



Untersuchung des Stroboskopeffekts in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Bericht für die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)

Bearbeiter:

TU Ilmenau
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Dr.-Ing. C. Vandahl
Prof. Dr. sc. nat. Ch. Schierz

Fachliche Begleiterin bei der BG ETEM:

Dr. sc. S. Hubalek

Ilmenau, 25.02.2025

Inhalt

1	Einführung in die Thematik	3
2	Testaufbau.....	4
2.1	Aufbau	4
2.2	Parameter.....	7
2.3	Testablauf.....	8
3	Auswertung	8
3.1	Bestimmung von Schwellen-Modulationstiefen	8
3.2	Bestimmung von Schwellen-Frequenzen	10
3.3	Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und dem SVM-Wert.....	12
4	Vergleiche mit der Literatur	14
5	Zusammenfassung.....	17
6	Ausblick	18
7	Literatur.....	18
8	Anhang	20
8.1	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe	20
8.2	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz	22

1 Einführung in die Thematik

Lichtflimmern ist eine sich periodisch wiederholende Veränderung des Lichtstroms von Lichtquellen. Es entsteht, wenn die Lichtquellen nicht mit konstantem Strom (Gleichstrom) betrieben werden. Man spricht dann mitunter auch von einem gepulsten Betrieb, bei dem die Lichtquelle in kurzen Abständen an- und ausgeschaltet wird. Der Pulsbetrieb wird auch zum Dimmen von Leuchtdioden benutzt. Bei der sogenannten Pulsweitenmodulation (PWM) wird die Länge der Lichtpulse umso kürzer, je weiter gedimmt wird.

Nicht jedes Lichtflimmern ist durch den Menschen wahrnehmbar. Je mehr Lichtpulse pro Sekunde dargeboten werden, desto höher ist die Frequenz des Lichtstromes und desto schwieriger sind die Lichtpulse vom Auge noch auseinanderzuhalten. Ab einer bestimmten Frequenz (Flimmerverschmelzungsfrequenz) sind sie nicht mehr getrennt zu sehen, sie verschmelzen zu einer konstanten Lichtwahrnehmung.

Für statische Situationen, in denen sich weder die beleuchteten Gegenstände noch das Beobachteraue bewegen, liegt die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter 90 Hz (90 Pulse pro Sekunde). In nicht statischen Situationen, bei denen sich beleuchtete Gegenstände bewegen, kann auch ein Lichtflimmern bei Frequenzen größer als 90 Hz als Flimmern gesehen werden. Es tritt dann der sogenannte Stroboskopeffekt auf (Abbildung 1). Es wird davon ausgegangen, dass ein relativ großer Teil der Beschwerden über Flimmern in Beleuchtungsanlagen auf den Stroboskopeffekt und nicht auf ein direkt wahrgenommenes Flimmern zurückzuführen ist.



Abbildung 1: links: unbewegte Hand, Mitte: die bewegte Hand erscheint weiterhin als ein einzelnes Objekt, rechts: die Finger der Hand sind durch den Stroboskopeffekt mehrfach wahrnehmbar

Aufgrund des Erfordernisses des Energieeinsparens werden in Betrieben vermehrt dimmbare Leuchten eingesetzt. Aufgrund von Alterung und Verschmutzung müssen neue Anlage überdimensioniert werden. Nach ASR A3.4 werden für viele Bereiche 500 lx gefordert. In sauberen Büros werden bei Neuanlagen mind. 625 lx installiert. In Produktionsbereichen sind es mind. 750 lx bis hin zu 1000 lx. Dort sind dimmbare Leuchten bis 50% interessant. Noch weiter gedimmt werden die Systeme als Tageslichtergänzung. Wenn beispielsweise durch das Tageslicht 400 lx erreicht werden, werden durch das Kunstlicht nur die fehlenden 100 lx ergänzt (10% des Ausgangswertes von 1000 lx).

Zur Bewertung der Wahrnehmung des Stroboskopeffekts zwischen 80 und 2000 Hz dient der SVM-Wert (Stroboscopic Visibility Measure). Ein Wert bei 1,0 bedeutet, dass ein durchschnittlicher Beobachter den Effekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkennt. Die Ökodesignrichtlinie der EU [1] fordert seit 2024 für LED und OLED-Netzspannungslichtquellen unter Vollastbetrieb einen $SVM \leq 0,4$. Die genannten Grenzwerte gelten allerdings nicht für den gedimten Betrieb der Leuchte. Bei Dimmung mit Pulsweitenmodulation (PWM) kann sich das Flimmern allerdings verstärken. Bei der Bewertung wird das nicht berücksichtigt, es sind keinerlei Grenzwerte vorgegeben, die eingehalten werden müssen.

Beim Dimmen mit Pulsweitenmodulation ändert sich der Tastgrad (Duty Cycle). Das ist der Zeitanteil währenddessen die Lichtquelle eingeschaltet ist (siehe Abbildung 7) und die Beleuchtungsstärke sinkt. Aus der

Literatur ist beschrieben, dass die Stärke des wahrgenommenen Stroboskopeffektes von der Umgebungshelligkeit (Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke) abhängt [2], [5]. Diese Abhängigkeit wird im derzeit zur Bewertung verwendeten SVM-Wert nicht berücksichtigt.

In der Studie wurde nun untersucht, welche Auswirkungen eine PWM-Dimmung und damit eine Beleuchtungsstärkevariation auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes hat und inwieweit die Bewertungsgröße SVM auch für diesen in der Praxis häufig vorkommenden Anwendungsfall gültig ist.

2 Testaufbau

2.1 Aufbau

Als Basis dienen die Untersuchungen von Vogels [3] und Perz [4], [5]. Der dort verwendeten Testaufbau (Abbildung 2) wurde nachempfunden.



Abbildung 2: Testaufbau aus [3], [4] und [5]: oben links: Die über dem Tisch montierten Leuchten, oben rechts: Versuchsaufbau mit einer Drehscheibe, unten links: Drehscheibe unter (kontinuierlichem) Gleichlicht, unten rechts: Drehscheibe unter moduliertem Wechsellicht

Auf einer drehbaren Scheibe (Radius 14 cm) befindet sich ein kreisförmiges Sehobjekt (Durchmesser 2,7 cm). Der Abstand des Objektes vom Kreismittelpunkt beträgt 10,5 cm. Die Scheibe ist in eine Tischplatte eingelassen, vor der die Testperson Platz nimmt (Maße s. Abbildung 4). Direkt über der Drehscheibe, im Abstand von 85 cm, befindet sich eine Leuchtdiode als Lichtquelle. Der Sehbereich ist eingehaust, die Oberflächen der Einhausung, der Tischplatte und der Drehscheibe sind weiß (Reflexionsgrad: 0,9). Auf diese

Weise adaptiert die Testperson auf eine nahezu konstante Leuchtdichte. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [3], [4] und [5] hat die Drehscheibe eine weiße Oberfläche und das Sehobjekt ist schwarz (Reflexionsgrad: 0,03; Kontrast zu weiß: 0,97).

In [3], [4] und [5] sind die Drehscheibe und unmittelbare Umgebung schwarz, die Wand hinter dem Tisch hingegen ist weiß (Abbildung 2). Insgesamt liegen also andere Adaptationsbedingungen vor, als in [3], [4] und [5].

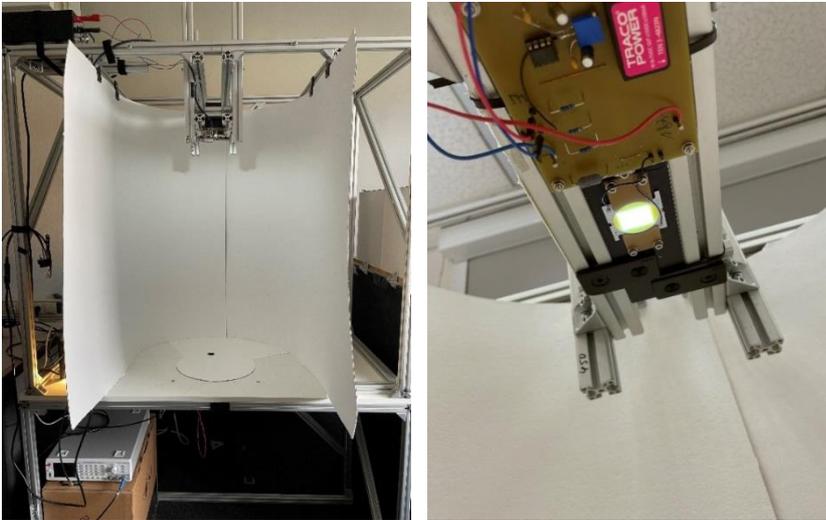


Abbildung 3: links: Foto des Teststand ohne Abdeckblende, rechts: Lichtquelle

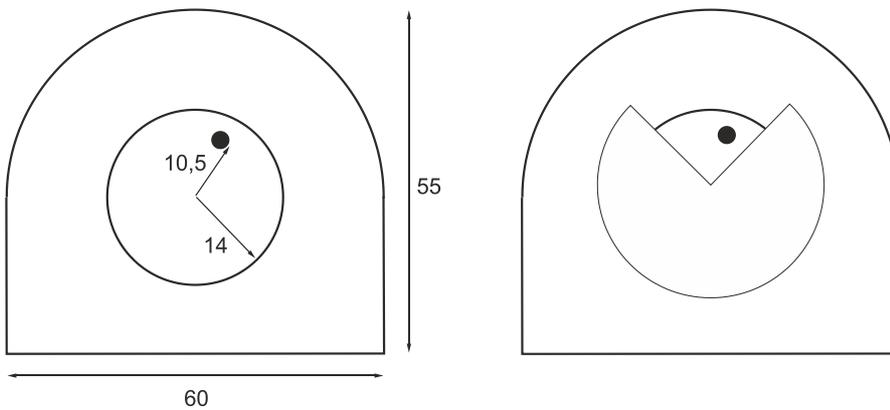


Abbildung 4: Skizze der Tischoberfläche (Maße in cm), links ohne Abdeckblende, rechts mit Abdeckblende

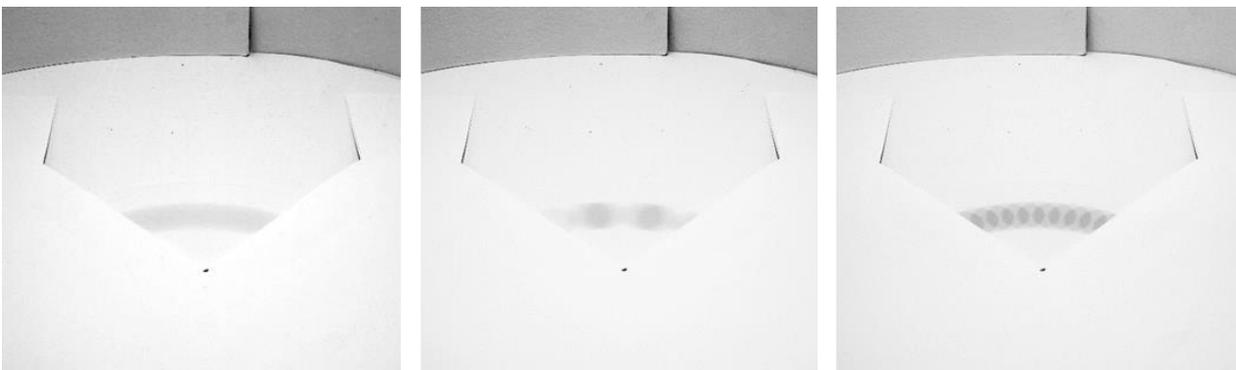


Abbildung 5: Darstellung der wahrgenommenen Effekte: links: kein Stroboskopeffekt, Mitte und rechts: verschiedene Stroboskopeffekte aufgrund der Beleuchtung mit unterschiedlichen Frequenzen

Um die Abhängigkeit des wahrgenommenen Stroboskopeffektes von der Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte ermitteln zu können, ist die Realisierung einer ausreichend homogenen Leuchtdichte erforderlich. Die Leuchtdichteverteilung wurde mit einer Leuchtdichtekamera (LMK mobile der Firma TechnoTeam) vermessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 und Tabelle 1 dargestellt. Die Tischplatte, der Bereich auf den die Testperson adaptiert, hat bei 1000 lx Beleuchtungsstärke eine mittlere Leuchtdichte von 285 cd/m² (minimal 265 cd/m², maximal 315 cd/m²).

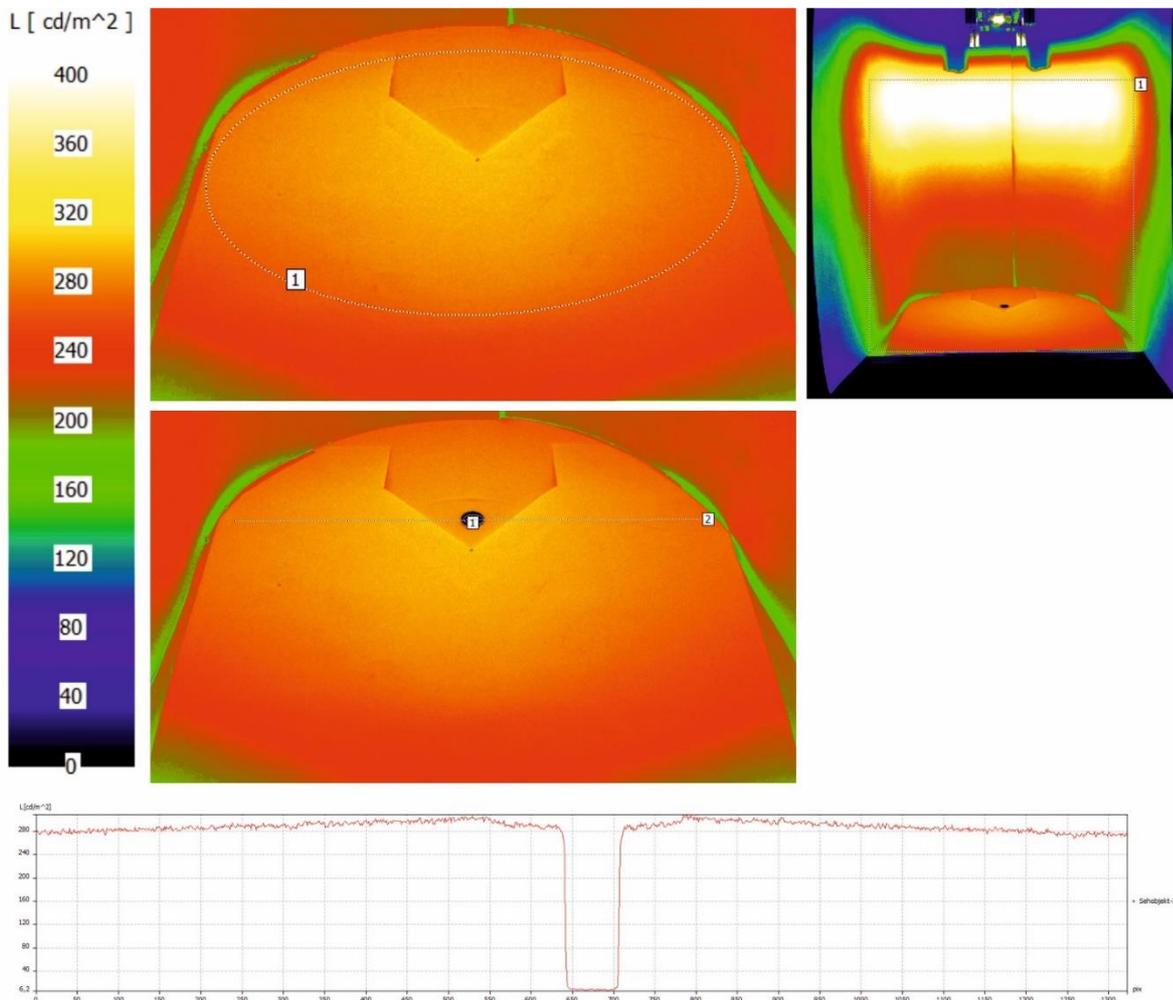


Abbildung 6: Leuchtdichteverteilung im Sehbereich bei einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx, Details s. Tabelle 1

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte zu Abbildung 6

Position in Abbildung 6	Region im Bild	Mittlere Leuchtdichte	Minimale Leuchtdichte	Maximale Leuchtdichte
oben rechts	Testraum [1]	285 cd/m ²	210 cd/m ²	437 cd/m ²
oben links	Tischplatte [1]	285 cd/m ²	265 cd/m ²	315 cd/m ²
mittig	Sehobjekt [1]	8,6 cd/m ²	6,0 cd/m ²	13,7 cd/m ²
unten	Schnitt an Linie [2]			

Die Leuchtdiode lässt sich in definierten Zeitverläufen ansteuern. Lichtstrom, Frequenz, Tastgrad (Duty Cycle DC) und Modulationstiefe (Kapitel 0) für alle Situationen können über einen Steuer-PC eingestellt werden. Die Untersuchung fand ausschließlich mit pulsweitenmoduliertem Licht (Rechteck-Signal) statt.

Alle Parameter sind für eine Beleuchtungsstärke von 1000 lx eingestellt und abgespeichert. Die Variation der Beleuchtungsstärke auf 250 lx und 63 lx erfolgt durch die Verwendung von Filterfolien.

Analog zu den Studien [3], [4] und [5] dreht sich die Scheibe mit einer Geschwindigkeit von 6,3 Umdrehungen pro Sekunde. Das Sehobjekt hat damit eine Geschwindigkeit von 4 m/s, was typischen menschlichen Bewegungen (z. B. ein schnelles Bewegen der Hand) entspricht.

Vorversuche zeigten, dass die Augenbewegungen der Testpersonen auch bei Beleuchtung mit konstantem Licht gelegentlich zur Wahrnehmung von stroboskopähnlichen Erscheinungen führen. Daher wurden $\frac{3}{4}$ der Drehscheibe abgedeckt (Abbildung 4 rechte Seite). Die Verkleinerung des Ausschnittes verringert die genannten Effekte.

2.2 Parameter

Die Untersuchung fand ausschließlich mit pulsweitenmoduliertem Licht (Rechteck-Signal) statt. Die Lichtquelle lässt sich in definierten Zeitverläufen ansteuern. Variiert wurden die Frequenz (f), der Tastgrad (Duty Cycle DC), die Modulationstiefe (m) sowie die Beleuchtungsstärke (E) nach Tabelle 2. Die Parameter f, DC und m sind in Abbildung 7 definiert.

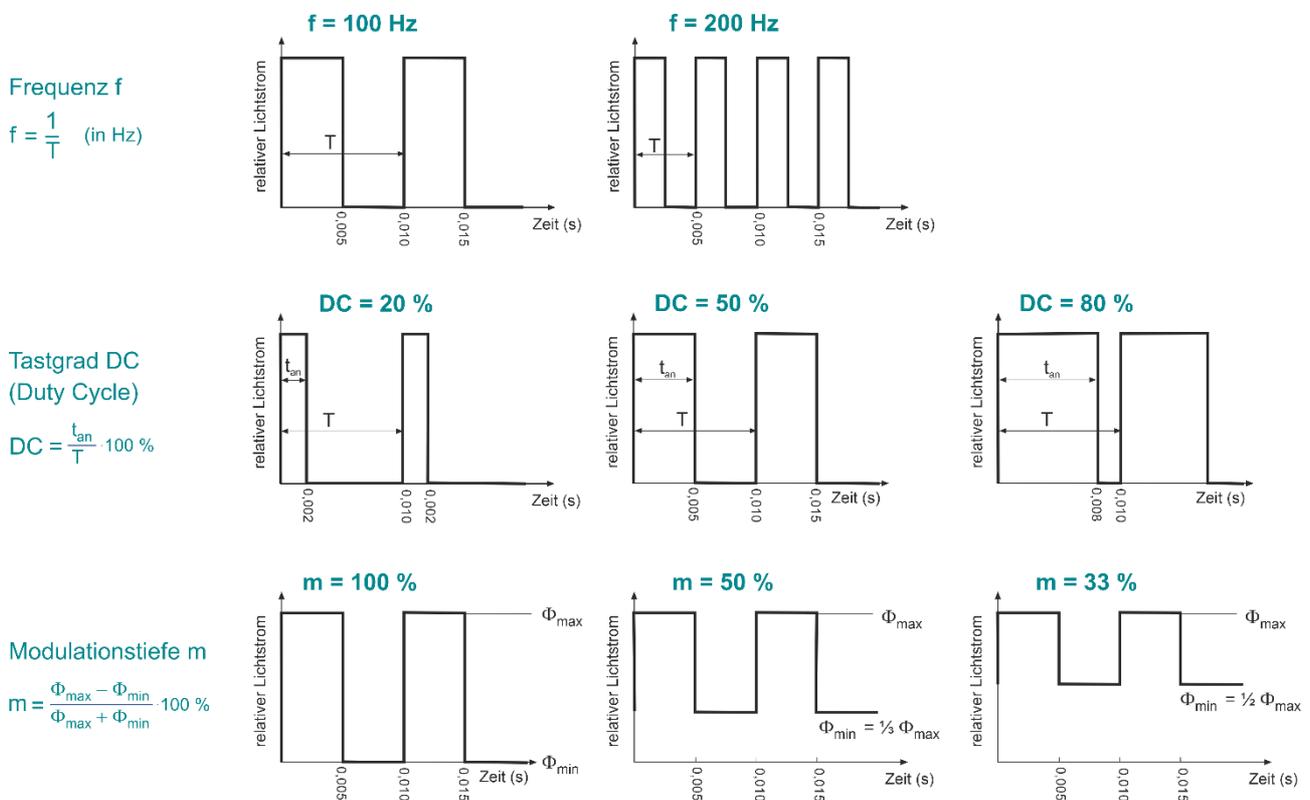


Abbildung 7: Definition der Untersuchungsparameter, für die Frequenz und die Modulationstiefe sind nicht alle untersuchten Werte dargestellt

Tabelle 2: Untersuchungsparameter

Frequenz f in Hz	100, 200, 400, 800, 1400, 2000
Tastgrad DC in %	20, 50, 80
Modulationstiefe m in %	100, 80, 63, 50, 40, 33, 0
Beleuchtungsstärke E in lx	1000, 250, 63

Durch die Kombinationen aus Frequenz, Tastgrad und Beleuchtungsstärke ergeben 54 Situationen.

2.3 Testablauf

Den 12 Testpersonen (6w, 6m, Alter zwischen 22 und 63) wurde die Beleuchtung mit einer Modulationstiefe von 100 % gezeigt und es wurde abgefragt, ob ein Stroboskopeffekt wahrgenommen wird. Danach wurde die Modulationstiefe auf 80 % verringert und wieder abgefragt. Auf diese Weise wurde die Schwelle der Erkennung mit absteigender Modulationstiefe ermittelt. Anschließend wurde der gleiche Ablauf mit aufsteigender Modulationstiefe wiederholt. Der gleiche Ablauf (aufsteigende und anschließend absteigende Modulationstiefe) wurde anschließend ein zweites Mal durchgeführt. Auf diese Weisen liegen insgesamt 48 Aussagen (4 je Person) für jede Modulationstiefe vor. Die Situation mit $f = 400$ Hz und $DC = 50\%$ kann in jedem Ablauf viermal vor, so dass hier 192 Aussagen je Modulationstiefe vorliegen.

Ein Durchlauf mit allen Wiederholungen dauerte etwa 30 Minuten pro untersuchte Beleuchtungsstärke. Pro Untersuchungstag wurde nur eine Beleuchtungsstärke untersucht.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung von Schwellen-Modulationstiefen

Die Aussage der Testperson lautet jeweils „Effekt erkannt“ oder „Effekt nicht erkannt“. Die prozentuale Häufigkeit der Aussage „Effekt erkannt“ kann als Erkennungswahrscheinlichkeit interpretiert werden und ist in Abbildung 8 für eine Situation in Abhängigkeit von der Modulationstiefe beispielhaft angegeben. Mit den Daten wurde eine logistische Regression durchgeführt, mit der für jede Erkennungswahrscheinlichkeit die zugehörige Modulationstiefe ermittelt werden kann. Üblicherweise wird die mittlere Schwelle bei 50 % Erkennungswahrscheinlichkeit festgelegt (Schwellen-Modulationstiefe $m_{50\%}$). Der Bereich zwischen den Modulationstiefen, bei denen die Erkennungswahrscheinlichkeiten 25 % und 75 % betragen, ist der Quartilabstand (grüner Bereich in Abbildung 8). Dieser wird in den folgenden Tabellen und Darstellungen als Streuungsmaß der momentanen Schwellen angegeben (innerhalb des Quartilabstands befinden sich 50 % der momentanen Schwellen). Die untere Quartilgrenze $m_{25\%}$ ist die Modulationstiefe, bei der der Stroboskop-Effekt in 25 % der Fälle erkannt wird, während die obere Quartilgrenze $m_{75\%}$ die Modulationstiefe ist, bei der der Stroboskop-Effekt in 75 % der Fälle erkannt wird. Mit größer werdender Modulationstiefe steigt also die Wahrscheinlichkeit des Erkennens.

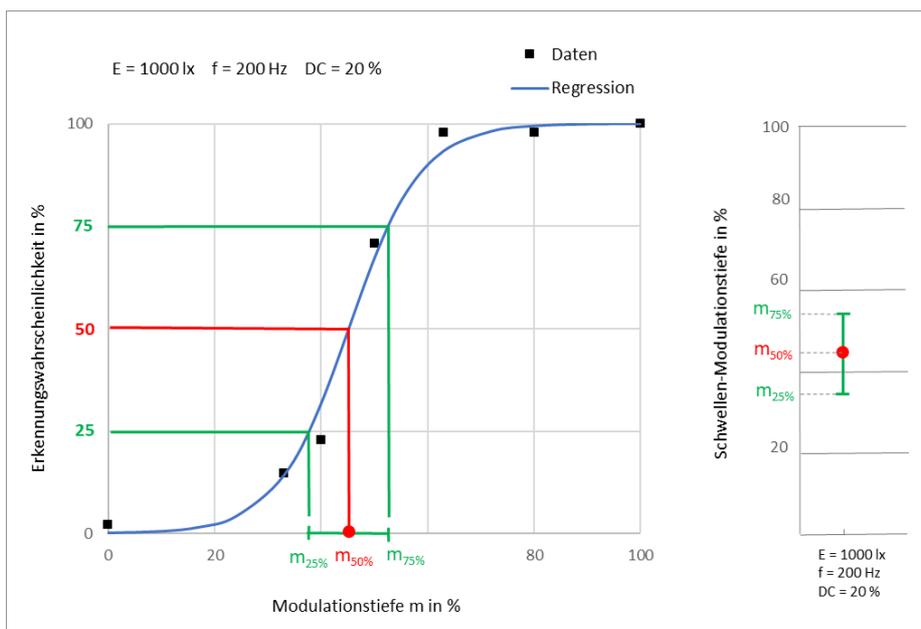


Abbildung 8: Links: Erkennungswahrscheinlichkeit für eine beispielhafte Situation in Abhängigkeit von der Modulationstiefe: Daten der Untersuchung und daraus ermittelte logistische Regressionsfunktion. Aus der Regressionsfunktion wurden der Schwellenwert der Modulationstiefe ($m_{50\%}$) sowie die Modulationstiefen bei den Erkennungswahrscheinlichkeiten von 25 % und 75 % ermittelt. Rechts: Darstellung von Schwelle (rot) und Quartilabstand (grün).

Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen für alle untersuchten Situationen sind im Anhang zu finden. Daraus lassen sich die Erkennungswahrscheinlichkeiten ablesen. In Tabelle 3 sind die Schwellen-Modulationstiefen mit den Quartilgrenzen für alle untersuchten Situationen zusammengefasst.

Tabelle 3: Schwellen-Modulationstiefen $m_{50\%}$ mit unterer und oberer Quartilgrenze $m_{25\%}$ und $m_{75\%}$, alle Angaben in %, fehlende Werte: die entsprechende Erkennungswahrscheinlichkeit wurde nicht erreicht.

	E	1000 lx	250 lx	63 lx	1000 lx	250 lx	63 lx	1000 lx	250 lx	63 lx
f	DC	Untere Quartilgrenze (25 %)			Schwelle (50 %)			Obere Quartilgrenze (75 %)		
100 Hz	20 %	20	16	18	27	25	27	35	35	36
	50 %	22	20	20	31	32	29	40	43	38
	80 %	63	75	64	87	92	95			
200 Hz	20 %	38	37	38	45	46	45	53	54	51
	50 %	35	35	34	44	45	43	52	56	51
	80 %	89	94	92						
400 Hz	20 %	58	66	58	67	72	68	77	78	77
	50 %	60	61	59	74	76	74	87	92	89
	80 %									
800 Hz	20 %	94	99							
	50 %									
	80 %									

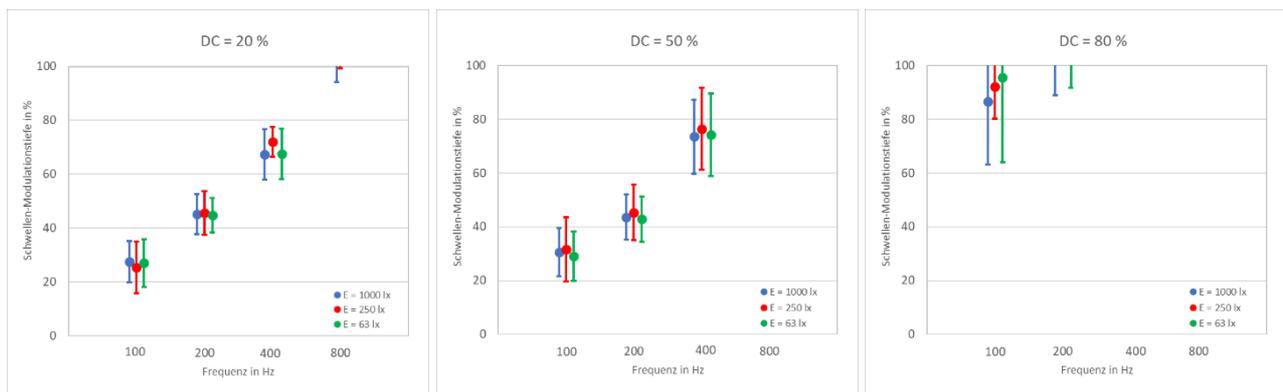


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 3: Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Beleuchtungsstärken und Tastgrade

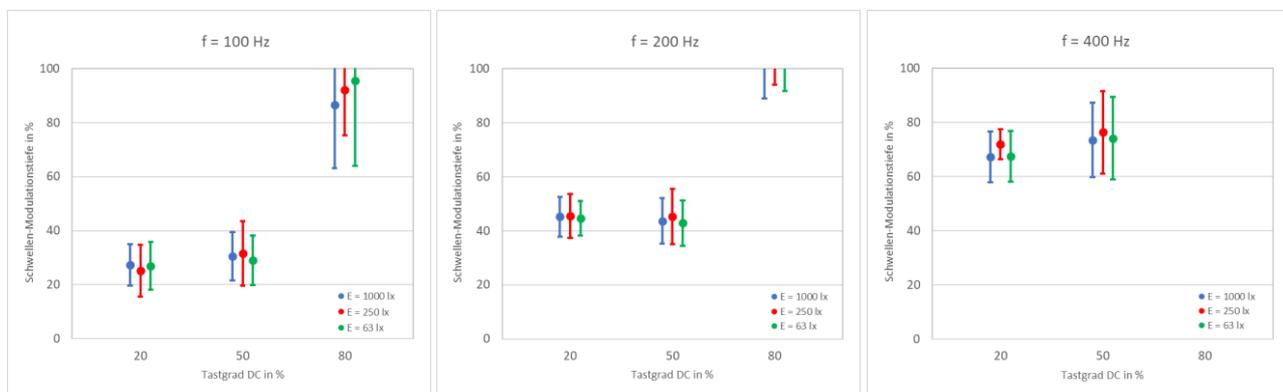


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 3: Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad DC für verschiedene Beleuchtungsstärken und Frequenzen

Erwartungsgemäß hat die Frequenz einen sehr großen Einfluss. So zeigt sich eine Zunahme des Schwellenwertes mit größer werdender Frequenz (Abbildung 9). Ab einer Frequenz von 800 Hz wird der Stroboskoppeffekt selbst bei maximaler Modulationstiefe $m = 100\%$ nur noch mit geringen Wahrscheinlichkeiten erkannt. Die untere Quartilgrenze $m_{25\%}$ wird nur in zwei Situationen ($DC = 20\%$ bei $E = 1000\text{ lx}$ und $E = 250\text{ lx}$) erreicht. In allen anderen Fällen liegt die Erkennungswahrscheinlichkeit unter 25% .

Es wurden drei Tastgrade untersucht. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, gibt es nur geringe Unterschiede zwischen $DC = 20\%$ und $DC = 50\%$. Beim Tastgrad von 80% hingegen werden selbst hohe Modulationstiefen nur noch mit geringen Wahrscheinlichkeiten erkannt. Bei Frequenzen von 400 Hz und mehr liegen die Erkennungswahrscheinlichkeiten unter 25% .

Da Tastgrade von 60% und 70% nicht untersucht wurden, kann darüber keine Aussage getroffen werden. Lichtquellen, die mit $DC = 80\%$ betrieben werden, sind nur in geringem Maße gedimmt. Meist werden stärkere Dimmungen benötigt. Eine klare Aussage zur Auswirkung des Tastgrades im Bereich zwischen 50% und 80% wäre wichtig für die Praxis.

Die Annahme, dass die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes von der Beleuchtungsstärke abhängt, konnte durch die Untersuchung nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse für Beleuchtungsstärken von 63 lx bis 1000 lx stimmen im Wesentlichen überein (Abbildung 9 und Abbildung 10).

3.2 Bestimmung von Schwellen-Frequenzen

Zur Bestimmung von Schwellen-Frequenzen wurde analog der Auswertung in Kapitel 3.1 eine logistische Regression der ermittelten Erkennungswahrscheinlichkeiten jetzt in Abhängigkeit von der Frequenz durchgeführt (Abbildung 11).

Die Schwellen-Frequenz $f_{50\%}$ ist die Frequenz, bei der die mittlere Erkennungswahrscheinlichkeit 50% beträgt. Mit zunehmender Frequenz sinkt die Erkennungswahrscheinlichkeit. Daher ist die obere Quartilgrenze $f_{25\%}$ die Frequenz, bei der der Stroboskop-Effekt in 25% der Fälle erkannt wird, während die untere Quartilgrenze $m_{75\%}$ die Frequenz ist, bei der der Stroboskop-Effekt in 75% der Fälle erkannt wird.

Die Regressionen für alle untersuchten Situationen sind im Anhang zu finden. Daraus lassen sich die Erkennungswahrscheinlichkeiten ablesen. In Tabelle 4 sind die Schwellen-Frequenzen mit den Quartilgrenzen für alle untersuchten Situationen zusammengefasst.

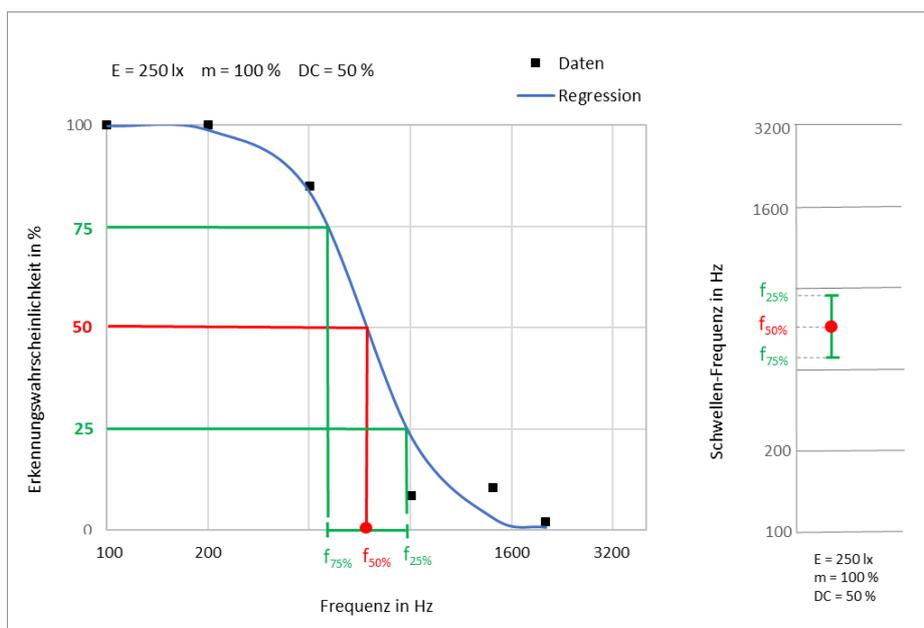


Abbildung 11: Links: Erkennungswahrscheinlichkeit für eine beispielhafte Situation in Abhängigkeit von der Frequenz: Daten der Untersuchung und daraus ermittelte logistische Regressionsfunktion. Aus der Regressionsfunktion wurden der Schwellenwert der Frequenz ($f_{50\%}$) sowie die Frequenzen bei den Erkennungswahrscheinlichkeiten von 25% und 75% ermittelt. Rechts: Darstellung von Schwellen (rot) und Quartilabstand (grün).

Tabelle 4: Schwellen-Frequenz $f_{50\%}$ mit unterer und oberer Quartilgrenze $f_{75\%}$ und $f_{25\%}$, alle Angaben in Hz

	E	1000 lx	250 lx	63 lx	1000 lx	250 lx	63 lx	1000 lx	250 lx	63 lx
m	DC	untere Quartilgrenze (75 %)			Schwelle (50 %)			obere Quartilgrenze (25 %)		
100 %	20 %	623	544	502	755	742	672	915	1011	899
	50 %	487	453	458	614	594	574	775	777	719
	80 %	63	56	39	127	115	92	253	234	221
80 %	20 %	422	418	401	518	534	546	637	682	743
	50 %	352	341	344	440	452	442	552	599	569
	80 %	52	13	30	100	41	67	192	125	153
63 %	20 %	282	232	271	348	303	389	429	396	557
	50 %	282	211	257	346	299	343	423	424	458
	80 %	26	13	16	49	33	37	94	87	84
50 %	20 %	190	180	190	247	240	276	319	319	399
	50 %	180	150	171	242	209	242	325	291	341
	80 %	14		20	29		39	59		74
40 %	20 %	124	118	112	169	155	162	229	204	233
	50 %	102	97	114	153	145	164	229	218	236
	80 %									
33 %	20 %	68	78	69	103	106	97	157	146	138
	50 %	73	52	72	108	89	115	160	152	182
	80 %									

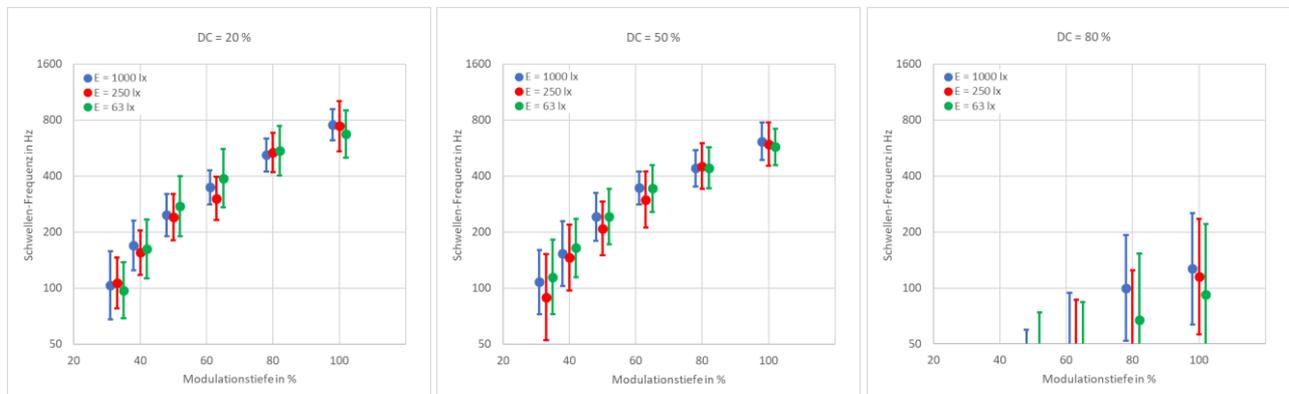


Abbildung 12: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 4: Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit von der Modulationstiefe für verschiedene Beleuchtungsstärken und Tastgrade

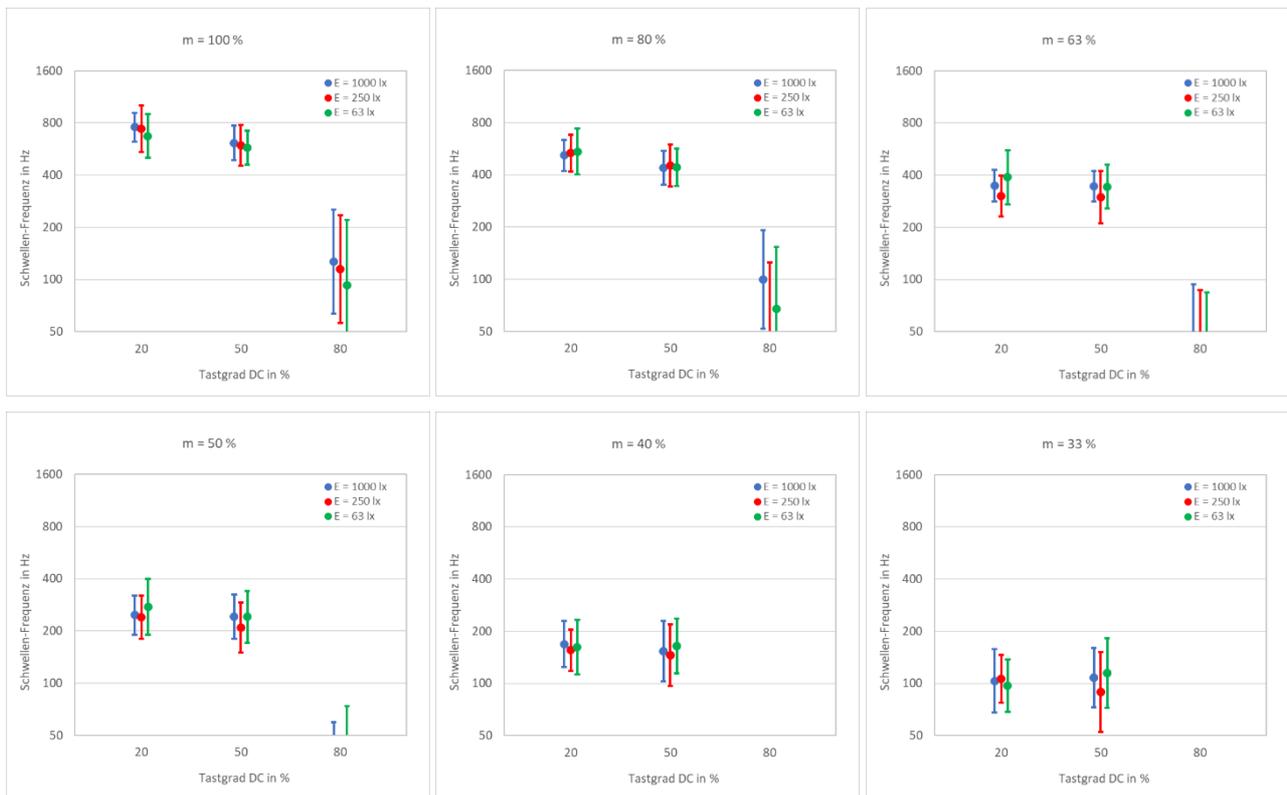


Abbildung 13: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 4: Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad für verschiedene Beleuchtungsstärken und Modulationstiefen

Erwartungsgemäß hängt die Schwellen-Frequenz stark von der Modulationstiefe ab (Abbildung 12). Vergleicht man dabei die untersuchten Tastgrade, so zeigt sich kein Unterschied zwischen den Tastgraden DC = 20 % und DC = 50 %. Beim Tastgrad von DC = 80 % liegen die Schwellen-Frequenzen niedriger als bei den geringeren Tastgraden.

Betrachtet man die in der Praxis für PWM-Dimmung meist verwendete Modulationstiefe von $m = 100\%$, so ist beim Tastgrad von DC = 80 % schon oberhalb einer Frequenz von 115 Hz der Stroboskopeffekt nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkennbar, während bei DC = 20 % die Schwelle bei 742 Hz liegt. In Abbildung 13 sind die Schwellengrenzen für alle Modulationstiefen in Abhängigkeit vom Tastgrad dargestellt. Es zeigt sich auch hier keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

3.3 Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und dem SVM-Wert

In Abbildung 14 links sind die Erkennungswahrscheinlichkeiten für alle untersuchten Situationen und Modulationstiefen über dem SVM-Wert aufgetragen. Logistische Regressionen für die einzelnen Tastgrade zeigen den Zusammenhang. Von einem SVM-Wert von 1,0 wird angenommen, dass ein durchschnittlicher Beobachter den Effekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkennt (blaue Kurve in Abbildung 15). Bei unseren Daten wird die Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 % erst bei einem SVM-Wert von 1,4 bis 1,8 erreicht. Die Ergebnisse stimmen eher mit den Ergebnissen von Veitch (Abbildung 15 aus [16] nach Daten aus [17]) überein.

Die Ökodesignrichtlinie der EU [1] fordert für Netzspannungslichtquellen unter Vollastbetrieb einen $SVM \leq 0,4$. Bei den Untersuchungsdaten haben die Situationen mit einem SVM bis zu 0,4 eine Erkennungswahrscheinlichkeit von maximal 2 %. Sie unterscheidet sich nicht von der Erkennungswahrscheinlichkeit bei einem SVM-Wert von 0 (Vergleichssituation mit konstantem Lichtstrom).

Schlussfolgerung: Eine Wahrnehmung von Stroboskopeffekten durch die Testpersonen bei Situationen mit einem $SVM \leq 0,4$ ist mit den Untersuchungsdaten nicht nachweisbar.

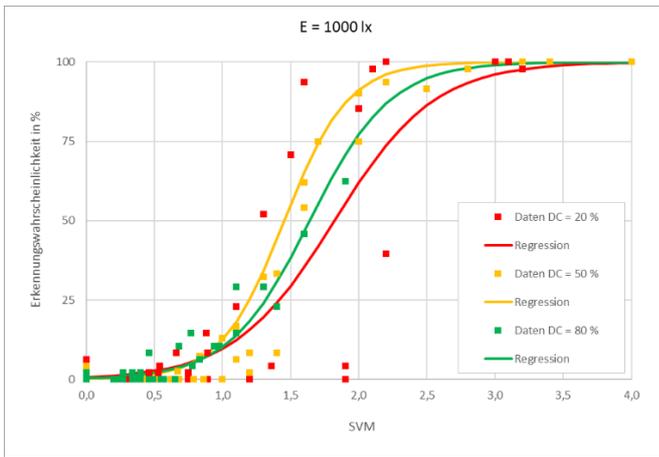


Abbildung 14: Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom SVM-Wert: Daten und logistische Regressionsfunktionen für die drei verschiedenen Tastgrade

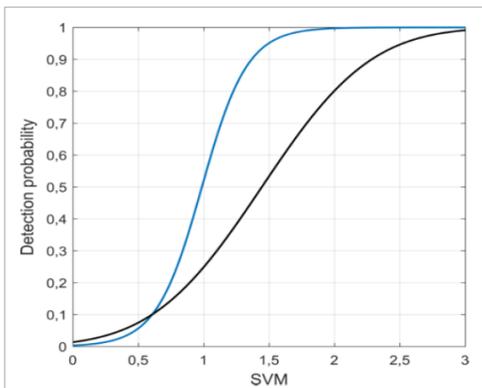


Abbildung 15: Bild aus [16], blaue Kurven: nach Perz [17], schwarze Kurve: nach Veitch [18]

In Abbildung 14 ist ersichtlich, dass die Daten für den Tastgrad DC = 20 % sehr stark streuen und der Zusammenhang zum SVM-Wert mit der Regression nur unzureichend beschrieben werden kann. Es gibt Situationen mit SVM-Werten über 1, bei denen die Erkennungswahrscheinlichkeit unter 50 % liegt, in zwei Fällen sogar bei 0 %. Hier passen die subjektiven Urteile unserer Testpersonen und die Aussage des SVM-Wertes nicht zusammen.

In Abbildung 16 wurden die Daten aus Abbildung 14 nach Frequenz (links) und Modulationstiefe (rechts) gruppiert. Bei SVM-Werten zwischen 1 und 2 treten niedrige Erkennungswahrscheinlichkeiten dann auf, wenn die Frequenz über $f = 800$ Hz beträgt und die Modulationstiefe 80 % oder 100 % beträgt.

Wird die Pulsweitenmodulation zum Ansteuern oder Dimmen einer Leuchte eingesetzt, beträgt die Modulationstiefe typischerweise $m = 100$ %. Ein $SVM \leq 0,4$ nach [1] ist mit einer Modulationstiefe von $m = 100$ % selbst mit einer Frequenz von 2000 Hz nur erreichbar, wenn der Tastgrad über DC = 80 % liegt. Damit ist ein Dimmen der Leuchte nahezu nicht mehr möglich. In Abbildung 17 sind die Erkennungswahrscheinlichkeiten für alle Situationen mit einer Modulationstiefe von $m = 100$ % gruppiert nach Tastgraden dargestellt. Auch hier ist erkennbar, dass niedrige Erkennungswahrscheinlichkeiten erreicht werden, wenn die Frequenz mehr als $f = 800$ Hz beträgt.

Schlussfolgerung: Die Wahrscheinlichkeit für die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten durch die Testpersonen bei Situationen mit einer Frequenz $f > 800$ Hz liegt unabhängig vom SVM-Wert unter 50 %. (Tabelle 4, Abbildung 14)

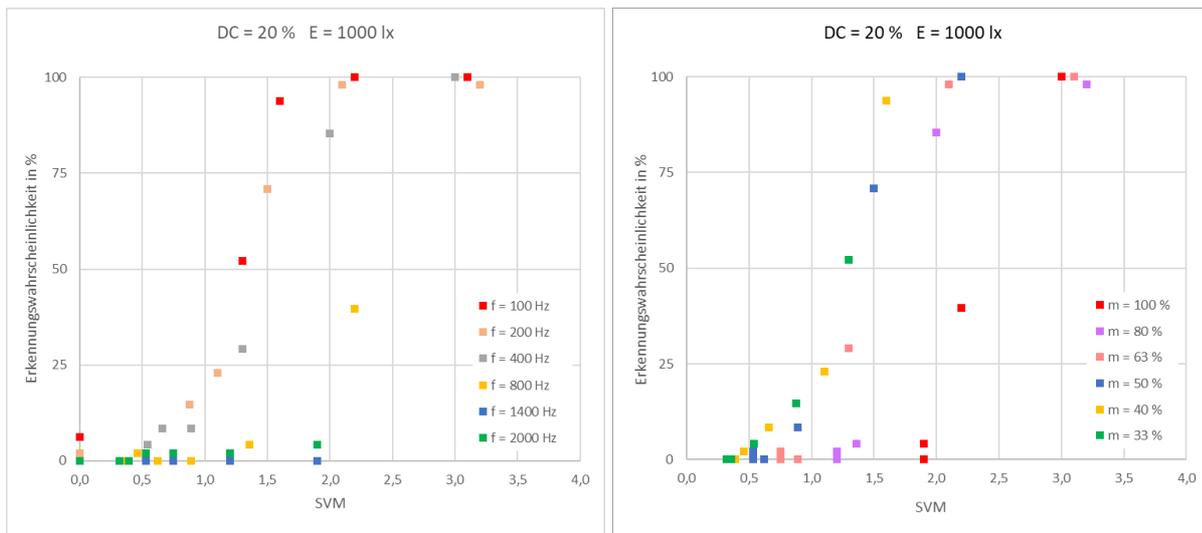


Abbildung 16: Daten aus Abbildung 14 für den Tastgrad DC = 20 %, links: gruppiert nach Frequenz, rechts: farblich gruppiert nach Modulationstiefe

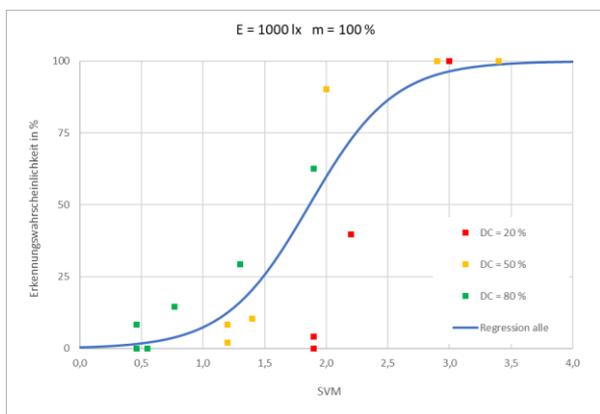


Abbildung 17: Daten aus Abbildung 14 für die Modulationstiefe m = 100 %, farblich gruppiert nach Tastgraden

4 Vergleiche mit der Literatur

Alle Studien mit denen unsere Ergebnisse verglichen werden sollen, wurden mit Testaufbauten nach Abbildung 2 durchgeführt. In Gegensatz zu unserem Aufbau war das Sehobjekt ein weißer Kreis auf einem schwarzen Umfeld. In unserer Studie war das Sehobjekt schwarz und das Umfeld weiß. Das fernere Umfeld (Wand hinter dem Testaufbau war in beiden Studien weiß. Aufgrund dieser Unterschiede sind die Adaptationsbedingungen bei gleicher angegebener Beleuchtungsstärke unterschiedlich. Die helle Umgebung in unserer Studie hatte höhere Adaptationsleuchtdichten zur Folge. Um die Ergebnisse trotzdem vergleichen zu können, werden in den nachfolgenden Tabellen unsere Ergebnisse der niedrigsten Beleuchtungsstärke E = 63 lx herangezogen. Trotzdem sind die Ergebnisse nicht unmittelbar vergleichbar, da in den Vergleichsstudien möglicherweise sehr viel geringere Leuchtdichten als in unserer Studie vorlagen.

Vogels [3] untersuchte mit dem Testaufbau in Abbildung 2 die Schwellen-Modulationstiefe für verschiedene Frequenzen und Tastgrade. Die Beleuchtungsstärke betrug 500 lx. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 den Ergebnissen unserer Studie gegenübergestellt. Auch hier steigt die Wahrnehmungsschwelle mit der Frequenz.

Die Auswirkung des Tastgrades stellen sich abweichend dar. In [3] sinkt die Schwellen-Modulationstiefe zunächst (bei der Erhöhung von DC = 10 % auf DC = 30 %), um dann wieder anzusteigen (Abbildung 18). In un-

serer Studie gibt es zwischen DC = 20 % und 50 % keinen Unterschied, danach steigt die Schwellen-Modulationstiefe deutlicher an. Unsere Schwellenwerte sind größer als in [3]. So entsprechen die Ergebnisse für DC = 80 % denen von DC = 90 % (Abbildung 19).

Vergleiche mit Ergebnissen aus [4] (Tabelle 6) zeigen in unserer Studie ebenfalls höhere Schwellen-Modulationstiefen.

Tabelle 5: Ergebnisse bei 63 lx im Vergleich mit den Daten von Vogels [3] bei 500 lx

DC =	TU Ilmenau (63 lx)			Vogels [3] (500 lx)				
	20 %	50 %	80 %	10 %	30 %	50 %	70 %	90 %
f = 50 Hz				40 %	27 %	28 %	32 %	75 %
f = 100 Hz	27 %	29 %	95 %	45 %	25 %	28 %	42 %	92 %
f = 200 Hz	45 %	43 %		57 %	34 %	37 %	59 %	97 %
f = 400 Hz	68 %	74 %		76 %	55 %	59 %	76 %	99 %

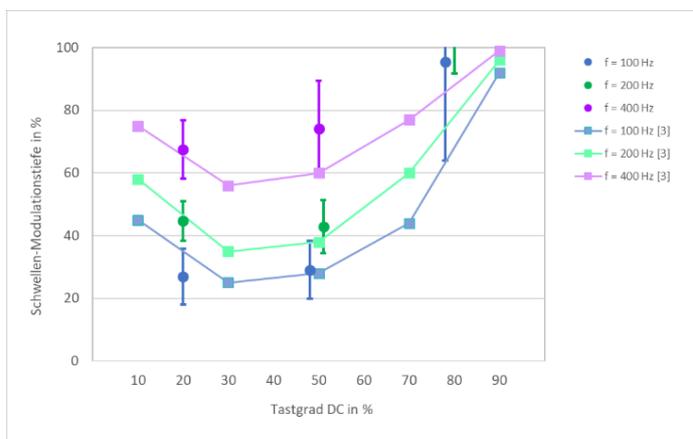
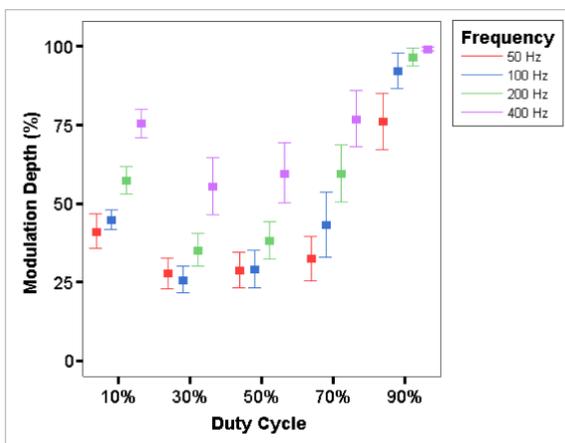


Abbildung 18: links: Daten von Vogels [3] (Schwellen-Modulationstiefe mit Konfidenzintervall bei E = 500 lx); rechts: Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand bei E = 63 lx. Zum Vergleich sind die Schwellen aus der linken Grafik als durchgezogene Linien mit eingefügt

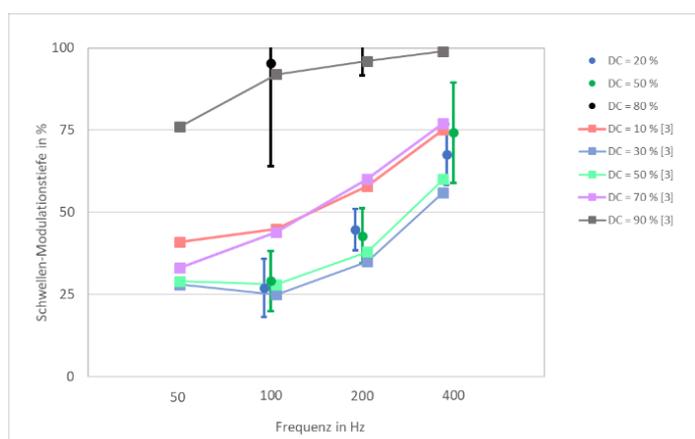
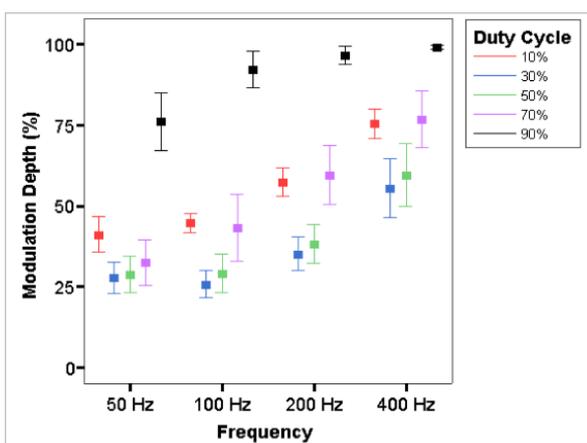


Abbildung 19: links: Daten von Vogels [3] (Schwellen-Modulationstiefe mit Konfidenzintervall bei E = 500 lx); rechts: Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand bei E = 63 lx. Zum Vergleich sind die Schwellen aus der linken Grafik als durchgezogene Linien mit eingefügt; alle eigenen Werte sind identisch zu Abbildung 18

Tabelle 6: Schwellen-Modulationstiefen bei 63 lx im Vergleich mit Perz [4] bei 500 lx

	TU Ilmenau (63 lx)	Perz [4], Exp. 2 (500 lx)	Perz [4], Exp. 2 (500 lx)
	DC = 50 %	DC = 50 %	Sinus
f = 50 Hz		15 %	25 %
f = 100 Hz	29 %	24 %	32 %
f = 200 Hz	43 %	33 %	40 %
f = 400 Hz	74 %	41 %	55 %

In Perz [5] wurde explizit die Abhängigkeit der Schwellen-Modulationstiefe von der Beleuchtungsstärke untersucht. Allerdings kam dort ein sinusförmiger Zeitverlauf zum Einsatz. Dasselbe gilt für Wang [6].

In beiden Vergleichsstudien wurden die geringsten Schwellen-Modulationstiefen bei einer Beleuchtungsstärke von 50 lx ermittelt (Tabelle 7). Kleinere und größere Beleuchtungsstärken führten zu höheren Schwellenwerten. Unsere Ergebnisse zeigen diese Abhängigkeit nicht. Allerdings wurden Werte unter E = 63 lx nicht untersucht.

Tabelle 7: Schwellen-Modulationstiefen im Vergleich mit Perz [5] und Wang [6]

	TU Ilmenau	Perz [5]	Wang [6], zit. in [5]
	f = 100 Hz, DC = 50 %	f = 100 Hz, sinusförmig	f = 100 Hz, sinusförmig
E = 5 lx		40 %	31 %
E = 10 lx		30 %	24 %
E = 63 lx / 50 lx	29 %	18 %	19 %
E = 100 lx		23 %	
E = 250 lx	32 %		
E = 500 lx		27 %	26 %
E = 1000 lx	31 %		

In einer Studie von Chen [7] wurde mit PWM-moduliertem Licht einer Modulationstiefe von 100 % die Wahrnehmung des Stroboskop-Effektes untersucht. Verwendet wurde hier ebenfalls ein Versuchsaufbau nach [3], [4] und [5]. Es zeigte sich, wie in unserer Studie eine Abhängigkeit vom Tastgrad aber keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke (Tabelle 8 und Abbildung 20). Allerdings sind die Schwellen-Frequenzen insgesamt höher als in unseren Untersuchungen.

Tabelle 8: Schwellen-Frequenzen im Vergleich mit Chen [7]

DC =	TU Ilmenau			Chen [7]				
	20 %	50 %	80 %	10 %	30 %	50 %	70 %	80 %
E = 1000 lx	755 Hz	614 Hz	127 Hz	1300 Hz	1200 Hz	950 Hz	600 Hz	380 Hz
E = 500 lx				1250 Hz	1150 Hz	980 Hz	650 Hz	350 Hz
E = 250 lx	742 Hz	594 Hz	115 Hz					
E = 100 lx				1500 Hz	1300 Hz	1125 Hz	800 Hz	500 Hz
E = 63 lx	672 Hz	574 Hz	92 Hz					

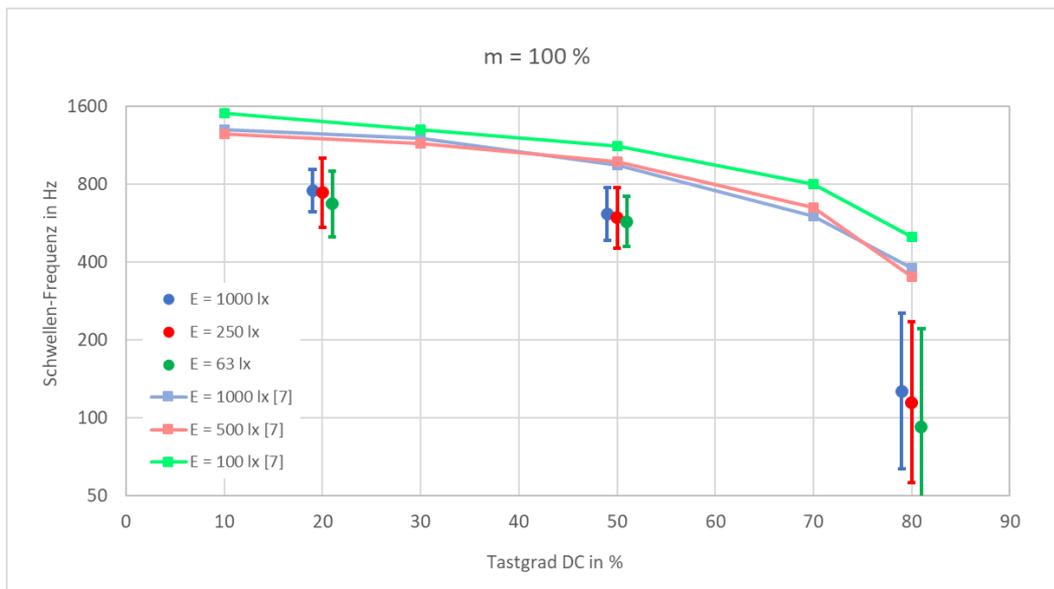


Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse mit den Daten von Chen [7] als durchgezogene Linien

5 Zusammenfassung

Die Untersuchung befasst sich mit dem Stroboskopeffekt, der bei der Wahrnehmung von flimmerndem Licht auftritt, insbesondere wenn Lichtquellen mit Pulsweitenmodulation (PWM) betrieben werden. Dabei wurde die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke und weiteren Parametern wie Frequenz und Tastgrad untersucht.

Die Untersuchung basierte auf einem Testaufbau mit einem rotierenden schwarzen Kreis als Sehobjekt auf hellem Hintergrund: Das Sehobjekt bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s. Das Testfeld wurde mit verschiedenen Beleuchtungsstärken (1000 lx, 250 lx, 63 lx) beleuchtet. Die LED-Beleuchtung variierte in Frequenzen, Tastgrad und Modulationstiefe. 12 Testpersonen nahmen an der Studie teil.

Hauptziel der Studie war, zu untersuchen, ob und wie die Beleuchtungsstärke den Stroboskopeffekt bei PWM-Dimmung beeinflusst, da dieser Effekt bisher bei der SVM-Bewertung nicht berücksichtigt wird.

Die Annahme, dass die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes von der Beleuchtungsstärke abhängt, konnte durch die Untersuchung nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse für Beleuchtungsstärken von 63 lx bis 1000 lx stimmen im Wesentlichen überein.

Betrachtet man die Abhängigkeit von der Frequenz, so zeigt sich erwartungsgemäß eine Zunahme des Schwellenwertes mit größer werdender Frequenz. Auch eine Zunahme des Tastgrades führt zu einer Zunahme des Schwellenwertes, wobei sich die Ergebnisse von DC = 20 % und DC = 50 % nicht unterscheiden. Beim Tastgrad von DC = 80 % liegen die Schwellen-Frequenzen niedriger als bei den geringeren Tastgraden.

Um aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen für die Praxis abzuleiten, sollte der kritischste Fall (Modulationstiefe $m = 100\%$ und Tastgrad DC = 20 %) herangezogen werden. In diesem werden Frequenzen von $f = 1000$ Hz und mehr mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 25 % erkannt (oberer Quartilgrenze, Abbildung 21).

Eine Wahrnehmung von Stroboskopeffekten durch die Testpersonen bei Situationen mit einem SVM $\leq 0,4$ ist mit den Untersuchungsdaten nicht nachweisbar. Die Wahrscheinlichkeit für die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten durch die Testpersonen bei Situationen mit einer Frequenz $f > 800$ Hz liegt unabhängig vom SVM-Wert unter 50 %. Bei einer Frequenz $f > 1000$ Hz liegt die Erkennungswahrscheinlichkeit unabhängig vom SVM-Wert unter 25 %.

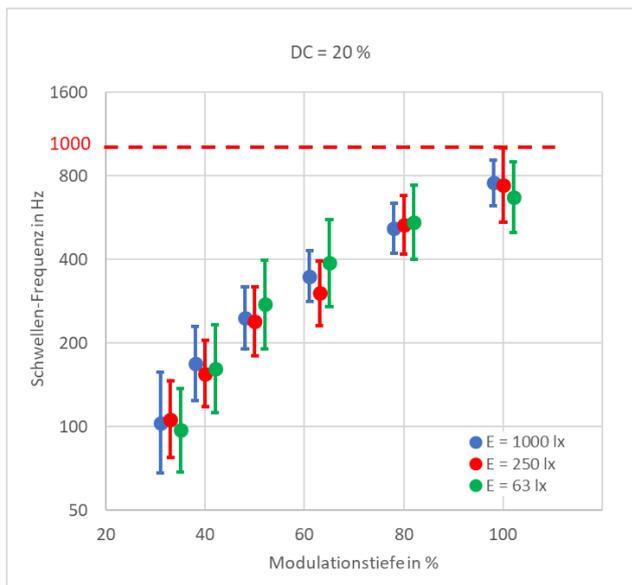


Abbildung 21: Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit von der Modulationstiefe für den Tastgrad DC = 20 %

6 Ausblick

Obwohl die Ergebnisse die erwartete Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke nicht bestätigen, lässt sich daraus eine weitere praxisrelevante Fragestellung ableiten. Vergleicht man die Situationen mit einem Tastgrad von 50 % mit denen von 80 %, zeigen sich sehr unterschiedliche Erkennungswahrscheinlichkeiten (Abbildung 10). Beim Dimmen ist jedoch genau dieser Bereich wichtig. In einer Folgeuntersuchung sollte untersucht werden, wie sich Tastgrade von 60 % und 70 % auf die Erkennung auswirken. Diese Betrachtung ist vor allem auch deshalb wichtig, weil gemäß dieser Studie die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten bei Situationen mit einem $f > 800$ Hz unabhängig vom SVM-Wert ist.

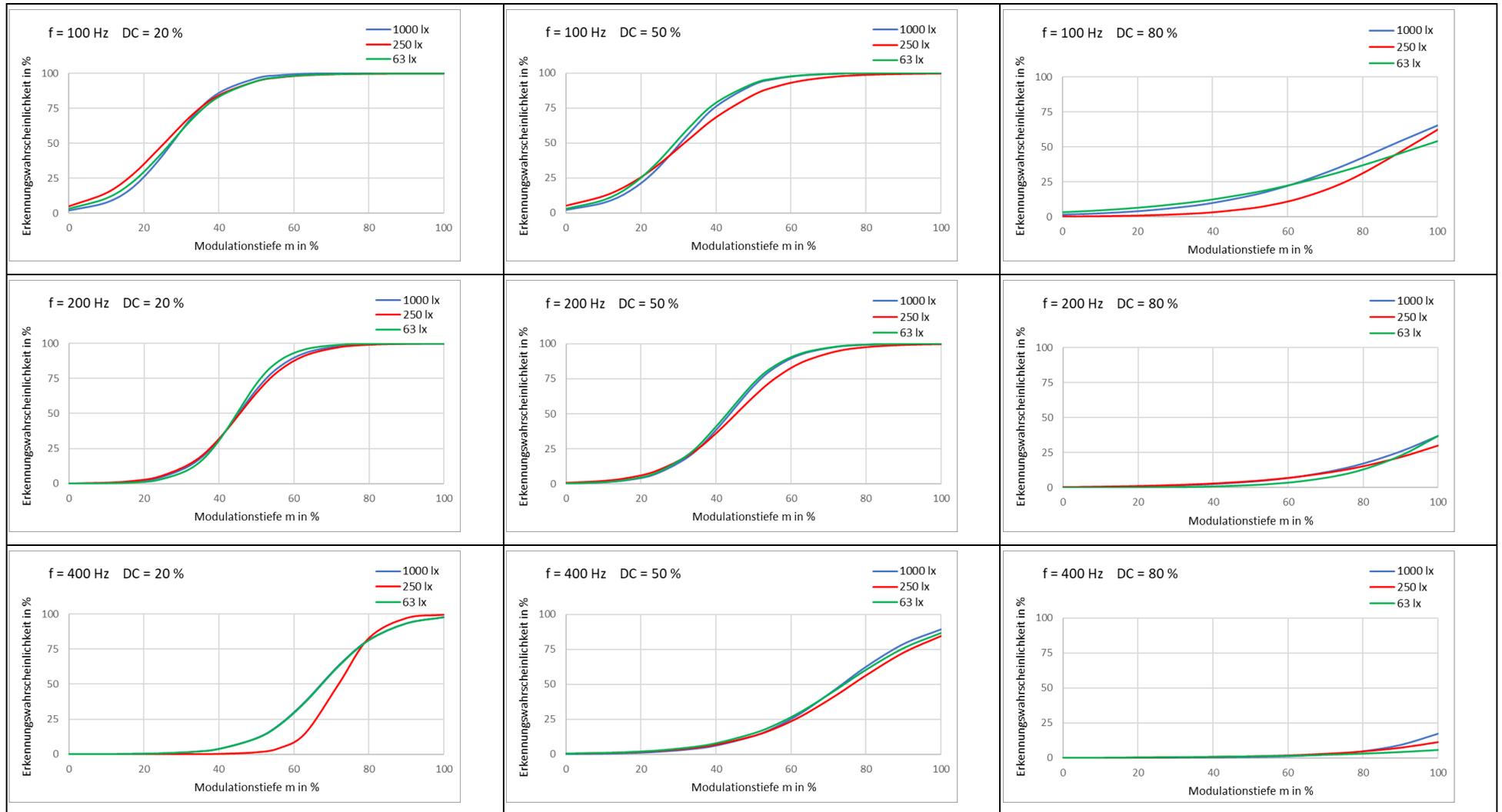
7 Literatur

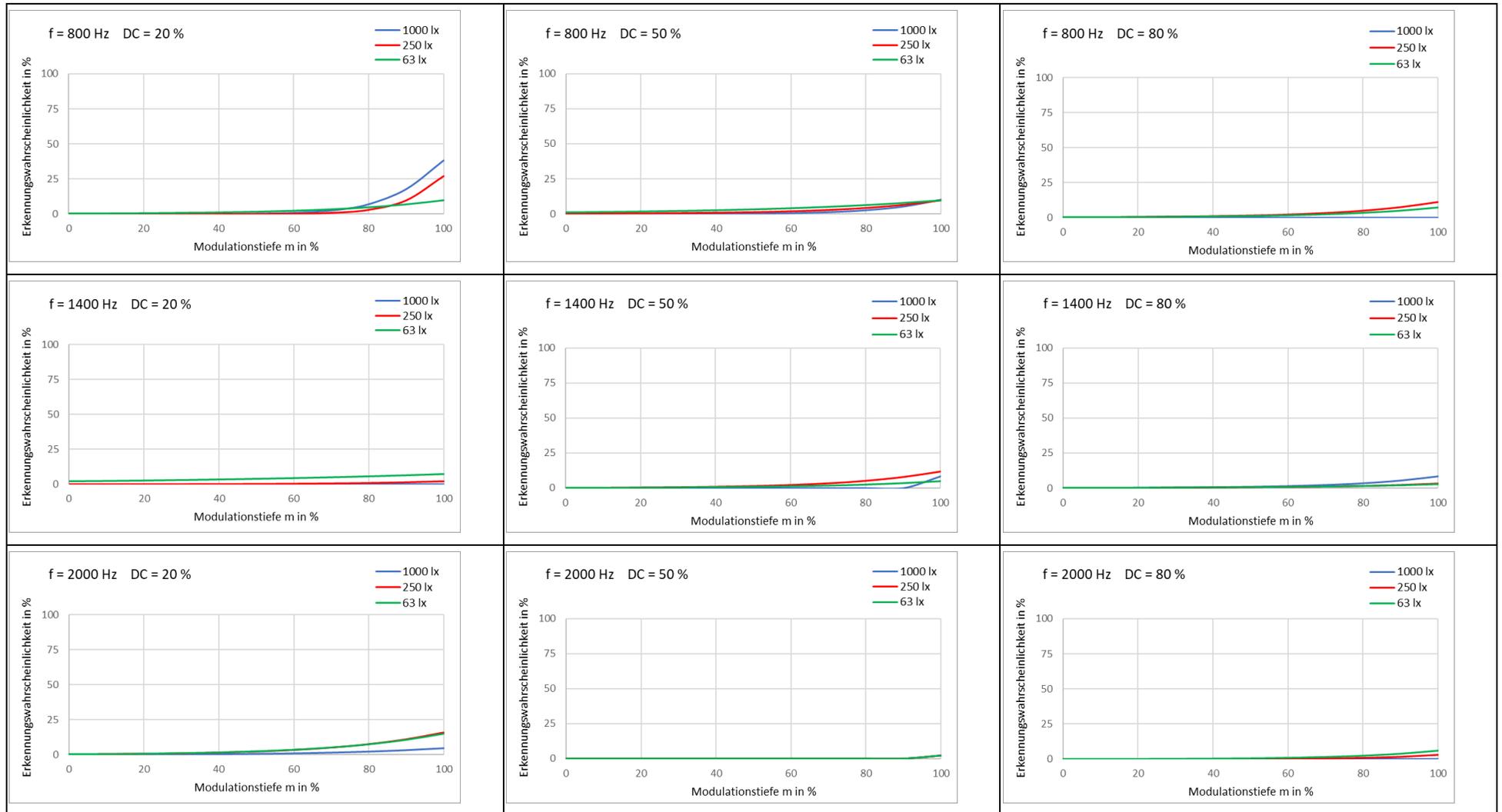
- [1] Verordnung (EU) 2019/2020 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen und separate Betriebsgeräte.
<http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2020/oj>
 EU (2021): Verordnung (EU) 2021/341 (Änderung der EU V 2019/2020).
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/341/oj>
- [2] Frederiksen, E. (1980): Stroboscopic effects in lighting installations. Licht-Forschung 2 (2), S. 71–80.
- [3] Vogels, I.; Sekulovski, D.; Perz, M. (2011): Visible artefacts of LEDs. Proc. CIE 27th Session. Sun City, ZA, 10.-15.7.2011. CIE Central Bureau, Wien (CIE Publikation 197), S. 42–51.
- [4] Perz, M.; Vogels, I.; Sekulovski, D.; Wang, L.; Tu, Y.; Heynderickx, I. (2015): Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems. Light. Res. Technol. 47 (3), S. 281–300. DOI: 10.1177/1477153514534945.
- [5] Perz, M.; Sekulovski, D.; Vogels, I.; Heynderickx, I. (2018): Stroboscopic effect: contrast threshold function and dependence on illumination level. J. Opt. Soc. Am. A 35 (2), S. 309–319. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000309.
- [6] Wang, L.; Tu, Y., Zhang, J., Lu, F., Liu, L; Vogels, I.; Perz, M.; Heynderickx, I.: Influence of illumination level on the visibility of the stroboscopic effect, in 7th Lighting Conference of China, Japan and Korea (CJK, 2014).

- [7] Chen, t.; Herzog, A.; Khanh, T. Q.: Detection of stroboscopic effects in dependence of duty cycle, speed and illuminance level. *Lux junior 2023* S. 25, <https://doi.org/10.22032/dbt.58586>
- [8] Vandahl, C.; Schierz, Ch.: Prävention von negativen gesundheitlichen Auswirkungen bei Lichtflimmern durch LEDs, Bericht für die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) 2023, https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/Bereiche/MB/lichttechnik/Literatur/2022_2023/Praevention_bei_Lichtflimmern_2023_06_30.pdf
- [9] CIE Technical Note TN 006 (2016): Visual aspects of time-modulated lighting systems. CIE, Wien
- [10] CIE Technical Note TN 008 (2017): CIE Stakeholder Workshop for Temporal Light Modulation Standards for Lighting Systems. CIE, Wien.
- [11] IEEE Std. 1789 (2015): IEEE Recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers. IEEE, New York, USA.
- [12] LiTG (2017): Flimmern und stroboskopische Effekte von PWM-gesteuerten LED-Autoscheinwerfern. Publ. 35, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft LiTG, Berlin.
- [13] LiTG (2022): Störungen und gesundheitliche Beeinträchtigung durch das Flimmerverhalten künstlicher Lichtquellen. Publ. 48, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft LiTG, Berlin.
- [14] Polin, D. (2015): Flicker and stroboscopic perception of white LEDs under photopic conditions. Chap. 5.11. in: Tran Quoc Khanh, Peter Bodrogi et al. (Hg.): LED lighting. Technology and perception. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, S. 321–331.
- [15] ZVEI (2017): Temporal Light Artefacts – TLA. Flimmern und Stroboskopeffekt, ZVEI Information. ZVEI, Frankfurt a. M.
- [16] CIE 249 (2022): Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems, Technical Report
- [17] Veitch, J. A.; Martinsons, C.: Detection of the stroboscopic effect by young adults varying in sensitivity, *Lighting Res. Technol.* 2020; 52: 790–810
- [18] Perz, M. (2019). Modelling visibility of temporal light artefacts. Technische Universiteit Eindhoven.

8 Anhang

8.1 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe





8.2 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz

