

2 Systemaufbau eines Flächenlichtmodulators

2.1 Anwendungen für Flächenlichtmodulatoren

Flächenlichtmodulatoren finden mittlerweile in vielen verschiedenen Bereichen Anwendung. Zu den größten und wichtigsten Gebieten zählen die Displaytechnologie, die Belichtungstechnik sowie adaptive Optiken.

2.1.1 Displaytechnologie

Das Anwendungsgebiet mit dem größten Anteil ist mit Abstand die Displaytechnologie. Ziel ist hier die Darstellung von optischer Information. Allgemein kann zwischen direkt betrachteten Displays wie Flachbildschirmen und Projektionsdisplays unterschieden werden.

Der Markt der Direktdisplays wird von den Flüssigkristallmodulatoren dominiert bzw. von Kathodenstrahlröhren, die manchmal auch zu den Flächenlichtmodulatoren gezählt werden. Bei speziellen Anwendungen, insbesondere bei großen Bildformaten kommen zunehmend weitere Technologie wie Plasmadisplays oder Feldemitterstrukturen zum Einsatz [6].

Im Bereich der Projektionsdisplays werden zur Zeit neben Flüssigkristallmodulatoren auch zunehmend mikromechanische Flächenlichtmodulatoren eingesetzt [16, 17]

Der Displaymarkt ist geprägt durch die Verwendung von Standardbauelementen, die in hohen Stückzahlen gefertigt werden. Die ersten am IMS entwickelten Flächenlichtmodulatoren dienten der Projektion von TV-Bildern im HDTV-Format und gehören daher in den Anwendungsbereich der Displaytechnik [9].

2.1.2 Belichtungssysteme

Ein technisch sehr anspruchsvolles Anwendungsgebiet ist die Mikrolithographie. In diesem Bereich dienen Lichtmodulatoren meist zur Belichtung von Masken für die Halbleiterfertigung oder direkt für die maskenlose Lithographie von Wafern oder Leiterplatten. In Abbildung 2.1 ist der prinzipielle Aufbau eines solchen Belichtungssystems unter Verwendung eines mikromechanischen Flächenlichtmodulators dargestellt.

Neben der Lithographie gibt es noch eine Reihe weiterer Anwendungen für Flächenlichtmodulatoren, die sich teilweise allerdings noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden. Als Beispiel sei hier der Einsatz in der Belichtungseinheit eines Laser- oder LED-Druckers oder auch für die Beleuchtung eines optischen Scanners genannt.

Ein noch sehr neues Anwendungsgebiet besteht in der Automatisierung von lichtinduzierten chemischen Prozessen. Gerade in der Biotechnologie wird in naher Zukunft ein weiteres Anwendungsgebiet für Lichtmodulatoren entstehen [7].

Im Gegensatz zur Displaytechnologie werden in den hier vorgestellten Belichtungssystemen anwendungsspezifische Modulatoren eingesetzt.

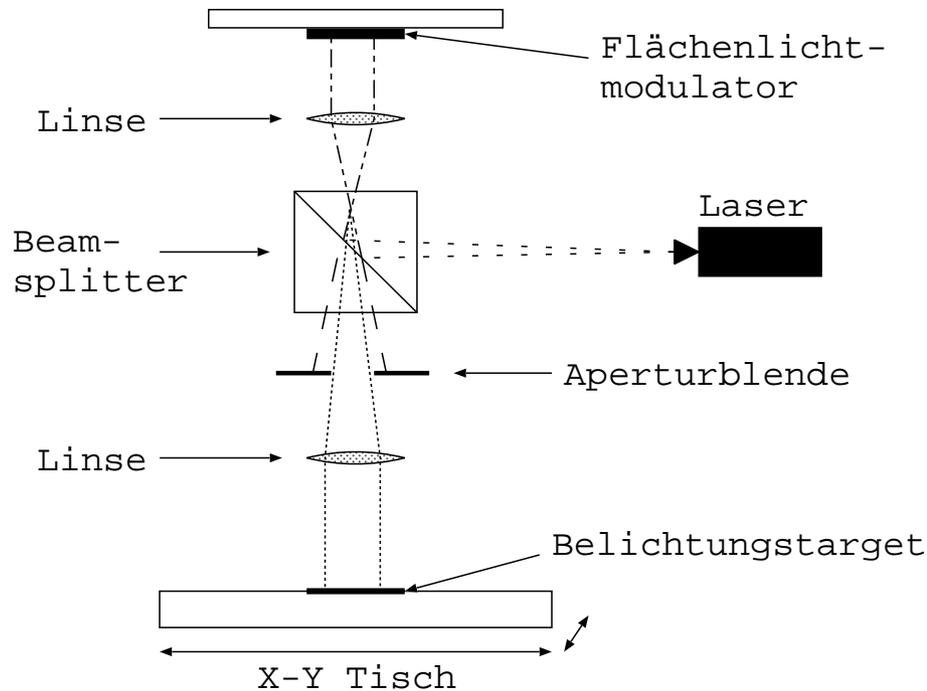


Abbildung 2.1: Systemaufbau eines ASIC-Direktbelichters

2.1.3 Adaptive Optiken

Das dritte große Anwendungsgebiet von Flächenlichtmodulatoren ist der Einsatz in adaptiven Optiken. Adaptive oder auch aktive Optiken bieten im Gegensatz zu passiven Lösungen die Möglichkeit das Brechungs- und Fokussierungsverhalten eines optischen Systems in weiten Bereichen zu variieren und damit auf Störungen und andere äußere Einflüsse zu reagieren. Adaptive Optiken mit Flächenlichtmodulatoren werden beispielsweise in der Medizintechnik, der Astronomie und in militärischen Anwendungen eingesetzt. Meist handelt es sich dabei um anwendungsspezifische Lösungen, die sich durch einen hohen Entwicklungsaufwand auszeichnen.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Schaltungskonzepten sind mikromechanische Flächenlichtmodulatoren realisierbar, die eine kostengünstigere Entwicklung adaptiver Optiken ermöglicht. Dadurch eröffnen sich weitere Anwendungsgebiete für solche Systeme wie beispielsweise die optische Kommunikationstechnik.

In Abbildung 2.2 ist der Aufbau eines optischen Systems gezeigt, das beispielsweise eine Wellenfrontdetektion und -korrektur für einen Lasertomographen durchführt.

Im Fraunhofer IMS laufen zur Zeit mehrere Projekte zur Entwicklung von mikromechanischen Flächenlichtmodulatoren für Belichtungssysteme für Masken zur Halbleiterfertigung [13] und für die Direktbelichtung von Wafern und Leiterplatten. Im Rahmen eines weiteren Projektes wird ein Flächenlichtmodulator für einen Lasertomographen entwickelt, der in der Augendiagnostik eingesetzt wird.

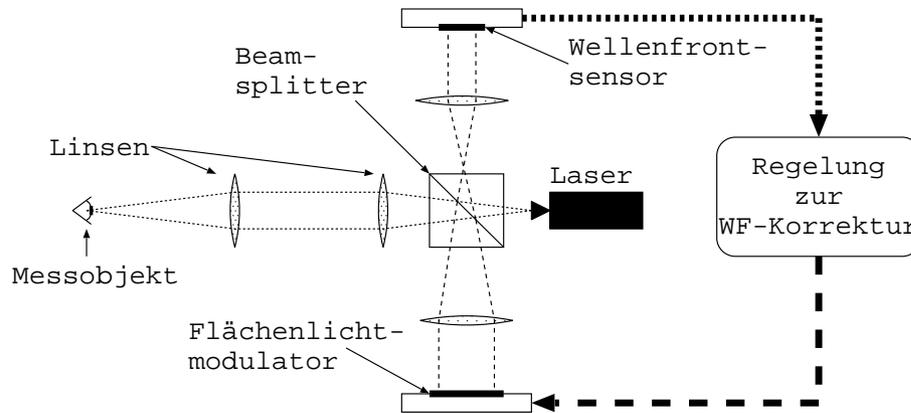


Abbildung 2.2: Beispiel einer adaptiven Optik zur Wellenfrontkorrektur

2.2 Anforderungen an die Ansteuerung des Lichtmodulators

Neben den elektrischen Anforderungen an die Ansteuerschaltung gibt es auch eine Reihe von mechanischen. Hierzu zählt vor allem eine Vorgabe der Pixelgeometrien und die Oberflächenplanarität.

Für die VCL-Spiegeltechnologie ist zum Beispiel nur eine quadratische Pixelgröße im Bereich von $16 \times 16 \mu\text{m}^2$ bis $24 \times 24 \mu\text{m}^2$ zulässig. Mit notwendigen Steuerspannungen von bis zu 40 V ist diese Technologie am anspruchsvollsten (siehe Kapitel 5.5.1). Bei den verschiedenen Geometrien der CBM-Technologie (siehe Kapitel 5.5.2) sind auch größere Pixelgeometrien möglich. Ein Vorteil, der die MLM-Technologie auszeichnet, ist eine etwas geringere Ansteuerspannung, was den Aufwand für die elektrischen Spannungstreiber minimiert (siehe Kapitel 5.5.3).

Um den Lichtmodulator in der hochauflösenden Mikrolithographie einzusetzen, ist eine hohe Auflösung bei gleichzeitig hoher Bildrate erforderlich. Hierin besteht auch zugleich einer der Hauptvorteile des Einsatzes von Flächenlichtmodulatoren gegenüber anderen schreibenden Belichtungsverfahren, wie dem Elektronenstrahlschreiben.

Beim Verwenden eines Elektronenstrahlschreibers wird jeweils die gesamte zu strukturierende Fläche mit einem Elektronenstrahl geschrieben, dessen Fokus der minimalen Strukturauflösung entspricht. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die sehr hohe Auflösung, die sich durch die sehr feine Fokussierung eines Elektronenstrahls erreichen lässt [41]. Allerdings ist das Schreiben kompletter Wafer extrem Zeitaufwendig und daher für eine Massenfertigung, wie sie bei integrierten Schaltkreisen und Leiterplatten üblich ist, nicht akzeptabel. Moderne Elektronenstrahlschreiber verfügen zwar über die Möglichkeit beim Schreiben von Strukturen, die größer als die Minimalabmessungen sind, den Fokus des Schreibstrahls aufzuweiten, jedoch werden dadurch insbesondere in der Fertigung integrierter Schaltkreise die Durchlaufzeiten herkömmlicher Maskenbelichter bei Weitem nicht erreicht [38, 40].

Flächenlichtmodulatoren vereinen die Flexibilität der maskenlosen Lithographie mit der hohen Schreibgeschwindigkeit einer flächenhaften Belichtung.

Die Auflösung bei Mikrolithographie durch Flächenlichtmodulatoren ist durch die physikalische Auflösung des Modulators und durch die Maßstabsverkleinerung der abbildenden Optik gegeben. Für die verwendeten optischen Wellenlängen sind zur Zeit Verkleinerungsmaßstäbe im Bereich von 1 : 100 realisierbar. Daraus ergibt sich ein physikalisches Pixelraster von höchstens $20\mu m$, um die Auflösung erzielen zu können, die heute durch die Mikrostrukturierung mit Masken erreicht wird.

In dieser Arbeit wird erstmals eine Graustufenmodulation zur Erhöhung der lithographischen Auflösung verwendet. Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die in der Mikrolithographie verwendeten UV-empfindlichen Fotolacke bei einer definierten optischen Bestrahlung ihre chemischen Eigenschaften ändern. Man spricht hier von einer definierten Schaltintensität. Mit Hilfe der Graustufenmodulation kann der Verlauf der Bestrahlungsstärke einer Strukturkante wesentlich feiner eingestellt werden, als durch das vollständige Ein- und Ausschalten einzelner Bildelemente. Abbildung 2.3 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Grauwertansteuerung und Kantenverschiebung.

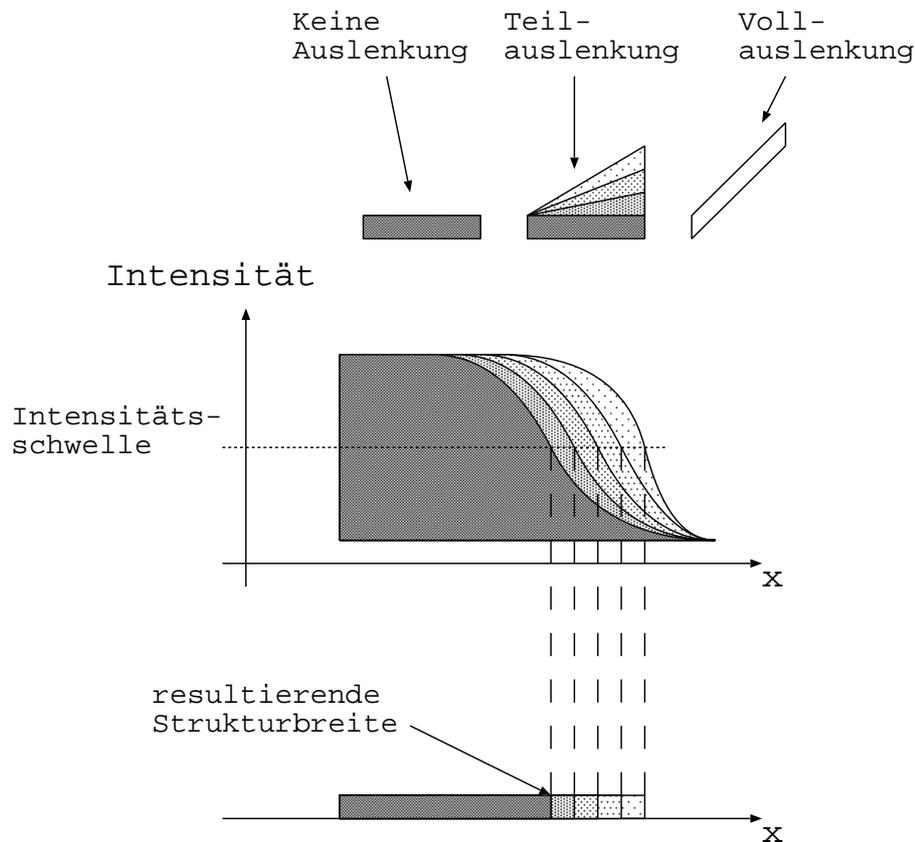


Abbildung 2.3: Kantenverschiebung durch Graustufenabbildung

Für eine hohe Schreibrate sind die optisch aktive Fläche des Modulators sowie die Bildrate des Flächenlichtmodulators zu optimieren.

Ein weiteres Einsatzfeld von Flächenlichtmodulatoren sind adaptive Optiken [34]. Hier dienen Lichtmodulatoren der Wellenfrontkorrektur, die durch eine reine Phasenmodulation des einfallenden Lichts durchgeführt werden kann. Adaptive Optiken mit Wellenfrontkorrekturen werden in vielen Bereichen eingesetzt: Die Anwendungen reichen von der Medizintechnik über die Astronomie bis hin zu militärischen Anwendungen.

In diesen Anwendungsgebieten werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Phasenmodulation und damit an die Oberflächenplanarität gestellt. Die Phasenauflösung solcher Systeme beträgt in der Regel weniger als ein Zehntel der genutzten Wellenlängen. Die Bildraten und die örtliche Auflösung solcher adaptiver Optiken sind im allgemeinen geringer als bei der Mikrolithographie, jedoch wird eine feinstufige bzw. stufenlose Modulation des Lichts pro Pixel häufig verlangt.

2.3 Ansteuerung mikromechanischer Aktoren

Eine allgemeine und sehr anschauliche Definition eines Aktors liefert [43]. Ein Aktor ist eine spezielle Form eines Transducers, bei der durch ein elektrisches Signal eine nicht-elektrische Reaktion ausgelöst wird. In diesem Fall handelt es sich um eine mechanische Reaktion, das heißt, die hier betrachteten Aktoren wandeln elektrische Signale in mechanische um. Für die Ansteuerung mikromechanischer Aktoren gibt es vier Wirkprinzipien, die auf einer elektrischen Anregung beruhen:

1. Elektro-thermisches Wirkprinzip
2. Elektro-magnetisches Wirkprinzip
3. Piezo-elektrisches Wirkprinzip
4. Elektro-statisches Wirkprinzip

Im folgenden werden die verschiedenen Wirkprinzipien näher erläutert und hinsichtlich ihrer Eignung für einen mikromechanischen Flächenlichtmodulator bewertet. Die Integrierbarkeit einer entsprechenden Aktortechnologie zusammen mit einer elektrischen Ansteuerschaltung ist ein wichtiger Faktor bei der Wahl des Wirkprinzips.

Bei der elektro-thermischen Wirkweise wird der Aktor elektrisch als Widerstand betrieben, in dem elektrische Energie in thermische übertragen wird. Diese thermische Energie wird durch eine geeignete Materialwahl des Aktors in eine mechanische Verformung gewandelt. Um die übliche laterale, thermische Ausdehnung des Aktors in eine komplexe mechanische Bewegung zu überführen, kommen verschiedene Materialien innerhalb des Aktors zum Einsatz, die unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Diese Methode der Aktorausführung entspricht den Bimetallen, die viele verschiedene Anwendungsgebiete erobern konnten.

Die Vorteile dieses Wirkprinzips liegen in dem einfachen Aufbau des Aktors und in der weitgehend verschleißfreien Arbeitsweise. Ein Nachteil ist jedoch die thermische Erwärmung des Aktors, die auf die elektrische Ansteuerung und das optische Verhalten zurückwirkt. Die Realisierung einer hochintegrierten Aktormatrix ist aufgrund der thermischen Kopplung einzelner Aktorelemente nur sehr schwer zu realisieren.

Bei einer elektromagnetischen Aktortechnologie wird mit Hilfe eines elektrischen Stromflusses ein magnetisches Kraftfeld erzeugt. In diesem Magnetfeld befindet sich der eigentliche Aktor, der entweder ferromagnetische Eigenschaften oder ebenfalls ein elektrisch erzeugtes Magnetfeld besitzt.

Diese Aktortechnologie besitzt einen sehr hohen Wirkungsgrad, da sich schon mit geringen elektrischen Leistungen ausreichend hohe Magnetfelder erzeugen lassen. Jedoch besitzt die elektromagnetische Aktortechnik wie die elektrothermische den Nachteil, dass sich benachbarte Aktoren insbesondere bei hoher Integrationsdichte gegenseitig beeinflussen. Dies schränkt die Verwendbarkeit für eine mikromechanische Technik stark ein. Hinzu kommt, dass eine Integration von ferromagnetischen Materialien in eine Technologie für integrierte Schaltkreise sehr aufwändig ist, da die in Frage kommenden Materialien meist nicht kompatibel zu den aktuellen Siliziumtechnologien sind.

Der piezoelektrische Effekt beschreibt die Verschiebung der Kristallstruktur durch ein elektrisches Feld. Zu den Materialien, in denen dieser Effekt ausgeprägt ist, gehört zum Beispiel die Bleititanat-Bleizirkonat Legierung oder auch Quarzglas aus Siliziumdioxid. Daher ist eine monolithische Integration von Aktoren dieses Wirkprinzips in eine herkömmliche Siliziumtechnologie möglich. Da es sich bei dem piezoelektrischen Effekt im Gegensatz zu den anderen hier beschriebenen Wirkprinzipien um einen mikroskopischen Effekt handelt, stellt das Übersprechen eines solchen Aktors auf seine Umgebung kein Problem dar. Diese Aktorart ist daher besonders gut geeignet, in einem Mikrosystem integriert zu werden und daher prinzipiell für die Verwendung in einem Flächenlichtmodulator geeignet.

Einen Nachteil stellen jedoch die verhältnismäßig kleinen Deformationen dar, die erreicht werden können bzw. die notwendigen hohen elektrischen Spannungen, die zur Ansteuerung notwendig sind.

Besonders die hohen elektrischen Spannungen begrenzen die Integrationsfähigkeit piezoelektrischer Aktoren, da die elektrische Isolation und die Durchbruchssicherheit der einzelnen Elemente einer Aktormatrix gewährleistet sein müssen. Zwar ist durch geeignete Materialwahl eine Verbesserung der elektrisch-mechanischen Empfindlichkeit möglich, jedoch ist der technologische Aufwand bei der Integration solcher Materialien in eine Technologie zur integrierten Ansteuerung wiederum sehr hoch.

Bei dem elektrostatischen Wirkprinzip tritt ebenfalls ein elektrostatisches Kraftfeld auf. Im Gegensatz zum piezoelektrischen handelt es sich dabei nicht um einen mikroskopischen Effekt, so dass man bei der Materialwahl weitgehend kompatibel zu herkömmlichen IC-Technologien bleiben kann und so eine Integration von Ansteuer-schaltung und mikromechanischem Aktor einfach zu realisieren ist. Da beim elektrostatischen Kraftfeld zwischen zwei Feldelektroden nur eine anziehende Kraftwirkung

wirken kann, ist zusätzlich eine entgegenwirkende mechanische (Rückstell-) Kraft notwendig.

Die notwendigen Ansteuerspannungen dieses Wirkprinzips liegen unterhalb derer der piezoelektrischen Aktoren, sind allerdings immer noch sehr hoch für eine Standard IC-Technologie. Aus diesem Grund wird zur Ansteuerung eine spezielle Hochvolt-CMOS-Technologie eingesetzt (siehe Kapitel 5.3).

Durch geeignete Wahl der Geometrien sowohl des elektrischen Feldes, das heißt der Ansteuerelektroden, als auch des Aktors lassen sich die elektrostatische Kräfte und die mechanischen Rückstellkräfte in einem weiten Bereich variieren. Aus diesem Grund werden in der Mikromechanik elektrostatische Aktoren besonders häufig realisiert.

Die Ansteuerung solcher Aktoren ist durch Bereitstellung einer elektrischen Spannung auf der Ansteuerelektrode schaltungstechnisch einfach. Da Ströme nur bei einer Änderung der Ansteuerspannung auftreten, ist dieses Wirkprinzip im Gegensatz zum elektrothermischen und elektromagnetischen nahezu leistungsarm. Das Aktorelement wirkt elektrisch wie eine Kapazität.

Elektrostatische Felder können im Gegensatz zu magnetischen Feldern durch entsprechende Elektrodengeometrien sehr gut abgeschirmt werden, so dass auch eine Integration eines elektrostatischen Aktorarrays, wie es für einen Flächenlichtmodulator notwendig ist, realisiert werden kann.

Von allen beschriebenen elektrisch-mechanischen Aktorprinzipien ist daher das elektrostatische am besten geeignet für einen mikromechanischen Flächenlichtmodulator mit integrierter Ansteuerschaltung.

2.4 Vergleich von Matrixansteuerkonzepten für mikromechanische Aktorarrays

Das in Kapitel 2.3 ausgewählte elektrostatische Steuerkonzept basiert auf elektrischen Feldern. Die Ansteuerung der in Kapitel 5.5 aufgeführten Spiegeltechnologien erfolgt daher immer durch elektrische Spannungen. Ströme sind während der statischen Ansteuerung vernachlässigbar. Das elektrische Ersatzschaltbild besteht im Wesentlichen aus einer Kapazität (siehe Kapitel 2.3).

Aus diesem Grund kann dasselbe Schaltungskonzept für alle drei in dieser Arbeit beschriebenen Spiegelaktoren verwendet werden.

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Ansteuerkonzeptes ist die optische Betriebsart. Hierbei wird zwischen der kontinuierlichen Beleuchtung (häufig auch als “continuous-wave mode” oder “cw-mode” bezeichnet) und der nicht-kontinuierlichen Beleuchtung (“flash mode”) unterschieden.

Bei der kontinuierlichen Beleuchtung ist der Lichtmodulator die ganze Zeit, d.h. ohne Unterbrechung, aktiv. Anwendungen, die unter diese Betriebsart fallen, sind hauptsächlich Projektionsdisplays und adaptive Optiken. Meistens dienen kontinuierliche optische Systeme dazu, ein Bild für das menschliche Auge zu erzeugen. Für

die Ansteuerung der mikromechanischen Aktoren ist dabei zu beachten, dass bei der kontinuierlichen Beleuchtung über einen bestimmten Zeitraum der Mittelwert der Beleuchtungsstärke ausgewertet wird. Beim menschlichen Auge beträgt dieser Wert circa 4/100 Sekunden. Bei hochempfindlichen Teleskopen beispielsweise kann dieser Wert jedoch wesentlich länger sein, da hiermit äußerst geringe Strahlstärken aufgenommen werden können. Die Zeitspanne für eine Änderung der Modulation (neues Bild oder Veränderung einer Phasenkorrektur) sollte bei einem zeitkontinuierlichen Betrieb immer möglichst kurz gegenüber der Auswertzeit sein, um die optischen Störungen während einer Änderung der Modulatoransteuerung gering zu halten.

Um mehr Freiheiten bei der Ansteuerung des Flächenlichtmodulators zu erhalten, ist es möglich, das modulierte Licht während einer Bildänderung nicht auszuwerten und die Auswertung erst nach der vollständigen Ansteuerung des Modulators fortzusetzen. In diesem Fall handelt es sich um einen nicht-kontinuierlichen Betrieb. Hierbei kann der optisch aktive Zeitraum (Beleuchtung und Auswertung) gegenüber dem nichtaktiven (ohne Beleuchtung oder Auswertung) größer, kleiner oder gleich lang ist. Dies ist hauptsächlich von der Anwendung des Lichtmodulators abhängig.

Je nachdem, ob das einzelne Pixel des Modulatorarrays neben der Ansteuerelektrode noch aktive elektronische Bauelemente enthält oder nicht, unterscheidet man allgemein zwischen aktiver und passiver Matrixansteuerung.

2.4.1 Passive Matrixansteuerung

Die einfachste passive Matrixansteuerung ist die, bei der jedes Matrixelement mit einer externen, d. h. außerhalb des Pixels angeordneten Treiberschaltung verbunden ist. Diese Art der Ansteuerung hat den Vorteil, dass das Layout jedes Pixels optimal an die optischen Anforderungen angepasst und die Ansteuerelektronik unabhängig von diesen Anforderungen dimensioniert werden kann. Die Möglichkeit Aktor und Elektronik in separaten Technologien zu realisieren, bietet viele Vorteile. Da jedoch für jedes Matrixelement eine Treiberschaltung mitsamt Zuleitung zum Aktor realisiert werden muss, sind bei dieser Ansteuervariante Einschränkungen bezüglich der Komplexität der Modulatormatrix vorhanden. Zur Zeit werden mit diesem Konzept Flächenlichtmodulatoren mit bis zu hundert separat ansteuerbaren Elementen realisiert [1, 2].

Um auch größere Arrays von Pixelelementen passiv ansteuern zu können, müssen mehrere Pixel zeitlich nacheinander mit Hilfe eines Multiplex-Verfahrens angesteuert werden. Diese Verfahren werden bereits erfolgreich bei passiven LCD-Displays (sogenannten STN-LCDs) angewendet [42, 6]. Im Falle der LCD-Displays werden die einzelnen Pixel ebenfalls durch ein elektrisches Feld angesteuert. Für die zur Lichtmodulation zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge sei an dieser Stelle auf obige Literatur verwiesen. In Bezug auf die elektrische Ansteuerung sind LCD's mit elektrostatischen Aktoren jedoch vergleichbar.

Bei der Multiplexansteuerung sind die Ansteuerelektroden jeweils über Spalten-

leitungen und die Gegenelektroden, die die Aktoren darstellen, über Zeilenleitungen³ verbunden.

Abbildung 2.4 zeigt ein Array mit passiv verdrahteten Steuerelektroden und Spiegeln. Der in Abbildung 2.5 gezeigte Aufbau des Aktors basiert in diesem Fall auf der CBM-Technologie, die in Kapitel 5.5.2 erläutert wird.

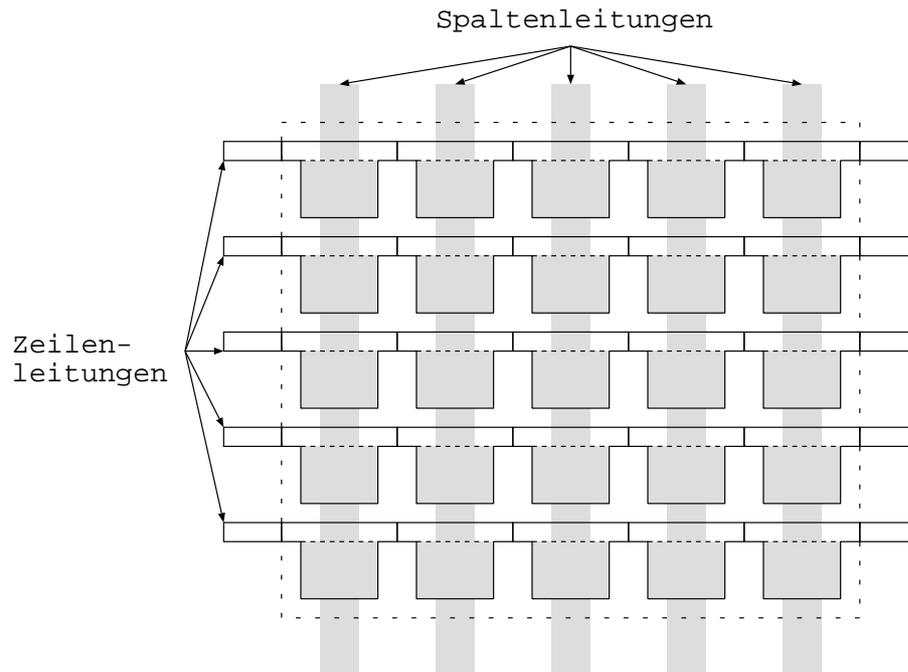


Abbildung 2.4: Aufbau eines Arrays mit 5×5 passiven Pixelzellen

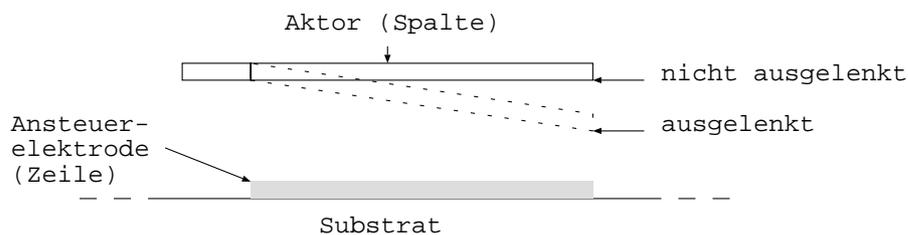


Abbildung 2.5: Querschnitt der Aktor-Elektroden-Anordnung des passiven Arrays aus Abbildung 2.4

Die einzelnen Pixel eines Arrays werden bei der passiven Ansteuerung nicht zeitkontinuierlich bewegt, sondern nur während einer Zeitspanne T_{aktiv} . Diese Zeitspanne

³An dieser Stelle werden die Begriffe Zeilen- und Spaltenleitung zur Unterscheidung verwendet. Prinzipiell sind diese Begriffe austauschbar, da das Array gedanklich um 90° gedreht werden kann.

ist durch die Bildrate des Modulators und durch den Multiplexfaktor N_{mux} vorgegeben:

$$T_{aktiv} = \frac{T_{Bild}}{N_{mux}}. \quad (2.1)$$

Für den in Abbildung 2.4 dargestellten Fall werden jeweils alle Pixel einer Zeile gleichzeitig angesteuert. Der Multiplexfaktor N_{mux} entspricht also der Anzahl der Zeilen N_{Zei} . Da das Ansteuersignal nur für einen Teil der Bildperiode aufgeschaltet ist, ist für jedes Pixel der Mittelwert der Ansteuerspannung über eine Bildperiode ausschlaggebend.

Aus diesem Grund ist die passive, zeitmultiplexe Ansteuerung von Lichtmodulatorarrays nur bei kontinuierlichem Betrieb möglich, bei dem der Mittelwert der Strahlstärke des modulierten Lichts ausgewertet wird.

Abbildung 2.6 zeigt ein passives 3×3 Array mit den Steuersignalen für die Zeilen- und Spaltenleitungen.

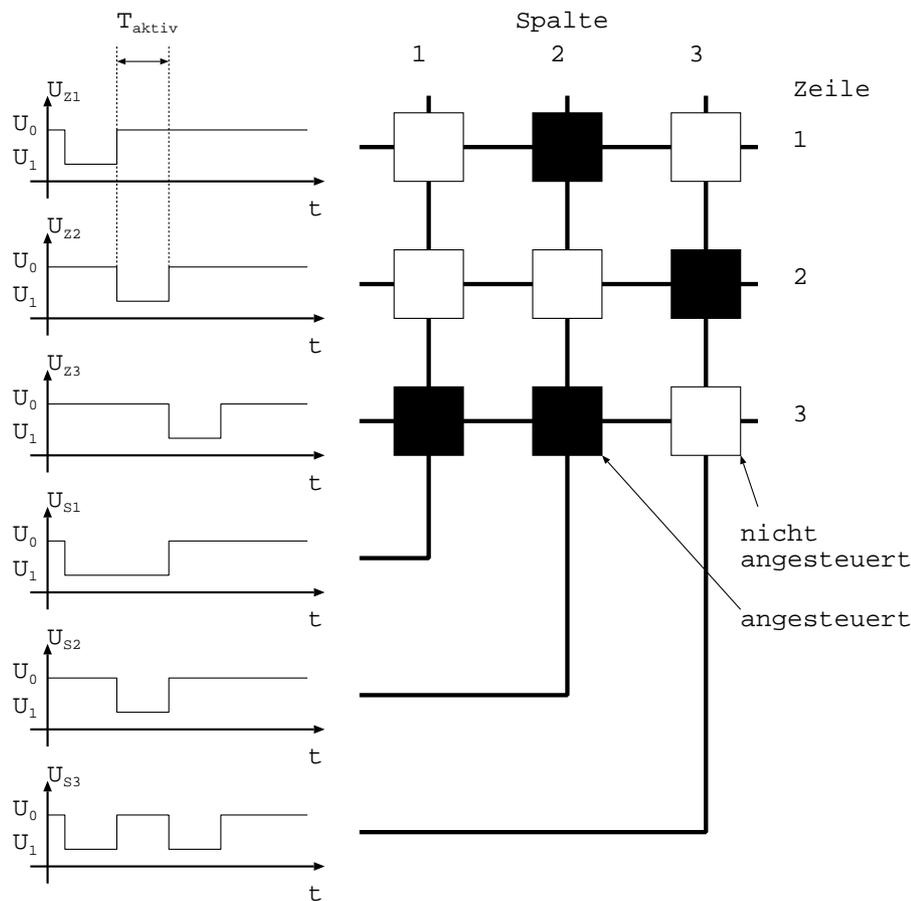


Abbildung 2.6: Ansteuersignale für eine zeitmultiplexe passive Ansteuerung

Hier beträgt die Multiplexrate $N_{mux} = 3$, da zu jedem Zeitpunkt nur die Pixel innerhalb einer Zeile aktiv angesteuert werden. Die Anzahl der Zuleitungen zum

Array verringert sich ebenfalls um den Faktor N_{mux} von $9 \cdot 2 = 18$ auf 6. Die maximale Bildrate $\frac{1}{T_{Bild}}$ ist allerdings bei der Multiplexansteuerung um den Faktor N_{mux} geringer gegenüber einer parallelen Ansteuerung aller Pixel.

Elektrostatische Aktoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch eine Spannungsdifferenz zwischen Ansteuerelektrode und beweglichem Aktor angesteuert werden. Dabei spielt die Polarität der Spannung keine Rolle, da unabhängig von der Richtung des elektrischen Kraftfeldes immer eine Anziehungskraft zwischen Elektrode und Aktor entsteht. Allgemein kann deshalb eine Steuerspannung U_S eingeführt werden, für die gilt:

$$U_S = |U_{Elektrode} - U_{Aktor}|. \quad (2.2)$$

Bei dem Beispiel aus Abbildung 2.6 werden ausgeschaltete Aktoren (weißes Feld) mit der Spannung

$$U_{aus} = |U_0 - U_0| = |U_1 - U_1| = 0$$

beaufschlagt und eingeschaltete Aktoren (schwarzes Feld) für jeweils eine Zeitspanne T_{aktiv} mit der Differenzspannung

$$U_{ein} = |U_0 - U_1|.$$

Bei der zeitmultiplexen, passiven Matrixansteuerung ist das zeitliche Antwortverhalten des Aktors auf die angelegte Ansteuerspannung ein wichtiger Kennwert. Im Falle eines idealen Aktors, der der angelegten Steuerspannung ohne Verzögerung folgt, lässt sich die Auslenkung des Spiegels direkt als Funktion der Steuerspannung $a(U_S)$ darstellen. Über die Bildperiode T_{Bild} ergibt sich damit für die Auslenkung folgender Mittelwert:

$$\bar{a} = \frac{1}{T_{Bild}} \cdot \int_0^{T_{Bild}} a(U_S(t)) dt. \quad (2.3)$$

Bei einem einfachen Rechteckimpuls der Länge T_{aktiv} der Ansteuerspannung ergibt sich $U_S(t)$ zu

$$U_S(t) = U_{ein} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-x}{T_{aktiv}}\right). \quad (2.4)$$

Der Faktor x wird so gewählt, dass der Rechteckimpuls vollständig innerhalb des Zeitintervalls $[0, T_{Bild}]$ liegt.

Im Falle einer (nahezu) zeitunabhängigen Aktorkennlinie, also bei Aktoren die ohne nennenswerte Verzögerung dem Ansteuersignal folgen, lässt sich $a(U_S)$ folgendermaßen darstellen:

$$a(U_S) = a(U_{ein}) \cdot \text{rect}\left(\frac{t-x}{T_{aktiv}}\right). \quad (2.5)$$

Setzt man (2.5) in (2.3) ein, so erhält man

$$\bar{a} = \frac{\int_0^{T_{aktiv}} a(U_{ein}) dt}{T_{Bild}}. \quad (2.6)$$

Für die mittlere Auslenkung des Aktors ergibt sich dann ein um die Multiplexrate N_{mux} verminderter Wert

$$\bar{a} = a(U_{ein}) \cdot \frac{T_{aktiv}}{T_{Bild}} = \frac{a(U_{ein})}{N_{mux}}. \quad (2.7)$$

Diese verminderte Auslenkung während einer Bildperiode setzt die Aussteuerdynamik herab auf einen Wert, der bei einer hohen Multiplexrate deutlich unterhalb der maximal möglichen Austeuerung des Aktors liegt. Bei einer Displayanwendung bedeutet das beispielsweise einen verminderten Kontrast.

Die realen mikromechanischen Aktoren besitzen im Antwortverhalten auf eine aufgeschaltete Ansteuerspannung eine signifikante zeitliche Verzögerung. Daraus ergibt sich ein etwas anderer Zusammenhang zwischen maximaler Ansteuerspannung und mittlerer Auslenkung. Die Abhängigkeit von der Multiplexrate bleibt jedoch erhalten.

Eine Verbesserung der mittleren Auslenkung und damit eine Verbesserung der optischen Eigenschaften des Lichtmodulators ist nur über eine stark nichtlineare Aktorkennlinie möglich.

Passiv angesteuerte Flüssigkristallmodulatoren, die im Multiplexverfahren adressiert werden, sind daher speziell für diese Ansteuerung optimiert worden [35, 6]. Diese Flüssigkristallelemente, die als Super-Twisted-Nematic (STN) LCDs bezeichnet werden, verfügen über eine Ansteuercharakteristik, die ein Umschalten über definierte Schwellwerte ermöglichen. Für diese Elemente kann durch Optimierung der Spannungspegel der Zeilen- und Spaltenleitungen eine deutliche Verbesserung des Kontrastes erreicht werden, die auch den Anforderungen an ein hochauflösendes Display genügt.

Bei mikromechanischen Aktoren ist ein Schaltverhalten durch Schwellwerte jedoch nicht vorhanden. Hier kann eine Verbesserung des Kontrastes nur durch eine aktive Matrixansteuerung erreicht werden. Hierbei wird in jedem Pixelelement zu der Steuerelektrode ein nichtlineares Element hinzugefügt, das über ein ausgeprägtes Schaltverhalten verfügt. Im Falle der LCD-Displays werden Dioden, sog. MIM-Strukturen⁴ und aktive Schaltelemente wie Transistoren in jedes Pixelelement eingefügt [35, 42, 44].

In dem folgenden Kapitel werden die daraus resultierenden Vorteile für das optische Verhalten sowie die Ansteuerung aktiver Matrixzellen erläutert.

2.4.2 Aktive Matrixansteuerung

Bei der aktiven Ansteuerung wird jedem Pixel ein nichtlineares Element hinzugefügt. Dadurch wird gewährleistet, dass der jeweilige Aktor nicht nur während der Adressierung des Pixels aktiv angesteuert wird, sondern die Steuerspannung auch während

⁴Metal-Insulator-Metal-Strukturen, die über ein ähnliches Schaltverhalten wie Dioden verfügen, jedoch keine Gleichrichtung verursachen

der restlichen Bildperiode anliegt. Wie bei der passiven Multiplexansteuerung ist es auch bei der aktiven Ansteuerung nicht notwendig, jedes Pixel mit einem externen Treiber zu verbinden. So können auch mit der aktiven Adressierung Lichtmodulatoren mit hohen Pixelzahlen angesteuert werden. Dieses zusätzliche nichtlineare Element bedingt allerdings eine komplexere Pixelarchitektur und schränkt daher sowohl die minimale Pixelgröße als auch unter Umständen die Fertigungsausbeute ein. Demgegenüber stehen bei der aktiven Matrixansteuerung eine Reihe von Vorteilen, die im folgenden aufgezeigt werden.

Das nichtlineare Element wirkt bei der aktiven Matrixansteuerung als Schalter. Während der aktiven Adressierung des Pixels muss der Schalter geschlossen sein, damit die Ansteuerspannung von der Spaltenleitung auf die Ansteuerelektrode aufgeschaltet wird. Während der nicht-aktiven Zeitspanne ist dann die Ansteuerelektrode von der Adressierleitung entkoppelt, das heißt der Schalter ist offen und die Ansteuerspannung muss durch einen Speichereffekt auf der Ansteuerelektrode gehalten werden.

Die Speicherung der Ansteuerspannung kann sowohl statisch als auch dynamisch erfolgen.

Im Falle der statischen Speicherung werden aktive Bauelemente verwendet. Der Vorteil der statischen Speicherung liegt in der unkritischen Speicherzeit und in der höheren Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen. Im Gegensatz zur dynamischen Speicherung ist keinerlei Refresh des eingeschriebenen Spannungswertes notwendig und die Speicherzeit ist im Idealfall unendlich. Durch die aktiven Bauelemente des Speicherelementes können auch parasitäre Störeinkopplungen bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden. Der Hauptnachteil der statischen Spannungsspeicherung liegt daran, dass eine kompakte Realisierung nur für die binäre Speicherung möglich ist. Gerade bei der Matrixanordnung von Speicherzellen, wie sie bei Flächenlichtmodulatoren gegeben ist, ist ein kompaktes Layout des Speicherelementes notwendig. Zur Speicherung binärer Spannungspegel ist die sogenannte 6-Transistor-Zelle geeignet, die auch bei handelsüblichen statischen RAMs Verwendung findet. Abbildung 2.7 zeigt den Schaltplan eines solchen Speicherelementes.

Diese Speicherzelle ist auch zur Ansteuerung elektrostatischer Aktoren geeignet, da sie bei Verwendung entsprechender Hochvoltbauelemente (siehe Kapitel 5.3) die notwendigen Spannungspegel zur Verfügung stellen kann. Auf die genaue Funktionsweise der statischen Speicherzelle wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da diese Schaltungstechnik weit verbreitet und in der Literatur (z.B. [53]) ausführlich beschrieben ist.

Da zur Erhaltung des statischen Speichers kein Refresh erforderlich ist, eignet sich die statische Speicherzelle besonders gut für eine wahlfreie Adressierung. Die Adressierung eines Pixels erfolgt nur bei einer Änderung des Inhaltes. Daher ist die wahlfreie Adressierung statischer Pixelzellen gut geeignet für einen Flächenlichtmodulator bei kontinuierlicher Beleuchtung, da bei einem Bildwechsel die Pixel, die ihre Position beibehalten, nicht adressiert werden und dadurch die Bildrate erhöht werden kann. Allerdings ist in diesem Fall die maximale Bildwiederholrate von dem

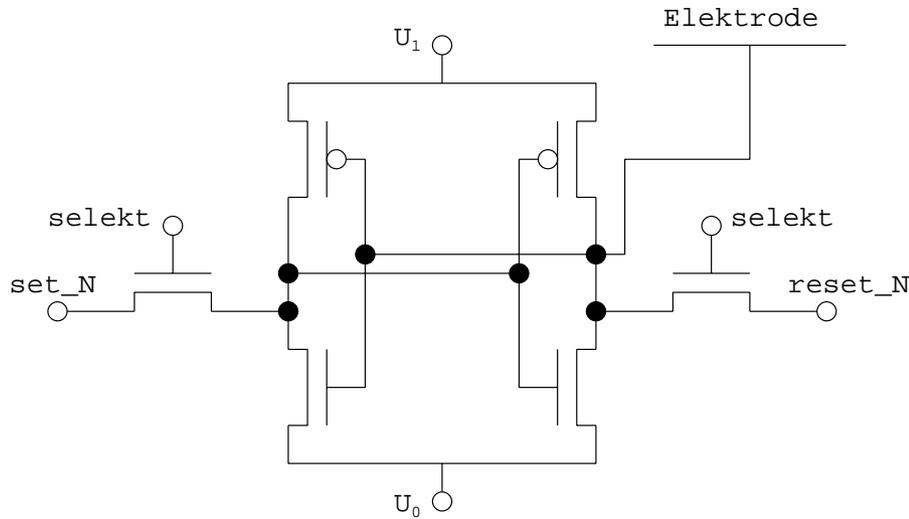


Abbildung 2.7: Schaltplan einer statischen 6-Transistor-Speicherzelle

jeweiligen Bildinhalt abhängig. Dieser Vorteil gilt jedoch nicht mehr, falls sich aufeinanderfolgende Bilder stark unterscheiden. In diesem Fall ist der Aufwand bei einer wahlfreien Adressierung höher als bei einer kompletten Adressierung des gesamten Arrays, da zusätzlich zu den Pixeldaten auch die jeweilige Adresse bereitgestellt und zu dem Lichtmodulator übertragen werden muss.

Eine kurze Zeitspanne zur Adressierung ist bei einem kontinuierlichen Betrieb von Vorteil, wie bereits in Abschnitt 2.4 erwähnt. Ein weiterer Vorteil der hier beschriebenen statischen Pixelzelle ist die Unempfindlichkeit gegenüber parasitären Einflüssen wie zum Beispiel gegenüber photoinduzierten Leckströmen.

Bei der dynamischen Speicherung wird das Ansteuersignal mit Hilfe von passiven Bauelementen gespeichert. Diese Signalspeicherung kann durch Kapazitäten realisiert werden, da mikromechanische Aktoren durch eine elektrische Spannung angesteuert werden. Wie später noch gezeigt wird, kann diese Speicherkapazität durch die Eigenkapazität der Aktor-Elektroden Anordnung realisiert werden oder durch hinzufügen eines zusätzlichen Speicherelements. Der Grundaufbau einer dynamischen Pixelzelle zur Ansteuerung mikromechanischer Aktorarrays ist mit dem einer DRAM-Zelle vergleichbar.

Abbildung 2.8 zeigt eine dynamische Speicherzelle mit einem Kondensator als Speicherelement.

Der Vorteil eines solchen dynamischen Speicherelementes liegt in der einfacheren Schaltungstechnik, die kleinere Pixelgrößen erlaubt. Im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen statischen Zelle gibt es bei der dynamischen Pixelzelle keine Beschränkung auf zwei verschiedene Spannungspegel. Mit der dynamischen Pixelzelle ist sogar eine analoge Ansteuerung des mikromechanischen Aktors möglich. Der Hauptnachteil der dynamischen Speicherung gegenüber der statischen liegt in dem notwendigen Refresh des eingeschriebenen Spannungswertes. Da keine aktiven Bauelemente den

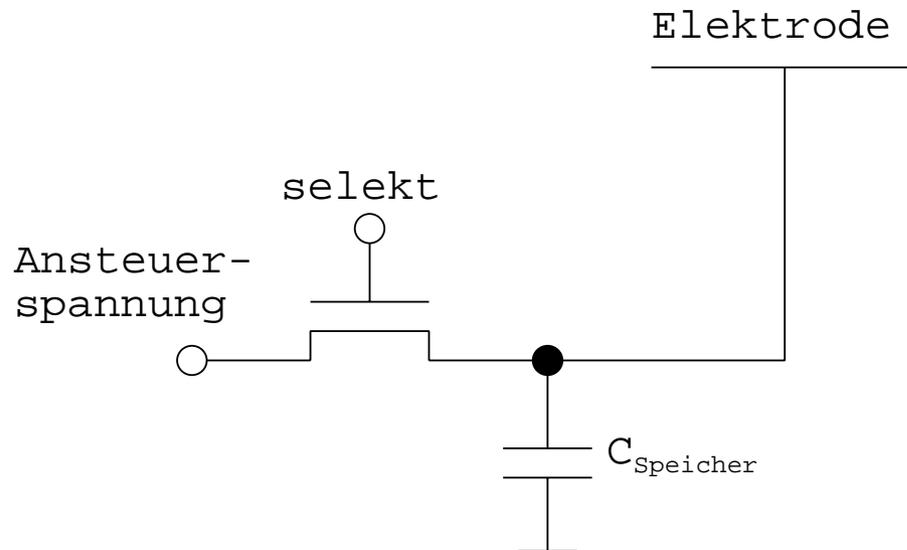


Abbildung 2.8: Schaltplan einer dynamischen Speicherzelle mit Speicherkapazität

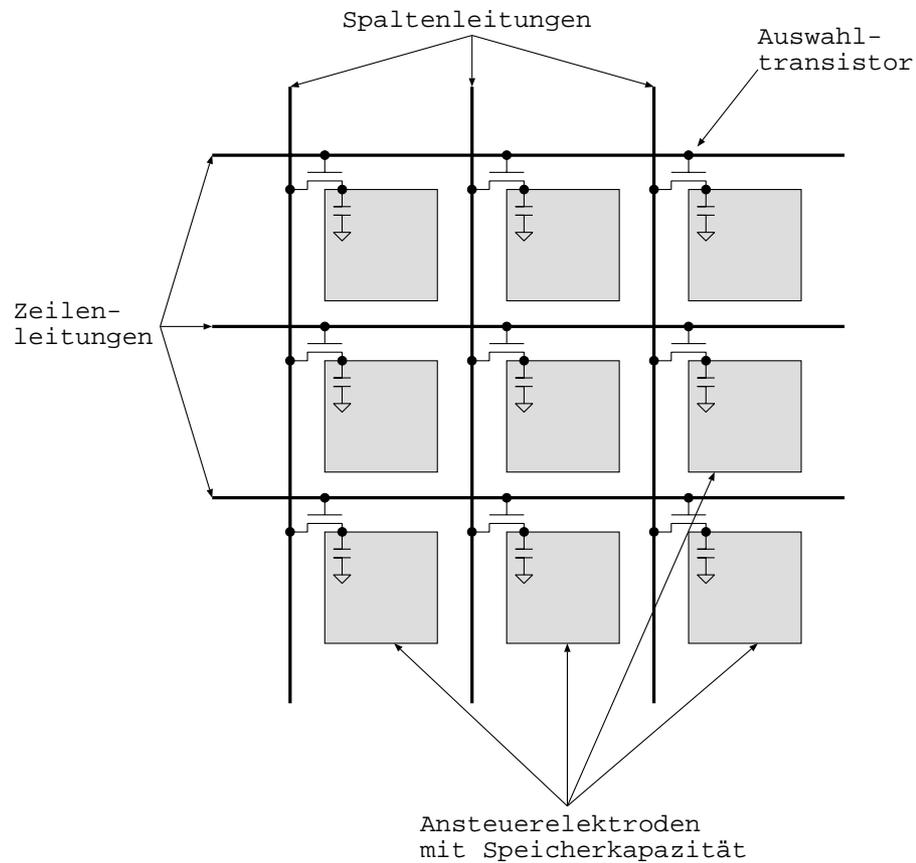
Einfluss von Leckströmen und anderen Störungen kompensieren, besitzt die dynamische Speicherzelle eine maximale Speicherzeit, nach der die gespeicherte Spannung durch eine erneute Adressierung der Zelle refreshet werden muss. Die mit der dynamischen Speicherung erreichbare Genauigkeit und die maximal mögliche Speicherzeit werden in den Kapiteln 3 und 4 ausführlich behandelt.

Die dynamische Speicherung eignet sich wegen ihrer geringeren Pixelkomplexität für sehr große Matrixkonfigurationen mit kleinen Pixelgrößen. Diese Matrixansteuerung ist für nicht-kontinuierliche Beleuchtung prädestiniert, da nach einer Bildperiode immer die komplette Matrix adressiert werden muss und dadurch der notwendige Refresh gewährleistet ist. Prinzipiell ist auch ein kontinuierlicher Betrieb möglich.

In Abbildung 2.9 ist eine aktiv angesteuerte 3×3 Matrix abgebildet, wie sie auch zur Ansteuerung von LC-Displays verwendet wird [35, 42].

Ausgehend von den vorangehenden Gegenüberstellungen der verschiedenen Ansteuerkonzepte, ist eine aktive Matrixansteuerung mit dynamischen Pixelzellen am besten geeignet, die Anforderungen an einen Lichtmodulator für die Mikrolithographie und andere adaptive optische Systeme zu erfüllen.

In der Mikrolithographie wird ein nicht-kontinuierliches Belichtungsverfahren verwendet, wobei die aufeinander folgenden Bilder in der Regel nur wenig Ähnlichkeiten besitzen. Hier bietet die komplette Adressierung Vorteile gegenüber dem wahlfreien Zugriff auf einzelne Pixel, da nur die Pixeldaten dem Flächenlichtmodulator zugeführt werden müssen und der Verzicht auf die Übertragung und Decodierung von Adressen eine höhere Bildrate ermöglicht. Der bei dynamischen Pixelzellen notwendige Refresh geschieht bei der kompletten Adressierung automatisch während des Einschreibens des nächsten Bildes. Die Verwendung von dynamischen Matrixzellen ermöglicht sehr kompakte Pixellayouts und dadurch Flächenlichtmodulatoren mit

Abbildung 2.9: Aktiv angesteuerte 3×3 Matrix

sehr hoher Ortsauflösung, wie sie für die Mikrolithographie benötigt werden.

Im folgenden Kapitel wird die Ansteuerung der einzelnen Pixelaktoren durch dynamische Speicherzellen genauer untersucht. Die mögliche Genauigkeit bei analoger Ansteuerung wird analytisch untersucht, um eine gezielte Optimierung zu ermöglichen.