

Physiologische Bewertung von Warnsichtsystemen

Jebas, Christian; Neumann, Cornelius

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Engesserstraße 13, Geb. 30.34, 76131 Karlsruhe

Tel. 0721-608 46735, christian.jebas@kit.edu, www.lti.kit.edu

1 Einleitung

Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen mit schwerem oder tödlichem Ausgang ereignen sich besonders häufig in der Dunkelheit (vgl. [Bäu07], [Hei10], [Ler03], [Spo03], [Sul01]). Als Ursache kann vor allem die eingeschränkte Sichtbarkeit von Personen angeführt werden, welche neben der geringen Größe auf den niedrigen Reflexionsgrad und die fehlende Markierungspflicht zurückzuführen ist.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Fußgängern und zur Erhöhung der Aufmerksamkeit von Fahrzeugführern stellt die Verwendung sogenannter Warnsichtsysteme dar, welche Personen in Fahrbahnnähe nach der Detektion additiv zur Grundlichtverteilung für eine definierte Zeitspanne beleuchten (Abbildung 1). Die Zusatzausleuchtung kann dabei sowohl kontinuierlich als auch zeitlich variierend erfolgen. Weiterhin sind vielfältige Ausprägungen hinsichtlich der Größe und Form denkbar.

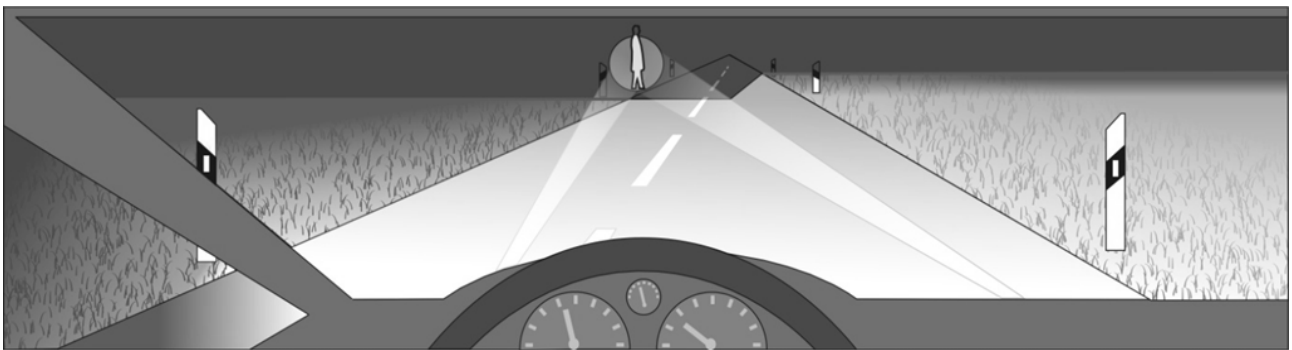


Abbildung 1:
Beispiel für die lichttechnische Umsetzung einer Warnsichtfunktion

Die Detektion und Klassifikation von Fußgängern erfolgt dabei durch die Verknüpfung des Scheinwerfersystems mit einer kamerabasierten Sensorik. Gute Voraussetzungen bieten insbesondere aktive oder passive Infrarot-Kameras, welche derzeit bereits für Nachtsichtsysteme Anwendung finden.

2011 werden erstmals Systeme dieser Art in Serienfahrzeugen eingesetzt [Dai10]. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach dem Wirkpotential dieses Lichtkonzeptes und seinem Einfluss auf die nächtliche Verkehrssicherheit. Im vorliegenden Bericht wird die im Rahmen einer Probandenstudie durchgeführte Bewertung unterschiedlicher Warnsichtsysteme vorgestellt. Nach der Erläuterung des Designs sowie der Durchführung der Versuche werden die erzielten Ergebnisse dargestellt.

2 Bewertete Konzepte

2.1 Warnsichtsystem *Adaptive Lichthupe*

Die *Adaptive Lichthupe* (Abk. WSS ALH) leuchtet den gesamten vor dem Fahrzeug befindlichen Verkehrsraum für eine definierte Zeitspanne kontinuierlich aus. Dieses vergleichsweise einfache Konzept nutzt das bereits vorhandene Fernlichtmodul, wodurch es grundsätzlich mit jedem Scheinwerfer über eine Verknüpfung mit einer entsprechenden Sensorik realisierbar ist. Die Anleuchtdauer wird auf zwei Sekunden festgelegt.

2.2 Warnsichtsystem *Markierungslicht*

Im Gegensatz zur *Adaptiven Lichthupe* erfolgt die Beleuchtung des Fußgängers im Fall des *Markierungslichtes* (Abk. WSS ML1) selektiv. Durch die Verwendung eines Lichtspots wird die Aufmerksamkeit des Fahrzeugführers nicht nur erhöht, sondern in die jeweilige Richtung gelenkt, wodurch die Reaktionszeit potentiell optimiert wird. Die Anleuchtdauer beträgt ebenfalls zwei Sekunden.

Die durchgeführte Untersuchung beinhaltet eine Bewertung des Markierungslichtes in Abhängigkeit zweier verschiedener Spotlagen. Zum Einen erfolgt eine Beleuchtung des Fußgängers unterhalb des Kopfes (Abbildung 2), welche innerhalb dieser Veröffentlichung [Jeb11] diskutiert wird. Obwohl dem Fahrzeugführer in diesem Fall eine vom Fußgänger abweichende Form dargeboten wird, welche sich möglicherweise problematischer klassifizieren lässt, ist dieses Konzept in Hinsicht auf eine reduzierte Blendung der detektierten Person für die Umsetzung eines Serieneinsatzes von hohem Interesse. Weiterhin wird eine Bewertung der Ausleuchtung des oberen Fußgängerbereiches bei gleichbleibender Spotgröße durchgeführt, welche in dieser Veröffentlichung nicht ausgeführt wird. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist der Dissertation [Jeb11] zu entnehmen.



Abbildung 2:
Subcraniale Ausleuchtung der Sehobjekte durch das Markierungslicht

3 Versuchsdesign

Die Ermittlung des Wirkpotentials erfolgt in einer Probandenstudie im realen Verkehrsraum. Als objektives Bewertungskriterium wird die Erkennbarkeitsentfernung ermittelt, welche den Abstand zwischen dem Fahrzeugführer und dem Sehobjekt zum Zeitpunkt der Objektidentifikation darstellt. Zu diesem Zweck wird eine 8,5 km lange, mit Sehobjekten präparierte, Versuchsstrecke von den Probanden unter Verwendung beider Warnsichtfunktionen sowie der Abblendlichtverteilung als Referenz jeweils einmal durchfahren. Dabei bestätigen die Probanden jede Erkennung eines Sehobjektes durch einen am Lenkrad befindlichen Taster.

Bedingt durch das Warnkonzept der zu untersuchenden Systeme erhöht sich die Auftretenswahrscheinlichkeit falschpositiver Antworten. Diese beinhalten eine ausschließlich auf die Systemauslösung basierende Reaktion des Fahrzeugführers ohne Erkennung eines Sehobjektes. In diesem Fall würde der Test das Kriterium *Erkennen* anzeigen, obwohl letzteres nicht vorliegt. Um das Auftreten dieser falschpositiven Antworten auszuschließen, werden die Sehobjekte am rechten und linken Fahrbahnrand positioniert. Unmittelbar nach der Erkennungsbestätigung geben die Testpersonen akustisch die Richtung an. Des Weiteren wird an einer weiteren Position, an der sich kein Sehobjekt befindet, eine Fehlauflö-

sung des Systems simuliert. Es werden lediglich Personen mit fehlerfreien Angaben in die Auswertung einbezogen.

Im Rahmen einer Voruntersuchung werden ferner die Erkennbarkeitsentfernungen von drei Runden unter Verwendung der Referenzlichtverteilung aufgenommen und miteinander verglichen. Auf diese Weise wird ein potentieller Lerneffekt der Testpersonen quantifiziert.

Neben der objektiven Bewertung werden die Probanden einer schriftlichen Befragung zur Ermittlung des subjektiven Einflusses der Warnsichtsysteme unterzogen. Die Fragebögen werden unmittelbar nach Abschluss der Versuchsfahrten von den Probanden ausgefüllt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Simulation der Warnsichtsysteme

Im Versuch wird die Funktionsweise der zu untersuchenden Warnsichtsysteme simuliert. Auf diese Weise werden eine konstante Detektionsreichweite und damit eine reproduzierbare Messmethode gewährleistet. Die Detektionsreichweite wird auf 90 m festgelegt.

Zur Simulation der sensorischen Detektion eines Sehobjektes werden Reflexionslichtschranken eingesetzt, welche als Trigger dienen. Unter Berücksichtigung der von der Steuerelektronik benötigten Verarbeitungszeit von 350 ms und der im Versuch gefahrenen Geschwindigkeit von 60 km/h beträgt der Abstand zwischen der Lichtschranke und dem Sehobjekt 96 m. Die Einschaltdauer der Systeme wird auf zwei Sekunden begrenzt.

Die *Adaptive Lichthupe* greift auf eine am Fahrzeug installierte Sender- und Empfangseinheit zurück, während sich der Reflektor nicht sichtbar für den Probanden am Fahrbahnrand befindet. Passiert das Fahrzeug den Reflektor, wird vergleichbar mit einer möglichen Serienrealisierung das Fernlichtmodul aktiviert (Abbildung 3).

Das *Markierungslicht* erfordert neben der Simulation der sensorischen Objekterkennung ebenfalls eine Simulation der lichttechnischen Komponente. Die Festlegung der lichttechnischen Charakteristik basiert auf den folgenden Überlegungen.

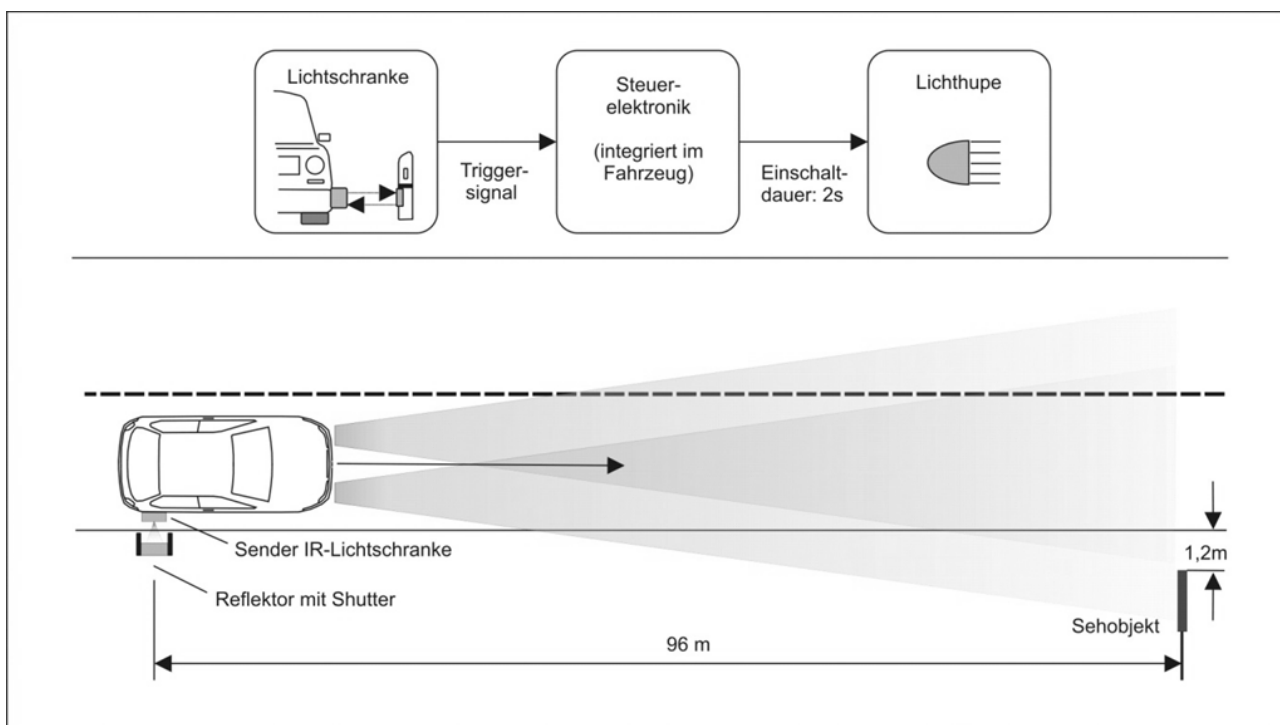


Abbildung 3:
Simulation des Warnsichtsystems *Adaptive Lichthupe*

Zum einen ist hinsichtlich einer Realisierung im Serienfahrzeug aufgrund der Forderung nach einem kompakten Aufbau sowie einem besonders kleinen Öffnungswinkel der Einsatz von Single-Chip-Leuchtdioden als wahrscheinlich anzunehmen. Diese Lichtquellen emittieren derzeit einen Lichtstrom von etwa 180 lm. Unter Annahme eines idealen Öffnungswinkels von $1^\circ (=9,56 \cdot 10^{-4} \text{ sr})$ und einem Wirkungsgrad von 80 % bei Einsatz einer TIR¹-Optik sind Lichtstärken von etwa 150.000 cd theoretisch erreichbar. Unter Berücksichtigung einer geforderten hohen Lebensdauer sowie thermischer Einflussfaktoren wird eine realisierbare Lichtstärke von 100.000 cd angenommen, welche einer Beleuchtungsstärke von 12 lx in der in 90 m Entfernung befindlichen Objektebene entspricht.

Zum anderen führt die Annäherung des Fahrzeuges an das Sehobjekt zu einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke gemäß dem photometrischen Entfernungsgesetz. Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h steigt die Beleuchtungsstärke innerhalb der Aktivierungsdauer des Warnsichtsystems von 12 lx auf 31 lx.

Die separate Ausleuchtung der Sehobjekte mit den genannten Eigenschaften wird über ein Beleuchtungsmodul umgesetzt (Abbildung 4 links), welches in einer Entfernung von 10 m vor dem Sehobjekt am Straßenrand positioniert wird. Zur Ansteuerung wird ein Mic-

¹ Total Internal Reflection

rocontroller eingesetzt, der auf eine am Fahrbahnrand positionierte Triggerlichtschranke zurückgreift. Der Reflektor wird am Heck des Fahrzeuges installiert (Abbildung 5).

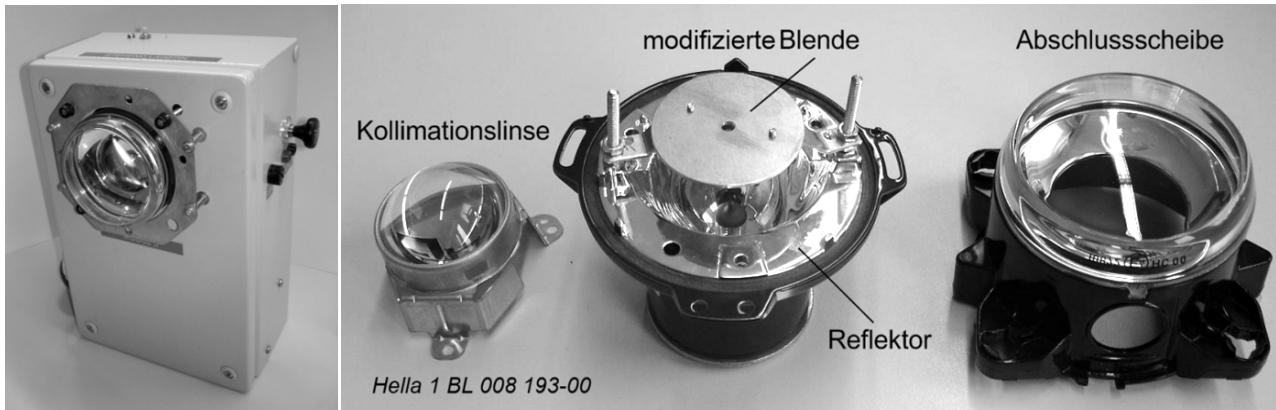


Abbildung 4:
Links: Beleuchtungsmodul zur Simulation des *Markierungslichtes*
Rechts: Aufbau des modifizierten Projektionsscheinwerfers

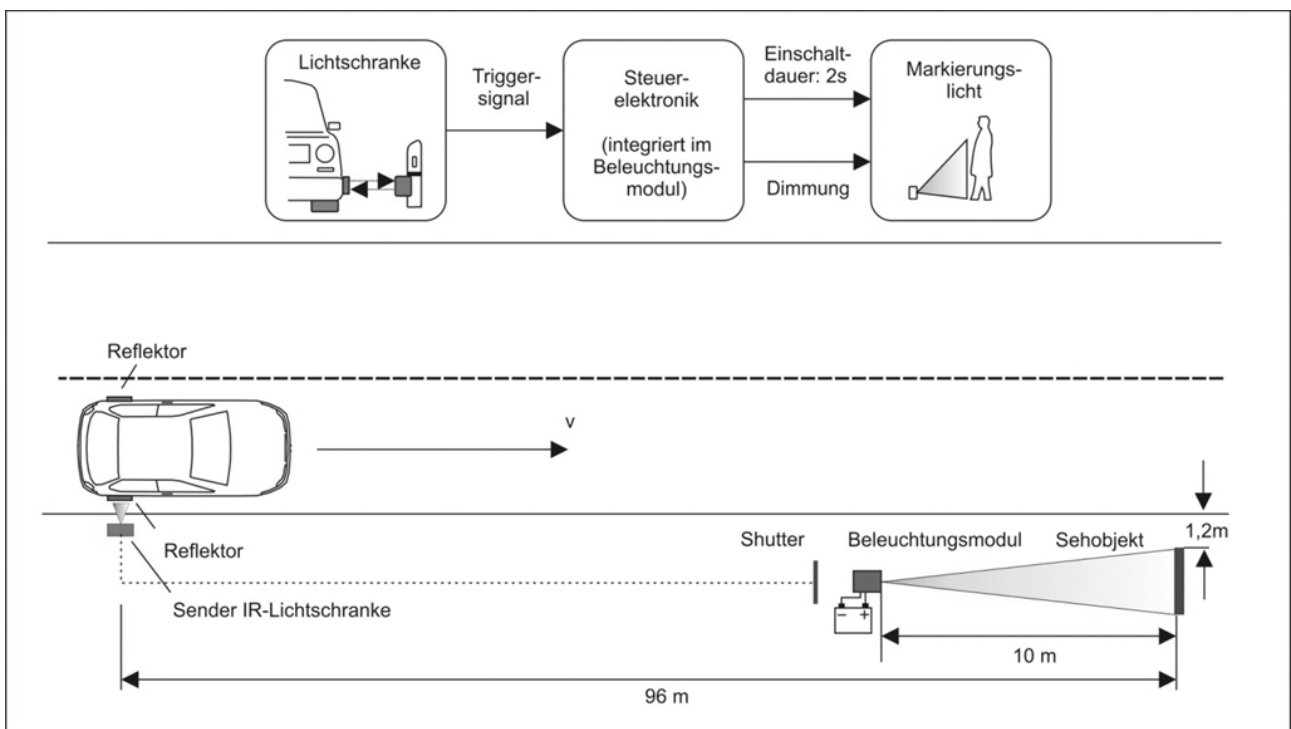


Abbildung 5:
Simulation des Warnsichtsystems *Markierungslicht*

Als Kernstück der Module wird ein handelsüblicher Projektionsscheinwerfer des Herstellers Hella eingesetzt, welcher den Anforderungen angepasst wird. Durch einen Austausch der in der Zwischenbildebene befindlichen z-förmigen Blende durch eine Lochblende mit einem Durchmesser von 4,5 mm wird der Öffnungswinkel des Scheinwerfers verringert.

Zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik werden die auf diese Weise modifizierten Module auf einem Goniophotometer vermessen. In Abbildung 6 ist die in einer Entfernung von 10 m bestimmte Beleuchtungsstärkeverteilung in der vertikalen 0°-Ebene dargestellt. Wie gefordert wird ein Spot mit einem Öffnungswinkel² von 3° und scharfer Hell-Dunkel-Grenze erzeugt. Damit resultiert eine in der Objektebene vorliegende Spotgröße von etwa 1 m.

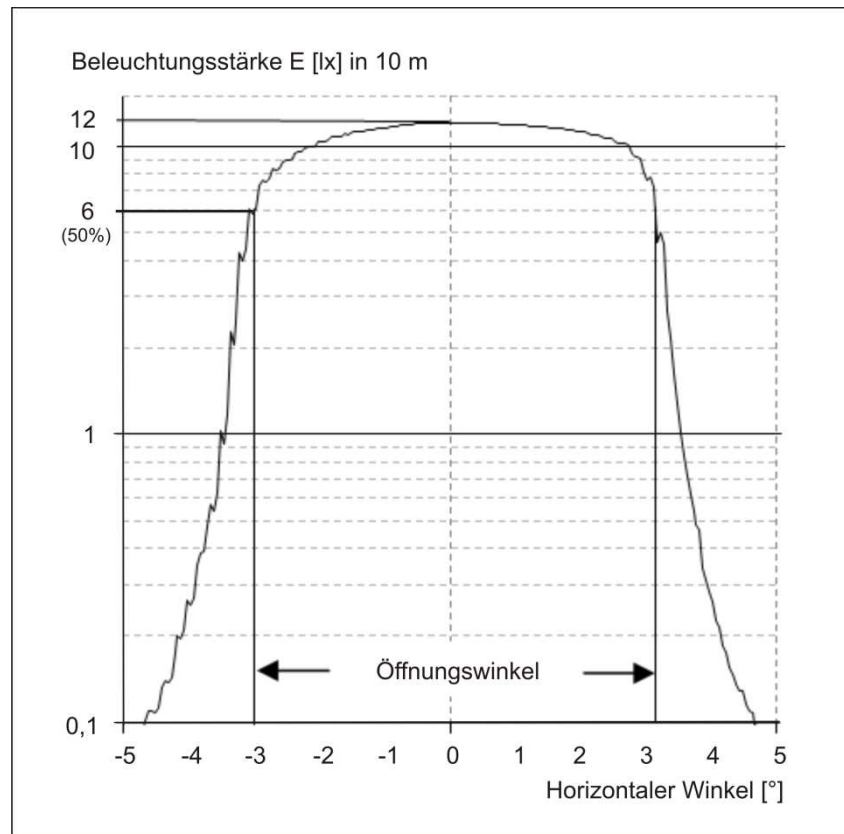


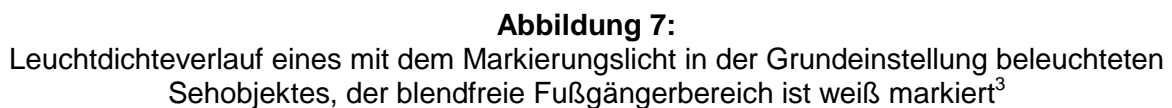
Abbildung 6:
Beleuchtungsstärkeverteilung in der vertikalen 0°-Ebene, Messentfernung 10 m

4.2 Sehobjekte

Die Erkennbarkeitsentfernung ist neben dem Kontrast eines Sehobjektes vor allem von dessen Form und Größe abhängig. Zwar sind potentielle Wirkungen der analysierten Warnsichtsysteme auch auf der Basis relativer Unterschiede der Erkennbarkeitsentfernung zu identifizieren, jedoch ist in Hinblick auf die Prüfung der Notwendigkeit derartiger Systeme auch eine Annäherung an die unter realen Bedingungen erreichbaren Werte sinnvoll. Aus diesem Grund dienen Fußgängerattrappen mit einer Größe von 1,77 m als Sehobjekte. Es werden insgesamt sechs Sehobjekte verwendet.

² Bezogen auf 50 % der maximalen Intensität

Abbildung 7 stellt den Leuchtdichteverlauf eines mit dem Markierungslicht in der Grundeinstellung beleuchteten Sehobjektes dar.



Das Probandenkollektiv setzt sich aus 21 männlichen und zehn weiblichen Personen im Alter von 40 bis 60 Jahren zusammen. Neben der Fahrerfahrung werden im Rahmen der

8

Akquise die optometrischen Leistungsparameter Sehschärfe, Stereosehen, Kontrastsehvermögen und Blendempfindlichkeit überprüft. Die Minimalvoraussetzungen werden wie folgt festgelegt:

- Sehschärfe binokular $\geq 1,0$
- Stereosehen vorhanden
- Kontrastsehvermögen ohne Blendung $\leq 10 \%$
- Kontrastsehvermögen mit Blendung $\leq 10 \%$

4.4 Versuchsstrecke

Auf Landstraßen ist das Unfallrisiko für Fußgänger in der Dunkelheit am höchsten. Nach Bäumler [Bäu03] und Lerner [Ler03] sind trotz des geringen Anteils von nur 10 % bezogen auf die Gesamtanzahl der Fußgängerunfälle etwa 30 % aller Todesfälle auf diesem Straßentyp zu verzeichnen. Aus diesem Grund werden die Versuchsfahrten auf einem 8,5 km langen Landstraßenabschnitt durchgeführt.

Zur Vermeidung äußerer, beispielsweise durch wechselnde Mondphasen bedingter, Lichteinflüsse führt die Versuchsstrecke durch ein Waldgebiet. Auf diese Weise bietet jede Nacht praktisch identische Versuchsbedingungen. Eine Sperrung der Strecke für den regulären Verkehr verhindert des Weiteren eine Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer.

5 Statistische Datenanalyse und Ergebnisse

Nach einer Ausreißerbereinigung wird zunächst die Vergleichbarkeit der sechs simulierten Begegnungssituationen überprüft. Zu diesem Zweck werden die aufgenommenen Erkennbarkeitsentfernungen für jede Sehobjektposition und Lichtverteilung über alle Probanden zusammengefasst und untereinander mithilfe der *Varianzanalyse* verglichen. Die Nullhypothese beinhaltet die Gleichheit der Messreihen. Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha = 0,05$ festgelegt, wobei $0,05 < \alpha \leq 0,1$ eine Tendenz anzeigt. Die für dieses parametrische Verfahren erforderlichen Voraussetzungen werden zuvor geprüft.

Es zeigt sich, dass die mit der *Varianzanalyse* berechneten Überschreitungswahrscheinlichkeiten im Fall aller Lichtfunktionen unterhalb des Signifikanzniveaus liegen, womit die Nullhypothese abzulehnen ist und die Vergleichbarkeit der Sehobjektpositionen nicht ge-

währleistet ist. Da letzteres jedoch eine notwendige Voraussetzung für ein sinnvolles Zusammenfassen der aufgenommenen Erkennbarkeitsentfernungen über alle Probanden und Situationen darstellt, sind die Identifikation der abweichenden Situation bzw. Situationen sowie die anschließende Extraktion der dazugehörigen Messwerte erforderlich.

Im weiteren Verlauf der Analyse zeigt sich, dass sich die an einer Sehobjektposition erzielten Erkennbarkeitsentfernungen, vermutlich durch eine unebene Fahrbahn bedingt, von den Messwerten der verbleibenden Positionen unterscheiden. Nach einer entsprechenden Filterung der Daten und einem erneuten Mittelwertvergleich mit der Varianzanalyse liegt die Vergleichbarkeit der Einzelsituationen vor.

Die auf diese Weise gefilterten Messwerte sind mit den dazugehörigen Streumaßen in Form von Boxplotdiagrammen in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

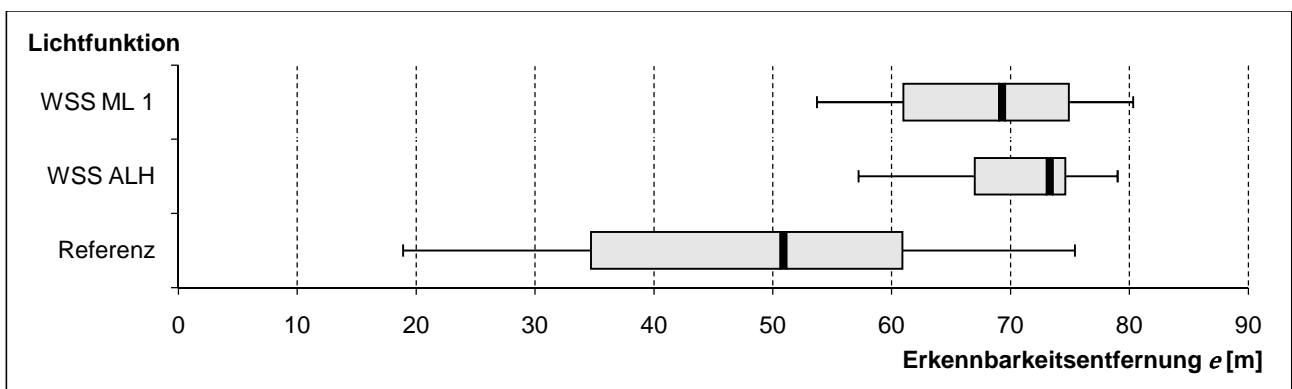


Abbildung 8:
Boxplots der Erkennbarkeitsentfernungen e in Abhängigkeit der Lichtfunktion

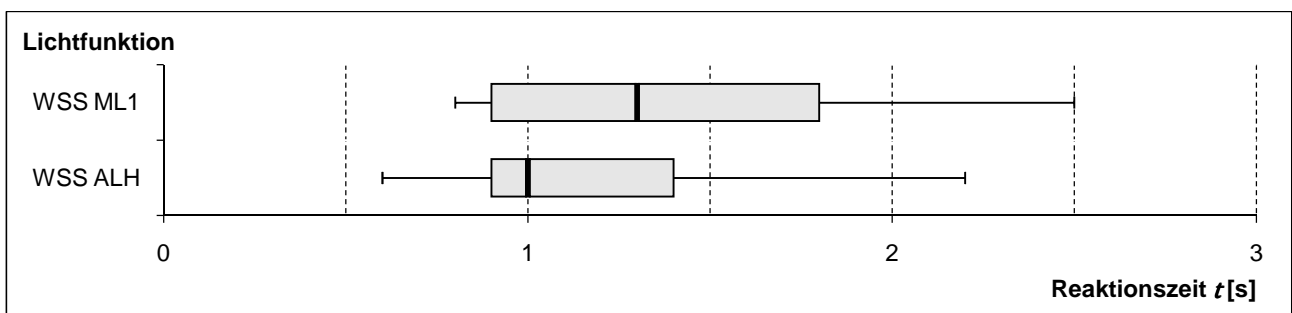


Abbildung 9:
Boxplots der Reaktionszeiten t in Abhängigkeit der Lichtfunktion

Der Vergleich der Mittelwerte erfolgt mithilfe des *T*-Tests, welcher als Sonderform der *Varianzanalyse* für den Vergleich von zwei Gruppen geeignet ist. Dabei wird die Alpha-Fehlerkumulierung mit dem *Bonferroni*-Verfahren korrigiert.

Auf Basis der in Tabelle 1 aufgeführten Überschreitungswahrscheinlichkeiten wird eine signifikante Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung bei Verwendung der untersuchten Warnsichtsysteme nachgewiesen. Die Verwendung der *Adaptiven Lichthupe* führt im Vergleich zum konventionellen Abblendlicht zu einer 22,4 m früheren Erkennung von Fußgängern. Mit einer Mediandifferenz von 18,4 m ist die Erhöhung bei Verwendung des *Markierungslichtes* geringfügig niedriger. Bei einer mittleren Erkennbarkeitsentfernung von 49,7 m entspricht dies einer Erhöhung von 37 bis 45 %. Erwartungsgemäß bedingen die großen Mittelwertsdifferenzen eine hohe standardisierte Differenz d und damit nach *Cohen* eine hohe Effektstärke.

Tabelle 1:

Vergleich der Lichtfunktionen; Mediandifferenzen $|\Delta \tilde{e}|$ Überschreitungswahrscheinlichkeiten $p/p_{korr.}$.

Statistik	Gruppen		$ \Delta \tilde{e} [\text{m}]$	p	$p_{korr.}$	d
T-Test	Referenz	WSS ALH	22,4	< 0,001	< 0,01	1,8
T-Test	Referenz	WSS ML 1	18,4	< 0,001	< 0,01	1,4
T-Test	WSS ALH	WSS ML 1	4,0	0,074	0,222	0,4

Die Verwendung von Warnsichtsystemen führt des Weiteren zu einer deutlichen Verringerung der Messwertstreuung. Insbesondere kritisch geringe Erkennbarkeitsentfernungen werden vermieden. Die Warnfunktion der Systeme führt demnach zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit von Fahrzeugführern.

Trotz höherer Lichtstärken und damit besserer Objektkontraste sowie einer zusätzlichen Information über die Richtung des Fußgängers zeigt das *Markierungslicht* im Vergleich zur *Adaptiven Lichthupe* keine statistisch signifikanten Differenzen bezüglich der Erkennbarkeitsentfernung. Allerdings ist zu beachten, dass die aus dem Vergleich resultierende Überschreitungswahrscheinlichkeit bereits das Tendenzniveau überschreitet. Dabei erreicht das Markierungslicht mit einer Mediandifferenz von $\Delta \tilde{e} = -4,0$ m den Erwartungen widersprechend geringere Erkennbarkeitsentfernungen. Eine weitere Untersuchung mit einem größeren Probandenkollektiv könnte mutmaßlich zu einem statistisch nachweisbaren signifikanten Unterschied führen. Allerdings wären die Unterschiede aufgrund des zu erwartenden geringen Effektmaßes in der Praxis im Vergleich zu anderen Faktoren von untergeordneter Bedeutung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Warnsichtsystem *Adaptive Lichthupe* trotz des einfachen Aufbaus ein mit selektiven Systemen vergleichbares Wirkpotential besitzt. Aufgrund des sowohl einfachen als auch kostengünstigen Aufbaus wäre eine schnelle

Marktdurchdringung denkbar. Dennoch ist dieses Konzept jedoch nicht vorbehaltlos zu empfehlen. Es gilt zu bedenken, dass sich das ermittelte Wirkpotential auf die Verwendung der Abblendlichtverteilung als Referenz bezieht. Aufgrund des bislang noch sehr hohen Nutzungsanteils dieser Lichtverteilung (vgl. [Böh10]) sind die Ergebnisse damit derzeit auf den Großteil der Situationen im nächtlichen Straßenverkehr anwendbar. Mit der Integration von Fernlichtassistenten bzw. dem blendfreien Fernlicht wird eine lichttechnische Warnfunktion nur noch mit einem Markierungslicht realisierbar sein. Des Weiteren stellt sich die Frage nach der durch das System erzeugten Blendbelastung anderer Fahrzeugführer.

Ähnlich positive Ergebnisse erzielt die Verwendung beider Warnsichtsysteme hinsichtlich der subjektiven Bewertung durch die Testpersonen. Neben der Erkennbarkeit wird die Unterstützung während der Fahraufgabe wie auch der Praxisnutzen als hoch eingeschätzt. Dabei sind die Ergebnisse im Vergleich mit dem Referenzsystem statistisch signifikant.

6 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Warnsichtsysteme sowohl die Erkennbarkeit von Fußgängern als auch die Aufmerksamkeit von Fahrzeugführern im nächtlichen Verkehrsraum steigern. Die Verwendung derartiger Systeme kann den bislang noch hohen Anteil nächtlicher Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen reduzieren und damit entscheidend zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen.

Literatur

- [Bäu07] Bäumler, H. 2007. Rekonstruktion von nächtlichen Fußgängerunfällen. *VKU-Konferenz - Fußgängerunfälle und Fußgängerschutz*. Aachen : Vieweg Technology Forum, 2007.
- [Bäu03] Bäumler, H. 2003. Vergleichende Untersuchungen von Fußgängerunfällen unter Berücksichtigung der Rezeptionsproblematik bei Dunkelheit. Dissertation. Gebenbach : s.n., 2003.
- [Böh10] Böhm, M., Locher, J., Krems, J.F. 2010. Effizienz adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer am Beispiel der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze. 4. *VDI-Tagung, Optische Technologie in der Fahrzeugtechnik*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2010. Vols. VDI-Berichte 2090.

- [Dai10] Daimler AG. 2010. Neue Spotlight-Funktion für den Aktiven Nachtsicht-Assistenten PLUS: Mehr Sicherheit für Fußgänger. *www.media.daimler.com*. [Online] 08 Dezember 2010. [Cited: 2011 April 07.] <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-658892-49-1354042-1-0-1-0-0-1-12639-854934-0-1-0-0-0-0-0.html?TS=1302168746363>.
- [Hei10] Heinrich, S., et al. 2010. Unfallgeschehen auf Landstraßen - Eine Auswertung der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 209*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW - Verlag für neue Wissenschaft GmbH , 2010.
- [Jeb06] Jebas, Christian. 2006. *Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten*. Diplomarbeit. Karlsruhe : Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [Kos03] Kosmatka, W.J. 2003. Differences in detection of moving pedestrians attributable to beam patterns and Speed. *Progress in Automobile Lighting (PAL) - 5th international Symposium*. München : Herbert Utz Verlag, 2003. Vol. 10.
- [Ler03] Lerner, Markus. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.. 2003. Analyse der Unfalldaten. *Schriftenreihe Verkehrssicherheit; Unfälle in der Dunkelheit*. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.. 2003, 12.
- [Spo03] Spörner, Alexander. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.. 2003. Lichttechnik zur Verbesserung der Sicherheit bei Dunkelheit. *Schriftenreihe Verkehrssicherheit; Unfälle in der Dunkelheit*. Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V.. 2003, 12.
- [Sul01] Sullivan, J.M. and Flannagan, M.J. 2001. *Characteristics of Pedestrian Risk in Darkness*. Ann Arbor, Michigan : The University of Michigan, Transportation Research Institute, 2001.