



Der Einfluss energieeffizienter Strassenbeleuchtung auf die Fahrgeschwindigkeit

**Influence de l'efficacité énergétique de l'éclairage de rue
sur la vitesse de déplacement des véhicules**

**L'impatto dell'illuminazione stradale ad alta efficienza
energetica sulla velocità di guida**

**The Impact of energy efficient street lightning on driving
speed**

**Universität Bern
Prof. Dr. Michael Schulte-Mecklenbeck
Dr. Sabrina Stöckli**

**Universität St. Gallen
Prof. Dr. Emanuel de Bellis**

**Max-Planck-Institut für Bildungsforschung
Prof. Dr. Ralph Hertwig**

**Swisstraffic AG
Daniel Baumann**

**EWZ
Christoph Girsperger**

**Elektron AG
Jörg Imfeld**

**Forschungsprojekt SVI 2018/003 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und der Verkehrsexperten (SVI)**

Oktober 2022

1734

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)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Der Einfluss energieeffizienter Strassenbeleuchtung auf die Fahrgeschwindigkeit

**Influence de l'efficacité énergétique de l'éclairage de rue
sur la vitesse de déplacement des véhicules**

**L'impatto dell'illuminazione stradale ad alta efficienza
energetica sulla velocità di guida**

**The Impact of energy efficient street lightning on driving
speed**

Universität Bern
Prof. Dr. Michael Schulte-Mecklenbeck
Dr. Sabrina Stöckli

Universität St. Gallen
Prof. Dr. Emanuel de Bellis

Max-Planck-Institut für Bildungsforschung
Prof. Dr. Ralph Hertwig

Swisstraffic AG
Daniel Baumann

EWZ
Christoph Girsperger

Elektron AG
Jörg Imfeld

**Forschungsprojekt SVI 2018/003 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und der Verkehrsexperten (SVI)**

Oktober 2022

1734

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Dr. Michael Schulte-Mecklenbeck

Prof. Dr. Emanuel de Bellis

Mitglieder

Dr. Sabrina Stöckli

Prof. Dr. Ralph Hertwig

Daniel Baumann

Christoph Girsperger

Jörg Imfeld

Begleitkommission

Präsident

Dr. Wernher Brucks

Mitglieder

Dr. Rahel Bieri

Dr. Petter Blattner

Patrick Eberling

Dr. Marina Groner

Jörg Haller

Matteo Morisoli

Dr. Michael Vock

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und der Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Riassunto	11
	Summary	13
1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage	15
1.2	Ziele	16
1.3	Arbeitspakete	16
1.3.1	AP1: Erweiterte Literaturanalyse und Hypothesenbildung	17
1.3.2	AP2: Expertenworkshops.....	18
1.3.3	AP3: Pilotstudie.....	18
1.3.4	AP4: Feldexperiment Strasse und Tunnel	18
1.3.5	AP5: Befragung Fahrzeuglenkende.....	18
1.3.6	AP6: Analyse und Synthese empirischer Daten	18
1.4	Zeitplan	19
2	Stand der Forschung	21
2.1	Relevanz	21
2.2	Der kontroverse Effekt von Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit.....	22
2.3	Evidenz für einen positiven Effekt.....	23
2.4	Evidenz für einen negativen Effekt	24
2.5	Evidenz für einen nicht-linearen Effekt	25
2.6	Erklärungen für die gemischten Forschungsergebnisse	25
2.6.1	Eigene Bewegung vs. Bewegung von Objekten.....	25
2.6.2	Methodische Limitationen	26
2.7	Hypothesen.....	27
3	Forschungsmethoden	29
3.1	Stichprobe, Versuchsplan und Vorgehen	29
3.2	Material	32
3.2.1	Strassenbeleuchtung	32
3.2.2	Messgeräte	33
3.2.3	Anzahl Geräte pro Strasse.....	36
3.2.4	Umfrage	36
4	Analyse und deskriptive Ergebnisse	41
4.1	Analyseplan	41
4.2	Datenbehandlung und Software	41
4.2.1	Dateneingabe.....	41
4.2.2	Synchronisierungskorrektur	42
4.2.3	Aggregieren der Datensätze	44
4.3	Deskriptive Ergebnisse	46
4.4	Messung der Beleuchtungsstärke auf der EK	48
4.5	Datenfilterung.....	48
5	Inferenzstatistische Ergebnisse	49
5.1	Hypothesentests	49
5.1.1	Einfluss Beleuchtungsstärke auf Fahrgeschwindigkeit.....	49
5.1.2	Leuchtdichte-Hypothese	51
5.1.3	Strassenoberfläche-Hypothese	57
5.1.4	Frequenzhypothese	58

5.2	Plausibilitätsprüfung	59
5.3	Umfrage.....	60
5.3.1	Kurzinterviews	61
5.3.2	Onlineumfrage.....	63
6	Diskussion	65
6.1	Zusammenfassung des Forschungsprojektes	65
6.2	Implikationen	66
6.2.1	Diskussion der Ergebnisse in Bezug zu bestehender Forschung	66
6.2.2	Implikationen für die Verkehrssicherheit	67
6.2.3	Implikationen für die Strassenbeleuchtungsnormierung	67
6.2.4	Implikationen für Fragen um Energieeffizienz und Lichtemissionen.....	68
6.3	Limitationen	68
6.3.1	Beschränkte Generalisierbarkeit	68
6.3.2	Technische Probleme	69
6.4	Künftige Forschung	70
6.5	Fazit.....	71
	Glossar	73
	Literaturverzeichnis	75
	Projektabschluss	79

Zusammenfassung

Ausgangslage & Zielsetzung

Ein zentrales Element der Verkehrssicherheit ist eine der Situation angepasste Geschwindigkeit der Fahrzeuglenkenden. Ein situativer Faktor ist hierbei die Strassenbeleuchtung. Eine Reihe von Studien aus verschiedenen Disziplinen hat gezeigt, dass sich die Beleuchtungsstärke (der auf die Strasse einfallende Lichtstrom) auf die Fahrgeschwindigkeit auswirken kann. Jedoch kamen diese Studien, welche grösstenteils im Labor durchgeführt wurden, zu unterschiedlichen und oftmals widersprüchlichen Erkenntnissen bezüglich der Richtung des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit. Das vorliegende Forschungsprojekt untersucht diesen Zusammenhang anhand eines Feldexperiments.

Methode

Das Feldexperiment fand auf drei ausgewählten Strassen in der Stadt Zürich statt: dem Mythenquai, der Duttweilerbrücke und der Emil-Klöti-Strasse. Über einen Zeitraum von sechs Monaten wurde die Beleuchtungsstärke der Strassenbeleuchtung systematisch über vier Stufen (C-Klassen: C2, C3, C4, C5) variiert, während die Fahrgeschwindigkeit gemessen wurde. Ebenfalls wurden folgende Messungen erhoben: Leuchtdichte, anonymisierte Kennzeichen, Strassenzustand und meteorologische Parameter. Der gesamte Datensatz aus dem Feldexperiment umfasst 6 Mio. Fahrzeugbewegungen. Ergänzend wurde eine zusätzliche Stichprobe von Fahrzeuglenkenden (n=454) im Rahmen von polizeilichen Grosskontrollen erhoben.

Empirische Ergebnisse

Die Ergebnisse des Feldexperiments zeigen keine Evidenz für einen systematischen Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit. Das heisst, die Manipulation der Beleuchtungsstärke führt auf aggregierter Ebene nicht zu unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeit. Hingegen zeigte sich in Bezug auf die Messung der Leuchtdichte eine negative Korrelation mit Fahrgeschwindigkeit, d. h. eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bei zunehmender Leuchtdichte. Schliesslich wurde mithilfe der Umfragen gezeigt, dass die Manipulation der Beleuchtungsstärke keinen Effekt auf das subjektive Helligkeitsempfinden der befragten Fahrzeuglenkenden hatte.

Implikationen

Die gesonderte Betrachtung dieser Ergebnisse würde für eine Verminderung der Beleuchtungsstärke der Strassenbeleuchtung sprechen. Eine solche Massnahme hätte, bei einer nicht zu erwartenden Steigerung der Fahrgeschwindigkeit, eine verbesserte Energieeffizienz sowie verminderte Lichtemissionen zur Folge. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Untersuchung auf urbanen und konfliktfreien Strassen durchgeführt wurde und bei einer möglichen Reduktion der Beleuchtungsstärke die Verkehrssicherheit, insbesondere an Konfliktzonen, nicht beeinträchtigt werden darf. Der nicht vorhandene Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit hat Implikationen für die Normierung der Strassenbeleuchtung, die Energieeffizienz städtischer Beleuchtung sowie die Lichtemissionen im urbanen Raum.

Résumé

Situation de départ & objectif

Un élément central de la sécurité routière est la vitesse des conducteurs adaptée à la situation. L'éclairage public est un facteur situationnel. Des recherches interdisciplinaires ont montré que l'éclairement (le flux lumineux incident sur la route) peut avoir une influence sur la vitesse de conduite. Cependant, ces études, pour la plupart réalisées en laboratoire, ont abouti à des résultats différents et souvent contradictoires quant à la direction de la relation entre l'intensité lumineuse et la vitesse de conduite. Le présent projet de recherche examine cette relation sur le terrain à l'aide d'une expérience réalisée dans trois rues de la ville de Zurich.

Méthode

Sur une période de six mois, l'intensité de l'éclairage public a systématiquement varié sur quatre niveaux (C2, C3, C4, C5), pendant que la vitesse de circulation ainsi que la luminance, les plaques d'immatriculation rendues anonymes, l'état des routes et les paramètres météorologiques étaient mesurés. L'ensemble des données issues de l'expérience de terrain comprend 6 millions de mouvements de véhicules. Des enquêtes menées dans le cadre de contrôles de police de grande envergure auprès d'un sous-échantillon (n = 454) de conducteurs ont montré, que ni les appareils de mesure ni les différences d'intensité de l'éclairage n'étaient perçues.

Résultats empiriques

Les résultats de l'expérience de terrain ne montrent aucune évidence d'une relation systématique entre l'éclairement et la vitesse de conduite. C'est-à-dire la manipulation de l'intensité lumineuse ne se traduit pas par des différences de vitesse de déplacement. En revanche, la mesure de la luminance a montré une corrélation négative avec la vitesse de circulation, c'est-à-dire une réduction de la vitesse de conduite lorsque la luminance augmente. Enfin, les enquêtes ont montré que la manipulation de l'intensité lumineuse n'avait pas d'effet sur la perception subjective de la luminosité des usagers de la route interrogés.

Implications

L'examen séparé de ces résultats plaiderait en faveur d'une réduction de l'intensité de l'éclairage public. Une telle mesure aurait pour effet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions lumineuses, sans en même temps anticiper une augmentation de la vitesse sur route des véhicules. Il faut toutefois tenir compte du fait que l'étude a été menée sur des routes urbaines et sans conflit et qu'une éventuelle réduction de l'éclairement ne doit pas compromettre la sécurité routière, notamment dans les zones de conflit. Le fait que les analyses n'ont établi aucune relation entre l'intensité de l'éclairage et la vitesse de circulation peut avoir des implications importantes pour la normalisation de l'éclairage public, l'efficacité énergétique de l'éclairage urbain aussi bien que pour les émissions lumineuses en milieu urbain.

Riassunto

Situazione iniziale & obiettivo

Un elemento centrale della sicurezza nel traffico stradale è la velocità dei conducenti, che viene adattata alla rispettiva situazione. Anche l'illuminazione stradale è un fattore situazionale. Diverse ricerche in varie discipline hanno mostrato che l'illuminamento (il flusso luminoso che incide sulla strada) può influire sulla velocità di guida. Tuttavia, questi studi, di cui la maggior parte è stata condotta in laboratorio, sono giunti a conclusioni diverse e spesso contraddittorie sulla questione in quale direzione esiste un rapporto tra l'illuminamento e la velocità di guida. Il presente progetto di ricerca esamina sul campo questo rapporto mediante un esperimento condotto su tre strade della città di Zurigo.

Il metodo

Per un periodo di sei mesi, l'illuminamento nell'illuminazione stradale è stato variato sistematicamente su quattro livelli (C2, C3, C4, C5), in cui venivano misurati la velocità di guida, la luminanza, le condizioni della strada e i parametri meteorologici, anonimizzando le targhe. L'insieme dei dati tratti dall'esperimento sul campo comprende 6 milioni di movimenti di veicoli. Le indagini condotte su un sottocampione di conducenti (n = 454) durante controlli della polizia su larga scala hanno dimostrato che né i dispositivi di misurazione né le differenze nell'illuminamento sono state percepite.

Risultati empirici

I risultati dell'esperimento sul campo non mostrano alcuna evidenza di una relazione sistematica tra l'illuminamento e la velocità di guida, vale a dire che la manipolazione dell'illuminamento non determina differenze nella velocità di guida. D'altra parte, la misurazione della luminanza ha mostrato una correlazione negativa con la velocità di guida, cioè una riduzione della velocità di guida con l'aumento della luminanza. Infine, i sondaggi hanno dimostrato che la manipolazione dell'illuminamento non ha avuto alcun effetto sulla percezione soggettiva della luminosità da parte degli utenti intervistati.

Implicazioni

Considerando questi risultati singolarmente, ci si potrebbe pronunciare per una riduzione dell'illuminamento nell'illuminazione stradale. Visto che non si prevede un aumento della velocità di guida, tale misura comporterebbe un miglioramento dell'efficienza energetica ed una riduzione delle emissioni luminose. Tuttavia, occorre tenere presente che lo studio è stato condotto su strade urbane e prive di conflitti e che un'eventuale riduzione dell'illuminamento non deve compromettere la sicurezza del traffico, soprattutto nelle zone di conflitto. L'inesistente correlazione tra illuminamento e velocità di guida comporta implicazioni per la normativa dell'illuminazione stradale, per l'efficienza energetica dell'illuminazione urbana e per le emissioni luminose nelle aree urbane.

Summary

Objective

Situation-dependent driving speed is a key element of road safety. In this context, a situational factor is road illumination. A number of studies from different disciplines have shown that illuminance (the luminous flux incident on the road) can affect driving speed. However, these studies, most of which have been conducted in the laboratory, have come to different and often contradictory conclusions about the direction of the relationship between illuminance and driving speed. The present research project investigates this relationship in a field experiment on three streets in the city of Zurich.

Method

Over a period of six months, the illuminance of street lighting was systematically varied over four levels (C2, C3, C4, C5), while driving speed as well as luminance, anonymized license plate numbers, road condition and meteorological parameters were measured. The total data set from the field experiment comprises 6 million vehicle movements. Surveys with a subsample of vehicle drivers (n = 454) conducted in the context of large-scale police checks showed that neither the measuring devices nor differences in illuminance were perceived.

Empirical results

The results of the field experiment provide no evidence for a systematic relationship between illuminance and driving speed, i.e., the manipulation of illuminance does not result in differences in driving speed. However, the measurement of luminance showed a negative correlation with driving speed, i.e., a reduction of driving speed with increasing luminance. Finally, the surveys showed that the manipulation of illuminance had no effect on drivers' subjective perception of brightness.

Implications

The separate consideration of these results would argue for a reduction of the illuminance of the street lighting. Such a measure would result in improved energy efficiency and reduced light emissions, provided that the increase in driving speed is not expected. However, it has to be considered that the study was carried out on urban and conflict-free roads and that a possible reduction in illuminance must not compromise traffic safety, especially in conflict zones. The non-existent relationship between illuminance and driving speed has implications for the standardization of street lighting, the energy efficiency of urban lighting and light emissions in urban areas.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Eine wesentliche Aufgabe der künstlichen Beleuchtung von Strassen ist es, die Verkehrssicherheit in der Nacht oder bei schlechten Lichtverhältnissen zu erhöhen. Allerdings sind in den letzten Jahren, u. a. durch die Umstellung auf neue Beleuchtungskörper (z. B. LED), auch die potenziell negativen Auswirkungen der Strassenbeleuchtung in den Fokus der Wissenschaft und Öffentlichkeit geraten. Diskutiert wurden die mangelnde Energieeffizienz und die Lichtemissionen der bestehenden Beleuchtungskörper, wie auch die Gültigkeit von Strassenbeleuchtungsnormen (z. B. Eisenbeis, 2013; Fotios & Gibbons, 2018). Das vorliegende Projekt bewegt sich in diesem Spannungsfeld – Verkehrssicherheit, Energieeffizienz, Lichtemissionen und Strassenbeleuchtungsnormen – und bildet die Basis für Diskussionen zur Optimierung dieser Variablen.

Eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten belegt den positiven Zusammenhang zwischen Strassenbeleuchtung und Verkehrssicherheit (Krause, 2015; Riedel et al., 2013; Walkling, 2017). Eine optimale Strassenbeleuchtung ermöglicht es Fahrzeuglenkenden, Gefahrenquellen auf und neben den Strassen frühzeitig zu erkennen und hilft somit, im Strassenverkehr adäquat zu entscheiden und richtig handeln zu können (Schweizer Licht Gesellschaft, 2020; Wagner & Wagner, 2013).

Zentrale Faktoren zur Reduktion von Unfällen im Strassenverkehr sind demnach eine optimale Strassenbeleuchtung und dadurch mehr Sicherheit durch «gutes Sehen». Basierend auf vielseitigen Erkenntnissen aus der Forschung und Praxis wird eine optimale Strassenbeleuchtung anhand verschiedener Gütekriterien festgelegt: (1) eine an die örtlichen Verhältnisse abgestimmte Beleuchtung, (2) gleichmässige Beleuchtung, (3) gute Blendungsbegrenzung, (4) optische Führung, (5) rasche Adaption für das menschliche Auge, sowie (6) optimal abgestimmte Energie- und Leistungswerte (Schweizer Licht Gesellschaft, 2020). Angesichts der Vorteile einer optimalen Strassenbeleuchtung gilt das Prinzip, dass die Qualität der Strassenbeleuchtung umso höher sein muss, je höher das Risiko für die Fahrzeuglenkenden ist (Riedel et al., 2013). Gemäss diesen Vorgaben stellt eine optimale Strassenbeleuchtung sicher, dass die Fahrzeuglenkenden Geschwindigkeiten wählen, die der Fahrumgebung angepasst sind, während die Beleuchtung gleichzeitig ein minimales Niveau an Lichtemissionen verursacht.

Bei der Ausgestaltung der Strassenbeleuchtung spielen u. a. die europäischen Strassenbeleuchtungsnormen (DIN EN 13201) sowie die Schweizer Norm für öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen (SN 640 551-1) eine wichtige Rolle. Die Normen enthalten quantitative Empfehlungen darüber, welches Beleuchtungsstärke-, bzw. Leuchtdichte-Level für eine bestimmte Strasse angemessen ist. Beleuchtungsstärke entspricht dem auf die Strasse einfallenden Lichtstrom (lx); Leuchtdichte entspricht dem von der Strassenoberfläche reflektierten und von den Fahrzeuglenkenden wahrgenommenen Licht (cd/m²). Solche Normen sollten möglichst lückenlos alle entscheidenden Parameter berücksichtigen, insbesondere situationsbedingte (z. B. Lichtverhältnisse, Verkehrsaufkommen), wirtschaftliche (z. B. Kosten der Strassenbeleuchtung, Stromverbrauch) und umweltbezogene Parameter (z. B. Lichtemission und deren Auswirkungen auf die nächtliche Umgebung sowie auf Menschen, Tiere und Pflanzen).

Eine aktuelle Herausforderung besteht darin, Parameter für optimale Strassenbeleuchtung zu definieren. Während eine Strassenbeleuchtung möglichst weitgehend auf empirischen Erkenntnissen fussen sollte, basieren die heutigen internationalen und nationalen Strassenbeleuchtungsnormen nur selten auf empirischen Ergebnissen (siehe Fotios & Gibbons, 2017). Ausgehend von neuen Daten (de Bellis et al., 2018) zu Fahrzeugbewegungen auf Schweizer Strassen setzt sich dieses Forschungsprojekt mit der Frage auseinander, inwiefern der Grundsatz zutrifft, dass eine höhere Beleuchtungsstärke

kausal mit einer Veränderung der Fahrgeschwindigkeit einhergeht. Tatsächlich zeigt eine in der Schweiz durchgeführte Feldstudie (de Bellis et al., 2018), dass das natürliche Umgebungslicht (gemessen als Beleuchtungsstärke) beeinflusst, wie schnell Fahrzeuglenkende fahren. Interessanterweise wurde ein negativer Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit gefunden, d. h., die erlaubte Höchstgeschwindigkeit wird bei stärkerer Dunkelheit öfter überschritten. Dieser Effekt trat auch zutage, wenn für eine Reihe von Variablen (wie bspw. Verkehrsaufkommen und Tageszeit) kontrolliert wurde. Die Studie bestärkt die Notwendigkeit, die Wirkung der Strassenbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit besser zu verstehen und das Optimierungspotenzial von Strassenbeleuchtungsnormen und neuen Beleuchtungstechnologien zu prüfen. Aufgrund der mangelnden Evidenzlage zu diesem kontraintuitiven Zusammenhang von Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit und der Einzigartigkeit der erwähnten Feldstudie braucht es weitere Forschungsanstrengungen. Insbesondere sollte die korrelative Natur der Untersuchung von de Bellis et al. (2018) durch eine kausale Untersuchung der Fahrgeschwindigkeit bei systematischer Variation der Strassenbeleuchtung erweitert werden.

Das vorliegende Forschungsprojekt baut auf früheren Untersuchungen auf und schliesst die Forschungslücken bestehender Labor- und korrelativer Studien. Neben einer systematischen Literaturrecherche und -analyse wurde ein Feldexperiment sowie eine Umfrage mit Fahrzeuglenkenden durchgeführt, um den negativen Beleuchtungsstärke-Fahrgeschwindigkeits-Zusammenhang (BFZ) zu überprüfen und haltbare Empfehlungen für verschiedene Entscheidungsträger*innen aus dem Strassenverkehrswesen (Behörden, Verkehrsingenieur*innen, Beleuchtungstechnolog*innen) sowie sämtliche Verkehrsteilnehmende abzugeben.

1.2 Ziele

Die übergeordneten Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes sind dreiteilig:

- (1) die relevante Fachliteratur zum Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit, bzw. Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit zu identifizieren, systematisieren und aufzubereiten,
- (2) diesen Zusammenhang empirisch und kausal zu untersuchen,
- (3) basierend auf den empirischen Ergebnissen Empfehlungen für das Optimierungspotenzial der Strassenbeleuchtung unter Berücksichtigung der Lichtemissionen abzugeben.

1.3 Arbeitspakete

Um eine grösstmögliche Wirkung des Forschungsprojektes sicherzustellen, ist eine starke Verzahnung von Forschung und Praxis unabdingbar. Dies wurde sichergestellt durch eine gezielte Verknüpfung der einzelnen Arbeitspakete (AP) sowie dem engen Austausch mit der Begleitkommission (BK) und der Durchführung von Expertenworkshops (siehe Abb. 1 veranschaulicht die realisierten APs und Meilensteine).

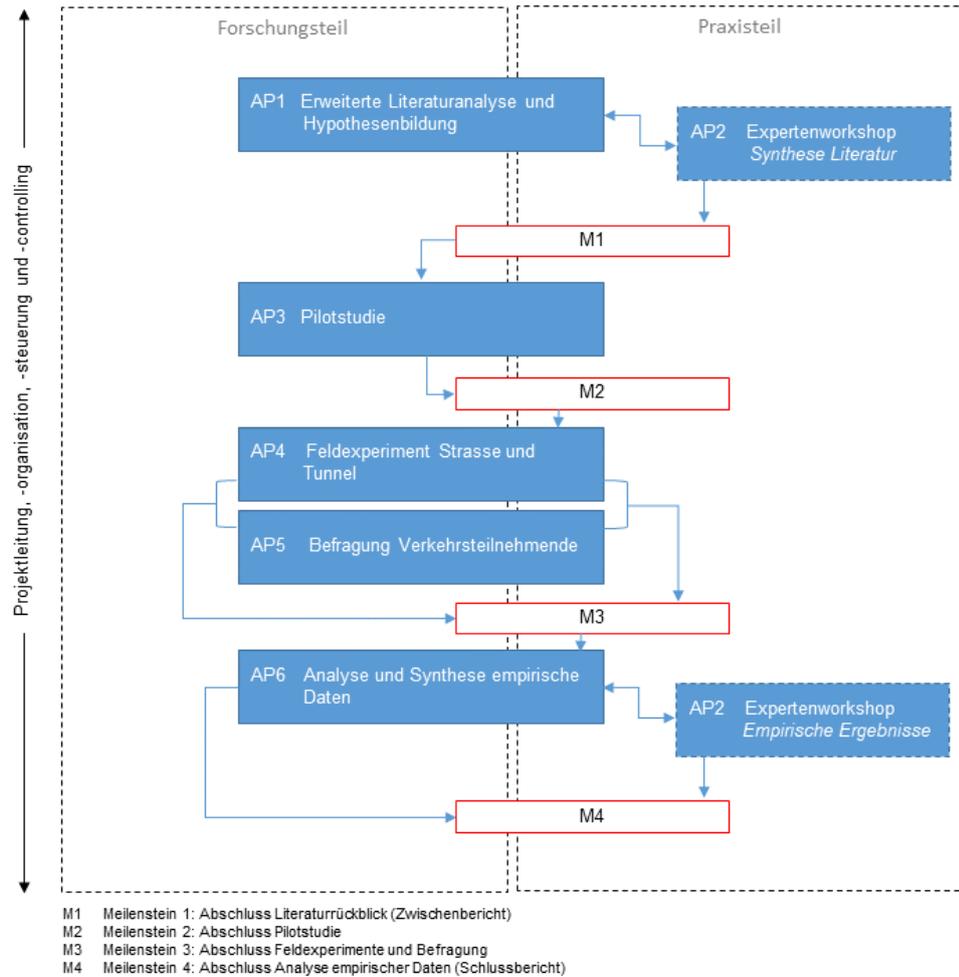


Abb. 1 Übersicht über die bearbeiteten Arbeitspakete (AP) und Meilensteine (M) des Projektes.

Im Zentrum des Projektes standen sechs inhaltlich definierte Arbeitspakete (AP1 bis AP6). Es wurden drei Sitzungen mit der BK sowie zwei Expertenworkshops geplant und durchgeführt. Weiter stellte die Definition von vier Meilensteinen (M1-M4) eine für die Projektleitung hilfreiche Orientierung zur Projektorganisation und -steuerung sowie zum Projektcontrolling dar. Das vorliegende Projekt wurde mit einer umfassenden Synthese sämtlicher Forschungsergebnisse (M1-M3) abgeschlossen und stellt durch gezielte Kommunikation der Ergebnisse eine optimale Wirkung sicher.

1.3.1 AP1: Erweiterte Literaturanalyse und Hypothesenbildung

Zu Beginn des Projektes wurde eine systematische Literaturrecherche, -analyse und -synthese zum BFZ durchgeführt. Dieser vertiefte Einblick in die Literatur bildete die Basis für die Generierung von Hypothesen für den empirischen Teil des Forschungsprojektes. Die Literaturrecherche wurde anhand verschiedener Kriterien systematisiert. So wurde die Literatur beispielsweise anhand des methodischen Kriteriums «Studientyp» kategorisiert, namentlich ob es sich um Feld- oder Laborstudien zum BFZ handelt. Die Erkenntnisse der Literaturanalyse finden sich in Kapitel 2 wieder.

Die in diesem Schritt generierten Hypothesen wurden präregistriert. Die Präregistrierung dient zur Einschränkung der Freiheitsgrade der Analyse und Interpretation eines Forschungsvorhabens. Diese Vorgehensweise ist bereits in vielen Forschungsbereichen zu finden und entwickelt sich zunehmend zum Standardvorgehen in der Wissenschaft. Die bevorzugte Plattform für eine Präregistrierung ist das Open Science Framework (<https://osf.io/>). Dieses erlaubt, die methodische Beschreibung einer Studie (was wird wann wie gemessen und manipuliert), die Beschreibung der Hypothesen, sowie die Festlegung

der Analysen mittels eines Zeitstempels festzuhalten. Damit wird sichergestellt, dass eine spätere Veränderung der Hypothesen oder eine Anpassung der Analysen nicht möglich ist, bzw. genau dokumentiert und begründet werden muss. Diese Plattform bietet auch die Möglichkeit, sowohl Daten als auch Analysecodes von Forschungsprojekten zu veröffentlichen.

1.3.2 AP2: Expertenworkshops

Es wurden zwei Expertenworkshops geplant und durchgeführt. Das Ziel der Expertenworkshops war es, sicherzustellen, dass das Projekt ein breites Interessenspektrum abdeckt und somit zu Implikationen führt, die für möglichst viele Entscheidungsträger*innen aus dem Verkehrswesen relevant sind.

Wir haben uns in Absprache mit der BK dazu entschieden, den ersten Expertenworkshop dazu zu verwenden, um die verkehrspsychologische Sichtweise des BFZ in die empirische Untersuchung miteinfließen zu lassen. Hierzu haben wir einen Expertenworkshop mit Dr. Rahel Bieri und Dr. Marina Groner durchgeführt. Der zweite Expertenworkshop verfolgte das Ziel, möglichst vielfältige Implikationen der Forschungsergebnisse abzuleiten und zu diskutieren. Hierzu haben wir einen Expertenworkshop mit Dr. Marina Groner und Dr. Peter Blattner durchgeführt.

1.3.3 AP3: Pilotstudie

Zur Qualitätssicherung wurde im Rahmen einer Pilotstudie das in der empirischen Untersuchung eingesetzte Equipment vorgetestet. Es war wichtig, vor der Feldphase zu testen, ob das Equipment und die Manipulation der Beleuchtungsstärke durch die zentral gesteuerte LED-Strassenbeleuchtungsanlage funktionierten. Insgesamt diente die Pilotstudie dem Umstand, das Risiko von Fehlern und Pannen bei der Datenerhebung in der Feldphase zu reduzieren.

1.3.4 AP4: Feldexperiment Strasse und Tunnel

Das Feldexperiment ist das Kernelement dieses Forschungsprojektes. Das übergeordnete Ziel bestand darin, die Kausalität des BFZ zu testen. Zu diesem Zweck wurde auf drei Zürcher Strassen die Beleuchtungsstärke systematisch variiert. Zudem wurden Fahrzeugbewegungen, Fahrgeschwindigkeit, Leuchtdichte, Strassenzustand sowie anonymisierte Fahrzeugkennzeichen aufgezeichnet (für eine Übersicht siehe Kapitel 3.2.2).

1.3.5 AP5: Befragung Fahrzeuglenkende

Aus der Gesamtheit der Fahrzeuglenkenden des Feldexperiments wurde eine Stichprobe gezogen und anschliessend befragt. Ziel war es, soziodemographische Variablen (z. B. Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung) sowie psychologische Aspekte des Fahrverhaltens zu erfassen. Zentral waren hierbei die subjektive Wahrnehmung der Helligkeit sowie die Wahrnehmung der Messgeräte.

1.3.6 AP6: Analyse und Synthese empirischer Daten

Für die umfassende Aufbereitung, Zusammenführung und Analyse der Daten wurden verschiedene statistische Verfahren angewandt. Dazu gehören insbesondere deskriptive sowie inferenzstatistische Analysen. Basierend auf den Befunden wurden Implikationen abgeleitet und diskutiert.

1.4 Zeitplan

In der nachfolgenden Abb. 2 ist der tatsächliche Zeitplan des Projektes inklusive der einzelnen APs abgebildet.

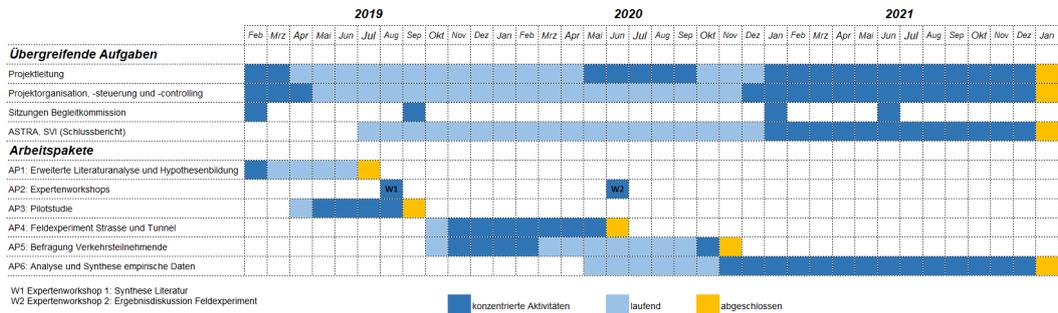


Abb. 2 Zeitplan des Projektes inklusive der einzelnen APs. Dieser Zeitplan bildet den tatsächlichen Zeitplan ab.

2 Stand der Forschung

2.1 Relevanz

Fahrgeschwindigkeit steht in direktem Zusammenhang mit Verkehrssicherheit, wie bspw. Unfallraten und der Anzahl Verkehrstoter. In der Vergangenheit hat sich die Forschung vor allem darauf konzentriert, wie personenbezogene Faktoren wie Alter oder Alkohol die Fahrgeschwindigkeit beeinflussen (Keall et al., 2005; Zhang et al., 2018). Weniger untersucht wurde die Rolle von Umweltfaktoren (de Bellis et al., 2018; Owens et al., 2018) wie der Leuchtdichte.

Die existierenden Studien, die bisher den Einfluss der Beleuchtungsstärke, bzw. der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit untersucht haben, kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Eine Gruppe von Studien legt nahe, dass eine geringere Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte mit einer verringerten Fahrgeschwindigkeit einher geht (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Brooks et al., 2011; Owens et al., 2010; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012; Wood et al., 2018). Eine andere Gruppe von Studien legt nahe, dass eine geringere Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte mit einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit einher geht (Anstis, 2003; Blakemore & Snowden, 1999; Brooks et al., 2011; de Bellis et al., 2018; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982).

Während ein Grossteil der Untersuchungen zum Einfluss der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit im Labor stattfand, gab es nur wenig Feldforschung zu dieser Thematik. Feldforschung ist aber wegen der Übertragbarkeit auf den tatsächlichen Strassenverkehr besonders wichtig. Wie Tab. 1 zeigt, hat auch die bestehende Feldforschung zum Einfluss der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit kein eindeutiges Muster gezeigt. Tab. 1 weist auch auf methodische Limitationen bestehender Forschung hin (z. B. geringe Stichprobengrößen), die wir in Kapitel 6.3 im Detail besprechen werden.

Angesichts dieser gegensätzlichen Ergebnisse ist es bis heute unklar, inwiefern die Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte unter realen Bedingungen tatsächlich mit der gewählten Fahrgeschwindigkeit zusammenhängt.

Tab. 1 Übersicht über Feldforschung zum Zusammenhang von Beleuchtungsstärke, bzw. Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit

Referenz	Stichprobengröße	Studientyp	Abhängige Variable(n)	Unabhängige Variable(n)	Ergebnisse	Richtung des Effekts
Assum et al. (1999)	273'780	QE	Fahrgeschwindigkeit	Strassenbeleuchtung	Die Fahrgeschwindigkeit stieg mit zunehmender Intensität der Beleuchtung (Licht bei Tag und Nacht mit/ohne Strassenbeleuchtung). Zur Berechnung der Effektstärke sind nicht genügend Informationen vorhanden.	P

Bassani & Mutani (2012)	7'433	K	Fahrgeschwindigkeit	Tageslicht/Beleuchtung	Die Fahrgeschwindigkeit nahm mit zunehmendem Tageslicht tagsüber zu; mit abnehmendem Tageslicht in der Nacht nahm die Fahrgeschwindigkeit ebenfalls zu. Die Effektgrösse wurde in drei separaten Regressionen mit Daten für sonnige Tageszeit, bewölkte Tageszeit und Nachtzeit berechnet ($r = -3,40 - 6,18$).	P +
De Bellis et al. (2018)	1.2 Mio.	K	Geschwindigkeitsüberschreitung	Tageslicht/Beleuchtung	Die Geschwindigkeitsüberschreitungen nahmen mit abnehmender Beleuchtungsstärke zu ($\eta^2 = 0.02$).	N
Edwards (1999)	4.8 Mio.	K	Fahrgeschwindigkeit	Tageslicht/Beleuchtung	Die Fahrgeschwindigkeit verringerte sich bei schlechterem Wetter (d. h. bei Regen/Nebel im Vergleich zu schönem Wetter). Zur Berechnung der Effektstärke sind nicht genügend Informationen vorhanden.	P
Owens, Wood, & Carberry (2010)	14	E	Fahrgeschwindigkeit, wahrgenommene Fahrgeschwindigkeit, Bremsweg, Anpassung der Fahrgeschwindigkeit	Kontrast	Die Fahrgeschwindigkeit nahm mit abnehmendem Kontrast ab. Die Geschwindigkeitsanpassung war bei niedrigem Kontrast langsamer ($\eta^2 = 0.38 - 0.75$). Der Kontrast hatte keinen Einfluss auf die wahrgenommene (berichtete) Fahrgeschwindigkeit oder den Bremsweg.	
Wood, Isoardi, Black, & Cowling (2018)	14	E	Fahrgeschwindigkeit, Erkennungsweiten bei Nacht, Reaktionszeit	LED-Strassenleuchte (Dim-Level: 25 %, 50 %, 75 %, 100 %)	Die Fahrgeschwindigkeit unterschied sich nicht zwischen den verschiedenen Strassenbeleuchtungsstufen. Die Erkennungsweiten bei Nacht und die Reaktionszeit nahmen mit zunehmender Strassenbeleuchtung zu ($d = 0.78 - 0.88$).	

Anm. QE = Quasi-Experimentell, E = Experimentell, K = Korrelativ; P = Positiv, N = Negativ, P+N = tagsüber positiv, nachts negativ

2.2 Der kontroverse Effekt von Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit

Verschiedene Forschungsbereiche, darunter die Wahrnehmungsforschung und die Verkehrspsychologie, haben den Einfluss der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit

untersucht, und zwar sowohl im Rahmen von korrelativen als auch experimentellen Designs im Labor und Feld. Die empirische Evidenz ist jedoch widersprüchlich.

Einige Studien deuten auf einen positiven Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit hin und stellen fest, dass eine geringere Leuchtdichte mit einer verringerten Fahrgeschwindigkeit einhergeht (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Brooks et al., 2011; Owens et al., 2010; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012; Wood et al., 2018). Mehrere Fahrsimulationen deuten darauf hin, dass Fahrzeuglenkende ihre Fahrgeschwindigkeit reduzieren, wenn die Leuchtdichte verringert wird (Brooks et al., 2011; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012). Ebenso zeigen korrelative Feldstudien, dass die Fahrgeschwindigkeit abnimmt, wenn die Leuchtdichte beispielsweise durch Einbruch der Dunkelheit oder ungünstige Witterungsbedingungen verringert wird (Brooks & Rafat, 2015; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998).

Andere Studien weisen auf einen negativen Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit hin und stellen fest, dass eine geringere Leuchtdichte zu einer höheren Fahrgeschwindigkeit führt (Anstis, 2003; Blakemore & Snowden, 1999; Brooks et al., 2011; de Bellis et al., 2018; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982). Kontrollierte Laboruntersuchungen legen nahe, dass Fahrzeuglenkende ihre Fahrgeschwindigkeit erhöhen, wenn die Leuchtdichte verringert wird (Brooks & Rafat, 2015; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998). Ebenso zeigt eine korrelative Feldstudie, dass die Fahrgeschwindigkeit zunimmt, wenn die Beleuchtungsstärke aufgrund von Umweltbedingungen wie Tageszeit und Wetter reduziert wird (de Bellis et al., 2018).

Neben Studien, die auf einen positiven oder negativen Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit hinweisen, gibt es wiederum Studien, die zeigen, dass es gar keinen oder einen nicht-linearen Effekt gibt (Fotios & Gibbons, 2018; Owens et al., 2010, 2018).

In Bezug auf die Operationalisierung der Leuchtdichte der hier zitierten Forschungsarbeiten ist es wichtig zu beachten, dass einige der Arbeiten den Kontrast (und nicht die Leuchtdichte) untersuchen. Der Kontrast ist das Verhältnis der Leuchtdichte für dunkle versus helle Oberflächen. Eine Änderung der Leuchtdichte beeinflusst die Kontrastsensitivität des Menschen. Die Kontrastsensitivität ist in Situationen mit niedriger Leuchtdichte schlechter als in Situationen mit hoher Leuchtdichte (Wood, 2020; Owens et al., 2007). Da eine Änderung der Leuchtdichte immer mit einer Änderung der Kontrastempfindlichkeit einhergeht, erscheint es sinnvoll, hier auch die Literatur über den Effekt des Kontrasts auf die Fahrgeschwindigkeit zu berücksichtigen.

2.3 Evidenz für einen positiven Effekt

Fahrsimulationen, die die Leuchtdichte manipulieren, legen nahe, dass Fahrzeuglenkende ihre Fahrgeschwindigkeit reduzieren, wenn die Leuchtdichte und der Kontrast niedrig sind (Brooks et al., 2011; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012). Ähnliche Ergebnisse sind aus Feldstudien hervorgegangen, in denen Kontrast-, Nebel- und Beleuchtungsstärken manipuliert wurden, z. B. durch Nachteinbruch und schlechtes Wetter. Konkret wurden hier positive Effekte der Kontrast- und Beleuchtungsstärken, bzw. negative Effekte der Nebelstärke auf die Fahrgeschwindigkeit gefunden (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Edwards, 1999; Lundkvist & Ihlström, 2014; Owens et al., 2010). Auch in einem Feldexperiment fuhren die Fahrzeuglenkenden langsamer, wenn der Kontrast durch Streufilter auf der Windschutzscheibe und den Seitenscheiben reduziert wurde. Interessanterweise wurden die verbalen Geschwindigkeitsschätzungen der Fahrzeuglenkenden jedoch durch die Kontraststufen nicht beeinflusst (Owens et al., 2010).

Die Grösse des positiven Effektes der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit variiert stark zwischen den hier beschriebenen Studien (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Edwards, 1999; Lundkvist & Ihlström, 2014; Owens et al., 2010). Während in einer Studie die Fahrzeuglenkenden ihre Geschwindigkeit von 58 km/h im Klarsichtzustand auf 49 km/h im kontrastverminderten Zustand reduzierten, fand man in einer anderen Studie eine

Abnahme von 64 km/h im Klarsichtzustand auf 62 km/h im Nebelzustand. Bemerkenswert ist hier, dass die Geschwindigkeitsreduktion in beiden Studien nicht ausreichen würde, damit die Fahrzeuglenkenden rechtzeitig bremsen könnten, um eine Kollision zu vermeiden (Owens et al., 2010).

Für den positiven Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit wurden zwei Erklärungen angeführt. Die erste beinhaltet eine Kombination aus kognitiven und wahrnehmungsbezogenen Faktoren und besagt, dass der positive Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit aus der beeinträchtigten Sehleistung in Situationen mit geringer Leuchtdichte resultiert. Wenn die Leuchtdichte abnimmt, nimmt auch die Sehleistung ab (Boyce & Rea, 1987). Eine gute Sehleistung ist jedoch erforderlich, um Ziele zu erkennen, den Bremsweg genau abzuschätzen und somit die Fahrgeschwindigkeit früh genug zu reduzieren (Fotios & Gibbons, 2018). Wie Fahrzeuglenkende auf beeinträchtigte Sehleistung reagieren, kann durch allgemeine Geschwindigkeitsadaptionsmodelle vorhergesagt werden. Eines der Modelle deutet etwa darauf hin, dass eine beeinträchtigte Sehleistung die Fahrzeuglenkenden veranlasst, die Geschwindigkeit zu reduzieren, um das individuelle «Angstniveau» aufrechtzuerhalten und riskante Situationen zu umgehen (Ni et al., 2010; Taylor, 1964). Es wird angenommen, dass das Angstniveau durch die wahrgenommene Unfallwahrscheinlichkeit bestimmt wird (Wilde, 1982).

Daneben gibt es eine zweite, wahrnehmungsbezogene Erklärung für den positiven Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit. Nach dieser Erklärung überschätzen die Fahrzeuglenkenden ihre Geschwindigkeit, wenn die Leuchtdichte abnimmt, was in reduzierter Geschwindigkeit resultiert (Brooks et al., 2011; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012). Es ist zu beachten, dass diese Erklärung zutrifft, wenn der Kontrast ungleichmässig reduziert wird, aber nicht, wenn der Kontrast gleichmässig über das Gesichtsfeld reduziert wird und von der Entfernung der Objekte im Gesichtsfeld abhängt. Kontrastverminderungen sind typischerweise bei weit entfernten Objekten stärker ausgeprägt als bei nahen Objekten. Da Situationen mit geringer Leuchtdichte das fokale Sehen des Fahrzeuglenkenden (d. h. visuelle Informationen, die aus der Mitte des Gesichtsfeldes gesammelt werden), aber nicht das Sehen in der Umgebung (d. h. Informationen über die Bewegung der umgebenden Objekte und über sich selbst) beeinträchtigen, wird die Geschwindigkeit entfernterer Objekte überschätzt (Pretto et al., 2012). Dies wiederum veranlasst Fahrzeuglenkende ihre Geschwindigkeit zu reduzieren.

2.4 Evidenz für einen negativen Effekt

Eine andere Reihe von Forschungsergebnissen legt nahe, dass eine niedrigere Leuchtdichte nicht mit reduzierter, sondern mit erhöhter Fahrgeschwindigkeit im Zusammenhang steht (Anstis, 2003; Blakemore & Snowden, 1999; Brooks et al., 2011; de Bellis et al., 2018; Herd et al., 1980; Horwill & Plooy, 2008; Leibowitz et al., 1998; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982). Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen Leuchtdichte-, Nebel- und Kontrastwerten deuten darauf hin, dass Fahrzeuglenkende – ohne sich dessen bewusst zu sein – schneller fahren, wenn die Leuchtdichte- und Kontrastwerte niedrig sind und/oder Nebel herrscht (Brooks & Rafat, 2015; Horwill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998). In einem Experiment mit simuliertem Nebel wurden die Fahrzeuglenkenden bspw. aufgefordert, mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu fahren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeuglenkenden bei Nebel ~10 km/h schneller fahren als ohne Einschränkungen (Snowden et al., 1998). Im gleichen Sinne zeigte eine Korrelationsanalyse eines Datensatzes von 1.2 Millionen Fahrzeugbewegungen, dass die Fahrgeschwindigkeit zunahm, wenn die Beleuchtungsstärke aufgrund von Umweltbedingungen abnahm. Konkret wurde eine Verringerung der Beleuchtungsstärke um 100 lx mit einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit einer Geschwindigkeitsübertretung um 0.59 % in Verbindung gebracht (de Bellis et al., 2018).

Für den negativen Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit wurden zwei wahrnehmungsbezogene Erklärungen diskutiert. Nach der ersten führen niedrige

Leuchtdichten zu einer Beeinträchtigung der Objekterkennung, d. h. die Objekte scheinen weiter entfernt zu sein, sodass die Fahrzeuglenkenden länger brauchen, um solche Objekte auf der Strasse zu erkennen. Dies hat wiederum eine verzögerte Reduktion der Geschwindigkeit zur Folge (Buchner et al., 2006; Cavallo et al., 2001; Fotios et al., 2018; Kang et al., 2008).

Nach der zweiten Erklärung führt eine niedrige Leuchtdichte dazu, dass die Fahrzeuglenkenden Fahrszenen als langsamer wahrnehmen, was sie dazu veranlasst, ihre eigene Fahrgeschwindigkeit zu erhöhen (Brooks & Rafat, 2015; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998); ein Phänomen, das als Thompson-Effekt bekannt ist (Thompson, 1982). Während anfängliche Studien zum Thompson-Effekt abstrakte Objektstimuli wie sich bewegende Punkte oder Quadrate verwendeten (Anstis, 2003), wurden neuere Untersuchungen in realistischeren Umgebungen durchgeführt (Owens et al., 2018). Wichtig ist, dass sich diese Forschungslinie auf den Einfluss der Kontrast- oder Leuchtdichte-Reduktion auf die Objektbewegung und nicht explizit auf die Eigenbewegung konzentriert hat. Daher beantwortet diese Forschung nicht die Frage, ob Fahrzeuglenkende auch ihre eigene Geschwindigkeit (im Vergleich zur Geschwindigkeit eines anderen Fahrzeugs) als langsamer wahrnehmen, wenn die Leuchtdichte niedrig (vs. hoch) ist. Neuere Untersuchungen, die zwischen Objekt- und Eigenbewegung unterscheiden, haben gezeigt, dass der Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit negativ für die Objektbewegung, aber nicht-linear für die Eigenbewegung ist (Owens et al., 2018).

2.5 Evidenz für einen nicht-linearen Effekt

Die Wahrnehmungsforschung liefert auch Hinweise dafür, dass der Effekt von Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit nicht-linear sein könnte. Konkret legen Studien nahe, dass eine Erhöhung der Leuchtdichte die Sehleistung bei einem niedrigen Leuchtdichte-Niveau erhöht, aber bei hohem Leuchtdichte-Niveau keine signifikante Verbesserung bringt (Boyce & Rea, 1987; Fotios & Gibbons, 2018). Fahrsimulationen untermauern diese Idee eines nicht-linearen Zusammenhanges von Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit. In einer Simulation mit vier Leuchtdichtebedingungen (Bereich: 21-42 cd/m²) empfanden die Studienteilnehmenden in den Bedingungen mit niedrigerer Leuchtdichte ihre eigene Fahrgeschwindigkeit bei höheren Geschwindigkeiten (56 und 72 km/h) als langsamer, bei niedrigeren Geschwindigkeiten (24 km/h) jedoch als schneller; bei einer moderaten Geschwindigkeit (40 km/h) entsprach die wahrgenommene Geschwindigkeit in etwa der tatsächlichen Geschwindigkeit (Owens et al., 2018). Es bleibt jedoch unklar, ob sich diese niedrigere versus höhere Wahrnehmung der eigenen Geschwindigkeit auf die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit auf realen Strassen übertragen lässt (Owens et al., 2010; Snowden et al., 1998).

2.6 Erklärungen für die gemischten Forschungsergebnisse

2.6.1 Eigene Bewegung vs. Bewegung von Objekten

Ein Grund für die gemischten Forschungsergebnisse mag die mangelnde Differenzierung zwischen Objekt- und Eigenbewegung in einigen Studien sein – es scheint, dass sich der Effekt der Leuchtdichte auf die Objektbewegung von dem auf die Eigenbewegung unterscheidet (Owens et al., 2018). Um diese Wahrnehmungsunterschiede erklären zu können, gilt es zu unterscheiden, dass Objekt- und Eigenbewegung auf zwei unterschiedlichen visuellen Mechanismen beruhen: (1) dem fokalen Sehen, das Zapfenzellen erfordert und visuelle Erkennung sicherstellt, und (2) dem peripheren oder Umgebungssehen, das Stäbchenzellen erfordert und die Wahrnehmung von Fortbewegung und Geschwindigkeit beeinflusst (Gibb et al., 2016). In Situationen mit geringer Leuchtdichte produzieren die Zapfenzellen kein Signal mehr und die

Stäbchenzellen übernehmen die Verarbeitung der eingehenden visuellen Informationen. Infolgedessen ist das fokale Sehen der Fahrzeuglenkenden typischerweise selektiv beeinträchtigt, d. h. die Objekterkennung verschlechtert sich. Gleichzeitig bleibt das Umgebungssehen unbeeinträchtigt, d. h. die räumliche Orientierung und die Fähigkeit, die eigene Geschwindigkeit wahrzunehmen, bleiben erhalten. Im Einklang mit dieser Hypothese der selektiven Beeinträchtigung gibt es zahlreiche Hinweise darauf, dass die Leuchtdichte die Objektbewegung, nicht aber die Eigenbewegung, beeinflusst. Eine Fahrsimulationsstudie zeigte, dass eine Manipulation der Kontrastwerte die Einschätzung der Fahrzeuglenkenden bezüglich (Eigen-)Geschwindigkeit oder Bremsweg nicht verändert (Owens et al., 2010). Im Gegensatz dazu deuten Untersuchungen darauf hin, dass der negative Effekt der Leuchtdichte auf die Geschwindigkeit nicht nur für die Objekt-, sondern auch für die Eigenbewegung gilt, d. h., dass es auch einen negativen Effekt der Leuchtdichte auf die Eigenbewegung gibt. Eine Studie fand, dass Fahrzeuglenkende in einem Fahrsimulator langsamere (Selbst-)Geschwindigkeiten bei reduziertem Kontrast berichteten (Snowden et al., 1998). Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Fahrzeuglenkenden in dieser Studie eher die Objektbewegung als die Eigenbewegung wahrnahmen (z. B. weil sie das Display des Simulationsgeräts wahrnahmen und weil die Studie keine Weitfeldsimulation verwendete, die zur Wahrnehmung der Eigenbewegung erforderlich ist; Horswill & Plooy, 2008; Owens et al., 2018). Neuere Simulationen, die diese Einschränkung durch die Verwendung einer Weitfeldsimulation in einem vollständig abgedunkelten Raum beheben, helfen, die inkonsistenten Effekte der reduzierten Leuchtdichte auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung besser zu verstehen (Owens et al., 2018).

Da die Richtung des Effektes der Leuchtdichte auf die Geschwindigkeit vom Geschwindigkeitsbereich abhängig zu sein scheint, sind zwei Forschungsrichtungen für die Zukunft unerlässlich. Zum einen ist Laborforschung erforderlich, um die Mechanismen besser zu verstehen, die dem Effekt der Leuchtdichte auf die Objekt- und Eigenbewegung über einen weiten Bereich von Leuchtdichte- und Geschwindigkeitsstufen zugrunde liegen, und um zu testen, wie sich die Wahrnehmung von Objekt- und Eigenbewegung auf die tatsächliche Geschwindigkeit auswirkt. Zum anderen ist Feldforschung erforderlich, um aussagekräftige Implikationen für die Strassenbeleuchtung abzuleiten. Da der Einfluss der Leuchtdichte auf Objekt- und Eigenbewegung bei Fahrgeschwindigkeiten über 56 km/h besonders ausgeprägt zu sein scheint (Owens et al., 2018), ist es sinnvoll, den Leuchtdichte-Fahrgeschwindigkeits-Effekt in Strassen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 50 km/h und höher experimentell zu testen.

2.6.2 Methodische Limitationen

Es lassen sich drei methodische Gründe für die widersprüchlichen Muster der Ergebnisse zum Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit identifizieren. Erstens wurde in der Vergangenheit hauptsächlich im Labor geforscht (Blakemore & Snowden, 1999, 2000; Brémond et al., 2016; Brooks et al., 2011; Brooks & Rafat, 2015; Broughton et al., 2007; Caro et al., 2009; Horswill & Plooy, 2008; Kemeny & Panerai, 2003; Owens et al., 2018; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012; Snowden et al., 1998). Den Experimenten in Fahrsimulatoren mangelt es trotz fortlaufender Weiterentwicklung immer noch an «perzeptivem Realismus» (Brémond et al., 2016). Dies ist problematisch, um die Übertragbarkeit in die reale Welt sicherzustellen. Es ist jedoch schwierig, realistische dreidimensionale Fahrsituationen zu simulieren, mit geringen mesopischen (zwischen 5×10^{-3} und 5 cd/m^2) und skotopischen Leuchtdichten (zwischen 10^{-6} und $5 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$), die für Nachtfahrten charakteristisch sind (Brémond et al., 2016). Angesichts der Tatsache, dass sich die Sehleistung zwischen Tag und Nacht unterscheidet (photopischer Bereich zwischen 5 und 10^4 cd/m^2), scheint es besonders wichtig zu sein, den Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit bei Nacht zu untersuchen, da mit dieser zeitlichen Periode grössere Risiken verbunden sind (Brémond et al., 2016).

Zweitens ist die Leuchtdichte in den erwähnten Studien auf verschiedene Weise operationalisiert worden. Die Leuchtdichte ist ein Mass für die von Fahrzeuglenkenden

wahrgenommene Helligkeit, während die Beleuchtungsstärke dem Licht entspricht, das die Strasse erreicht. Daher kann sich die Leuchtdichte erheblich von der Beleuchtungsstärke unterscheiden (Fotios et al., 2018). In den meisten früheren Untersuchungen wurden Näherungsvariablen wie Beleuchtungsstärke, Nebel (d. h. tiefliegende Wolken, die eine Sichtweite unter 1'000 m verursachen) oder Kontrast (d. h. Unterschied in der Helligkeit eines Objekts und seines Hintergrunds) verwendet (Anstis, 2003; Bassani et al., 2016; Blakemore & Snowden, 1999, 2000; de Bellis et al., 2018; Edwards, 1999; Fotios & Gibbons, 2018; Kim et al., 2017; Owens et al., 2010; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982). Obwohl Vorsicht bei der Gleichsetzung geringer Leuchtdichte mit geringer Beleuchtungsstärke, hohem Nebel oder geringem Kontrast geboten ist, wird diese Einschränkung oft nicht erwähnt (de Bellis et al., 2018; Fotios & Gibbons, 2018; Owens et al., 2018).

Drittens haben die meisten Forschungsarbeiten im Feld Korrelationsdesigns verwendet (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Bassani & Mutani, 2012; de Bellis et al., 2018; Edwards, 1999). Experimentelle Designs zum Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit, welche es erlauben würden, kausale Zusammenhänge zu detektieren, sind selten (Owens et al., 2010). Es ist daher schwierig festzustellen, ob eine Änderung der Leuchtdichte tatsächlich eine Änderung der realen Fahrgeschwindigkeit bewirkt. Dies wird noch deutlicher, wenn man bedenkt, dass die meisten experimentellen Feldstudien kleine und teils ungenügende Stichprobengrößen verwenden und daher eine zu kleine statistische Power (die Wahrscheinlichkeit, dass ein Effekt entdeckt wird, sofern der Effekt auch tatsächlich existiert) aufweisen. Angesichts dieser Probleme und der von uns beschriebenen methodischen Einschränkungen erscheint experimentelle Feldforschung mit grossen Stichproben besonders sinnvoll (de Bellis et al., 2018).

2.7 Hypothesen

Ausgehend von der früheren Forschung war das primäre Ziel dieses Forschungsprojektes die Überprüfung, ob eine Abnahme der Beleuchtungsstärke, bzw. der Leuchtdichte zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit führt. Konkret wurden folgende Hypothesen getestet:

Leuchtdichte-Hypothese: Eine Abnahme der gemessenen Leuchtdichte führt zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit.

Die Fahrgeschwindigkeit wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Ein solcher Faktor ist die Strassenoberfläche. Unsere Annahme ist, dass Fahrzeuglenkende langsamer fahren, wenn die Strassenoberfläche «nicht vorteilhaft», d.h. nass und schneebedeckt ist, bzw. schneller fahren, wenn die Strassenoberfläche «vorteilhaft», d.h. trocken ist. Weiter kann die Fahrgeschwindigkeit durch die Frequenz beeinflusst werden, mit der die Verkehrsteilnehmenden eine Strasse befahren. Unsere Annahme ist, dass höhere Vertrautheit mit einer Verkehrsumgebung die wahrgenommene Sicherheit erhöht, was zu einer höheren Geschwindigkeit führt. Zusätzlich werden deshalb die folgenden Hypothesen getestet:

Strassenoberflächen-Hypothese: Je vorteilhafter die Bedingungen der Strassenoberfläche (d. h., je weniger Feuchtigkeit auf der Strassenoberfläche), desto höher die Fahrgeschwindigkeit.

Frequenz-Hypothese: Je öfter Verkehrsteilnehmende eine Strasse benutzen, desto höher die Fahrgeschwindigkeit.

3 Forschungsmethoden

3.1 Stichprobe, Versuchsplan und Vorgehen

Das Feldexperiment wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten vom 5. Dezember 2019 bis zum 26. Mai 2020 auf drei Strassen in Zürich durchgeführt.

Während des Feldexperiments manipulierten wir die Beleuchtungsstärke (siehe Tab. 2), indem wir das Niveau der Strassenbeleuchtung über vier Beleuchtungsstärken entsprechend den internationalen Strassenbeleuchtungsklassen ([SNR 13201-1](https://shop.snv.ch/Technische-Regel/Strassenbau/SNR-13201-1.html); <https://shop.snv.ch/Technische-Regel/Strassenbau/SNR-13201-1.html>) variierten.

Tab. 2 Beleuchtungsklassen nach C-Klasse

Beleuchtungsklasse	Beleuchtungsstärke (lx)
C2	20
C3	15
C4	10
C5	7.5

Darüber hinaus wurde ein speziell entwickeltes Messsystem in den Experimentalstrassen installiert, um die für die Hypothesentestung notwendigen Variablen zu messen (siehe Kapitel 3.2.2).

Die Auswahl der Strassen erfolgte in Absprache mit der BK, insbesondere mit der Dienstabteilung Verkehr (DAV) und den Elektrizitätswerken der Stadt Zürich (EWZ). Die Strassen sollten über die Stadt Zürich verteilt sein und wurden anhand geografischer (z. B. lange, ebene Strassenstrecke, keine Hindernisse) und verkehrstechnischer Gründe sowie aus Machbarkeitsgründen (z. B. Möglichkeit der Installation einer LED-Strassenbeleuchtung) ausgewählt. Die Strassen werden in Abb. 3 bis Abb. 5 beschrieben.

Emil-Klöti-Strasse (EK)

Länge des manipulierten Strassenabschnitts: ca. 1'100 m
Geschwindigkeitsbegrenzung: 60 km/h
Längen-/Breitengrad des Messpunktes: 8,516651 / 47,403539



Abb. 3 Ansicht Emil-Klöti-Strasse.

Mythenquai (MQ)

Länge des manipulierten Strassenabschnitts: ca. 1'000 m
Geschwindigkeitsbegrenzung: 50 km/h
Längen-/Breitengrad des Messpunktes: 8,534116 / 47,352863



Abb. 4 Ansicht Mythenquai.

Duttweilerbrücke (DB)

Länge des manipulierten Strassenabschnitts: ca. 600 m
Geschwindigkeitsbegrenzung: 50 km/h
Längen-/Breitengrad des Messpunktes: 8.509346 / 47.387631



Abb. 5 Ansicht Duttweilerbrücke

Abb. 6 gibt einen Überblick über die drei Strassen und ihre Lage in der Stadt Zürich, sowie die Länge der jeweiligen Manipulationsstrecke, d. h., dass auf der eingezeichneten Länge der jeweiligen Strasse die Beleuchtungsstärke im Messzeitraum variiert wurde.

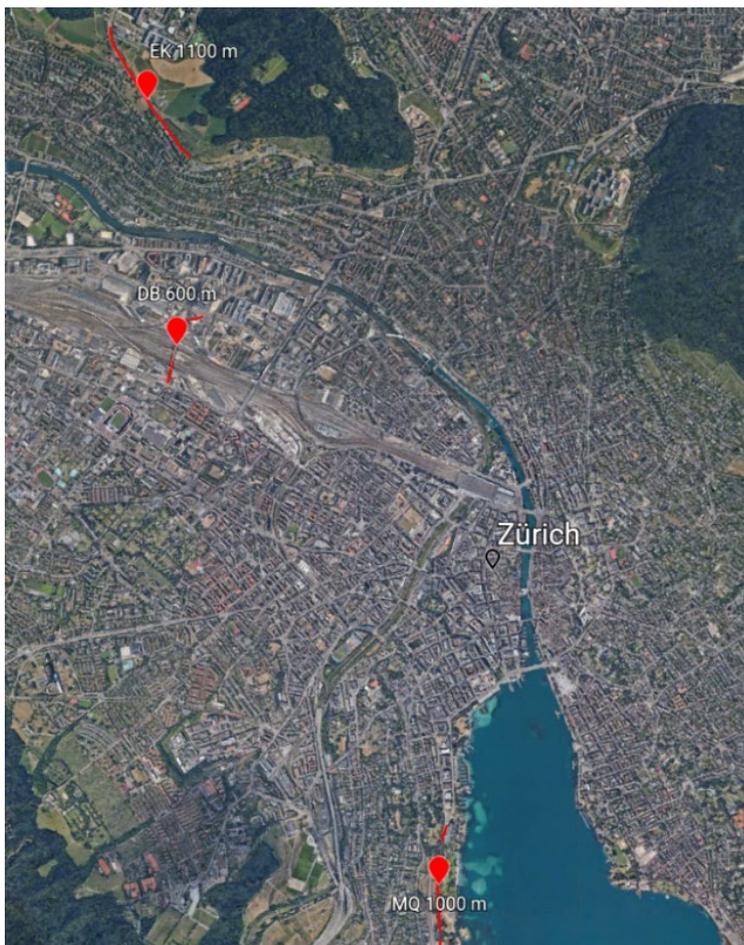


Abb. 6 Übersicht über die drei untersuchten Strassen in Zürich.

Um das Niveau der Strassenbeleuchtung zu variieren und vergleichbare Lichtverhältnisse zu gewährleisten, hat das EWZ auf den genannten Strassen LED-

Strassenbeleuchtungssysteme installiert. Die Umstellung auf LED war unabhängig von diesem Forschungsprojekt geplant, allerdings zeitlich so koordiniert, dass in der Testperiode überall LED-Systeme vorhanden waren.

Die LED-Strassenbeleuchtung sowie die Messsysteme schalteten sich automatisch ein bzw. aus, sobald die Beleuchtungsstärke in der Umgebung unter/über 100 lx fiel/stieg. Mit anderen Worten, die Start- und Endzeiten der Manipulation und der Messungen waren dynamisch und hingen vom jahreszeitlichen Umgebungslicht und vom Wetter ab. Die Beleuchtungsstärke der LED-Leuchten wechselte an jeder Strasse jeden Tag in einem Zeitfenster von 20 Minuten um Mitternacht. Das Feldexperiment beschränkte sich auf die Stunden relativer Dunkelheit, basierend auf der bürgerlichen Dämmerung (die Zeit direkt vor dem Sonnenaufgang bzw. nach dem Sonnenuntergang, in der die Sonne maximal 6° unter dem Horizont steht). Die vier Beleuchtungsstärken (C2-C5) wurden über die vier Strassen (inkl. UT) und über den Experimentalzeitraum mit folgenden Einschränkungen vollständig randomisiert: (1) zur gleichen Zeit herrschte auf jeder Strasse eine andere Beleuchtungsstärke; (2) die Kombination der Beleuchtungsstärken zwischen den Strassen war pro Nacht unterschiedlich; (3) die Kombination der Beleuchtungsstärken in zwei aufeinanderfolgenden Nachthälften war unterschiedlich.

Die Messsysteme (siehe Kapitel 3.2.2) ermöglichten die Aufzeichnung von Fahrzeugbewegung, Fahrgeschwindigkeit, Leuchtdichte, anonymisierte Fahrzeugkennzeichen, Bilder des Strassenzustandes sowie verschiedene Wetterdaten (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit usw.). Aufgrund der Natur des Feldexperimentes ist es wahrscheinlich, dass sowohl einmalige Fahrzeuglenkende als auch Fahrzeuglenkende, die in einer Nacht oder mehreren Nächten wiederholt auf einer oder mehreren der Experimentalstrassen fahren (z. B. Pendler), aufgezeichnet wurden.

Während des Feldexperimentes wurde eine zweistufige Datenerhebung in Form einer Umfrage mit einer Teilstichprobe von Fahrzeuglenkenden durchgeführt. Die Fahrzeuglenkenden wurden in Verbindung mit offiziellen Polizeikontrollen an sieben Abenden (zwischen 19 und 22 Uhr), jeweils während zweier Stunden, rekrutiert. Die Teilnahme an der Umfrage war freiwillig. An jeder der drei Strassen gab es mindestens zwei Kontrollen. Für jede Rekrutierung wurden fünf bis sechs geschulte Interviewer*innen eingesetzt, von denen jede*r nach einer routinemässigen Polizeikontrolle und nach Einholung der Zustimmung der Fahrzeuglenkenden vier Fragen stellte. Nach diesen Kurzinterviews wurde den Fahrzeuglenkenden ein Flyer mit einem Link für eine zusätzliche Online-Umfrage ausgehändigt. Sämtliche Fragen finden sich in Kapitel 3.2.2. Als Incentivierung wurde den Fahrzeuglenkenden beim zusätzlichen Ausfüllen einer Online-Umfrage ein Gutschein im Wert von CHF 30.- angeboten.

Das Feldexperiment sowie die Umfrage wurden von der Ethikkommission der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Universität Bern, Schweiz, genehmigt (Registrierungsnummer: 042019).

3.2 Material

Nachfolgend werden die Messinstrumente mit allen gemessenen Variablen beschrieben. Eine tabellarische Kurzübersicht über die Messgeräte sowie die gemessenen Variablen finden sich in Tab. 3.

3.2.1 Strassenbeleuchtung

Die Beleuchtungsstärke wurde durch das EWZ (Kontakt: André Gmür und Christoph Girsperger) mithilfe des LED-Strassenbeleuchtungssystems (Esave sIControl; <https://www.esaveag.com/de/?r=1>) manipuliert. Die vier Beleuchtungsstärken entsprechen den lx-Angaben der Strassenbeleuchtungsklassen C2-C5 der internationalen Strassenbeleuchtungsnorm DIN EN 13201-2 (siehe Tab. 2), die auf europäischen Strassen üblich sind (Fotios & Gibbons, 2018).

3.2.2 Messgeräte

Das an den Strassen montierte System bestand aus individuellen Geräten zur Messung von Fahrgeschwindigkeit (Radar), Leuchtdichte (Leuchtdichtekamera), Kennzeichen-Hash (ANPR), Strassenzustand (Webcam) und Wetter (Wetterstation). Diese Geräte sind Eigentum der Firma Swisstraffic, die auch den Aufbau überwachte. Swisstraffic führte zudem die Verlaufskontrollen der Geräte (z. B. Austausch von Batterien wo nötig) sowie das Sichern der aufgezeichneten Daten durch.

Radargerät

TMS-SA-Radar (siehe Abb. 7) (<https://www.irdinc.com/pcategory/counters-classifiers/icom-tmssa-nonintrusive-traffic-counter.html>) von Icoms Detections SA zur Messung/Berechnung der folgenden Variablen: (1) Zeitstempel, (2) Fahrgeschwindigkeit (km/h; gemessen), (3) Verkehrsaufkommen (Fahrzeuge pro Stunde, vph; berechnet) und (4) Fahrzeuglänge



(m; gemessen).

Abb. 7 TMS-SA-Radar.

Leuchtdichtekamera

t/LUM-A1-Leuchtdichtekamera (siehe Abb. 8) (<https://www.tunnelsicherheit.at/product/tlum-leuchtdichte-kamera/>) von Tunnelsicherheit.at zur Aufzeichnung der Leuchtdichte (cd/m^2) bei einer Frequenz einer Messung pro Sekunde (1 Hz).

Die folgenden Messwerte wurden aufgezeichnet: (1) Zeitstempel und (2) Leuchtdichte (Millivolt; erlaubt Umrechnung in cd/m^2).



Abb. 8 Leuchtdichtekamera.

ANPR-Kamera

Hikvision Automatic Number Plate Recognition (ANPR) Ultra-Light-Bullet Kamera (siehe Abb.) (<https://us.hikvision.com/en/products/cameras/network-camera/smart-series/specialty/license-plate-recognition/2-mp-ultra-low>) zur Aufzeichnung der Kennzeichen-Hash aller vorbeifahrenden Fahrzeuge.

Die ANPR-Kamera verwendet einen Hash-Mechanismus, um anonymisierte Identifikatoren für jedes Fahrzeug bereitzustellen. In Übereinstimmung mit den Datenschutzbestimmungen ist es nicht möglich, auf die eigentlichen Kennzeicheninformationen zuzugreifen. Die folgenden Messwerte wurden aufgezeichnet: (1) Zeitstempel, (2) Kennzeichenhash und (3) Fahrtrichtung.



Abb. 9 ANPR-Kamera.

Webcam

Brinno TLC200Pro Webcam (siehe Abb.) (<https://brinno.com/de/time-lapse-camera/TLC200Pro>) zur Dokumentation des Strassenzustands pro Minute.



Abb. 10 Webcam (Gerät in der Mitte).

Die folgenden Variablen wurden aufgezeichnet: (1) Zeitstempel und (2) Bild der Strassenoberfläche im PNG-Format.

Wir verwendeten einen maschinellen Lernalgorithmus, um alle Bilder in eine von vier Strassenzuständen zu kategorisieren: (1) trocken, (2) etwas nass, (3) nass und (4) starker Regen (siehe Abb.).



Abb. 11 Kategorien des Strassenzustands (klassifiziert durch maschinelles Lernen).

Wetterstation

Libelium Waspnote Plug & Sense!-Wetterstation (siehe Abb.) (<https://www.libelium.com/iot-products/plug-sense/>) zur Registrierung folgender Wetterindikatoren alle 15 Minuten: (1) Windgeschwindigkeit (km/h), (2) Windrichtung, (3) Temperatur (°C), (4) Niederschlag (mm) und (5) Luftdruck (hPA).



Abb. 12 Wetterstation.

Die gesammelten Daten wurden u. a. dazu verwendet, um die Gültigkeit und Zuverlässigkeit des maschinellen Lernalgorithmus zu überprüfen und eine kontinuierliche Messung dieser Umweltvariablen zu erhalten.

Beleuchtungsstärke-Kamera

LimeCam von Elektron AG (<https://www.elektron.ch/de/produkte-loesungen/licht/strassenbeleuchtung/lichtmessung/limecam-de>) zur Manipulationskontrolle

Diese wurde am 22. Oktober 2019 auf der EK verwendet, um alle vier C-Klassen (C2-C5) der Beleuchtungsstärke einmalig zu messen.

3.2.3 Anzahl Geräte pro Strasse

Das Setup der Geräte pro Strasse setzte sich aus folgenden Geräten zusammen:

Pro Strasse:

- Zwei Radargeräte (ein Gerät pro Fahrtrichtung)
- Eine Leuchtdichtekamera (in nördlicher Ausrichtung)
- Zwei ANPR-Kameras (ein Gerät pro Fahrtrichtung)
- Eine Webcam (in Richtung Strassenoberfläche ausgerichtet)

Zusätzlich wurden an der EK und UT jeweils eine Wetterstation angebracht.

3.2.4 Umfrage

Bei der Umfrage wurden den Fahrzeuglenkenden vier Fragen in Form eines Kurzinterviews gestellt. Konkret wurden den Fahrzeuglenkenden die vier folgenden Fragen gestellt:

- 1) Ist Ihnen etwas Aussergewöhnliches auf der Strasse aufgefallen, auf der Sie sich gerade befinden? [ja / nein; wenn ja: Was ist Ihnen aufgefallen?]
- 2) Wie hell war die gerade befahrene Strasse? [1 = überhaupt nicht hell; 7 = sehr hell]
- 3) Wie gut ist Ihre Nachtsicht? [1 = sehr schlecht; 7 = sehr gut]
- 4) Wie alt sind Sie? [in Jahren]

Darüber hinaus erfassten die Interviewer*innen das mutmassliche Geschlecht des/der Fahrzeuglenker*innen, die Anzahl der Personen im Auto und die Fahrzeugmarke.

Nach den Kurzinterviews wurde den Fahrzeuglenkenden jeweils ein Flyer mit einem Link für eine zusätzliche Online-Umfrage ausgehändigt. Der schematische Ablauf der Umfragen ist in Abb. 13 ersichtlich. Anhand der zusätzlichen Fragen der Online-Umfrage konnten wir uns ein genaueres Bild von der Zusammensetzung der Fahrzeuglenkenden machen. Konkret wurden die folgenden Fragen gestellt:

- 1) Wie weit fahren Sie in einer durchschnittlichen Woche? [km]
- 2) Wann haben Sie Ihren Führerschein erhalten? [Jahr]
- 3) Wie hoch ist die Leistung Ihres Fahrzeugs in kW? [kW]
- 4) Wie oft fahren Sie im Dunkeln? [1 = nie; 7 = sehr oft]

5) Wie gut kennen Sie Zürich? [1 = überhaupt nicht; 7 = sehr gut]

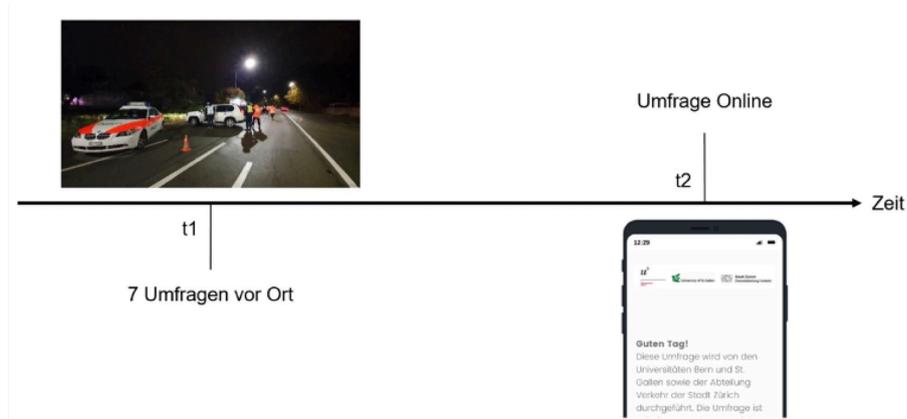


Abb. 13 Schematische Darstellung der Umfrage vor Ort und Online.

Tab. 3 Übersicht über alle manipulierten und gemessenen Variablen

Variablenname	Beschreibung	Manipulation Messung
Feldmessungen: Prädiktoren (Manipulation)		
Beleuchtungsstärke	Strassenbeleuchtung C-Klassen: C2 = 20 lx, C3 = 15 lx, C4 = 10 lx, C5 = 7.5 lx	DIN EN 13201-2 C-Klassen, Manipulation mit Esave sIControl (Esafe AG)
Adjustierte Beleuchtungsstärke	Berechnet auf der Basis der Leuchtdichtemessung: ≥ 1.50 cd/m^2 = adjustiertes C2 Level, $1.00\text{--}1.49 \text{cd/m}^2$ = adjustiertes C3 Level, $0.76\text{--}0.99 \text{cd/m}^2$ = adjustiertes C4 Level, ≤ 0.75 cd/m^2 = adjustiertes C5 Level	t/LUM-A1 Leuchtdichtemet er (tunnelsafety.at)
Feldmessungen: Prädiktoren (gemessene Variablen)		
Leuchtdichte	Das von der Strassenoberfläche reflektierte und von Fahrzeuglenkenden wahrgenommene Licht (cd/m^2)	t/LUM-A1 Leuchtdichtemet er (tunnelsafety.at)
Strassenzustand	Klassifizierung der aufgenommenen Webcam-Bilder mit maschinellem Lernalgorithmus: (1) trocken (Strassenoberfläche vollständig trocken), (2) etwas nass (jedes Anzeichen, dass die Strassenoberfläche nass ist), (3) nass (Strassenoberfläche vollständig nass), (4) starker Regen (Regen deutlich sichtbar,	TLC200 pro Webcam (Brinno)

unabhängig von den
Strassenoberflächenbedingunge
n)

Feldmessungen: Abhängige Variable (gemessene Variable)

Fahrgeschwindigkeit	Gemessene Geschwindigkeit der Fahrzeuge (km/h)	TMS-SA Radar (Icoms Detections SA)
Speeding Index	Gemessene Geschwindigkeit der Fahrzeuge (km/h) kategorisiert in eine binäre Variable, wobei '1' erlaubte Höchstgeschwindigkeits-Überschreitung und '0' keine erlaubte Höchstgeschwindigkeits-Überschreitung kategorisiert. Die Grenzen für diese Kategorisierung wurden mit 65 km/h für die EK und 55 km/h für die DB und MQ festgelegt.	TMS-SA Radar (Icoms Detections SA)
Anzahl Durchfahrten	Anhand der Kennzeichen-Hashes wurde die Anzahl der Durchfahrten (über den gesamten Beobachtungszeitraum) gezählt und jedem Kennzeichen-Hash (d. h. Auto) zugewiesen. Für die vorliegenden Analysen wird die Durchfahrt auf 180 im Beobachtungszeitraum limitiert, da angenommen wird, dass eine höherer Durchfahrtsrate für professionelle Fahrer (ÖV, LKW) spricht.	ANPR Ultra-Light-Bullet Kamera

Feldmessungen: Kovariate (gemessene Variable)

Verkehrsaufkommen	Anzahl 1000 Fahrzeuge pro Experimentalstrasse pro Stunde (aggregiert auf Basis des Auftretens), für die Modelle wurden die Mittelwerte zentriert.	TMS-SA Radar (Icoms Detections SA)
-------------------	---	------------------------------------

Kurzinterview: Prädiktoren (gemessene Variablen)

Aufgefallen	Ist Ihnen auf der Strasse, die Sie gerade befahren haben, etwas Ungewöhnliches aufgefallen?	ja; nein; wenn ja: was
Helligkeit	Wie hell war die Strasse, auf der Sie gerade gefahren sind?	1 = überhaupt nicht hell; 7 = sehr hell
Alter	Wie alt sind Sie?	
Nachtsicht	Wie gut ist Ihre Nachtsicht?	1 = sehr schlecht; 7 = sehr gut
Geschlecht	Geschlecht (des Fahrzeuglenkenden)	Erfasst durch Interviewer*in
Fahrzeuginsassen	Anzahl Personen im Fahrzeug (inklusive fahrzeuglenkende Person)	Erfasst durch Interviewer*in

Fahrzeugmarke	Hersteller des Fahrzeuges	Erfasst durch Interviewer*in
Online-Umfrage (gemessene Variablen)		
Fahrkilometer	Wie weit fahren Sie in einer durchschnittlichen Woche?	km
Führerschein	Wann haben Sie Ihren Führerschein erhalten?	Jahr
Fahrzeugleistung	Wie hoch ist die Leistung Ihres Autos in kW?	kW
Nachtfahrten	Wie oft fahren Sie im Dunkeln?	1 = nie; 7 = sehr oft
Züri-Liebe	Wie gut kennen Sie Zürich?	1 = überhaupt nicht; 7 = sehr gut
Risikofahrverhalten	<p>Risikoreiche Fahrertendenzen «Errors»: Beim Schlangene stehen, um links auf eine Hauptstrasse abzubiegen die Aufmerksamkeit dermassen auf die Hauptstrasse lenken, dass man beinahe in das Auto vor einem fährt; FussgängerInnen nicht bemerken, wenn man von einer Hauptstrasse in eine Seitenstrasse einbiegt; Die Rückspiegel nicht überprüfen vor dem Abbiegen, Spurwechsel, usw.; Auf einer rutschigen Fahrbahn zu schnell bremsen oder beim Schleudern in die falsche Richtung lenken; Beim Rechtsabbiegen beinahe eine Person auf dem Fahrrad anfahren; Das «Vorfahrt gewähren» Schild übersehen und nur knapp eine Kollision mit dem Verkehr verhindern, welcher Vortritt hat; Versuchen jemanden zu überholen, bei dem man nicht bemerkt hat, dass er/sie signalisiert hat, links abzubiegen; Beim Überholen die Geschwindigkeit eines entgegenkommenden Fahrzeuges unterschätzen</p> <p>«Lapses»: Beim Rückwärtsfahren etwas anfahren, das man vorher nicht gesehen hat; Vorhaben nach «A» zu fahren und plötzlich feststellen, dass man auf dem Weg zu «B» ist; Beim Annähern eines Kreisels oder einer Kreuzung in die falsche Fahrbahn kommen; Etwas einschalten (z. B. Scheinwerfer), obschon man etwas Anderes einschalten wollte (z. B. Scheibenwischer); Versuchen von einer</p>	<p>Subskalen des Manchester Driver Behaviour Questionnaire (“errors” and “lapses”, 16 Fragen); 1 = nie; 7 = sehr oft</p>

Verkehrsampel im dritten Gang loszufahren;
 Vergessen, wo man das Auto parkiert hat; Verkehrsschilder missverstehen und die falsche Ausfahrt nehmen; Bemerkten, dass man sich nicht klar an die Strasse erinnert, die man gerade befahren hat

Weitere Variablen (gemessene Variablen)

Strasse	Emil-Klöti-Strasse (EK), Mythenquai (MQ), Duttweilerbrücke (DB)	
Kennzeichen-Hash	Hash-Wert für Kennzeichen der Fahrzeuge zur Anonymisierung	ANPR-Kamera (Hikvision)
Wetter	Messung von fünf zentralen Wetterindikatoren: (1) Windgeschwindigkeit (km/h), (2) Windrichtung, (3) Temperatur (°C), (4) Niederschlag (mm) und (5) Luftdruck (hPA)	Waspnote Plug & Sense! (Libelium)

4 Analyse und deskriptive Ergebnisse

4.1 Analyseplan

Um die Freiheitsgrade der Analyse einzuschränken wurde vor der Datenerhebung der komplette Analyseplan auf dem Open Science Framework ([OSF](https://osf.io/cz2kt/)) präregistriert. D. h., eine schreibgeschützte Kopie des Analyseplans wurde mit Zeitstempel hochgeladen (siehe <https://osf.io/cz2kt/>). In diesem Plan wurde vorab festgehalten, wie wir die Datenaufbereitung sowie die Analyse durchführen werden.

Die detaillierte Beschreibung der Datenbereinigung, der Zusammenführen aller Daten, sowie alle Analyse-Codes sind auf OSF einsehbar. In diesem Bericht beschränken wir uns daher auf die Beschreibung der wichtigsten Datenbehandlungsmassnahmen (siehe Kapitel 4.2) und fokussieren auf die statistischen Modelle, bzw. die Hypothesentestung.

Bevor wir die statistischen Modelle aus dem Analyseplan genau beschreiben, halten wir folgende allgemeine Spezifikationen für das Testen aller Hypothesen fest:

Wir verwenden das konventionelle 5%-Signifikanzniveau ($p < .05$) für das Hypothesentesten und berichten durchgehend Effektstärken.

Wir verwenden für alle Modelle mit gemischten Effekten diagnostische Grafiken, um die Normalitätsannahme zu überprüfen (d. h. wir testen, ob die Modelle normalverteilte Residuen besitzen). Sollte die Normalitätsannahme nicht erfüllt sein, transformieren wir die Daten entsprechend.

4.2 Datenbehandlung und Software

Die für die Hypothesen relevanten Variablen wurden mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Messsystem aufgezeichnet. In diesem Unterkapitel beschreiben wir, wie wir die Rohdaten für die finalen Analysen aufbereitet haben. Sämtliche Daten, eine umfassende Dokumentation der Datenaufbereitung sowie der Code sind auf OSF öffentlich zugänglich.

Für alle Analysen verwenden wir die Statistiksoftware «R» (R Core Team, 2021). Dabei kommen insbesondere folgende R-Pakete zum Einsatz: car (Fox & Weisberg, 2019); keras (<https://keras.rstudio.com>); lme4 (Bates et al., 2015); lmerTest (Kuznetsova et al., 2017); performance (Lüdtke et al., 2021); tidyverse (Wickham et al., 2019).

4.2.1 Dateneingabe

In Tab. 4 wird aufgelistet, wie die im Feld gemessenen Daten für die statistischen Modelle aufbereitet wurden. In der Spalte *Datenaufbereitung und Reinigung* ist zu lesen, mit welchen Massnahmen die Variablen aus dem Rohdatensatz aufbereitet wurden, bevor die aufbereiteten Datensätze zu einem finalen Datensatz zusammengeführt wurden.

Tab. 4 Übersicht über Datenimport und Datenkorrektur der Rohdatensätzen

Zentrale Variable	Erhobene Daten (Einheit)	Datenaufbereitung und Reinigung	Anzahl und Grösse (in MB) Datensätze pro Strasse
Fahrgeschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Zeitstempel Fahrgeschwindigkeit (km/h) 	<ul style="list-style-type: none"> 112 Dateien im csv Format wurden in eine Datei pro Strasse zusammengeführt 	<ul style="list-style-type: none"> DB: 49 (29.4) EK: 27 (13.6) MQ: 36 (35.7)

	<ul style="list-style-type: none"> • Länge (m) • Ausrichtung der Kamera • Bezeichnung der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel in UTC Format konvertiert • Ausrichtung der Kamera wurde in «Nord» bzw. «Süd» kodiert • Korrektur von negativen Geschwindigkeitsmessungen durch umgekehrte Montage zweier Kameras • Korrektur und Zusammenführung von veränderten Kamerabezeichnungen durch Austausch von Kamera auf DB (28.01.2020) • Synchronisierungskorrektur siehe Kapitel 4.2.2 	
Leuchtdichte	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel • Leuchtdichte (Millivolt) • Bezeichnung der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> • 8'043 Dateien im csv Format wurden im Stundentakt automatisiert via E-Mail an einen Server gesendet • Zeitstempel in UTC Format konvertiert • Die Dateien wurden in eine Datei pro Strasse zusammengeführt 	<ul style="list-style-type: none"> • DB: 2658 (56.4) • EK: 2678 (50.0) • MQ: 2698 (54.9)
Kennzeichen-Hash	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel • Hash der Kennzeichen • Ausrichtung der Kamera • Bezeichnung der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> • 55 Dateien im csv Format wurden in eine Datei pro Strasse zusammengeführt • Zeitstempel in UTC Format konvertiert • Ausrichtung der Kamera wurde in «Nord» bzw. «Süd» kodiert 	<ul style="list-style-type: none"> • DB: 17 (29.0) • EK: 18 (30.8) • MQ: 20 (79.3)
Wetter	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel • Messwertbezeichnung • Messwert • Einheit • Bezeichnung der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 Dateien im csv Format wurden in eine Datei zusammengeführt • Zusammenführung und Abgleich unterschiedlicher Dateiformate der Rohdaten • Zeitstempel in UTC Format konvertiert • Extraktion der folgenden Messwerte: Niederschlag (mm), Temperatur (Celsius), Luftdruck (bar), Luftfeuchtigkeit (g/m³), Windstärke (km/h), Windrichtung (Himmelsrichtung) 	<ul style="list-style-type: none"> • EK: 30 (1.5)
Strassenzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel • mpeg Film • Bezeichnung der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> • 315 Filmdateien • Split der Filmdateien in einzelne .jpeg Bilder, 1 Bild pro Minute • Zoom auf den jeweiligen Strassenbelag • Zeitstempel in UTC Format konvertiert • Erstellung von ca. 260'000 Einzelbildern 	<ul style="list-style-type: none"> • DB: 105 (~ 5'000) • EK: 100 (~ 5'000) • MQ: 110 (~ 5'000)

4.2.2 Synchronisierungskorrektur

Jedes der Messgeräte zeichnet die Daten mit eindeutigen, unabhängigen Zeitstempeln auf. Leider mussten wir bei der Analyse feststellen, dass die von Swisstraffic gelieferten Datensätze (siehe Tab. 4) teils markante Abweichungen in den Zeitstempeln zwischen den Geräten aufwiesen. Als Beispiel verwenden wir die MQ. Es zeigt sich hier, dass es eine zeitliche Verschiebung um -258 Sekunden zwischen ANPR-Kamera und Leuchtdichtekamera gibt. In diesem Zeitfenster wurde also die Leuchtdichtemessung 258 Sekunden vor der Kennzeichenmessung eingetragen. Dies wäre im Prinzip eine triviale Verschiebung, die sich einfach für jedes der 19 Geräte abgleichen lassen würde.

Im Verlauf der Analyse wurde jedoch deutlich, dass sich die Grösse der Verschiebung (Offset oder Drift) auch über die Zeit änderte, d. h. der Offset wanderte über die Zeit nach

hinten (wurde also grösser). Dieser Effekt ist in Abb. 14 abgebildet, wobei das Wandern des Offsets der beiden Uhren deutlich zu erkennen ist. Die Differenz beginnt in der ersten Nacht bei -50 Sekunden und erreicht in Nacht 115 einen Offset von -267 Sekunden.

Als dritte Komponente gab es zu verschiedenen Zeitpunkten einen Reset der Uhren einzelner Geräte (was oftmals mit dem Auslesen der Daten durch Swisstraffic zusammenhing). Der Reset ging allerdings nie vollständig auf die Ausgangsposition zurück, sondern war unterschiedlich. Ein Beispiel für einen solchen Zeitsprung ist in Nacht 115 zu sehen, in der der Offset zurück auf 188 Sekunden fällt, um dann final auf 290 Sekunden anzuwachsen. Es stellte sich heraus, dass der Offset in der MQ vergleichsweise gering war; die Bandbreite des Offsets für die EK war -2'800 bis 100 Sekunden und für die DB -50 bis 600 Sekunden.

Obwohl diese Abweichungen klein erscheinen mögen, verunmöglichen sie eine eindeutige Zuordnung der verschiedenen Datenquellen (Leuchtdichte, Geschwindigkeit und Nummernschild). Neben der Zuordnungsproblematik der verschiedenen Geräte zu einem Fahrzeug ergibt sich auch noch die Problematik der Zuordnung der Fahrzeuge zur Manipulation der Beleuchtungsstärke. Es treten also zwei Zuordnungsprobleme auf, die eine signifikante Einschränkung der Aussagekraft der Daten mit sich bringen.

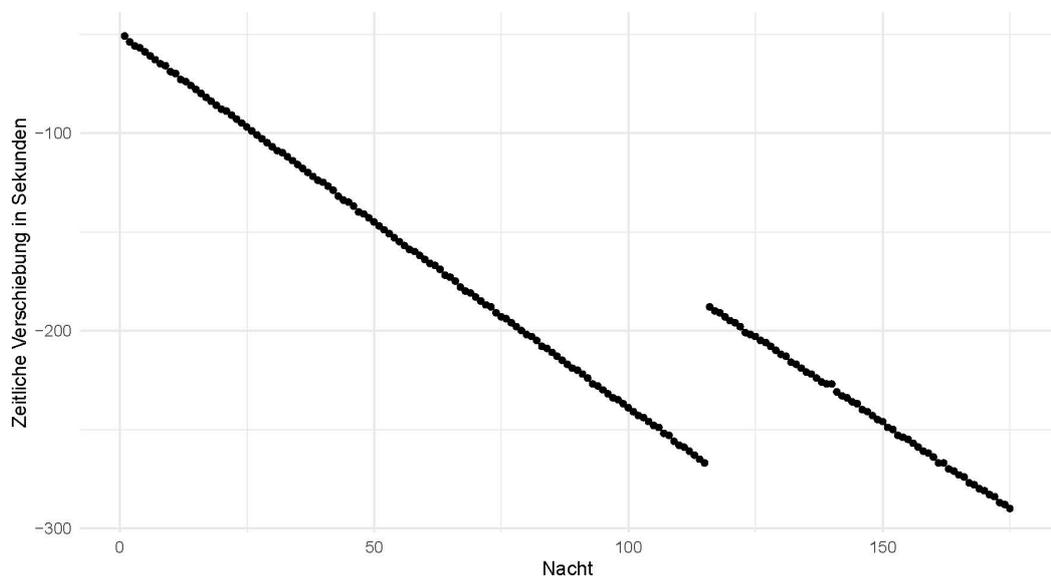


Abb. 14 Illustration zum Zeit-Offset der Leuchtdichtekamera und der ANPR-Kamera.

Um das Radar und die ANPR-Kamera mit der Leuchtdichtekamera abzugleichen, gingen wir getrennt für jede Nacht der Messungen folgendermassen vor: Für ein Zeitfenster von -3'600 bis 3'600 Sekunden verglichen wir pro Sekunde, ob ein Fahrzeug in den Leuchtdichtedaten «sichtbar» (siehe Abb.) oder kein Ausschlag zu beobachten war. Die Zeitstempel wurden dann pro Zeitfenster verschoben, bis die Übereinstimmung gewährleistet war. Diese Herangehensweise funktioniert für den Abgleich der Zeitstempel an allen Strassen zufriedenstellend. Da es, wie oben beschrieben, notwendig war ein eindeutiges Signal für die Leuchtdichte zu erhalten, war die angewandte Methode nur für eine Fahrtrichtung möglich – nämlich, wenn sich Fahrzeuge 'in Richtung' der Kamera bewegten; 'von der Kamera weg' war das Signal nicht verwertbar. Das Isolieren und Beheben der in diesem Abschnitt beschriebenen Mängel hat zusätzliche zeitliche und finanzielle Mittel benötigt (u. a. mussten wir externe Expertise für den Zeitabgleich einkaufen) und war ein Hauptgrund für die Verzögerungen in der Auswertung des Projektes.

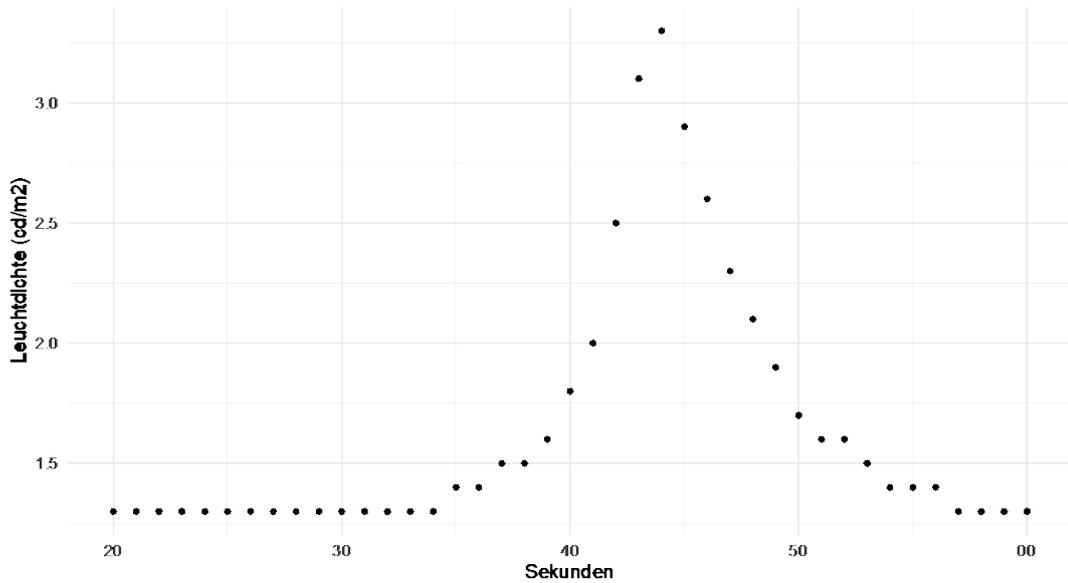


Abb. 15 Leuchtdichte Verteilung eines vorbeifahrenden Autos mit dem Maximalwert bei 44 Sekunden

4.2.3 Aggregieren der Datensätze

Nachdem die Datensätze (wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben) synchronisiert waren, wurden im nächsten Schritt die relevanten Zeitintervalle (d. h. Nächte) gefiltert, die Manipulation der Leuchtdichte kodiert und die einzelnen Dateien zu einem Datensatz zusammengeführt. Im nächsten Schritt wurde der Strassenzustand, abgeleitet aus der Kategorisierung der Webcam-Bilder, eingefügt und weitere Variablen berechnet.

Tab. 5 Abgeleitete und aggregierte Daten

Variable	Erhobene Daten (Einheit)	Aggregation
Strassenzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitstempel • Strassenzustand • Zeitintervall (00, 15, 30, 45) • Bezeichnung der Strasse 	<ul style="list-style-type: none"> • Um die ca. 260'000 Bilder zu kategorisieren wurde ein Algorithmus aus dem maschinellen Lernen angewandt • Spezifisch wurde ein Neuronales Modell zuerst auf eine Klasse vorkategorisierter Bilder angelernt • 6 Mitarbeitende haben je 500 Bilder, die zufällig aus dem Datensatz ausgewählt wurden, in die folgenden 6 Klassen kategorisiert: <ul style="list-style-type: none"> • trocken (vollkommen trockene Strasse) • etwas nass (jegliches Anzeichen von Wasser auf der Strasse) • nass (komplett nasse Strasse) • nass/Schnee (nasse Strasse mit Schnee am Gras/Gehweg auf der Seite, allerdings nicht auf der Strasse selbst) • starker Regen (Regen ist auf dem gesamten Bild sichtbar) • Schnee (jegliches Anzeichen von Schnee auf der Strasse)

Diese Kategorisierungen wurden aggregiert und in folgenden Schritten abgearbeitet: 1) stimmten alle 6 Beurteilungen für ein Bild überein (z. B. wurde 6 Mal angegeben, dass ein Bild eine trockene Strasse abbildete) dann wurde das Bild mit dem Attribut trocken kategorisiert; 2) gab es divergierende Beurteilungen, dann wurde ein einfacher Mehrheitsentscheid verwendet, um ein Attribut zuordnen zu können; 3) war es nicht möglich einen Mehrheitsentscheid zu verwenden, wurde durch Diskussion der Projektmitarbeiter eine Entscheidung herbeigeführt.

- Die kategorisierten Bilder wurden als «ground truth» dem Model zur Verfügung gestellt. Basierend auf diesen Bildern hat das neuronale Netz Features extrahiert und konnte auf dieser Basis lernen, zu welcher der 6 Klassen ein neues Bild am wahrscheinlichsten zugehörig ist.
- Das Model kategorisierte alle 260'000 Bilder in die 6 oben beschriebenen Klassen.
- Stichprobenartig wurde die Qualität der Kategorisierung überprüft und als zufriedenstellend betrachtet. Weiter wird in Abb. 26 ein Vergleich der kategorisierten Klassen mit dem gemessenen Niederschlag auf der EK dargestellt. Auch hier zeigt sich eine zufriedenstellende Qualität der Klassifizierung.
- Schliesslich wurde die Anzahl Kategorien wegen sehr geringer Besetzung in den Kategorien Schnee und nass/Schnee auf 4 Kategorien reduziert: trocken, etwas nass, nass, starker Regen.

Anzahl
Fahrzeuge

- Zeitstempel (Stunde)
- Frequenz (Anzahl)

- Aggregation der Anzahl Fahrzeuge pro Strasse, Tag, Stunde

4.3 Deskriptive Ergebnisse

Die in diesem Abschnitt präsentierten Ergebnisse beziehen sich auf den vollständigen Datensatz mit 6'413'087 Fahrzeugbewegungen. An den drei Messpunkten wurden 1'072'890 (EK), 2'991'557 (MQ), sowie 2'348'629 (DB) Fahrzeugbewegungen aufgezeichnet. Für die statistischen Analysen wurden die Daten nach mehreren Kriterien gefiltert (siehe Kapitel 4.5).

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Fahrzeugbewegungen.

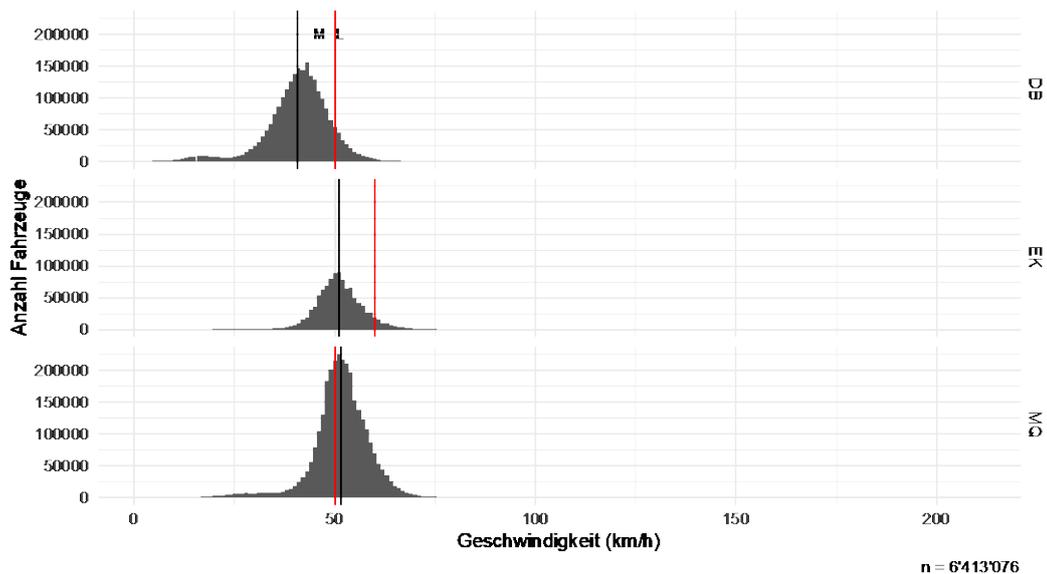


Abb. 16 Geschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuglenkenden über die drei Experimentalstrassen. M = Mittelwert gemessene Fahrgeschwindigkeit; L = Geschwindigkeitslimit.

Abb. 16 zeigt die Häufigkeiten der Fahrgeschwindigkeit für die drei Experimentalstrassen, wobei M die mittlere Fahrgeschwindigkeit ($M_{DB} = 40.7$ km/h, $SD_{DB} = 8.5$ km/h; $M_{EK} = 51.1$ km/h, $SD_{EK} = 6.4$ km/h; $M_{MQ} = 51.4$ km/h, $SD_{MQ} = 7.4$ km/h) und L das jeweilige Geschwindigkeitslimit kennzeichnet (50 km/h auf der DB und dem MQ; sowie 60 km/h auf der EK). Auf der DB und EK wird das Limit im Schnitt somit deutlich unterschritten (7-10 km/h Differenz); auf der MQ liegt die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit um 1.4 km/h über dem Limit von 50 km/h.

In der vorangehenden Abbildung ist zu erkennen, dass die x-Achse bis in den Bereich von über 200 km/h reicht. Dies deutet darauf hin, dass es Fahrer gibt, die mit stark überhöhter Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet wurden. Um dies zu illustrieren haben wir in den Bereich über 90 km/h hineingezoomt und stellen diese Werte in Abb. 17 dar. Insgesamt fallen 546 Fahrzeuge (0.009%) in diesen Bereich. Zur Einordnung: Bei Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h und mehr wird von einer schweren Zuwiderhandlung gegen das Strassenverkehrsgesetz ausgegangen und wird mit drei Monaten Führerausweisentzug geahndet. Bei einer Geschwindigkeitsüberschreitung innerorts von 50 km/h und mehr liegt der Tatbestand des «Rasens» vor, der gemäss aktueller Gesetzeslage mit einer Freiheitsstrafe von mindestens einem Jahr und einem Führerausweisentzug auf unbestimmte Zeit bestraft wird. Die oben erwähnten 546 Fahrzeuglenker würden also alle als Raser bestraft werden. Die Maximalgeschwindigkeit von 210 km/h wurde auf der MQ gemessen.

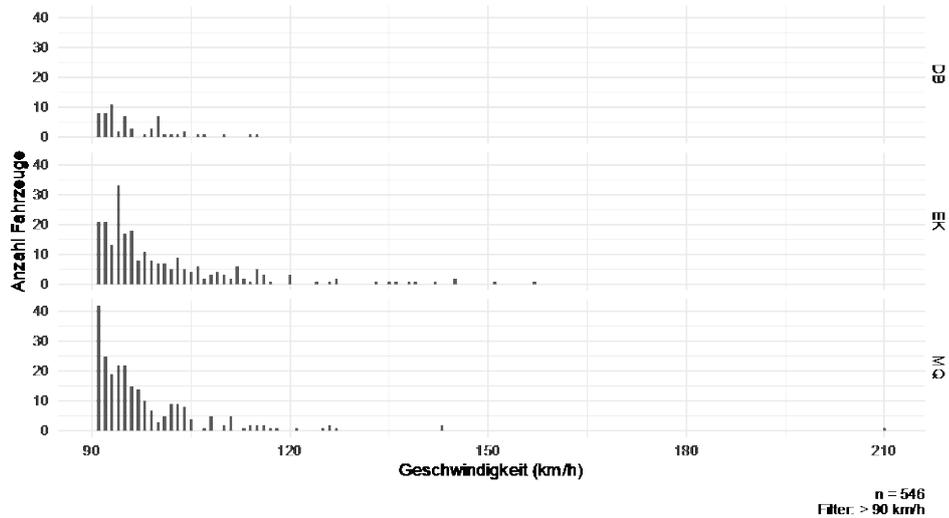


Abb. 17 Häufigkeit von Fahrgeschwindigkeiten über 90 km/h je Strasse.

Abb. 18 bildet die Entwicklung des Verkehrsaufkommens über den gesamten Verlauf der Studie (Dezember 2019 bis Mai 2020) ab. Deutlich sind die wöchentlichen Rhythmen des Verkehrsaufkommens zu sehen mit einer kontinuierlichen Steigerung der Anzahl Fahrzeuge von Montag bis Freitag, gefolgt von einem starken Abfall am Wochenende. In der Darstellung sind auch die Effekte der COVID-19-Pandemie zu sehen. Zur besseren Orientierung haben wir mehrere Zeitpunkte des Einsetzens (z. B. «Besondere Lage») und Aussetzens (z. B. «1. Lockerung») der Pandemie in der Grafik gekennzeichnet. Das Verkehrsaufkommen hat teilweise stark fluktuiert (z. B. «Ausserordentliche Lage» im März 2020) und somit auch die Frequenz der aufgezeichneten Fahrzeuge in unserer Studie beeinflusst. Als Vergleich ist der «Weihnachtsknick» im Dezember 2019 heranzuziehen – das Ausrufen der «Ausserordentlichen Lage» 2020 hat zu einer ähnlich grossen Abnahme des Verkehrsaufkommens geführt wie die Feiertage um Weihnachten. Es soll aber auch der schnelle Anstieg nach den beiden Lockerungen hervorgehoben werden, der innerhalb von zwei Wochen wieder zum Verkehrsaufkommen auf Niveau von vor der Pandemie geführt hat.

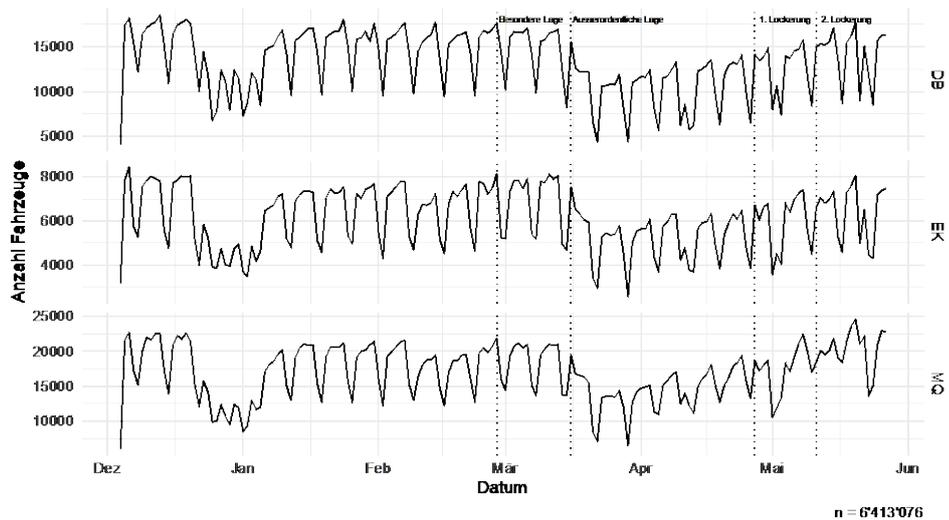


Abb. 18 Entwicklung des Verkehrsaufkommens über den Verlauf der Studie mit Kennzeichnung der relevanten Phasen der COVID-19-Pandemie (zwischen Dezember 2019 und Mai 2020).

4.4 Messung der Beleuchtungsstärke auf der EK

Um sicherzustellen, dass die gewählten Dim-Levels der Beleuchtungskörper auch den geplanten C-Levels entsprechen, wurde mit der Unterstützung der Elektron AG und des EWZ eine vor Ort Messung der Beleuchtungsstärke auf der EK durchgeführt. Deutlich zu erkennen ist die hohe lux-Zahl bei C2 und die kontinuierliche Abnahme bei C3, C4 und C5. Diese Analyse entspricht der geplanten Manipulation der Beleuchtungsstärke – es kann somit sichergestellt werden, dass die gewählten C-Levels tatsächlich zum geplanten Unterschied der Beleuchtungsstärke auf der Strasse führen.



Abb. 19 Falschfarben-Darstellung der C-Levels (von links oben im Uhrzeigersinn): C2, C3, C4 und C5 (rechts unten).

4.5 Datenfilterung

Die Gesamtstichprobe von 6.4 Mio. Fahrzeugbewegungen über den Beobachtungszeitraum wurde durch Schritte in der nachträglich notwendigen Datensynchronisierung (siehe Kapitel 4.2.2) sowie geplanten Filterschritten reduziert.

Da es nur in eine Fahrtrichtung möglich war (wenn Fahrzeuge in Richtung der Leuchtdichtekamera fahren) ein eindeutiges Signal des Fahrzeuges bzw. der Scheinwerfer in der Leuchtdichtekamera zu erhalten, wurde nur diese Fahrtrichtung ausgewertet. Die Synchronisierung der verschiedenen Messgeräte konnte nicht perfekt durchgeführt werden, da die Uhren einerseits asynchron liefen und zusätzlich über die Zeit eine Drift in diesen Zeitunterschieden aufzeigten (siehe Kapitel 4.2.2). Das heisst, dass vor allem für die statistischen Modelle, ein nur stark eingeschränktes Sample zur Verfügung stand, in dem für jede Beobachtung klar eine Geschwindigkeitsmessung einem Kennzeichen-Hash sowie einem Scheinwerfersignal zuzuweisen war.

Da für die experimentelle Manipulation nur die Phasen der Dunkelheit relevant sind, wurden die Daten basierend auf der bürgerlichen Dämmerung, wie in der Präregistrierung geplant, gefiltert und somit sichergestellt, dass nur Daten bei Dunkelheit in die Analyse mit eingingen.

Diese nachträglichen sowie geplanten Filterungen und Restriktionen resultierten final in einem Datensatz von 458'281 Fahrzeugbewegungen, die in die Analyse eingehen. Diese Zahl fungierte, wo nicht anders angegeben, in allen nachfolgenden Analysen als Stichprobengrösse.

5 Inferenzstatistische Ergebnisse

5.1 Hypothesentests

5.1.1 Einfluss Beleuchtungsstärke auf Fahrgeschwindigkeit

Ein simpler Ansatz zur Überprüfung des Effekts der Strassenbeleuchtung auf die Geschwindigkeit ist der Vergleich der Fahrgeschwindigkeit je Beleuchtungsstärke-Level (7.5, 10, 15, 20 lx). In Abb. 20 werden die Mittelwerte pro Beleuchtungsstärke-Level abgebildet. Der Bereich der Werte liegt zwischen 50.0 und 50.3 km/h. Eine Varianzanalyse, die Fahrgeschwindigkeit mit Beleuchtungsstärke vorhersagt, resultiert in einem signifikanten Effekt für Beleuchtungsstärke ($F(3, 458'277) = 23.40, p < .001, \eta^2 = .0002$). Alle Kontraste zwischen den vier Stufen sind ebenfalls signifikant, mit Ausnahme der Kontraste 10 vs. 15 lx ($p = .32$) sowie 7.5 vs. 15 lx ($p = .21$). Die kleine Effektstärke der Varianzanalyse weist jedoch auf einen sehr kleinen Effekt hin, der lediglich durch die grosse Stichprobengrösse signifikant wird. Dies wird durch das An- und Absteigen der Mittelwerte über die Beleuchtungsstärke-Levels hinweg untermauert.

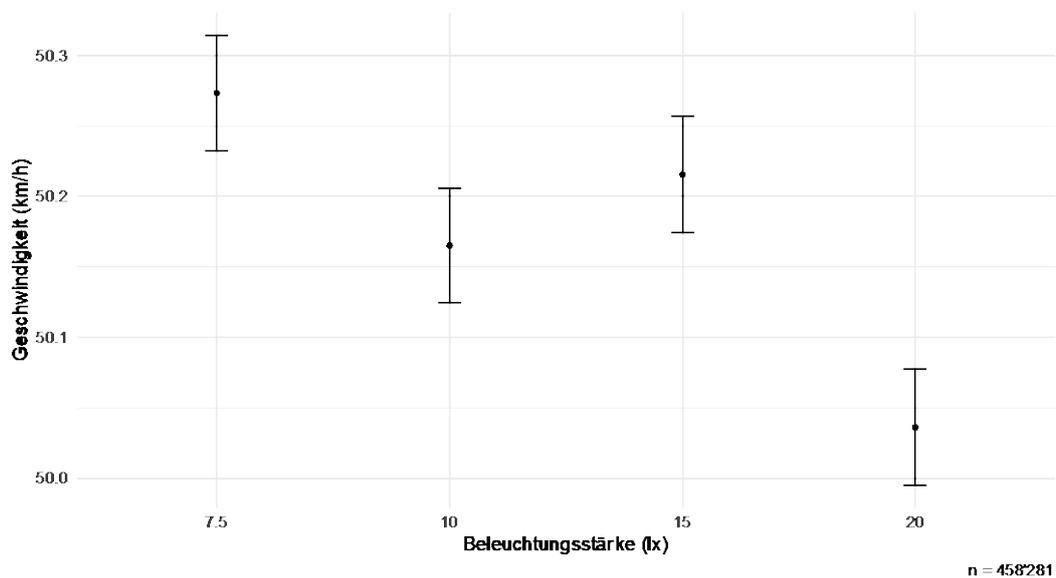


Abb. 20 Effekt der manipulierten Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit. Fehlerbalken entsprechen den 95%-Konfidenzintervallen der Mittelwerte.

Im nächsten Schritt betrachten wir die gleichen Ergebnisse getrennt für die drei Strassen (EK, DB und MQ, siehe Abb. 21) und berechnen eine Varianzanalyse, die Fahrgeschwindigkeit mit Beleuchtungsstärke vorhersagt und dabei für Strasse kontrolliert. Wie zu erwarten ist, unterscheidet sich die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit signifikant zwischen den drei Strassen, wobei diese in der MQ am höchsten und der DB am niedrigsten ist (DB = 44.7 km/h, EK = 51.9 km/h, MQ = 53.9 km/h; $F(2, 458'275) = 125'900, p < .001, \eta^2 = .35$). In Bezug auf den Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit zeigt sich auf den einzelnen Strassen ein ähnliches, inkonsistentes Muster (siehe Abb. 21), wobei auch dieser Effekt zwar statistische Signifikanz erreicht ($F(3, 458'275) = 22.61, p < .001, \eta^2 = .0001$), aber nur eine sehr kleine Effektstärke aufweist.

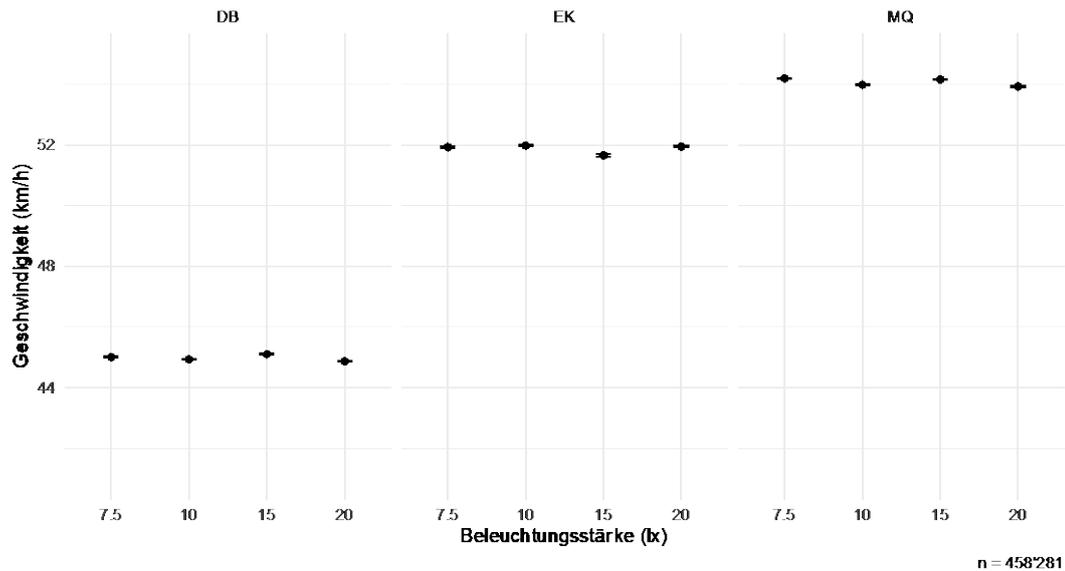


Abb. 21 Effekt der manipulierten Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit je Strasse. Fehlerbalken entsprechen den 95%-Konfidenzintervallen der Mittelwerte.

Modell 1:

Fahrgeschwindigkeit ~ Beleuchtungsstärke
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | Beleuchtungsstärke / Kennzeichen-Hash)

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Ergebnisse von Modell 1.

Tab. 6 zeigt die Parameter für die festen sowie Zufälligen Effekte. Es ist ersichtlich, dass der Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit statistisch nicht signifikant ist. Die Ergebnisse stützen die Beschreibung der Abb. 20 und Abb. 21, wonach der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit nicht gezeigt werden kann.

Wie erwartet, zeigte sich ein Zusammenhang des Strassenzustands mit der Fahrgeschwindigkeit: mehr Niederschlag geht mit einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit einher. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Fahrgeschwindigkeit mit zunehmendem Verkehrsaufkommen abnimmt.

Tab. 6 Regressionsparameter für den Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	50.67	5.99	8.46	.83	
Beleuchtungsstärke 7.5	0.01	7.56	0.001	1.00	0.0003
Beleuchtungsstärke 10	-0.08	7.56	-0.01	.99	
Beleuchtungsstärke 20	-0.15	7.56	-0.02	.99	
Verkehrsaufkommen	-4.37	0.05	-93.64	< .001	0.02
Strassenzustand (etwas nass)	-0.19	0.02	-8.27	< .001	0.001
Strassenzustand (nass)	-0.40	0.02	-19.25	< .001	

Strassenzustand (starker Regen)	-0.55	0.04	-12.28	< .001
Random Effekte	Varianz	SD		
Strasse	21.93	4.68		
Beleuchtungsstärke	28.58	5.35		
Kennzeichen-Hash*Beleuchtungsstärke	11.37	3.37		
Residuen	20.73	4.55		

Bemerkung. Referenzkategorie: Beleuchtungsstärke = 15 lx (Normalzustand); Strassenzustand = trocken. In diesem und allen nachfolgenden Modellen wird η^2 mittels der Funktion `F_to_eta2` berechnet und schätzt die Effektstärke des jeweiligen Haupteffektes (eine exakte Berechnung der Effektstärke bei gemischten Modellen ist nicht möglich).

5.1.2 Leuchtdichte-Hypothese

Um die Leuchtdichte-Hypothese zu testen, haben wir ebenfalls ein Regressionsmodell mit gemischten Effekten gerechnet.

Leuchtdichte-Hypothese: Eine Abnahme der gemessenen Leuchtdichte führt zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit.

Wie die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 22 bis Abb. 24) zeigen, ist eine globale Abnahme der Fahrgeschwindigkeit bei zunehmender Leuchtdichte im unteren Bereich (0 – 10 cd/m²) ersichtlich. Diese Abnahme findet sich bei allen 4 Beleuchtungsstärke Level (siehe Abb. 23) sowie an allen Strassen, wobei die Abnahme an der DB und MQ am stärksten ausgeprägt ist, bei der EK vorhanden aber am kleinsten ist (siehe Abb. 24)

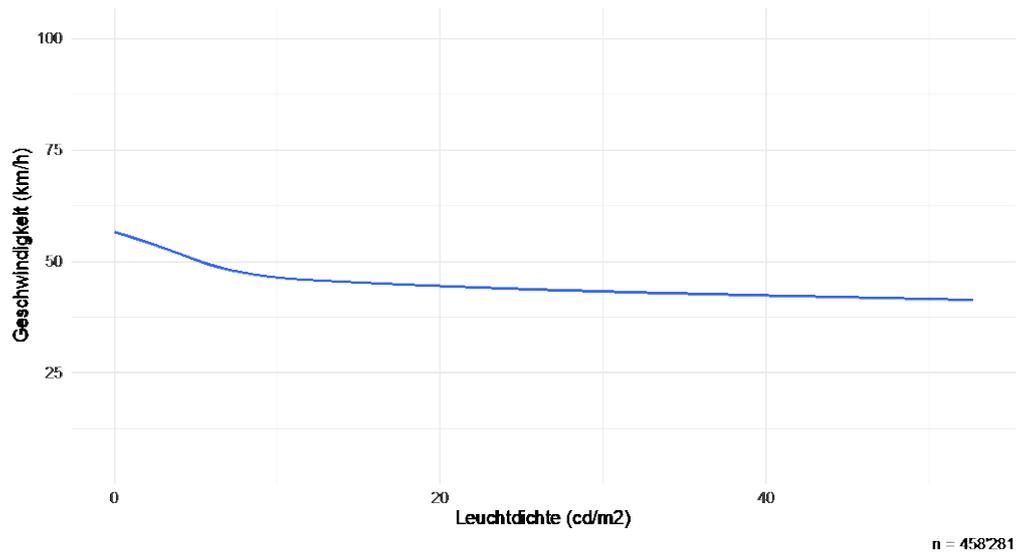


Abb. 22 Zusammenhang zwischen gemessener Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit.

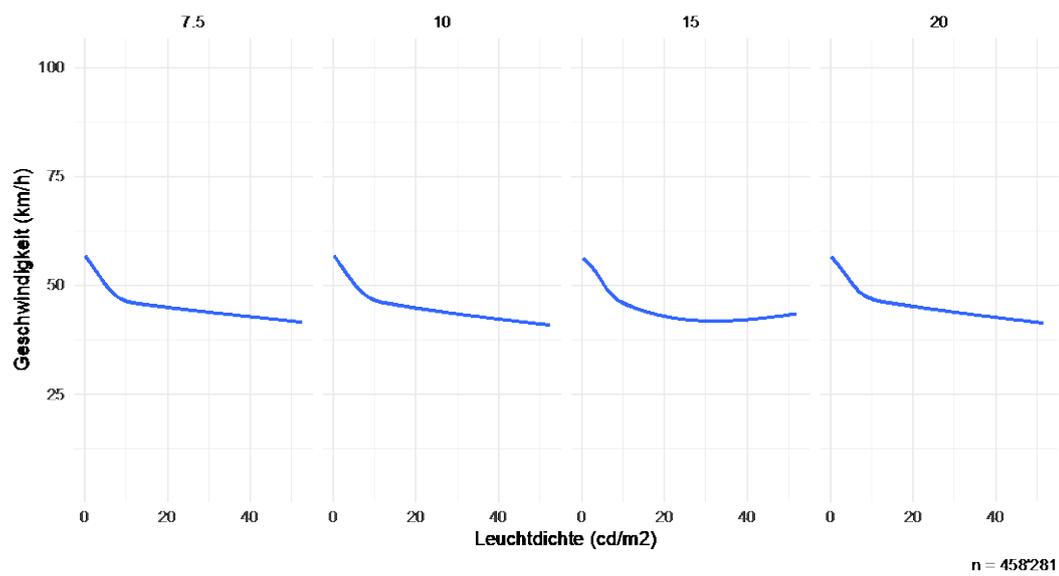


Abb. 23 Zusammenhang zwischen gemessener Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit je manipulierter Beleuchtungsstärke.

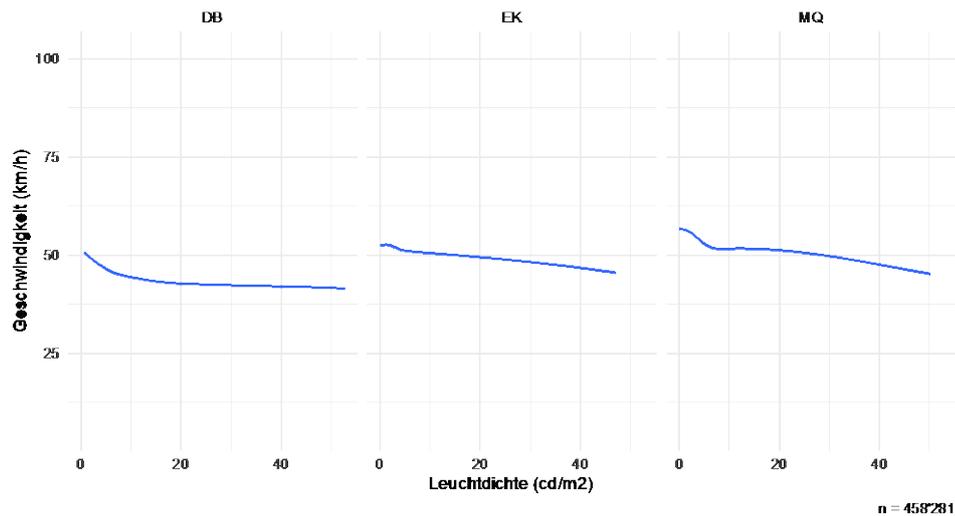


Abb. 24 Zusammenhang zwischen gemessener Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit je Strasse.

Im folgenden Modell 2 sagen wir Fahrgeschwindigkeit mit der Leuchtdichte vorher. Dabei berücksichtigen wir das Verkehrsaufkommen und den Strassenzustand als zusätzliche Prädiktoren. Zudem lassen wir Random Intercepts für Strasse sowie Kennzeichen-Hash innerhalb der Leuchtdichte zu.

Modell 2:

Fahrgeschwindigkeit ~ Leuchtdichte
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | Leuchtdichte / Kennzeichen-Hash)

Tab. 7 enthält die Ergebnisse des Modell 2 und zeigt die Parameter für die festen sowie Zufälligen Effekte. Die Ergebnisse stützen die Eindrücke aus den Abbildungen, wonach der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit vorhanden und negativ ist. Gemäss dem linearen Regressionsmodell geht die Zunahme um eine Leuchtdichte-Einheit (1 cd/m^2) mit der Abnahme von 0.15 km/h einher bei einer Effektstärke von $\eta^2 = 0.57$.

Die Parameter für das Regressionsmodell zeigen, dass es auch in diesem Modell einen signifikanten negativen Zusammenhang zwischen Verkehrsaufkommen und Fahrgeschwindigkeit gibt ($B = -1.39$, $p < .001$), der allerdings eine sehr kleine Effektstärke von $\eta^2 = 0.002$ aufweist, der Strassenzustand resultiert in diesem Modell mit positiven Regressionsgewichten, die allesamt signifikant aber ebenfalls mit sehr kleiner Effektgrösse $\eta^2 = 0.01$ versehen sind.

Tab. 7 Regressionsparameter für den Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	50.05	2.06	24.34	< .001	
Leuchtdichte	-0.12	0.004	-30.39	< .001	0.57
Verkehrsaufkommen	-1.39	0.05	-29.57	< .001	0.002
Strassenzustand (etwas nass)	0.15	0.02	8.01	< .001	0.01
Strassenzustand (nass)	0.66	0.02	35.33	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	0.71	0.04	19.07	< .001	
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	12.66	3.56			
Leuchtdichte	1.01	1.01			
Kennzeichen-Hash*Leuchtdichte	24.18	4.92			
Residuen	5.76	2.40			

Weiter haben wir dieselbe Analyse mit einem adjustierten Mass der Beleuchtungsstärke gerechnet (siehe Tab. 8). Dieses adjustierte Mass ermöglicht einen Einblick in die tatsächlich auf der Strasse vorhandene Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte (Scheinwerfer + Umgebungslicht).

Modell 3:

Fahrgeschwindigkeit ~ adj. Beleuchtungsstärke
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | adj. Beleuchtungsstärke)

Tab. 8 Regressionsparameter für den Effekt der adjustierten Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	52.03	6.47	8.04	.74	
Adj. Beleuchtungsstärke <0.75	-0.52	8.13	-0.06	.99	0.03
Adj. Beleuchtungsstärke 0.75-1.0	0.28	8.13	0.04	.99	
Adj. Beleuchtungsstärke >1.5	-1.52	8.13	-0.19	.97	
Verkehrsaufkommen	-4.06	0.05	-83.90	< .001	0.02
Strassenzustand (etwas nass)	-0.16	0.02	-7.18	< .001	0.001
Strassenzustand (nass)	-0.35	0.02	-16.71	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	-0.49	0.04	11.13	< .001	
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	26.40	5.14			
Adj. Beleuchtungsstärke	33.05	5.75			
Kennzeichen-Hash*Adj. Beleuchtungsstärke	9.51	3.08			
Residuen	22.94	4.79			

Tab. 8 zeigt die statistischen Ergebnisse des Modell 3, welches die Resultate der vorherigen Analyse auch mit der neuen unabhängigen Variablen 'Adjustierte Beleuchtungsstärke' bestätigt – kein Effekt der Beleuchtungsstärke sowie signifikant negative Effekte für Verkehrsaufkommen und Strassenzustand.

Die drei abschliessenden Analysen fokussieren, anstelle der kontinuierlichen Geschwindigkeitsmessung, auf Geschwindigkeitsübertretungen in binärem Format ja/nein, als abhängige Variable. Geschwindigkeitsübertretungen wurden anhand eines Speeding Indexes operationalisiert (siehe Tab. 9). Die Analysen unterscheiden sich wiederum in ihrem Fokus in Bezug auf die zentrale unabhängige Variable: Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte und adjustierte Beleuchtungsstärke (Tab. 9 - Tab. 11).

Modell 4:

Speeding Index ~ Beleuchtungsstärke
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | Beleuchtungsstärke / Kennzeichen-Hash)

Tab. 9 Regressionsparameter für den Effekt der Beleuchtungsstärke auf den Speeding Index

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	0.15	0.11	1.34	.32	
Beleuchtungsstärke 7.5	0.002	0.002	1.04	.30	0.00004
Beleuchtungsstärke 10	-0.002	0.002	-1.28	.20	
Beleuchtungsstärke 20	-0.003	0.002	-1.58	.11	
Verkehrsaufkommen	-0.2	0.003	-69.13	< .001	0.01
Strassenzustand (etwas nass)	-0.004	0.001	-2.81	.005	0.0002
Strassenzustand (nass)	-0.01	0.001	-9.90	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	-0.01	0.003	-3.92	< .001	
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	0.04	0.19			
Beleuchtungsstärke	0.001	0.00			
Kennzeichen-Hash* Beleuchtungsstärke	0.03	0.18			
Residuen	0.09	0.29			

Modell 5:

Speeding Index ~ Leuchtdichte
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | Leuchtdichte / Kennzeichen-Hash)

Tab. 10 Regressionsparameter für den Effekt der Leuchtdichte auf den Speeding Index

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	0.11	0.11	1.01	.41	
Leuchtdichte	-0.003	0.0002	-14.97	< .001	0.21
Verkehrsaufkommen	-0.06	0.003	-21.13	< .001	0.001
Strassenzustand (etwas nass)	0.01	0.001	6.32	< .001	0.003
Strassenzustand (nass)	0.03	0.001	24.64	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	0.04	0.002	17.55	< .001	
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	0.04	0.19			
Leuchtdichte	0.002	0.05			
Kennzeichen-Hash*Leuchtdichte	0.09	0.29			
Residuen	0.03	0.17			

Modell 6:

Speeding Index ~ adj. Beleuchtungsstärke
 + Verkehrsaufkommen
 + Strassenzustand
 + (1 | Strasse)
 + (1 | adj. Beleuchtungsstärke / Kennzeichen-Hash)

Tab. 11 Regressionsparameter für den Effekt der adjustierten Beleuchtungsstärke auf den Speeding Index

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	0.23	0.24	1.19	.98	
Adj. Beleuchtungsstärke <0.75	0.01	0.21	0.03	.998	0.17
Adj. Beleuchtungsstärke 0.75-1.0	0.03	0.21	0.15	.998	
Adj. Beleuchtungsstärke >1.5	-0.10	0.21	-0.45	.99	
Verkehrsaufkommen	-0.18	0.003	-59.25	< .001	0.01
Strassenzustand (etwas nass)	-0.002	0.001	-1.74	.08	0.0001
Strassenzustand (nass)	-0.008	0.001	-6.02	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	-0.006	0.003	-1.98	.047	
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	0.10	0.32			
Adj. Beleuchtungsstärke	0.02	0.15			
Kennzeichen-Hash*Adj. Beleuchtungsstärke	0.02	0.16			
Residuen	0.09	0.31			

Die Ergebnisse zeigen, wie schon in der vorangegangenen Analyse, keinen Effekt der Beleuchtungsstärke, wie auch der adjustierten Beleuchtungsstärke auf die Geschwindigkeitsübertretungen (Speeding Index). Leuchtdichte resultiert in einem negativen Effekt ($B = -0.003$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.21$) und zeigt somit auch eine Reduzierung der Geschwindigkeitsübertretungen bei zunehmender Leuchtdichte an.

Verkehrsaufkommen resultiert in allen Modellen 4-6 in durchgängig negativen Prädiktoren, d.h., Reduzierung der Geschwindigkeitsüberschreitungen bei grösserem Verkehrsaufkommen. Einzig der Strassenzustand zeigt bei Modell 5 einen positiven Effekt, im Gegensatz zu den Modellen 4 und 5 wo ein negativer Effekt angezeigt ist. In allen drei Modellen ist sind die Effekte jedoch sehr klein ($\eta^2 < 0.003$).

5.1.3 Strassenoberfläche-Hypothese

Um die Strassenoberfläche-Hypothese zu testen haben wir ein gemischtes Regressionsmodell mit Random Intercepts für die Strassen berechnet.

Strassenoberfläche-Hypothese: Je vorteilhafter die Bedingungen der Strassenoberfläche (d. h., je weniger Feuchtigkeit auf der Strassenoberfläche) desto höher die Fahrgeschwindigkeit.

Im folgenden Modell sagen wir Fahrgeschwindigkeit mit dem Strassenzustand vorher. Dabei berücksichtigen wir das Verkehrsaufkommen als zusätzliche Prädiktoren. Wir berücksichtigen zudem Random Intercepts für die Strasse.

Modell 7:

Fahrgeschwindigkeit ~ Strassenzustand
 + Verkehrsaufkommen
 + (1 | Strasse)

Tab. 12 Regressionsparameter für den Effekt des Strassenzustandes auf die Fahrgeschwindigkeit

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	0.28	0.24	1.19	.95	
Strassenzustand (etwas nass)	-0.16	0.02	-6.67	< .001	0.0005
Strassenzustand (nass)	-0.32	0.02	-14.44	< .001	
Strassenzustand (starker Regen)	-0.6	0.05	-11.52	< .001	
Verkehrsaufkommen	-4.45	0.04	-101.91	< .001	0.02
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	21.29	4.61			
Residuen	40.47	6.36			

Wie schon in den Modellen oben, welche Fahrgeschwindigkeit vorhersagen, zeigt sich auch hier ein negativer Effekt des Strassenzustandes auf die Fahrgeschwindigkeit – bei schlechteren Verkehrsbedingungen (etwas nass – nass – starker Regen) nimmt die Fahrgeschwindigkeit ab ($B = -0.6$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.0005$). Es bleibt hier anzumerken, dass der Effekt sehr klein ist, aber in mehreren Modellen (1, 3, 4, 6) konsistent auftritt.

5.1.4 Frequenzhypothese

Um die Frequenz-Hypothese zu testen, haben wir ein gemischtes Regressionsmodell mit Random Intercepts für die Strassen berechnet.

Frequenz-Hypothese:

Je öfter Verkehrsteilnehmende eine Strasse benutzen desto höher die Fahrgeschwindigkeit.

Im folgenden Modell sagen wir Fahrgeschwindigkeit mit der Häufigkeit der Durchfahrten (Anzahl Durchfahrten) vorher. Dabei berücksichtigen wir das Verkehrsaufkommen als zusätzliche Prädiktoren. Wir berücksichtigen zudem Random Intercepts für die Strassen.

Modell 8:

Fahrgeschwindigkeit ~ Anzahl Durchfahrten
 + Verkehrsaufkommen
 + (1 | Strasse)

Tab. 13 Regressionsparameter für den Effekt der Anzahl der Durchfahrten auf die Fahrgeschwindigkeit

Parameter	B	SE	t	p	η^2
Intercept	50.51	2.88	17.52	.003	
Anzahl Durchfahrten	-0.01	0.0003	-24.79	< .001	0.001
Verkehrsaufkommen	-4.16	0.04	-112.25	< .001	0.02
Random Effekte	Varianz	SD			
Strasse	24.94	4.99			
Residuen	32.14	5.67			

Die Anzahl der Durchfahrten zeigt einen negativen Effekt auf die Fahrgeschwindigkeit ($B = -0.01$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.001$), was, gegen unsere Vorhersage, für eine verringerte Fahrgeschwindigkeit bei häufigerer Durchfahrt spricht. Verkehrsaufkommen zeigt auch hier einen negativen Effekt, der bei höherem Verkehrsaufkommen auf geringere Fahrgeschwindigkeit hinweist ($B = -4.16$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.02$).

5.2 Plausibilitätsprüfung

Um die Plausibilität der analysierten Daten zu prüfen, haben wir verschiedene Analysen durchgeführt. Dazu gehört die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen der manipulierten Beleuchtungsstärke und der resultierenden Leuchtdichte. Da die Leuchtdichte durchgängig aufgezeichnet wurde, und die Scheinwerfer jedes Fahrzeuges von der Kamera registriert wurden, ist es nötig die Daten zuerst zu filtern, um einen sinnvollen Vergleich sicherzustellen. Deshalb wurden die Daten zuerst mit den Daten der nautischen Dämmerung abgeglichen, welche konservativer ist als die bürgerliche Dämmerung; d. h. es fließen nur zeitliche Abschnitte in absoluter Dunkelheit in diese Analyse mit ein. Im zweiten Schritt wurde pro Strasse, Nachthälfte und Stunde das 1. Perzentil der Leuchtdichte berechnet, um möglichst Zeitpunkte zu wählen, zu denen kein Fahrzeug am Messpunkt, bzw. auf der Strasse war. Diese Werte wurden dann über die Beleuchtungsstärkelevel gemittelt und geplottet. Wie in Abb. 25 ersichtlich ist wird der Anstieg in der Beleuchtungsstärke sehr gut in der Leuchtdichte abgebildet; es zeigt sich ein linearer Anstieg der Leuchtdichte mit einem Anstieg in der Beleuchtungsstärke. Eine Ausnahme in diesem Muster ist die Kondition 10 lx auf der EK – hier wird im Schnitt niedrigere Leuchtdichte gemessen als in der 7.5 lx Bedingung.

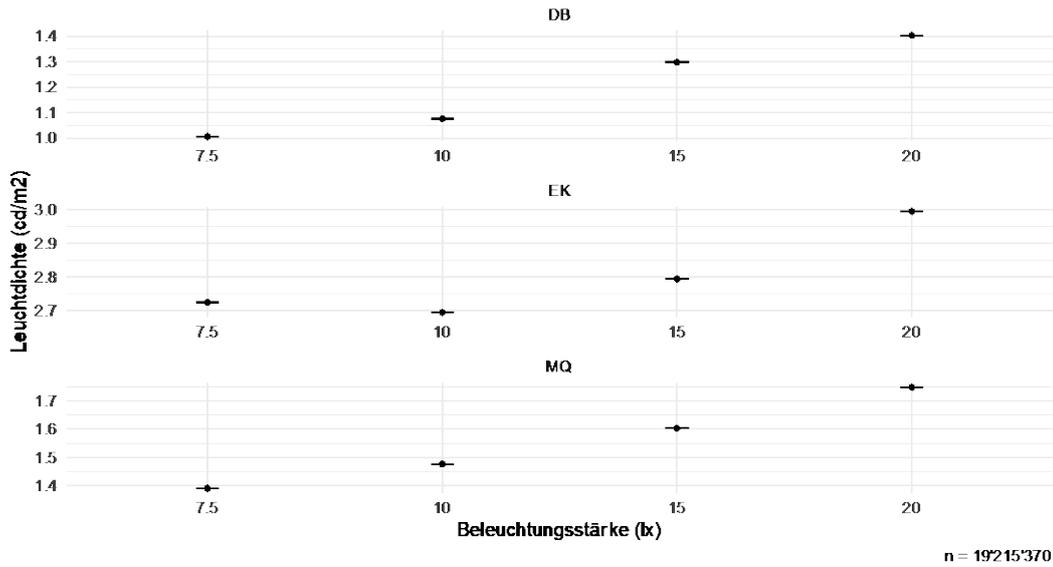


Abb. 25 Effekt der manipulierten Beleuchtungsstärke auf die Leuchtdichte (1. Perzentil der Messwerte). Fehlerbalken entsprechen den 95%-Konfidenzintervallen der Mittelwerte. Anmerkung: Leuchtdichte wurde hochfrequent (1 Hz), durchgängig gemessen – daher resultiert die grosse Stichprobengrösse.

Abb. 26 überprüft schliesslich die Klassifizierung der Strassenoberfläche der Webcam-Bilder und zeigt, dass eine nassere Strassenoberfläche (kodiert durch den maschinellen Lernalgorithmus) wie erwartet mit mehr Niederschlag einhergeht (in mm, von Waspnote Plug & Sense! (Libelium)).

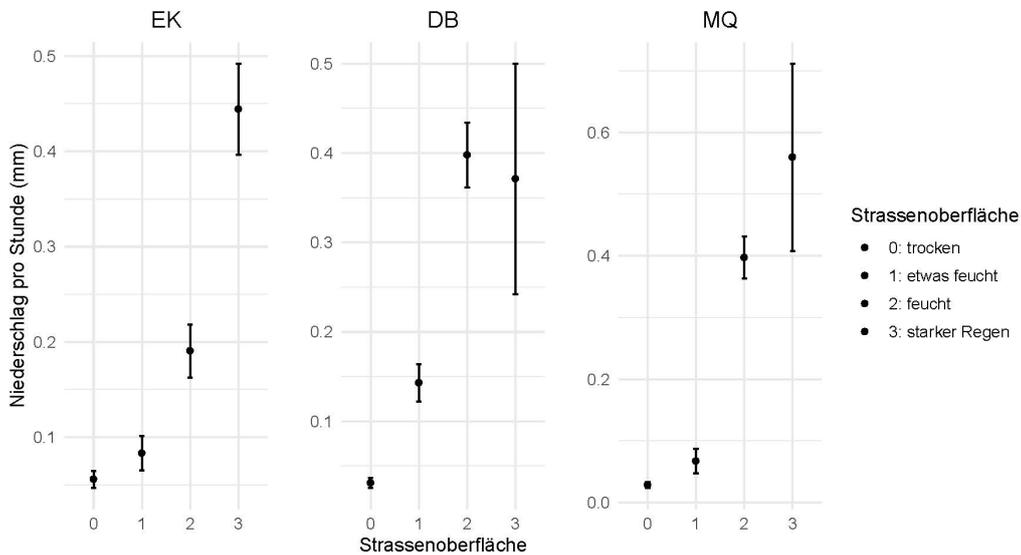


Abb. 26 Zusammenhang zwischen klassifizierten Strassenzustandsbildern und mittlerem Niederschlag (in mm). Fehlerbalken entsprechen den 95%-Konfidenzintervallen der Mittelwerte.

5.3 Umfrage

Mit den Daten aus der Umfrage haben wir insbesondere drei Ziele verfolgt: Erstens wollten wir mit den Daten eine Vorstellung der demografischen Zusammensetzung der Fahrzeuglenkenden auf den Experimentalstrassen erhalten. Hierfür berichten wir nachfolgend die relevanten Statistiken der Stichprobe des Kurzinterviews und der

Onlineumfrage. Zweitens wollten wir überprüfen, inwiefern den Fahrzeuglenkenden auf der Strasse das experimentelle Setting (z. B. Radargeräte und Leuchtdichtekameras, wahrgenommene Leuchtdichte, bzw. «Helligkeit») aufgefallen sind. Details zum genauen Ablauf der Umfrage finden sich in Kapitel 3.2.4. Drittens wollten wir mit dem Erheben individueller Charakteristiken der Fahrzeuglenkenden in der Lage sein, mögliche Erklärungen (psychologische Prozesse) für einen allfälligen Effekt der Beleuchtungsstärke, bzw. der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit zu untersuchen.

5.3.1 Kurzinterviews

Insgesamt nahmen 454 Fahrzeuglenkende an den Kurzinterviews teil (28 % Frauen, 72 % Männer; M_{Alter} : 42.3; SD_{Alter} : 14.8). Abb. 27 veranschaulicht die Verteilung der Fahrzeuglenkenden auf die drei Experimentalstrassen. Von den Fahrzeuglenkenden, die an den Kurzinterviews teilnahmen, nahmen 165 (36 % der insgesamt befragten) zusätzlich auch an der Online-Umfrage teil (35 % Frauen, 65 % Männer; M_{Alter} : 42.6; SD_{Alter} : 15.0).

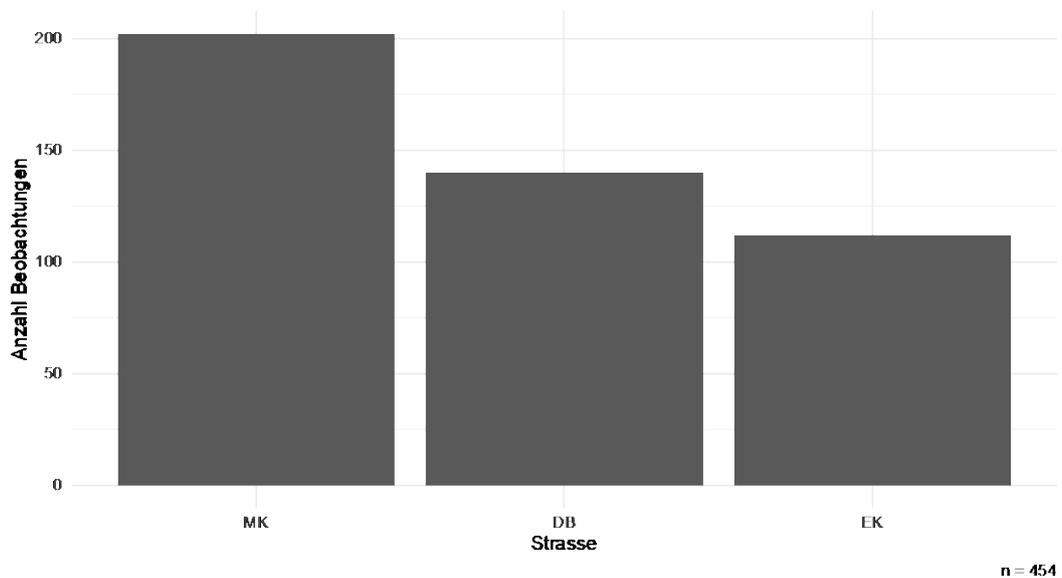


Abb. 27 Verteilung der Anzahl Kurzinterviews über die drei Strassen.

Die meisten Fahrzeuge waren mit nur einer Person besetzt (siehe Abb.), dies zeigt sich auch im Median der Anzahl Passagiere pro Fahrzeug ($Median = 1$, $IQR = 1$).

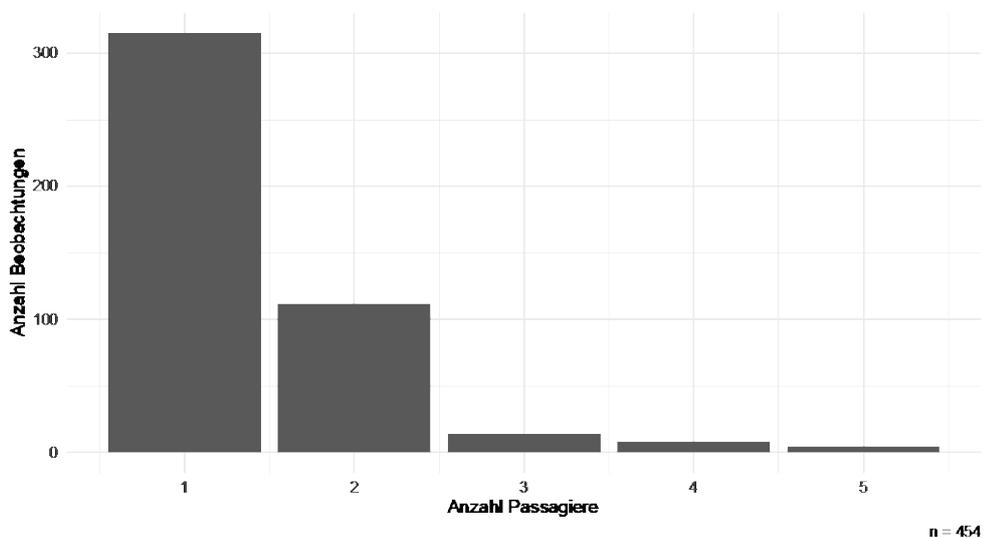


Abb. 28 Anzahl Beobachtungen von Passagieren pro Fahrzeug (inkl. Fahrer*in).

Zudem zeigte sich, dass die Fahrzeuglenkenden ihre Nachtsicht als gut einschätzten (siehe Abb.) ($M = 5.9$, $SD = 1.0$).

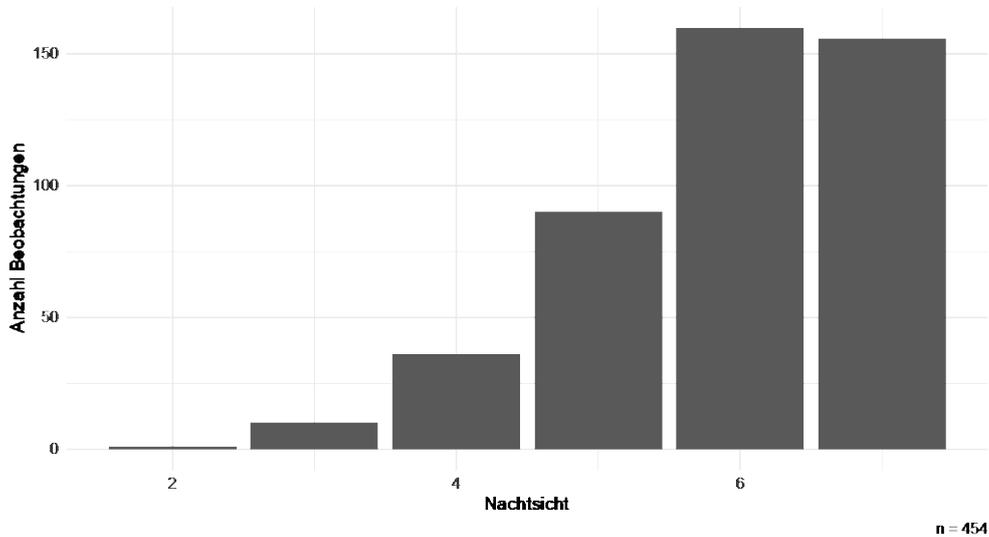


Abb. 29 Anzahl Beobachtungen je Selbsteinschätzung Nachtsicht (1 = sehr schlecht, 7 = sehr gut).

In Bezug auf die Frage, ob den Befragten etwas Aussergewöhnliches aufgefallen sei, lässt sich generell festhalten, dass allgemeine Nennungen in einem geringen Prozentsatz (14% - 29%) aufgetreten sind. Wichtig für unsere Untersuchung ist, dass die Messgeräte (0% - 8% je nach Strasse) und die Lichtverhältnisse (7% - 15% je nach Strasse) nur einem sehr geringen Prozentsatz der Befragten aufgefallen sind (siehe Abb.).

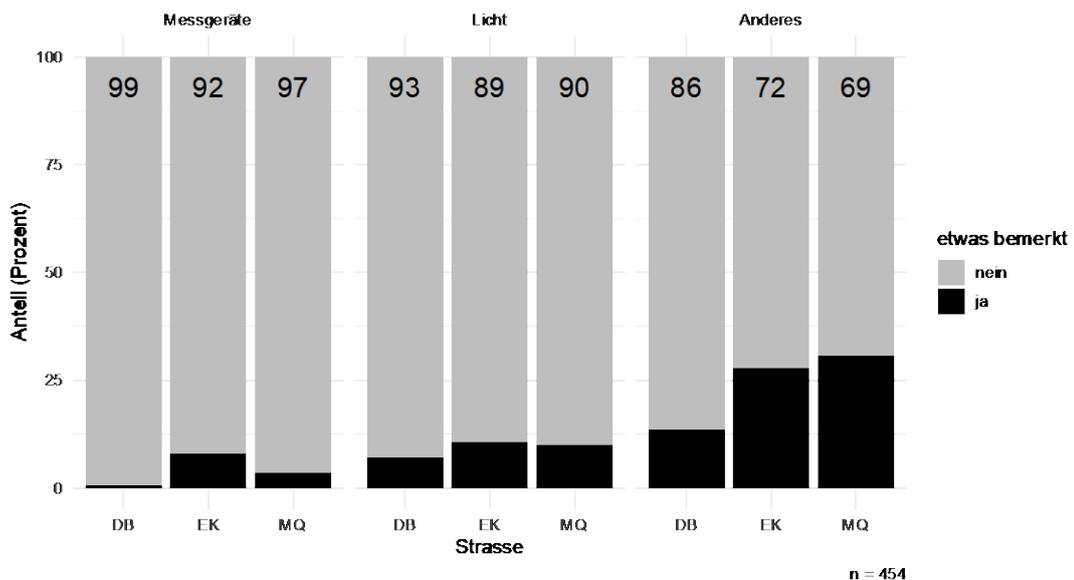


Abb. 30 Anzahl Beobachtungen über Bemerkungen («Ist Ihnen etwas Aussergewöhnliches aufgefallen?»).

Um zu testen, ob den Fahrzeuglenkenden die Manipulation der Beleuchtung auffällt, haben wir eine Varianzanalyse gerechnet, mit Beleuchtungsstärke (7.5lx – 20lx) als Prädiktor und

selbstberichteter Helligkeit als abhängige Variable (1 = sehr dunkel, 7 = sehr hell). Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeuglenkenden trotz der starken Manipulation keine unterschiedlichen Helligkeiten berichteten, $F(3, 450) = 1.796$, $p = .147$ (siehe Abb.). In diesem Zusammenhang gilt es hervorzuheben, dass sich alle Mittelwerte in der oberen Hälfte der Skala befinden und sich signifikant von der Mitte der Skala (4) unterscheiden. So die Mehrheit der Teilnehmenden in der dunkelsten Bedingung (7.5 lx) an, dass die Strasse eher hell (4-7) war. Dies impliziert, dass die Strassen unabhängig von der manipulierten Beleuchtungsstärke im Schnitt als eher hell wahrgenommen wurden.

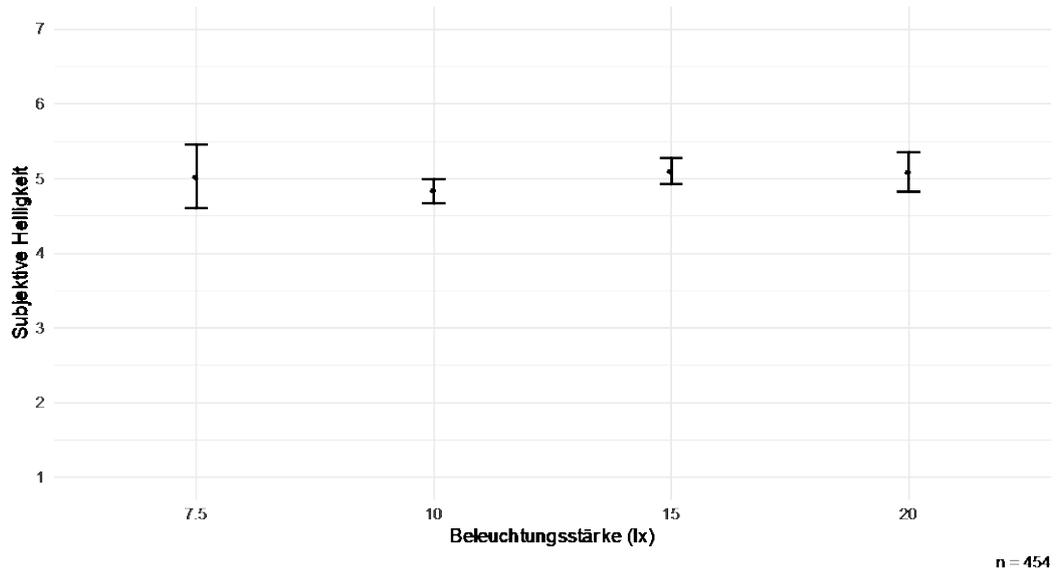


Abb. 31 Effekt der manipulierten Beleuchtungsstärke auf die subjektive Helligkeit (1: überhaupt nicht hell; 7: sehr hell). Fehlerbalken entsprechen den 95%-Konfidenzintervallen der Mittelwerte. Rohdaten sind im Hintergrund als Punkte dargestellt.

5.3.2 Onlineumfrage

Insgesamt haben 165 Personen an der Onlineumfrage teilgenommen (36 % der Gesamtbefragten). Der Zweck der Onlineumfrage war es, die Stichprobe mit weiteren Eigenschaften zu beschreiben.

So sind die Teilnehmenden der Onlinebefragung im Mittel seit 21.1 ($SD = 14.1$) Jahren im Besitz eines Führerscheines. Die Teilnehmenden gaben zudem an, eher oft im Dunkeln zu fahren ($M = 5.4$, $SD = 1.3$ auf einer 7-Punkte Skala von 1 (*nie*) bis 7 (*sehr oft*)) und die Strassen von Zürich eher gut zu kennen ($M = 5.6$, $SD = 1.3$ auf einer 7-Punkte Skala von 1 (*überhaupt nicht*) bis 7 (*sehr gut*)). Insgesamt scheint es also, dass wir mit unserer Untersuchung tendenziell erfahrene Fahrzeuglenkende beobachten.

Gemäss einer Analyse der Risikofreudigkeit haben die Fahrzeuglenkenden angegeben wenig risikofreudig zu fahren ($M = 1.8$, $SD = 0.6$ auf einer 7-Punkte Skala von 1 - *überhaupt nicht risikofreudig* bis 7 - *sehr risikofreudig*).

6 Diskussion

6.1 Zusammenfassung des Forschungsprojektes

Das vorliegende Forschungsprojekt hat drei Ziele verfolgt. Erstens die relevante Fachliteratur zum Zusammenhang von Beleuchtungsstärke (bzw. Leuchtdichte) und Fahrgeschwindigkeit identifizieren, analysieren und aufbereiten. Zweitens den Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit empirisch untersuchen. Drittens, basierend auf den Ergebnissen, Empfehlungen für das Optimierungspotenzial der Strassenbeleuchtung entwickeln und diskutieren.

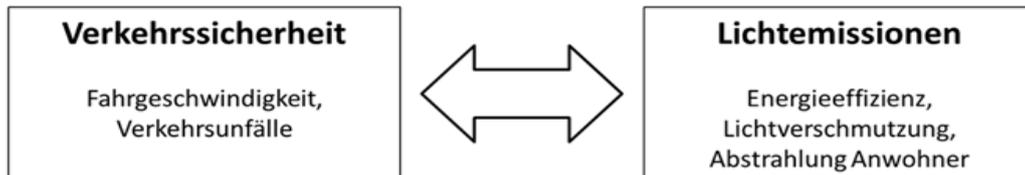
Die Literaturrecherche und -analyse zur Erreichung des ersten Zieles dieses Forschungsprojektes hat untermauert, dass die Evidenz bezüglich des BFZ widersprüchlich ist. Es gibt Evidenz, die sowohl für einen positiven (höhere Geschwindigkeit bei höherer Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte) als auch für einen negativen (niedrigere Geschwindigkeit bei höherer Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte) Effekt von Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit spricht. In der Fachliteratur werden verschiedene Erklärungen für die unterschiedlichen Effektrichtungen diskutiert. Viele der Studien wurden in künstlichen Umgebungen wie bspw. Fahrsimulatoren durchgeführt. Diejenigen Studien, die im Feld stattfanden, sind oftmals korrelativer Natur und/oder wurden auf abgesperrten Strassenabschnitten durchgeführt. Auch ist die Stichprobengrösse der genannten Studien oftmals klein. Unsere Erkenntnisse der Literaturrecherche und -analyse lassen also nicht ausschliessen, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen der Strassenbeleuchtung und der Fahrgeschwindigkeit gibt. Insgesamt untermauert die Literaturrecherche und -analyse die Wichtigkeit einer eigenen empirischen Felduntersuchung des BFZ mit einem experimentellen Ansatz.

Die empirische Untersuchung des BFZ in Form eines Feldexperimentes zur Erreichung des zweiten Zieles stellt das Kernelement dieses Forschungsprojektes dar. Das übergeordnete Ziel bestand darin, kausale Evidenz für den BFZ aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurde auf drei Zürcher Strassen das Niveau der Strassenbeleuchtung systematisch variiert. Zudem haben wir alle Fahrzeugbewegungen inkl. deren Geschwindigkeit gemessen und den Strassenzustand sowie anonymisierte Fahrzeugkennzeichen aufgezeichnet. Unsere Analyse zeigt keine Evidenz für einen systematischen BFZ, das heisst, wir können keinen kausalen Zusammenhang zwischen der Strassenbeleuchtung (auf den vier manipulierten Levels) und der Fahrgeschwindigkeit herstellen. Konkret wurden in Bezug auf die Manipulation der Beleuchtungsstärke keine konsistenten Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit gefunden. In Bezug auf die Leuchtdichte wurde hingegen ein negativer Effekt auf die Fahrgeschwindigkeit festgestellt, vor allem im unteren Leuchtdichte-Bereich (bis 10 cd/m^2).

Die Diskussion von Empfehlungen für das Optimierungspotenzial der Strassenbeleuchtung, als drittes Ziel des Forschungsprojektes, ist ein besonderes Anliegen des Forschungsteams wie auch der BK. Die Erkenntnisse der Literaturrecherche und -analyse sowie des Feldexperimentes ermöglichten es, ein besseres Verständnis des BFZ zu entwickeln. Die vorliegenden Erkenntnisse untermauern insbesondere auch den Diskussionsbedarf hinsichtlich geltender Strassenbeleuchtungsnormierungen und -praktiken und das Potential einer Reduktion von Lichtemissionen und der damit verbundenen Energieersparnis.

6.2 Implikationen

Dieses Forschungsprojekt hat vier übergeordnete Implikationen. Die erste Implikation bezieht sich auf die Klärung des BFZ. Die zweite Implikation bezieht sich auf die Bedeutung der Ergebnisse für verkehrssicherheitstechnische Überlegungen. Ähnlich sind als dritte Implikationen mögliche Auswirkungen zu diskutieren, welche die Ergebnisse für die Strassenbeleuchtungsnormierung mit sich bringen. Schliesslich haben die Ergebnisse



auch Implikationen für die Diskussion zum Spannungsfeld der Verkehrssicherheit, Energieeffizienz und Lichtemissionen. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 32 ersichtlich.

Abb. 32 Spannungsfeld zwischen Verkehrssicherheit und Lichtemissionen.

6.2.1 Diskussion der Ergebnisse in Bezug zu bestehender Forschung

Unsere Literaturrecherche und -analyse hat untermauert, dass die Evidenz bezüglich des BFZ bis anhin widersprüchlich war. Eine Gruppe von Studien legte bislang nahe, dass eine geringere Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte mit einer verringerten Fahrgeschwindigkeit einher geht (Assum et al., 1999; Bassani et al., 2016; Brooks et al., 2011; Owens et al., 2010; Pretto et al., 2012; Pritchard & Hammett, 2012; Wood et al., 2018). Eine andere Gruppe von Studien legte nahe, dass eine geringere Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte mit einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit einher geht (Anstis, 2003; Blakemore & Snowden, 1999; Brooks et al., 2011; de Bellis et al., 2018; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982). Hinzu kommen neuere Forschungsergebnisse, die nahelegen, dass der BFZ von nicht-linearer Natur ist (Owens et al., 2018). Wie wir zu Beginn dieses Berichtes (siehe Kapitel 2.6) ausgeführt haben, liegt eine mögliche Erklärung dieser widersprüchlichen Evidenz darin, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Strassenbeleuchtung und der gewählten Fahrgeschwindigkeit gibt. Dies steht im Einklang mit Studien, die zeigen, dass es keinen oder einen nicht-linearen BFZ gibt (Fotios & Gibbons, 2018; Owens et al., 2010, 2018).

Hinsichtlich dieser Unklarheiten bringt unser Forschungsprojekt nun Aufschluss: Unsere Analyse zeigt keine Evidenz für einen systematischen BFZ, das heisst, wir können keinen kausalen Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Fahrgeschwindigkeit herstellen. Gleichzeitig finden wir jedoch einen negativen Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der Fahrgeschwindigkeit, was im Einklang mit der einen Gruppe von Studien und insbesondere mit der korrelativen Feldstudie von de Bellis et al. (2018) steht, welche ebenfalls auf Daten von Zürcher Strassen beruht. Während wir also keinen Effekt in Bezug auf Beleuchtungsstärke finden, erhalten wir einen negativen Effekt in Bezug auf Leuchtdichte, welche neben der Strassenbeleuchtung auch durch Umgebungslicht und insbesondere durch Fahrzeugscheinwerfer beeinflusst wird. Diese unterschiedlichen Ergebnisse könnten helfen einige der oben aufgezeigten Inkonsistenzen in der Literatur zu erklären.

Unsere Ergebnisse sind bisherigen Studienergebnissen insofern vorzuziehen, als dass sie auf einem Feldexperiment beruhen, das in vielerlei Hinsicht methodisch ausgereifter ist als frühere Studien. So handelt es sich bei unserem Projekt um eine Langzeitstudie über 6 Monate, mit einer grossen Stichprobe in einem realen Setting (nicht im Fahr Simulator) und mit experimentellen Bedingungen, was eine kausale Interpretation der Ergebnisse zulässt. Zu untermauern gilt es ebenfalls, dass wir in unserem Projekt sowohl Leuchtdichte als auch Beleuchtungsstärke berücksichtigt und wir unsere Hypothesen präregistriert haben.

6.2.2 Implikationen für die Verkehrssicherheit

Strassenbeleuchtung ist ein bedeutender Prädiktor für Verkehrssicherheit. Eine hohe Qualität der Strassenbeleuchtung geht mit hoher Verkehrssicherheit einher (Krause, 2015; Riedel et al., 2013; Walkling, 2017). Optimale Strassenbeleuchtung hilft Fahrzeuglenkenden, frühzeitig Gefahrenquellen auf und neben den Strassen zu erkennen. So können die Fahrzeuglenkenden im Strassenverkehr richtig handeln (Schweizer Licht Gesellschaft, 2020; Wagner & Wagner, 2013). Grundsätzlich gilt eine optimale Strassenbeleuchtung als zentraler Faktor, um die Zahl und die Schwere von Unfällen im Strassenverkehr zu reduzieren. Eine optimale Strassenbeleuchtung wird anhand verschiedener Gütemerkmale festgelegt. Dazu gehören bspw. (1) eine optimal an die örtlichen Verhältnisse abgestimmte Beleuchtungsstärke, (2) eine gleichmässige Beleuchtung, (3) eine gute Blendungsbegrenzung, (4) eine optische Führung, und (5) das Ermöglichen einer raschen Adaption für das menschliche Auge (Schweizer Licht Gesellschaft, 2020). Angesichts der Vorteile einer optimalen Strassenbeleuchtung gilt das Prinzip, dass die Qualität der Strassenbeleuchtung umso höher sein muss, je höher das Risiko für die Verkehrssicherheit ist.

Während die Wichtigkeit einer optimalen Strassenbeleuchtung in der Vergangenheit zu einer «Norm hoher Beleuchtungsstärke» geführt hat, kam dieser Ansatz mit den zunehmenden Bedenken des Einflusses auf die Umwelt in Kritik (Riedel et al., 2013). Dieses Projekt liefert ein Argument dafür, dass mehr Beleuchtung nicht unbedingt «besser» ist. Tiefere Beleuchtungsstärken haben, im Gegensatz zu Erkenntnissen aus früheren Studien, keine höhere Fahrgeschwindigkeit zur Folge. Für Strassen ohne Konfliktzonen bedeutet dies laut unseren Ergebnissen, dass eine Reduktion der Beleuchtungsstärke, z. B. von aktuell 15 lux auf 10 lux, nicht mit erhöhter Fahrgeschwindigkeit einhergehen sollte. Die Ergebnisse zur Leuchtdichte lassen darauf schliessen, dass eine solche Reduktion möglicherweise durch immer hellere Fahrzeugscheinwerfer kompensiert werden würde (s. Lyttimäki, Tapio, & Assmuth, 2012).

Zwei Aspekte sind in diesem Zusammenhang wichtig. Während unsere Ergebnisse keine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit bei geringerer Beleuchtungsstärke zeigen, können wir keine abschliessenden Aussagen über den Effekt auf die Verkehrssicherheit machen, da die gewählte Fahrgeschwindigkeit zwar ein wichtiger Aspekt der Verkehrssicherheit ist, aber nicht der einzige Einflussfaktor. Zweitens erscheint es uns wichtig, wiederholt darauf hinzuweisen, dass die vorliegenden Ergebnisse und die damit verbundenen Implikationen beschränkt generalisierbar sind. Insbesondere darf die Implikation, dass die Beleuchtungsstärke reduziert werden kann, nicht ohne weiteres auf Strassen mit Konfliktzonen übertragen werden. Auf Strassen mit Konfliktzonen dient eine hohe Beleuchtungsstärke insbesondere dazu, Personen oder Hindernisse sichtbar zu machen, was nach wie vor hohe Priorität haben sollte.

6.2.3 Implikationen für die Strassenbeleuchtungsnormierung

Verkehrs- und Beleuchtungsexpert*innen und zuständige Behörden haben Strassenbeleuchtungsnormen und Empfehlungen für eine optimale Strassenbeleuchtung definiert. So spielen bei der Ausgestaltung der Strassenbeleuchtung etwa die Schweizer Norm für öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen (SN 640 551-1) oder die europäischen Strassenbeleuchtungsnormen (DIN EN 13201) eine wichtige Rolle.

Viele Strassenbeleuchtungsnormierungen sind «historisch gewachsen» und gelten bereits seit vielen Jahren. Ein fundamentales Problem besteht darin, dass Strassenbeleuchtungsnormierungen ungenügend auf empirischen Erkenntnissen fussen (z. B. Fotios & Gibbons, 2017), insbesondere nicht auf wahrnehmungs- und verkehrspsychologischen Erkenntnissen. Dieses Forschungsprojekt hat wahrnehmungs- und verkehrspsychologische Implikationen, die relevant für die Strassenbeleuchtungsnormierung sind. Es zeigt auf, dass auf Strassen ohne Konfliktzonen nicht damit gerechnet werden muss, dass eine niedrigere Beleuchtungsstärke zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit führt, wie es eine Reihe bisheriger Forschungsarbeiten nahe gelegt hat (Anstis, 2003; Blakemore & Snowden, 1999; Brooks et al., 2011; de Bellis

et al., 2018; Horswill & Plooy, 2008; Snowden et al., 1998; Thompson, 1982). Empfehlungen in Richtung tieferer Beleuchtungsstärke-Levels können aufgrund unserer Ergebnisse, mit den diskutierten Einschränkungen, grundsätzlich unterstützt werden.

6.2.4 Implikationen für Fragen um Energieeffizienz und Lichtemissionen

Die Strassenbeleuchtungsnormierung sollte nicht nur auf den neuesten Erkenntnissen der Wissenschaft beruhen und situationsbedingte Parameter wie z. B. Lichtverhältnisse und das Verkehrsaufkommen berücksichtigen, sondern auch wirtschaftliche Parameter (z. B. Energieverbrauch) sowie umweltbezogene Parameter (z. B. Auswirkungen auf die nächtliche Landschaft sowie auf Menschen, Tiere und Pflanzen) miteinbeziehen.

In Bezug auf die wirtschaftliche Perspektive lässt sich festhalten, dass die vorliegenden Ergebnisse auf ein substanzielles Einsparungspotential beim Energieverbrauch hinweisen. Laut EWZ liegt der gesamte Energieverbrauch für die Strassenbeleuchtung in der Stadt Zürich bei ca. 16 GWh. Angenommen die Strassenbeleuchtung der Stadt Zürich wäre komplett mit LED ausgestattet (was in Planung ist), dann würde es bei Halbierung der Beleuchtungsstärke zu einer Einsparung von ca. 6 GWh kommen. Dies entspricht dem Energieverbrauch von mehr als 2'200 Haushalten.

Gerade die umweltbezogene Perspektive auf die Strassenbeleuchtungsnormierung hat in den letzten Jahren stark an Relevanz gewonnen. Damit sind nicht zuletzt auch Empfehlungen laut geworden, die Strassenbeleuchtungsnormierung anzupassen, bzw. die Beleuchtungsstärke auf den Strassen zu reduzieren. Neben den ökologischen Vorteilen für Tiere wird dabei auch der Vorteil für Menschen hervorgehoben (z. B. grösserer Wohnkomfort; UFAM, 2021). Obschon dies Diskussion in den letzten Jahren breiter geführt wurde, stellen wir fest, dass es kaum Änderungen in der Strassenbeleuchtungsnormierung gegeben hat. Dies ist insbesondere auf die fehlenden empirischen Ergebnisse zurückzuführen. Das vorliegende Forschungsprojekt wirkt nun diesen Bedenken entgegen und stützt die Empfehlung, die Strassenbeleuchtung auf Strassen ohne Konfliktpotential zu reduzieren.

6.3 Limitationen

Wir sehen insbesondere zwei Limitationen, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts diskutiert werden sollten. Die erste Limitation ergibt sich durch die beschränkte Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Strassentypen wie z. B. Strassen mit Konfliktzonen. Die zweite Limitation bezieht sich auf eine Reihe technischer Herausforderungen vor und während dem Feldexperiment, hier vor allem die schlechte Datenqualität, der durch Swisstraffic gelieferten Daten.

6.3.1 Beschränkte Generalisierbarkeit

Das Feldexperiment fand auf drei Zürcher Strassen statt. Die Wahl dieser drei Strassen ist auf methodische und praktische Gründe zurückzuführen. Im Hinblick auf das experimentelle Design, den Versuchsplan und die geplante Datenaggregation und -analyse war es wichtig, dass die Strassen durchgängig gerade geführt und konfliktzonenfrei waren. Zudem war die Auswahl der Strassen aus praktischer Sicht eingeschränkt. So mussten die Strassen verschiedene technische und sicherheitsrelevante Kriterien erfüllen, damit Swisstraffic und das EWZ die verschiedenen Messsysteme installieren und warten konnten. In Absprache mit der BK, insbesondere Christoph Girsperger (EWZ), André Gmür (EWZ) und Dr. Wernher Brucks (Stadt Zürich), ist so die Auswahl auf die drei genannten städtischen Strassen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 50 km/h und 60 km/h gefallen.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die vorliegenden Erkenntnisse v. a. für städtische Strassen ohne Konfliktzonen zutreffend sind. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Ergebnisse für Strassen mit Konfliktzonen, ländliche Strassen und/oder Strassen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen unter 50 km/h oder über 60 km/h nicht verallgemeinerbar sind. Während es sinnvoll erscheint, den Einfluss der

Strassenbeleuchtung auch für Strassentypen mit anderen Geschwindigkeitsbegrenzungen zu untersuchen, ist aus Sicherheitsgründen davon abzuraten, Feldexperimente auf Strassen mit grossem Konfliktpotential durchzuführen. Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass die vorliegenden Erkenntnisse wichtige Implikationen für die Strassenbeleuchtung mit sich bringen, die Übertragbarkeit der Erkenntnisse jedoch bei Strassentypen, die sich stark von den Experimentalstrassen unterscheiden, kritisch betrachtet werden muss.

Weiterhin sei erwähnt, dass durch den Versuchsaufbau der Umfrage (Teilnahme direkt im Anschluss an eine Polizeikontrolle) nicht ausgeschlossen werden kann, dass sozial erwünschte Antworten gegeben wurden. Wird jedoch die Streuung der Antworten (siehe Abb. 31) und die Kontrollfunktion dieser Fragen (z.B. Helligkeitswahrnehmung) berücksichtigt, scheint ein grosser Effekt hier unwahrscheinlich.

6.3.2 Technische Probleme

Wie bereits in Kapitel 1.3 und 4.2.2 erwähnt gilt es darauf hinzuweisen, dass während des Feldexperimentes mehrere technische Probleme auftraten. Namentlich beziehen sich diese Probleme auf Messausfälle, Messungenauigkeiten und Synchronisationsprobleme der durch Swisstraffic bereitgestellten Geräte und Daten.

Im Hinblick auf Messausfälle konnten wir zu Beginn des Feldexperimentes (geplanter Start: 01.11.2019) aufgrund Lieferschwierigkeiten und technischer Probleme mit den Leuchtdichtekameras keine Daten erheben. Für die EK und den MQ konnte Swisstraffic das Problem am 12.11.2019 lösen; für die DB bis zum 04.12.2019. Aufgrund dieser Messausfälle haben wir uns in Absprache mit Swisstraffic und der BK dazu entschieden, das Feldexperiment erst am 04.12.2019 zu starten und bis zum 31.05.2020 zu verlängern. Insgesamt konnten wir so sicherstellen, dass wir wie geplant Daten für einen Zeitraum von einem halben Jahr aufzeichnen.

Die wohl grösste Herausforderung des Forschungsprojektes bestand darin, dass sich die Daten der unterschiedlichen Geräte nicht, wie geplant, über die jeweiligen Zeitstempel zusammenführen liessen. Wir fanden für die relevanten Geräte über den Messzeitraum einen Shift und einen wandernden Offset (Drift) der Zeitstempel zwischen den Geräten. Dies war insbesondere bei der Zusammenführung der Daten der Radargeräte, Leuchtdichtekameras und ANPR-Kameras problematisch. Wir mussten diese Messungenauigkeiten im Nachgang durch signifikanten Zusatzaufwand, komplexes Datenmanagement und ungeplante Analyseschritte beheben. Diese Prozesse führten zu einer massiven Datenreduktion, die u. a. mit einem Verlust an statistischer Power einherging.

Nach Rücksprache mit Dr. Wernher Brucks und dem ASTRA konnten wir einige der freigewordenen finanziellen Mittel (z. B. ein Teil der Mittel, die für die Fahrstudie vorgesehen waren) für den beschriebenen Zusatzaufwand verwenden. Diese finanziellen Mittel konnten jedoch nur einen Bruchteil des Zusatzaufwandes decken, der sich durch die schlechte Qualität der Daten ergeben hat. Die einzelnen Schritte zur Behebung dieser Synchronisationsprobleme sind unter Kapitel 4.2.2 detailliert adressiert worden.

Um der Transparenz unserer Datenbereinigung, -aufbereitung und -analyse genügend Rechnung zu tragen, möchten wir darauf hinweisen, dass es zu weiteren, vergleichbar kleineren Messproblemen kam. Wir haben diese jeweils individuell analysiert und entsprechend adressiert. Meistens handelt es sich um fehlende Werte oder um einige Unstimmigkeiten, die durch entsprechendes Datenmanagement gelöst werden konnten. Diese Unstimmigkeiten wurden z. B. durch ungeplanten Austausch von Geräten, Umbenennung von Gerätebezeichnungen und inkonsistentes Datenmanagement durch Swisstraffic verursacht.

6.4 Künftige Forschung

In Bezug auf künftige Forschung möchten wir vier Fragestellungen diskutieren, die sich aufgrund der diskutierten Limitationen dieses Forschungsprojektes ergeben und die unseres Erachtens besonders dringlich sind.

Die erste dieser Fragestellungen ergibt sich aus der beschränkten Übertragbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf Strassen mit Konfliktzonen. Unsere Ergebnisse sind repräsentativ für urbane Strassen ohne Konfliktzonen. Die von den Ergebnissen abgeleiteten Implikationen können somit nicht ohne weiteres auf Strassen mit Konfliktzonen übertragen werden. Bei Strassen mit Konfliktzonen ist bei der Bestimmung der Strassenbeleuchtung aufgrund sicherheitstechnischer Gründe besonders grosse Vorsicht geboten. Wir empfehlen daher experimentell zu prüfen, inwiefern die vorliegenden Ergebnisse auch auf Strassen mit Konfliktzonen zutreffen. Um die nötige Sicherheit zu gewähren, schlagen wir ein Experiment bei Dunkelheit auf einem gesperrten Areal mit dem erforderlichen Setting (z. B. Strassen und manipulierbare Strassenbeleuchtung, höchste Sicherheitsvorkehrungen) vor, wobei sämtliche Konfliktzonen so ausgestaltet sind, dass sie zwar echt wirken, jedoch keine Risiken bestehen (es müsste hierbei sichergestellt werden, dass die Wahrnehmung der Situation als «echt» gegeben ist). So könnten Konfliktzonen z. B. mit lebensgrossen, beweglichen Puppen ausgestattet sein. Die Beleuchtungsstärken könnten dann gemäss einem Versuchsplan variiert und die Fahrgeschwindigkeit gemessen werden. Die Ergebnisse eines solchen Experimentes würde die notwendige Sicherheit dafür bringen, ob eine Reduktion der Beleuchtungsstärke auch für Strassen mit Konfliktzonen empfehlenswert ist.

Die zweite Fragestellung ergibt sich daraus, dass wir zwar Aussagen über den BFZ, nicht aber über den Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und Verkehrsunfällen machen können. Während wir Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit betrachten, können wir keine Aussage zum Zusammenhang zwischen Strassenbeleuchtung und Verkehrsunfällen machen. Dies ist eine Limitation des vorliegenden Forschungsprojektes und sollte in einem künftigen Forschungsprojekt entsprechend adressiert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, auf bestehende Datenbanken mit Verkehrsdaten (Beleuchtungsstärke/Leuchtdichte sowie Anzahl und Ausmass von Verkehrsunfällen) zurückzugreifen und zu analysieren, ob es einen korrelativen Zusammenhang der Strassenbeleuchtung mit Verkehrsunfällen gibt. Eine andere Möglichkeit wäre, Fahrzeuge individuell zu tracken, um Aussagen über das spezifische Fahrverhalten unter gegebener Beleuchtungsstärke treffen zu können. Dies würde es auch erlauben, die Vertrautheit mit einer bestimmten Strasse (Häufigkeit der Durchfahrt) besser berücksichtigen zu können.

Die dritte Fragestellung bezieht sich auf die gegenläufigen Ergebnisse in Bezug auf Beleuchtungsstärke versus Leuchtdichte. Während wir keine Evidenz für einen kausalen Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit gefunden haben, fanden wir eine konsistent negative Korrelation zwischen Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit. Zukünftige Forschung sollte sich mit diesem inkonsistenten Muster beschäftigen und insbesondere den Fokus auf Variablen richten, welche möglicherweise mit Leuchtdichte korrelieren und deswegen den negativen Zusammenhang bewirkt haben könnten. In diesem Kontext könnte auch der Einfluss von immer helleren Fahrzeugscheinwerfern diskutiert und ggf. empirisch analysiert werden, wodurch die Bedeutung der Strassenbeleuchtung möglicherweise abnimmt.

Die vierte Fragestellung betrifft die Geschwindigkeitswahl bei verschiedenen Subgruppen der Bevölkerung. Da die vorliegenden Ergebnisse für die gesamte Stichprobe an Verkehrsteilnehmenden gelten wäre es interessant, bestimmte Subgruppen zu analysieren, die sich bspw. in Alter, Geschlecht und/oder sozioökonomischem Status unterscheiden. Möglicherweise finden sich für solche Subgruppen andere Effekte in Bezug auf den BFZ. Auch in den Extrembereichen der Geschwindigkeitsverteilung (Stichwort «Raser») wäre es spannend zu sehen, ob es spezifische Bedingungen gibt, unter den stark überhöhte Geschwindigkeit besonders oft vorkommt, wobei diese Frage personen- wie auch umweltbezogen beantwortet werden sollte.

6.5 Fazit

Dieses Forschungsprojekt konnte keine Evidenz für einen kausalen Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Fahrgeschwindigkeit zeigen. Es wurde allerdings eine negative Korrelation zwischen Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit gefunden. Die Ergebnisse des Feldexperiments bringen verschiedene Implikationen für die Strassenbeleuchtungspraxis mit sich. Im Rahmen der untersuchten Verkehrssituation (Strassen ohne Konfliktzone, Geschwindigkeitsbegrenzung bei ca. 50-60 km/h) kann die Empfehlung einer reduzierten Beleuchtungsstärke grundsätzlich unterstützt werden, was eine verbesserte Energieeffizienz und verminderte Lichtemissionen zur Folge hätte und somit einen ökonomischen als auch ökologischen Mehrwert stiften würde. Effekte auf die allgemeine Verkehrssicherheit müssen von einer solchen Massnahme getrennt evaluiert werden.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
Beleuchtungsstärke	Der auf die Strasse einfallende Lichtstrom, gemessen in lux
BFZ	Beleuchtungsstärke-Fahrgeschwindigkeits-Zusammenhang
BK	Begleitkommission
C-Klasse	Norm für Beleuchtungsklassen: C2 = 20 lx, C3 = 15 lx, C4 = 10 lx, C5 = 7.5 lx
DB	Duttweilerbrücke
EK	Emil-Klöti-Strasse
Leuchtdichte	Das von der Strassenoberfläche reflektierte und von Fahrzeuglenkenden wahrgenommene Licht, gemessen in cd/m^2
M	Meilensteine
MQ	Mythenquai
Strassenzustand	trocken; etwas nass; nass; starker Regen

Literaturverzeichnis

- Amoros, E., Brosnan, M., Wegman, F., Bos, N., Perez, C., Segui, M., Heredero, R., Noble, B., Kilbey, P., & Feypell, V. (2009). Reporting on Serious Road Traffic Casualties, International Traffic Safety Data and Analysis Group–IRTAD, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). International Transport Forum, Paris.
- Anstis, S. (2003). Moving objects appear to slow down at low contrasts. *Neural Networks*, *16*(5–6), 933–938. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(03\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(03)00111-4)
- Assum, T., Bjørnskau, T., Fosser, S., & Sagberg, F. (1999). Risk compensation—The case of road lighting. *Accident Analysis & Prevention*, *31*(5), 545–553. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00011-1)
- Bassani, M., Catani, L., Cirillo, C., & Mutani, G. (2016). Night-time and daytime operating speed distribution in urban arterials. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *42*(1), 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.020>
- Bassani, M., & Mutani, G. (2012). Effects of environmental lighting conditions on operating speeds on urban arterials. *Transportation Research Record*, *2298*(1), 78–87. <https://doi.org/10.3141/2298-09>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Blakemore, M. R., & Snowden, R. J. (1999). The effect of contrast upon perceived speed: A general phenomenon? *Perception*, *28*(1), 33–48. <https://doi.org/10.1068/p2722>
- Blakemore, M. R., & Snowden, R. J. (2000). Textured backgrounds alter perceived speed. *Vision Research*, *40*(6), 629–638. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00214-X](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00214-X)
- Boyce, P. R., & Rea, M. S. (1987). Plateau and escarpment: The shape of visual performance. *Proceedings of the CIE 21st Session, Venice*.
- Brémond, R., Dang, N.-T., & Villa, C. (2016). The dynamic range of driving simulation. In F. Dufaux, R. K. Mantiuk, P. Le Callet, & M. Mrak (Hrsg.), *High Dynamic Range Video* (S. 549–559). Elsevier.
- Brooks, J. O., Crisler, M. C., Klein, N., Goodenough, R., Beeco, R. W., Guirl, C., Tyler, P. J., Hilpert, A., Miller, Y., Grygier, J., Burroughs, B., Martin, A., Ray, R., Palmer, C., & Beck, C. (2011). Speed choice and driving performance in simulated foggy conditions. *Accident Analysis & Prevention*, *43*(3), 698–705. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.014>
- Brooks, K. R., Morris, T., & Thompson, P. (2011). Contrast and stimulus complexity moderate the relationship between spatial frequency and perceived speed: Implications for MT models of speed perception. *Journal of Vision*, *11*(14), 1–10. <https://doi.org/10.1167/11.14.19>
- Brooks, K. R., & Rafat, M. E. (2015). Simulation of driving in low-visibility conditions: Does stereopsis improve speed perception? *Perception*, *44*(2), 145–156. <https://doi.org/10.1068/p7779>
- Broughton, K. L. M., Switzer, F., & Scott, D. (2007). Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, *39*(1), 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.06.009>
- Buchner, A., Brandt, M., Bell, R., & Weise, J. (2006). Car backlight position and fog density bias observer-car distance estimates and time-to-collision judgments. *Human Factors*, *48*(2), 300–317. <https://doi.org/10.1518/001872006777724363>
- Bundesamt für Umwelt BAFU | Office fédéral de l'environnement OFEV | Ufficio federale dell'ambiente UFAM. (2021). *Lichtemissionen (Lichtverschmutzung)*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-elektromog/elektromog-und-licht-fachinformationen/lichtemissionen-lichtverschmutzung-.html>
- Caro, S., Cavallo, V., Marendaz, C., Boer, E. R., & Vienne, F. (2009). Can headway reduction in fog be explained by impaired perception of relative motion? *Human Factors*, *51*(3), 378–392. <https://doi.org/10.1177/0018720809339621>
- Cavallo, V., Colomb, M., & Doré, J. (2001). Distance perception of vehicle rear lights in fog. *Human Factors*, *43*(3), 442–451. <https://doi.org/10.1518/001872001775898197>
- de Bellis, E., Schulte-Mecklenbeck, M., Brucks, W., Herrmann, A., & Ralph, H. (2018). Blind haste: As light decreases, speeding increases. *PLoS One*, *13*(1), e0188951. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188951>
- Edwards, J. B. (1999). Speed adjustment of motorway commuter traffic to inclement weather. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *2*(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(99\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(99)00003-0)
- Eisenbeis, G. (2013). Lichtverschmutzung und die Folgen für nachtaktive Insekten. In M. Held, F. Hölker, & B. Jessel (Hrsg.), *Schutz der Nacht—Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft* (S. 53–56). Bundesamt für Naturschutz, BfN.
- Fotios, S., Cheal, C., Fox, S., & Uttley, J. (2018). The effect of fog on detection of driving hazards after dark. *Lighting Research & Technology*, *50*(7), 1024–1044. <https://doi.org/10.1177/1477153517725774>

Fotios, S., & Gibbons, R. (2018). Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research & Technology*, 50(1), 154–186. <https://doi.org/10.1177/1477153517739055>

Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression* (3. Aufl.). SAGE Publications, Inc. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

Gibb, R., Gray, R., & Scharff, L. (2016). *Aviation Visual Perception: Research, Misperception and Mishaps*. Routledge.

Herd, D. R., Agent, K. R., & Rizenbergs, R. L. (1980). *Traffic accidents: Day versus night*. Kentucky Transportation Center. <http://dx.doi.org/10.13023/KTC.RR.1980.545>

Herrmann, A., Brenner, W., & Stadler, R. (2018). *Autonomous Driving: How the Driverless Revolution Will Change the World*. Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9781787148338>

Hogema, J. H. (1996). *Effects of rain on daily traffic volume and on driving behavior* (TM-96-B019). TNO Human Factors Research Institute. <https://trid.trb.org/view/572713>

Horswill, M. S., & Plooy, A. M. (2008). Reducing contrast makes speeds in a video-based driving simulator harder to discriminate as well as making them appear slower. *Perception*, 37(8), 1269–1275. <https://doi.org/10.1068/p5821>

Kang, J. J., Ni, R., & Andersen, G. J. (2008). Effects of reduced visibility from fog on car-following performance. *Transportation Research Record*, 2069(1), 9–15. <https://doi.org/10.3141/2069-02>

Keall, M. D., Frith, W. J., & Patterson, T. L. (2005). The contribution of alcohol to night time crash risk and other risks of night driving. *Accident Analysis & Prevention*, 37(5), 816–824. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.03.021>

Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00011-6)

Khattak, A. J., Kantor, P., & Council, F. M. (1998). Role of adverse weather in key crash types on limited-access: Roadways implications for advanced weather systems. *Transportation Research Record*, 1621(1), 10–19. <https://doi.org/10.3141/1621-02>

Kim, J. D., Perrone, J. A., & Isler, R. B. (2017). The Effect of Differences in Day and Night Lighting Distributions on Drivers' Speed Perception. *Perception*, 46(6), 728–744. <https://doi.org/10.1177/0301006616684236>

Krause, K. (2015). *Funktionen der künstlichen Beleuchtung und der Dunkelheit: Ein Bericht zum Stand der sozialwissenschaftlichen Forschung* (Bd. 3). Universitätsverlag der TU Berlin. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonnce-3809>

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

Lyytimäki, J., Tapio, P., & Assmuth, T. (2012). Unawareness in environmental protection: The case of light pollution from traffic. *Land Use Policy*, 29(3), 598–604.

Leibowitz, H. W., Owens, D. A., & Tyrrell, R. A. (1998). The assured clear distance ahead rule: Implications for nighttime traffic safety and the law. *Accident Analysis & Prevention*, 30(1), 93–99. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00067-5)

Lu, Z., Kwon, T. J., & Fu, L. (2019). Effects of winter weather on traffic operations and optimization of signalized intersections. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(2), 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.02.002>

Lüdecke, D., Makowski, D., Waggoner, P., & Patil, I. (2021). performance: An R package for assessment, comparison and testing of statistical models. *Journal of Open Source Software*, 6(60). <https://doi.org/10.21105/joss.03139>

Lundkvist, S.-O., & Ihlström, J. (2014). *Samband mellan hastighet och belysning*. VTI. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-6773>

Ni, R., Kang, J. J., & Andersen, G. J. (2010). Age-related declines in car following performance under simulated fog conditions. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 818–826. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.04.023>

Owens, D. A., Gu, J., & McNally, R. D. (2018). Perception of the speed of self-motion vs. object-motion: Another example of two modes of vision? *Consciousness and Cognition*, 64, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.con-cog.2018.07.006>

Owens, D. A., Wood, J., & Carberry, T. (2010). Effects of reduced contrast on the perception and control of speed when driving. *Perception*, 39(9), 1199–1215. <https://doi.org/10.1068/p6558>

Owens, D. A., Wood, J. M., & Owens, J. M. (2007). Effects of age and illumination on night driving: A road test. *Human Factors*, 49(6), 1115–1131. <https://doi.org/10.1518/001872007X249974>

Pretto, P., Bresciani, J.-P., Rainer, G., & Bühlhoff, H. H. (2012). Foggy perception slows us down. *ELife*, 1, e00031. <https://doi.org/10.7554/eLife.00031>

Pritchard, S. J., & Hammett, S. T. (2012). The effect of luminance on simulated driving speed. *Vision Research*, 52(1), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.10.014>

-
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
-
- Riedel, M., Ringwald, R., & Rönitzsch, H. (2013). *Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung: Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik*. Beuth Verlag.
-
- Rudin-Brown, C., & Jamson, S. (2013). *Behavioural Adaptation and Road Safety: Theory, Evidence and Action*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429106569>
-
- Rungruangvirojn, P., & Kanitpong, K. (2010). Measurement of visibility loss due to splash and spray: Porous, SMA and conventional asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 499–510. <https://doi.org/10.1080/10298430903578945>
-
- Schweizer Licht Gesellschaft. (2020). SLG. <https://slg.ch/>
-
- Snowden, R. J., Stimpson, N., & Ruddle, R. A. (1998). Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature*, 392, 450. <https://doi.org/10.1038/33049>
-
- Taylor, D. H. (1964). Drivers' galvanic skin response and the risk of accident. *Ergonomics*, 7(4), 439–451. <https://doi.org/10.1080/00140136408930761>
-
- Thompson, P. (1982). Perceived rate of movement depends on contrast. *Vision Research*, 22(3), 377–380. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90153-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90153-5)
-
- Wagner, K., & Wagner, H.-J. (2013). *Handbuch der Verkehrsmedizin: Unter Berücksichtigung aller Verkehrswissenschaften*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-86977-8>
-
- Walkling, A. (2017). Schwellenuntersuchung zur physiologischen Blendung für ortsfeste Strassenbeleuchtung-Weiterentwicklung der TI-Formel für nasse und trockene Strassen. In *Schriften der Ilmenauer Lichttechnik* (Bd. 20). Universitätsverlag Ilmenau. https://www.db-thueringen.de/receive/MQt_mods_00032687
-
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., D'Agostino McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43). <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
-
- Wilde, G. J. (1982). The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. *Risk analysis*, 2(4), 209–225. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1982.tb01384.x>
-
- Wood, J. M. (2019). Nighttime driving: Visual, lighting and visibility challenges. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 40(2), 187–201. <https://doi.org/10.1111/opo.12659>
-
- Wood, J. M., Isoardi, G., Black, A., & Cowling, I. (2018). Night-time driving visibility associated with LED streetlight dimming. *Accident Analysis & Prevention*, 121, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.08.023>
-
- Zhang, W., Hu, Z., Feng, Z., Ma, C., Wang, K., & Zhang, X. (2018). Investigating factors influencing drivers' speed selection behavior under reduced visibility conditions. *Traffic Injury Prevention*, 19(5), 488–494. <https://doi.org/10.1080/15389588.2018.1453134>
-

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: 30.01.2022

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI Projekt-Nr. 2018/003

Projekttitel: Der Einfluss energieeffizienter Strassenbeleuchtung auf die Fahrgeschwindigkeit

Enddatum: 31.01.2022

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ein zentrales Element der Verkehrssicherheit ist die, der Situation angepasste, Geschwindigkeit der Fahrzeuglenkenden. Ein situativer Faktor ist hierbei die Strassenbeleuchtung. Interdisziplinäre Forschung hat gezeigt, dass sich die Beleuchtungsstärke (der auf die Strasse einfallende Lichtstrom) auf die Fahrgeschwindigkeit auswirken kann. Das vorliegende Forschungsprojekt untersucht diesen Zusammenhang im Feld anhand eines Experiments auf drei Strassen der Stadt Zürich. Über einen Zeitraum von sechs Monaten wurde die Beleuchtungsstärke der Strassenbeleuchtung systematisch über vier Stufen (C2 = 20 lx, C3 = 15 lx, C4 = 10 lx, C5 = 7.5 lx) variiert, während die Fahrgeschwindigkeit sowie Leuchtdichte, anonymisierte Kennzeichen, Strassenzustand und meteorologische Parameter gemessen wurden. Der gesamte Datensatz aus dem Feldexperiment umfasst 6 Mio. Fahrzeugbewegungen. Im Rahmen von polizeilichen Grosskontrollen durchgeführte Umfragen mit einer Teilstichprobe (n = 454) der Fahrzeuglenkenden haben gezeigt, dass weder die Messgeräte noch Unterschiede in der Beleuchtungsstärke wahrgenommen wurden. Die Ergebnisse des Feldexperiments zeigen keine Evidenz für einen systematischen Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit, d. h., die Manipulation der Beleuchtungsstärke resultiert nicht in Unterschieden der Fahrgeschwindigkeit. Hingegen zeigte sich in Bezug auf die Messung der Leuchtdichte eine negative Korrelation mit Fahrgeschwindigkeit, d. h. eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bei zunehmender Leuchtdichte. Die gesonderte Betrachtung dieser Ergebnisse würde für eine Verminderung der Beleuchtungsstärke der Strassenbeleuchtung sprechen. Eine solche Massnahme hätte, bei einer nicht zu erwartenden Steigerung der Fahrgeschwindigkeit, eine verbesserte Energieeffizienz sowie verminderte Lichtemissionen zur Folge. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Untersuchung auf urbanen und konfliktfreien Strassen durchgeführt wurde und bei einer möglichen Reduktion der Beleuchtungsstärke die Verkehrssicherheit, insbesondere an Konfliktzonen, nicht beeinträchtigt werden darf. Der nicht vorhandene Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit hat potenziell weitreichende Implikationen für die Normierung der Strassenbeleuchtung, die Energieeffizienz städtischer Beleuchtung sowie die Lichtemissionen im urbanen Raum.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die übergeordneten Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes sind dreiteilig:

- (1) die relevante Fachliteratur zum Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Fahrgeschwindigkeit, bzw. Beleuchtungsstärke und Fahrgeschwindigkeit identifizieren, systematisieren und aufarbeiten -> Kapitel 2.1 - 2.6
- (2) den Zusammenhang aus (1) empirisch untersuchen -> Kapitel 3 - 5
- (3) basierend auf den empirischen Ergebnissen, Empfehlungen für das Optimierungspotenzial der Strassenbeleuchtung unter Berücksichtigung der Lichtemissionen abgeben -> Kapitel 6

Folgerungen und Empfehlungen:

Dieses Forschungsprojekt konnte keine Evidenz für einen kausalen Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Fahrgeschwindigkeit zeigen. Es wurde jedoch ein negativer Effekt der Leuchtdichte auf die Fahrgeschwindigkeit dokumentiert. Dieser Befund bringt verschiedene Implikationen für die Strassenbeleuchtungspraxis mit sich. Zentral ist, dass das vorliegende Forschungsprojekt für den getesteten Strassentyp (Strasse ohne Konfliktzone, Geschwindigkeitsbegrenzung zwischen 50 und 60 km/h) die Empfehlung einer reduzierten Beleuchtungsstärke grundsätzlich unterstützt, was insbesondere Vorteile in Bezug auf höhere Energieeffizienz und tiefere Lichtemissionen mit sich bringen würde. Effekte auf die allgemeine Verkehrssicherheit müssen vor einer solchen Massnahme getrennt evaluiert werden.

Publikationen:

- Abschlussbericht zuhanden des ASTRA mit dem Titel "Der Einfluss energieeffizienter Strassenbeleuchtung auf die Fahrgeschwindigkeit"
- Working Paper (Manuskript für wissenschaftliche Publikation) mit dem Titel "The Effect of Luminance on Driving Speed: A Field Experiment"

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schulte-Mecklenbeck Vorname: Michael

Amt, Firma, Institut: Universität Bern, Institut für Marketing und Management

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:

Sicht und Sichtbarkeit der Verkehrsteilnehmenden sind wichtigste Voraussetzungen für einen sicheren Verkehrsablauf. In der Dämmerung und nachts kann dies durch eine ausreichende Beleuchtung erreicht werden. Allerdings möchte man die Beleuchtung aus verschiedenen Gründen so weit wie möglich reduzieren (z.B. Lichtverschmutzung, Energieersparnis). Es gab bisher jedoch keine eindeutigen Erkenntnisse, wie sich eine schwächere Beleuchtung auf das für die Verkehrssicherheit zentrale Geschwindigkeitsverhalten auswirkt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass entgegen einiger bisheriger Quellen auch eine schwächere Beleuchtung nicht zu schnellerer Fahrweise führt. Dies ist als Hinweis zu werten, dass unter gewissen Bedingungen das Ziel der Verkehrssicherheit mit anderen Zielen wie geringer Lichtverschmutzung oder Energieersparnis kompatibel ist. Die Begleitkommission hat den Schlussbericht im Rahmen einer Vernehmlassung einhellig positiv bewertet und abgenommen. Die Forschungsstelle hat die entsprechenden Rückmeldungen im Schlussbericht berücksichtigt, soweit das möglich war. In der Begleitkommission herrschte Einigkeit über die hohe Qualität der Forschung. Der innovative Pioniercharakter der Studie wurde in den Rückmeldungen betont.

Umsetzung:

Das Forschungsprojekt ist der Fragestellung der verkehrssicheren Strassenbeleuchtung mittels aufwändiger Messungen im Rahmen eines umfangreichen Feldexperiments in der Stadt Zürich nachgegangen. Neben der objektiven Messung verschiedener physikalischer Kennwerte (z.B. Lichtstärke, gefahrene Geschwindigkeit) wurde mittels Befragungen im Rahmen von Polizeikontrollen auch die subjektive Wahrnehmung der betroffenen Fahrzeuglenkenden erhoben. Die Ergebnisse wurden wissenschaftlich nachvollziehbar hergeleitet und in der Diskussion in den inhaltlichen Kontext gestellt. Die Forschergruppe hat die Grenzen der Ergebnisse aufgezeigt, zum Beispiel dass sie nur auf gerade Strecken ohne Konfliktpunkte (z.B. Querungen) generalisiert werden können. Der Einbezug einschlägiger Experten und Praktiker (z.B. Elektrizitätswerke) gewährleistet den Transfer der Erkenntnisse in die Praxis.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die vorliegende Forschung hat weiteren Forschungsbedarf aufgedeckt, der im Schlussbericht im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse ausführlich ausgewiesen wird. Zum Beispiel ist eine zentrale Frage, wie die vorliegenden Ergebnisse an verkehrlichen Konfliktstellen (z.B. Fussgängerstreifen) anwendbar sind, um die erhöhten Ansprüche der Verkehrssicherheit an die Strassenbeleuchtung an solchen Stellen zu gewährleisten.

Einfluss auf Normenwerk:

Die vorliegende Forschung kann als Grundlage für Standards der öffentlichen Strassenbeleuchtung dienen. Durch den Einbezug von Fachpersonen aus der Praxis im Forschungskonsortium und in der Begleitkommission ist der Transfer der Erkenntnisse gewährleistet.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Brucks

Vorname: Wernher

Amt, Firma, Institut: Stadt Zürich, Dienstabteilung Verkehr

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3