Übungsblatt 6 **Zuverlässigkeit I**

Aufgabe 6.1

Durch welche Aspekte ist der Fehlermechanismus der Conductive Filament Formation (CFF) gekennzeichnet?

a) Oberflächenkontamination ☐

b) Grenzflächendelamination (d.h. Ablösung) ■

c) thermisch-mechanische Beanspruchung ■

d) Herstellungsfehler ■

e) Feldüberhöhung ☐

f) Feuchtemigration ■

g) Thermomigration ☐

h) Kohäsionsbruch ☐

Erläuterung:
Folgende Fehlermechanismen können zur CFF führen:

- Grenzflächendelamination (Interfacebrüche zwischen Faser und Epoxidmatrix)
- Temperaturwechsel
- Feuchte
- Herstellungsfehler

Aufgabe 6.2

An welchen Stellen in elektronischen Aufbauten tritt der Fehlermechanismus der Conductive Filament Formation (CFF) bevorzugt auf?

a) zwischen Leitbahnen ☐

b) in Isolationslagen ☐

c) zwischen Leitbahnebenen ■

d) in Durchkontaktierungen ☐

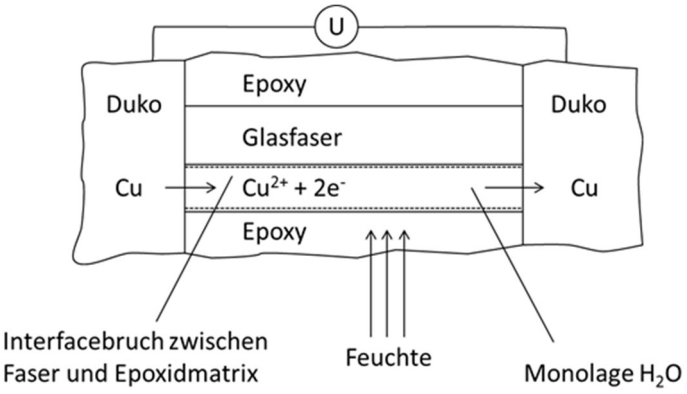
e) in Leitbahnkreuzungen ☐

f) in Glasfasern ■

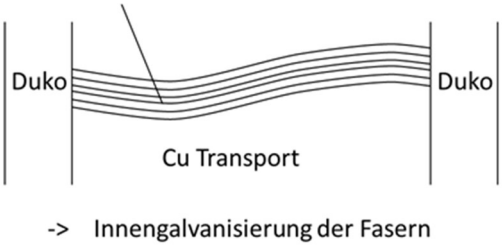
g) zwischen Durchkontaktierungen ■

h) an Glasfaser/Epoxy Grenzflächen ■

Erläuterung:
Fehlermechanismus 1: Cu-Transport entlang Faser



Fehlermechanismus 2: Transport durch Fasern



Aufgabe 6.3

Nennen Sie mögliche Folgen des Fehlermechanismus der Conductive Filament Formation (CFF)!

a) Ausfall durch dauerhaften Kurzschluss ☐
b) Durchbrennen der Leitungen infolge eines Kurzschlusses ☐
c) Durchbrennen der Durchkontaktierungen infolge eines Kurzschlusses ☐
d) Auftreten von Nebenschlüssen ■
e) kurzzeitiger Kurzschluss bis zum Durchbrennen des Filaments ■
f) Abbrennen des Trägermaterials infolge eines Kurzschlusses ☐
g) Verlust der Isolationswirkung zwischen Durchkontaktierungen ■
h) Verlust der Isolationswirkung zwischen Leitbahnebenen ■

Erläuterung:
Mögliche Folgen der CFF sind:
- (kurzzeitige) Kurzschlüsse
- Kriechströme
- Nebenschlüsse (Signaldegradation in komplexen Schaltungsträgern)

Aufgabe 6.4

Welche Testmöglichkeiten existieren, um den Fehlermechanismus der Conductive Filament Formation (CFF) über ein Ausfallmodell zu beschreiben?

a) High Voltage Test (HV) ☐

b) Surface Insulation Resistance Test (SIR) ☐

c) Hole to Hole Test ■

d) Leakage Test ☐

e) Raytheon Test ■

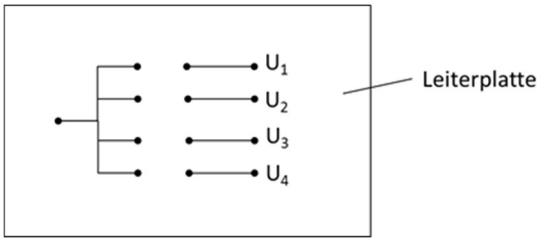
f) I-V-Test ☐

g) Pressure Cooker Test ☐

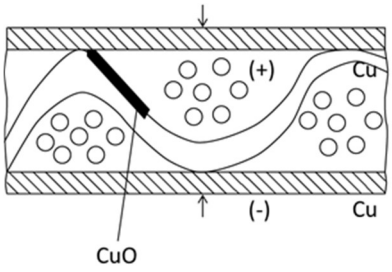
h) Breakthrough Voltage Test ☐

Erläuterung:

Möglichkeit 1: Hole-Hole-Testkörper



Möglichkeit 2: Raytheon Test



$$\text{MTTF} = a(H)^b e^{\left(\frac{Ea}{RT}\right)} . d\frac{L^2}{U}$$

H ... Feuchte
E_a ... aktuelle Energie
L ... Leitbahnabstand
U ... Spannung

$$t_f = \left[\frac{a \cdot f \cdot [1000 \cdot k \cdot L]^n}{U^m [M - M_t]}\right]$$

M_t :=Treshold
A,f,m,n ... Parameter

Aufgabe 6.5

Welche Voraussetzungen müssen unbedingt vorliegen, damit es zu Korrosion kommen kann?

a) zwei metallische Leitbahnen mit gleichem elektrochemischem Potential ☐

b) zwei metallische Leitbahnen mit ungleichem elektrochemischem Potential ☐

c) eine metallische Leitbahn mit negativem sowie eine metallische Leitbahn mit positivem elektrochemischem Potential ☐

d) eine metallische Leitbahn mit negativem elektrochemischem Potential ■

e) eine metallische Leitbahn mit positivem elektrochemischem Potential ☐

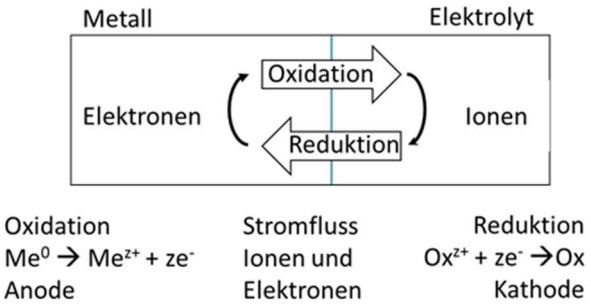
f) ein stark saures, flüssiges Umgebungsmedium ■

g) ein schwach basisches, flüssiges Umgebungsmedium ☐

h) Wasser ☐

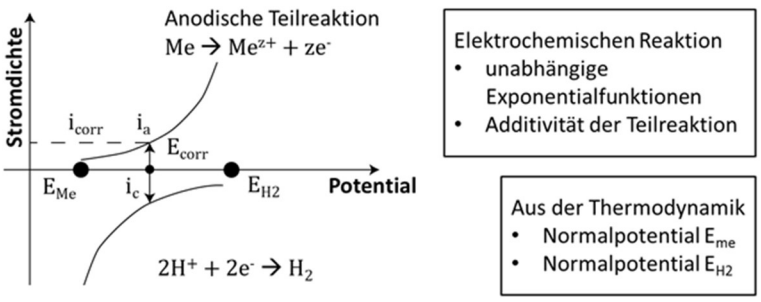
i) Luft ■

Erläuterung:
Prinzip der Korrosion:



Voraussetzungen:
- metallische Leitbahn mit negativem elektrochemischem Potential
- stark saures, flüssiges Umgebungsmedium
- Luft

Korrosionspotential:



Aufgabe 6.6

Welche in der Elektronikproduktion verwendeten Chemikalien, Flussmittel und Hilfsstoffe fördern korrosive Effekte an Leitbahnen?

a) Kolophonium ■

b) Ameisensäure ■

c) RMA Flussmittel ☐

d) no clean Flussmittel ☐

e) Flash Gold Überzüge ☐

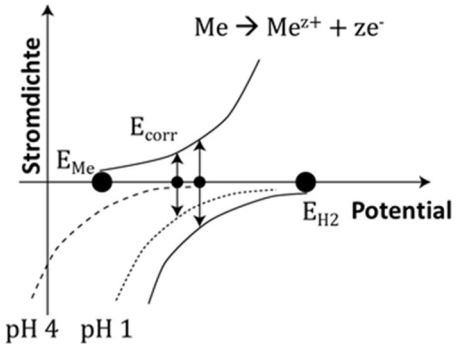
f) Silberüberzüge ☐

g) Lötstopplack ☐

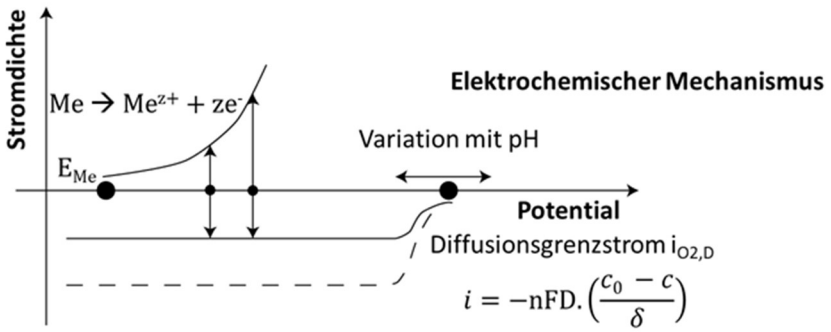
h) conformal coating ☐

i) Epoxidharzmassen ☐

Erläuterung:



Die atmosphärische Korrosion benötigt einen Flüssigkeitsfilm und Sauerstoff.



Die Dicke des Flüssigkeitsfilms beeinflusst das Korrosionspotential und die Korrosionsgeschwindigkeit.

Säurehaltige Flussmittel führen zur Korrosion der Lötstellen.

Aufgabe 6.7

Was sind Beispiele für kombinierte thermisch-mechanische Ausfallmechanismen in elektronischen Aufbauten?

a) Schichtspannungen in der Mehrebenenmetallisierung auf einem Si-Chip ■

b) intermetallisches Phasenwachstum an der Grenzfläche eines SnAgCu-Lötkontakts zur Cu-Leitbahn einer Leiterplatte □

c) Lötstellenermüdung an einem Vielschichtkondensator aus $BaTiO_3$ auf einer FR4-Leiterplatte ■

d) Kornwachstum in einer Cu-Leitbahn auf einer Leiterplatte □

e) Riss durch Kontaktzone eines Drahtbond Al-Wedge-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Leistungstransistors ■

f) montagebedingter Muschelbruch im Si unterhalb eines Drahtbond Au-Ball-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs □

g) intermetallisches Phasenwachstum an einem Drahtbond Au-Ball-Kontakt auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs □

h) Ostwaldreifung der $SnAg_3$-Phasen in eutektischen SnAgCu-Lötkontakten □

i) Rissbildung im Wärmeleitkleber auf der Rückseite eines Si-Chips ■

Erläuterung:

Thermisch-mechanische Ausfallmechanismen sind u.a.:

- thermisch-mechanische Ermüdung
- Rekristallisation

Aufgabe 6.8

Was sind Beispiele für rein thermische Ausfallmechanismen in elektronischen Aufbauten?

a)	Schichtspannungen in der Mehrebenenmetallisierung auf einem Si-Chip	☐
b)	intermetallisches Phasenwachstum an der Grenzfläche eines SnAgCu-Lötkontaktes zur Cu-Leitbahn einer Leiterplatte	■
c)	Lötstellenermüdung an einem Vielschichtkondensator aus $BaTiO_3$ auf einer FR4-Leiterplatte	☐
d)	Kornwachstum in einer Cu-Leitbahn auf einer Leiterplatte	■
e)	Riss durch Kontaktzone eines Drahtbond Al-Wedge-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Leistungstransistors	☐
f)	montagebedingter Muschelbruch im Si unterhalb eines Drahtbond Au-Ball-Kontaktes auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs	☐
g)	intermetallisches Phasenwachstum an einem Drahtbond Au-Ball-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs	■
h)	Ostwaldreifung der $SnAg_3$-Phasen in eutektischen SnAgCu-Lötkontakten	■
i)	Rissbildung im Wärmeleitkleber auf der Rückseite eines Si-Chips	☐

Erläuterung:
Rein thermische Ausfallmechanismen sind u.a.:

- Kornvergröberung
- intermetallisches Phasenwachstum

Sie wirken indirekt auf Ausfälle, indem sie zur Alterung beitragen.

Aufgabe 6.9

Was sind Beispiele für rein mechanische Ausfallmechanismen in elektronischen Aufbauten?

a) Schichtspannungen in der Mehrebenenmetallisierung auf einem Si-Chip ☐

b) intermetallisches Phasenwachstum an der Grenzfläche eines SnAgCu-Lötkontaktes zur Cu-Leitbahn einer Leiterplatte ☐

c) Lötstellenermüdung an einem Vielschichtkondensator aus $BaTiO_3$ auf einer FR4-Leiterplatte ☐

d) Kornwachstum in einer Cu-Leitbahn auf einer Leiterplatte ☐

e) Riss durch Kontaktzone eines Drahtbond Al-Wedge-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Leistungstransistors ☐

f) montagebedingter Muschelbruch im Si unterhalb eines Drahtbond Au-Ball-Kontaktes auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs ■

g) intermetallisches Phasenwachstum an einem Drahtbond Au-Ball-Kontakts auf einer Al-Anschlussfläche eines Si-Logik-ICs ☐

h) Ostwaldreifung der $SnAg_3$-Phasen in eutektischen SnAgCu-Lötkontakten ☐

i) Rissbildung im Wärmeleitkleber auf der Rückseite eines Si-Chips ☐

Erläuterung:

Rein mechanische Ausfallmechanismen sind:

- Vibration
- Schock
- Biegung
- Dauerlast

Aufgabe 6.10

Warum machen thermisch-mechanische Ausfälle den Hauptteil aller Ausfälle in elektronischen Aufbauten aus? Was sind die treibenden Ursachen dieser Art von Ausfällen?

a) Erhöhung des Integrationsniveaus ■

b) Verkleinerung der Strukturabmessungen □

c) Verringerung der Materialvolumina □

d) Erhöhung der Transistoranzahl pro IC □

e) Erhöhung von Chipgrößen ■

f) Erhöhung der Anschlusszahl □

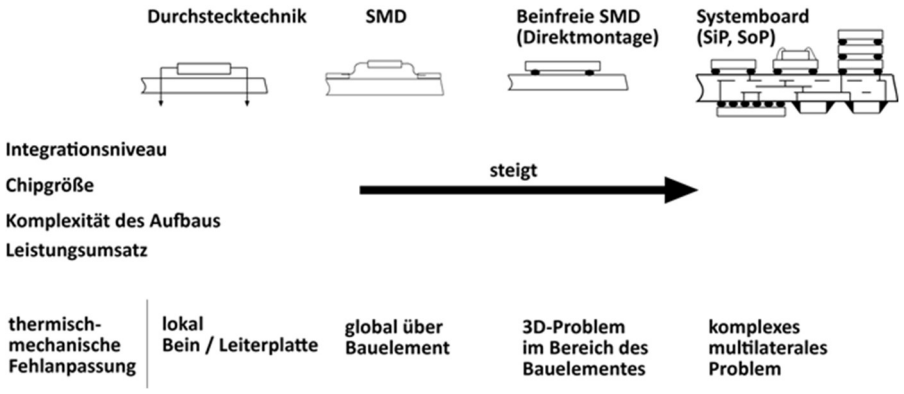
g) Erhöhung der Komplexität des Aufbaus ■

h) neue Belastungsarten □

i) Erhöhung des Leistungsumsatzes ■

Erläuterung:

Technologieentwicklung und Fehlpassungsproblematik:

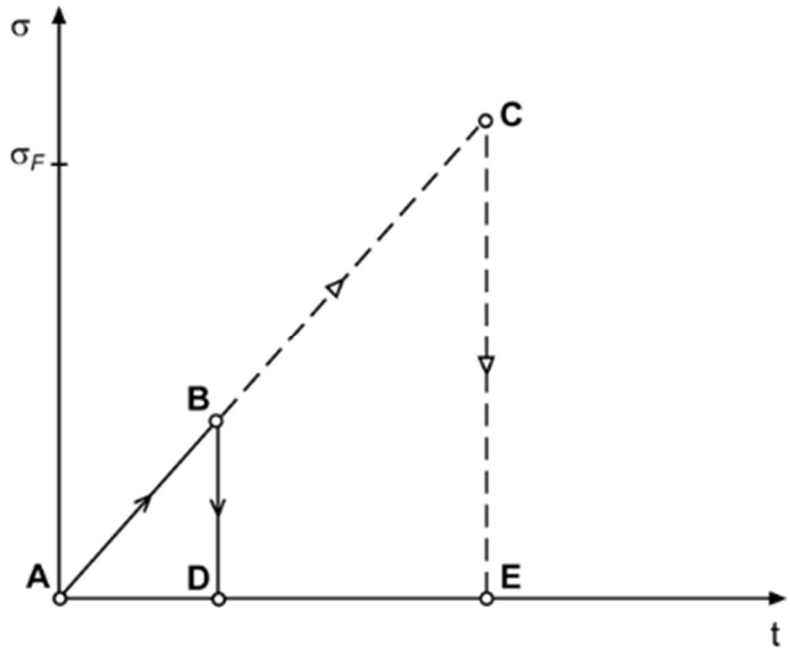


Aufgabe 6.11

Wodurch ist die elastische Verformung (werkstoffmechanisches Verhalten) in kristallinen Festkörpern gekennzeichnet?

a)	linear	■
b)	nicht-linear	□
c)	reversibel	■
d)	umkehrbar	■
e)	Energiedissipation	□
f)	Hysterese-Effekte	□
g)	existiert nur im Zugbereich	□
h)	existiert nur im Druckbereich	□
i)	existiert im Zug- und Druckbereich	■

Erläuterung:
Elastische Verformung:

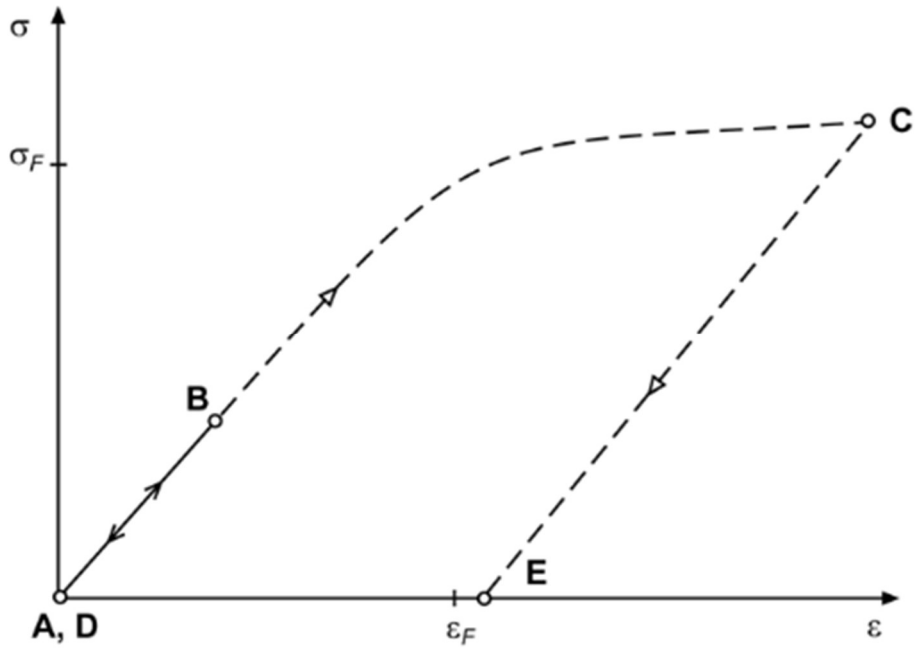


Aufgabe 6.12

Wodurch ist die plastische Verformung (werkstoffmechanisches Verhalten) in kristallinen Festkörpern gekennzeichnet?

a)	linear	☐
b)	nicht-linear	■
c)	reversibel	☐
d)	umkehrbar	■
e)	Energiedissipation	■
f)	Hysterese-Effekte	■
g)	existiert nur im Zugbereich	☐
h)	existiert nur im Druckbereich	☐
i)	existiert im Zug- und Druckbereich	■

Erläuterung:
Plastische Verformung:



Aufgabe 6.13

Wodurch ist die Kriechverformung (werkstoffmechanisches Verhalten) in kristallinen Festkörpern gekennzeichnet?

a)	temperaturabhängig	■
b)	zeitabhängig	■
c)	existiert nur im Temperbereich unterhalb 40 % der homologen Temperatur	□
d)	mechanische Spannung nimmt mit Verformungsgeschwindigkeit zu	■
e)	mechanische Spannung nimmt mit Temperatur zu	□
f)	es kommt zur Materialverfestigung	□
g)	existiert nur im Zugbereich	□
h)	existiert nur im Druckbereich	□
i)	existiert im Zug- und Druckbereich	■

Erläuterung:
Kriechen ist die zeitabhängige, plastische Verformung bei $T > 0{,}4 \bullet T_H$. Das Kriechverhalten lässt sich im Rahmen eines Kriechversuchs charakterisieren. Die Dehnung wird in Abhängigkeit der Zeit bei konstanter Kraft bzw. Spannung gemessen.

Aufgabe 6.14
Die Ausfallrate einer Komponente sei $\lambda = 0{,}5 \bullet 10^{-6} h^{-1}$.

a) Geben Sie die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ an und zeichnen Sie diese!
b) Geben Sie die Ausfalldichtefunktion $f(t)$ an und zeichnen Sie diese!
c) Bestimmen Sie aus den vorangegangenen Überlegungen die Ausfallratefunktion $\lambda(t)$ und zeichnen Sie ihren Verlauf!

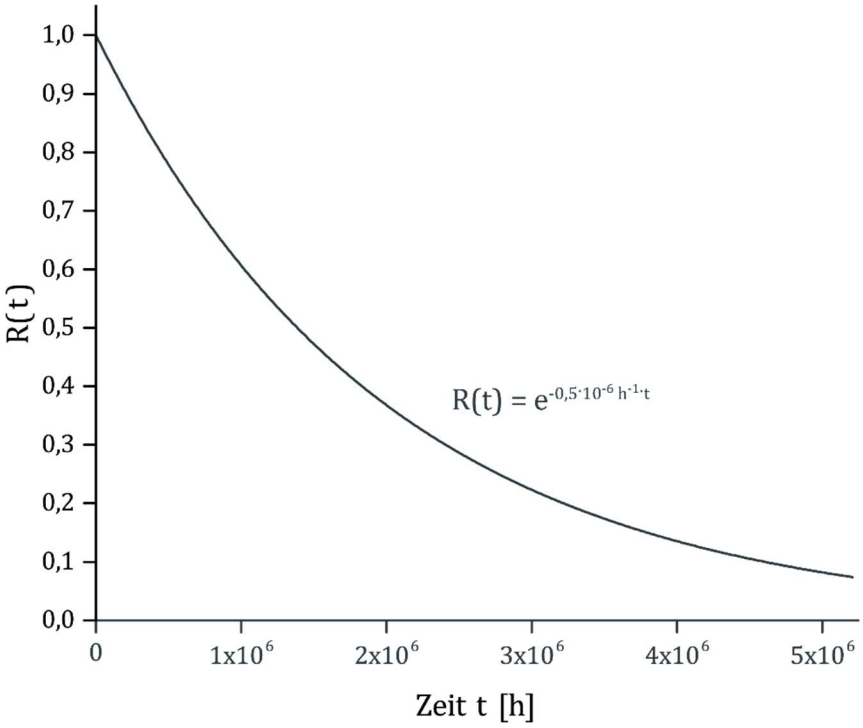
Lösung:

a) Da die Ausfallrate konstant ist, handelt es sich um eine Exponentialverteilung. Für deren Überlebenswahrscheinlichkeit gilt allgemein:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Im vorliegenden Fall ergibt sich:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0{,}5 \bullet 10^{-6} h^{-1} \bullet t}$$

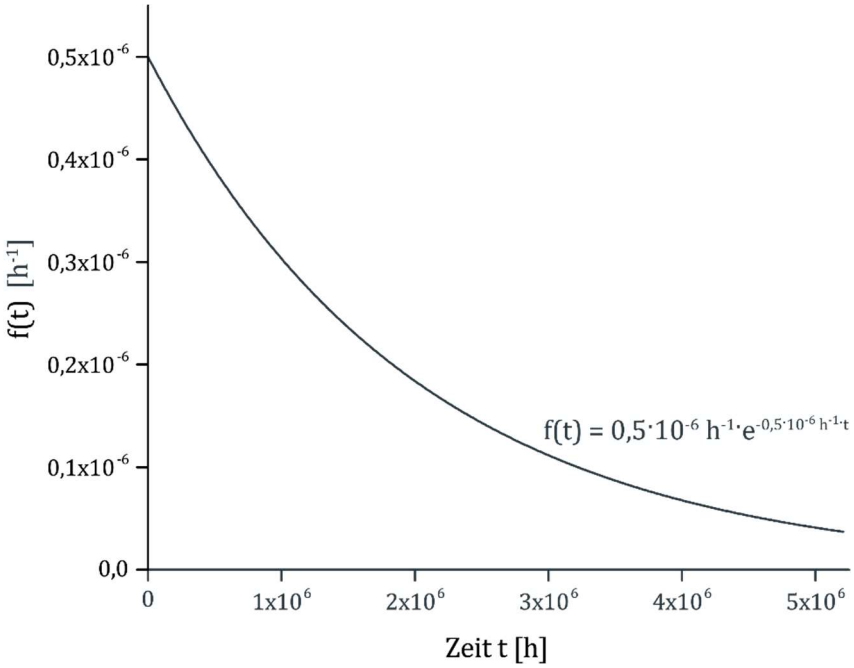


b) Für die Ausfalldichte einer Exponentialverteilung gilt allgemein:

$$f(t) = \lambda \bullet e^{-\lambda t}$$

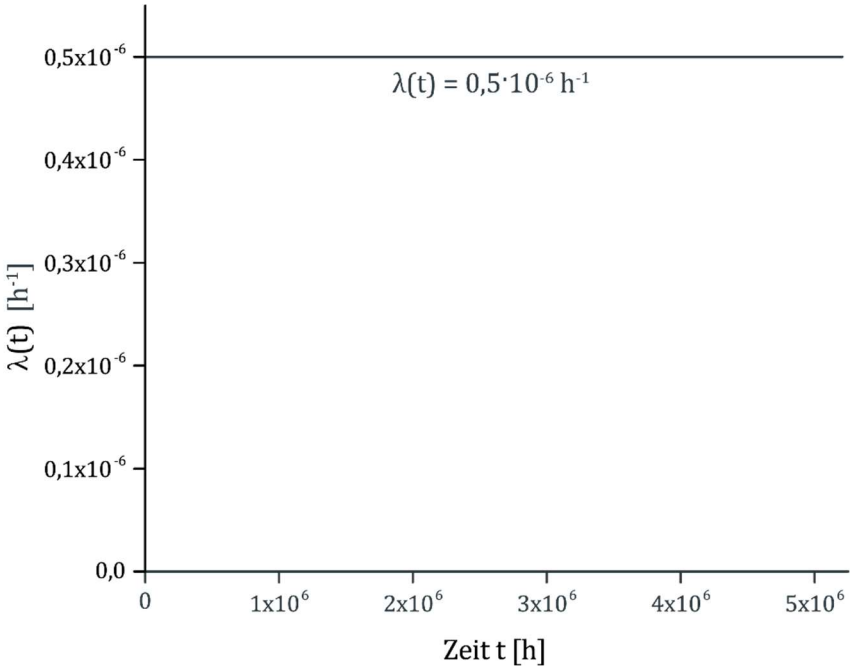
Im vorliegenden Fall ergibt sich:

$$f(t) = 0{,}5 \bullet 10^{-6} h^{-1} \bullet e^{-0{,}5 \bullet 10^{-6} h^{-1} t}$$



c) Die Ausfallratefunktion lässt sich aus den Funktionen der Überlebenswahrscheinlichkeit und der Ausfalldichte wie folgt berechnen:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \bullet e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = 0{,}5 \bullet 10^{-6} h^{-1}$$



Aufgabe 6.15

Die Überlebenswahrscheinlichkeit einer automatischen Fertigungsstraße für Zylinderköpfe von PKW-Motoren hat bei $t_1 = 120\ h$ den Wert $R(t_1) = 0{,}9$. Berechnen Sie die Ausfallrate λ, die Ausfalldichte $f(t_1)$ sowie die mittlere Lebensdauer $\overline{T}$ unter Annahme einer Exponentialverteilung!

Lösung:

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit einer Exponentialverteilung gilt:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Die Ausfallrate λ erhält man durch entsprechendes Umformen:

$$\Leftrightarrow \ln[R(t)] = \ln\,(e^{-\lambda}\ )$$

$$\Leftrightarrow \ln[R(t)] = -\lambda t$$

$$\Leftrightarrow \lambda = -\frac{\ln[R(t)]}{t}$$

Damit ergibt sich mit den gegebenen Daten:

$$\lambda = -\frac{\ln[R(t_1)]}{t_1} = -\frac{\ln(0{,}9)}{120\ h} \approx -\frac{-0{,}1054}{120\ h} \approx 8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1}$$

Für die Ausfalldichte einer Exponentialverteilung gilt:

$$f(t) = \lambda \bullet e^{-\lambda t}$$

Zum Zeitpunkt $t_1 = 120\ h$ ergibt sich:

$$f(t_1) = \lambda \bullet e^{-\lambda t_1} = 8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1} \bullet e^{-8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1} \bullet 120\ h}$$

$$= 8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1} \bullet e^{-0{,}1056} \approx 8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1} \bullet 0{,}8998 \approx 7{,}9 \bullet 10^{-4} h^{-1}$$

Die mittlere Lebensdauer entspricht dem Kehrwert der Ausfallrate λ:

$$\overline{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{8{,}8 \bullet 10^{-4} h^{-1}} \approx 1136{,}4\ h$$

Aufgabe 6.16

Welche Untersuchungszeit ist für einen Posten von 1000 Transistoren mit einer Ausfallrate von $\lambda = 10^{-7} h^{-1}$ notwendig, wenn in dieser Zeit wenigstens 10 Transistoren ausfallen sollen?

Lösung:

Da die Ausfallrate konstant ist, handelt es sich um eine Exponentialverteilung. Für deren Überlebenswahrscheinlichkeit gilt allgemein:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = 1 - F(t)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit zu einem beliebigen Zeitpunkt t lässt sich ermitteln, indem man die Anzahl der bis zum Zeitpunkt t ausgefallenen Transistoren $n(t)$ durch die Gesamtzahl N dividiert:

$$F(t) = \frac{n(t)}{N} = \frac{10}{1000} = 0{,}01$$

Es ergibt sich:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - 0{,}01 = 0{,}99 = e^{-\lambda t}$$

$$\Leftrightarrow \ln(0{,}99) = \ln\left(e^{-\lambda t}\right)$$

$$\Leftrightarrow \ln(0{,}99) = -\lambda t$$

$$\Leftrightarrow t = -\frac{\ln(0{,}99)}{\lambda} = -\frac{\ln(0{,}99)}{10^{-7} h^{-1}} \approx -\frac{-0{,}0101}{10^{-7} h^{-1}} = 101000\ h$$

Referenzen

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.

D. Kececioglu: Reliability and Life Testing Handbook. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice-Hall, 1993.