

2 Grundlagen

2.1 Defekte

Bei der Fertigung mikroelektronischer Schaltkreise sind vor allem sogenannte Defekte für Fehlfunktionen oder gar Totalausfälle des Produktes verantwortlich.

Obwohl in vielen Veröffentlichungen das Wort "Defekt" benutzt wird, meinen die Autoren nicht immer denselben Sachverhalt. In dieser Arbeit sollen analog zu [12] und [18] die folgenden Vereinbarungen gelten:

- **Partikel** können auf einem Schaltkreis in hoher Anzahl festgestellt werden, die jedoch keinerlei Schaden anrichten. Entweder weil sie auf Stellen des Chips gefallen sind, an denen gar keine Strukturen hergestellt wurden, oder -im Falle eines Aluminiumpartikels- weil sie zu klein waren, um zum Beispiel zwei benachbarte Leitbahnen kurzschließen zu können.
- Die Kategorie der **Ausfälle** verursacht zumindest einen Teilausfall des Chips, so daß er nicht mehr all seine Funktionen erfüllen kann. Häufig wird diese Art der Partikel auch als "Killerdefekt" bezeichnet.
- **Defekte** sollen hier Partikel sein, die zumindest eine Leitbahn, oder -allgemeiner formuliert- eine Figur des Layouts berühren. Es ist damit noch nicht gesagt, daß ein solches Partikel sofort zum Ausfall des ganzen Chips führen muß.

Aus dieser Festlegung läßt sich eine weitere Unterteilung der Defekte vornehmen:

- die Ausbeute beeinflussende Defekte
- die Zuverlässigkeit beeinflussende Defekte (latente Defekte)

2.1.1 Ausbeutevermindernde Defekte

Als ausbeutevermindernde oder -relevante Defekte sollen die Defekte bezeichnet werden, die elektrische Parameter eines Schaltkreises bei ihrem Vorkommen deutlich verändern. Im Leitbahnkomplex handelt es sich dabei um Leitbahnunterbrechungen und um Kurzschlüsse zwischen benachbarten Leitbahnen. Im Gateoxidkomplex stellen dagegen sogenannte Pinholes Defekte dar, die die Schaltkreisfunktion sofort beeinträchtigen.

2.1.2 Zuverlässigkeitsvermindernde Defekte

Diese Art von Defekten führt nicht sofort zum Ausfall des Schaltkreises. Es kann sogar sein, daß durch diese Defekte die Schaltungsparameter zunächst nur sehr geringfügig verändert werden. Häufig handelt es sich um Leitbahnabdünnungen oder -einschnürungen bzw. um Materialverunreinigungen durch Fremdatome im Gateoxid.

Erst nach einer gewissen Betriebsdauer machen sich diese Defekte bemerkbar und führen schließlich zum Ausfall des Bauelements.

2.2 Ausbeutemodelle

Ausbeuteverluste lassen sich einerseits auf systematische Fehler der Produktionsanlagen, sogenannte grobe Fehler (zum Beispiel beim Waferhandling) und andererseits auf statistisch verteilte Defekte zurückführen. Die statistisch zufällige Verteilung der Defekte auf der Waferoberfläche wurde bereits in den Anfangsjahren der Mikroelektronik untersucht und dokumentiert (vgl. [79], [76]). Dabei muß man sich zunächst zwischen zwei Grundmodellen der Statistik entscheiden, dem Bose-Einstein-Modell und dem Maxwell-Boltzmann-Modell ([45], [46]).

Die beiden Modelle unterscheiden sich in einer grundsätzlichen Annahme: Sind die Ereignisse (hier die Defekte), für die eine statistische Verteilung angegeben werden soll, voneinander unterscheidbar im oder nicht? Die Antwort auf diese Frage ist dabei von fundamentaler Bedeutung, wie die folgenden Abschnitte zeigen werden.

2.2.1 Maxwell-Boltzmann-Statistik

Nimmt man zunächst den Fall unterscheidbarer Defekte an (Maxwell-Boltzmann-Modell), von denen eine Gesamtzahl von M Stück auf N Chips zu verteilen seien, dann gibt es dafür N^M Möglichkeiten [46]. Für einen Wafer der Fläche S , auf dem N Chips mit einer Fläche A platziert wurden, ergibt sich nun der folgende Zusammenhang:

$$M = N \cdot A_c \cdot D_0 = S \cdot D_0 = N \cdot \lambda \quad (2.1)$$

| | |
|-----------|--|
| M | <i>Gesamtanzahl der Defekte</i> |
| N | <i>Anzahl der Chips</i> |
| A_c | <i>defektempfindliche Chipfläche</i> |
| D_0 | <i>Defektdichte (Defekte pro Fläche)</i> |
| S | <i>zur Verfügung stehende Waferfläche</i> |
| λ | <i>Produkt aus A_c und D_0</i> |

Die Ausbeute entspricht mathematisch gesehen der Wahrscheinlichkeit, unter allen produzierten Chips einen defektfreien Chip zu finden. Diese Wahrscheinlichkeit ergibt sich nach der obigen Annahme von unterscheidbaren Defekten wie folgt:

$$Y_{MB} = \frac{(N-1)^M}{N^M} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^M = \left(1 - \frac{\lambda}{M}\right)^M \quad (2.2)$$

| | |
|----------|--|
| Y_{MB} | <i>Ausbeute nach Maxwell-Boltzmann-Statistik</i> |
|----------|--|

Durch Logarithmieren und anschließende Taylorreihenentwicklung für den Fall $\lambda \approx 0$, welcher der Annahme weniger Defekte bzw. vieler Chips entspricht, geht diese Gleichung in eine Exponentialform über:

$$Y_{MB} = e^{-\lambda} = e^{-A_c D_0} \quad (2.3)$$

Dieses Ausbeutemodell ist bekannt als das Poisson-Modell [47]. Nach [68] sind an die Anwendbarkeit dieser Formel drei Voraussetzungen geknüpft:

1. Eine beliebig ausgewählte Fläche hat dieselbe Wahrscheinlichkeit, einen Defekt einzufangen, wie eine beliebige andere Fläche der gleichen Größe.
2. Der Ort eines Objektes in der Fläche 1 ist unabhängig vom Ort eines Objektes in der Fläche 2.
3. Es gibt keine Tendenz der Clusterbildung innerhalb einer Fläche (vgl. Abschnitt 2.2.4).

2.2.2 Bose-Einstein-Statistik

Die Annahme, daß die Defekte nicht unterscheidbar sind, führt zum Bose-Einstein-Modell. Danach berechnet sich die Anzahl der Möglichkeiten, eine Gesamtzahl von M Defekten auf N Chips zu verteilen, nach der folgenden Formel (vgl. [46], [128]):

$$X_{BE}(M, N) = \frac{(M + N - 1)!}{M!(N - 1)!} \quad (2.4)$$

| | |
|----------|---|
| M | <i>Gesamtanzahl Defekte</i> |
| N | <i>Anzahl Chips</i> |
| X_{BE} | <i>Anzahl der Möglichkeiten, M Defekte auf N Chips zu verteilen</i> |

Somit ergibt sich bei analogem Vorgehen zu Abschnitt 2.2.1 für die Ausbeute:

$$Y_{BE} = \frac{X_{BE}(M, N - 1)}{X_{BE}(M, N)} = \frac{N - 1}{M + N - 1} = \frac{N - 1}{N \cdot (\lambda + 1) - 1} \quad (2.5)$$

| | |
|----------|--|
| Y_{BE} | <i>Ausbeute nach Bose-Einstein-Statistik</i> |
|----------|--|

Für den Fall großer N ergibt sich somit näherungsweise:

$$Y_{BE} = \frac{1}{1 + \lambda} = \frac{1}{1 + A_c D_0} \quad (2.6)$$

Dieser Ausdruck wurde erstmals von Seeds und Price angegeben und ist unter diesem Namen als Ausbeutemodell verbreitet ([47], [48]).

2.2.3 Vergleich Maxwell-Boltzmann- / Bose-Einstein-Statistik

Sinkt die Anzahl der Defekte (M) bei gleichbleibender Anzahl Chips (N), oder wird bei konstantem M die Fläche der Chips verkleinert und somit deren Anzahl auf dem Wafer vergrößert, so sinkt zwangsläufig das Produkt $M \cdot N = \lambda$. Werden die Gleichungen (2.3) und (2.6) für den Fall $\lambda \approx 0$ in eine Taylorreihe entwickelt, so ergibt sich folgendes Bild:

$$\begin{aligned} Y_{MB} &= e^{-\lambda} \approx 1 - \lambda \\ Y_{BE} &= \frac{1}{1 + \lambda} \approx 1 - \lambda \end{aligned} \quad (2.7)$$

Diese Berechnung deutet an, daß für den Fall kleiner Produkte aus Defektdichte und defektempfindlicher Chipfläche beide Modelle ineinander überführt werden können. Die folgende Grafik zeigt eine Gegenüberstellung der mit den Formeln (2.3) und (2.6) berechneten Ausbeuten in Abhängigkeit vom Produkt $A_c D_0$ (vgl. auch [50]):

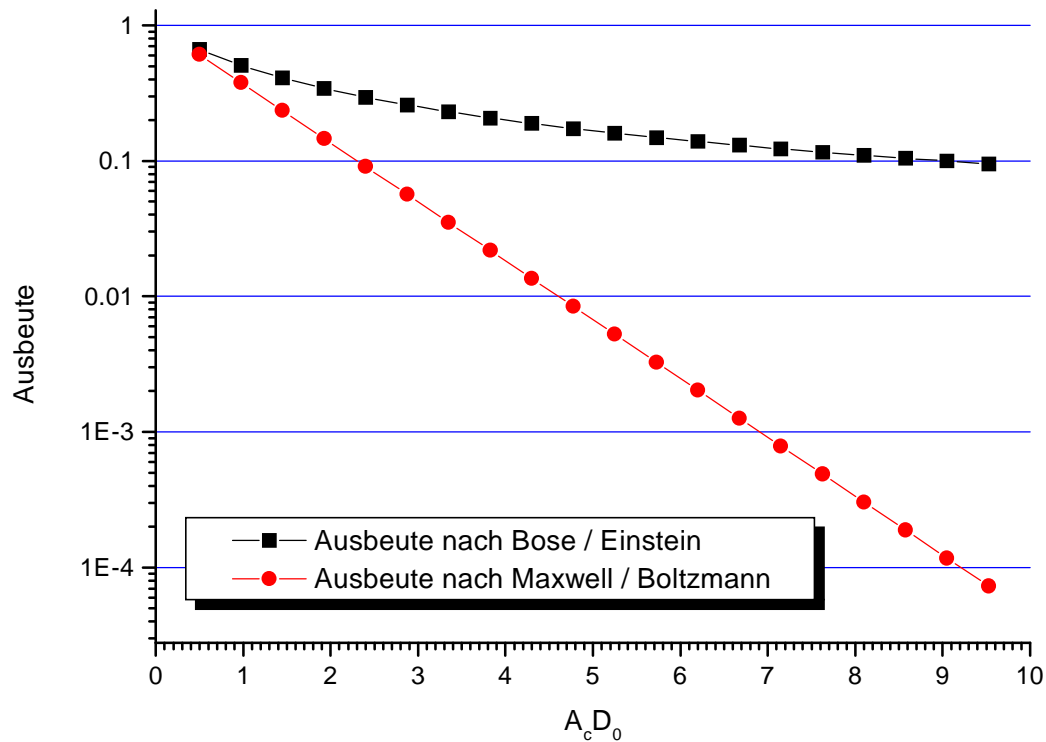


Abbildung 2: Vergleich der berechneten Ausbeute für die Bose-Einstein- und die Maxwell-Boltzmann-Statistik

Während bei kleinen Produkten aus Chipfläche und Defektdichte die beiden Modelle nahezu identische Ergebnisse liefern, weichen sie bei großen Produkten immer mehr voneinander ab. Diese Diskrepanz wird in [46]-[49] beschrieben, indem man feststellt, daß das Poisson-Modell die Ausbeute für eine gegebene Chipfläche und bekannte Defektdichte unterschätzt, dagegen bei Anwendung des Seeds-Price-Modells ein der Praxis mehr entsprechendes Ergebnis erzielt wird.

Diese Aussage gilt jedoch nicht generell, vielmehr entscheidet die Defektcharakteristik der konkreten Fertigungsstrecke über den Einsatz des entsprechenden Modells. So wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit gezeigt, wie durch eine Erweiterung des Poisson-Modells die Abhängigkeit der Ausbeute vom Produkt $A_c D_0$ für einen konkreten Fall korrekt modelliert werden kann.

2.2.4 Defektcluster

Man stellte frühzeitig fest, daß die Gleichverteilung der Defekte nicht immer gegeben ist und man Gebiete auf dem Wafer findet, in denen wesentlich mehr Defekte enthalten sind als in einem angrenzenden Nachbargebiet. Dieser Effekt ist in der Literatur als *Clustering* bekannt (vgl. [45], [46], [48], [50]-[54], [56], [79]). Die Defektdichte unterliegt also einer örtlichen Schwankung auf ein und demselben Wafer. Auch ist sie beim Übergang von einem Wafer zum anderen und von einer Charge zur nächsten nicht konstant.

Zur Charakterisierung der Defektdichte reicht es demnach nicht aus, nur die Anzahl der registrierten Defekte pro Fläche zu zählen. Vielmehr muß die örtliche Schwankung in einer Modellfunktion berücksichtigt werden. Es wird immer wieder beschrieben ([50]-[54], [62]-[64]), daß die Werte der Defektdichte, gemessen an verschiedenen Stellen des Wafers, über einen recht großen Bereich streuen und nicht gleichverteilt sind.

Den ersten Versuch, diese Verteilung zu beschreiben, unternahm Murphy (vgl. [47], [48]). Zunächst ging er von dem bekannten Poisson-Modell aus und erweiterte die Formel zur Berechnung der Ausbeute um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(D)$ für die Defektdichte D :

$$Y = \int_0^{\infty} e^{-DA_c} f(D) dD \quad (2.8)$$

D *Defektdichte am jeweiligen Ort des Wafers*

$f(D)$ *Wahrscheinlichkeitsverteilung der Defektdichte*

Murphy beobachtete, daß die Defektdichte um einen Mittelwert herum verteilt ist und setzte für $f(D)$ die Gaußverteilung ein. Der resultierende Ausdruck läßt sich aber analytisch nicht integrieren. Die Gaußverteilung wurde deshalb zur Vereinfachung durch eine Dreieck-Funktion ersetzt. Diese Substitution führte zum folgenden Ausdruck ([46]-[48]):

$$Y = \left(\frac{1 - e^{-D_0 A_c}}{D_0 A_c} \right)^2 \quad (2.9)$$

D_0 *mittlere Defektdichte*

Es sei noch erwähnt, daß die Formel (2.9) durch Ersetzen der Dreieck-Funktion mit der Delta-Funktion, in der Art $f(D) = \delta(D - D_0)$, in das Poisson-Modell (2.3) übergeht [64].

In den folgenden Jahren wurden weitere Modelle zur Berücksichtigung der Defektdichteverteilung veröffentlicht, die hier aber nicht alle aufgeführt werden sollen. Es sei dazu auf [45]-[50], [64] und [66] verwiesen. Stellvertretend soll nur eine weitere wichtige Funktion für $f(D)$ angeführt werden, die im späteren Verlauf zur Berechnung verwendet wird:

- In einem Anfang der 70'er Jahre von Okabe entwickelten und von Stapper populär gemachten Modell wird zur Beschreibung der Defektdichteverteilung die Gammafunktion benutzt [79]:

$$f(D) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot D^{\alpha-1} e^{-\frac{D}{\beta}} \quad (2.10)$$

D *Defektdichte am jeweiligen Ort des Wafers*

α, β *Parameter der Funktion, Erklärung im Text*

Γ *Gammafunktion*

$f(D)$ *Wahrscheinlichkeitsverteilung der Defektdichte*

Die Parameter α und β sind dabei eng mit den gemessenen Werten für D verbunden. Nach [62] und [79] gelten folgende Zusammenhänge:

$$D_0 = \alpha \beta \quad (2.11)$$

$$\text{Var}(D) = \alpha \beta^2 \quad (2.12)$$

D_0 *mittlere Defektdichte*
 Var *Varianz*

Setzt man (2.10) in (2.8) ein, dann erhält man ein Modell zur Ausbeuteberechnung, das unter dem Namen *Negatives Binomialmodell* bekannt geworden ist [54]:

$$Y = \left(1 + \frac{A_c D_0}{\alpha}\right)^{-\alpha} \quad (2.13)$$

Egal welches Modell zur Beschreibung der Defektdichteverteilung nach der entsprechenden Datenanalyse gewählt wird, das prinzipielle Vorgehen ist immer gleich. Möchte man beispielsweise die Defektdichteschwankung auf einem einzelnen Wafer bestimmen, verfährt man wie folgt (vgl. auch [23], [24]):

- Über den Wafer wird zunächst ein gedachtes engmaschiges Netz gelegt und die Defektdichte für jede der einzelnen Maschen bestimmt. Dies ergibt eine erste Wahrscheinlichkeitsverteilung der einzelnen Defektdichten.
- Im nächsten Schritt werden die Maschen des Netzes erweitert und wiederum die Häufigkeit der Einzeldefektdichten registriert. So fährt man fort, bis nur noch eine Masche auf dem Wafer vollständig plaziert werden kann.
- Zum Schluß werden alle ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen in einer einzigen Verteilung zusammengefaßt.

Während der Zusammenarbeit mit einem Projektpartner wurde nach Anwendung des geschilderten Algorithmus die im folgenden Diagramm dargestellte Defektdichteverteilung bestimmt:

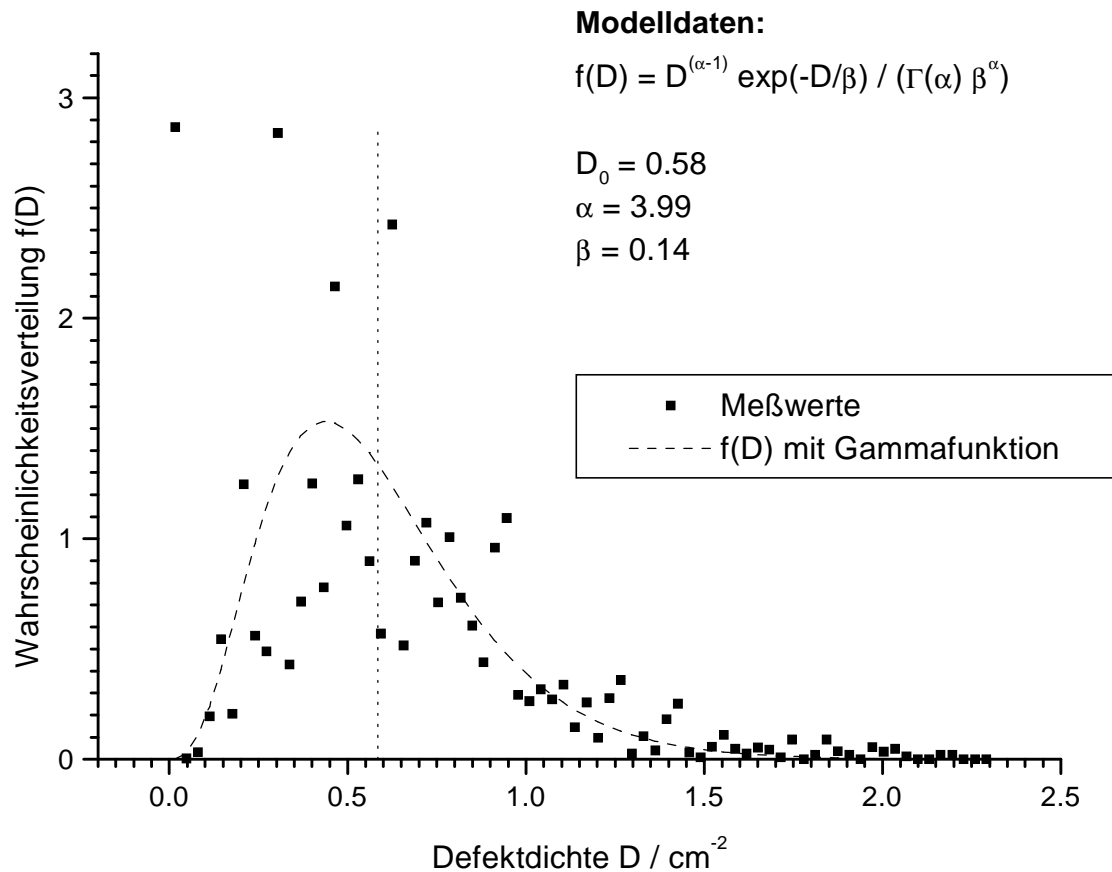


Abbildung 3: Zur Bestimmung der Defektdichte, Erklärung im Text

Bei dem hier vorgestellten Versuchsergebnis kann gezeigt werden, daß die Defektdichteverteilung am besten mit der Gleichung (2.10) unter Verwendung der Gammafunktion beschrieben werden kann. In der Grafik sind die Meßwerte und die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt, deren Parameter mit Hilfe einer Kurvenanpassung bestimmt wurden.

2.3 Ausfallwahrscheinlichkeit

Bei der Klassifizierung der Defekte im Abschnitt 2.1 wurde darauf hingewiesen, daß nicht jeder Defekt auch sofort zu einer Fehlfunktion der gesamten Schaltung führen muß. Abgesehen vom Gateoxid- und dem Zwischenisolatorkomplex wirken sich sehr kleine Defekte kaum auf die Funktionstüchtigkeit des Schaltkreises aus. Erst ab einer gewissen Größe sind Defekte in der Lage, benachbarte Leitbahnen miteinander zu verbinden (Kurzschluß) oder eine Leitbahn vollständig zu durchtrennen (Unterbrechung).

2.3.1 Definition des Kernels

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Defekt eine Wirkung auf die Schaltung hat, hängt eng mit seiner Größe und dem Ort seines Auftretens zusammen. Betrachtet man zunächst einen Kurzschluß, so ist klar, daß diese Wahrscheinlichkeit um so größer wird, je größer der Defektdurchmesser und je geringer der Abstand benachbarter Leitbahnen ist. Eine solche Wahrscheinlichkeitsfunktion nennt man Kernelfunktion [47]. Sie wird allgemein mit $K(d)$ bezeichnet, wobei d für den Durchmesser eines kreisrunden Defekts steht. Für sehr einfache Layouts oder zumindest für sehr einfache Layoutteile läßt sich diese Funktion analytisch beschreiben. So gilt beispielsweise für ein einfaches Gitter paralleler Leitbahnen, bei dem der Leitbahnabstand und die Leitbahnbreite gleich sind, die Formel [47]:

$$K(d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & d < w \\ \frac{1}{2w} \cdot d - 0.5 & w \leq d \leq 3w \\ 1 & 3w < d \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

| | |
|--------|--|
| d | Durchmesser eines kreisrunden Defekts |
| w | Leitbahnabstand bzw. Leitbahnbreite |
| $K(d)$ | Wahrscheinlichkeit, mit der ein Defekt mit dem Durchmesser d einen Kurzschluß im Gitter verursacht |

Das folgende Beispiel zeigt den prinzipiellen Kurvenverlauf der obigen Kernelfunktion für Kurzschlüsse an einem Leitbahngitter. Die Leitbahnbreite und die Abstände benachbarter Leitbahnen betragen in diesem Beispiel jeweils $0.8 \mu\text{m}$. Die durchgezogene Kurve stellt dabei die analytische Lösung dar, die eingezeichneten Meßpunkte wurden durch eine Monte-Carlo-Simulation berechnet.

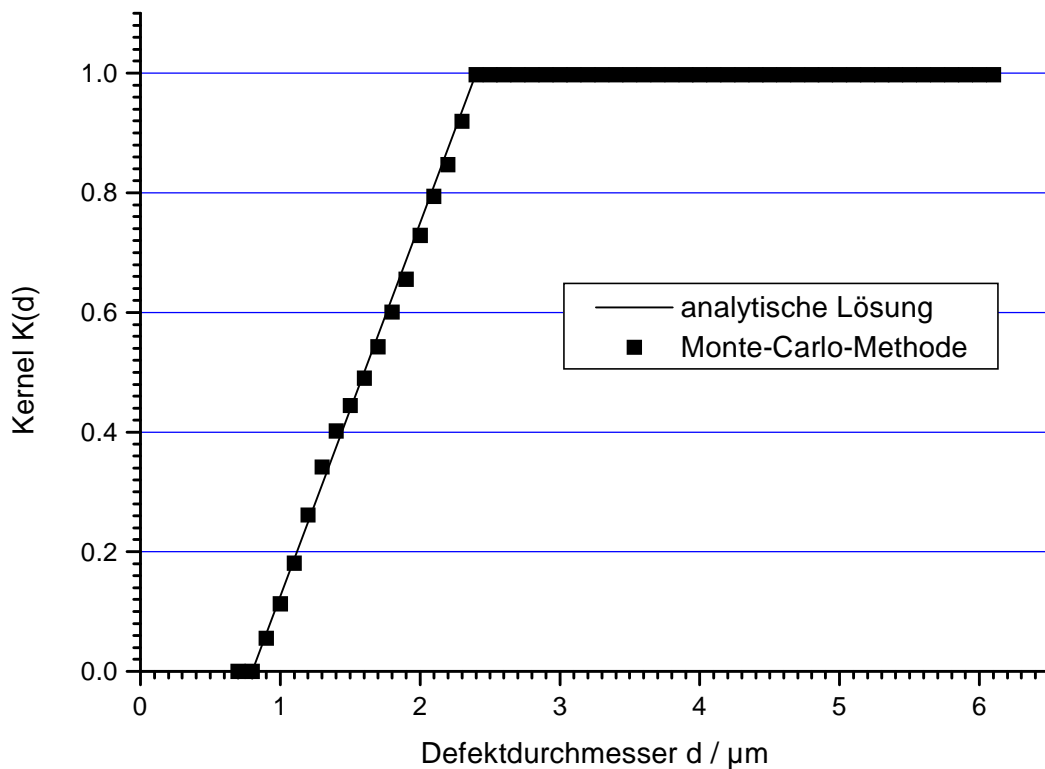


Abbildung 4: Vergleich der nach analytischer Berechnung mit (2.14) und Monte-Carlo-Methode bestimmten Kernelfunktionen

Die Kernelfunktion ergibt erst ab einem Defektdurchmesser von $d \geq 0.8 \mu\text{m}$ einen Wert größer 0. Ein Defekt dieses Durchmessers kann nur dann, wenn er genau in die Mitte zweier benachbarter Leitbahnen fällt, einen Kurzschluß verursachen. Da die Wahrscheinlichkeit, daß er genau dort auftritt, aber recht gering ist, ist auch die Wahrscheinlichkeit gering, daß er überhaupt eine Wirkung hervorruft. Wird der Defekt aber größer, dann muß er nicht mehr nur genau in der Mitte liegen, das heißt, die Menge der Orte, an denen er einen Schaden hervorrufen kann, steigt. Ebenso steigt auch die Kernelfunktion an. Ist der Durchmesser des Defekts schließlich so groß wie der Leitbahnabstand plus zwei Leitbahnbreiten, dann schließt er unabhängig von seiner Lage immer mindestens zwei Leitbahnen kurz, die Kernelfunktion liefert den Wert 1.

2.3.2 Definition der kritischen Fläche

Im vorigen Abschnitt wurde erklärt, daß ein Defekt einer gewissen Größe nur dann einen Schaden an der Schaltung hervorrufen kann, wenn sein Zentrum in einen bestimmten Bereich benachbarter Leitbahnen fällt. Die Summe dieser Orte ergibt eine Fläche, die sogenannte kritische Fläche. Die kritische Fläche ist demnach die Fläche, in die das Zentrum eines Defekts fallen muß, um einen Schaltkreis funktionsuntüchtig zu machen [47]. Damit ist diese kritische Fläche sowohl vom Layout als auch vom Defektdurchmesser abhängig. Sie wird für einen bestimmten Defektdurchmesser allgemein nach der folgenden Formel berechnet:

$$A_{\text{krit}}(d) = K(d) \cdot A_{\text{Chip}} \quad (2.15)$$

| | |
|-------------------|--|
| A_{krit} | <i>kritische Fläche des Chips</i> |
| A_{Chip} | <i>Gesamtfläche des Chips</i> |
| d | <i>Durchmesser eines kreisrunden Defekts</i> |
| $K(d)$ | <i>Wahrscheinlichkeit, mit der ein Defekt mit dem Durchmesser d das Schaltungslayout beschädigt, Kernelfunktion</i> |

Da im Fertigungsprozeß nicht nur eine einzige Defektgröße auftritt, erweitert man häufig die obige Formel und erhält die sogenannte reduzierte Chipfläche ([47], [48]):

$$A_{red} = A_{Chip} \int_0^{\infty} K(d) \cdot S(d) \, dd \quad (2.16)$$

A_{red} *reduzierte Chipfläche*
 $S(d)$ *Wahrscheinlichkeitsverteilung der Defektgröße, Defektgrößenverteilung (ausführliche Erläuterungen im Abschnitt 3.3)*

Die reduzierte Chipfläche wird in der Literatur auch als defektempfindliche Chipfläche bezeichnet. Im nachfolgenden Text werden beide Bezeichnungen parallel benutzt und sollen die gleiche Bedeutung haben.

Betrachtet man die Formeln (2.3), (2.6), (2.9) und (2.13), dann stellt man fest, daß in all diesen Gleichungen zur Berechnung der Ausbeute die eben definierte reduzierte bzw. defektempfindliche Chipfläche vorkommt. Zur Ausbeuteberechnung ist es also notwendig, neben der Defektdichte, die Defektgrößenverteilung $S(d)$ und schließlich die Kernelfunktion $K(d)$ zu bestimmen. Die nächsten Abschnitte werden die dazu erforderlichen Schritte beschreiben.