

## 4 Produktspezifische Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausbeute

### 4.1 Grundlagen

In den bisherigen Ausführungen wurden die Grundlagen der Ausbeuteberechnung behandelt. So wurde bereits im Abschnitt 2.3.2 beschrieben, daß zur Berechnung der Ausbeute im wesentlichen drei Größen benötigt werden:

1. die Defektdichte  $D_0$  und die Defektgrößenverteilung  $S(d)$ , wobei  $d$  der Durchmesser eines kreisrunden Defekts ist,
2. die Kernelfunktion  $K(d)$ , die die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der ein kreisrunder Defekt des Durchmessers  $d$  bei der Wechselwirkung mit dem Layout einen Kurzschluß bzw. eine Unterbrechung verursacht
3. und eine Funktion, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, auf einer defektempfindlichen Fläche der Größe  $A_{red}$  keinen Defekt zu finden.

Das Ergebnis der im letzten Punkt beschriebenen Funktion entspricht natürlich der Ausbeute. Im Abschnitt 2.2 wurden mit den Formeln (2.3), (2.6), (2.9) und (2.13) bereits mehrere dieser Modelle zur Berechnung der Ausbeute aufgeführt. Um das Zusammenspiel der unter den Punkten 1 bis 3 genannten Größen zu verdeutlichen, soll der Einfachheit halber das Poisson-Modell benutzt werden:

$$Y = e^{-A_{red}D_0} \quad (4.1)$$

$$A_{red} = A_{Chip} \int_0^{\infty} K(d) \cdot S(d) \, dd \quad (4.2)$$

Im Abschnitt 2.3.1 wurde darauf hingewiesen, daß die Berechnung der Kernelfunktion  $K(d)$  in Gleichung (4.2) in den seltensten Fällen analytisch durchgeführt werden kann. Im Abschnitt 5 wird ein Simulationsprogramm vorgestellt, das die Berechnung dieser Kernelfunktion übernimmt. Je nach Komplexität des zu untersuchenden Layouts kann dieser Prozeß jedoch sehr zeitaufwendig sein.

Im Abschnitt 3.6 wurde erläutert wie sich der Kurvenverlauf der Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  ändert, wenn die reale Defektform berücksichtigt wird. Es stellt sich nun die Frage, welche Auswirkung die Korrektur der Defektgrößenverteilung auf die Ausbeuteberechnung hat. In dem Defektgrößenbereich, in dem  $S_{\text{kor}}(d)$  größer als  $S(d)$  ist (vgl. Abbildung 22), wird die Kernelfunktion  $K(d)$  gerade ihren Maximalwert von 1 erreichen. Das Produkt  $K(d) \cdot S_{\text{kor}}(d)$  liegt demnach um den Faktor  $S_{\text{kor}}(d) / S(d)$  über dem Produkt  $K(d) \cdot S(d)$ . Die nach (4.2) berechnete reduzierte Chipfläche fällt nun größer aus und führt mit dem jeweiligen Ausbeutemodell zu einer geringeren Ausbeute. Im Abschnitt 7.2 wird auf diesen Umstand nochmals eingegangen.

In den folgenden Abschnitten werden einige in der Praxis häufig vorkommende Ereignisse diskutiert, die die Empfindlichkeit eines Designs auf Defekte und damit die Kernelfunktion ändern. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie man eine zeitaufwendige Neuberechnung der Kernelfunktion, die durch entsprechende Simulationsprogramme durchgeführt werden müßte, umgehen kann, indem ein einmal bekannter Kernel in eine andere Kurvenform überführt wird.

### **4.2 Layoutskalierungen**

Bei einer Skalierung des Layouts ändert sich in der Gleichung (4.2) die Größe der reduzierten Chipfläche. Zum einen wird die Chipfläche  $A_{\text{Chip}}$  selbst geändert und zum anderen ändert sich die vom Layout abhängige Kernelfunktion, da sich die Leitbahnbreiten und deren Abstände zueinander ebenfalls ändern. Alle anderen Größen, wie die Defektgrößenverteilung  $S(d)$  und die Defektdichte  $D_0$  bleiben von der Skalierung des Layouts unberührt.

Angenommen, man hat für unskalierte Layoutdaten eine Kernelfunktion  $K_u(d)$  bestimmt, so stellt sich nun die Frage, wie sich für einen Layoutskalierungsfaktor  $L$  die Kernelfunktion  $K_s(d)$  gegenüber  $K_u(d)$  ändert<sup>1</sup>. Die Lösung ist:

$$K_s(d) = K_u(d/L) \quad (4.3)$$

$d$  Defektdurchmesser

$L$  Layoutskalierungsfaktor

Die Kernelfunktion wird also lediglich entlang der x-Achse gestaucht oder gestreckt, der prinzipielle Kurvenverlauf ändert sich jedoch nicht [105].

### 4.3 Maßübertragungsschwankungen und Sizing

Durch Prozeßeinflüsse, wie Über- oder Unterätzen sowie Über- oder Unterbelichten kann es vorkommen, daß eine Leitbahn auf dem Wafer etwas breiter oder schmaler ist, als es die Layoutdaten vorschreiben. Auch dieser Fehler in der Übertragung der Layoutmaße auf reale Maße beeinflusst die Kernelfunktion der realen Strukturen auf dem Wafer ([105], [108]).

Solche Maßübertragungsfehler können vielfältige Ursachen haben. Allgemein werden sie unter dem Begriff der Kantenverschiebung zusammengefaßt. Der mathematische Ausdruck für die Kantenverschiebung ist:

$$KV = \frac{\text{Entwurfsmaß} - \text{Ätzmaß}}{2} \quad (4.4)$$

$KV$  Kantenverschiebung

---

<sup>1</sup> Es wird vorausgesetzt, daß ein Skalierungsfaktor im mathematischen Sinne gemeint ist, d.h., bei  $L > 1$  werden die Leitbahnbreiten und -abstände größer.

Normalerweise liegt der Wert für KV bei einem Bruchteil der im Design vorkommenden Leitbahnbreite. Beim Entwurf komplexer Mikroprozessoren ist es heute aber üblich, zunächst ein Layout zu entwickeln, das zum Teil breitere Leitbahnen, größere Gateflächen, u.s.w. enthält. Erst während des Produktionsprozesses werden sowohl die Ätz- und Belichtungszeiten für diese Strukturen als auch deren Layoutdaten nach und nach so verändert, bis die kleinst mögliche, noch herstellbare Strukturbreite erreicht ist. Im Layout sind sozusagen "Reserven eingebaut". Der Prozeß der stufenweisen Strukturbreitenverminderung wird als "Sizing" bezeichnet. Die Wirkung des Sizing kann der Wirkung einer durch statistische Prozeßschwankungen erzeugten Kantenverschiebung gleichgesetzt werden. Der Wert für  $KV_{\text{Sizing}}$  ist jetzt allerdings wesentlich größer.

Da die Kantenverschiebung prozeßabhängig ist, bleibt sie nicht für alle Chips oder alle Wafer konstant, sondern unterliegt einer gewissen Schwankung um einen Mittelwert. Ist der Wert für KV kleiner als 0, dann sind die Strukturen auf dem Wafer um den Betrag  $2 \cdot KV$  breiter und länger als im Layout angegeben. Das bedeutet gleichzeitig, daß die Ränder benachbarter Leitbahnen dichter beieinander liegen.

So können einerseits diese Leitbahnen bereits von kleineren Defekten kurzgeschlossen werden, andererseits braucht man größere Defekte, um sie zu unterbrechen. Die Empfindlichkeit der realen Struktur auf kurzschlußverursachende Defekte ist also gegenüber dem originalen Layout angestiegen, die Empfindlichkeit auf Unterbrechungen ist dagegen gesunken.

Nach der Definition im Abschnitt 2.3.1 wird eben diese Empfindlichkeit des Layouts auf Defekte eines gewissen Durchmessers von der Kernelfunktion beschrieben. Bei einer Kantenverschiebung  $KV \neq 0$  muß sich also die Kernelfunktion der realen Struktur von der Kernelstruktur des ursprünglichen Layouts unterscheiden.

Die Auswertung entsprechender Meßstrukturen, auf die im Abschnitt 7.1.2 noch eingegangen wird, zeigt, daß der Wert von KV um einen Mittelwert mit der Standardabweichung  $\sigma_{KV}$  normalverteilt ist. Betrachtet man zunächst eine Kantenverschiebung mit  $KV > 0$ , dann ist mit Gleichung (4.4) sofort klar, daß der Raum zwischen zwei benachbarten Leitbahnen um den doppelten Betrag von KV breiter wird. Damit verschiebt sich die Kernelfunktion für Kurzschlüsse im Mittel um eben diesen Betrag nach rechts und für Unterbrechungen nach links (Abbildung 23) [108].

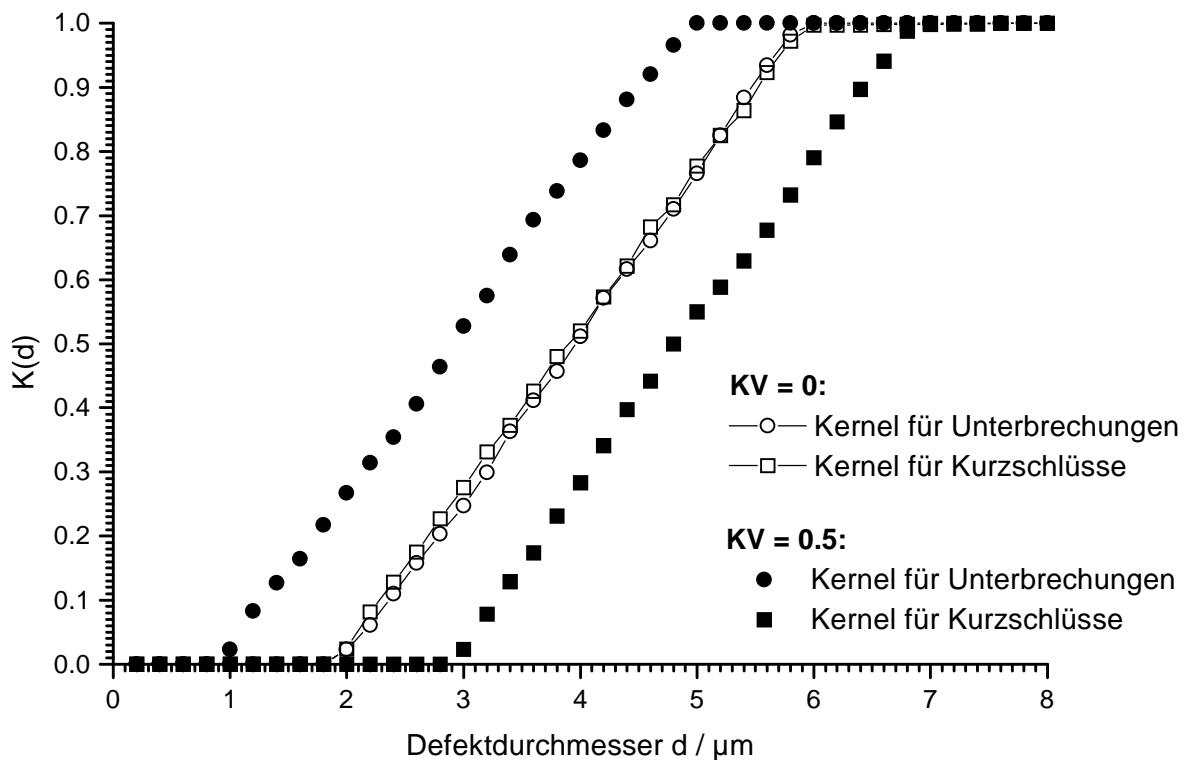


Abbildung 23: Verschiebung der Kernelfunktion durch Kantenverschiebung

Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Ausführungen des Abschnitts 4.2 kann nun für die Kernelfunktion erstmals die folgende allgemeingültige Formel angegeben werden:

$$K(d) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} [K_u(x/L) \cdot G(x-d, -2 \cdot KV, \sigma_{KV})] dx & \text{Unterbrechung} \\ \int_{-\infty}^{\infty} [K_u(x/L) \cdot G(x-d, 2 \cdot KV, \sigma_{KV})] dx & \text{Kurzschluß} \end{cases} \quad (4.5)$$

$K_u(d)$	Kernel der unveränderten Layoutdaten
$d$	Defektdurchmesser
$L$	Layoutskalierungsfaktor
$G$	Gaußfunktion (Normalverteilungsfunktion) der Form $y = G(\text{aktueller Wert, Mittelwert, Standardabweichung})$
$KV$	Kantenverschiebung aus (4.4)
$\sigma_{KV}$	Standardabweichung der Kantenverschiebung

In [108] wird die Wirkung der Kantenverschiebung anders behandelt:

- Die Kernelfunktion bleibt unverändert, statt dessen wird der Defektdurchmesser entsprechend vergrößert bzw. verkleinert.

Demzufolge wird die Defektgrößenverteilung  $S(d)$  analog der obigen Gleichung (4.5) verändert. Die Anwendung dieser Umformung führt im allgemeinen bei der Berechnung der reduzierten Chipfläche mit Gleichung (4.2) nicht zum selben Ergebnis, denn es ist für das Produkt aus  $K(d)$  und  $S(d)$  mathematisch nicht egal, ob die Kernelfunktion oder die Defektgrößenverteilung entlang der x-Achse verschoben wird. Die folgenden Diagramme sollen den Effekt der Kurvenverschiebung weiter verdeutlichen:

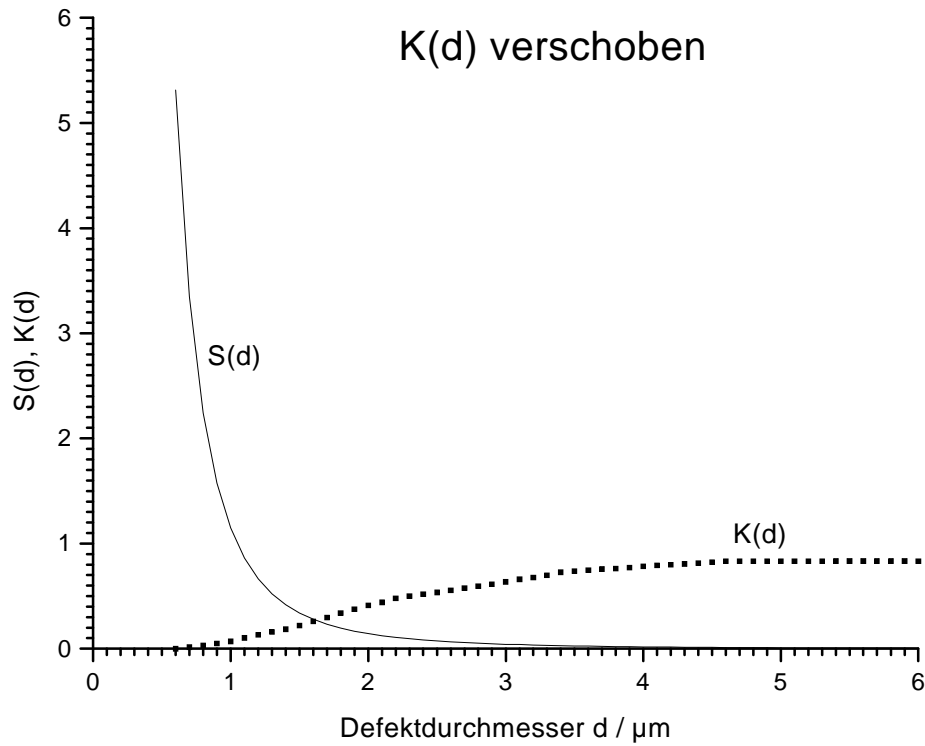


Abbildung 24:  $K(d)$  wurde gegenüber der originalen Kurve entlang der  $x$ -Achse verschoben.

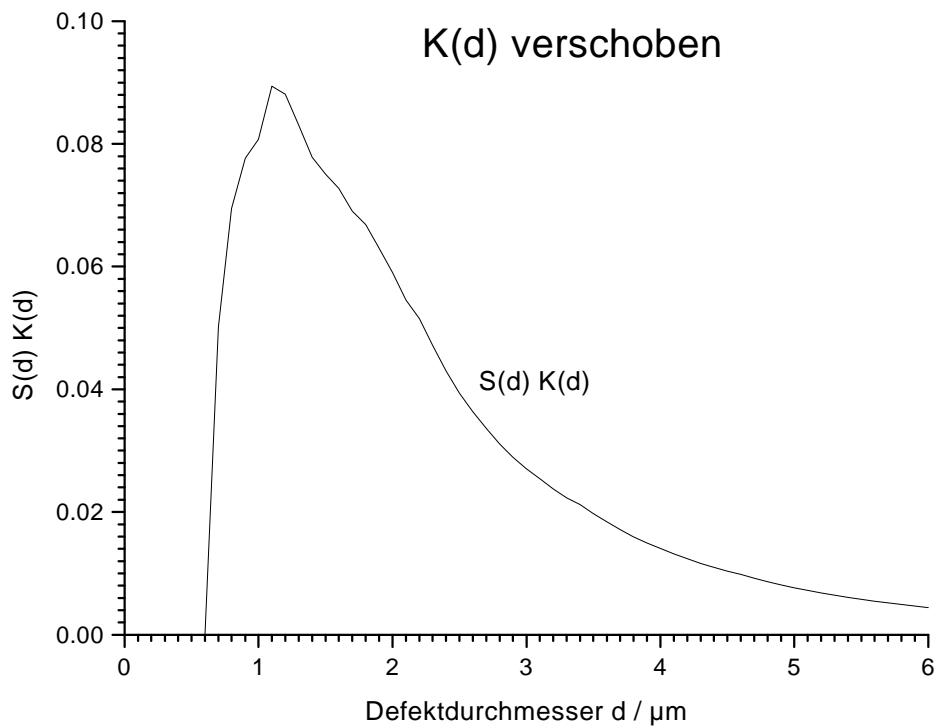


Abbildung 25: Darstellung des Produktes  $S(d) \cdot K(d)$ ;  $K(d)$  wurde gegenüber der originalen Kurve entlang der  $x$ -Achse verschoben.

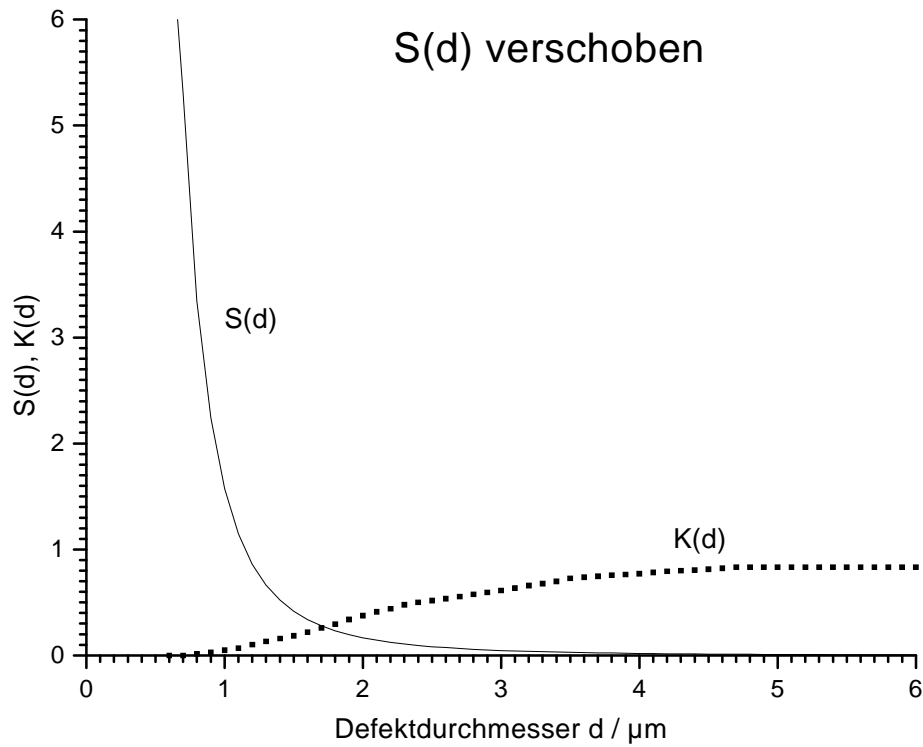


Abbildung 26:  $S(d)$  wurde gegenüber der originalen Kurve entlang der  $x$ -Achse verschoben.

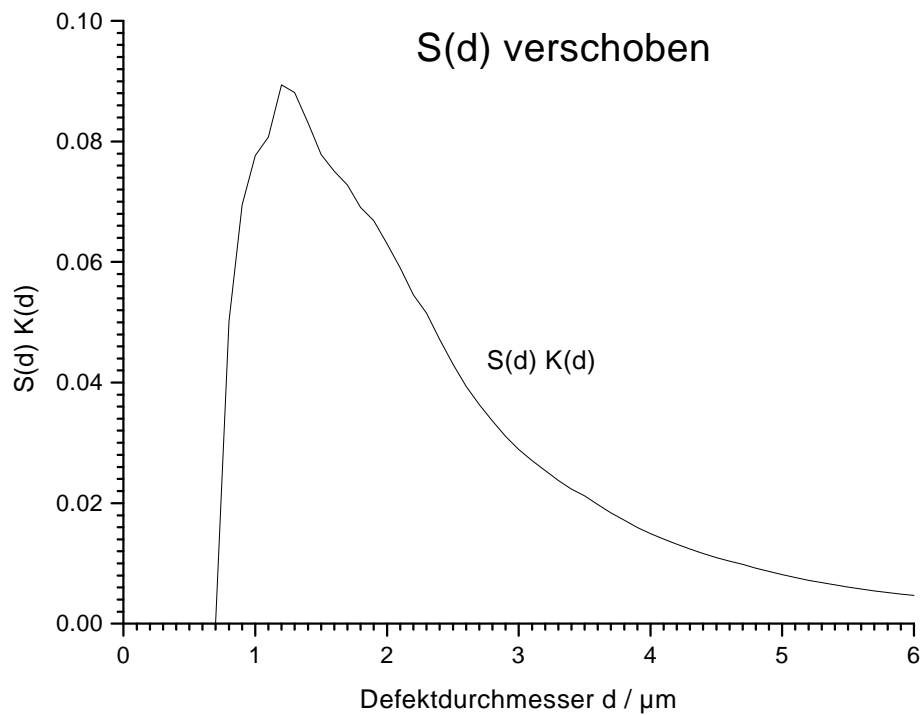


Abbildung 27: Darstellung des Produktes  $S(d) \cdot K(d)$ ;  $S(d)$  wurde gegenüber der originalen Kurve entlang der  $x$ -Achse verschoben.



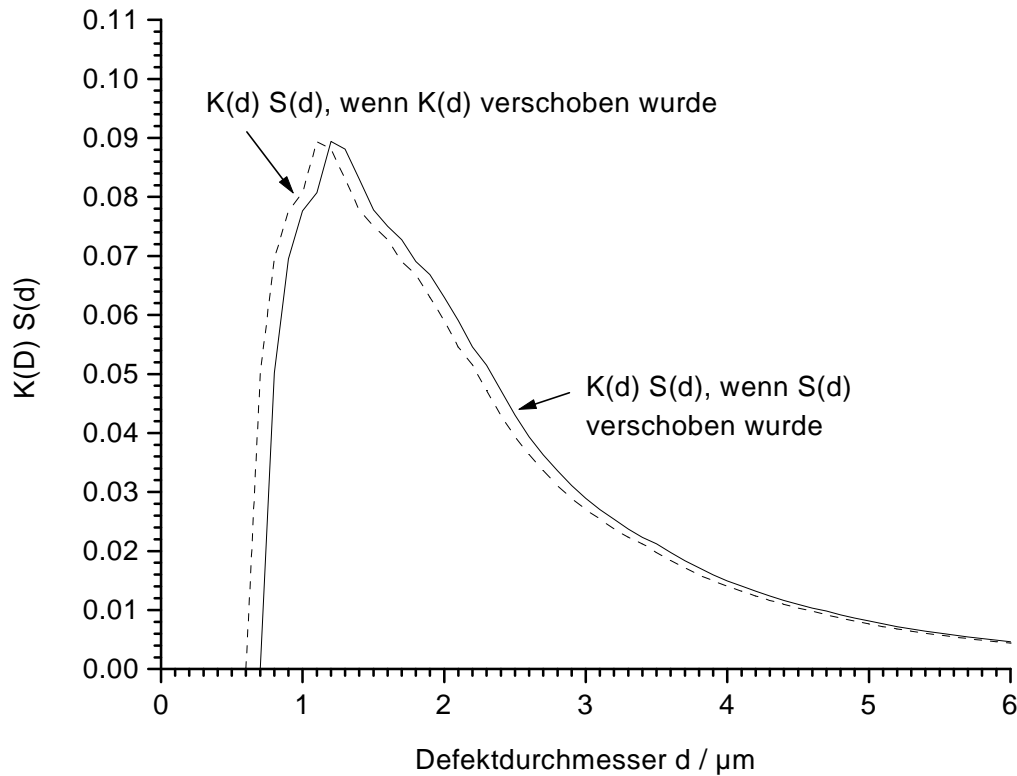


Abbildung 28: Produkt aus  $K(d) \cdot S(d)$ , Gegenüberstellung der Verschiebeeffekte

#### 4.4 Ausbeute als Funktion der Layoutskalierung

Im Abschnitt 4.2 wurde beschrieben, wie sich Skalierungen des Layouts auf die Kernelfunktion und somit auf die Ausbeuteberechnung auswirken. Auch wurde im Abschnitt 4.3 diskutiert, wie Prozeßeinflüsse, die die Maßübertragung verändern, berücksichtigt werden können. Es soll nun untersucht werden, wie sich das gleichzeitige Auftreten beider Faktoren auf die zu erwartende Ausbeute auswirkt.

Dazu soll wieder vom einfachsten Ausbeutemodell, dem Poisson-Modell (siehe Gleichung (4.1)), ausgegangen werden. Außerdem wird für die weiteren Ausführungen eine Kantenverschiebung von  $KV = 0.1 \mu\text{m}$  angenommen. Zusätzlich soll berücksichtigt werden, daß Leitbahnbreiten und -abstände, die einen bestimmten Grenzwert unterschreiten, beim Herstellungsprozeß lithographisch nicht mehr aufgelöst werden können. Der erwähnte Grenzwert ist dabei sowohl vom Auflösungsvermögen der verwendeten Anlagen als auch vom verwendeten Photolack abhängig und soll nachfolgend als Auflösungsgrenze bezeichnet werden. Die folgende Grafik zeigt die Ausbeute für ein Beispiellayout in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor bei einer angenommenen Auflösungsgrenze von  $0.6 \mu\text{m}$ :

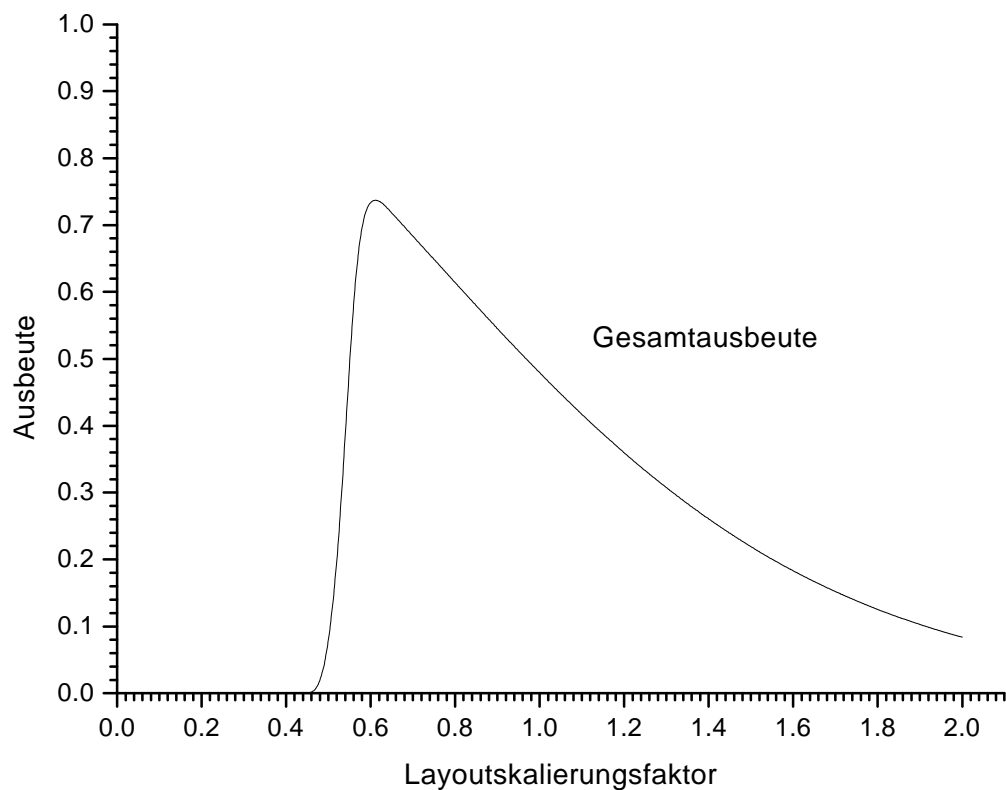


Abbildung 29: Ausbeute als Funktion der Layoutskalierung

Dieser Kurvenverlauf läßt sich wie folgt erklären [105]:

- Bei einem Skalierungsfaktor, der größer als 1 ist, wird das Layout in x- und y-Richtung gleichermaßen gedehnt, und die Fläche wächst demnach quadratisch mit dem Skalierungsfaktor an. Die Wahrscheinlichkeit, daß auf dieser Fläche ein Defekt liegt, wird somit größer. Mit größerem Skalierungsfaktor werden die kleinen Defekte, von denen es sehr viele gibt (siehe Abschnitt 3.3 zur Erklärung der Defektgrößenverteilung), keinen Schaden mehr anrichten können, da durch die Skalierung die Leitbahnbreiten und die Leitbahnabstände größer geworden sind. Nur noch die relativ wenigen großen Defekte können die Ausbeute beschränken. Sinkt die Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  für Defekte größerer Ausdehnung nicht schnell genug ab, dann können auf der vergrößerten Layoutfläche insgesamt mehr Defekte einen Schaden anrichten, als auf der Ausgangsfläche; die Ausbeute wird geringer.
- Wird das Layout durch den Skalierungsfaktor kleiner, dann wird einerseits die "Einfangfläche" kleiner, andererseits wirken sich jetzt zusätzlich die kleineren Defekte auf die Ausbeute aus. Es hängt nun wieder vom Verlauf von  $S(d)$  und natürlich vom Layout selbst ab, wie sich die Ausbeute entwickelt.
- Ab einem gewissen Skalierungsfaktor sinkt die berechnete Ausbeute jedoch drastisch ab und erreicht sehr schnell den Wert 0. Das liegt daran, daß bei kleinen Skalierungsfaktoren die Leitbahnen so dicht beieinander liegen und so schmal werden, daß es einerseits lithographisch nicht mehr möglich ist, so schmale Strukturen aufzulösen. Andererseits wirken sich in diesem Skalierungsbereich Schwankungen der Maßübertragungsfehler immer stärker aus. Das geht soweit, daß schließlich allein durch die Kombination aus Skalierungsfaktor und Kantenverschiebung die schmalsten Leitbahnen unterbrochen bzw. die am dichtesten beieinanderliegenden Leitbahnen kurzgeschlossen werden.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Ausbeute durch zwei Mechanismen von der Layoutskalierung abhängt: Einerseits wird sie durch die Anwesenheit von Defekten mit deren Größenverteilung  $S(d)$  und andererseits von der Auflösungsgrenze, der auftretenden Kantenverschiebung und deren Standardabweichung beschränkt. Die folgende Grafik zeigt für diese Mechanismen den Verlauf der Ausbeutefunktionen in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor. Die Gesamtausbeute in Abbildung 29 ist das Produkt aus den in der folgenden Abbildung 30 gezeigten Kurven.

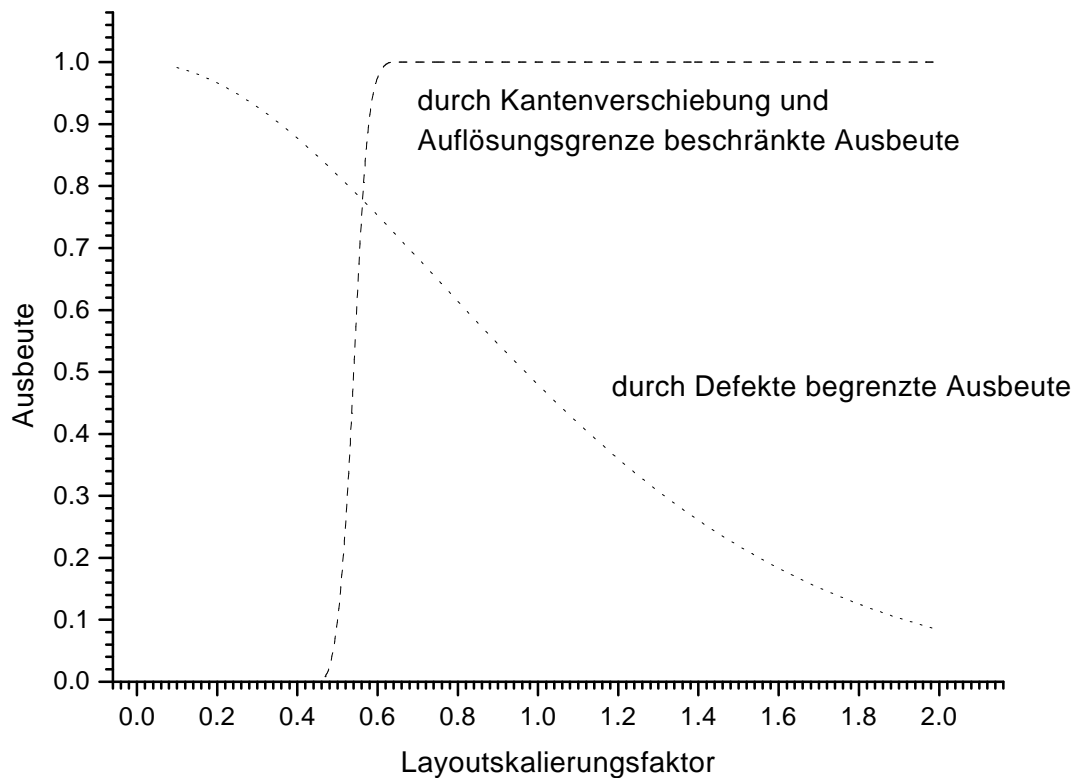


Abbildung 30: Ausbeute in Abhängigkeit vom Layoutskalierungsfaktor

## 4.5 Ausbeute bei redundanten Bauelementen

Ein weiterer seit langem bekannter Weg, die Ausbeute zu steigern, besteht darin, daß man eine gewisse Redundanz im jeweiligen Bauelement vorsieht. Das heißt, daß zum Beispiel in einem 256 kB-Speicher statt der notwendigen 256 Spalten von vornherein 257 Spalten entworfen werden. Wird nun eine der Spalten durch einen Defekt unbrauchbar, so kann über einen speziellen eingebauten Mechanismus die eine zusätzliche Spalte aktiviert werden. Somit ist das Bauelement weiter verwendungsfähig, und die Ausbeute bleibt von dem Defekt unberührt. In [60], [61], [74] und [117] werden entsprechende Berechnungsmodelle beschrieben, die die Redundanz eines Bauelementes berücksichtigen. Deshalb soll an dieser Stelle nur das Grundprinzip erläutert werden.

Heutige Designs sind meist modular aufgebaut, so daß sich die Ausbeute des gesamten Chips aus dem Produkt der Ausbeute der einzelnen Module ergibt. Der Einfachheit halber sei eines dieser Module aus  $n$  gleichen Zellen aufgebaut. Ein Modul soll die ihm zugedachte Aufgabe erfüllen können, wenn eine beliebige Auswahl von  $m$  Zellen aus den  $n$  vorhandenen Zellen frei von Defekten ist. Außerdem muß der Teil des Moduls defektfrei sein, der für den Reparaturmechanismus benötigt wird. Nach [117] ergibt sich für die Modulausbeute:

$$Y_{Modul} = \left[ \sum_{i=0}^{n-m} \binom{n}{i} \cdot Y_{Zelle_r}^{n-i} (1 - Y_{Zelle_r})^i \right] \cdot Y_{Zelle_n}^n \quad (4.6)$$

$Y_{Modul}$	Ausbeute des gesamten Moduls
$n$	Anzahl gleichartiger Zellen im Modul
$m$	Anzahl der Zellen, die zum Betrieb notwendig sind
$Y_{Zelle-r}$	Ausbeute einer einzelnen Zelle
$Y_{Zelle-n}$	Ausbeute des Reparaturmechanismus (nicht redundant)

Da man nach Gleichung (4.6) zwischen der Ausbeute einer einzelnen Zelle und der Ausbeute des Reparaturmechanismus unterscheiden muß, erhöht das den Aufwand bei der Extraktion der kritischen Flächen aus den Layoutdaten. Der Aufwand läßt sich aber eingrenzen, wenn der redundante Teil des Layouts komplett mit anderen Layernummern versehen wird als der nicht redundante Reparaturmechanismus.