



# **Flickereffekt bei Beleuchtungsanlagen im Strassentunnel**

**Effet de scintillement dans les systèmes d'éclairage des  
tunnels routiers**

**Flicker effect of lighting systems in road tunnels**

**Amstein + Walthert Progress AG**  
Urs Welte  
Lars Derek Mellert

**Scians GmbH**  
Dr. Marina Groner  
Dr. Walter F. Bischof

**Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)**  
Dr. Marino Menozzi

**Eidgenössisches Institut für Metrologie (METAS)**  
Dr. Peter Blattner

**Forschungsprojekt AGT 2018/003 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**März 2022**

**1721**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 «Projektabschluss», welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 «Clôture du projet», qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Flickereffekt bei Beleuchtungsanlagen im Strassentunnel**

**Effet de scintillement dans les systèmes d'éclairage des  
tunnels routiers**

**Flicker effect of lighting systems in road tunnels**

**Amstein + Walthert Progress AG**  
**Urs Welte**  
**Lars Derek Mellert**

**Scians GmbH**  
**Dr. Marina Groner**  
**Dr. Walter F. Bischof**

**Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)**  
**Dr. Marino Menozzi**

**Eidgenössisches Institut für Metrologie (Eidgenössisches Institut für  
Metrologie (METAS))**  
**Dr. Peter Blattner**

**Forschungsprojekt AGT 2018/003 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**März 2022**

**1721**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Urs Welte, (Amstein + Walthert Progress AG)

Lars Derek Mellert (Amstein + Walthert Progress AG)

### Projektteam

Dr. Marina Groner (Scians GmbH)

Dr. Walter F. Bischof (Scians GmbH)

Dr. Marino Menozzi (ETH)

Dr. Peter Blattner (METAS)

Samuel Zumtaugwald (Amstein + Walthert Progress AG)

Sandro Ropelato (ETH)

## Begleitkommission

### Präsident

Martin Stauber (bbs Ingenieure AG)

### Mitglieder

Daniel Tschudy (RIBAG Licht AG)

Thomas Blum (Thol Concept GmbH)

Matteo Morisoli (Bundesamt für Strassen, Astra)

Walter Bill (Beratungsstelle für Unfallverhütung, bfu)

## Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Problembeschreibung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Ausgangslage.....	13
1.1.1 Auswirkungen auf den Menschen und Empfehlungen Strassentunnel .....	13
1.1.2 Wissenschaftliche Nachweise und Einfluss neuer Technologien .....	14
1.2 Ziel.....	15
<b>2 Stand der Forschung</b> .....	<b>17</b>
2.1 Flickereffekt generell .....	17
2.2 Einfluss von Beleuchtungstechnologien .....	17
2.3 Wahrnehmungseffekte .....	18
2.4 Neurologische Probleme.....	18
<b>3 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz</b> .....	<b>19</b>
3.1 Unabhängige Variablen.....	19
3.1.1 Beleuchtung .....	19
3.1.2 Kognitive Belastung .....	21
3.2 Abhängige Variablen.....	21
3.3 Versuchsaufbau .....	21
3.4 Messmethoden und Systeme.....	23
3.5 Versuchspersonen .....	24
<b>4 Durchführung Experiment</b> .....	<b>25</b>
4.1 Vorversuche .....	25
4.2 Ethik-Gesuch.....	25
4.3 Zeitlicher Ablauf des Experiments.....	25
<b>5 Resultate</b> .....	<b>27</b>
5.1 Datenanalyse .....	27
5.1.1 Analyse der Geschwindigkeit.....	27
5.1.2 Statistische Analysen .....	27
5.2 Beurteilung der Sehbedingungen in den Tunneln durch die Probanden .....	27
5.3 Fahrverhalten – Abweichung von der Spurmitte .....	29
5.4 Fahrverhalten – Abweichung Richtung Tunnelmitte .....	30
5.5 Fahrverhalten – Beschleunigung seitwärts .....	32
5.6 Fahrverhalten – Beschleunigung in Fahrtrichtung .....	33
5.7 Okulomotorisches Verhalten .....	35
5.8 Fragebogen .....	35
5.9 Diskussion der Resultate des Experimentes .....	37
5.10 Weitere Ergebnisse .....	37
5.11 Massnahmen und Empfehlungen .....	38
<b>6 Glossar</b> .....	<b>39</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>41</b>
<b>8 Projektabschluss</b> .....	<b>43</b>



## Zusammenfassung

Unter dem Begriff «Flickereffekt» werden schnelle und wiederholte Leuchtdichteschwankungen verstanden, die durch natürliches Licht oder künstliche Beleuchtungen hervorgerufen werden können. In Strassentunneln wird diese von den durchfahrenden Fahrzeuglenkern wahrgenommene Erscheinung typischerweise durch die in bestimmten Abständen montierten Leuchten im Deckenbereich erzeugt.

Zur Vermeidung von solch störenden Effekten bei den Fahrzeuglenkern mit potenziellen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit wird deshalb international die Einhaltung von Mindestwerten für die Gleichförmigkeit von Tunnelbeleuchtungen empfohlen. Weil der Flickereffekt im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 10 Hz als besonders unangenehm empfunden wird, sollen als Vorsichtsmassnahme in Schweizer Strassentunneln für die Beleuchtung Frequenzen zwischen 4 Hz und 15 Hz vermieden werden, was normativ festgelegt ist.

Die Grundlagen zur Bestimmung des Flickerbereichs in Strassentunneln sind international wenig gesichert. Diese Unsicherheiten schlagen sich auch in den verschiedenen Vorgaben der Normen und Richtlinien diverser Länder nieder: Die untere Grenze der Flickerfrequenz variiert zwischen 2.5 Hz und 4 Hz, die obere zwischen 11 Hz und 15 Hz. Aus diesem Grund wurde das vorliegende Forschungsprojekt mit dem Ziel lanciert, neue Erkenntnisse zu erarbeiten und zu untersuchen, inwiefern der Einfluss des Flickereffekts auf die Verkehrssicherheit in Strassentunneln wissenschaftlich nachweisbar ist. Es wurden deshalb die Auswirkungen moderner Beleuchtungstechnologien auf die kognitive und visuelle Leistungsfähigkeit von Fahrzeuglenkern experimentell analysiert. Die Versuche wurden am *Institute for Environmental Decisions* der ETH Zürich mit 36 Probanden durchgeführt. Diese Versuchsanlage bot eine geeignete Umgebung für Experimente mit virtual reality (VR) und ermöglichte die Durchführung von realitätsnahen Versuchen.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der subjektive als störend empfundene Flickereffekt ist nicht beschränkt auf die mittleren Frequenzen (4...15 Hz), sondern besteht auch bei höheren Frequenzen (16...20 Hz).
- Der mittlere Frequenzbereich von 12 Hz wird nach wie vor als sehr störend empfunden.
- Höhere Frequenzen verschlechtern die Fahrqualität; dies äusserte sich im Experiment durch vermehrte Quer- und Längsbeschleunigungen des Fahrzeugs.
- Lichtbänder werden generell als angenehmer empfunden.
- Das Alter verstärkt die schlechtere Fahrqualität bei höheren Frequenzen.

Somit können die ursprünglichen Annahmen, welche zum «Vermeidungsbereich» (4...15 Hz) geführt haben, nicht als weiterhin gültig betrachtet werden. Es scheint, dass eine generelle Verschlechterung des (subjektiv empfundenen) Fahrkomforts und der (objektiv festgestellten) Fahrqualität mit zunehmender Flickerfrequenz besteht. Somit sollte die bestehende Schweizer Norm SN 40 551-1 (Teil 1: Lichttechnische Anforderungen, Begriffe und Gütemerkmale) in diesem Punkt überarbeitet werden. Gleichzeitig scheint es angezeigt, die vorliegende Forschung weiterzuführen und den höheren Frequenzbereich über 15 Hz zu untersuchen.





## Résumé

Le terme «effet de scintillement» désigne les fluctuations rapides et répétées de la luminance qui peuvent être provoquées par la lumière naturelle ou l'éclairage artificiel. Dans les tunnels routiers, ce phénomène, perçu par les conducteurs qui les traversent, est généralement causé par les luminaires montés à certains intervalles dans la zone du plafond.

Afin d'éviter de tels effets perturbateurs pour les conducteurs avec des effets potentiels sur la sécurité routière, il est donc recommandé au niveau international de maintenir des valeurs minimales pour l'uniformité de l'éclairage des tunnels. L'effet de scintillement étant perçu comme particulièrement désagréable dans la plage de fréquences comprise entre 5 Hz et 10 Hz, les fréquences comprises entre 4 Hz et 15 Hz devraient être évitées pour l'éclairage des tunnels routiers suisses par mesure de précaution, ce qui est défini par des normes.

Les principes de détermination de la portée du papillotement dans les tunnels routiers ne sont pas très bien établis au niveau international. Ces incertitudes se reflètent également dans les différentes spécifications des normes et directives de divers pays : la limite inférieure de la fréquence de papillotement varie entre 2.5 Hz et 4 Hz, la supérieure entre 11 Hz et 15 Hz. C'est pourquoi le présent projet de recherche a été lancé dans le but de développer de nouvelles connaissances et d'étudier dans quelle mesure l'influence de l'effet de scintillement sur la sécurité routière dans les tunnels routiers peut être prouvée scientifiquement. Les effets des technologies d'éclairage modernes sur les performances cognitives et visuelles des conducteurs ont donc été analysés expérimentalement. Les expériences ont été menées à l'Institut des décisions environnementales de l'ETH Zurich avec 36 sujets. Cette installation d'essai a fourni un environnement approprié pour les expériences avec la réalité virtuelle (VR) et a permis la réalisation de tests réalistes.

Les résultats peuvent être résumés comme suit:

- L'effet subjectif de scintillement, qui est perçu comme perturbant, ne se limite pas aux fréquences moyennes (4...15 Hz), mais existe également à des fréquences plus élevées (16...20 Hz).
- La gamme de fréquences moyennes de 12 Hz est encore perçue comme très perturbante.
- Les fréquences plus élevées détériorent la qualité de roulement, ce qui s'est manifesté dans l'expérience par une augmentation des accélérations latérales et longitudinales du véhicule.
- Les bandes lumineuses sont généralement perçues comme plus agréables.
- L'âge exacerbe la mauvaise qualité de roulement à des fréquences plus élevées.

Ainsi, les hypothèses initiales qui ont conduit à la «fenêtre d'interdiction» (4...15 Hz) ne peuvent être considérées comme toujours valables. Il semble qu'il y ait une détérioration générale du confort de conduite (subjectivement perçu) et de la qualité de conduite (objectivement déterminée) avec l'augmentation de la fréquence de scintillement. Ainsi, la norme suisse existante SN 40 551-1 (Partie 1 : Exigences photométriques, définitions et exigences de qualité) devrait être révisée sur ce point. En même temps, il semble approprié de poursuivre la présente recherche et d'étudier la gamme de fréquences supérieures à 15 Hz.



## Summary

The term «flicker effect» refers to rapid and repeated fluctuations in luminance that can be caused by natural light or artificial lighting. In road tunnels, this phenomenon, which is perceived by drivers passing through, is typically produced by the lights mounted at certain intervals in the ceiling area.

To avoid such disturbing effects on vehicle drivers with potential effects on road safety, it is therefore internationally recommended to maintain minimum values for the uniformity of tunnel lighting. Because the flicker effect is perceived as particularly unpleasant in the frequency range between 5 Hz and 10 Hz, frequencies between 4 Hz and 15 Hz should be avoided for the lighting in Swiss road tunnels as a precautionary measure, which is defined by standards.

The principles for determining the flicker range in road tunnels are not very well established internationally. These uncertainties are also reflected in the different specifications of the standards and guidelines of various countries: the lower limit of the flicker frequency varies between 2.5 Hz and 4 Hz, the upper between 11 Hz and 15 Hz. For this reason, the present research project was launched with the aim of developing new findings and investigating the extent to which the influence of the flicker effect on traffic safety in road tunnels can be scientifically proven. Therefore, the effects of modern lighting technologies on the cognitive and visual performance of vehicle drivers were analyzed experimentally. The experiments were conducted at the Institute for Environmental Decisions of the ETH Zurich with 36 participants. This experimental facility provided a suitable environment for experiments with virtual reality (VR) and enabled the performance of realistic experiments.

The results can be summarized as follows:

- The subjective flicker effect, which is perceived as annoying, is not limited to the middle frequencies (4...15 Hz), but also exists at higher frequencies (16...20 Hz).
- The medium frequency range of 12 Hz is still perceived as very annoying.
- Higher frequencies worsen the driving quality; this was manifested in the experiment by increased lateral and longitudinal accelerations of the vehicle.
- Strip lighting is generally perceived as more pleasant.
- Age exacerbates the poorer driving quality at higher frequencies.

Thus, the original assumptions that led to the «prohibition window» (4...15 Hz) cannot be considered as still valid. It seems that there is a general deterioration of the (subjectively perceived) ride comfort and the (objectively determined) driving quality with increasing flicker frequency. Thus, the existing Swiss standard SN 40 551-1 (Part 1: Lighting requirements, terms and quality characteristics) should be revised on this point. At the same time, it seems appropriate to continue the present research and to investigate the higher frequency range above 15 Hz.



# 1 Problembeschreibung

## 1.1 Ausgangslage

Unter dem Begriff «Flickereffekt» werden schnelle und wiederholte Leuchtdichteschwankungen verstanden (nach [32]; [27]), die durch natürliches Licht oder künstliche Beleuchtungen hervorgerufen werden können (vgl. Abbildung 1). In Strassentunneln wird diese von den durchfahrenden Fahrzeuglenkern wahrgenommene Erscheinung typischerweise durch die in bestimmten Abständen montierten Leuchten im Deckenbereich erzeugt. Dieser Effekt ist klar abzugrenzen vom oftmals auch als «Flicker» bezeichneten Phänomen von visuell wahrnehmbaren Leuchtdichteschwankungen in Leuchtmitteln, die aber durch elektrische Spannungsschwankungen im Stromnetz hervorgerufen werden ([18]; [32]). Flickereffekte werden insbesondere von lichtempfindlichen Personen als sehr störend wahrgenommen und können mitunter zu photosensitiver Epilepsie führen ([18]; [25]). In Strassentunneln wird dem Flickereffekt eine generelle Beeinträchtigung des Fahrverhaltens zugeschrieben ([13]; [15]; [27]).



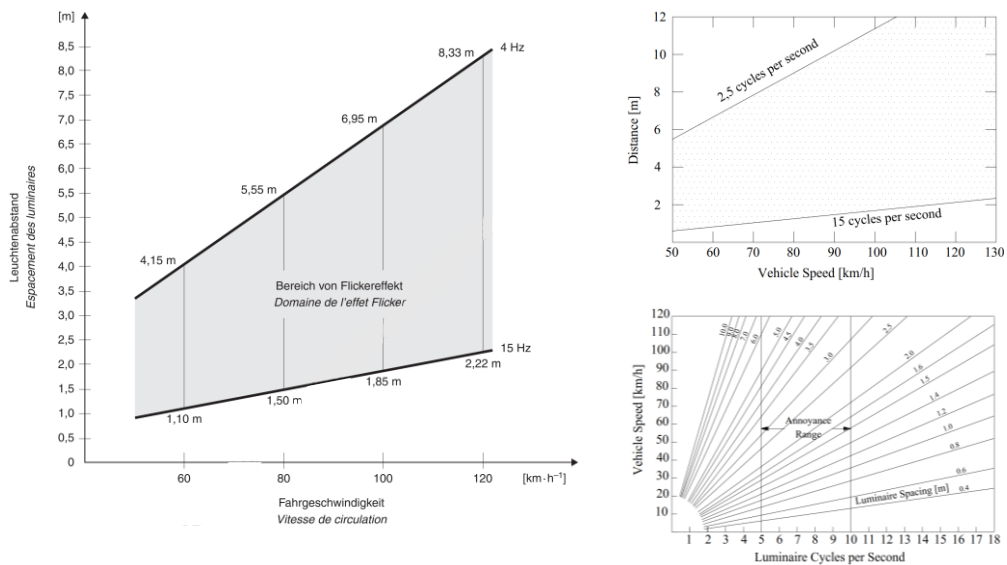
**Abb.1** Flickereffekte durch natürliches Licht auf Baumalleen (links) und in Galerien (Mitte) sowie durch künstliche Beleuchtung in Strassentunneln (rechts)

### 1.1.1 Auswirkungen auf den Menschen und Empfehlungen Strassentunnel

Untersuchungen zur Flickerwahrnehmung wurden bereits vor über 250 Jahren durchgeführt ([19]). Wenn das menschliche Auge intermittierender Beleuchtung ausgesetzt wird, dann lassen sich die Auswirkungen nach der Sichtbarkeit des Flickerns unterscheiden ([32]): Beim sichtbaren Flickern treten Symptome beim Menschen in der Regel sofort auf und reichen von neurologisch unspezifischen Symptomen wie Unwohlsein und Kopfschmerzen bis hin zu unvorhersehbaren Krampfanfällen, die auch bei Personen ohne Vorgeschichte oder Diagnose einer Epilepsie auftreten können. Beim unsichtbaren Flickern hingegen treten die gesundheitlichen Auswirkungen beim Menschen typischerweise nach einer Langzeitbelastung erst verzögert auf und manifestieren sich vor allem in Form von Kopfschmerzen und damit verbundener Beeinträchtigung des Gleichgewichtsempfindens oder der Sehleistung ([13]). Studien deuten darauf hin, dass ein nicht vernachlässigbarer Zusammenhang zwischen Beleuchtungseffekten und der kognitiven sowie visuellen Leistungsfähigkeit von Fahrzeuglenkern in Strassentunneln besteht (vgl. [4]; [9]; [15]). Die biologischen und verhaltensspezifischen Auswirkungen sind jedoch immer abhängig von der Empfindlichkeit der Person sowie des Anwendungsfalls der Beleuchtung und werden massgeblich durch die folgenden Faktoren bestimmt (nach [27]): Frequenz (je nach Fahrgeschwindigkeit und Lichtpunktabstand), Dauer der Einwirkung, Grösse der Leuchtdichtekontraste (Modulation), zeitlicher Verlauf der Leuchtdichteänderungen (Gradient), Lage der Störleuchtdichten im Blickfeld.

Zur Vermeidung von solch störenden Effekten bei den Fahrzeuglenkern mit potenziellen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit wird deshalb international die Einhaltung von Mindestwerten für die Gleichförmigkeit von Tunnelbeleuchtungen empfohlen. Weil der Flickereffekt im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 10 Hz als besonders unangenehm empfunden wird (vgl. auch [15]), sollen als Vorsichtsmassnahme in Schweizer Strassentunneln für die Beleuchtung Frequenzen zwischen 5 Hz und 15 Hz vermieden werden. Konkret bedeutet dies, dass die Leuchtmittel in einem Strassentunnel je nach

vorgesehener Fahrgeschwindigkeit nur in bestimmten Abständen platziert werden können (vgl. Abbildung 2).



**Abb.2** Bereich des Flickereffekts in Abhängigkeit des Leuchtenabstandes und der Fahrgeschwindigkeit in schweizerischen Strassentunneln (links, [27]) und kritische Frequenzbereiche in Strassentunneln gemäss internationaler Empfehlung (rechts oben und rechts unten, [13])

### 1.1.2 Wissenschaftliche Nachweise und Einfluss neuer Technologien

Generell ist festzustellen, dass die Grundlagen zur Bestimmung des Flickerbereichs in Strassentunneln international wenig gesichert sind, kaum wissenschaftlich belastbare Nachweise vorliegen und im Wesentlichen auf unterschiedlichen Praxiserfahrungen basieren. Diese Unsicherheiten schlagen sich auch in den verschiedenen Vorgaben der Normen und Richtlinien diverser Länder nieder: Die untere Grenze der Flickerfrequenz variiert zwischen 2.5 Hz und 4 Hz, die obere zwischen 11 Hz und 15 Hz. Diese Flickerbereiche wurden in den vergangenen Jahren nicht hinterfragt und gelten zum Beispiel in der Schweiz und auch in Österreich seit mehreren Jahrzehnten als Grundlage für die Auslegung von Beleuchtungsanlagen in Strassentunneln. Bis heute fehlen jedoch klare Nachweise, dass die Einhaltung der kritischen Frequenzbereiche einen signifikanten Einfluss auf die Minderung des Flickereffekts und damit auf die Verkehrssicherheit hat. In der aktuellen Beleuchtungsnorm SN 40 551-1 ([27]) wird auf diesen unsicheren Kenntnisstand hingewiesen und explizit erwähnt, dass im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 15 Hz lediglich «(...) mangels gesicherter quantitativ formulierbarer Erkenntnisse und aus Vorsicht (...)» Durchfahrtsbeleuchtungen vermieden werden sollen.

Hinzu kommt, dass das ASTRA seit einigen Jahren vorgibt, dass für Beleuchtungsanlagen in Strassentunneln zwingend LED-Lampen verwendet werden müssen ([4]). Aufgrund der grossen Lichtausbeute derartiger Leuchten werden in der Durchfahrtsbeleuchtung praktisch keine Lichtbänder mehr installiert (wie bis anhin mit FL-Leuchten), sondern stets Einzelleuchten in unterschiedlichen Abständen platziert, was in ungünstigen Fällen zu einer Verschärfung des Flickereffekts führen kann. Es ist bislang nicht geklärt, inwiefern sich dieser Technologiewechsel auf den Flickereffekt auswirkt und ob die aktuellen Vorgaben zur Vermeidung bestimmter Frequenzen noch Bestand haben. Zurzeit lassen sich hinsichtlich des Flickereffekts bei Beleuchtungsanlagen in Strassentunneln somit die folgenden Fragestellungen erörtern:

- Entsprechen die vorgegeben Frequenzbereiche des Flimmereffekts noch dem aktuellen Wissensstand und sind sie aus Sicht der Verkehrssicherheit belegbar oder kann unter Umständen von ihnen abgewichen werden?
- Inwiefern wirken sich neue Beleuchtungstechnologien, insbesondere die LED-Technologie, auf den Flickereffekt und die entsprechenden Frequenzbereiche aus?
- Ergeben sich dadurch Auswirkungen auf die zukünftige Projektierung und den zukünftigen Betrieb von Beleuchtungsanlagen in Strassentunneln?

## 1.2 Ziel

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt sind gesicherte und quantitativ formulierbare Erkenntnisse zum Flickereffekt bei Beleuchtungsanlagen in Strassentunneln zu erarbeiten. Im Besonderen ist zu untersuchen, inwiefern der Einfluss des Flickereffekts auf die Verkehrssicherheit in Strassentunneln wissenschaftlich nachweisbar ist und ob neue Beleuchtungstechnologien zu einer veränderten Ausgangslage führen. Sofern möglich sollen zweckmässige Massnahmen hergeleitet werden, die den neuen Wissensstand sowie die aktuellen Technologieentwicklungen ausreichend berücksichtigen. Ausgehend von den in Kapitel 1.1 aufgeführten Fragestellungen wird folgende Hypothese formuliert, die mit dem vorliegenden Forschungsprojekt untersucht werden soll:

**«Die aktuellen Vorgaben zur Vermeidung der Auswirkungen des Flickereffekts auf die Verkehrssicherheit in Strassentunneln sind aus wissenschaftlicher Sicht und unter Berücksichtigung aktueller Beleuchtungstechnologien nicht ausreichend belegt.»**

Im Kontext ansteigender Verkehrszahlen sowie der Tendenz, den Verkehr in urbanisierten Räumen in den Untergrund zu verlagern, nimmt die Bedeutung von sicheren Strassentunneln zu. Um die Konzentration und Fahrsicherheit der Verkehrsteilnehmer während ihrer Durchfahrt zu unterstützen, haben objektspezifische Beleuchtungsanlagen für ausreichende Sichtbedingungen zu sorgen. Hinsichtlich des Flickereffekts werden in den einschlägigen Normen und Richtlinien zwar technische Vorgaben gemacht, bei denen aber ausdrücklich nicht klar ist, ob sie dem aktuellen Wissensstand entsprechen und die Vor- und Nachteile neuer Beleuchtungstechnologien ausreichend berücksichtigen. Im ungünstigsten Fall werden dadurch sowohl Projektierenden als auch Betreibern von Strassentunneln unnötige oder sogar kontraproduktive Vorgaben gemacht, die eine Ausschöpfung allfälliger Optimierungspotentiale verunmöglichen (Bsp. Erhöhung von Leuchtenabständen und entsprechende Reduzierung von Leuchtenanzahl und des Energieverbrauchs ohne Sicherheitsauswirkung).

Solange die genaue Wirkungsweise und Konsequenzen des Flickereffekts in Strassentunneln unbekannt bleiben, stellen sie einen Unsicherheitsfaktor im Umgang mit modernen Beleuchtungsanlagen dar, mit potenziellen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit in Strassentunneln. Die Formulierung der Hypothese konzentriert sich deshalb auf die beiden Aspekte «Verkehrssicherheit» und «Beleuchtungstechnologien» und verdeutlicht, dass im vorliegenden Forschungsprojekt der Fokus nicht nur auf die Nachweiserbringung der tatsächlich relevanten Frequenzbereiche gerichtet werden soll, sondern dass diese aufgrund technologischer Entwicklungen generell hinterfragt werden sollen. Dies ist von grossem Interesse, da aufgrund der hohen Lichtleistung moderner LED-Leuchten neue, effizientere Anordnungen der Leuchten möglich sind.

Damit die Hypothese eindeutig beantwortet werden kann, muss der zu wählende Forschungsansatz entsprechend ganzheitlich sein und zentrale Einflussbereiche des Flickereffekts auf die Verkehrssicherheit berücksichtigen. Somit sollen folgende Aspekte untersucht werden, wie sich der Flickereffekt sowohl auf Basisfunktionen des Sehens als auch auf die Fahrleistung auswirkt:

- Wahrnehmungsprobleme (z.B. Kontrastwahrnehmung, Tiefenwahrnehmung, Bewegungswahrnehmung, Objekterkennung)

- Probleme mit Augenbewegungen und Aufmerksamkeit (z.B. Kontrolle der Augenbewegungen, Pupillendurchmesser, Erfassen von Informationen im gesamten Gesichtsfeld)
- Physiologische Probleme (z.B. Augenbeschwerden wie Brennen, Tränen oder Blenden, Unwohlsein, Kopfschmerzen, Müdigkeit)
- Neurologische Probleme (z.B. photosensitive Epilepsie)
- Performanzprobleme (z.B. Abstandhalten, Spurtreue, Veränderungen der Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigungsfrequenzen sowohl seitlich als auch in Fahrrichtung, allgemeine Fahrleistung)

Im Kern sind deshalb die Auswirkungen moderner Beleuchtungstechnologien auf die kognitive und visuelle Leistungsfähigkeit von Fahrzeuglenkern experimentell zu analysieren. Anhand der Ergebnisse sind angemessene Massnahmen für den zukünftigen Umgang mit dem Flickereffekt zu formulieren. Die folgenden Ziele sind dabei zu erreichen:

Ziel 1 Aufzeigen des Einflusses neuer Beleuchtungstechnologien auf den Flickereffekt und die Verkehrssicherheit in Strassentunneln

Ziel 2 Formulierung von Vorschlägen zur allfälligen Anpassung der beleuchtungstechnischen Vorgaben, insbesondere bzgl. Art und Position der Lichtquelle, Lichtfarbe, Lichtintensität, Expositionsdauer und Lichteinfluss

Abgrenzung: Die Alterung von LED-Leuchten ist nicht explizit Gegenstand des Projekts. Allerdings können aus der Variation der Leuchtdichte im Projekt Schlüsse auf die Wirkung der Alterung gezogen werden, da diese unter anderem in einer Reduktion der Leuchtdichte besteht. Zudem nicht berücksichtigt werden der Einfluss von Eigen-frequenzen auf benachbarte technische Anlagen sowie grundsätzliche Unterschiede im Lebenszyklusmanagement von LED-Leuchten und FL-Leuchten.

Im vorliegenden Projekt werden ausschliesslich Flickereffekte von vollständig künstlichen Beleuchtungen in Strassentunneln untersucht; Flickereffekte, die durch natürliche Beleuchtungen hervorgerufen werden, beispielsweise in Galerien, stehen nicht im Fokus.



## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Flickereffekt generell

Das Wahrnehmungsphänomen «Flicker» (auch «Flimmern» genannt) ist schon sehr lange bekannt, wurde aber erstmals in den 1970er Jahren von D. H. Kelly ([19]) auf eine präzise wissenschaftliche Grundlage gestellt. In der Folge wurde fast ausschliesslich der sichtbare, d.h. direkt wahrgenommene Flicker bis etwa 50 Hz im Zentrum des Gesichtsfeldes, bis etwa 80 Hz im peripheren Gesichtsfeld, untersucht. Dabei ist zu betonen, dass das Sensitivitätsmaximum bei ungefähr 15 Hz liegt – also genau im Frequenzbereich, der von den meisten aktuellen Vorgaben für Tunnelbeleuchtungen als nicht mehr kritisch betrachtet wird (vgl. Abbildung 2). Neuere Arbeiten zum sichtbaren Flicker wurden insbesondere von Wilkins ([30]; [29]) diskutiert.

Im Gegensatz zum sichtbaren Flicker können die Effekte des unsichtbaren Flickers bis zu Frequenzen im Bereich von mehreren kHz nachgewiesen werden. Allerdings wird der unsichtbare Flicker nicht direkt wahrgenommen, sondern in speziellen Situationen, z.B. während häufigen, sprungartigen Verschiebungen der Sehrichtung, sogenannten Sakkaden. Im Weiteren zeigen sich die Folgen eines unsichtbaren Flickers oft bei besonders sensitiven Personen, die sich nach einiger Zeit in einem Raum mit hochfrequentem Flicker über Unwohlsein oder Kopfschmerzen beklagen.

### 2.2 Einfluss von Beleuchtungstechnologien

Traditionell wurden für die Durchfahrtsbeleuchtung von Strassentunneln vornehmlich FL-Leuchten sowie Natriumdampflampen und erst in neuerer Zeit LED-Lampen verwendet. Untersuchungen in einem Fahrsimulator haben gezeigt, dass verbesserte Ausleuchtung von Tunneln durch LED-Lampen zu besserem Fahrverhalten, insbesondere einer besseren Früherkennung von kritischen Situationen sowie frühzeitigen Ausweichmanövern führen kann ([12]).

Ein weiterer Vorteil der LED-Lampen gegenüber den bisher konventionellen Leuchten zeigt sich in der spektralen Zusammensetzung des emittierten Lichts: Während beispielsweise Natriumdampflampen ein gelbliches Licht (mit stärkster Energie im Bereich 550-650 nm) ausstrahlen, geben LED-Lampen zusätzliche Energie im kurzwelligen Bereich (450-500 nm) ab. Damit führen LED-Lampen zu einer verbesserten Wahrnehmung für höhere Farbtemperaturen, da bei Dämmerungsadaption auch die Stäbchen an der Hellempfindung beteiligt sind und diese im kurzwelligen Bereich empfindlicher sind (vgl. [11]). Andererseits können LED-Lampen zu erhöhten Blendungseffekten (glare) und damit zu Sehbeschwerden führen (vgl. [10]). Die LED-Beleuchtungen können wegen ihrer erhöhten Effizienz aber auch zu Streifenmustern auf den Wänden und der Fahrbahn führen, vor allem dann, wenn die Leuchten aus Energiespargründen mit grossem Abstand montiert werden. Dieses Problem ist zwar in der neueren Literatur erkannt, aber es gibt noch praktisch keine empirischen Untersuchungen dazu. Es wird vermutet, dass diese Streifenmuster aber mehrere negative Auswirkungen haben, die im Folgenden ausgeführt und im vorliegenden Projekt genauer untersucht werden sollen.

Von einer vertieften Untersuchung des Einflusses der LED-Technologie im Vergleich zu bisherigen Leuchten im Hinblick auf den Flicker wurde jedoch abgesehen, obwohl die punktförmigen Leuchtpunkte höhere Leuchtdichten erzeugen als flächige Strahler. Auch die Gefahr der Blendung muss als etwas höher eingestuft werden. Trotzdem kommen die Autoren zum Schluss, dass eine eingehende Untersuchung der LED-Technologie für die Beurteilung des Flickereffekts nicht notwendig ist. Die Kontraste und Beleuchtungsstärken, welche die Grundlage für das Experiment bildeten, wurden am Auge mit mehreren Messungen in repräsentativen Tunneln sowohl mit LED- als auch FL-Leuchten ausgemessen. Hier zeigten sich keine relevanten Unterschiede in der Beleuchtungsstärke.

## 2.3 Wahrnehmungseffekte

Die projizierten Streifenmuster beeinflussen das Wahrnehmungssystem auf verschiedene Arten. Regelmässige Streifenmuster auf Wänden und Fahrbahn können einerseits die Beurteilung der gefahrenen Geschwindigkeit verbessern ([33]). Allerdings besteht auch die Möglichkeit, dass sich die wahrgenommene Geschwindigkeit mit der Zeit verlangsamt, insbesondere wenn die Streifen einen reduzierten Kontrast haben ([26]). Die Bewegung der Streifen im peripheren Gesichtsfeld führt andererseits zu Flickereffekten, welche wiederum die Aufmerksamkeit auf sich und damit weg vom zentralen Gesichtsfeld ziehen.

## 2.4 Neurologische Probleme

Intermittierendes Licht kann Augenbeschwerden, Unwohlsein, Kopfschmerzen und im ungünstigsten Fall einen epileptischen Anfall auslösen. Etwa 2-5% von Epilepsie-Patienten und Patientinnen sind von dieser photosensitiven Epilepsie (PSE) betroffen. In der Altersgruppe der 7-19-jährigen Personen beträgt die Prävalenz etwa 10% ([23]). Bei  $\frac{3}{4}$  dieser Personen bleibt die PSE lebenslang erhalten ([14]). Es besteht eine relativ enge Korrelation zwischen der photosensitiven Epilepsie und der Photosensitivität, die auch in der gesunden Population mit einer Prävalenz von ca. 0.5% vorhanden ist ([23]).

Für das vorliegende Forschungsprojekt sind vor allem die Eigenschaften der visuellen Reize von Interesse, die das Potenzial haben, einen Anfall von photosensitiver Epilepsie auszulösen. In Studien mit Patienten, die an photosensitiver Epilepsie litten, wurde untersucht, welche Muster photoparoxysmale Reaktionen (PPR) im EEG auslösen. Es sind dies vor allem hell-dunkle Streifenmuster mit einer optimalen Raumfrequenz zwischen 2 und 4 Perioden/Grad Sehwinkel. Mit zunehmendem Hell-Dunkel-Kontrast steigt die Wahrscheinlichkeit von PPR an ([31], [16]). Verändern sich die Streifenmuster oder andere visuelle Muster zeitlich repetitiv (wie beim Flickereffekt), so nimmt die Wahrscheinlichkeit für PPR im EEG weiter zu. Zwar können Frequenzen von 3-70 Hz PPR auslösen, die grösste Wahrscheinlichkeit dafür liegt aber zwischen 15 und 20 Hz ([16]; [14]). Folglich birgt eine Flickerrate von 15-20 Hz das grösste Risiko, Anfälle von photosensitiver Epilepsie auszulösen. Diese Tatsache deutet auf den nicht mehr aktuellen Wissensstand in den Vorgaben für Tunnelbeleuchtungen hin, in denen lediglich der Frequenzbereich zwischen 4-15 Hz als kritisch erachtet wird; zudem verdeutlicht sie den Bedarf für tieferegehende und wissenschaftlich fundierte Untersuchungen des Flickereffekts.

## 3 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz

Weder wissenschaftliche Studien noch Erfahrungen von Tunnelbetreibern aus dem In- und Ausland vermögen bislang gesicherte und quantitativ formulierbare Aussagen über den Flickereffekt in Strassentunneln zu liefern. Aus diesem Grund wurde die Hypothese mittels eines aussagekräftigen Experiments mit Probanden untersucht.

### 3.1 Unabhängige Variablen

Ziel des Experiments war es, den Einfluss der Leuchtdichteverteilung der Tunnelbeleuchtung auf die subjektiv beurteilten Sehbedingungen, das Fahrverhalten und das okulomotorische Verhalten (Augenbewegungen) systematisch zu untersuchen.

Die Position und Leuchtdichteverteilung der Lichtquellen und deren Projektion auf Fahrbahn, Tunnelwand, Tunneldecke und Armaturenbrett im Auto wurden systematisch variiert. Die Positionen der Lichtquellen wurden so gewählt, dass die räumliche Frequenz der projizierten Streifenmuster bei einer vorgegebenen Fahrgeschwindigkeit die zeitlichen Frequenzen von 2.5 Hz, 6 Hz, 12 Hz, 16 Hz und 20 Hz erzeugte. Zusätzlich wurde eine homogene Beleuchtung (= 0 Hz) als Kontrollbedingung eingeführt.

Generell musste darauf geachtet werden, dass mit dem Experiment nur die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Flickereffekt untersucht werden. Zu viele unabhängige Variablen führen schnell zu einer «kombinatorischen Explosion», wodurch die Versuchssegmente für die Probanden unzumutbar lang (max. 45 min) geworden wären.

#### 3.1.1 Beleuchtung

Frequenz und Kontrast sind gemäss Literatur die Variablen mit dem stärksten Einfluss des Lichts auf die Photosensitivität. Die gewählten Ausprägungen dieser Variablen (Stufen) wurden allen Versuchsteilnehmern in allen Kombinationen präsentiert. Dies trifft auch auf die Dauer der Einwirkung, deren Stufen aus den Daten eruierbar sind, zu.

##### *Frequenz*

Gegenwärtig werden die Abstände zwischen den Leuchten so gewählt, dass Frequenzen zwischen 4 und 15 Hz vermieden werden. Die zu variierenden Frequenzen werden im Experiment deshalb auf diesen kritischen Bereich ausgerichtet und gemäss der folgenden Tabelle erzeugt.

**Tab. 1** Geschwindigkeitsabhängige Leuchtenabstände zur Erzeugung verschiedener Flickerfrequenzen

Frequenzstufen	Periode (Leuchtdichtenabstand)		Bemerkung
	bei 80 km/h	bei 100 km/h	
0 Hz			Kontrollbedingung
2.5 Hz	8.88 m	11.11 m	EU-weit als unterste Flickerfrequenz genannt
6 Hz	3.7 m	4.6 m	Innerhalb Flickerbereich CH
12 Hz	1.9 m	2.3 m	Innerhalb Flickerbereich CH
16 Hz	1.4 m	1.7 m	Knapp ausserhalb Flickerbereich CH
20 Hz	1.1 m	1.38 m	ausserhalb des Flickerbereichs, aber Frequenz mit hohem Anteil an photosensitiven Reaktionen

### Kontrast

Mittlere Kontraste und Beleuchtungsstärken von Leuchten am Auge wurden mit mehreren Messungen in repräsentativen Tunneln sowohl mit LED- als auch FL-Leuchten in den Grossräumen Bern und Zürich durch die METAS ausgemessen (vgl. folgende Tabelle).

**Tab. 2** Messungen METAS (Auswahl)

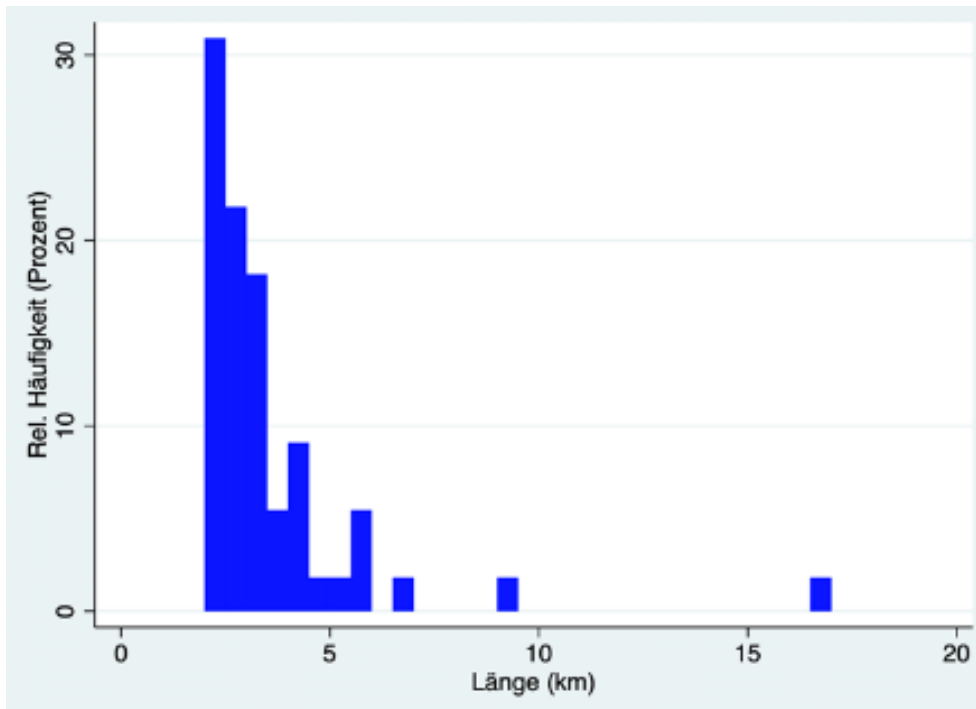
#	Tunnel	Fahrriichtung / Fahrstreifen	Michelson-Kontrast am Auge	Mittlere Beleuchtungsstärke am Auge
1	Längholz (A5, BE)	Solothurn, rechter Fahrstreifen	1.00	1.63 lx
2	Büttenberg (A5, BE)	Solothurn, rechter Fahrstreifen	0.87	3.99 lx
3	Büttenberg (A5, BE)	Bern, rechter Fahrstreifen	0.74	3.93 lx
4	Längholz (A5, BE)	Bern, rechter Fahrstreifen	0.85	2.29 lx
5	Längholz (A5, BE)	Solothurn, linker Fahrstreifen	1.00	3.49 lx
6	Längholz (A5, BE)	Solothurn, rechter Fahrstreifen	0.90	3.76 lx
7	Ligerztunnel (H5, BE)	Neuchâtel, rechter Fahrstreifen	0.68	9.11 lx
8	St. Blaise Ouest (A5, NE)	Yverdon	0.70	k.A.
9	Vignier (A5, NE)	Yverdon	0.41	k.A.
10	Monruz (A5, NE)	Yverdon	0.51	k.A.
11	Tunnel est (A5, NE)	Yverdon, rechter Fahrstreifen	0.66	5.25 lx
		Yverdon, linker Fahrstreifen	0.81	12.56 lx
12	Tunnel est (A5, NE)	Yverdon, kurz vor Ausfahrt Serrières	0.72	9.01 lx
13	Tunnel Serrières (A5, NE)	Yverdon, rechter Fahrstreifen	k.A.	k.A.
14	Tunnel Serrières (A5, NE)	Biel, rechter Fahrstreifen	k.A.	k.A.
15	Tunnel ouest (A5, NE)	rechter und linker Fahrstreifen	0.71, 0.81, 0.74	7.83 lx, 14.65 lx, 7.23 lx
16	Tunnel Monruz (A5, NE)	rechter Fahrstreifen	0.49	9.38 lx
17	Hauterive (A5, NE)	k.A.	0.57	k.A.
18	Hauterive (A5, NE)	2. Hälfte nach Galerie	0.50	k.A.
19	Brünnen (A1, BE)	k.A.	0.63	3.98 lx

### Dauer der Einwirkung

Studien legen nahe, dass der Flickereffekt erst ab einer längeren Einwirkungsdauer störend wirkt ([22]). Im Experiment werden deshalb Innenstrecken eines ansonsten normkonformen Schweizer Strassentunnels simuliert, die ausreichend lang sind, sodass der Flickereffekt die Basisfunktionen des Sehens und die Fahrleistung beeinträchtigen kann.

Die Einwirkungsdauern im vorliegenden Experiment orientierten sich an den typischen Längen von Schweizer Strassentunneln: die häufigsten Tunnel weisen eine Länge zwischen 2'000 und 5'000 m auf. Mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fährt man in 36 Sekunden durch einen Tunnel von 1 km Länge, mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in 45 Sekunden. Kürzere Einwirkungszeiten können in den Daten leicht abgeleitet und analysiert werden.

Um eine längere Einwirkungsdauer zu untersuchen wurden die 7 Versuchstunnel von den Probanden ein zweites Mal durchfahren.



**Abb.3** Verteilung der Tunnellängen in der Schweiz (ab 2000m)

### 3.1.2 Kognitive Belastung

Im vorliegenden Experiment wurden die Probanden während der «Primäraufgabe» (korrekte Tunnelfahrt) aufgefordert, die Distanz zum voranfahrenden Fahrzeug möglichst konstant zu halten.

## 3.2 Abhängige Variablen

Der Einfluss der Leuchtdichteverteilung wurde mit drei Gruppen von Variablen erfasst. Die Beurteilung der Sehbedingungen durch die Probanden bei der Durchfahrt jedes Tunnels wurde während des Experiments am Ende jedes Tunnels mit Hilfe einer Skala erhoben. Das allgemeine Wohlbefinden sowie physiologische Probleme (z. B. Müdigkeit) und neurologische Probleme (z. B. Unwohlsein, Kopfschmerzen) wurden am Schluss des Experiments in einem Interview erfasst.

Die Qualität des Fahrverhaltens wurde mit mehreren Massen erfasst, nämlich dem Einhalten der Spur (Distanz zur Spurmitte) und damit dem Abstand von Tunnelmitte und Tunnelwand, sowie den lateralen Beschleunigungen (quer zur Fahrtrichtung) und den longitudinalen Beschleunigungen (in Fahrtrichtung).

Während des gesamten Versuchs wurden okulomotorische Funktionen wie Augenbewegungen, Lidschläge, Pupillendurchmesser sowie weitere Messungen erhoben.

## 3.3 Versuchsaufbau

Die Probandenversuche wurden bei der Forschungsgruppe Human Factors Engineering der Professur für Verbraucherverhalten der ETH Zürich in einem selbstentwickelten Fahrsimulator durchgeführt. Der Fahrsimulator besteht aus einer mobilen Plattform mit 6 Bewegungsgraden (3 Richtungen und 3 Rotationen), einem Lenkrad, Gas- und Bremspedal, einer Visualisierungseinheit, bestehend aus 3 Bildschirmen und einem Datenhelm (head mounted display HMD), einem Blickbewegungsmessgerät (Pupil Labs GmbH, Deutschland), das im Datenhelm integriert ist, Lautsprechern, einem High-end PC, zwei High-end Grafikkarten und einem Kontrollpult (siehe Abbildung).



**Abb. 4** Bewegungsplattform des Fahrsimulators (links), Freiheitsgrade der Bewegungsplattform im Fahrsimulator (rechts oben), HMD (rechts unten)

Diese Versuchsanlage bot eine geeignete Umgebung für Experimente mit virtual reality (VR) und ermöglichte die Durchführung von realitätsnahen Versuchen, die in einem realen Strassentunnel im gegebenen Kostenrahmen nicht umsetzbar und mit Risiken im Strassenverkehr verbunden gewesen wäre. Die Simulation für die Versuchsperson erfolgte im HMD. Die Fahrt wurde ebenfalls auf einem der 3 Monitore des Fahrsimulators und auf Bildschirm des Versuchsleiters angezeigt.

In Analogie zu den Untersuchungen von Domenichini [12] wurde eine Fahrstrecke implementiert, die aus einer Abwechslung von Tunnelfahrten und Fahrten ausserhalb der Tunnels zusammengesetzt ist. Nach jeder Tunneldurchfahrt fährt der Proband eine weite Kurve auf offener Strecke, die in den nächsten Tunnel führt. Tunnel- und Aussenstrecken führen zwei Fahrstreifen mit Richtungsverkehr. Bis auf ein voranfahrendes Fahrzeug sind keine weiteren Verkehrsteilnehmer in der Simulation. Die Leuchtdichteunterschiede der Szenen innerhalb und ausserhalb des Tunnels sind gering, sodass keine Adaptationseffekte auftreten. Die Strecken ausserhalb des Tunnels dienten als Pause für die Versuchsperson. Die Einstellung der Flickerbeleuchtung im Inneren eines nachfolgenden Tunnels erfolgte sobald die Probanden den Vorgängertunnel verlassen hatten. Visualisiert wurde die Fahrstrecke im Datenhelm.

Damit die Probanden zum Halten der konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h nicht ständig auf den Tacho schauen mussten, fuhr als Hilfe ein graues Auto mit exakt dieser Geschwindigkeit auf der Strecke voran. Damit konnten sich die Probanden zum Halten der Geschwindigkeit auch am Abstand zu diesem Auto orientieren.



**Abb. 5** Proband auf dem Fahrsimulator (oben) und Sicht der Probanden während des Fahrens (unten). Das graue Auto ist im Bild unten in der Ferne sichtbar.

Das Hauptinteresse in diesem Projekt liegt auf der Einwirkung des Flickereffekts im Tunnelinnern auf das Autofahren. Deshalb wurden andere visuelle Effekte, wie Blendung oder Änderung des Lichtadaptationsniveaus nicht untersucht. Somit wurden im Simulator keine hohen Leuchtdichten erzeugt und die im HMD erzeugten Leuchtdichten (von der Grössenordnung  $100 \text{ cd/m}^2$ ) reichten aus. Zum Vergleich: Lichtreflexionen beim Strassenbelag haben eine Leuchtdichte von ca. 1 bis  $5 \text{ cd/m}^2$ .

Die Leuchtdichte der Bildschirme des im Versuch verwendeten HMDs (HTC Vive) wurde vor den Versuchen kalibriert. Dazu wurde die Leuchtdichte der Bildschirme in Abhängigkeit der Ansteuerung für elf gleichabständige Graustufen von 0 (Schwarz, RGB = 000000) bis 1 (Weiss, RGB = FFFFFFFF) ermittelt. Aus optischen Gründen wurde die Kalibration mit zwei verschiedenen Messanordnungen durchgeführt und die Resultate der beiden Messungen miteinander verglichen. Mit der ersten Messanordnung wurde die Leuchtdichte mit einem Gerät zur Messung der Adaptationsleuchtdichte (Gossen Panolux 20 mit Adaptationsleuchtdichteaufsatz) durchgeführt. Dabei wurde der Aufsatz des Geräts direkt auf die Linse des HMDs aufgesetzt. Bei der zweiten Methode wurde ein Diffusor (Edmund Optics, Opal diffuser, 26 mm Durchmesser, 42% Transmission) vor der Linse des HMDs montiert und mit einem Leuchtdichtemessgerät (LMT, 1008) in 90cm Entfernung die Leuchtdichte des Diffusors gemessen. Dank der Kalibration konnte der auf dem Armaturenbrett des Autos erzeugte Flicker in der Simulation so eingestellt werden, dass er mit dem Medianwert der durch die METAS in den 19 Tunneln gemessenen Werten übereinstimmte.

Auf die ursprünglich angedachten Zweitaufgaben, welche die Probanden während der Fahrt auszuführen hatten – beispielsweise das Öffnen eines Fensters oder das Bedienen der Ventilation – wurde verzichtet.

### 3.4 Messmethoden und Systeme

Im Experiment wurden messtechnische Einrichtungen und Geräte eingesetzt, die geprüft sind und für Versuche dieser Art typischerweise eingesetzt werden. Die eingesetzten Messmethoden und -systeme für die einzelnen Parameter entsprechen dem wissenschaftlichen Standard und sind in der folgenden Tabelle genauer umschrieben.

**Tab. 3** *Abhängige Variablen und entsprechende Messmethoden und -systeme*

Abhängige Variable	Messmethode / Messsystem
Okulomotorische Funktionen	Ein im HMD integriertes Gerät (Pupil Labs GmbH, Berlin, Deutschland) erfasst Blickbewegungen und Pupillendurchmesser mit einer Abtastrate von 60 Hz. Aus den Blickbewegungen werden Fixationen und deren zeitliche Verteilung innerhalb festgelegter Blickfeldzonen bestimmen. Dabei sind drei Blickfeldzonen von Interesse: das Armaturenbrett, die Windschutzscheibe (Blick nach Aussen) und der Rest des Blickfeldes. Für diese Blickfeldzonen werden auch Mittelwerte der Fixationsdauern bestimmt. Aus den Daten über den Pupillendurchmesser wurden für jeden Tunnel separat Mittelwerte über die erste und die zweite Hälfte der Tunnelfahrt und über die nachfolgende Fahrt ausserhalb des Tunnels berechnet. Für die drei Streckenabschnitte wurden auch Mittelwerte der Lidschlussraten (Blinks) ermittelt.
Fahrverhalten	Die Position des Fahrzeugs in der virtuellen Welt wird kontinuierlich erfasst, um daraus folgende Mittelwerte und Varianzen zu berechnen, die für das Fahrverhalten von Bedeutung sind: Abstand zur Fahrbahnmitte, Abstand zum voranfahrenden Fahrzeug, laterale und longitudinale Beschleunigung. Ebenso wurden Mittelwerte und Varianzen der Geschwindigkeiten in den Tunneln und den darauffolgenden Strecken ausserhalb der Tunnel berechnet.
Subjektives Empfinden	Nach jeder Tunneldurchfahrt wurden die Versuchspersonen gebeten, den im Tunnel erlebten visuellen Komfort zu bewerten. Dazu wurde eine Skala verwendet, die aus den folgenden fünf Stufen bestand: „sehr unangenehm“ (Skalenwert -2), „unangenehm“ (-1), neutral (0), angenehm (+1), sehr angenehm (+2).

### 3.5 Versuchspersonen

Es nahmen 36 Probanden am Experiment teil, wobei die Stichprobengrösse mittels Teststärkenanalyse bestimmt worden war. Die Probanden wurden aus zwei Altersgruppen rekrutiert, mit 18 Probanden in der Altersgruppe 18-39 Jahre und 18 Probanden in der Altersgruppe 40-65 Jahre.

Die Probanden wurden durch Anzeigen und durch persönliche Kontakte durch die ETH rekrutiert. Alle Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme am Experiment mit einem Betrag entschädigt. Personen, die unter photosensitiver Epilepsie leiden oder bei denen ein grosses Risiko besteht, dass ihnen bei der Simulation übel wird, wurden von den Versuchen ausgeschlossen.



## 4 Durchführung Experiment

Die Versuche wurden anhand eines vorgängig erstellten, von der Begleitkommission genehmigten Versuchskonzeptes umgesetzt. Die Versuche fanden mit 36 Probanden in den Monaten August und September 2021 statt.

### 4.1 Vorversuche

Zur endgültigen Bestimmung der Versuchsvariablen sowie des Versuchsablaufes waren Vorversuche unabdingbar.

### 4.2 Ethik-Gesuch

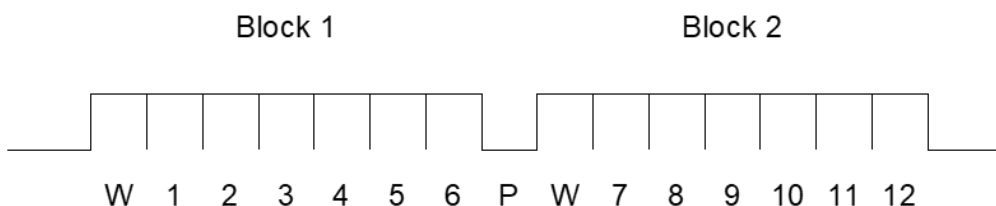
Die Versuche wurden unter Beachtung des Schutzes und der Sicherheit der Probanden durchgeführt und berücksichtigten die üblichen Richtlinien der Ethik sowie die Hygienemassnahmen der ETH zum Schutz vor einer Übertragung von COVID-19. Das für die Versuche bei der Ethikkommission der ETH Zürich eingereichte Gesuch wurde mit der Nummer EK-2020-N-166 bewilligt.

### 4.3 Zeitlicher Ablauf des Experiments

Zu Beginn des Experiments beantworteten die Probanden mehrere Fragebogen, um sowohl ihre Tendenz zur Immersion in virtuelle Umgebungen als auch ihre Tendenz zu «motion sickness» zu etablieren. Die Probanden wurden darauf hingewiesen, dass sie das Experiment zu jeder Zeit abbrechen konnten, wenn sie sich nicht wohlfühlten.

Anschliessend wurden die Probanden zum Experiment folgendermassen instruiert: «In dieser Studie geht es um die Beleuchtung in Strassentunneln. Sie werden mit einem Fahrsimulator durch mehrere Tunnel fahren. Sie fahren zuerst durch sieben Tunnel mit freien Strecken dazwischen. Dann gibt es eine Pause und danach folgen weitere sieben Tunnel. Der Fahrsimulator lässt sich wie ein Automat fahren, das heisst Sie haben ein Pedal für das Gas und eines für die Bremse. Es ist wichtig, dass Sie im Tunnel mit 100 km/h fahren. Auf den freien Zwischenstrecken können Sie das Tempo selbst wählen. Um die 100 km/h einzuhalten, müssen Sie sich nach dem Tacho richten».

Dann absolvierte jeder Proband zwei Versuchsblöcke (siehe Abbildung 6). Zu Beginn jedes Blocks wurde die Augenregistrieranlage kalibriert und dann fuhren die Probanden durch 7 Tunnel, wobei der erste Tunnel homogen beleuchtet war und als Warmup-Versuch (W) von der statistischen Analyse ausgeschlossen wurde. In den übrigen 6 Tunneln wurde die Leuchtdichteverteilung so variiert, dass die projizierten Streifenmuster bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h eine zeitliche Frequenz von 0 Hz (= homogene Beleuchtung), 2.5 Hz, 6 Hz, 12 Hz, 16 Hz, und 20 Hz erzeugten. Die 6 Tunnel wurden jeweils in zufälliger Reihenfolge durchfahren. Die Fahrt durch einen Tunnel dauerte bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h ungefähr 36 Sekunden. Zwischen den Tunneln fuhren die Probanden ungefähr 32 Sekunden im Freien, durch eine Kurve bis zum nächsten Tunneleingang. Die Probanden machten zwischen den beiden Blöcken eine kurze Pause (Median 6.5 Minuten inklusive Zeit für die Kalibrierung der Augenregistrieranlage).



**Abb. 6** Schematischer Ablauf des Experiments. *W* = Warmup-Segment, *P* = Pause; die Zahlen stehen für die Versuchs-Segmente mit den Beleuchtungsfrequenzen 0, 2.5, 6, 12, 16 und 20 Hz, die in zufälliger Reihenfolge präsentiert wurden.

Am Ende des Experiments beantworteten die Probanden wiederum den «motion sickness» Fragebogen, einen Fragebogen, der ihre Präsenz im Experiment evaluierte und einen Fragebogen mit offenen Fragen zum Experiment (siehe weiter unten). Anschliessend wurden die Probanden verdankt, bezahlt und verabschiedet.

## 5 Resultate

### 5.1 Datenanalyse

#### 5.1.1 Analyse der Geschwindigkeit

Damit die Probanden bei der Durchfahrt der Tunnel tatsächlich den zu untersuchenden Flickerfrequenzen von 2.5 Hz bis 20 Hz ausgesetzt waren, mussten sie mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fahren, die sie mit Hilfe des digitalen Tachometers und des Abstandes zum voranfahrenden Auto kontrollieren konnten. Die Analyse der Geschwindigkeitsprofile zeigte, dass die geforderte Geschwindigkeit mit einem Fehler von weniger als 0.5% eingehalten wurde und dass die Frequenz der Tunnelbeleuchtung keinen Einfluss auf diesen Fehler hatte.

#### 5.1.2 Statistische Analysen

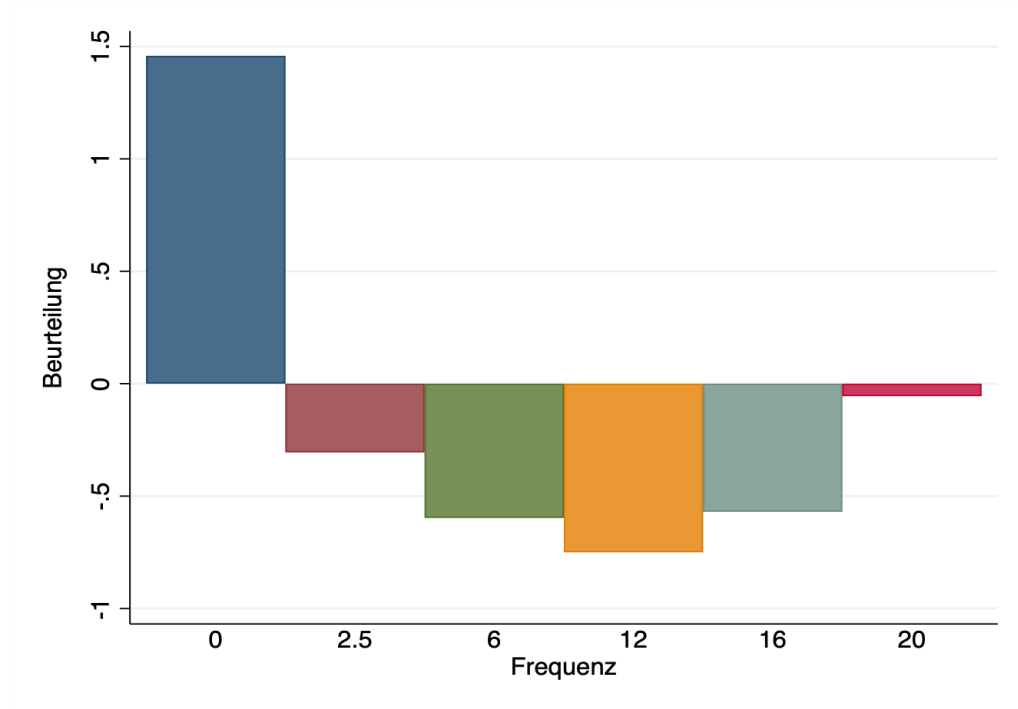
In den folgenden Abschnitten werden die statistischen Analysen der Resultate präsentiert und am Schluss jedes Abschnitts in einer verständlichen Art zusammengefasst. Die Resultate der Beurteilung der Sehbedingungen und des Fahrverhaltens wurden mit gemischten Varianzanalysen mit dem Faktor Altersgruppe (18 – 39 und 40 – 65) und den Faktoren Block (erster Block und zweiter Block) und Beleuchtungsfrequenz (0 Hz, 2.5 Hz, 6 Hz, 12 Hz, 16 Hz, 20 Hz) als Faktoren mit wiederholter Messung analysiert. Wenn nötig, wurde die Huynh-Feldt-Korrektur der Freiheitsgrade (ein in der Statistik übliches Verfahren) angewandt.

Die Stufen von signifikanten Faktoren wurden paarweise mit dem LSD («Least significant differences») Test verglichen. Zusätzlich wurde die homogene Bedingung (0 Hz) mit dem Durchschnitt der anderen Bedingungen (2.5 Hz, 6 Hz, 12 Hz, 16 Hz, 20 Hz) verglichen, um den Gesamteffekt der Flickerbedingungen zu evaluieren.

Jeder Abschnitt einer Analyse wird am Schluss in allgemein verständlicher Form zusammengefasst.

### 5.2 Beurteilung der Sehbedingungen in den Tunneln durch die Probanden

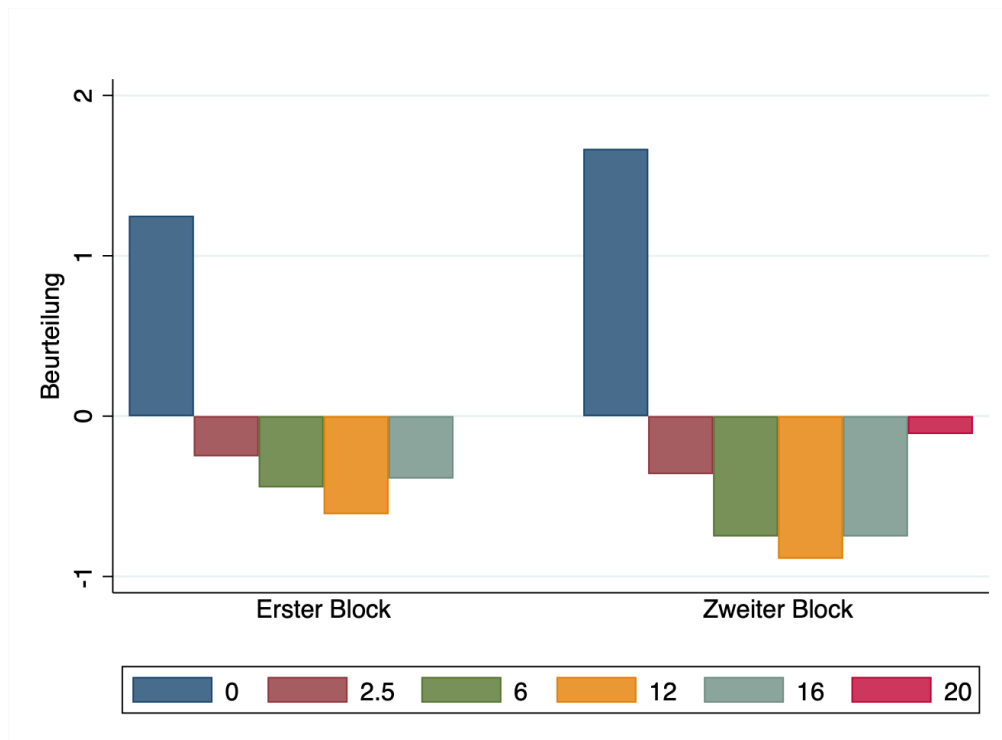
Nach jeder Fahrt durch einen Tunnel mussten die Probanden angeben, wie angenehm bzw. unangenehm die Fahrt für ihre Augen war. Dazu gaben sie ein Urteil mit einer Zahl auf einer Skala von -2 bis +2 an. -2 bedeutete, dass die Sehbedingungen sehr unangenehm waren, -1 bedeutete unangenehm, 0 war neutral, +1 bedeutete angenehm und +2 sehr angenehm. Die Resultate (der Durchschnitt aller Probanden beider Altersgruppen, für beide Blöcke) in Abhängigkeit von der Beleuchtungsfrequenz sind in der folgenden Abbildung präsentiert.



**Abb.7** Einfluss der Beleuchtungsfrequenz auf die Beurteilung der Sehbedingungen

Die Varianzanalyse der Beurteilungen zeigt einen hochsignifikanten Einfluss der Flimmerfrequenz (Huynh-Feldt:  $F(3.10, 105.24)=37.74$ ,  $p<0.001$ ) und weitere Tests zeigen, dass die Beurteilung der homogenen Beleuchtung von der Beurteilung des Durchschnitts aller Flicker-Bedingungen signifikant abweicht ( $F(1,170)=472.8$ ,  $p<0.001$ ). In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die homogen beleuchteten Tunnel (0 Hz) mit durchschnittlich 1.46, also zwischen angenehm und sehr angenehm beurteilt wurden, während alle Tunnel zwischen -0.75 und -0.06 als eher unangenehm empfunden wurden. Die paarweisen Vergleiche zeigen signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Bedingungen 0 Hz versus alle anderen Bedingungen (alle  $p < 0.001$ ), 2.5 Hz versus 6 Hz, 2.5 Hz versus 12 Hz, 6 Hz versus 20 Hz (alle  $p < 0.05$ ), 12 Hz versus 20 Hz, 16 Hz versus 20 Hz (alle  $p < 0.001$ ). Der Tunnel mit einer Beleuchtungsfrequenz von 12 Hz wurde als der unangenehmste beurteilt, während der Tunnel mit einer Beleuchtungsfrequenz von 20 Hz als nahezu neutral beurteilt wurde.

Die beiden Altersgruppen unterscheiden sich nicht in der Beurteilung der Beleuchtung, aber die Interaktion von Block und Frequenz zeigt einen statistisch gesicherten Einfluss (Huynh-Feldt:  $F(4.97,168.81)= 3.14$ ,  $p = 0.01$ ). Die Beurteilung der Flicker-Bedingungen ist im zweiten Block noch negativer als im ersten Block (vgl. Abbildung 8), während die homogene Beleuchtung im zweiten Block positiver als im ersten Block beurteilt wird. Dies deutet darauf hin, dass die verstärkt negative Beurteilung der Flicker-Bedingungen im zweiten Block nicht auf eine Ermüdung der Probanden zurückgeführt werden kann.

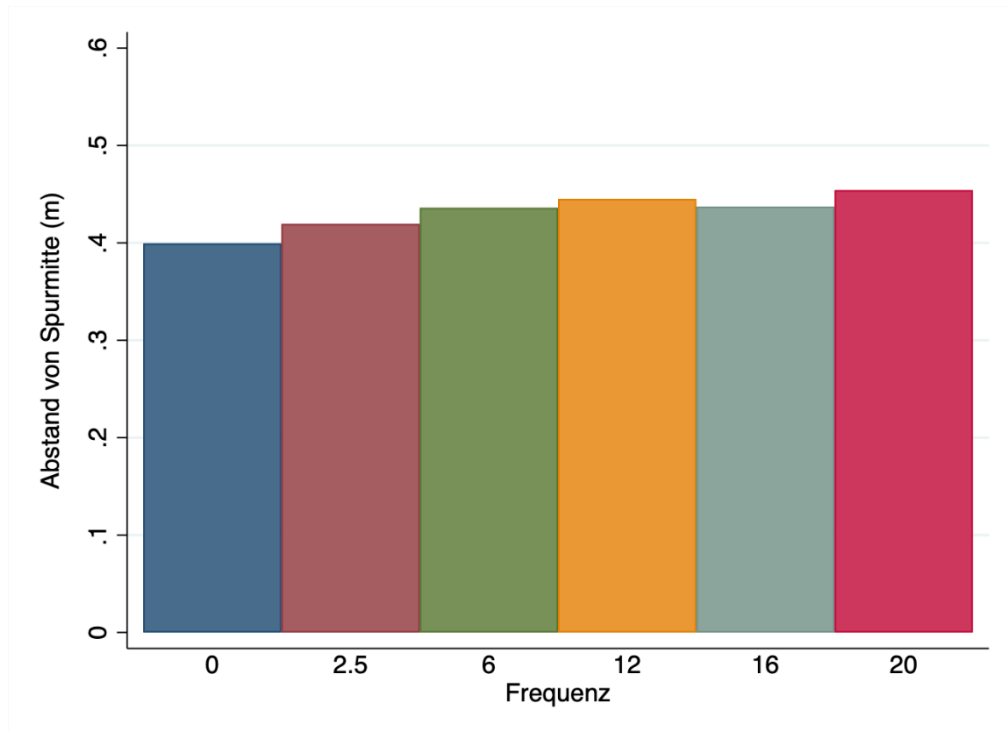


**Abb.8** Einfluss von Block und Beleuchtungsfrequenz auf die Beurteilung der Sehbedingungen

**Zusammenfassung:** Die Resultate zeigen, dass die Frequenz der Tunnelbeleuchtung einen sehr starken Einfluss auf die Beurteilung der Sehbedingungen im Tunnel hat. Tunnel mit homogener Beleuchtung wurden zwischen angenehm und sehr angenehm beurteilt, während die Tunnel mit Flicker-Beleuchtung als eher unangenehm empfunden wurden. Der Tunnel mit einer Beleuchtungsfrequenz von 12 Hz (in der Mitte des «Vermeidungsbereichs» in der Schweiz) wurde am unangenehmsten beurteilt. Bei den wiederholten Durchfahrten im zweiten Block waren diese Beurteilungen noch stärker ausgeprägt, d. h. der homogen beleuchtete Tunnel wurde als noch angenehmer und die Flicker-Tunnel als noch unangenehmer beurteilt. Dies deutet darauf hin, dass bei längeren Fahrten durch Tunnel mit Flicker die Sehbedingungen immer negativer empfunden werden.

### 5.3 Fahrverhalten – Abweichung von der Spurmitte

Eine Varianzanalyse der Resultate zeigt einen signifikanten Effekt der Beleuchtungsfrequenz auf den durchschnittlichen (absoluten) Abstand von der Spurmitte (Huynh-Feldt:  $F(4.52, 153.82) = 2.37$ ,  $p < 0.05$ ). Wie die folgende Abbildung zeigt, tendieren die Abweichungen von der Spurmitte mit der Flickerfrequenz anzusteigen.



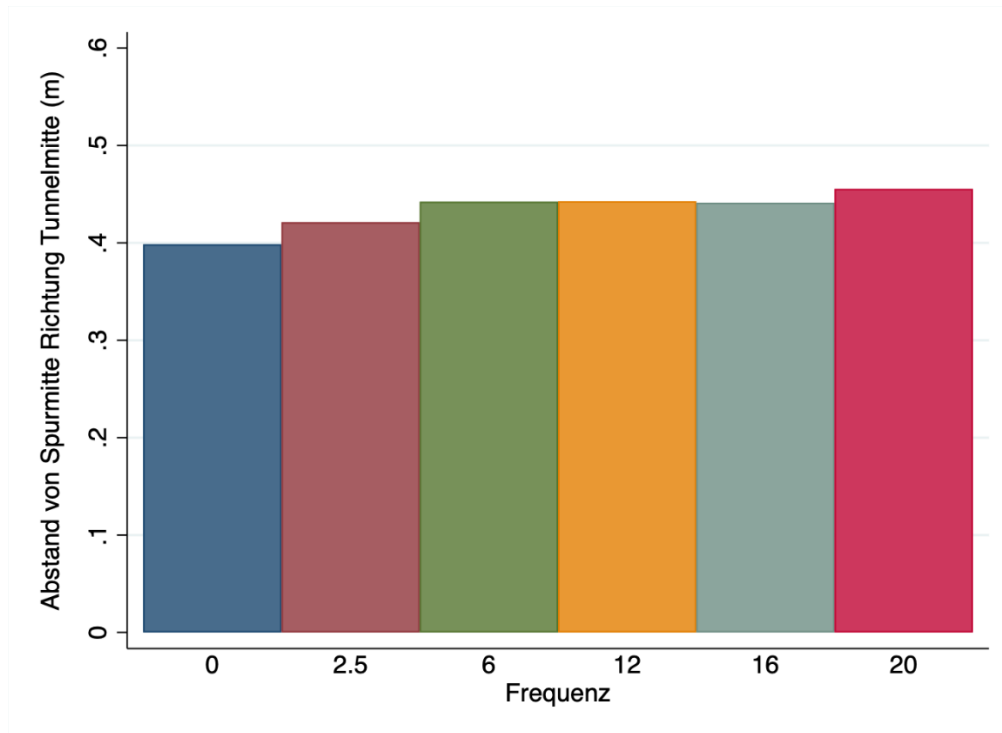
**Abb.9** Einfluss der Beleuchtungsfrequenz auf den (absoluten) Abstand von der Spurmitte

Paarweise Vergleiche der Frequenzen zeigen, dass die Differenz zwischen der homogenen Beleuchtung und den Flickerbedingungen 12 Hz und 20 Hz (beide  $p < 0.05$ ) signifikant ist und dass der Kontrast zwischen der homogenen Beleuchtung und dem Durchschnitt der Flickerbedingungen hoch signifikant ist ( $F(1,170) = 7.05$ ,  $p < 0.01$ ). Weder Block noch Altersgruppe haben einen signifikanten Einfluss auf die Abweichung von der Spurmitte.

**Zusammenfassung:** In der Beurteilung der Sehbedingungen zeigt die Flickerbedingung 12 Hz den grössten Unterschied zu der homogenen Beleuchtung. Bei der Abweichung von der Spurmitte hingegen ist der Unterschied zwischen der homogenen Beleuchtung und der höchsten Frequenz (20 Hz) am grössten. Mit anderen Worten, es zeigen sich Unterschiede zwischen der subjektiven Beurteilung der Sehbedingungen und dem objektiven Fahrverhalten in ihrer Frequenzabhängigkeit.

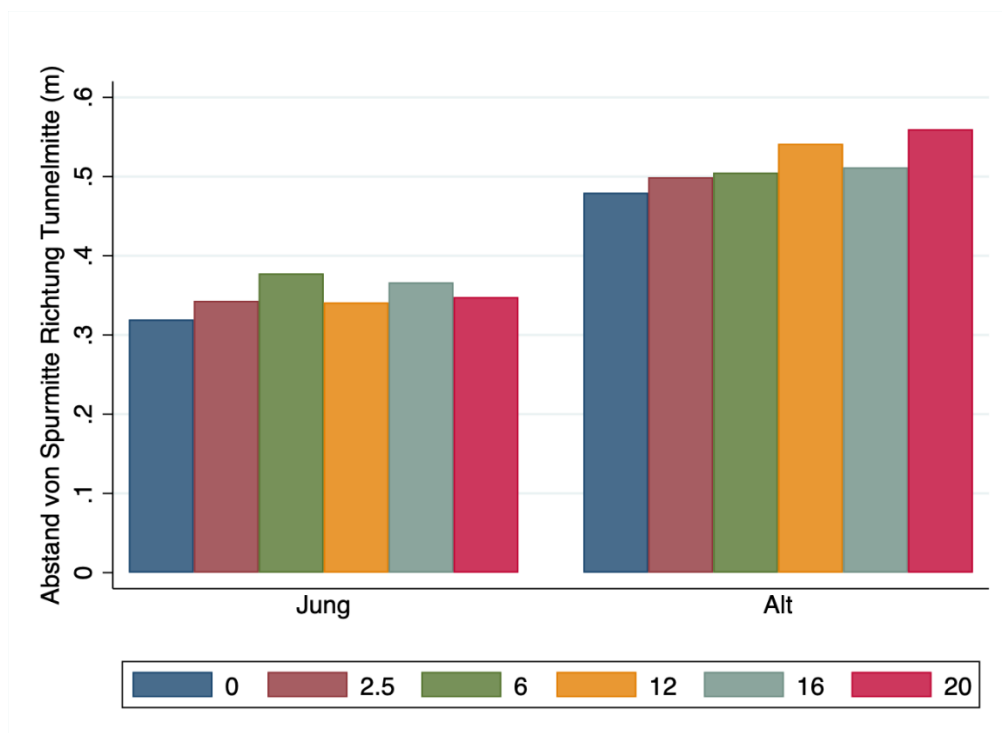
## 5.4 Fahrverhalten – Abweichung Richtung Tunnelmitte

Wird geprüft, in welche Richtung von der Spurmitte abgewichen wird, so stellt man fest, dass ein grosser Teil der Abweichungen (78.2%) Richtung Tunnelmitte erfolgt. Eine Varianzanalyse der Abweichungen Richtung Tunnelmitte zeigt einen signifikanten Einfluss der Beleuchtungsfrequenz (Huynh-Feldt:  $F(4.54,163.40) = 4.24$ ,  $p < 0.01$ ). Die folgende Abbildung zeigt, dass umso stärker Richtung Tunnelmitte gefahren wird, je höher die Flimmerfrequenz ist, d. h. bei einer Flimmerfrequenz von 20 Hz ist die Abweichung Richtung Tunnelmitte am grössten. Der paarweise Vergleich der Bedingungen zeigt die folgenden signifikanten Unterschiede: 0 Hz versus 6 Hz, 0 Hz versus 12 Hz, 0 Hz versus 16 Hz (alle  $p < 0.05$ ), 0 Hz versus 20 Hz ( $p < 0.001$ ) und 2.5 Hz versus 20 Hz ( $p < 0.01$ ).



**Abb.10** Einfluss der Beleuchtungsfrequenz auf den Abstand von der Spurmitte Richtung Tunnelmitte

Im Weiteren zeigt sich auch ein signifikanter Einfluss der Altersgruppen ( $F(1,36) = 4.44$ ,  $p < 0.05$ ). Während die Abweichung Richtung Tunnelmitte im Durchschnitt bei den jungen Probanden ungefähr 0.35 m beträgt, ist sie bei den älteren ungefähr 0.52 m, d. h. die Jungen fahren genauer in der Spurmitte als die Älteren (siehe folgende Abbildung).



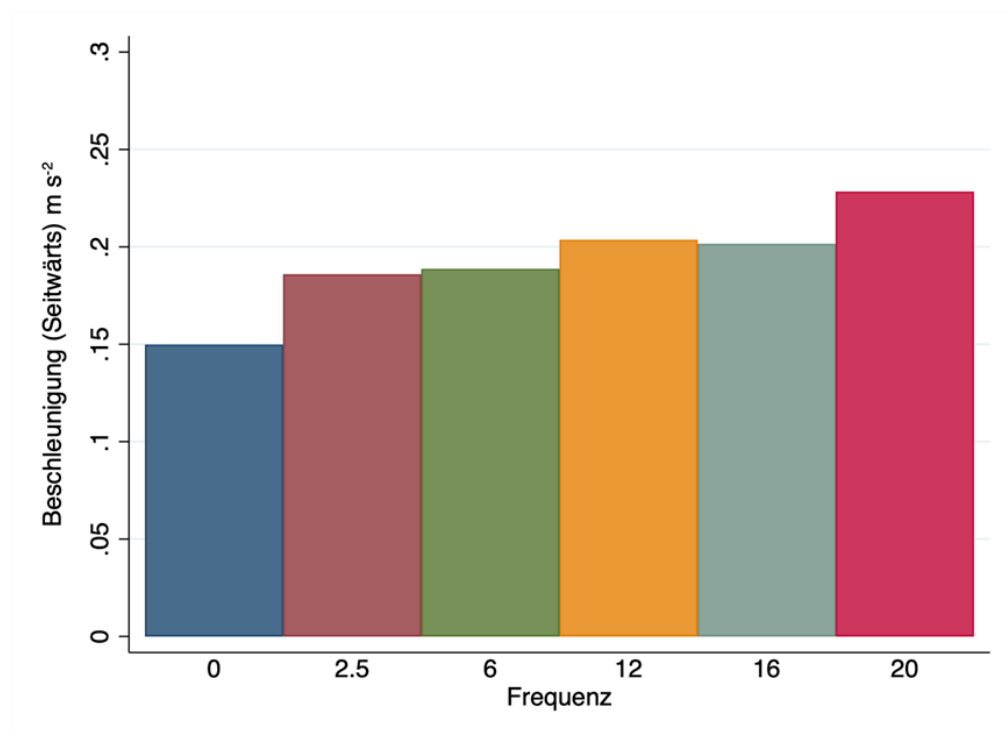
**Abb.11** Einfluss von Alter und Beleuchtungsfrequenz auf den Abstand von der Spurmitte Richtung Tunnelmitte

**Zusammenfassung:** Die Analyse der Abweichungen von der Spurmitte zeigt, dass ein grosser Teil der Abweichungen Richtung Tunnelmitte erfolgt, d. h. die Probanden haben die Tendenz weg von der Tunnelwand näher zur Tunnelmitte zu fahren. Werden nur die Abweichungen Richtung Tunnelmitte analysiert, dann zeigt sich die Frequenzabhängigkeit der Abweichungen noch etwas pointierter. Je grösser die Beleuchtungsfrequenz, umso mehr wird von der Spurmitte Richtung Tunnelmitte ausgewichen (vgl. Abbildung 10). Im Weiteren zeigt sich auch ein Alterseffekt im Sinne, dass die älteren Probanden viel stärker Richtung Tunnelmitte gefahren sind als die jungen Probanden (vgl. obige Abbildung).

## 5.5 Fahrverhalten – Beschleunigung seitwärts

Die Analyse der Beschleunigungen des Fahrzeugs, sowohl der lateralen Beschleunigung (orthogonal zur Fahrtrichtung) als auch der longitudinalen Beschleunigung (parallel zur Fahrtrichtung) zeigt, dass sie signifikant von der Beleuchtungsfrequenz beeinflusst werden.

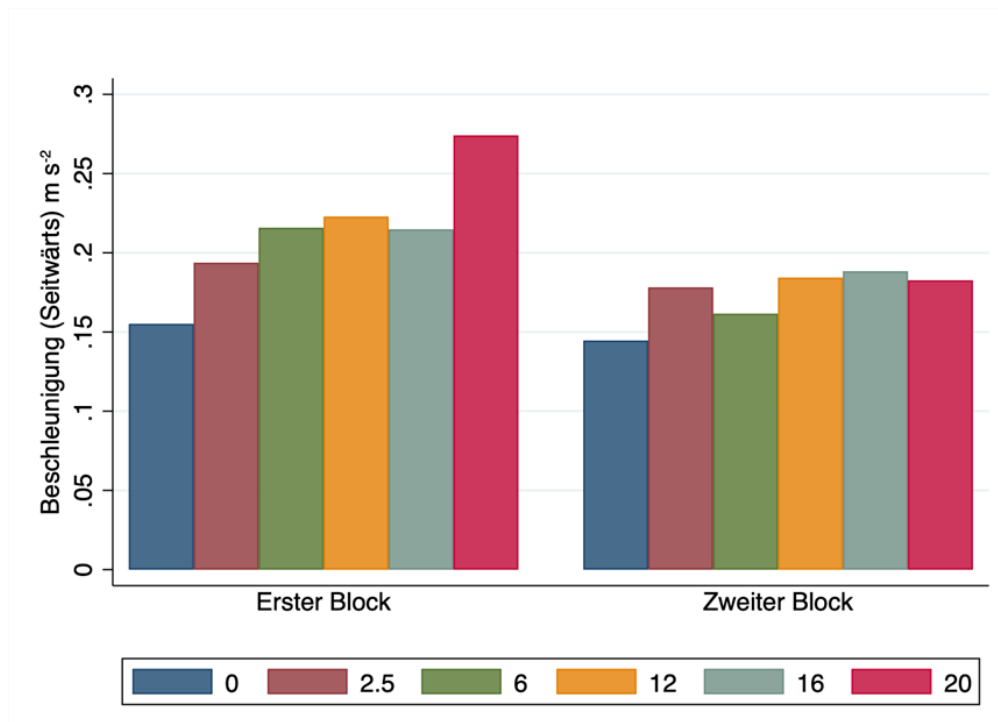
In der Analyse der lateralen Beschleunigungen wurden für jeden Tunnel die durchschnittlichen absoluten Beschleunigungen orthogonal zur Fahrtrichtung berechnet. Es zeigt sich, dass die Beleuchtungsfrequenz einen signifikanten Einfluss auf die lateralen Beschleunigungen hatte (Huynh-Feldt:  $F(1,47,49.96) = 4.62, p < 0.05$ ). Eine detaillierte Analyse (vgl. folgende Abbildung) zeigt, dass die durchschnittlichen Seitwärts-Beschleunigungen mit der Beleuchtungsfrequenz ansteigen und dass für die Beleuchtungsfrequenz von 20 Hz die seitlichen Beschleunigungen am höchsten sind. Paarweise Vergleiche zwischen den Bedingungen zeigen folgende signifikante Unterschiede: 0 Hz versus 2.5 Hz, 0 Hz versus 6 Hz, 0 Hz versus 12 Hz, 0 Hz versus 16 Hz (alle  $p < 0.001$ ), 0 Hz versus 20 Hz und 2.5 Hz versus 16 Hz (beide  $p < 0.05$ ). Ein Vergleich der homogenen Bedingung (0 Hz) mit den anderen Bedingungen zeigt einen hochsignifikanten Unterschied zwischen 0 Hz und dem Durchschnitt der anderen Bedingungen ( $F(1,170) = 17.07, p < 0.001$ ).



**Abb.12** Einfluss der Beleuchtungsfrequenz auf die Beschleunigung seitwärts

Im Weiteren zeigt sich kein Einfluss der Altersgruppen, aber ein Einfluss von Block ( $F(1,34) = 6.59, p < 0.05$ ). Im zweiten Block sind die Seitwärts-Beschleunigungen gegenüber dem ersten Block reduziert (vgl. folgende Abbildung).





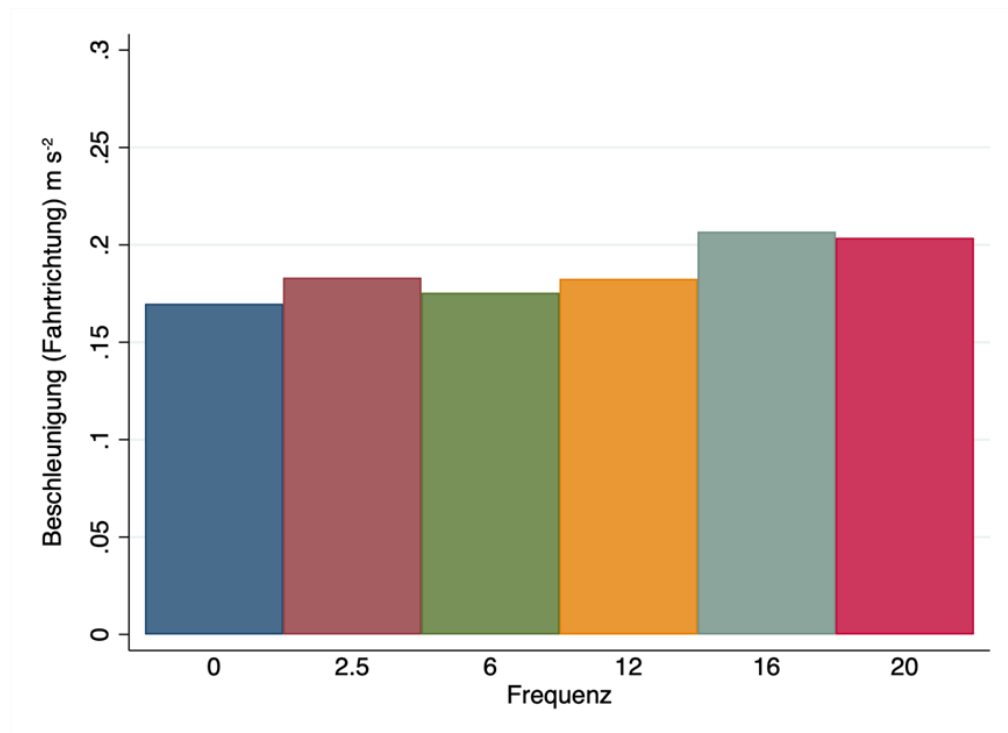
**Abb.13** Einfluss von Block und Beleuchtungsfrequenz auf die Beschleunigung seitwärts

**Zusammenfassung:** Die Analyse der lateralen Beschleunigungen (orthogonal zur Fahrtrichtung) zeigt, dass sie von der Beleuchtungsfrequenz signifikant beeinflusst werden im Sinne, dass die durchschnittlichen Seitwärtsbeschleunigungen mit der Beleuchtungsfrequenz ansteigen und für die höchste Frequenz von 20 Hz am grössten sind. Dieses Resultat stimmt überein mit der Abweichung von der Spurmitte als Funktion der Beleuchtungsfrequenz. Je grösser die Abweichung von der Spurmitte ist, umso beschleunigter wird diese korrigiert.

Im Weiteren zeigt sich, dass die Beschleunigungen im zweiten Block gegenüber dem ersten Block reduziert sind. Daraus kann geschlossen werden, dass die Probanden rasch lernen, die seitlichen Beschleunigungen zu reduzieren und unter Kontrolle zu bringen.

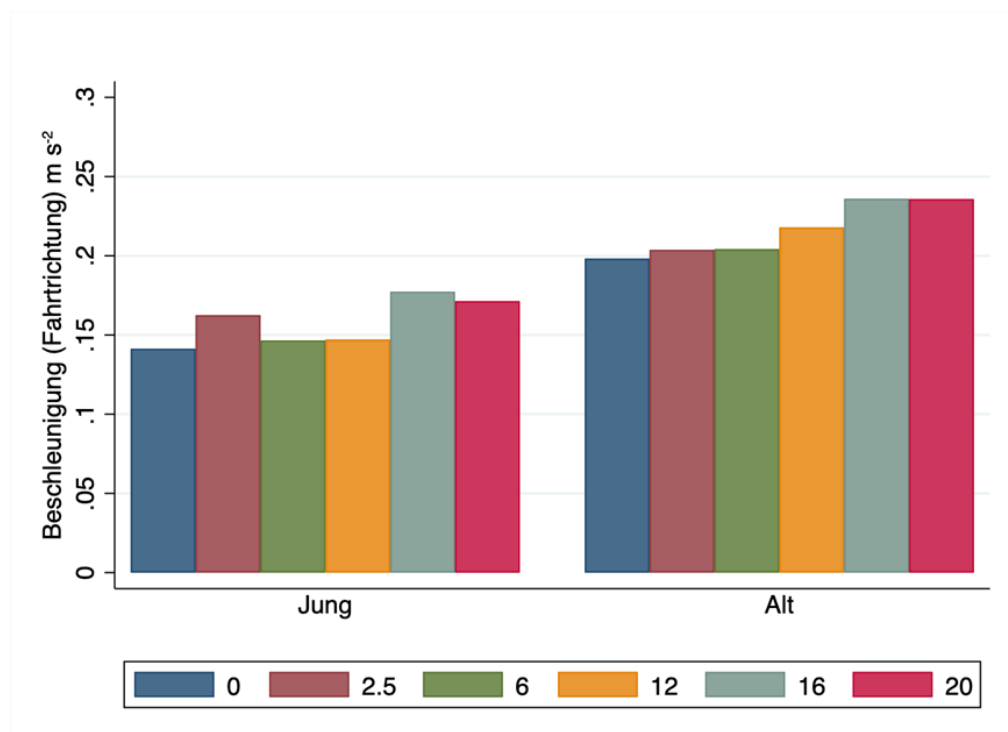
## 5.6 Fahrverhalten – Beschleunigung in Fahrtrichtung

Die Analyse der durch Gas-Geben und Bremsen erzeugten longitudinalen Beschleunigungen zeigt ebenfalls einen signifikanten Einfluss der Beleuchtungsfrequenz (Huynh-Feldt  $F(4.24, 144.31) = 3.01, p < 0.05$ ). Je höher die Beleuchtungsfrequenz, umso höher sind die durchschnittlichen (absoluten) Beschleunigungen in der Fahrtrichtung (vgl. Abbildung 14). Die paarweisen Vergleiche zwischen den Bedingungen zeigen, dass die folgenden Unterschiede statistisch signifikant sind: 0 Hz versus 16 Hz, 0 Hz versus 20 Hz (beide  $p < 0.01$ ), 6 Hz versus 16 Hz, 6 Hz versus 20 Hz (beide  $p < 0.05$ ). Ein Vergleich der homogenen Beleuchtung mit dem Durchschnitt der anderen Bedingungen zeigt, dass die longitudinalen Beschleunigungen in den Flickerbedingungen signifikant höher als in der homogenen Bedingung sind ( $F(1,170) = 5.21, p < 0.05$ ).



**Abb.14** Einfluss der Beleuchtungsfrequenz auf die Beschleunigungen in Fahrtrichtung

Zusätzlich zeigt sich auch ein signifikanter Einfluss der Altersgruppe ( $F(1,34) = 5.79, p < 0.05$ ). Die absoluten longitudinalen Beschleunigungen sind bei den älteren Probanden höher als bei den jüngeren Probanden (vgl. folgende Abbildung).



**Abb.15** Einfluss von Alter und Beleuchtungsfrequenz auf die Beschleunigungen in Fahrtrichtung

**Zusammenfassung:** Die longitudinalen Beschleunigungen (in Fahrtrichtung) zeigen ähnliche Resultate wie die lateralen Beschleunigungen (quer zur Fahrtrichtung). Je höher die Beleuchtungsfrequenz, umso höher sind die Beschleunigungen. Zusätzlich zeigt sich auch ein Alters-Effekt: Die longitudinalen Beschleunigungen sind bei den älteren Probanden grösser als bei den jüngeren, d. h. die älteren Probanden scheinen ruckartiger zu fahren

## 5.7 Okulomotorisches Verhalten

Zusätzlich zum Fahrverhalten wurde auch das okulomotorische Verhalten der Probanden registriert und analysiert. Dazu wurden die folgenden Verhaltensparameter aufgezeichnet und analysiert:

Der Pupillendurchmesser variiert primär mit der Dunkeladaptation und ist ungefähr 7 mm unter dämmrigen Bedingungen und ungefähr 3 mm unter hellen Bedingungen. Für diese Studie ist von Wichtigkeit, dass der Pupillendurchmesser bei mentaler Belastung etwas ansteigt. Es kann daher erwartet werden, dass störende Flickerbedingungen in der Tunnelbeleuchtung sich im Pupillendurchmesser zeigen. Weitere Faktoren wie Ermüdung, emotionale Erregung, Alter oder Drogen sind in diesem Zusammenhang weniger wichtig.

Die Lidschläge, genauer gesagt die Frequenz der Lidschläge wird durch eine grosse Anzahl von Faktoren beeinflusst, einschliesslich der mentalen Belastung und des Alters. Wiederum kann erwartet werden, dass störende Flickerbedingungen in der Tunnelbeleuchtung sich in der Lidschlagfrequenz manifestieren.

Die Dauer von Fixationen wird ebenfalls von mehreren Faktoren beeinflusst, die für die vorliegende Studie von potenzieller Wichtigkeit sind, nämlich von der Intensität der kognitiven Verarbeitung, von Stress, aber auch von neurologischen Problemen.

Die Verteilung von Fixationen in verschiedenen Regionen kann Aufschluss über die visuelle Selektion und Verarbeitung geben. Dazu wurden die Fixationen in 5 Regionen unterteilt, nämlich Armaturenbrett, Strasse, Tunnelwände, Tunneldecke sowie unbekannt. Es ist plausibel, dass die verschiedenen Flickerbedingungen sich in unterschiedlichen Fixationshäufigkeiten in diesen Regionen zeigen.

Verwandt mit der Verteilung von Fixationen in verschiedenen Regionen ist die Distanz von fixierten Positionen, die z.B. für Fixationen des Armaturenbretts am kleinsten ist (ca. 0.5 m), während sie für Tunnelboden, -wände und -decke viel grösser ist.

**Zusammenfassend** kann das okulomotorische Verhalten interessante Aufschlüsse über die visuelle Verarbeitung beim Durchfahren von Strassentunneln geben. Eine detaillierte Analyse der Daten zeigte allerdings, dass die verschiedenen Verhaltensparameter vom verwendeten System nur sehr unzuverlässig erfasst wurden und eine Verwendung von Pupillendurchmesser, Lidschlägen, Verteilung von Fixationen und Distanz von fixierten Positionen dadurch nicht möglich war. Die einzige anscheinend zuverlässige Informationsquelle waren die Fixationsdauern, sie blieben jedoch von Beleuchtungsfrequenz, Alter und Block unbeeinflusst.

## 5.8 Fragebogen

Am Schluss des Experimentes wurden die Probanden zu mehreren Aspekten der Untersuchung befragt. Die Fragen waren offen, d. h. die Probanden konnten die Fragen frei beantworten. Mit den Antworten wurde eine Inhaltsanalyse durchgeführt, die zu den folgenden Resultaten führte.

**«Wie haben Sie die Fahrt durch die Tunnel empfunden?»**

Die meisten Aussagen beziehen sich auf die Anordnung der Leuchten (10 Aussagen). Davon werden in fünf Aussagen punktweise angebrachte Leuchten, die Flicker erzeugen, als unkomfortabel, störend, irritierend und in einer Aussage als schwindelerzeugend empfunden im Unterschied zu einer homogenen Beleuchtung. In einer Aussage werden einige Leuchten als angenehm bezeichnet. In den restlichen Aussagen zu den Leuchten wird einfach festgehalten, dass sie verschieden waren. Die Beleuchtung wird in drei Aussagen als zu hell bezeichnet.

Das Einhalten der Geschwindigkeit wird in drei Aussagen als schwierig bezeichnet, Der Fahrkomfort wird positiv wahrgenommen (6 Aussagen).

Die Tunnel werden als künstlich und ein wenig zu eng wahrgenommen (4 Aussagen). In einer Aussage wird das geringe Verkehrsaufkommen thematisiert.

Die restlichen Aussagen (5 Aussagen) sind unspezifisch und reichen von unauffällig bis zu erstaunlich und sehr realistisch.

**«Ist Ihnen bezüglich Beleuchtung im Tunnel etwas aufgefallen?»**

Die Beleuchtung in den Tunneln wird als sehr hell empfunden (4 Aussagen) und unterschiedlich (1 Aussage). Die Lichtfarbe könnte verbessert werden. Selbst die homogene Beleuchtung stört (1 Aussage).

Sieben Probanden haben bemerkt, dass die Distanz zwischen den Leuchten variiert: Sechs Probanden stellen einfach fest, dass die Beleuchtung variiert, während ein Proband bemerkte, dass das zu verschiedenen Mustern an den Wänden führt. Drei Probanden haben nichts bemerkt.

In elf Aussagen wird Bezug auf den Flicker genommen. Sieben Probanden empfinden den Flicker als störend und bevorzugen homogene Beleuchtung. Bezüglich Flickerfrequenz sind sich die Probanden nicht einig. Drei Probanden empfinden tiefe Frequenzen als störend, zwei hohe Frequenzen. Ein Proband erwähnt Flicker im Auto.

**«Hatten Sie Probleme beim Sehen wie z.B. Brennen in den Augen?»**

Die meisten Probanden (29 Antworten) geben an, dass sie keine Probleme mit den Augen hatten.

In zwei Aussagen wird auf die Flickerfrequenz Bezug genommen. Flicker wirkt störender auf das Sehen und die Konzentration als homogene Beleuchtung. Hohe Flickerfrequenz und Helligkeit führen zum Blinzeln. Ermüdung der Augen (2 Aussagen) und unscharfes Sehen im peripheren Gesichtsfeld (1 Aussage) werden erwähnt.

**«Bekamen Sie Kopfschmerzen?»**

30 Probanden verneinen die Frage. 4 Probanden haben leichte Kopfschmerzen bekommen, davon eine durch den Druck des Helms. 1 Proband antwortet mit ja.

### «Wurde Ihnen schwindlig?»

24 Probanden verneinen die Frage. Sechs Probanden erwähnen leichten Schwindel, zwei davon am Ende des Experiments und ein Proband in den Kurven. Fünf Probanden bejahen die Frage, davon zwei beim Bremsen, einer in den Kurven und einer nach jeder Tunneldurchfahrt.

## 5.9 Diskussion der Resultate des Experimentes

In der vorliegenden Studie ging es hauptsächlich darum, mit experimentellen Methoden zu untersuchen, welche Flickerfrequenzen, die in Tunneln durch die Beleuchtung erzeugt werden, zu unangenehmen Sehbedingungen führen und das Fahrverhalten beeinflussen.

Die Resultate der Untersuchung zeigen, dass alle untersuchten Flickerfrequenzen zwischen 2.5 Hz und 20 Hz als unangenehm für die Sehbedingungen beurteilt werden, während die homogene Beleuchtung als angenehm beurteilt wird. Das Maximum der unangenehmen Empfindung liegt bei 12 Hz, also innerhalb des in der Schweiz geltenden «Vermeidungsbereich» von 4-15 Hz. Mit zunehmender Dauer der Fahrt durch die Tunnel verstärkt sich der Unterschied zwischen der Beurteilung der homogenen Beleuchtung und der Beurteilung der Flickerbedingungen. Dies zeigt, dass die verstärkte negative Beurteilung der Flickerbedingungen bei der zweiten Durchfahrt durch die Tunnel nicht das Resultat einer allgemeinen Ermüdung sein kann, sondern, dass eine längere Einwirkung des Flickers zu mehr Irritation führt.

Diese Ergebnisse finden sich bei beiden Altersgruppen. Die Befragung der Probanden am Ende des Experiments bestätigt den Unterschied in der Beurteilung der Flickerbedingungen und der homogenen Beleuchtung. Obwohl in der Befragung der Flicker als störend und irritierend bezeichnet wurde, verursachte er nur in ganz wenigen Fällen Kopfschmerzen oder Schwindel.

Die Fahrqualität wurde durch die seitliche Abweichung von der Spurmitte und durch die lateralen und longitudinalen Beschleunigungen erfasst. Die seitlichen Abweichungen von der Spurmitte nehmen mit der Flickerfrequenz zu. Die meisten erfolgen in Richtung der Strassenmitte, was für die Verkehrssicherheit problematisch sein kann. Es scheint, dass die Nähe zur Tunnelwand vermieden wird. Möglicherweise, weil die nicht-homogene Beleuchtung sich als Streifenmuster an der Tunnelwand niederschlägt. Im Experiment gab es keinen Gegenverkehr. Es wäre interessant zu untersuchen, wie sich Gegenverkehr auf die Einhaltung der Spurmitte unter Flickerbedingungen auswirken würde.

Die lateralen und longitudinalen Beschleunigungen zeigen dasselbe Bild wie die Abweichungen von der Spurmitte. Sie sind ausgeprägter unter den Flickerbeleuchtungen als unter der homogenen Beleuchtung und nehmen mit der Flickerfrequenz zu; mit einem Maximum bei 20 Hz. Damit unterscheiden sie sich von der subjektiven Beurteilung der Sehbedingungen, die ein negatives Maximum bei einer Flickerfrequenz von 12 Hz aufweist. Offenbar wird das Fahrverhalten durch den Flicker anders beeinflusst als das subjektive Empfinden der Sehbedingungen. Die Steuerung eines Fahrzeugs erfolgt durch einen automatisierten Regelkreis zwischen Wahrnehmung und Motorik, der mit zunehmender Fahroutine kaum mehr das Bewusstsein erreicht. Hier scheinen sich grössere Flickerfrequenzen stärker auszuwirken. In die subjektive Beurteilung der Sehbedingungen gehen eher Augenbeschwerden und neurologische Probleme ein. Da das Fahrverhalten für die Verkehrssicherheit ebenso relevant, vielleicht sogar relevanter ist als das subjektive Empfinden, müsste überlegt werden, ob das «Vermeidungsbereich» von 4-15 Hz nicht auf höhere Frequenzen erweitert werden müsste. Eine weitere Untersuchung dieser und noch höherer Frequenzen würde dazu mehr Klarheit bringen.

## 5.10 Weitere Ergebnisse

Als weiteres Ziel der Forschung wurde der Einfluss neuer Beleuchtungstechnologien (LED) auf den Flickereffekt bezeichnet. Hier zeigte sich aufgrund der Beleuchtungsstärke- und Kontrastmessungen, welche in repräsentativen Tunneln ausgemessen wurden, dass

dieser Effekt bez. Flicker nicht speziell untersucht werden musste. Es darf festgestellt werden, dass die Ergebnisse des Experimentes unabhängig von der Beleuchtungstechnologie Gültigkeit haben. Eine Akzentuierung der Flickerproblematik ist allerdings nicht von der Hand zu weisen: Durch die höheren Lichtstärken der LED-Leuchten werden die Abstände der Leuchten kaum vermindert. Leuchtenbänder werden dadurch noch seltener zum Einsatz kommen.

## 5.11 Massnahmen und Empfehlungen

Es wurde eindeutig festgestellt, dass der Flickereffekt nicht beschränkt ist auf die mittleren Frequenzen (4...15 Hz), sondern auch bei höheren Frequenzen (16...20 Hz) besteht. Es wird deshalb empfohlen, in einer fortführenden Forschungsarbeit den Einfluss dieser höheren Frequenzen zu untersuchen.

Als Folge davon ist zu prüfen, wie weit die bestehende Schweizer Norm SN 40 551-1 (Teil 1: Lichttechnische Anforderungen, Begriffe und Gütemerkmale) in diesem Punkt überarbeitet werden muss.

Zudem hat die Arbeit gezeigt, dass kontinuierliche Lichtbänder generell als angenehmer empfunden wurden (was nicht überraschend ist). Da jedoch die objektiv ermittelte Fahrqualität davon direkt beeinflusst wird, ist zu prüfen, ob in Tunneln Lichtbänder installiert werden sollen, sofern dies aufgrund einer speziellen Situation (z.B. hohes Verkehrsaufkommen, grosse Anzahl Fahrstreifen) sinnvoll erscheint.

Neue Strassentunnel werden derzeit (2021) nur noch mit LED-Technologie ausgerüstet; bei Sanierungen wird zumeist auf diesen Typ gewechselt. Da dieser Leuchtentyp hohe Leuchtdichten in Punktform liefert, wird die Blendung (welche in dieser Arbeit nicht untersucht wurde) gefördert. Leuchtenkonstruktionen mit flächigeren Leuchtabgabe würden diesem Umstand entgegenwirken, und hätten damit mit grosser Wahrscheinlichkeit einen positiven Einfluss auf die Fahrqualität.

## 6 Glossar

Begriff	Bedeutung
Beleuchtungsstärke [lx]	Die Beleuchtungsstärke (Lux) ist der auf ein Flächenelement auffallende Lichtstromanteil. Dies ist die photometrische Grösse zur Beschreibung des auf eine Fläche auffallenden Lichts.
BSA EES	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) <i>équipements d'exploitation et de sécurité (EES)</i>
BZ <i>plan de feux</i>	Betriebszustand (BZ) Bezeichnet den Signalisationszustand; beziehungsweise die Anzeigen auf mehreren zusammengehörenden Aktoren.
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
Flickereffekt	Unter dem Begriff «Flickereffekt» werden zyklische Leuchtdichteschwankungen verstanden, die durch natürliche oder künstliche Lichtquellen hervorgerufen werden und wahrnehmungspsychologische Effekte verursachen können, wenn sich der Betrachter durch den beleuchteten Raum bewegt. In Strassentunneln wird diese von den durchfahrenden Fahrzeuglenkern wahrgenommene Erscheinung typischerweise durch die in bestimmten Abständen montierten Leuchten im Deckenbereich erzeugt. Der Flickereffekt ist eine Art von <i>Temporal Light Artefacts (TLA)</i> .
FL-Leuchte	Eine FL-Leuchte ist eine Niederdruck-Gasentladungsröhre, spezieller Metaldampflampe, die innen mit einem fluoreszierenden Leuchtstoff beschichtet ist.
HMD	Engl. <i>head mounted display</i> Der im Versuch verwendete Datenhelm.
KLZ	Kantonale Leitzentrale (KLZ) <i>centrale cantonale de gestion du trafic (KLZ)</i>
Kontrastgütekoeffizient [cd * m-2 * lx-1]	Der Kontrastgütekoeffizient ist der Quotient aus Fahrbahnleuchtdichte und Vertikalbeleuchtungsstärke gegen die Fahrtrichtung (entweder an einem Punkt oder als Mittelwert). Dieser Wert definiert die Kontrastwiedergabeeigenschaften einer Tunnelbeleuchtungsanlage (symmetrische, asymmetrische oder Gegenstrahlbeleuchtung).
LED-Leuchte	Engl. <i>light emitting diodes</i> . Eine LED-Leuchte ist ein Halbleiter-Bauelement, das Licht ausstrahlt, wenn elektrischer Strom in Durchlassrichtung fliesst.
Leuchtdichte [cd * m-2]	Die Leuchtdichte ( <i>Candela pro Flächeneinheit</i> ) ist der von einem Flächenelement einer leuchtenden oder beleuchteten Fläche in einer bestimmten Richtung in einen Kegel mit dem Raumwinkel ausgesandte Lichtstromanteil. Dies ist die photometrische Grösse, welche das Auge sieht und die den Helligkeitseindruck eines Flächenelements wiedergibt.
Leuchte	Von einer Leuchte spricht man, wenn ein oder mehrere Leuchtmittel in ein in der Regel metallisches Gehäuse mit spezifischen Zusatzmodulen wie Reflektoren, Spiegelraster, Verkabelung etc. verbaut werden.
Leuchtmittel (auch «Lampe»)	Der Begriff Leuchtmittel bezeichnet die frei strahlende Primärlichtquelle selbst, ohne irgendwelche das Licht lenkenden Zusatzvorrichtungen.
Lichtausbeute [lm * W-2]	Die Lichtausbeute (Lumen pro Leistung) beschreibt, wie viel sichtbares Licht (gemessen in Lumen) pro zugeführte elektrische Leistungseinheit (gemessen in Watt) eine Lichtquelle liefert.
Lichtstärke [cd]	Die Lichtstärke (Candela) ist der von einer Quelle in einer bestimmten Richtung in einem Kegel mit dem Raumwinkel ausgesandten Lichtstromanteil. Dies ist die photometrische Grösse zur Beschreibung der Lichtabstrahlung einer Quelle in einer bestimmten Richtung.
Lichtstrom [lm]	Der Lichtstrom (Lumen) ist die gesamte von einer Quelle (Lampe, Leuchte) ausgesandte Lichtleistung. Dieser elektromagnetische Strahlungsfluss wird mit der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet.
<i>Phantom Array Effect</i>	Der Begriff <i>Phantom Array Effect</i> bezeichnet die Veränderung der wahrgenommenen Form oder der räumlichen Position von Objekten, induziert durch einen Lichtreiz, dessen Leuchtdichte oder spektrale Verteilung mit der Zeit schwankt, für einen nicht statischen Beobachter in einer statischen Umgebung.

	Der <i>Phantom Array Effect</i> ist eine Art von <i>Temporal Light Artefacts</i> (TLA).
Richtungsverkehr	Hochleistungsstrasse mit 2 Fahrstreifen pro Richtung
Sakkadische Augenbewegungen	Sakkadische Augenbewegungen sind kurze, sprunghafte Blickbewegungen zwischen Fixationspunkten.
SSV OSR	Signalisationsverordnung (SSV) <i>Ordonnance sur la signalisation routière (OSR)</i>
Stammroute <i>itinéraire de base</i>	Signalisierte Route, wo der Betriebszustand der Grundzustand ist.
Stroboskopeffekt	Der Begriff Stroboskopeffekt bezeichnet die Änderung der Bewegungswahrnehmung, die durch einen Lichtreiz hervorgerufen wird, dessen Leuchtdichte oder Spektralverteilung mit der Zeit schwankt, für einen statischen Beobachter in einer nicht statischen Umgebung. Der Stroboskopeffekt ist eine Art von <i>Temporal Light Artefacts</i> (TLA).
<i>Temporal Light Artefacts</i> (TLA)	Unter dem Begriff TLA werden sämtliche unerwünschten Veränderung der visuellen Wahrnehmung zusammengefasst, die durch einen Lichtreiz hervorgerufen werden, dessen Leuchtdichte oder spektrale Verteilung für einen Beobachter in einer bestimmten Umgebung mit der Zeit schwankt. TLA gilt als Oberbegriff für «Flickereffekt», « <i>Phantom Array Effect</i> » und « <i>Stroboskopeffekt</i> ».
Umleitungsrouten <i>itinéraire de déviation</i>	Umleitung zu einer Stammroute. Die Stammroute ist nicht mehr befahrbar oder die Verlustzeit ist grösser als der Umweg über eine verfügbare Umleitungsrouten.
VM-CH	Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH) <i>gestion du trafic en Suisse (VM-CH)</i>
VMZ-CH	Verkehrsmanagementzentrale Schweiz (VMZ-CH) <i>centrale nationale suisse de gestion du trafic (VMZ-CH)</i>
RLZ	Regionale Leitzentrale (RLZ) <i>centrale régionale de gestion du trafic (RLZ)</i>
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
WTA PMV	Wechseltextanzeige (WTA) <i>panneau à messages variables (PMV)</i>
WWW	Wechselwegweisung (WWW) <i>panneau de direction à indications variables (WWW)</i>



## 7 Literaturverzeichnis

- 
- [1] Adjamian, P., Holliday, I. E., Barnes, G. R., Hillebrand, A., Hadjipapas, A., Singh, K. D. (2004): **Induced visual illusions and gamma oscillations in human primary visual cortex**. *European Journal of Neuroscience*, 20, 587-592.
- 
- [2] ASTRA (2014): **Fehlschätzung der Kollisionszeiten bei der Tunneleinfahrt bedingt durch eine gestörte Adaptation**. Forschungsprojekt FGU 2010/003, Bundesamt für Strassen ASTRA, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern..
- 
- [3] ASTRA (2017): **Beleuchtungsanlagen. Richtlinie ASTRA 13015**. Bundesamt für Strassen ASTRA, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- 
- [4] ASTRA (2019): **Betriebs und Sicherheitsausrüstungen. Fachhandbuch ASTRA 23000**. Bundesamt für Strassen ASTRA, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- 
- [5] Bella, F. (2008): **Driving simulator for speed research on two-lane rural roads**. *Accident Analysis & Prevention*, 40, 1078-1087.
- 
- [6] Brookhuis, K., Dewaard, D., Mulder, B. (1994): **Measuring driving performance by car-following in traffic**. *Ergonomics*, 37(3), 427-434.
- 
- [7] Calvi, A., D'Amico, F. D. (2013): **A study of the effects of road tunnel on driver behavior and road safety using driving simulator**. *Advances in Transportation Studies: An international Journal*, Section B, 30, 59-76.
- 
- [8] Calvi, A., Rosaria De Blasiis, M., Guattaro, C. (2012): **An empirical study of the effects of road tunnel on driving performance**. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 53, 1100-1110.
- 
- [9] Canazei, M., Pohl, W., Staggi, S. (2011): **Influence of tunnel lighting on cognitive and visual performance parameters – a field study**. 20th EVU Annual Congress.
- 
- [10] Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., Pagliano, L. (2015): **A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016-1033.
- 
- [11] CIE (191:2010): **Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance**
- 
- [12] Domenichini, L., La Torre, F., Vagi, D., Virga, A., Branzi, V. (2017): **Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: A driving simulator study**. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(2), 216-238.
- 
- [13] Dondi, G., Simone, A., Lantieri C., Vignali V. (2011): **Bike lane design: the context sensitive approach**. *Procedia Engineering*, 21, 897-906.
- 
- [14] Fisher, R.S., Harding, G., Erba, G., Barkley, G.L., Wilkins, A. (2005): **Photoc- and pattern-induced seizures: A review for the Epilepsy Foundation of America Working Group**. *Epilepsia*, 46, 1426-1441.
- 
- [15] Hanreich, G., Kukaschek H., Schrefel J., Hopferwieser, W. (1986): **Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit**, Forschungsvorhaben Nr. 969, Wien, Bundesministeriums für Bauten und Technik
- 
- [16] Harding, G. F. A., Fylan, F. (1999): **Two visual mechanisms of photosensitivity**. *Epilepsia*, 40, 446-451.
- 
- [17] Huang, Y. Y., Menozzi, M., Beldi, G., Brand, Y. (2019): **Training visual attention in a naturalistic visual environment**. *Ergonomics*.
- 
- [18] ITU-R (2018): **Guidance for the reduction of photosensitive epileptic seizures caused by television**. Recommendation ITU-R BT.1702-1, International Tele-communication Union ITU, Geneva.
- 
- [19] Kelly, D. H. (1971): **Flicker**. In: Jameson, D., Hurvich, L.M. (Hrsg.), *Handbook of sensory physiology*, Vol. VII/4. Springer Verlag, Heidelberg.
- 
- [20] Kim, J. H., Matsui, Y., Hayakawa, S., Suzuki, T., Okuma, S., Tsuchida, N. (2005): **Acquisition and Modeling of Driving Skills by Using Three Dimensional Driving Simulator**. *IEICE Trans. Fundamentals*, E88-A(3), 770-778.
- 
- [21] Menozzi, M., Baumer-Bergande, E., Seiffert, B. (2012): **Working towards a test for screening visual skills in a complex visual environment**. *Ergonomics*, 55(11), 1331-1339.
- 
- [22] Müller, B., Basler, H. D. (1993): **Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung**. Beltz, Weinheim.
- 
- [23] Padmanaban, V., Inati, S., Ksendzovsky, A., Zaghoul, K. (2019): **Clinical advances in photosensitive epilepsy**. *Brain Research*, 1703, 18-25.
- 
- [24] Parra, J., Lopes da Silva, F. H., Stroink, H., Kalitzin, S. (2007): **Is colour modulation an independent factor in human visual photosensitivity?** *Brain*, 130, 1679-1689.
-

- 
- [25] Shiraishi, H., Tateki, F., Yushi, I., Kazuichi, Y. (2001): **Photosensitivity in relation to epileptic syndromes: a survey from an epilepsy centre in Japan.** *Epilepsia*, 42(3), 393- 397.
- 
- [26] Thompson, P. (1982): **Perceived rate of movement depends on contrast.** *Vision Research*, 22, 377-380.
- 
- [27] VSS (2012): **Öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen – Teil 1: Lichttechnische Anforderungen, Begriffe und Gütemerkmale.** Schweizer Norm SN 40 551-1, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- 
- [28] Wilkins, A. J. (1995): **Visual Stress.** Oxford psychology series; no. 24. Oxford University Press.
- 
- [29] Wilkins, A. J. (2016): **A physiological basis for visual discomfort: Application in lighting design.** *Lighting research technology*, 48, 44-54.
- 
- [30] Wilkins, A. J. Nimmo-Smith, I., Slater, A. I., Bedocs, L. (1989): **Fluorescent lighting, headaches and eyestrain.** *Lighting research technology*, 21, 11-18.
- 
- [31] Wilkins, A. J., Darby, C. E., Binnie, C. D. (1979): **Neurophysiological aspects of pattern-sensitive epilepsy.** *Brain*, 102(1), 1-25.
- 
- [32] Wilkins, A. J., Veitch, J. Lehman, B. (2010): **LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update.** 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- 
- [33] Zheng, Z., Du, Z., Yan, Q., Chen, G. (2017): **The impact of rhythm-based visual reference system in long highway tunnels.** *Safety Science*, 95, 75-82.
-

## 8 Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

### FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

#### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 17.12.2021

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2018/003

Projekttitel: Flickereffekt bei Beleuchtungsanlagen im Strassentunnel

Enddatum: 31.12.2021

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In Strassentunneln wird dem Flickereffekt eine generelle Beeinträchtigung des Fahrverhaltens zugeschrieben. Zur Vermeidung potentieller Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit wird deshalb international die Einhaltung von Mindestwerten für die Gleichförmigkeit von Tunnelbeleuchtungen empfohlen. Weil der Flickereffekt im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 10 Hz als besonders unangenehm empfunden wird, wird als Vorsichtsmassnahme in Schweizer Strassentunneln für die Beleuchtung dieser Frequenzbereich vermieden. Konkret bedeutet dies, dass die Leuchtmittel in einem Strassentunnel je nach vorgesehener Fahrgeschwindigkeit nur in bestimmten Abständen platziert werden können. Es ist jedoch festzustellen, dass die Grundlagen zur Bestimmung des Flickerbereichs in Strassentunneln international wenig gesichert sind und kaum wissenschaftlich belastbare Nachweise vorliegen. In der aktuellen Beleuchtungsnorm SN 40 551-1 wird auf diesen unsicheren Kenntnisstand hingewiesen und explizit erwähnt, dass im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 15 Hz lediglich «(...) mangels gesicherter quantitativ formulierbarer Erkenntnisse und aus Vorsicht (...)» Durchfahrtsbeleuchtungen vermieden werden sollen.

Für eine wissenschaftliche Analyse des Flickereffekts wurden spezifische Probandenversuche in einem eigens dafür ausgerüsteten Fahrsimulator der ETH mittels "Virtual Reality" durchgeführt. Dabei wurden Wahrnehmungseffekte, Augenbewegungen, subjektives Empfinden sowie Verhaltenseffekte gemessen, die durch die Simulation des Flickereffekts beeinträchtigt werden. Für die Realisierung des Forschungsprojektes wurde eine Kollaboration mit der ETH, der scians GmbH, sowie der METAS sichergestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der subjektiv als störend empfundene Flickereffekt nicht auf die mittleren Frequenzen (4...15 Hz) beschränkt ist, sondern auch bei höheren Frequenzen (16...20 Hz) besteht. Höhere Frequenzen verschlechtern die Fahrqualität; dies äusserte sich im Experiment durch vermehrte Quer- und Längsbeschleunigungen des Fahrzeugs. Das Alter verstärkt zudem die schlechtere Fahrqualität bei höheren Frequenzen. Zudem wurden Lichtbänder im Gegensatz zu Punktquellen als deutlich angenehmer empfunden.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Die eingangs formulierte These, dass "die aktuellen Vorgaben zur Vermeidung der Auswirkungen des Flickereffekts auf die Verkehrssicherheit in Strassentunneln aus wissenschaftlicher Sicht und unter Berücksichtigung aktueller Beleuchtungstechnologien nicht ausreichend belegt sind" konnte bestätigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der subjektiv als störend empfundene Flickereffekt nicht auf die mittleren Frequenzen (4...15 Hz) beschränkt ist, sondern auch bei höheren Frequenzen (16...20 Hz) besteht. Zudem konnte objektiv belegt werden, dass der Flickereffekt (auch bei höheren Frequenzen) die Fahrqualität verschlechtert. Diese Erkenntnis ist neu und bedarf aus Sicht der Autoren weiterer Untersuchungen.

Das im Forschungsgesuch formulierte Ziel - Einfluss der Beleuchtungstechnologie auf den Flickereffekt - erschien deshalb als nicht zentral, wie Messungen des Kontrasts und der Beleuchtungsstärke in verschiedenen Tunneln zeigen konnten. Weit wichtiger zeigte sich die Erreichung der übergeordneten Zielsetzung, wie gross der Einfluss des Flickers auf die Verkehrssicherheit ist.

Vorschläge zur Bemessung von Beleuchtungsanlagen wurden gemacht, namentlich die Verwendung von Lichtbändern oder auch die Verwendung von Beleuchtungskörpern mit flächigerem Licht. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass die Schweizer Norm SN 40 551-1 damit einer Anpassung bedarf. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Versuchsanordnung konnten Einflüsse der Lichtfarbe und Lichtintensität nicht untersucht werden, was aber im Hinblick auf das Forschungsergebnis tragbar ist.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Aufgrund der Analysen und des Probanden-Experimentes können folgende Folgerungen und Empfehlungen gemacht werden:

1. Der Flickereffekt beeinträchtigt die Fahrqualität und damit die Verkehrssicherheit subjektiv und objektiv.
2. Das in der Norm SN 40 551-1 definierte "Verbots-Fenster" für Frequenzen zwischen 4 und 15 Hz ist nach wie vor richtig.
3. Das Experiment zeigte deutlich, dass auch höhere Frequenzen, über 15 Hz bez. des Flickereffekts relevant sind.
4. Lichtbänder verbessern generell die Fahrqualität.
5. Die Norm SN 40 551-1 ist aufgrund der Erkenntnisse zu überarbeiten.
6. Die Autoren empfehlen weitere Untersuchungen des Flickereffekts für Frequenzen über 15 Hz.

#### Publikationen:

Welte U., Mellert L.D., Groner M., Bischof W.F., Menozzi M., Blattner P. (2021): Flickereffekt bei Beleuchtungsanlagen im Strassentunnel. Forschungsprojekt AGT 2018/003 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Welte

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walther Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Begleitkommission wurde in Forschungsprozess eingebunden und lieferte insbesondere bei der Erarbeitung und Genehmigung des Versuchskonzeptes einen wesentlichen Beitrag. Insgesamt wurden 4 BK-Sitzungen durchgeführt, welche auch zur Überwachung des Budgets und der Termine dienten. Das Projekt erfuhr aufgrund der Pandemie im Jahr 2020 eine Verzögerung von rund sechs Monaten, da die Probandenversuche in dieser Zeit nicht durchgeführt werden konnten. Ansonsten war der Ablauf termingerecht.

Das Projektmanagement insgesamt sowie die erfolgreiche Planung und Durchführung des Experiments und die Aufbereitung der Ergebnisse werden von der BK positiv beurteilt.

##### Umsetzung:

Die Umsetzung des Forschungsgesuchs mit einem wissenschaftlich fundierten Ansatz war zielführend und angemessen. Die Probandenversuche wurden korrekt durchgeführt, sodass signifikante und belastbare Ergebnisse erzielt wurden.

Das Projektergebnis erreichte einen wesentlichen Erkenntnisgewinn in einem Bereich, der in den letzten Jahren wenig erforscht und untersucht wurde. Die Resultate sind relevant und bilden eine gute Basis für weitergehende Untersuchungen.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Das Projekt zeigte auf, dass der Flickereffekt nicht auf den in der Norm definierten Frequenzbereich zwischen 4 und 15 Hz beschränkt werden kann. Die Autoren empfehlen, weitergehende Untersuchungen und Versuche im höheren Frequenzbereich über 15 Hz durchzuführen.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Die Schweizer Norm SN 40 551-1 soll bezüglich des Abschnittes "Flimmererscheinungen und Flickereffekt" überarbeitet werden. Es erscheint sinnvoll, dies im Rahmen der weiterführenden Forschung zu tun, welche aus Sicht der Autoren als notwendig erachtet wird.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Stauber

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: BBS Ingenieure AG, Winterthur

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: