



Untersuchung des Stroboskopeffekts in Abhängigkeit vom Tastgrad und den Umgebungsbedingungen

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, 9.2.2026

Inhalt

1	Einführung	3
2	Testaufbau	4
2.1	Parameter	7
2.1.1	Teil A: weißes Umfeld	7
2.1.2	Teil B: schwarzes Umfeld	8
2.2	Testablauf	8
3	Auswertung	8
3.1	Bestimmung von Schwellen-Modulationstiefen	8
3.2	Bestimmung von Schwellen-Frequenzen	11
4	Vergleiche mit der Literatur	15
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	17
6	Literatur	18
7	Anhang	20
7.1	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe ($f = 100 \text{ Hz}, 200 \text{ Hz}$)	20
7.2	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe ($f = 400 \text{ Hz}, 800 \text{ Hz}$)	21
7.3	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz ($m = 100 \%, 80 \%, 63 \%$)	22
7.4	Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz ($m = 50 \%, 40 \%, 33 \%$)	23

1 Einführung

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. 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.

Zur Bewertung der Wahrnehmung des Stroboskopeffekts zwischen 80 Hz 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 Volllastbetrieb einen $SVM \leq 0,4$. Die genannten Grenzwerte gelten allerdings nicht für den gedimmten 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.

In dem Vorgängerprojekt [19] ging aus den Ergebnissen der Untersuchung hervor, dass die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes nicht - wie erwartet - von der Beleuchtungsstärke abhängt. Untersucht wurde der für die Praxis relevante Beleuchtungsstärkebereich von 63 lx bis 1000 lx, wobei sich ein schwarzes Testobjekt in einem hellen Umfeld befand (Abbildung 1). Untersuchungen, mit denen die Ergebnisse verglichen wurden, fanden mit einem Aufbau nach Abbildung 2 [3 bis 7] statt, bei dem sich ein weißes Testobjekt auf einem schwarzen Umfeld befand. Das helle Umfeld in der Studie [19] erzeugte höhere Adaptationsleuchtdichten, was eine Erklärung für die deutlichen Abweichungen der Ergebnisse zu den anderen Studien [3 bis 7] darstellen könnte. Um den Einfluss des Umfeldes zu klären, sollte daher an dem vorhandenen Messaufbau [19] eine neue Messreihe mit einem an Abbildung 2 angepassten Testaufbau durchgeführt werden, bei dem auch ein schwarzes Umfeld zum Einsatz kommt.

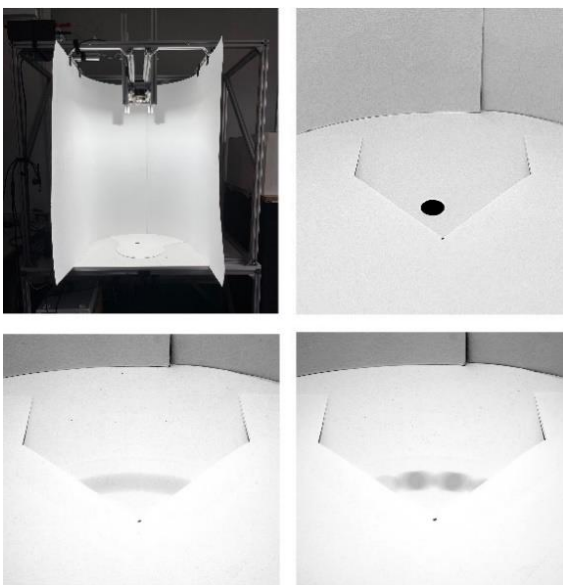


Abbildung 1: Testaufbau aus [19]: oben links: Die über dem Tisch montierten Leuchte beleuchtet das Testfeld mit dem schwarzen Punkt auf hellem Umfeld, oben rechts: unbewegte Drehscheibe, unten links: Drehscheibe unter (kontinuierlichem) Gleichlicht, unten rechts: Drehscheibe unter moduliertem Wechsellicht



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

2 Testaufbau

Bei den ergänzenden Untersuchungen kam zunächst der gleiche Testaufbau zum Einsatz wie in [19] (Abbildung 3 a und b). Bei einem Teil der Untersuchungen wurde dann mit einem umgerüsteten Aufbau gearbeitet. Die Drehscheibe und die angrenzende Arbeitsfläche (Abbildung 3 c und d) erhielten eine schwarze Oberfläche (Reflexionsgrad: 0,05), das Sehobjekt war weiß (Reflexionsgrad: 0,9; Kontrast zu schwarz: 0,93). Die Wand hinter dem Tisch blieb in allen Untersuchungen weiß (Reflexionsgrad: 0,9).

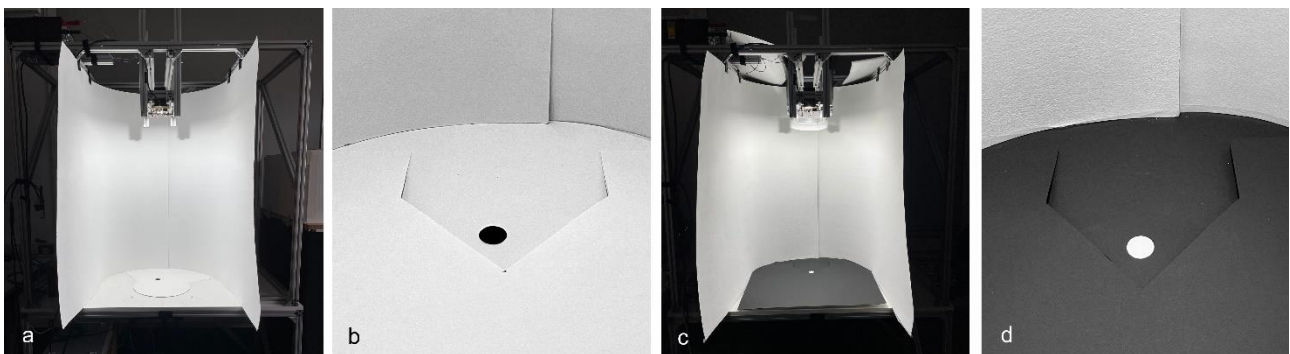


Abbildung 3: a und b: Aufbau mit weißem Umfeld, c und d: Aufbau mit schwarzem Umfeld

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 für das weiße Umfeld in Abbildung 4 und Tabelle 1, für das schwarze Umfeld in Abbildung 5 und Tabelle 2 dargestellt. Das weiße Umfeld, der Bereich auf den die Testperson adaptiert, hat bei 500 lx Beleuchtungsstärke eine mittlere Leuchtdichte von 142 cd/m^2 (minimal 133 cd/m^2 , maximal 157 cd/m^2). Das schwarze Umfeld hat bei 500 lx Beleuchtungsstärke eine mittlere Leuchtdichte von $7,3 \text{ cd/m}^2$ (minimal $2,1 \text{ cd/m}^2$, maximal $9,6 \text{ cd/m}^2$).

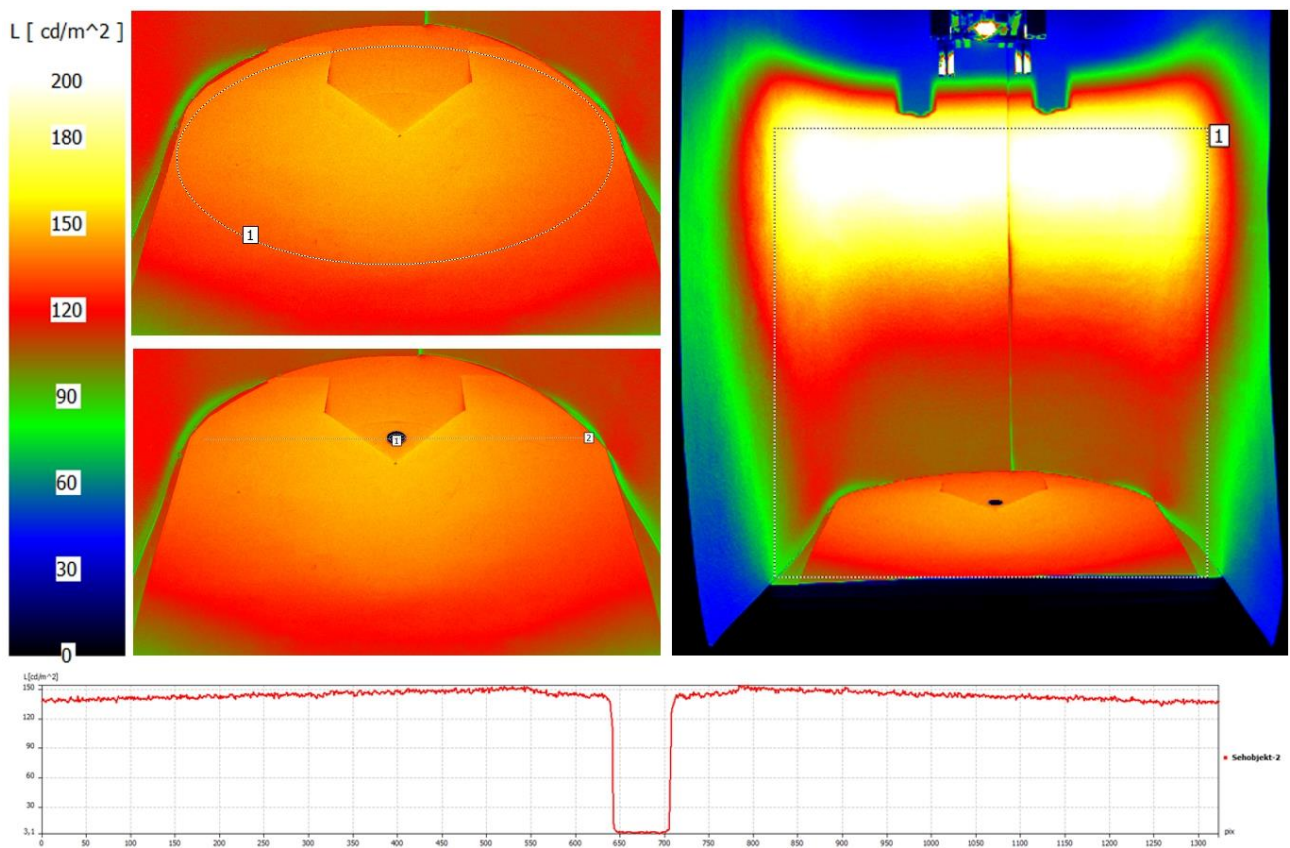


Abbildung 4: Weißes Umfeld: Leuchtdichteverteilungen im Sehbereich bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lx, Details s. Tabelle 1

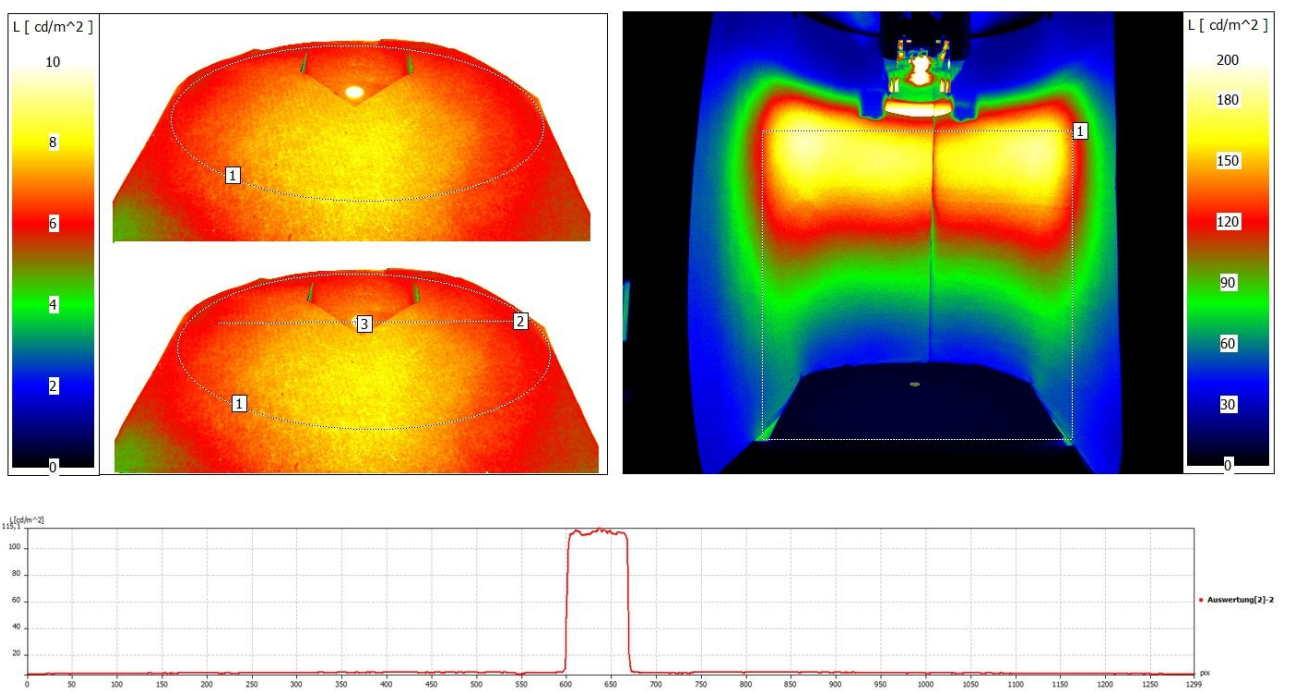


Abbildung 5: Schwarzes Umfeld: Leuchtdichteverteilungen im Sehbereich bei einer Beleuchtungsstärke von 500 lx, Details s. Tabelle 2

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte bei weißem Umfeld und einer Beleuchtungsstärke von $E = 500 \text{ lx}$.

Position in Abbildung 4	Region im Bild	Mittlere Leuchtdichte	Minimale Leuchtdichte	Maximale Leuchtdichte
rechts oben	Testraum [1]	142 cd/m^2	105 cd/m^2	218 cd/m^2
links oben	Umfeld [1]	142 cd/m^2	133 cd/m^2	157 cd/m^2
links mittig	Sehobjekt [3]	4,3 cd/m^2	3,0 cd/m^2	6,8 cd/m^2
unten	Schnitt an Linie [2]			

Tabelle 2: Leuchtdichtewerte bei schwarzem Umfeld und einer Beleuchtungsstärke von $E = 500 \text{ lx}$.

Position in Abbildung 5	Region im Bild	Mittlere Leuchtdichte	Minimale Leuchtdichte	Maximale Leuchtdichte
rechts oben	Testraum [1]	88 cd/m^2	2,4 cd/m^2	199 cd/m^2
links oben	Umfeld [1]	7,3 cd/m^2	2,1 cd/m^2	9,6 cd/m^2
links mittig	Sehobjekt [3]	110 cd/m^2	75 cd/m^2	115 cd/m^2
unten	Schnitt an Linie [2]			

Tabelle 3: Leuchtdichtewerte der untersuchten Situationen für beide Untersuchungen im Vergleich

Beleuchtungsstärke in lx	Reflexionsgrad des Umfeldes	Mittlere Leuchtdichte des Umfeldes in cd/m^2	Mittlere Leuchtdichte des Sehobjekts in cd/m^2
1000 [19]	0,90 (Weiß)	285	8,6
500	0,90 (Weiß)	142	4,3
250 [19]	0,90 (Weiß)	71	2,1
63 [19]	0,90 (Weiß)	17,8	0,5
500	0,05 (Schwarz)	7,3	110
50	0,05 (Schwarz)	0,7	11

Die Leuchtdiode lässt sich in definierten Zeitverläufen ansteuern. Lichtstrom, Frequenz, Tastgrad (Duty Cycle DC) und Modulationstiefe 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 500 lx und 50 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 3 b und d). Die Verkleinerung des Ausschnittes verringert die genannten Effekte.

2.1 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 4 und Tabelle 5. Die Parameter f, DC und m sind in Abbildung 6 definiert.

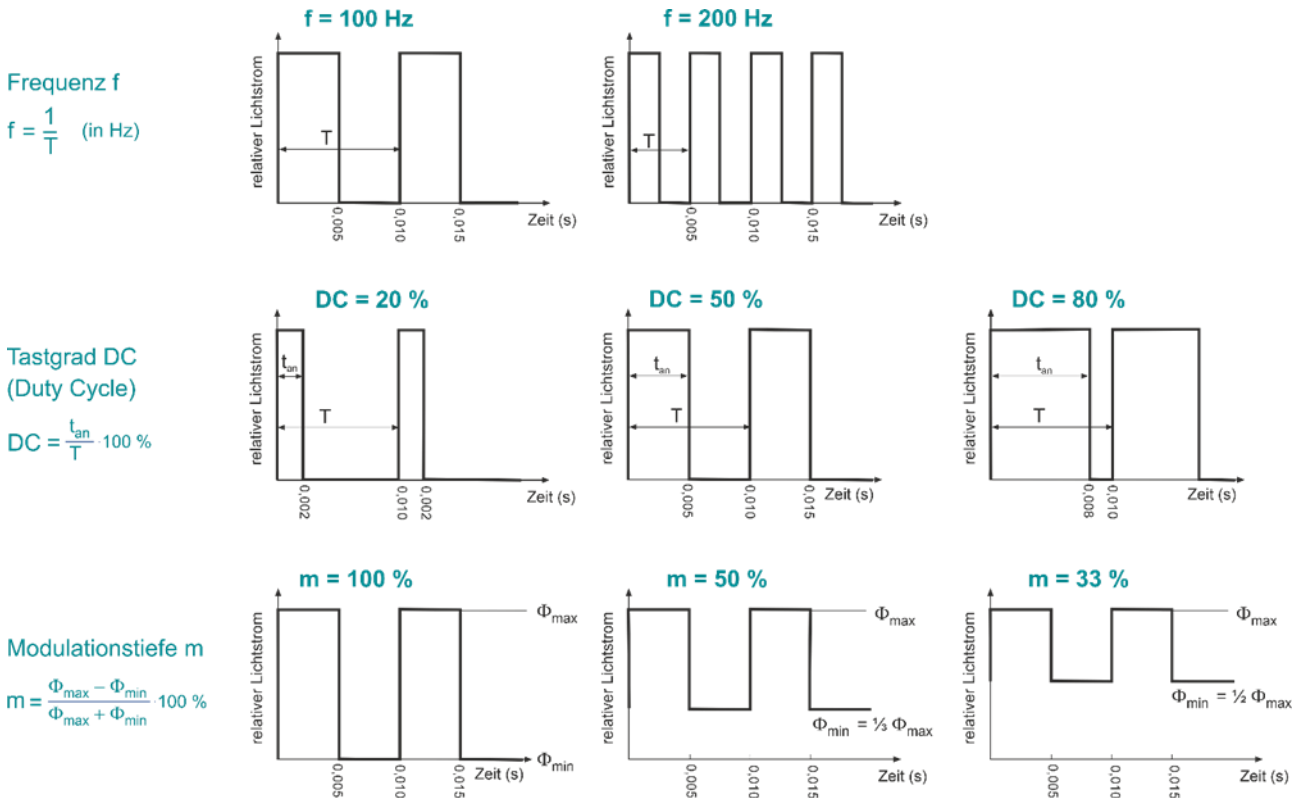


Abbildung 6: Definition der Untersuchungsparameter, für die Frequenz und die Modulationstiefe sind nicht alle untersuchten Werte dargestellt

2.1.1 Teil A: weißes Umfeld

Teil A diente dem Vergleich mit der vorangegangenen Studie [19]. Dort fanden die Untersuchungen bei drei Beleuchtungsstärken statt (63 lx, 250 lx, 1000 lx). Die Untersuchungsergebnisse zeigten keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke. Daher wurde die Untersuchung nur bei der Beleuchtungsstärke von 500 lx bei weißem Umfeld (W) durchgeführt. In [19] wurden die Tastgrade DC = 20 %, DC = 50 % und DC = 80 % untersucht, wobei sich die Ergebnisse zwischen DC = 20 % und DC = 50 % nicht unterschieden. Hier wurden nun Tastgrade von 50 % und 80 % um die Tastgrade 60 % und 70 % ergänzt (

Tabelle 4).

Tabelle 4: Untersuchungsparameter mit weißem Umfeld (Teil A)

Frequenz f in Hz	100, 200, 400, 800, 1400
Tastgrad DC in %	50, 60, 70, 80
Modulationstiefe m in %	100, 80, 63, 50, 40, 33, 0
Beleuchtungsstärke E in lx	500 (W)

2.1.2 Teil B: schwarzes Umfeld

Ziel war, zu untersuchen, ob sich die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen [19] und [3], [4], [5], [6], [7] auf die unterschiedlichen Beleuchtungsstärken und Reflexionsgrade zurückführen lassen. Daher wurden die Beleuchtungsstärken $E = 50 \text{ lx}$ und $E = 500 \text{ lx}$ (nach [4], [5], [6] und [7]) bei schwarzem Umfeld (S) verwendet. Es wurden nicht alle Kombinationen der Parameter aus Tabelle 5 untersucht. Die Tastgrade 60 % wurde nur bei 100 Hz und 200 Hz betrachtet, der Tastgrad 70 % nur bei 100 Hz, da der Einfluss des Tastgrades in der Messreihe mit weißem Hintergrund untersucht wurde.

Tabelle 5: Untersuchungsparameter mit schwarzem Umfeld (Teil B)

Frequenz f in Hz	100, 200, 400, 800, 1400, 2000
Tastgrad DC in %	20, 50, 80, teilweise: 60, 70
Modulationstiefe m in %	100, 80, 63, 50, 40, 33, 0
Beleuchtungsstärke Teil B E in lx	50 (S), 500 (S)

2.2 Testablauf

Den 12 Testpersonen (6w, 6m, Alter zwischen 22 und 63, MW 41 Jahre) 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. Dadurch liegen insgesamt 48 Aussagen (4 je Person) für jede Modulationstiefe vor. Ein Durchlauf mit allen Wiederholungen dauerte etwa 30 Minuten pro untersuchter Beleuchtungsstärke. Pro Untersuchungstag wurde nur eine Beleuchtungsstärke untersucht.

11 der Testpersonen waren die gleichen, wie in der vorangegangenen Studie [19]. Eine männliche junge Testperson stand für die Versuche nicht mehr zur Verfügung und wurde daher durch eine ebenfalls junge männliche Testperson ausgetauscht.

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 7 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 7). 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 Fällen erkannt wird, während die obere Quartilgrenze $m_{75\%}$ die Modulationstiefe ist, bei der der Stroboskop-Effekt in 75 % der Fällen erkannt wird. Mit größer werdender Modulationstiefe steigt also die Wahrscheinlichkeit des Erkennens.

Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen für alle untersuchten Situationen sind im Anhang dargestellt. Daraus lassen sich die Erkennungswahrscheinlichkeiten ablesen. In Tabelle 6 sind die Schwellen-Modulationstiefen mit den Quartilgrenzen (Erkennungswahrscheinlichkeit 25 % und 75 %) für alle untersuchten Situationen zusammengefasst.

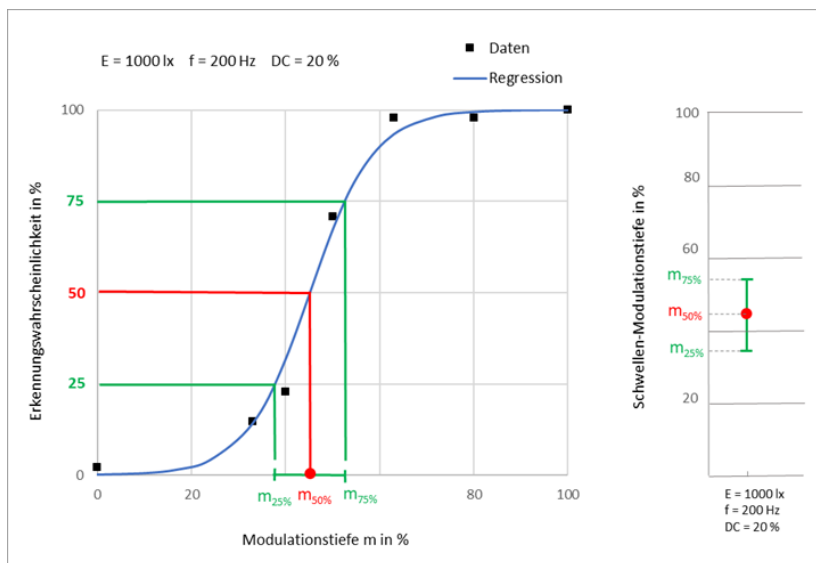


Abbildung 7: Links: Erkennungswahrscheinlichkeit für eine beispielhafte Situation in Abhängigkeit von der Modulationstiefe: Daten der Untersuchung und daraus ermittelte logistische Regressionsfunktion. Aus der Regressionsfunktion wurden der Schwellenwert der Modulationstiefe ($m_{50\%}$) sowie die Modulationstiefen bei den Erkennungswahrscheinlichkeiten von 25 % und 75 % ermittelt. Rechts: Darstellung von 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, n. u.: die Situation wurde nicht untersucht

Tabelle 6: 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, n. u.: die Situation wurde nicht untersucht.

	E	500 lx (W)	500 lx (S)	50 lx (S)	500 lx (W)	500 lx (S)	50 lx (S)	500 lx (W)	500 lx (S)	50 lx (S)
f	DC	Untere Quartilgrenze (25 %)			Schwelle (50 %)			Obere Quartilgrenze (75 %)		
100 Hz	20 %	n. u.	19	20	n. u.	30	27	n. u.	42	35
	50 %	29	21	16	37	35	29	45	48	41
	60 %	32	22	22	44	37	34	57	52	46
	70 %	56	33	27	75	46	41	94	60	55
	80 %	71	51	42	91	69	62		87	81
200 Hz	20 %	n. u.	29	26	n. u.	35	34	n. u.	42	42
	50 %	38	25	26	49	35	35	60	45	44
	60 %	45	33	23	57	43	38	68	64	52
	70 %	64	n. u.	n. u.	80	n. u.	n. u.	95	n. u.	n. u.
	80 %	96	66	62		88	80			98
400 Hz	20 %	n. u.	45	45	n. u.	52	52	n. u.	59	58
	50 %	70	36	34	85	47	45	99	58	56
	60 %	72	n. u.	n. u.	95	n. u.	n. u.		n. u.	n. u.
	70 %	86	n. u.	n. u.		n. u.	n. u.		n. u.	n. u.
	80 %			83			99			
800 Hz	20 %	n. u.	70	68	n. u.	78	77	n. u.	87	86
	50 %		77	75		94	89			
	60 %		n. u.	n. u.		n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
	70 %		n. u.	n. u.		n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
	80 %									

1400 Hz	20 %	n. u.			n. u.			n. u.		
	50 %									
	60 %		n. u.	n. u.		n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
	70 %		n. u.	n. u.		n. u.	n. u.	n. u.	n. u.	n. u.
	80 %									

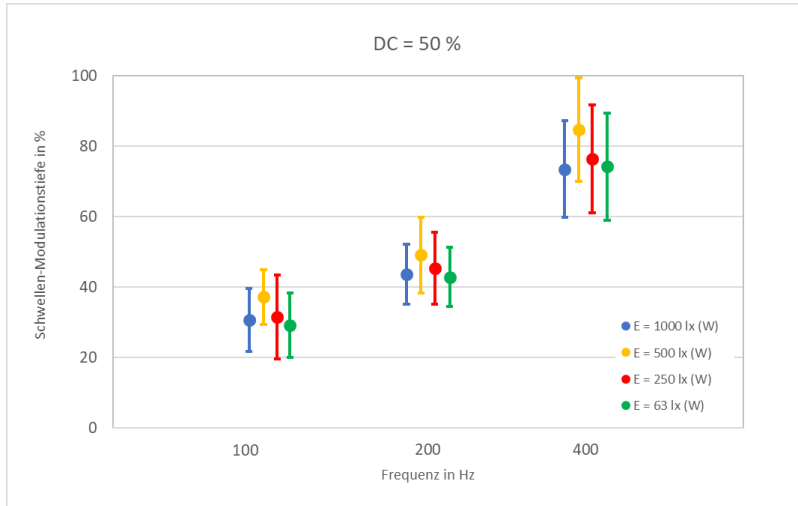


Abbildung 8: Vergleich der Schwellen-Modulationstiefen bei einem Tastgrad DC von 50 % für das weiße Umfeld (500 lx) mit den Ergebnissen der vorangegangenen Studie (63 lx, 250 lx und 1000 lx) [19]

Vergleicht man zunächst die Schwellen-Modulationstiefen für das weiße Umfeld (500 lx) mit den Ergebnissen der vorangegangenen Studie [19] (63 lx, 250 lx und 1000 lx), so sieht man, dass die Werte der aktuellen Studien etwas höher ausfallen (Abbildung 8).

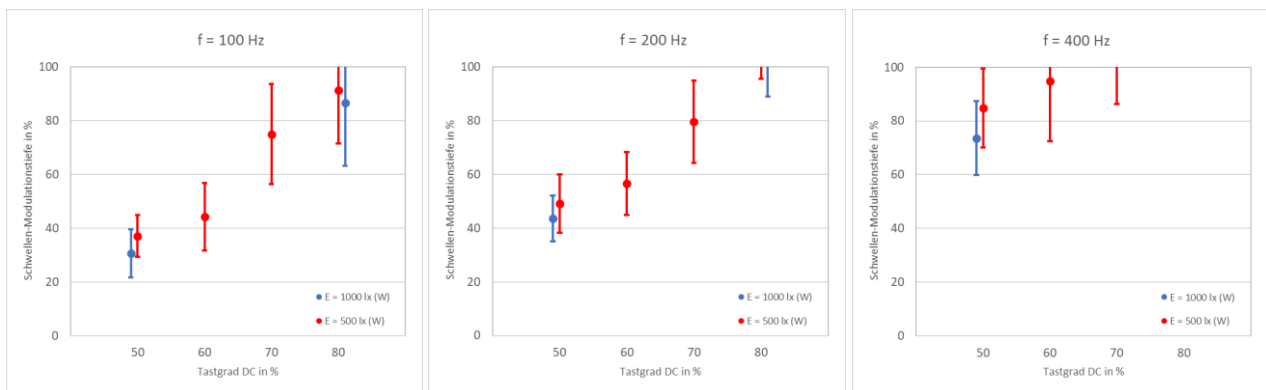


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 6 für 500 lx bei weißem Umfeld (rot): Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad DC für E = 500 lx (weißes Umfeld) und verschiedene Frequenzen. Zum Vergleich in blau: Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie [19] mit E = 1000 lx (weißes Umfeld).

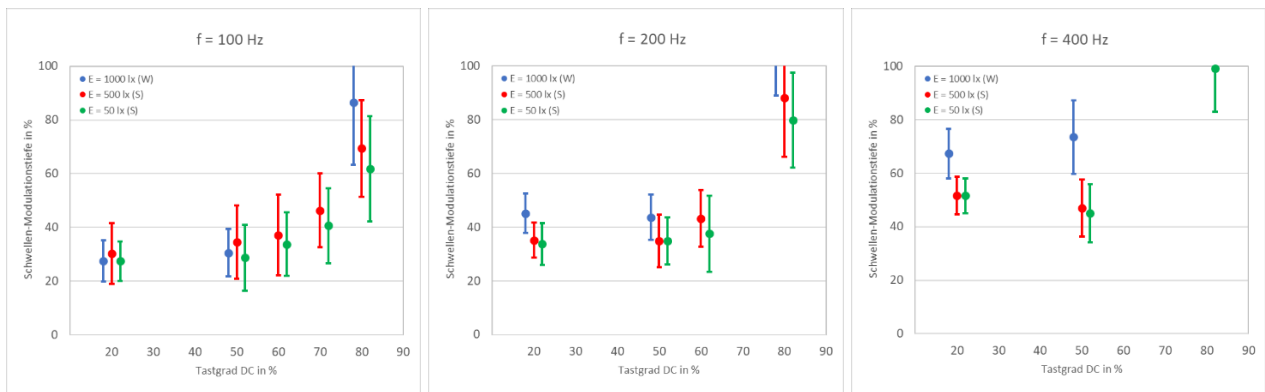


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 6 für das schwarze Umfeld (500 lx in rot und 50 lx in grün): Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad DC für verschiedene Beleuchtungsstärken auf schwarzem Umfeld und verschiedenen Frequenzen. Zum Vergleich in blau: Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie [19] mit $E = 1000$ lx (weißes Umfeld).

In der vorangegangenen Studie wurden Tastgrade von $DC = 20\%$, $DC = 50\%$ und $DC = 80\%$ verglichen. Es zeigte sich kein Unterschied in den Schwellenwerten zwischen $DC = 20\%$ und $DC = 50\%$. Zwischen $DC = 50\%$ und $DC = 80\%$ war der Unterschied jedoch sehr groß, so dass in dieser Studie nun die Zwischenwerte $DC = 60\%$ und $DC = 70\%$ auch untersucht wurden. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse ($E = 500$ lx, weißes Umfeld) im Vergleich zur vorangegangenen Studie ($E = 1000$ lx, weißes Umfeld). Es zeigt sich ein Anstieg der Schwellenwerte mit Erhöhung des Tastgrades.

In Abbildung 10 sind die Schwellen-Modulationstiefen für die Untersuchung mit dem schwarzen Umfeld im Vergleich zur vorangegangenen Studie ($E = 1000$ lx, weißes Umfeld) dargestellt. Zwischen den beiden Beleuchtungsstärkewerten bei schwarzem Umfeld sind kaum Unterschiede erkennbar. Im Vergleich zur vorangegangenen Studie zeigen sich tendenziell etwas niedrigere Schwellenwerte. Bei einer Frequenz von 100 Hz besteht ein relevanter Unterschied nur bei einem Tastgrad von $DC = 80\%$, bei 200 Hz und 400 Hz bei allen Tastgraden. Bei 400 Hz, einem Tastgrad von 80 % und einer Modulationstiefe von 100 % wird bei einer Beleuchtungsstärke von 50 lx der Stroboskopeffekt noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkannt, während er bei 500 lx nicht mehr erkannt wird.

Ab einer Frequenz von 800 Hz wird der Stroboskopeffekt selbst bei maximaler Modulationstiefe $m = 100\%$ nur noch mit geringen Wahrscheinlichkeiten erkannt. Die untere Quartilgrenze $m_{25\%}$ wird nur in zwei Situationen ($DC = 20\%$ und $DC = 50\%$ bei schwarzem Umfeld) erreicht. In allen anderen Fällen liegt die Erkennungswahrscheinlichkeit unter 25 %.

Insgesamt scheint das schwarze Umfeld dazu zu führen, dass der Stroboskopeffekt bereits bei kleineren Modulationstiefen wahrgenommen wird.

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.

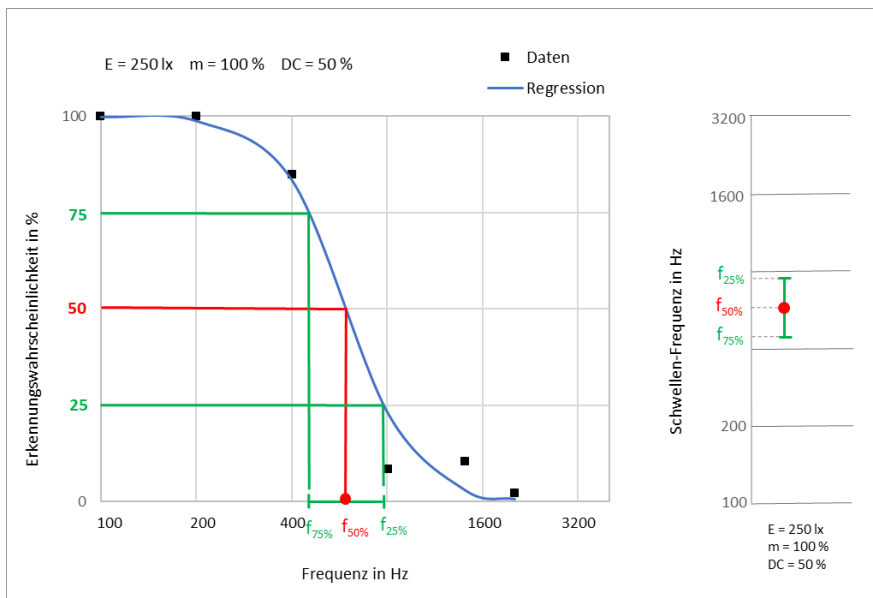


Abbildung 11: Links: Erkennungswahrscheinlichkeit für eine beispielhafte Situation in Abhängigkeit von der Frequenz: Daten der Untersuchung und daraus ermittelte logistische Regressionsfunktion. Aus der Regressionsfunktion wurden der Schwellenwert der Frequenz ($f_{50\%}$) sowie die Frequenzen bei den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

Die Regressionen für alle untersuchten Situationen sind im Anhang zu finden. Daraus lassen sich die Erkennungswahrscheinlichkeiten ablesen. In Tabelle 7 sind die Schwellen-Frequenzen mit den Quartilgrenzen für alle untersuchten Situationen zusammengefasst.

Tabelle 7: Schwellen-Frequenz $f_{50\%}$ mit unterer und oberer Quartilgrenze $f_{75\%}$ und $f_{25\%}$, alle Angaben in Hz, n. u.: die Situation wurde nicht untersucht.

	E	500 lx (W)	500 lx (S)	50 lx (S)	500 lx (w)	500 lx (S)	50 lx (S)	500 lx (W)	500 lx (S)	50 lx (S)
m	DC	untere Quartilgrenze (75 %)			Schwelle (50 %)			obere Quartilgrenze (25 %)		
100 %	20 %	n. u.	928	971	n. u.	1134	1107	n. u.	1386	1261
	50 %	377	642	726	452	784	882	542	956	1072
	60 %	290	n. u.	n. u.	432	n. u.	n. u.	643	n. u.	n. u.
	70 %	140	n. u.	n. u.	258	n. u.	n. u.	476	n. u.	n. u.
	80 %	67	123	167	117	205	271	207	341	438
80 %	20 %	n. u.	648	717	n. u.	801	843	n. u.	989	991
	50 %	90	519	649	377	676	757	467	882	882
	60 %	132	n. u.	n. u.	339	n. u.	n. u.	472	n. u.	n. u.
	70 %	130	n. u.	n. u.	172	n. u.	n. u.	302	n. u.	n. u.
	80 %	62	103	121	80	164	206	142	261	351
63 %	20 %	n. u.	424	453	n. u.	535	583	n. u.	675	751
	50 %	211	356	367	265	508	509	333	724	706
	60 %	176	n. u.	n. u.	263	n. u.	n. u.	395	n. u.	n. u.
	70 %	58	n. u.	n. u.	108	n. u.	n. u.	201	n. u.	n. u.
	80 %	29	60	75	52	107	130	94	191	226
50 %	20 %	n. u.	239	299	n. u.	338	408	n. u.	478	556
	50 %	138	191	237	197	320	365	282	536	562
	60 %	79	n. u.	n. u.	134	n. u.	n. u.	229	n. u.	n. u.
	70 %	24	n. u.	n. u.	44	n. u.	n. u.	78	n. u.	n. u.
	80 %	6	39	59	14	65	89	33	109	133

40 %	20 %	n. u.	141	163	n. u.	216	241	n. u.	331	357
	50 %	84	122	139	131	209	243	205	358	423
	60 %	58	n. u.	n. u.	89	n. u.	n. u.	136	n. u.	n. u.
	70 %	25	n. u.	n. u.	40	n. u.	n. u.	65	n. u.	n. u.
	80 %		23	46		40	65		71	93
33 %	20 %	n. u.	71	105	n. u.	121	157	n. u.	204	236
	50 %	64	59	91	87	119	154	119	238	262
	60 %	37	n. u.	n. u.	61	n. u.	n. u.	102	n. u.	n. u.
	70 %	5	n. u.	n. u.	10	n. u.	n. u.	21	n. u.	n. u.
	80 %		21	85		33	89		53	94

Vergleicht man zunächst die Schwellen-Frequenzen für das weiße Umfeld (500 lx, gelb) mit den Ergebnissen der vorangegangenen Studie [19] (63 lx, 250 lx und 1000 lx), so sieht man, dass die Werte der aktuellen Studien bei niedriger Modulationstiefe etwas höher ausfallen, bei den hohen Modulationstiefen jedoch fast identisch sind (Abbildung 12). Durch die zweite Probandenstudie wurden die Ergebnisse der ersten Probandenstudie bestätigt.

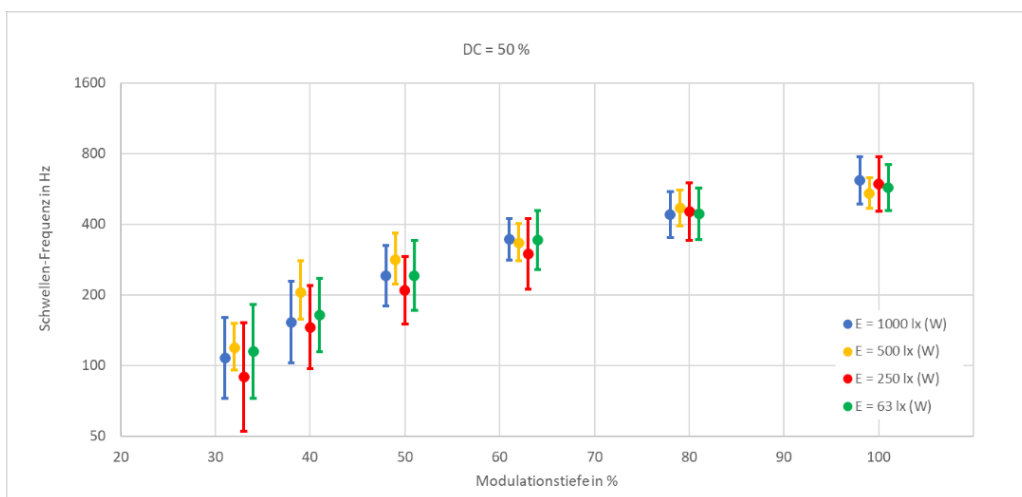


Abbildung 12: Vergleich der Schwellen-Frequenzen für das weiße Umfeld (500 lx) mit den Ergebnissen der vorangegangenen Studie (63 lx, 250 lx und 1000 lx)

In Abbildung 12 wurde ein Tastgrad von 50 % dargestellt. Abbildung 13 zeigt die Abhängigkeit der Schwellen-Frequenz von verschiedenen Tastgraden. Bei hohen Modulationstiefen (63 % und mehr) gibt es keinen Unterschied zwischen den Tastgraden DC = 50 % und DC = 60 %. Vergleicht man die in beiden Studien untersuchten Tastgrade DC = 50 % und DC = 80 %, so wird wiederum die hohe Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Studien deutlich. Ein DC = 80 % führt zu einer deutlich geringeren Wahrnehmungswahrscheinlichkeit als ein DC = 50 %. Bereits in der vorangegangenen Studie zeigte sich kein Unterschied in den Ergebnissen für die drei untersuchten Beleuchtungsstärken.

In Abbildung 14 sind die Schwellen-Frequenzen für die Untersuchung mit dem schwarzen Umfeld im Vergleich zur vorangegangenen Studie (E = 1000 lx, weißes Umfeld) dargestellt. Zwischen den beiden Untersuchungen mit schwarzem Umfeld sind keine Unterschiede erkennbar. Gegenüber der Untersuchung mit dem weißen Umfeld fallen die Schwellen-Frequenzen jedoch höher aus.

Die Schwellenfrequenz für DC = 20 % ähnelt der bis DC = 50 %. Erst ab DC = 50 % bis DC = 80 % zeigen sich deutliche Unterschiede. Bei schwarzem Umfeld, einer Modulationstiefe m von 100 % und einem Tastgrad von 20 % beträgt die Schwellenfrequenz bei einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 25 % etwa 1400 Hz. Bei der ersten Probandenstudie mit weißem Umfeld [19] waren es noch 1000 Hz. Das menschliche Auge ist bei dunklem Hintergrund also flimmerempfindlicher.

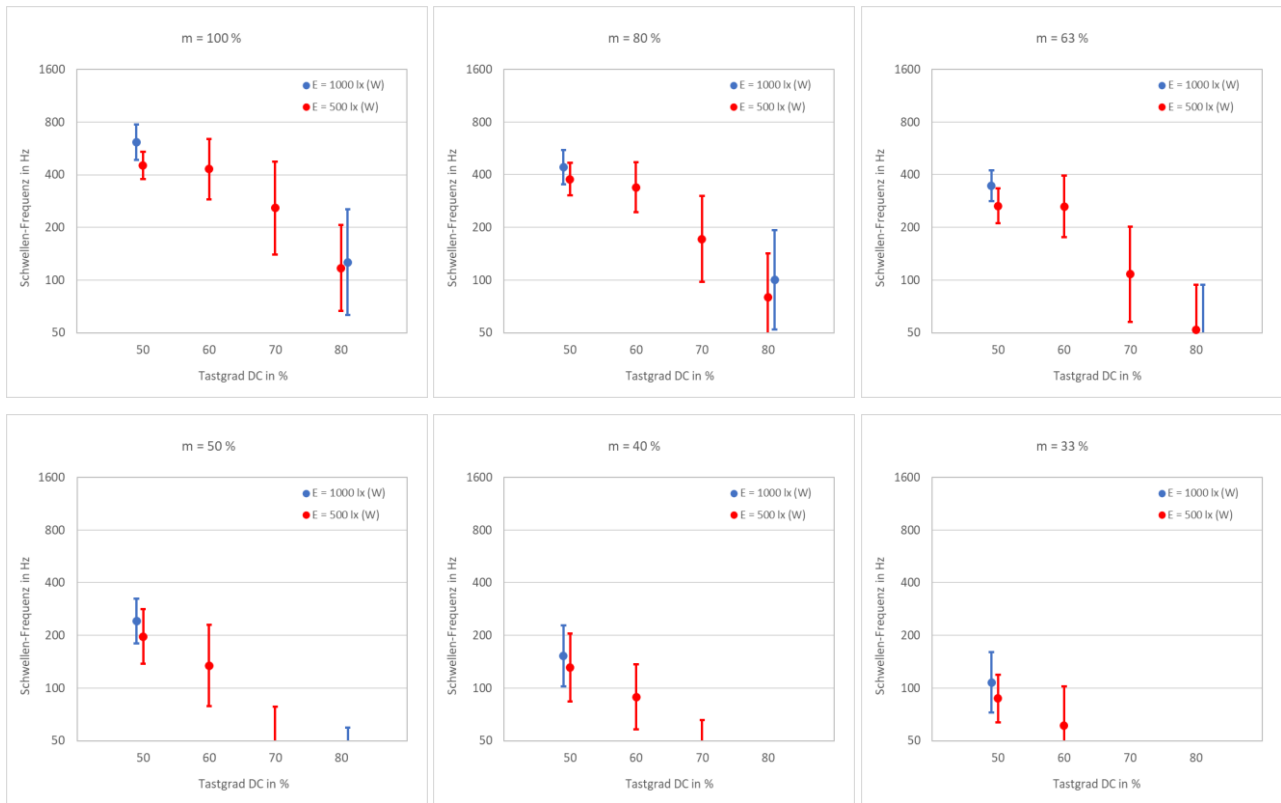


Abbildung 13: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 7 (rot): Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad DC für E = 500 lx (weißes Umfeld) und verschiedene Frequenzen. Zum Vergleich in blau: Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie [19] mit E = 1000 lx (weißes Umfeld).

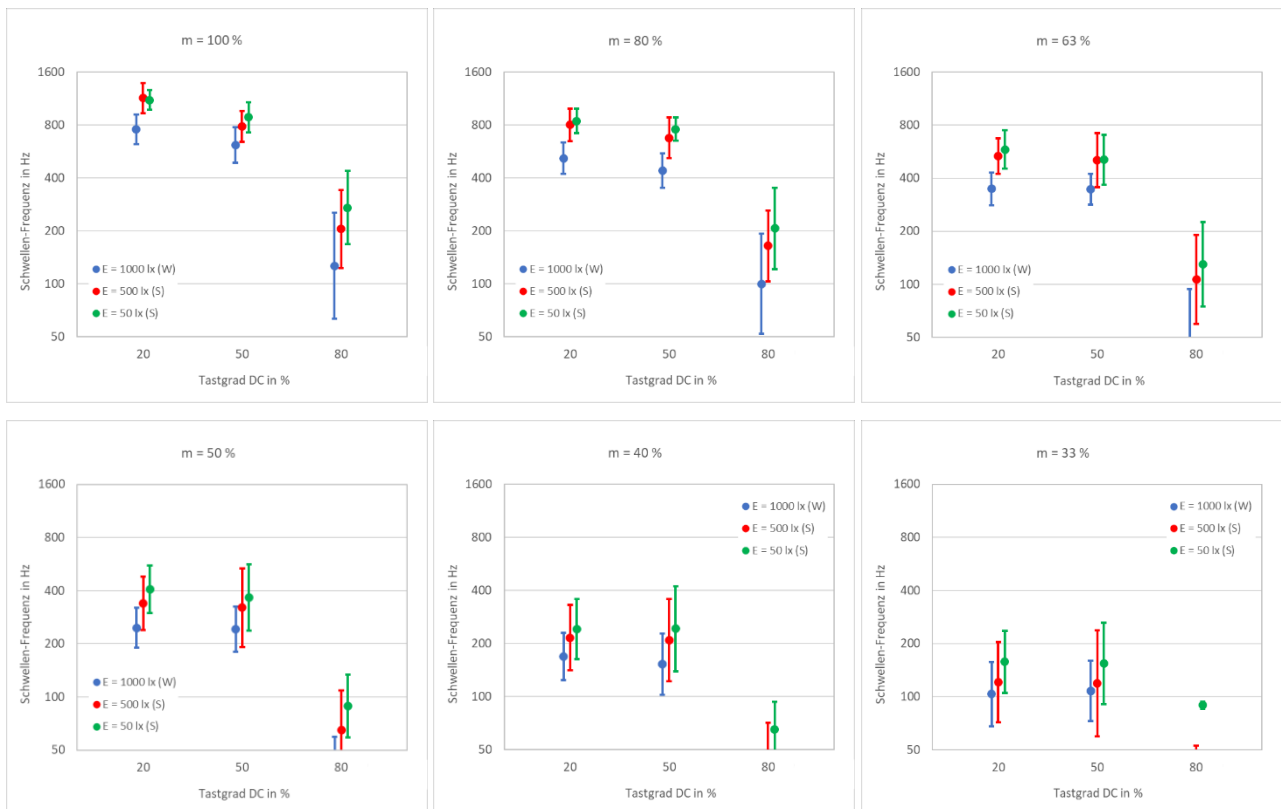


Abbildung 14: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 7: Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit vom Tastgrad DC für verschiedene Beleuchtungsstärken auf schwarzem Umfeld und verschiedene Frequenzen, zum Vergleich in blau: Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie [19] mit E = 1000 lx (weißes Umfeld).

4 Vergleiche mit der Literatur

Beim Vergleich mit der Literatur waren in der vorangegangenen Studie [19] deutliche Abweichungen erkennbar. Als Ursache wurden die ungleichen Adaptationsbedingungen bei der Untersuchung mit dem weißen Umfeld vermutet. Daher sollen im Folgenden die mit dem schwarzen Umfeld ermittelten Werte zum Vergleich herangezogen werden. Alle Vergleichsstudien verwendeten einen Testaufbau nach Abbildung 2.

Vogels [3] untersuchte die Schwellen-Modulationstiefe für verschiedene Frequenzen und Tastgrade. Die Beleuchtungsstärke betrug 500 lx. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Abbildung 15 den Ergebnissen dieser Studie gegenübergestellt. Trotz ähnlicher Versuchsbedingungen zeigen sich hier Unterschiede bei den einzelnen Werten. Die Tendenzen dagegen sind durchaus vergleichbar. Unterschiede sind möglicherweise auf das Alter der Versuchspersonen zurückzuführen. Bei Vogels [3] lag das mittlere Alter bei 28 Jahren und damit unter dem unserer Versuchspersonen (41 Jahre).

Tabelle 8: Ergebnisse bei 500 lx (schwarzes Umfeld) im Vergleich mit den Daten von Vogels [3] bei 500 lx (schwarz)

	TU Ilmenau (500 lx)			Vogels [3] (500 lx)				
DC =	20 %	50 %	80 %	10 %	30 %	50 %	70 %	90 %
f = 50 Hz				40 %	27 %	28 %	32 %	75 %
f = 100 Hz	30 %	35 %	69 %	45 %	25 %	28 %	42 %	92 %
f = 200 Hz	35 %	35 %	88 %	57 %	34 %	37 %	59 %	97 %
f = 400 Hz	52 %	47 %		76 %	55 %	59 %	76 %	99 %

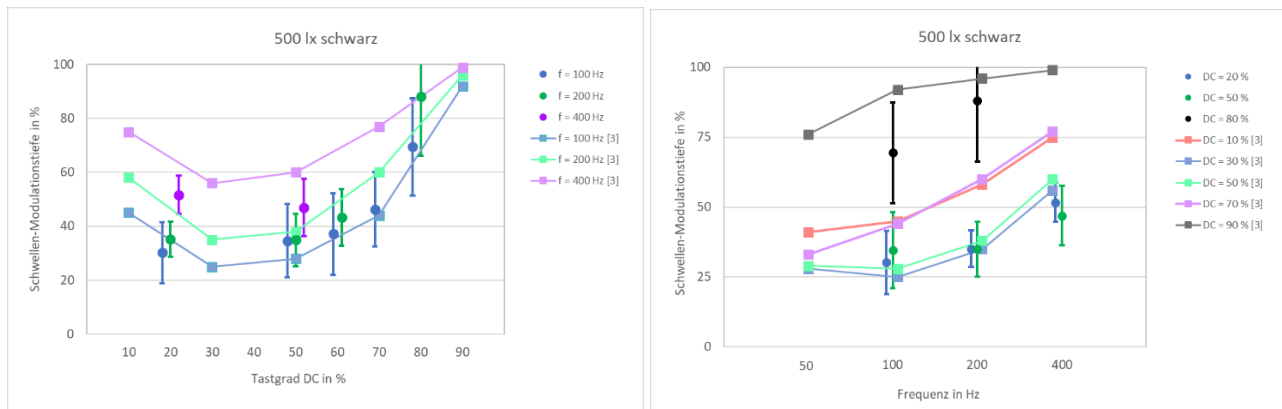


Abbildung 15: Schwellen-Modulationstiefe mit Quartilabstand bei $E = 500$ lx, schwarzes Umfeld. Durchgezogene Linien: Daten aus [3]

Tabelle 9: Schwellen-Modulationstiefen bei 500 lx (schwarz) im Vergleich mit Perz [4] bei 500 lx (schwarz)

	TU Ilmenau (500 lx)	Perz, Exp. 2 [4] (500 lx)	Perz, Exp. 2 [4] (500 lx)
	DC = 50 %	DC = 50 %	Sinus
f = 50 Hz		15 %	25 %
f = 100 Hz	35 %	24 %	32 %
f = 200 Hz	35 %	33 %	40 %
f = 400 Hz	47 %	41 %	55 %

Vergleiche mit Ergebnissen aus [4] (Tabelle 9) zeigen in unserer Studie ähnliche Schwellen-Modulationstiefen.

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 10). Kleinere und größere Beleuchtungsstärken führten zu höheren Schwellenwerten. In unserer Untersuchung zeigte sich keine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

Tabelle 10: 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 = 50 lx	29 %	18 %	19 %
E = 100 lx		23 %	
E = 500 lx	35 %	27 %	26 %

In einer Studie von Chen [7] wurde mit PWM-moduliertem Licht einer Modulationstiefe von 100 % die Wahrnehmung des Stroboskop-Effektes untersucht. Im Vergleich zeigen unsere Ergebnisse dieser Probandenstudie sehr ähnliche Schwellen-Frequenzen. (Tabelle 11 und Abbildung 16). Zu unserer vorangegangenen Studie [19] waren die Unterschiede größer.

Tabelle 11: Schwellen-Frequenzen im Vergleich mit Chen [7]

	TU Ilmenau			Chen [7]				
DC =	20 %	50 %	80 %	10 %	30 %	50 %	70 %	80 %
E = 500 lx	1134 Hz	784 Hz	205 Hz	1250 Hz	1150 Hz	980 Hz	650 Hz	350 Hz
E = 100 lx				1500 Hz	1300 Hz	1125 Hz	800 Hz	500 Hz
E = 50 lx	1107 Hz	882 Hz	271 Hz					

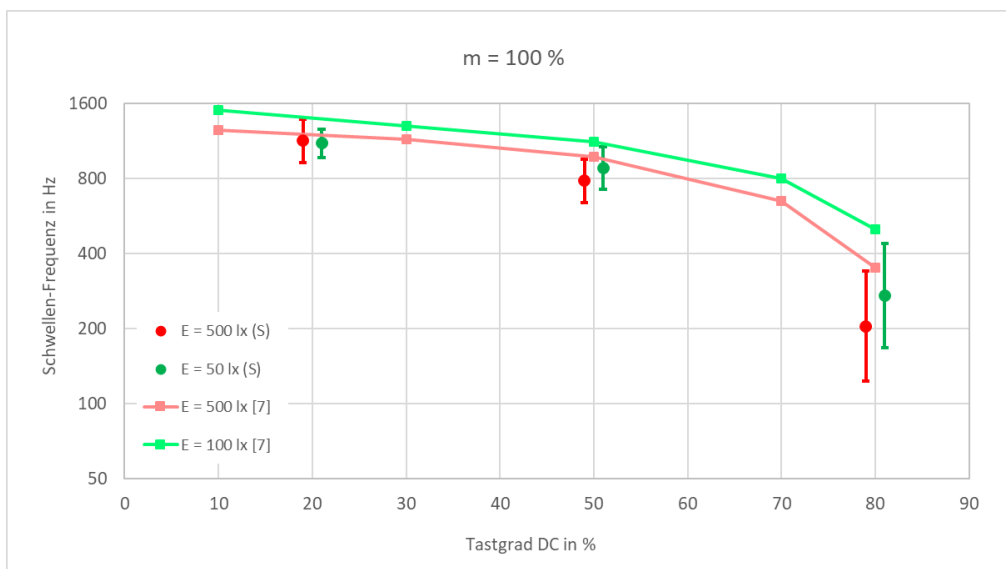


Abbildung 16: Vergleich der Schwellen-Frequenzen mit Quartilabstand mit den Daten von Chen [7] (durchgezogene Linien)

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

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 Tastgrad, Modulationstiefe, Beleuchtungsstärke, Reflexionsgrad des Umfeldes und Frequenz untersucht.

Die Untersuchung basierte auf einem Testaufbau mit einem rotierenden schwarzen Kreis als Sehobjekt auf hellem Umfeld: Das Sehobjekt bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s. Das Testfeld wurde mit zwei verschiedenen Beleuchtungsstärken (500 lx, 50 lx) beleuchtet. Der Reflexionsgrad des Umfeldes betrug 90 % (weißes Umfeld analog zur vorangegangenen Studie [19]) und wurde im zweiten Teil der Studie auf 5 % (schwarzes Umfeld) verändert. Die LED-Beleuchtung wurde in Frequenz, Tastgrad und Modulationstiefe variiert. 12 Testpersonen nahmen an der Studie teil.

Die Erhöhung der Tastgrade von 50 % bis 80 % zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes. Bei hohen Modulationstiefen (63 % und mehr) gibt es keinen Unterschied zwischen den Tastgraden DC = 50 % und DC = 60 %. Ansonsten führen höhere Tastgrade zu niedrigeren Schwellenfrequenzen. Bei höherem Tastgrad nimmt die Wahrnehmbarkeit des Flimmerns ab.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Studien [19] zeigten keinen Einfluss der Beleuchtungsstärkevariation von 63 lx bis 1000 lx auf weißem Umfeld. Auch die neuen Untersuchungen mit 500 lx auf weißem Umfeld zeigen die gleichen Ergebnisse. Die Untersuchungen mit schwarzem Umfeld (50 lx und 500 lx) zeigten höhere Schwellen-Frequenzen als bei weißem Umfeld, wobei sich 50 lx und 500 lx nicht unterschieden. Das schwarze Umfeld hatte geringere Adaptations-Leuchtdichten zur Folge, was sich vermutlich auf die Ergebnisse auswirkte. Allerdings war der Unterschied in der Adaptations-Leuchtdichte gegenüber der in der vorangegangenen Studie betrachteten Beleuchtungsstärke von $E = 63$ lx nicht sehr groß (

Tabelle 3), so dass hier noch anderen Einflüsse zu vermuten sind, beispielsweise die Kontrastrichtung zwischen Sehobjekt und Umfeld.

Nach [11] besteht oberhalb von 1250 Hz nur noch ein geringes Risiko für die Wahrnehmung des Stroboskop-Effektes. Der US-Bundesstaat Kalifornien hat für dimmbare Beleuchtungsprodukte die Anforderung zur Begrenzung von Flimmern und Stroboskopeffekten eingeführt, dass die Modulationstiefe bei Frequenzen unter 200 Hz geringer sein muss als 30 Prozent. Nach unseren Daten würde bei einer Modulationstiefe von 33 % die Erkennungswahrscheinlichkeit für der Stroboskop-Effekt immer noch bei 30 % liegen: In Abbildung 17 liegt bei einer Modulationstiefe von 33 % die obere Quartilgrenze (der roten und grünen Linie) bei ca. 200 Hz.

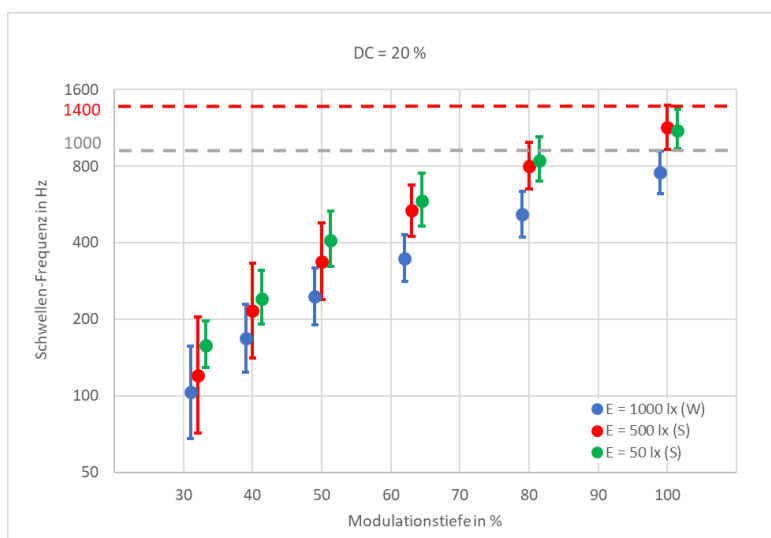


Abbildung 17: Schwellen-Frequenz mit Quartilabstand, aufgetragen in Abhängigkeit von der Modulationstiefe für den Tastgrad DC = 20 %

Um aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen für die Praxis abzuleiten, soll der kritischste Fall (Modulationstiefe $m = 100\%$ und Tastgrad $DC = 20\%$) herangezogen werden. In diesem werden Frequenzen von $f = 1400\text{ Hz}$ und mehr mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 25% erkannt (oberer Quartilgrenze, Abbildung 17). Aus den Daten der vorangegangenen Studie [19] wurde eine Frequenz von mehr als 1000 Hz abgeleitet. Der Unterschied ergibt sich aufgrund der höheren Schwellen-Frequenzen bei dunklem Umfeld.

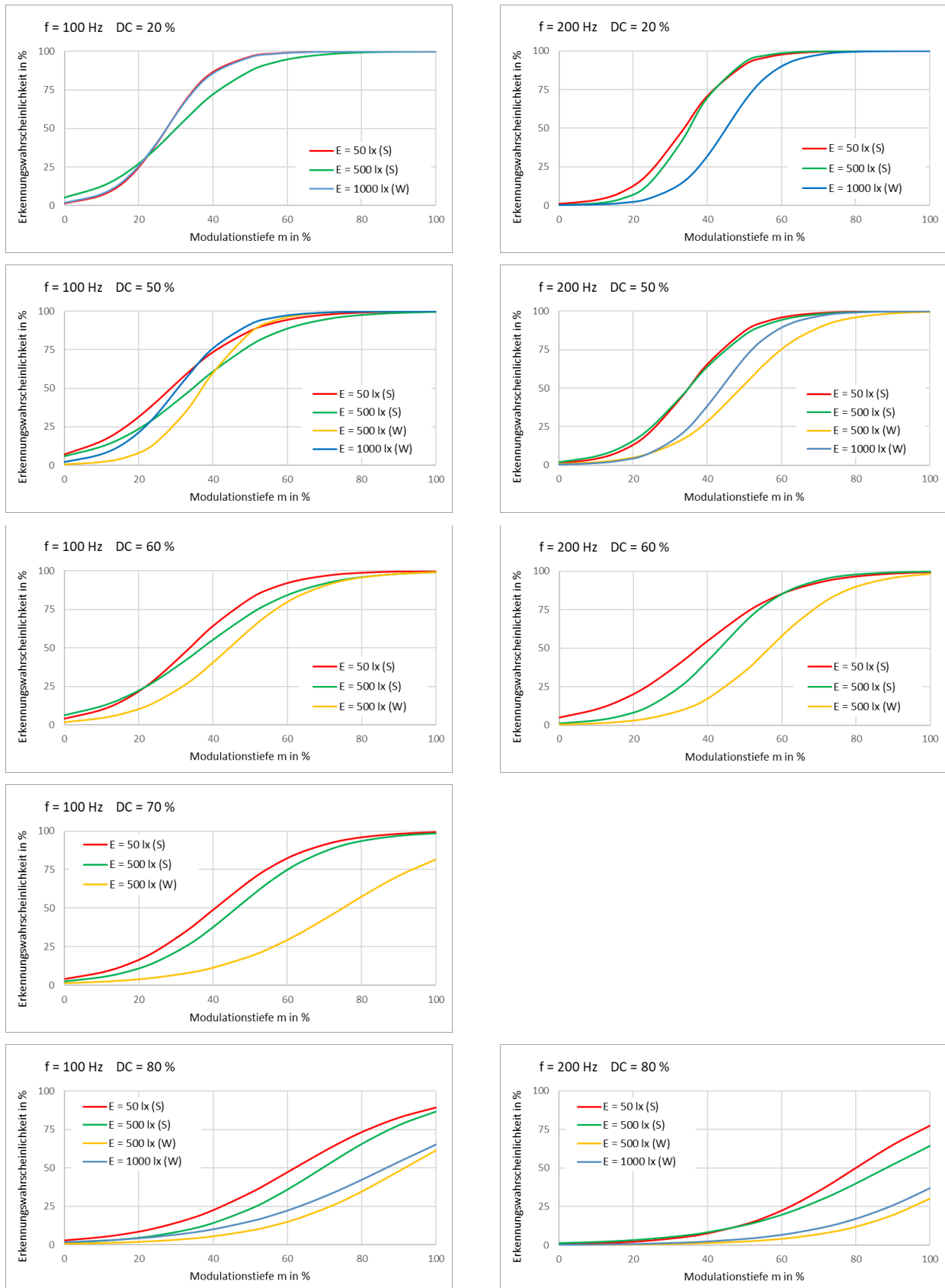
6 Literatur

- [1] Verordnung (EU) 2019/2020 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen und separate Betriebsgeräte.
<https://eur-lex.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. <https://doi.org/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: <https://doi.org/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. http://files.cie.co.at/883_CIE_TN_006-2016.pdf
- [10] CIE Technical Note TN 008 (2017): CIE Stakeholder Workshop for Temporal Light Modulation Standards for Lighting Systems. CIE, Wien. http://files.cie.co.at/943_CIE_TN_008-2017.pdf
- [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.

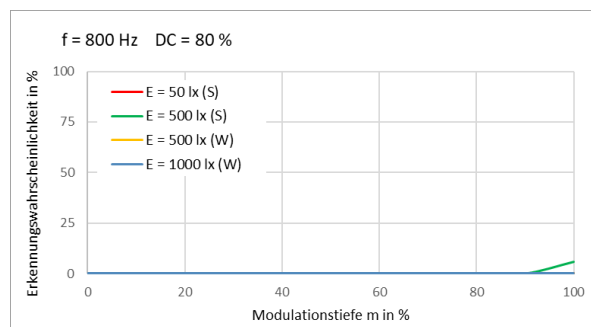
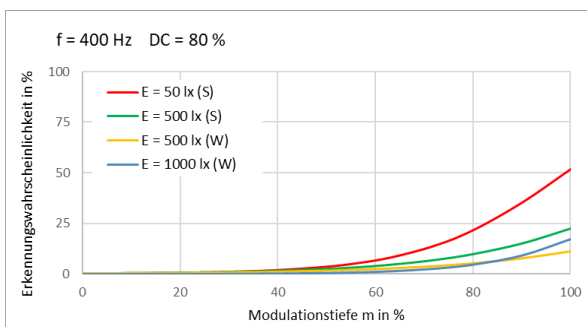
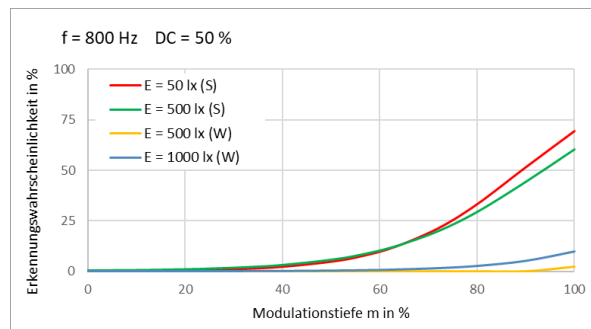
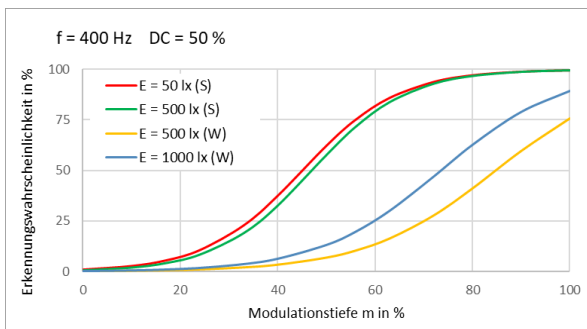
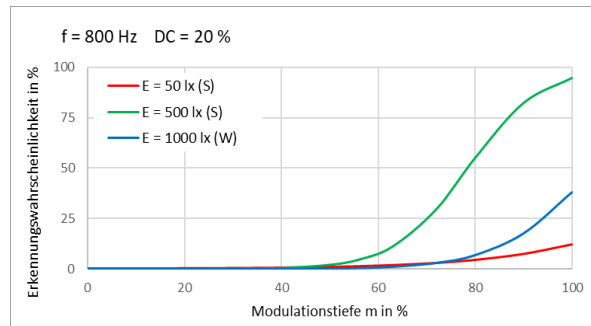
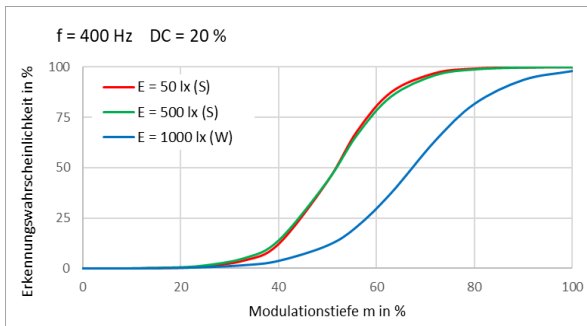
- [16] CIE 249 (2022): Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems, Technical Report
- [17] Veitch, J. A.; Martinsons, C.: Detection of the stroboscopic effect by young adults varying in sensitivity, *Lighting Res. Technol.* 2020; 52: 790–810. <https://doi.org/10.1177/1477153519898718>
- [18] Perz, M. (2019). Modelling visibility of temporal light artefacts. Technische Universiteit Eindhoven.
- [19] Vandahl, C.; Schierz, Ch.: Untersuchung des Stroboskopeffekts in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke. Bericht für die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG E-TEM) 2025
- [20] CEC California Energy Commission. 2016 Title 24, Part 6. Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. <http://www.energy.ca.gov/title24/2016standards>

7 Anhang

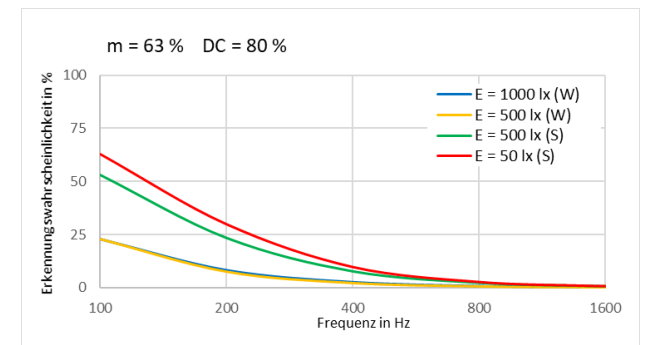
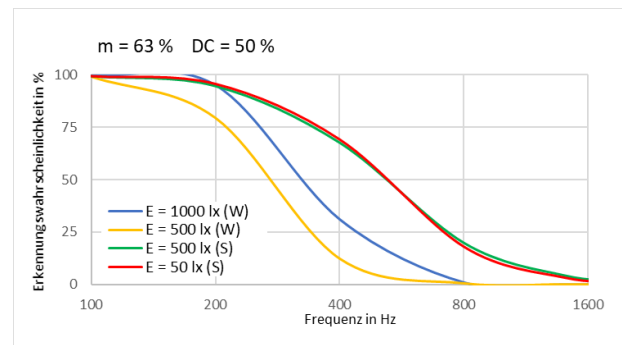
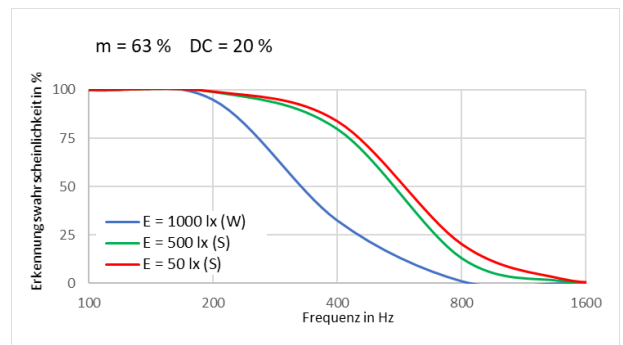
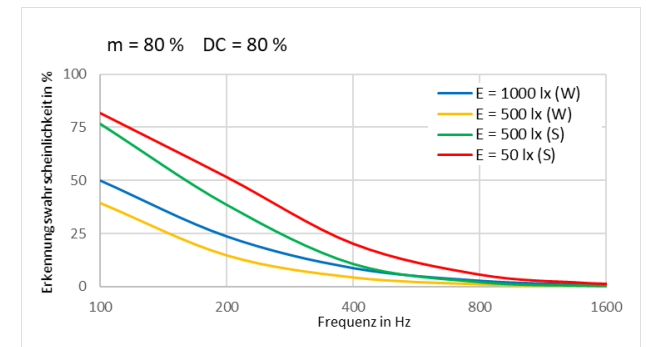
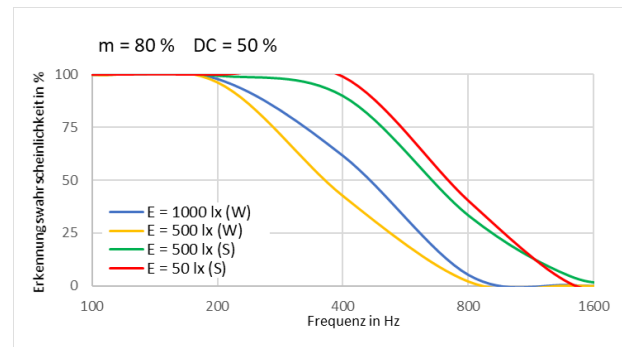
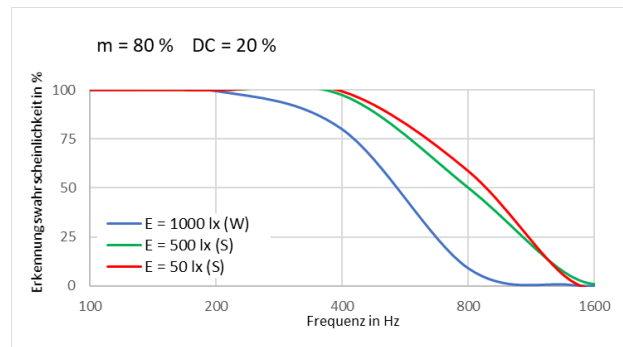
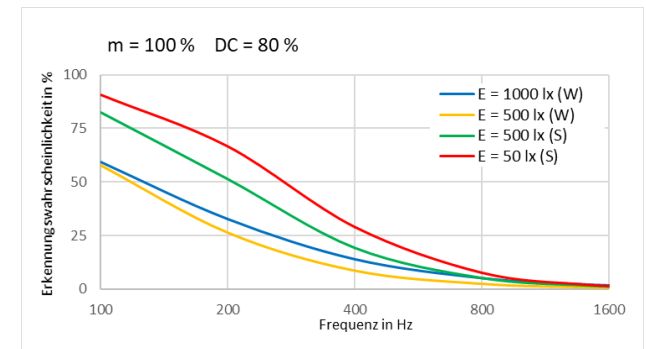
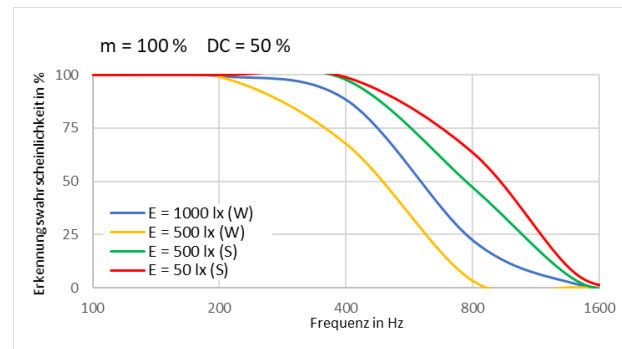
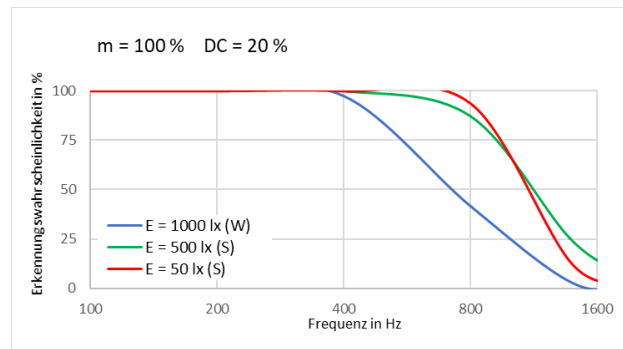
7.1 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe ($f = 100 \text{ Hz}$, 200 Hz)



7.2 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Modulationstiefe ($f = 400 \text{ Hz}$, 800 Hz)



7.3 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz ($m = 100\%$, 80% , 63%)



7.4 Erkennungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz ($m = 50\%$, 40% , 33%)

