

Anforderungen an die Ausleuchtung von Lichtmodulatoren

Marcel Philipp Held*, Peer-Phillip Ley*, Alexander Wolf*, Roland Lachmayer*

*Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Leibniz Universität Hannover
<mailto:held@ipeg.uni-hannover.de>

Hochaufgelöste Beleuchtungssysteme erfordern für einen effizienten und lichtstarken Betrieb eine möglichst exakte Ausleuchtung der lichtmodulierenden Fläche. In diesem Paper werden relevante Technologien gegenübergestellt und hinsichtlich eines Einsatzes in der Fahrzeuglichttechnik evaluiert.

1 Motivation

Hochauflösende Pixellichtsysteme ermöglichen eine deutlich präzisere und dynamischere Formung des Lichts als herkömmliche Beleuchtungssysteme. Dadurch können z.B. in der Fahrzeuglichttechnik Projektionen in den Verkehrsraum [1] oder in der Biomedizintechnik Projektionen auf Organe [2] ermöglicht werden. In diesen Anwendungsbereichen ist neben einer hohen Auflösung und hohen Kontrasten eine bestimmte Menge an Licht erforderlich, um die Projektionen auch bei starker Umgebungsbeleuchtung erkennen zu können. Grundsätzlich wird die maximal modulierbare Menge an Licht durch das Funktionsprinzip der jeweiligen Technologie, dem Beleuchtungswinkel, der Polarisation des Lichts und der Effizienz des Lichtmodulators (Reflexions- / Transmissionsgrad) limitiert.

Nachfolgend werden die relevanten Technologien anhand der Funktionsprinzipien gegenübergestellt. Dabei werden die Grenzen jeder Technologie hinsichtlich der effektiv übertragbaren Lichtmenge pro Fläche aufgezeigt. Grundsätzlich kann zwischen additiver und subtraktiver Lichtmodulation unterschieden werden.

2 Additive Lichtmodulation

Bei der additiven Lichtmodulation wird Licht nur dort erzeugt und projiziert, wo es auch benötigt wird. Dadurch wird ein Bild durch eine Aneinanderreihung einzelner Pixel erzeugt, wobei jedes Pixel eine eigene Lichtquelle respektive LED darstellt. Die LEDs werden dabei in sehr geringen Abständen zueinander in einem Array angeordnet, um eine möglichst kleine aktive Arrayfläche zu bilden. Als Beispiel ist hier der Eviyos Chip zu nennen, welche 1024 einzelne LEDs auf einer Fläche von 4x4 mm besitzt [3]. Aufgrund der geringen Arrayfläche ist ein sehr scharf abbildendes optisches System für kontrastreiche Lichtszenarien notwendig. Dabei ist der große Beleuchtungswinkel der Lambertschen Abstrahlcharakteristik jeder einzelnen LED herausfordernd.

3 Subtraktive Lichtmodulation

Im Gegensatz zur additiven Modulation werden bei der subtraktiven Lichtmodulation Bilder durch Absorption von Licht erzeugt. Da bei diesem Prinzip ständig der gesamte Modulator (DMD, LCD bzw. LCoS) ausgeleuchtet wird, resultiert dies im Teillastbetrieb in oftmals sehr geringen Wirkungsgraden. Nachfolgend sind drei subtraktive Technologien mit einer Auflösung von über 100.000 Pixeln beschrieben.

3.1 Digital Micromirror Devices (DMDs)

Digital Micromirror Devices bestehen aus einem Array von kleinen Mikrosiegeln mit beispielsweise 17 μm Diagonale [4]. Diese Spiegel besitzen zwei Modi, die sich durch den Kippwinkel unterscheiden. Sind Spiegel im Off-State, so wird das Licht auf einen Absorber gelenkt und lokal dunkle Pixel erzeugt. Befinden sich Spiegel im On-State, so wird das Licht in das optische System eingekoppelt und helle Pixel in der Gesamtlichtverteilung erzeugt. Typischerweise liegen diese Kippwinkel zum Lot der optischen Achse bei -12° und $+12^\circ$. Der Reflexionsgrad des gesamten Moduls liegt bei 66% [4]. Die Polarisationsrichtung des Lichts ist für das Funktionsprinzip des DMDs von geringerem Interesse.

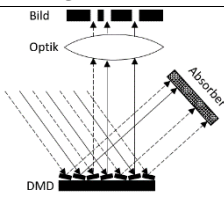
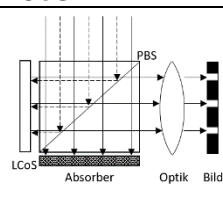
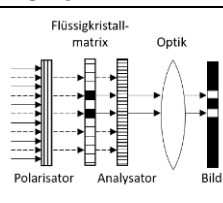
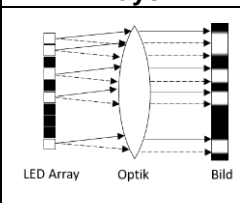
3.2 Liquid Crystal Displays (LCDs)

Liquid Crystal Displays sind hauptsächlich durch den Einsatz bei Mobiltelefonen oder Fernsehgeräten bekannt. Durch eine Flüssigkristallmatrix kann die Polarisationsrichtung des Lichts verändert werden und sowohl eine Amplituden- als auch Phasenmodulation stattfinden, indem das Licht durch zusätzliche Polarisatoren absorbiert wird. Für das Funktionsprinzip ist somit eine Polarisation des Lichts zwingend notwendig. Werden die typischerweise sehr geringen Füllfaktoren der einzelnen Flüssigkristallzellen von ca. 50% berücksichtigt, so liegt der Transmissionsgrad solcher Systeme für unpolarisiertes Licht bei ca. 25% [5].

3.3 Liquid Crystal on Silicon (LCoS)

Die Liquid Crystal on Silicon Technologie ähnelt stark den LCDs. Für die Amplituden- und Phasen-

Tab. 1: Gegenüberstellung der Lichtmodulatoren

Anforderungen	DMDs	LCoS	LCDs	LED-Arrays
Funktionsprinzip				
Polarisiertes Licht	Nicht erforderlich	Erforderlich	Erforderlich	Nicht erforderlich
Beleuchtungswinkel	-12° und +12°	≤12°	≤10°	≤60°
Modulationsart	Graustufen	Phase & Amplitude	Phase & Amplitude	Graustufen
Parameter				
Auflösung in px	>100.000	>1.000.000	>1.000.000	1024
Effizienz für unpol. Weißes Licht	66%	33%	25%	75% @ 60°
Fläche in mm ²	14,22 x 10,67	15,36 x 8,64	16,32 x 9,18	4 x 4
Étendue in mm ² sr	18,82	18,08	14,19	37,70
Max. Lichtstrom / Fläche in lm/mm ²	34,8	19,0	10,1	144

modulation erfolgt ebenfalls der Einsatz einer Flüssigkristallmatrix. Zusätzlich ist ein polarisierender Beamsplitter notwendig, der nur eine Polarisationsrichtung auf den LCoS lenkt. Das einfallende Licht wird an der Rückseite der Flüssigkristallmatrix durch eine Spiegelschicht reflektiert. Ein angeschaltetes Pixel dreht die Polarisationsrichtung so, dass Licht in das optische System eingekoppelt wird, während ein ausgeschaltetes Pixel Licht zurück zur Lichtquelle reflektiert. Typische Wirkungsgrade liegen hier für unpolarisiertes Licht und Beleuchtungswinkel um die ±12° bei 33% [6].

4 Gegenüberstellung der Technologien

In Tab. 1 sind die Anforderungen an die Beleuchtung der Lichtmodulatoren aus den vorherigen Abschnitten, sowie typische Systemparameter wie die Auflösung und die Effizienz für unpolarisiertes Licht aufgelistet. Zusätzlich wird der maximal mögliche Lichtstrom pro Fläche über das Verhältnis der Étendue G des Lichtmodulators zur Lichtquelle G_{LQ} für einen Beleuchtungswinkel von ±60° ermittelt:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{G}{G_{LQ} \cdot A} \cdot \Phi_{LQ} \cdot \eta.$$

Für DMD, LCoS und LCD wird ein zusätzliches Array unpolarisierter Weißlichtquellen mit je 1000 lm bei 1 mm² aktiver Fläche zur Ausleuchtung der Modulatoren vorausgesetzt. Ausgehend davon zeigt die Gegenüberstellung, dass die DMD-Technologie von den subtraktiven Lichtmodulatoren den größten Lichtstrom pro Fläche verarbeiten kann. Im Vergleich dazu kann die LCD- und LCoS-Technologie lediglich 29% respektive 55% des Lichtstroms pro Fläche verarbeiten.

Das additive Wirkprinzip des LED-Arrays befähigt diese Technologie dazu, mehr als den vierfachen

Lichtstrom pro Fläche generieren zu können. Sie steht jedoch, aufgrund der geringen Pixeldichte den subtraktiven Technologien hinsichtlich der Auflösung erheblich nach.

5 Zusammenfassung

Aus der Gegenüberstellung lässt sich schlussfolgern, dass für die Umsetzung hochauflösender und lichtstarker Pixellichtsysteme unter Verwendung einer unpolarisierten Weißlichtquelle vorzugsweise die DMD-Technologie einzusetzen ist.

6 Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Ministerium für Wissenschaft und Kultur im Rahmen des Promotionsprogramms *Tailored Light* unterstützt.

Literatur

- [1] G. Kloppenburg, „Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung,“ (2017). ISBN: 978-3-95900-168-7.
- [2] S. Illango, M. Knöchelmann, L. A. Kahrs, A. Wolf, T. Ortmaier und R. Lachmayer, „User evaluation study on illumination requirements to design an augmented reality projector for open liver surgery,“ in *Proceedings of SPIE 10693* (2018). DOI: 10.1117/12.2309667.
- [3] H. Oppermann, M. Brink, O. Ehrmann, T. Passow, H. Schmidt und T. Liebetrau, „BMBF-Verbundprojekt: Integrierte µ-strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme,“ (2016). Abschlussbericht.
- [4] Texas Instruments, „Hi-Speed V-Module,“ (2018). Datenblatt
- [5] Epson, „L3C07U-86G11,“ (2018). Datenblatt
- [6] Holoeye Photonics AG, „HED6001 Monochrome LCoS microdisplay,“ (2018). Datenblatt.