Aufgabe 5.1

Welche Art von Ausfällen ist in Halbleiterbauelementen vorrangig?

a) nuklear ■
b) elektrisch ■
c) elektrisch-chemisch □
d) chemisch □
e) thermisch-chemisch □
f) thermisch □
g) thermisch-mechanisch □
h) mechanisch □

Erläuterung:
Bei Halbleiterbauelementen treten überwiegend elektrische sowie nukleare Ausfälle auf.

Aufgabe 5.2

Aus welchen Gründen treten besonders diese Ausfälle in Halbleiterbauelementen auf?

a) hohe Spannungen □
b) hohe Feldstärken ■
c) hohe Ströme □
d) hohe Stromdichten ■
e) hohe Temperaturen □
f) mechanische Belastungen □
g) quantenmechanische Effekte ■
h) Materialfehler ■

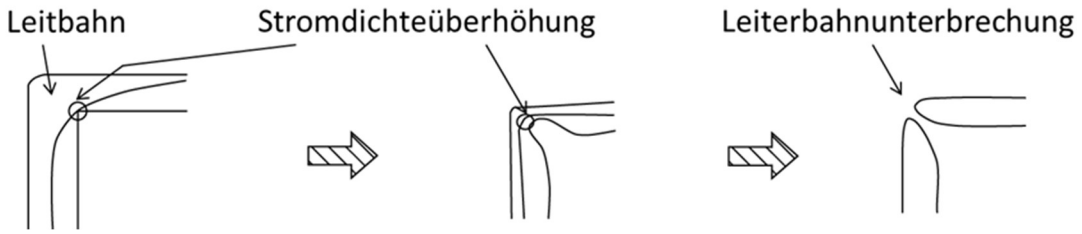
Erläuterung:
Durch kleine Abmessungen ergeben sich hohe Feldstärken und hohe Stromdichten. Materialfehler und quantenmechanische Effekte führen ebenfalls zu erhöhtem Auftreten von Ausfällen.

Aufgabe 5.3

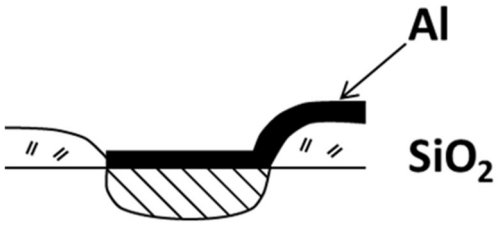
Wodurch ist der Mechanismus der Elektromigration gekennzeichnet?

a)	Ionentransport	■
b)	Elektronentransport	□
c)	hohe Temperaturen	□
d)	hohe Feldstärken	□
e)	hohe Stromdichten	■
f)	Hotspots	□
g)	Porenbildung	■
h)	Kurzschlussbildung	■
i)	Hillocks	■
j)	Shunts	□
k)	heiße Elektronen	□

Erläuterung:
Bei der Elektromigration führen hohe Stromdichten zu einem Ionentransport. Durch diesen Materialabtrag kann es bspw. an Leitbahnunstetigkeiten zu offenen Schaltkreisen (also Unterbrechungen) kommen.



An Stellen, an denen sich das abgetragene Material anhäuft (bspw. an Kontakten), kann es dagegen zu Kurzschlüssen und zur Bildung von Hillocks kommen.



Aufgabe 5.4

An welchen Stellen in elektronischen Aufbauten tritt Elektromigration bevorzugt auf?

a) im p-n-Übergang ☐

b) im Gateoxid ☐

c) in geraden Leitbahnen ☐

d) an Leitbahnabzweigungen ■

e) in Vias ■

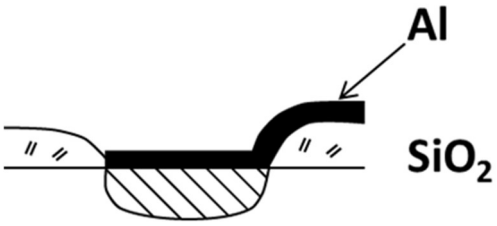
f) in Kontaktstellen zum Halbleiter ■

g) in der Primärpassivierung ☐

h) in Diffusionsbarrieren ☐

Erläuterung:

- An Leitbahnabzweigungen und -unstetigkeiten führen (lokal) erhöhte Stromdichten zu Elektromigration.
- In Halbleiterkontaktsystemen existieren zwei verschiedene Formen der Elektromigration:
    - Durch eine Anhäufung von Aluminium-Ionen bilden sich Hillocks, welche zu Kurzschlüssen führen können.



    - Durch Abtransport von Aluminium diffundiert Silizium in Aluminium.

Aufgabe 5.5

Welche wichtigen physikalischen Parameter beeinflussen das Zustandekommen von Elektromigration?

a) Temperatur ■

b) elektrische Feldstärke □

c) elektrische Stromstärke □

d) elektrische Stromdichte ■

e) Diffusionsgeschwindigkeit ■

f) Elektronenladung □

g) Leitbahnwiderstand □

h) Leitbahnlänge ■

Erläuterung:
Für die Elektromigration gilt:

$$j = \frac{ND}{kT} \bullet Z^* \bullet l \bullet \rho \bullet J$$

j: Ionenfluss
N: Anzahl Ladungsträger
D: Diffusionskonstante
k: Boltzmann-Konstante
T: Temperatur
Z^*: Effektive Ladung
l: Leitbahnlänge
ρ: Ladungsträgerdichte
J: Stromdichte

Aufgabe 5.6

An welchen Stellen in elektronischen Aufbauten tritt elektrolytische Migration bevorzugt auf?

a) in Halbleiterbauelementen ☐

b) an den Anschlusskontakten von gehäusten ICs ☐

c) in Elektrolytkondensatoren ☐

d) auf Leiterplatten zwischen zwei Leitbahnen ■

e) in Leiterplatten zwischen zwei Durchkontaktierungen ☐

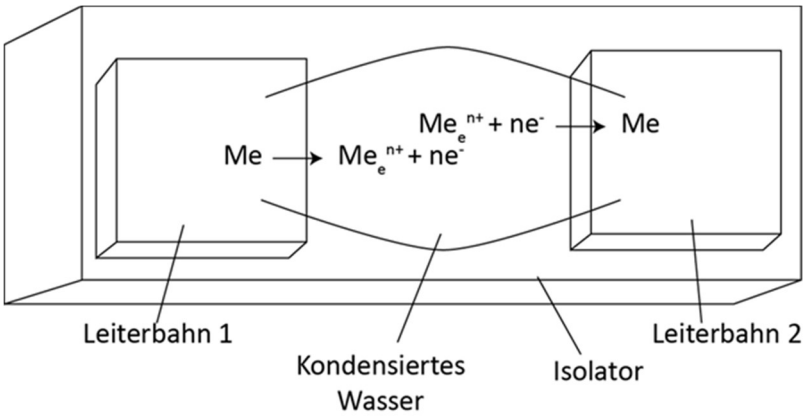
f) an dünnen Leitbahnen ☐

g) an Steckkontakten ☐

h) unter Verkapselungsmaterialien ☐

Erläuterung:

Elektrolytische Migration tritt auf Leiterplatten zwischen zwei Leitbahnen auf. Dabei wandert das Metall bei Feuchte unter Wirkung eines elektrischen Feldes über den Isolator unter Bildung dissoziierter Ionen von der Anode zur Kathode.



Physikalischer Prozess des Dendritenwachstums:

- Adsorption von Wasser auf der Oberfläche
- Dissoziation von Metallionen $Me \rightleftarrows Me_e^{n+} + ne^-$
- Ionentransport durch anliegendes elektrisches Feld
- Verarmung von dissoziierten Ionen auf der Anoden-Seite (unterstützt die Reaktionsrichtung $Me \rightarrow Me_e^{n+} + ne^-$)
- Atome werden in Atomgitter der Kathoden-Seite eingebaut ($Me \rightarrow Me_e^{n+} + ne^-$)
- Dadurch erfolgt Abtransport der Ionen aus der Lösung. Der Dendrit baut sich langsam auf, da die elektrische Feldstärke bei geringer werdendem Abstand steigt.
- Das beschleunigte Wachstum der Dendriten führt dann zu einem Kurzschluss.

Aufgabe 5.7

Welche Voraussetzungen müssen für das Zustandekommen der elektrolytischen Migration vorhanden sein?

a) hohe Luftfeuchte ☐
b) hohe Temperatur ☐
c) hohe elektrische Spannungen ☐
d) hohe elektrische Stromdichte ☐
e) elektrisches Gleichfeld ■
f) migrierfreudiges Leitbahnmaterial ■
g) hoher Oberflächenisolationswiderstand des Trägermaterials ■
h) dünner Feuchtigkeitsfilm auf der Oberfläche eines Trägersubstrats ■

Erläuterung:

Aufgabe 5.8

Welches sind die typischen Fehlerfälle infolge elektrolytischer Migration?

a) Ausfall durch dauerhaften Kurzschluss ☐
b) Durchbrennen der Leitungen infolge eines Kurzschlusses ☐
c) Auftreten von Kriechströmen ■
d) Auftreten von Nebenschlüssen ■
e) kurzzeitiger Kurzschluss bis zum Durchbrennen des Dendriten ■
f) Abbrennen des Trägermaterials infolge eines Kurzschlusses ☐
g) Verlust der Isolationswirkung des Trägersubstrats ☐
h) Minderung der Stromtragfähigkeit von Leitbahnen ☐

Erläuterung:
Durch Dendriten entstehen elektrische Verbindungen an Stellen, an denen keine solche vorgesehen bzw. erwünscht ist. Dadurch entstehen Kriechströme und Nebenschlüsse, bis der Dendrit nach kurzer Zeit durchbrennt und die entstandene Verbindung wieder getrennt ist.

Aufgabe 5.9

Warum kommt es bei elektrolytischer Migration zum Dendritenwachstum?

a) Dendriten wachsen an Orten mit günstiger Kristallorientierung. ☐

b) Durch die Kristallorientierung des Dendriten können sich Atome nur an seiner Spitze, nicht aber auf den Seitenflächen ablagern. ☐

c) Die verkürzte Entfernung zur anderen Leitbahn erhöht den Stromfluss und begünstigt damit das Wachstum der Dendriten. ☐

d) An der Spitze des Dendriten kommt es zu Überhöhungen des elektrischen Feldes, was die Ablagerung von Atomen begünstigt. ■

e) Im Dendriten herrscht eine höhere Temperatur, wodurch die Ablagerung von Atomen begünstigt wird. ☐

f) Dendriten durchstoßen eine Oxidationsschicht an den Seitenkanten der Leitbahn, wodurch sich an den Dendriten, jedoch nicht an den Leitbahnkanten Atome ablagern können. ☐

g) Das Wachstum von Dendriten ist thermodynamisch energieärmer als das Wachstum breiter, ebener Flächen. ☐

h) Dendriten bauen stabile, einkristalline Strukturen auf und zerfallen dadurch nicht wieder in der Gleichgewichtsreaktion mit dem Elektrolyt. ☐

Erläuterung:

Aufgabe 5.10

Ein Lebensdauerversuch wird mit $N = 1000$ Elementen gestartet. Die Versuchsdauer beträgt $t_E = 3000\ h$, alle $\Delta t = 100\ h$ wird die Anzahl der ausgefallenen Elemente notiert. Bestimmen Sie anhand der Angaben der nachfolgenden Tabelle die Werte für die Überlebenswahrscheinlichkeit $R_N(t)$, die Ausfalldichte $f_N(t)$, die Ausfallrate $\lambda_N(t)$ und die Lebensdauer $\overline{T_N}$, und stellen Sie $R_N(t)$, $f_N(t)$ und $\lambda_N(t)$ grafisch dar!

$\boldsymbol{k}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\boldsymbol{n_k}$	50	40	32	25	20	17	16	16	15	14
$\boldsymbol{n(t_k)}$	0	50	90	122	147	167	184	200	216	231
$\boldsymbol{N - n(t_k)}$	1000	950	910	878	853	833	816	800	784	769

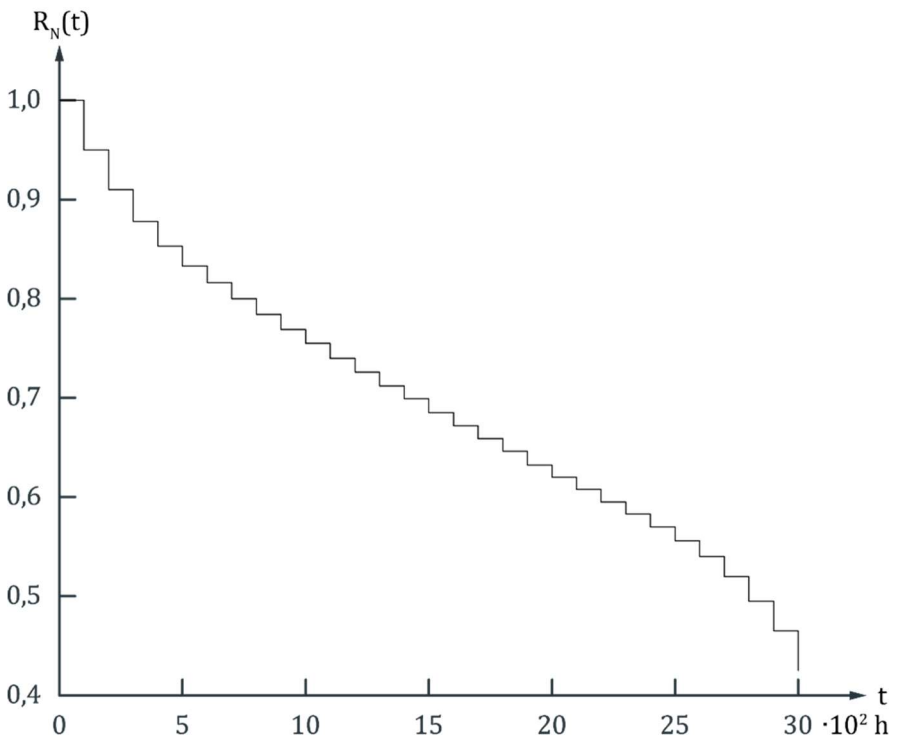
$\boldsymbol{k}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\boldsymbol{n_k}$	15	14	14	13	14	13	13	13	14	12
$\boldsymbol{n(t_k)}$	245	260	274	288	301	315	328	341	354	368
$\boldsymbol{N - n(t_k)}$	755	740	726	712	699	685	672	659	646	632

$\boldsymbol{k}$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\boldsymbol{n_k}$	12	13	12	13	14	16	20	25	30	40	-
$\boldsymbol{n(t_k)}$	380	392	405	417	430	444	460	480	505	535	575
$\boldsymbol{N - n(t_k)}$	620	608	595	583	570	556	540	520	495	465	425

Lösung:
Für die Überlebenswahrscheinlichkeit $R_N(t)$ gilt:

$$R_N(t) = 1 - F_N(t) = 1 - \frac{n(t_k)}{N}$$

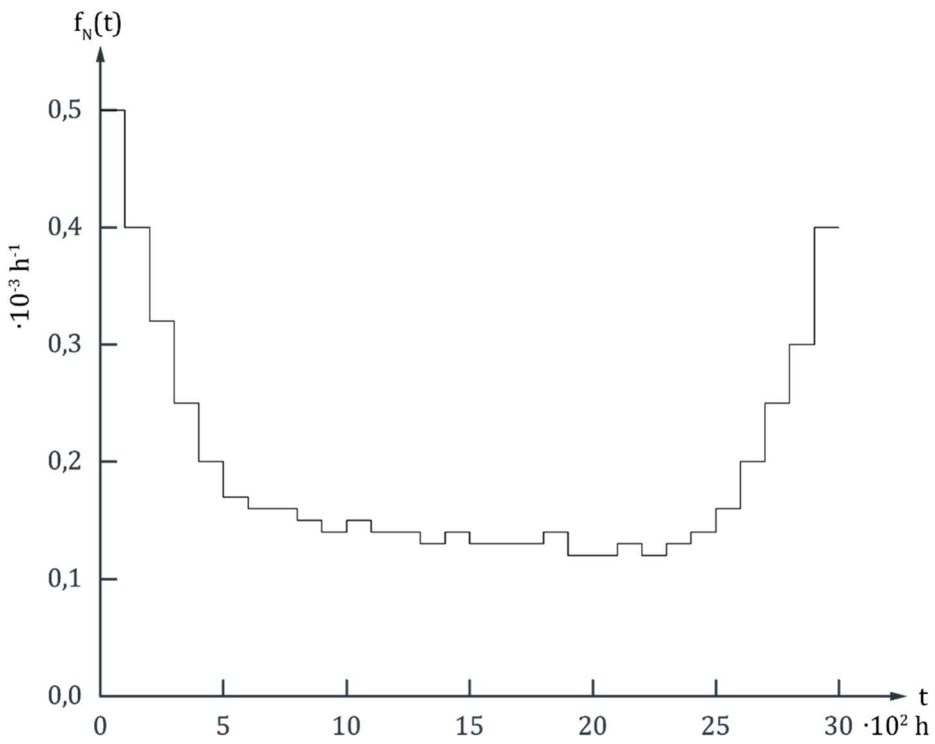
$$R_N(t) = \begin{cases} 1 - \frac{n(t_0)}{N} = 1 - \frac{0}{1000} = 1{,}000 & \text{für } 0 \leq t < \Delta t \\ 1 - \frac{n(t_1)}{N} = 1 - \frac{50}{1000} = 0{,}950 & \text{für } \Delta t \leq t < 2\Delta t \\ 1 - \frac{n(t_2)}{N} = 1 - \frac{90}{1000} = 0{,}910 & \text{für } 2\Delta t \leq t < 3\Delta t \\ \quad \ldots & \quad \ldots \\ 1 - \frac{n(t_{29})}{N} = 1 - \frac{535}{1000} = 0{,}465 & \text{für } 29\Delta t \leq t < 30\Delta t \end{cases}$$



Für die Ausfalldichte $f_N(t)$ gilt:

$$f_N(t) = \frac{n_k}{N \bullet \Delta t}$$

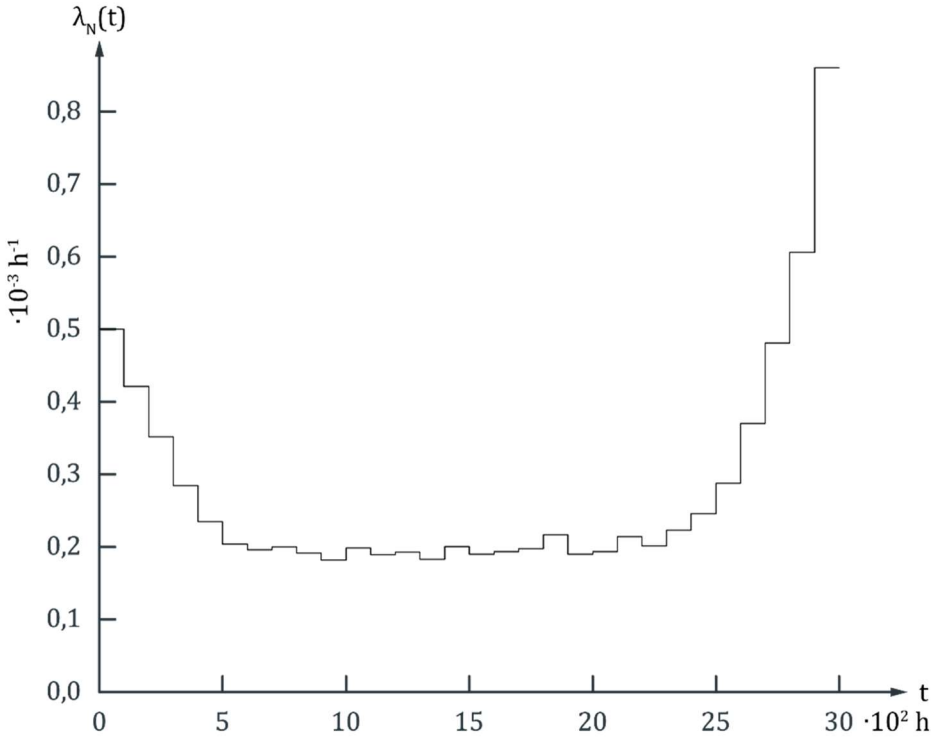
$$f_N(t) = \begin{cases} \frac{n_0}{N \bullet \Delta t} = \frac{50}{1000 \bullet 100h} = 0{,}500 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 0 \leq t < \Delta t \\ \frac{n_1}{N \bullet \Delta t} = \frac{40}{1000 \bullet 100h} = 0{,}400 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } \Delta t \leq t < 2\Delta t \\ \frac{n_2}{N \bullet \Delta t} = \frac{32}{1000 \bullet 100h} = 0{,}320 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 2\Delta t \leq t < 3\Delta t \\ \dots & \dots \\ \frac{n_{29}}{N \bullet \Delta t} = \frac{40}{1000 \bullet 100h} = 0{,}400 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 29\Delta t \leq t < 30\Delta t \end{cases}$$



Für die Ausfallrate $\lambda_N(t)$ gilt:

$$\lambda_N(t) = \frac{n_k}{[N - n(t_k)] \bullet \Delta t}$$

$$\lambda_N(t) = \begin{cases} \dfrac{n_0}{[N - n(t_0)] \bullet \Delta t} = \dfrac{50}{(1000 - 0) \bullet 100h} = 0{,}500 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 0 \leq t < \Delta t \\[2ex] \dfrac{n_1}{[N - n(t_1)] \bullet \Delta t} = \dfrac{40}{(1000 - 50) \bullet 100h} \approx 0{,}421 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } \Delta t \leq t < 2\Delta t \\[2ex] \dfrac{n_2}{[N - n(t_2)] \bullet \Delta t} = \dfrac{32}{(1000 - 90) \bullet 100h} \approx 0{,}352 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 2\Delta t \leq t < 3\Delta t \\[2ex] \qquad \ldots & \qquad \ldots \\[2ex] \dfrac{n_{29}}{[N - n(t_{29})] \bullet \Delta t} = \dfrac{40}{(1000 - 535) \bullet 100h} \approx 0{,}860 \bullet 10^{-3} h^{-1} & \text{für } 29\Delta t \leq t < 30\Delta t \end{cases}$$



Alle Ergebnisse finden sich in nachfolgender Tabelle:

$\boldsymbol{k}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\boldsymbol{R_N(t)}$	1,000	0,950	0,910	0,878	0,853	0,833	0,816	0,800	0,784	0,769
$\boldsymbol{f_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,500	0,400	0,320	0,250	0,200	0,170	0,160	0,160	0,150	0,140
$\boldsymbol{\lambda_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,500	0,421	0,352	0,285	0,234	0,204	0,196	0,200	0,191	0,182

$\boldsymbol{k}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\boldsymbol{R_N(t)}$	0,755	0,740	0,726	0,712	0,699	0,685	0,672	0,659	0,646	0,632
$\boldsymbol{f_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,150	0,140	0,140	0,130	0,140	0,130	0,130	0,130	0,140	0,120
$\boldsymbol{\lambda_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,199	0,189	0,193	0,183	0,200	0,190	0,193	0,197	0,217	0,190

$\boldsymbol{k}$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$\boldsymbol{R_N(t)}$	0,620	0,608	0,595	0,583	0,570	0,556	0,540	0,520	0,495	0,465
$\boldsymbol{f_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,120	0,130	0,120	0,130	0,140	0,160	0,200	0,250	0,300	0,400
$\boldsymbol{\lambda_N(t)[10^{-3}h^{-1}]}$	0,194	0,214	0,202	0,223	0,246	0,288	0,370	0,481	0,606	0,860

Die Lebensdauer $\overline{T_N}$ entspricht dem arithmetischen Mittelwert der einzelnen Ausfallzeitpunkte. Allgemein berechnet sich dieser bei klassierten Daten über folgende Formel:

$$\overline{T_N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} n_k t_k$$

Dabei ist t_k die jeweilige Klassenmitte. Diese ist das arithmetische Mittel zwischen Klassenober- und Klassenuntergrenze:

$$t_k = \frac{t_{k,max} + t_{k,min}}{2}$$

$$t_0 = \frac{0\ h + 100\ h}{2} = 50\ h$$

$$t_1 = \frac{100\ h + 200\ h}{2} = 150\ h$$

$$t_2 = \frac{200\ h + 300\ h}{2} = 250\ h$$

...

$$t_{29} = \frac{2900\ h + 3000\ h}{2} = 2950\ h$$

Da der Versuch nach $t_E = 3000\ h$ abgebrochen wurde, ohne dass alle Teile ausgefallen sind (425 Teile haben die Versuchsdauer überlebt), muss die vorgenannte Formel leicht modifiziert werden:

$$\overline{T_N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m}(n_k t_k + 425 \bullet 3000\ h)$$

$$\overline{T_N} = \frac{1}{1000}(50 \bullet 50\ h + 40 \bullet 150\ h + 32 \bullet 250\ h + \cdots + 40 \bullet 2950\ h + 425 \bullet 3000\ h)$$

$$= 2078{,}35\ h$$

Dieser Schätzwert liegt natürlich unter jenem, der sich bei einer Versuchsdurchführung bis zum letzten Ausfall ergeben würde.

Aufgabe 5.11

Die Serienproduktion von Glühlampen erfolgt mit einem Ausschussanteil von 1 %. Aus der laufenden Produktion wird eine Stichprobe vom Umfang $n = 100$ entnommen. Mit welcher Wahrscheinlichkeit enthält diese Stichprobe drei oder mehr defekte Glühlampen?

Lösung:

Laut Aufgabenstellung wird eine Stichprobe aus der laufenden Produktion entnommen, was zur Annahme einer Poissonverteilung führt. Für diese gilt allgemein (vgl. [1], S. 188):

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda}$$

Für große Stichprobenumfänge $n \to \infty$ und geringe Wahrscheinlichkeiten $p \to 0$ gilt für den Erwartungswert:

$$E(X) = \lambda = n \bullet p$$

Die Gültigkeit darf im vorliegenden Fall angenommen werden. Dann ergibt sich:

$$\lambda = n \bullet p = 100 \bullet 0{,}01 = 1$$

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, drei oder mehr defekte Glühlampen in der Stichprobe zu finden:

$$P(X \geq 3) = 1 - P(X < 3) = 1 - [P(X = 0) + P(X = 1) + P(X = 2)]$$

$$= 1 - \left[\frac{1^0}{0!}e^{-1} + \frac{1^1}{1!}e^{-1} + \frac{1^2}{2!}e^{-1}\right] \approx 1 - \left[\frac{1}{1}0{,}3678 + \frac{1}{1}0{,}3678 + \frac{1}{2}0{,}3679\right]$$

$$\approx 1 - 0{,}9198 = 0{,}0802$$

Referenzen

[1] *Luderer, B.; Nollau, V.; Vetters, K.:* Mathematische Formeln für Wirtschaftswissenschaftler, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler 2015.

Die Aufgaben wurden zum Teil folgenden Büchern entnommen:

P. Köchel: Zuverlässigkeit technischer Systeme. Leipzig: Fachbuchverlag 1982.

A. Meyna, B. Pauli: Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik. München, Wien: Hanser 2010.

Entfallene bzw. abgewandelte Aufgaben aus früheren Übungen:

Aufgabe 5.1

Welche Art von Ausfällen ist in Halbleiterbauelementen vorrangig? Weshalb treten besonders diese Ausfälle dort auf?

Aufgabe 5.2

Erläutern Sie den Mechanismus der Elektromigration! An welchen Stellen in elektronischen Aufbauten tritt dieser Mechanismus bevorzugt auf? Wie unterscheidet er sich von anderen Migrationsmechanismen (z.B. Thermomigration)?

Aufgabe 5.3

Welche wichtigen physikalischen Parameter beeinflussen das Zustandekommen von Elektromigration?

Aufgabe 5.4

Erläutern Sie den Mechanismus der elektrolytischen Migration!

Aufgabe 5.5

Welche Voraussetzungen müssen für das Zustandekommen der elektrolytischen Migration vorhanden sein? Erläutern Sie an einem technischen Beispiel das Zustandekommen dieser Voraussetzungen!