

Kurz und knapp: LEDiertes Licht

Perlschnur-Erscheinung: Gewünschter Affekt oder Zufallseffekt?

Lars Gerhard Kühl

Hamburg im Oktober 2013

Gelegentlich sieht man LED-Lampen bei Änderungen der Blickrichtung in Punktspuren leuchten. Dieses Phänomen ist als Perlschnur-Effekt bekannt. In diesem kurz gefaßten Papier werden anhand eines konkreten Beispiels die meßtechnisch erfaßten Bedingungen genannt. Damit dem Betreiber kein möglicher Nachteil aus seinem anzuerkennenden Innovationsmut entsteht, wird die Installation nicht konkret identifiziert.

Einführung

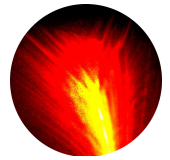
Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit von Lichtstromvariabilität bei LED-Lampen sind unterschiedliche Zahlen in Umlauf. Die Spanne des Anteils der Menschen, die dieses Flackern bewußt wahrnehmen sollen, liegt wohl grob zwischen fünf und 15 Prozent. Eine wichtige Angabe fehlt dann gewöhnlich dazu: Die über die Betriebsart der LED-Leuchtmittel. Denn insbesondere bei einer Konstantstrom-Versorgung der LED-Leuchtmittel wird niemand ein – nicht defekt-bedingtes – Flackern wahrnehmen. Gerade netzentkoppelte konstantstrom-betriebene LED-Lampen liefern einen geradezu perfekt konstanten Lichtstrom. Die Helligkeit netzbetriebener Glühlampen dagegen variiert um mindestens fünf Prozent mit einer Frequenz von 100 Hz (der zweifachen Netzfrequenz). Denn die Strahlungsleistung eines Schwarzkörperstrahlers ist proportional zur vierten Potenz seiner Temperatur. Eine Diskussion um „flackernde“ LEDs kann deshalb nur auf LED-Leuchtmittel bezogen sein, die „gepulst“, d.h. mit einer Rechteckspannung betrieben werden.

In diesem Papier wird eine eher objektivierbare Variante der „Flackerwahrnehmung“ betrachtet: Der Perlschnur-Effekt. Hier wird durch Blickrichtungsänderung die zeitliche Lichtstromvariabilität in eine räumlich assoziierte Wahrnehmung übersetzt. Hintergrund ist, daß ein Mensch die Blickrichtung sehr schnell ändern kann. Die Winkelgeschwindigkeit kann einen Wert von $\omega = 180^\circ\text{s}^{-1}$ überschreiten. Dann ist es zwar kaum mehr möglich, die Umgebung scharf wahrzunehmen. Wenn aber eine Lampe währenddessen an- und ausgeht, evoziert dieses Reize an verschiedenen Stellen der Netzhaut. Wie weit eine Auflösung in räumlich assoziierte Hell-Dunkel-Sequenzen erfolgt, hängt von der Frequenz, der Hell-Dunkel-Dauer-Relation sowie dem Bereich der Netzhaut ab. Hintergrund ist, daß die Auflösung der Netzhaut regional sehr stark variiert. Im inneren des zentralen Gesichtsfelds wird eine Auflösung von einer Bogenminute erreicht, zum Rande hin fällt sie drastisch auf weit weniger als ein Hundertstel ab. Lesen oder Details erkennen kann ein Mensch deshalb nur mit dem zentralen Gesichtsfeld.

Die Lichtinstallation

Die vorrangig betrachtete Installation befindet sich in einem Lounge-Bereich. Darin befinden sich Pendelleuchten mit jeweils einer LED-Lampe. Zumindest in einem Gesichtsbereich von einigen Bogengrad um das zentrale Gesichtsfeld wird im Falle von Blickrichtungsänderungen der Perlschnur-Effekt sehr deutlich. Dieser wird von zwei männlichen Personen wahrgenommen. Ferner macht das Licht auf die Probanden insgesamt einen flackernden Eindruck. In diesem Umfeld werden primär die Messungen vorgenommen.

Im Sanitärbereich ist auch eine LED-basierte Beleuchtung installiert. Dort nehmen die Probanden keinen Perlschnur-Effekt wahr. Das Licht wirkt dort auf die Probanden ferner nicht flackernd. Auch im Sanitärbereich werden Messungen durchgeführt.



Gerät und Methode

Gerät

Zur Messung des Flackerns wird eine auf einem Phototransistor basierende Schaltung verwendet. Diese ist auf Nachweisempfindlichkeit optimiert. Für kleine Schwankungen arbeitet das Gerät in sehr guter Näherung linear, sofern die Helligkeit nicht sehr nahe dem Maximum oder sehr nahe dem Minimum des Gesamtmeßbereichs liegt. Große Helligkeitsänderungen werden nicht linear reproduziert. Das Gerät hat zwei Meßbereiche. Gleichmaßen geringe Helligkeitsvariationen wie große Schwankungen, im besonderen Ein- und Ausschaltvorgänge sind sicher zu erfassen. Der Frequenzbereich geht dabei über zwei kHz hinaus. Der Sensor liefert eine Spannung, die oszilloskopisch dargestellt wird. Die Sensitivität des Phototransistors ist richtungselektiv.

Methode

Es wird sowohl mit relativ großem Winkel zu den untersuchten künstlichen Lichtquellen als auch direkt auf diese zu die Helligkeitsvariation gemessen. Großer Winkel bedeutet hier, daß infolge der Meßrichtung der Beitrag einer bestimmten Lampe zum Gesamtlichteinfall gering ist. Erstere Messung dient der Bestimmung eines Licht- und damit des licht-bedingten Signaluntergrunds. Da die Umgebung LED-dominiert ist, ist es ferner prinzipiell möglich, daß diese in Phase geschaltet werden. Das würde zu einem stark schwankenden Lichtuntergrund führen.

Messungen

Die Messungen werden am 20. September 2013 von ca. 19.00 Uhr bis 21.00 Uhr durchgeführt.

Lounge-Bereich

Zu Beginn des Besuchs fällt noch natürliches Licht im Lounge-Bereich in den Raum. Die Intensität ist jedoch gering, die Sonne bereits untergegangen. Dieser Beitrag fällt während der Messung unter die Nachweisgrenze.

Der Lichtuntergrund ist relativ konstant. Die LED-Lampen schalten ergo nicht in Phase. Variationen der Untergrundhelligkeit sind vorrangig Folge der Bewegung von Menschen und damit einhergehenden Abschattungseffekten.

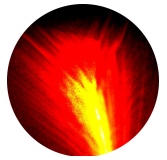
Die LED-Lampen der Pendelleuchten werden mit einer Frequenz von 100 Hz betrieben. Die Schwingungsdauer beträgt also 10 ms. Innerhalb dieser Zeit sind diese LED-Lampen ca. 3,5 ms eingeschaltet und ca. 6,5 ms ausgeschaltet. Das deckt sich mit dem Eindruck, daß die Beleuchtung herab gedimmt ist. Ändert man nur mit $\omega = 90^\circ\text{s}^{-1}$ die Blickrichtung, so ergeben sich Hellabschnitte von 18,9 Bogenminuten und Dunkelabschnitte von 35,1 Bogenminuten. Das liegt eindeutig innerhalb der Auflösung des zentralen Gesichtsfeldes. Diese Betriebsbedingungen – geringe Frequenz der Rechteckspannung und herab-gedimmte Helligkeit – führen unausweichlich zum Perlschnureffekt. Exakt dessen Vorliegen wird, vergleiche oben, von den Probanden genannt.

Die Daten machen deutlich, daß in der Regel nur je bei einer Leuchte dieser Perlschnur-Effekt wahrnehmbar ist. Die anderen liegen außerhalb des Gesichtsfeldes zureichender Auflösung. Tatsächlich kann man bei mehr als einer Pendelleuchte gleichzeitig den Perlschnureffekt wahrnehmen, sofern sie in der Perspektive einen genügend geringen Winkelabstand aufweisen.

Sanitärbereich

Im Sanitärbereich wird erst nach Eintritt subjektiv außen vollständiger Dunkelheit gemessen. Ferner gibt es augenscheinlich keinen Einlaß für natürliches Licht dort am Ort der Messung.

Oszilloskopisch stellt sich unter großen Winkeln zu einzelnen Lampen eine konstante Helligkeit dar, die z.T. jedoch sehr kurz unterbrochen wird. *Großer Winkel* bedeutet auch hier, daß aufgrund der richtungselektiven Sensitivität des Sensors der Beitrag einer einzelnen Lampe zum Gesamtlichteinfall gering ist.



Die Messung des Lichts einer einzelnen Lampe zeigt einen Betrieb der LED-Lampe mit einer Rechteckspannung von 500 Hz auf. Während der Schwingungsdauer von 2 ms ist die Lampe mindestens 1,8 ms ein- und höchstens 0,2 ms ausgeschaltet. Geht man wieder von einer Winkelgeschwindigkeit der Blickrichtungsänderung von $\omega = 90^\circ\text{s}^{-1}$ aus, so ergibt sich für die Dunkelphase ein Winkel von kleiner oder gleich $1'5''$. Das liegt gerade an der Auflösungsgrenze des absolut zentralen Gesichtsfelds. Das Wahrnehmen eines Perlschnur-Effekts ist ergo sehr unwahrscheinlich. Selbst dann wenn man von der doppelten Winkelgeschwindigkeit der Blickrichtungsänderung ausgeht, $\omega = 180^\circ\text{s}^{-1}$, so ergibt sich ein Dunkelbogen von $2'10''$. Auch in dem Falle müßte man den Dunkelbogen mit einem sehr zentralen Teil des Gesichtsfelds erfassen. Auch das ist noch sehr unwahrscheinlich.

Unter diesen Beleuchtungsbedingungen stellen die Probanden, siehe oben, keinen Perlschnur-Effekt fest.

Diskussion

Bei einer Frequenz der Versorgungsspannung von 100 Hz ist, wie unter → Messungen → Lounge-Bereich dargelegt, die Wahrnehmung eines Perlschnur-Effekts sehr wahrscheinlich. Das gilt im besonderen, wenn die gepulst betriebene LED-Beleuchtung auch noch herab-gedimmt ist, so daß die Dunkelbögen die Hellbögen klar trennen.

Bei der Frequenz von 500 Hz ist die Wahrnehmung eines Perlschnur-Effekts deutlich unwahrscheinlicher. Jedoch gilt das nur, wenn die Helligkeit soweit wie im beschriebenen Fall hoch gedimmt ist. Bereits bei einer Hell-zu-Dunkel-Zeit-Relation von eins, ergäbe sich bei einer Blickrichtungsänderungs-Winkelgeschwindigkeit von $\omega = 90^\circ\text{s}^{-1}$ jeweils ein Hell- wie Dunkelbogen von $5'24''$, bei $\omega = 180^\circ\text{s}^{-1}$ von $10'48''$. Unter solchen Bedingungen ist das Gewahrwerden eines Perlschnur-Effekts sehr viel wahrscheinlicher.

Zusätzliche Effekte

Unter realen Bedingungen zeigt sich, sofern mehr als eine gepulst betriebene LED-Lampe im Einsatz ist, ein Mittelungseffekt, da die Lampen nicht exakt gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden. Alleine daraus ergibt sich ein Lichtuntergrund relativ zum Licht einer einzelnen Lampe. Der Pegel dieses Lichtuntergrunds bestimmt wesentlich, ob Flackern oder auch ein Perlschnur-Effekt wahrgenommen werden. Denn die Wahrnehmungsstärke unterliegt dem Weber-Fechnerschen Gesetz. Danach ist die Wahrnehmungsstärke proportional zum Logarithmus des Quotienten aus Reizstärke und Grenzureizstärke. Die Grenzureizstärke ist hierbei die minimale Reizstärke bei der noch etwas wahrgenommen wird. Die Logarithmus-Funktion verläuft jedoch konkav und streng monoton wachsend, so daß die Steigung mit wachsendem Argument geringer wird.

Herabdimmen kann sich also hinsichtlich der Perlschnur-Effekt-Wahrnehmung doppelt verstärkend auswirken: Einerseits durch die verlängerte Dunkelbogen-Länge, andererseits durch das Weber-Fechnersche Gesetz.

Relativierend zum zweiten Punkt sei jedoch angemerkt, daß das Weber-Fechnersche Gesetz möglicherweise bei einer hell-dunkel-dauer-relationsbedingten Dimmung nicht oder nur eingeschränkt anzuwenden ist. Denn zeitweise scheint das Licht mit voller Intensität. Hier ist noch einiges an Erkenntnis zu fördern.

Conclusio

Die Untersuchung macht deutlich, daß wer sich zur Wahrnehmbarkeit der Lichtstromvariabilität von LED-basierter Beleuchtung äußert, genau spezifizieren muß, wie das Beleuchtungssystem betrieben wird. Wer sich in diesem Kontext nicht auf einen Spezialfall bezieht, sondern über größere Anzahlen von Menschen und verschiedene Situationen mittelt, muß auch die LED-Beleuchtungs-Installationen adäquat statistisch erfassen und in die Aussage mit einbeziehen.

Für die Lichtplanung ist hinsichtlich des Perlschnur-Effekts wichtig, diesen als Planungsgegenstand konkret mit zu erfassen und die entscheidenden technischen Parameter daraus abzuleiten.