

## 7 Produktspezifische Anwendungsbeispiele

Wie schon mehrfach erwähnt, werden zur Berechnung der Ausbeute eines Produktchips die Defektdichte  $D_0$ , die Defektgrößenverteilung  $S(d)$ , die Kernelfunktion  $K(d)$  und ein Ausbeutemodell benötigt.

In den folgenden Abschnitten soll die Ermittlung dieser Größen erläutert und die Handhabung des Defektsimulationsprogrammes demonstriert werden.

### 7.1 Prozeßcharakterisierung

#### 7.1.1 Präparation eines Defektmonitorchips

Zur Bestimmung von Defektdichte und -größenverteilung wurde eine Charge von 24 Wafern mit dem im Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Defektmonitorchip präpariert. Die Chips der ersten 12 Wafer bestanden aus den zwei Metallagen Metall 1 und Metall 2. Metall 1 wirkte dabei als sogenannte Holperstrecke unter Metall 2 (siehe Abbildung 13, Ebene "Poly" wurde durch die Ebene "Metall 1" ersetzt). So konnten sowohl die Güte des Zwischenisolators als auch die Defektgrößenverteilungen und die Defektdichten des Metall 1 und Metall 2 gleichzeitig bestimmt werden.

Bei den Wafern 13-24 wurde auf die Holperstrecke verzichtet und nur Metall 2 abgeschieden, um die Defektgrößen dieses Layers am Mikroskop besser bestimmen zu können, da die optisch störende Untergrundstruktur entfällt.

Beim Vergleich der beiden Metallebenen wurde im Verlauf der Auswertungen festgestellt, daß die Ebenen praktisch dieselben Werte, sowohl für die Defektdichte als auch für die Defektgrößenverteilung liefern. Es wird deshalb in den weiteren Betrachtungen auf eine gesonderte Behandlung dieser Layer verzichtet und nur noch auf die Metall-2-Ebene eingegangen.

Nach erfolgter Präparation wurden die Defektmonitorstrukturen an einem speziellen Meßplatz elektrisch hinsichtlich verschiedener Kriterien geprüft, von denen hier die wichtigsten aufgezählt sind:

1. Widerstände der Mäanderleitungen (Metall 1 und 2)
2. Widerstandsmessung zwischen Kamm A und Mäander sowie zwischen Kamm B und Mäander (Metall 1 und 2)
3. Leckstromtest zwischen der unteren Metall 1- und der oberen Metall 2-Ebene
4. Auswertung einer Struktur zur Bestimmung der Kantenverschiebung

Alle Daten wurden mit einem zu diesem Zweck entwickelten Wafermap-Programm ausgewertet. Mit diesem Programm lassen sich u.a. die Kurzschlußorte der Defekte, deren Anzahl und ihre Verteilung über die jeweiligen Wafer feststellen. Auch die Kantenverschiebung, auf deren Bedeutung im Abschnitt 4.3 eingegangen wurde, läßt sich aus den experimentellen Daten mit dem Wafermap-Programm direkt bestimmen.

Die Defekte, deren Orte durch die elektrischen Messungen ermittelt wurden, wurden am Mikroskop aufgesucht und auf zwei verschiedene Arten vermessen:

1. Es wurde gezählt, wie viele Leitbahnen vom jeweiligen Defekt kurzgeschlossen wurden. Daraus läßt sich der elektrisch wirksame Defektdurchmesser bestimmen. Wenn die Form der Defekte zufällig ist, wird durch dieses Verfahren ein elektrisch wirksamer Defektdurchmesser bestimmt, der dem mittleren Defektdurchmesser entspricht.
2. Die Defekte wurden mittels einer Mikrometerskala im Mikroskop vermessen (siehe Abschnitt 3.6 und Abbildung 20).

### 7.1.2 Bestimmung der Kantenverschiebung

Durch die elektrischen Messungen (eine KV-Meßstruktur pro Chip) wurde die folgende Verteilung der Kantenverschiebung ermittelt:

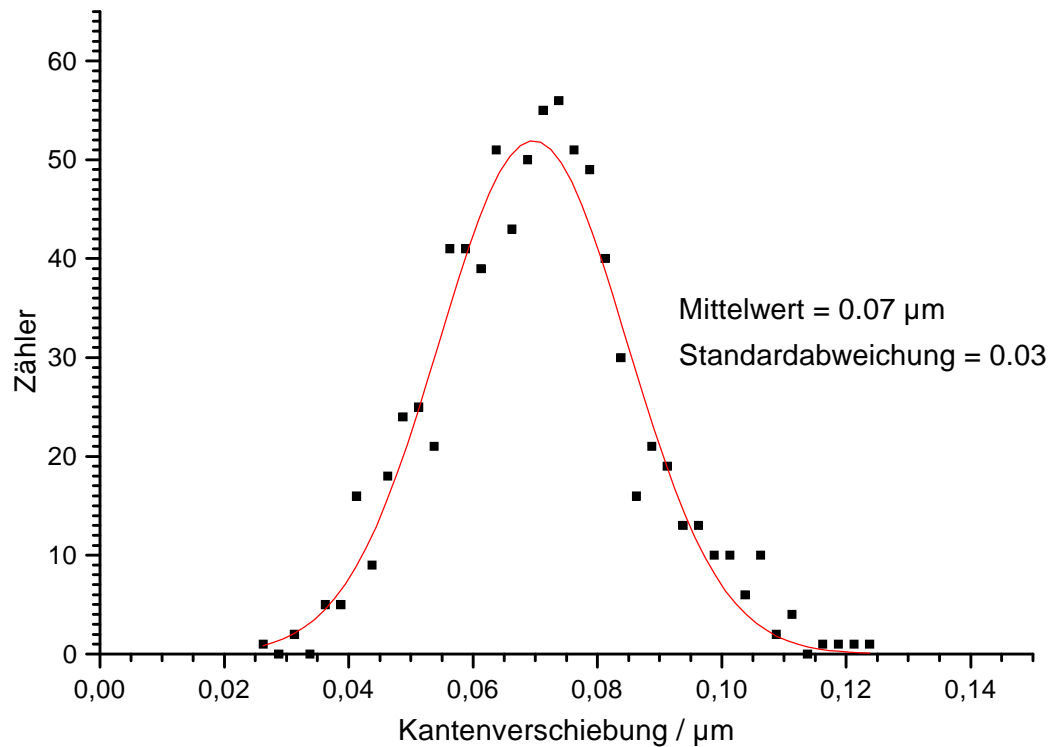


Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der Kantenverschiebung im Metall 2 des Monitorchips. Die durchgezogene Kurve entspricht der Normalverteilung (durch Kurvenanpassung bestimmt).

Der relativ kleine Mittelwert von 0,07  $\mu\text{m}$  bedeutet, daß die Strukturen auf den Wafern um 0,14  $\mu\text{m}$  schmaler sind, als es die Layoutdaten vorschreiben. Dieser Wert ist damit so klein, daß er innerhalb der technologischen Grenzen liegt. Auf die Bedeutung der Kantenverschiebung für die Ausbeutevorhersage wird im Abschnitt 7.2 nochmals eingegangen.

### 7.1.3 Bestimmung der Ausbeute und der mittleren elektrisch wirksamen Defektdichte des Defektmonitorchips

#### 7.1.3.1 Ausbeute und Defektdichte im Metall

Zunächst wurde die praktisch erzielte Ausbeute des Defektmonitorchips für die Metall 2-Ebene bestimmt. Die Berechnung wurde jeweils für die drei verschiedenen Strukturbreiten und für den gesamten Chip ( $1 \text{ Chip} = 24 \text{ Subchips} = 8 \cdot 0.8 \mu\text{m} + 8 \cdot 1.2 \mu\text{m} + 8 \cdot 1.6 \mu\text{m}$ ) durchgeführt (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14). Es ergibt sich dabei folgende Grafik:

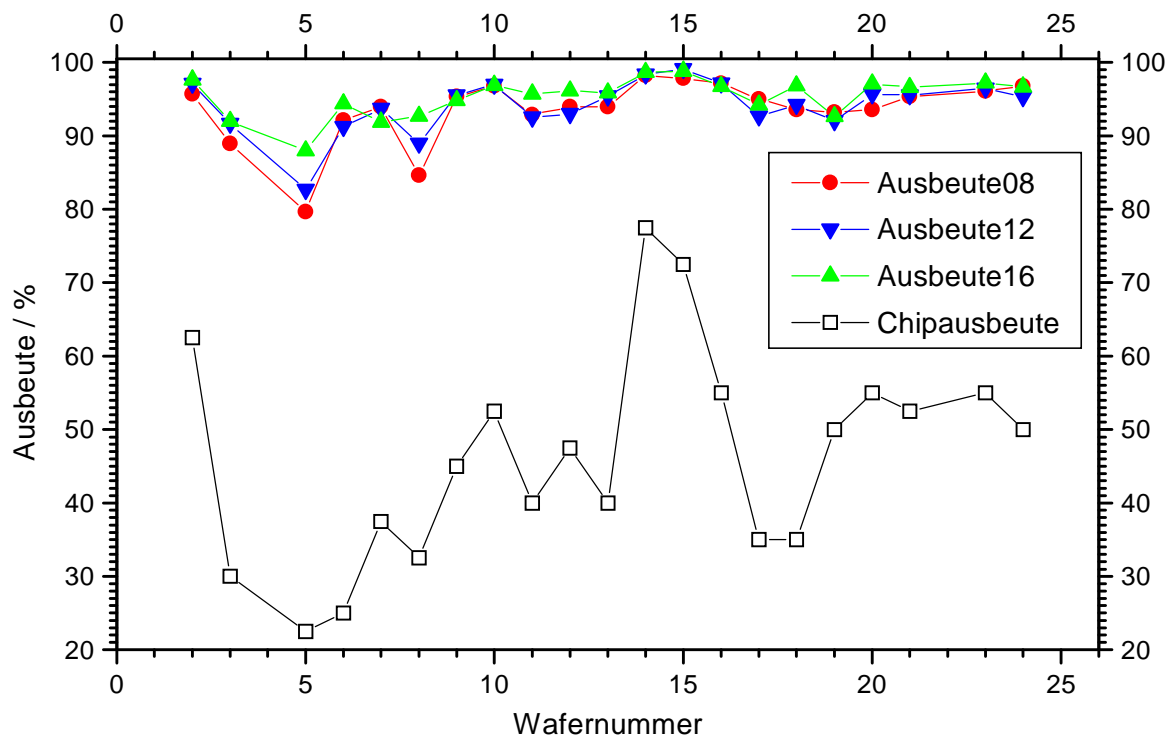


Abbildung 50: Verlauf der Ausbeute der jeweiligen Strukturen, ermittelt über alle Subchips der jeweiligen Rastergröße ( $0.8 \mu\text{m}$ ,  $1.2 \mu\text{m}$ ,  $1.6 \mu\text{m}$ ) auf dem jeweiligen Wafer, Bezugsfläche ist die Subchipfläche, Chipausbeute: Die Ausbeute des gesamten Chips (ein Chip ist nur dann "gut", wenn alle Subchips "gut" sind). Die Bezugsfläche ist hier die Chipfläche.

Die mittlere elektrisch wirksame Defektdichte wurde bestimmt, indem alle Defekte, unabhängig von ihrer Größe, gezählt wurden.

Ergebnisse: ca. 0.56 Kurzschlußdefekte / cm<sup>2</sup>

ca. 0.08 Unterbrechungen / cm<sup>2</sup>

Die Chipausbeute für die Metallebene des Monitorchips beträgt im Mittel  $Y_{\text{exp}} = 46.3 \%$  (Mittelwert der ChipYield-Kurve in Abbildung 50).

Die Bestimmung der Defektdichte durch Zählen aller Defekte und anschließende Division durch die bewertete Fläche setzt voraus, daß die Defekte über den Wafer gleichmäßig verteilt sind. Nur so ist die Angabe der mittleren Defektdichte gerechtfertigt. Sind die Defekte nicht gleichmäßig auf der Waferoberfläche verteilt, spricht man von sogenannten Defektclustern. Wie die Defektdichte im Falle einer Clusterbildung bestimmt wird, wurde schon im Abschnitt 2.2.4 beschrieben. Mit den vorliegenden Meßdaten ergibt sich unter Anwendung des dortigen Verfahrens die folgende Defektdichtenhäufigkeitsverteilung:

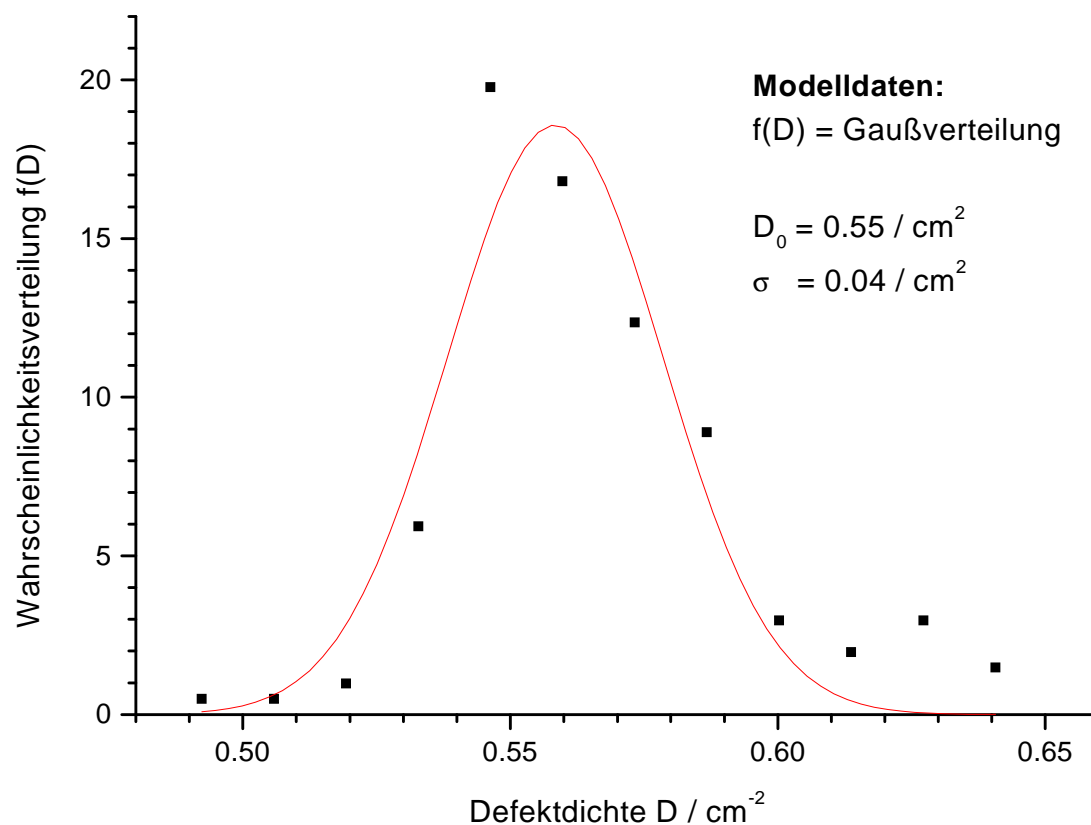


Abbildung 51: Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Defektdichte im Metall 2

An die experimentell ermittelten Punkte ließ sich die Gaußfunktion in guter Näherung anpassen. Als mittlere Defektdichte wurde  $D_{0,2}=0.55$  Kurzschlußdefekte /  $\text{cm}^2$  berechnet. Daß dieser Wert nur sehr wenig vom bereits vorher bestimmten  $D_{0,1}=0.56$  abweicht, deutet auf eine verschwindend geringe Clusterbildung hin. Man kann somit von einer gleichmäßigen Verteilung der Defekte auf dem Wafer sprechen.

Für die im Abschnitt 7.3 noch näher behandelte Ausbeutevorhersage bedeutet das, daß die im Abschnitt 2.2.1 beschriebene Maxwell-Boltzmann-Statistik und damit das Poisson-Modell zur Ausbeuteberechnung anwendbar sein wird.

#### ***7.1.3.2 Ausbeute und Defektdichte im Zwischenisolator***

Elektrische Messungen zwischen den beiden Metallebenen lassen die Bestimmung der Defektdichte des Zwischenisolators zu. Eine Defektgrößenverteilung ist hier aber nicht sinnvoll, da nur eine gleichmäßig dicke Isolatorschicht verfügbar ist. Alle registrierten Defekte sind also mindestens so groß, wie die Isolatorschicht dick ist.

Nach dem im Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Verfahren der Maschenbildung zur Bestimmung der Defektdichte ergeben sich folgende Werte:

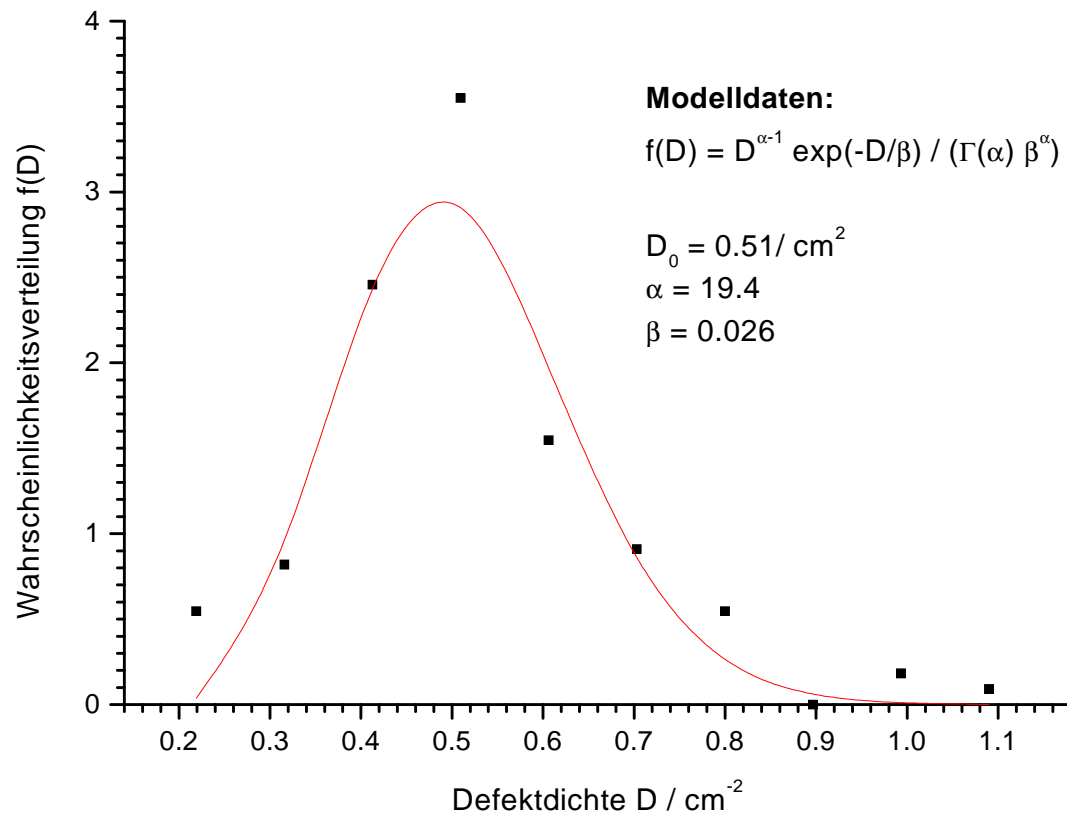


Abbildung 52: Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Defektdichte im Zwischenisolator

Die an die Meßpunkte angepaßte Verteilung entspricht jetzt der Gleichung (2.10), und es ergibt sich eine Defektdichte von  $D_{0,2} = 0.51 \text{ cm}^{-1}$ . Nach der konventionellen Methode, die Defekte zu zählen und die Anzahl durch die Registrierfläche zu dividieren, wird dagegen ein Wert von  $D_{0,2} = 0.52 \text{ cm}^{-1}$  ermittelt. Da beide Werte auch hier nahezu gleich sind, läßt das den Schluß zu, daß die Defekte des Zwischenisolators in guter Näherung gleichverteilt sind und die Maxwell-Boltzmann-Statistik angewendet werden kann.

Die experimentell bestimmte Chipausbeute für den Zwischenisolator des Defektmonitorchips beträgt 95.0 %.

#### 7.1.4 Bestimmung der Defektgrößenverteilung im Defektmonitor

Nachdem sowohl die Defektdichte als auch die erzielte Ausbeute bekannt waren, wurde die im Abschnitt 3.3 beschriebene Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  bestimmt.  $S(d)$  ließ sich aus den experimentellen Daten des Defektmonitorchips gewinnen, indem alle Defekte pro Größe gezählt wurden. Anschließend wird die so erhaltene Kurve auf ein Integral vom Wert 1 normiert.

In der Literatur werden verschiedene Modellfunktionen für  $S(d)$  vorgeschlagen. Welches Modell gewählt werden muß, richtet sich nach den experimentellen Werten. In diesem Fall ließ sich keines der bisher bekannten Modelle mit ausreichender Genauigkeit an die Daten anpassen. Es wurde deshalb eine neue Formel aufgestellt. Es handelt sich dabei um eine Funktion, die sich aus der Kombination des exponentiellen Zerfalls und der Gaußkurve ergibt. Die Gründe für die Wahl dieser Formel sind einerseits der schnelle exponentielle Abfall der Defekthäufigkeiten von sehr kleinen zu größeren Defektdurchmessern, der auch in [95] und [105] beobachtet wurde und andererseits die im Bereich von 30-60  $\mu\text{m}$  kurz ansteigende und dann gleich wieder abfallende Defekthäufigkeit.

Auch das letztgenannte Phänomen wurde in [105] registriert, allerdings werden dort die Defekte großer Ausdehnung in den Folgerechnungen nicht berücksichtigt. Die Ursache für diesen speziellen Verlauf ist in den verschiedenen Defektquellen zu suchen (weitere Klassifizierungen findet man unter [45] und [105]):

- Kleine Defekte rühren zum größten Teil von Partikeln der Reinraumatmosfera her, die zum Beispiel auf die verwendete Maske fallen können und so zu Belichtungsfehlern führen.
- Eine bekannte Quelle von Defekten geringer Größe sind auch Sputteranlagen zur Metallabscheidung. Kleine Metallpartikel können so auf den Wafer gelangen und zum Beispiel einen Kurzschluß verursachen. Kleine Blasen oder Fremdkörper im Fotolack werden auch häufig als Ursache kleiner Defekte genannt.



- Die großen Defekte entstehen meist nur in sehr geringer Anzahl, wirken aber dafür fast zu 100% in Form eines Kurzschlusses bzw. einer Unterbrechung größerer Chipbereiche. Sie werden vor allen Dingen durch Abrieberscheinungen in der jeweiligen Fertigungsanlage erzeugt.

Der letzte Punkt deutet bereits an, daß besonders die großen Defekte, auch wenn es nur wenige davon gibt, die erzielbare Ausbeute beträchtlich einschränken können. Die Summe der bisher geschilderten Überlegungen und Beobachtungen an den aktuellen Daten führt nun zur neu entwickelten Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$ :

$$S(d) = D \cdot \left[ D_1 \cdot e^{\frac{-d}{a_1}} + D_2 \cdot e^{\frac{-(d_0-d)^2}{a_2}} \right] \quad (7.1)$$

$d$	<i>Defektdurchmesser</i>
$D$	<i>Skalierungsfaktor</i>
$D_1$	<i>Wichtungsfaktor des exponentiellen Teils</i>
$D_2$	<i>Wichtungsfaktor des glockenförmigen Teils</i>
$a_1$	<i>Skalierungsfaktor zur Regulierung des Anstiegs im exponentiellen Teil</i>
$a_2$	<i>Skalierungsfaktor zur Regulierung des Anstiegs im glockenförmigen Teil</i>
$d_0$	<i>mittlerer Defektdurchmesser im glockenförmigen Teil</i>

Die Funktion setzt sich aus der Gleichung des exponentiellen Zerfalls ( $S(d) \sim e^{-d}$ ) und einer auf den glockenförmigen Teil reduzierten Gaußverteilung zusammen. Zur Verknüpfung beider Einzelfunktionen wurden die entsprechenden Wichtungsfaktoren  $D_1$  und  $D_2$  eingeführt. Über die Skalierungsfaktoren  $a_1$  und  $a_2$  lassen sich die Anstiege der einzelnen Funktionsbereiche variieren.

In der nächsten Grafik sind die experimentell ermittelten Werte der Defektgrößenverteilung als Meßpunkte dargestellt. Die durchgezogene Kurve entspricht der Formel (7.1), deren Parameter durch eine Kurvenanpassung bestimmt wurden.

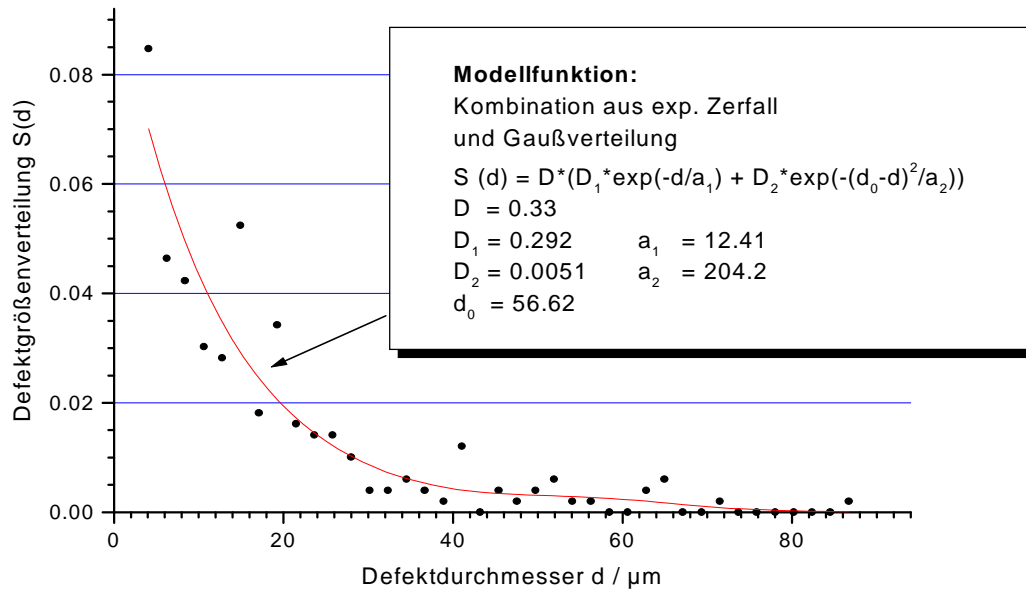


Abbildung 53: Defektgrößenverteilung im Metall 2

## 7.2 Einfluß der realen Defektform

Die bisher bestimmte Defektgrößenverteilungsfunktion wurde unter der Annahme erhalten, daß ein Defekt als kreisrunde Scheibe beschrieben werden kann. In der Praxis weicht die Defektform allerdings mehr oder weniger stark von dieser Form ab. Deshalb wurde im Abschnitt 3.6 ein neues Verfahren zur Berücksichtigung dieser Abweichung vorgeschlagen. Dazu war es notwendig, neben der mittleren Defektausdehnung auch die minimale und die maximale Ausdehnung  $d_{\min}$  bzw.  $d_{\max}$  zu bestimmen und die Verhältnisse aus  $2 - (d_{\text{mittel}} / d_{\min})$  und  $d_{\max} / d_{\text{mittel}}$  in ein Histogramm aufzunehmen. Für die aktuellen Defektdaten ergibt sich nach diesem Verfahren das folgende Diagramm:

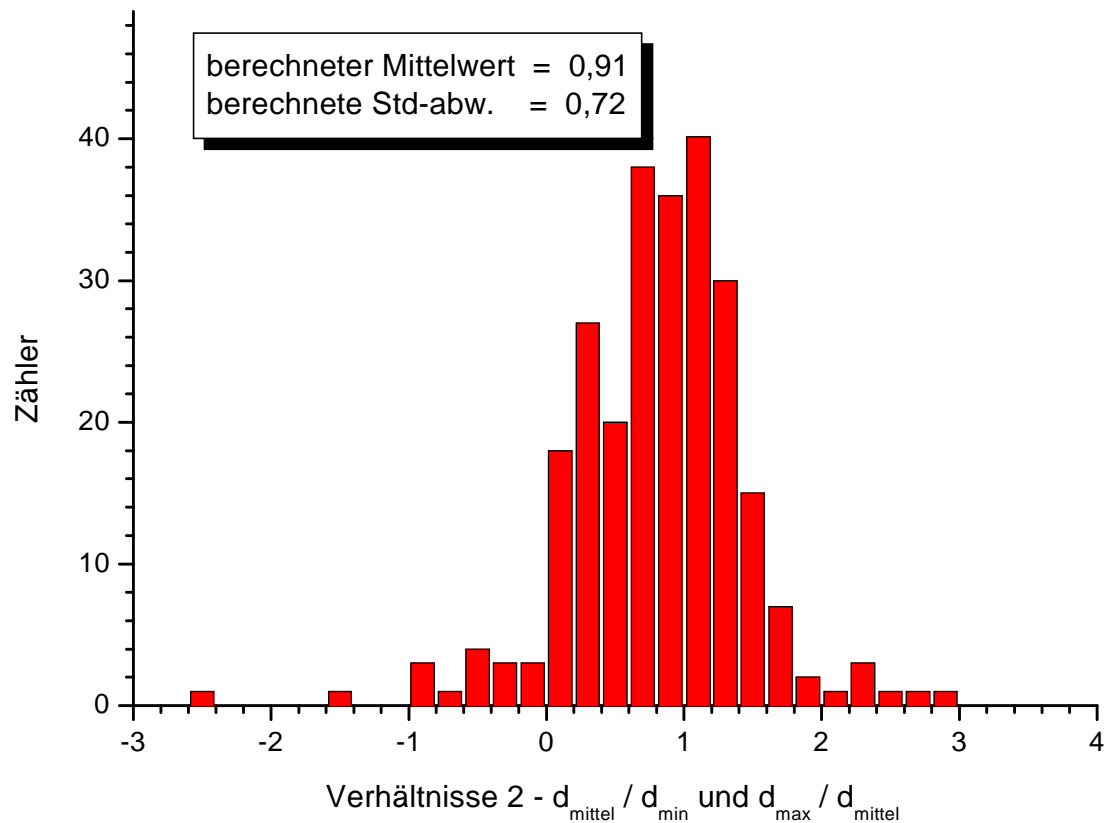


Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der Verhältnisse  $2 - d_{\text{mittel}} / d_{\text{min}}$  und  $d_{\text{mittel}} / d_{\text{max}}$

Die Daten der obigen Grafik zeigen einen Mittelwert  $\mu_d = 0.9$  und eine Standardabweichung  $\sigma_d = 0.72$ . Nach den Ausführungen des Abschnitts 3.6 bedeutet das:

1. Die Defekte haben eine schwache Vorzugsorientierung ( $\mu_d \neq 1$ ).
2. Die vom Defektmonitor registrierten Defektdurchmesser sind im Mittel zu groß ( $\mu_d < 1$ ).
3. Die Defekte weichen stark von der Kreisform ab ( $\sigma_d$  sehr groß).

Sowohl der Mittelwert  $\mu_d$  als auch die Standardabweichung  $\sigma_d$  fließen nun in die Gleichung (3.9) ein, wobei für  $S(d)$  das Modell (7.1) eingesetzt wird. Zum Vergleich sind in der nächsten Grafik die korrigierte und die originale Defektgrößenverteilung eingezeichnet.

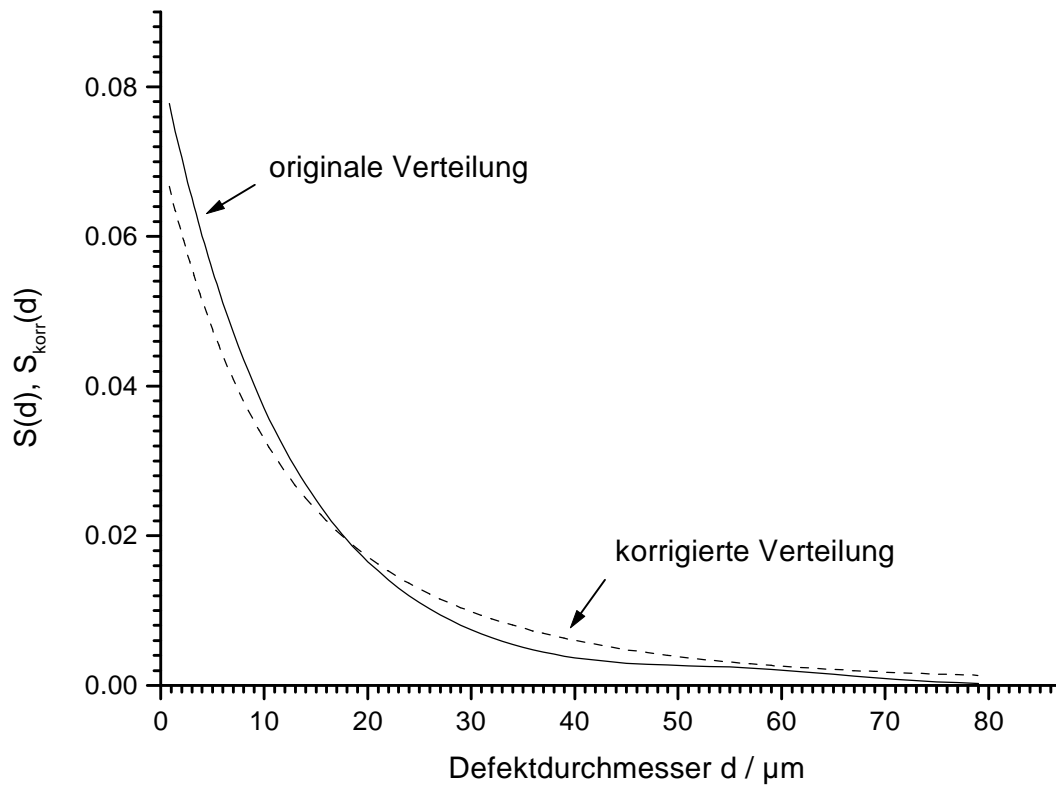


Abbildung 55: Gegenüberstellung der originalen und der korrigierten Defektgrößenverteilung

Zur weiteren Interpretation der Grafik sei an dieser Stelle auf die Abschnitte 3.6 und 4.1 verwiesen. Obwohl dort für die Defektgrößenverteilung eine andere Gleichung benutzt wurde, gelten alle Aussagen analog auch hier. Auf den Einfluß der experimentell gefundenen relativ großen Standardabweichung  $\sigma_d$  auf die Ausbeute soll im nächsten Abschnitt eingegangen werden.

### 7.3 Ausbeutevorhersage für die Metallebene des Defektmonitors

Ziel der Ausbeutevorhersage ist es, aus einer bekannten Defektgrößenverteilung, der Defektdichte und dem Layout des Produkts Aussagen zu dessen voraussichtlicher Ausbeute zu treffen. So ist es möglich, die Ausbeute für jeden Layer und jeden Layoutabschnitt getrennt zu berechnen und eventuell Segmente im Chip zu finden, die die Gesamtausbeute besonders negativ beeinflussen.

Um zunächst die Richtigkeit der an zahlreichen Stellen des Rechenweges benutzten Modellfunktionen und -vorstellungen zu überprüfen, soll als Test die theoretische Ausbeute für den verwendeten Defektmonitor berechnet werden. Diese läßt sich mit der experimentell erzielten Ausbeute, die durch die bereits erfolgte Auswertung (Abschnitt 7.1.3) bekannt ist, vergleichen. Erst wenn dieser Vergleich ein zufriedenstellendes Ergebnis liefert, kann man von der Gültigkeit der entsprechenden Modellvorstellungen ausgehen und diese auf ein neues Produkt anwenden. Von diesem Produkt müssen dann außer dem Layout keine weiteren Daten vorliegen.

Man findet in der Literatur eine Reihe verschiedenster Modelle zur Berechnung der Ausbeute ([27], [45]-[49], [56], [64], [66], [72], [73], [75], [76], [78]). Einige davon wurden bereits im Abschnitt 2.2 genannt. So verschieden die Modellfunktionen auch sein mögen, allen gemeinsam ist mindestens ein Term, der die Ausbeute mit einer Fläche und einer Defektdichte verknüpft. So sind beispielsweise beim bekanntesten Ausbeutemodell, dem Poisson-Modell, die Formulierungen (7.2) und (7.4) unter Beachtung der jeweils verwendeten Größen (7.3) bzw. (7.5) identisch.

$$Y = e^{-A_{red}D_0} \quad (7.2)$$

$$A_{red} = A_{Chip} \int_0^{\infty} K(d) \cdot S(d) \, dd \quad (7.3)$$

$A_{red}$	<i>defektempfindliche Chipfläche</i>
$D_0$	<i>mittlere Defektdichte (Defekte pro Fläche)</i>
$S(d)$	<i>Defektgrößenverteilungsfunktion</i>
$K(d)$	<i>Kernelfunktion des jeweiligen Layouts</i>

$$Y = e^{-A_{Chip} D_{eff}} \quad (7.4)$$

$$D_{eff} = D_0 \int_0^{\infty} K(d) \cdot S(d) \cdot dd \quad (7.5)$$

$A_{Chip}$       *gesamte Chipfläche*  
 $D_{eff}$       *effektive Defektdichte*

Die Defektgrößenverteilung  $S(d)$  und die Defektdichte  $D_0$  des Prozesses wurden bereits aus den experimentellen Daten des Defektmonitorchips gewonnen (siehe Abschnitte 7.1.3.1 und 7.2). Die layoutabhängige Kernelfunktion  $K(d)$  läßt sich nun mit dem im Abschnitt 6 beschriebenen Simulationsprogramm CALYPSO berechnen.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der berechneten Kernelfunktionen für die drei Strukturbreiten. Die Legende der Grafiken ist dabei so zu verstehen:

- YO = yield open = vollständige Unterbrechung der Leitbahn,
- YS = yield short = ein Defekt verbindet mindestens zwei benachbarte Leitbahnen miteinander,
- RO = reliability open = teilweise Unterbrechung der Leitbahn,
- RS = reliability short = ein Defekt "ragt" über die Leitbahn hinaus (und verbindet zwei benachbarte Leitbahnen nur "fast")

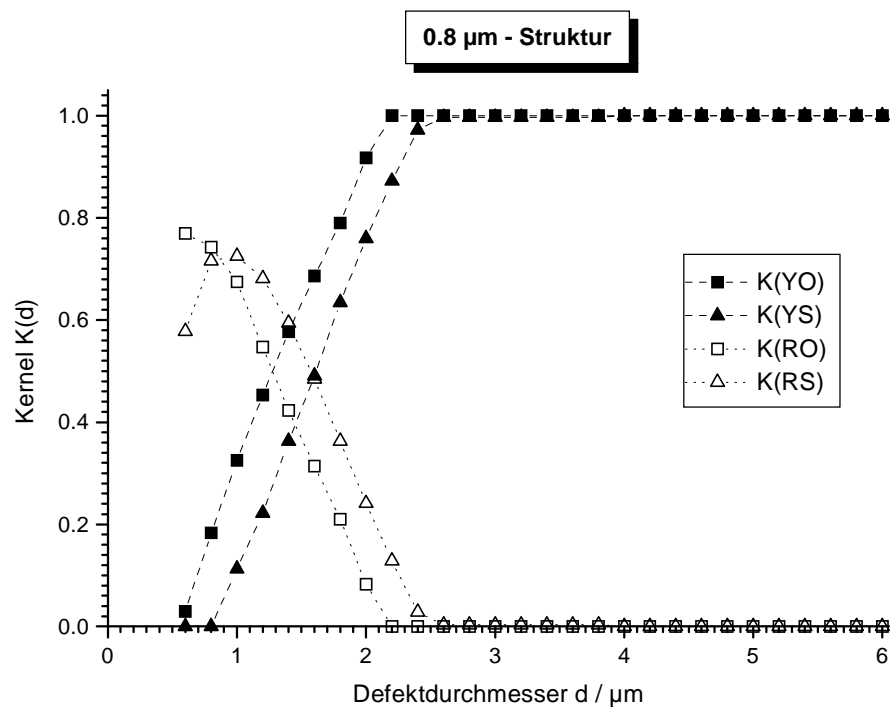


Abbildung 56: Kernelfunktion der 0.8  $\mu\text{m}$ -Struktur für Metall 2

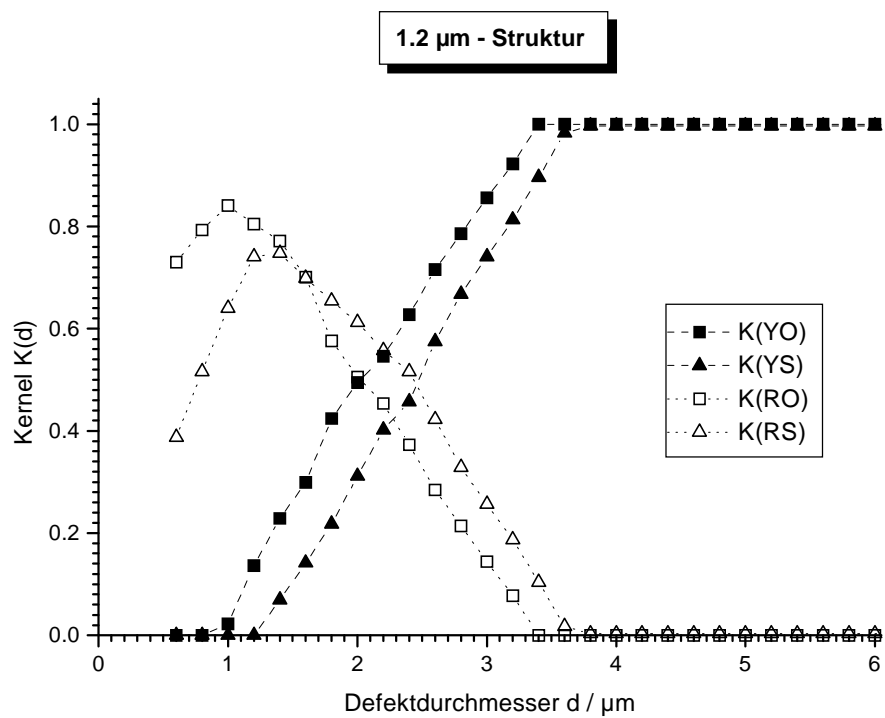


Abbildung 57: Kernelfunktion der 1.2  $\mu\text{m}$ -Struktur für Metall 2

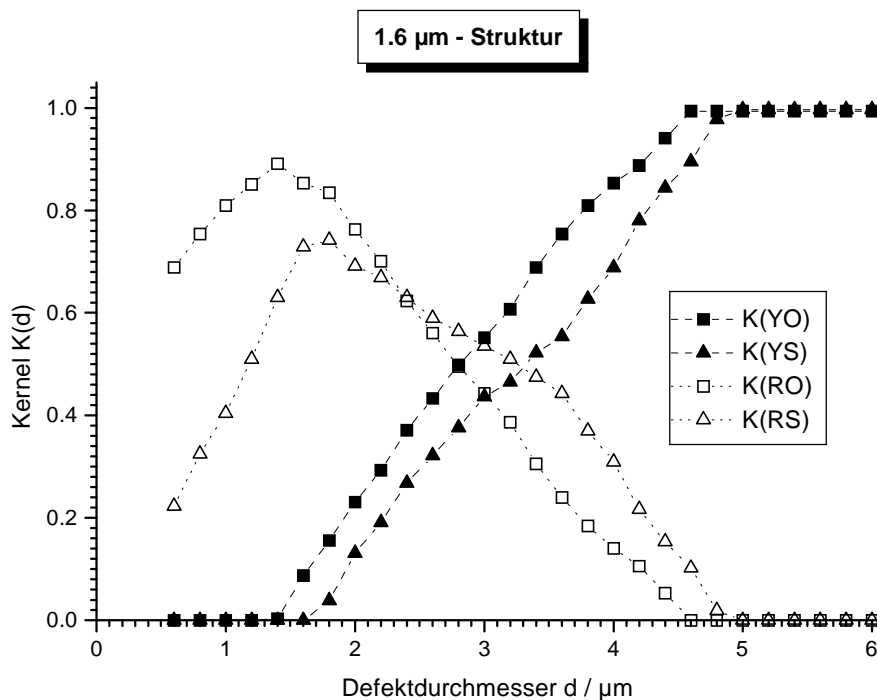


Abbildung 58: Kernelfunktion der 1.6  $\mu\text{m}$ -Struktur für Metall 2

Im wesentlichen handelt es sich bei diesen Teststrukturen um ein einfaches Gitter paralleler Leitbahnen mit annähernd gleichen Breiten und Abständen. Beschränkt man sich zunächst auf yield opens und yield shorts, so kann für ein solches Gitter die Kernelfunktion auch analytisch berechnet werden (siehe Abschnitt 2.3.1, Gleichung (2.14)). Demnach ist für die Kernelfunktion erst ein Wert  $K(d) > 0$  zu erwarten, wenn die Defekte größer oder gleich dem Leitbahnabstand bzw. -breite sind. Dann steigt die Kernelfunktion linear an und erreicht den Wert 1, wenn ein Defektdurchmesser erreicht ist, der dreimal größer als die Leitbahnbreite bzw. -abstand ist. Für größere Defekte bleibt die Kernelfunktion bei 1.

Bei der dargestellten Berechnung wurde die im Abschnitt 7.1.2 ermittelte Kantenverschiebung von  $0.07 \mu\text{m}$  berücksichtigt. Aus diesem Grund liegen die Werte der Kernel für die Kurzschlüsse leicht versetzt zu denen der Unterbrechungen. Im vorliegenden Fall bedeutet das z.B. für die Kernelfunktionen der Kurzschlüsse, daß bei der  $0.8 \mu\text{m}$ -Struktur ab einem Defektdurchmesser von  $(0.8 + 2 \cdot 0.07) \mu\text{m}$  die Funktion linear ansteigt, bis sie bei etwa  $(2.4 + 2 \cdot 0.07) \mu\text{m}$  den Wert 1 erreicht.



Da die abgebildeten Kernelfunktionen für die realen Strukturen berechnet wurden, berücksichtigen sie auch den Einfluß der Endsegmente der Mäander und der Kämme, so daß eine geringfügige Abweichung von der analytischen Lösung zu erwarten war.

Bei der Betrachtung zuverlässigkeitsrelevanter Defekte, muß man zunächst feststellen, daß der Verlauf der Kernelfunktion vollkommen anders ist:

- Ab einem gewissen Defektdurchmesser steigt die Funktion an, erreicht etwas später ihr Maximum und sinkt wieder auf den Wert 0 ab. Dabei sind für dieses spezielle Layout der Anstieg und der Abfall nahezu linear.

Daß die Kernelfunktion für diese Art Defekte mit zunehmender Defektgröße auf den Wert 0 absinkt, hat eine recht einfache Ursache:

- Ab einer gewissen Größe wirkt ein Defekt nicht mehr als Zuverlässigkeitsdefekt, sondern mindert mit immer größerer Wahrscheinlichkeit die Ausbeute und trägt dann zu jener Kernelfunktion bei.

Bereits im Abschnitt 7.1.3 zur Bestimmung der Ausbeute und der mittleren elektrisch wirksamen Defektdichte des Defektmonitorchips wurde darauf hingewiesen, daß hier zunächst angenommen werden kann, daß eine Berechnung der zu erwartenden Ausbeute mit dem Poisson-Modell erfolgen könnte. Da sich die reduzierte Chipfläche proportional zur Chipfläche verhält (siehe Gleichung (7.3)), ergibt die logarithmische Darstellung der jeweiligen Ausbeute für verschiedene Chipflächen eine Gerade, deren Anstieg gleich  $-D_0$  ist.

Um diese Flächenabhängigkeit darstellen zu können, müßten unterschiedlich große Chips produziert und deren Ausbeute über der jeweiligen Fläche aufgetragen werden. Einfacher kann man zu einer solchen Darstellung gelangen, wenn man zunächst die Ausbeute der Einzelsegmente des Defektmonitors bestimmt, dann gedanklich zwei benachbarte Segmente zu einem virtuellen Chip zusammenfaßt und dessen Ausbeute feststellt. Im nächsten Schritt faßt man drei benachbarte Segmente zusammen bestimmt die Ausbeute dieses "Chips", u.s.w.. Diese Zusammenfassungen können so lange durchgeführt werden, bis der gesamte Wafer einen einzigen großen virtuellen Chip bildet.

Nach diesem Verfahren ergibt sich für die Ausbeute des präparierten Defektmonitorchips als Funktion der Chipfläche folgende Darstellung:

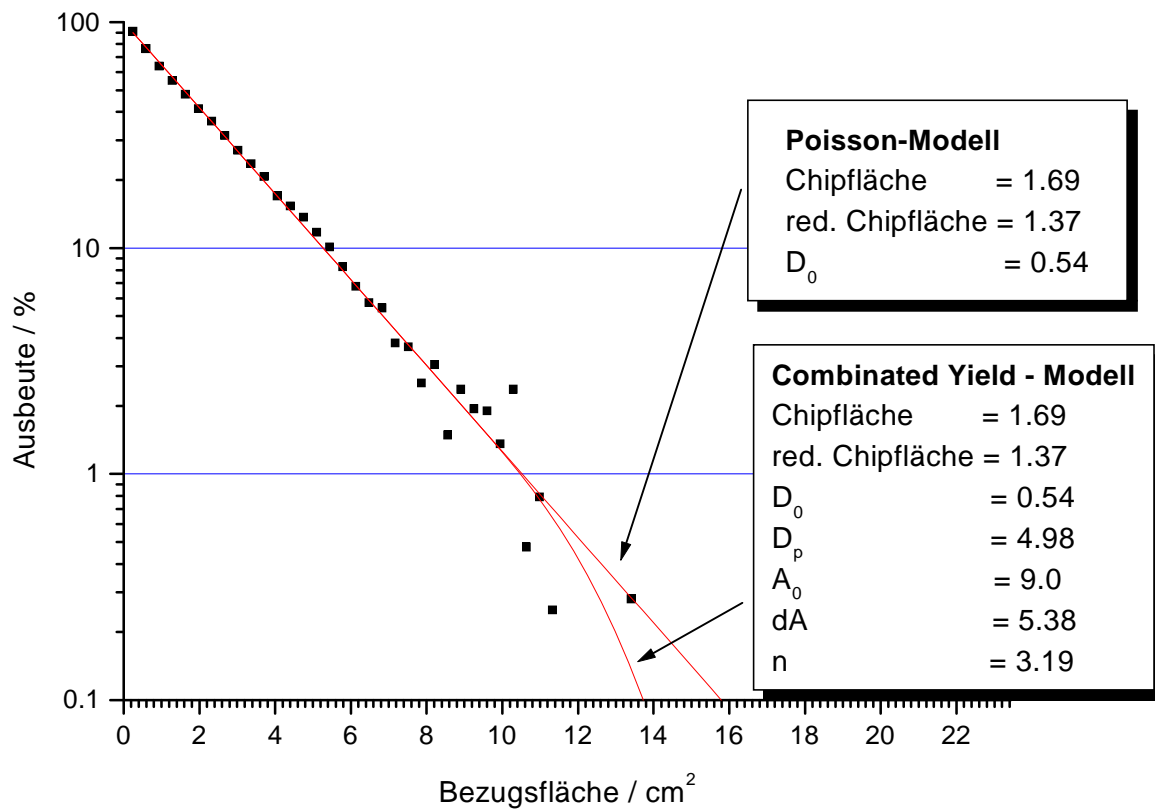


Abbildung 59: Ausbeute als Funktion der Bezugsfläche (MTM, Metall 2)

Die Ausbeute kann bei größeren Flächen nicht mehr mit einer einfachen Exponentialfunktion wie beim Modell von Poisson beschrieben werden. Bei größeren Flächen ist in der Grafik ein deutliches Abknicken in der hier verwendeten logarithmischen Darstellung zu erkennen. Es ist bisher keine Funktion aus der Literatur bekannt, die den oben dargestellten Verlauf der Meßwerte genügend gut beschreibt. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit war daher, eine neue Funktion zur Ausbeuteberechnung zu entwickeln. Ausgangspunkt war dabei die logarithmierte Poissonformel:

$$\ln(Y(A)) = -\frac{A}{A_{Chip}} A_{red} D_0 \quad (7.6)$$

Wie in der Abbildung 59 gezeigt, beschreibt diese Funktion in der logarithmischen Darstellung eine Gerade, aus deren Anstieg die mittlere Defektdichte  $D_0$  bestimmbar ist. Zur Modellierung anderer als dieser, im logarithmischen Maßstab linearer, Verläufe sollte zunächst der Anstieg eine Funktion der Fläche sein. Außerdem sollte sowohl die Stärke der Flächenabhängigkeit mittels Wichtungsfaktor verändert als auch entlang der x-Achse verschoben werden können. Eine mögliche Funktion mit diesen Eigenschaften ist die folgende (in der Abbildung 59 als "Combinated Yield" bezeichnet):

$$Y(A) = \left\{ \begin{array}{ll} e^{-D_0 \frac{A}{A_{Chip}} A_{red}} & A \leq A_0 \\ e^{-D_0 \left( \frac{A}{A_{Chip}} A_{red} + D_p \left( \frac{A-A_0}{dA} \cdot \frac{A_{red}}{A_{Chip}} \right)^n \right)} & A > A_0 \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

$D_0$	<i>mittlere Defektdichte</i>
$D_p$	<i>Faktor zur Regulierung der Flächenabhängigkeit</i>
$A_{Chip}$	<i>Chipfläche</i>
$A_{red}$	<i>reduzierte Chipfläche</i>
$A_0$	<i>Fläche, bis zu der das Poisson-Modell anwendbar ist</i>
$dA$	<i>Regulierung des Anstiegs für Flächen <math>A &gt; A_0</math></i>
$n$	<i>Exponent der Flächenabhängigkeit</i>

Diese Funktion beschreibt den in der Abbildung 59 dargestellten Verlauf der Meßwerte auch bei größeren Bezugsflächen korrekt. Die in der Grafik angegebenen Kurvenparameter wurden durch eine Kurvenanpassung ermittelt. Der Parameter  $A_0$  bestimmt wann das Abknicken der Modellfunktion einsetzt. Die Grafik zeigt, daß dieser Punkt bei einer Fläche von 9 cm<sup>2</sup> liegt. Bei größeren Bezugsflächen wird die reine Poisson-Statistik immer ungenauer.

Einen Beweis, daß mit diesem neuen Modell nicht nur das Abknicken der Ausbeutekurve beschrieben werden kann, sondern auch andersartige Kurvenverläufe modellierbar sind, zeigt die Abbildung 60. So können durch eine entsprechende Wahl der Modellparameter auch die dort dargestellten Daten gut beschrieben werden. Durch die hohe Flexibilität des neuen Modells sollte sich ein weiterer Anwendungskreis erschließen.

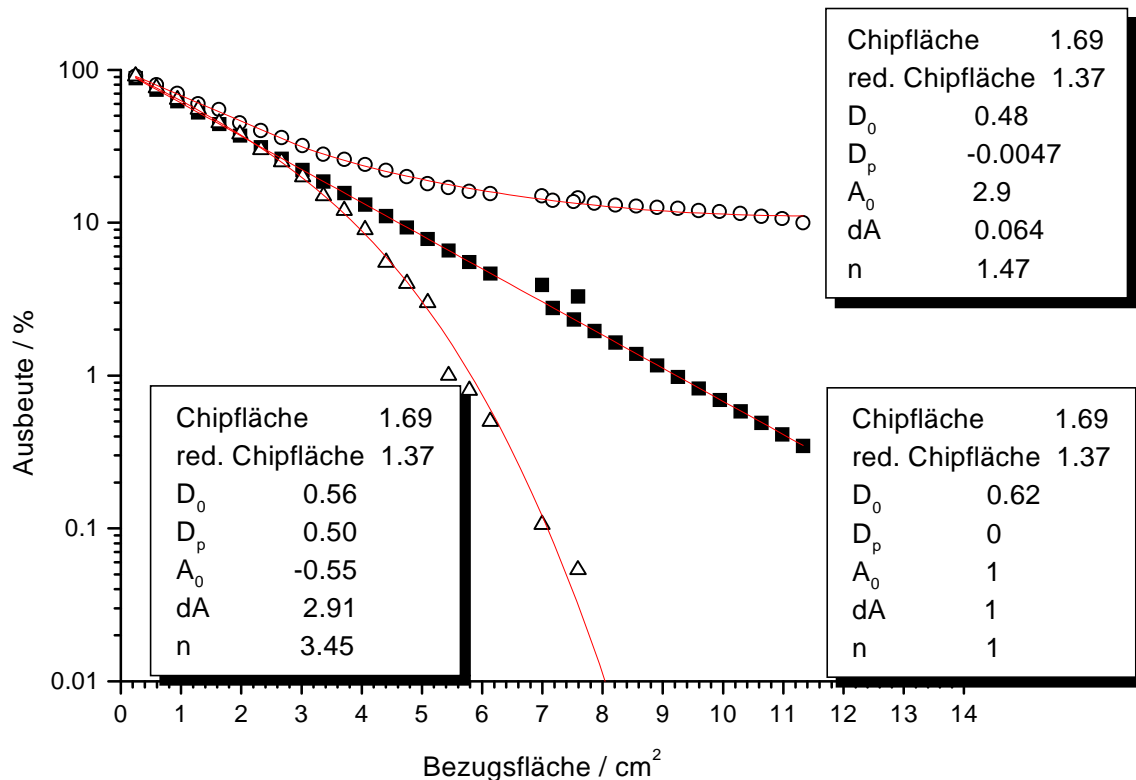


Abbildung 60: Beispiele für mögliche Abhängigkeiten der Ausbeute von der Bezugsfläche und deren Modellierung durch Gleichung (7.7)

Um die Gültigkeit des neuen Modells zu prüfen, kann man nun die Kurvenparameter des Ausbeutemodells und die ermittelte Defektgrößenverteilung (Abschnitt 7.1.4) an das Simulationsprogramm CALYPSO übergeben. CALYPSO berechnet aus diesen Daten die zu erwartende Ausbeute (Metall 2) für den Defektmonitorchip, die dann mit der tatsächlich erzielten Ausbeute von 46.3% (siehe Abschnitt 7.1.3) verglichen werden kann. Die Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der zur Berechnung verwendeten Parameter:

Tabelle 5: Zur Ausbeuteberechnung verwendete Parameter

Parameterbezeichnung	Parameterwert
Defektdichte $D_0$ / $\text{cm}^2$	Kurzschlüsse: $0.55 \pm 0.02$ Unterbrechungen : $0.08 \pm 0.003$
Defektgrößenverteilungsfunktion $S(d)$	$S(d) = D \cdot \left[ D_1 \cdot e^{\frac{-d}{a_1}} + D_2 \cdot e^{\frac{-(d_0-d)^2}{a_2}} \right]$
Parameter von $S(d)$	$D = 0.33$ $D_1 = 0.29$ $a_1 = 12.41$ $D_2 = 0.00514$ $x_0 = 56.62$ $a_2 = 204.2$
Kantenverschiebung / $\mu\text{m}$	0.07
zugehörige Standardabweichung $\sigma_{KV}$	0.03
mittleres Defektgrößenverhältnis $\mu_d$	0.91
zugehörige Standardabweichung $\sigma_d$	0.72
Chipfläche $A_{\text{Chip}}$ / $\text{cm}^2$	1.69
Ausbeutefunktion	$Y(A) = \begin{cases} e^{-D_0 \frac{A}{A_{\text{Chip}}} A_{\text{red}}} & A \leq A_0 \\ e^{-D_0 \left( \frac{A}{A_{\text{Chip}}} A_{\text{red}} + D_p \left( \frac{A-A_0}{dA} \cdot \frac{A_{\text{red}}}{A_{\text{Chip}}} \right)^n \right)} & A > A_0 \end{cases}$
Parameter der Ausbeutefunktion	$A_{\text{red}}$ wird von CALYPSO berechnet. $dA = 5.38 \text{ cm}^2$ $A_0 = 9 \text{ cm}^2$ $n = 3.19$ $D_p = 4.98 \text{ cm}^2$

Die Abbildung 61 zeigt einen Ausdruck der durchgeführten Ausbeuteberechnungen für die Kurzschlüsse im Metall 2 des Defektmonitorchips wie er von CALYPSO erzeugt wird:

D:\MISKOWIE\DEFSIM\MTMETIB.HIT

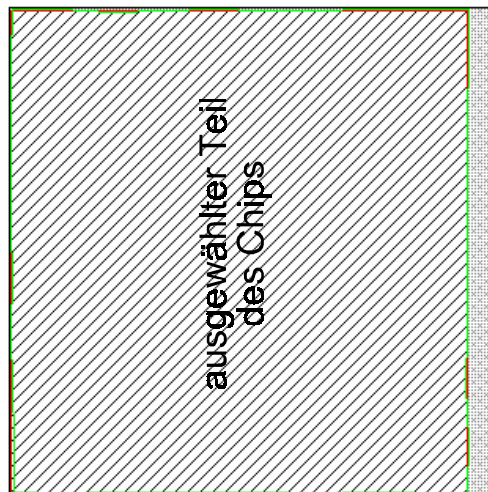
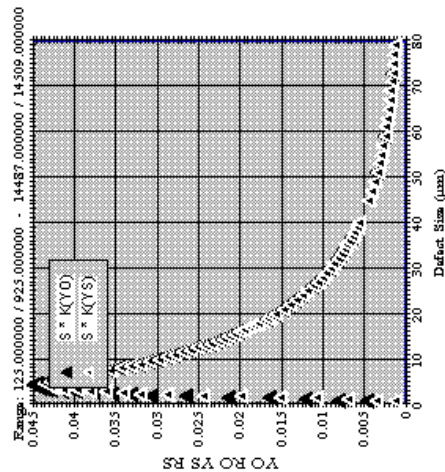


Abbildung 61: Berechnung der Ausbeute für Metall 2 des Monitorchips; von CALYPSO erzeugter Übersichtsdruck

yield information for		yield		shorts	
ppm/1000000	14487.000000 / 14309.000000	yield	0.0840.003	yield	0.077640.000166
defect density D:			1.99166 / 1.93624		0.82540.000595
selected area / cm²:			0.84640.000513		0.46440.000941
integral(S*(Y(X))) [0.8 -> 80 / 0.8 -> 80]:			0.067640.000244		0.13140.000228
eff. defect density:			1.4340.000867		1.440.00101
reduced area / cm² = Aselected*integral(S*K):			1.6440.000983		0.1540.000321
layout-yield (sizing):			0.977		1
Poisson: Y = exp(-Defr*A)			0.89240.000368		0.46440.00738
Murphy: Y = [1-exp(-Defr*A)] / (Defr*A)^n			0.87740.000414		0.41540.00756
Seeds/Price: Y = 1 / (1+Defr*A)			0.89340.000361		0.48740.00677
Moore: Y = exp(-sqrt(Defr*A))			0.87840.000406		0.44340.0069
neg. binomial: Y = (1 + Defr*A)^Complexity [1]			0.89740.000332		0.49340.00652
Okabe: Y = 1 / (1 + S*Defr*A)^1.0/S[1]			0.88440.000369		0.46440.00738
CombiYield: Y(A) = exp[-Do*(A^Ach/Ach + Dp)*(A-Ac)^2/ydA3]^n...			0.89440.000332		0.46440.00738
YIELD:			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.41540.00756
			0.89340.000361		0.48740.00677
			0.87840.000406		0.44340.0069
			0.89740.000332		0.49340.00652
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89440.000332		0.46440.00738
			0.89740.000332		0.46440.00738
			0.88440.000369		0.46440.00738
			0.89240.000368		0.46440.00738
			0.87740.000414		0.4

Für die Fläche dieses Chips ( $A = 1.69 \text{ cm}^2$ ) liefern sowohl das Poisson- als auch das neue Combined Yield-Modell denselben Wert für die Kurzschluß-Ausbeute mit  $Y_{\text{th}} = 46.4 \%$  (Spalte **shorts**, Unterspalte **yield**, Zeile **CombiYield**). Die Ausbeute wird durch das Simulationsprogramm in diesem Fall um 0.1 % überschätzt. Zur Bestimmung der Genauigkeit des berechneten Wertes wird aus den Fehlern der Eingangsparameter eine Fehlerrechnung durchgeführt. Es ergibt sich:  $Y_{\text{th}} = (46.4 \pm 1.3) \%$ . Damit liegen berechnete und praktisch bestimmte Ausbeute ( $Y_{\text{exp}} = 46.3 \%$ ) sehr dicht beieinander.

Berücksichtigt man die reale Defektform nicht mit entsprechenden Werten für  $\mu_d$  und  $\sigma_d$ , dann ändert sich der Wert der theoretisch erreichbaren Ausbeute auf  $Y_{\text{th}} = (47.1 \pm 1.3) \%$ , also um 0.7 %. Nur durch den relativ großen Meßfehler der Defektdichte (siehe Tabelle 5) liegt dieser Wert innerhalb der Toleranzgrenze nahe genug an der experimentell ermittelten Ausbeute.

Aufgrund der Übereinstimmung der berechneten und der praktisch bestimmten Ausbeute kann von der Richtigkeit der Modellvorstellungen ausgegangen und diese auf ein vollkommen neues Produkt angewendet werden.

## 7.4 Untersuchungen zur Ausbeute eines Beispieldesigns

Als Produkt, für das zur anschließenden beispielhaften Diskussion entsprechender Einflußfaktoren zunächst die zu erwartende Ausbeute berechnet werden soll, wurde ein großes aktives Bauelement (Fläche ca.  $15.5 \text{ cm}^2$ ) des Fraunhofer Institutes "Mikroelektronische Schaltungen und Systeme" ausgewählt. Ausschlaggebend dafür waren Besonderheiten des Layouts (Zerlegbarkeit des Chips in vier Segmente A – D, siehe Abbildung 62, im Layout vorkommende weitere Besonderheiten) und die große Einfangwahrscheinlichkeit von Defekten aufgrund der erwähnten großen Chipoberfläche.

A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B
B																	B
B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B
B																	B
B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B
B																	B
B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B
B																	B
A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A

Abbildung 62: Prinzipskizze des als Beispiel dienenden Chips

Zur Berechnung der Kernelfunktion wurde vom Gesamtlayout nur der markierte Teil ausgewertet, womit eine deutliche Verringerung der Rechenzeit erreicht wurde. Die in diesem markierten Teilstück enthaltenen Flächen wurden zur weiteren Vereinfachung zusammengefaßt und umbenannt:

- $A \rightarrow A'$
- $2 \cdot B \rightarrow B'$
- $4 \cdot C \rightarrow C'$
- $2 \cdot D \rightarrow D'$

Nach dieser Umbenennung läßt sich die Kernelfunktion jeweils für die Teile A', B', C' und D' berechnen und die zu erwartende Ausbeute getrennt feststellen.

Um die Ausbeute der gesamten Matrix zu bestimmen, ist es notwendig, die Ausbeuten der Flächen A' bis D' auf die Gesamtfläche der Matrix umzurechnen. Die Matrix besteht aus  $4 \cdot A' + 8 \cdot B' + 8 \cdot C' + 16 \cdot D'$ . Somit ergeben sich folgende Segmentflächen:



Tabelle 6: Flächenzusammensetzung des Beispieldesigns aus Abbildung 62

Flächensegment	Fläche pro Segment (cm <sup>2</sup> )	Flächensegment	Fläche pro Segment (cm <sup>2</sup> )
A	0.2534	Summe <sub>A</sub> = 4 A	1.0138
B	0.1872	Summe <sub>B</sub> = 16 B	2.9952
C	0.0906	Summe <sub>C</sub> = 32 C	2.9006
D	0.2678	Summe <sub>D</sub> = 32 D	8.5696
A' = 1 A	0.2534	Matrix <sub>gesamt</sub>	15.479
B' = 2 B	0.3744		
C' = 4 C	0.3625		
D' = 2 D	0.5356		

Da die Flächen der betrachteten Teile A' bis D' noch unter der aus Abbildung 59 bestimmten Grenzfläche von 9 cm<sup>2</sup> liegen, kann man davon ausgehen, daß die Berechnung der Ausbeute sowohl mit Poisson als auch mit dem neuen Ausbeutemodell "Combinated Yield" annähernd dieselben Ergebnisse liefert.

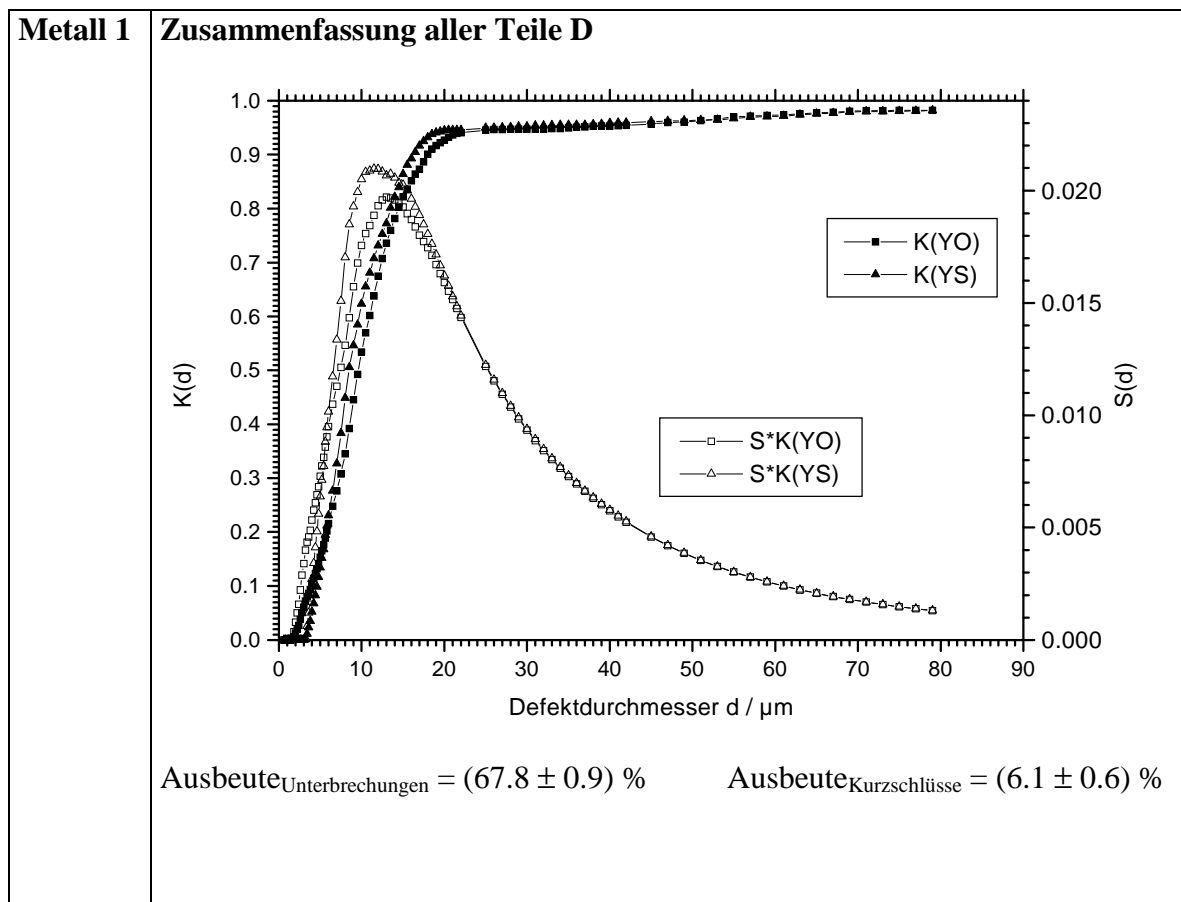
Auch die Summen aller Teile A (Summe<sub>A</sub>, Summe<sub>B</sub>, u.s.w.) sind nicht größer als 9 cm<sup>2</sup>. Deshalb kann hier gemäß der Poisson-Statistik die Ausbeute für eine Fläche der Summe<sub>A</sub> berechnet werden, indem die Ausbeute eines Teils A mit vier potenziert wird. Wäre die Flächensumme aller Teile A größer als 9 cm<sup>2</sup> gewesen, hätte man diese Rechnung nicht machen dürfen, sondern hätte die kompliziertere Formel (7.7) zur Umrechnung benutzen müssen (Einsetzen der Gesamtfläche der A-Teile).

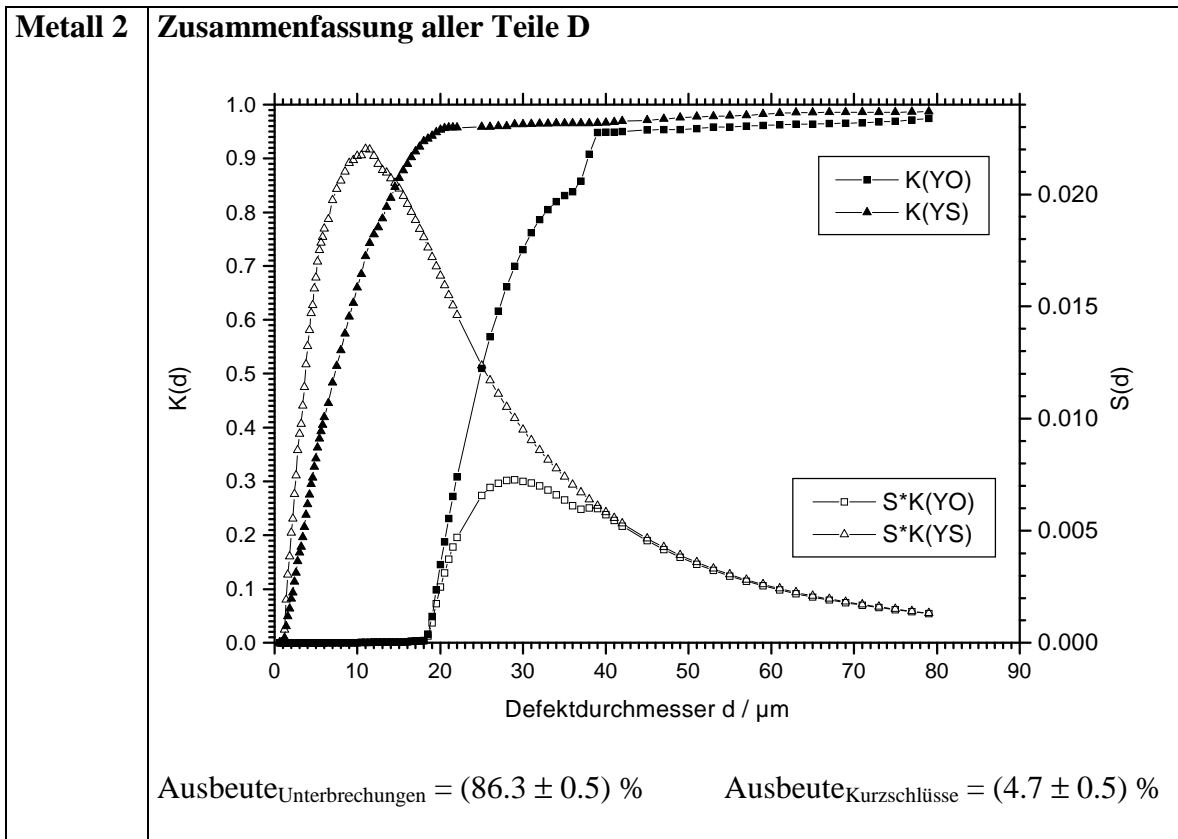
Da nun die Flächen der jeweiligen Segmente festgestellt und die Defektdaten (Defektdichte, Defektgrößenverteilung) durch Anwendung des Defektmonitors bekannt sind, müssen im nächsten Schritt die Kernelfunktionen für jedes Segment und für jeden Layer bestimmt werden. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, werden hier nur zwei Metallebenen und der zugehörige Zwischenisolator behandelt.

### 7.4.1 Ausbeuteberechnung für die Metall 1- und Metall 2-Ebene

Im ersten Schritt wurden mit CALYPSO die Kernelfunktionen für Unterbrechungen und Kurzschlüsse der jeweiligen Layoutsegmente bestimmt. Die folgende Tabelle enthält der Übersichtlichkeit halber aber nur die jeweiligen Kurven des D'-Teils. Zusätzlich zur Kernel- und Defektgrößenverteilungsfunktion wurde auch das Produkt aus  $S(d)$  und  $K(d)$  dargestellt. Mit den Kurvendaten aller Layoutsegmente, den in Tabelle 5 aufgeführten Angaben zur Defektdichte und den Parametern des Ausbeutemodells "Combinated Yield" (siehe Abbildung 59) wurde anschließend die jeweils zu erwartende Ausbeute berechnet.

Tabelle 7: Zusammenstellung der durchgeführten Ausbeuteanalyse des Beispieldesigns für den D'-Teil





Aufgrund der geringeren Defektdichte der Unterbrechungen im Vergleich zu den Kurzschlußdefekten ist die zu erwartende Ausbeute für Unterbrechungen in allen Layoutsegmenten beider Metallebenen größer als für Kurzschlüsse. Im D'-Teil fällt dieser Unterschied besonders groß aus. So liegt für die Metall 1-Ebene ein Faktor von ca. 11 zwischen der Ausbeute für Unterbrechungen und der für Kurzschlüsse. Für die Metall 2-Ebene liegt dieser Faktor sogar über 18. Die Erklärungen für diese großen Faktoren sind einerseits der Unterschied in der registrierten Defektdichte (Unterbrechungen:  $0.08 / \text{cm}^2$ , Kurzschlüsse:  $0.55 / \text{cm}^2$ ) und andererseits die unterschiedliche Empfindlichkeit des Layouts gegenüber additiven und subtraktiven Defekten.

Dies spiegelt sich besonders in der Kernelfunktion für Metall 2 des D-Segments wider. Während die Kernelfunktion für Kurzschlüsse bereits bei Defekten mit einem Durchmesser von  $1\text{ }\mu\text{m}$  ansteigt und schnell den Endwert von 1 erreicht, ist für Unterbrechungen erst bei  $18\text{ }\mu\text{m}$  ein Anstieg der Kernelfunktion zu beobachten. Defekte, die kleiner als  $18\text{ }\mu\text{m}$  sind, können das Layout im D'-Segment also noch nicht unterbrechen. Da jedoch nach der Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  größere Defekte relativ selten vorkommen, ist ein Ausfall des Schaltkreises aufgrund einer Unterbrechung in diesem Segment relativ unwahrscheinlich. Die äquivalente mathematische Formulierung dazu lautet: Die defektempfindliche Fläche (oder auch reduzierte Fläche, siehe Abschnitt 2.3.2) ist für subtraktive Defekte geringer als für additive Defekte.

Die bisherigen Ergebnisse zeigten, daß das D-Segment die erzielbare Gesamtausbeute am stärksten reduziert. Die Ursachen dafür sind einerseits die etwa dreimal so große Gesamtfläche ( $\text{Summe}_D$ ) im Vergleich zu den Segmenten B und C und andererseits das spezielle Layout dieses Bereiches.

#### **7.4.2 Ausbeuteberechnung für den Zwischenisolator Metall 1 / 2**

Die Bestimmung der Ausbeute eines Zwischenisolators ist im Vergleich zur Auswertung der Metallebenen einfach. Anders als dort benötigt man hier keine Kernelfunktionen, um die defektempfindliche Chipfläche zu berechnen. Diese entspricht in diesem Fall einfach der Überlappungsfläche der beiden gegeneinander zu isolierenden Ebenen (vgl. [19], [41], [113]). Die Berechnung dieser Überlappungsfläche wird vom Simulationsprogramm CALYPSO durch den Defektsimulator II (Abschnitt 6.1.5) und das zugehörige Auswertemodul (Abschnitt 6.1.6) durchgeführt. Kennt man die defektempfindliche Fläche des interessierenden Layoutbereiches und die für die jeweilige Schichtdicke des Isolators zutreffende Defektdichte, dann sind bereits alle Angaben zur Ausbeuteberechnung vorhanden.

Bei der Feststellung der Defektdichte im Zwischenisolator wurde herausgefunden, daß die Defekte des Zwischenisolators gleichverteilt sind und die Poisson-Statistik angewendet werden kann (siehe Abschnitt 7.1.3.2). Die folgende Tabelle zeigt die zur Berechnung verwendeten Daten und die für die jeweiligen Layoutsegmente zu erwartende Ausbeute, die diesmal mit dem Poisson-Modell bestimmt wurde:

Tabelle 8: Zusammenstellung der berechneten Zwischenisolatorausbeuten

<b>Defektdichte <math>D_0</math></b>	$(0.53 \pm 0.01) \text{ cm}^{-1}$			
<b>Segment</b>	<b>Segmentfläche / <math>\text{cm}^2</math></b>	<b>defektempf. Fläche / <math>\text{cm}^2</math></b>	<b><math>A_{\text{Segment}} / A_{\text{red}}</math></b>	<b>Ausbeute</b>
<b>A'</b>	0.2534	0.0403	6.29	$(97.9 \pm 0.04) \%$
<b>B'</b>	0.3744	0.1347	2.78	$(93.1 \pm 0.12) \%$
<b>C'</b>	0.3625	0.1523	2.38	$(92.2 \pm 0.14) \%$
<b>D'</b>	0.5356	0.2312	2.32	$(88.4 \pm 0.20) \%$
<b>alle Segmente A</b>	1.0138	0.1614	6.29	$(91.8 \pm 0.16) \%$
<b>alle Segmente B</b>	2.9952	1.0776	2.78	$(56.4 \pm 0.96) \%$
<b>alle Segmente C</b>	2.9006	1.2184	2.38	$(52.2 \pm 1.40) \%$
<b>alle Segmente D</b>	8.5696	3.6989	2.32	$(13.9 \pm 3.20) \%$

Auch bei der Auswertung des Zwischenisolators schneidet das D-Segment am schlechtesten ab, obwohl diesmal der Unterschied zu den anderen Segmenten nicht so groß wie beim Metall ist.

### 7.4.3 Zusammenfassung zur Ausbeutebestimmung

Die Gesamtausbeute des Beispielchips setzt sich aus den Einzelausbeuten der Teile A' bis D' für die Ebenen Metall 1, 2 und dem Zwischenisolator zusammen. Die nächste Tabelle faßt die bisherigen Ergebnisse in einem Überblick zusammen.

Tabelle 9: Übersicht zur berechneten Ausbeute des Beispieldesigns

	<b>Metall 1</b>		<b>Zwischen- isolator</b>	<b>Metall 2</b>	
	subtraktive Defekte	additive Defekte	additive Defekte	subtraktive Defekte	additive Defekte
<b>Ausbeute pro Defektart</b> $= A'^4 \cdot B'^8 \cdot C'^8 \cdot D'^{16}$	$50.6 \pm 1.3 \%$	$0.9 \pm 0.1 \%$	$3.76 \pm 1.0 \%$	$81.5 \pm 0.7 \%$	$2.2 \pm 0.3 \%$

#### 7.4.4 Vorschläge zur Ausbeutesteigerung

##### 7.4.4.1 *Veränderungen der Defektgrößenverteilung und der Defektdichte*

Es stellt sich nun die Frage, wie die im vorigen Abschnitt ermittelten Ausbeuten erhöht werden können. Abgesehen von Layoutveränderungen, die zweifellos alle bisherigen Berechnungen am meisten beeinflussen würden, führen eine Veränderung der Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  und der Defektdichte  $D_0$  sofort zu Ausbeuteveränderungen. Da relativ viele Defekte mit einem Durchmesser  $d > 15 \mu\text{m}$  registriert wurden, sinkt  $S(d)$  nicht schnell genug ab. Die Folge davon ist, daß in dem Bereich, in dem  $K(d)$  bis auf den Wert 1 ansteigt,  $S(d)$  immer noch relativ große Defekthäufigkeiten ausweist und das Produkt  $S(d) \cdot K(d)$  weiterhin verhältnismäßig große Beiträge zur anschließenden Integration liefert. Je größer das Integral aber ist, um so größer ist auch die defektempfindliche Fläche  $A_{\text{red}}$  (siehe Gleichung (2.16)), die zur Berechnung der Ausbeute herangezogen wird. Da  $A_{\text{red}}$  sogar exponentiell in die meisten Ausbeuteberechnungsmodelle eingeht, bewirkt eine moderate Vergrößerung dieser Fläche einen stark erhöhten Ausbeuteverlust.

Um diesen Effekt zu demonstrieren, wurden alle bisherigen Berechnungen nochmals mit einer anderen Defektgrößenverteilung durchgeführt. Dazu wurden alle Defekte, deren Durchmesser größer als  $15 \mu\text{m}$  waren, von der Berechnung ausgeschlossen. Durch Weglassen dieser Defekte mußte auch die Defektdichte auf einen Wert von  $D_{0, \text{red}} = 0.18 / \text{cm}^2$  reduziert werden. Die Abbildung 63 zeigt den neuen Kurvenverlauf von  $S_{\text{red}}(d)$  und die Tabelle 10 gibt die erzielten Ergebnisse an.

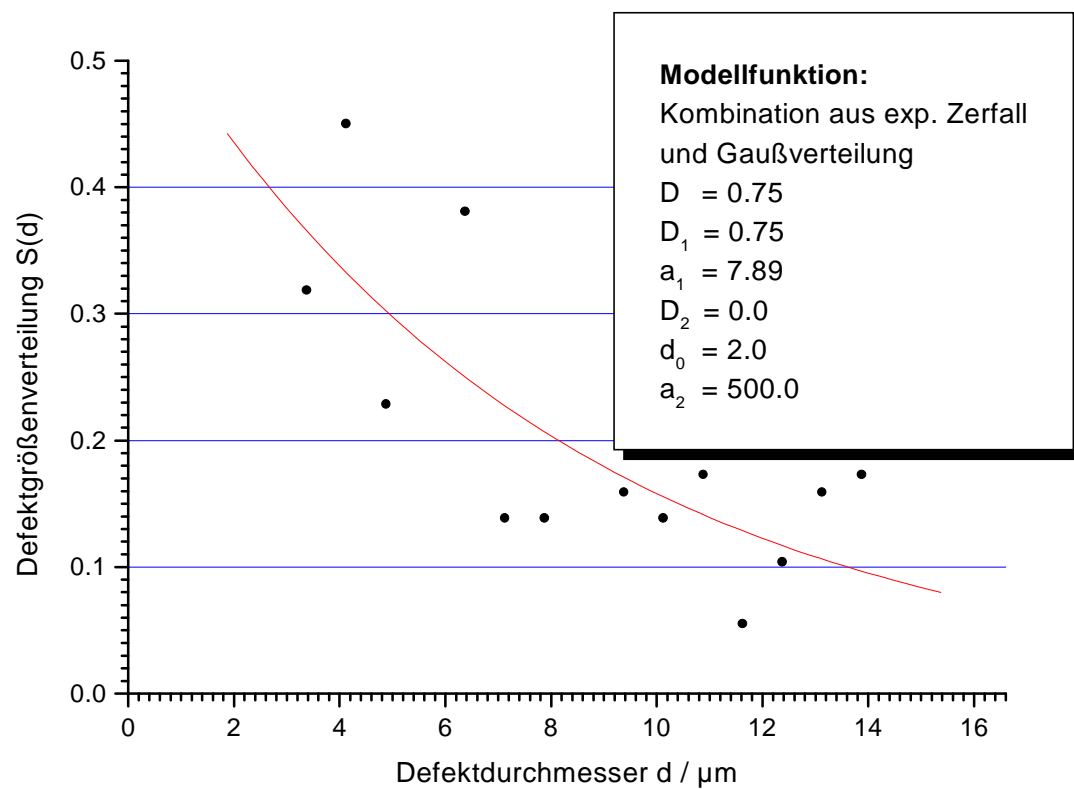


Abbildung 63: Defektgrößenverteilung, wenn Defekte mit  $d > 15 \mu\text{m}$  weggelassen werden

Tabelle 10: Metall-Ausbeute des untersuchten Chips bei Defekten mit  $d < 15 \mu\text{m}$

	Metall 1		Metall 2	
	subtraktive Defekte	additive Defekte	subtraktive Defekte	additive Defekte
<b>Ausbeute pro Defektart</b> $= A'^4 \cdot B'^8 \cdot C'^8 \cdot D'^{16}$	$89.7 \pm 1.0 \%$	$51.4 \pm 5.2 \%$	$99.8 \pm 0.2 \%$	$55.3 \pm 10.0 \%$

Ein Vergleich der jetzt berechneten Metallausbeuten mit den entsprechenden Daten der Tabelle 9 zeigt bereits eine beachtliche Steigerung der Ausbeute. Somit kann recht eindrucksvoll die Wirkung der reduzierten Defektdichte und der geänderten Defektgrößenverteilung demonstriert werden. Da im Abschnitt 7.1.4 Maschinenabrieb als eine Hauptursache großer Defekte genannt wurde, sollten für die Produktion des hier betrachteten Chips nur neueste Maschinen mit geringstem Abrieb (Partikelproduktion) benutzt werden.

#### **7.4.4.2 Skalierung des Layouts**

Bereits im Abschnitt 4.4 wurde beschrieben, wie die Ausbeute als Funktion eines Layoutskalierungsfaktors aufgefaßt werden kann. Unter diesem Aspekt sollen jetzt die Einzelausbeuten der Segmente A-D betrachtet werden. Um die Gesamtausbeute für das Produkt zu erhalten, müssen die Einzelausbeuten zunächst auf das Gesamtlayout umgerechnet und bei jeweils gleichem Skalierungsfaktor multipliziert werden. Es ergibt sich für die Gesamtausbeute ein Kurvenverlauf, wie er in Abbildung 64 gezeigt ist. Dabei wurden die Einstellungen der Tabelle 5 unverändert benutzt. Da bei immer kleineren Skalierungsfaktoren auch die Leitbahnen immer schmaler werden, ist ab einem gewissen Faktor die schmalste noch herstellbare Bahnbreite erreicht. Analog können ab einem Grenzfaktor benachbarte Leitbahnen nicht mehr getrennt aufgelöst werden. Für alle hier dargestellten Rechnungen wurde deshalb eine Auflösungsgrenze von  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von 0.03 (aus Abbildung 49 im Abschnitt 7.1.2) angenommen.



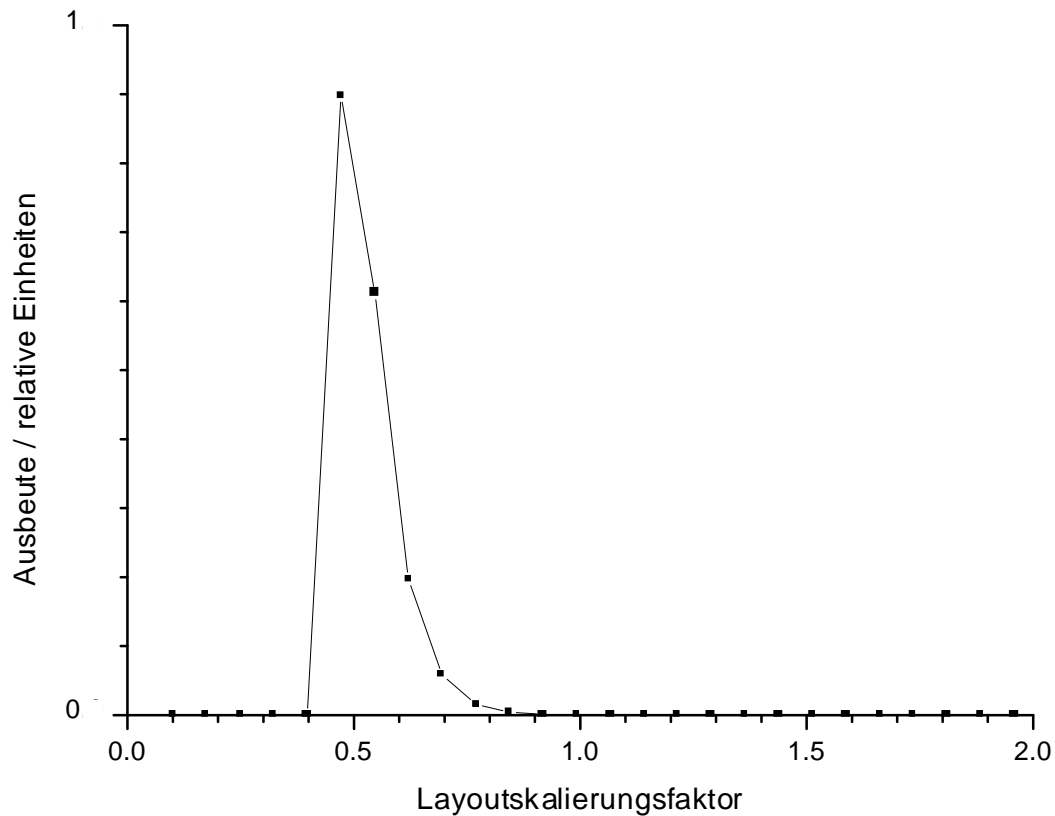


Abbildung 64: Abhängigkeit der Ausbeute des Beispieldesigns vom Layoutskalierungsfaktor

Bei einem Skalierungsfaktor von  $f \approx 0.5$  erhält man für dieses Design die maximale Ausbeute. Durch eine Kombination der Layoutskalierung mit der im Abschnitt 7.4.4.1 veränderten Defektdichte und Defektgrößenverteilung ergibt sich die folgende Grafik:

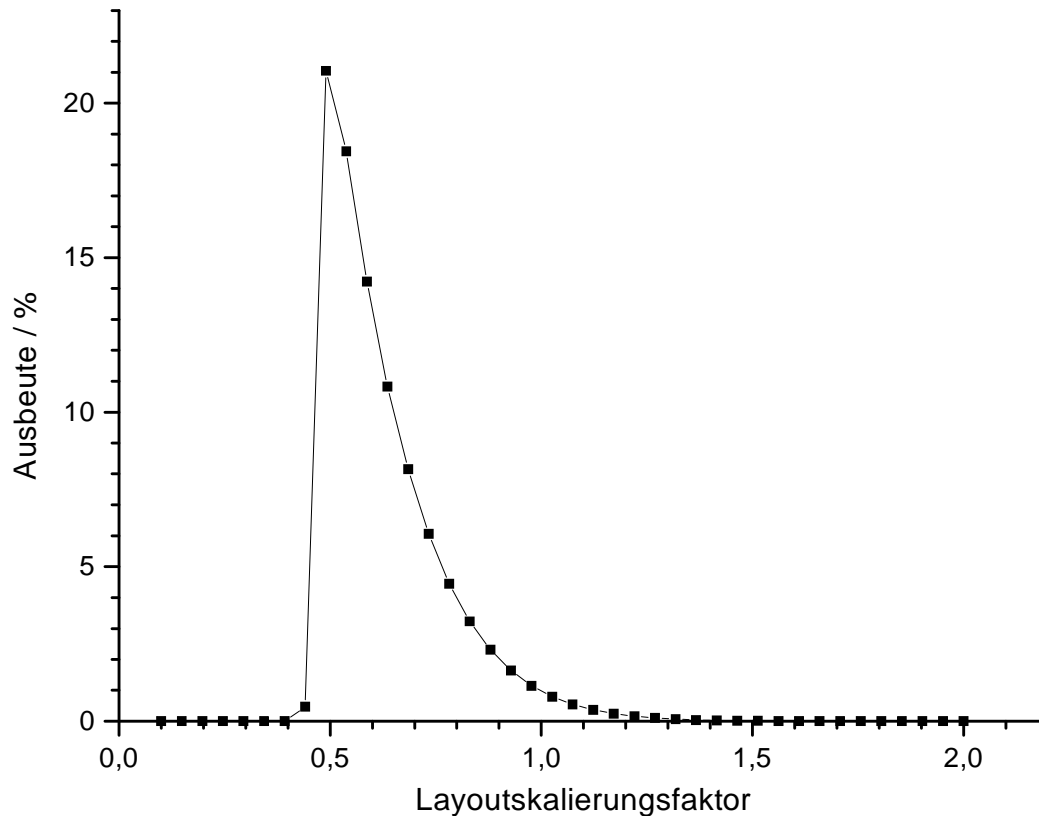


Abbildung 65: Erzielbare Ausbeute des Beispieldesigns in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor unter Berücksichtigung der reduzierten Defektdichte  $D_{0,red} = 0.18 / \text{cm}^2$  und der resultierenden Defektgrößenverteilung

Als Ergebnis dieser Kombination erhält man eine Gesamtausbeute von ca. 21 %. Natürlich darf nicht vergessen werden, daß man mit dem Skalierungsfaktor von  $f \approx 0.5$  für dieses spezielle Layout die Abstände benachbarter Leitbahnen bis zur derzeit aktuellen Auflösungsgrenze reduziert. Bei der Produktion auf moderneren Anlagen wird diese Grenze allerdings nochmals reduziert, und man könnte einen noch kleineren Skalierungsfaktor zur weiteren Ausbeutesteigerung verwenden.

Weiterhin ist bei Layoutskalierungen zu beachten, daß sich solche Operationen auf alle Ebenen des jeweiligen Layoutsegments auswirken. So kann es durchaus vorkommen, daß die Ausbeute der einen Ebene durch Reduktion des Skalierungsfaktors weiter gesteigert werden kann, während derselbe Faktor in einer anderen Ebene bereits zum Unterschreiten der Auflösungsgrenze führt und somit die Ausbeute für diese Ebene drastisch senkt.

Wenn man von örtlichen Auflösungsschwankungen absieht, ist der kleinste noch anwendbare Skalierungsfaktor demnach von der geringsten Leitbahnbreite bzw. dem kleinsten Abstand benachbarter Leitbahnen des Layouts vorgegeben. Da heutige Chips meist modular aufgebaut sind, gibt es in jedem dieser Module eine solche kleinste Breite bzw. einen kleinsten Abstand. Somit ist es möglich und auch nötig, jedes Modul für sich mit einem Faktor zu skalieren, um eine maximale Ausbeutesteigerung zu erhalten.

## **7.5 Produktzuverlässigkeit**

### **7.5.1 Überprüfung des Modells zur Lebensdauerprognose**

Um die im Abschnitt 5.2 ff. beschriebenen Annahmen über die Abhängigkeit der Ausfallzeit einer Leitbahn von der lokalen Stromdichte zu prüfen, wurde ein spezielles Layout mit Schwachstellen entworfen (Abbildung 66) und präpariert (Abbildung 67). Die Schwachstellen entsprechen in ihrer Form der eines kreisrunden subtraktiven Zuverlässigkeitsdefektes, wie er in Abbildung 41 dargestellt wurde. Von diesen Schwachstellen wurden 9 Stück im Abstand von 100  $\mu\text{m}$  auf jeder Leitbahn gleichmäßig verteilt. Während die Leitbahnbreite konstant 2.8  $\mu\text{m}$  beträgt, wurden die Maße der Schwachstellen von Leitbahn zu Leitbahn so variiert, daß sie ein Raster entsprechend der Abbildung 68 ergeben. In [99] werden ähnliche Designs beschrieben, allerdings verwendet man dort je Leitbahn nur eine Einkerbung, die je nach Struktur 50 % bzw. 80 % Prozent der Leitbahn entfernt. Der Mittelpunktsabstand des Defekts bleibt außerdem konstant bei  $s = 0$ .

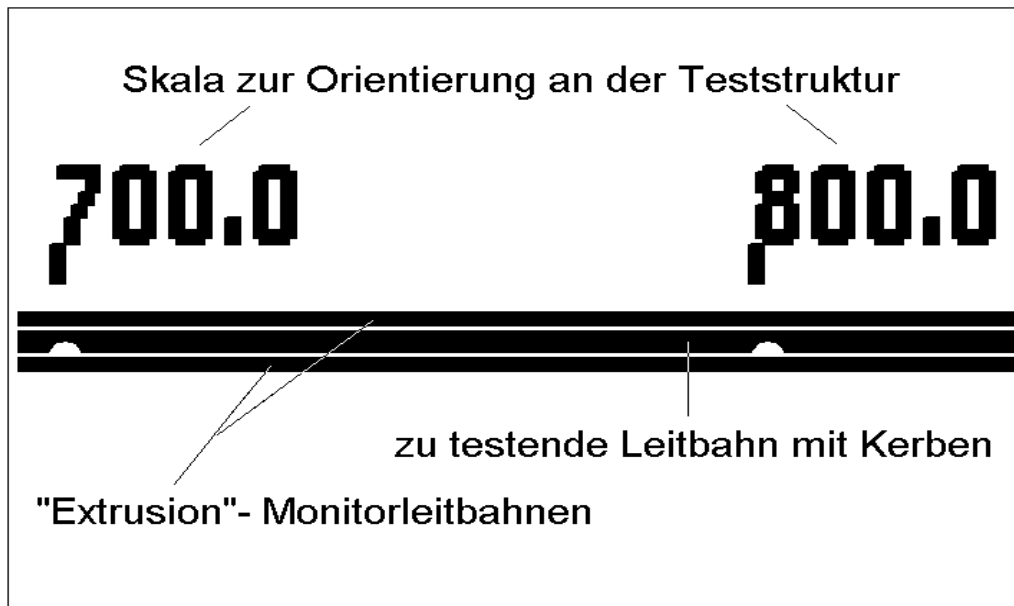


Abbildung 66: Entworfenes Layout mit Schwachstellen (Einkerbungen)

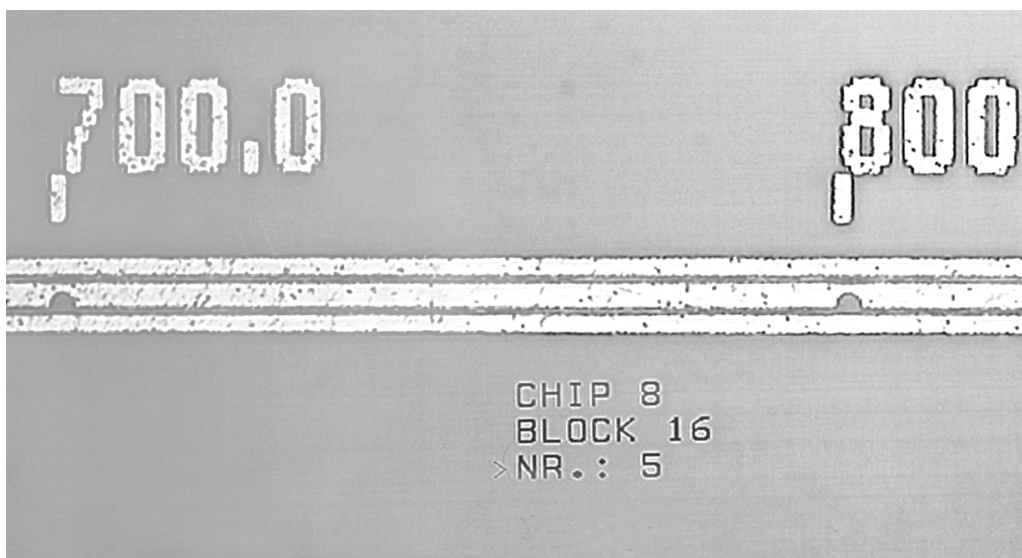


Abbildung 67: Präparierte Leitbahn mit Schwachstellen entsprechend dem Layout in Abbildung 66

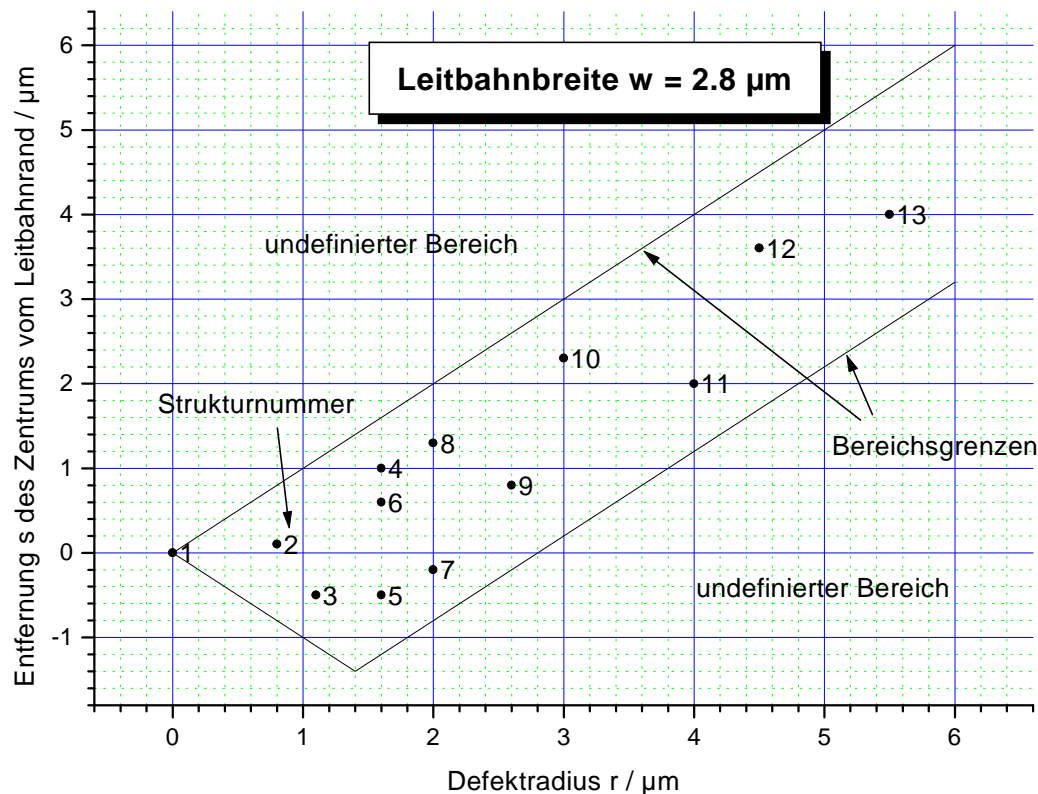


Abbildung 68: Zuordnung der präparierten Defektmaße zu den einzelnen Strukturen; Die Struktur 1 ist nicht "vorgeschädigt" worden ( $r = 0, s = 0$ ), da sie als Referenz dient.

Bei der Herstellung der Leitbahnen wurden genau die Prozessschritte durchgeführt, wie sie auch für eine normale Metall-2-Ebene der Technologie verwendet werden. Nach abgeschlossener Präparation konnten die Lebensdauern der Teststrukturen auf einem entsprechenden WLR-Meßplatz<sup>2</sup> mit dem konventionellen Verfahren der konstanten Stromdichte, beschrieben in [125], unter Nutzung folgender Einstellungen bestimmt werden:

- Heiztischtemperatur  $T = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Streßstromdichte  $j = 3 \text{ MA} / \text{cm}^2$
- Leitbahnbreite  $w = 2.8 \mu\text{m}$

Durch den angelegten Streßstrom, der während der Messungen immer auf einem konstanten Wert gehalten wurde, kam es zu einer Eigenerwärmung der Leitbahnen um ca.  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , was

<sup>2</sup> WLR = Wafer Level Reliability; hier Meßplatz, mit dem auf Waferebene Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden können

eine reale Meßtemperatur von ca. 260 °C bedeutet. Um für jedes Rastermaß eine gewisse statistische Sicherheit der Ausfallzeiten zu erlangen, wurden je Rasterpunkt 14 gleichartige Strukturen vermessen. Ermittelt man aus diesen Daten die mittleren Ausfallzeiten der jeweiligen Strukturklassen mit der logarithmischen Normalverteilung, so lassen sich diese auch als 3D-Grafik darstellen. In der Abbildung 69 sind die so bestimmten relativen Ausfallzeiten (relative Ausfallzeit = mittlere Lebensdauer einer eingekerbten Leitbahn / mittlere Lebensdauer der unbeschädigten Bahn) der Teststrukturen aufgetragen und mit MTTF bezeichnet<sup>3</sup>.

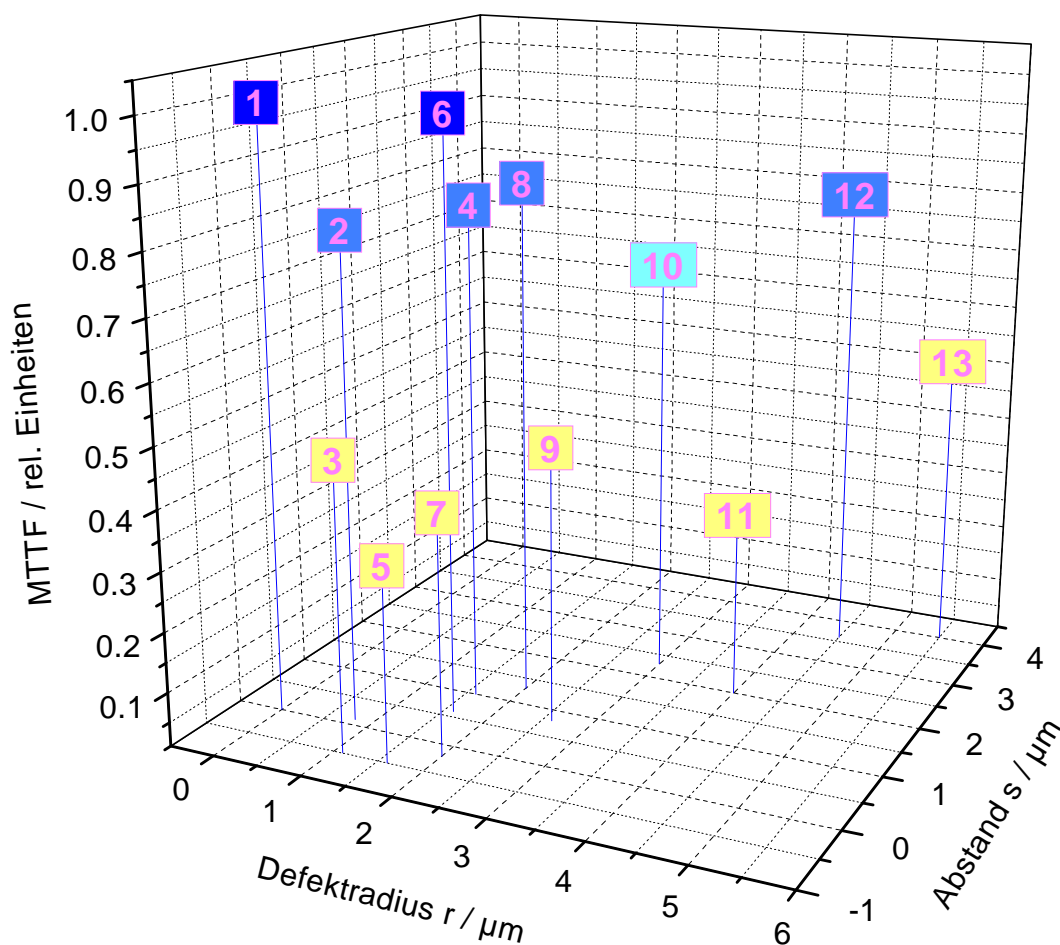


Abbildung 69: Dreidimensionale Darstellung der gemessenen Ausfallzeiten für Leitbahnen mit Schwachstellen

<sup>3</sup> MTTF = Mean Time To Failure, mittlere Zeit bis zum Ausfall

Die Abbildung 69 zeigt, wie die mittlere gemessene relative Lebensdauer sowohl vom Defektdurchmesser als auch vom Abstand seines Zentrums zum Leitbahnrand abhängt. An der Struktur mit der Nummer 1 wurde keine Einkerbung vorgenommen (siehe Abbildung 68) und erwartungsgemäß ist ihre Lebensdauer die größte. Die Ausfallzeiten aller anderen Strukturen wurden zur grafischen Darstellung auf die Zeit dieser ungeschädigten Struktur bezogen (relative Ausfallzeiten).

Im Anschluß an die Bestimmung der Ausfallzeiten wurde der Stromdichteexponent in Gleichung (5.13) bestimmt. Dazu wurden Lebensdauermessungen an Strukturen ohne Kerben bei veränderter Stromdichte aber konstanter Leitbahntemperatur durchgeführt. Da sich mit der Stromdichte auch die Eigenerwärmung der Leitbahn ändert, muß zum Erreichen einer gleichbleibenden Leitbahntemperatur die Heiztischtemperatur entsprechend angepaßt werden. Trägt man den logarithmischen Wert der so erhaltenen Ausfallzeiten über dem Logarithmus der jeweiligen Stromdichte auf, dann sollten diese auf einer Geraden liegen, aus deren Anstieg der negative Stromdichteexponent ermittelt wird. Für die untersuchten, nicht mit Kerben versehenen, Leitbahnen ergab sich somit ein Wert von  $n = 3.0$  (siehe Abbildung 70). Dieser Wert weicht damit von dem allgemein in der Literatur ([83], [84], [94], [95], [124]) veröffentlichten Wert von  $n = 2$  ab. Da das Ziel dieser Arbeit nicht die detaillierte Untersuchung von Elektromigrationsprozessen ist und der Parameter  $n$  für die späteren Rechnungen nur als Eingangsparameter benutzt werden soll, wird auf eine ausführlichere Ergebnisdiskussion an dieser Stelle verzichtet.

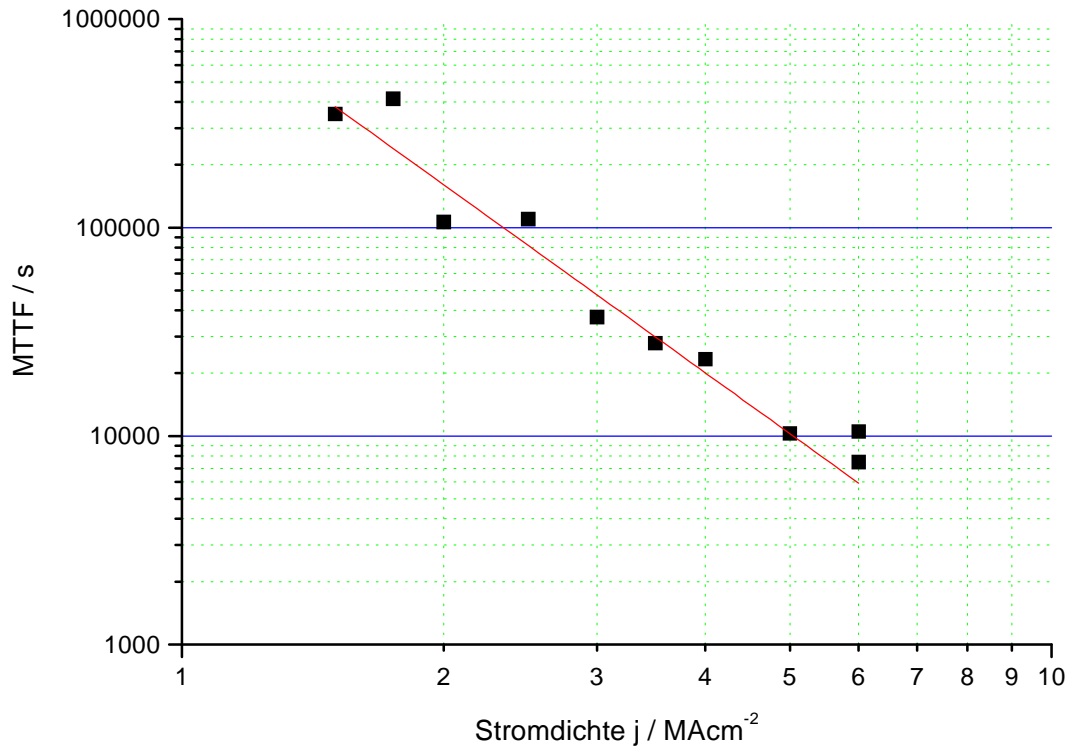


Abbildung 70: Registrierte mittlere Ausfallzeiten als Funktion der angelegten Streßstromdichte zur Bestimmung des Stromdichteexponenten

Nach demselben Prinzip wurde die Aktivierungsenergie  $E_a$  bestimmt. Während jetzt die Temperatur des Heiztisches und damit die Leitbahntemperatur verändert wurde, blieb die Stromdichte auf einem konstanten Wert. Aus der grafischen Darstellung von  $\log(\text{MTTF})$  über  $1/k_B T$  (Arrhenius-Darstellung, vgl. [122]) läßt sich nun für die Aktivierungsenergie  $E_a = 0.64 \text{ eV}$  ablesen ( $E_a$  entspricht nach der Umrechnung vom dargestellten dekadischen in den natürlichen Logarithmus dem Anstieg der Geraden in Abbildung 71).



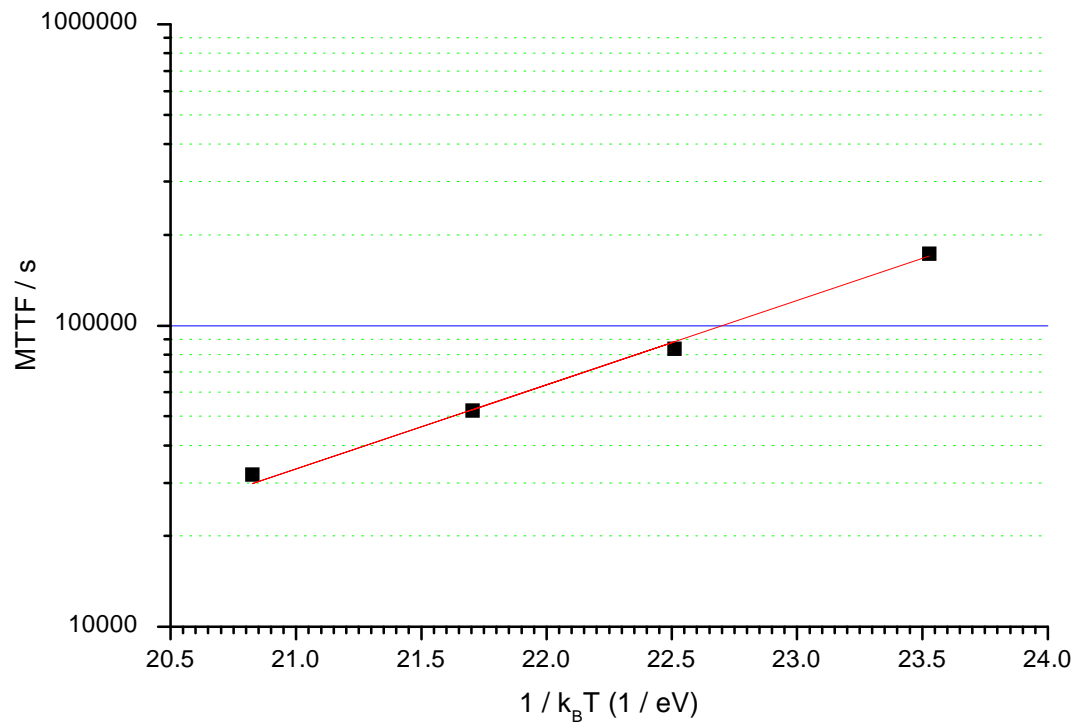


Abbildung 71: Zur Bestimmung der Aktivierungsenergie, Erklärung im Text

Auf eine Diskussion für den erhaltenen Wert von  $E_a = 0,64 \text{ eV}$  wird hier verzichtet, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Im nächsten Schritt wurde versucht, die registrierten relativen mittleren Ausfallzeiten mit der Gleichung (5.22) zu modellieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 72 dargestellt.

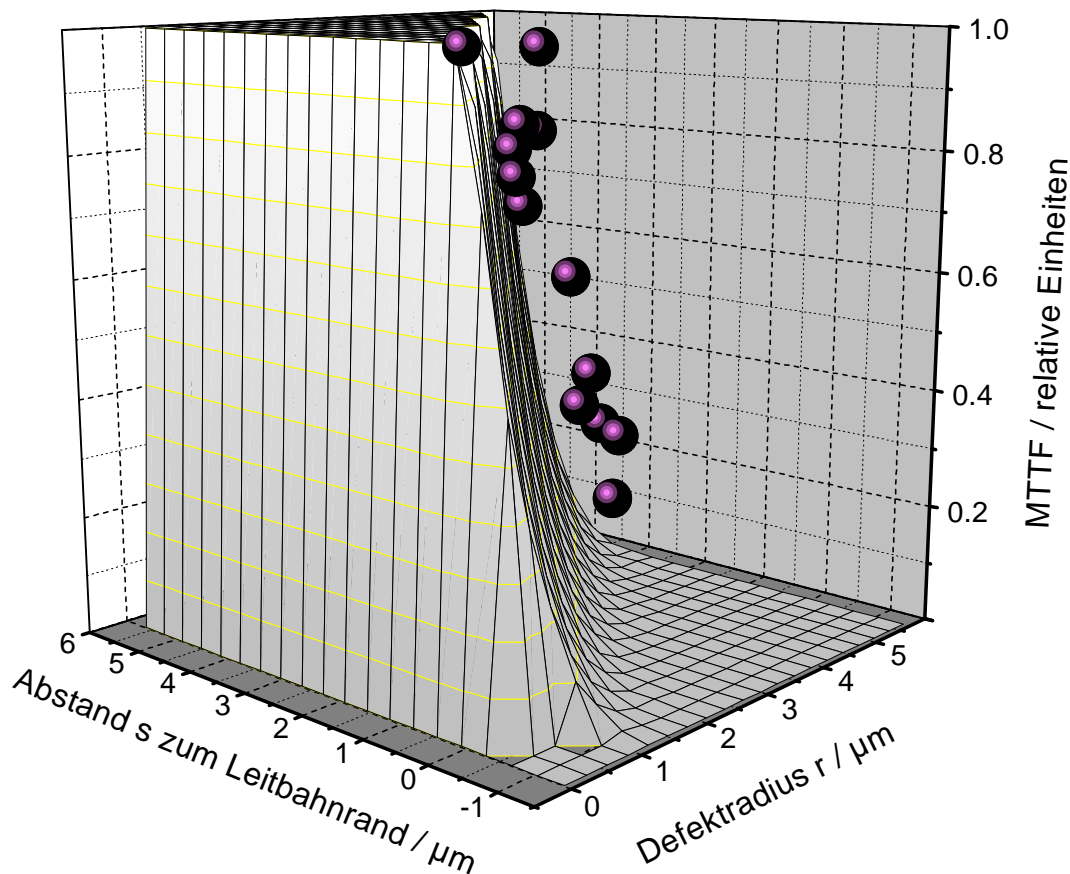


Abbildung 72: Meßwerte und deren Modellierung mit (5.13) und (5.22) unter Benutzung eines Stromdichteexponenten von  $n = 3$  und einer Aktivierungsenergie von  $E_a = 0.64 \text{ eV}$  (aus Experiment)

Es mußte festgestellt werden, daß die registrierten Ausfallzeiten mit dem Stromdichteexponenten  $n = 3$  nicht in der vom Modell vorhergesagten Fläche liegen. Die Gleichung (5.22) sagt für alle Teststrukturen eine zu geringe Lebensdauer vorher.

Physikalische Überlegungen, nach denen die sich Lebensdauer einer Leitbahn genau umgekehrt proportional zur Stromdichte verhält, führen in der Blackschen Gleichung (5.13) zu einem Wert von  $n = 1$  ([83], [121], [124]). Es wurden deshalb nochmals alle Modellrechnungen, diesmal aber mit  $n = 1$ , wiederholt und das Ergebnis in Abbildung 73 dargestellt.

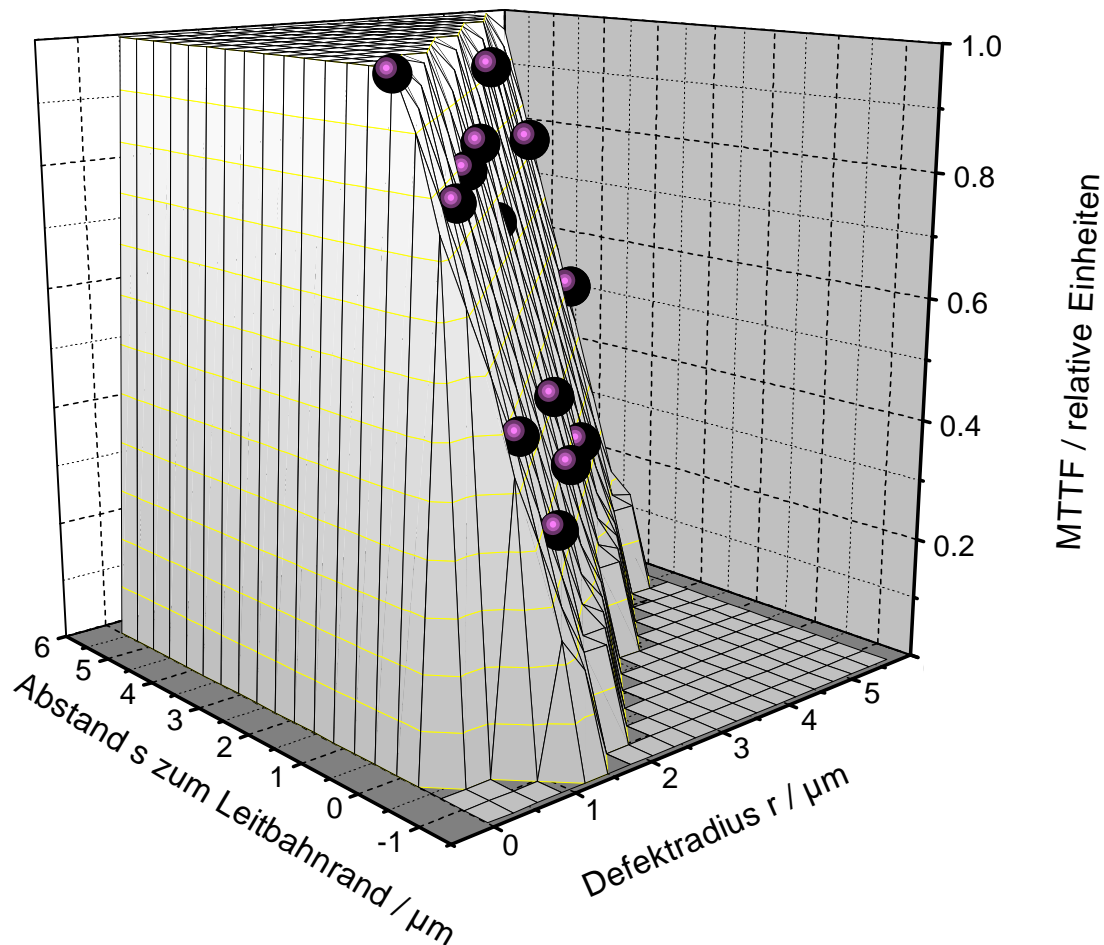


Abbildung 73: Meßwerte und deren Modellierung mit (5.13) und (5.22) unter Verwendung des physikalisch begründeten Stromdichteexponenten von  $n = 1$  und einer Aktivierungsenergie von  $E_a = 0.64 \text{ eV}$

Die Meßwerte liegen jetzt recht genau in der modellierten Ebene. Das legt den Schluß nahe, daß für den Erfolg von  $n = 1$  maßgeblich die in diesem Experiment benutzten lokalen Leitbahneinschnürungen und die damit verbundene örtlich höhere Stromdichte (bis Faktor 4.7) verantwortlich sind. Das würde den Mißerfolg des experimentell bestimmten Wertes von  $n = 3$  erklären, da diese Versuche an langen Leitbahnen durchgeführt wurden, bei denen zudem im Design keine lokale Einschnürung realisiert wurde.

Bei bekannten Versuchen (vgl. [83], [121], [124]), bei denen für den Stromdichteexponenten ein Wert von  $n \approx 2$  bestimmt wurde, verwendete man ebenfalls lange Leitbahnen konstanter Breite. In den vorliegenden Untersuchungen wurden aber Experimente mit langen Leitbahnen ( $1000\text{ }\mu\text{m}$ ) durchgeführt, die nur auf einem vergleichsweise kurzen Bereich (ca.  $7.5\text{ }\mu\text{m}$ ) in ihrer Breite reduziert wurden. Für diese Verhältnisse spielen Änderungen in der Stromdichte offenbar eine andere Rolle, als in Experimenten mit Leitbahnen konstanter Breite.

Während der Modellüberprüfung konnte gezeigt werden, daß sich die Ausfallzeit einer lokal eingegengten Leitbahn ohne Berücksichtigung der örtlichen Temperaturerhöhung korrekt modellieren läßt. Dies bekräftigt die Aussage im Abschnitt 5.3, nach der bei hohen globalen Leitbahntemperaturen lokale Temperaturerhöhungen von wenigen Grad kaum eine Auswirkung auf die Ausfallzeit haben.

Abschließend läßt sich feststellen, daß, wie in der Abbildung 73 gezeigt, die Anwendbarkeit des obigen Modells bewiesen ist und jeder Zuverlässigkeitsdefekt prinzipiell bezüglich seiner Schadwirkung klassifiziert werden kann.

### **7.5.2 Anwendungstest des Moduls zur Schwachstellenanalyse**

Im folgenden soll die Anwendung des im Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Moduls "Edge-Finder", das Bestandteil des Ausbeute- und Zuverlässigkeitssimulators CALYPSO ist, demonstriert werden. Da der Edge-Finder beliebige Layouts auf Schwachstellen überprüft, bietet es sich an, für einen Funktionstest das im Abschnitt 7.5 beschriebene und in der Abbildung 67 ausschnittsweise dargestellte Testlayout an dieses Modul zur Analyse zu übergeben. Als weitere Eingangsparameter wurden die folgenden Größen verwendet:

- |                                      |                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| • Leitbahnbreite (ohne Einschnürung) | $w = 2.8\text{ }\mu\text{m}$    |
| • Aktivierungsenergie                | $E_a = 0.64\text{ eV}$          |
| • Stromdichteexponent                | $n = 1$                         |
| • mittlere reale Leitbahntemperatur  | $T = 260\text{ }^\circ\text{C}$ |

Der Edge-Finder untersucht nun das übergebene Layout auf Schwachstellen, markiert diese und berechnet aus den weiteren Eingangsdaten die jeweiligen Ausfallzeiten, aus denen eine kumulative Ausfallzeitverteilung (exakter: kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeiten) berechnet wird. Die Abbildung 74 zeigt die markierten Schwachstellen. Die linke untere Struktur wurde vom Edge-Finder nicht markiert, da diese Testleitbahn als Referenzstruktur diente und nicht eingengt wurde. In der Abbildung 75 ist die vom Edge-Finder bestimmte kumulative Ausfallzeitverteilung dargestellt. Zum Vergleich sind weiterhin die experimentell ermittelten und die nach der Abbildung 73 analytisch bestimmten kumulativen Ausfallzeitverteilungen eingezeichnet.

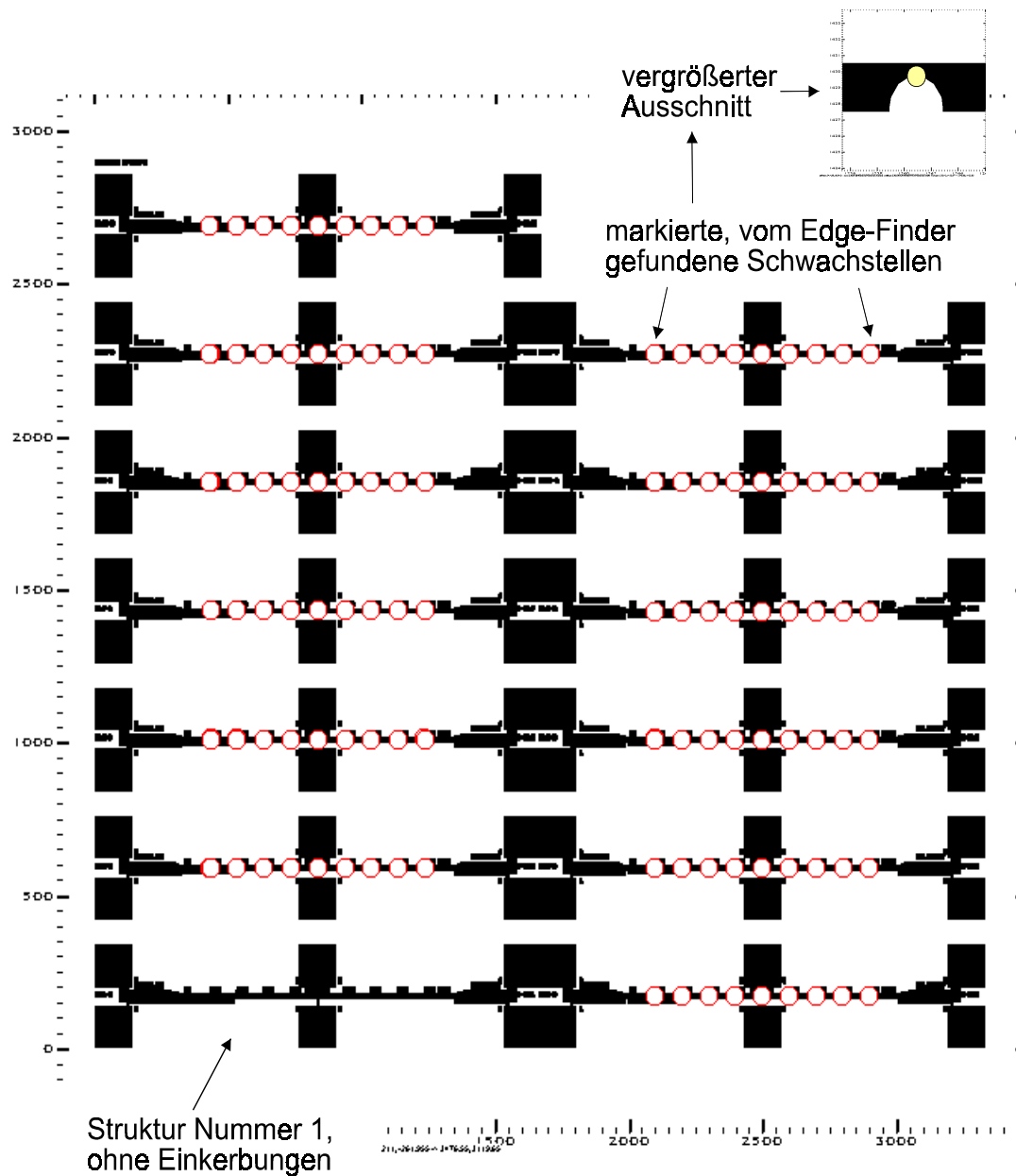


Abbildung 74: Übersicht zum Testlayout; Die Leitbahneinschnürungen wurden vom Edge-Finder als Schwachstellen markiert (Kreise).

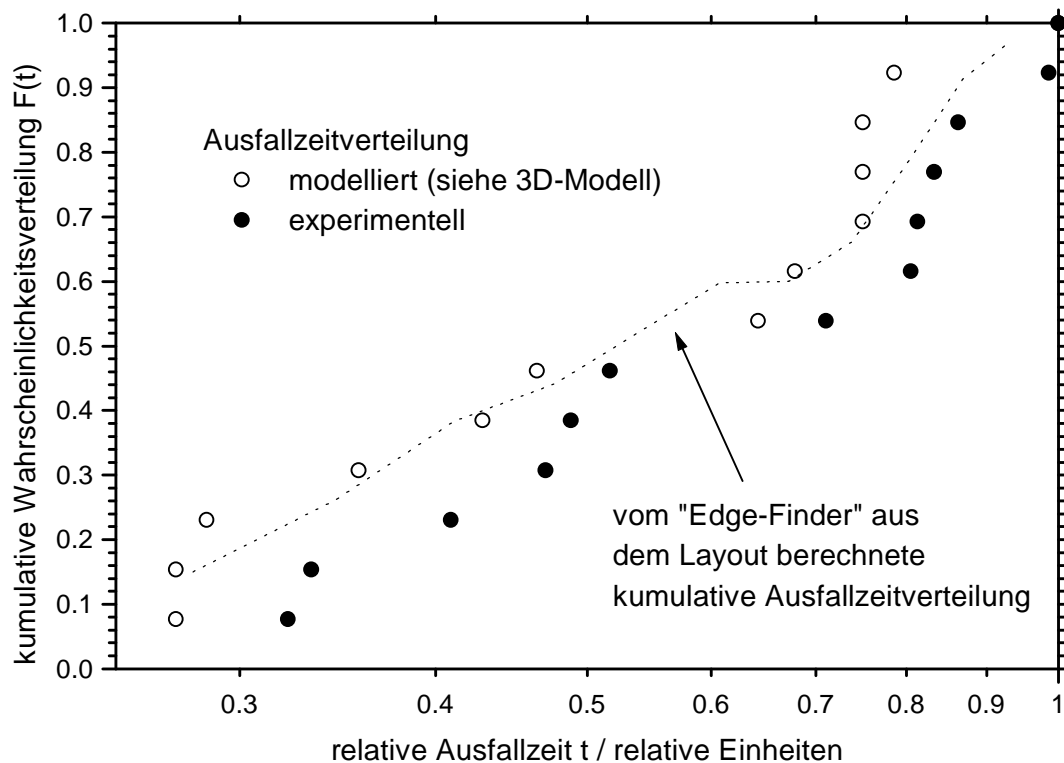


Abbildung 75: Vergleich der kumulativen Ausfallzeitverteilungen des Testlayouts

Die in der Abbildung 75 gezeigte gute Übereinstimmung der auf verschiedenen Wegen erhaltenen kumulativen Ausfallzeitverteilungen bestätigt die Richtigkeit der im Edge-Finder verwendeten Modellvorstellungen und Algorithmen. Somit kann auch dieses im Ausbeute- und Zuverlässigkeitssimulator enthaltene Modul, analog zum Ausbeuteprognosemodul, auf ein Produktdesign angewendet werden.

### 7.5.3 Schwachstellenanalyse eines Produktlayouts

Das im Abschnitt 7.4 beschriebene Beispieldesign wurde auf Schwachstellen, wie sie im Abschnitt 5 beschrieben sind, mit den entsprechenden Modulen des Programms CALYPSO (Abschnitt 6.2 ff.) untersucht. Es muß dabei zwischen den sogenannten Soft-Faults (Zuverlässigkeitsdefekte) und "eingebauten Schwachstellen" ("build-in reliability") unterschieden werden.

Soft-Faults entstehen durch zufällig verteilte Defekte auf dem Schaltkreis. "Eingebaute Schwachstellen" sind jedoch Polygone des Layouts, die vom Designer gezeichnet wurden und Stellen erhöhter Stromdichtedivergenz, besonders schmaler Leitbahnbreiten oder zu kleiner Abstände zu Nachbarpolygonen aufweisen. Normalerweise werden solche Stellen durch den sogenannten Design-Rule-Check (DRC) gefunden. Bei sehr großen Layouts -und um ein solches handelt es sich hier- dauert ein Design-Rule-Check mehrere Stunden bis Tage.

Das im beschriebenen Programm CALYPSO enthaltene Modul ist kein Ersatz für einen DRC und diesem auch nicht gleichwertig. Trotzdem ist es in der Lage, relativ schnell z.B. Stellen erhöhter Stromdichtedivergenz und Leitbahneinschnürungen (vgl. Abbildung 74) zu finden.

#### **7.5.3.1 Auswertung von "*build-in*"-Schwachstellen**

Zunächst wurden die Polygone der Metall 1- und -2-Ebenen auf Stellen erhöhter Stromdichtedivergenz untersucht. Während in der Metall 2-Ebene keine derartigen Stellen gefunden wurden, fiel in der Metall 1-Ebene das D'-Segment mit besonders vielen und großen Stromdichtedivergenzen auf. Die folgende Grafik zeigt die gefundenen Orte auf dem gleichzeitig dargestellten Produktlayout. Das abgebildete Layout entspricht dabei dem in der Abbildung 62 dunkel unterlegten Teilstück und wurde zur Darstellung um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Im rechten Teil der Abbildung 76 ist ein Ausschnitt vergrößert dargestellt.



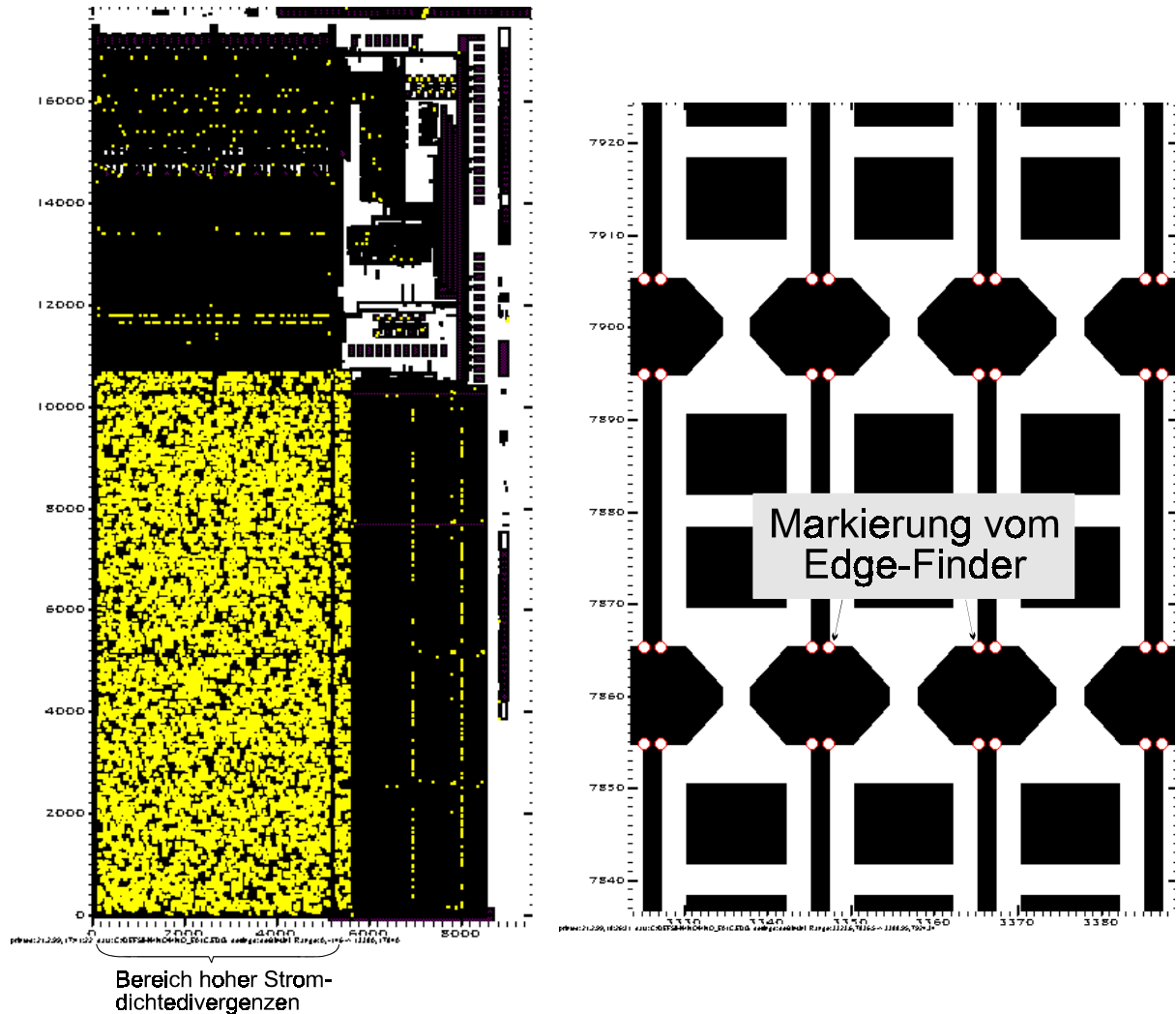


Abbildung 76: links: Stellen höchster Stromdichtedivergenzen, rechts: vergrößerter Ausschnitt aus dem Segment D', die Stellen großer Stromdichtedivergenzen sind markiert

Die Stellen erhöhter Stromdichtedivergenz im D'-Teil könnte man beseitigen, indem die Verbindung von der schmalen Leitbahn zur plötzlichen Verdickung durch eine verlängerte Schräge ersetzt wird (Abbildung 77). Die Stromdichtedivergenz ließe sich durch diese Maßnahme sofort senken.

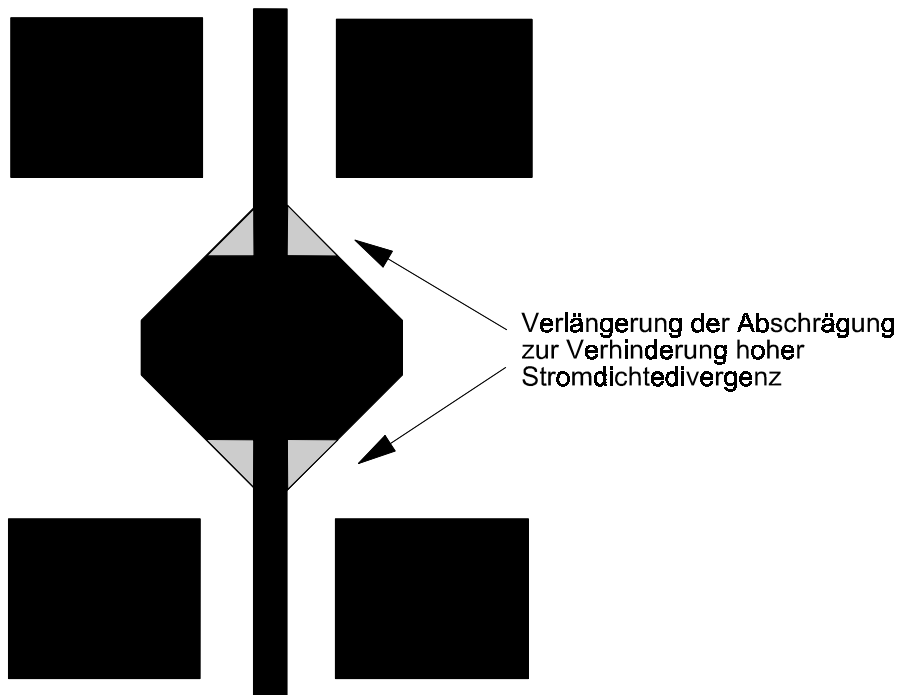


Abbildung 77: Vorgeschlagene Änderung des Layouts zur Vermeidung hoher Stromdichtedivergenzen

### 7.5.3.2 Auswertung von Zuverlässigkeitsdefekten

Die vom Defektsimulator I erzeugten Defekte werden je nach Größe und ihren zufälligen Koordinaten entweder die Ausbeute mindern oder zur Kategorie der Zuverlässigkeitsdefekte gehören (Definition im Abschnitt 5.1). Die Wirkung dieser Zuverlässigkeitsdefekte auf das Layout der Lichtventilmatrix wurde ebenfalls ausgewertet.

Genau wie für die "eingebauten Schwachstellen" des Abschnitts 7.5.3.1 lässt sich nach den Ausführungen der Abschnitte 5.3 bis 5.5 für jeden Zuverlässigkeitsdefekt eine relative Lebensdauer bestimmen. Diese Zeiten wurden sowohl für subtraktive als auch für additive Zuverlässigkeitsdefekte bestimmt und in je einem Histogramm festgehalten. Dabei müssen zusätzlich die aus dem Defektmonitoring bekannten Defektgrößenverteilungen  $S(d)$  sowie die jeweilige Defektdichte berücksichtigt werden.

Die Abbildung 78 zeigt zunächst die getrennt registrierten kumulativen Wahrscheinlichkeitsdichten der berechneten Ausfallzeiten. Es ist zu erkennen, daß diese Verteilungen für die additiven und die subtraktiven Defekte in der gewählten Darstellungsart entsprechend der Weibullverteilung zumindest vergleichbare Kurvenformen zeigen. Allerdings kann man nur für die subtraktiven Zuverlässigkeitsdefekte befriedigend gut eine Gerade an die berechneten Werte anpassen.

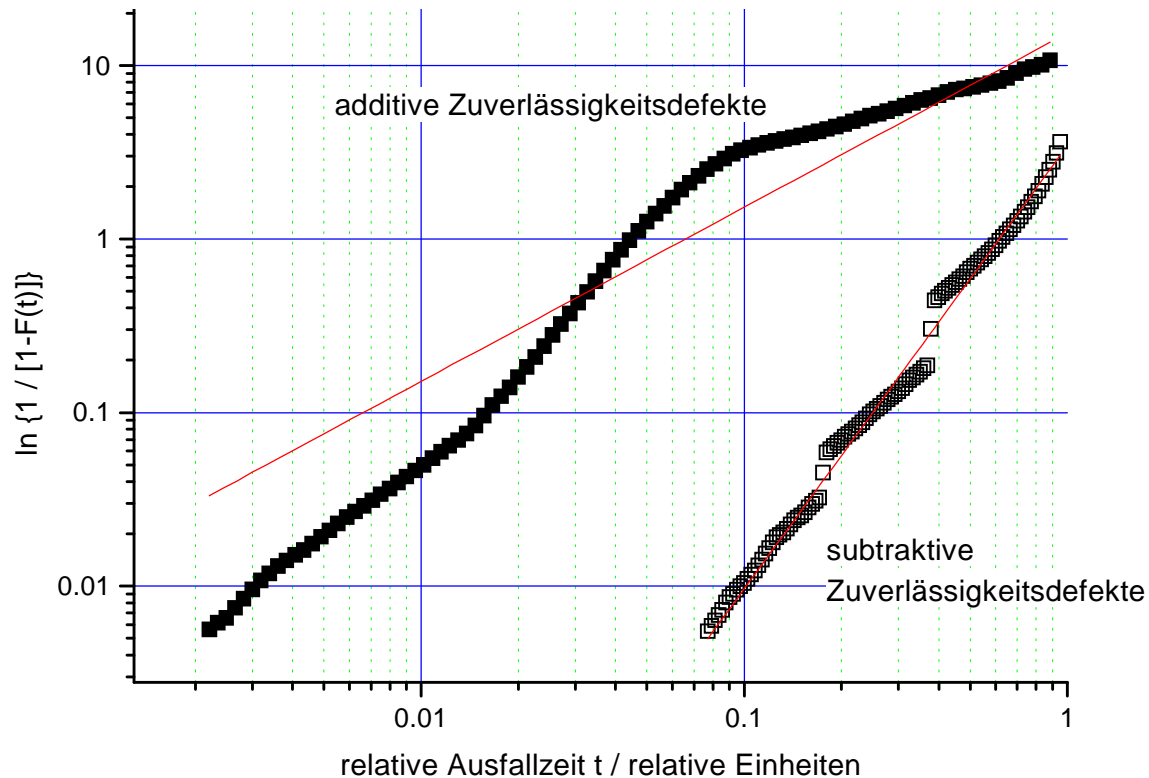


Abbildung 78: Kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilungen der relativen Ausfallzeiten für additive und subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte

Die Überlagerung der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $F(t)$  der Ausfallzeiten ist in der Abbildung 79 dargestellt. Aufgrund der Abweichungen der Einzelkurven  $F(t)$  für additive und subtraktive Defekte ergibt sich nun ein sogenannter multimodaler Gesamtkurvenverlauf.

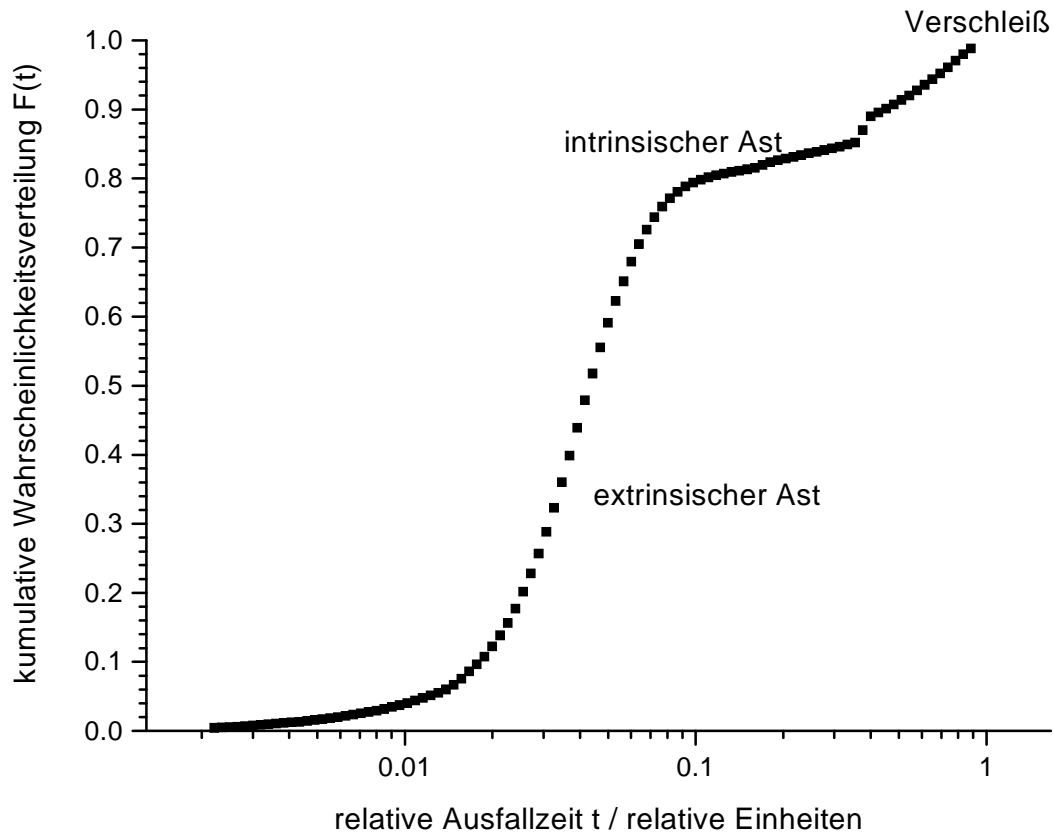


Abbildung 79: Überlagerung der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $F(t)$  für additive und subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte

Aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $f(t)$  der Ausfallzeiten und den damit bestimmbaren kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $F(t)$  ergibt sich nach [103] und [122] die (momentane) Ausfallrate  $h(t)$  nach folgender Gleichung:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (7.8)$$

$f(t)$	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeit
$F(t)$	kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeit
$h(t)$	(momentane) Ausfallrate

In der Abbildung 80 ist der Verlauf von  $h(t)$  für beide Defektkategorien dargestellt. Es zeigt sich ein grundsätzlich voneinander verschiedener Kurvenverlauf der Ausfallraten. Während von den additiv wirkenden latenten Defekten vorrangig hohe Ausfallraten nach kleinen Betriebszeiten erzeugt werden, steigt die Ausfallrate bei subtraktiv wirkenden Defekten erst bei großen Betriebsdauern an. Additive Defekte werden demnach Frühausfälle erzeugen, während sich die subtraktiven Defekte weit mehr im späten Betriebsstadium bemerkbar machen.

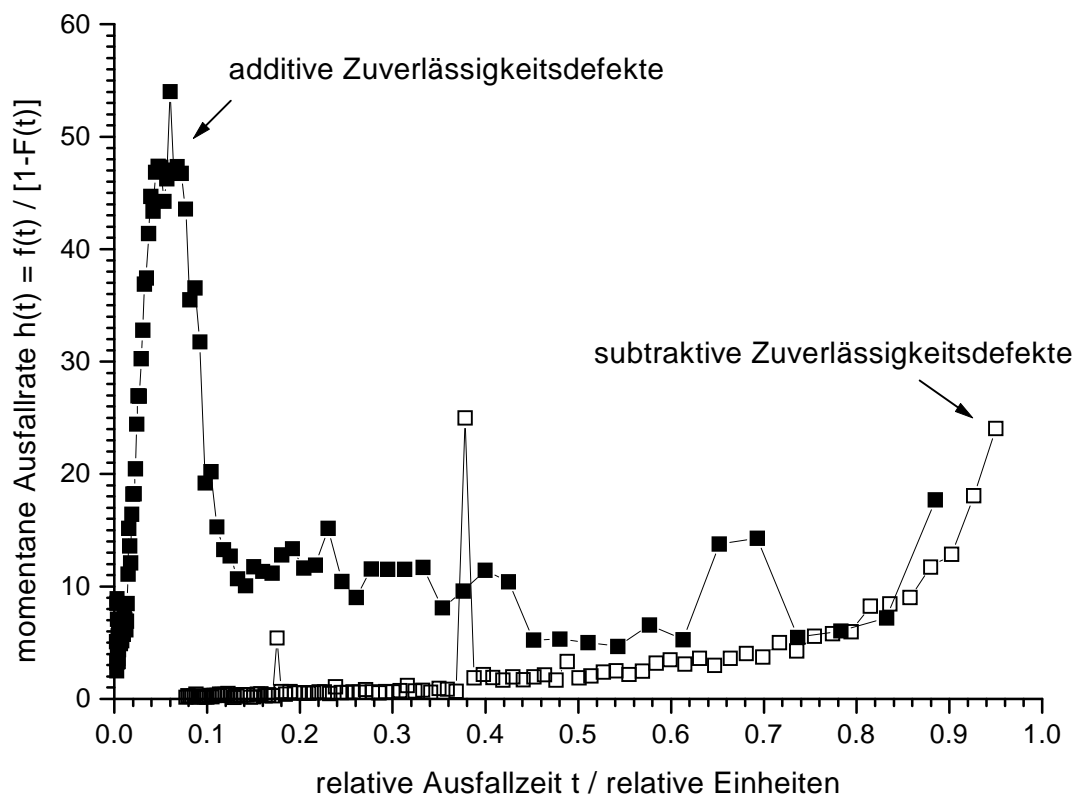


Abbildung 80: Vergleich der momentanen Ausfallraten  $h(t)$  für additive und subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte

Die Überlagerung beider Kurven  $h(t)$  ist in der Abbildung 81 aufgetragen. Es ergibt sich nun ein Kurvenverlauf, der der sogenannten "Badewannenkurve", die im Abschnitt 5 beschrieben wurde, zumindest ähnlich ist. Es sei an dieser Stelle darauf aufmerksam gemacht, daß das Ansteigen der Ausfallrate gegen Ende der normalen Lebensdauer bei der Badewannenkurve mit Verschleißerscheinungen begründet wurde. Da auch in der Abbildung 81 ein solcher Anstieg zu erkennen ist, dessen Ursache hier aber hauptsächlich subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte sind, legt das den Schluß nahe, daß insbesondere diese Klasse von Defekten maßgeblich zur Beschleunigung des Materialverschleißes führt.

Sieht man von der Spitze im Kurvenverlauf von  $h(t)$  bei  $t \approx 0.37$  ab, deren Auftreten ungeklärt ist, dann ergibt sich im Bereich von  $t \approx 0.1$  bis  $t \approx 0.6$  ein annähernd konstantes Niveau der Ausfallrate. Ein solches Plateau wurde im Abschnitt 5 mit dem Vorhandensein intrinsischer Defekte erklärt. Für den hier untersuchten Fall heißt das, daß sowohl ein kleiner Teil der additiven, als auch ein kleiner Teil der subtraktiven latenten Defekte als intrinsische Defekte wirken.

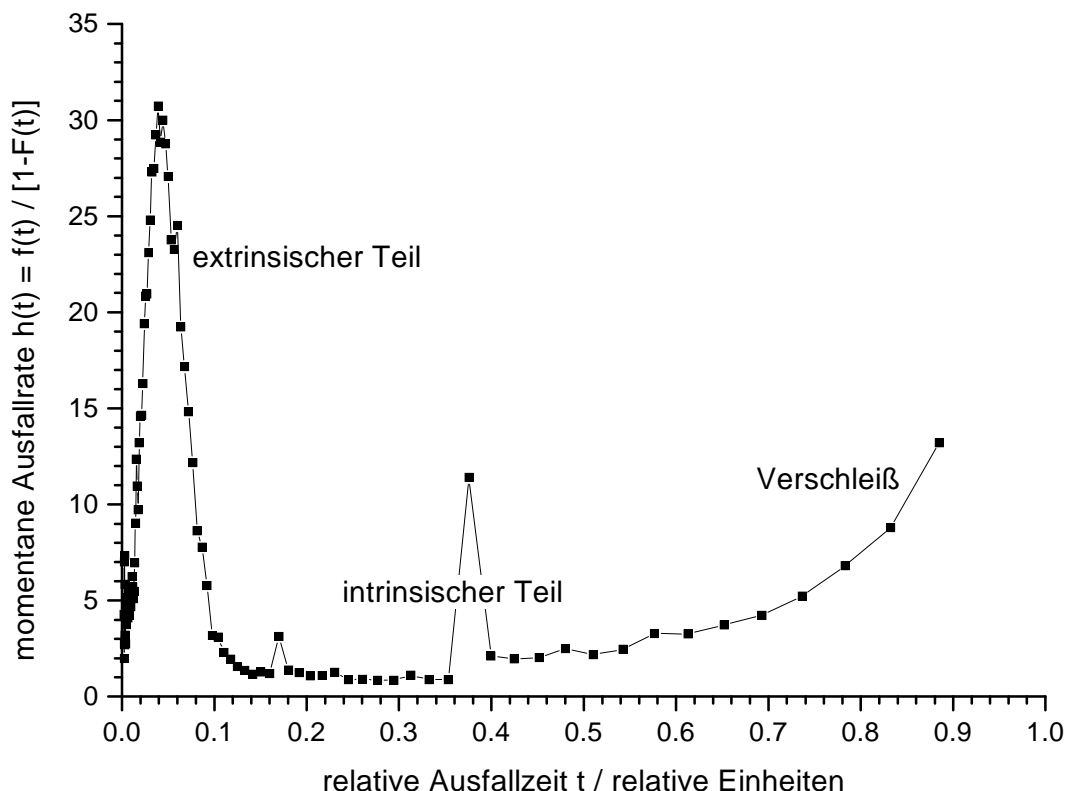


Abbildung 81: Überlagerung der momentanen Ausfallraten  $h(t)$  für additive und subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte; Das Ergebnis ist die typische "Badewannenkurve".

Bei den Untersuchungen zur örtlichen Verteilung derjenigen latenten Defekte, die zu einer besonders kurzen Lebensdauer des Chips führen, wurde zunächst festgestellt, daß es sich dabei in erster Linie um die additiven Zuverlässigkeitsdefekte handelt. Die Auswertung der vom Defektsimulator I erzeugten Defektdatei ergab weiterhin, daß die C'- und der B'-Teile des untersuchten Layouts (vgl. Abbildung 62) sehr schwach bevorzugte Bereiche auf dem Chip darstellen. Die Abbildung 82 gibt im linken Teil einen Überblick zur Verteilung der Defekte, die den Chip in den ersten 5 % der Gesamtlebensdauer zum Ausfall bringen. Der rechte Teil der Abbildung 82 zeigt eine vergrößerte Ansicht, in der man typische Vertreter der Zuverlässigkeitsdefekte des C'-Teils der Lichtventilmatrix erkennt.

Erklären läßt sich die schwache Häufung der Defekte in den C'- und D'-Gebieten mit der dortigen Layoutcharakteristik. So befinden sich in diesen beiden Teilen sehr lange Leitbahnen, die mit Busleitungen in herkömmlichen VLSI-Designs vergleichbar sind. Derart lange und relativ schmale Leitbahnen sind einerseits bekannt dafür, besonders empfindlich auf Einkerbungen (Voids), zu reagieren [83]. Andererseits liegen die Leitbahnen in diesen Bereichen auf langen Strecken relativ dicht beieinander und bilden so eine große Einfangfläche für additive Defekte. Diese Tatsache spiegelt sich nun in der Simulation wider.

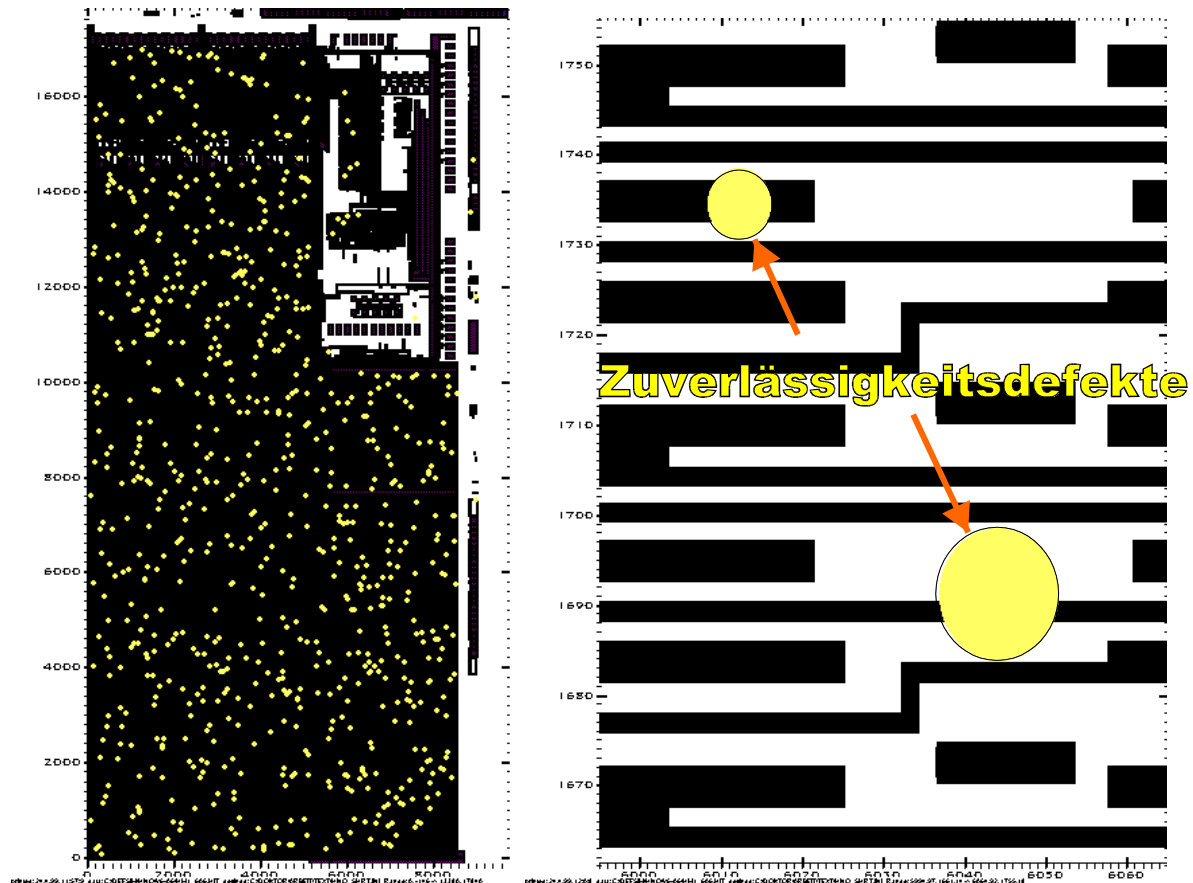


Abbildung 82: links: Zuverlässigkeitsdefekte der Lichtventilmatrix, die in den ersten 5 % der Gesamtlebensdauer zum Ausfall führen; rechts: Vergrößerung zweier typischer Vertreter der links gezeigten Defekte (additive Zuverlässigkeitsdefekte)

Für diese Art von Zuverlässigkeitsdefekten kann man keine abschließende Empfehlung zur Änderung des Designs geben. Schließlich gehorchen sie einer statistischen Verteilung, die von der jeweiligen produktspezifischen Layoutcharakteristik überlagert wird.