Die beiden wesentlichen Parameter sind die Leistungsflussdichte (Intensität) und die Pulsfrequenz (Flimmerfrequenz) des LED-Lichts. Die in der Langfassung dieses Artikels vorgestellten Studienergebnisse zeigen, dass beide Parameter bei der Datenübertragung mit LED-Licht in Bereichen liegen können, die nach heutiger Kenntnis gesundheitlich unkritisch sind. Biologische Wirkungen werden vor allem bei hohen Leistungsflussdichten (Intensitäten) ($> 50 \text{ W/m}^2$) und niederfrequenten Pulsungen (unter 1 kHz) beobachtet. Die Datenübertragung in Innenräumen kommt dagegen mit geringen Leistungsflussdichten ($< 10 \text{ W/m}^2$) aus und benötigt hohe Datenraten, was Pulsung/Flimmern im höheren kHz- bzw. MHz-Bereich bedeutet. Nur bei der Verwendung ungeeigneter Modulationsverfahren kann es auch zu Pulsungen im niederfrequenten Bereich von z. B. 100 Hz (wie beim DECT-Schnurlostelefon) kommen, die gesundheitlich bedenklich sind. Ansonsten arbeitet man im Bereich schwacher, natürlicher biologischer Wirkungen, die vom Organismus nach derzeitiger Kenntnis toleriert werden. Darüber hinaus gelten

auch hier alle weitergehenden Empfehlungen, die beim Einsatz von LEDs als reine Lichtquelle beachtet werden müssen (z. B. so flimmerarm wie möglich). Auch die Datenanbindung des Systems sollte strahlungsarm über eigene Datenleitungen und nicht über Powerline erfolgen, um alle Vorteile ausnutzen zu können.

Dennoch ist bezüglich der Wirkungen des modulierten Lichts auf Augen und Haut weiterer Forschungsbedarf erforderlich, vor allem auch in Bezug auf andere Lebewesen. Das heißt: „Die VLC-Technik muss schnellstmöglich auf ihre biologische Verträglichkeit hin weiter untersucht werden“^{8, 9}. Solange dies nicht gegeben ist, gilt es, beim Einsatz dieser Datenübertragungstechnik nur solche LED-Intensitäten, Spektren und Pulsungen zu akzeptieren, die so weit wie möglich von den genannten, bisher erkennbaren biologischen Wirkungsschwellen entfernt liegen. Es gilt das Vorsorgeprinzip ALASTA (As Low As Scientifically and Technically Achievable): So niedrig wie wissenschaftlich und technisch möglich!

-
- 1) TED: Technology, Entertainment, Design
 - 2) <https://bit.ly/2W5CuWx>
 - 3) <https://www.hhi.fraunhofer.de/abteilungen/pn/products-and-solutions/in-door-lifi-systems.html>
 - 4) Firma Signify: <https://www.signify.com/de-de/our-company/news/press-releases/2019/20190619-signify-launches-trulifi> und <https://www.signify.com/global/innovation/trulifi>
 - 5) <https://purelifi.com>
 - 6) <https://www.oledcomm.net/>
 - 7) <http://www.aerolifi.com/>
 - 8) Diagnose-Funk (2013): Die Zukunft der Mobilien Kommunikation: Mobil und risikoarm kommunizieren. Download unter: <http://www.diagnose-funk.org/ueber-diagnose-funk/brennpunkt/mobil-und-risikoarm-kommunizieren.php>
 - 9) Scheingraber, C. (2012). Gesundheits- und umweltverträgliche Massen-Kommunikation mit Photonischen Netzen. Kompetenzinitiative e.V. Download unter: <http://www.kompetenzinitiative.net/publikationen/forschungsberichte/massen-kommunikation-mit-photonischen-netzen.html>

Weitergehende Tipps zu LEDs und Bildschirmen allgemein

Nutzen Sie nur weitestgehend flimmerfreie LEDs. Damit ist die Verwendung von dimmbaren LEDs von vornherein ausgeschlossen. Dimmbarkeit wird ausschließlich über das sog. Pulsweiten-Modulationsverfahren (PWM) realisiert und hat in der Regel niederfrequente Pulsanteile zur Folge. Eine empfehlenswerte Testseite hierzu ist die von Wolfgang Messer: fastvoice.net.

Nutzen Sie flimmerarme/flimmerfreie Bildschirme. Dies ist ein Qualitätsmerkmal für gute Bildschirme. „Normale“ Bildschirme sollten nach Möglichkeit in voller Helligkeitseinstellung genutzt werden. Dazu ist die Stärke der Umgebungsbeleuchtung entsprechend anzupassen. Sobald normale Bildschirme gedimmt werden (spätestens ab 85 % Leuchtstärke), werden die verbauten RGB-LEDs mit zunehmend kürzeren Pulsen getaktet, meistens mit niederfrequenten Anteilen.