Veranstaltung

„Innerbetrieblicher Materialfluss“, Wintersemester 2015/16

Übung: „Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit“

Zuverlässigkeit R ist ein Maß dafür, dass die Einrichtung innerhalb einer in die Zukunft reichenden Zeitspanne T die von ihr geforderte Funktion unter definierten Bedingungen störungsfrei und korrekt erfüllt.

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

Die Weibull-Verteilung

Jegliche Zuverlässigkeitsvoraussage 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*.

Die Dichtefunktion der Weibull-Verteilung lautet:

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

mit

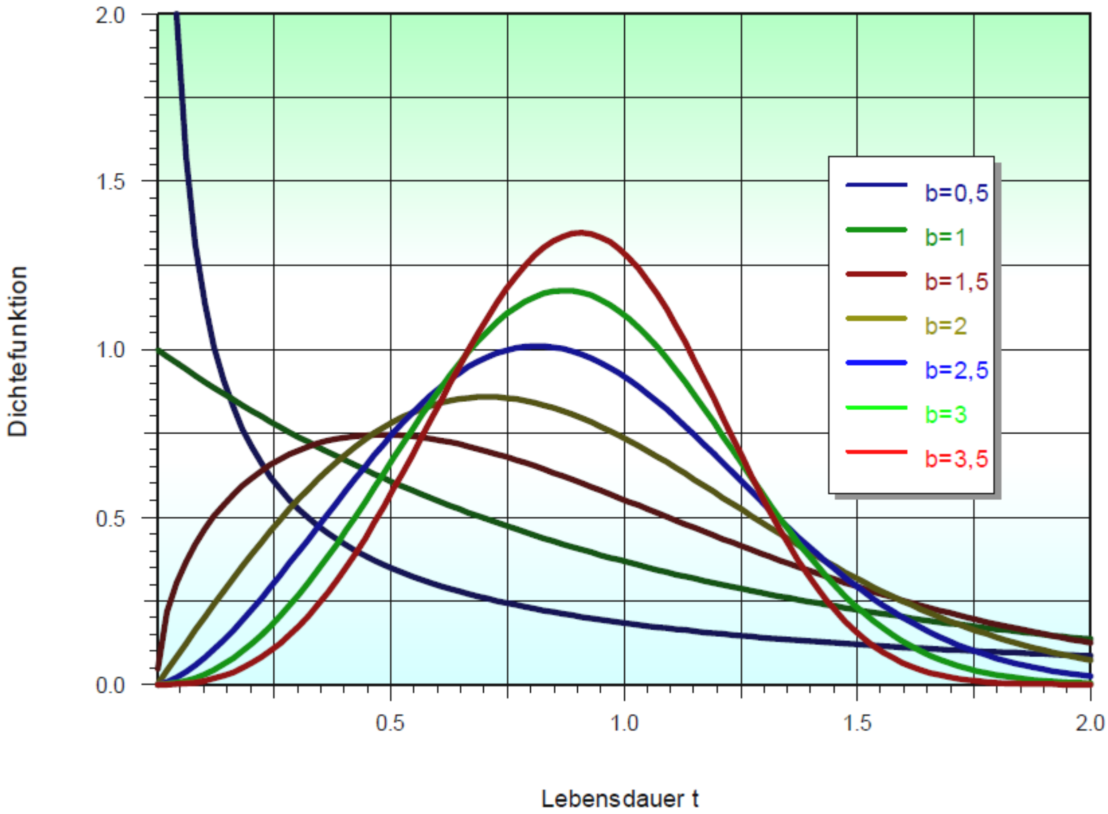
h = Wahrscheinlichkeitsdichte für Zeitpunkt T

t = Lebensdauervariable (Fahrstrecke, Einsatzdauer, Lastwechsel etc.)

T = Charakteristische Lebensdauer, bei der in Summe 63,2% der Einheiten ausgefallen sind

b = Formparameter, Steigung der Ausgleichsgeraden im Weibull-Netz

Die Weibullverteilung ist eine zweiparametrige, stetige Funktion. Die beiden Parameter sind der sog. **Formparameter b** und der **Lageparameter T**. Als Zufallsvariable wird zumeist *t* statt x benutzt, da Weibullverteilungen sehr häufig in Zusammenhang mit Lebensdauern verwendet werden. Weibullverteilungen erfüllen nicht das Kriterium der Gedächtnislosigkeit. Deshalb ist die Weibullverteilung dazu geeignet, **Früh- oder Spätausfälle** von Bauteilen zu modellieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil im nächsten Zeitintervall ausfällt, ist bei schon sehr alten Bauteilen häufig höher als bei neuen Bauteilen. Weibullverteilungen sind nur für positive Werte von t definiert.



Quelle: weibull.de

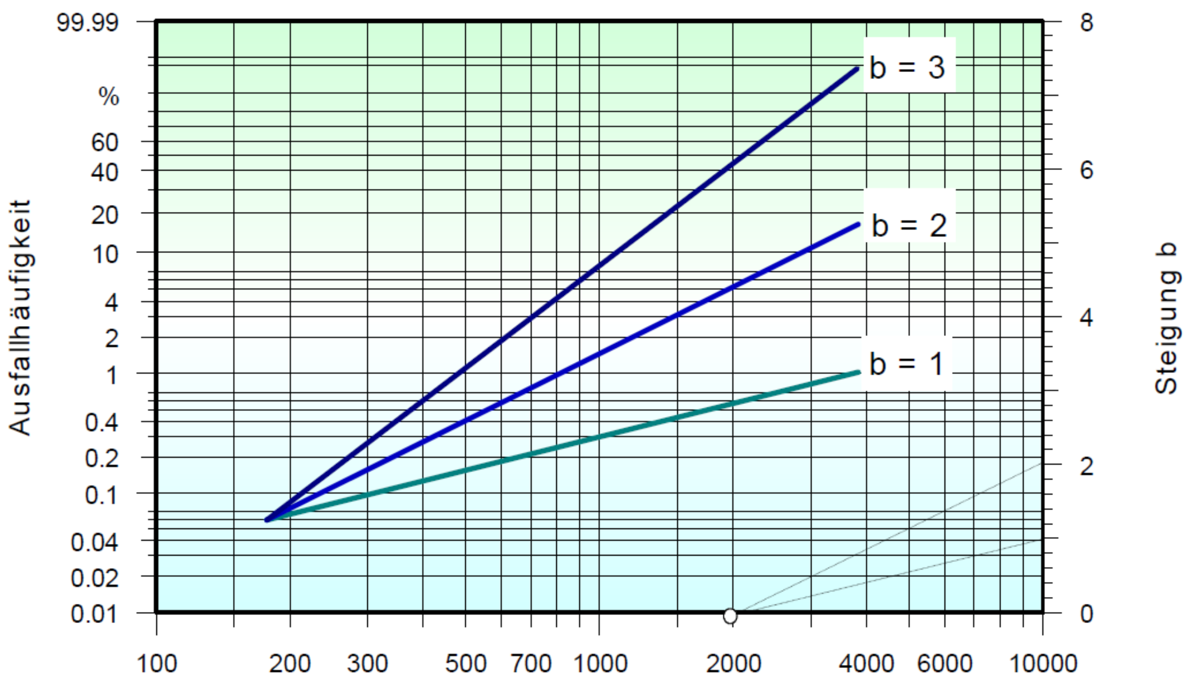
Interpretation von Funktion und Parametern

Entsprechend der hauptsächlichen Verwendung der Weibullverteilung als Lebensdauerverteilung wird im Folgenden mit Ausfällen argumentiert. Der **Formparameter b** kann dazu genutzt werden, um zu modellieren, ob Früh- oder Spätausfälle häufiger sind. Wird b<1 gewählt, treten verstärkt Frühausfälle auf, bei b>1 verstärkt Spätausfälle. **Wird der Formparameter b=1 gewählt, ergibt sich exakt die Exponentialverteilung. Der Lageparameter kann verwendet werden, um die durchschnittliche Lebensdauer zu verändern**. Er gibt allerdings im Allgemeinen nicht die durchschnittliche Lebensdauer an.

Anwendungen

Die dominierende Anwendung von Weibullverteilungen sind Lebensdaueruntersuchungen. Die Verteilungsfunktion — **kontextbezogen Ausfallwahrscheinlichkeit genannt** – kann schnell mit einem bestimmten Netz, dem *Weibullwahrscheinlichkeitsnetz*, ermittelt werden. Auf diesem Papier ist die **x-Achse logarithmisch** und die **y-Achse doppeltlogarithmisch** skaliert. **Dadurch hat die Verteilungsfunktion die Form einer Graden.**

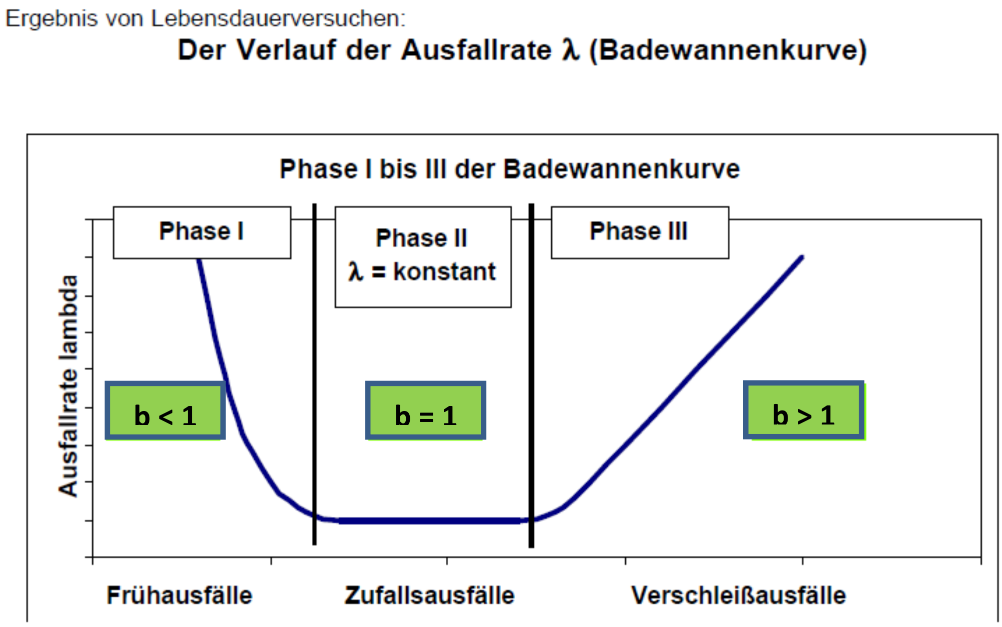
$H = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b}}$ mit H = Summen-Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Ausfallhäufigkeit (normiert auf 1, in % mal 100)



Quelle: weibull.de

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

Es gibt drei Phasen:



Phase I: Frühausfälle

Sie kommen durch Produktionsfehler zustande; die Ausfällrate sinkt kurzfristig ab.
Im Lebensdauernetz b < 1 (Fertigungsfehler, Materialfehler, Montagefehler, Bedienfehler in der Lernphase, „Kinderkrankheiten“ etc.)

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).

Phase II: Zufallsausfälle (Eingeschwungener Zustand)

Es findet fast kein Verschleiß statt; die Ausfallrate ist konstant.
Im Lebensdauernetz b = 1. Die Frühausfälle sind abgeklungen, übliche Verschleißteile werden durch regelmäßige Wartungsarbeiten ersetzt, Ermüdungsausfälle treten noch nicht ein, das Ausfallgeschehen wird hauptsächlich bestimmt durch Zufallsausfälle.

Beispiel:
Der Totalausfall eines neuen, eingefahrenen PKW (schrottreif) kommt nur als Folge eines Unfalls (Zufalls) vor.

Phase III: Verschleißausfälle

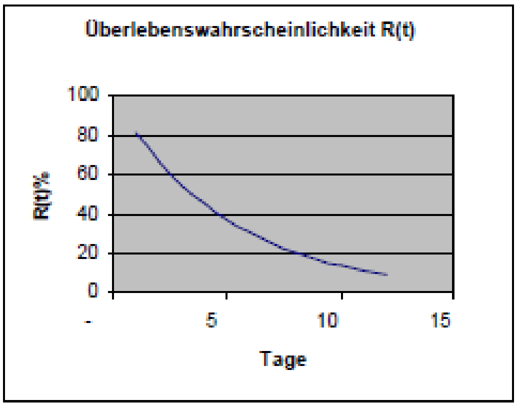
Es kommt zunehmender Alterungsverschleiß zustande; die Ausfallrate steigt wieder an.
Im Lebensdauernetz b > 1

Beispiel:
Zündkerzen, Korrosionsschäden, Verschleiß an Wälzlagern, Verderben von Lebensmitteln und Medikamenten.

Die Exponentialverteilung (Phase II)

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

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



<u>Hier gilt:</u>

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	$G = N * G(t) = N – R$

Beispiel:

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.

Wie viele Bauelemente werden 25.000 h überleben?

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

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

Wie viele Bauelemente werden 25.000 h überleben?

<u>Lösungsgang:</u>

$$R = N \cdot R(t)$$

$$R = 500 \cdot e^{-10 \cdot 10^{-6} \cdot 25000}$$

$$R = 389 \text{ Teile}$$

Die Weibullverteilung (Phase I und III)

Sie gilt für Bereiche I und III, da sie keine Gedächtnislosigkeit besitzen. Sie beschreibt den allgemeinen Fall, bei dem die Ausfallrate nicht konstant ist, sondern mit der Zeit zu- oder abnimmt.

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

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

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)

Es werden 1000 Schaltungen gebaut und ausgeliefert. Der Formfaktor b=2 und die Lebensdauer beträgt 140.000 LW. Wie viele Schaltungen sind nach 26.000 Lastwechseln bereits zerstört G(t)?

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

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

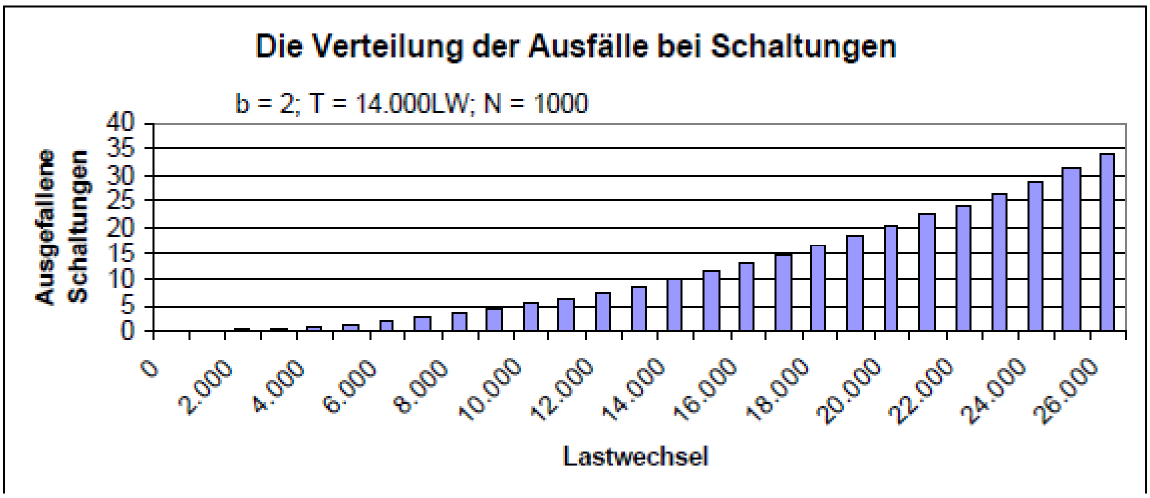
$G(t) = 1 - e^{-(t/T)b}$

$G(t) = 1 - e^{-(26000/140000)2}$

<u>G(t) = 3,39%</u>

<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.



λ - Ausfallrate

Aufgabe 1:

In einem Lager werden für leistungsfähige Regalbediengeräte **Überlastwächter** benötigt, die mit einem Schließerkontakt den Betrieb abschalten, und zwar mit einer MTBF von besser als **3000 Stunden**.

a) Bei einem Test von **50 Überlastwächtern** eines verfügbaren Typs **über 100 Stunden** sprachen **2** nicht mehr an. **Wie hoch ist die Ausfallrate bzw. MTBF?**

$$\lambda = \frac{r}{n \cdot t} = \frac{2}{50 \cdot 100} = 4 \cdot 10^{-4}\ h^{-1}$$ **Ausfälle pro Stunde**

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = 2500\ h$$

b) Wie könnte man mit den vorhandenen Überlastwächtern eine MTBF **von > 3000 Stunden** erreichen?

Parallelschaltung von zwei Wächtern

c) Wie hoch ist die **MTBF** bei dieser Maßnahme?

$$MTBF = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i \cdot \lambda} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 2500 + 1250 = 3750\ h > 3000\ h$$

Quelle: DHBW

Funktionszuverlässigkeit η^{zuv} : $\boxed{\eta^{zuv} = \frac{n_r}{n_r + n_f}}$

n_r - Anzahl der richtigen Funktionserfüllungen

n_f - Anzahl der gestörten Funktionserfüllungen

Störungswahrscheinlichkeit bzw. Funktionsunzuverlässigkeit:

$\eta^{unz} = 1 - \eta^{zuv}$ oder $\boxed{\eta^{unz} = \frac{n_f}{n_r + n_f}}$

Beispiel:

Nach der Einlaufphase von 6 Monaten werden für ein Regalbediengerät, das an einem Übergabepunkt von einer Rollenbahn Paletten abnimmt und in ein Hochregallager, einlagert, im Rahmen einer Zuverlässigkeitsuntersuchung folgende Zahlen erfasst:

Zahl der korrekt ausgeführten Einlagerungsvorgänge: 12748

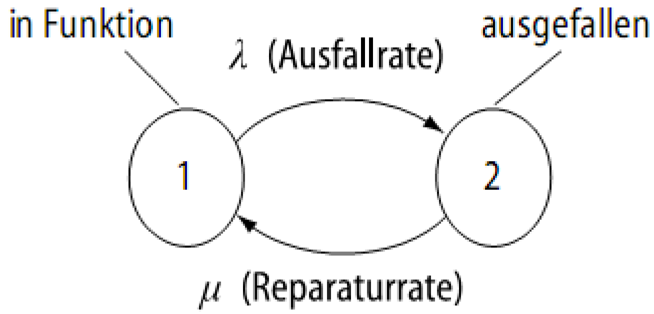
Zahle der Störungen: 34

$$\eta^{zuv} = \frac{12748}{12748 + 34} = 0{,}9973 \Rightarrow 99{,}73\%$$

$$\eta^{unz} = 1 - \eta^{zuv} = 1 - 0{,}9973 = 0{,}0027 \Rightarrow 0{,}27\%$$

Verfügbarkeit

Verfügbarkeit erfasst die Relation zwischen der Summe der zu erwartenden Ausfallzeiten und der gesamten theoretisch nutzbaren Einsatzzeit. Die zufällige Folge der Zustände funktionsfähig (1) und ausgefallen (2) kann vereinfacht als Markov-Prozess modelliert werden.



Daraus folgt: $\boxed{\eta = \lim_{t\to\infty} P_1(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda}}$

Die nach dieser Gleichung berechnete Verfügbarkeit kennzeichnet demnach einen Prozess, der sich über sehr lange Zeit in einem Gleichgewichtszustand zwischen *Verschlechterung* (infolge von Ausfällen) und *Verbesserung* (infolge von Reparaturen) befindet.

$E(t_E) = MTBF$: Erwartungswert der störungsfreien Einsatzdauern (Mean Time Between Failures)

$E(t_A) = MTTR$: Erwartungswert der Ausfalldauern (Mean Time To Repair)

Mit $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ und $MTTR = \frac{1}{\mu}$ folgt:

$$\boxed{\eta = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}}$$

Aufgabe 2:

Eine Abfüllanlage läuft an **5 Tagen pro Woche je 4 Stunden**. Die Etikettiereinrichtung fiel in den letzten Jahren nach je ca. **200 Betriebsstunden** durch mechanische Abnutzung aus. Die **Reparatur benötigt 6 Stunden** und kann außerhalb der normalen Betriebszeit durchgeführt werden.

a) Wie hoch ist die **Verfügbarkeit** bezogen auf die Betriebszeit, wenn für den schlimmsten Fall mit einem **Ausfall am Beginn der täglichen Betriebszeit** gerechnet wird, d.h. dass die Anlage an einem Tag nicht die geplanten 4 Stunden laufen kann?

$$\eta = \frac{200}{200+4} = 0{,}98$$

b) Angenommen, die Anlage würde zur Vorbeugung von Produktionsausfällen **alle 100 Stunden (außerhalb der geplanten Betriebszeit) gewartet**, wobei die Verschleißteile ausgewechselt würden. Welche **Verfügbarkeit** könnte die Anlage so erreichen?

MTBF wird zu 100 h angenommen, MTTR zu 0 h, da außerhalb der Betriebszeit

$$\eta = \frac{100}{100+0} = 1$$

c) Eine Reparatur mit Teileaustausch kostet **1000 €**, der Produktionsausfall im **Fall a) kostet nur 200 €,** da nur einige Lieferungen umdisponiert werden müssen. Die Reparatur nach **je durchschnittlich 200 Stunden** muss für den Fall a) natürlich berücksichtigt werden. Würde sich die **regelmäßige Wartung nach 100 Stunden** lohnen?

Fall a): alle 200 h: Reparaturkosten + Ausfallkosten = 1000 + 200 = 1200 €
Fall b): alle 100 h: Reparaturkosten = 1000 €
nach 200 h: = 2000 €
Fazit: Fall b) wäre alle 200 h 800 € teurer – es lohnt sich nicht!

d) Wie würde sich das Ergebnis von c) ändern, wenn die **Ausfallkosten 1100 € betragen würden**?

Fall a): alle 200 h: Reparaturkosten + Ausfallkosten = 1000 + 1100 = 2100 €, hier wäre die Wartung billiger!

e) Wann würde sich der Einbau einer besseren Etikettiereinrichtung für **11.000 €** lohnen, die nur **alle 1000 Stunden für 500 €** gewartet werden müsste?

Wartungskosten nach je 1000 h:	500 €
Kosten Fall a) nach 1000 h:	(1000/200)*1200 = 6000 €
Ersparnis nach je 1000 h:	5500 €

*Amortisation nach (Anschaffungskosten/Ersparnis)*MTBF*$_{neu}$ *= (11000/5500)*1000 = 2000 h*

Quelle: DHBW

Reihenanordnung von Elementen

Ist zur Funktion eines Systems die Funktion eines jeden Elements erforderlich, so entspricht dies einer Reihenanordnung aller Systemelemente. Die Gesamtverfügbarkeit in diesem Fall ist:

$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n = \prod_{i=1}^{n} \eta_i$$

Aufgabe 3:

Folgendes System sei gegeben:

$\eta_{ges} = 70\%$ Alle Stationen haben die gleiche Verfügbarkeit!

- **Wie hoch muss die Einzelverfügbarkeit sein?**

$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_7 = \eta^7 = 0{,}7$$
$$\eta_i = \sqrt[7]{0{,}7} = 0{,}95$$
$$\Rightarrow \eta_i = 0{,}95 \Rightarrow \text{95\%-ge Verfügbarkeit.}$$

Technischer Durchsatz:

Technischer Durchsatz ergibt sich aus der „Soll-Leistung“ dividiert durch die Gesamtverfügbarkeit. Jedes Element des Systems muss diesen Durchsatz ermöglichen.

$\lambda_{tech} = \dfrac{\lambda_{soll}}{\eta_{ges}}$ λ_{soll} - geforderter Durchsatz einer Anlage.

$\lambda_{res} = \lambda_{tech} - \lambda_{soll}$ λ_{res} - Durchsatzreserve zum Ausgleich von Störungen.

Aufgabe 4:

λ_{tech} = 125 St./h; λ_{soll} = 100 St./h

Gegeben: 10 Stationen in der Reihenschaltung.

- **Wie hoch ist die Einzelverfügbarkeit?**

$$\eta_{ges} = \frac{\lambda_{soll}}{\lambda_{tech}} = \frac{100}{125} = 0{,}8$$

$$\eta_i = \sqrt[10]{\eta_{ges}} = \sqrt[10]{0{,}8}$$

$\eta_i = 0{,}98 \Rightarrow$ 98%-ge Verfügbarkeit.

Ist für die Funktion eines Systems die Funktion eines seiner Elemente bereits ausreichend, so entspricht dies einer Parallelanordnung. Die Gesamtverfügbarkeit wird wie folgt berechnet:

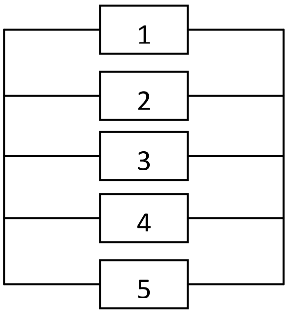
$$\eta_{ges} = 1 - (1-\eta_1)\cdot(1-\eta_2)\cdots(1-\eta_n)$$

$$\eta_{ges} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1-\eta_i)$$

Aufgabe 5: Parallelanordnung (Redundantes System!)

Vollredundanz (Parallelschaltung): Jedes dieser Elemente kann 100% des Durchsatzes übernehmen.

Gegeben sei folgendes System:



$\eta_{ges} = 0{,}99$

Alle Elemente haben die gleiche Verfügbarkeit.

- **Wie hoch ist die Einzelverfügbarkeit?**

$$\eta_{ges} = 1 - (1 - \eta_i)^5$$

$$(1 - \eta_i)^5 = 1 - \eta_{ges}$$

$$\eta_i = 1 - \sqrt[5]{1 - \eta_{ges}}$$

$$\eta_i = 1 - \sqrt[5]{0{,}01}$$

$$\boxed{\eta_i \cong 0{,}6}$$

kleine Einzelverfügbarkeit, aber große Gesamtverfügbarkeit!

Teilredundanz:

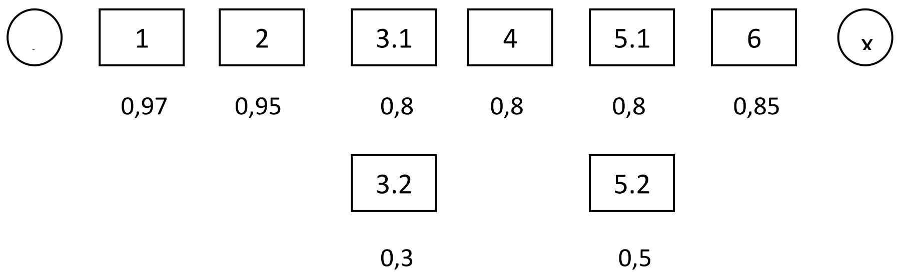
$P_{tech,i}$: Anteil, den das Element i maximal vom Gesamtdurchsatz übernehmen kann, wenn es ohne Störung betrieben wird.

Bei echter Redundanz ist $P_{tech,i} = 1$.

$$\eta_i = 1 - \Big[\underbrace{(1-\eta_{i.1})\cdot(1-P_{tech,i.2})}_{\substack{\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \\ \text{Element i.1 mal} \\ \text{Durchsatzreserve El. i.2}}} + \underbrace{(1-\eta_{i.2})\cdot(1-P_{tech,i.1})}_{\substack{\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \\ \text{Element i.2 mal} \\ \text{Durchsatzreserve El. i.1}}} - \underbrace{(1-\eta_{i.1})\cdot(1-\eta_{i.2})\cdot(1-P_{tech,i.1}-P_{tech,i.2})}_{\substack{\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \\ \text{beide gleichzeitig}}} \Big]$$

Aufgabe 6:

Folgendes System sei gegeben:



$P_{tech,3.1} = 1 \qquad P_{tech,5.1} = 0,9$

$P_{tech,3.2} = 0,3 \quad P_{tech,5.2} = 0,6$

λ_{soll} = 100 St./h

λ_{tech} = ?

$$\eta_3 = 1 - \left[(1-0,8)\cdot(1-0,3) + (1-0,3)\cdot(1-1) - (1-0,8)\cdot(1-0,3)\cdot(1-1-0,3)\right]$$
$$\eta_3 = 1 - [0,2\cdot 0,7 + 0,7\cdot 0 - 0,2\cdot 0,7\cdot(-0,3)]$$
$$\eta_3 = 1 - [0,14 + 0 - 0,14\cdot(-0,3)]$$
$$\eta_3 = 1 - [0,14 + 0,042]$$
$$\eta_3 = 1 - 0,182$$
$$\eta_3 = 0,818$$

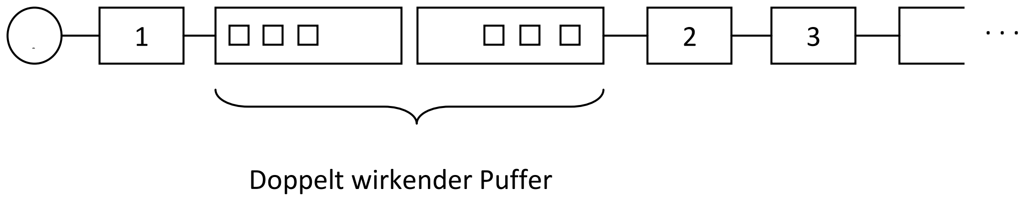
$$\eta_5 = 1 - \left[(1-0,8)\cdot(1-0,6) + (1-0,5)\cdot(1-0,9) - (1-0,8)\cdot(1-0,5)\cdot(1-0,9-0,6)\right]$$
$$\eta_5 = 1 - [0,2\cdot 0,4 + 0,5\cdot 0,1 - 0,2\cdot 0,5\cdot(-0,5)]$$
$$\eta_5 = 1 - [0,08 + 0,05 - 0,1\cdot(-0,5)]$$
$$\eta_5 = 1 - [0,08 + 0,05 + 0,05]$$
$$\eta_5 = 1 - 0,18$$
$$\eta_5 = 0,82$$

$$\eta_{ges} = 0,97\cdot 095\cdot 0,818\cdot 0,8\cdot 0,82\cdot 0,85 = 0,42$$

λ_{soll} = 100 St./h (gegeben)

$$\lambda_{tech} = \frac{\lambda_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,42} = 238 \text{ St./h}$$

Anordnung mit Puffer



Puffer dient zur Störungsüberbrückung und wirkt wie eine parallelgeschaltete Anlage!

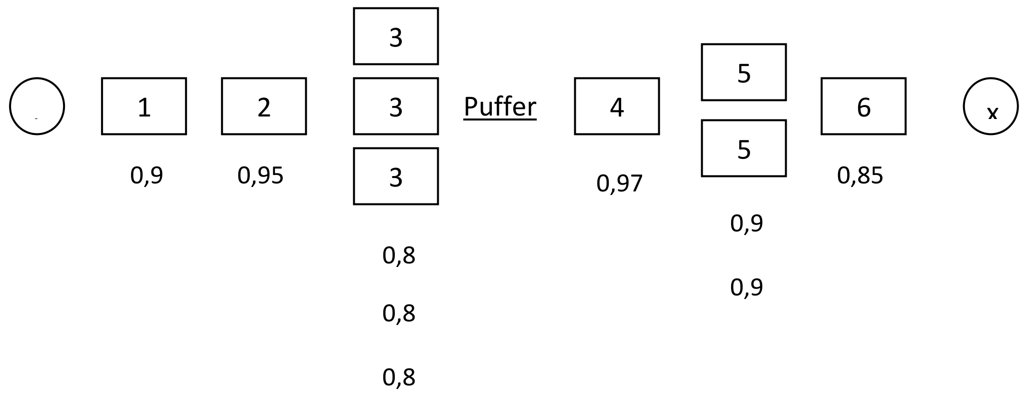
$\eta_p = \eta_o + f(1-\eta_o)$ η_o - vorgeschaltete Seite

Durch den Puffer wird ein Teil f der Störzeit abgedeckt.

$f = \frac{2}{3}$ bei exponentiellen Störverteilung (typische Störzeitverteilung).

Aufgabe 7:

Folgendes System sei gegeben:



$P_{tech,5.1} = 0,75$ $P_{tech,5.2} = 0,8$

λ_{soll} = 100 St./h λ_{tech} = ?

$$\eta_3 = 1 - \left[(1-0,8)\cdot(1-0,8)\cdot(1-0,8)\right] = 0,992$$

$$\eta_5 = 1 - \left[(1-0,9)\cdot(1-0,8) + (1-0,9)\cdot(1-0,75) - (1-0,9)\cdot(1-0,9)\cdot(1-0,75-0,8)\right]$$
$$\eta_5 = 1 - [0,1\cdot 0,2 + 0,1\cdot 0,25 - 0,1\cdot 0,1\cdot(-0,55)]$$
$$\eta_5 = 1 - [0,02 + 0,025 + 0,0055]$$
$$\eta_5 = 0,95$$

$$f = \frac{2}{3}$$

$$\eta_p = \eta_o + f(1-\eta_o)$$

$$\eta_{p_{1,2,3}} = 0{,}9 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0992 + \frac{2}{3} \cdot \left(1-0{,}9 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}992\right)$$

$$\eta_{p_{1,2,3}} = 0{,}949$$

$$\eta_{p_{4,5,6}} = 0{,}97 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}85 = 0{,}783$$

$$\eta_{ges} = \eta_{p_{1,2,3}} \cdot \eta_{p_{4,5,6}} = 0{,}949 \cdot 0{,}783 = 0{,}743$$

$$\lambda_{tech} = \frac{\lambda_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0{,}743} \cong 135 \text{ St./h}$$

Literatur:

1. VDI 3581: *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*, 2004

2. VDI 4004: *Zuverlässigkeitskenngrößen – Übersicht*, 1986

3. VDI 3649: *Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme*, 1992

4. Peter S. Weygant: *Clusters for High Availability.* Hewlett-Packard Professional Books / Prentice Hall PTR, 1996

5. Gerhard H. Schlick: *Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Maschinen, Geräten und Anlagen mit Ventilen,* Expert Verlag, 2001