

## ■ Volle Info voraus!

**Head-up-Displays projizieren fahrrelevante Informationen auf die Windschutzscheibe. Kostengünstig werden sie dank Opto-Elektronik und optischen Freiformflächen.**

Jeder Kampffjet und jedes Passagierflugzeug haben eines, inzwischen auch die ersten Autos: Head-up-Displays. Sie machen Informationen im Blickfeld des Fahrers sichtbar und helfen so, sich strikter an Geschwindigkeitsbeschränkungen zu halten oder souveräner zu navigieren. Neben der Fahrgeschwindigkeit lassen sich Geschwindigkeitsbegrenzungen anzeigen, der Abstand zum vorausfahrenden Auto oder der eigene Bremsweg. Diese Informationen tauchen direkt im Sichtfeld des Fahrers auf, ohne dass er den Blick von der Straße abwenden muss.

Head-up-Displays bestehen aus einem bildgebenden Modul, einer Optik und einer Projektionsfläche, dem Combiner. Beim Auto ist das die Windschutzscheibe, also eine gewölbte Fläche mit variierendem Krümmungsradius. Das bildgebende Modul enthält Hochleistungsleuchtdioden, die ein Flüssigkristall-Display von hinten durchstrahlen. Auf dem Display werden wie bei einem Dia die zu projizierenden Informationen dargestellt. Bei der Optik handelt es sich um ein System aus ein bis zwei Spiegeln, die abbildende Eigenschaften haben und den Strahlengang falten, um die gesamte Baugruppe möglichst kompakt zu halten (Abb. 1).



Dank Head-up-Displays haben Autofahrer Informationen wie die momentane

Geschwindigkeit oder Tempolimits direkt im Blick.

Das Head-up-Display steckt hinter dem Armaturenbrett. Sein Licht fällt unter einem Winkel von mehr als 65 Grad auf die Windschutzscheibe und wird von dort zu den Augen des Fahrers reflektiert. Für ihn entsteht dadurch ein virtuelles Bild hinter der Windschutzscheibe in einer Entfernung von zwei bis drei Metern (Abb. 2). Um die angezeigten Informationen zu sehen, müssen die Augen des Fahrers also kaum neu akkomodieren, während dies beim Blickwechsel zwischen der Straße und dem Armaturen-

brett aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen nötig ist.

Das von einem Flüssigkristalldisplay kommende Licht ist polarisiert. Bei einer Polarisationsrichtung senkrecht zur Einfallsebene reflektiert der Luft-Glas-Übergang der Windschutzscheibe gemäß den Fresnelschen Formeln rund 30 Prozent des Lichts. Nur dieser Anteil steht für das virtuelle Bild zur Verfügung, die restlichen 70 Prozent gehen durch Brechung an der Windschutzscheibe verloren. Jedes Head-up-Display erzeugt folglich ein zweites virtuelles Bild unterhalb des Fahrzeugs. Von einer Brücke aus kann man es in einem sehr kleinen Winkelbereich beobachten.

Zurück auf den Fahrersitz: Damit Reflexionen an der Außenseite der Windschutzscheibe keine störenden Doppelbilder erzeugen, steckt im Verbundglas an der relevanten Stelle der Scheibe eine dünne Folie mit einem geringen Keilwinkel von weniger als einem Grad. Sie bringt die beiden Doppelbilder wieder zur Deckung.

Der Fahrer sieht das virtuelle Bild des Head-up-Displays mit seinen beiden Augen nur in einem relativ kleinen Bereich von etwa  $14 \times 7$  Zentimeter. Dieser Bereich



Abb. 1 Platz ist ein entscheidender Faktor bei einem Head-up-Display, da der Raum hinter dem Armaturenbrett begrenzt ist. Die beiden Spiegel, die das Licht des Displays an die Windschutzscheibe werfen, besitzen Freiformflächen und falten den Strahlengang der gesamten Optik.

heißt Eyebox. In manchen Fahrzeugen ist das Head-up-Display durch kippbare Spiegel individuell an die Sitzhöhe anzupassen. Der Strahlkegel des virtuellen Bildes, den der Fahrer von einer festen Position aus erfasst, beträgt  $6 \times 3$  Grad. Nur für so kleine Eyeboxes und Winkelbereiche lassen sich die Abbildungsfehler des Head-up-Displays mit vertretbarem Aufwand hinreichend minimieren.

### Frei geformt

Mitentscheidend für die Massentauglichkeit von Head-up-Displays ist die Herstellung der bildgebenden Spiegel: Da das optische System nicht rotations-symmetrisch ist, müssen die Spiegel auf komplizierte Weise frei geformt sein. Diese Spiegel im Spritzgussverfahren aus Kunststoffen mit ausreichender Präzision herzustellen, ist erst seit relativ kurzer Zeit möglich. Da jeder Fahrzeugtyp eine andere Windschutzscheibe hat, ist jeweils ein unterschiedlich geformter Spiegel nötig.

Beide Spiegel haben eine Freiformfläche mit einer schwachen konkaven bzw. konvexen Krümmung mit einem Radius von 300 Millimetern. Ihre lineare Ausdehnung wird durch die gewünschte Größe der Eyebox bestimmt, damit der Lichtabfall zum Rand in einem akzeptablen Rahmen bleibt.

Der dominierende Abbildungsfehler der Optik ist die geometrische Verzerrung des Bildes (Verzeichnung), weil der Abbildungsmaßstab über das Bildfeld variiert. Einerseits liegt das an der ungleichmäßigen Krümmung der Windschutzscheibe im Nutzbereich, andererseits an der Vorgabe, mit Blick auf die Kosten möglichst wenige optische Flächen im System zu haben. Mit ein bis zwei optischen Flächen lässt sich die Verzeichnung nicht vollständig korrigieren, daher wird das im Flüssigkristall-Display erzeugte Bild vorab entgegengesetzt verzerrt. Neben der Verzeichnung treten weitere Fehler auf, zum Beispiel eine Verkippung der Bildebene.

Weitere Randbedingungen für die Optik des Head-up-Displays ergeben sich aus dem beidäugigen Sehen: Das optische System hat zwei Austrittspupillen, eben die Augen des Fahrers, die zudem beweglich sind. Schließlich muss sich das virtuelle Bild gut von der Umgebung abheben, ohne dass es zu hell erscheint und dadurch stört. Die Sensorik, um wechselnde Lichtverhältnisse zu erfassen, ist in heutigen Fahrzeugen meist vorhanden. Spezifiziert ist das virtuelle Bild eines automobilen Head-up-Displays für eine Leuchtdichte von 10 000 bis über 15 000 Candela pro Quadratmeter – diese Leuchtdichte

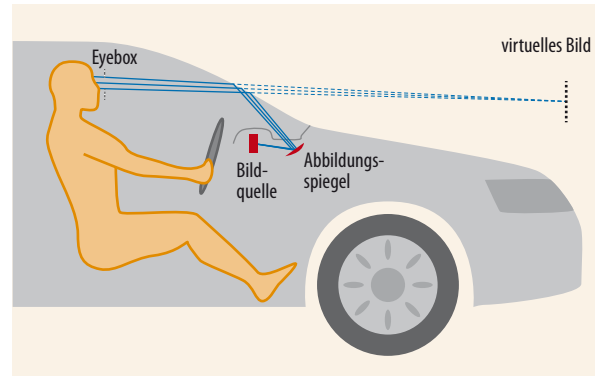


Abb. 2 Ein Head-up-Display erzeugt ein virtuelles Bild in zwei bis drei Meter Entfernung vom Fahrer. Das Licht der Bildquelle wird von einem Spiegel an die Windschutzscheibe geworfen und dort zum Teil reflektiert. Nur in einem kleinen Bereich kann der Fahrer das komplette virtuelle Bild sehen.

liegt rund 20- bis 50-mal höher als bei den Displays teurer Smartphones. Die virtuellen Bilder sind also ausreichend kontrastreich. Bei Sonnenschein müssen allerdings Blenden streifenden Lichteinfall unterbinden.

Bislang sind Head-up-Displays nur in der Oberklasse zu finden. Aber da auch andere Fahrzeugklassen mit immer mehr Assistenzfunktionen ausgestattet werden, dürfte sich das bald ändern. Zudem sind die Preise für die erforderliche Opto-Elektronik und für die Herstellung optischer Freiformflächen so weit gesunken, dass Head-up-Displays bereits für rund 1000 Euro zu haben sind.<sup>\*)</sup>

Michael Vogel

\*) Ich danke Peter Ott von der Hochschule Heilbronn für wesentliche Informationen und hilfreiche Erläuterungen.

## Höhere Mathematik leicht gemacht

 WILEY-VCH



RAINER WÜST

### Mathematik für Physiker und Mathematiker

3. Auflage

**Band 1:**  
Reelle Analysis und Lineare Algebra

ISBN: 978-3-527-40877-1  
2009 600 S. Broschur € 49,90

**Band 2: Analysis im Mehrdimensionalen  
und Einführungen in Spezialgebiete**

ISBN: 978-3-527-40878-8  
2009 672 S. Broschur € 54,90

Eine Zusammenstellung aller relevanten Themen aus der Höheren Mathematik. Von der Analysis, der Linearen Algebra bis hin zur Funktionentheorie und Differential-

rechnung in der Physik. Das Buch vermittelt präzise das für Physiker und Mathematiker erforderliche Grundwissen.

Besuchen Sie uns unter  
[www.wiley-vch.de](http://www.wiley-vch.de)

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61 • D-69451 Weinheim  
Tel. +49 (0) 62 01-60 64 00 • Fax +49 (0) 62 01-60 61 84 • E-mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de)  
Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: November 2012