

Optik-Design von Head-up Displays mit CAD-kompatiblen Freiformflächen

Peter Ott, Hochschule Heilbronn
Peter Pogany, IVM Automotive München GmbH

Mit Head-up Displays im Automobil wird erhöhte Sicherheit, Fahrkomfort, Technikbegeisterung und ein Imagegewinn verbunden. Eine kritische Komponente beim Entwurf eines Head-up Displays ist der Abbildungsspiegel, der typischerweise als optische Freiformfläche ausgelegt wird. In diesem Beitrag werden hierzu Design-Methoden und Ergebnisse vorgestellt, und es wird aufgezeigt, dass die Freiformfläche bereits im Entwurf so beschrieben werden kann, dass ein Datenexport in gängige CAD-Systeme ohne Leistungseinbußen problemlos gelingt.

Head-up Displays (**Bild 1**) waren wegen ihrer ursprünglich hohen Kosten lange der militärischen und zivilen Luftfahrt und dann dem Premiumsegment der Kraftfahrzeuge vorbehalten. Inzwischen sind aber zur Abbildung großflächige Freiformspiegel mit Kantenlängen von über 100 mm mittels Spritzguss kostengünstig herstellbar. Auch sind kleine TFT-Displays als Bildquelle erschwinglich und deren kompakte, gerichtete und regelbare Beleuchtung mit LEDs möglich geworden. Die somit niedrigeren Herstellkosten ermöglichen den Einsatz von Head-up Displays in allen Fahrzeugklassen, so dass auch mehr und mehr Zulieferer auf diesem Gebiet aktiv werden. Da die Abbildung beim Head-up Display über eine Reflexion an der Windschutzscheibe erfolgt und diese für jeden Fahrzeugtyp eine individuelle Form aufweist, ist für jeden Fahrzeugtyp eine Anpassung der Abbildungsoptik erforderlich. Dies verlangt eine effiziente Vorgehensweise beim Optik-Design, um die Entwicklungskosten zu minimieren. Bisher sind hierfür aber kaum vergleichbare Methoden wie in der klassischen Abbildungsoptik bekannt. Hinzu kommt, dass offen zugängliche Referenzdesigns fehlen.

1 Funktionsweise eines Head-up Displays

Bei einem Head-up Display (HuD) werden Fahrerinformationen wie Geschwindigkeit, Navigationshinweise oder die Ausgabe einer Infrarot-Nachtsichtkamera in einem virtuellen Bild dargestellt, das sich in Blickrichtung des Fahrers ca. zwei bis drei Meter vor ihm befindet (**Bild 2**) und sich der natürlichen Umgebung überlagert.

Dies wird dadurch erreicht, dass das vom HuD ausgehende Licht an der Windschutzscheibe unter einem Einfallswinkel von typischerweise über 65° reflektiert wird. Bei einer Polarisationsrichtung senkrecht zur Einfallsebene wird dann gemäß dem Fresnelschen Reflexionsfaktor ca. 30% des Lichts am Luft-Glas-Übergang reflektiert. Die passende Polarisationsrichtung wird durch eine entsprechende Anordnung des als Bildquelle verwendeten Flüssigkristalldisplays erreicht (alternativ dazu werden laserdiodenbasierte, scannende Systeme als Bildquelle vorangetrieben). Da auch an der Außenseite der Wind-

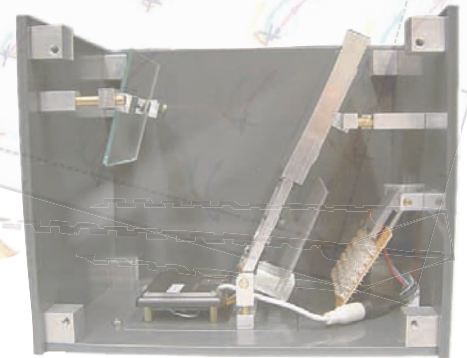


Bild 1: Head-up Displays erleichtern die visuelle Wahrnehmung von Zusatzinformationen und können daher Sicherheit und Fahrkomfort verbessern (Bild: BMW)

schutzscheibe Licht reflektiert wird, würde die Reflexion an Innen- und Außenseite einer parallelen Windschutzscheibe zu einem störenden Doppelbild führen. Durch eine Keilfolie im Verbundglas mit angepasstem Keilwinkel werden diese Doppelbilder übereinander gelegt.

Die Abbildung des HuD überlagert sich mit dem aus der gleichen Richtung kommenden Umgebungslicht. Die Helligkeit des HuD wird durch die Regelung der Lichtquelle an die Umgebungshelligkeit angepasst, wofür bereits Sensoren in vielen Fahrzeugen vorhanden sind. Übrigens entsteht auch unterhalb des Fahrzeugs ein

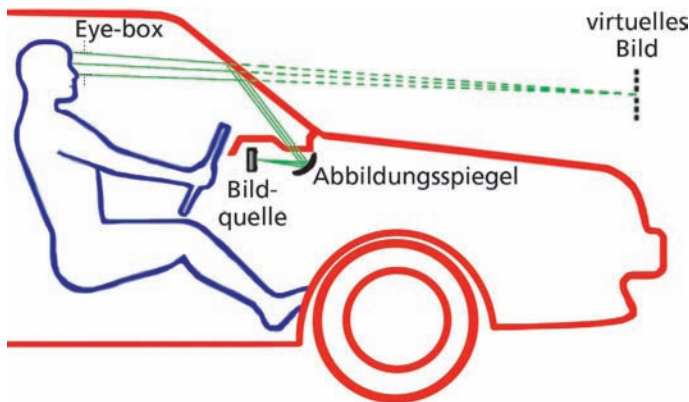


Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines Head-up Displays (HuD)

virtuelles Bild, das prinzipiell von oben, also z.B. von einer Brücke aus, in einem kleinen Winkelbereich beobachtet werden kann. Wäre die Windschutzscheibe eine plane Fläche, würde es prinzipiell genügen, die Bildquelle ohne weiteren Spiegel in entsprechender Richtung im Armaturenbrett anzuordnen. Dies hätte jedoch den Nachteil, dass ein relativ großes und damit teures Display verbaut werden müsste. Noch schwerwiegender ist der Umstand, dass die Windschutzscheibe gekrümmt ist, was zu Bildverzerrungen führt. Zudem wäre das virtuelle Bild nur gut einen Meter vom Auge entfernt. Aus diesen Gründen wird mindestens ein Abbildungsspiegel verwendet, um die Abbildungsfehler der Windschutzscheibe möglichst gut zu kompensieren, die Bildquelle zu vergrößern und das virtuelle Bild in eine angenehme Distanz von zwei bis drei Meter bei einem vollen Feldwinkel von ca. $5^\circ \times 2^\circ$ zu projizieren. Der Abbildungsspiegel ist einer klassischen Lupe äquivalent, durch die hindurch das als Bildquelle dienende Display betrachtet wird.

Sichtbar ist das virtuelle Bild von der Fahrposition aus bei heutigen Systemen nur in einem relativ kleinen, typischerweise $140 \times 70 \text{ mm}^2$ großen, senkrecht zur Fahrtrichtung liegenden Bereich, der sogenannten Eye-box. Der Abbildungsspiegel kann bei manchen Systemen verkippt werden, um diesen Bereich an die Sitzhöhe anzupassen. Nur innerhalb dieser relativ kleinen Eye-box und des obigen kleinen Feldwinkels lassen sich die Abbildungsfehler der

Windschutzscheibe mit vertretbarem Aufwand hinreichend korrigieren. Die Fehlerkompensation ist bei großen Querschnitten auch dadurch limitiert, dass die fertigungsbedingten Toleranzen der Scheibenform derzeit noch sehr groß sind.

Zudem entspricht die Größe der Eye-box auch in etwa der notwendigen Öffnung der Abbildungsoptik und ist damit eine wesentliche Einflussgröße auf den erforderlichen und immer knapp zur Verfügung stehenden Bauraum. Die im Vergleich zu anderen Abbildungssystemen relativ große Öffnung ist auch der Grund dafür, dass eine klassische Glasoptik im Fahrzeug wegen der hohen Kosten ausscheidet.

2 Mensch-Maschine-Interaktion via HuD

Aus der obigen Darstellung der Funktionsweise ergeben sich einige direkte Vorteile aus dem Einsatz eines HuD: Information wird in Blickrichtung auf das Verkehrsgeschehen eingeblendet, wodurch dieses ständig sichtbar bleibt. Die Änderung der Akkommodation (Scharfeinstellung des Auges) und der Vergenz (beidäugige Koordination) wird im Vergleich zur herkömmlichen Anzeige im Armaturenbrett deutlich verringert, auch wenn die in manchen Werbebotschaften dargestellten Zeitvorteile von über 2 sec wohl nicht realistisch sind [1]. Insbesondere die vielen Fahrer mit Altersweitsichtigkeit sprechen von einer angenehmen Darstellung durch den großen Bildabstand und verringerte visuelle Reize von außerhalb des Hauptsichtbereichs. Durch die Darstellung im HuD kann beim Fahren auch die Beanspruchung

durch Nebenaufgaben wie telefonieren oder navigieren verringert werden.

Von sportlich orientierten Fahrern wird allerdings berichtet, dass die ständige Wahrnehmung der Geschwindigkeit in Blickrichtung als lehrmeisterlich empfunden wird. Grundsätzlich besteht auch die Gefahr, dass durch die Informationsdarstellung über das HuD von der Primäraufgabe des Fahrens abgelenkt wird, da diese Form der Anzeige den Blick förmlich auf sich ziehen und zu einer Art Tunnelblick führen kann [2]. Wegen solcher Sicherheitsaspekte zögern einige Fahrzeughersteller wohl noch und ziehen andere Displays in Betracht, die die Information nicht in Blickrichtung des Fahrens projizieren, aber mit einer HuD-ähnlich großen Projektionsdistanz.

Große Chancen durch das HuD bieten sich in der Augmented Reality durch die Darstellung sogenannter kontaktanaloger Information¹ [2]. Im Kraftfahrzeug könnten dies z.B. die Darstellung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug, des Bremswegs oder Hinweise auf Verkehrsschilder und andere Verkehrsteilnehmer sein. Durch diese Art der Informationsdarstellung ließen sich die obigen Nachteile vermeiden und unter Umständen wie im Flugzeug durch den Sicherheitsgewinn die Versicherungsprämien für derart ausgerüstete Fahrzeuge verringern [2]. Aber auch hierbei gilt höchste Sorgfalt, da jede zusätzliche Information je nach Fahrsituation auch eine Ablenkung oder Überforderung darstellen kann.

3 Optik-Design

3.1 Analyse des Startsystems

Mittels differentialgeometrischer Methoden zur Beschreibung der Abbildung kleiner Strahlenbündel an Freiformflächen [3,4] kann ein Startsystem für die HuD-Optik ermittelt werden, und zwar bereits unter Berücksichtigung der Krümmungen der Windschutzscheibe. Der Abbildungsspiegel wird dabei mittels eines nicht rotationssymmetrischen Paraboloids beschrieben. Ein solches System ist in **Bild 3** dargestellt. Da

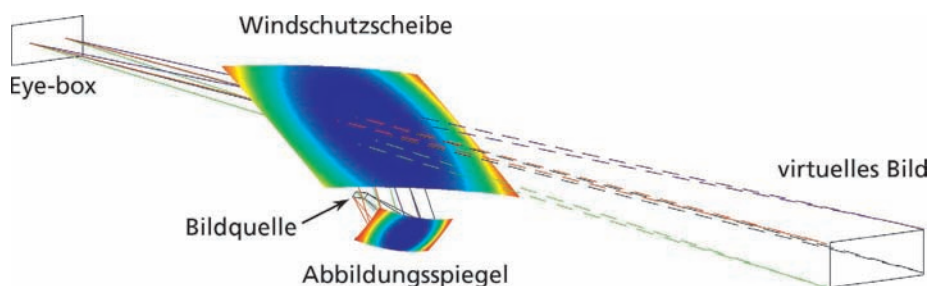


Bild 3: Strahlengang beim einspiegeligen HuD für vier Objektpunkte und zwei Augenpositionen innerhalb der Eye-box. Für jeden Objektpunkt und jede Augenposition wurde nur ein Strahl dargestellt. Die virtuellen Verläufe bis zur Bildebene sind gestrichelt gezeichnet

¹ „Kontaktanalog“ bedeutet, dass die Informationsdarstellung direkt mit der Außenwelt in Beziehung steht, wie z.B. der künstliche Horizont im Flugzeug. So kann etwa der voraussichtliche Bremsweg statt einer Zahlenangabe durch Augmented Reality im Bild der Außenwelt farblich hervorgehoben werden – dann ist die Information kontaktanalog. Auch wenn z.B. ein Pfeil als Navigationshinweis an der Stelle im wahrgenommenen Bild eingeblendet wird, an der abgebogen werden soll, handelt es sich um eine kontaktanaloge Anzeige. Die Geschwindigkeit wird dagegen im (statischen) Bild der Außenwelt nicht wahrgenommen; die Anzeige eines Tachos o.ä. ist additiv.

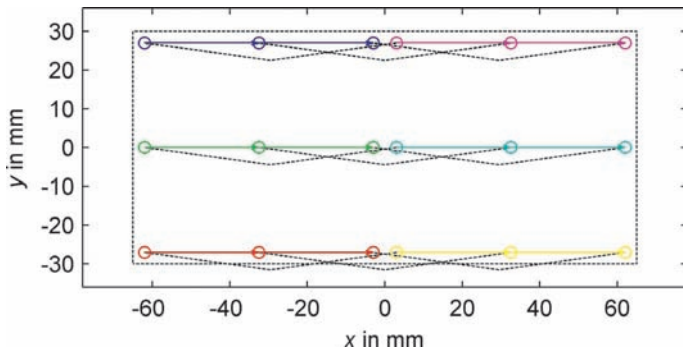


Bild 4: Analytierte Augenpositionen (Kreise) innerhalb der Eye-box (gestrichelte, rechteckige Umrandung) und deren farbliche Kodierung. Durch diese Positionen werden horizontale Kopfbewegungen von links nach rechts an drei Orten jeweils für das linke und rechte Auge und für drei Kopfhöhen betrachtet. Eine Bewegung ist durch einen Pfeil repräsentiert. Korrespondierende linke und rechte Augen sind durch schwarze, gestrichelte Linien angedeutet und werden durch entsprechende Farbenpaare unterschieden

diese Art der Vorauslegung nur kleine Strahlenbündeln nahe dem Abbildungszentrum betrachtet, wird die Verzeichnung damit allerdings noch nicht berücksichtigt. Dieses Startsystem kann mittels Strahldurchrechnung einer ersten Analyse unterzogen werden. Dafür werden im Folgenden verschiedene Austrittspupillen innerhalb der Eye-box farblich kodiert (**Bild 4**), was verschiedenen Augenpositionen entspricht. Im Vergleich zu Okularen oder Head-mounted Displays [5] variiert beim HuD die Lage der Austrittspupille also über einen wesentlich größeren Bereich. Die verschiedenen Positionen der Austrittspupille erlauben einerseits die Untersuchung der Auswirkungen einer horizontalen Kopfbewegung, insbesondere die Änderung der Verzeichnung bei einer solchen Bewegung. Dieser Effekt wird auch kurz Dynamik genannt. Des Weiteren erlaubt die Kodierung die Untersuchung der Vergenz durch Vergleich der Bildpunkte für linke und rechte Augenpositionen, die durch korrespondierende Farben gekennzeichnet sind. Daneben lässt sich für jede Augenposition die Bildschärfe betrachten.

In **Bild 5** ist das Ergebnis einer Strahldurchrechnung von neun horizontalen und fünf vertikalen Objektpunkten in die oben angegebenen Augenpositionen dargestellt. Für diese Darstellung werden die bildseitigen Strahlen in die virtuelle Bildebene verlängert und dort analysiert. Bei einer solchen Vorgehensweise ist eine 'gezielte' Strahldurchrechnung (sogenanntes ray-aiming) notwendig, da die geforderte Richtung des vom Objektpunkt ausgehenden Strahls zunächst nicht bekannt ist, sondern nur dessen geforderter Auftreffort in der Eye-box. Die Darstellung in Bild 5 macht deutlich, dass das Startsystem die Anforderungen hinsichtlich der Verzeichnung nicht erfüllt. Auch die Dynamik der Verzeichnung, die durch die Länge der Pfeile interpretiert werden kann, und die Vergenz, dem Unterschied zwischen den korrespondierenden Farbpaaren, ist offensichtlich sehr groß. Lediglich die Bildschärfe, die durch die Ausdehnung des Bildpunkts wiedergegeben ist, liegt im Bereich einiger weniger Winkelminuten und wäre damit tolerierbar.

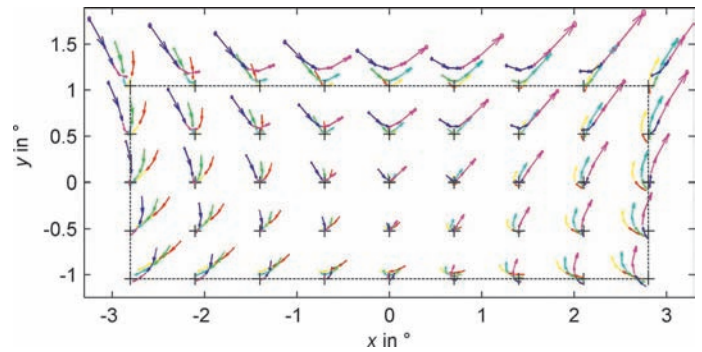


Bild 5: Darstellung des Startsystems: virtuelle Bildpunkte für die Augenpositionen gemäß Bild 3. Die Sollbildpunkte sind durch schwarze Kreuze gekennzeichnet. Die Ausdehnung eines Spotdiagramms für eine Augenposition ist durch die Größe der dargestellten Ellipse repräsentiert

3.2 CAD-kompatible Freiformflächenbeschreibung

Bevor mit der Optimierung des Abbildungsspiegels begonnen wird, stellt sich die Frage nach einer adäquaten Flächenbeschreibung. Das in Standardsoftware für Optik-Design gängige Format dafür ist die Polynomdarstellung. Die Flächendaten der Abbildungsoptik müssen nach dem Entwurf jedoch unweigerlich in die in der Automobilindustrie gängigen CAD-Systeme importiert werden. Dies ist heikel, weil dabei die Polynomdarstellung in die in CAD-Systemen übliche Flächenbeschreibung mit sogenannten NURBS (non-uniform rational B-splines) [6] konvertiert wird. Dabei kommt es häufig zu Problemen u.a. mit Genauigkeiten und Flächen-Stetigkeiten [7].

Abhilfe bietet der Ansatz, die Flächen bereits in der Optik-Software auf NURBS-Basis zu beschreiben. Der Datenaustausch mit CAD-Systemen kann dann über standardisierte Formate wie STEP oder IDGES erfolgen. Leider wird diese Art der Flächenbeschreibung von kommerziellen Programmen zum Entwurf abbildender Systeme bisher nicht angeboten, weshalb die hier dargestellten Untersuchungen mit einer auf Matlab basierenden Software durchgeführt wurden [8].

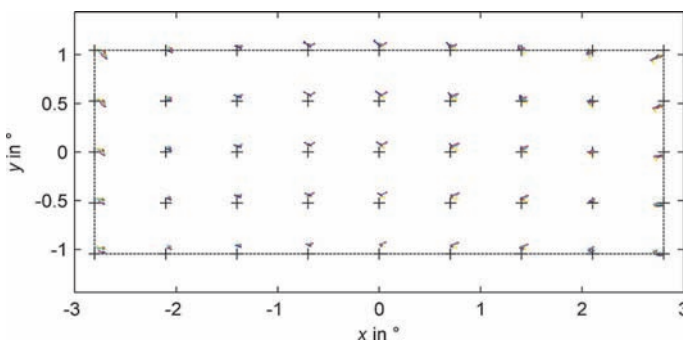


Bild 6: Virtuelle Bildpunkte nach der Optimierung. Details dazu siehe Bild 4 und im Text

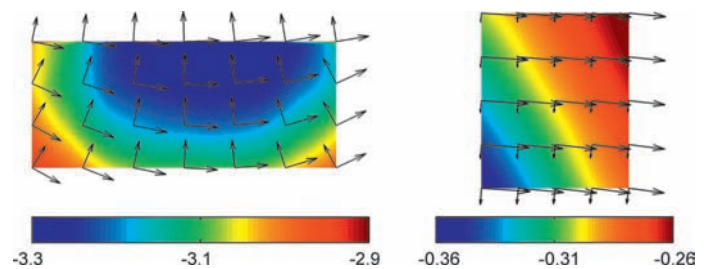


Bild 7: Links: Abbildungsspiegel ($152 \times 64 \text{ mm}^2$) mit farbkodiertem Verlauf der mittleren Krümmung in dpt sowie den Hauptkrümmungsrichtungen. Rechts: analog dargestellter, relevanter Ausschnitt aus der Windschutzscheibe ($160 \times 193 \text{ mm}^2$, im Vergleich zum Abbildungsspiegel verkleinert)

3.3 Optimierung des Optik-Designs

Das zuvor berechnete Startsystem genügte bei weitem nicht den Verzeichnungs-Anforderungen. Diese lassen sich zusammen mit einer akzeptablen Bildschärfe nicht mit einem einzigen Abbildungsspiegel zu Null reduzieren, lediglich eine Minimierung ist möglich.

Die Verzeichnung lässt sich aufteilen in Verzeichnungs-dynamik, Vergenz und absolute Verzeichnung (vgl. 3.1). Das Ergebnis einer Optimierung, bei der die Flächenparameter variiert und diese Verzeichnungsanteile zusammen mit der Bildschärfe minimiert wurden, ist in **Bild 6** dargestellt. Wie dort im Vergleich zum Startsystem aus Bild 5 zu sehen ist, hat sich das Ergebnis deutlich verbessert. Die Verzeichnung konnte bei in etwa gleich bleibender Bildschärfe erheblich verringert werden. Der verbleibende, parabelförmige Restfehler der Verzeichnung lässt sich mit nur einem Abbildungsspiegel nicht weiter reduzieren, kann aber durch eine Vorverzerrung in der Bildquelle ('image warping') ausgleichen werden.

Nach einer Optimierung ist eine Toleranzuntersuchung des entstandenen Designs notwendig, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Des Weiteren ist eine Analyse der Flächenform des Spiegels hilfreich, um z.B. starke Krümmungsänderungen aufzuspüren. Oft wird solch eine Krümmungsanalyse bereits in CAD-Systemen anhand konvertierter Flächendaten durchgeführt. Unter Umständen werden dann bei der Analyse aber Effekte sichtbar, die erst durch die Konvertierung entstanden sind, deren Herkunft aber nicht offensichtlich ist. Bereits an dieser Stelle ist also eine Flächenbeschreibung mit CAD-kompatiblen B-splines sehr empfehlenswert.

Bild 7 zeigt den Verlauf der mittleren Krümmung in Dioptrien über die Spiegelfläche. An ausgewählten Punkten der

Fläche sind die beiden Hauptkrümmungsrichtungen durch Pfeile dargestellt, deren Länge proportional zur entsprechenden Hauptkrümmung ist.

Von Interesse ist nun auch die Qualität des Abbildungsspiegel-Designs mit dieser Flächenbeschreibung. Dazu wurden die Optimierungsergebnisse bei Verwendung der gängigen Polynome und der CAD-kompatiblen B-splines verglichen. Die Konvergenz bei der Polynombeschreibung ist etwas schneller, jedoch wird mit der B-spline-Beschreibung ein leicht besseres Optimierungsergebnis erreicht. Insgesamt kann gesagt werden, dass letztere hier keine schlechteren Ergebnisse liefert, aber eindeutig Handhabungsvorteile aufweist.

4 Demonstrator

Neben Optik-Designs für HUDs im Automobilbereich wurde auch ein Design für einen Demonstrator mit einer vereinfachten, planen Windschutzscheibe entwickelt. Der Abbildungsspiegel wurde auf einer Präzisionsfräsmaschine mittels Diamantbearbeitung einer geeigneten Aluminiumlegierung hergestellt. Dafür wurden die Flächendaten des Optik-Designs direkt in NC-Befehle gewandelt. Der Strahlengang im Demonstrator wurde mittels eines Planspiegels gefaltet. Für die Hinterleuchtung der Bildquelle wurde eine einfache Lösung mit einer LED-Matrix gewählt. Der in **Bild 8** dargestellte Demonstrator dient zu Anschauungszwecken und wurde zur Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion in einen Fahrsimulator [9] integriert.

Literaturhinweise:

- [1] W.B. Kloke, W. Jaschinski, G. Rinkenauer, *Beid-äugige Blickbewegungen an Head-up-Displays*, 53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, pp 383-387, 2007
- [2] H. Bupp, G. Reichart, *Braucht man HUD's im Kraftfahrzeug? Ergebnisse einer Literaturrecherche und eigener Versuche*, VDI-Berichte 948, Seite 101-125, 1992

- [3] V. Greco, G. Giusfredi, *Reflection and refraction of narrow Gaussian beams with general astigmatism at tilted optical surfaces: a derivation oriented toward lens design*, Applied Optics, vol 46, no 4, pp. 513-521 2007
- [4] P. Ott, *Imaging with tilted surfaces: an efficient matrix method for the generalized Scheimpflug condition and its application to rotationally symmetric triangulation*, J. Opt. Soc. Am. A, vol 22, no 6, pp. 1077-1085, 2005
- [5] B. Achtner, F.O. Karutz, M. Pollmann, M. SeeBeberg, *Videobrille für das Kino unterwegs*, Photonik 1/2008, S. 40-43
- [6] L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS Book*, 2. ed., Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [7] *Protokoll und Anwenderberichte zum Thema Freiformflächen*, 4. gemeinsames Treffen der Fachgruppe Optik-Design von bayern photonics und der Arbeitsgemeinschaft Optik-Design und Simulation von Photonics BW am 19. Oktober 2006 in Ulm
- [8] P. Ott, *Ray-tracing und Optik-Design für Lehre und Laboranwendungen mit einer MATLAB Toolbox*, 102. DGaO Jahrestagung, 2001
- [8] M. Kocsis, A. Meroth, *Integrated Test and Simulation Environment for Graphical User Interfaces*, electronic displays, Nürnberg, February 2008

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Peter Ott
Hochschule Heilbronn
Institut für Mechatronik
Labor Technische Optik
Max-Planck-Str. 39
D-74081 Heilbronn
Tel. 07131/504-325 (-343)
Fax 07131/504-143252
eMail: ott@hs-heilbronn.de
iaf.hs-heilbronn.de/wiki/LaborTechnischeOptik



Dr. Peter Pogany
Teamleiter Fahrerassistenzsysteme
IVM Automotive München GmbH
Lauchstädter Str. 1
D-80939 München
Tel. 089/2444708-11
Fax 089/2444708-30
eMail: peter.pogany@ivm-automotive.com
www.ivm-automotive.com



www.photonik.de ▶ Webcode 2009



Bild 8: HUD-Demonstrator mit diamantgefrästem Abbildungsspiegel sowie Integration des Demonstrators in einen Fahrsimulator