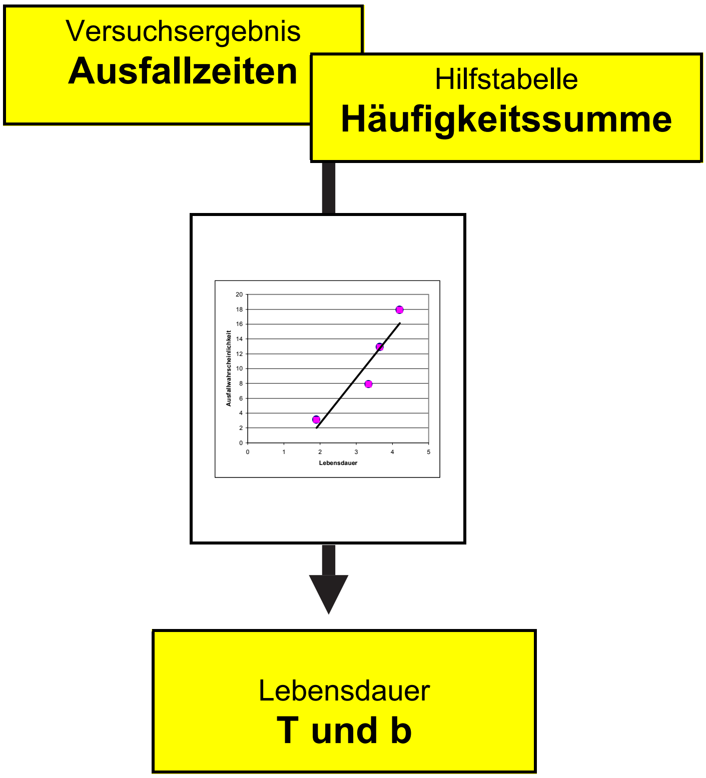
4h. Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Um was geht es?

Die DIN fordert unter Designlenkung eine Überprüfung, ob die geforderte Lebensdauer der Produkte erfüllt wird. Dies geht nur mit Hilfe der Statistik, d.h. mit der Weibull-Verteilung.

Inhalt dieses Abschnitts:



1. Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Weibull-Verteilung

Die Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit wird der Teil der Qualität verstanden, der das Verhalten der Einheiten während einer vorgegebenen Zeitspanne, bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen, betrifft.

Die Lebensdauer

Die Lebensdauer eines Produkts t ist die Zeit bis zum Ausfall (failure). Mit Zeit können konkrete Zeiteinheiten (Stunden, Monate usw.) gemeint sein, die Zeit kann aber auch in Lastwechseln, Schaltvorgänge, Laufleistung usw. angegeben werden.

Der Ausfall

Der Ausfall kann in zwei Arten auftreten, dem

Sprungausfall = plötzlicher Übergang in den funktionsunfähigen Zustand (Reifen platzt ...)
Driftausfall = definiertes Ende z.B. Reifen erreicht 1,6mm Profiltiefe

Begriffe:

Ausfall	failure - Ende der Funktionsfähigkeit
Lebensdauer	TTF - time to failure
Mittlere Lebensdauer	MTTF - mean time to failure (bei nichtinstandsetzbaren Teilen)
	MTBF - mean time between failure (bei instandsetzbaren Teilen)
Mittlere Reparaturdauer	MTTR - mean time to repair
Charakteristische Lebensdauer	T (Lageparameter)
Ausfallsteilheit	b (Formparameter)

Die Weibull-Verteilung

Jegliche Zuverlässigkeitvoraussage kann nur mit Hilfe von geeigneten statistischen Modellen getroffen werden. Das wichtigste statistische Modell ist die Weibull-Verteilung. Je nach dem Parameter b ist die Weibull-Verteilung eine Exponentialverteilung oder eine logarithmische Normalverteilung.

Definitionen:
R(t) = Überlebenswahrscheinlichkeit
R(t) = Anzahl der nach t noch intakten Teile (in%)

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$ **Formel 4h.-1**

G(t) = Ausfallwahrscheinlichkeit
G(t) = Anzahl der nach t ausgefallenen Teile G(t) = 1 - R(t)

λ = Ausfallrate in 1/s
t = Lebensdauer
T = Charakteristische Lebensdauer

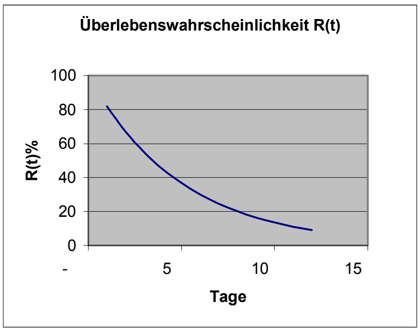


Abbildung 4h.-1 (rechts):
Die Überlebensrate R(t), wenn λ konstant ist

2. Badewannenkurve

Ergebnis von Lebensdauerversuchen:

Der Verlauf der Ausfallrate λ (Badewannenkurve)

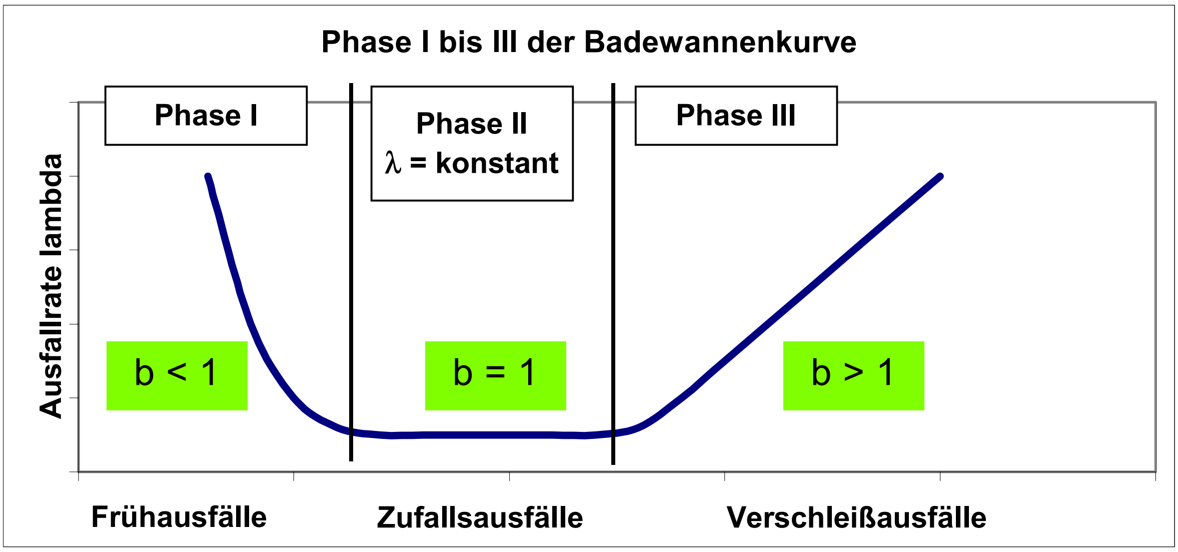


Abbildung 4h.-2: Badewannenkurve

Die Ausfallrate λ verändert sich im Laufe der Lebenszeit vieler Produkte. Der typische Verlauf wird in der sogenannten Badewannenkurve dargestellt.

Es gibt drei Phasen:

<u>Phase I:</u> **<u>Frühausfälle</u>**
Sie kommen durch Produktionsfehler zustande; die Ausfällrate sinkt kurzfristig ab.
Im Lebensdauernetz b < 1
Beispiel:
Weichlötstellen, die mangels Flußmittel "Kaltlötstellen" sind, haben zwar bei der Inbetriebnahme Kontakt(sind im Prüffeld ok), gehen aber nach kurzer Zeit zu Bruch (kein Kontakt).

<u>Phase II:</u> **<u>Zufallsausfälle</u>**
Es findet fast kein Verschleiß statt; die Ausfallrate ist konstant
Im Lebensdauernetz b = 1
Beispiel:
Der Totalausfall eine neuen , eingefahrenen PKW (schrottreif) kommt nur als Folge eines Unfalls (Zufall) vor. Halbleiterbauelemente zeigen in der Regel ein Ausfallverhalten mit b = 1.

<u>Phase III:</u> **<u>Verschleißausfälle</u>**
Es kommt zunehmender Alterungsverschleiß zustande; die Ausfallrate steigt wieder an
Im Lebensdauernetz b > 1
Beispiel:
Zündkerzen, Korrosionsschäden, Verschleiß an Wälzlagern, Verderben von Lebensmitteln und Medikamenten.

3. Exponentialverteilung (Phase II)

Die Exponentialverteilung (Phase II)

Sie erstreckt sich im Zufallsbereich der Badewannenkurve (Phase II). Die Ausfallrate ist konstant und der Formfaktor b = 1.
Hier gilt:

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

Formel 4h.-1

Ausfallrate	$\lambda = 1/T$
Lebensdauer	t
Charakterist.Lebensdauer	T
Mittlere Lebensdauer	t-quer = T = $1/\lambda$ = MTBF = MTTF
Überlebenswahrscheinlichkeit	$R(t) = e^{-\lambda * t}$
Ausfallwahrscheinlichkeit	G(t) = 1 - R(t)
Ausfalldichte	$g(t) = \lambda * R(t)$
Ursprungs-Gesamtheit	N
Zahl der noch intakten Teile	R = N * R(t)
Zahl der defekten Teile	G = N * G(t) = N - R

Die charakteristische Lebensdauer T

Definition:
Die **charakteristische Lebensdauer** T ist die Zeit, bis zu der nur noch R(t) = 36,79% der Teile intakt sind. Die Charakteristische Lebensdauer eines PKW ist erreicht, wenn nur noch 36,79% der Fahrzeuge intakt sind.

Beispiel 1: 500 Bauelemente eines bestimmten Typs werden in einem Lebensdauerversuch getestet. Es ist bekannt, daß die Lebensdauer dieser Bauelemente zufallsabhängig, d.h. exponentialverteilt ist. Nach 1000 h sind 5 Bauelemente ausgefallen.
Wieviele Bauelemente werden 25 000 h überleben?

Die Ausfallquote 5/500 in 1000h kann als Schätzwert für die Ausfallrate verwendet werden.

$$\lambda = \frac{5}{500 \cdot 1000\text{h}} = \underline{\underline{10 \cdot 10^{-6}\ 1/\text{h}}}$$

Wieviele Bauelemente werden 25 000 h überleben?

Lösung zu Beispiel 1:

$$R = N \cdot R(t)$$
$$R = 500 \cdot e^{-10 \cdot 10^{-6} \cdot 25000}$$
$$R = 389 \text{ Teile}$$

4. Weibull-Verteilung (Phase I, II, III)

Die Weibullverteilung (Phase I, II und III)

Sie gilt für alle Bereiche. Sie beschreibt den allgemeinen Fall, bei dem die Ausfallrate nicht konstant ist, sondern mit der Zeit zu- oder abnimmt.

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$$ **Formel 4h.-2**

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}}$$ **Formel 4h.-3**

Ausfallrate	λ (t)
Lebensdauer	t
Charakter. Lebensdauer	T
Überlebenswahrscheinlichkeit	R(t)
Ausfallwahrscheinlichkeit	G(t) = 1 - R(t)
Ausfalldichte	g(t) = λ * R(t)
Ausfallsteilheit	b
Ursprungsgesamtheit	N
Zahl der noch intakten Teile	R = N * R(t)
Zahl der ausgef. Teile	G = N * G(t)

Der Formfaktor b und die Charakteristische Lebensdauer werden im Lebensdauernetz abgelesen.

Lebensdauerversuch

Die Anwendung des Lebensdauernetzes soll an einem einfachen Beispiel dargelegt werden.

1.Ausfall	2.Ausfall	3.Ausfall	4.Ausfall	5.Ausfall	6.Ausfall	
45.000	70.000	95.000	130.000	150.000	200.000	Lastwechsel
10,2%	26,1%	42,1%	57,9%	73,9%	89,8%	H (Ausfallswahrscheinlichkeitssumme aus Tabelle Seite 7)

Tabelle 4h.-1: Ausgefallene Schaltungen

Beispiel 2:

Es geht um den Umwerfer einer Kettenschaltung. 6 Exemplare werden einem Dauerschaltversuch unterzogen, bei dem die jeweilige Schaltung solange betätigt wird, bis sie ausfällt. Die Zeiten (Lastwechselzahlen LW) bis zum Ausfall wurden notiert und sortiert aufgeschrieben. Tabelle 4h.-1 zeigt die sortierte Liste der Lastwechselzahlen, bei denen jeweils die Schaltung zerstört wurde. Besonderheit gegenüber Beispiel 1 ist hierbei, dass λ, T und b unbekannt sind. Es werden 1000 Schaltungen gebaut und ausgeliefert. Wieviele Schaltungen sind nach 26.000 Lastwechseln bereits zerstört ?

Lösung zu Beispiel 2:

1. Skalieren der t-Achse im Lebensdauernetz mit 10^4 (unten links)
2. Hilfstabelle für das Wahrscheinlichkeitsnetz aufschlagen und die zugehörigen Werte der Wahrscheinlichkeitssummen G(t) auch F(t)genannt, in die Tabelle eintragen. (Tab.oben, 2.Zeile)
3. Die 6 Punkte ins Lebensdauernetz eintragen.
4. Ausgleichsgerade durch die Punkte legen.
5. Schätzwert für die Charakteristische Lebensdauer T am Schnittpunkt der T-Linie (G(t) = 63,21%) mit der Ausgleichgerade ablesen.
6. Parallele zur Ausgleichgeraden durch den POL legen. Der Pol wurde aus zeichnerischen Gründen bei t = 30 auf der t-Scala gelegt.
7. In Höhe des Schnittpunktes dieser Parallelen mit dem rechten Rand des Lebensdauernetzes wird die Ausfallsteilheit b abgelesen. b = 2.

Ergebnis: T = 140.000 LW; b = 2.

Es werden 1000 Schaltungen gebaut und ausgeliefert. Wieviele Schaltungen sind nach 26.000 Lastwechseln bereits zerstört ?

$G(t) = 1 - R(t)$
$G(t) = 1 - e^{-(t/T)b}$
$G(t) = 1 - e^{-(26000/140000)2}$
<u>$G(t) = 3{,}39\%$</u>

$$\boxed{R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}}$$

Formel 4h.-3

<u>G = N * G(26.000) = 1000 * 0,0339 = 34 Teile</u>
Ergebnis: Nach 26.000 Lastwechseln sind 34 Schaltungen zerstört. Anders ausgedrückt: Die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt G(t) = 3,39%. Die Mittlere Lebensdauer beträgt etwa 14000 LW.

links:
Abbildung 4h.-3

unten:
Tabelle 4h.-2

5. Aufgabe (Schalter)

Arbeitsübung:
Ein Entwickler von Schaltern muß nach ISO DIN 9001/4.4 "Designlenkung" ein Designverifizierung ausführen, um sicherzustellen, daß das Entwicklungsergebnis die Forderungen aus den Designvorgaben erfüllt. Dazu werden 20 Schalter einer Dauerprüfung unterzogen. Folgende Lebensdauerdaten traten auf. Die Liste (Tabelle 4h.-2) ist sortiert, die Lebensdauer ist in "Anzahl der Betätigungen" angegeben.

Lebensdauer	Wahrscheinlichkeitssumme aus Tabelle Seite 7
$1{,}90 * 10^5$	
$3{,}34 * 10^5$	
$3{,}65 * 10^5$	
$4{,}20 * 10^5$	
$5{,}72 * 10^5$	
$5{,}89 * 10^5$	
$6{,}10 * 10^5$	
$6{,}62 * 10^5$	
$7{,}92 * 10^5$	
$8{,}40 * 10^5$	
$8{,}50 * 10^5$	
$9{,}00 * 10^5$	
$9{,}60 * 10^5$	
$11{,}02 * 10^5$	
$11{,}95 * 10^5$	
$12{,}40 * 10^5$	
$13{,}03 * 10^5$	
$13{,}42 * 10^5$	
$18{,}07 * 10^5$	
$20{,}63 * 10^5$	

<u>Frage:</u>
Wieviel% der Teile sind nach 2Mill. Lastwechsel noch unzerstört?

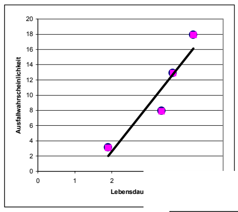
<u>Lösungsansatz:</u>
1. Skalieren der Achse t im Lebensdauernetz
2. Eintragen der Werte aus Tabelle Lebensdauernetz in die Tabelle auf Seite 8
3. Ausgleichsgerade ziehen.
4. T (charakteristische Lebensdauer) ermitteln.
5. Parallele zur Auagleichgeraden durch den Pol (30) ziehen.
6. Den Formfaktor b (Ausfallsteilheit) ermitteln.

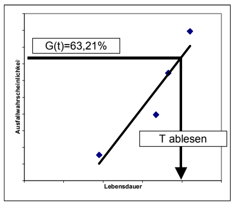
6. Das Prinzip der Weibull-Auswertung mit Hilfstabellen

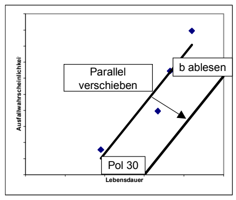
Versuch

Lebensdauerliste
190.000 LW
334.000 LW
365.000 LW
....
....

Liste zur Eintragung der Ausfallwahrscheinlichkeit
3,1%
7,9%
....
.....







Ergebnis: T, b

$R(t) = e^{-(t/T)b}$

x	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	x
1	0,286	0,199	0,152	0,122	0,102	0,089	0,078	0,068	0,062	0,056	0,052	0,048	1
2	0,714	0,500	0,383	0,310	0,261	0,244	0,198	0,176	0,159	0,145	0,131	0,123	2
3		0,801	0,617	0,500	0,421	0,363	0,319	0,284	0,255	0,233	0,215	0,198	3
4			0,849	0,690	0,579	0,500	0,440	0,394	0,352	0,323	0,295	0,274	4
5				0,878	0,739	0,637	0,560	0,500	0,452	0,413	0,378	0,348	5
6					0,898	0,776	0,681	0,606	0,548	0,500	0,460	0,425	6
7						0,912	0,802	0,716	0,648	0,587	0,540	0,500	7
8							0,922	0,824	0,745	0,677	0,622	0,575	8
9								0,932	0,841	0,767	0,705	0,652	9
10									0,938	0,855	0,785	0,726	10
11										0,944	0,869	0,802	11
12											0,949	0,877	12
13												0,953	13

Tabelle 4h.-3: Tabellenwerte stellen die Summenausfallwahrscheinlichkeiten dar und werden in das Lebensdauernetz eingetragen. Hinweis: Bei mehreren Ausfällen je Intervall "überspringt" man die entsprechenden Werte**.**

x	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	x
1	0,045	0,041	0,039	0,037	0,034	0,033	0,031	0,029	0,028	0,027	0,026	0,024	1
2	0,113	0,106	0,100	0,093	0,089	0,084	0,079	0,076	0,072	0,069	0,067	0,064	2
3	0,184	0,171	0,161	0,152	0,142	0,136	0,129	0,123	0,117	0,113	0,107	0,104	3
4	0,255	0,239	0,224	0,209	0,198	0,187	0,179	0,171	0,164	0,156	0,149	0,142	4
5	0,323	0,302	0,284	0,268	0,251	0,239	0,227	0,218	0,206	0,198	0,189	0,181	5
6	0,394	0,367	0,348	0,326	0,309	0,291	0,278	0,264	0,251	0,242	0,233	0,224	6
7	0,464	0,433	0,409	0,382	0,363	0,345	0,326	0,312	0,298	0,284	0,274	0,261	7
8	0,536	0,500	0,468	0,440	0,417	0,397	0,378	0,359	0,341	0,326	0,316	0,302	8
9	0,606	0,567	0,532	0,500	0,472	0,448	0,425	0,405	0,386	0,371	0,356	0,341	9
10	0,677	0,633	0,591	0,560	0,528	0,500	0,476	0,452	0,433	0,413	0,397	0,382	10
11	0,745	0,698	0,652	0,618	0,583	0,552	0,524	0,500	0,476	0,456	0,436	0,421	11
12	0,816	0,761	0,716	0,674	0,637	0,603	0,575	0,548	0,524	0,500	0,480	0,460	12
13	0,887	0,829	0,776	0,732	0,691	0,655	0,622	0,595	0,567	0,544	0,520	0,500	13
14	0,955	0,894	0,839	0,791	0,749	0,709	0,674	0,641	0,614	0,587	0,564	0,540	14
15		0,959	0,900	0,848	0,802	0,761	0,722	0,688	0,659	0,629	0,603	0,579	15
16			0,961	0,907	0,858	0,813	0,773	0,736	0,702	0,674	0,644	0,618	16
17				0,963	0,912	0,864	0,821	0,782	0,749	0,716	0,684	0,659	17
18					0,966	0,916	0,871	0,829	0,794	0,758	0,726	0,698	18
19						0,967	0,921	0,877	0,836	0,802	0,767	0,739	19
20							0,969	0,924	0,883	0,844	0,811	0,776	20
21								0,971	0,928	0,887	0,851	0,819	21
22									0,972	0,931	0,893	0,858	22
23										0,973	0,933	0,896	23
24											0,974	0,936	24
25												0,976	25

1. Lebensdauerliste aus Versuch ordnen
2. Unter der Anzahl der Teile steht jeweils die Summenausfallwahrscheinlichkeit bis Teil 1 , 2, 3, usw.

7. Lebensdauernetz: Wahrscheinlichkeitsnetz für Weibull-Verteilung