

4 Eindimensionale Bildsignalaufnahme und Bildsignaldarstellung

Die Übertragungseigenschaften eines optischen Systems, z.B. einer Linse, werden durch die Punktantwort für den ortskontinuierlichen Fall PSF charakterisiert (engl. PSF, Point Spread Function) [68]. Analog dazu kann die Bildsignalaufnahme ein- oder zweidimensionaler Photosensorarrays mittels diskreter Impulsantwort $h_d(x)$ bzw. $h_d(x,y)$ des Photosensorarrays charakterisiert werden. Die diskrete Impulsantwort eines Photosensorarrays ist eine makroskopische Größe. Sie kann nur diskret gemessen werden, da die Ausgangssignale der Photosensorelemente an diskreten Orten vorliegen.

Eine weitere Möglichkeit, genaue Information über den Charakter der Bildsignalaufnahme eines Photosensorarrays zu erhalten, bietet die Antwort eines einzelnen Photosensorelementes auf Eingangsimpulse an jedem beliebigen Ort. Diese Antwort ist der ortsabhängige Empfindlichkeitsverlauf des Photosensorelementes und wird im folgenden mit mikroskopischer Apertur $h_m(x)$ bezeichnet, womit eine begriffliche Trennung gegenüber der (numerischen) Apertur, z.B. der eines Kameraobjektiv, beabsichtigt ist.

Weiterhin wird nur noch der eindimensionale Fall eines Photosensorarrays betrachtet, wobei die folgenden Betrachtungen formal auf den zweidimensionalen Fall erweitert werden können.

Für Photosensorarrays kann die Theorie der linearen ortsinvarianten Systeme in Analogie zur Theorie der linearen zeitinvarianten Systemen (LZI-Systeme) angewandt werden. Dies gilt sowohl für den orts(zeit)diskreten Fall als auch für den orts(zeit)kontinuierlichen Fall. Ein wichtiger Unterschied zu den realen LZI-Systemen besteht darin, daß lineare ortsinvariante Systeme nicht zwingend der Bedingung der Kausalität unterliegen.

4.1 Makroskopische Bildsignalaufnahme

Zunächst sei der Fall betrachtet, daß nur die diskrete Impulsantwort $h_d(n \cdot \Delta x)$ des gesamten Photosensorarrays bekannt ist. Das Photosensorarray sei als unendlich ausgedehnt angenommen und die Photosensorelemente befinden sich an den Orten $n \cdot \Delta x$. Das diskrete Ausgangssignal eines unendlich ausgedehnten Photosensorarrays $g_d(n \cdot \Delta x)$ an der Stelle x_0 setzt sich aus der Überlagerung der um $m \cdot \Delta x$ verschobenen Anteile der mit dem Eingangssignal $s_d(n \cdot \Delta x)$ gewichteten diskreten Impulsantwort zusammen:

$$g_d(x_0) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s_d(m \cdot \Delta x) h_d(x_0 - m \cdot \Delta x). \quad (4.69)$$

Bild 4.1 macht dies deutlich:

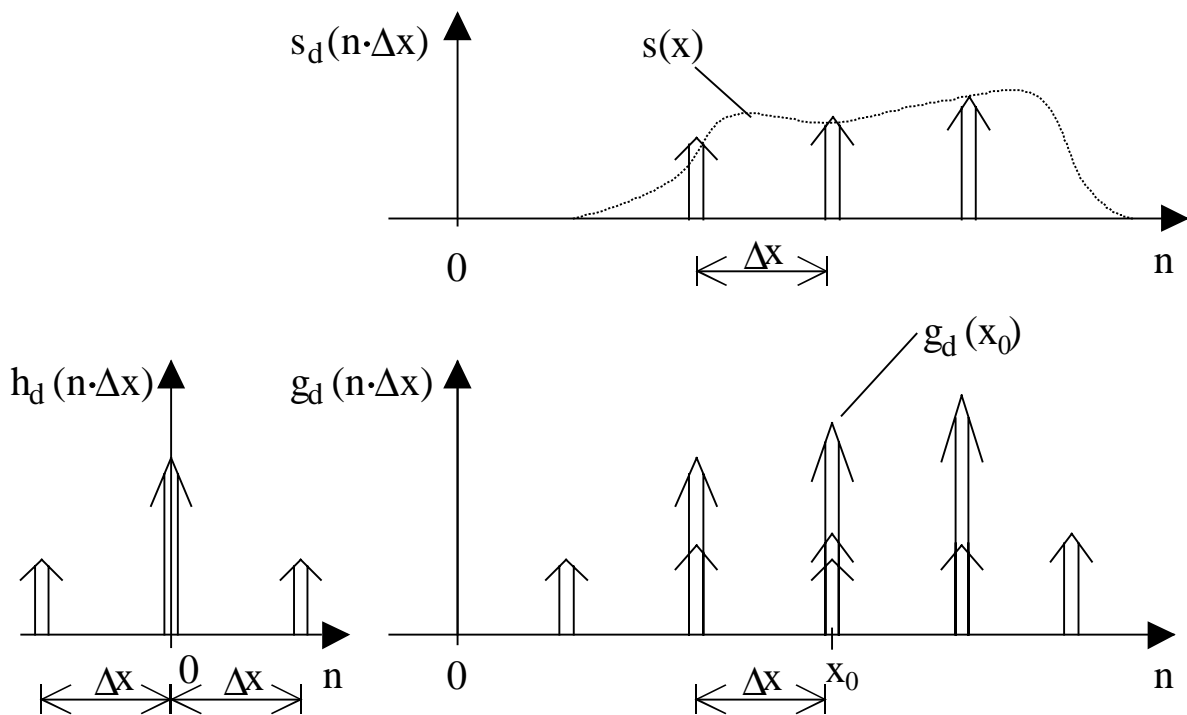


Bild 4.70: Aus der diskreten Impulsantwort gewonnenes Ausgangssignal

oder für beliebige Stellen $n \cdot \Delta x$:

$$g_d(n \cdot \Delta x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s_d(m \cdot \Delta x) h_d(n \cdot \Delta x - m \cdot \Delta x). \quad (4.71)$$

Das diskrete Ausgangssignal $g_d(n \cdot \Delta x)$ des gesamten Photosensorarrays wird damit analog zum diskreten LZI-System durch die diskrete Faltung gewonnen:

$$g_d(n \cdot \Delta x) = s_d(n \cdot \Delta x) * h_d(n \cdot \Delta x). \quad (4.72)$$

Das Eingangssignal der Bildaufnahme, also die Bestrahlungsstärkeverteilung, ist in der Realität nicht ortsdiskret sondern ortskontinuierlich. Die ortskontinuierliche Eingangsfunktion $s(x)$ muß daher für die Berechnung des Ausgangssignals mit Hilfe der diskreten Impulsantwort zunächst in das diskrete Eingangssignal $s_d(n \Delta x)$ überführt werden. Dies geschieht durch Abtastung, allerdings ist die Abtastung mit finiten Aperturfunktionen sehr schwierig zu beschreiben. Um einfache Lösungen zu erhalten, nimmt man meistens an, daß das abgetastete Signal durch den innerhalb der Aperturfunktion ermittelten Mittelwert approximiert werden kann. Man nimmt bei der Mittelwertbildung an, daß das Photosensorelement innerhalb seiner Ausdehnung gleichermaßen empfindlich ist. Damit wird $s_d(n \Delta x)$ wie folgt approximiert [73].

$$s_d(n \Delta x) = \frac{1}{\Delta x} \int_{x=(n-\frac{1}{2})\Delta x}^{(n+\frac{1}{2})\Delta x} s(\xi) d\xi. \quad (4.74)$$

An dieser Stelle wird deutlich, daß sich das diskrete Ausgangssignal des Photosensorarrays $g_d(n \Delta x)$ mit Hilfe der diskreten Impulsantwort $h_d(n \Delta x)$ nur approximieren läßt, da die mikroskopische Information über die Empfindlichkeit innerhalb der Ausdehnung des Photosensorelementes fehlt.

4.2 Mikroskopische Bildsignalaufnahme

Nun sei der Fall betrachtet, daß die mikroskopische Apertur eines Photosensorelementes $h_m(x)$ bekannt sei. $h_m(x)$ läßt sich näherungsweise durch Einstrahlen mit einem verfahrbaren Laser auf das Photosensorelement und der Messung des entsprechenden Ausgangssignals bestimmen. Bild 4.2 zeigt dies an dem Beispiel einer n+/p-Substrat Photodiode. Die eingesammelten photogenerierten Ladungsträger sind für jede Laserposition x als Photostrom an der Ausgangsklemme meßbar.

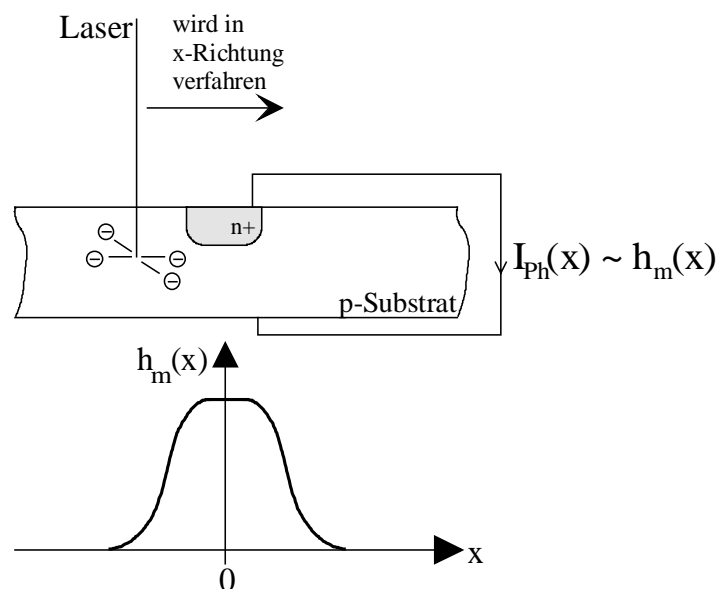


Bild 4.75: Bestimmung der mikroskopischen Apertur eines Photosensorelementes

Es ist zu beachten, daß die mikroskopische Apertur eines Photosensorelementes nicht nur von dessen Form und Sammlungseigenschaften photogenerierter Ladungsträger abhängt, sondern auch in Zusammenhang mit der Lage benachbarter Photosensorelemente betrachtet werden muß. Beispielsweise wird innerhalb eines bestimmten Photosensorarrays, dessen Photosensorelemente den Abstand p_1 aufweisen, $h_m(x)$ gemessen. Man kann nicht zwangsläufig für ein zweites Photosensorarray mit Photosensorelementen gleicher Form aber anderen Abständen p_2 annehmen, daß die mikroskopischen Aperturen dieselben sind. Die Sammlungseigenschaften photogenerierter Ladungsträger der benachbarten Photosensorelemente bezüglich des betrachteten Photosensorelementes sind durch den veränderten Abstand unterschiedlich.

Die Fouriertransformierte von $h_m(x)$ in den Ortsfrequenzbereich ist $H_m(\omega_x)$. Der Betragsverlauf von $H_m(\omega_x)$ wird mit MTF (Modulation Transfer Function) bezeichnet. Die MTF gibt an, wie gut ein Photosensorarray mit $h_m(x)$ charakterisierten Photosensorelementen

bestimmte Helligkeitsmodulationen bzw. Ortsfrequenzen aufnehmen kann. Mit der Kenntnis von $h_m(x)$ läßt sich die Bildsignalaufnahme anhand gezielter Manipulation (z.B. Änderung der Geometrie des Photosensorelementes oder gezielte Abdeckung von Teilbereichen) hinsichtlich des Verlaufes der MTF optimieren.

Als nächstes soll das Ausgangssignal eines Sensorelementes als Antwort auf ein beliebiges Eingangssignal mit Kenntnis von $h_m(x)$ bestimmt werden. Hierfür wird als unabhängige Variable ξ gewählt. Die mikroskopische Apertur eines Photosensorelementes, welches sich an der Stelle x_0 befindet, wird dann mit $h_m(\xi - x_0)$ bezeichnet.

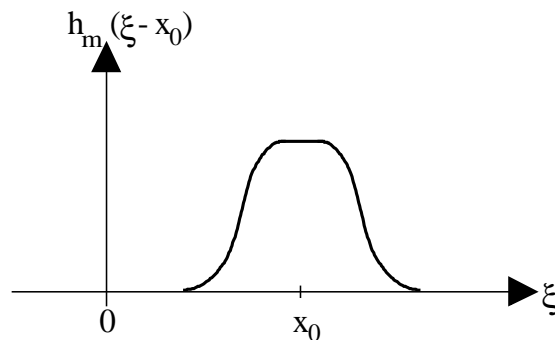


Bild 4.76: Mikroskopische Apertur eines Photosensorelementes an der Stelle x_0

Das Eingangssignal ist ein Verlauf der Helligkeit oder Bestrahlungsstärke und wird allgemein mit $s(x)$ bezeichnet. Das Photosensorelement gewichtet die eingehende Bestrahlungsstärke mit der mikroskopischen Apertur über den Ort und sammelt die photogenerierten Ladungsträger an der Stelle x_0 ein. Das Ausgangssignal eines Photosensorelementes an der diskreten Position x_0 , welches allgemein mit $g(x_0)$ bezeichnet wird, kann dann durch das folgende Integral ausgedrückt werden:

$$g(x_0) = \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} s(\xi) h_m(\xi - x_0) d\xi. \quad (4.77)$$

Es sei nun das ganze Photosensorarray betrachtet, welches als unendlich ausgedehnt angenommen wird. Das Ausgangssignal des Photosensorarrays ist ortsdiskret, weil die Photosensorelemente an den diskreten Positionen $n \cdot \Delta x$ vorliegen. Das Ausgangssignal des Photosensorarrays kann also als Abtastung der Ausgangssignale eines Photosensorelementes an den Stellen $n \cdot \Delta x$ verstanden werden. Die Abtastung wird mit der Ausblendeigenschaft eines Dirac'schen δ -Impulszugs an den Stellen $n \cdot \Delta x$ vorgenommen.

$$g(n \cdot \Delta x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\delta(x - n \cdot \Delta x) \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} s(\xi) h_m(\xi - n \cdot \Delta x) d\xi \right]. \quad (4.78)$$

Die oben beschriebene Eigenschaft des Photosensorelementes der gewichteten Integration und anschließender Abtastung innerhalb eines Photosensorarrays wird in [79] "averaging sampling" genannt.

Durch die Ausblendeigenschaft des δ -Impulszuges kann man im Integral der Gleichung 4.6

$$x = n \Delta x \quad (4.80)$$

setzen und das Integral aus der Klammer herausnehmen, dies führt zu

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n \Delta x) \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} s(\xi) h_m(\xi - x) d\xi. \quad (4.81)$$

Im Normalfall handelt es sich um spiegelsymmetrische Funktionen $h_m(x)$, d.h.:

$$h_m(x) = h_m(-x). \quad (4.82)$$

Dies ist allerdings nur möglich, da die betrachteten Systeme nicht kausal sind. Unter der Bedingung der Gleichung 4.9 läßt sich Gleichung 4.8 als

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n \cdot \Delta x) \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} s(\xi) h_m(x - \xi) d\xi \quad (4.83)$$

bzw.

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n \cdot \Delta x) [s(x) * h_m(x)] \text{ schreiben.} \quad (4.84)$$

Die Eingangsfunktion $s(x)$ wird also zunächst mit $h_m(x)$ gefaltet, was einer Filterung entspricht, und dann abgetastet. Dieser Zusammenhang läßt sich in das folgende Modell fassen.

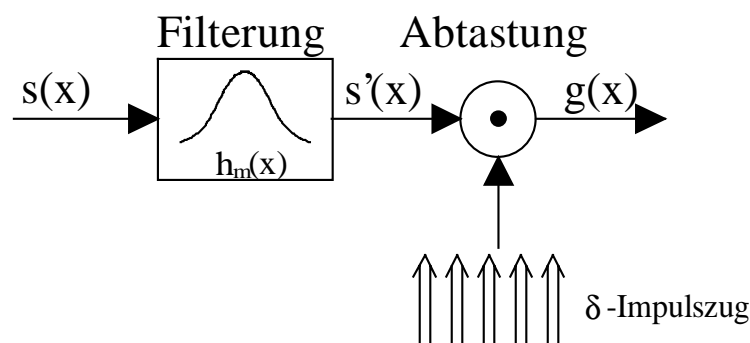


Bild 4.85: Modell zur mikroskopischen Bildsignalaufnahme

In der Realität sind Photosensorarrays endlich ausgedehnt. Man erhält das Ausgangssignal eines Photosensorarrays $g'(x)$ durch Multiplikation von $g(x)$ mit einer Rechteck-Funktion von der Breite des Photosensorarrays. Der komplette Vorgang der mikroskopisch betrachteten

Bildsignalaufnahme ist in Bild 4.5 im Originalbereich (Ort) und im Bildbereich (Ortsfrequenz) wiedergegeben.

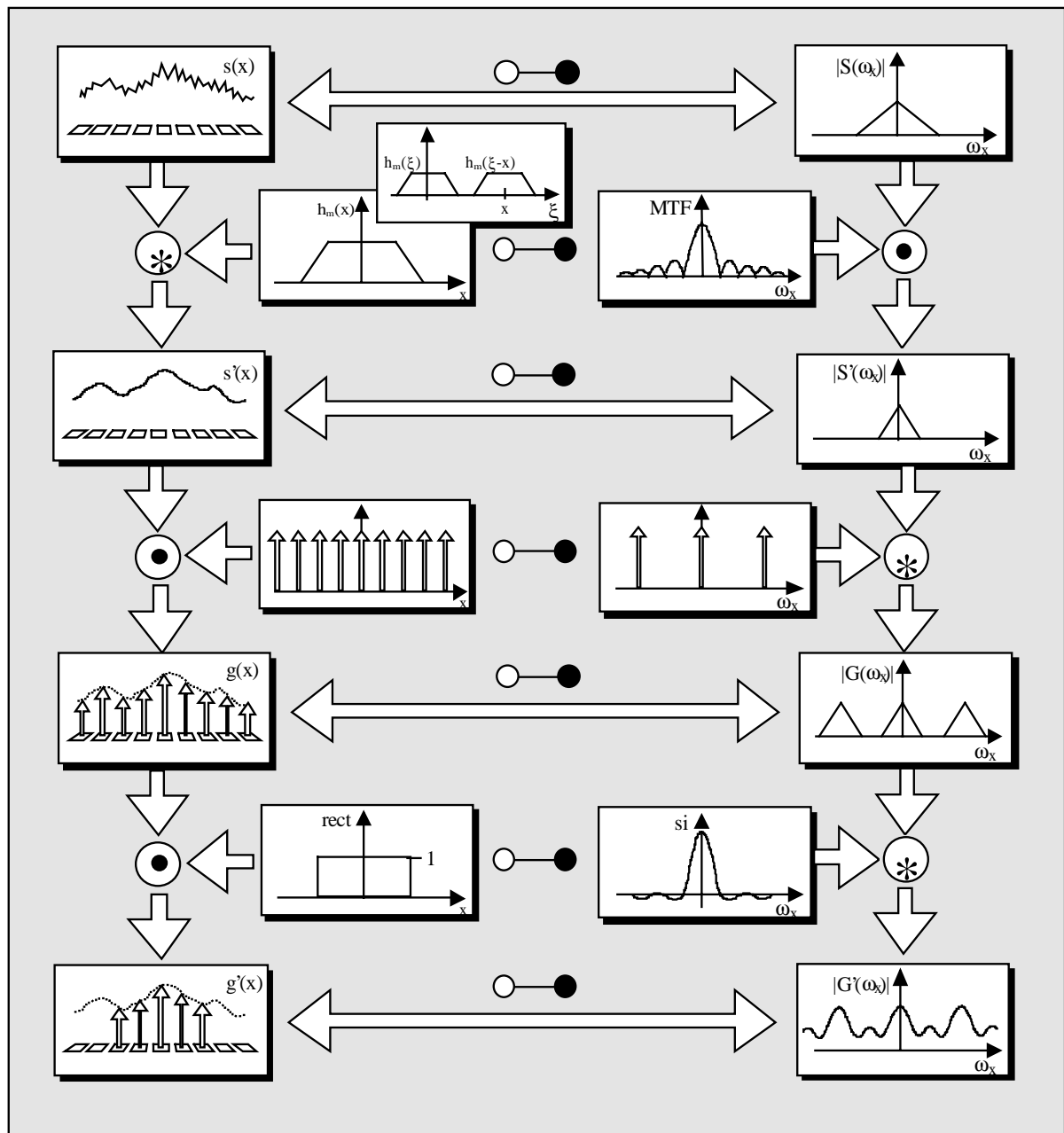


Bild 4.86: Mikroskopisch betrachtete Bildsignalaufnahme

Die makroskopische diskrete Punktantwort kann, wie das folgende Bild 4.6 verdeutlicht, aus $h_m(x)$ ermittelt werden.

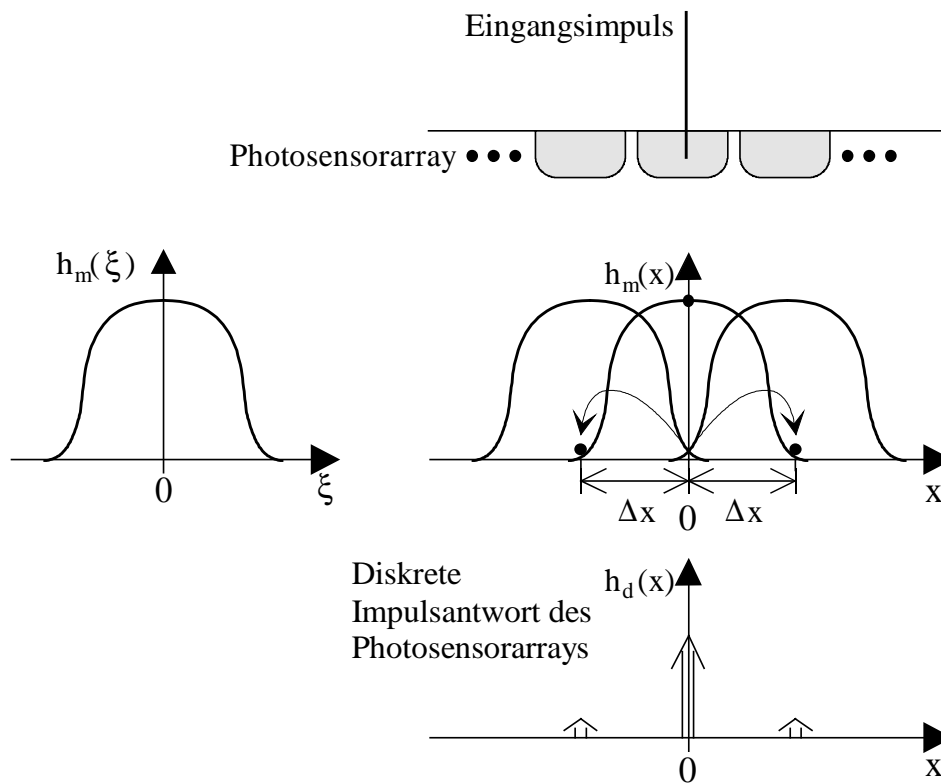


Bild 4.87: Zusammenhang zwischen $h_d(x)$ und $h_m(x)$

Die benachbarten Photosensorelemente (im Grenzfall unendlich viele) leisten einen Beitrag zur diskreten Impulsantwort, welche der an der Stelle $x=0$ abgetasteten und um $n \cdot \Delta x$ verschobenen mikroskopischen Apertur entspricht. Es gilt also:

$$h_d(n \cdot \Delta x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x) h_m(x - n \cdot \Delta x). \quad (4.88)$$

Da die diskrete Impulsantwort aus einer Abtastung der mikroskopischen Apertur hervorgeht, kann umgekehrt die mikroskopische Apertur nur dann aus der diskreten Impulsantwort rekonstruiert werden, wenn der Abstand der Photosensorelemente Δx , also das Abtastintervall, genügend klein ist und das Abtasttheorem im Ortsbereich erfüllt. Je kleiner der Abstand der Photosensorelemente ist, desto geringer ist jedoch auch die Ausdehnung der Photosensorelemente und damit breiterbandiger die MTF im Ortsfrequenzbereich und desto unwahrscheinlicher die Möglichkeit zur Rekonstruktion. Das bedeutet, daß in praktischen Fällen die Rekonstruierbarkeit der mikroskopischen Apertur aus der diskreten Impulsantwort nicht gegeben ist.

4.3 Verbesserung der Bildsignalaufnahme

Ein Photosensorarray kann, wie in Kapitel 4.1 und 4.2 gezeigt, als ein abgetastetes System interpretiert werden. In der Frequenzbereichsdarstellung eines abgetasteten Signals $|G(\omega_x)|$ wiederholen sich die Spektren des ursprünglichen Signals mit $2/\Delta x$ mal inversem Abtastintervall Δx (bzw. Abstand der Photosensorelemente). Bei zu großem Abtastintervall oder zu schmaler mikroskopischer Apertur, z.B. bei geringem Füllfaktor des Pixels, kann es vorkommen, daß sich breitbandige Eingangssignale im Basisband des Frequenzspektrums überlappen. Das Abtasttheorem im Ortsbereich ist dann nicht erfüllt. Das Eingangssignal wird also unterabtastet und man spricht vom sog. Aliasing, welches aus der Theorie der linearen *zeitinvarianten* Systeme (LZI- Systeme) her bekannt ist.

Kommt es andererseits zu starken Überlappungen der mikroskopischen Aperturen im Ortsbereich aufgrund der Photosensorgeometrie oder Übersprechen zwischen Photosensorelementen, so ist die MTF im Frequenzbereich sehr schmalbandig und das Eingangssignal erfährt eine starke Tiefpaßfilterung, die sich als Unschärfe des im Photosensorarray repräsentierten Bildes bemerkbar macht.

Die CMOS-Technologie bietet eine Auswahl verschiedener Photosensorelemente, sowie die Gestaltung der Geometrie der Photosensorelemente. Weiterhin bietet die CMOS-Technologie die Möglichkeit, mit gezielten Ablendungen durch Metall oder teilreflektierendes Polysilizium (etwa 70%ige Reflexion) eine Manipulation der mikroskopischen Apertur durchzuführen und auf diese Weise eine Anpassung an ggf. bekannte Ortsfrequenzeigenschaften auftreffender Eingangssignale vorzunehmen.

Wegen der endlichen Ausdehnung des Photosensorarrays in der Praxis kann es ggf. auch zu Aliasing im Ortsfrequenzbereich kommen wie Bild 4.5 (unten, rechts) zeigt. In diesem Fall kann man dem Photosensorarray eine Fensterfunktion als Gewichtungsfunktion aufprägen. Entsprechende Methoden sind aus der Theorie der LZI-Systeme bekannt (u.a. Hanning-, Hamming-Fensterfunktion)