

## 5 Latente Defekte und Produktzuverlässigkeit

Defekte verringern nicht nur die Ausbeute eines Bauelements, sie beeinträchtigen auch dessen Zuverlässigkeit. Die Folge solcher Zuverlässigkeitsdefekte, auch als extrinsische Defekte bezeichnet, sind relativ hohe Ausfallraten im frühen Betriebsstadium (siehe Abbildung 31). Die Anzahl der ausgefallenen Produkte pro Zeiteinheit sinkt dann auf ein nahezu konstantes Niveau ab, dessen Höhe vom Vorhandensein sogenannter intrinsischer Defekte bestimmt wird. Gegen Ende der "normalen" Lebensdauer eines Bauelements steigt sie aufgrund von Verschleißerscheinungen wieder an. Die folgende Grafik zeigt den resultierenden typischen Verlauf der Ausfallrate als Funktion der Betriebsdauer. Diese Kurve, die die momentane Ausfallrate darstellt, ist bekannt als sogenannte "Badewannenkurve" (vgl. [45], [86], [87], [103]).

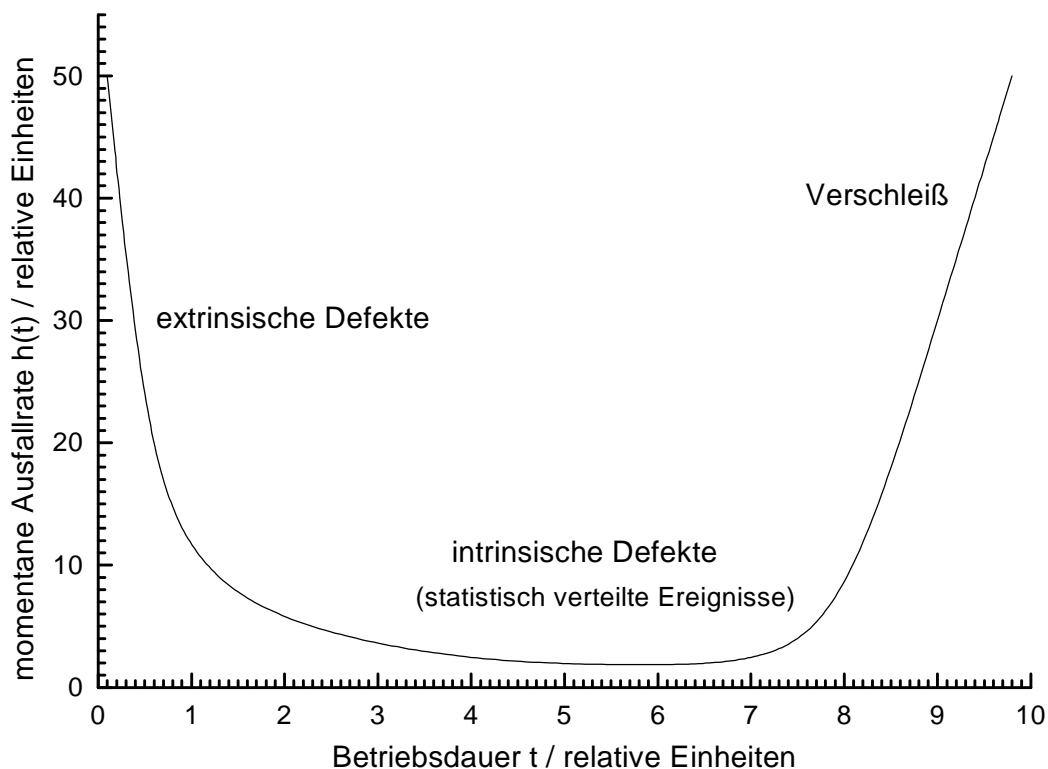


Abbildung 31: Darstellung der momentanen Ausfallrate  $h(t)$  als Funktion der Zeit  $t$  (typische "Badewannenkurve")

### 5.1 Definition von Zuverlässigkeitsdefekten (Soft-Faults)

Die im Abschnitt 2.1.2 erwähnte Klasse der zuverlässigkeitsrelevanten Defekte (weiterhin auch als Zuverlässigkeitsdefekte bezeichnet) beinhaltet ein weites Spektrum von Ereignissen, die die Zuverlässigkeit bzw. die Lebensdauer eines Schaltkreises beeinträchtigen. So können z.B. Fremdatome im Gateoxid maßgeblich dessen Durchschlagfestigkeit verringern. Im Leitbahnkomplex bewirken sie Fehler im Metallgitter und können so an dieser Stelle zum verfrühten Ausfall der Leitbahn führen.

Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf Zuverlässigkeitsdefekte im Leitbahnkomplex, die eine Leitbahn entweder zum Teil unterbrechen, so daß es an dieser Stelle zu einer Leitbahneinengung kommt, oder die Leitbahn lokal verbreitern. Durch letztere Defekte kann es passieren, daß der verbleibende Abstand zur Nachbarleitbahn so klein wird, daß schon geringe Potentialunterschiede zwischen beiden Bahnen ausreichen, um an der Berührungsstelle das sowieso nur wenig -wenn überhaupt- vorhandene Isolatormaterial zu durchschlagen (vgl. Abbildung 32).

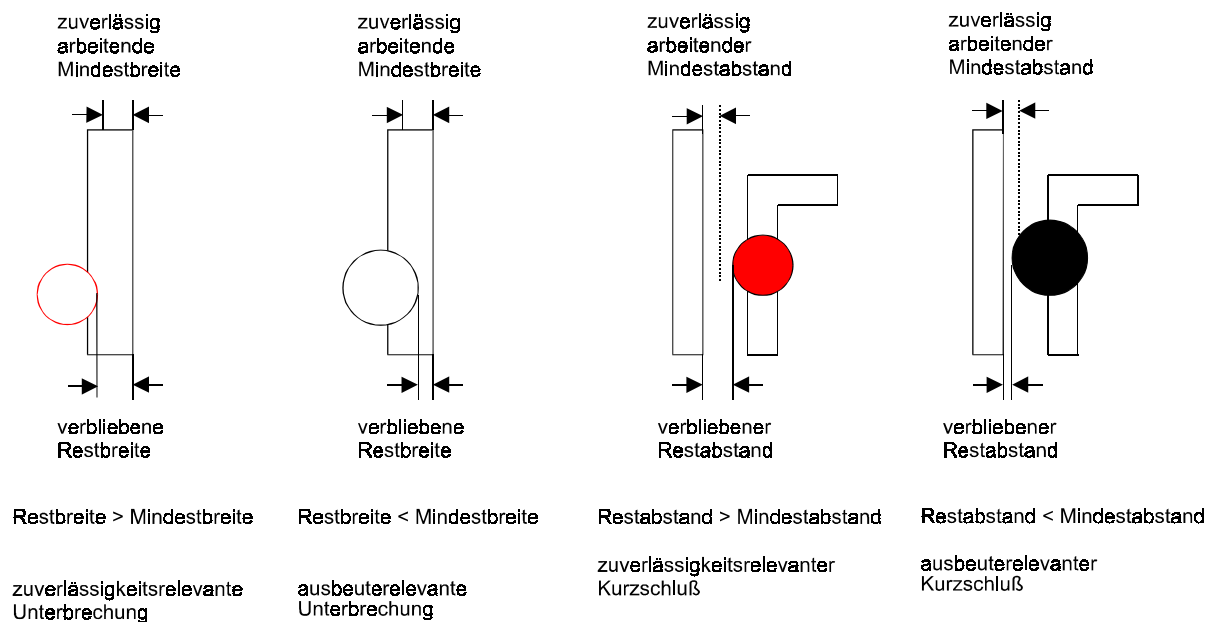


Abbildung 32: Einteilung in ausbeute- und zuverlässigkeitsrelevante Defekte

Ein Zuverlässigkeitsdefekt kann nicht ohne weiteres von einem automatischen Waferinspektionsgerät erkannt werden, da seine Ausdehnung und damit die Abweichung von der normalen Leitbahn meist innerhalb der Toleranzgrenzen üblicher Inspektionsgeräte liegt. Auch ein Funktionstest der Schaltung führt höchstens zu sehr geringen Abweichungen der Testparameter, die ebenfalls noch im Toleranzbereich liegen [82].

Über die Behandlung bzw. Auswertung der Zuverlässigkeitsdefekte wird in der Literatur nur relativ wenig ausgesagt [26]. Nur in [82] und [86] wird diese Art von Defekten ausführlicher diskutiert. Dabei geht man von folgender Überlegung aus:

Man betrachtet zunächst einen additiven Defekt, der im vollen Kontakt zu einer Leitbahn steht, aber von einer benachbarten zweiten Leitbahn durch einen geringen Abstand getrennt ist. Durch Einführung eines Minimalabstands  $\delta$ , ab dem der Defekt als Zuverlässigkeitsdefekt gelten soll, kann auch für diese Defekte eine Kernelfunktion  $K_R(d)$  berechnet werden. Eine solche Funktion verläuft vollkommen anders als die bisher bekannten Kernel, wie man der folgenden Grafik entnehmen kann:

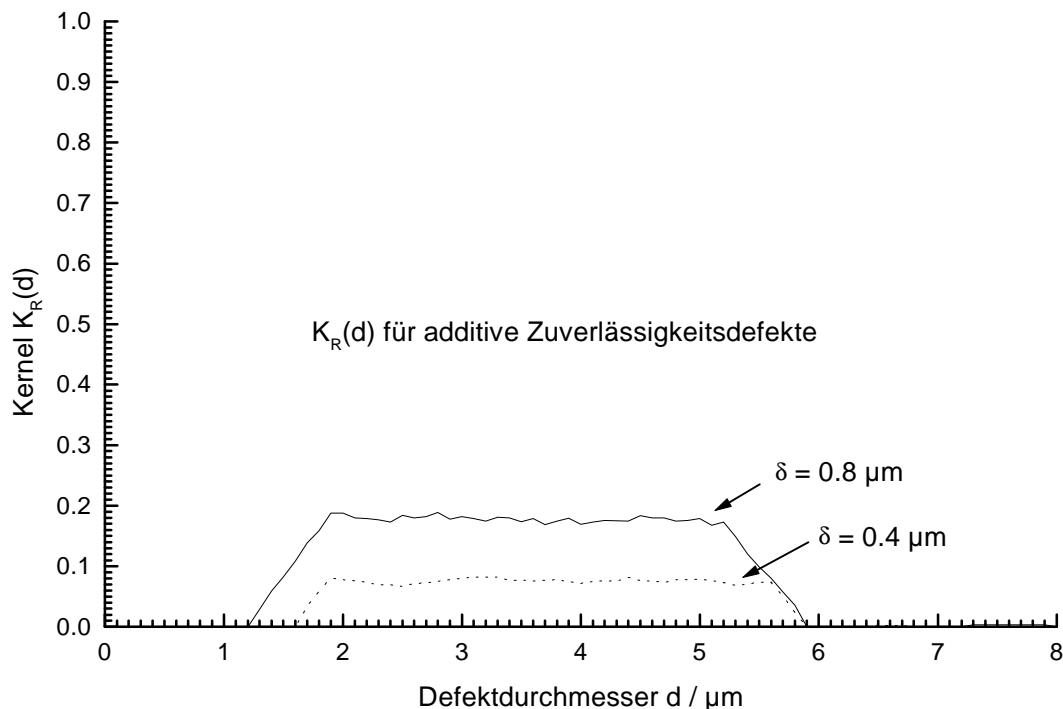


Abbildung 33: Kernelfunktion für additive Zuverlässigkeitsdefekte an einem Leitbahngitter mit  $w = s = 2 \mu\text{m}$

Der Abbildung 33 liegen Daten zugrunde, die für ein einfaches Leitbahngitter mit der Leitbahnbreite  $w = 2 \mu\text{m}$  und mit Leitbahnabständen von  $s = 2 \mu\text{m}$  berechnet wurden. Man sieht, daß erst ab einem Defektdurchmesser  $d_{R\min} = s - \delta$  die Wahrscheinlichkeit für diese Zuverlässigkeitsdefekte sehr schnell auf ein Niveau von 10% ( $\delta = 0.4 \mu\text{m}$ ) bzw. 20% ( $\delta = 0.8 \mu\text{m}$ ) ansteigt. Dieser Wert bleibt bis ca.  $d_{R\max} = 2w + s - \delta$  annähernd konstant, sinkt dann rasch und erreicht bei  $6.0 \mu\text{m}$  den Wert 0. Defekte, die kleiner als  $d_{R\min}$  sind, können nicht gleichzeitig die eine Leitbahn berühren und so nahe an eine benachbarte Leitbahn heranreichen wie es der jeweils gewählte Minimalabstand  $\delta$  verlangt. Für Defektdurchmesser, die sich  $d_{R\max}$  nähern, steigt die Wahrscheinlichkeit, daß der Defekt bereits die Ausbeute durch einem "echten" Kurzschluß mindert. Deshalb sinkt die Wahrscheinlichkeit für Zuverlässigkeitsdefekte, bis sie schließlich bei  $d \geq d_{R\max}$  den Wert 0 erreicht.

Diese Aussagen gelten in analoger Weise auch für Zuverlässigkeitsdefekte, die eine Leitbahn bis auf eine Restbreite einschnüren. Allgemein wählt man hier keine feste Restbreite, sondern gibt einen Prozentsatz  $\delta_p$  an. Sinkt die prozentuale Restbreite unter diesen Wert, dann wird dieser Defekt als Zuverlässigkeitsdefekt gewertet. In [86] geht man beispielsweise willkürlich von  $\delta_p = 25\%$  aus.

Durch Festlegung entsprechender Werte für  $\delta$  und  $\delta_p$ , kann mit Gleichung (5.1) auch für Zuverlässigkeitsdefekte eine reduzierte Chipfläche  $A_{R\text{red}}$  bestimmt werden, die sich nun wie gewohnt in ein Ausbeutemodell einsetzen läßt. Das Ergebnis entspricht der Wahrscheinlichkeit, einen Chip zu finden, der frei von extrinsischen Zuverlässigkeitsdefekten ist [86].

Benutzt man bei diesen Berechnungen sowohl für Ausbeute- als auch für Zuverlässigkeitsdefekte beispielsweise das Poisson-Modell, dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$Y = e^{-A_{red}D_0} \quad \text{bzw.} \quad Y = e^{-A_{Chip}D_{eff}} \quad (5.1)$$

$$R = e^{-A_{Rred}D_0} \quad \text{bzw.} \quad R = e^{-A_{Chip}D_{Reff}} \quad (5.2)$$

und

$$R = Y^\kappa \quad (5.3)$$

$$\kappa = \frac{A_{Rred}}{A_{red}} = \frac{D_{Reff}}{D_{eff}} \quad (5.4)$$

$R$       *von extrinsischen Defekten freier Teil der Produkte*

$D_{Reff}$     *effektive Zuverlässigkeitsdefektdichte*

Damit besteht zwischen der Ausbeute und der Zuverlässigkeit eines Produktes eine enge Verbindung:

- Niedrige Ausbeuten bedeuten gleichzeitig auch eine geringe Produktzuverlässigkeit [82], [86].

Die mit Gleichung (5.4) verdeutlichte Beziehung muß dabei nicht immer so trivial sein, sie hängt vielmehr vom jeweils verwendeten Ausbeutemodell ab.

Das Ergebnis des folgenden Ausdrucks entspricht dem Anteil der gefertigten Chips, der durch extrinsische Defekte ausfällt und wird als Defektlevel bezeichnet [86]:

$$DL = 1 - R \quad (5.5)$$

*DL*      *Defektlevel*

Für einen bestimmten Ausfallmechanismus kann nun angenommen werden, daß für jeden einzelnen Zuverlässigkeitsdefekt eine individuelle Ausfallzeit existiert. Das führt für diesen Ausfallmechanismus zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilung  $f(t)$  der Ausfallzeiten  $t$ , oder kurz, zur Ausfallzeitverteilung. Integriert man  $f(t)$  über die Zeit, dann ergibt sich die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F(t)$  der Ausfallzeiten und daraus die sogenannte Überlebensfunktion  $S(t)$  des Schaltkreises:

$$F(t) = \int f(t) dt \quad (5.6)$$

*t*            *Zeit*  
*f(t)*        *Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeiten*  
*F(t)*        *kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeiten*

$$S(t) = 1 - F(t) \quad (5.7)$$

*S(t)*        *Überlebensfunktion*

Die Überlebensfunktion  $S(t)$  gibt an, welcher Teil der Produktchips bis zur Zeit  $t$  überlebt hat. In [82] wird ein Verfahren beschrieben, wie man die Funktion  $S(t)$  für ein neues Produkt aus den Daten eines Referenzproduktes bestimmen kann. Es soll hier nur in groben Zügen wiedergegeben werden:

- Es wird davon ausgegangen, daß jeder Zuverlässigkeitsdefekt eine Überlebenswahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit besitzt. Diese Wahrscheinlichkeit soll mit  $s(t)$  bezeichnet werden.
- Die Wahrscheinlichkeit, daß ein vollständiger Schaltkreis, der als Referenz dienen soll, überlebt, wird mit  $S(t)$  bezeichnet und berechnet sich nach der sogenannten Kettenregel:

$$S_r(t) = s_r(t)^n = s_r(t)^{D_{R_{eff}} \cdot A_{Referenzchip}} \quad (5.8)$$

$s_r(t)$       *Überlebensfunktion eines einzelnen Zuverlässigkeitsdefektes*

$S_r(t)$       *Überlebensfunktion des Referenzchips*

$n$             *Anzahl der Zuverlässigkeitsdefekte*

- Diese Funktion läßt sich auf ein Produkt mit folgendem Ausdruck umrechnen:

$$S_p(t) = S_r(t)^{R(p|r)} \quad (5.9)$$

$$R(p|r) = \frac{D_{R_{eff},p} \cdot A_{Chip,p}}{D_{R_{eff},r} \cdot A_{Chip,r}} \quad (5.10)$$

$S_p(t)$       *Überlebensfunktion des Produktes*

$S_r(t)$       *Überlebensfunktion des Referenzchips*

$R(p|r)$       *Skalierungsfunktion zwischen Referenz und Produkt*

- Um die für Gleichung (5.9) benötigte Funktion  $S_r(t)$  zu erhalten, wird die Ausfallzeitverteilung des Referenzproduktes benötigt. Damit man die Ausfallzeiten dieser Verteilung möglichst schnell erhält, werden Belastungstests unter Bedingungen durchgeführt, die den Ausfall beschleunigen. Gebräuchlich sind dabei höhere Temperaturen und höhere Spannungen, als für den normalen Betrieb vorgesehen sind. Der resultierende Beschleunigungsfaktor wird allgemein nach dem folgenden Ausdruck berechnet ([82], [83], [93], [122]):

$$AF(2|1) = \exp\left\{\frac{E_a}{k_B} \cdot \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] + C \cdot (U_2 - U_1)\right\} \quad (5.11)$$

|           |  |
|-----------|--|
| $AF(2 1)$ | Beschleunigungsfaktor zwischen<br>Testbedingung 1 und 2      |
| $E_a$     | für den Ausfallmechanismus notwendige<br>Aktivierungsenergie |
| $k_B$     | Boltzmann-Konstante  |
| $T_{1,2}$ | Temperaturen   |
| $U_{1,2}$ | Spannungen   |
| $C$       | Spannungsbeschleunigungsfaktor                               |

- Durch den Beschleunigungsfaktor geht Gleichung (5.9) schließlich über in:

$$S_p(2|t) = S_r(1|AF(2|1) \cdot t)^{R(p|r)} \quad (5.12)$$

Somit wäre es möglich, die Überlebensfunktion bzw. die Ausfallrate eines Produktes noch vor seiner erstmaligen Herstellung aus den Daten eines Referenzchips abzuleiten. Die Anwendbarkeit des eben beschriebenen Formalismus ist jedoch an eine Reihe von Bedingungen geknüpft [82]:

1. Die Form der Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  muß für Referenz und Produkt identisch sein.
2. Die Leitbahnbreite und die Leitbahnabstände von Referenz und Produkt müssen übereinstimmen.
3. Die eingeführten Werte für  $\delta$  (siehe Abbildung 33) und  $\delta_p$  müssen für alle Berechnungen gleich bleiben.
4. Für die Anwendung der Beziehungen (5.3) und (5.4) wird eine Gleichverteilung der Defekte vorausgesetzt. Außerdem dürfen sich die Defekte nicht gegenseitig beeinflussen.



Wegen der Bedingung 2 ist man für korrekte Berechnungen darauf angewiesen, das Layout des Referenzchips ständig an das Layout des späteren Produktes anzupassen. In den heute üblichen komplexen Schaltkreisen wird aber nicht nur mit einer durchgängig gleichen Leitbahnbreite gearbeitet. Auch die Leitbahnabstände bleiben nicht über die gesamte Fläche des Layouts konstant. Die Erfüllung der Bedingung 2 ist demnach in Frage gestellt.

Die Werte für  $\delta$  und  $\delta_p$  sind willkürlich gewählt worden. Die Abbildung 33 zeigt den Einfluß des konkret benutzten Betrages von  $\delta$  auf die Kernelfunktion, die ihrerseits den mit den Gleichungen (5.2) und (5.5) berechneten Wert für den "Defektlevel" bestimmt. Je nach Wahl von  $\delta$  wird sich demzufolge auch der Verlauf der Überlebensfunktion und damit die vorausberechnete Ausfallrate des Produktes ändern. Für  $\delta_p$  gelten die Aussagen in analoger Weise.

Somit ist das in [82] beschriebene Verfahren zur Abschätzung der Ausfallrate mit einigen Unsicherheiten behaftet, die die Gültigkeit der mit Gleichung (5.12) berechneten Ausfallrate in Frage stellen.

## **5.2 Analyse von Zuverlässigkeitsdefekten**

Ausgehend von den abschließenden Ausführungen des obigen Abschnitts wird zunächst auf die Angabe von festen Werten der dort eingeführten Größen  $\delta$  und  $\delta_p$  verzichtet. Das hat folgende Konsequenzen:

1. Jeder additive Defekt, der exakt eine Leitbahn berührt und über den Leitbahnrand hinausragt, ist ein Zuverlässigkeitsdefekt.
2. Jeder subtraktive Defekt, der exakt eine Leitbahn berührt, ist ebenfalls ein Zuverlässigkeitsdefekt.

Die Motivation für dieses Vorgehen findet sich in vielen Veröffentlichungen zu den Themen Leitbahnzuverlässigkeit und Elektromigration, denn als zentrales Problem wird dort die Abhängigkeit der Leitbahnlebensdauer von Veränderungen in der Leitbahnstruktur diskutiert ([83], [89], [92], [95], [124]).

Wie die Bezeichnung "Elektromigration" schon vermittelt, handelt es sich dabei um das Phänomen des Materialtransports durch elektrische Felder. Beobachtet wurde dies bereits im Jahre 1861 durch Gerardin. In [83] werden die Mechanismen des Elektrotransports ausführlich beschrieben. Es soll deshalb hier nur das zugrundeliegende Prinzip umrissen werden:

- Ein Metallion ist unter Zufuhr thermischer Energie in der Lage, die Kräfte des Metallgitters zu überwinden und sich frei zu bewegen.
- Einerseits wirkt auf dieses positiv geladene Ion durch ein angelegtes elektrisches Feld die Coulomb-Kraft und zieht es zur Kathode.
- Andererseits können sich im Metallgitter auch die sogenannten Leitungselektronen frei bewegen und werden von der Coulomb-Kraft zur Anode bewegt. Die Bewegungen des Ions und der Elektronen sind also gegenläufig. Damit kommt es unvermeidbar auch zu Zusammenstößen und somit zur Impulsübertragung.
- Da die Elektronen nicht einer thermischen Aktivierung bedürfen um sich frei zu bewegen, werden die vergleichsweise wenigen aktivierten Metallionen vom sogenannten Elektronenwind mitgerissen. Es kommt somit zum Materialtransport in Richtung Anode und zu einer Abdünnung der Leitbahn an der Kathode.

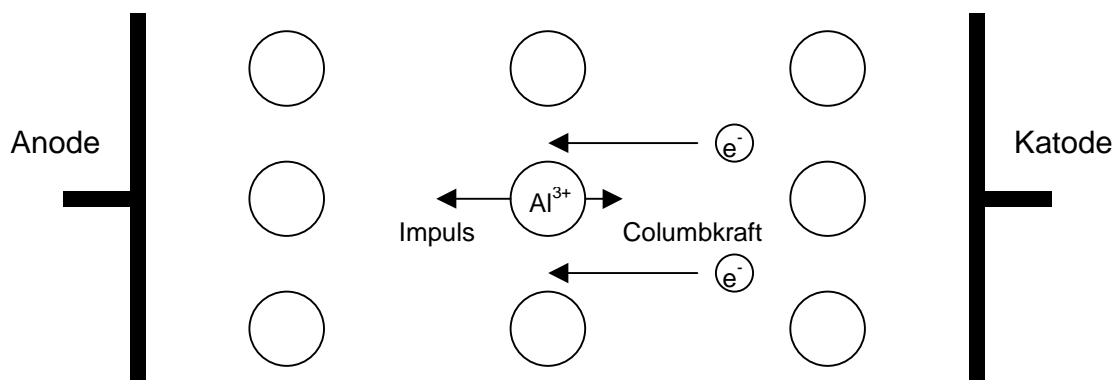


Abbildung 34: Prinzipskizze zum Elektrotransport

Ein Massefluß durch eine Leitbahn kann diese allein noch nicht schädigen, solange die Flußgeschwindigkeit an allen Stellen gleich ist. Erst wenn es zu Flußdivergenzen kommt, beobachtet man an einigen Stellen der Leitbahn die Ausbildung von Poren, die sich bilden, weil weniger Material angeliefert wird als abfließt. An anderen Stellen beobachtet man die Ausbildung von Materialhügeln, den sogenannten Hillocks, weil hier mehr Material zufließt als abtransportiert wird.

Betrachtet man einen der oben beschriebenen Zuverlässigkeitsdefekte, der eine Leitbahn bis auf eine Restbreite einschnürt, so kann man ihn in diesem Zusammenhang auch als Pore (Void) in der Leitbahn auffassen. Ein additiver Zuverlässigkeitsdefekt, der die Leitbahn lokal verbreitert, kann demnach als Hillock interpretiert werden. Beiden Zuverlässigkeitsdefekten gemein ist die Eigenschaft, daß sie die Stromdichte in der Leitbahn lokal ändern, also zu einer Stromdichtedivergenz führen. Aufgrund des geänderten elektrischen Feldverlaufs kommt es zu Materialflußdivergenzen, die das Wachstum einer Pore bzw. eines Hillocks weiter beschleunigen und schließlich zu einer Unterbrechung oder einem Kurzschluß führen. Somit hat eine Leitbahn, die von einem solchen Defekt betroffenen ist, eine geringere Lebensdauer gegenüber einer ungestörten Bahn.

Durch den Stromfluß in einer Leitbahn kommt es infolge Joulescher Wärme zu einer Temperaturerhöhung. Das heißt, aufgrund der Änderung der Stromdichte verändert sich auch die Temperatur einer beschädigten Leitbahnstelle. Eine der fundamentalsten Gleichungen auf dem Gebiet der Elektromigration, die Black'sche Gleichung (5.13), verknüpft die Stromdichte, die Temperatur und die eingangs erwähnte Aktivierungsenergie zur Berechnung der Lebensdauer. Höhere Stromdichten und/oder höhere Temperaturen führen zu einer verkürzten Lebensdauer und einer höheren Ausfallrate.

$$TTF = A \cdot j^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (5.13)$$

|                      |   |
|----------------------|---|
| <i>TTF</i>           | <i>Zeit bis zum Ausfall (Time To Failure)</i>       |
| <i>A</i>             | <i>Materialkonstante</i>                            |
| <i>j</i>             | <i>Stromdichte</i>                                  |
| <i>n</i>             | <i>Stromdichteexponent (<math>\approx 2</math>)</i> |
| <i>E<sub>a</sub></i> | <i>Aktivierungsenergie</i>                          |
| <i>k<sub>B</sub></i> | <i>Boltzmann-Konstante</i>                          |
| <i>T</i>             | <i>Temperatur</i>                                   |

Um die Temperaturdifferenz zwischen der Schwachstelle und der unbeschädigten Leitbahn zu bestimmen, gibt es einige Simulationsprogramme, die mit relativ hohem Rechenaufwand die genaue Temperaturverteilung an Leitbahneinschnürungen oder -verdickungen berechnen können [126]. Wie sich die lokale Temperatur beispielsweise für einen subtraktiven Zuverlässigkeitsdefekt je nach seiner Lage und Größe entlang der Leitbahn entwickelt, soll der Schwerpunkt des folgenden Abschnitts sein.

### 5.3 Subtraktive Zuverlässigkeitsdefekte

Zur weiteren Betrachtung subtraktiver Zuverlässigkeitsdefekte werden folgende Annahmen gemacht:

1. Die Dicke der Leitbahn ist konstant.
2. Die lokale Stromdichte ist proportional dem Verhältnis aus globaler Leitbahnbreite zu lokaler Restbreite.
3. Die zu erwartende Lebensdauer wird entsprechend (5.13) vom Maximum aus lokaler (an der Störstelle) und globaler (in der ungestörten Leitbahn) Stromdichte und Temperatur bestimmt.

Die Temperaturerhöhung einer langen Leitbahn infolge Joulescher Wärme kann nach [98] wie folgt abgeschätzt werden:

$$\Delta T = \frac{(j/j_c)^2}{TCR \cdot \left[1 - (j/j_c)^2\right]} \quad (5.14)$$

|       |  |
|-------|--|
| $j$   | <i>Stromdichte</i>   |
| $j_c$ | <i>Stromdichte, ab der die Leitbahn zu schmelzen beginnt</i> |
| $TCR$ | <i>Temperaturkoeffizient nach [98] und [134]</i>             |

Die eingeschnürte Stelle der Leitbahn wird sich demnach aufgrund der lokal verminderten Leitbahnbreite und somit höheren Stromdichte stärker erwärmen. Andererseits wird sie durch die anliegenden breiteren Leitbahnsegmente gekühlt, da diese über ihre größere Oberfläche besser die Wärme an die Umgebung abführen können. Dieser Effekt wird von der Gleichung (5.14) allerdings nicht berücksichtigt. Auch setzt die Anwendung der Formel eine *lange* Leitbahn voraus, um Randeffekte, die an den Anschlüssen auftreten, vernachlässigen zu können [98]. Zur Bestimmung der mittleren Temperatur der eingeschnürten Leitbahnstelle wird deshalb das Simulationsprogramm ANSYS [126] verwendet, das auf der Methode der *Finiten Elemente* basiert.

Zunächst wurde eine Leitbahn mit einer Gesamtlänge von 500  $\mu\text{m}$  modelliert, die von vier kreisrunden Einkerbungen im Abstand von jeweils 100  $\mu\text{m}$  eingeschnürt wird. Die Abbildung 35 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Gesamtmodells. In der Mitte des abgebildeten Leitbahnsegments wurde eine kreisrunde Kerbe plaziert, die die Leitbahn bis auf eine Restbreite von 1  $\mu\text{m}$  reduziert.

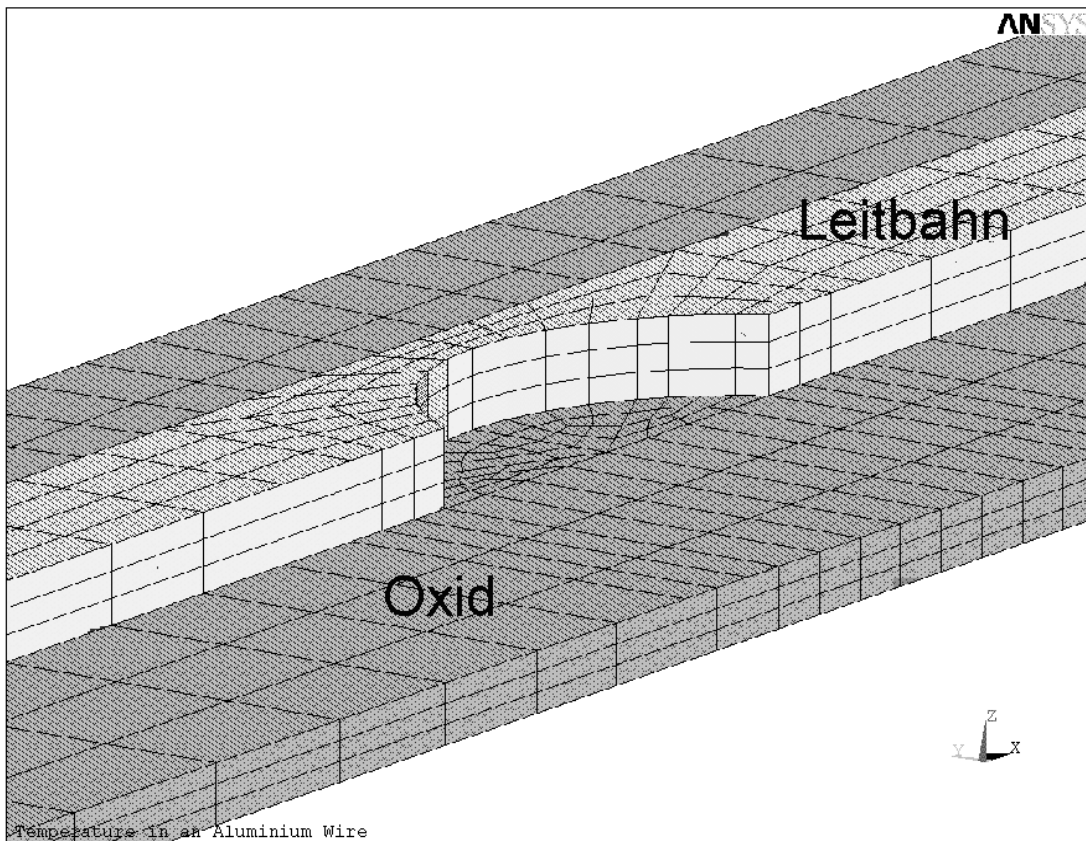


Abbildung 35: Ausschnitt aus der modellierten Anordnung Leitbahn / Oxid mit eingezeichnetem Raster zur Zerlegung in Finite Elemente

Diese zu modellierende Leitbahn muß zur Anwendung des erwähnten Simulators in einzelne Elemente zerlegt werden. An den Eckpunkten der Elemente, den Knoten, werden vom Programm skalare Knotengrößen, wie z.B. die jeweilige Temperatur bestimmt. Beim Übergang von einem Element zum nächsten gilt dabei die Randbedingung, daß die Knotengrößen an den jeweiligen Berührungspunkten der Elemente gleich groß sein müssen. Im Element selbst werden richtungsabhängige Elementgrößen durch Gradientenbildung berechnet. Eine solche Elementgröße ist z.B. die Stromdichte. Für Elementgrößen gilt die erwähnte Randbedingung beim Übergang zu einem benachbarten Element nicht. Es kann deshalb zu Sprüngen in Betrag und Richtung der betrachteten Größe kommen. In einem Bereich großer Gradienten sollte das Netz der Finiten Elemente also dichter sein. Dies wurde im Bereich der Einschnürungen realisiert (vgl. Abbildung 35).

Die Temperatur eines einzelnen Leitbahnelements wird von der eingekoppelten elektrischen Leistung und der an die Nachbarelemente infolge Wärmeleitung abgegebenen Wärme bestimmt. Nach [135] ergibt sich der folgende Formelapparat:

- Ein Temperaturfeld  $T(\mathbf{r}, t)$  in Abhängigkeit vom Ort  $\mathbf{r}$  und der Zeit  $t$  in einem Medium wird allgemein von der Wärmeleitungsgleichung beschrieben:

$$\operatorname{div}(\kappa \cdot \operatorname{grad}(T(\vec{r}, t))) = c_s \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - Q(\vec{r}, t) \quad (5.15)$$

|              |  |
|--------------|--|
| $\kappa$     | <i>Wärmeleitfähigkeit (Matrix)</i>     |
| $T$          | <i>Temperatur</i>                      |
| $Q$          | <i>Leistungsdichte / Energiedichte</i> |
| $\mathbf{r}$ | <i>Ortsvektor</i>                      |
| $t$          | <i>Zeit</i>                            |
| $c_s$        | <i>spezifische Wärmekapazität</i>      |
| $\rho$       | <i>Massendichte</i>                    |

- Der Quellterm  $Q(\mathbf{r}, t)$  in (5.15) entspricht einem Zuwachs bzw. einer Abnahme der Energiedichte z.B. infolge des Wärmeaustauschs mit der äußeren Umgebung. Für den Fall einer stationären Temperaturverteilung reduziert sich die Wärmeleitungsgleichung auf:

$$\Delta T(\vec{r}) = -\frac{Q(\vec{r})}{\kappa} \quad (5.16)$$

- Für die in ein Volumenelement eingekoppelte Wärme ergibt sich:

$$Q \, dV = dP \quad \text{bzw.} \quad Q = \frac{dP}{dV} \quad (5.17)$$

$dV$       *Volumenelement*  
 $dP$       *in das Volumenelement*  
            *eingekoppelte elektrische Leistung*

- Weiterhin gilt:

$$dP = \rho(\vec{r}) \frac{dl}{dA} \cdot j^2(\vec{r}) \cdot dA^2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{dP}{dV} = \rho(\vec{r}) \cdot j^2(\vec{r}) \quad (5.18)$$

$\rho(\mathbf{r})$       *spezifischer elektrischer*  
                  *Widerstand am Ort  $\mathbf{r}$  des*  
                  *Volumenelements*  
 $dA$       *Fläche des betrachteten*  
                  *Volumenelements senkrecht zur*  
                  *Stromrichtung*  
 $dl$       *Länge des Volumenelements in*  
                  *Stromrichtung*  
 $j(\mathbf{r})$       *lokale elektrische Stromdichte*  
                  *(konstant im Volumenelement)*

Wie die Wärmeleitungsgleichung für die Finiten Elementen gelöst wird, soll hier nicht weiter dargestellt werden. Dies ist Inhalt der entsprechenden Programmdokumentation von [126]. Zur Simulation der in der Leitbahn auftretenden Temperaturverteilung wurde folgender iterativer Algorithmus gewählt:

1. An die modellierte Teststruktur wurde als Startwert eine Spannung von  $U \approx 1 \text{ V}$  angelegt und nach obigem Formelapparat die stationäre Temperaturverteilung unter Berücksichtigung des von der jeweiligen Temperatur abhängigen lokalen spezifischen elektrischen Widerstands  $\rho_i$  bestimmt. Der spezifische elektrische Widerstand  $\rho_i$  des Elements  $i$  wird aus dem spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$  berechnet, dessen lineare Temperaturabhängigkeit aus [134] bekannt ist.
2. ANSYS bestimmt für jedes Element die jeweilige Stromdichte  $j$ .



3. Schließlich wurde die Spannung  $U$  iterativ so verändert, bis sich nach Durchlaufen aller bisher genannten Simulationsstufen für die nicht eingeschnürten Leitbahnsegmente in der Nähe der Anschlußstellen (in Anpassung an ein parallel durchgeführtes Experiment, beschrieben im Abschnitt 7.5.1) eine Stromdichte von  $j = 3 \text{ MA} / \text{cm}^2$  einstellte.

Für die Berechnungen wurde weiterhin angenommen, daß zwischen einer realen zu untersuchenden Leitbahn und dem Wafer eine Oxidschicht der Dicke 770 nm liegt. Der Wafer befindet sich auf einem Heiztisch, der auf eine Temperatur von 240 °C gebracht wird. Die numerischen Berechnungen zeigten, daß aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Siliziumwafers, die Heiztischtemperatur und die Temperatur der Waferoberseite im Rahmen der Rechengenauigkeit übereinstimmen.

Da sich die Leitbahn ohne Einkerbungen aufgrund des eingespeisten Stroms auf etwa 260 °C erhitzt, liegt ihre Temperatur über der des Heiztisches. Mit den durchgeführten Berechnungen konnte gezeigt werden, daß der Ausgleich dieses Temperaturunterschiedes nur über die erwähnte Oxidschicht stattfindet (vgl. Abbildung 36). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß diese Aussage nur für relativ dicke Oxide gilt. Je dünner das Oxid wird, desto größer wird der Temperaturanteil, der über das Silizium abfällt. Aufgrund der verwendeten Oxiddicke von 770 nm konnte für die Folgerechnungen deshalb auf die Modellierung des Siliziums verzichtet werden. So wurde einerseits die zur Berechnung notwendige Zeit verkürzt und andererseits Speicherplatz gespart.

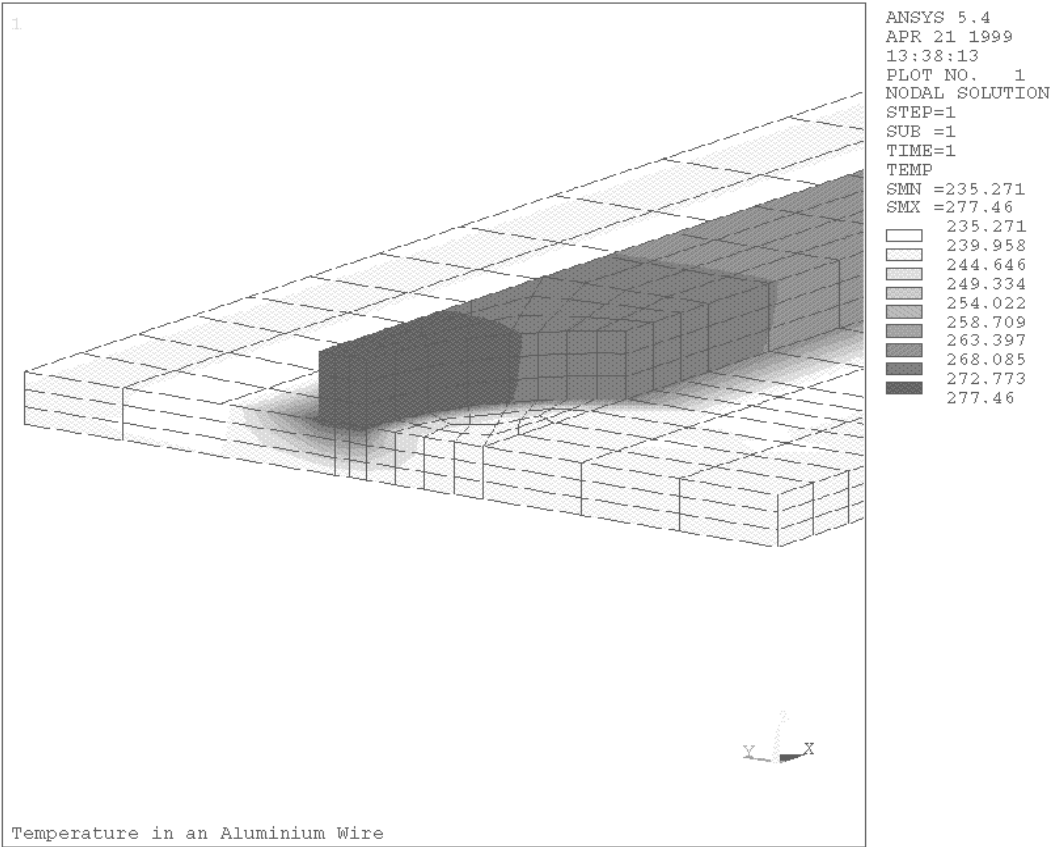


Abbildung 36: Darstellung des Temperaturabfalls über das Oxid, berechnet für die schmalste Stelle der Einkerbung

Tabelle 3: Zur Temperaturprofilberechnung verwendete Parameter

| Parameterbezeichnung  | Parameterwert  |
|---|--|
| Leitbahnlänge / $\mu\text{m}$   | 500  |
| Leitbahnbreite / $\mu\text{m}$  | 2.8  |
| Anzahl der Kerben   | 4  |
| Radius einer der Kerben / $\mu\text{m}$   | 4  |
| verbliebene Restbreite der Leitbahn / $\mu\text{m}$   | 1  |
| Temperatur des Heiztisches / $^{\circ}\text{C}$   | 240  |
| Dicke des Oxids (unter der Leitbahn) / $\mu\text{m}$  | 0.77   |
| seitliche Ausdehnung des Untergrundes (nur Oxid als Untergrund modelliert) / $\mu\text{m}$  | 10   |
| Wärmeleitfähigkeit des Oxids $\kappa_{\text{Ox}}$ / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$   | 1.4 aus [133]  |
| Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumleitbahn $\kappa_{\text{Al}}$ / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$   | 240 aus [130]  |
| spezifischer elektrischer Widerstand des Aluminiums $\rho_{\text{Al}}$ / $\Omega \text{cm}^{-1}$  | $3.0 \cdot 10^{-6} = \rho_{\text{Al}}(0^{\circ}\text{C}) + (\Delta\rho_{\text{Al}} / \Delta T) \cdot T$ nach [134]<br>mit $\rho_{\text{Al}}(0^{\circ}\text{C}) = 2.5 \cdot 10^{-6}$ nach [136] |
| Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstands $(\Delta\rho_{\text{Al}} / \Delta T)$ / $\Omega \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$ | 0.0114e-6 aus [134]  |

Mit den Parametern, die in der Tabelle 3 zusammengefaßt sind, ergaben die Berechnungen eine Temperaturverteilung entlang der Leitbahnlängsachse wie sie in der Abbildung 37 als zweidimensionales Diagramm dargestellt ist. Die Grafik zeigt lokale Temperaturmaxima an den Stellen der Einschnürungen. Diese erhöhten Temperaturen werden aufgrund der Wärmeleitung entlang der Leitbahn nach rechts und links abgebaut.

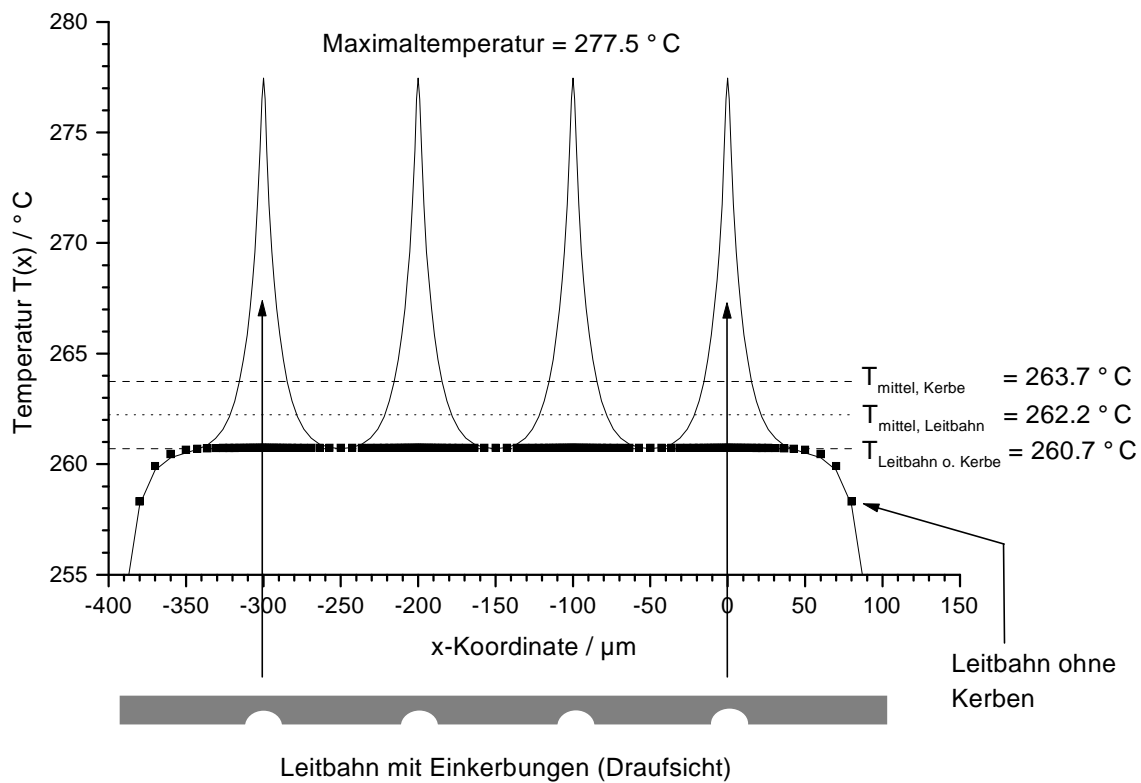


Abbildung 37: Temperaturverlauf entlang der Leitbahnlängsachse, berechnet mit [126] unter Nutzung der Parameter in der Tabelle 3

Während der durchgeführten Berechnungen mit verschiedenen konfigurierten Einkerbungen (siehe Tabelle 4) wurde festgestellt, daß die Höhe der Temperaturmaxima stark von der verbliebenen Leitbahnrestbreite abhängt, während sich die Halbwertsbreite der Maxima nur wenig änderte und bei ca. 13  $\mu\text{m}$  liegt (vgl. Abbildung 38). Es konnte weiterhin gezeigt werden, daß die Temperatur zwischen den Kerben auf einen Wert absinkt, der im Rahmen der Rechengenauigkeit dem einer uneingeschnürten Leitbahn entspricht. Die x-Ausdehnung des Bereiches, in dem beide Temperaturen nahezu gleich sind und der jeweilige Maximalwert der Temperatur hängen sowohl von der Tiefe der Einkerbung als auch von deren seitlicher Ausdehnung ab.

Tabelle 4: Konfiguration der als Testobjekte verwendeten Einkerbungen

| <b>Radius<br/>r / <math>\mu\text{m}</math></b> | <b>Rest-<br/>breite<br/>w / <math>\mu\text{m}</math></b> | <b>maximale<br/>Stromdichte<br/>/ <math>\text{MAcm}^{-2}</math></b> | <b>Maximal-<br/>temp. / <math>^{\circ}\text{C}</math></b> | <b>mittlere<br/>Kerben-<br/>temp. / <math>^{\circ}\text{C}</math></b> | <b>mittlere<br/>Leitbahn-<br/>temp. / <math>^{\circ}\text{C}</math><br/>(m. Kerben)</b> | <b>Halbwerts-<br/>breite des<br/>Temp.-profils<br/>/ <math>\mu\text{m}</math></b> |
|--|--|---|---|---|---|---|
| 0  | 2.8  | 3   | 260.7   | 260.7   | 260.7   | -   |
| 0.8  | 2.1  | 4   | 261.6   | 260.9   | 260.7   | 12.6  |
| 1.6  | 2.2  | 3.8   | 261.7   | 261.0   | 260.7   | 12.6  |
| 2  | 2.1  | 4   | 262.1   | 261.0   | 260.7   | 12.6  |
| 3  | 2.1  | 4   | 262.4   | 261.1   | 260.8   | 12.3  |
| 1.6  | 1.8  | 4.7   | 262.9   | 261.2   | 260.8   | 12.6  |
| 4.5  | 1.9  | 4.4   | 263.7   | 261.4   | 260.4   | 14.6  |
| 1.1  | 1.2  | 7   | 265.2   | 261.7   | 260.9   | 12.6  |
| 5.5  | 1.2  | 6.5   | 269.7   | 262.5   | 261.5   | 13.7  |
| 2.6  | 1  | 8.4   | 270.6   | 262.5   | 261.3   | 12.6  |
| 1.6  | 0.7  | 12  | 272.9   | 262.8   | 261.0   | 9.0   |
| 2  | 0.6  | 14  | 277.3   | 263.5   | 262.0   | 8.9   |
| 4  | 0.8  | 10.5  | 277.4   | 263.7   | 262.3   | 12.6  |

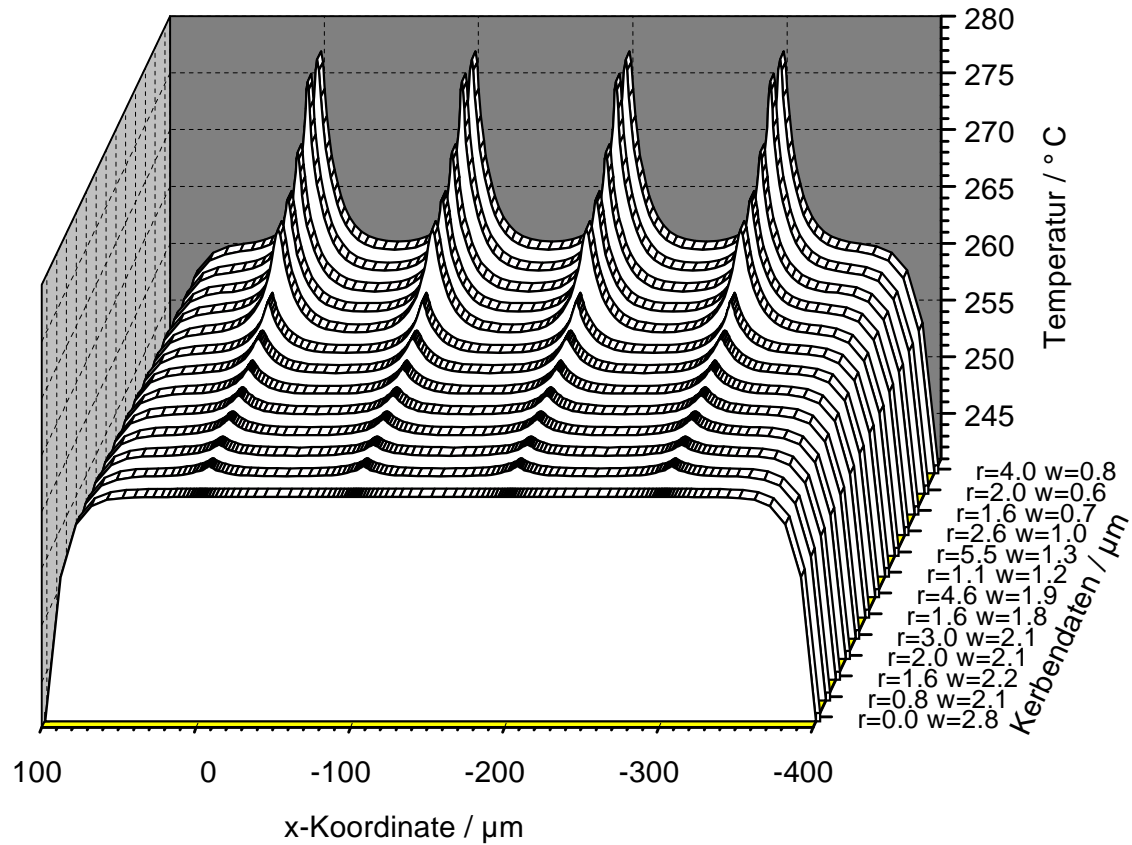


Abbildung 38: Berechneter Temperaturverlauf entlang der Leitbahnlängsachse in Abhängigkeit von der Konfiguration (Radius und verbleibende Restbreite) der Einschnürung; Die vorderste Kurve entspricht dem berechneten Temperaturverlauf entlang einer nicht eingeeigneten Leitbahn.

In der Abbildung 37 sind außer den Temperaturprofilen (für eine Leitbahn mit und ohne Einkerbung) noch drei weitere Temperaturniveaus markiert:

1. die mittlere Temperatur der Einschnürungen,
2. die mittlere Leitbahntemperatur *mit* Berücksichtigung der Temperaturmaxima an den Einschnürungen,
3. die mittlere Leitbahntemperatur *ohne* Berücksichtigung der Temperaturmaxima an den Einschnürungen

Obwohl der Temperaturunterschied zwischen diesen drei Niveaus von der jeweiligen Konfiguration der Leitbahneinengungen abhängig ist, traten selbst bei Restbreiten von etwa einem Fünftel der ursprünglichen Leitbahnbreite zwischen dem untersten und dem obersten Niveau nur Temperaturdifferenzen von maximal 3 °C auf. Das bedeutet für den vorliegenden Fall (globale Leitbahntemperatur 260 °C) eine relative Temperaturänderung von höchstens 0.6 %. Die mittlere Leitbahntemperatur (mittleres Niveau in der Abbildung 37) erhöht sich sogar nur um maximal 1.6 °C. Die lokale Stromdichte variiert dagegen für diese Konfiguration der Kerben um mehrere hundert Prozent.

Bei der alleinigen Betrachtung des Temperatureinflusses auf die Lebensdauer der Teststruktur erscheint es zweckmäßig, von der Blackschen Gleichung (5.13) nur den entsprechenden Exponentialterm zu betrachten. Fällt eine Teststruktur bei der Temperatur  $T$  zur Zeit  $t_1$  aus, dann wird eine identische Teststruktur bei der Temperatur  $T+\Delta T$  zur Zeit  $t_2$  ausfallen.  $t_2$  kann mit Hilfe eines Temperaturbeschleunigungsfaktors  $AF_T$  und der Zeit  $t_1$  bestimmt werden:

$$t_2 = t_1 \cdot AF_T \quad \text{mit} \quad AF_T = \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T+\Delta T} - \frac{1}{T}\right)\right] \approx \exp\left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \frac{\Delta T}{T^2}\right] \quad (5.19)$$

$t_{1,2}$       Ausfallzeiten bei den Temperaturen  $T_1$   
                 bzw.  $T_2$

$T$             Leitbahntemperatur

$\Delta T$         lokale Temperaturdifferenz

$E_a$         Aktivierungsenergie

$k_B$         Boltzmann-Konstante

$AF_T$       Temperaturbeschleunigungsfaktor

Die folgende Abbildung 39 zeigt den Temperaturbeschleunigungsfaktor  $AF_T$  in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$  und einer angenommenen Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , hervorgerufen von einer Leitbahneinschnürung (Es sei an dieser Stelle auf die unterschiedliche Bedeutung des Faktors  $AF_T$  und des in Gleichung (5.11) eingeführten Beschleunigungsfaktors  $AF$  hingewiesen.). Zur Darstellung wurde eine Aktivierungsenergie von  $E_a = 0.64$  eV benutzt, die in einem parallel durchgeführten Experiment bestimmt wurde (vgl. Abschnitt 7.5.1):

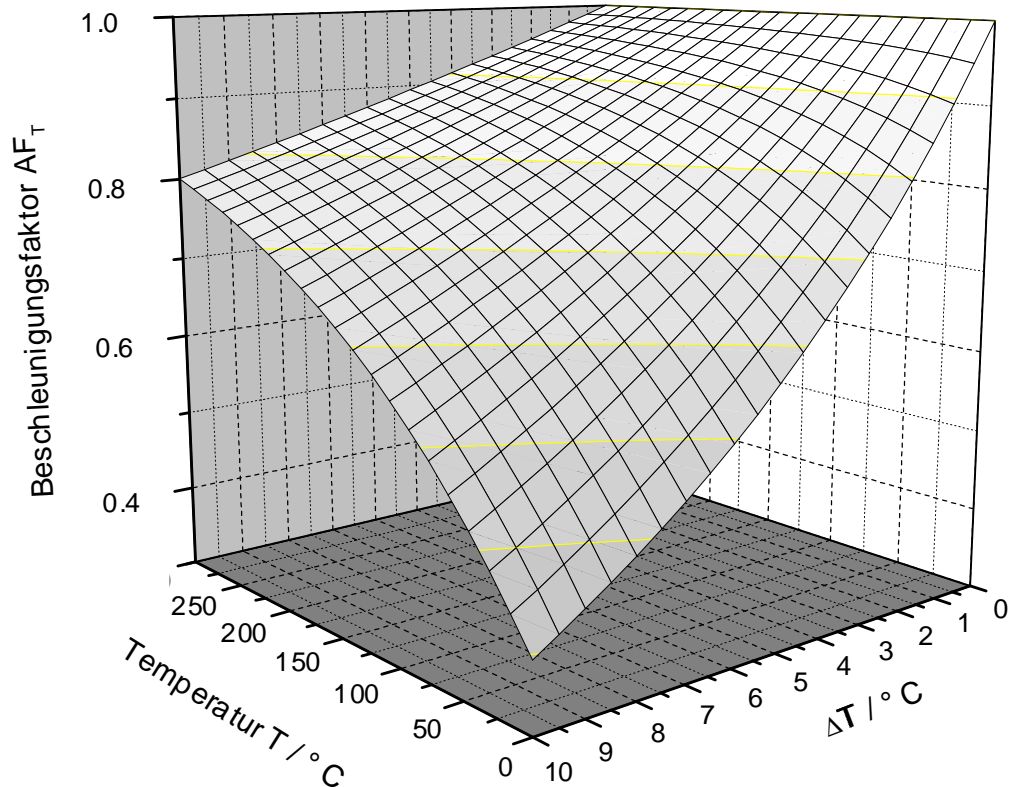


Abbildung 39: Abhängigkeit des Temperaturbeschleunigungsfaktors von der Leitbahntemperatur und der lokalen Temperaturerhöhung an einer Einkerbung (Die verwendete Aktivierungsenergie von  $E_a = 0.64 \text{ eV}$  wurde einem parallel durchgeführten Experiment entnommen, vgl. Abschnitt 7.5.1.)

Um die Werte für  $AF_T$  besser ablesen zu können, wurde die Abbildung 39 in eine andere Darstellung umgerechnet. Die Abbildung 40 zeigt die Entwicklung des Temperaturbeschleunigungsfaktors als Höhenlinien an. Diese Darstellung zeigt, daß bei relativ hohen globalen Leitbahntemperaturen die für dieses Beispiel berechneten lokalen Temperaturerhöhungen von weniger als  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  die Ausfallzeit einer Teststruktur im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht beeinflussen werden. Selbst bei normalen Arbeitstemperaturen mikroelektronischer Schaltungen, die im Bereich von ca.  $40\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$  liegen, können Leitbahneinengungen infolge lokaler Temperaturerhöhungen die Lebensdauer nur unwesentlich verkürzen. Auf eine weitere Berücksichtigung der lokalen Temperaturunterschiede kann deshalb verzichtet werden. Diese Vereinfachung setzt dabei allerdings folgende Punkte voraus:



- Die seitliche Ausdehnung der Kerbe ist klein gegenüber der Leitbahnlänge. Diese Voraussetzung ist in den Metallebenen heutiger großflächiger Designs in guter Näherung erfüllt. Hinzu kommt, daß besonders die langen Leitbahnen aufgrund ihrer großen "Einfangfläche" gegenüber Zuverlässigkeitsdefekten, die zu Einschnürungen führen, empfindlich sind (vgl. [38]).
- Das lokale Temperaturmaximum kann aufgrund guter Wärmeleitung schnell zur Umgebung abgeleitet werden (kleine Halbwertsbreite des Temperaturprofils).

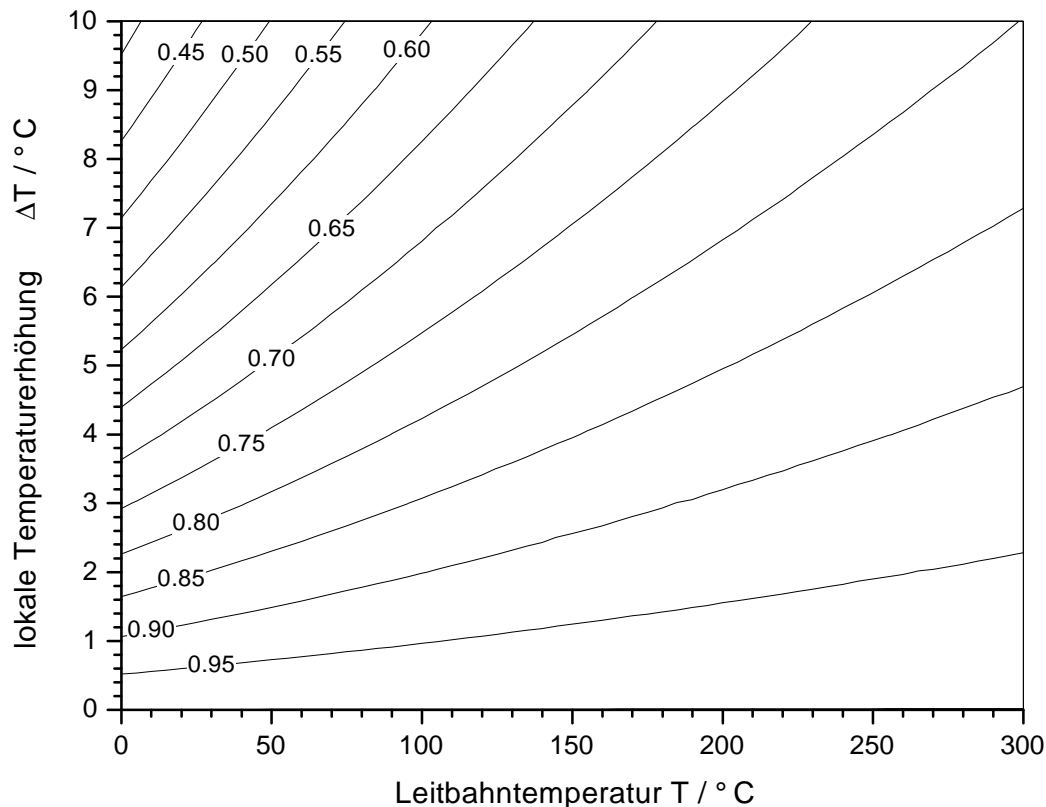


Abbildung 40: Höhenliniendarstellung der Abhängigkeit des Temperaturbeschleunigungsfaktors von der Leitbahntemperatur und der lokalen Temperaturerhöhung an einer Einkerbung (Die verwendete Aktivierungsenergie von  $E_a = 0.64$  eV wurde einem parallel durchgeführten Experiment entnommen, vgl. Abschnitt 7.5.1.)

Setzt man in die Blacksche Gleichung (5.13) die lokale Stromdichte und die mit (5.14) abgeschätzte globale Leitbahntemperatur ein, kann man für jeden subtraktiven Zuverlässigkeitsdefekt die Lebensdauer der jeweils betroffenen Leitbahn abschätzen. Das setzt natürlich voraus, daß man die Stromdichte der ungestörten Leitbahn in der Nähe der Einschnürung kennt. Zu deren Berechnung gibt es spezielle Computerprogramme, die allerdings bei entsprechend komplexen Designs enorme Rechenzeiten benötigen ([84], [94], [96]). Für die weiteren Ausführungen wird auf den Einsatz eines solchen Programms verzichtet. Es wird statt dessen von folgenden vereinfachenden Überlegungen ausgegangen:

- Um eine konstante Stromdichte zu gewährleisten, verwendet der Designer während des Layoutentwurfs Leitbahnbreiten, die sich proportional zur Stromstärke verhalten, denen die Leitbahn während des Betriebs im Mittel ausgesetzt ist.
- Kennt man die Stromdichte  $j_1$  einer Leitbahn mit der Breite  $w_1$ , dann kann man die Stromdichte  $j_2$  für ein Leitbahnsegment der Breite  $w_2$  durch die einfache Verhältnisgleichung  $w_1 j_1 = w_2 j_2$  berechnen. Dies folgt aus der Konstanz der Stromstärke in der Leitbahn. Mit (5.13) und (5.14) läßt sich schließlich deren Lebensdauer bestimmen.
- Geht man davon aus, daß durch den Ausfall einer geringen Anzahl von Leitbahnen schließlich der gesamte Schaltkreis seine Funktion nicht mehr ordnungsgemäß ausführt, dann wird die Lebensdauer bzw. die Ausfallrate des Bauelements durch eben diese geringe Anzahl von Zuverlässigkeitsdefekten bestimmt.
- Setzt man die für eine Einschnürung der aktuellen Leitbahn abgeschätzte Ausfallzeit ins Verhältnis zur abgeschätzten Ausfallzeit derselben Leitbahn ohne Einschnürung, dann erhält man eine sogenannte relative Ausfallzeit bzw. Lebensdauer, die zwischen 0 und 1 liegt.
- Die Leitbahnen mit der kleinsten relativen Lebensdauer werden schließlich den gesamten Schaltkreis zum Ausfall bringen.
- Markiert man diese, kann man besonders gefährdete Stellen des Schaltkreises erkennen und durch Designänderungen beseitigen.

## 5.4 3D-Modell zur Lebensdauerabschätzung bei subtraktiven Zuverlässigkeitsdefekten

Nach den bisherigen Betrachtungen wird neues ein Modell zur Berechnung der zu erwartenden Ausfallrate bzw. Lebensdauer hergeleitet. Dabei wird vorausgesetzt, daß ein subtraktiv wirkender Zuverlässigkeitsdefekt eine kreisrunde Form hat. Das Defektzentrum sei eine Strecke  $s$  vom Leitbahnrand entfernt. Liegt das Zentrum des Defekts innerhalb der Leitbahn, dann soll die Entfernung  $s$  mit einem negativen Vorzeichen belegt werden. Weiterhin habe der Defekt einen Durchmesser  $d$ , so daß sich folgendes Bild ergibt:

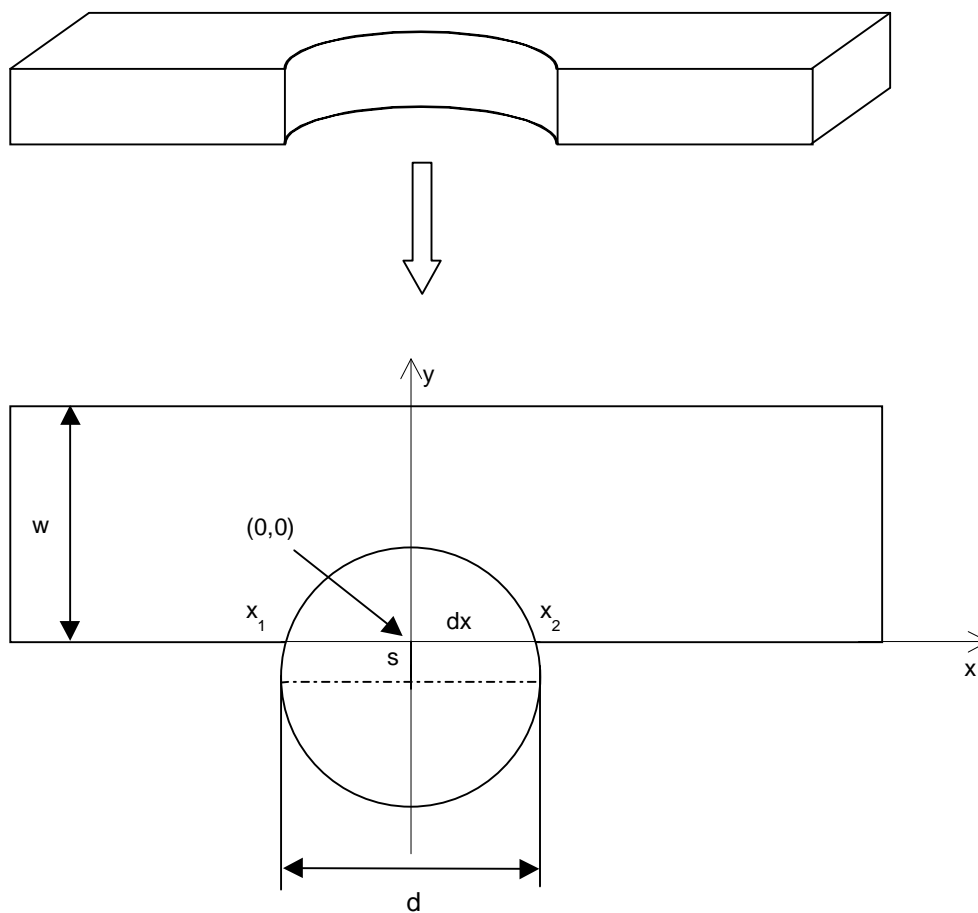


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Ausschnitts einer Leitbahn, deren Breite von einem subtraktiv wirkenden Zuverlässigkeitsdefekt reduziert wurde

Mit diesen Modellvorstellungen lässt sich die zu erwartende relative Lebensdauer in Abhängigkeit vom Defektdurchmesser und dessen Mittelpunktsabstand zum Leitbahnrand bestimmen. Zur grafischen Darstellung dieses Zusammenhangs eignet sich das in Abbildung 42 dargestellte dreidimensionale Diagramm. Die folgenden Formeln, die sich aus den Gleichungen (5.13), (5.14) und der Konstanz der Stromstärke in der Leitbahn ergeben, wurden dabei verwendet:

$$TTF(s, r, j) = A \cdot \left[ j \left( \frac{w}{w + s - r} \right) \right]^{-n} \cdot \exp \left[ \frac{E_a}{k_B T(j)} \right] \quad (5.20)$$

$$T(j) = T_u + \frac{(j/j_c)^2}{TCR \cdot [1 - (j/j_c)^2]} \quad (5.21)$$

$T_u$                       *Umgebungstemperatur*

Durch die Verwendung relativer Ausfallzeiten geht Gleichung (5.20) über in:

$$TTF_{rel}(s, r) = \left( \frac{w}{w + s - r} \right)^{-n} \quad (5.22)$$

$TTF_{rel}$                       *relative Ausfallzeit (im Vergleich zur nicht eingeeengten Leitbahn)*

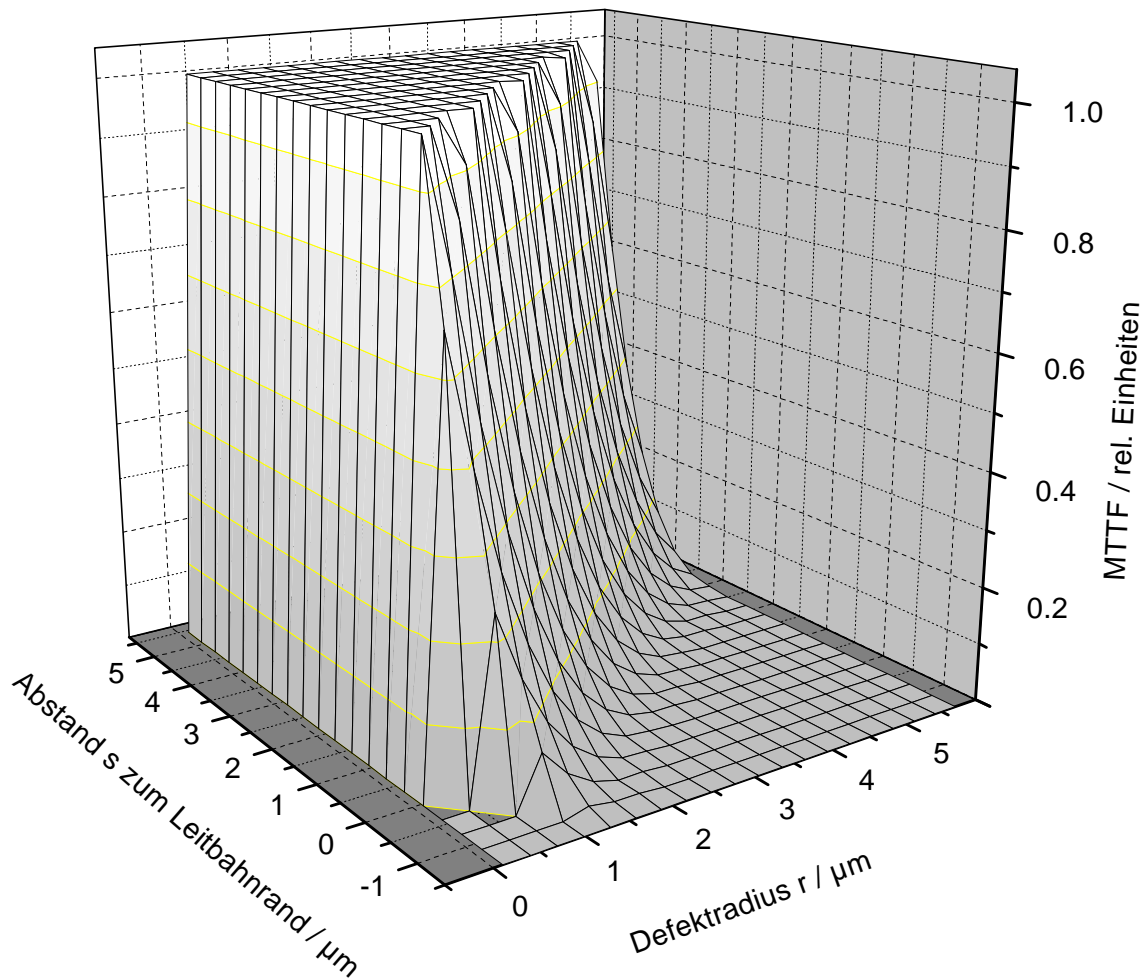


Abbildung 42: Diagramm zur Abschätzung der relativen Lebensdauer als Funktion der Defektgröße und -lage bei einer angenommenen Stromdichte von  $j = 3 \text{ MA/cm}^2$  (Berechnung nach (5.22))

In der Abbildung 42 sind Bereiche zu erkennen, in denen sich die relative Lebensdauer nicht ändert, sondern bei 0 bzw. 1 liegt. Der Grund ist, daß es keine Defekte gibt, die einen Radius  $r$  und einen Mittelpunktsabstand  $s$  aus einem dieser Bereiche haben und gleichzeitig die betrachtete Leitbahn (hier Breite  $w = 3.0 \text{ μm}$ ) einschnüren können (ohne sie zu durchtrennen).

## 5.5 Additive Zuverlässigkeitsdefekte

Die theoretische Behandlung additiver Zuverlässigkeitsdefekte gestaltet sich im Vergleich zu subtraktiven Zuverlässigkeitsdefekten schwieriger, da bisher kein entsprechendes Modell zur Abschätzung der tatsächlichen Ausfallzeit bekannt ist. Eine Auswertung analog der subtraktiven Defekte, wie sie im Abschnitt 5.3 beschrieben wurde, scheidet aus, da an Leitbahnverbreiterungen geringere Stromdichten und Temperaturen auftreten, als in der ungestörten Leitbahn. Damit hätte das verbreiterte Leitbahnsegment nach Gleichung (5.13) eine größere Lebensdauer und hätte demnach keine die Ausfallzeit begrenzende Wirkung.

Im Abschnitt 5.1 wurde darauf hingewiesen, daß beim Vorkommen additiver Zuverlässigkeitsdefekte der verbleibende Restabstand zu einer zweiten benachbarten Leitbahn eine Schlüsselrolle spielt. Ein solcher Defekt wird für die weiteren Betrachtungen als Kreisscheibe mit dem Radius  $r$  ( $r = d / 2$ ) modelliert, die im Abstand  $s$  vor einer elektrisch gegensätzlich geladenen Platte steht. Die Platte soll dabei der erwähnten Nachbarleitbahn entsprechen (siehe Abbildung 43).

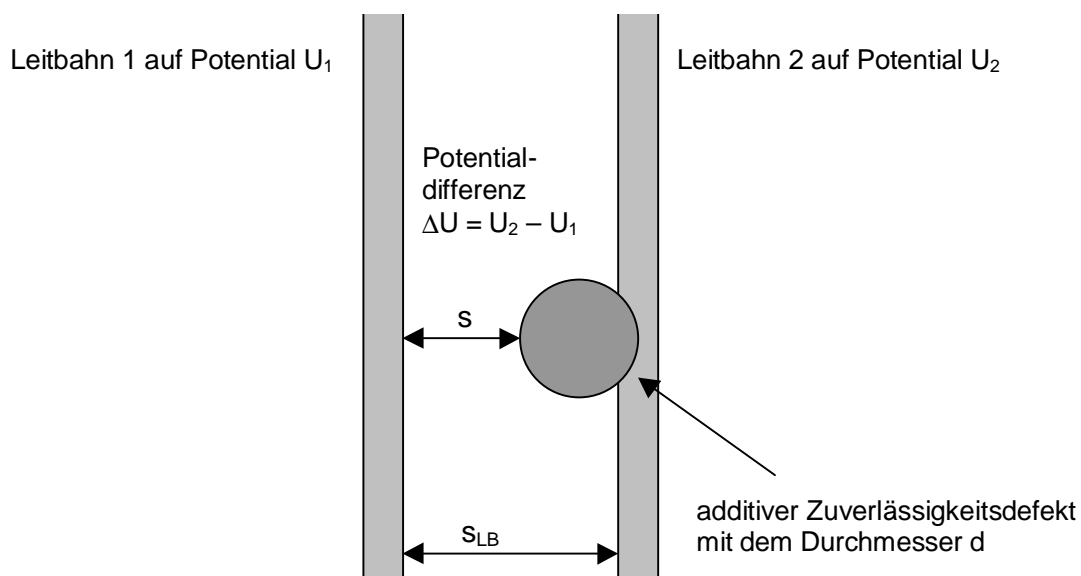


Abbildung 43: Zur Behandlung additiver Zuverlässigkeitsdefekte

Es ist unmittelbar klar, daß an der schmalsten Stelle des Spaltes das größte elektrische Feld zu erwarten ist. Die geometrischen Verhältnisse gestatten es, den Betrag des E-Feldes  $E_{\text{Def}}$  nach dem Modell des Plattenkondensators zu bestimmen. Nach [127] ergibt sich:

$$E_{Def} = \frac{U}{s} \quad (5.23)$$

|           |  |
|-----------|--|
| $U$       | <i>Spannung zwischen den Leitbahnen</i>            |
| $s$       | <i>Abstand Defekt / Nachbarleitbahn</i>            |
| $E_{Def}$ | <i>Betrag der elektrischen Feldstärke im Spalt</i> |

Die geometrischen Verhältnisse zwischen den benachbarten Leitbahnen in einiger Entfernung zum additiven Zuverlässigkeitsdefekt entsprechen nicht mehr denen des Plattenkondensators. Zur Berechnung dieses E-Feldes  $E_{LB}$  müßten die Leitbahnen als dünne Drähte modelliert werden [135]. Die dazu erforderliche Leitbahndicke (z-Richtung) läßt sich jedoch nicht aus den Daten des Layouts entnehmen. Die Tatsache, daß der Querschnitt beliebiger Leitbahnen mehr oder weniger stark von der quadratischen Form, die am ehesten dem Querschnitt eines dünnen Drahtes entsprechen würde, abweicht, erschwert die Berechnungen des E-Feldes zusätzlich. Aus diesen Gründen wird deshalb auch hier auf das nicht mehr ideal geeignete Modell des Plattenkondensators zurückgegriffen.

In der Literatur existieren im wesentlichen zwei miteinander konkurrierende Ansätze, die die Ausfallzeit von Isolatorschichten in Abhängigkeit von der auf sie wirkenden Feldstärke beschreiben [137]. Es handelt sich dabei um das E-Modell (5.24) und das 1/E-Modell (5.25).

$$\tau = c_1 \cdot e^{-c_2 E} \quad (5.24)$$

$$\tau = c_1 \cdot e^{\frac{c_2}{E}} \quad (5.25)$$

|           |  |
|-----------|--|
| $c_{1,2}$ | <i>technologie- und materialabhängige Konstanten</i> |
| $\tau$    | <i>mittlere Ausfallzeit des Isolators</i>            |
| $E$       | <i>Betrag der elektrischen Feldstärke</i>            |

Kennt man die in den obigen Gleichungen (5.24) und (5.25) angegebenen Konstanten, so lassen sich die Lebensdauern des Zwischenisolators an der schmalsten Stelle des Spaltes und im davon entfernten Zwischenraum bestimmen. Unter Verwendung des im Abschnitt 5.3 eingeführten Konzepts der relativen Lebensdauern umgeht man die Bestimmung der Konstanten  $c_1$ . Es ergeben sich je nach gewähltem Modell die folgenden Zusammenhänge:

$$\tau_{rel} = e^{-c_2 U \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s_{LB}} \right)} \quad (5.26)$$

$$\tau_{rel} = e^{\frac{c_2}{U} (s_{LB} - s)} \quad (5.27)$$

|              |   |
|--------------|---|
| $c_2$        | <i>technologie- und materialabhängige Konstante</i> |
| $\tau_{rel}$ | <i>mittlere relative Ausfallzeit des Isolators</i>  |
| $s$          | <i>geringste Spaltbreite</i>                        |
| $s_{LB}$     | <i>regulärer Leitbahnabstand</i>                    |
| $U$          | <i>Spannung zwischen den Leitbahnen</i>             |

Diejenigen additiven Zuverlässigkeitsdefekte, die aufgrund ihrer Lage bei einer vorgegebenen Spannung  $U$  zu hohen Feldstärken führen, werden den Schaltkreis demnach frühzeitiger zum Ausfall bringen. Zur Berechnung der mittleren Potentialdifferenz  $U$  (also der elektrischen Spannung) zwischen den beiden benachbarten Leitbahnen sind spezielle Computerprogramme notwendig ([84], [94], [96]).

Um die Berechnung von  $U$  zu umgehen, wird in der vorliegenden Arbeit stark vereinfachend angenommen, daß auf dem gesamten Chip an jeder Stelle zwischen zwei Nachbarleitbahnen jeweils die gleiche mittlere Potentialdifferenz herrscht. Mit dieser Vereinfachung lassen sich die Ausfallzeiten, mit denen die additiven Zuverlässigkeitsdefekte zum Kurzschluß führen, zueinander ins Verhältnis setzen. Somit ergibt sich die Möglichkeit, ansatzweise eine Bewertung dieser Art von Zuverlässigkeitsdefekten vorzunehmen.