

## 2 Head-up-Display-Technologie

Basis für die Entwicklung eines kontaktanalogen Head-up-Displays stellt die Technologie der herkömmlichen Head-up-Displays dar. Technische Grundlagen, der Aufbau aktueller Systeme und umgesetzte Anzeigekonzepte beschreiben im Folgenden die Ausgangslage für die Entwicklung eines kontaktanalogen Systems. Eine Probandenstudie zur Optimierung von Anzeigekonzepten in Head-up-Displays liefert Aussagen über die Notwendigkeit einer kontaktanalogen Anzeige.

### 2.1 Technische Grundlagen eines Head-up-Displays

Die wesentlichen Bauteile eines Head-up-Displays sind das Spiegelsystem, die Bilderzeugungseinheit und die Windschutzscheibe (bzw. der Combiner). Für diese Komponenten werden im Folgenden technische Grundlagen und Anforderungen aufgezeigt. Als Einstieg hierfür soll die Erläuterung des physikalischen Prinzips eines Head-up-Displays dienen. Die Notwendigkeit einer Betrachtung von optischen Abbildungsfehlern im Head-up-Display und die Angabe von Grenzwerten hierfür werden im letzten Teilkapitel beschrieben.

#### 2.1.1 Physikalisches Prinzip

Grundlegende Idee des Head-up-Displays ist die Überlagerung von Information mit der realen Umgebung. Die Information wird in Form eines virtuellen Bildes dargestellt. Die Charakteristik eines solchen virtuellen Bildes ist am Beispiel des Spiegelbildes in Abbildung 1 zu sehen. Vom realen Gegenstand gehen Lichtstrahlen aus, welche an der Spiegeloberfläche reflektiert werden. Lichtstrahlen, die die Spiegeloberfläche im Punkt A treffen, fallen im Beispiel von Abbildung 1 laut Reflexionsgesetz ( $\alpha = \beta$ ) genau ins Auge. Da der Mensch allerdings einen geraden Verlauf der Lichtstrahlen annimmt, erscheint ihm der Gegenstand an der Stelle, an der in Abbildung 1 das virtuelle Bild positioniert ist. Er empfindet also die reflektierten Lichtstrahlen, die vom Gegenstand ausgehen als unreflektierte Lichtstrahlen, die vom virtuellen Bild ausgesandt werden. Somit lässt sich ein virtuelles Bild als Darstellung eines realen Gegenstandes an einem Ort definieren, an dem sich der Gegenstand physikalisch nicht befindet. Verwendet man anstatt des Spiegels eine nur teilverspiegelte Fläche, so kann sowohl das virtuelle Bild, als auch die reale Umgebung jenseits der teilverspiegelten Fläche vom Betrachter erkannt werden. Hiermit ist bereits ein System beschrieben, das mit einfachen Mitteln die

Grundvoraussetzung eines Head-up-Displays erfüllt: die Möglichkeit, der Realität transparente Information zu überlagern.

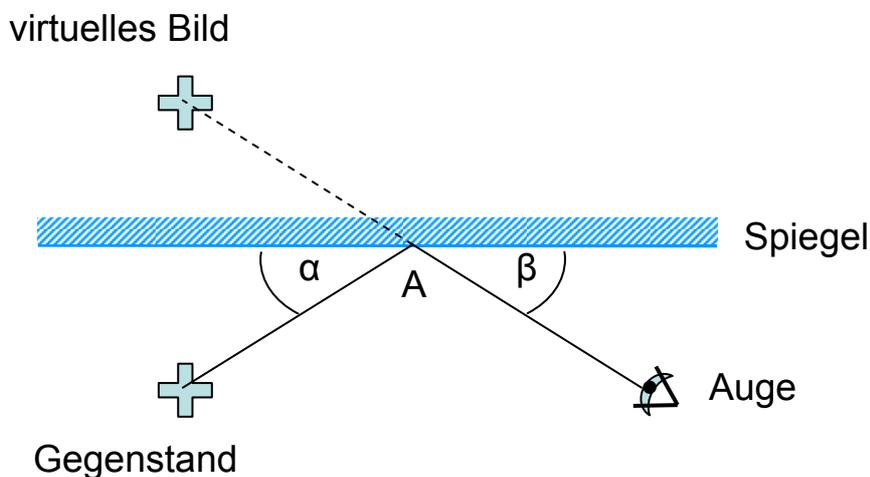


Abbildung 1: Prinzip des virtuellen Bildes

Auf der Strecke zwischen dem Gegenstand und dem Reflexionspunkt A können optische Elemente eingebracht werden, die den Strahlenverlauf des Lichtes ändern, ohne dass die Sicht des Betrachters auf die reale Umgebung des virtuellen Bildes beeinträchtigt wird. Diese Veränderung des Strahlenverlaufs kann entweder über Reflexion mittels verspiegelter Elemente oder über Brechung mittels Prismen und Linsen geschehen. Der Einsatz von ebenen Spiegeln dient einer Faltung des Strahlenganges und bietet Möglichkeiten zu einer flexibleren Positionierung des abzubildenden Gegenstandes. Der Einsatz von Linsen bietet weitere Möglichkeiten bei der Auslegung des virtuellen Bildes. Konvexe Linsen können als bild- und distanzvergrößernde Elemente eingesetzt werden. Physikalischer Hintergrund hierfür ist am Beispiel in Abbildung 2 zu sehen. Gegenstände, die zwischen Linsenoberfläche und deren Brennpunkt liegen, erscheinen beim Blick durch die Linse in Form eines virtuellen Bildes auf der entgegengesetzten Seite des Betrachters (also auf der gleichen Seite des Gegenstandes). Das virtuelle Bild ist vergrößert und wird in einer größeren Entfernung wahrgenommen als der Gegenstand, was die Funktionsweise einer Lupe erklärt. Mit Hilfe der Gesetze geometrischer Optik kann die Größe und die Distanz des virtuellen Bildes wie folgt berechnet werden, wobei  $b$  die Bildweite,  $B$  die Bildgröße,  $g$  die Gegenstandsweite,  $G$  die Gegenstandsgröße und  $f$  die Brennweite der Linse repräsentieren:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} - \frac{1}{g} \tag{1}$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \tag{2}$$

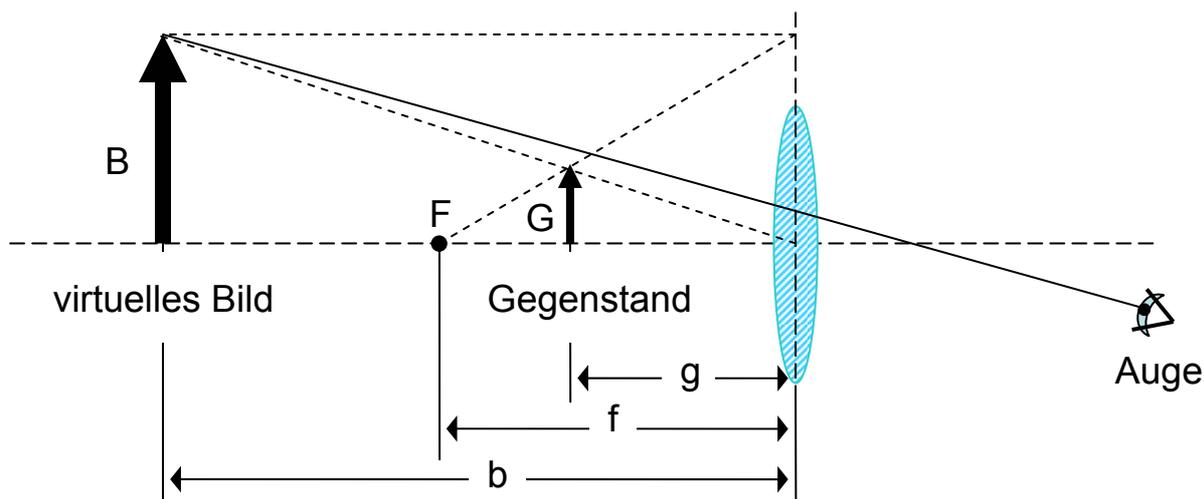


Abbildung 2: Prinzip der Lupe

Die Effekte einer Bildvergrößerung und der Realisierung einer größeren Bildabstand können auch durch den Einsatz von Hohlspiegeln erreicht werden. Der Unterschied zum Einsatz einer Linse ist, dass sich der Gegenstand auf der Seite des Brennpunktes des Hohlspiegels befindet und das virtuelle Bild auf der anderen Seite des Hohlspiegels. In Abbildung 3 ist das Prinzip der Bildvergrößerung mit einem Hohlspiegel dargestellt.

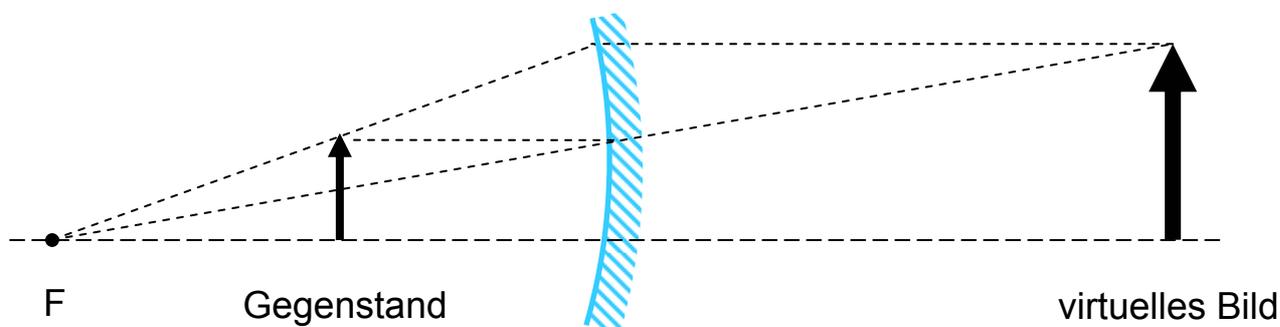


Abbildung 3: Prinzip des Hohlspiegels

Zur Erzeugung virtueller Bilder können also plane Spiegel, Hohlspiegel und Linsen eingesetzt werden. Im Folgenden ist zu klären, welche Anforderungen von diesen optischen Elementen erfüllt werden müssen, damit das Prinzip eines virtuellen Bildes für Head-up-Displays in Fahrzeugen angewendet werden kann.

## 2.1.2 Optisches System

Über das optische System werden wesentliche Parameter eines Head-up-Displays beeinflusst. Plane Spiegel ermöglichen mit ihren ablenkenden Eigenschaften eine Faltung des optischen Strahlenganges und somit – was gerade für Head-up-Displays in Fahrzeugen wichtig ist – mehr Freiheiten bei der Bauraumgestaltung. Linsen beeinflussen auf Grund ihrer abbildenden Eigenschaften die virtuelle Distanz und die Größe des virtuellen Bildes. Asphärische Hohlspiegel vereinen die Eigenschaften von Spiegel und Linse, haben also sowohl ablenkende als auch abbildende Eigenschaften und sind daher für den Einsatz im Head-up-Display sehr gut geeignet. Das gesamte optische System eines Head-up-Displays lenkt die von der Bilderzeugungseinheit (Bildquelle) erzeugten Lichtstrahlen über bzw. durch die einzelnen optischen Elemente bis zum Deckglas des Head-up-Displays. Dort treten die Lichtstrahlen aus dem Head-up-Display heraus und treffen – für die Anwendung im Fahrzeug – die Windschutzscheibe in einem Bereich von welchem aus der reflektierte Lichtstrahl ins Auge des Fahrers fällt. Die Größe der optischen Elemente und der Austrittsöffnung definiert über das größtmögliche Lichtstrahlbündel die Größe der Eyebow, also des Bereiches in der y-z-Ebene, in dem sich die Augen des Fahrers befinden müssen, damit das virtuelle Bild wahrgenommen werden kann. Die Entfernung des virtuellen Bildes vom Auge setzt sich aus der virtuellen Bilddistanz, die sich auf Grund der letzten Linse bzw. des letzten asphärischen Hohlspiegels im Head-up-Display ergibt, der Entfernung dieses optischen Elements von der Windschutzscheibe und der Entfernung der Windschutzscheibe vom Auge des Betrachters zusammen. Der Fahrer nimmt die entstandene Darstellung nicht als Spiegelung in der Windschutzscheibe wahr, sondern empfindet auf Grund der überwiegend transmissiven Eigenschaft der Windschutzscheibe die erzeugte Darstellung der Umgebung vor dem Fahrzeug überlagert. Somit kann das virtuelle Bild eines Head-up-Displays als eine Darstellung beschrieben werden, die an einer vom eigentlichen Ort der Bildentstehung sich unterscheidenden Position wahrgenommen wird. Der eigentliche Ort der Bildentstehung ist die Displayoberfläche im Head-up-Display, wahrgenommen wird die Darstellung allerdings der Umgebung überlagert vor dem Fahrzeug. Abbildung 4 zeigt die Funktionsweise und beispielhaft Bauteile eines Head-up-Displays. Durch eine

bewegliche Lagerung des letzten Spiegels im Strahlengang kann der Reflexionsbereich auf der Windschutzscheibe und somit die Lage der Eyebox variiert werden. Dies kann jedoch nur für herkömmliche Head-up-Displays umgesetzt werden; für das später beschriebene kontaktanaloge System ist eine solche Verstellereinrichtung auf Grund der geforderten Ortskorrektheit des virtuellen Bildes nicht möglich. Eine Kompensation der gekrümmten Geometrie der Windschutzscheibe geschieht durch gezielte Gestaltung der Oberflächen der optischen Elemente im Head-up-Display. Diese Thematik wird in Kapitel 2.1.5 (Optische Abbildungsfehler) genauer behandelt.

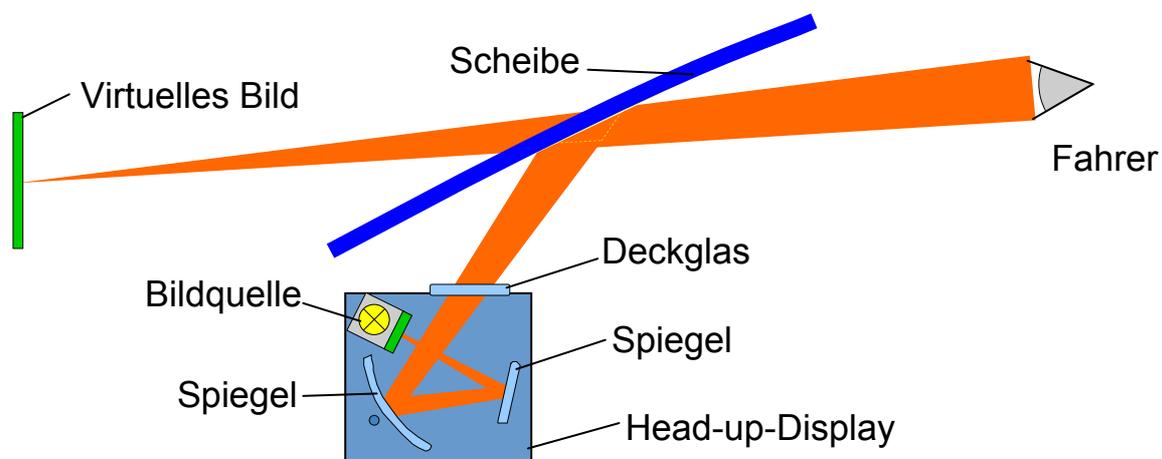


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines Head-up-Displays

### 2.1.3 Bilderzeugungseinheit

Die vom Beobachter als virtuelles Bild empfundene Darstellung befindet sich physikalisch gesehen am Anfang des Strahlenganges im Head-up-Display. Die hier verbaute Bilderzeugungseinheit muss bestimmte Anforderungen erfüllen, die eine optimale optische Performance im virtuellen Bild sicherstellen. Im Wesentlichen betreffen diese Vorgaben die Leuchtdichte und den Kontrast; des Weiteren sind allgemeine Anforderungen, die für einen Einsatz in Kraftfahrzeugen gelten, einzuhalten.

#### Leuchtdichte

Um die Ablesbarkeit des virtuellen Bildes auch bei intensiver Sonneneinstrahlung sicherzustellen, hat sich für Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen als Forderung für die Leuchtdichte ein Wert von  $5.000\text{cd/m}^2$  nach Reflexion in der Windschutzscheibe

(d.h. empfunden im virtuellen Bild) durchgesetzt. Der Reflexionsgrad der Windschutzscheibe beträgt für polarisiertes Licht ca. 25%, für unpolarisiertes Licht ca. 13%. Für den Reflexionsgrad der optischen Elemente kann ein Wert von ca. 80% angenommen werden. Somit ergibt sich für die geforderte Leuchtdichte des Displays für polarisiertes Licht ein Wert von  $25.000\text{cd/m}^2$ , für unpolarisiertes Licht ein Wert von ca.  $48.000\text{cd/m}^2$ . Abbildung 5 zeigt diese Leuchtdichteverluste im optischen Strahlengang eines Head-up-Displays.

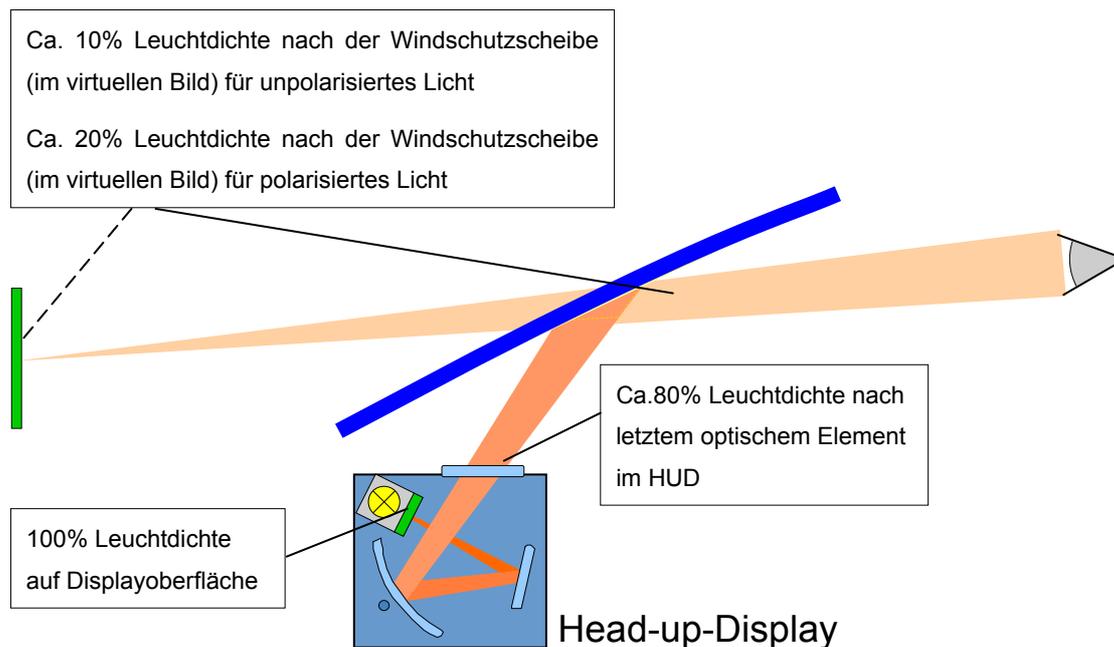


Abbildung 5: Leuchtdichteverluste im optischen Strahlengang eines Head-up-Displays

## Kontrast

Für eine optimale Ablesecharakteristik muss der Helligkeitskontrast im virtuellen Bild für eine Nachtsituation mindestens 50:1 sein; für Tageslichtbedingungen erfüllt ein Kontrastwert von mindestens 10:1 die Anforderungen für eine gute Ablesbarkeit. Für den Kontrast der Bildquelle im Head-up-Display ist ein Erfahrungswert von 500:1 gefordert, der ein Erreichen der geforderten Kontrastwerte für das virtuelle Bild ermöglicht. Diese hohe Anforderung an die Bilderzeugungseinheit hinsichtlich des Kontrasts beruht im Wesentlichen auf dem transparenten Charakter des virtuellen Bildes. Im Optimalfall ist im virtuellen Bild des Head-up-Displays nur die momentan aktuelle Anzeige sichtbar; die restliche Anzeigefläche des virtuellen Bildes ist nicht zu sehen. Ein schlechtes Kontrastverhältnis im virtuellen Bild zeigt Abbildung 6. Hier ist außer den darzustellenden Symbolen zusätzlich der maximale Anzeigebereich des

virtuellen Bildes als orange Fläche sichtbar. Dies ist zwar im gezeigten Beispiel hinsichtlich der damit verbundenen verschlechterten Ablesbarkeit noch nicht als kritisch zu betrachten, jedoch ist die Fläche der Umgebungsüberlagerung deutlich größer. Das virtuelle Bild erscheint somit dominanter und wird unter Umständen als störend empfunden.



Abbildung 6: Problematik eines niedrigen Kontrasts im virtuellen Bild

### Allgemeine Anforderungen an die Bilderzeugungseinheit

Für einen Serieneinsatz von Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen sind weitere grundlegende Voraussetzungen an die Bildquelle gegeben. So dürfen beispielsweise Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+85^{\circ}\text{C}$  die Funktionsfähigkeit der Anzeige nicht beeinflussen. Des Weiteren muss die Möglichkeit einer Dimmung der Anzeige auf zumindest 1% der maximalen Helligkeit bestehen. Dies ist besonders bei der Head-up-Display-Technologie von enormer Bedeutung, da eine nicht an die Umgebungsbeleuchtung angepasste Helligkeit der Anzeige – beispielsweise bei Nachtfahrten – zu Blendung im primären Sichtbereich führt und somit ein Sicherheitsrisiko darstellt.

### Bewertung verschiedener Displaytechnologien

Betrachtet man die Eigenschaften der verfügbaren Displaytechnologien, wird deutlich, dass die Erfüllung der Leuchtdichteanforderung die größte Einschränkung bei der Auswahl der Bildquelle darstellt. Nicht geeignet für einen Einsatz im Head-up-Display sind aus diesem Grund Plasma-Display-Panels (PDP), Feld-Emissions-Displays (FED) und Organic-Light-Emitting-Diode-Displays (OLED) mit welchen lediglich Leuchtdichten in der Größenordnung von  $1.000\text{cd}/\text{m}^2$  erreichbar sind. Mit Vakuum-Fluoreszenz-Displays (VFD) können Leuchtdichten von bis zu  $50.000\text{cd}/\text{m}^2$  erreicht werden. Auch die Anforderungen hinsichtlich Kontrast und Temperaturbeständigkeit können mit VFDs erfüllt werden. Der segmentierte

Charakter der Anzeigen in einem VFD und die begrenzten Möglichkeiten bei Farbdarstellungen lassen eine VFD-Anzeige jedoch als altmodisch erscheinen. Somit kann die VFD-Technologie zwar als technische Möglichkeit zur Umsetzung in einem Head-up-Display genannt werden, wird jedoch im Vergleich zu den folgenden Displaytechnologien an Relevanz verlieren. Zielführende technische Lösungen für Bildquellen in Head-up-Displays stellen nur folgende zwei Displaytechnologien dar: die Laser-Display-Technologie (LDT) und Thin-Film-Transistor-Displays (TFT).

Bei der Laser-Display-Technologie wird ein Bild generiert, indem drei Laserstrahlen in den Grundfarben Rot, Grün und Blau mittels eines Spiegelsystems überlagert und über Ablenkeinheiten auf eine Oberfläche projiziert werden. Die Bilddaten werden in digitaler Form in einem Bildspeicher zwischengespeichert. Die Farbtransformationseinheit realisiert die notwendige Farbanpassung für die drei Grundfarben. Die Laser-Modulationseinheit überträgt die Bildinformation in optischer Form auf die einzelnen Laserstrahlen. Spiegel bzw. Strahlteiler bündeln die drei einzelnen Strahlen zu einem einzigen kollinearen (quasiparallelen) Strahl. Der Aufbau des Bildes geschieht ähnlich dem Prinzip der Kathodenstrahlröhre: der Strahl schreibt zeilenweise das Bild auf die Projektionsfläche, wobei ein Polygondrehspiegel zur horizontalen und ein Galvanometerkippspiegel zur vertikalen Ablenkung dienen (siehe auch [27]). Das Funktionsprinzip eines Laser-Displays ist in Abbildung 7 zu sehen.

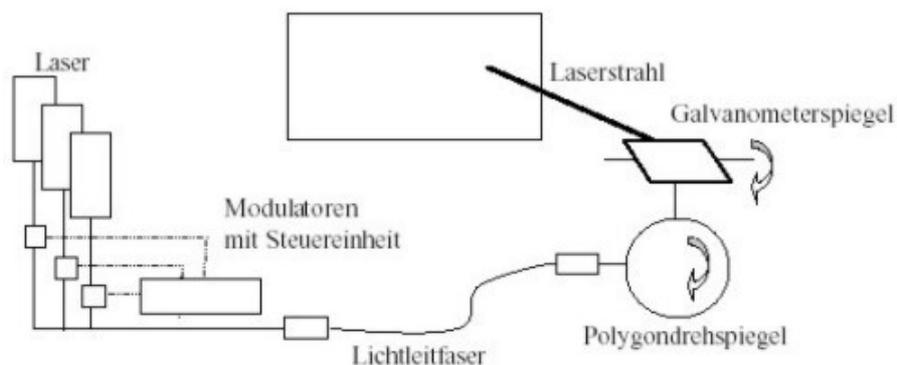


Abbildung 7: Funktionsprinzip der Laser-Projektion (aus [31])

Ein großer Vorteil der Laserprojektion ist die Kollinearität des ausgesendeten Lichtes. Dies begründet, dass die Schärfe des projizierten Bildes nicht von dem Abstand des Projektors zu der Projektionsfläche abhängig ist, wodurch sich eine Fokussierung auf die Projektionsfläche erübrigt. Der maximal erreichbare Kontrast liegt nach [27] bei 2000:1. Die Leistung eines Lasers für diese Anwendung liegt im Bereich weniger Milliwatt. Für die Anwendung im Automotive-Bereich existieren bereits Laser in den

Farben Rot, Grün und Blau, die durch enorm kompakte Bauweise den Anforderungen, die sich aus den Packageproblemen im Bereich der Instrumententafel ergeben, gerecht werden. Auch die erforderliche Leuchtdichte und die Temperaturstabilität kann mit der Laser-Display-Technologie erreicht werden.

Thin-Film-Transistor-Displays hingegen liegt ein gänzlich anderes Funktionsprinzip zu Grunde. Bei dieser Technologie bedient man sich der speziellen Eigenschaften von transparenten Flüssigkristallen (Liquid Crystal), deren Moleküle eine Verdrehung aufweisen, welche die Polarisierung durchstrahlenden Lichtes ändert. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes richten sich die Kristalle entsprechend aus, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Diese Eigenschaften der Kristalle werden bei LC-Displays genutzt, um den Lichtdurchlass zu regeln. Das Licht wird beispielsweise bei transmissiven LC-Displays von Lichtquellen (Backlight) auf der Rückseite des Displays erzeugt und durch Polarisationsfilter ausgerichtet. Solange kein elektrisches Feld angelegt wird, erfolgt eine Änderung der Polarisation entlang der gedrehten Moleküle. Anschließend trifft dieses Licht auf einen zweiten Polarisationsfilter, der im rechten Winkel zu dem ersten angeordnet ist. Aufgrund der Drehung durch die Flüssigkeitskristalle kann das Licht diesen passieren. Auf diese Weise wird die Helligkeit geregelt, um die notwendige Anzahl von Graustufen für ein hochwertiges Display zu erhalten. Der Bildschirm ist in Bildelemente (Pixel) unterteilt, aus denen das Gesamtbild zusammengesetzt wird; für die Umsetzung eines Farbdisplays werden pro Bildpunkt drei Pixel verwendet, deren Farbe (Rot, Grün oder Blau) per Farbfilter erzeugt wird. Weitere Informationen sind [27] und [32] zu entnehmen.

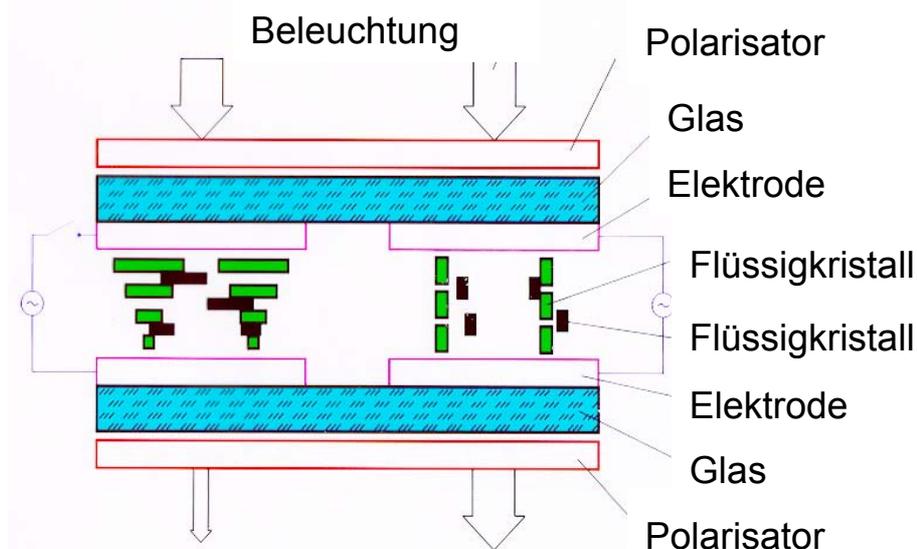


Abbildung 8: Beispielhafter Aufbau von Flüssigkristalldisplays