Aufgabe 4.1

Von einem Ausfall spricht man, wenn …

a) … es zum Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit kommt. ■

b) … es zum abrupten Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit kommt. ■

c) … es zum allmählichen Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit kommt. □

d) … es zunächst zu einem Verlust, später jedoch zu einer Wiedererlangung der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit kommt. ■

e) … ein vorher definierter Grenzzustand einer Funktionalität langfristig unterschritten wird, ohne dass ein kompletter Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit eintritt. ■

f) … ein vorher definierter Grenzzustand einer Funktionalität langfristig überschritten wird, ohne dass ein kompletter Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit eintritt. ■

g) … ein vorher definierter Grenzzustand einer Funktionalität einmalig nur kurzfristig unter- bzw. überschritten wird, ohne dass ein kompletter Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit eintritt. ■

h) … es zum ständigen Wechsel zwischen Verlust und Wiedererlangung der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit kommt. ■

Erläuterung:

Ein Ausfall ist ein Ereignis, das im Verlust der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit besteht. Dabei wird ein Grenzzustand erreicht, bei dem sich eine oder mehrere Kenngrößen so verändert haben, dass die Funktionstüchtigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Das Bauelement gilt auch nach kurzfristigem Unter- bzw. Überschreiten des Grenzzustands als nicht mehr funktionstüchtig (und somit als Ausfall).

Aufgabe 4.2

Welche Gründe treffen für das Auftreten von Ausfällen in elektronischen Aufbauten in besonderer Weise zu?

a)	Ausfälle werden immer durch physikalische oder chemische Prozesse hervorgerufen.	■
b)	Durch eine Verringerung der Strukturbreiten treten vermehrt Ausfälle auf.	■
c)	Durch unbekannte bzw. neue Umweltbelastungen treten neuartige Ausfälle auf.	■
d)	Durch einen steigenden Integrationsgrad treten vermehrt Ausfälle auf.	□
e)	Durch eine steigende Zahl von Bauelementeanschlüssen treten vermehrt Ausfälle auf.	■
f)	Ausfälle entstehen häufig durch einen Bedienungsfehler.	□
g)	Ausfälle treten bei gleichen Bauelementen immer zur gleichen Zeit auf.	□

Erläuterung:

- Ausfälle werden immer durch physikalische (z. B. mechanische, thermische oder nukleare Triebkräfte) oder chemische Prozesse (z. B. Korrosion, elektrolytische Migration) hervorgerufen.
- Eine Verringerung der Strukturbreiten führt aus folgenden Gründen vermehrt zu Ausfällen:
    - Geringere Materialvolumen (höhere örtliche Stromdichte, erhöhte Anfälligkeit gegen Elektromigration, Schablonenverschiebung, usw.).
    - Höhere Feldstärken und größere Temperaturgradienten wirken ausfallbeschleunigend.
    - Kompliziertere Entwürfe erhöhen die Möglichkeit von Entwurfsfehlern.
- Unbekannte Umweltbelastungen und Anforderungsprofile führen, wie auch neue Belastungsarten (bspw. Schockbelastungen bei tragbaren Geräten), ebenfalls zu neuartigen Ausfällen.
- Werden durch einen steigenden Integrationsgrad für die gleiche Funktion weniger Anschlüsse gebraucht, wirkt dies positiv auf die Zuverlässigkeit.
- Eine steigende Anschlusszahl dagegen wirkt negativ auf die Zuverlässigkeit.
- Bedienungsfehler spielen keine große Rolle bei den hier behandelten Ausfällen.
- Ausfälle treten bei gleichen Bauelementen nicht immer zur gleichen Zeit auf.

Aufgabe 4.3

Durch welche besonderen Aspekte der Entwicklung der Elektronik werden thermisch-mechanische Ausfälle in besonderer Weise begünstigt?

a)	Verringerung der Strukturbreiten	☐
b)	Steigendes Integrationsniveau	■
c)	Steigende Anschlusszahlen	☐
d)	Erhöhte Komplexität der Aufbautechnik elektronischer Schaltungen	■
e)	Neue Belastungsarten	☐
f)	Größerer Leistungsumsatz pro Flächeneinheit	■
g)	Verkleinerte, gewichtsreduzierte Bauelemente für Mobilfunk	☐
h)	Veränderung der Verbindungstechnik (THT → SMT → Area Array)	■

Erläuterung:

Thermische-mechanische Ausfälle sind üblicherweise insbesondere durch Schichtspannungen und Bimaterialverbindungen charakterisiert.

- Eine Verringerung der Strukturbreiten führt durch geringere Materialvolumen zu einer erhöhten Anfälligkeit gegen Elektromigration (elektrisch-chemisch). Zudem wirken höhere Feldstärken (elektrisch) und größere Temperaturgradienten (thermisch) ausfallbeschleunigend.
- Ein steigendes Integrationsniveau führt durch höhere Verlustleistungen zu höheren Temperaturen und fördert damit thermisch-mechanisch induzierte Schichtspannungen.
- Die reine Erhöhung von Anschlusszahlen hat hier keinen Einfluss.
- Die erhöhte Komplexität elektronischer Schaltungen erhöht die Anfälligkeit für thermisch-mechanisch induzierte Schichtspannungen (beispielsweise durch eine höhere Materialvielfalt).
- Neue Belastungsarten haben hier keinen Einfluss.
- Ein größerer Leistungsumsatz pro Flächeneinheit fördert durch höhere Temperaturen thermisch-mechanisch induzierte Schichtspannungen.
- Verkleinerte, gewichtsreduzierte Bauelemente haben hier keinen Einfluss.
- Die Veränderung der Verbindungstechnik von THT zu Area Array begünstigt ebenfalls thermisch-mechanische Ausfälle aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Bauelement.

Aufgabe 4.4

Wo treten durch rein elektrische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen hauptsächlich auf?

a) vor der 1. Verbindungsebene ■

b) zwischen der 1. und 2. Verbindungsebene □

c) zwischen der 2. und 3. Verbindungsebene □

d) nach der 3. Verbindungsebene □

Erläuterung:
Durch rein elektrische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen (Dielektrikumsdurchschlag (EOS, ESD, zeitabhängig), ionische Verunreinigung, heiße Elektronen) treten überwiegend vor der 1. Verbindungsebene (Wafer-Ebene) auf.

Aufgabe 4.5

Wo treten durch thermische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen hauptsächlich auf?

a) vor der 1. Verbindungsebene ■

b) zwischen der 1. und 2. Verbindungsebene ■

c) zwischen der 2. und 3. Verbindungsebene ■

d) nach der 3. Verbindungsebene ■

Erläuterung:
Durch thermische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen (Gefügevergröberung) treten in allen Verbindungsebenen auf.

Aufgabe 4.6

Wo treten durch rein mechanische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen hauptsächlich auf?

a) vor der 1. Verbindungsebene ☐

b) zwischen der 1. und 2. Verbindungsebene ☐

c) zwischen der 2. und 3. Verbindungsebene ■

d) nach der 3. Verbindungsebene ■

Erläuterung:
Durch rein mechanische Triebkräfte hervorgerufene Ausfallmechanismen (Stoß, Vibration, Biegung) treten überwiegend ab der 2. Verbindungsebene (Baugruppen auf Keramikträger, flexibler Polymerfolie oder Leiterplatte) bzw. 3. Verbindungsebene (Baugruppenträger) auf.

Aufgabe 4.7

Welche Ausfallmechanismen unterliegen einer elektrisch-chemischen Triebkraft?

a) Ionische Verunreinigung ☐

b) Elektrolytische Migration ■

c) Korrosion ☐

d) Feuchtigkeitsmigration ☐

e) Gefügevergröberung ☐

f) Schichtspannungen ☐

g) Vibration ☐

h) Biegung ☐

Erläuterung:
Die Ausfallmechanismen der elektrolytischen Migration sowie CFF (Conductive Filament Formation) unterliegen einer elektrisch-chemischen Triebkraft.

Aufgabe 4.8

Welche Ausfallmechanismen unterliegen einer thermisch-chemischen Triebkraft?

a) Ionische Verunreinigung ☐
b) Elektrolytische Migration ☐
c) Korrosion ☐
d) Feuchtigkeitsmigration ■
e) Gefügevergröberung ☐
f) Schichtspannungen ☐
g) Vibration ☐
h) Biegung ☐

Erläuterung:
Der Ausfallmechanismus der Feuchtigkeitsmigration unterliegt einer thermisch-chemischen Triebkraft.

Aufgabe 4.9

Welche Ausfallmechanismen unterliegen einer rein mechanischen Triebkraft?

a) Ionische Verunreinigung ☐
b) Elektrolytische Migration ☐
c) Korrosion ☐
d) Feuchtigkeitsmigration ☐
e) Gefügevergröberung ☐
f) Schichtspannungen ☐
g) Vibration ■
h) Biegung ■

Erläuterung:
Die Ausfallmechanismen Stoß, Vibration und Biegung unterliegen einer rein mechanischen Triebkraft.

Aufgabe 4.10

Berechnen Sie, wie lange ein Reihensystem von vier gleichen Bauelementen mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,7 ausfallfrei arbeitet!

Gehen Sie dabei von einer Ausfallrate von $\lambda = 10^{-3}\ h^{-1}$ aus.

Lösung:

Für die Ausfallrate einer Serienschaltung von n gleichen Bauelementen gilt:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 4\lambda$$

Somit ergibt sich hier:

$$\lambda_S = 4\lambda = 4 \bullet 10^{-3} h^{-1}$$

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit gilt:

$$R_S(t) = e^{-\lambda_S t}$$

Laut Aufgabenstellung soll berechnet werden, wie lange das gegebene System mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,7 ausfallfrei arbeitet:

$$R_S(t) = e^{-\lambda_S t} = 0{,}7$$

$$\Leftrightarrow \ln\left(e^{-\lambda_S t}\right) = \ln(0{,}7)$$

$$\Leftrightarrow -\lambda_S t = \ln(0{,}7)$$

$$\Leftrightarrow t = -\frac{\ln(0{,}7)}{\lambda_S} = -\frac{\ln(0{,}7)}{4 \bullet 10^{-3} h^{-1}} \approx -\frac{-0{,}3567}{4 \bullet 10^{-3} h^{-1}} \approx 89{,}2\ h$$

Aufgabe 4.11

Eine Parallelschaltung von n identischen Geräten soll eine Überlebenswahrscheinlichkeit von (mindestens) 98 % besitzen. Berechnen Sie n, wenn die mittlere Lebensdauer bis zu 300 h beträgt! Die Ausfallrate der einzelnen Bauteile beträgt $\lambda = 10^{-3}\ h^{-1}$.

Lösung:

Für die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Parallelschaltung von n identischen Geräten gilt:

$$F_S(t) = \prod_{i=1}^{n} F_i(t) = [F(t)]^n = [1 - e^{-\lambda t}]^n$$

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit gilt:

$$R_S(t) = 1 - F_S(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^n$$

Laut Aufgabenstellung soll berechnet werden, wie viele identische Geräte parallelgeschaltet werden müssen, um eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 98 % zu erreichen:

$$R_S(t) = 1 - F_S(t) = 1 - \left[1 - e^{-\lambda t}\right]^n \geq 0{,}98$$

$$\Leftrightarrow \left[1 - e^{-\lambda t}\right]^n \leq 0{,}02$$

$$\Leftrightarrow ln\left(\left[1 - e^{-\lambda t}\right]^n\right) \leq \ln(0{,}02)$$

$$\Leftrightarrow n \bullet \ln\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \leq \ln(0{,}02)$$

$$\Leftrightarrow n \geq \frac{\ln(0{,}02)}{\ln(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{\ln(0{,}02)}{\ln\left(1 - e^{-10^{-3}h^{-1} \bullet 300\ h}\right)} = \frac{\ln(0{,}02)}{\ln(1 - e^{-0{,}3})}$$

$$\approx \frac{\ln(0{,}02)}{\ln(1 - 0{,}74)} = \frac{\ln(0{,}02)}{\ln(0{,}26)} \approx \frac{-3{,}91}{-1{,}35} \approx 2{,}90$$

Es werden also 3 identische Geräte benötigt, um die geforderte Überlebenswahrscheinlichkeit von (mindestens) 98 % zu erreichen.

Aufgabe 4.12

500 Bauelemente eines bestimmten Typs werden in einem Lebensdauerversuch getestet. Es ist bekannt, dass die Lebensdauer dieser Elemente exponentialverteilt ist. Nach $1000\,h$ sind 5 Bauelemente ausgefallen. Wie viele Bauelemente werden $25000\,h$ überleben?
Die Ausfallrate beträgt $\lambda = 1{,}1 \bullet 10^{-5}\,h^{-1}$.

Lösung:

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t gilt bei einer exponentialverteilten Lebensdauer:

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

Für $t = 25000\,h$ folgt:

$$R(t = 25000\,h) = e^{-1{,}1 \bullet 10^{-5} h^{-1} \bullet 25000\,h} = e^{-0{,}275} \approx 0{,}7596$$

Die Anzahl der zu diesem Zeitpunkt noch funktionsfähigen Teile berechnet sich wie folgt:

$$N(t = 25000\,h) = N \bullet R(t = 25000\,h) = 500 \bullet 0{,}7596 = 379{,}8$$

Nach $25000\,h$ leben also noch 380 Teile.

Aufgabe 4.13

a) Berechnen Sie die Zuverlässigkeit $R(t_1)$ und die Ausfallrate $\lambda(t_1)$ eines Produktes in der Frühausfallphase für $\beta = 0{,}5$ und $\tau = 10^4\,h$ zum Zeitpunkt $t_1 = 100\,h$!
b) Nach $t_2 = 200\,h$ ist die Frühausfallphase abgeschlossen. Dabei ist die Ausfallrate $\lambda(t_2 = 200\,h)$ gegenüber $\lambda(t_1)$ um 30 % gesunken. Berechnen Sie die Zuverlässigkeit $R(t_3)$ für $t_3 = 500\,h$!

Lösung:

a) Die Frühausfallphase unterliegt einer Weibull-Verteilung. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ zum Zeitpunkt t gilt:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta}} \qquad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta}}$$

τ heißt Skalenparameter und gibt an, zu welchem Zeitpunkt ca. 63,2 % der betrachteten Elemente ausgefallen sind. Er ist der Kehrwert der charakteristischen Lebensdauer T.
β heißt Formparameter und ist ein Maß für die Steilheit der Verteilung.

Die Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt $t_1 = 100\,h$ kann dann mit $\beta = 0{,}5$ und $\tau = 10^4\,h$ wie folgt berechnet werden:

$$R(t_1) = e^{-\left(\frac{t_1}{\tau}\right)^{\beta}} = e^{-\left(\frac{100\,h}{10^4\,h}\right)^{0{,}5}} = e^{-0{,}01^{0{,}5}} = e^{-0{,}1} \approx 0{,}9048$$

Für die Ausfallrate $\lambda(t_1)$ gilt:

$$\lambda(t_1) = \frac{\beta}{\tau}\left(\frac{t_1}{\tau}\right)^{\beta-1} = \frac{0{,}5}{10^4\ h}\left(\frac{100\ h}{10^4\ h}\right)^{0{,}5-1} = 5 \bullet 10^{-5}\ h^{-1}\left(\frac{1}{100}\right)^{-0{,}5}$$

$$= 5 \bullet 10^{-5}\ h^{-1}\sqrt{100} = 5 \bullet 10^{-5}\ h^{-1} \bullet 10 = 5 \bullet 10^{-4}\ h^{-1}$$

b) Auf die Frühausfallphase folgt die Zufallsphase. Diese ist durch eine konstante Ausfallrate gekennzeichnet. Diese beträgt laut Aufgabenstellung $70\,\%$ der Ausfallrate der Frühausfallphase:

$$\lambda(t_3) = \lambda(t_2 = 200\ h) = 0{,}7 \bullet \lambda(t_1) = 0{,}7 \bullet 5 \bullet 10^{-4}\ h^{-1} = 3{,}5 \bullet 10^{-4}\ h^{-1}$$

Um die Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt $t_3 = 500\ h$ nach Versuchsbeginn berechnen zu können, muss zunächst die Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t_2 = 200\ h$ (also dem Ende der Frühausfallphase) berechnet werden. Danach muss die Überlebenswahrscheinlichkeit nach weiteren $\Delta t = 300\ h = t_3 - t_2$ berechnet werden, da die Verteilung ab dann einer Exponentialverteilung folgt. Anschließend müssen die so erhaltenen Wahrscheinlichkeiten miteinander multipliziert werden.

Am Ende der Frühausfallphase gilt:

$$R(t_2 = 200\ h) = e^{-\left(\frac{t_2}{\tau}\right)^{\beta}} = e^{-\left(\frac{200\ h}{10^4\ h}\right)^{0{,}5}} = e^{-0{,}02^{0{,}5}} \approx e^{-0{,}1414} \approx 0{,}8681$$

Für die nächsten $300\ h$ muss die Formel der Exponentialverteilung genutzt werden:

$$R(\Delta t = 300\ h) = e^{-\lambda(t_3)\Delta t} = e^{-3{,}5 \bullet 10^{-4}\ h \bullet 300\ h} = e^{-0{,}105} \approx 0{,}9003$$

Damit folgt für die Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t_3 = 500\ h$:

$$R(t_3) = R(t_2) \bullet R(\Delta t) = 0{,}8681 \bullet 0{,}9003 \approx 0{,}7816$$

Aufgabe 4.14
Ein elektronisches Gerät besteht aus:

Anzahl und Art der Bauteile	$\boldsymbol{\lambda}\ [\boldsymbol{h^{-1}}]$
14 Transistoren	$0{,}30 \bullet 10^{-5}$
4 Si-Gleichrichtern	$0{,}50 \bullet 10^{-5}$
56 Kondensatoren	$0{,}14 \bullet 10^{-5}$
168 Widerstände	$0{,}05 \bullet 10^{-5}$
1 Transformator	$0{,}30 \bullet 10^{-5}$
2 Transformatoren	$0{,}20 \bullet 10^{-5}$
6 Drosseln	$0{,}10 \bullet 10^{-5}$
3 Spulen	$0{,}05 \bullet 10^{-5}$

Ermitteln Sie die Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit des Erzeugnisses im Zeitraum bis $t_1 = 260\ h$ und die mittlere Zeit der ausfallfreien Arbeit $\overline{T_S}$!

Lösung:
Für die Ausfallrate in einem solchen elektronischen Gerät bzw. System gilt allgemein:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{m} n_i \lambda_i$$

Hier:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{8} n_i \lambda_i$$

$$= (14 \bullet 0{,}30 + 4 \bullet 0{,}50 + 56 \bullet 0{,}14 + 168 \bullet 0{,}05 + 1 \bullet 0{,}30 + 2 \bullet 0{,}20 + 6 \bullet 0{,}10 + 3 \bullet 0{,}05)$$

$$= 23{,}89 \bullet 10^{-5}\ h^{-1}$$

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit folgt:

$$R(t_1 = 260\ h) = e^{-\lambda t_1} = e^{-23{,}89 \bullet 10^{-5} h^{-1} \bullet 260\ h} = e^{-0{,}062114} \approx 0{,}9398$$

Die mittlere Zeit der ausfallfreien Arbeit $\overline{T_S}$ entspricht dem Kehrwert der Ausfallrate:

$$\overline{T_S} = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{23{,}89 \bullet 10^{-5} h^{-1}} \approx 4185{,}85\ h$$

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.

Entfallene bzw. abgewandelte Aufgaben aus früheren Übungen:

Aufgabe 4.1

Erläutern Sie die folgenden Begriffe:

a) Ausfall
b) Ausfallmechanismus

Aufgabe 4.2

Geben Sie Gründe für das Auftreten von Ausfällen in elektronischen Aufbauten an!

Zeigen Sie den Zusammenhang zwischen verschiedenen Typen von Ausfällen und der Elektronikentwicklung auf, und stellen Sie dies zu Ausfallmechanismen im Maschinen- und Flugzeugbau in Beziehung!

Aufgabe 4.3

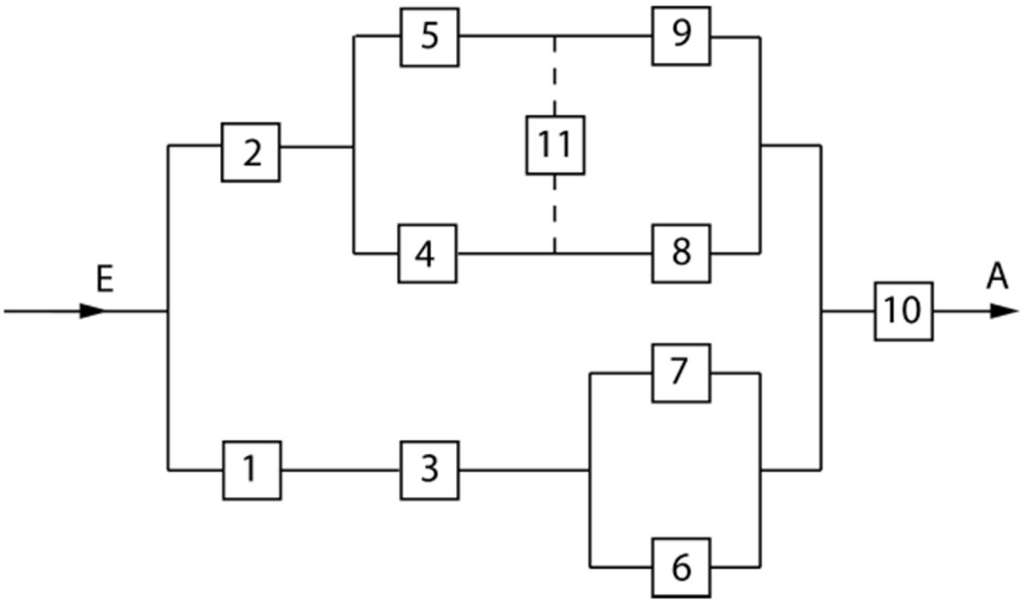
Teilen Sie Ausfallmechanismen nach ihrem Entstehungsort ein!

Aufgabe 4.4

Teilen Sie Ausfallmechanismen in elektronischen Aufbauten nach ihren physikalisch-chemischen Triebkräften ein und nennen Sie jeweils Beispiele!

Aufgabe 4.5

Bestimmen Sie die Zuverlässigkeits- und Ausfallwahrscheinlichkeitsfunktion des Gesamtsystems aus Aufgabe 3.8 mit dem zusätzlichen Element 11.


5
9
2
11
4
8
E
A
10
7
1
3
6