Die Weibullverteilung

(Zuverlässigkeits-, Lebensdaueruntersuchungen)

Gliederung:

1. Rückblick: Der Verlauf der Ausfallrate
2. Die Weibullverteilung
    1. Die Weibullverteilung und ihre Darstellung
    2. Dichtefunktionen verschiedener Weibullverteilungen
    3. Parameterschätz-Verfahren
        1. Regressionsmethode
            1. Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate
            2. Ermittlung der Näherungswerte

1. Rückblick: Der Verlauf der Ausfallrate (Badewannenkurve)

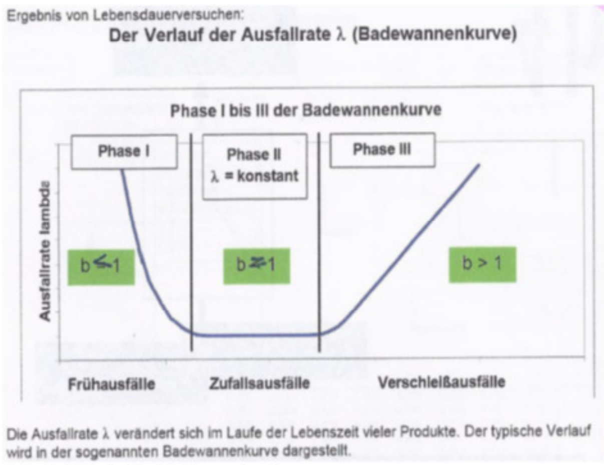


Abbildung 4: Der Verlauf der Ausfallrate (Badewannenkurve)

- Eine typische Ausfallrate, wie sie bei vielen technischen Anwendungen zu sehen ist hat die Form einer „Badewanne“, deshalb nennt man diese Kurve auch „Badewannenkurve“.

-mit der Badewannenkurve lässt sich das Ausfallverhalten in drei Phasen einer Badewannenkurve beschreiben

-der Formparameter b kann dazu genutzt werden, um zu modellieren, ob Früh- oder Spätausfälle häufiger auftreten

-Frühausfälle: (Abnahme bei zunehmender Lebensdauer)

-könne durch Produktionsfehler zustande kommen

-die Ausfallrate nimmt zufällig ab

-Beispiel: Weichlötstellen, die mangels Flussmittel Kaltlötstellen sind, haben zwar bei der Inbetriebnahme Kontakt, gehen aber nach kurzer Zeit zu Bruch (kein Kontakt)

-b<1

-Zufallsausfälle: (konstante Lebensdauer)

-es findet fast kein Verschleiß statt

-die Ausfallrate ist konstant

-Beispiel: der Tatotalausfall eines neuen, eingefahrenen PKW (schrottreif) kommt nur als Folge eines Unfalls (Zufall) vor

-b=1

-Spätausfälle: (Verschleißausfälle)

-Anstieg bei zunehmender Lebensdauer)

-es kommt zunehmender Alterungsverschleiß zustande

-die Ausfallrate steigt wieder an

-Beispiel: Verderben von Lebensmitteln, Verschleiß an Wälzlagern usw.

1. Rückblick:
Die Exponentialverteilung

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

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

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	$G = N * G(t) = N - R$

Abbildung 5: Die Exponentialverteilung

-erstreckt sich im Zufallsbereich

-die Exponentialverteilung hat deshalb eine besondere theoretische Bedeutung, weil sie eine konstante Ausfallrate aufweist

-dies liegt an ihrer Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit

-in der Realität kommt es jedoch häufig zu Ermüdungsausfällen

-ist ein Bauteil lange in betrieb, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es in der nächsten Zeiteinheit ausfällt

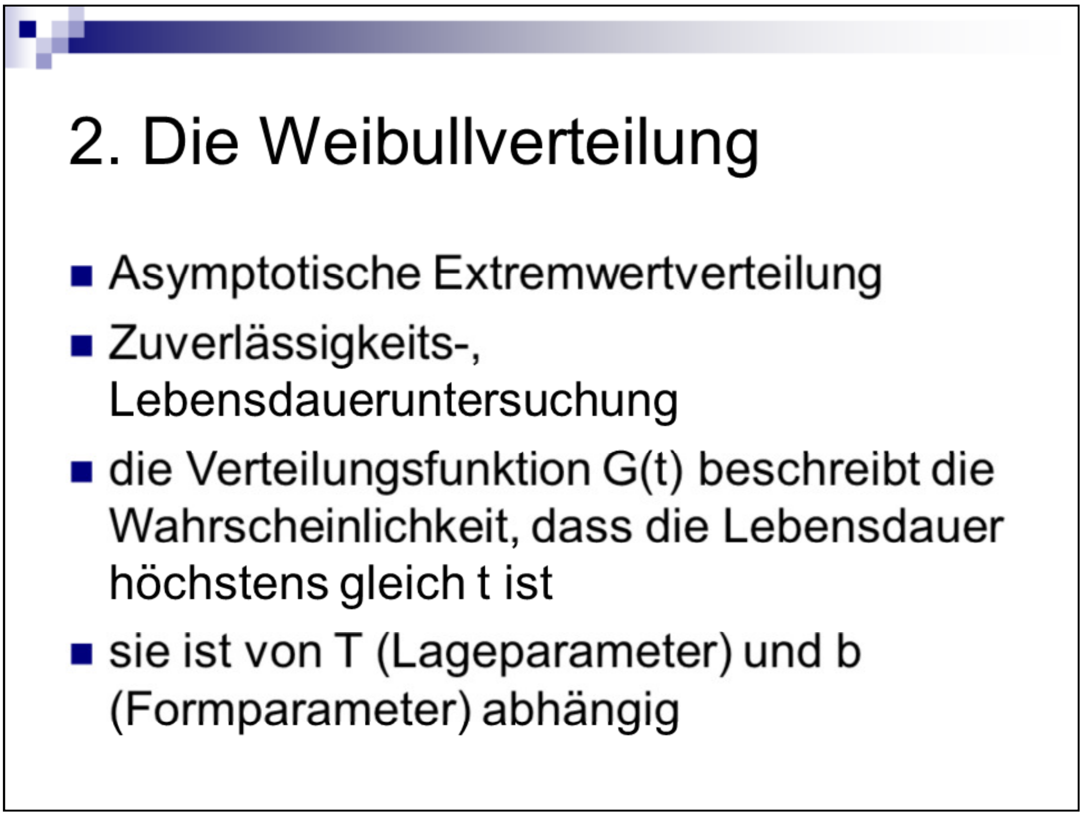
-ein derartiger Sachverhalt kann nicht durch die Exponentialverteilung abgebildet werden

-dasselbe gilt für Frühausfälle

-treten Früh- oder Ermüdungsausfälle auf, kann die Weibullverteilung verwendet werden

-treten gehäuft sowohl früh- als auch Ermüdungsfälle auf, nennt man die Funktion der Ausfallrate Badewannenkurve

-die Badewannenkurve ist keine Weibullverteilung



-während bei einfachen Systemen, z.B. Glühbirnen, Versuche ausreichen, um das Ausfallverhalten zu beobachten, sind z.B. bei Flugzeugen oder Atomkraftwerken umfangreichere Überlegungen notwendig

-aus diesem Grund wurden Methoden entwickelt, um das Ausfallverhalten von komplexen Systemen theoretisch zu betrachten

-denn sie sind als Qualitätsmerkmal für Produzenten und Kunden wichtige Produktmerkmale

-jede Zuverlässigkeitsvoraussage kann nur mit Hilfe von statistischen Modellen getroffen werden

-nach dem Schweden Waloddi Weibull benannt

-Zuverlässigkeits-, Lebensdaueruntersuchung

-W.V. stellt, neben der Exponentialverteilung (welche ein Spezialfall ist), die wichtigste und am häufigsten verwendete Lebensdaueruntersuchung dar

-die Verteilungsfunktion G(t) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Lebensdauer höchstens gleich t ist

-sie ist von T (charakteristische Lebensdauer/ Lageparameter) und b (Ausfalleinheit/ Formparameter) abhängig

2.1 Die Weibullverteilung und ihre Darstellung

Zweiparametrige Weibullverteilung:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}}$$

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

mit:

T: Charakteristische Lebensdauer

b: Formparameter bzw. Ausfallsteilheit

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$$

Abbildung 6: Die Weibullverteilung

- Da oft Aussagen über die Überlebenswahrscheinlichkeit oder Zuverlässigkeit R gemacht werden sollen, wird die Weibullverteilung, wie folgt angegeben
- als Zufallsvariable wird zumeist t statt x benutzt, da Weibullverteilungen sehr häufig im Zusammenhang mit Lebensdauern verwendet werden
- t: Lebens-, Betriebs- oder Einsatzdauer (z.B. auch gefahrene Kilometer)
- T: Lageparameter (wo in etwa die Mitte der Verteilung liegt)
    - in manchen Anwendungen (meist bei zeitabhängigen) wird er durch seinen Kehrwert ersetzt (1/T=lamda)

    - charakteristische Lebensdauer
    - entspricht der zeit, bis zu der ca. 63% aller Objekte ausfallen oder ca. 37% in Funktion bleiben
    - um die W.v. den realen Ausfalldaten anzupassen, kommt es deshalb darauf an, T so zu wählen, dass gemäß des empirischen Datensatzes zu diesem Zeitpunkt auch 63,2% der Teststücke ausfallen
- b: Formparameter/ Ausfalleinheit (stellt ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten dar und bestimmt die Form der Dichtefunktion)

- G(t): Verteilungsfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit
    - Wahrscheinlichkeit bis ein Objekt zur Zeit t ausfällt
    - Anzahl der nach t ausgefallenen Teile (G(t)=1-R(t))
- R(t): Überlebenswahrscheinlichkeit
    - Anzahl der nach t noch intakten Teile (in %)
    - R(t)=1-G(t)

2.1 Die Weibullverteilung und ihre Darstellung

Dichtefunktion:

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}} \qquad \text{für } t, T, b \geq 0$$

Verteilungsfunktion:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}} \qquad \text{für } t, T, b \geq 0$$

Erwartungswert: (mit der Gammafunktion)

$$\mathrm{E}(X) = \frac{1}{\lambda} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

Varianz: (mit der Gammafunktion)

$$\mathrm{Var}(X) = \frac{1}{\lambda^2}\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]$$

2.1 Die Weibullverteilung und ihre Darstellung

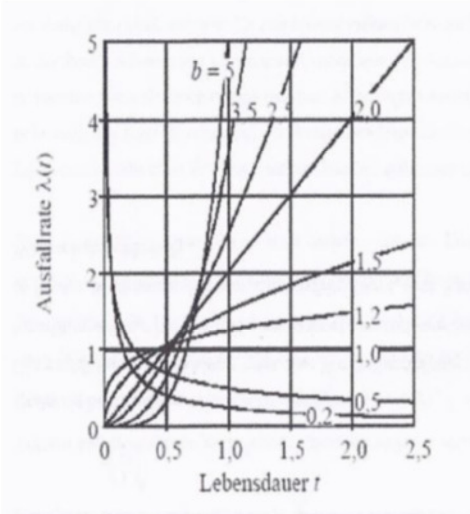


Abbildung: Ausfallrate Weibullverteilung für verschiedene Formparameter (siehe Abbildung 6)

2.1 Die Weibullverteilung und ihre Darstellung

- IFR-Verteilungen
  - steigende Ausfallrate (im Sinne von nicht fallend) > Spätausfälle
  - bedingte Überlebenswahrscheinlichkeit fällt mit zunehmender Zeit
- DFR-Verteilungen
  - fallende Ausfallrate (im Sinne von nicht steigend) > Frühausfälle
  - bedingte Überlebenswahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Zeit

- Man klassifiziert weiterhin die Lebensdauerverteilungen nach ihrer Ausfallrate
- Verteilungen mit wachsender Ausfallrate werden als IFR-Verteilungen (increasing failure rate) bezeichnet
- Dementsprechend werden Verteilungen mit fallender Ausfallrate DFR-Verteilungen (decreasing failure rate) genannt

2.2 Dichtefunktionen verschiedener Weibullverteilungen

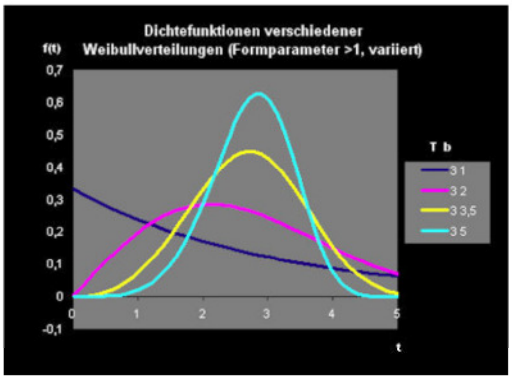


Abbildung 7: Dichtefunktionen verschiedener Weibullverteilungen

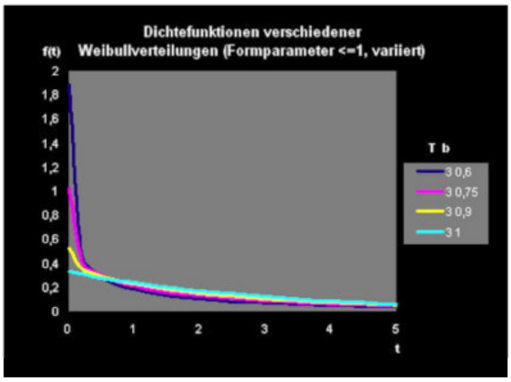
-in den folgenden Grafen sind die Werte für den Formparameter b variiert

-denn je nach Wahl der Parameter kann das gesteigerte Auftreten von Früh- oder Spätausfällen abgebildet werden

-wie man sehen kann erhält man für b=1 eine Exponentialfunktion

-für b=3,5 eine Funktion, die der Normalverteilung sehr ähnlich ist

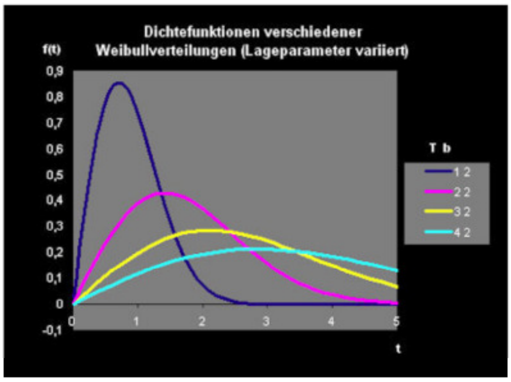
2.2 Dichtefunktionen verschiedener Weibullverteilungen



siehe: Abbildung 7

- hier wurde wieder der Formparameter variiert
- diesmal allerdings sind die Werte kleiner gleich eins

2.2 Dichtefunktionen verschiedener Weibullverteilungen



siehe: Abbildung 7

- hier wurde der Lageparameter variiert
- der Lageparameter kann verwendet werden, um die durchschnittliche Lebensdauer zu verändern

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \left(\frac{t}{T}\right)^b$$

$$\ln(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)) = b \ln\left(\frac{t}{T}\right)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = b(\ln(t) - \ln T)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = b \ln(t) - b \ln T$$

- wie ihr sicher schon erahnt habt, ist das Problem die Schätzung des Parameters b, die Ausfalleinheit
- verschiedene Schätzmethoden liefern unterschiedliche Ergebnisse für die Parameter einer zu schätzenden Verteilung
- die Parameterschätzung ist eine Prozedur, um die Parameter eines vorgegebenen Modells zu bestimmen, um die zugrunde liegenden Daten genaust möglich zu beschreiben
- eine Möglichkeit bildet die Regression
- um diese anwenden zu können, muss die Skalierung so manipuliert werden, dass die Weibullfunktion als Gerade geschätzt werden kann dies führt zu einer doppelt-logarithmischen Abbildung der Zielvariablen (Wahrscheinlichkeit F(t)) und einer einfach-logarithmischen Transformation der unabhängigen Variable (Ausfallzeit t)
- mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsnetzes wird eine lineare Ausgleichsgerade im Sinne der linearen Regression bestimmt und die Parameter anhand der Steigung und des absoluten Gliedes der Kurve bestimmt
- die beste Anpassungslinie ist diejenige, die die geringste Summe an quadratischen Abweichungen liefert

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

Die Gleichung $\ln(-\ln(1-F(t)) = b\ln(t) - b\ln(T)$ kann man analog zur einfachen Geradengleichung

$y_i = bx_i - a$ betrachten:

$$y_i = \ln(-\ln(1-F_i)) \quad i = 1, \dots, n$$
$$x_i = \ln(t_i)$$
$$a = b\ln(T)$$
$$b = b$$

- die Steigung ist der Formparameter b
- der Skalenparameter stellt die charakteristische Lebensdauer dar

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

Nun wird nach der Methode der kleinsten Quadrate

$$Z = \sum_{i=1}^{n} (y_i - (b x_i + a))^2 \xrightarrow[a,b]{} \min$$, nach den Parametern

$b = b$ und den Achsenabschnitt

$a = -b \cdot \ln(T)$ partiell abgeleitet

$$\hat{a} = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{und} \quad \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

- Die Methode der kleinsten Quadrate: besteht darin, die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

kompakt:

$$\hat{a} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(-\ln(1-F_i)) - b \cdot \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(t_i)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Big(\overbrace{\ln(t_i) - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(t_i)}^{x_i - \bar{x}}\Big)\Big(\overbrace{\ln(-\ln(1-F_i)) - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(-\ln(1-F_i))}^{y_i - \bar{y}}\Big)}{\sum_{i=1}^{n} \underbrace{\Big(\ln(t_i) - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(t_i)\Big)^2}_{(x_i - \bar{x})^2}}$$

- die Werte für Fi sind Näherungswerte der kommulierten Ausfallwahrscheinlichkeit i-ten Ausfalls
- die Ausfallzeit ti ist gleich der Ausfallzeit des i-ten Ausfalls

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

Man kann jetzt b aus b bestimmt und dann T berechnen:

$$\ln \hat{T} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(-\ln(1-F_i)) - b\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(t_i)}{-b}$$

$$\hat{T} = e^{\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(-\ln(1-F_i)) - b\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(t_i)}{-b}}$$

$$\hat{T} = e^{-\frac{\overline{Y} - b \cdot \overline{X}}{b}}$$

Mit diesen beiden Parametern kann man die Funktion

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}}$$

eindeutig beschreiben.

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

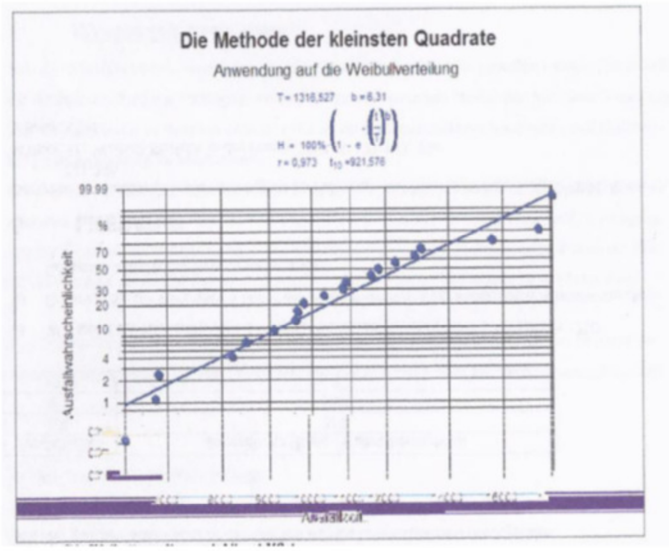


Abbildung 8: Die Weibullverteilung mit Visual Xsel

- die nachfolgende Abbildung zeigt eine Weibullverteilung in einem Wahrscheinlichkeitsnetz mit einer logarithmischen Abszisse und einer doppelt-logarithmischen Ordinate, sowie die Punkte (ti, Fi)
- diese Punkte bestimmen sich aus den Ausfallzeiten t, dem Rang der Ausfallzeiten i und der angenäherten Wahrscheinlichkeit Fi

2.3.2 Regression:

Ermittlung der Näherungswerte Fi

- Werte der Größe nach ordnen:
- die geordneten Werte als Rangrößen bezeichnen (der Index i steht für die Rangzahl)

- da die Ausfallzeiten dem Ergebnis einer Untersuchung vom Umfang n entsprechen und zunächst nur sie vorhanden sind, müssen die Ausfallwahrscheinlichkeiten in einem ersten Schritt geschätzt werden
- in der Praxis können aus Lebensdauerversuchen und Schadenstatistiken nur die Ausfallzeiten der untersuchten Bauteile entnommen werden
- allerdings werden zur Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz noch die Ausfallwahrscheinlichkeiten benötigt
- deshalb wird jedem Ausfall eine bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) zugeordnet
- dafür geht man folgendermaßen vor:

2.3.2 Regression:

Ermittlung der Näherungswerte Fi

i	Ausfallzeit [h]
1	630
2	680
3	685
4	820
5	850
6	910
7	960
8	965
9	980
10	1030

i	Ausfallzeit [h]
11	1080
12	1090
13	1160
14	1180
15	1230
16	1290
17	1310
18	1560
19	1750
20	1810

Abbildung 8b: Ausfallzeiten eines Bauteiles aufsteigend sortiert (siehe Abbildung 8)

- ist das erste Bauteil der Stichprobe ausgefallen, so ist 1/20 der Stichprobe ausgefallen usw.
- in einer Annäherung erhält man eine Schätzung der Ausfallwahrscheinlichkeiten

- als Beispiel dient ein Unternehmen, welches Bauteile für den Maschinenbau herstellt
- das Unternehmen möchte die Ausfallzeiten einer neuen Baureihe ermitteln
- zu diesem Zweck wird eine Stichprobe vom Umfang n=20 aus einer laufenden Produktion entnommen und auf einem Prüfstand belastet
- für jedes Bauteil ergeben sich durch die Belastung unterschiedliche Ausfallzeiten, die aufsteigend sortiert ein eine Tabelle eingetragen werden

2.3.2 Regression:

Ermittlung der Näherungswerte Fi

- Näherungsformel für die Ausfallwahrscheinlichkeiten

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i}{n} = F_i$$

$$F_1 = \frac{1}{20} = 5\%$$

$$F_2 = \frac{2}{20} = 10\%$$

$$F_3 = \frac{3}{20} = 15\% \text{ usw.}$$

- eine Messreihe, bestehend aus n Messungen, kann m mal wiederholt werden
- dabei ergeben sich für jede Stichprobe jeweils andere Ausfallzeiten
- die Ranggrößen können deshalb als Zufallsvariablen betrachtet werden
- unter der Prämisse, dass diese Ausfallzeiten weibullverteilt sind, ergibt sich für praktische Anwedung mit Stichprobenumfängen $n<50$ die folgende Näherungsformel für die Ausfallwahrscheinlichkeiten

2.3.1 Parameterschätzverfahren: Regression

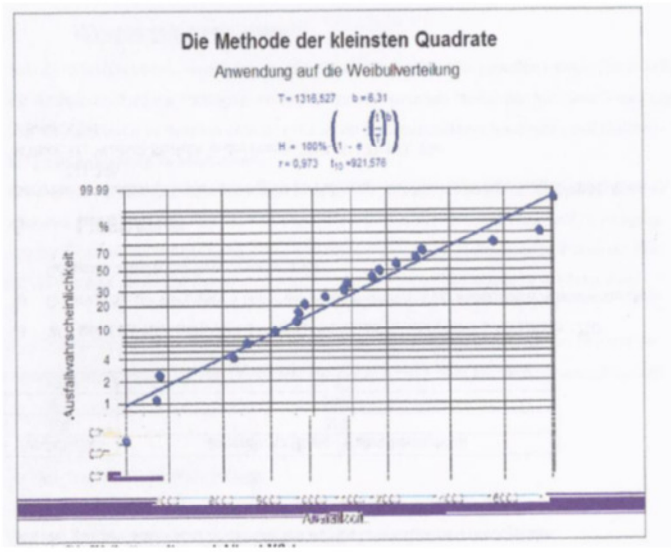


Abbildung 8: Die Weibullverteilung mit Visual Xsel

- die nachfolgende Abbildung zeigt eine Weibullverteilung in einem Wahrscheinlichkeitsnetz mit einer logarithmischen Abszisse und einer doppelt-logarithmischen Ordinate, sowie die Punkte (ti, Fi)
- diese Punkte bestimmen sich aus den Ausfallzeiten t, dem Rang der Ausfallzeiten i und der angenäherten Wahrscheinlichkeit Fi

Szenario

Die Zuverlässigkeitsprüfung für einen neuen Typ H7-Halogenscheinwerferlampe ergab folgende klassierte Daten:

	A	B	C	D	E
1	**Lebensdauer neue H7-Scheinwerferlampe**				
2					
3	Zeitraum in h	Klassen-Nr.:	Ausfallhäufigkeit absolut	Ausfallhäufigkeit relativ (%)	Ausfallhäufigkeit relativ, summiert (%)
4	0 - 200	1	4	2,0	
5	200 - 400	2	8	4,0	6,0
6	400 - 600	3	15	7,5	13,5
7	600 - 800	4	27	13,5	27,0
8	800 - 1000	5	33	16,5	43,5
9	1000 - 1200	6	40	20,0	63,5
10	1200 - 1400	7	28	14,0	77,5
11	1400 - 1600	8	17	8,5	86,0
12	1600 - 1800	9	11	5,5	91,5
13	1800 - 2000	10	6	3,0	94,5
14	2000 - 2200	11	5	2,5	97,0
15	2200 - 2400	12	2	1,0	98,0
16	2400 - 2600	13	2	1,0	99,0
17	2600 - 2800	14	1	0,5	99,5
18	2800 - 3000	15	1	0,5	100,0
19		Anzahl	200	100,0	

Abbildung 1: Lebensdauer neue H7 - Scheinwerferlampe

- die Zuverlässigkeitsprüfung für einen neuen Typ H7 – Halogenscheinwerferlampe ergab folgende klassifizierte Daten

Szenario

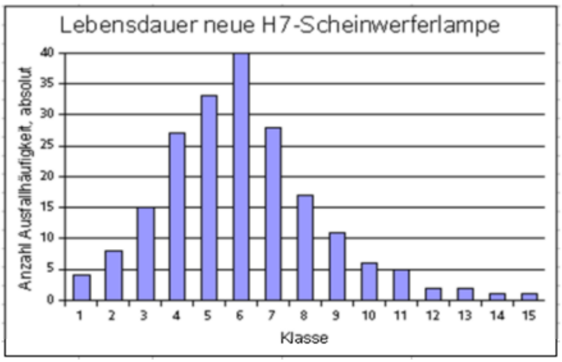


Abbildung 2: Anzahl Ausfallhäufigkeit absolut

- bevor das Szenario fortgesetzt wird, ist nun der Punkt erreicht, wo wir endlich zur Weibullfunktion kommen

Szenario

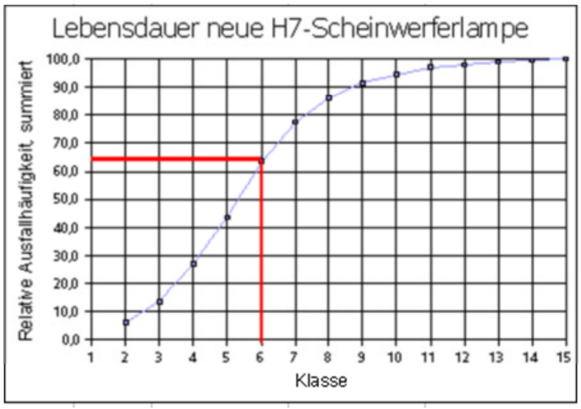


Abbildung 9: Relative Ausfallhäufigkeit

- im folgenden wird von einem b-Wert=1,8 ausgegangen
- der Parameter T, die charakteristische Lebensdauer, kann aus obiger Tabelle hingegen direkt geschätzt werden

Szenario

Zeitraum in h	Klassen-Nr.:	Ausfallhäufigkeit absolut	Ausfallhäufigkeit relativ (%)	Ausfallhäufigkeit relativ, summiert (%)	Zeitraum in h Klassenmitte	Überlebens-wahrscheinlichkeit relativ
0 – 200	1	4	2,0			
200 - 400	2	8	4,0	6,0	300	94,0
400 - 600	3	15	7,5	13,5	500	86,5
600 - 800	4	27	13,5	27,0	700	73,0
800 - 1000	5	33	16,5	43,5	900	56,5
1000 - 1200	6	40	20,0	63,5	1100	36,5
1200 - 1400	7	28	14,0	77,5	1300	22,5
1400 - 1600	8	17	8,5	86,0	1500	14,0
1600 - 1800	9	11	5,5	91,5	1700	8,5
1800 - 2000	10	6	3,0	94,5	1900	5,5
2000 - 2200	11	5	2,5	97,0	2100	3,0
2200 - 2400	12	2	1,0	98,0	2300	2,0
2400 - 2600	13	2	1,0	99,0	2500	1,0
2600 - 2800	14	1	0,5	99,5	2700	0,5
2800 - 3000	15	1	0,5	100,0	2900	0,0
	Anzahl:	200	100,0			

Abbildung 9a: Lebensdauer neue H7-Scheinwerferlampe (siehe Abb. 9)

- in der Tabelle der klassierten Daten entspricht die Klasse 6 einer relativen Ausfallhäufigkeit von 63,5% und die Klassenmitte beträgt 1100h
- der Parameter T wird mit 1100h angenommen
- die Ermittlung des Parameters T, bzw. dessen Klasse, kann auch über die Quantilberechnung erfolgen (http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Weibull/basis-lexikon-weibull.html)

Szenario

Lebensdauer neue H7-Scheinwerferlampe

Zeitraum in h	Klassen-Nr.:	Ausfallhäufigkeit absolut	Ausfallhäufigkeit relativ (%)	Ausfallhäufigkeit relativ, summiert (%)	Zeitraum in h Klassenmitte	Überlebens-wahrscheinlichkeit relativ	Ausfallhäufigkeit absolut, summiert	
0 – 200	1	4	2,0				4	
200 - 400	2	8	4,0	6,0	300	94,0	12	
400 - 600	3	15	7,5	13,5	500	86,5	27	
600 - 800	4	27	13,5	27,0	700	73,0	54	
800 - 1000	5	33	16,5	43,5	900	56,5	87	
1000 - 1200	6	40	20,0	63,5	1100	36,5	127	$\doteq Q_{0,63}$
1200 - 1400	7	28	14,0	77,5	1300	22,5	155	
1400 - 1600	8	17	8,5	86,0	1500	14,0	172	
1600 - 1800	9	11	5,5	91,5	1700	8,5	183	
1800 - 2000	10	6	3,0	94,5	1900	5,5	189	
2000 - 2200	11	5	2,5	97,0	2100	3,0	194	
2200 - 2400	12	2	1,0	98,0	2300	2,0	196	
2400 - 2600	13	2	1,0	99,0	2500	1,0	198	
2600 - 2800	14	1	0,5	99,5	2700	0,5	199	
2800 - 3000	15	1	0,5	100,0	2900	0,0	200	

Abbildung 9b: Lebensdauer neue H7-Scheinwerferlampe (siehe Abb. 9)

Szenario

er neue H7-Scheinwerferlampe

F	G	H	I	J
Zeitraum in h Klassenmitte	Überlebens-wahrscheinlichkeit relativ	Überlebens-wahrscheinlichkeit relativ Berechnet mit b=1,8	Δ (G/100) – H:	Δ(100%)
300	94,0	0,9081	0,032	3,19
500	86,5	0,7851	0,080	7,99
700	73,0	0,6419	0,088	8,81
900	56,5	0,4982	0,067	6,68
1100	36,5	0,3679	-0,003	-0,29
1300	22,5	0,2590	-0,034	-3,4
1500	14,0	0,1742	-0,034	-3,42
1700	8,5	0,1120	-0,027	-2,7
1900	5,5	0,0689	-0,014	-1,39
2100	3,0	0,0407	-0,011	-1,07
2300	2,0	0,0230	-0,003	-0,3
2500	1,0	0,0125	-0,002	-0,25
2700	0,5	0,0065	-0,002	-0,15
2900	0,0	0,0033	-0,003	-0,33
		Summen Abweichung:	0,13	13,38

Abbildung 9c: Lebensdauer neue H7-Scheinwerferlampe (siehe Abb. 9)

- da nun die Parameter b und T geschätzt wurden, sollte die Validierung der Schätzung erfolgen
- in den Zellen der Spalte H ist obige Formel der Überlebenswahrscheinlichkeit R(t) hinterlegt und die Abweichung der Ergebnisse sind in der Spalte I absolut und in der Spalte J relativ dargestellt

Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis: