

Kurzbericht

Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw

01.12.2014

Schmidt, Eike Andreas
Hoffmann, Heike
Krautscheid, Rainer
Bierbach, Maxim
Gail, Jost
Lotz-Keens, Christine

Bundesanstalt für Straßenwesen

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bright green color. It consists of the lowercase letters 'bast' in a bold, sans-serif font.

Inhalt

1. Einleitung	3
2. Versuchsfahrzeuge	3
2.1. Pkw	3
2.2. Lkw	4
3. Technische Aspekte	4
3.1. Versuchskonzept.....	4
3.2. Versuche und Ergebnisse	5
3.2.1. Sichtfeld nach hinten und direkte Sicht nach vorne.....	5
3.2.2. Allgemeine Tag- und Nachteigenschaften	6
3.2.3. Bildwiedergabe.....	7
3.2.4. Blendung durch andere Scheinwerfer bei Nacht.....	7
3.2.5. Reflexionen auf dem Display und Blendung des Displays.....	8
3.2.6. Verstellbarkeit von Kamera und Display	8
3.2.7. Ausfallsicherheit	9
3.2.8. Verhalten bei verschiedenen Witterungsbedingungen	9
3.2.9. Auswirkung von Verschmutzungen.....	10
4. Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion	11
4.1. Versuchskonzept Pkw	11
4.2. Wesentliche Ergebnisse der Pkw-Versuche	14
4.3. Blickverhalten bei Realfahrten	15
4.4. Subjektiv präferierte Position und Akzeptanz des KMS	16
4.5. Versuchskonzept Lkw	17
4.6. Wesentliche Ergebnisse der Lkw-Versuche.....	18
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	20
6. Literaturverzeichnis	22

1. Einleitung

Kamera-Monitor-Systeme (KMS) können bei Kraftfahrzeugen dazu verwendet werden, die Sicht nach hinten für den Fahrer auf einem im Fahrzeug montierten Monitor darzustellen. Dies bietet auch die Möglichkeit, herkömmliche Außenspiegel durch geeignete KMS zu ersetzen und damit neue Designvarianten mit aerodynamischen Vorteilen umsetzen zu können. Da es sich bei den Außenspiegeln jedoch um ein sicherheitsrelevantes Fahrzeugteil zur Gewährleistung der indirekten Sicht nach hinten handelt (Anforderungen sind in der UN-Regelung Nr. 46 festgelegt), stellt sich die Frage, ob KMS einen gleichwertigen Ersatz für Spiegel bieten können. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurde daher vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) beauftragt, eine entsprechende Untersuchung durchzuführen, in der KMS und Spiegel vergleichend bewertet werden. Dazu wurden Versuche mit Fahrzeugen, die mit KMS, Spiegeln oder beidem ausgerüstet waren, durchgeführt. Untersuchungsgegenstand waren zum einen technische Aspekte, zum anderen Fragestellungen zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion.

2. Versuchsfahrzeuge

2.1. Pkw

Für die Versuche mit Pkw standen zwei Fahrzeuge zur Verfügung: Ein Fahrzeug, das in Kleinserie hergestellt wird und bereits nur mit KMS als Ersatz für Außenspiegel ausgerüstet ist, sowie ein Fahrzeug der Kompaktklasse, an dem sowohl ein KMS als Nachrüstsatz verbaut war als auch die herkömmlich vorhandenen Außenspiegel (siehe Abbildung 1). Letztere konnten für Fahrten ausschließlich mit KMS abgedeckt werden.



Abbildung 1: Kamera- und Monitorintegration (eine der gewählten Positionen) im nachgerüsteten Pkw auf der Fahrerseite

2.2. Lkw

Für die Versuche am Lkw stand eine Sattelzugmaschine mit Auflieger zur Verfügung. Die Fahrerkabine war mit einem nachgerüsteten KMS ausgestattet (siehe Abbildung 2). Die Kameras waren oberhalb der Hauptaußenspiegel an der Fahrer- und Beifahrerseite angebracht. Zusätzlich befanden sich am Fahrzeug die herkömmlichen Außenspiegel, die man für Fahrten mit KMS jedoch auch so wegklappen konnte, dass eine Nutzung durch den Fahrer nicht mehr möglich war.



Abbildung 2: Monitor- und Kameraintegration im prototypisch nachgerüsteten Lkw

3. Technische Aspekte

3.1. Versuchskonzept

Um die Funktion des KMS im direkten Vergleich mit dem Spiegel zu prüfen, wurden Fahrversuche unter verschiedensten äußeren Bedingungen sowie statische Versuche durchgeführt. Diese statischen und dynamischen Versuche wurden für die Auswertung als Video- oder Fotomaterial festgehalten. Um dabei die rückwärtige Sicht des Fahrers so gut wie möglich zu dokumentieren, wurde eine zusätzliche Kamera so montiert und ausgerichtet, dass sowohl der linke Rückspiegel als auch der linke Monitor auf der Aufzeichnung zu sehen waren (siehe Abbildung 3). Bei den statischen Versuchen wurde als Hintergrund in der Regel ein Farb- und ein Graustufenschema verwendet, was eine gute Bewertbarkeit des KMS- sowie Spiegelbildes ermöglichen sollte.



Abbildung 3: Kamerahalterung und -bild für die Untersuchung der technischen Aspekte am Pkw

Das KMS wurde im Wesentlichen auf folgende technischen Aspekte und Situationen – immer im Hinblick auf Unterschiede zum Spiegel - hin betrachtet:

- Sichtfeld nach hinten und ggf. Einschränkung der direkten Sicht nach vorne
- Allgemeine Tag- und Nachteigenschaften
- Bildwiedergabe
- Blendung durch andere Scheinwerfer bei Nacht
- Reflexionen und Blendung (Display)
- Verstellbarkeit von Kamera und Display
- Ausfallsicherheit
- Verhalten bei verschiedenen Witterungsbedingungen
- Auswirkung von Verschmutzungen

Die technischen Aspekte wurden ausschließlich am Pkw untersucht, die Ergebnisse gelten aber gleichermaßen für das KMS am Lkw.

3.2. Versuche und Ergebnisse

Zu den in Abschnitt 3.1 aufgeführten technischen Untersuchungsgegenständen wird im Folgenden jeweils kurz auf den Versuch und das daraus abgeleitete Ergebnis eingegangen.

3.2.1. Sichtfeld nach hinten und direkte Sicht nach vorne

Das gesamte auf den Monitoren dargestellte Sichtfeld wurde in der Realität hinter dem Fahrzeug abgesteckt und vermessen. Das Sichtfeld erfüllte alle Anforderungen an die indirekte

Sicht. Der sogenannte „tote Winkel“, d. h. die Bereiche, die weder durch direkte Sicht nach hinten noch durch das System für indirekte Sicht erfasst werden, war mit KMS verringert.

Durch den Verbau der Monitore im Innenraum wurde die direkte Sicht, d. h. das Sichtfeld nach vorne, nicht eingeschränkt.

3.2.2. Allgemeine Tag- und Nachteileigenschaften

Wesentliche Herausforderung für KMS ist der Umgang mit abrupt wechselnden Umgebungshelligkeiten. Dies wurde an Hand von Tunnelein- und –ausfahrten untersucht. Die Blende der Kamera ist in diesen Situationen entweder zunächst zu klein bzw. zu groß eingestellt und damit ist das Bild zu dunkel bzw. zu hell. Nach ca. 1 s war der Nachregelvorgang der Kamera jeweils abgeschlossen. In dieser Zeit war die Darstellung auf dem Monitor jedoch beeinträchtigt. Abbildung 4 zeigt die Situation nach einer Tunnelausfahrt, in der zu viel Licht in die Kamera fällt und die Bildinhalte überstrahlt werden (Blooming, helle Bereiche nehmen mehr Raum im Bild ein, als es ihrer tatsächlichen Größe entspricht), so dass Information verloren geht. Bei Nacht kehrt sich das Verhalten um.



Abbildung 4: Tunnelausfahrt am Tag

Auch bei schnell hin und her wechselnden Lichtbedingungen wie einer Alledurchfahrt bei Sonnenschein zeigten sich Farbwiedergabe und Grauabstufung in ihrer Qualität deutlich gemindert. Auch bei der Darstellung von weißen Objekten (z. B. Fahrzeugen) bei sehr hellen Umgebungsbedingungen und hellen Hintergründen (z. B. Betonfahrbahn) kam das KMS an seine Grenzen.

Bei tiefem Sonnenstand haben sowohl Spiegel als auch KMS Vor- und Nachteile. Physische Blendung des Auges tritt ausschließlich beim Spiegel auf (hierzu ist der Monitor nicht in der Lage). Das KMS zeigte zunächst wiederum Blooming, das nach dem Nachregeln der Kamera aber deutlich geringer wurde, so dass Bildinhalte wieder sichtbar wurden.

Während der Nacht ist es wichtig, dass es aufgrund des Abblend- bzw. Fernlichtes anderer Verkehrsteilnehmer im KMS nicht zum Blooming-Effekt kommt und Punktlichtquellen, also die einzelnen Scheinwerfer anderer Fahrzeuge, auch als Punktlichtquellen wiedergegeben werden. Bei den Testfahrten war festzustellen, dass beim KMS die einzelnen Scheinwerfer anderer Fahrzeuge zu erkennen waren. Es kam lediglich zum sogenannten Smear-Effekt, bei dem sich auf dem Monitor jeweils ein heller Kranz um die Scheinwerfer zeigt. Es war dem Fahrer jedoch trotz dieses Smear-Effekts möglich einzelne Fahrzeuge zu erkennen und voneinander zu unterscheiden.

3.2.3. **Bildwiedergabe**

Kontrastmessungen zeigten, dass das KMS (auf Grund interner Verstärkung) bei Nacht deutlich höhere Kontraste liefert als der Spiegel. Bei hohen Umgebungsbeleuchtungsstärken kehrt sich die Situation um. Der Monitor kann dann auf Grund seiner begrenzten Leuchtdichte nur noch etwas mehr als die Hälfte des Kontrastes des Spiegels liefern.

Bei Messungen der Farbwiedergabe unterschieden sich Spiegel- und KMS kaum. Schwächen bei der Farbwiedergabe im KMS, die wesentlich von den Umgebungslichtbedingungen abhängen, wurden aber bei den Testfahrten beobachtet.

3.2.4. **Blendung durch andere Scheinwerfer bei Nacht**

Bei Nacht ist es wichtig, dass vor allem die Scheinwerfer der rückwärtigen Fahrzeuge erkennbar sind und diese als Punktlichtquellen dargestellt werden. Dies ist eine besondere Schwierigkeit, da Scheinwerfer in der Nacht starke Lichtquellen sind und diese bei direktem Einstrahlen in die Kamera zu Blooming führen können.

Versuche zur Blendung bei Nacht wurden in der Lichthalle der BASt, einer komplett abgedunkelten Halle, durchgeführt. Hinter dem Fahrzeug mit KMS wurden Fahrzeuge mit Xenon-Abblendscheinwerfern und Halogen-Fernscheinwerfern postiert.

Trotz Smear-Effekte waren die Abblendlicht-Scheinwerfer in allen Entfernungen deutlich als Punktlichtquellen zu erkennen. Die Farbwiedergabe von zusätzlich aufgestellten Verkehrszeichen war jedoch gegenüber dem Spiegel sehr stark eingeschränkt. Sowohl im Spiegel als auch im Monitor erfuhr der Fahrer keine physische Blendung. Bei Fernlicht (dem für den Straßenverkehr in der Regel unüblichen Szenario) verschmolzen die Scheinwerfer im Monitorbild aufgrund von Blooming und Smear miteinander (Abstand nach hinten: 50 m). Hier wurden die Punktlichtquellen also nicht mehr eindeutig wiedergegeben. Durch den Spiegel betrachtet erzeugte das

Fernlicht beim Fahrer physische Blendung, wodurch die Sicht ebenfalls stark eingeschränkt war.

3.2.5. Reflexionen auf dem Display und Blendung des Displays

Während der Versuchsfahrten konnten Reflexionen auf dem Display beobachtet werden. So spiegelte sich in dem Display auf der Beifahrerseite oft die Sicht aus dem Fenster der Fahrertür. Das kann z. B. beim Abbiegen nach rechts dazu führen, dass der Fahrer andere Verkehrsteilnehmer übersieht. Vergleichbare Reflexionen treten bei einem Spiegel nicht auf.

Mit einer Blendung des Displays sind die direkte Lichteinstrahlung auf das Display und deren Folgen gemeint. Dieser Lichteinfall auf das Display wird in der Regel durch die Sonne hervorgerufen. Da der Monitor in seiner maximalen Leuchtdichte begrenzt ist, kann die Leuchtdichte, die durch die Sonneneinstrahlung auf dem Display hervorgerufen wird, größer sein. Dadurch vermindert sich für den Fahrer der Kontrast und die Farbwahrnehmung. Eine Hutze oder ein Schirm, welche die oberen und seitlichen Ränder der Displays umgibt, könnte sowohl für die Reflexionen als auch für die Gefahr der Blendungen Abhilfe leisten.

3.2.6. Verstellbarkeit von Kamera und Display

Die Notwendigkeit von Verstellmöglichkeiten ist differenziert zu bewerten. Verstelloptionen erlauben die individuelle Anpassung an die Bedürfnisse des jeweiligen Fahrers. Damit einher geht jedoch die Gefahr, dass Spiegel wie KMS von Fahrern so eingestellt werden, dass die indirekte Sicht nicht mehr optimal ist. Vorteil von KMS ist, dass durch Default-Einstellungen immer das optimale (und gesetzlich vorgeschriebene) Sichtfeld voreingestellt sein kann. Je nach Fahrsituation kann jedoch manuelles Verstellen des Bildausschnitts nützlich sein. Dies trifft insbesondere beim Lkw zu. (Beim Spiegel ist Bildverstellung sowohl durch Kopfbewegungen als auch durch Verstelleinrichtungen möglich). Hilfreich wäre auch eine Einstellbarkeit des Monitors auf die Körpergröße des Fahrers, um einen möglichst senkrechten Blick auf die Displays zu gewährleisten.

In Bezug auf Helligkeit und Kontrast sollte eine automatische Anpassung an die Umgebungsbedingungen Standard sein, zusätzliche manuelle Einstellmöglichkeiten wurden als sinnvoll erachtet.

3.2.7. Ausfallsicherheit

Während der Testfahrten kam es vereinzelt zu kurzen Ausfällen der prototypisch nachgerüsteten Monitore. Diese Bildausfälle von ca. 1 s gab es sowohl im linken als auch im rechten Monitor, jedoch nicht gleichzeitig. Diese Ausfälle konnten keiner bestimmten Fahrsituation oder einer bestimmten Umgebung zugeordnet werden. Die Ursache konnte nicht ermittelt werden. Der Sachverhalt zeigt jedoch, wie wichtig es ist, bei sicherheitsrelevanten Systemen auf Ausfallsicherheit zu achten.

Auch bei Störungen durch elektromagnetische Strahlung sollte es, um die Sicherheit im Straßenverkehr zu gewährleisten, zu keinen Bildausfällen kommen. Zum Test wurden Funkgeräte und Mobiltelefone in unmittelbarer Nähe des KMS benutzt. Nur während des Absetzens eines Rufes (Funkgerät) in der direkten Nähe des KMS-Steuergerätes, entstanden Bildfehler, bemerkbar durch ein Flimmern mit Verzerrung des Bildes bis hin zu einem kompletten Bildausfall, bei dem im Monitor ein rotes X angezeigt wurde (siehe Abbildung 5). Durch das Handy wurden keine Bildfehler ausgelöst. Dies zeigt die Bedeutung des Schutzes von KMS gegenüber elektromagnetischer Strahlung.



Abbildung 5: Bildausfall durch elektromagnetische Strahlung

3.2.8. Verhalten bei verschiedenen Witterungsbedingungen

Verhalten bei extremer Kälte und Hitze

Um das Verhalten des KMS bei extremer Kälte zu testen, wurde der Testträger in einer Klimakammer auf eine Temperatur von -20 °C gebracht.

Direkt nach Zündung an und dem Hochfahren des KMS wurde ein unscharfes Bild festgestellt. Nach Verlassen der Klimakammer bildete sich Kondenswasser. Dieses setzte sich sowohl auf der Kamera, als auch auf dem Spiegel ab. Nach zwei Minuten war aufgrund der Spiegelheizung die Spiegelfläche wieder komplett frei. Die Kamera hingegen war noch beschlagen und nicht einsatzfähig. Ein beheiztes KMS, bei dem sowohl die Kamera als auch der Monitor beheizt wer-

den, könnte das Problem verringern. Eine solche Heizung könnte die Zeit bis zur uneingeschränkten Betriebsbereitschaft deutlich verkürzen und somit die Verkehrssicherheit erhöhen.

Eine Erhöhung der Temperatur der Kamera auf ca. 80 °C zeigte keinerlei Beeinträchtigungen der Darstellung des KMS.

Verhalten bei Regen

Bei Regen kam es selten zu störenden Tropfen auf der Kamera, die das Bild aber in der Regel nur leicht beeinflussten. Beim Spiegel hingegen war sowohl das Spiegelglas selbst als auch die Seitenscheibe, durch welche man hindurch blicken muss, mit Tropfen behaftet. Streulicht beeinflusst dann die Sicht negativ. Bei Starkregen und der damit zusammenhängenden starken Gischtbildung konnten beim KMS im Monitor Punktlichtquellen nicht mehr als solche dargestellt werden. Scheinwerfer von Fahrzeugen im Hintergrund verschmolzen zu einem großen Lichtkegel. Auch im Spiegel – wenn auch geringer als beim KMS - war die Sicht bei Starkregen aufgrund der Tropfen und der damit zusammenhängenden Brechung des Lichtes verschlechtert.

3.2.9. Auswirkung von Verschmutzungen

Von Verschmutzungen sind Kameras prinzipiell genauso betroffen wie Rückspiegel, die sich außen am Fahrzeug befinden. Ursache für Verschmutzung ist meist in Sprühnebel gelöster Schmutz von der Straße, der sich auf dem Fahrzeug absetzt. Wie sich solch ein Schmutzfilm auf dem KMS auswirkt, wurde mit in mehreren Stufen aufgebraucher Salzlösung als Schmutzerersatz getestet.

Im Ergebnis wirkt sich die Verschmutzung im Spiegel stärker auf die Sicht aus als im Monitor. In allen drei Stufen war sowohl die Farbwiedergabe als auch der Kontrast im Monitor höher.

Abbildung 6 zeigt den direkten Vergleich zwischen Spiegel und Monitor beispielhaft.

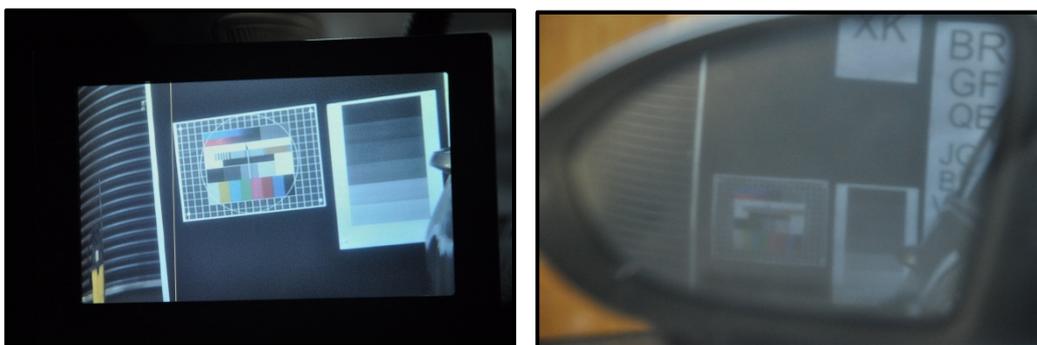


Abbildung 6: Monitorbild und Spiegelbild mit mittlerer Verschmutzung

4. Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion

4.1. Versuchskonzept Pkw

Die Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion im Pkw wurden im Rahmen von Probandenversuchen untersucht. Es wurden für den Einsatz im Pkw drei Experimente durchgeführt:

- Experiment zur Distanz- und Geschwindigkeitswahrnehmung herannahender Fahrzeuge.
- Experiment zum Rückwärtsfahren und Parken in Längs- und Querrichtung.
- Experiment, ob und in welche Richtung sich das Blickverhalten bei einer Realfahrt unter Verwendung eines KMS verändert.

Eine subjektive Einschätzung der Systemunterstützung wurde zusätzlich mittels Fragebogen (mit Messwiederholung) ermittelt.

Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 42 Versuchspersonen an der Untersuchung teil. Innerhalb der Gesamtstichprobe waren 18 Teilnehmer weiblich und 24 männlich. Das Durchschnittsalter der Gesamtstichprobe betrug $\bar{x} = 47.8$ Jahre (SD = 17.2), wobei der jüngste Proband 25 Jahre alt war und der älteste 78 Jahre.

Die Probanden wurden vorab zwei Experimentalgruppen zugeteilt. 11 Probanden bildeten eine vordefinierte „Expertengruppe“ (E). Das Einschlusskriterium hierbei war eine mindestens 60 minütige bis maximal zweitägige freie Nutzung des Kamera-Monitor-Systems im Straßenverkehr.

Die zweite Kategorie stellte die Gruppe der „Novizen“ dar. Diese Gruppe setzte sich aus 31 externen Probanden zusammen, die bislang noch keinen Kontakt mit dem Kamera-Monitor-System hatten und lediglich eine mündliche Einweisung in das System sowie eine Proberunde vor Beginn der eigentlichen Erhebung bekamen.

Integration der Monitore des KMS

Für die Versuche wurde ein Fahrzeug der Kompaktklasse, an dem sowohl ein KMS als Nachrüstsatz als auch die herkömmlich vorhandenen Außenspiegel verbaut war (siehe auch Abschnitt 2.1). Die zwei Monitore des Versuchsträgers waren variabel anbringbar, indem sie mittels drei Halterungen auf jeder Seite in die jeweilige Position verschoben werden konnten. Dabei wurden die Monitore alternativ in folgenden Positionen angebracht:

- an der Fahrer- und nahe der Beifahrertür, als Position 1 (KMS1)
- in Lenkradnähe, unmittelbar auf den Gittern der Ausströmer, als Position 2 (KMS2)

- nahe der A-Säule des Versuchsfahrzeugs wurden Saugfußhalterungen für die Integration der Position 3 (KMS3) montiert.

Die Abbildung 7 zeigt schematisch die Anbringungsorte der Monitore in der Übersicht. Gemäß einem linken und rechten Spiegel-Ersatzsystem waren bei der Durchführung der Studie immer ein fahrerseitiger und beifahrerseitiger Monitor angebracht.



Abbildung 7: Schematische Übersicht der Anbringungsorte der Position KMS1, KMS2 und KMS3

Versuchsanordnung zur Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung

Zur validen Erfassung der subjektiven Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung eines sich nähernden Fahrzeuges wurde die „last safe gap“ Methode genutzt. (vgl. Bowles, 1969; Burger et al., 1980; Fisher & Galer, 1984; Mortimer, 1971; Mortimer & Jorgeson, 1974; Walraven & Michon, 1969). Dabei wird die subjektiv schwer fassbare Distanz- und Geschwindigkeitswahrnehmung indirekt über die Angabe des letzten sicheren Moments für einen Fahrstreifenwechsel erfasst. Hierbei wurde im statischen Versuchsfahrzeug ein sich näherndes Referenzfahrzeug durch eine Vorrichtung (hier: linker KMS-Monitor bzw. linker Außenspiegel) beobachtet. Für die Schätzung durfte weder der Innenspiegel noch ein Schulterblick zur Hilfe genommen werden. Der Proband sollte dann durch Tastendruck den letzten sicheren Moment für das Ausscheren vor dem Fahrzeug angeben. Der Versuch wurde sowohl mit Außenspiegel (bei ausgeschaltetem KMS) als auch mit KMS (bei abgeklebten Außenspiegeln) durchgeführt.

Versuchsanordnung zum Rückwärtsfahren und Parken

Das Rückwärtsfahren und Parken wurde in zwei Szenarien untersucht:

- Parallelparken und parallele Annäherung an Hindernis (Randstein)
- Querparken und orthogonale Annäherung an Hindernis

Auch hier wurden alle vier Positionen (KMS1, KMS2, KMS3 & Außenspiegel) getestet.

Versuchsanordnung zum Blickverhalten bei Realfahrten

Alle vier Positionen (KMS1, KMS2, KMS3 & Außenspiegel) wurden anhand einer vergleichbaren Fahrstrecke getestet. Damit Reihenfolgeeffekte ausgeschlossen werden konnten, wurden die zu befahrenden Positionen zwischen den Probanden permutiert. Das Versuchereignis „Überholen“ sollte mindestens dreimal, aber maximal fünfmal erhoben werden. Der Start des Versuchereignisses „Überholen“ wurde dabei bei vollständigem Fahrstreifenwechsel nach links sowie das Ende erst bei vollständigem Fahrstreifenwechsel nach rechts gesetzt.



(a) Kalibrierung des Blickerfassungssystems

(b) Ausrichtung der Augenkamera auf die Feldkamera



(c) Anfahrt mit montiertem KMS2 vom Parkplatz

(d) Versuchereignis „Überholen“. Vorbereitung auf Fahrstreifenwechsel nach links

Abbildung 8: Versuchsaufbau. Messung der Versuchereignisse mit Hilfe des Blickerfassungssystems *Dikablis*.

Zur Erfassung des Blickverhaltens wurde das Blickerfassungssystem der Firma *Ergoneers*, die *Dikablis Head-Unit* verwendet (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9).



Abbildung 9: Blickerfassungssystem der Firma Ergoneers, die Dikablis Head-Unit

Befragung zum Situationsbewusstsein, zur Akzeptanz und zur Ablenkung

Mittels eines Fragebogens wurde zusätzlich die subjektive Einschätzung der Probanden zur Akzeptanz der Systemunterstützung erhoben. Der Fragebogen wurde während des Versuchs nach jeder Änderung der Monitorposition bzw. Nutzung der Außenspiegel von den Probanden beantwortet.

4.2. Wesentliche Ergebnisse der Pkw-Versuche

Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung

Abbildung 10 zeigt grafisch die Mittelwerte der tatsächlichen Distanz des sich von hinten nähernden Referenzfahrzeuges vom Versuchsfahrzeug zum Zeitpunkt des Tastendruckes in Abhängigkeit des verwendeten Systems und den gefahrenen Geschwindigkeiten.

Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit des verwendeten Systems. Tendenziell wird mit dem KMS früher nicht mehr ausgeschert.

Für die Geschwindigkeiten des Referenzfahrzeuges konnte ein signifikanter Haupteffekt nachgewiesen werden: Je schneller das Referenzfahrzeug, desto größer ist die Distanz bei der nicht mehr ausgeschert wird. Die Interaktion des verwendeten Systems mit den Geschwindigkeiten des Referenzfahrzeuges zeigte jedoch keine statistische Signifikanz.

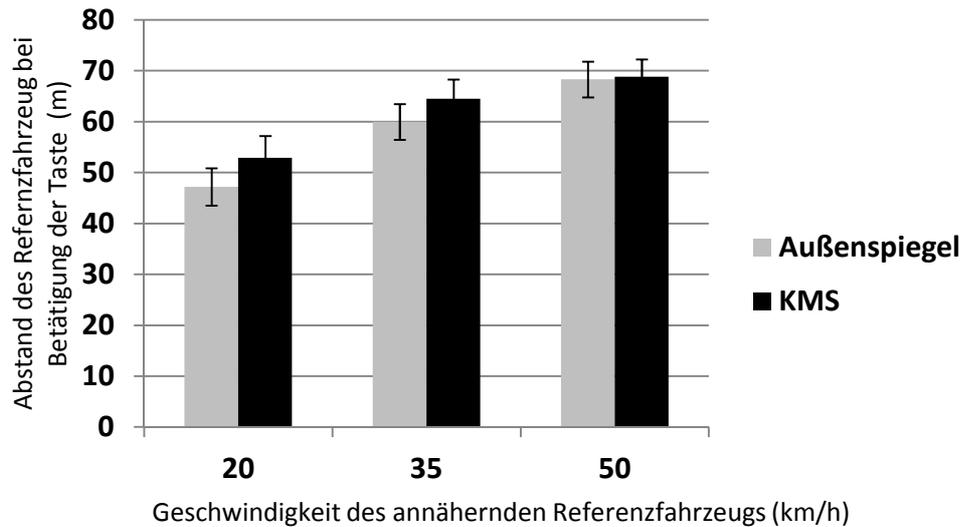


Abbildung 10: Ergebnis der Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung unter Verwendung des fahrerseitigen Monitors oder Außenspiegels und der Geschwindigkeitskategorien für alle Probanden (N=34).

Für die Analyse konnten Daten von 34 Teilnehmern (18 männlich, 16 weiblich, mittleres Alter 46,7) verwendet werden.

4.3. Blickverhalten bei Realfahrten

Beim Auffahren auf die Autobahn konnte ein signifikanter Unterschied auf die Blickhäufigkeit und -dauer bei der Nutzung des KMS in den unterschiedlichen Positionen und dem Außenspiegel nur beim KMS in der Position 3 (signifikante Erhöhung der Anzahl der Blicke gegenüber dem Außenspiegel, Abbildung 11) und beim KMS in der Position 1 (signifikante Reduzierung der mittleren und der maximalen Blickdauer im Vergleich zum Außenspiegel, Abbildung 12) festgestellt werden.

Die Daten von 24 Teilnehmern (12 männlich, 12 weiblich, mittleres Alter 51,6) konnten für die Auswertung herangezogen werden.

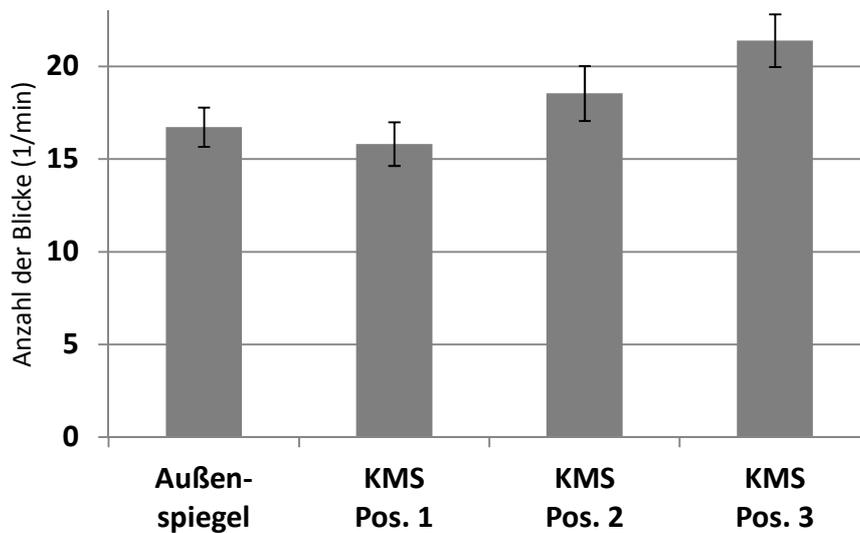


Abbildung 11: Anzahl der Blicke auf das KMS bzw. den Spiegel 15 Sekunden vor dem Einfahren auf die Autobahn

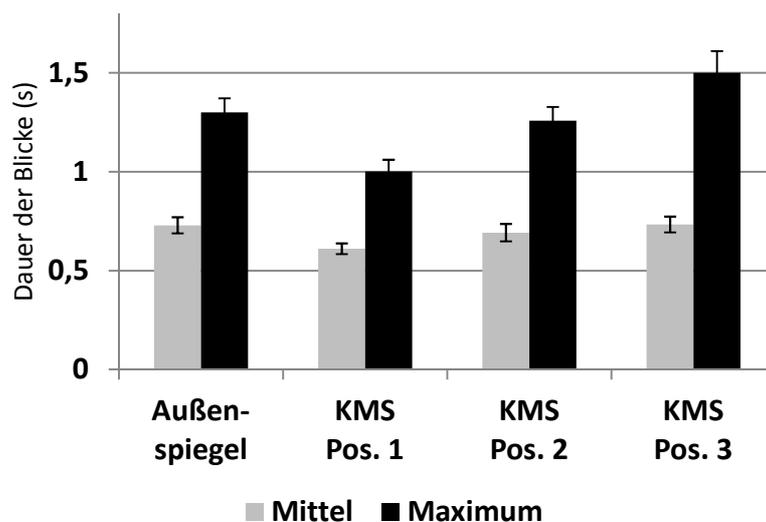


Abbildung 12: Dauer der Blicke auf das KMS bzw. den Spiegel 15 Sekunden vor dem Einfahren auf die Autobahn

4.4. Subjektiv präferierte Position und Akzeptanz des KMS

Abbildung 13 zeigt die Verteilung der präferierten Position des KMS Monitors. Mehr als die Hälfte der Teilnehmer bevorzugten die Position 3, während ca. 38% die Position 2 präferierten. Nur ein Proband präferierte die Position 1. Zwei Teilnehmer merkten an, dass sie eine Lösung bevorzugen würden, in der die Information von der rechten Seite näher im zentralen Sehfeld platziert wird (wie in Position 2), jedoch der Monitor linker Hand so nah wie möglich an der ursprünglichen Position des Außenspiegels bleiben sollte.

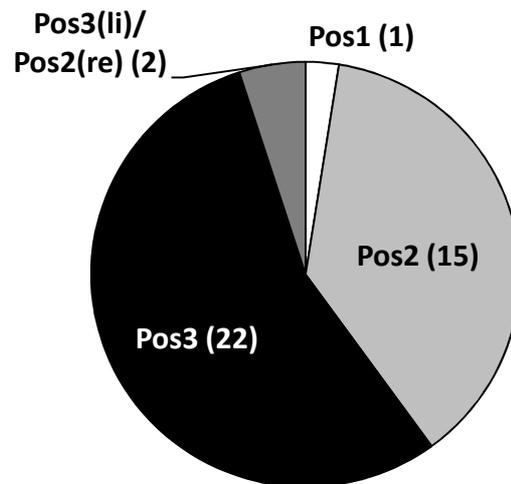


Abbildung 13: Präferierte Position des KMS (siehe auch Abbildung 7)

Die Teilnehmer berichteten eine mittlere Akzeptanz vor der Nutzung des Systems, nach der ersten Nutzung und am Ende des gesamten Versuchs. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Nutzungsdauer auf die Akzeptanz festgestellt werden.

4.5. Versuchskonzept Lkw

Die Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion im Lkw wurden ebenfalls im Rahmen von Probandenversuchen untersucht. Es wurden für den Einsatz des KMS im Lkw zwei Szenarien untersucht:

- Probefahrt (Dauer ca. 20 Minuten) auf einem Versuchsgelände inkl. Szenarien wie Geradeausfahrt, Kurven- und gerade Rückwärtsfahrt, Distanzschätzung durch rückwärtiges Heranfahen an zwei Pylonen rechts und links vom Ende des Aufliegers.
- Realfahrten im öffentlichen Straßenverkehr. Die Streckenlänge betrug insgesamt 57 km, davon 29 km Autobahn und 28 km Landstraße.

Die Realfahrten wurden, nach einer ersten Fahrt zur Eingewöhnung, von der Versuchsleiterin (Psychologin) begleitet, die während der Fahrt die von der Versuchsperson spontan geäußerten Kommentare zum KMS notierte und die Probanden anhand vorgegebener Kriterien (Wahrnehmung von Differenzgeschwindigkeiten; Durchfahrt durch den Kreisverkehr / Ortschaft; Erkennbarkeit von entfernten Objekten) zur subjektiven Einschätzung befragte und die Antworten dokumentierte. Am Ende der Realfahrten erhielten die Probanden nochmals einen Fragebogen.

Versuchspersonen

An dem Versuch nahmen insgesamt 10 männliche Versuchspersonen teil. Das Durchschnittsalter betrug 51,1 Jahre ($SD=7,65$). Acht der zehn Versuchspersonen fuhren im Durchschnitt seit 11,4 Jahren keinen Lkw mehr. Die Hälfte der Versuchspersonen hatte durch die Teilnahme an dem Experiment mit dem Pkw Vorerfahrungen mit dem Kamera-Monitor-System.

4.6. Wesentliche Ergebnisse der Lkw-Versuche

Die Fahrten mit dem Kamera-Monitor-System im öffentlichen Straßenverkehr zeigten sich insgesamt für alle Probanden unproblematisch, d.h. keiner hatte die Fahrt abgebrochen bzw. die Spiegel benötigt.

Beim Vergleich der positiven und negativen Anmerkungen fällt auf, dass die Mehrheit der Probanden sich zum prototypisch verbauten System negativ äußerte. Alle gaben jedoch an, dass sich der Fahrer an das KMS gewöhnen müsse. Nach einer gewissen Eingewöhnungszeit würden z.B. die kleinere Monitorgröße, die Position der Monitore, die veränderten Lichtverhältnisse weniger störend wahrgenommen werden.

Für den Lkw wurde positiv angemerkt, dass die auf den Weitwinkelspiegeln durch dessen Krümmung verzerrt und relativ klein dargestellten Bildinhalte durch KMS wesentlich klarer abgebildet werden.

Allerdings ergaben sich Beanstandungen, die von einigen Probanden als ein Gefährdungspotenzial für den Straßenverkehr erlebt wurden:

- Alle Versuchspersonen kritisierten, dass Objekte im Display kleiner wahrgenommen werden; vor allem für das Rangieren und Manövrieren ist eine detailgetreue Sicht von großer Bedeutung.
- Kontrast und Farbintensität änderten sich in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung. Der Kontrast zwischen Auflieger und Straße war bei starker Sonneneinstrahlung kaum wahrnehmbar. Auf dem Display dargestellte Schatten erschienen dann sehr dunkel, so dass Objekte im Schatten des Aufliegers nicht mehr trennscharf gesehen werden können. Dies führt auch dazu, dass z.B. der Abstand vom Bordstein deutlich schlechter eingeschätzt werden konnte.
- Bei Sonneneinstrahlung waren die Bilder auf den Monitoren hinsichtlich ihrer Farbgebung unterschiedlich, so dass der Blick für die Erkennung von Objekten länger auf dem Display gerichtet war. Helle Fahrzeuge sowie auch die Konturen von weit entfernten Objekten (z.B. Scheinwerfer anderer Fahrzeuge) waren schlechter bis gar nicht erkennbar.

- Die Durchfahrt durch den Kreisverkehr wurde teilweise als „eher störend“ bewertet. Dies wurde damit begründet, dass einmal das Bild auf dem Monitor ruckelte und ein weiteres Mal die Kontraststärke so gering war, dass nur durch genaues Hinschauen der Abstand zwischen Räder und Verkehrsinsel abgeschätzt werden konnte.

Neun von 10 Versuchspersonen gaben an, dass das Kamera-Monitor-System erst nach Beseitigung der vorliegenden Schwächen als kundentauglich bewertet werden könne.

In Bezug auf die räumliche Tiefenwahrnehmung gab die Mehrheit der Probanden an, durch die Verkleinerung der Objekte die räumliche Tiefe eingeschränkt wahrzunehmen, wobei eine Geschwindigkeits- und Abstandsmessung jedoch möglich sei.

Die von den Probanden der vorliegenden Studie weniger gute Bewertung der Bildqualität ist wohl darauf zurückzuführen, dass durch die intensive Sonneneinstrahlung während der Versuchsdurchführung beide Monitore unterschiedlich starke Blendungseffekte aufwiesen. Auch durch die starke Schattenbildung auf den Monitoren war die Erkennbarkeit von (weiter entfernten) Verkehrsobjekten stärker eingeschränkt.

Positiv beurteilt wurden die Durchfahrt durch den Ort sowie die Schätzung der Differenzgeschwindigkeiten auf der Autobahn.

Der Abstand zu den Pylonen bei der Rückwärtsfahraufgabe wurde mit dem KMS tendenziell genauer eingeschätzt als mit den Außenspiegeln. Trotzdem könnte eine zusätzliche Kamera für das Heck des Lkw die Situation weiter verbessern.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass es möglich ist, die indirekte Sicht nach hinten sowohl bei Pkw als auch bei Lkw durch KMS, die gewisse Qualitätskriterien erfüllen, für den Fahrer ausreichend darstellen zu können. Je nach Ausgestaltung bietet ein KMS sogar die Möglichkeit, mehr Information über den rückwärtigen Raum zu präsentieren als es mit Spiegelsystemen möglich ist. Ungeachtet dessen bestehen jedoch grundsätzliche Unterschiede zwischen beiden Lösungen. Eine Tiefeninformation bzw. ein räumlicher Eindruck des Bildes ist beim Spiegel beispielsweise immer gegeben, beim KMS wegen der zweidimensionalen Darstellung auf dem Monitor prinzipiell nicht möglich. Außerdem lässt sich das Sichtfeld im Spiegel durch Kopfbewegungen leicht verändern, beim KMS bisher nicht.

Das KMS ist in der Regel unempfindlicher gegenüber Verschmutzung und Regentropfen, da die Kamera klein ist (was auch der Aerodynamik nützt) und das Display im Innenraum verbaut ist. Dafür können Frost, Kälte und elektromagnetische Störungen ein Problem darstellen. Ohne Stromversorgung funktioniert ein KMS nicht, ein Spiegel demgegenüber ist immer einsatzbereit. Bei direkter Sonneneinstrahlung ist das KMS überlegen, da es direkte physische Blendung des Fahrers vermeidet. Es bietet weiter die Möglichkeit, Kontraste - je nach Umgebungshelligkeit - zu verstärken oder abzuschwächen, so dass der Betrachtungskomfort und insbesondere der Informationsgehalt im Bild – gerade bei Nacht – gegenüber dem Spiegel gesteigert ist. Hier kommt es jedoch auf die Adaptionsfähigkeit des KMS (nötige Anpassungszeit an Helligkeitsunterschiede und Darstellungsfähigkeit eines großen Bereiches an Helligkeiten) an. Beim KMS können je nach Anbringungsort des Monitors Reflexionen oder Blendungen auf dem Display auftreten; hier können Abdeckungen oder Einhausungen für das Display Abhilfe schaffen. Typisch für KMS sind weiterhin die Möglichkeit des Auftretens von Artefakten wie „Blooming“ oder „Smear“, so dass das Bild insbesondere bei der Darstellung künstlicher Lichtquellen die Realität nicht mehr sauber abbildet. Insgesamt halten sich Vor- und Nachteile von KMS und Spiegeln die Waage. Es ist jedoch darauf zu achten, dass bestimmte Anforderungen an KMS zu stellen und zu erfüllen sind, um diese Gleichwertigkeit auch tatsächlich zu gewährleisten:

- Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit
- Gute Farb- und Kontrastwiedergabe, Artefaktminimierung
- Schnelle Anpassung an Umgebungshelligkeitsänderungen
- Darstellung ohne Zeitverzug
- Detektion und sofortige Anzeige von Bildausfall bzw. besser noch Sicherstellung, dass es nicht zu Bildausfällen kommt
- Frost- und Beschlagschutz

Die Fahrversuche mit Probanden haben gezeigt, dass der Umstieg von Spiegeln auf KMS immer einer gewissen Gewöhnungsphase bedarf, diese jedoch verhältnismäßig kurz ist und nicht notwendigerweise zu sicherheitskritischen Situationen führt. Für den Pkw wurde in Bezug auf Geschwindigkeits- und Abstandsschätzungen festgestellt, dass diese mit KMS konservativer erfolgen als bei Spiegeln, d. h. man wartet auf leicht größere Lücken, bevor man einschert. Für den Lkw wurde positiv angemerkt, dass die auf den Weitwinkelspiegeln durch dessen Krümmung verzerrt und relativ klein dargestellten Bildinhalte durch KMS wesentlich klarer abgebildet werden. Wegen der fehlenden Tiefeninformation sind mit KMS weit entfernte Objekte schwerer einzuschätzen. Die Rückwärtsfahraufgabe wurde mit dem KMS tendenziell genauer bewältigt als mit den Außenspiegeln. Wo sich genau das Ende des Fahrzeugs befindet, ist gerade beim Rangieren ein wesentlicher Aspekt. Hier wäre sowohl bei Spiegeln als auch bei KMS eine zusätzliche Nahansicht der Situation am Heck des Fahrzeugs wünschenswert.

In Bezug auf die Positionen der Monitore äußerten sich einige Probanden dahingehend, dass Informationen über Bereiche auf der linken Seite auch links dargestellt werden sollten, Gleiches gilt für die rechte Seite, wobei die Information nicht unbedingt in der Nähe der A-Säule gegeben werden muss, sondern durchaus dichter ans Lenkrad heranrücken kann. Als vorteilhaft wurde gerade beim Lkw bewertet, dass dann die Kopfbewegung deutlich geringer zu sein brauchen als bei Spiegelanordnungen und man bei näher angebrachtem Monitor mehr Details erkennen würde als bei einer Anbringung an der rechten A-Säule. Lediglich eine zu tiefe Anbringung der Monitore wird nicht gewünscht. Durch den Wegfall der Spiegel wurde auch ein Mehr an direkter Sicht positiv bewertet. Für die Probanden war weiterhin wichtig, dass die Auflösung des Monitors ausreichend hoch ist und damit dem Spiegel nahe kommt und die Farbwiedergabe (insbesondere der Farbe Weiß) qualitativ gut ist. Bei Lkw wurde angemerkt, dass das Display möglichst groß sein sollte. Für Weitsichtige ist es wichtig, dass eine entsprechende Sehhilfe getragen wird, da das Bild des KMS nicht mehr wie bei Spiegeln weit entfernt sondern verhältnismäßig nah zum Fahrer auf dem Monitor dargestellt wird.

Eine Befragung der Versuchspersonen ergab eine mittlere Akzeptanz des KMS, die sich auch bei länger dauernder Nutzung des KMS nicht veränderte. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die durchschnittlichen Erwartungen der Verkehrsteilnehmer an das KMS während der Nutzung im Versuch erfüllt worden sind.

6. Literaturverzeichnis

- Bowles, T. S. (1969): Motorway overtaking with four types of exterior rear view mirror. In: *International Symposium on Man-Machine Systems, 2, Transport systems and vehicle control*. Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- Burger, W. J., Mulholland, M. U., Smith, R. L. & Sharkey, T. J. (1980): Passenger vehicle, light truck and van convex mirror optimization and evaluation studies 1Convex mirror optimization Washington, D.C.: Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- Denson, S. (2013): Kamera-Monitor-Systeme als Ersatz für Außenspiegel – Experimentelle Untersuchung von Wahrnehmungsaspekten in der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Masterarbeit. Institut für kognitive Neurowissenschaft, Abteilung für Neuropsychologie, Ruhr-Universität Bochum.
- Fisher, J. A. & Galer, I. A. R. (1984): The effects of decreasing the radius of curvature of convex external rear view mirrors upon drivers' judgements of vehicles approaching in the rearward visual field. *Ergonomics*, 27, 1209 – 1224.
- Marandi, D. (2013): Analyse und Bewertung eines Kamera-Monitor-Systems als Ersatz für Außenspiegel an Kraftfahrzeugen". Bachelorarbeit. Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Niederrhein, Viersen.
- Mortimer, R. G. (1971): The effects of convex exterior mirrors on lane-changing and passing performance of drivers. SAE Technical Paper Series. New York: Society of Automotive Engineers
- Mortimer, R. G. & Jørgensen, C. M. (1974): Drivers' vision and performance with convex exterior rearview mirrors. SAE Technical Paper. New York: Society of Automotive Engineers.
- Walraven P.L & Michon J. A. (1969): The influence of some side mirror parameters on the decisions of drivers. SAE Technical Paper. New York: Society of Automotive Engineers