

Operationalisierung von Sicherheit am Beispiel Markierungslicht

Philip Stroop

L-LAB

Rixbecker Str. 75 59552 Lippstadt

02941 38 31335

Philip.Stroop@l-lab.de

Jürgen Locher

L-LAB

Rixbecker Str. 75 59552 Lippstadt

02941 38 31370

Juergen.Locher@l-lab.de

Einleitung

Bei neuen (licht)technischen Systemen stellt sich häufig die Frage der Bewertung im Hinblick auf Kriterien wie Sicherheit oder Nutzerakzeptanz. Dazu müssen solche Konstrukte operationalisiert werden: durch Angabe geeigneter Messschritte erfolgt eine Quantifizierung. Häufig sind unterschiedliche sinnvolle Operationalisierungen möglich. Probandenstudien eignen sich zumeist gut, sind aber sehr aufwändig. Technische Messschritte sind daher wünschenswert, müssen aber validiert werden. Im nachfolgenden Artikel wird am Beispiel der Funktion Markierungslicht eine Probandenstudie vorgestellt, bei der die Sicherheit des neuen Systems in Abhängigkeit der Sensorreichweite untersucht wurde. Gleichzeitig wurden lichttechnische Messungen mit dem Ziel durchgeführt, ein Modell zu generieren, das solche Bewertungen des Sicherheitsaspekts auch ohne Probandenversuche erlaubt. Diese Modellentwicklung ist bislang nicht abgeschlossen.

Fragestellung

Eine neue Scheinwerfertechnologie für Kraftfahrzeuge ist das Markierungslicht. Dabei sollen bei nächtlichen Fahrten Fußgänger in gefährlichen Situationen detektiert und durch einen Lichtspot „markiert“ werden. Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird auf den Fußgänger gelenkt. Für die Realisierung eines solchen Systems bedarf es neben einer geeigneten Aktorik vor allem einer sehr leistungsfähigen Sensorik. Letztere stellt hierbei eine das System limitierende Größe dar. Realistisch erscheinen im Augenblick Obergrenzen der Sensorreichweite von etwa 80 m. Welche Entfernungen mittel- und langfristig erreicht wer-

den können, bleibt abzuwarten. Damit stellt sich die Frage nach dem potentiellen Sicherheitsgewinn eines solchen Systems. Werden bei den derzeit realistischen Sensordaten für den Fahrer Erkennbarkeitsentfernungen erzielt, die signifikant über denen von Abblendlicht liegen? Und welche Detektionsentfernungen für die Sensorik müssten ggf. realisiert werden, damit es im Vergleich zu Abblendlicht zu deutlich höheren Werten kommt?

Untersuchungsdesign

Probandenversuch

Beim Probandenversuch sollte eine Versuchsstrecke gefahren werden, bei der an unterschiedlichen Stellen Fußgängerattrappen am Straßenrand aufgestellt waren. Diese wurden in unterschiedlichen Entfernungen (70, 100 und 140 m) markiert bzw. ohne Markierung (Abblendlicht) passiert. Aufgabe der Fahrer war es, einen mit Klettband am Finger befestigten Taster zu drücken, sobald eine Figur erkannt wurde. Dadurch wird auf die Erkennbarkeitsentfernung geschlossen.

Da es bislang keine geeigneten Sensoriken gibt, welche die genannten Anforderungen bezüglich der Detektionsentfernungen erfüllen, mussten diese durch technische Mittel simuliert werden. Deshalb wurde das Versuchsfahrzeug mit einem hochpräzisen differentiellen GPS (dGPS) ausgestattet. Hierdurch war es möglich, die exakte Position des Fahrzeugs jederzeit zu bestimmen und abzuspeichern. Die genauen Positionen der Fußgängerattrappen wurden zuvor vermessen. Somit war jederzeit die relative Position des Fahrzeugs zu dem nächstfolgenden „Dummy“ bekannt und der Markierungsaktor, der auf einem Rack an der Front des Fahrzeugs montiert war, konnte so angesteuert werden, als hätte das Fahrzeug einen perfekten Sensor. Da auch die präzise Fahrzeugposition beim jeweiligen Drücken des Tasters bekannt war, konnte auf die Erkennbarkeitsentfernung (jeweils vermindert um die Reaktionszeit) zurückgeschlossen werden.

Als Markierungsentfernungen wurden 70, 100 und 140 m gewählt. Da nach der Detektion eine Signalverarbeitung und Aktoransteuerung erfolgen muss, entspricht dies in etwa Detektionsentfernungen, welche 10 m höher liegen. Für die Versuchsfahrten wurde eine 8 km lange Versuchsstrecke in der Nähe von Lippstadt ausgewählt. Zehn Figuren wurden am Straßenrand (links und rechts) aufgestellt (Abb. 1). Je zwei Figuren wurden in 70, 100 und 140 m Entfernung markiert. Drei Dummys wurden gar nicht markiert, um einen Referenzwert für das Fahren mit Abblendlicht bestimmen zu können. Die Reihenfolgen, in denen die Figuren markiert wurden, wurden über alle Probanden randomisiert. Dies ist notwendig, damit nicht spezifische Kombinationen von Figur und Hintergrund, die einen unterschiedlichen Kontrast aufweisen, als Störvariablen in die Ergebnisse einfließen. Die erste

Figur diente als Probeobjekt und wurde immer in 100 m Entfernung markiert aber nicht ausgewertet. Die Probanden wurden darauf hingewiesen, dass die Markierungsfunktion auch aktiviert werden kann, wenn keine Figur am Straßenrand positioniert ist. In diesem Fall durfte der Taster nicht gedrückt werden. Diese „Fehlschaltungen“ dienten dazu sicherzustellen, dass die Probanden nicht jedes Mal den Taster drückten, wenn sie eine Veränderung des Lichtbildes im Verkehrsraum bemerkten. Sonst würde nicht die Erkennbarkeitsentfernung, sondern die Reaktion auf einen einfachen Stimulus (hier: Einschalten des Markierungssspots) gemessen. Die Studie wurde im Februar 2011 mit 25 Probanden durchgeführt.



Abbildung 1 Versuchsstrecke mit Positionen der Figuren

Lichttechnische Messungen

Das Vorgehen zur Bestimmung des Leuchtdichtekontrastes der Sehobjekte gegen den Hintergrund wird im Folgenden skizziert. Die einzelnen Objektpositionen sollen lichttechnisch anhand von Leuchtdichteaufnahmen charakterisiert werden. Hierzu werden aus unterschiedlichen Entfernungen Leuchtdichtebilder aufgenommen. Diese bilden die Grundlage zur Anwendung von bestehenden Modellen zur theoretischen Ermittlung der Sichtweite.

ADRIAN [1] ermittelte einen zur Detektion notwendigen Schwellenleuchtdichteunterschied, welcher später von ECKERT [2] in seinem Modell zur Berechnung der Erkennbarkeitsweite

weitere Anwendung fand. KOKOSCHKA und GALL [3] veröffentlichten im Jahr 2000 den Abschlussbericht zum Projekt FASIVAL (Fahrsichtweiten-Validierung) in dem das Visibility Level als Prädiktor der Sichtweite eingesetzt wird. BREMOND ET. AL. [4] stellten unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des Kontrastes und der Adaptationsleuchtdichte für die Bestimmung des Visibility Levels gegenüber. Sie fanden große Unterschiede im absoluten Wert des Visibility Level je nach angewandter Berechnungsmethode. Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse in Abhängigkeit der Modellparameter ist es sinnvoll die Modelle hinsichtlich ihrer Anpassung an die empirisch ermittelten Daten zu untersuchen.

Zusammenhang zwischen empirischen und lichttechnischen Daten

Die Korrelation zwischen den Modellen und den Ergebnissen der empirischen Untersuchung wird durch den Vergleich der mittleren, empirisch ermittelten Entfernung und der aus den Modellen ermittelten Erkennbarkeitsentfernung berechnet. Stellt sich heraus, dass die Entfernungen zwar variieren, der Kontrast aus der Modellannahme aber stark mit den empirischen Daten korreliert, zeigte dies eine gute Anpassung des Modells an die reale Situation im empirischen Versuch. Des Weiteren wäre dies ein starker Hinweis darauf, dass der Kontrast verantwortlich für die Erkennbarkeit des Objektes war.

Durch Praxisfaktoren kann eine Anpassung des jeweiligen Labormodells an die reale Messsituation hergestellt werden. Ein gewählter Faktor soll allerdings konsistent über alle Objektpositionen anwendbar sein, um eine Relevanz für die realen Situationen nachzuweisen.

Wird kein Zusammenhang zwischen den Kontrastmodellen und den mittleren Entfernungen gefunden, kann dies ein Hinweis auf andere überlagernde Effekte oder eine schlechte Anwendbarkeit der Modelle auf die spezielle Situation sein. Dies müsste in weiteren Untersuchungen getrennt voneinander evaluiert werden.

Die lichttechnischen Messungen konnten aus technischen Gründen noch nicht für alle Positionen durchgeführt werden. Daraus folgend ist auch die Interpretation noch nicht abgeschlossen.

Ergebnisse der empirischen Untersuchung

Von jeder Versuchsperson lagen neun Messwerte vor, drei für die Abblendlichtbedingung und je zwei für die Markierungen 70, 100 und 140 m. Diese wurden für jede Einzelbedingung gemittelt, so dass jedem Probanden vier Werte zugeordnet wurden. Die mittleren Erkennbarkeitsentfernungen zeigt Abbildung 2.

Unter Abblendlicht wurden die Objekte in durchschnittlich 42 m Entfernung erkannt. Da die Hell-Dunkel-Grenze aufgrund ihrer Asymmetrie am rechten Fahrbahnrand mehr als 65 m vor dem Fahrzeug liegt, war es völlig offen, ob eine Markierungsentfernung von 70 m überhaupt einen Vorteil bringt. Die Erkennbarkeitsentfernung erhöht sich um gut 10 m auf 53 m. Eine weitere Erhöhung der Markierungsentfernungen (100 und 140 m) führt dann entsprechend zu höheren Erkennbarkeitsentfernungen (73 und 101 m). Darüber, ob noch höhere Markierungsentfernungen weiteren Nutzen bringen, kann allenfalls spekuliert werden. Ab einer gewissen Entfernung ist [aufgrund der begrenzten Auflösung des Auges](#) mit Sättigungseffekten zu rechnen.

Die hier skizzierten Unterschiede zwischen den Erkennbarkeitsentfernungen sind nicht auf zufallsbedingte Schwankungen zurückzuführen. Die Daten wurden inferenzstatistisch insgesamt und für paarweise Differenzen (Varianzanalyse, Paardifferenzen mit Bonferroni-Korrektur) überprüft. Die Ergebnisse sind hochsignifikant. Die Effektstärke ist mit $\eta^2 = 0.85$ sehr groß.

Einige Probanden haben bei den falschen Alarmen einmal den Taster gedrückt. Diese unterschieden sich in Bezug auf die Erkennbarkeitsentfernungen nicht signifikant von den anderen Probanden. Der Fall, dass bei beiden falschen Alarmen der Taster gedrückt wurde, kam nicht vor. Die Reihenfolgen, in der die Objekte markiert wurden, waren – wie oben bereits erwähnt – randomisiert. Zwischen den dadurch entstandenen „Sets“ gab es ebenfalls keine Effekte in Bezug auf die Erkennensentfernung. Das gleiche gilt für die Positionierung der Figuren am linken oder rechten Fahrbahnrand. Hier gibt es lediglich einen leichten (nicht signifikanten) Effekt unter Abblendlicht: Die Asymmetrie der HDG bewirkt, dass Figuren am rechten Fahrbahnrand etwas früher wahrgenommen werden als am linken.

Insgesamt sind die Ergebnisse der empirischen Studie von großer Eindeutigkeit: Eine Markierung in 70 m Entfernung führt zu einer Steigerung der Erkennbarkeit gegenüber Abblendlicht von ca. 10 m. Eine weitere Steigerung der Markierungsentfernung innerhalb des hier dargebotenen Rahmens geht mit einer entsprechenden weiteren Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung einher. Die hohe Effektstärke zeigt, dass der Einfluss etwaiger Störvariablen in diesem experimentellen Setting weitgehend kontrolliert werden konnte. Die so gewonnenen Daten sind daher als verlässlich anzusehen und bieten eine tragfähige Basis zur Überprüfung vorhandener oder zur Generierung neuer lichttechnischer Modelle zur Prädiktion von Erkennbarkeitsentfernungen.

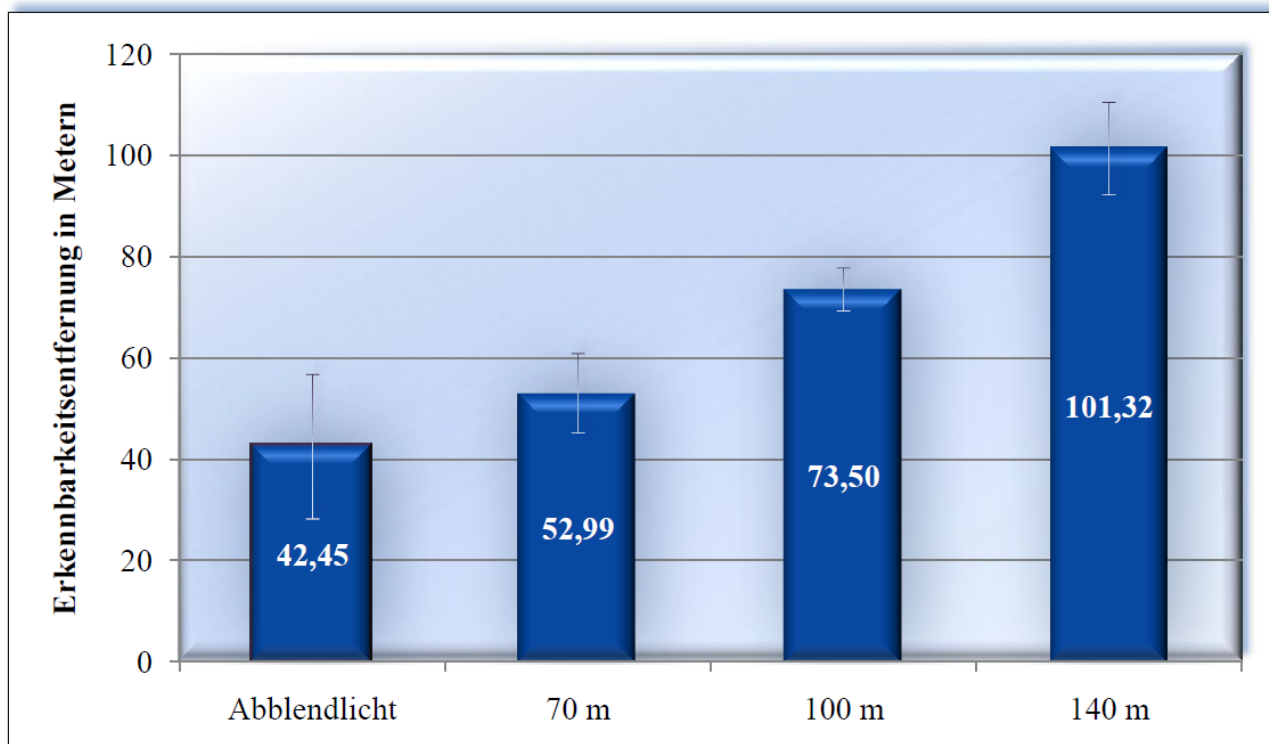


Abbildung 2 Erkennbarkeitsentfernungen aus dem empirischen Versuch

Diskussion

Die empirische Studie lieferte konsistente Ergebnisse hinsichtlich der Erkennbarkeitsentfernungen von Sehobjekten unter verschiedenen Bedingungen (Markierungsentfernungen). Die statistische Analyse legt nahe, dass es sich um verlässliche Daten handelt, die das zu messende Konstrukt valide abbilden. Anhand der Leuchtdichtebilder wird es möglich sein, unterschiedliche lichttechnische Modelle zur Prädiktion von Erkennbarkeitsentfernungen im Hinblick auf ihre Vorhersagegüte zu überprüfen. Dabei könnte es sein, dass die absoluten vorhergesagten Werte eines Modells zwar von den empirischen abweichen, dass die Struktur der Daten aber erhalten bleibt. Ein Beispiel: für alle vier Bedingungen wird ein Wert vorhergesagt, der um einen nahezu konstanten Betrag zu hoch ist, die Differenz zwischen den vorhergesagten Werten entsprechen jedoch weitgehend den empirisch gemessenen. Dann könnte das Modell geeignet sein, wenn es um einen Praxisfaktor ergänzt wird. Möglicherweise wird es aber notwendig sein, ein eigenes Modell mit möglichst hoher Passung zu generieren. Ergibt sich ein solches Modell mit hoher Passung (ggf. neu generiert oder modifiziert), dann ist die Reichweite dieses Modells gesondert zu überprüfen. Im Idealfall kann sich eine Kreuzvalidierung anschließen: Unter variierten Bedingungen werden neue Daten empirisch erhoben und es wird überprüft, wie gut sich die Ergebnisse durch das Modell vorhersagen lassen.

Ein praxistaugliches Modell zur Prädiktion von Erkennbarkeitsentfernungen ist wünschenswert. Die sehr aufwändige Operationalisierung dieses Konstrukts durch Probandenversuche könnte dann entfallen oder deutlich reduziert werden. Ob es mit dem hier beschriebenen Ansatz gelingt, dieses Ziel zu erreichen, wird sich in den nächsten Monaten zeigen.

- [1] Adrian, W. Die Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. Lichttechnik 21, Berlin, 1969
- [2] Eckert, M. Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr, 1993
- [3] Kokoschka, S., Gall, D. FASIVAL – Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite – Abschlussbericht, 2000
- [4] Bremond et. al., Photometric measurements for visibility level computations, Lighting Research and Technology 2011 43:119, 2010