

Die dunkle Seite des Lichts - Diskomfort durch Flicker bei (LED-)Lichtern im Straßenverkehr in Bezug zu peripheren Flimmerverschmelzungsfrequenzen

Jens Mühlstedt, Patrick Roßner und Angelika C. Bullinger ¹

Schlüsselwörter: Flicker, Flimmern, Sehen, Flimmerverschmelzungsfrequenz, Diskomfort

Zusammenfassung

Leuchtdioden (light-emitting diode, LED) werden seit einigen Jahren mit hohen Wachstumsraten in allen Bereichen moderner Lichttechnik eingesetzt. Auch im Straßenverkehr, insbesondere bei Lichtzeichenanlagen wie z. B. Ampeln und in Scheinwerfern, kommen LEDs zum Einsatz. Dies hat verschiedene Vorteile, wie hoher Wirkungsgrad, längere Lebensdauer, kurze Ansprechzeiten und günstiges Defektverhalten. Speziell im Straßenverkehr steht diesen jedoch ein wesentlicher Nachteil entgegen: durch eine gepulste Ansteuerung der LEDs entsteht ein optischer Flicker: ein hochfrequentes Pulsieren der Lichter, das Diskomfort auslösen kann.

Der Beitrag steht unter der Forschungsfrage des Diskomforts durch Flicker. Analysiert wird der subjektive Diskomfort im Bezug zu objektiven Flimmerverschmelzungsfrequenzen sowie Unterschiede von zentralen und peripheren Flimmerverschmelzungsfrequenzen. Die erste von zwei durchgeführten Studien hat zum Ergebnis, dass etwa ein Drittel der Probanden den Flicker wahrgenommen haben und davon etwa die Hälfte diesen als (sehr) unangenehm empfinden. Die periphere Flimmerverschmelzungsfrequenz differiert nach der zweiten Studie von der zentralen Flimmerverschmelzungsfrequenz und hat im Bereich zwischen 20° und 30° um den zentralen Sehpunkt um ca. 10 Hz höhere Frequenzen. Die zentrale Flimmerverschmelzungsfrequenz beträgt $47 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$, die peripheren betragen um 25° etwa 54-56 Hz.

Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass der Flicker seit der Nutzung von LEDs in Verbindung mit gepulster Ansteuerung ein relevantes Phänomen im Straßenverkehr ist. Technische sowie ergonomische Fragestellungen sind offen und bedürfen dringend einer Untersuchung. Insbesondere die Frage, wie es zu dem Diskomfort bei Frequenzen von 100-200 Hz verursacht durch Ampeln und Fahrzeugleuchten kommt, sollte beantwortet und in Vorgaben für die Leuchtenhersteller überführt werden.

¹ Technische Universität Chemnitz, Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement

Die dunkle Seite des Lichts - LEDs und Flicker

Die technische Basis künstlicher Beleuchtung befindet sich in einem Umbruch. Seit der Umsetzung der Energieeffizienzklassen in der EU und damit einhergehendem Herstellungs- und Vertriebsverbot für Glühlampen (Richtlinie 2009/125/EG, 2009) findet neben dem Ersatz herkömmlicher Leuchtmittel durch sogenannte Retrofits ein Einsatz von LEDs in verschiedensten Anwendungen statt (Fördergemeinschaft Gutes Licht, 2010). Von der Hintergrundbeleuchtung von Monitoren und Fernseher über die Nutzung in Schreibtisch- und Raumbeluchtungen bis hin zum Einsatz in automotiven Anwendungen ergeben sich mehrere Vorteile, die durch die neue Technik genutzt werden können (Tab. 1). Diesen stehen nur wenige Nachteile gegenüber, denen aber besondere psycho-physiologische Relevanz innewohnt (Tab. 1). Selbst ein vermeintlicher Vorteil - die geringe Einschaltdauer - kann in Verbindung mit einer Pulsung zur Verstärkung negativer Effekte führen.

Tab. 1: mögliche Vor- und Nachteile von LED-Leuchtmitteln gegenüber konventionellen Leuchtmitteln (Glühlampe, Halogenlampe, Gasentladungslampe)

Vorteile von LEDs	Nachteile von LEDs
lange Lebensdauer	notwendige Elektronik (Hanus, 2004)
hohe Energieeffizienz	z. T. Höhere Anschaffungskosten (Fördergemeinschaft Gutes Licht, 2010)
beliebige (Licht-)Farben	punktueller Wärmeentwicklung (Krückeberg, 2007)
vibrationsunempfindlich	punktuell hohe Leuchtdichten (BAuA, 2013)
geringe Wärmeentwicklung	Flicker
frei von IR- und UV-Strahlung	
Dimmbarkeit	
geringe Einschaltdauer	
(Fördergemeinschaft Gutes Licht, 2010)	

In verschiedenen Anwendungen werden LEDs nicht mit einer konstanten Gleichspannung versorgt, sondern mit unterschiedlichen Frequenzen sowie aus bestimmten Gründen gepulst angesteuert (Tab. 2, Abb. 1). Ein Grund ist die Gleichrichtung von Wechselströmen zum Betreiben der Dioden. Weitere Ursachen sind die Erzeugung eines Tastverhältnisses zur Dimmung, Wärme- oder Leistungsregulation.

Tab. 2: Beispiele für die Pulsung von LED-Licht (eigene Messungen)

Anwendung	exemplarische Frequenzen
Ampeln / Lichtzeichenanlagen	50 Hz, 100Hz
KFZ-Rücklichter	100Hz, 200Hz, 600Hz
KFZ-Tagfahrleuchten	200 Hz
KFZ-Frontscheinwerfer	200 Hz, 600 Hz
KFZ-Innenraumbelichtung	75 Hz, 200 Hz, 500 Hz
Wechselverkehrszeichen	70 Hz, 300 Hz, ∞ Hz
LED-Info-Anzeigedisplays	50 Hz, 100 Hz, 400 Hz



Abb. 1: Beispiele für Flicker in Rückleuchten (links), Wechselverkehrszeichen (Mitte) und Anzeigen, hier eines Fahrstuhls (rechts)

Zur Ermittlung von Flicker sind Flickermeter erhältlich, die Frequenz, Tastverhältnis usw. ermitteln (z. B. Klein, 2013; Arri, 2013). Eine einfache Methode zur überschlägigen Ermittlung der Flickerfrequenzen von Leuchtquellen sowie für schwer erreichbare Objekte ist die Nutzung digitaler Kameras. Bei bekannter Verschlusszeit und einer Relativbewegung der Kamera zum Objekt (Schwenken) erscheint die Leuchtquelle mehrfach auf dem Bild, man kann von einer Perlschnur sprechen (Abb. 2). Bei mehrfacher Durchführung ist die Flickerfrequenz hinreichend genau ermittelbar und eine grobe Einschätzung von Tastverhältnis und Wellenform möglich.

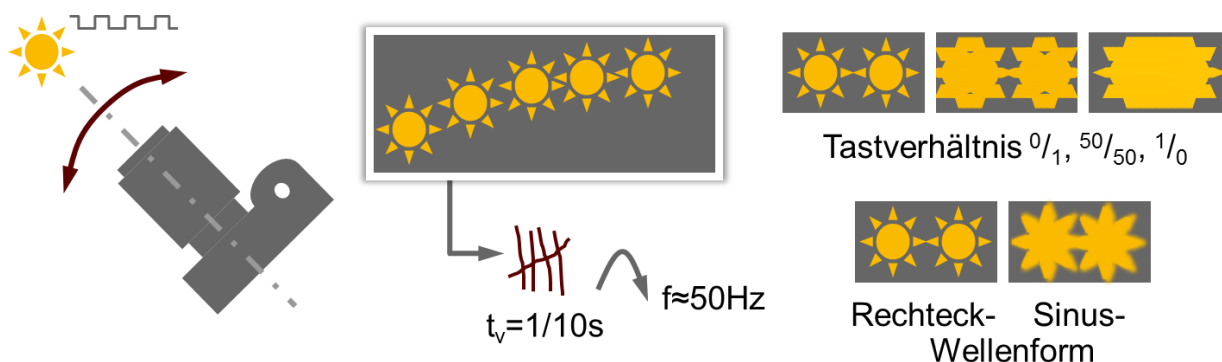


Abb. 2: Ermittlung von Flickerfrequenzen mit Digitalkameras (Beispiel: bei einer Verschlusszeit von 1/10 s und fünf auf dem Bild sichtbaren Objekten ergibt sich eine Flickerfrequenz von etwa 50 Hz)

Die Flimmerverschmelzungsfrequenz des menschlichen Auges - Ich sehe was, was Du nicht siehst

Der menschliche Sehapparat ist das wichtigste Wahrnehmungsorgan (Mühlstedt, Glöckner, Spanner-Ulmer, 2011). Ein Großteil der Informationen wird visuell aufgenommen. Hierbei erfordern technische Innovationen der Interaktion immer wieder die Überprüfung notwendiger Anpassung an den menschlichen Sehapparat, der bestimmte Eigenschaften und Fähigkeiten besitzt (Roßner, Hartwich, Bullinger, 2012). Eine der wichtigen Eigenschaften des Auges, neben Akkomodations-, Auflösungs- und Adaptationsvermögen sowie Farbwahrnehmung, ist die Flimmerverschmelzungsfrequenz (engl. flicker-fusion threshold). Diese bezeichnet "die Frequenz, bei der eine Folge von Lichtblitzen als ein kontinuierliches Licht wahrgenommen wird" (Schlick, Luczak, Bruder, 2010). Es wurden verschiedene Parameter beschrieben, die Einfluss auf diese Frequenz haben (siehe insbesondere Landis, 1954; Kleberger, 1960):

- Leuchtdichte (Jaklitsch, 2004) und Signal-Noise-Ratio / SNR (Kleberger, 1960), Wellenlänge und Tastverhältnis (Groneberg, 2010), Form und Größe des Reizes (Kleberger, 1960),
- Adaptationszustand der Netzhaut, Vigilanz d. Probanden (Schmidtke, 1965),
- Alter der Probanden (Lachenmayer et al., 1994; Groneberg, 2010),
- Umgebungsfaktoren wie Hintergrundgeräusch (Amelang et al., 2006).

Einige in bisherigen Untersuchungen ermittelte Flimmerverschmelzungsfrequenzen sind in Tab. 3 angegeben. Die großen Unterschiede und Bandbreiten entstehen durch veränderte Parameter, die je nach Versuchsbedingung verschiedene Frequenzen ergeben.

Tab. 3: Flimmerverschmelzungsfrequenzen aus der Literatur

Frequenz	Autor(en)	Angegebene Parameter
0-55Hz, bis 85 Hz	Landis, 1954	0-55 Hz zentral, bis 75 Hz peripher, bis 85 Hz bei best. Lichtfarben
0-97 Hz	Hentschel, 2002	in Abhängigkeit von z. B. Umfeldleuchtdichte
10/25-80 Hz, meist 50-60 Hz	Tauer, 2010	10-25 Hz bei geringen Leuchtdichten, 80 Hz bei großer Helligkeit, meist 50-60 Hz
20-85 Hz	Ehrenstraßer, 2008	
82 Hz	Hylkema, 1942	30° großes Feld, 500 cd/m ²
bis 85 Hz	Gralla, 2007	

Ein bislang wenig untersuchter Parameter ist die Lage des Reizes auf der Netzhaut, die periphere Flimmerverschmelzungsfrequenz. Hierzu wurden Angaben zum ungefähren Verlauf gemacht - dieser sei im Bereich von 30-40° um die Mitte des Gesichtsfeldes am größten und sowohl zur Mitte als auch nach außen geringer (Roehrig, 1959; Gralla, 2007). Ein weiterer wenig untersuchter Parameter ist die Streuung der Frequenzen in Populationen. Die Untersuchungen der Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement setzen an diesen Forschungslücken - periphere Flimmerverschmelzungsfrequenz und Streuung dieser in Populationen - an und untersuchen diese. Doch zuerst soll untersucht werden, wie hoch die Relevanz des Flickers im Straßenverkehr ist.

Studie zu Diskomfort durch Flicker

Zur Beantwortung der Forschungsfrage, ob Flicker von Lichtquellen im Straßenverkehr erkannt wird und einen Diskomfort hervorruft, wird eine quantitative Studie zur Wahrnehmung sowie subjektiver Bewertung des Flickers bei Lichtzeitanlagen und Fahrzeuglichtern durchgeführt. Für die Studie wurden insgesamt 1.792 Personen mittels eines standardisierten Fragebogens befragt, ein Teil davon online und ein Teil offline auf Parkplätzen. Die Probanden waren im Durchschnitt 34,7±12,0 Jahre alt, zu 47% weiblich und 55% nutzen eine Sehhilfe.

Die Auswertung zeigt, dass 40% der Probanden ein Flimmern bei Ampeln wahrgenommen haben, 22% bei Fahrzeugrückleuchten und 29% bei Tagfahrleuchten (Abb. 3). Die statistische Auswertung zeigt, dass weder Alter noch Geschlecht, Sehhilfe oder Teilnahme am Straßenverkehr einen signifikanten Einfluss auf diese Häufigkeiten haben.



Abb. 3: Wahrnehmung eines Flimmerns/Flackerns bei den erfragten LED-Lichtquellen (Bildquellen: Wikimedia Commons, 2013)

Das Flimmern wird von jeweils über der Hälfte der Befragten als unangenehm oder sehr unangenehm beurteilt (Ampeln 55% / Rückl. 63% / Tagfahrl. 58%) und wird nicht zu einer bestimmten Tageszeit verstärkt wahrgenommen (ähnliche Anteile fallen auf tagsüber / Dämmerung / nachts und "weiß nicht").

Die Anzahl der Menschen, die das Flimmern in den untersuchten Anwendungen bereits wahrgenommen haben, ist überraschend hoch. Gingen Prognosen von einstelligen Prozentzahlen aus, legen Werte von 20-40% eine hohe Relevanz des

Themas dar. Die Beurteilung des Flimmerns hingegen ist wie erwartet sehr negativ, und das interessanterweise unabhängig von der Tageszeit. Schlussfolgernd stellt sich die Forschungsfrage, inwiefern diese subjektive Alltagswahrnehmung mit konkreten Laboruntersuchungen zur Flimmerverschmelzungsfrequenz nachvollzogen werden kann. Folgend wird dazu eine zweite Studie vorgestellt.

Studie zu peripheren Flimmerverschmelzungsfrequenzen

Um periphere Flimmerverschmelzungsfrequenzen des Menschen zu ermitteln, wurde eine Laborstudie durchgeführt. Ein Versuchsträger, der gepulstes Licht variabler Frequenz (10-300 Hz) abgibt, wird in verschiedenen Punkten des Gesichtsfeldes abgebildet, indem nacheinander verschiedene Punkte im Raum fokussiert werden. Der Versuchsleiter ermittelt die jeweilige Flimmerverschmelzungsfrequenz des Probanden durch absteigendes und aufsteigendes Ändern der Pulsfrequenz. Als Versuchsträger dient ein LED-Fahrzeug-Rücklicht (Abb. 4). In diesem sind 12 rote LEDs zweireihig angeordnet, sodass sich mit einem Abstand zu den Augen der Probanden von 4,1 m und einer Leuchtfläche von $110 \times 30 \text{ mm}^2$ ein Sehwinkel der Lichtquelle von $1,5^\circ \times 0,4^\circ$ ergibt. Die Lichtquelle besitzt eine Leuchtdichte von $L=2.000 \text{ cd/m}^2$ und die Umgebung im Mittel $L=3 \text{ cd/m}^2$, was einem Leuchtdichteverhältnis von etwa 1:700 entspricht. Ausgehend von der Lichtquelle sind 50 Messpunkte in 8 Strahlen bis zu den Grenzen des Gesichtsfeldes angeordnet (Abb. 4/5). An dem Versuch nahmen $n=28$ Probanden teil. Das Alter der Probanden beträgt $25,3 \pm 4,7$ Jahre, 30% sind weiblich und 41% nutzen eine Sehhilfe.



Abb. 4: Versuchsträger (links, Leuchtelemente sind die 12 LEDs auf der linken Seite, Frequenz- und Tastverhältnis über Bedienfeld links) und Versuchsaufbau (rechts - Versuchsträger mit Versuchsleiter links oben, Proband rechts unten)

Die ermittelten Flimmerverschmelzungsfrequenzen liegen im Probandenmittel zwischen 38 und 56 Hz. Es zeigt sich eine Verteilung, wie sie auch in anderen Untersuchungen beschrieben wurde: im zentralen Gesichtsfeld ist diese eher niedrig mit 47 Hz, steigt peripher bis etwa 20° - 30° im Gesichtsfeld auf 54-56 Hz an, um nach außen bis an die Ränder des Gesichtsfeldes unter 50 Hz abzufallen (Abb. 5).

Die Frequenzen streuen intraindividuell um etwa $s=5,6$ Hz, wobei die Daten normalverteilt sind und das 5./95. Perzentil je 9 Hz vom Mittelwert und das 1./99. Perzentil etwa 13 Hz vom Mittelwert entfernt sind. Das absolute Maximum der Studie liegt bei einer Frequenz von 87,5 Hz.

Die peripheren Flimmerverschmelzungsfrequenzen dienen nicht als Erklärung für den Diskomfort aus der ersten Studie. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, denn insbesondere die maximalen Flimmerverschmelzungsfrequenzen um 100 Hz stehen Perlschnurverschmelzungsfrequenzen von 300-900 Hz gegenüber (Strauß, 2007). Dies sind Grenzfrequenzen, bei denen ein Netzhautabbild einer Lichtquelle als unterbrochene Linie wahrgenommen wird, das sich relativ auf dieser bewegt. Es existiert eine Forschungslücke bezüglich "dynamischer", eine Relativbewegung der Lichtquelle im Gesichtsfeld aufweisender Flimmerverschmelzungsfrequenzen. Was im Detail zwischen den Flimmer- und den Perlschnurverschmelzungsfrequenzen für Effekte auftreten, muss weiter wissenschaftlich untersucht werden.

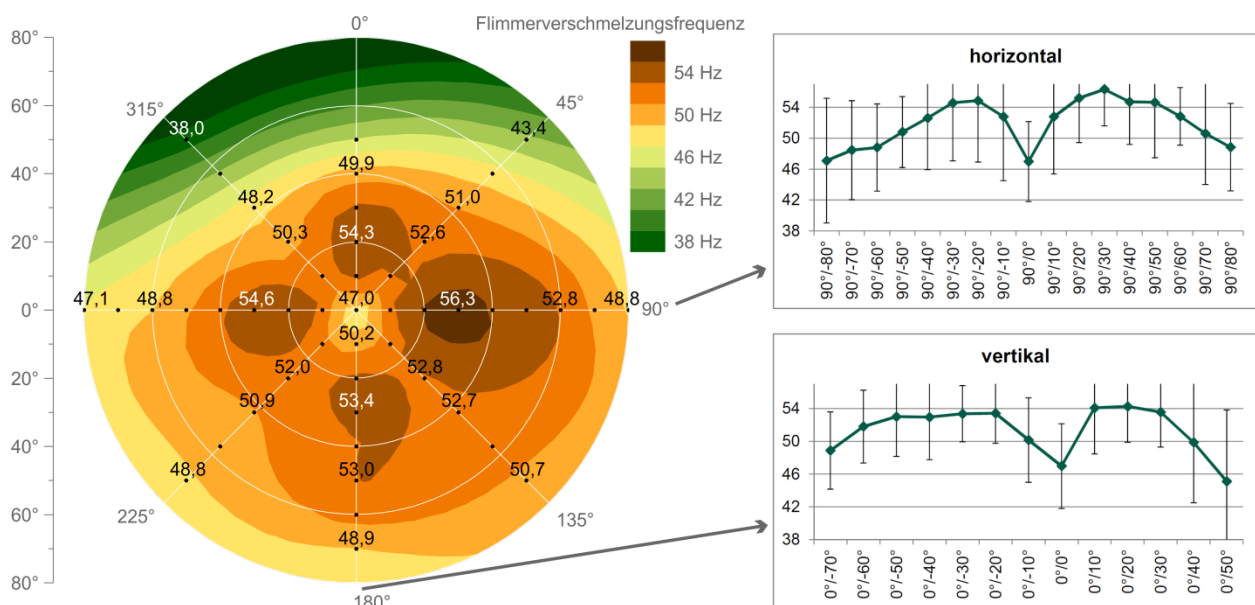


Abb. 5: periphere Flimmerverschmelzungsfrequenzen im Flächendiagramm (links) und in zwei Schnitten (rechts)

Zusammenfassung und Ausblick

Moderne Lichttechnik bringt durch den Einsatz von LEDs nicht nur Vorteile mit sich, sondern auch einige Probleme, wie den Flicker. Dieser kann unter bestimmten Bedingungen Diskomfort durch unvollständige Flimmerverschmelzung erzeugen. Eine dieser Bedingungen ist das Auftreten des Reizes im peripheren Gesichtsfeld. Dieser erklärt den Effekt aber noch nicht vollständig. Eine weitere Bedingung, die sich in Beobachtungen zeigt, scheint eine Bewegung des Reizes im Gesichtsfeld zu sein, verursacht entweder durch Bewegungen des Objekts oder der Augen des Betrachters. Hier sollten Folgeforschungen anknüpfen.

Weiterhin ist die Frage offen, ob durch ein wahrgenommenes Flimmern ein Diskomfort zustande kommt oder sogar die Sicherheit im Straßenverkehr gefährdet ist. Strategien zur Vermeidung des Flimmerns neben einer nicht immer sinnvollen Frequenzerhöhung (mögliche Probleme zur elektromagnetischen Verträglichkeit / EMV) sollten ebenfalls gesucht werden. Darüber hinaus existieren weitere Detailfragen, die in diesem Zusammenhang erforscht werden sollten, etwa nichtvisuelle Auswirkungen von Flicker, der Wellenform (Rechteck, Sägezahn, Sinus etc.) sowie mögliche Effekte beim Auftreten mehrerer Flicker-Lichtquellen.

Der Beitrag entstand z. T. auf Basis der Projektarbeit von Tim Heidrich (2013).

Literatur

- Amelang, Manfred; Bartussek, Dieter; Stemmler, Gerhard; Hagemann, Dirk. (2006). *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. Kohlhammer.
- Arri. (2013). Light Analyzer. Zugriff am 25.07.2013: http://www.arri.com/lighting/americas/arri_accessories/light_analyzer.html.
- BAuA. (2013). Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED). Forschung Projekt F 2115. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. ISBN 978-3-88261-726-9.
- Ehrenstraßer, Michael. (2008). *Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage*. Herbert Utz Verlag.
- Fördergemeinschaft Gutes Licht. (2010). *Licht.wissen 17. LED: das Licht der Zukunft*. ISBN-Nr. Druckausgabe 978-3-926193-55-1.
- Gralla, V. (2007). *Peripheres Sehen im Sport - Möglichkeiten und Grenzen dargestellt am Beispiel der synchroptischen Wahrnehmung*. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.
- Groneberg, T. (2010). *Die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei altersabhängiger Makuladegeneration*. München: Technische Universität München.
- Hanus, B. (2004). *Experimente mit superhellen Leuchtdioden*. Poing: Franzis Verlag.
- Heidrich, Tim. (2013). *Untersuchung des Diskomforts von gepulsten LED-Leuchten*. Projektarbeit. Technische Universität Chemnitz.
- Hentschel, Hans-Jürgen. (2002): *Licht und Beleuchtung*. 5., neubearb. und erw. Aufl. Hüthig, Heidelberg.
- Hylkema, B. S. (1942). Fusion Frequency with Intermittent Light under Various Circumstances. *Acta ophthal. (Kbh.)*, 20, 159-180.
- Jaklitsch, Walter (2004). *Handbuch der Laufbildfotografie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kleberger, Eberhard. (1960). Zur Pathologie der Flimmerverschmelzungsfrequenz. *Documenta Ophthalmologica*, 1961, 5(1), S. 226-320.

- Klein. (2013). Klein K10-A Colorimeter. Zugriff am 25.07.2013: <http://www.kleininstruments.com/colorimeters/k10-a/>.
- Krückeberg, J. (2007). *Hochleistungs-LEDs in der Praxis*. Poing: Franzis Verlag GmbH.
- Lachenmayer, B., Kojetinsky, S., Ostermaier, N., Angstwurm, K., Vivell, P., & Schaumberg, M. (Mai 1994). The Different Effects of Aging on Normal Sensitivity in Flicker and Light-Sense Perimetry. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 35(6), S. 2741-2748.
- Landis, Carney. (1954). Determinants of the Critical Flicker-Fusion Threshold. *Physiol. Rev.*, 34(2), S. 259-286.
- Mühlstedt, Jens; Glöckner, Stev; Spanner-Ulmer, Birgit. (2011). Licht und Farbe am Wissensarbeitsplatz – ergonomische Anforderungen der Nutzer. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.). *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess*, Bericht zum 57. Arbeitswissenschaftlichen Kongress, S. 331 - 334. Dortmund: GfA-Press. ISBN 978-3-936804-10-2.
- Richtlinie 2009/125/EG. (2005). Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.
- Roehrig, W. (1959). The Influence of the Portion of the Retina stimulated on the Critical Flicker-Fusion Threshold. *The Journal of Psychology*, S. 57-63.
- Roßner, P.; Hartwich, F.; Bullinger, A. C. (2012). ViFa 65plus – Visuelle Fahrerassistenzsysteme zur Kompensation altersbedingter Veränderungen. Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabrikssysteme, *Tagungsband VPP 2012 - vernetzt planen und produzieren & Symposium Wissenschaft und Praxis*. 8. November 2012 - 9. November 2012, Chemnitz, S. 405-410.
- Schlick, Christopher; Bruder, Ralph; Luczak, Holger. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg: Springer. ISBN 987-3-540-78332-9.
- Schmidtke, H. (1965). *Die Ermüdung*. Bern: Hans Huber.
- Strauß, Steffen. (2007). Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn.
- Tauer, Holger. (2010). *Stereo-3D*. Fachverlag Schiele & Schoen.
- Wikimedia Commons. (2013). File. Zugriff am 25.07.2013: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/LED_traffic_light.jpg, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/A6_avant_c6_led.jpg http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Mercedes-Benz_SLS_AMG_%28C_197%29_%E2%80%93_Scheinwerfer%2C_10._August_2011%2C_D%C3%BCsseldorf.jpg.