

6. Zuverlässigkeit im Gerätebau



6.1 Einführung

Einführung

Zuverlässigkeit kennzeichnet die **Wahrscheinlichkeit** dafür, dass ein technisches System innerhalb vorgegebener Grenzen/Einsatzbedingungen und während einer bestimmten Zeitdauer den durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen genügt und nicht ausfällt.

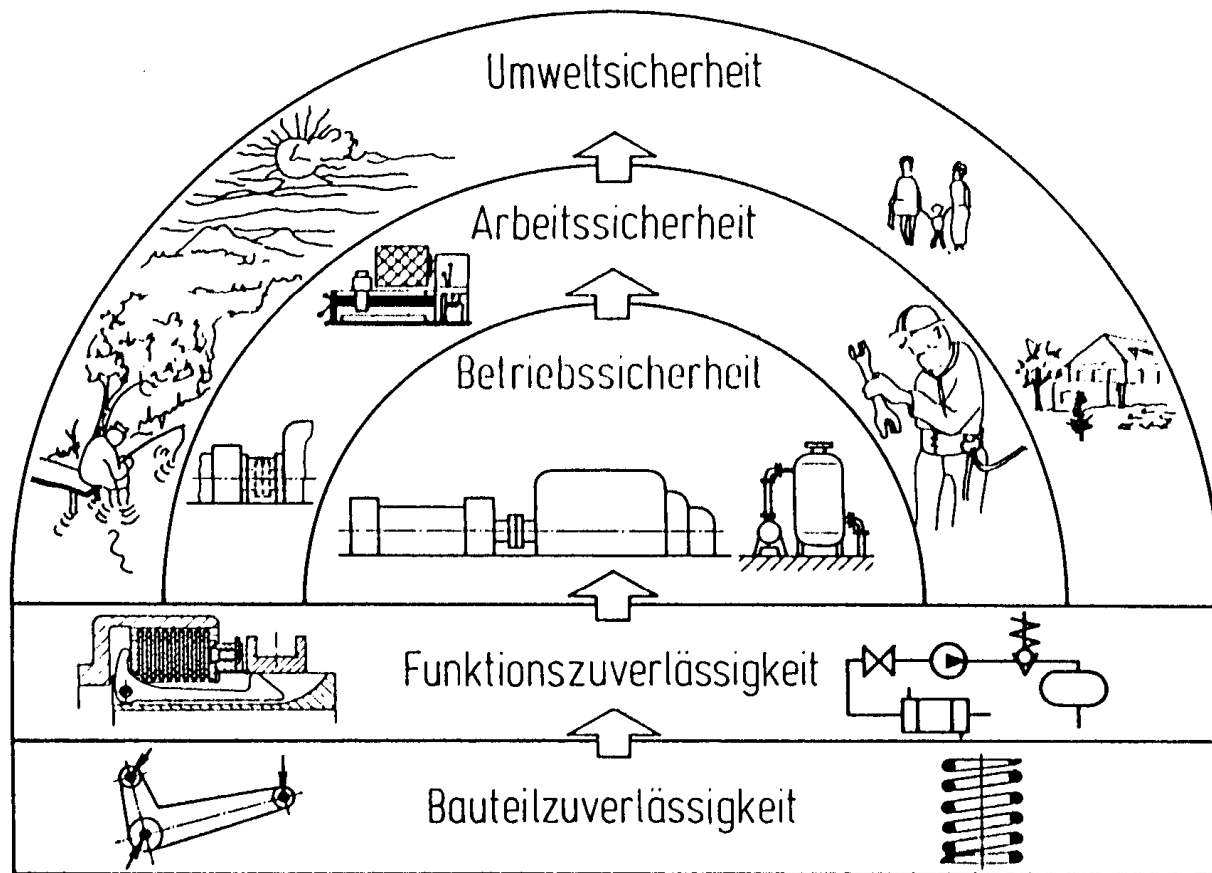
Zuverlässigkeit ist somit gebunden an:

- festgelegte Betriebs- und Umweltbedingungen, innere und äußere Arbeitsbedingungen (B)
- festgelegte Beanspruchungsgrenzen (B)
- ein bereits vorhandenes Lebensalter (T)
- eine bestimmte Betriebsdauer (t)
- das festgelegte Ausfallkriterium (A)

Zuverlässigkeit $R = R(t, T, B, A)$

Tangierende Begriffe

Sicherheit: Vergleiche Abschnitt 5. Sichere Geräte erfordern häufig zuverlässige Funktionen, insbesondere sicherheitsrelevante Funktionen. Ein zuverlässiges Gerät muss aber nicht sicher sein.



Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Sicherheit, aus /3/

Tangierende Begriffe

- Genauigkeit:** Erreichen und Beibehalten der geforderten Funktionsparameter innerhalb zulässiger Abweichungen, kennzeichnet Ausgangszustand (Qualität) und Zustandsveränderung.
- Güte:** Kennzeichnet die Qualität und die Zuverlässigkeit als Gesamtfunktion für das Gerät.
- Qualität:** Gesamtumfang der Parameter zur Beschaffenheit zum Zeitpunkt der Fertigstellung und damit Gesamtheit der Merkmale um bestimmte Erfordernisse zu erfüllen.
- Verfügbarkeit:** Verfügbarkeit kennzeichnet das Verhältnis zwischen der Zeitdauer, die ein System ordnungsgemäß nutzbar ist und der Gesamtzeit/Kalenderzeit. Hier gehen Ausfälle und Stillstandszeiten durch Reparaturen mit ein.

6.2 Kennziffern und Charakterisierung der Zuverlässigkeit

Kennziffern und Charakterisierung der Zuverlässigkeit

Der Begriff des **Ausfalls**:

Ein **Ausfall** kennzeichnet ein Ereignis, nach dem ein Gerät/System seine vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllen kann und durch einen nicht vorgesehenen äußeren Eingriff wieder hergestellt werden muss.

Beispiele eines Ausfalls am PKW:

- Ausfall des Motors
- Ausfall des Motorsteuergerätes oder anderer funktionswichtiger Steuergeräte
- Ausfall eines Bremskreises (Achtung: Differenzierung zwischen Totalausfall und Teilausfall innerhalb einer Zweikreisbremsanlage)
- Ausfall eines Bremslichtes (von drei Bremslichtern).

Keine Ausfälle sind:

- planmäßige Wartung in der Werkstatt
- planmäßiger Wechsel von Zündkerzen
- planmäßiger Zahnriemenwechsel
- planmäßiger Batteriewechsel einer Armbanduhr oder anderen elektromechanischen Geräte
- Druckkopfreinigung eines Druckers
- Auswechseln von Verbrauchsmaterial...

Ausfallarten:

- Totalausfall
- Teilausfall
- Sprungausfall
- Driftausfall...

Ausfallcharakteristiken:

Die Lebensdauer oder der Zeitpunkt eines Ausfalls eines ganz bestimmten Gerätes ist nicht vorhersehbar. Stattdessen wird die **Lebensdauer der Gesamtheit aller Systeme** als Zufallsgröße in Form einer **Ausfallcharakteristik** interpretiert.

Kenngrößen:

Ausfallwahrscheinlichkeit

(Fehlerfunktion oder Unzuverlässigkeitsfunktion)

$$F(t) = P(T \leq t) \approx \frac{n_o - n_g(t)}{n_o} = \frac{n_a(t)}{n_o}$$

Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Lebensdauer T eines Elementes/Systems zum jeweiligen Zeitpunkt t kleiner als t ist. $F(t)$ ist eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ausfalles.

Schätzwert dafür ist die **Ausfallhäufigkeitssumme**:
Verhältnis zwischen ausgefallenen (n_a) Systemen/Bauelementen und Anfangsbestand (n_o) der Systeme/Bauelemente.

Ausgefallene und noch überlebende (n_g) Systeme ergänzen sich zum Anfangsbestand.

Überlebenswahrscheinlichkeit:

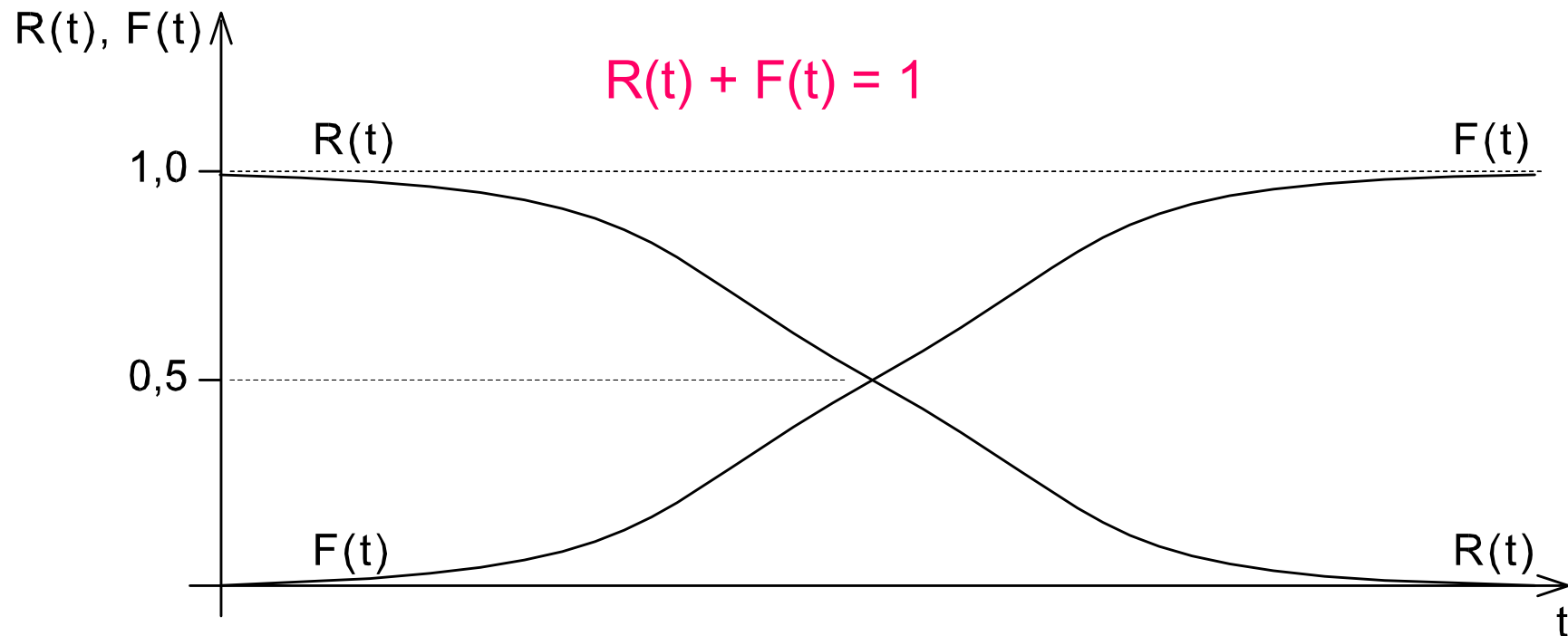
$$R(t) = P_{\ddot{u}}(T > t) \approx \frac{n_g(t)}{n_o} = \frac{n_o - n_a(t)}{n_o} \quad \text{mit} \quad R(t) = 1 - F(t)$$

Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Lebensdauer T zum jeweiligen Zeitpunkt t größer als die aktuelle Zeit t ist, das System also noch ordnungsgemäß funktioniert.

Zur Ausfallwahrscheinlichkeit komplementäre **Zuverlässigkeitsfunktionen**. Der Begriff der Überlebenswahrscheinlichkeit wird vorzugsweise für nicht reparierbare Systeme benutzt.

Vergleiche die bereits bekannten Zusammenhänge der Überlebenswahrscheinlichkeit von 90 % bei Wälzlagern.

Ausfallwahrscheinlichkeit und Überlebenswahrscheinlichkeit als komplementäre Größen, beispielhaft:



Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit qualitativ

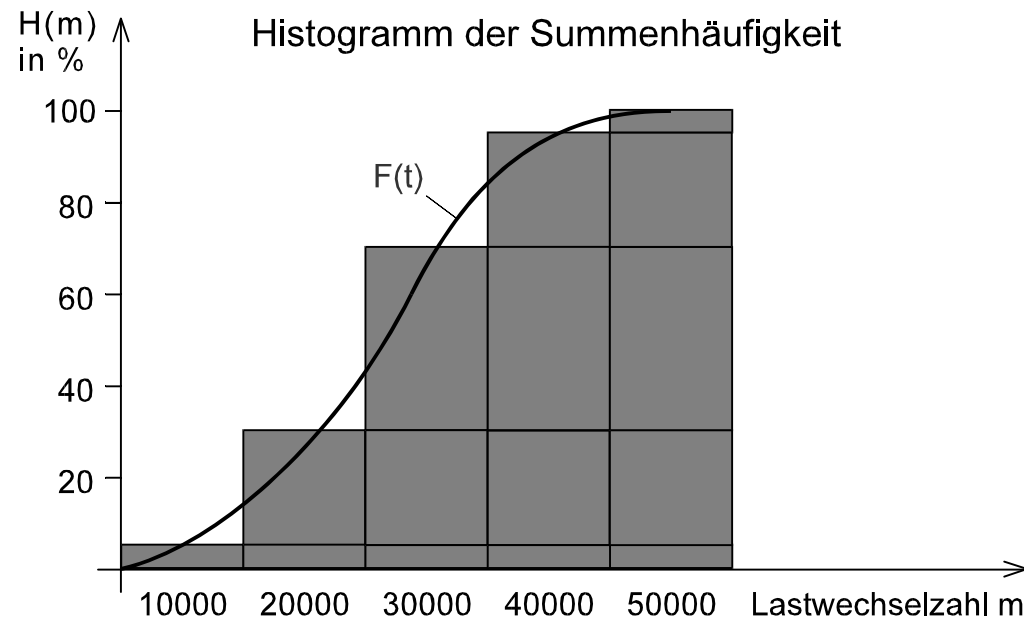
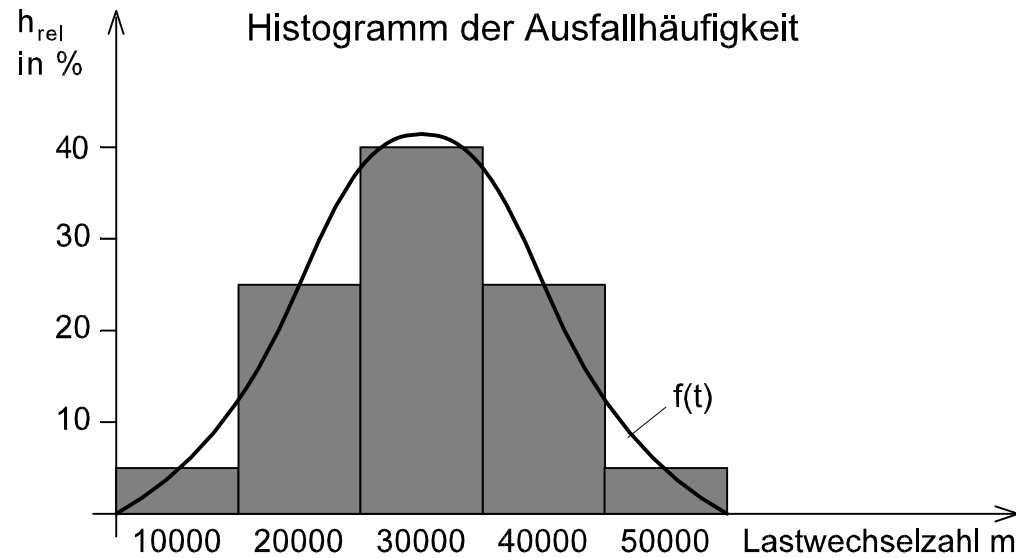
$$F(t) = 1 - R(t)$$

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte (zugehörige Dichtefunktion)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$$

Sie kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Ausfall zum Zeitpunkt t bis $t + dt$ auftritt.

Zusammenhang zwischen Histogrammen und Verteilungsfunktionen



Beispiel zur Ermittlung von Dichte- und Verteilungsfunktionen, hier Ausfall eines Bauteils durch Wechselbeanspruchung als Funktion der Lastwechselzahl, nach /31/

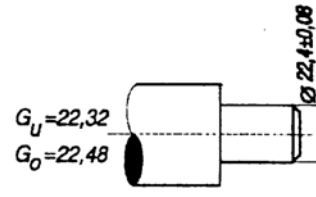
Erinnerung: Prinzipielles Vorgehen bei der Ermittlung von Verteilungen im Fertigungsprozess am Beispiel einer manuellen Qualitätskontrolle (aus /11/)

Wellenzapfen - Außendurchmesser $22,4 \pm 0,08$ mm

Meßwerte (von 50 Wellen)

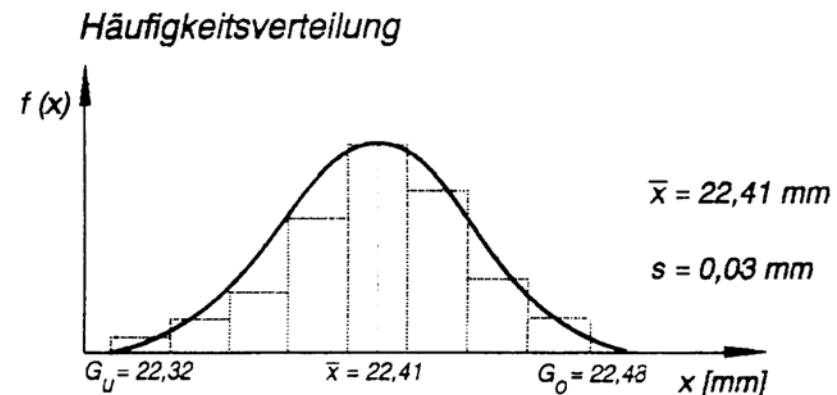
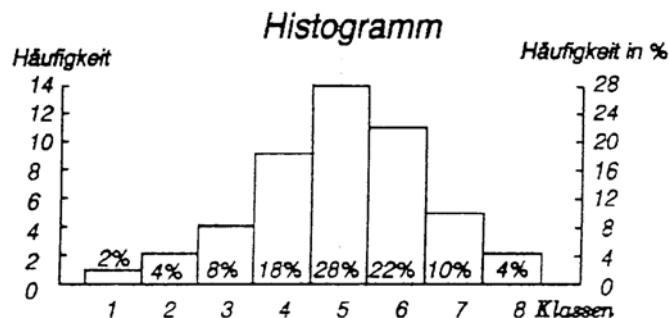
(Angegeben sind nur die Nachkommastellen)

Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert	Nr	Wert
1	48	6	41	11	43	16	43	21	40	26	41	31	39	36	45	41	37	46	42
2	37	7	42	12	42	17	32	22	38	27	38	32	41	37	42	42	43	47	44
3	38	8	36	13	50*	18	40	23	41	28	43	33	49*	38	36	43	45	48	40
4	45	9	40	14	40	19	39	24	43	29	35	34	41	39	38	44	41	49	38
5	43	10	35	15	39	20	41	25	46	30	42	35	44	40	40	45	39	50	43



Ergebnis: angenommen 48
verworfen * 2

Strichliste		Σ	%
Klassen	1 22,32 - 22,34	/	1
	2 22,34 - 22,36	//	2
	3 22,36 - 22,38	///	3
	4 22,38 - 22,40	////	4
	5 22,40 - 22,42	/////	5
	6 22,42 - 22,44	////	4
	7 22,44 - 22,46	///	3
	8 22,46 - 22,48	//	2
			Häufigkeit
			4 % verworfen



Verteilungsfunktionen lassen sich aus den Ausfallhäufigkeiten bzw. Summenhäufigkeiten ermitteln.

Ausfallhäufigkeit:

$$h = h_{rel} = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle in einer Klasse } K}{\text{Gesamtzahl der Ausfälle}} = \frac{n_K}{n}$$

Als typische Anzahl der Klassen wählt man $\sqrt{n}$, mit n als Gesamtzahl der Ausfälle oder Elemente und n_K der Zahl der Ausfälle in der jeweiligen Klasse.

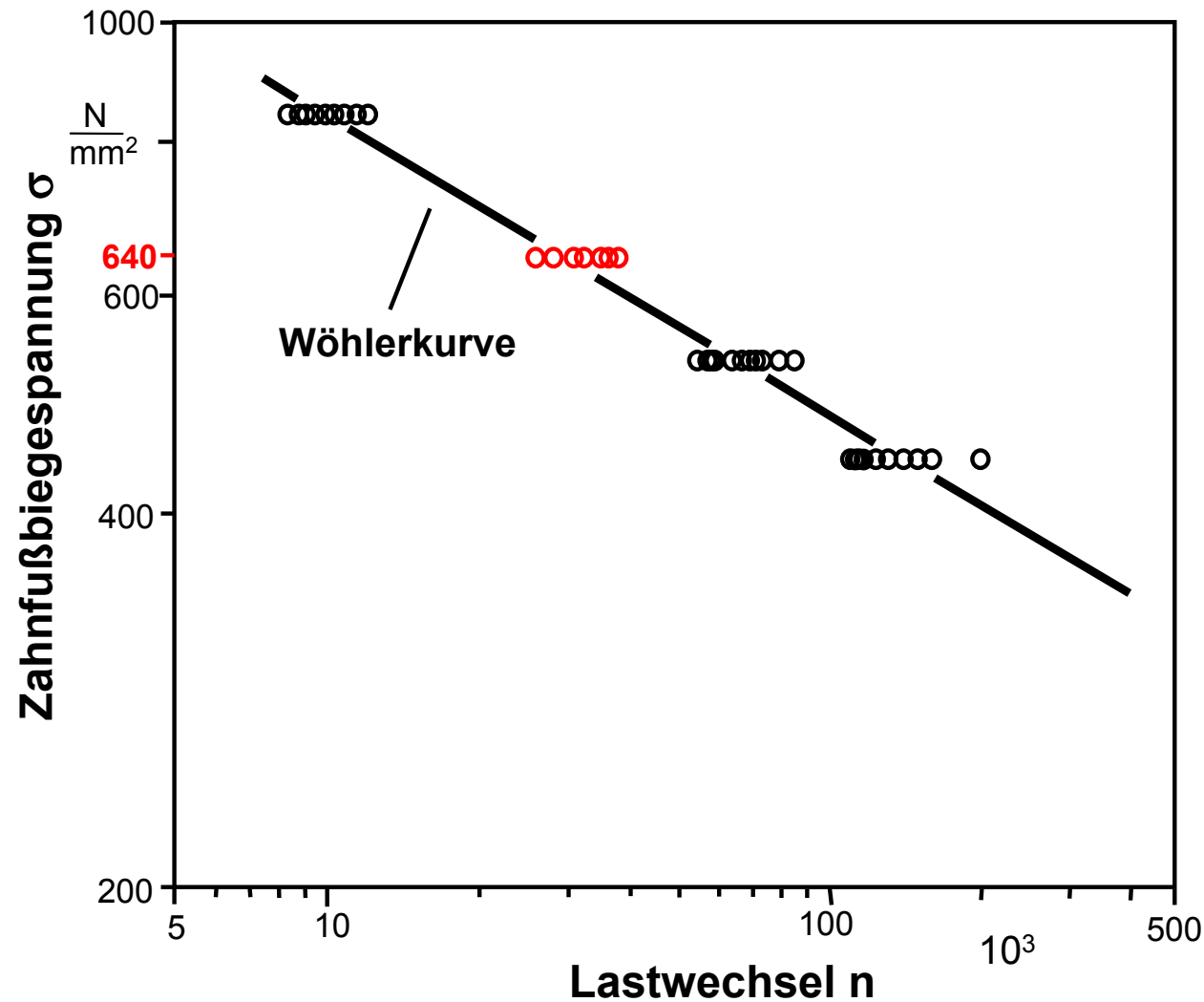
Summenhäufigkeit:

$$H(m) = \sum_{i=1}^m h_{rel(i)}$$

als Gesamtzahl der Ausfälle zu einem Zeitpunkt t .

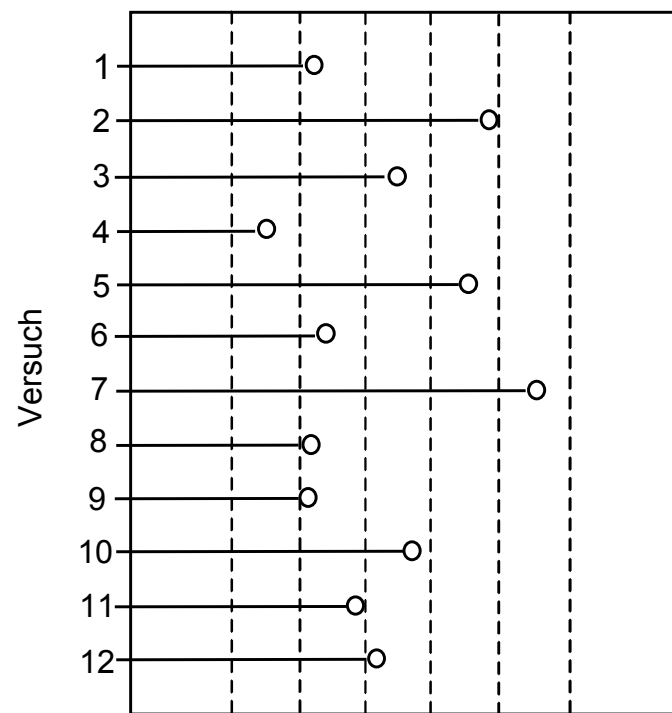
$f(t)$ und $F(t)$ sind die Grenzwerte der Ausfallhäufigkeit h_{rel} und $H(m)$.

Zahnbruch Wöhlerversuch mit Streuung der Ausfallzeiten

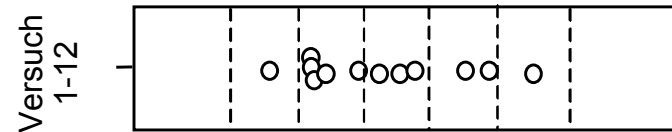


Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

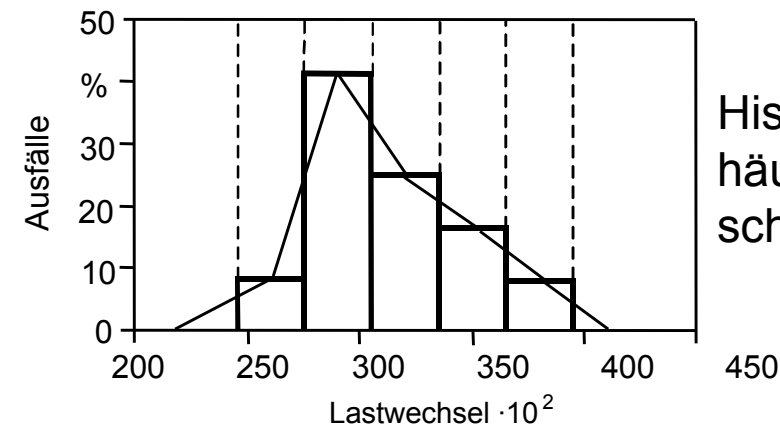
Ausfallzeiten und Histogramm der Ausfallhäufigkeiten für das Lastniveau $\sigma = 640 \text{ N/mm}^2$ aus dem Zahnbruch Wöhlerversuch



Ausfallzeiten der Versuche



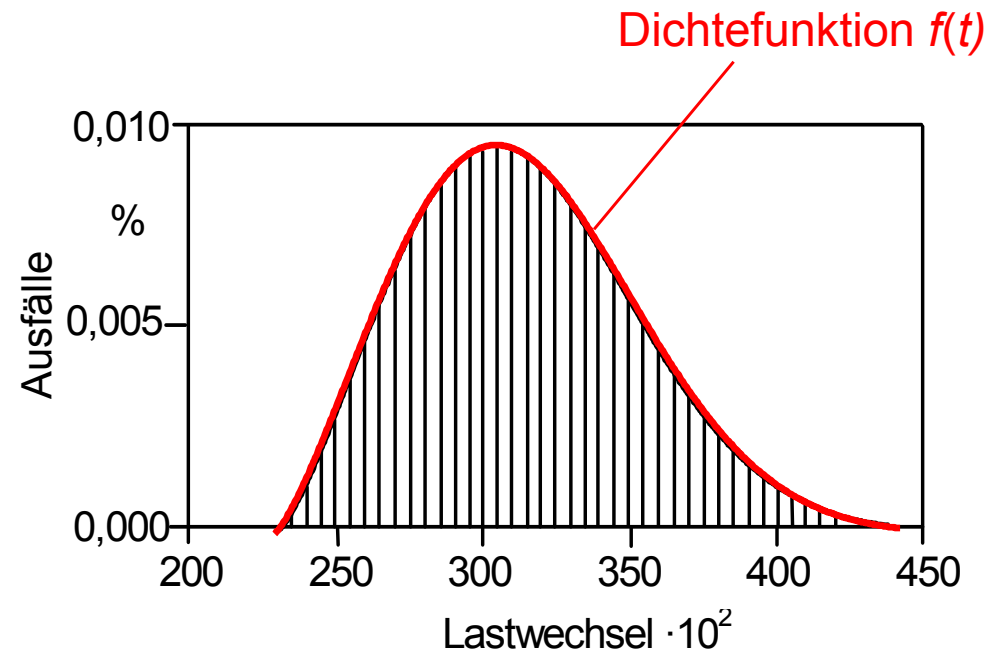
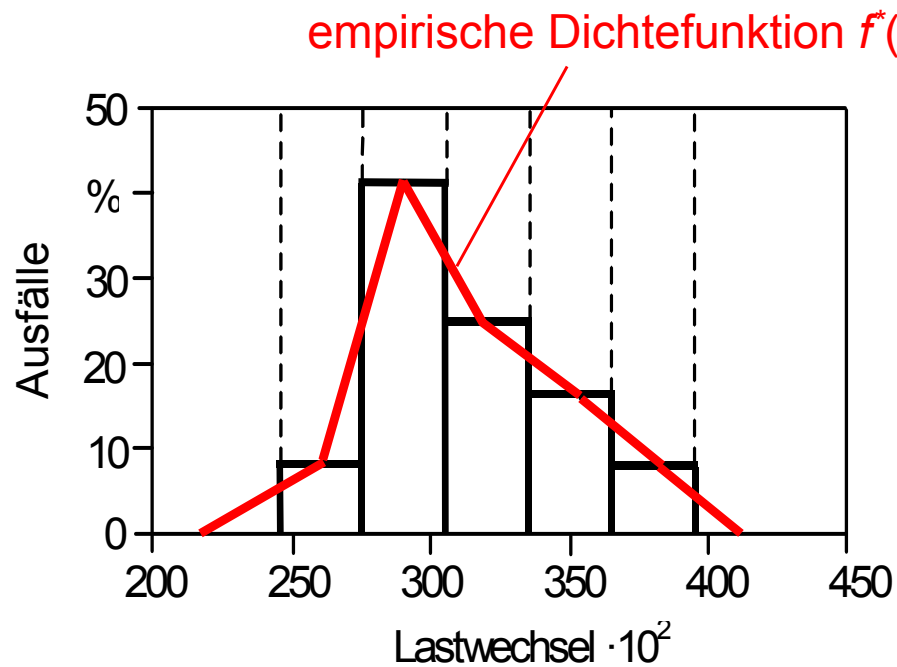
Geordnete Ausfallzeiten



Histogramm der Ausfallhäufigkeiten mit empirischer Dichtefunktion $f^*(t)$

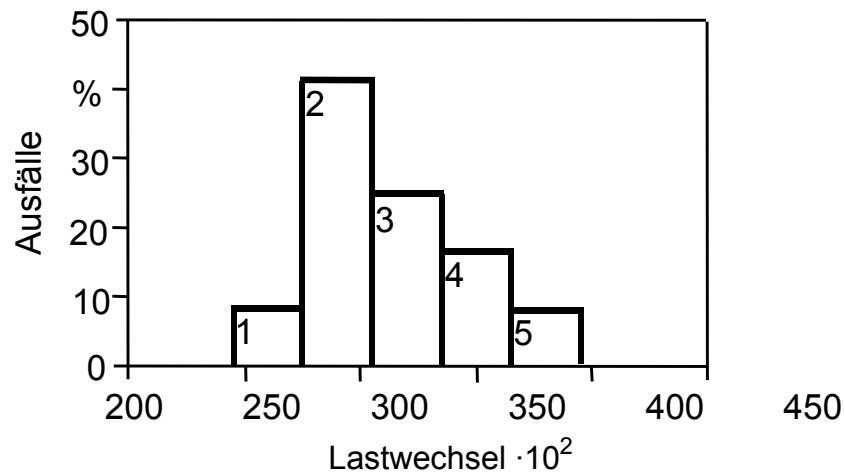
Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und Dichtefunktion $f(t)$



(Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$)

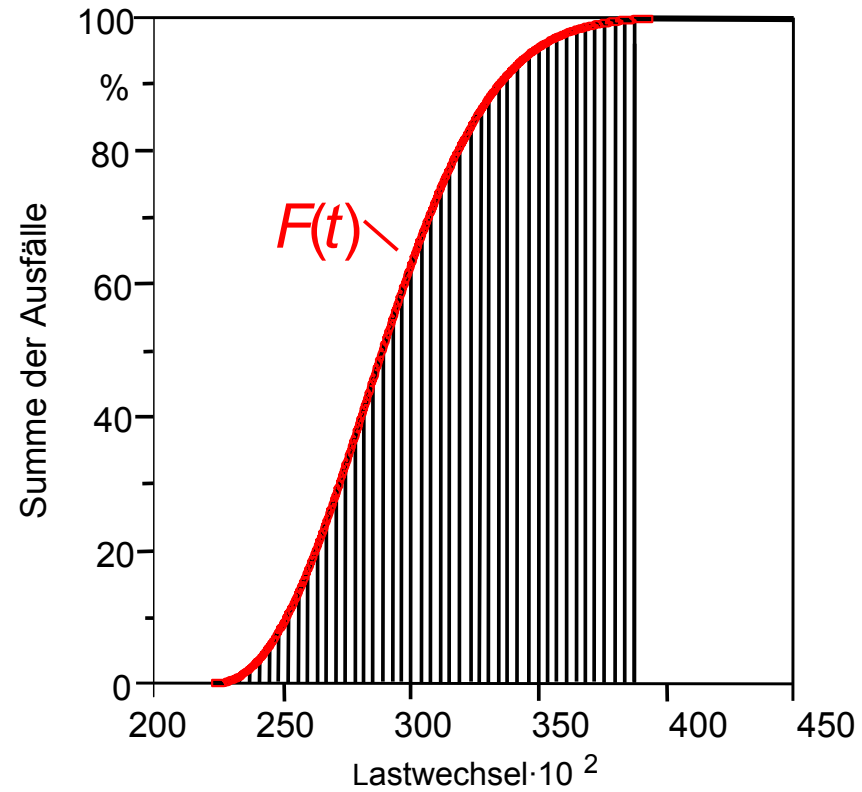
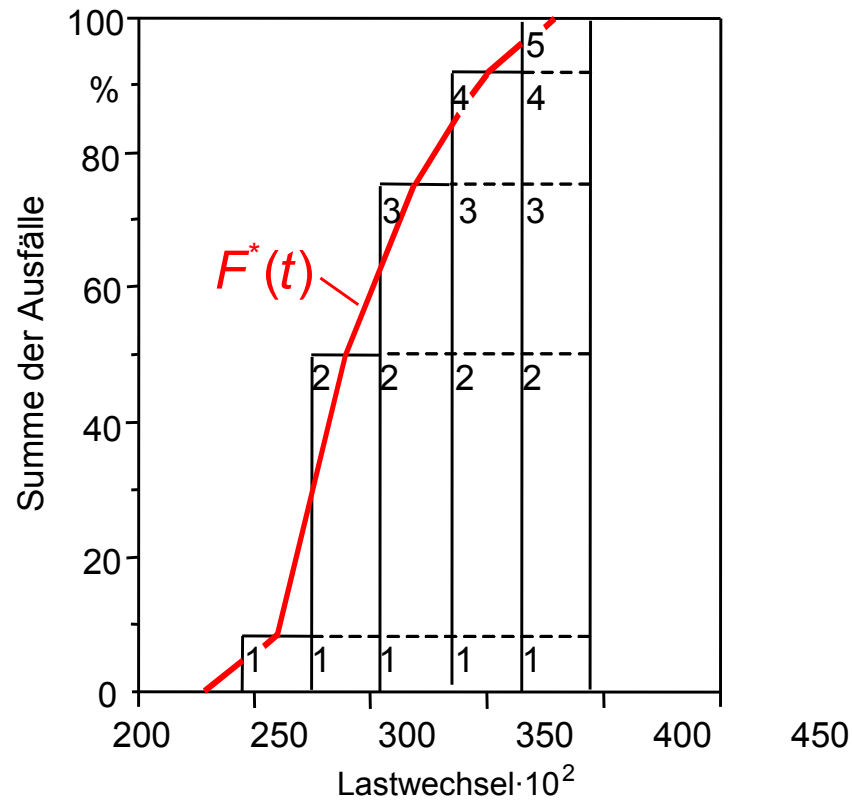
Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)



$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

(Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$)

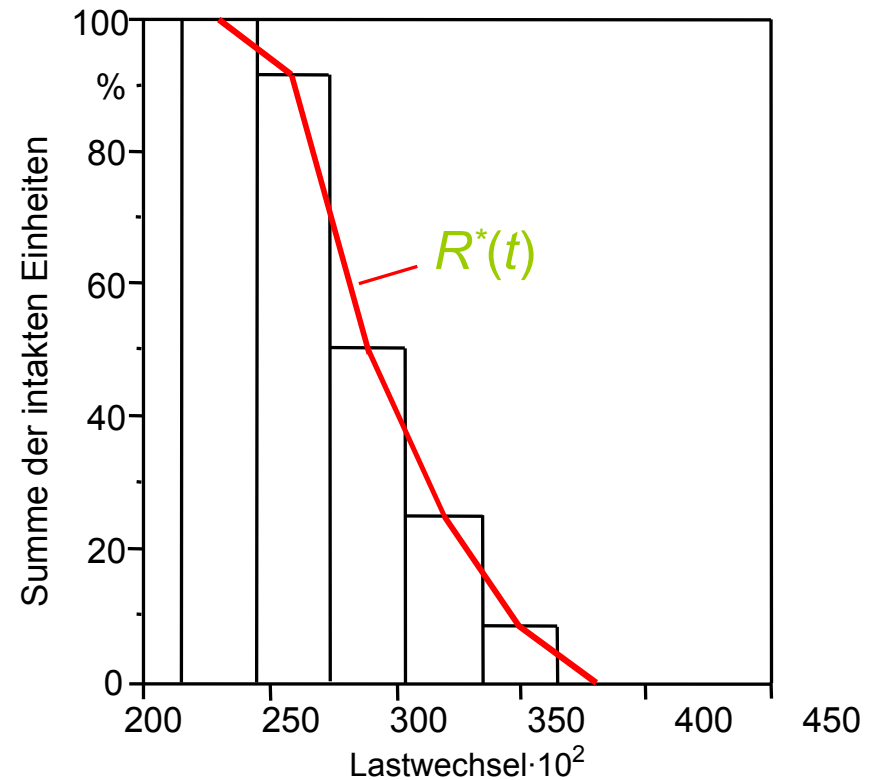


Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ (Reliability)

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$\begin{array}{r} \text{ausgefallene Teile} \\ + \text{ noch intakte Teile} \\ \hline = 100\% \end{array}$$



Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Weitere Kenngrößen:

Ausfallrate λ

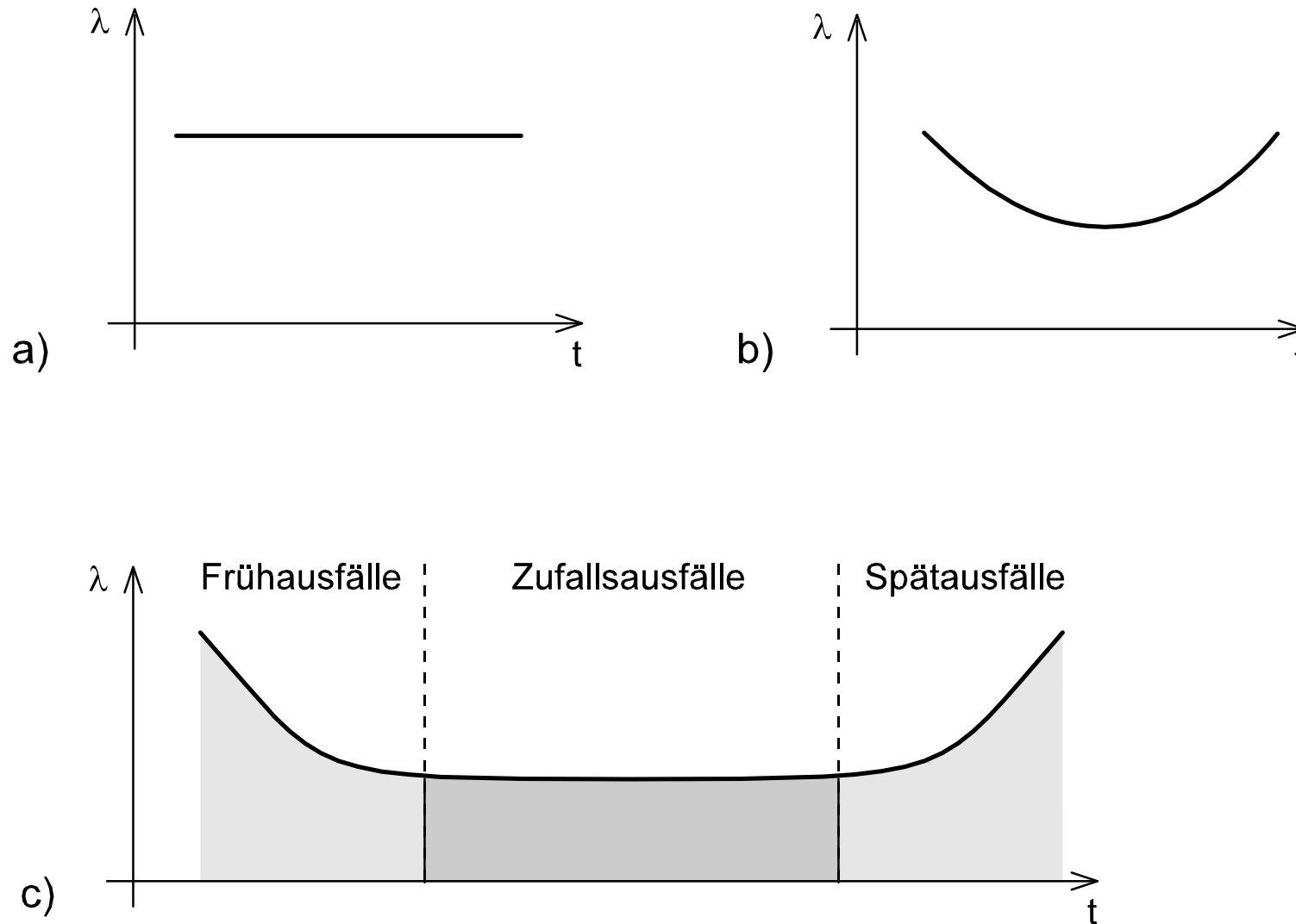
$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{\frac{dR}{dt}}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

charakterisiert den **zeitlichen Verlauf der Ausfälle** in Bezug auf die zum Zeitpunkt t noch überlebenden Systeme.

Maßeinheiten von λ :

- typische Maßeinheit: **1/h**
- typische Werte von λ : $\lambda = 10^{-9} \dots 10^{-6} \text{ 1/h}$
- bei elektronischen Bauelementen (konstante Ausfallrate, Exponentialverteilung) nutzt man häufig die Größe FIT (Failure in Time) **relative Fehlerrate** mit **FIT** = 10^{-9} 1/h relativ per Zeiteinheit.
- Ausfallzahlen über die gesamte Nutzungsdauer hinweg werden auch in **ppm** (parts per million) als **absolute Fehlerrate** angegeben.

Badewannenkurve als typischer Verlauf einer Ausfallrate



Beispiele für charakteristische Ausfallraten

a) konstante Ausfallrate (z. B. elektronische Bauelemente bei Zufallsausfällen)

b) typische Ausfallrate mechanischer Bauelemente

c) typische Badewannenkurve (z. B. Gesamtlebenszyklus elektrischer oder mechanischer Systeme)

Zeitabhängigkeit und weitere Abhängigkeiten der Ausfallrate

$$\lambda = \lambda (t, T, B, A)$$

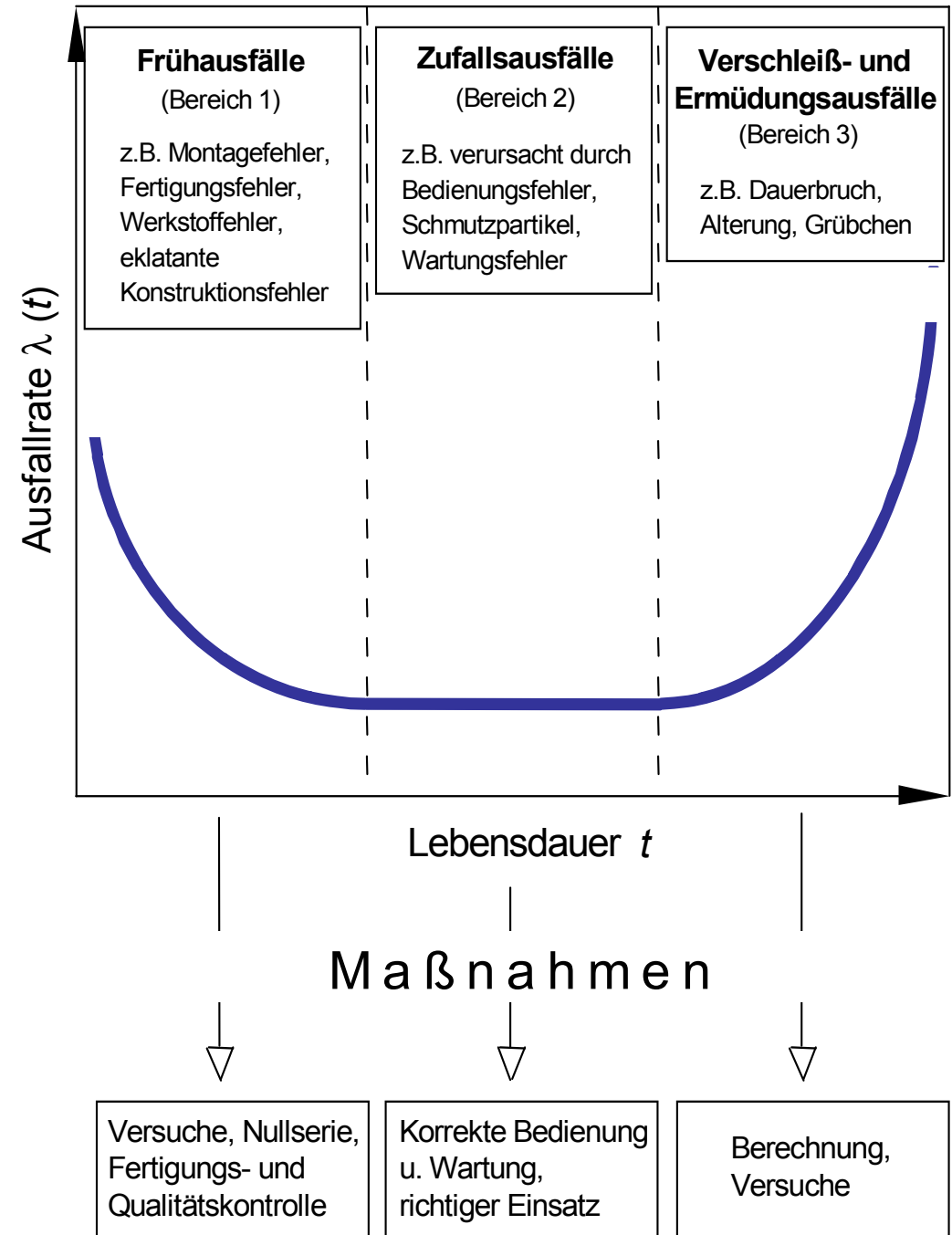
$$\lambda = \lambda (\text{Betriebszeit, Lebensalter, Beanspruchung, Ausfallkriterium})$$

Die Ausfallrate ist in der Regel zeitabhängig, abhängig vom bereits erreichten Lebensalter, der Beanspruchung in dem gewählten Ausfallkriterium.

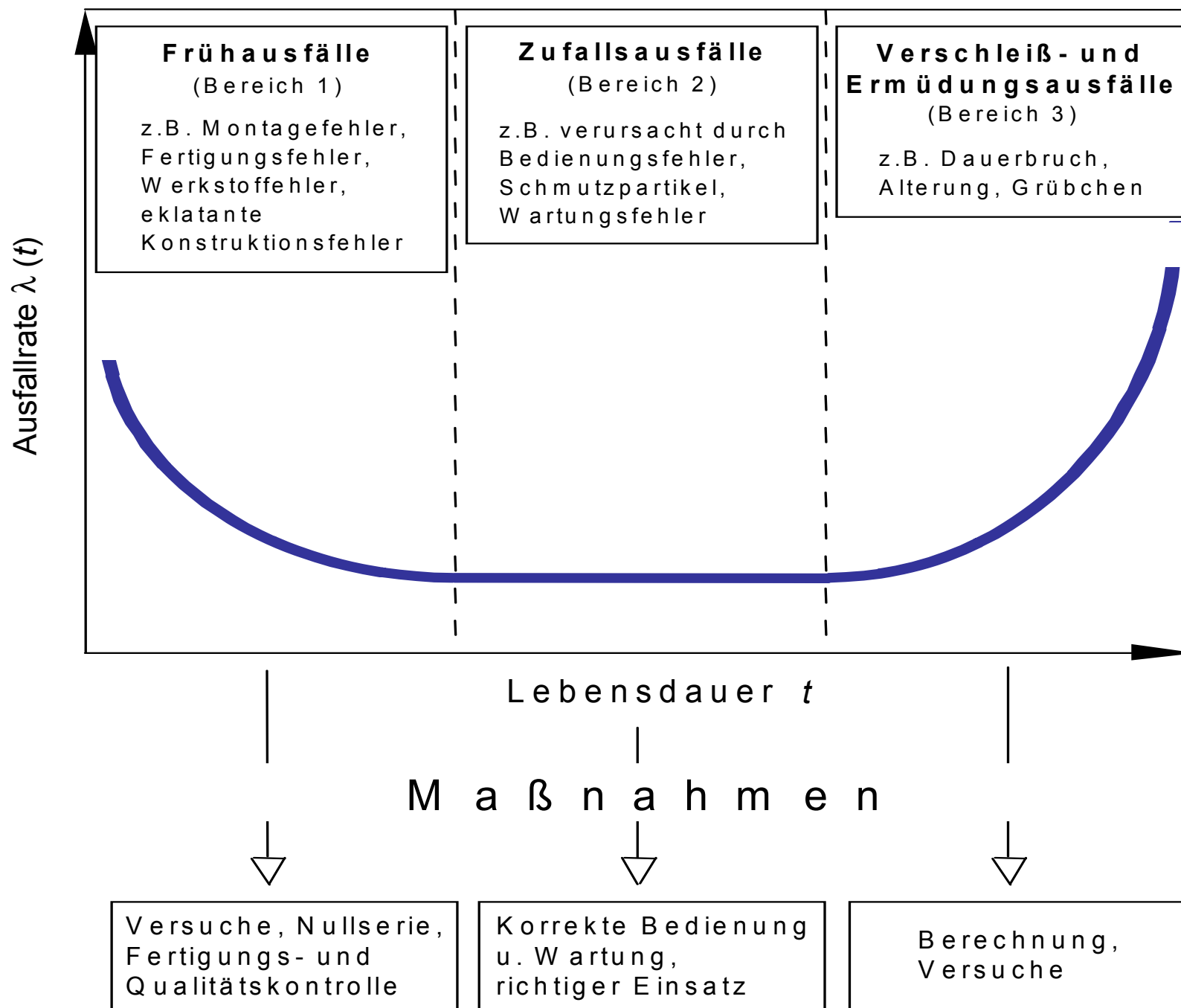
Ausfallrate λ

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\text{Ausfälle (zum Zeitpunkt } t \text{)}}{\text{Summe der noch intakten Einheiten}}$$



Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)



Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Phasen der Badewannenkurve:

- Frühausfälle

Typisches Verhalten nach Erstinbetriebnahme, bedingt durch unerkannt gebliebene Material-, Fertigungs- oder Montagefehler auftretende Ausfälle (vermeidbar durch burn-in oder begrenztes Einlaufen beim Hersteller)

- Zufallsausfälle

Sich einstellendes, oftmals relativ konstantes Ausfallverhalten über einen längeren Zeitraum

- Spätausfälle

Alterung und Verschleiß bedingen gegen Ende der Lebensdauer einen Anstieg der Ausfallrate.

Weitere Kennwerte

$$E(t) = MTTF = \theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Der Erwartungswert E ist die zu erwartende Betriebszeit bzw. die mittlere Betriebszeit bis zum ersten Ausfall,

- $MTTF$ -Wert (meantime to failure) bzw.
- $MTTFF$ -Wert (meantime to first failure) bzw.
- $MTBF$ -Wert (meantime between failure), bei zwischenzeitlichen Reparaturen.
- Einen Schätzwert ergibt das Verhältnis zwischen Betriebsdauer und Zahl der Ausfälle.

Verfügbarkeit

$$V = \frac{T}{T + T_A} = \frac{\text{(mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen)}}{\text{mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen} + \text{Ausfalldauer}}$$

In die Verfügbarkeit gehen die Ausfallzeiten und damit auch die Reparaturzeiten mit ein. Die Dauer des Ausfalls hängt ab von der Schnelligkeit des Service, der Verfügbarkeit der Ersatzteile, der Dauer der Fehlersuche und der Reparaturzeit.

B₁ und B₁₀ Quantile

stellen die Lebensdauer beim Erreichen von 1 % bzw. 10 % Ausfällen dar. Diese Werte bilden einzelne charakteristische Punkte einer Verteilung, werden jedoch häufig genutzt.

Charakteristischen Lebensdauer T :

Für die Exponentialverteilung (siehe später) gilt allgemein:

$$E(t) = MTTF = \theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\Lambda t} dt = \frac{1}{\Lambda} = T$$

Dies ist gleichzeitig die allgemeine Definition der charakteristischen Lebensdauer.

und eingesetzt in die Ausfallwahrscheinlichkeit folgt

$$F(t = T) = 1 - e^{-1} = 0,6321 = 63,21 \%$$

Dieser Zusammenhang wird als Definition der charakteristischen Lebensdauer T allgemein verwendet. D. h. mit dem Erreichen der charakteristischen Lebensdauer sind 63,2 % aller Teile ausgefallen.

Achtung:

Der Erwartungswert bei anderen Funktionen fällt nicht mit T der charakteristischen Lebensdauer zusammen.

6.3 Charakteristische Verteilungsfunktionen

Charakteristische Verteilungsfunktionen

In der Zuverlässigkeitstechnik werden folgende Verteilungsfunktionen häufig genutzt:

- Exponentialverteilung
- Gaußsche Normalverteilung
- Logarithmische Normalverteilung
- Weibull-Verteilung

6.3.1 Exponentialverteilung

Exponentialverteilung

Gleichungen der Exponentialverteilung:

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

als Überlebenswahrscheinlichkeit

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

als Ausfallwahrscheinlichkeit

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

als Dichtefunktion $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{konst.}$$

als Ausfallrate

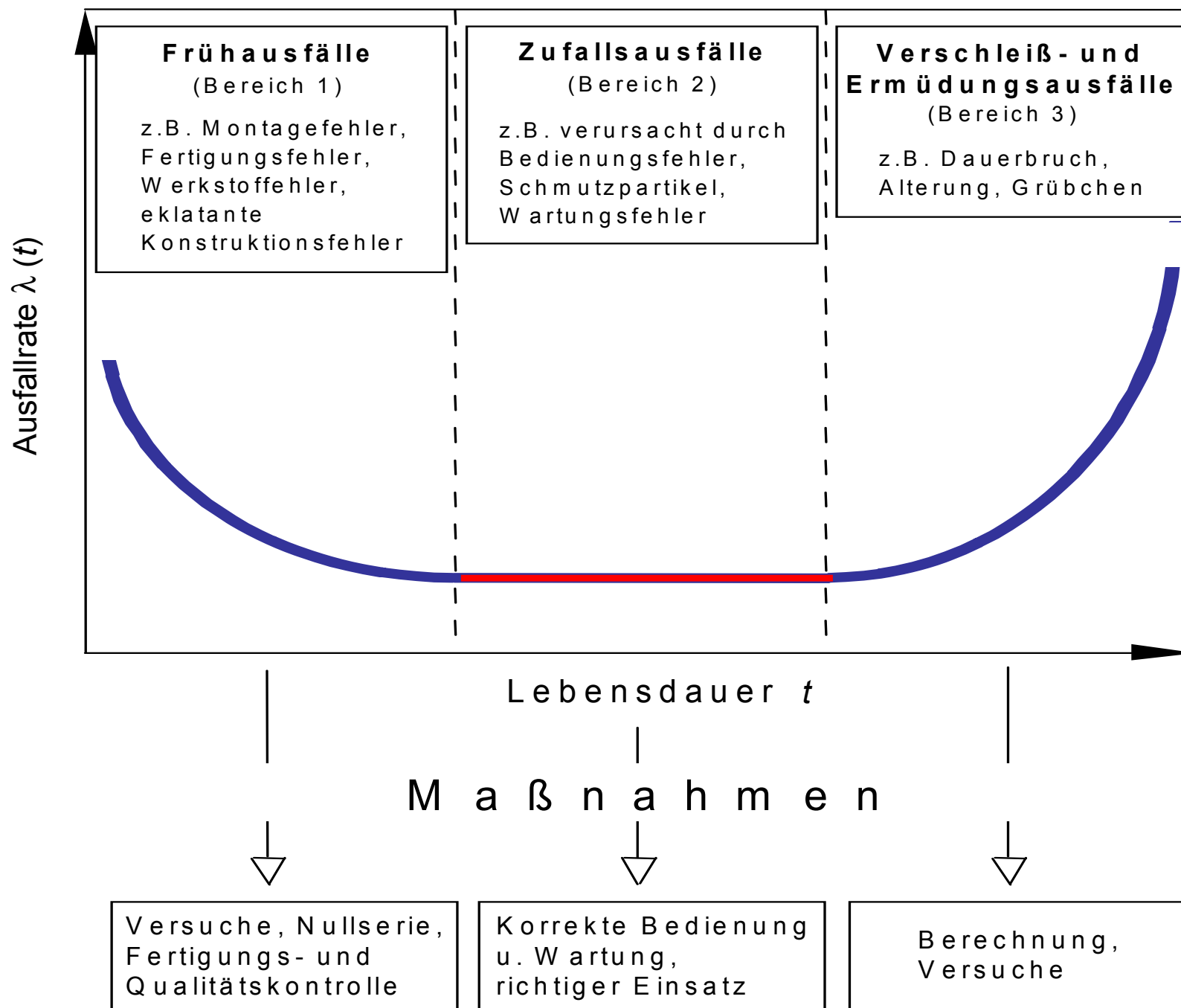
$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{\frac{dR}{dt}}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

mit $\lambda = 1/T = 1/t_m$

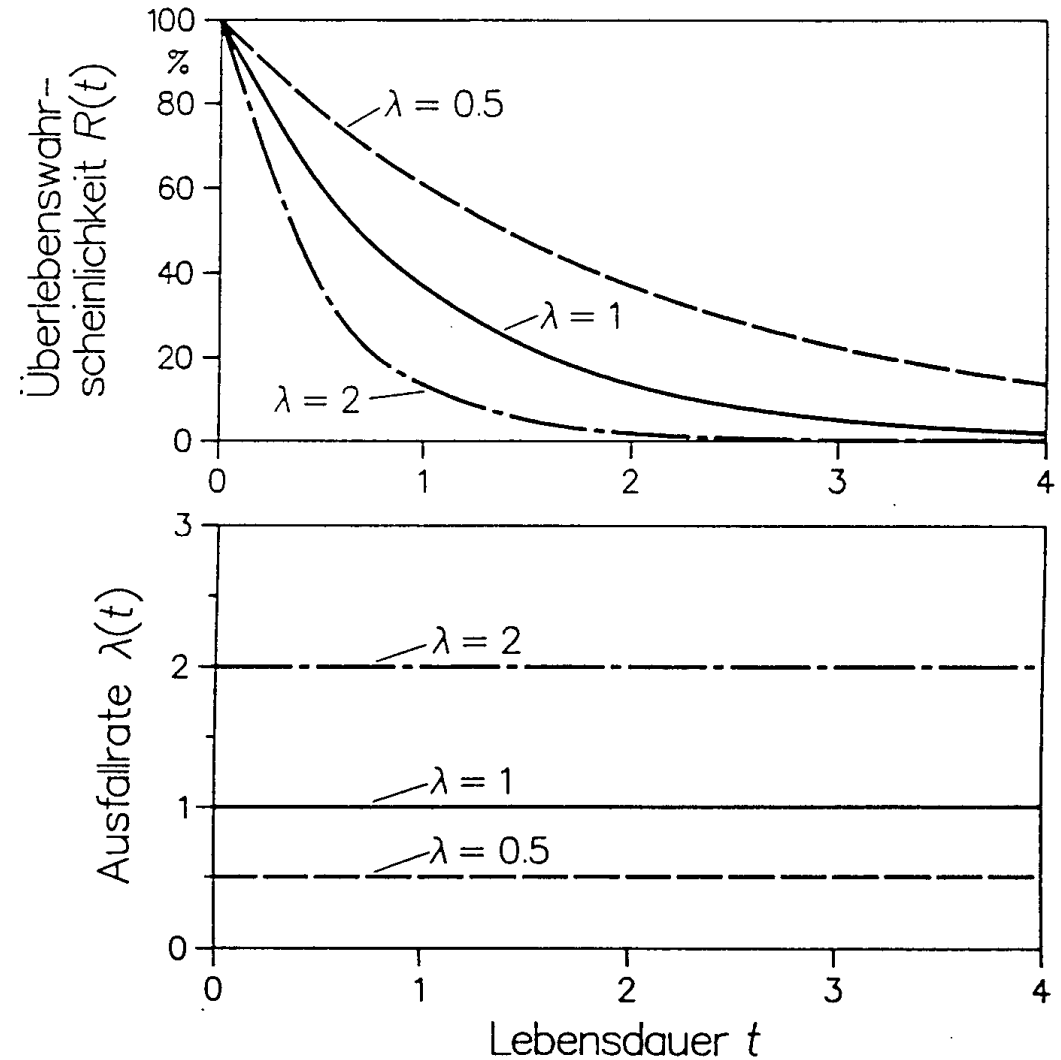
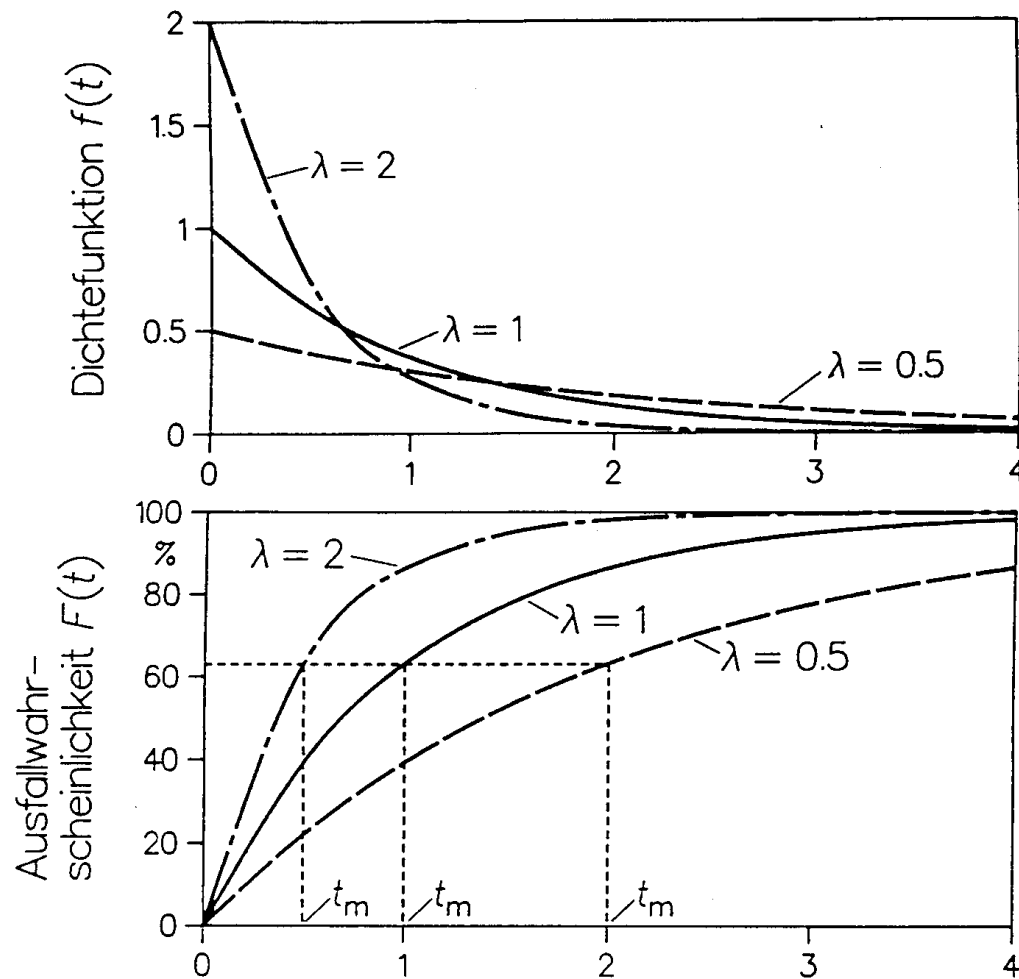
Kennzeichen:

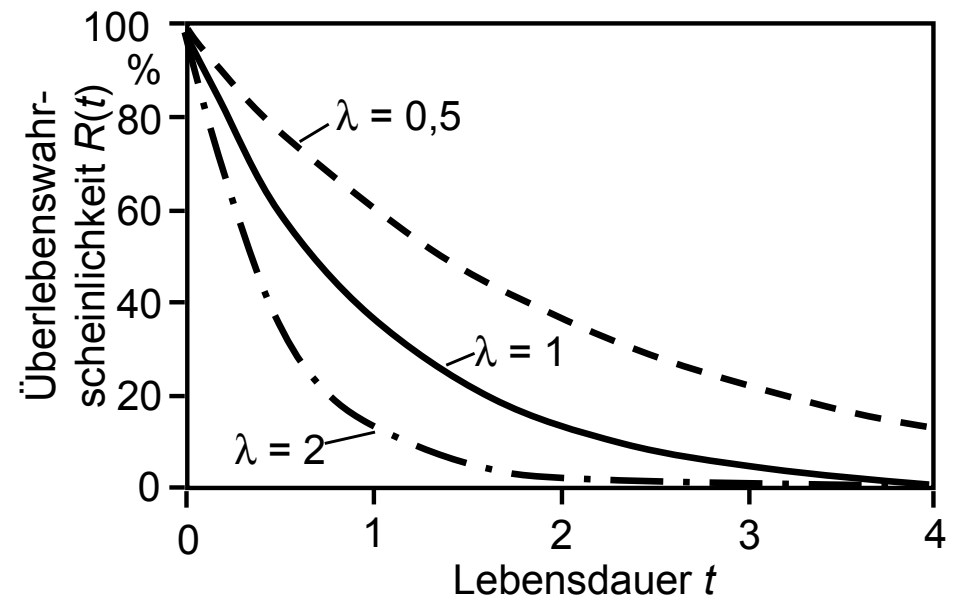
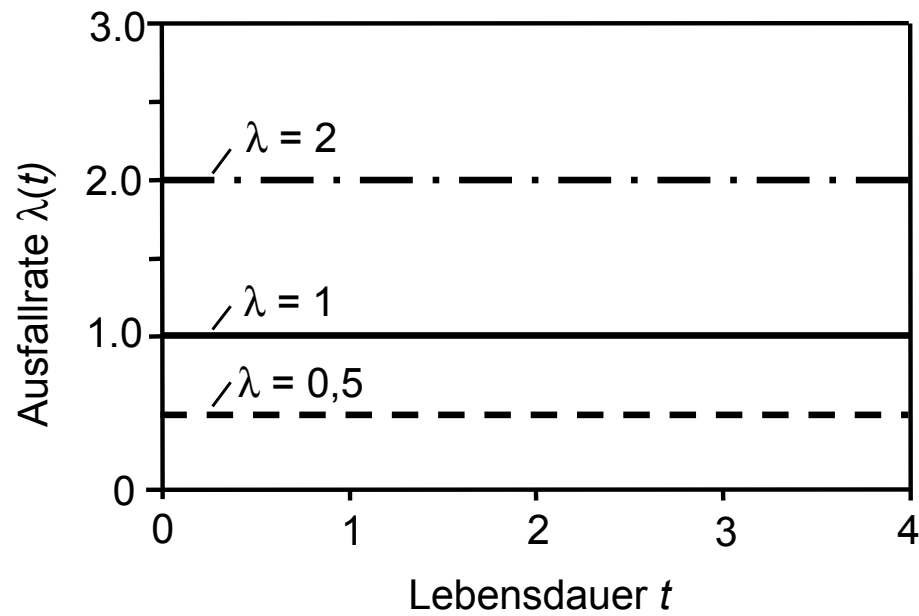
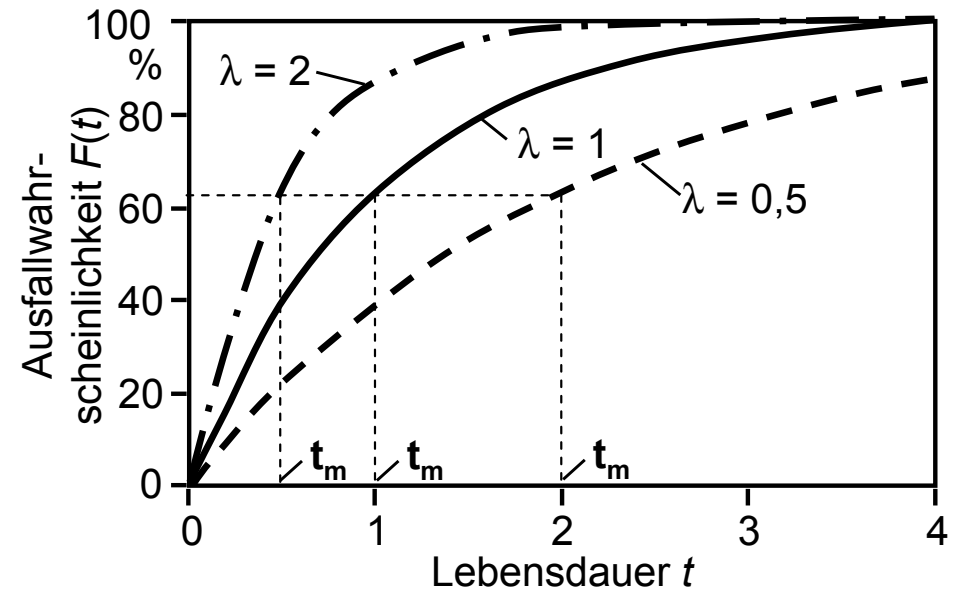
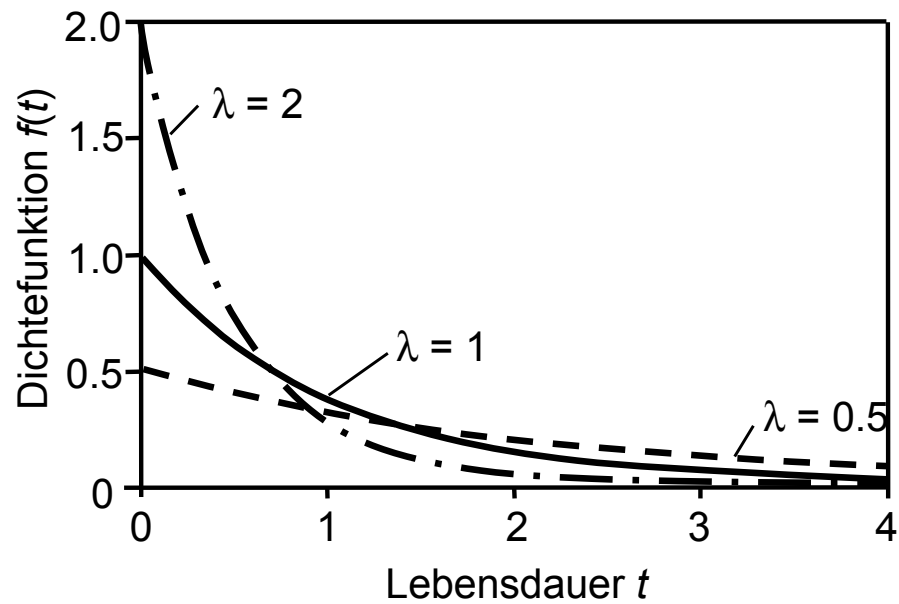
Das Ausfallverhalten (Ausfallrate) ist zeitlich konstant. Dies entspricht dem Bereich der Zufallsausfälle einer typischen Badewannenkurve.

Die Exponentialverteilung ist sehr einfach handhabbar und gilt vorzugsweise für elektronische Bauelemente und Baugruppen oder auch für Systeme, deren defekte Teile vorbeugend ausgetauscht werden.



Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)





Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Dichtefunktion:

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

Ausfallwahrscheinlichkeit:

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

Überlebenswahrscheinlichkeit:

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

Ausfallrate:

$$\lambda(t) = \text{konst}$$

Parameter:

t : Statistische Variable (Beanspruchungszeit, Lastwechsel, Anzahl der Betätigungen, ...)

λ : Lage und Formparameter $\lambda = \frac{1}{t_m}$

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

6.3.2 Gaußsche Normalverteilung

Gaußsche Normalverteilung

Gleichungen:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

mit $\lambda = \lambda(t)$

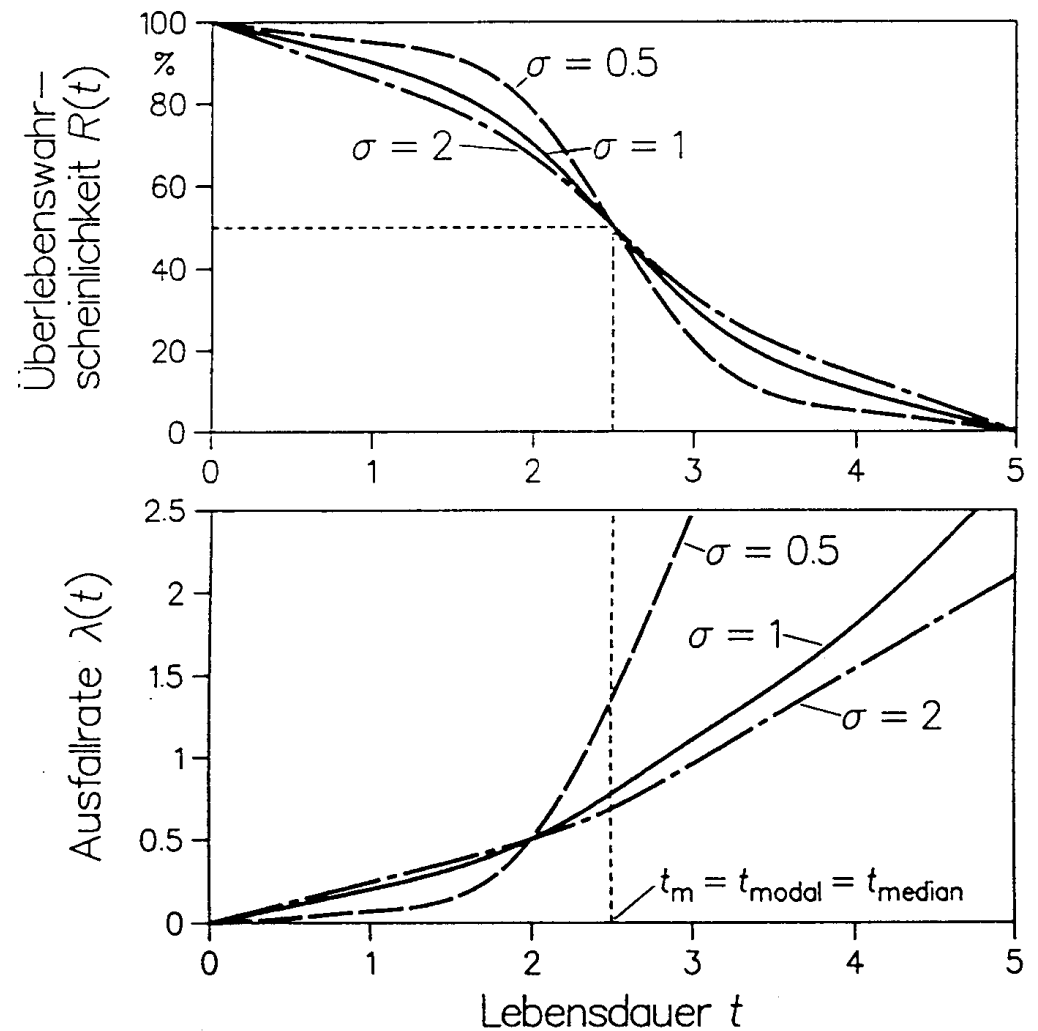
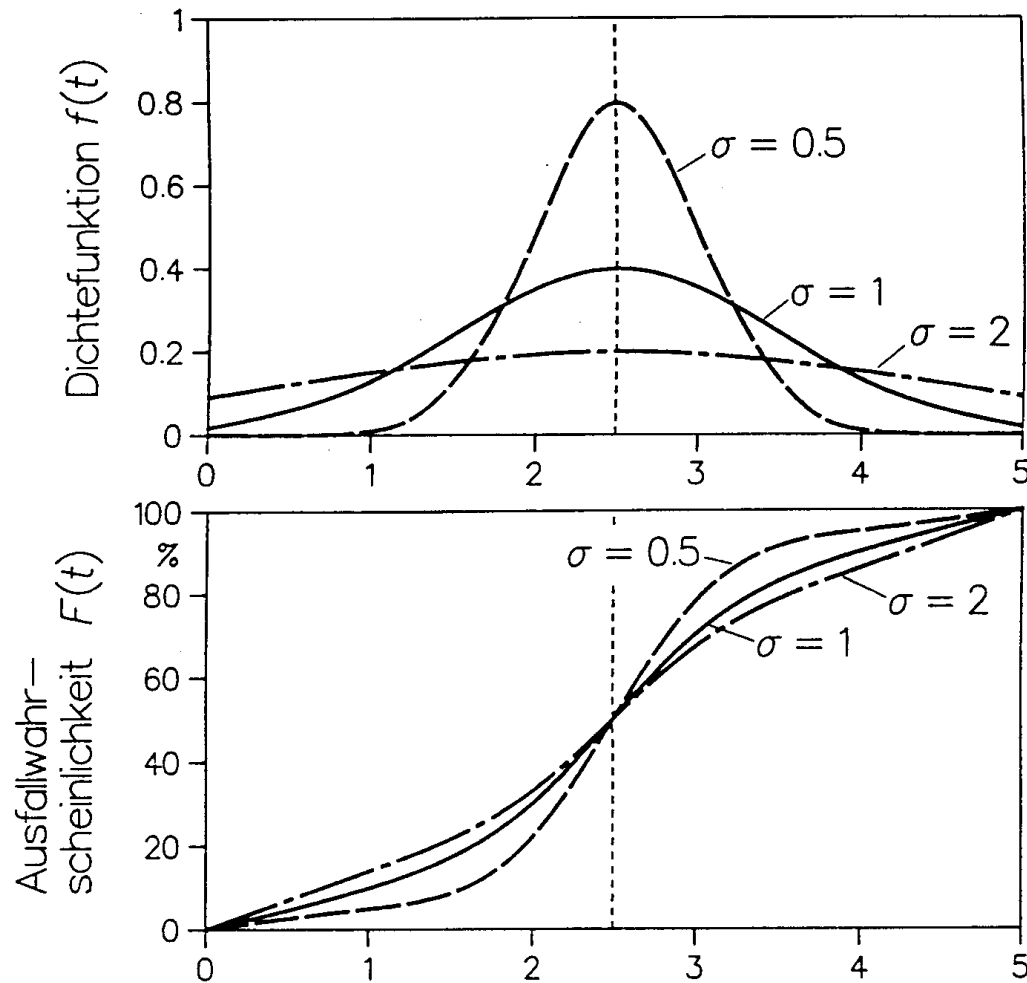
Parameter der Normalverteilung:

- Mittelwert μ (Lageparameter, entspricht hier der mittleren Lebensdauer t_m)
- Standardabweichung σ (Formparameter)

Im Gegensatz zur Exponentialverteilung sind hier zwei Parameter vorhanden.

Kennzeichen der Normalverteilung:

Natürliche Alterungsprozesse, das Zusammentreffen sehr vieler einzeln nicht dominierender Einflussgrößen und auch das Verhalten bei Ermüdungsbrüchen wird durch die Normalverteilung gut gekennzeichnet.



Logarithmische Normalverteilung:

Substitution t in lgt

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(lgt-\mu)^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{h},$$

Achtung:

Gleichung für $f(t)$ ist eine zugeschnittene Größengleichung und gilt für σ , t und μ in Stunden.

Hinweis:

In der Realität gibt es keine negativen Zeiten $t < 0$. Die Normalverteilungen werden also nur für Zeiten > 0 genutzt.

6.3.3 Weibull-Verteilung

Zweiparametrische Weibull-Verteilung (Weibull = schwedischer Ingenieur)

Gleichungen der zweiparametrischen Weibull-Verteilung:

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

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

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

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$$

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

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{\frac{dR}{dt}}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

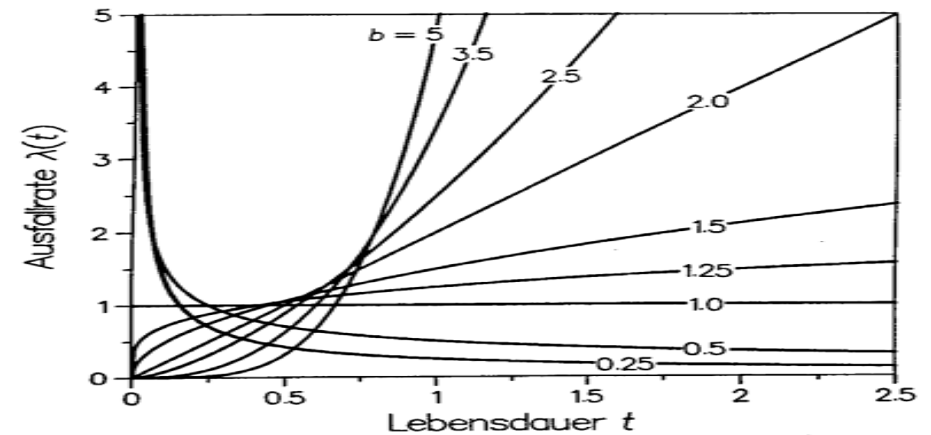
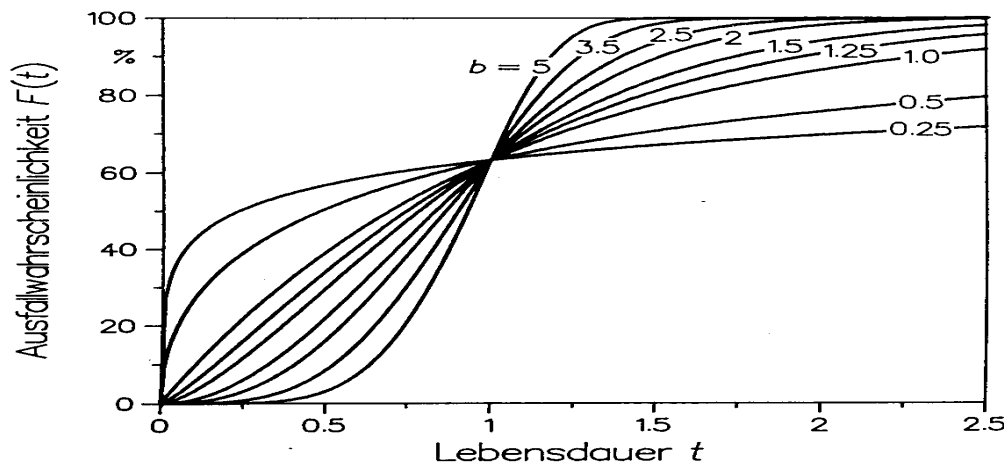
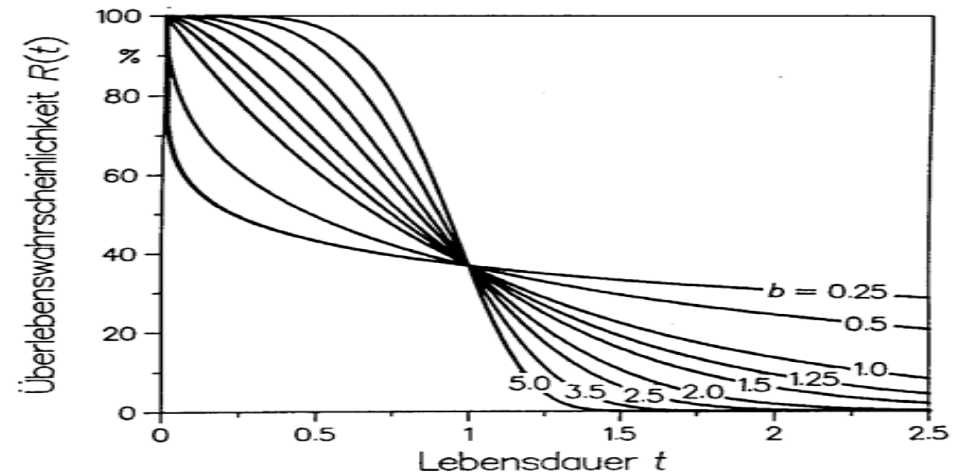
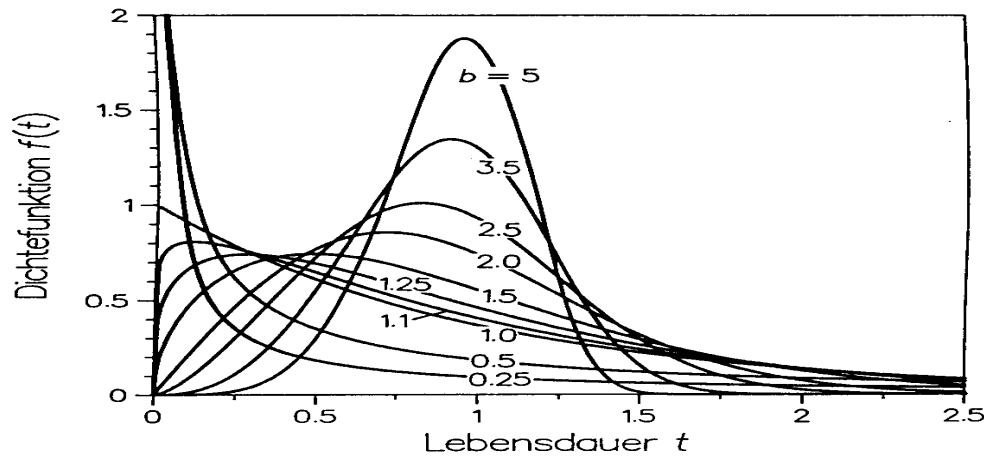
Parameter:

- Formparameter b (Ausfallsteilheit)
- Lageparameter T (charakteristische Lebensdauer, hier entspricht T wieder einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 %)

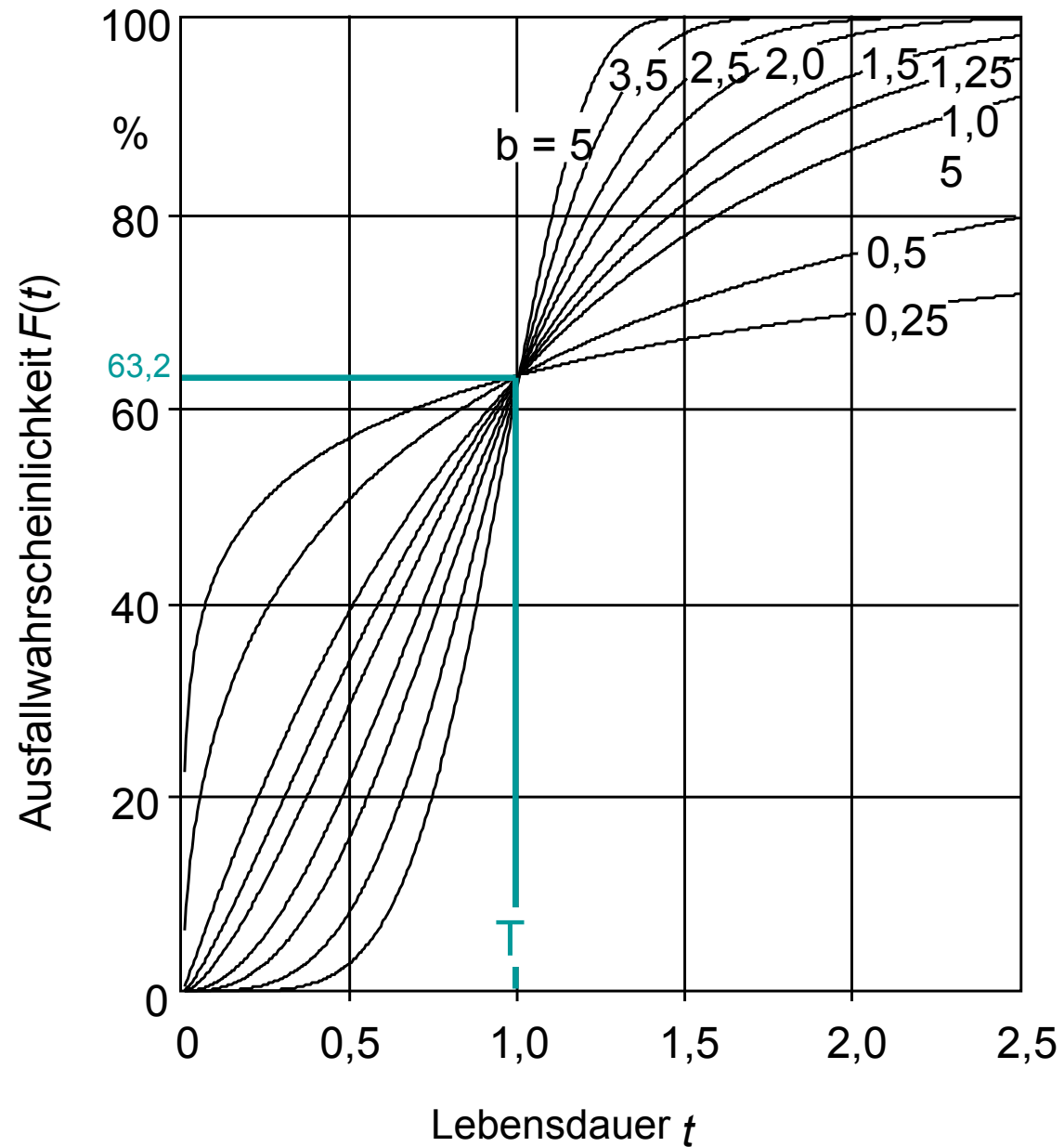
Kennzeichen:

Vorzugsweise genutzt für die Beschreibung von Bruchfestigkeiten. Enthält sowohl die Normal- als auch die Exponentialverteilung als Sonderfälle. Weite Verbreitung für mechanische Systeme.

Funktionen der Weibullverteilung, aus /31/ (charakteristische Lebensdauer $T = 1$, ausfallfreie Zeit $t_0 = 0$)

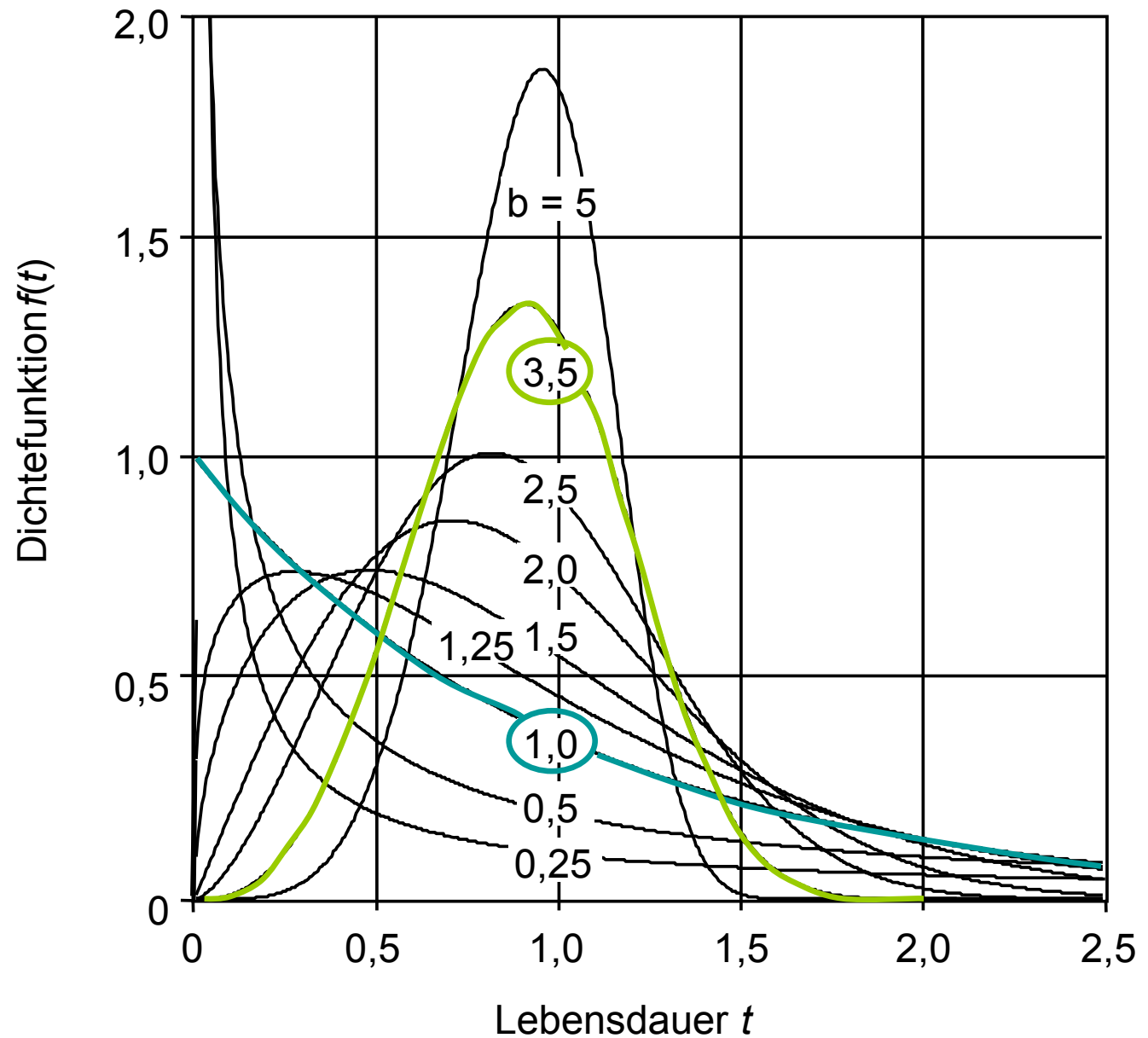


Weibull-Verteilung
für
unterschiedliche
Formparameter b
(Charakteristische
Lebensdauer $T = 1$,
ausfallfreie Zeit $t_0 = 0$)



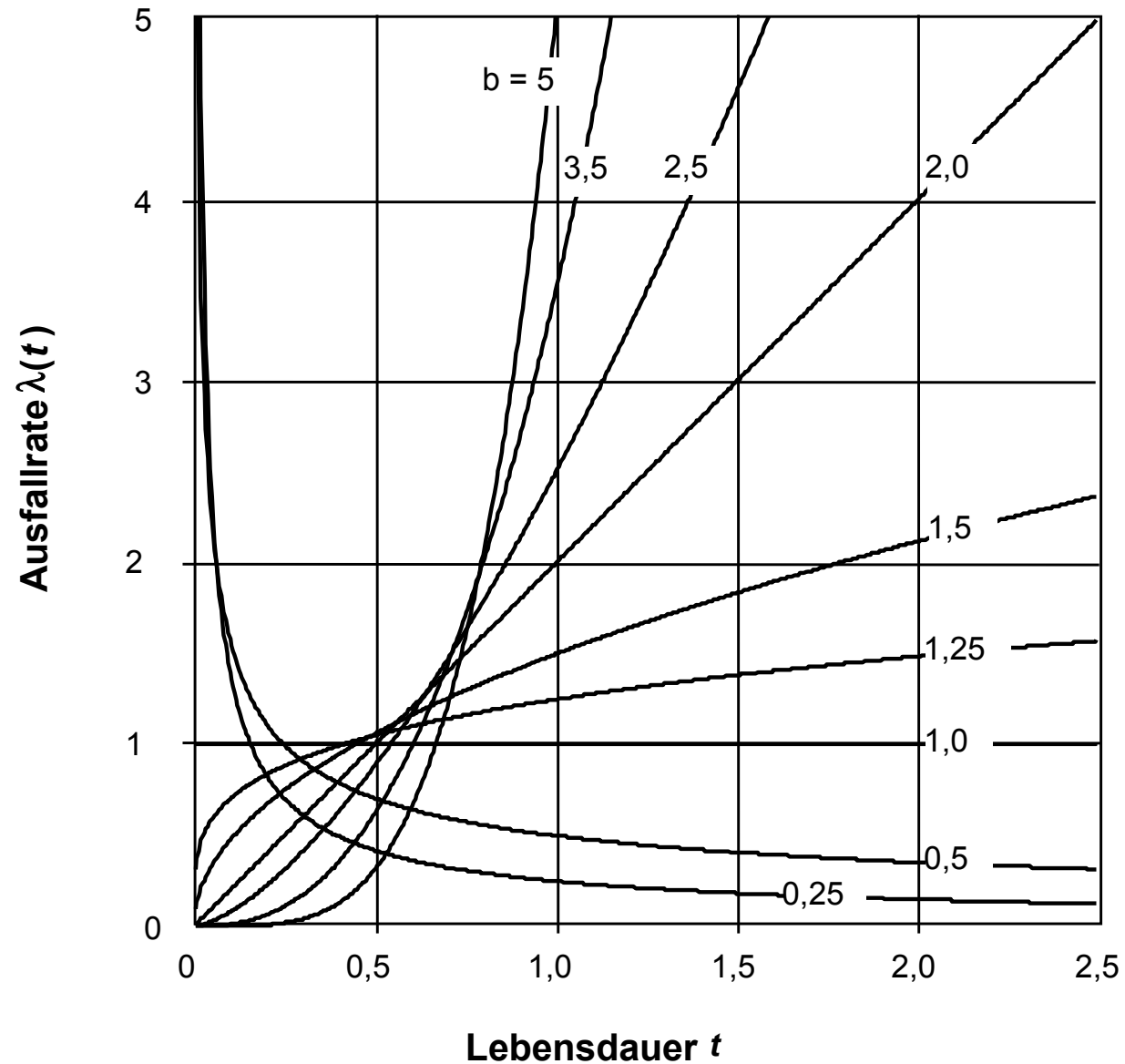
Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Weibull-Verteilung
für
unterschiedliche
Formparameter b
(Charakteristische
Lebensdauer $T = 1$,
ausfallfreie Zeit $t_0 = 0$)



Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Weibull-Verteilung
für
unterschiedliche
Formparameter b
(Charakteristische
Lebensdauer $T = 1$,
ausfallfreie Zeit $t_0 = 0$)



Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Dreiparametrische Weibull-Verteilung

Gleichungen der dreiparametrischen Weibull-Verteilung:

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

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

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

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

Parameter:

- Formparameter b (Ausfallsteilheit)
- Lageparameter T (charakteristische Lebensdauer, 63,2 % Ausfallwahrscheinlichkeit)
- t_0 ausfallfreie Zeit (Verschiebung der t-Achse)

Formeln der 3-parametrischen Weibull-Verteilung

2 Parameter $\xrightarrow{\quad}$ $\begin{matrix} T & \boxed{\times} & T-t_0 \\ t & \boxed{\times} & t-t_0 \end{matrix}$ $\xrightarrow{\quad}$ 3 Parameter

Überlebenswahrscheinlichkeit: $R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$

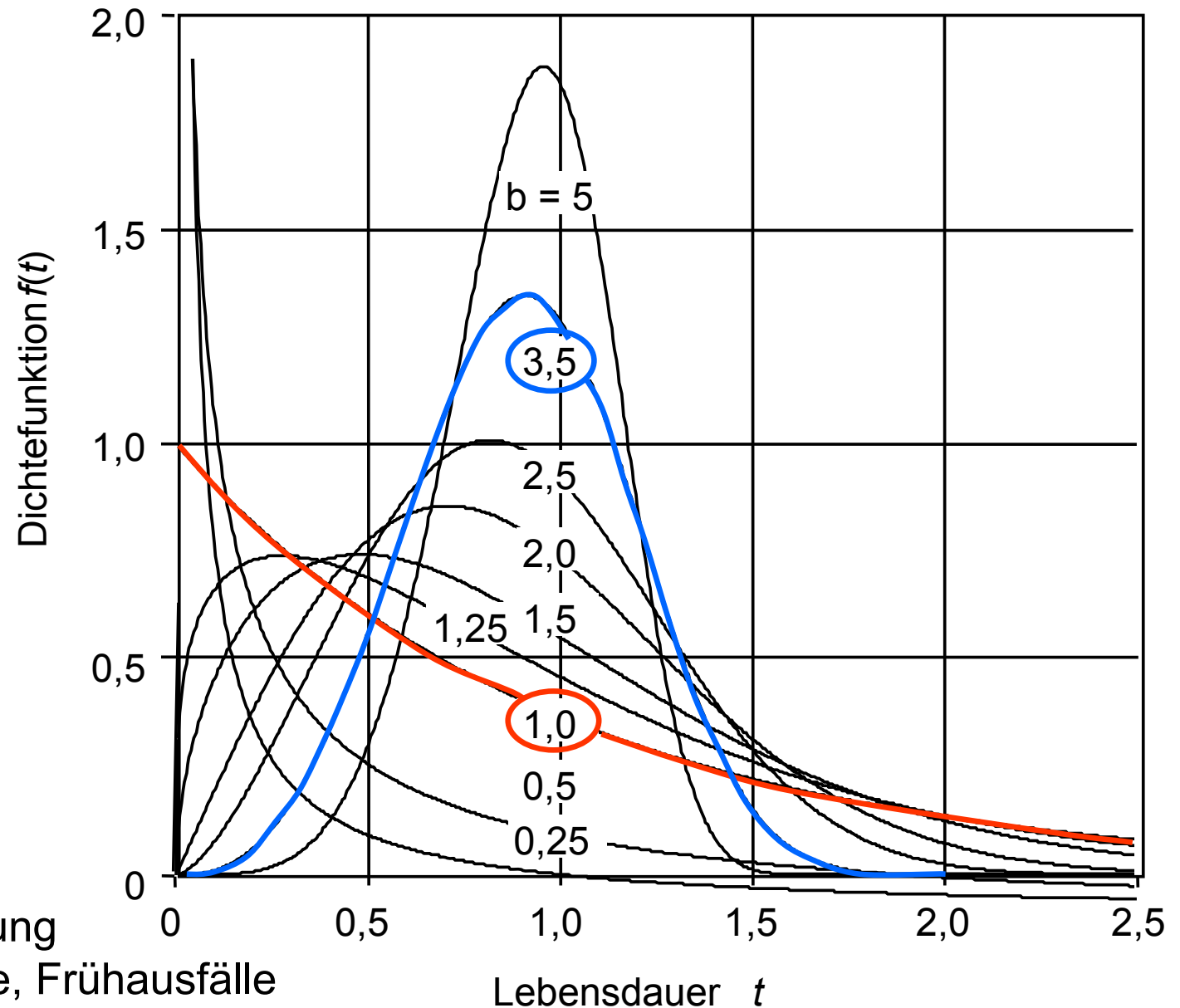
Ausfallwahrscheinlichkeit: $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$

Dichtefunktion: $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T-t_0} \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$

Ausfallrate: $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1}$

Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Sonderfälle der Weibull-Verteilung:



$b = 1$ Exponentialverteilung

$b < 1$ fallende Ausfallrate, Frühausfälle

$b > 1$ steigende Ausfallrate, Spätausfälle

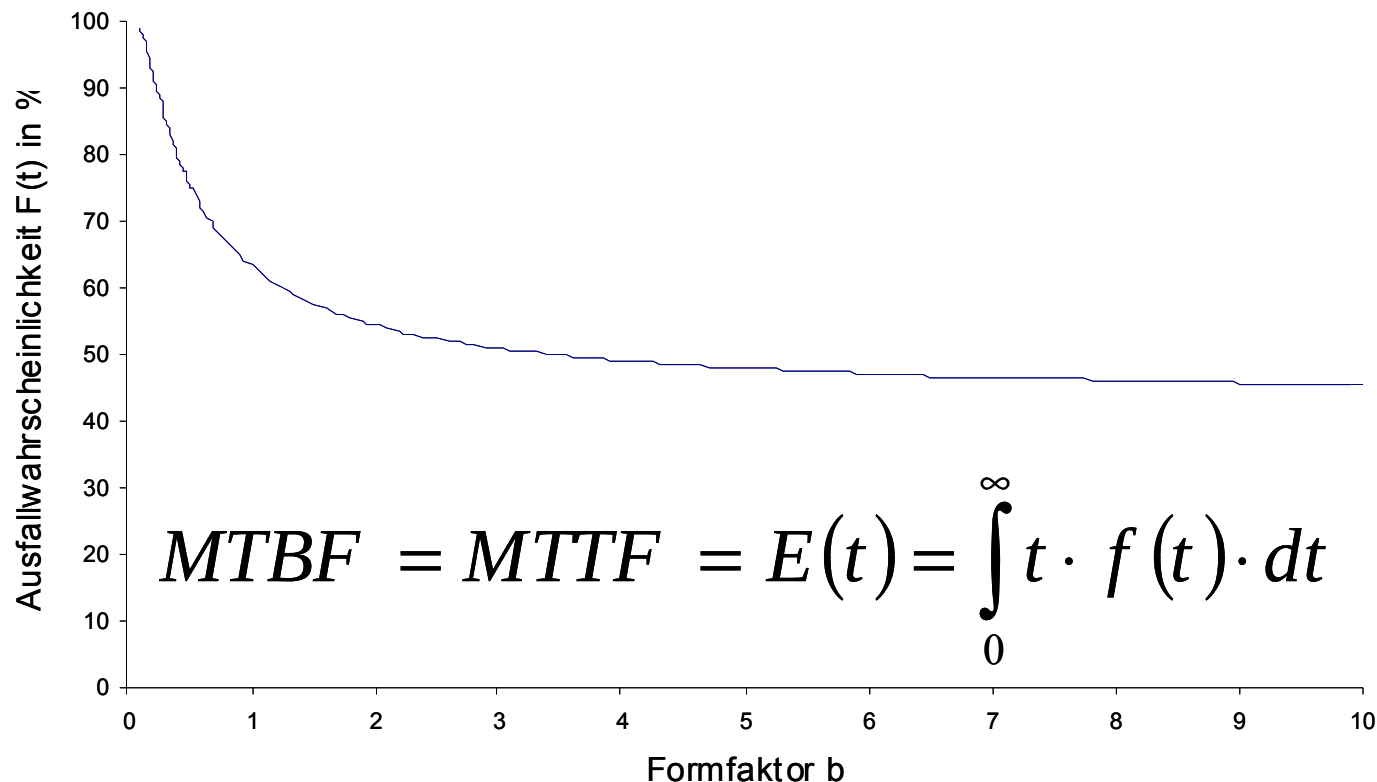
$b = 3,25 \dots 3,5$ angenäherte Normalverteilung

Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Erwartungswert der Weibull-Verteilung:

Im Gegensatz zur Exponentialfunktion ist der Erwartungswert bzw. der MTBF-Wert für die Weibull-Verteilung nur im Spezialfall $b = 1$ (Exponentialfunktion) gleich der charakteristischen Lebensdauer T .

Der MTBF-Wert ist bei anderen Formparametern b als Erwartungswert demzufolge mit anderen Ausfallwahrscheinlichkeiten verknüpft.



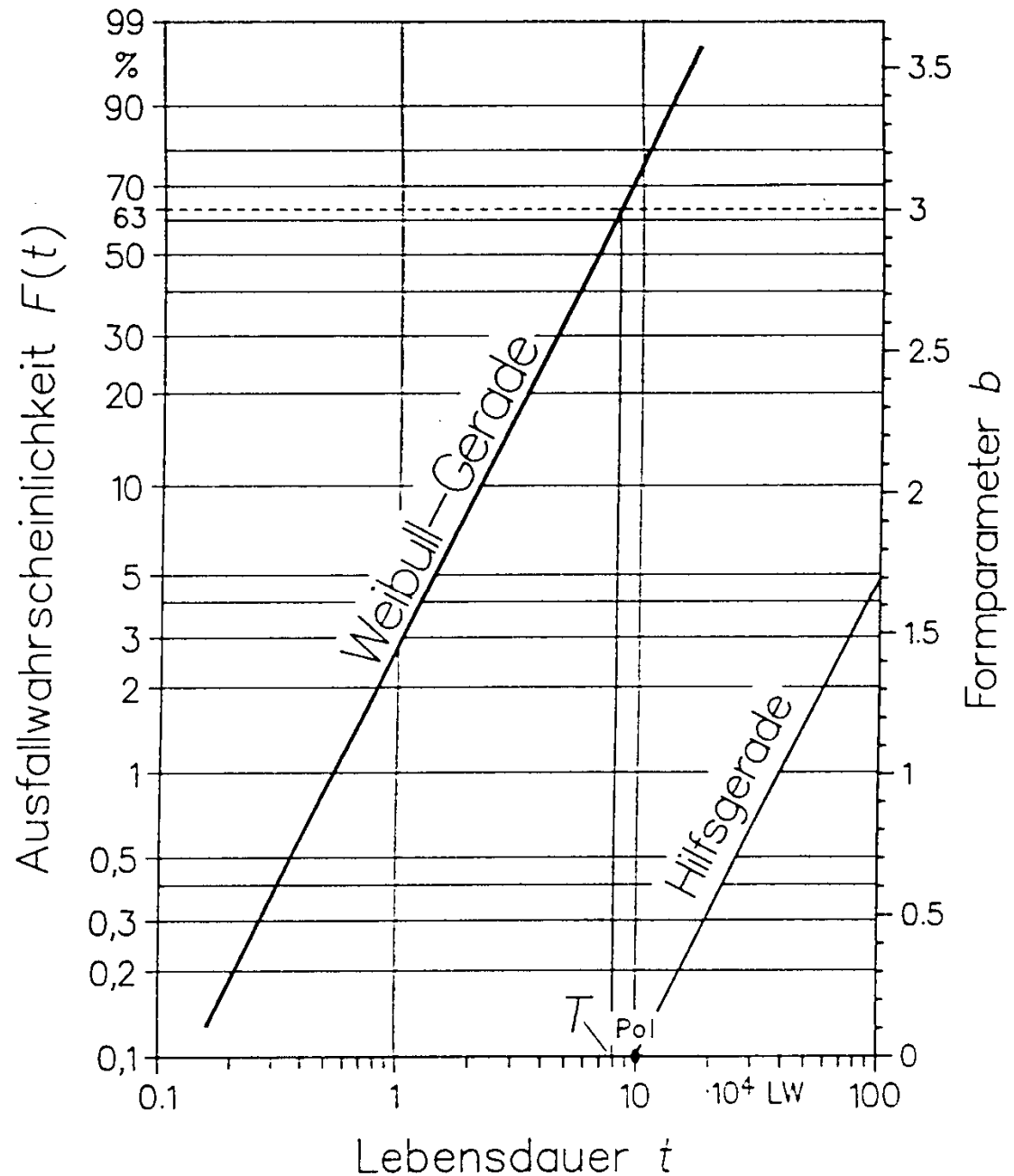
Wahrscheinlichkeitsnetz für Weibull-Verteilungen:

Diese zunächst äußerst komplizierte Verteilung kann mittels eines speziellen Wahrscheinlichkeitsnetzes vergleichsweise leicht gehandhabt werden und ermöglicht dann eine getrennte Ermittlung der Parameter b und T ,

wenn beispielsweise eine zweiparametrische Weibull-Verteilung dargestellt wird in der Form

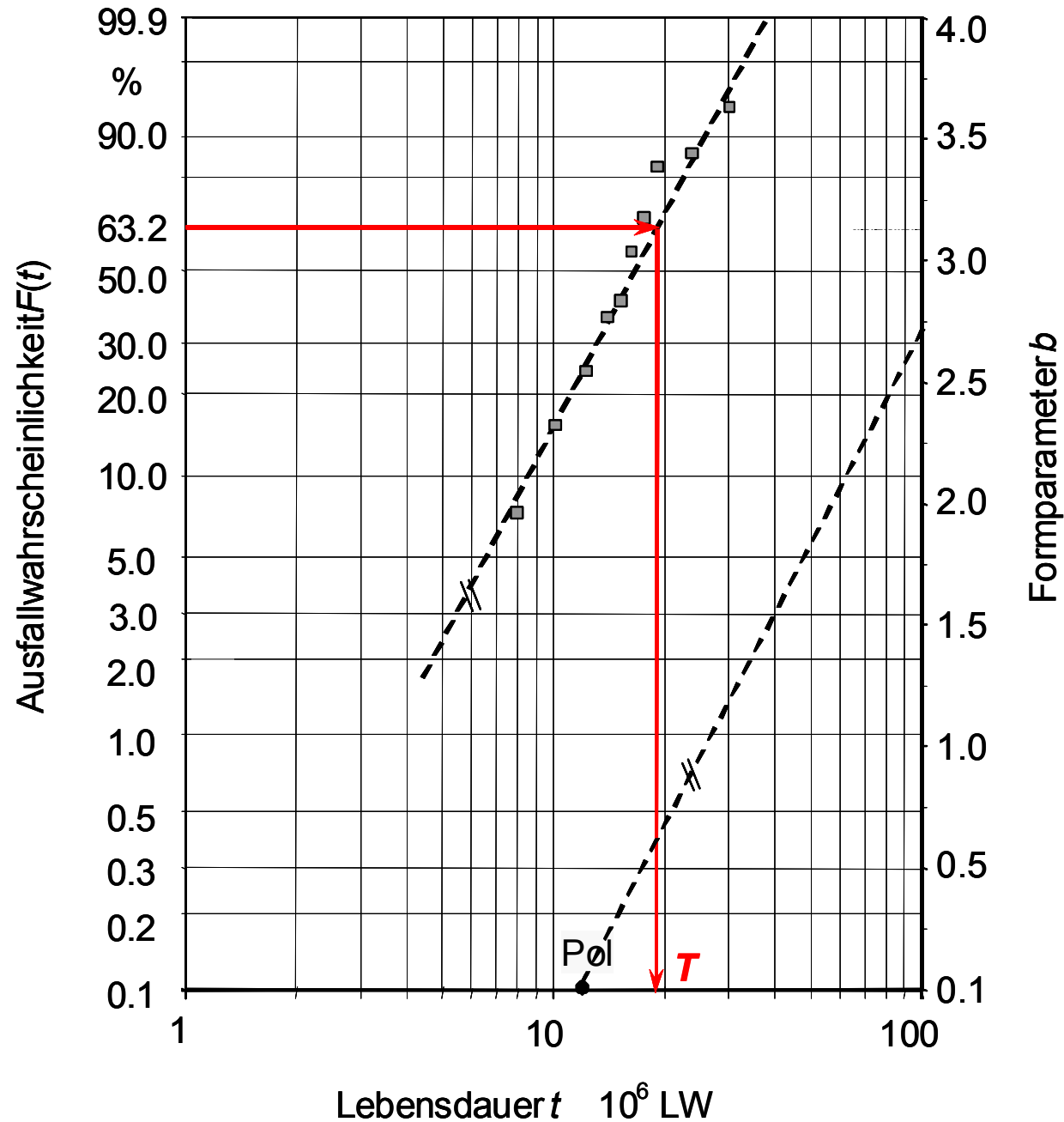
$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = b \ln t - b \ln T.$$

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



Ermittlung einer Weibull-Ausgleichs-Gerade im Wahrscheinlichkeitsnetz:

- Auftragen von Ausfallzeiten und zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten im Wahrscheinlichkeitsnetz
- Zeichnen einer Ausgleichsgeraden
- Ablesen der charakteristischen Lebensdauer T an der Stelle der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(T) = 63,2 \%$
- Verschieben der Ausgleichsgeraden durch den Pol
- Ablesen des Formparameters b als Achsenschnittpunkt



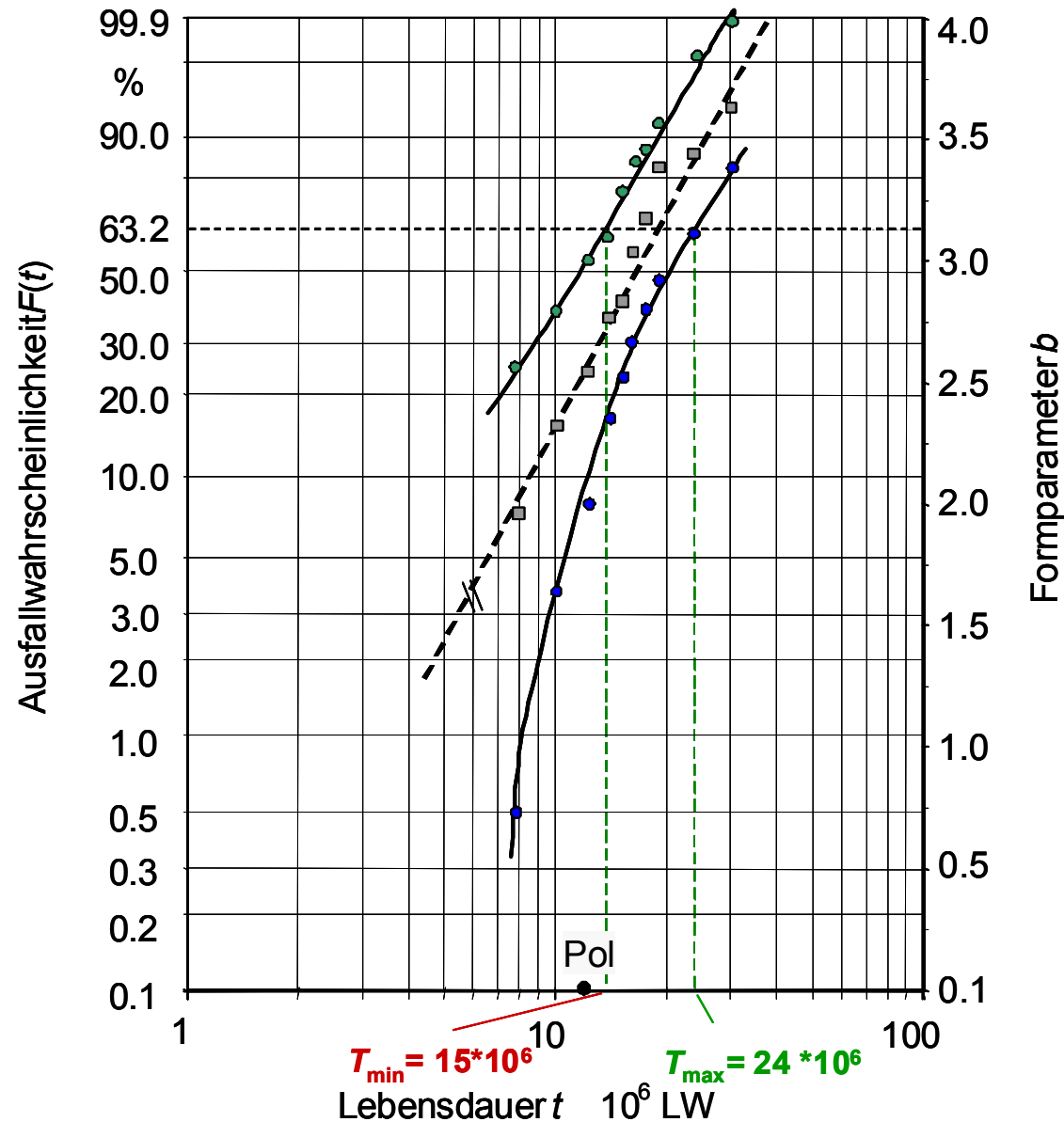
Weibull-Ausgleichs-Gerade und Ermittlung der Parameter T und b beispielhaft, nach /31/ bzw.
 Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

Neben den reinen Kennlinien ist die Angabe von **Vertrauensbereichen** hilfreich. Diese beziehen die Streuungen der Größen mit ein.

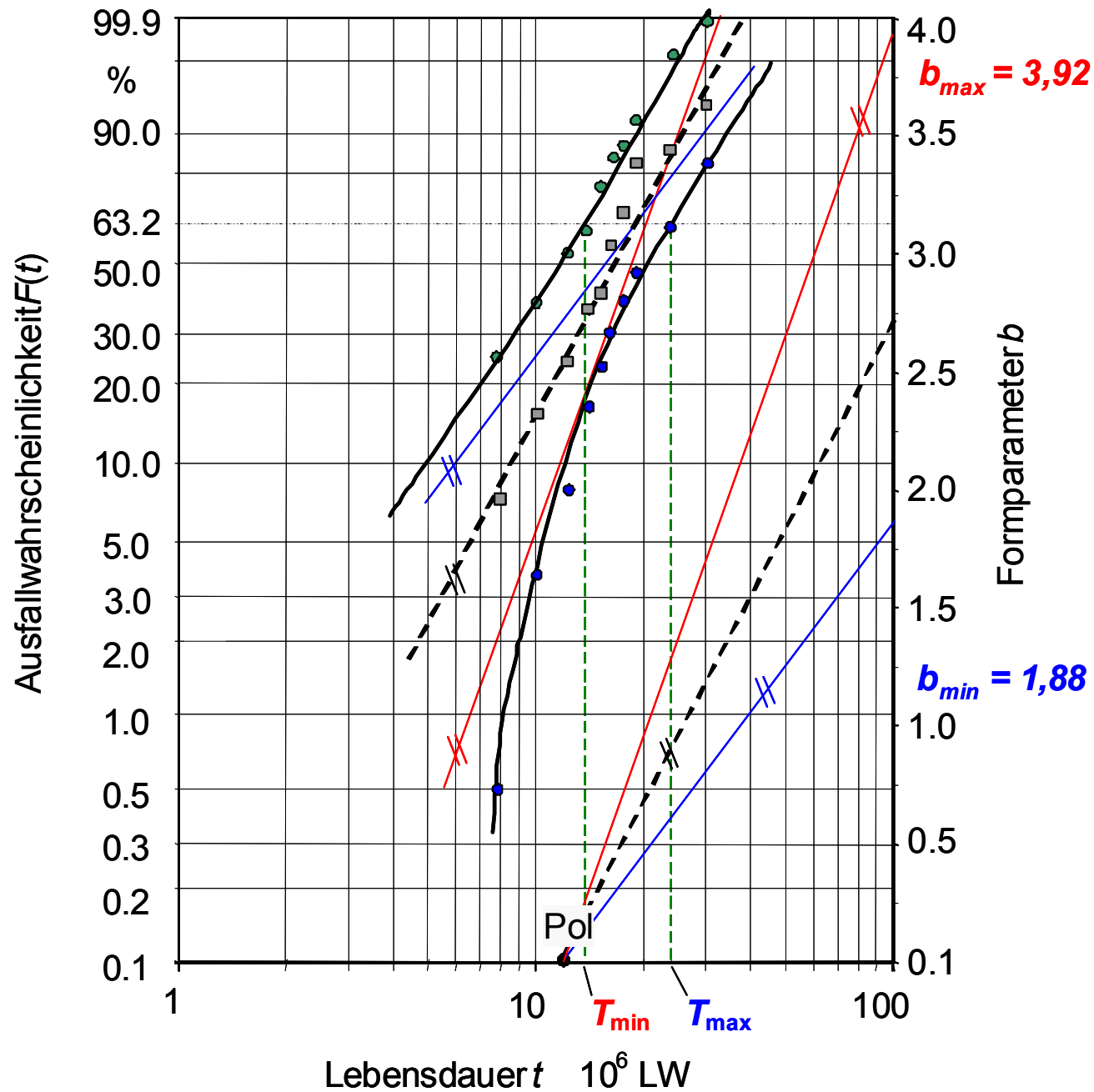
Typischerweise wird der **90 % Vertrauensbereich** angegeben. Außerhalb der Grenzen liegen zu jeder Seite hin 5 % der Ausfälle oberhalb bzw. unterhalb dieses Bereiches.

Ausgehend von den Vertrauensbereichen lassen sich dann auch **Schwankungsbereiche der Formparameter b bzw. der Lebensdauer T** ablesen.

Weibull-Gerade mit Vertrauensbereichen:



Vertrauensbereich mit Minimal- und Maximalwerten von T beispielhaft, nach /31/ bzw. Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart



Vertrauensbereich mit Minimal- und Maximalwerten von T und b beispielhaft, nach /31/ bzw.
 Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

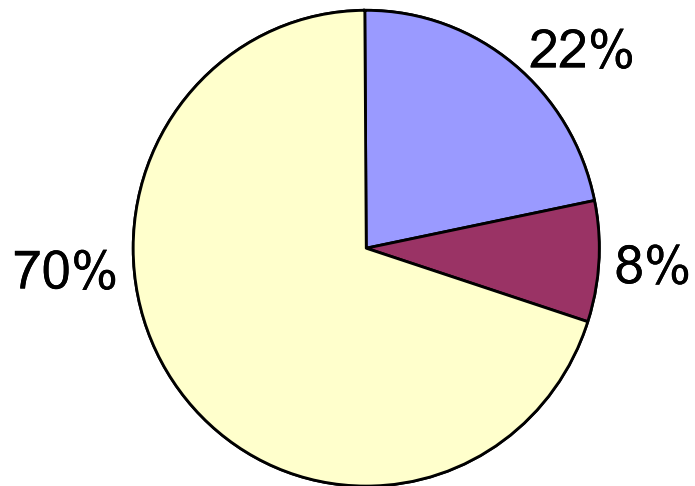
Zur Frage der Verfügbarkeit der genannten Parameter:

- In der Praxis sind bei weitem nicht alle Kennwerte verfügbar
- Es werden teilweise nur ganz lückenhafte Aussagen veröffentlicht, beispielsweise wird eine B_1 oder B_{10} Lebensdauer angegeben oder eine Lebensdauer T , ohne diese hinsichtlich der Zuverlässigkeit zu spezifizieren oder t_m oder t_0 oder MTTF- bzw. MTBF-Wert.

**Einschub:
Unsicherheiten bei der Verwendung von
Zuverlässigkeitskenngrößen
beispielhaft**

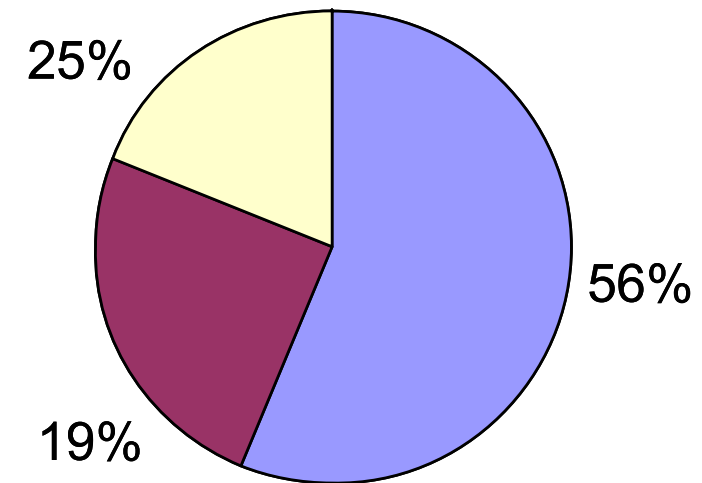
Recherche zu Lebensdauerangaben für DC-Motoren

Katalogrecherche zu Lebensdauerangaben
von bürstenbehafteten DC-Motoren
(53 Hersteller von Kleinantrieben)



- Angabe konkreter Zahlenwerte für die Lebensdauer
- allgemeine Aussagen zur Lebensdauer / keine konkreten Daten
- keinerlei Aussagen zur Lebensdauer

Telefonbefragung zum Bezug der
genannten Lebensdauerangaben
(16 Hersteller)

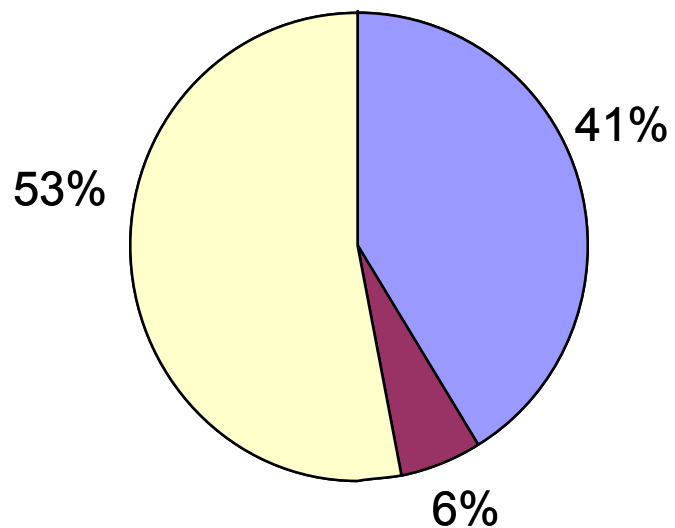


- ausfallfreie Zeit
- MTBF-Wert / durchschnittliche Lebensdauer
- keine Angabe / Schätzwert

Recherche zu Lebensdauerangaben für EC-Motoren

Katalogrecherche zu Lebensdauerangaben
von EC-Motoren

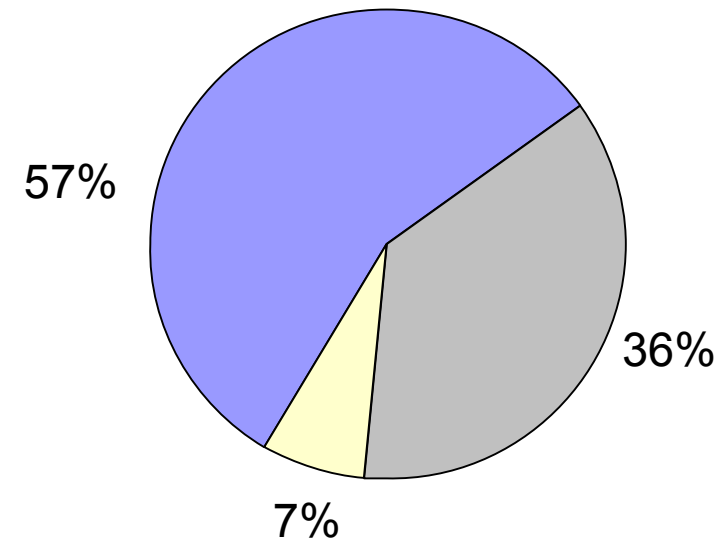
(35 Hersteller von Kleinantrieben)



- Angabe konkreter Zahlenwerte für die Lebensdauer
- allgemeine Aussagen zur Lebensdauer / keine konkreten Daten
- keinerlei Aussagen zur Lebensdauer

Telefonbefragung zum Bezug der
genannten Lebensdauerangaben

(16 Hersteller)

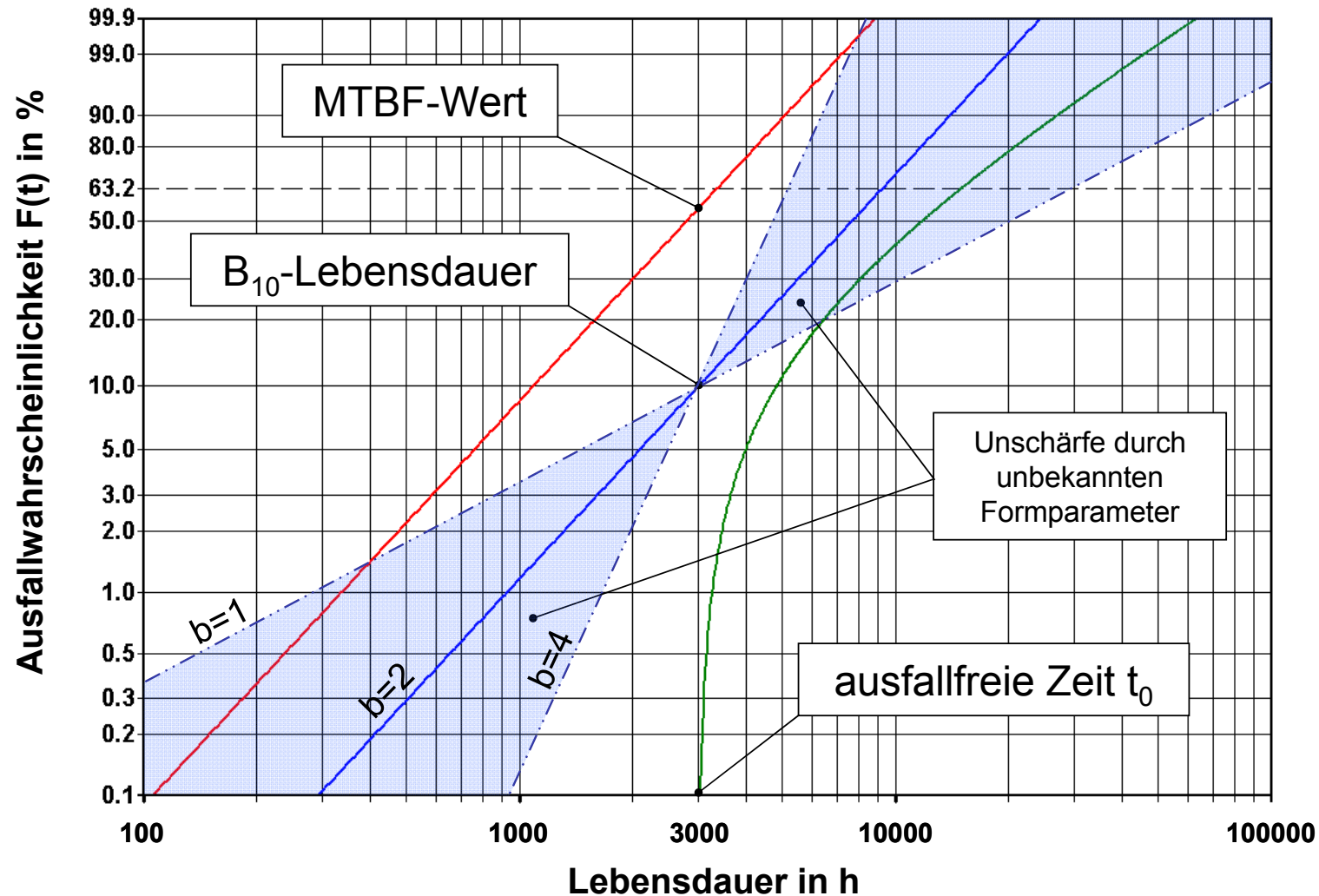


- ausfallfreie Zeit
- MTBF-Wert / durchschnittliche Lebensdauer
- keine Angabe / Schätzwert
- B₁₀-Lebensdauer

Katalogangabe:

Lebensdauer 3000h bei Dauerbetrieb

Interpretationsmöglichkeiten:



Ausfallfreie Zeit t_0 :

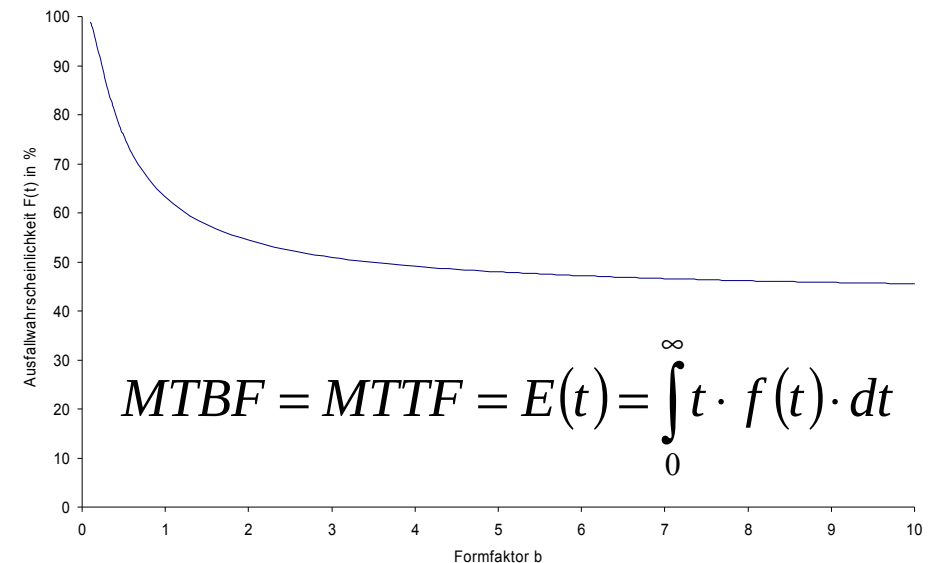
- exakt definierter Kennwert, komplett unabhängig von der Verteilungsfunktion
- kein Einfluss der Geradensteigung
- 100%-Garantie von Seiten des Herstellers kritisch zu sehen

B_{10} -Wert bzw. B_1 -Wert: (möglicher Kompromiss zwischen Hersteller und Kunde)

- exakt definierter Kennwert, bedingt abhängig von der Verteilungsfunktion
- Einfluss der Geradensteigung deutlich geringer
- experimentelle Ermittlung weniger zeitintensiv durch zensierte Teststrategien

MTBF-Wert:

- stark von der Form der Verteilungsfunktion abhängig
- Missbrauch der ursprünglichen Definition
- sehr geringe Aussagekraft, Steigung der Ausfallgerade hat starken Einfluss



Exponentialverteilung

Ausfallwahrscheinlichkeit:

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

Dichtefunktion:

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

2-parametrische Weibullverteilung

Ausfallwahrscheinlichkeit:

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

Dichtefunktion:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

3-parametrische Weibullverteilung

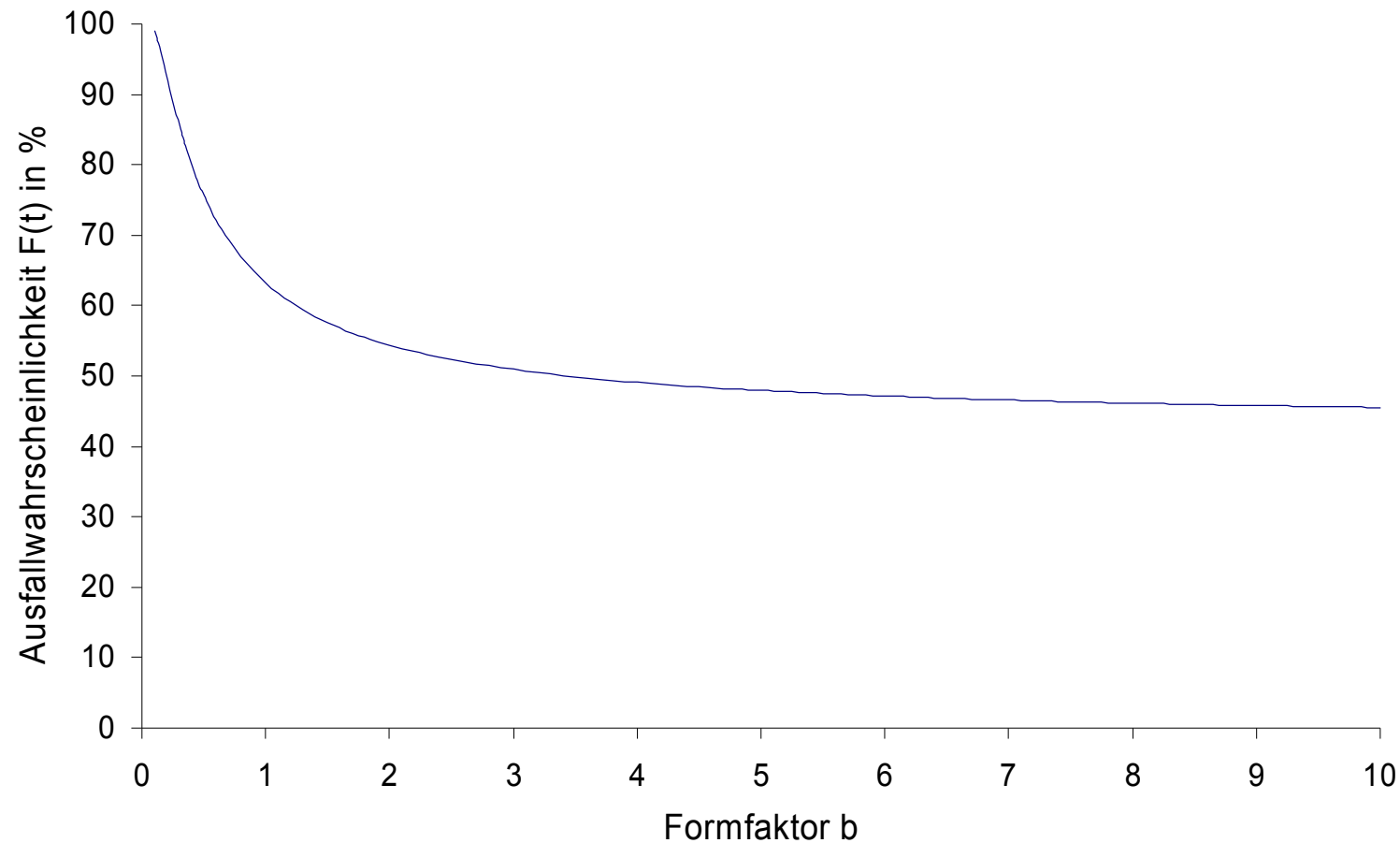
Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$$

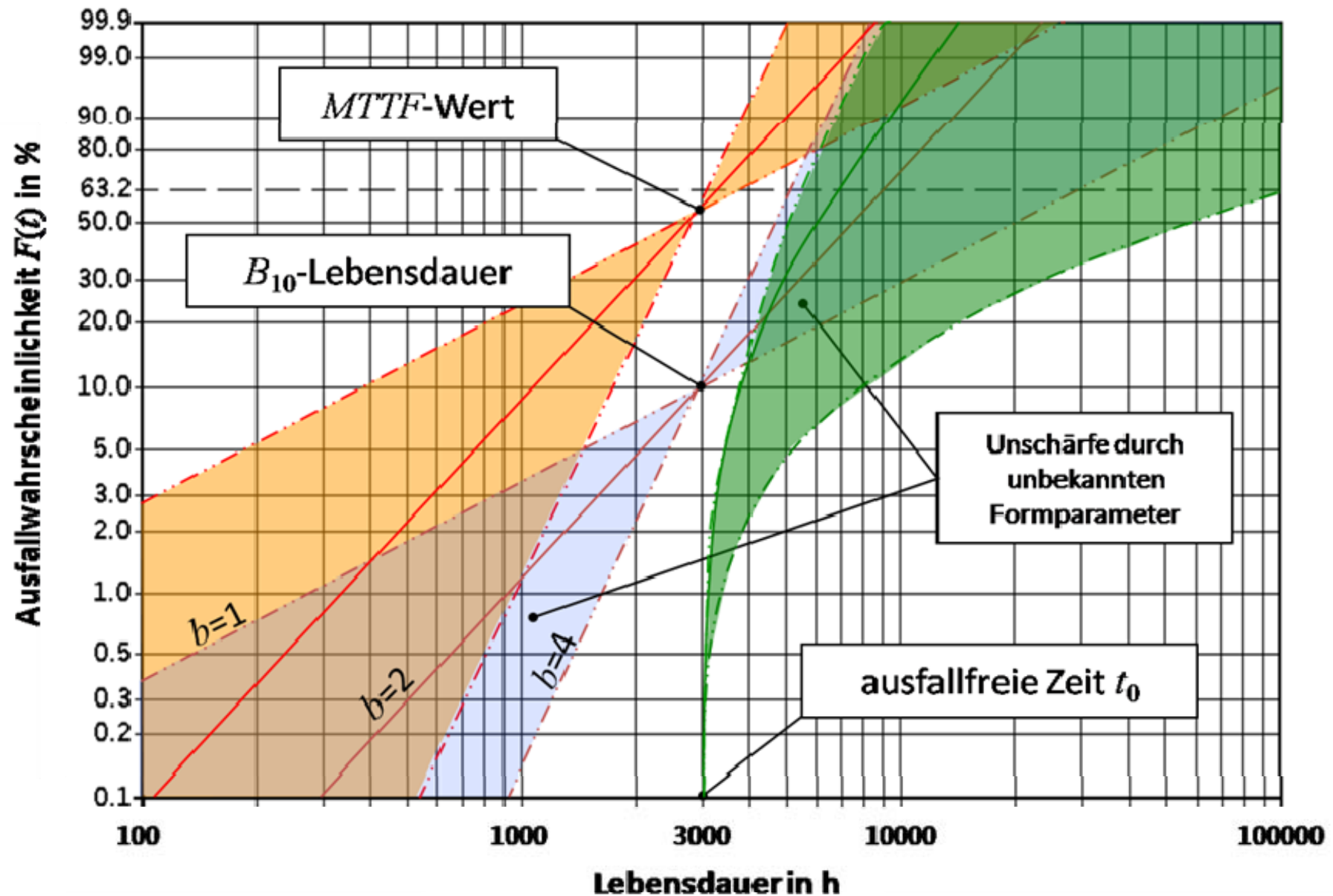
Dichtefunktion:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T-t_0} \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$$

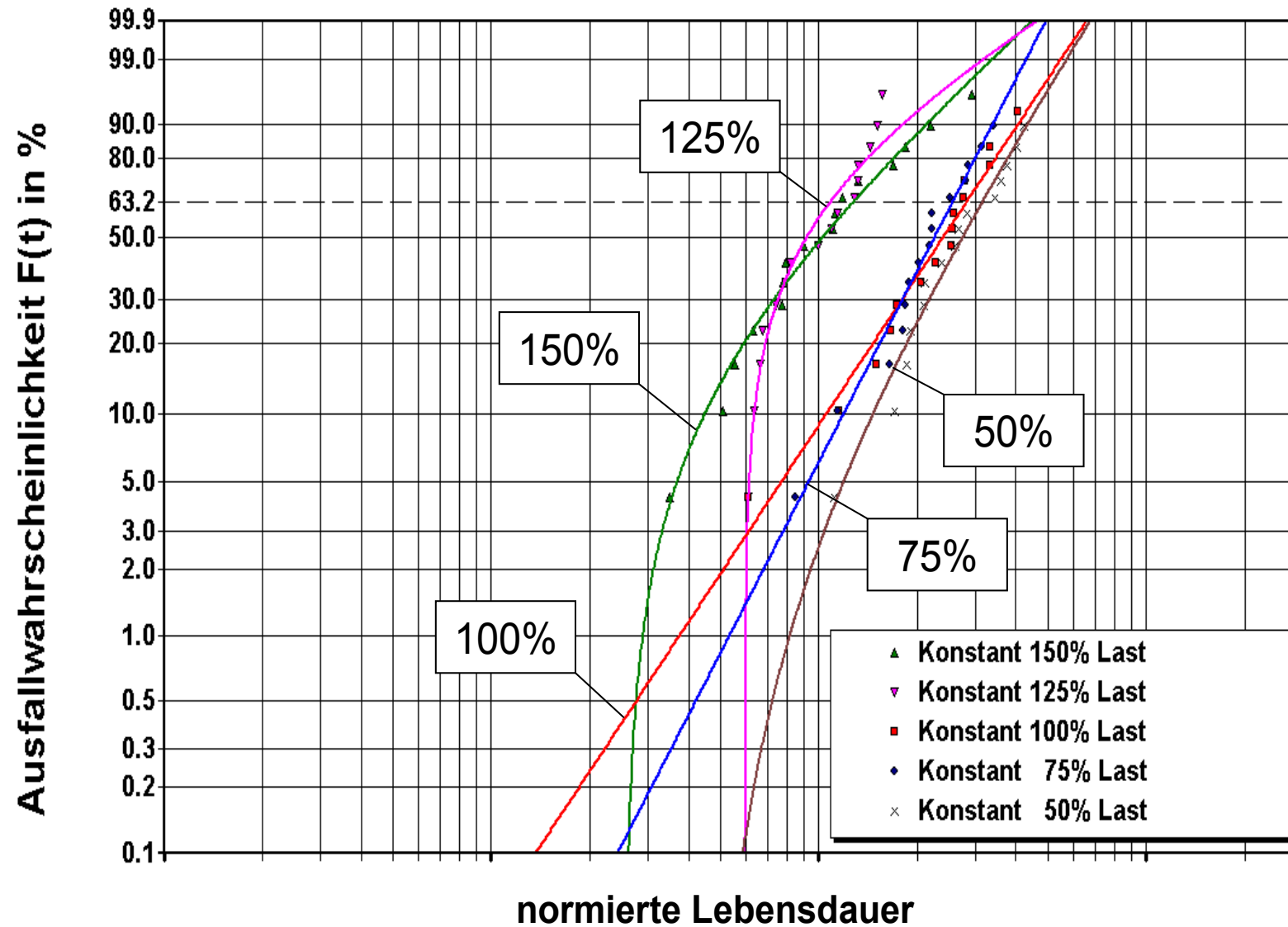
Bezugsquantil des MTBF-Wertes in Abhängigkeit des Formparameters b



Lebensdauer 3000 h, Interpretationsmöglichkeiten

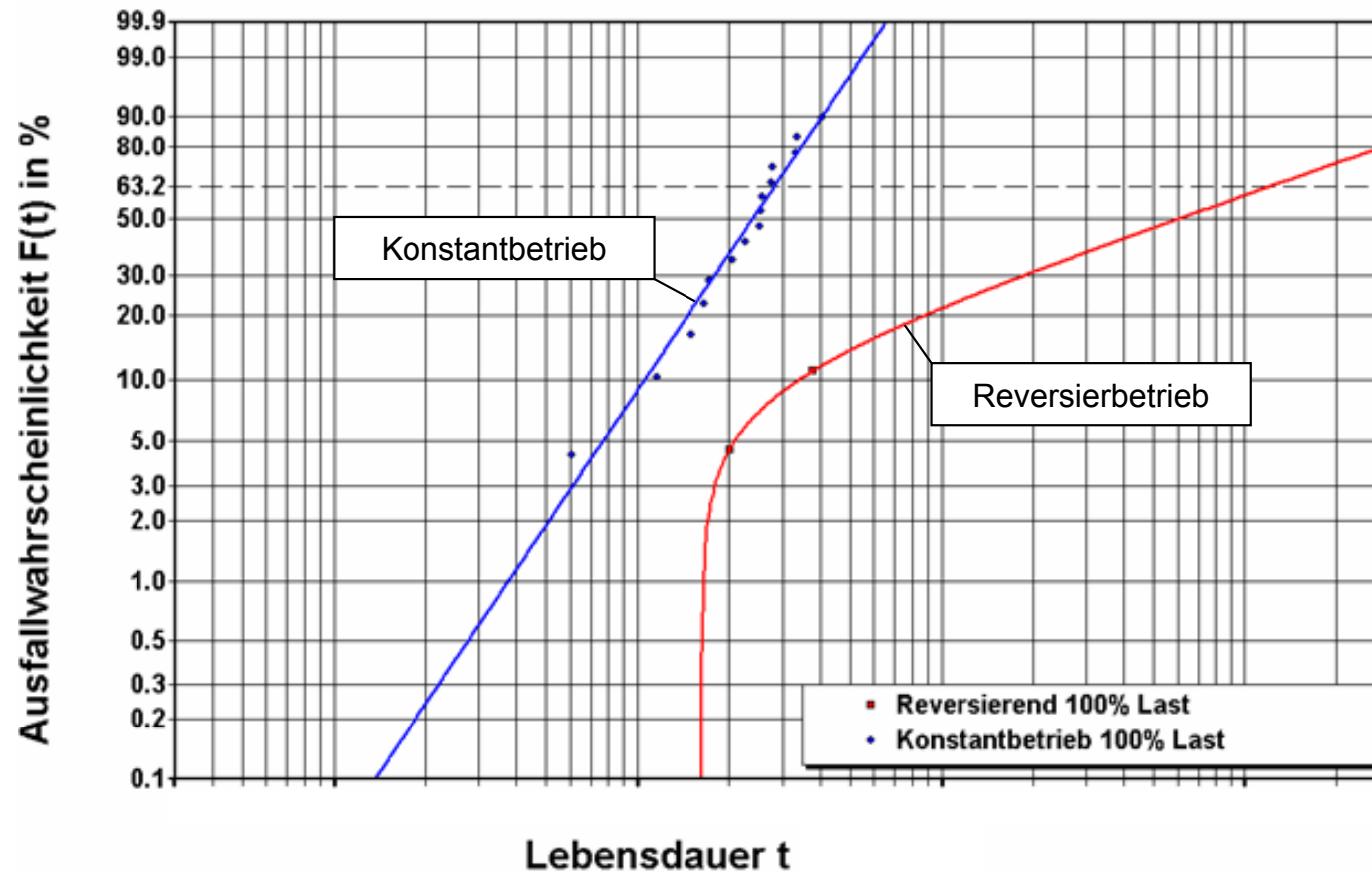


Weibullnetz

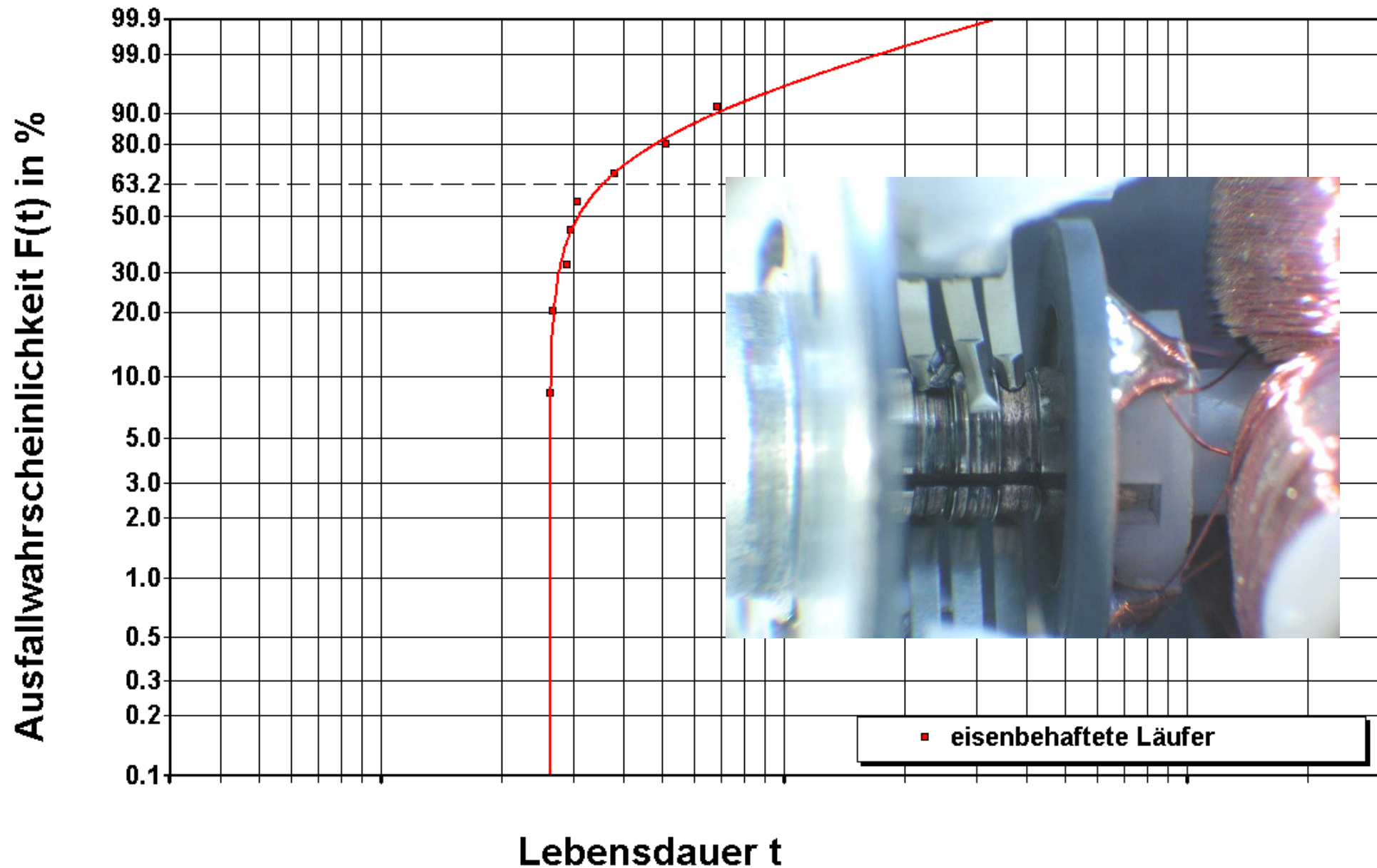


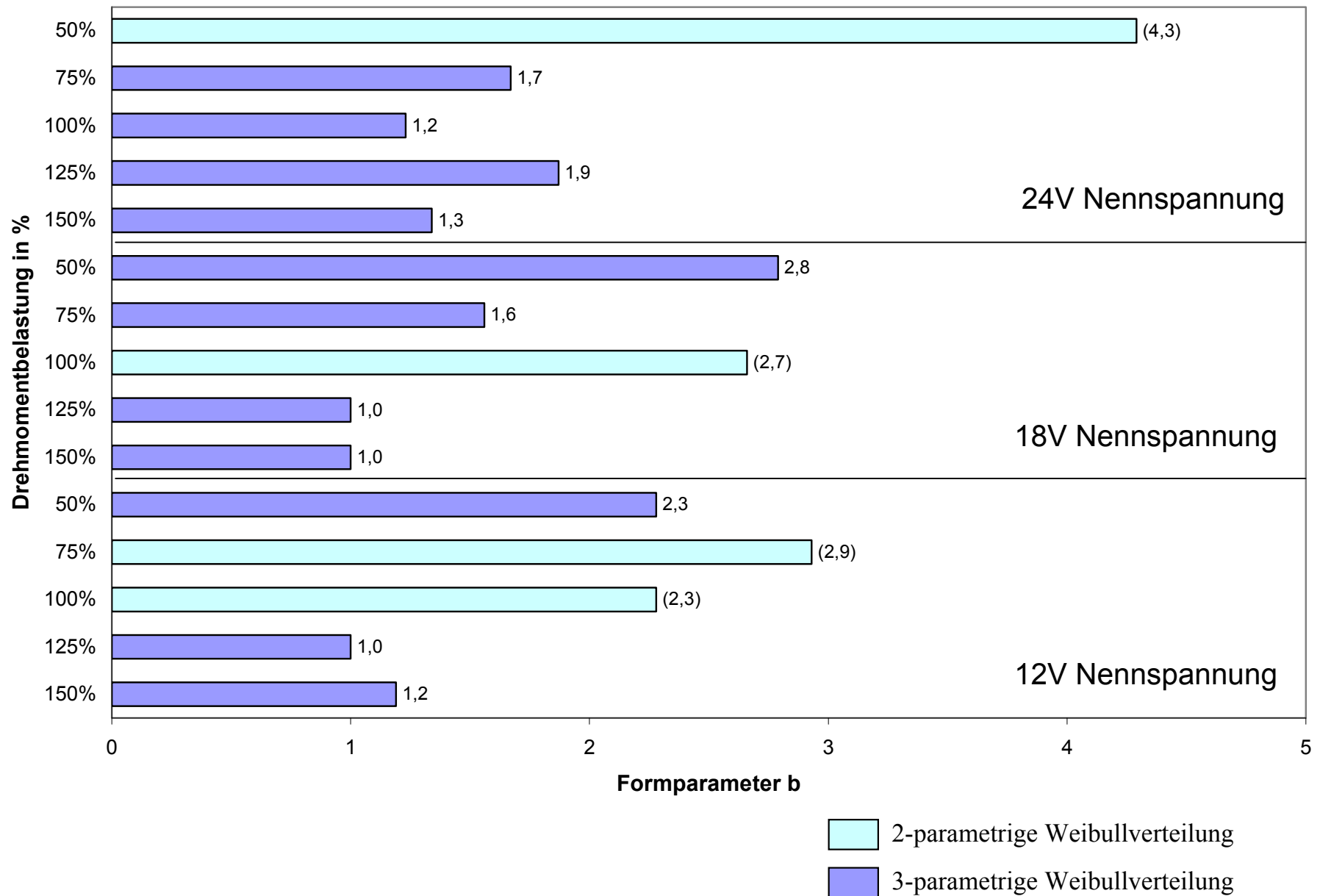
Jeweils 16 Motoren wurden bei identischer Last geprüft

- 15 von 16 Motoren nach 4000h im Konstantbetrieb ausgefallen
- 2 von 16 Motoren nach 4000h im Reversierbetrieb ausgefallen



Büstenverschleiß bei Edelmetallbürsten mit größeren Abmessungen

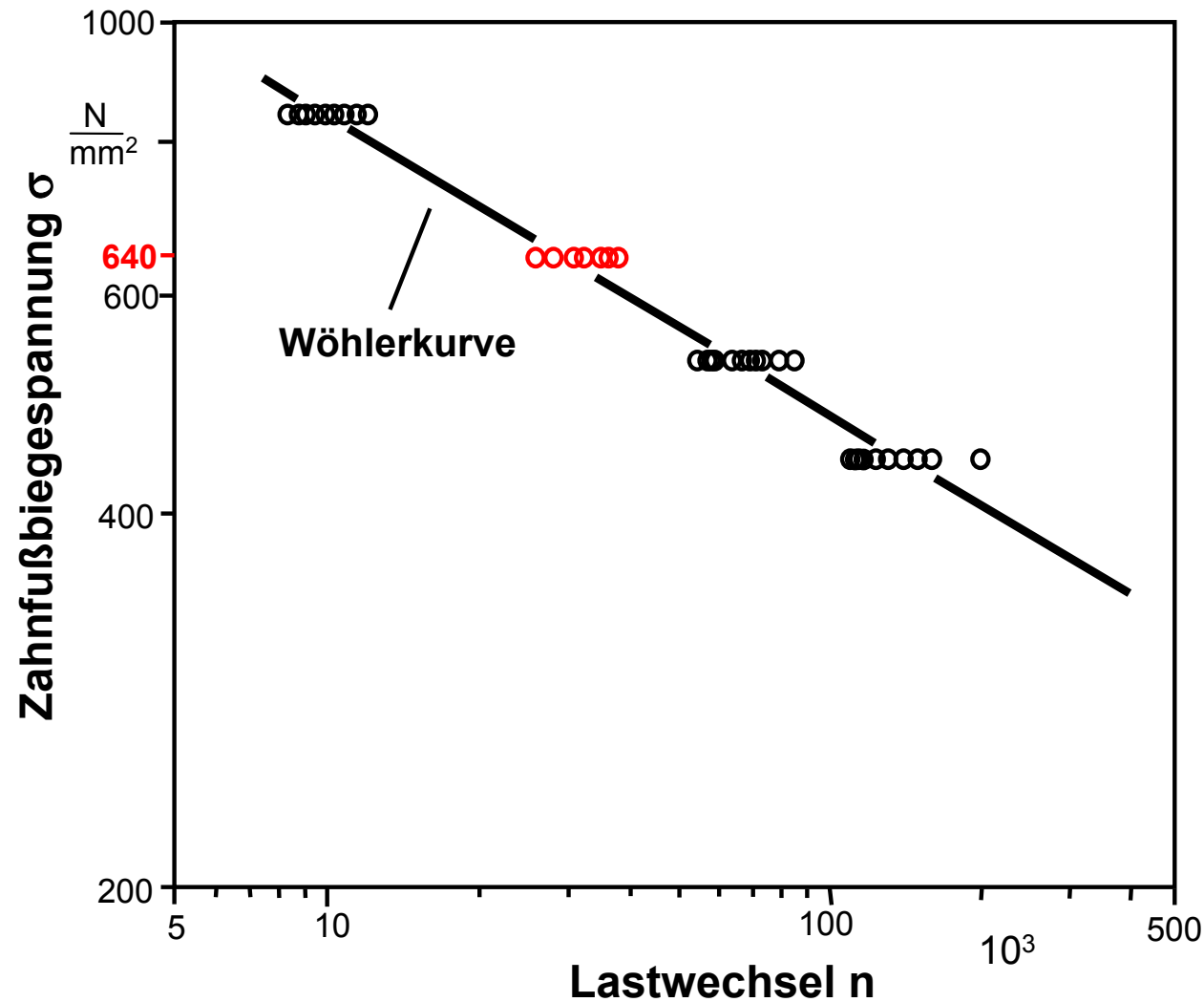




Ermittlung der Verteilungsfunktionen aus Versuchsdaten

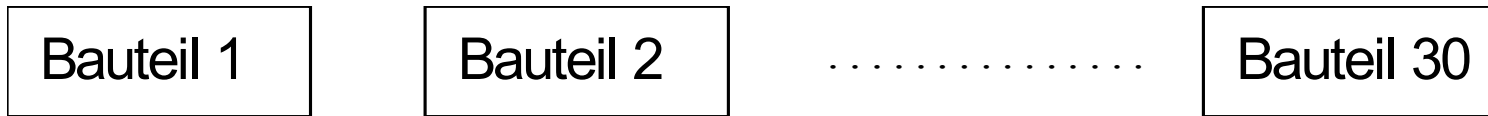
**Zur Frage der Auswertung statistischer Versuche
und Ermittlung der Verteilungsfunktionen aus Versuchsdaten
in Form von Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen
und deren Unsicherheiten**

Zahnbruch Wöhlerversuch mit Streuung der Ausfallzeiten



Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Stichprobe vom Umfang $n = 30$ Bauteile:



Nach Lebensdauerversuch:

Ausfallzeiten: $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{29}, t_{30}$; $t_i < t_{i+1}$;

z.B. $t_1 = 100.000 \text{ LW}$, ... $t_5 = 400.000 \text{ LW}$, ... $t_{30} = 3.000.000 \text{ LW}$.

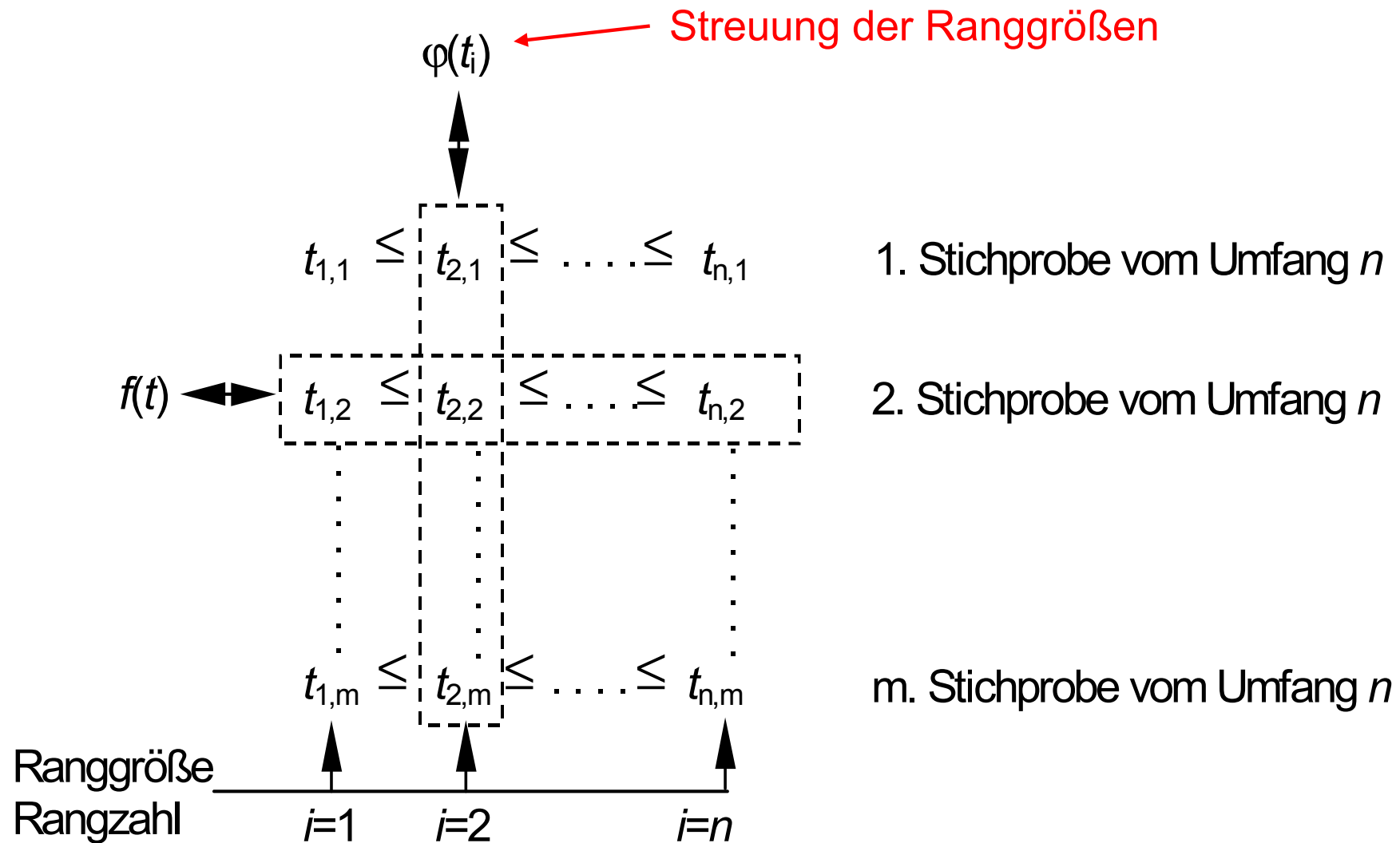
Ranggrößen

Rangzahl

1. Teil	→	1/30 der Stichprobe ausgefallen	→	$F(t) = 1/30 = 3,3 \%$
1.+2. Teil	→	2/30 der Stichprobe ausgefallen	→	$F(t) = 2/30 = 6,7 \%$

Oder $t_1 = \quad ??? \text{ LW}$, ... $t_5 = \quad ??? \text{ LW}$, ... $t_{30} = \quad ??? \text{ LW}$.

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)



Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

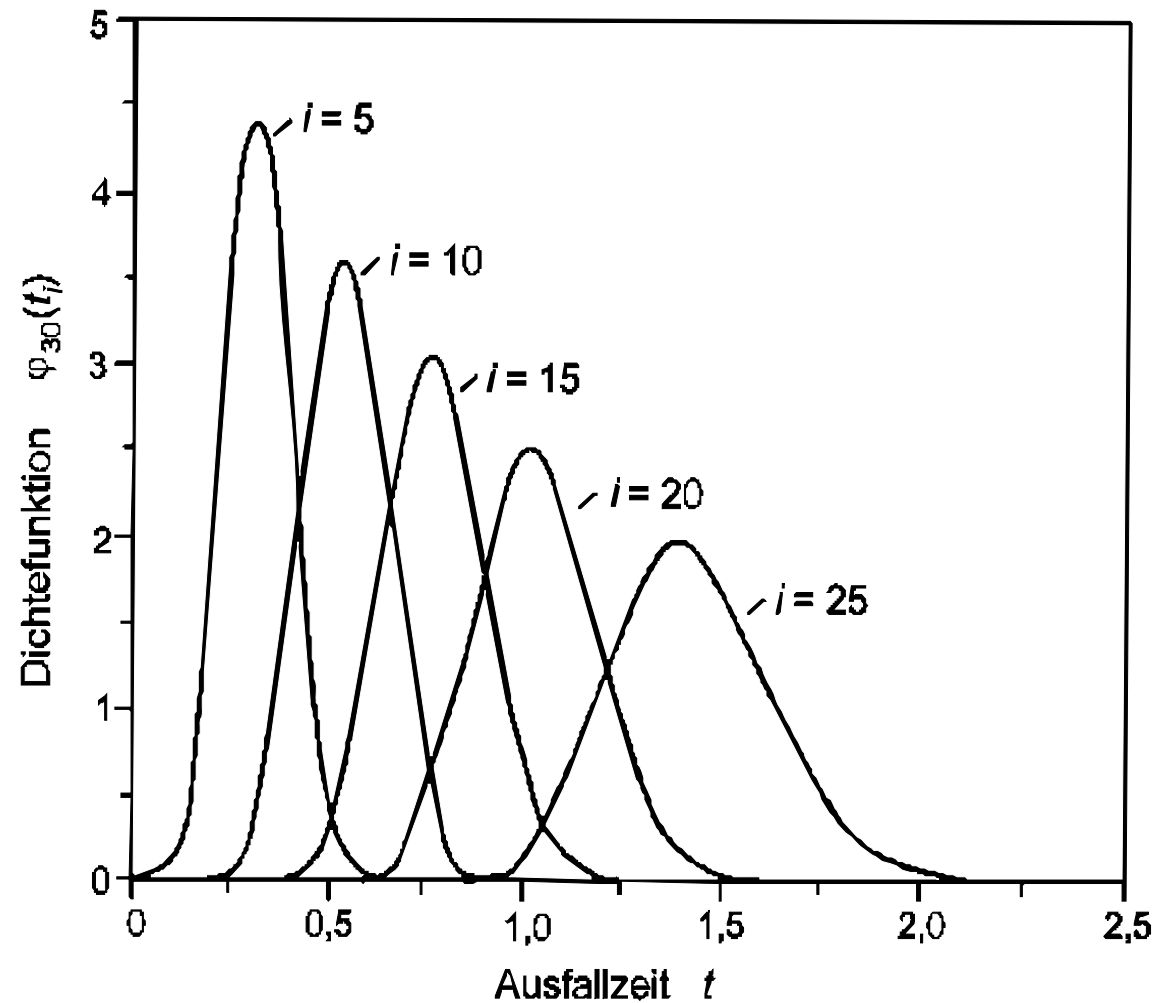
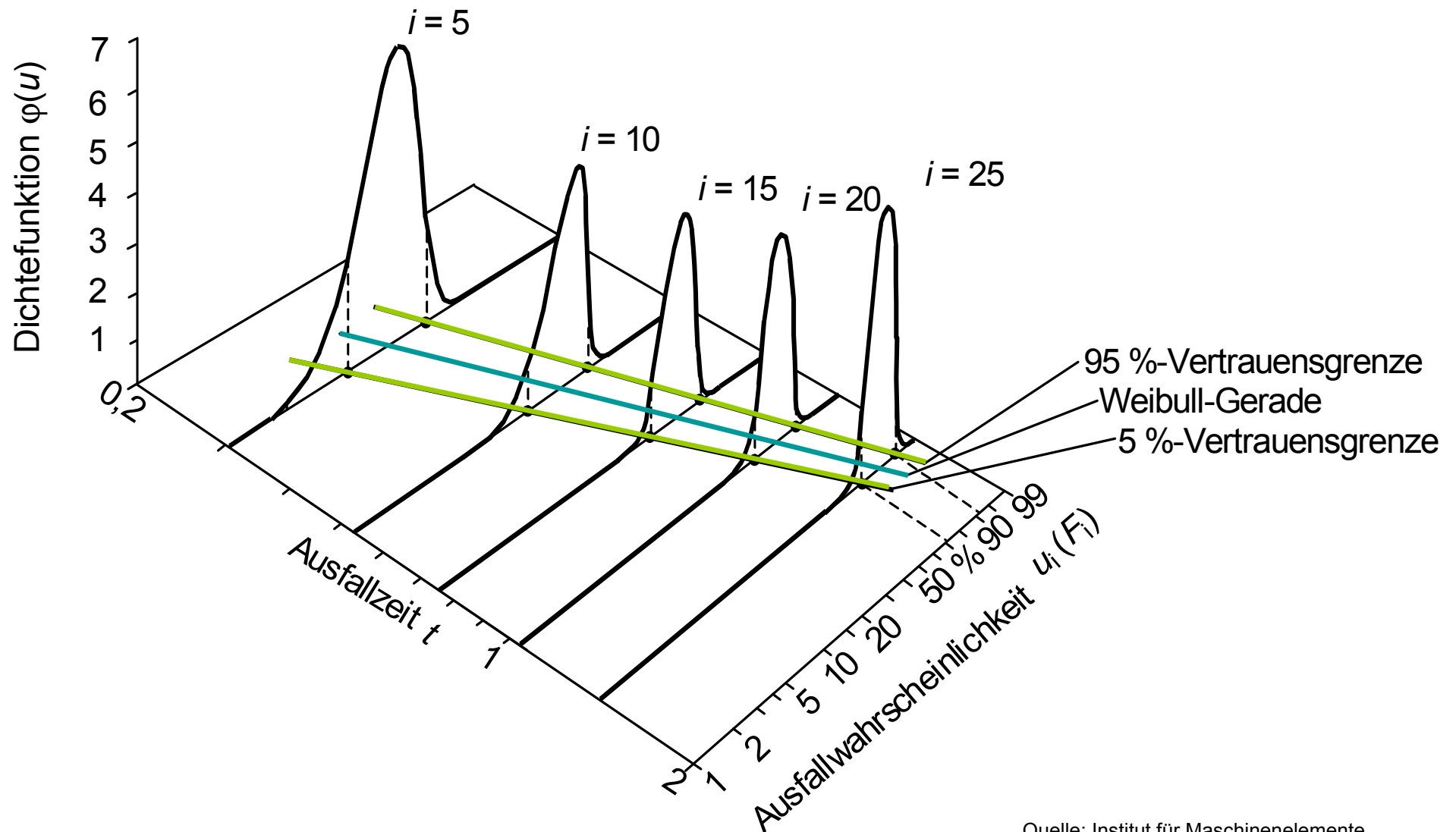


Abb. 6.4. Dichtefunktionen der i -ten Ranggrößen in einer Stichprobe vom Umfang $n = 30$ (Ausgangsverteilung: zweiparametrische Weibullverteilung mit $b = 1,5$ und $T = 1$)

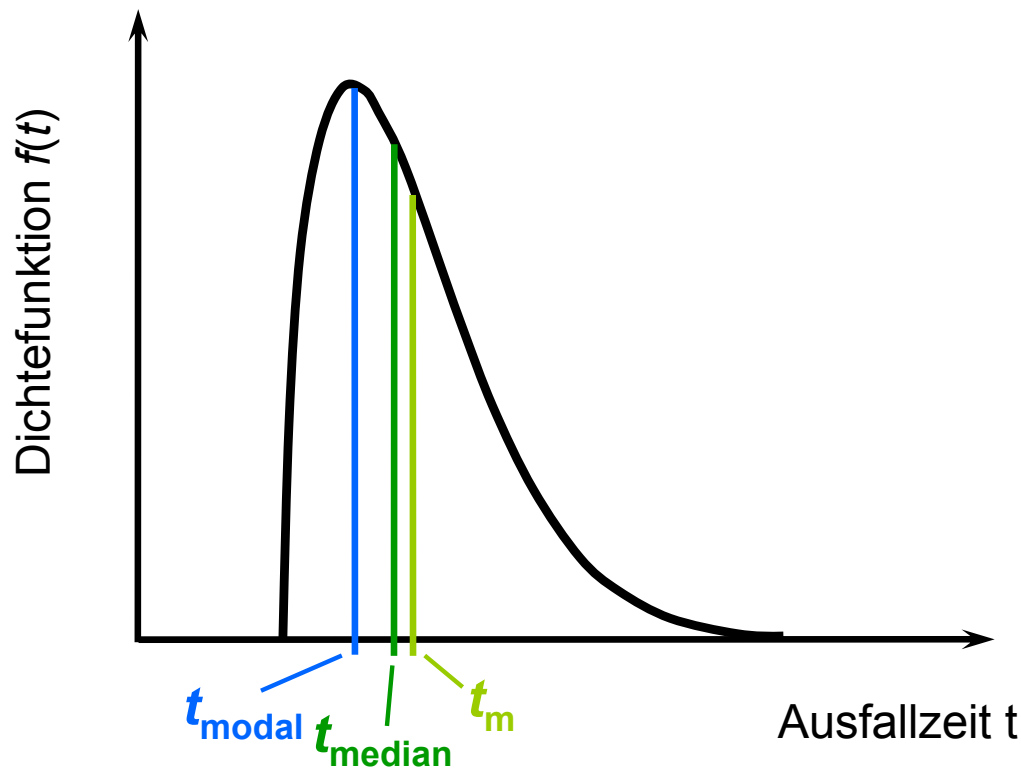
Quelle: B. Bertsche, G. Lechner: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau

Dichtefunktionen der Ranggrößen-Ausfallwahrscheinlichkeiten und ihre 90%-Vertrauensbereiche



Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Statistische Maßzahlen an Dichtefunktionen



arithmetischer Mittelwert:

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

Median:

$$F(t_{\text{median}}) = 0,5$$

Modalwert:

$$f'(t_{\text{Modal}}) = 0$$

t_{Modal} entspricht der Ausfallzeit beim Maximum der Dichtefunktion

Quelle: Institut für Maschinenelemente (IMA)

Zweckmäßige Vorgehensweise:

1.) Ordnen Sie die Ausfallzeiten der Größe nach:

$$t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_{10}.$$

2.) Ermitteln Sie mit Hilfe der Tabellen die Medialen Ränge F_i der einzelnen Zahnräder.

3.) Tragen Sie die Wertepaare $(t_i; F_i)$ in das Weibullpapier ein. Die Ausfallzeit wird als Abszisse, der zugehörige Median-Rang als Ordinate in das Papier eingetragen.

4.) Legen Sie durch die Punkte näherungsweise eine Ausgleichsgerade. Der Parameter T ergibt sich als Schnittpunkt der 63%-Linie mit der Ausgleichsgeraden. Der Parameter b kann nach parallelem Verschieben der Ausgleichsgeraden durch den Pol auf der rechten Ordinate abgelesen werden.

5.) Tragen Sie für die Ausgleichsgerade den 5%- und 95%-igen Vertrauensbereich ein.

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Schritt 1: Geordnete t_i

t_1	=	7,9	Millionen LW
t_2	=	10,0	Millionen LW
t_3	=	12,2	Millionen LW
t_4	=	13,5	Millionen LW
t_5	=	14,3	Millionen LW
t_6	=	15,1	Millionen LW
t_7	=	17,3	Millionen LW
t_8	=	18,2	Millionen LW
t_9	=	24,6	Millionen LW
t_{10}	=	30,5	Millionen LW

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Schritt 2: Median und Vertrauensgrenzen

Tab. 1: **Median(50%)-Werte** in % für Stichprobenumfang n und Ranggröße i

	n = 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
i = 1	50,0000	29,2893	20,6299	15,9104	12,9449	10,9101	9,4276	8,2996	7,4125	6,6967
2		70,7107	50,0000	38,5728	31,3810	26,4450	22,8490	20,1131	17,9620	16,2263
3			79,3700	61,4272	50,0000	42,1407	36,4116	32,0519	28,6237	25,8575
4				84,0896	68,6190	57,8593	50,0000	44,0155	39,3085	35,5100
5					87,0550	73,5550	63,5884	55,9845	50,0000	45,1694
6						89,0899	77,1510	67,9481	60,6915	54,8306
7							90,5724	79,8869	71,3763	64,4900
8								91,7004	82,0380	74,1425
9									92,5875	83,7737
10										93,3033

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

Schritt 1:

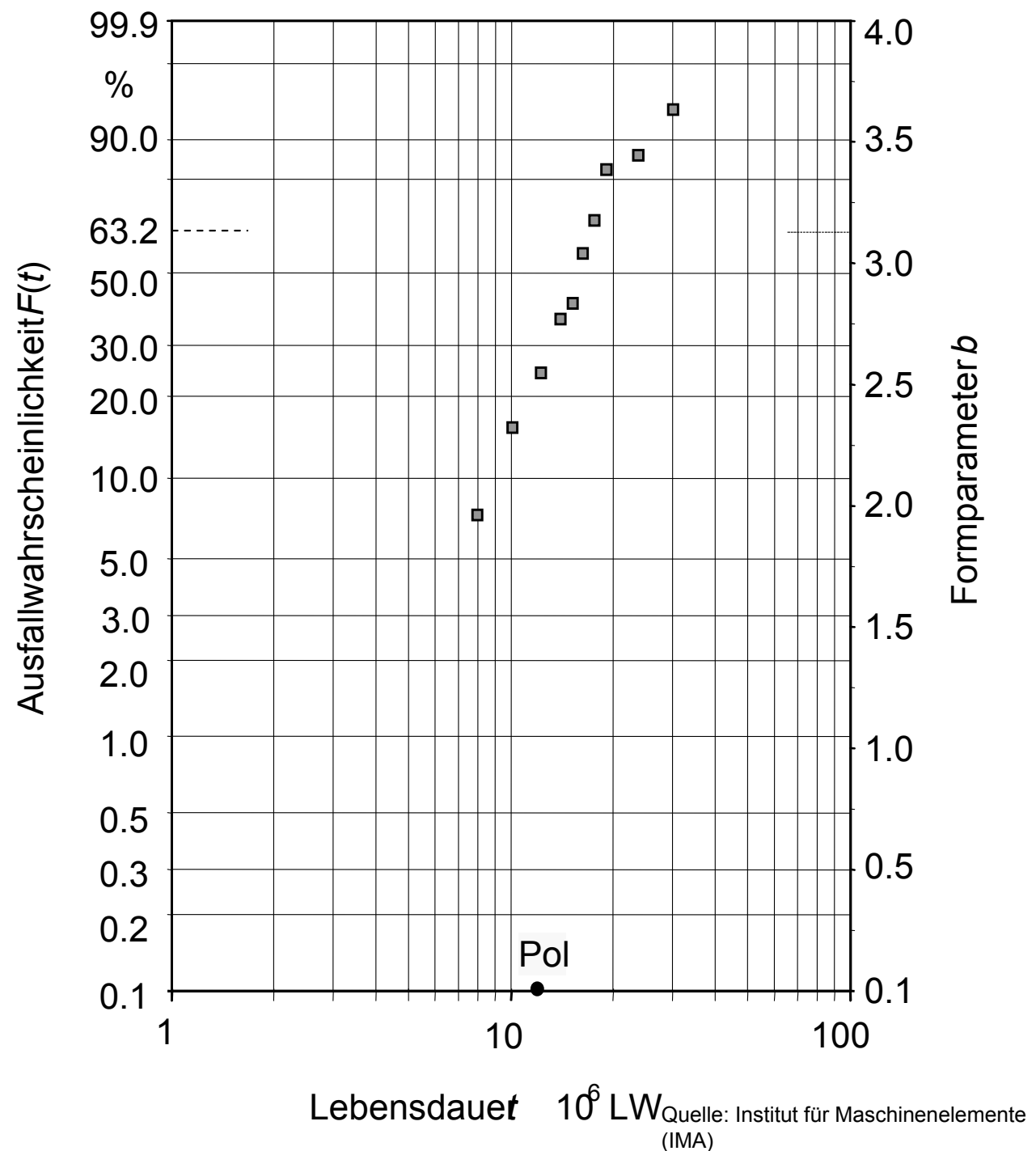
Ausfallzeiten ermitteln, nach
Größe ordnen

Schritt 2:

Ausfallwahrscheinlichkeiten der
Ranggrößen aus Tabellen

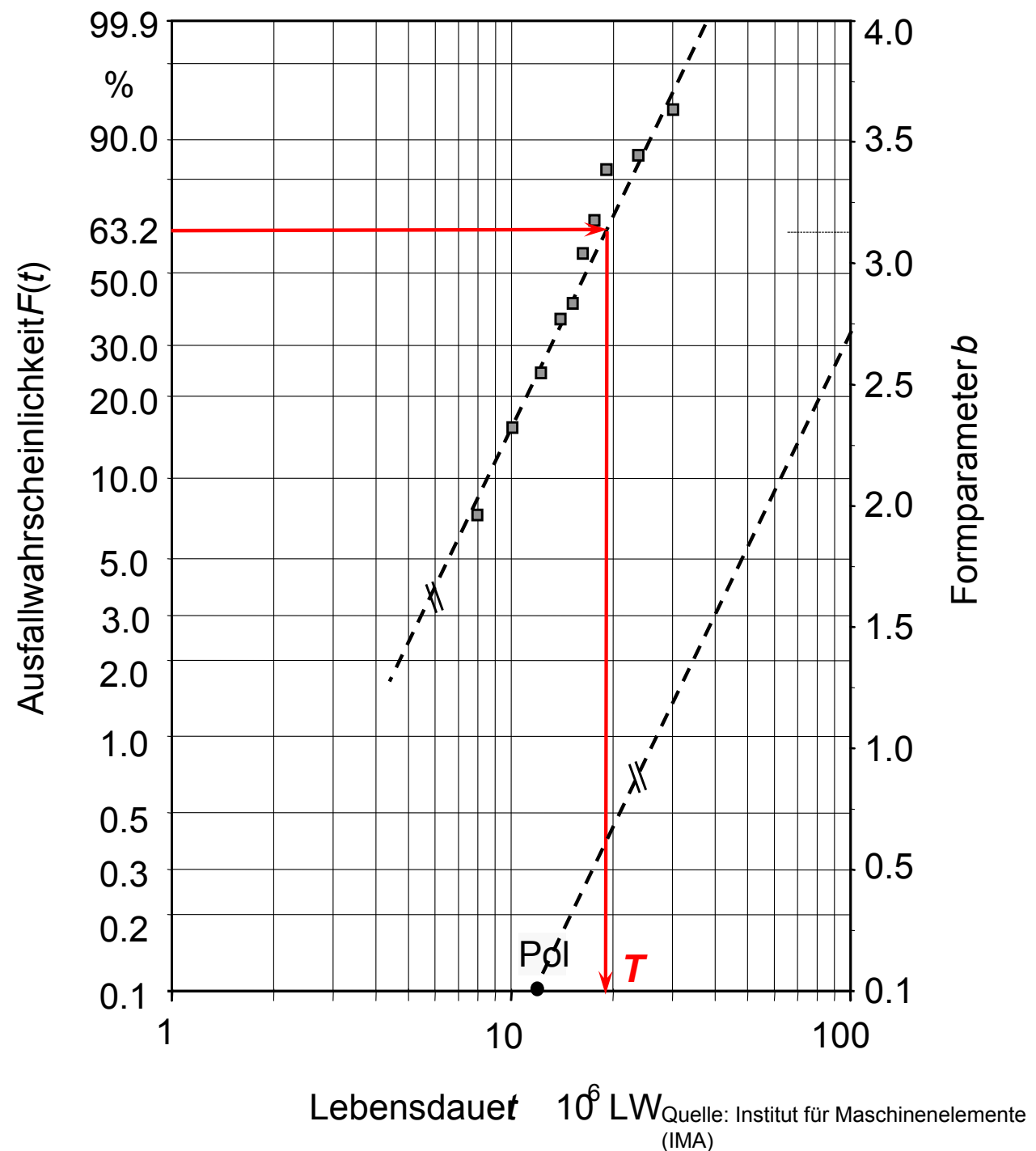
Schritt 3:

Wertepaare t_i , $F(t_i)$ im Weibull-
Wahrscheinlichkeitspapier
eintragen

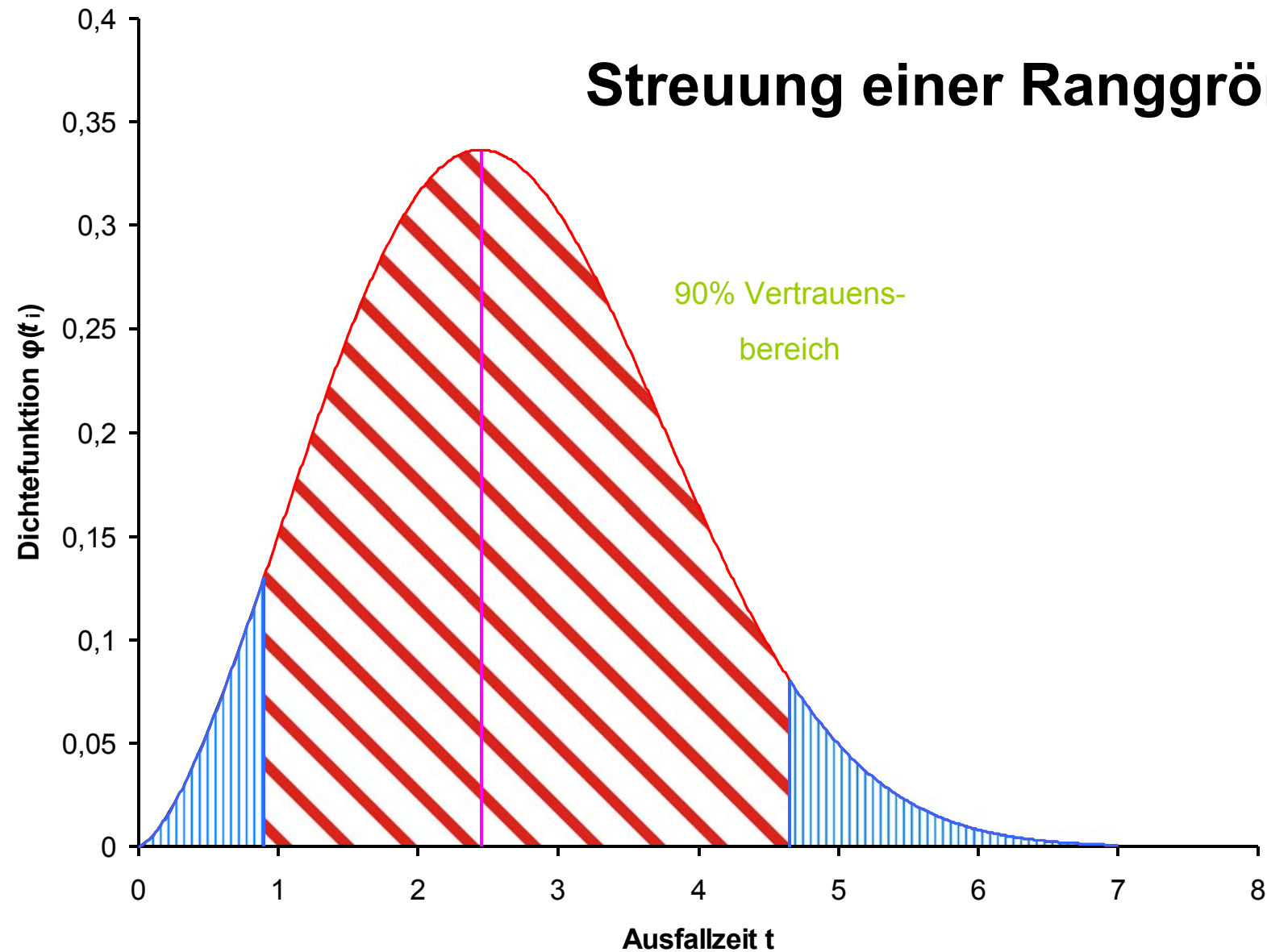


Schritt 4:
Weibull-Ausgleichs-
Gerade und Ermittlung
der Parameter
 T und b

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{1910^6}\right)^{2,7}}$$



Streuung einer Ranggröße



5% Vertrauensgrenze

Modalwert

95% Vertrauensgrenze

Schritt 2: Median und Vertrauensgrenzen

Tab. 2: Ausfallwahrscheinlichkeiten in % für die **5%-Vertrauensgrenze** bei Stichprobenumfang n und Ranggröße i

	$n = 1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$i = 1$	5,0000	2,5321	1,6952	1,2742	1,0206	0,8512	0,7301	0,6391	0,5683	0,5116
2		22,3607	13,5350	9,7611	7,6441	6,2850	5,3376	4,6389	4,1023	3,6771
3			36,8403	24,8604	18,9256	15,3161	12,8757	11,1113	9,7747	8,7264
4				47,2871	34,2592	27,1338	22,5321	19,2903	16,8750	15,0028
5					54,9281	41,8197	34,1261	28,9241	25,1367	22,2441
6						60,6962	47,9298	40,0311	34,4941	30,3537
7							65,1836	52,9321	45,0358	39,3376
8								68,7656	57,0864	49,3099
9									71,6871	60,5836
10										74,1134

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

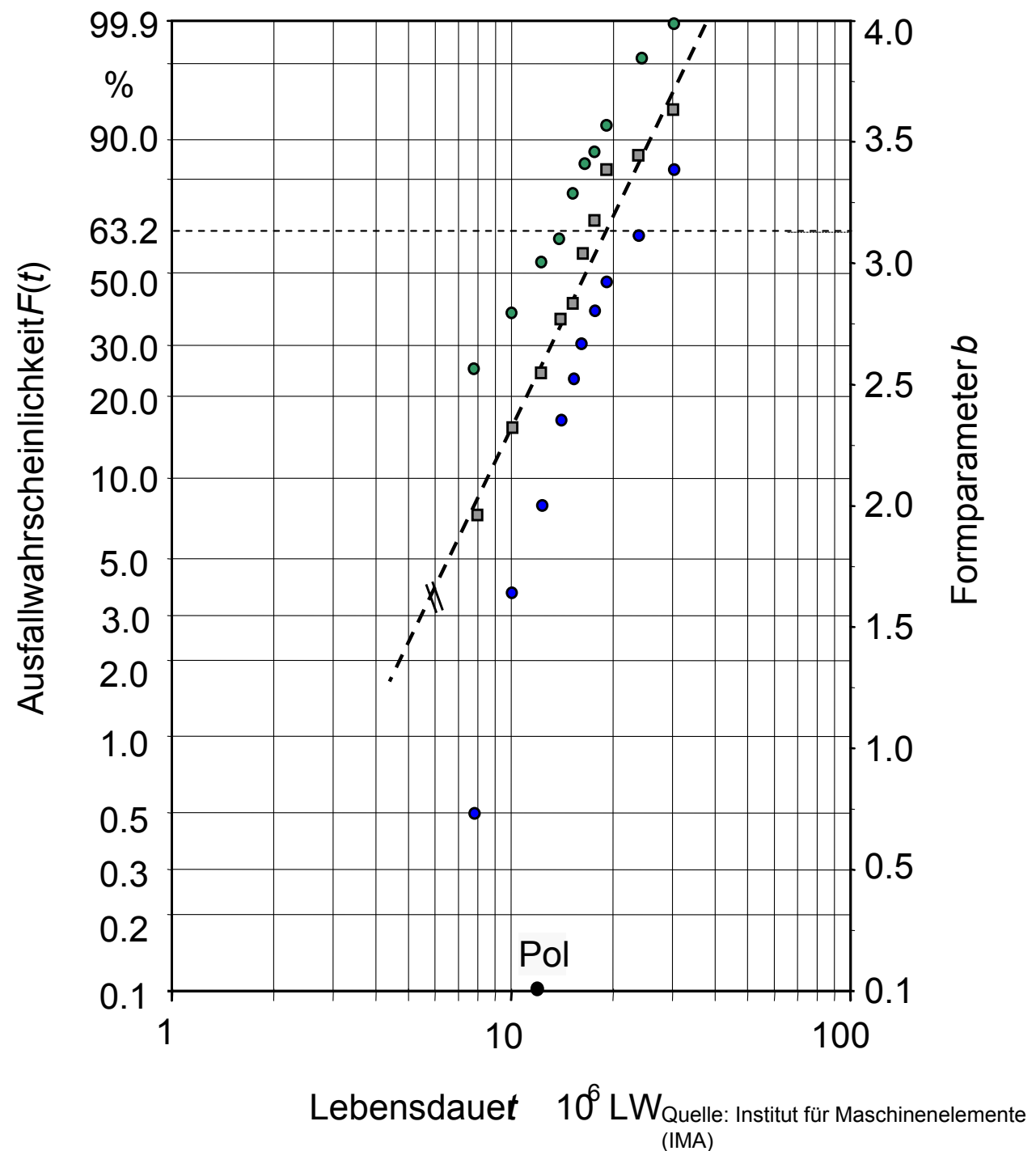
Schritt 2: Median und Vertrauensgrenzen

Tab. 3: Ausfallwahrscheinlichkeiten in % für die **95%-Vertrauensgrenze** bei Stichprobenumfang n und Ranggröße i

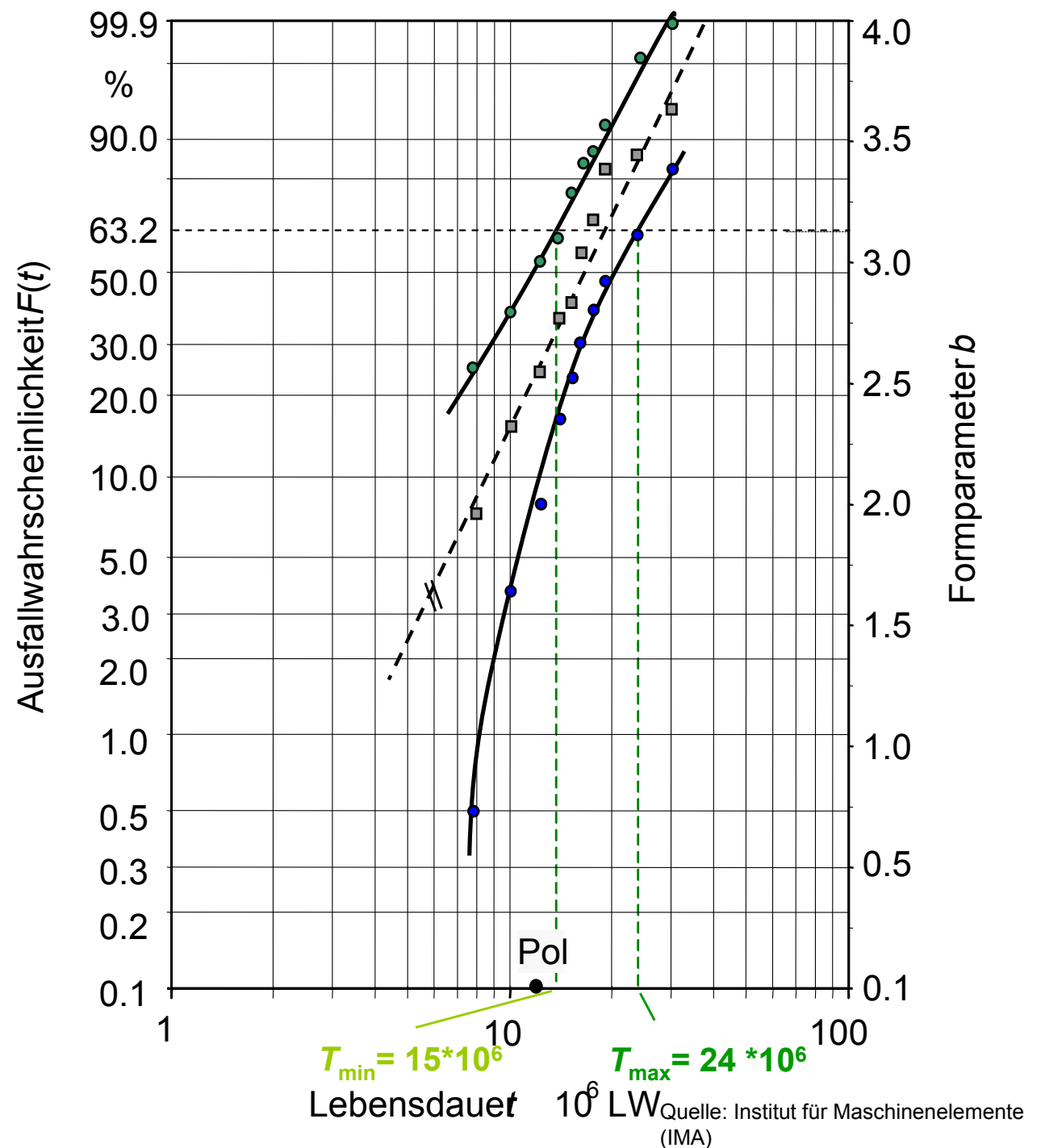
	$n=1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$i=1$	95,0000	77,6393	63,1597	52,7129	45,0720	39,3038	34,8164	31,2344	28,3129	25,8866
2		97,4679	86,4650	75,1395	65,7408	58,1803	52,0703	47,0679	42,9136	39,4163
3			98,3047	90,2389	81,0744	72,8662	65,8738	59,9689	54,9642	50,6901
4				98,7259	92,3560	84,6839	77,4679	71,0760	65,5058	60,6624
5					98,9794	93,7150	87,1244	80,7097	74,8633	69,6463
6						99,1488	94,6624	88,8887	83,1250	77,7559
7							99,2699	95,3611	90,2253	84,9972
8								99,3609	95,8977	91,2736
9									99,4317	96,3229
10										99,4884

Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

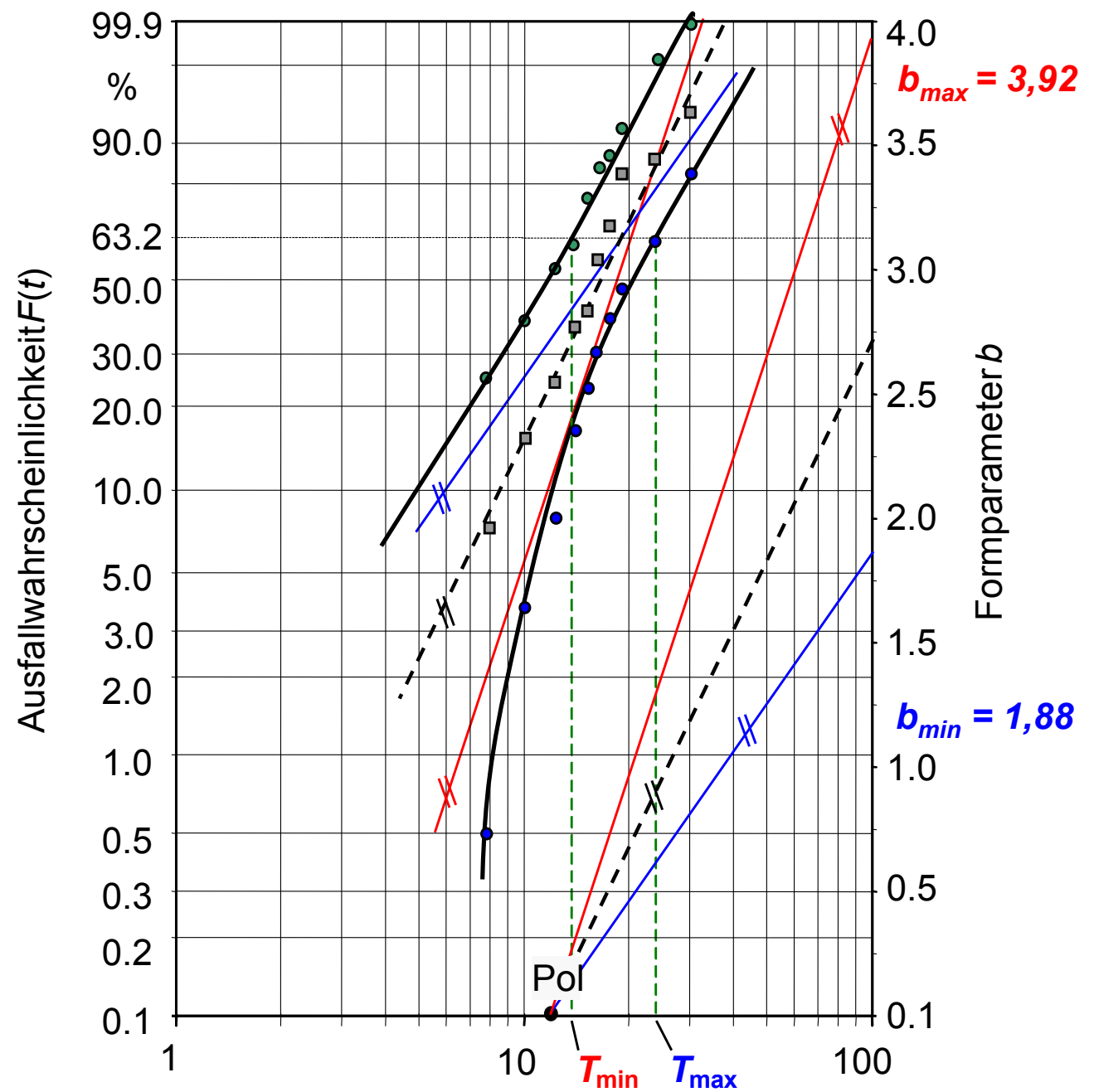
Schritt 5:
Vertrauens-
bereich mit Minimal-
und Maximalwerten
von T und b



Schritt 5:
Vertrauens-
bereich mit Minimal-
und Maximalwerten
von T und b



Schritt 5:
Vertrauens-
bereich mit Minimal-
und Maximalwerten
von T und b



Quelle: Institut für Maschinenelemente
(IMA)

6.4 Zuverlässigkeit von Systemen

Zuverlässigkeit von Systemen:

Beachte die Diskrepanz zwischen Elektronik und Mechanik!

Elektronik:

Bauelemente zeigen vorzugsweise Exponentialverteilungen, Leiterplatten bestehen vorzugsweise aus Bauelementen und sind damit als Summe einzelner Bauelemente mit Exponentialverteilung zu betrachten.

Mechanik:

Die Zuverlässigkeit einzelner kritischer mechanischer Elemente kann nicht angegeben werden. Mechanische Elemente zeigen vorzugsweise in ihrer Wechselwirkung mit einem Gegenpartner Ausfallerscheinungen. Beispielsweise fällt ein einzelnes Zahnrad ohne das Gegenrad in einer Getriebestufe nicht aus.

Mechanische Bauelemente zeigen dann in ihrer Wechselwirkung mit den entsprechenden weiteren Bauteilen das ganze Durchlaufen der Badewannenkurve.

6.4.1 Rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit

Rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit

Eingrenzung für die rechnerische Ermittlung der Systemzuverlässigkeit:

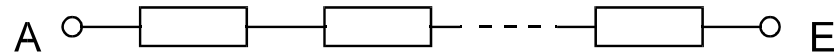
- Zuverlässigkeiten $R(t)$ oder Ausfallraten $\lambda(t)$ sind für die einzelnen Elemente bekannt
- Das **Ausfallverhalten** der einzelnen Elemente ist **voneinander unabhängig** (dies ist mechanisch nur bei Betrachtung von Baugruppen als unterste Elementeebene möglich)
- Die Randbedingungen zur Funktionsbeanspruchung und zu den wirkenden Umweltbedingungen sind bekannt, ebenso deren Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit

Unter diesen Voraussetzungen lassen sich mittels einer einfachen **Modellbildung (Boolesches Modell)** die Systemzuverlässigkeiten berechnen:

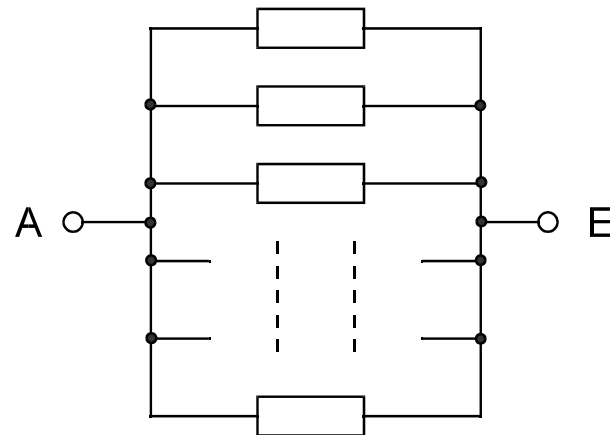
- Definition der niedrigsten Systemebene (elektronisches Bauelement oder Getriebestufe mechanisch)
- Ermittlung der logischen Verknüpfung Elemente zueinander
- Berechnung der Systemzuverlässigkeit unter Berücksichtigung der beiden wesentlichen Verknüpfungen Serien- oder Parallelsysteme

Boolesches Modell zur Analyse der Systemzuverlässigkeit

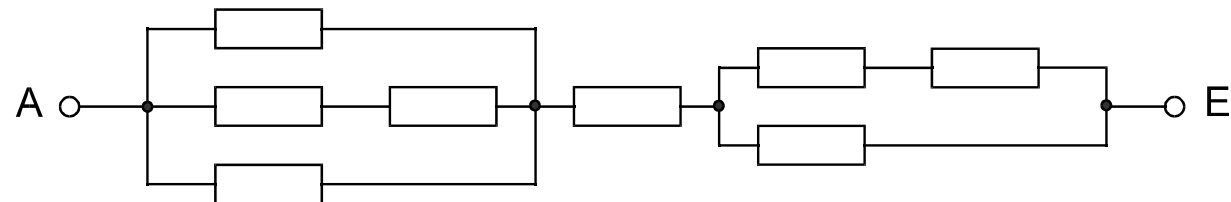
a) Seriensystem



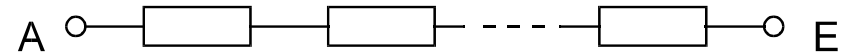
b) Parallelsystem



c) reale Verknüpfungen (Beispiel)



Seriensystem:



$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \text{mit } R_s < R_i$$

Ein Seriensystem liegt vor, wenn der Ausfall eines Elementes bereits zum Systemausfall führt. Nur für das Seriensystem lässt sich die Berechnungsgleichung auch unter Nutzung von Ausfallraten darstellen. Es gilt dann

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

Die Systemausfallrate ist also die Summe der Elementausfallraten, wobei die Ausfallraten zeitunabhängig oder zeitabhängig sein können.

Parallelsystem:

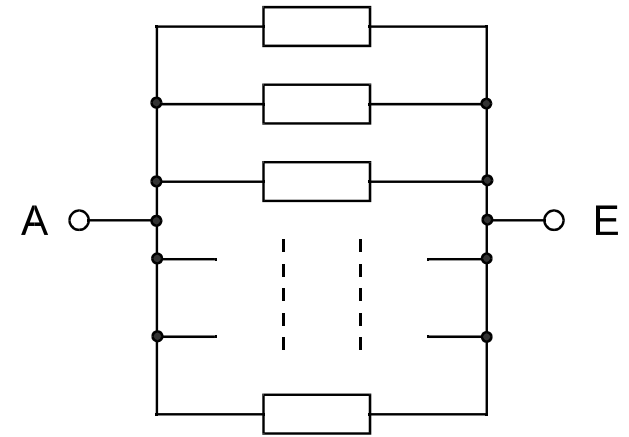
$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

bzw.

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

mit

$$F_s < F_i \quad \text{bzw.} \quad R_s > R_i$$



Ein Parallelsystem liegt vor, wenn erst der Ausfall aller logisch parallel liegenden Elemente einen Systemausfall bedingt.

Achtung:

Die physikalische Anordnung ist nicht relevant. Relevant für die Einordnung in die grundsätzliche Systemstruktur ist die logische Verknüpfung, die zu einem Ausfall führt.

Parallelsysteme:

- zeigen folglich Redundanz
- heiße Redundanz (ständiges Mitlaufen eines weiteren Systems, z. B. zwei Bremsleuchten)
- kalte Redundanz, umschaltbare weitere Systeme
- Redundanzgrade bedeuten ökonomischen Aufwand
- höhere Redundanzgrade erhöhen den ökonomischen Aufwand sehr stark

Besonderheiten bei mechanischen Systemen:

- während der Nutzung meist systematische Schädigung, beispielsweise durch Verschleiß und Abnutzung und damit zeitabhängige Ausfallraten
- zeitlich vergleichsweise kurze Abschnitte mit λ -konst. in der Badewannenkurve
- starke gegenseitige Beeinflussung der Elemente untereinander, so dass stets Gesamtzusammenhang (Einbauverhältnisse, Verschleiß, Umwelt ...) und damit bereits eine Baugruppe als einzelnes Element betrachtet werden muss
- allgemeingültige Daten für mechanische Systeme meist fehlen
- dagegen sind Zuverlässigkeitsdaten für Elektronik-Bauelemente Katalogangaben.

Generelles Vorgehen bei der Zuverlässigkeitsanalyse

1. **Quantitative Analyse** zur Bestimmung der zuverlässigkeitskritischen Systemelemente. Angezeigt ist eine Systemreduzierung durch Klassifizierung der Elemente in sogenannte ABC-Teile

A-Teile sind risikoreich, werden definiert beansprucht, eine Lebensdauerberechnung ist möglich und weitgehend abgesichert. Das Ausfallverhalten sei bekannt.

B-Teile sind ebenfalls risikoreich, eine Lebensdauerberechnung ist jedoch nicht möglich, das Ausfallverhalten muss geschätzt werden oder durch Vorversuche ermittelt werden (überwiegend für Komponenten, die Reibung und Verschleiß fahren).

C-Teile sind risikoneutral, werden in aller Regel nicht rechnerisch ausgelegt, es treten nur Zufallsausfälle auf. Sie sind nicht ursächlich für Systemausfälle.

2. **Versuche, Berechnungen**, Erfahrungswissen, Nutzen zur Ermittlung der Ausfallzeiten der einzelnen Komponenten
3. **Aufstellen eines Modells** (Boolesches Modell)
4. **Prüfungsmöglichkeiten zur Raffung von Lebensdauertests**
(Voraussetzung ist, dass der Schadensmechanismus sich bei erhöhter Belastung nicht ändert und der Zusammenhang zwischen der Belastung und dem Ausfallverhalten bekannt ist)
5. **Eingrenzung der Systemmodellierung** auf die wesentlichsten Elemente
6. **Berechnung der Systemzuverlässigkeit** zeichnerisch, rechnerisch als Zusammenfassung von verschiedenen Serien- und Parallelsystemen.

Hinweis:

Für elektronische Bauelemente ist die Berechnung im Allgemeinen über eine konstante Ausfallrate ohne Zeitabhängigkeit möglich. Für mechanische Systeme fehlen oft Ausgangsdaten. Eine Zeitabhängigkeit ist in der Regel immer gegeben.

6.4.2 Weitere Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben

a) Ingenieurtechnisches Verfahren

Ausfall-Effekt-Analyse. (FMEA/failure mode and effect analysis). Mit Hilfe eines Logiktests werden die Auswirkungen aller möglichen Bauelementeschäden und Ausfälle auf das System untersucht. Das Ziel ist die Ableitung von Schutzmaßnahmen, die Aufdeckung von Schwachstellen sowie die Aufstellung einer Liste von Normalschäden als Grundlage für die Instandhaltung, vgl. Tafel 5.2 in Abschnitt 5.4.

Fehlerbaummethode. Ausgehend vom Systemausfall wird unter Anwendung logischer Verknüpfungen die Systemstruktur so dargestellt, dass bei bekannter Wahrscheinlichkeit von Bauelementeausfällen die Systemzuverlässigkeit abgeschätzt werden kann (vom Fehlerbaum bestehen Analogien zum Booleschen Modell). Mit diesem Verfahren lassen sich Schwachstellen ermitteln sowie qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsaussagen treffen.

Technische Diagnostik. Anhand messbarer Parameter des Systems wird eine Einschätzung des vorhandenen Schadens und der noch zu erwartenden Lebensdauer vorgenommen (Beispiele: Rausch- und Oberwellenmessungen an elektrischen Widerständen, Geräuschemessungen an Lagern). Anwendung finden Verfahren der technischen Diagnostik sowohl für Selektionstests zur Aussonderung potentiell unzuverlässiger Elemente noch vor Einsatz als auch zur Überwachung in Betrieb befindlicher Erzeugnisse. Einschränkung: Verfahren meist sehr aufwendig und für viele Schadensfälle noch im Erprobungsstadium.

Technische Kausalanalyse. Untersuchung ausgefallener Systeme bzw. Bauelemente nach den aufgetretenen Schäden und Aufdeckung der Kausalkette Belastung-Schaden-Ausfall einschließlich schädigender Einflüsse bei der Herstellung.

Checklistenmethode. Programm zur Sicherung der Zuverlässigkeit eines Erzeugnisses von der Entwicklung bis zur Nutzung. Es beinhaltet ingenieurtechnische, mathematische und experimentelle Methoden sowie Fragen der Qualitätskontrolle, Lager- und Transportvorschriften, Bedienungs- und Wartungsanleitungen.

b) Experimentelle Methoden

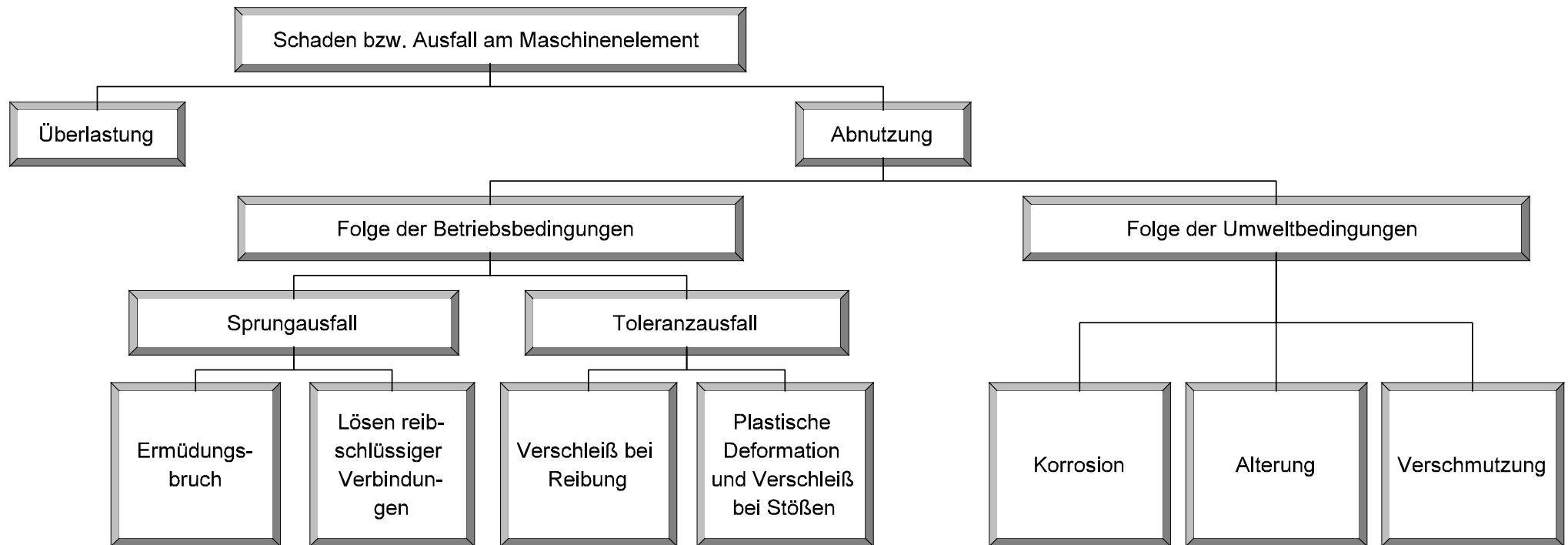
Betriebsversuche. Nutzung der Erzeugnisse bei Nennbeanspruchung unter Simulation möglichst vieler, real auftretender Einflussfaktoren mit dem Ziel der Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen oder dem Nachweis einer bestimmten Mindestzuverlässigkeit.

Forcierte Tests. Tests bei Erhöhung der Belastung über die Nennwerte zur Zeitraffung der gesamten Nutzungs- oder Lebensdauer sowie für sogenannte Selektionstests zur Vermeidung von Frühausfällen.

Stresstests. Tests bei Belastungen nahe den Beanspruchungsgrenzen des Erzeugnisses zur Ermittlung von Sicherheitsfaktoren sowie zur Schwachstellenanalyse und Erkundung von Ausfallursachen.

6.4.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Zuverlässigkeit durch den Konstrukteur

Hauptausfallursachen bei mechanischen Konstruktions- und Maschinenelementen



Konstruktiv zu beeinflussende Aspekte:

- ein exaktes Lastenheft sollte auch Zuverlässigkeitsfragen berücksichtigen
- Beanspruchungen sollten möglichst exakt bekannt sein bzw. durch Simulationen ermittelt werden
- Umweltbedingungen beachten!
- möglichst frühzeitig sind sowohl rechnerische als auch andere Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben im Entwicklungsprozess einzubeziehen
- wenige Risikoteile, wenige Einzelteile insgesamt sichern die Zuverlässigkeit

- aus Zuverlässigkeitssicht sind gewisse Sicherheiten in der Dimensionierung (Überdimensionierung) und kleine Betriebsdauern sinnvoll
- Redundanzen einbauen!
- leichte Austauschbarkeit von Verschleißteilen sichern!
- die Bedienung sollte narrensicher sein!
- umfangreiche Funktionstests, Dauerversuche, Prüfstands- und Felderprobungen machen Schwachstellen vorab sichtbar
- die Auswertung von Garantie- und Kulanzstatistiken zeigt Schwachstellen bereits ausgelieferter Erzeugnisse auf
- teilweise können Verschleiß- und Alterung auch konstruktiv kompensiert oder ausgeglichen werden.

In der Fertigung zu beeinflussende Aspekte:

- Frühausfälle durch
Voraltern (mit ausgewählter Beanspruchung)
Einlaufen (mit bei Nutzung zu erwartender Beanspruchung) oder
Einbrennen (durch erhöhte Beanspruchung)
beim Hersteller vorweggenommen werden (möglichst auf
Bauelementeebene und nicht nach der Endmontage)
- Ein Qualitätssicherungssystem sichert eine stabile Fertigung.

Im Service zu beeinflussende Aspekte:

- durch vorbeugenden Ersatz gefährdeter Bauteile kann die
Lebensdauer verlängert und eine konstante Ausfallrate erzielt
werden.

Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit

