Zuverlässigkeitstechnik als Beitrag zur Nachhaltigkeit

Prof. Dr. A. Birolini, Emeritus Professor für Zuverlässigkeitstechnik an der ETH Zürich

Einleitung

Zuverlässigkeitstechnik ist ein ingenieurmässig stark interdisziplinäres Gebiet, mit dem Ziel zuverlässige und langlebige Bauteile, Geräte und Systeme zu entwickeln und zu fabrizieren unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, d. h. der Ressourcen-Schonung, der Auswirkung auf die Umwelt sowie der Möglichkeit für Recycling. Sie fordert deshalb einen ausgesprochenen Willen für die Zusammenarbeit mit allen Projektmitgliedern sowie breite Kenntnisse in Ingenieurwissenschaften und Mathematik. Sie ist als selbständige Disziplin in den 50er Jahren im Rahmen von Raumfahrt- und Militärprojekten entstanden. Mitte der 80er Jahre wurde an der ETH Zürich ein Lehrstuhl eingerichtet [1]. Heutzutage wird sie in vielen Hochschulen und Universitäten gelehrt. Mit der zunehmenden Problematik der Umweltbelastung und der Ressourcen-Verknappung gewinnt das Gebiet der Zuverlässigkeitstechnik stark an Bedeutung. Eine Grundvorlesung im Umfang von einem Semester zu 2 Std. pro Woche sollte deshalb zum Curriculum jedes Ingenieurs gehören. Diese kurze, allgemein zugängliche Darlegung kann für anspruchsvolle Leser/Interessenten mit [2], besser mit [3] oder mit der dort aufgeführten Literatur ergänzt werden.

Grundbegriffe, Hauptaufgaben

Quantitativ gesehen, ist die ***Zuverlässigkeit*** R(t) die Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit, neu zur Zeit $t = 0$, seine geforderte Funktion ausfallfrei während des Zeitintervalls $(0, t)$ unter gegebenen Bedingungen ausführen wird. Die Notwendigkeit von einer Wahrscheinlichkeit zu sprechen, ist weil alle systematischen Ausfälle vor Beginn der Inbetriebnahme eliminiert sein sollen/sollten und damit die Ausfälle zufällig auftreten. Zwei Grössen die oft anstelle des Zuverlässigkeitswertes (zwischen 0 und 1) angegeben werden, sind der Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit ***MTTF*** (Mean Time To Failure) und die ***Ausfallrate*** $\lambda(t)$. $\lambda(t)\delta t$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Betrachtungseinheit, neu zur Zeit $t = 0$, erst im Intervall $(t, t + \delta t)$ ausfallen wird. Ist $\lambda(t)$ zeitunabhängig, d. h. $\lambda(t) = \lambda$, so wird oft $MTTF = MTBF = 1/\lambda$ gebraucht (***MTBF*** steht für Mean operating Time Between Failures).

Für reparierbare Betrachtungseinheiten werden entsprechend die ***Reparaturrate*** $\mu(t)$ und die ***MTTR*** (Mean Time To Repair), sowie der Mittelwert für eine präventive Wartung ***MTTPM*** definiert. Für diese Betrachtungseinheiten wird neben der Zuverlässigkeit (wie oben definiert, wobei nur Ausfälle auf Systemebene zu berücksichtigen sind, was im Falle der Anwesenheit von Redundanz zu wesentlich höheren ***MTTF***-Werten führt), auch die ***Verfügbarkeit*** $PA(t)$ definiert. $PA(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Betrachtungseinheit zur Zeit *t* seine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen ausführt (zwischen 0 und *t* kann sie ausgefallen und repariert worden sein). Der stationäre Wert *PA* gibt auch den Prozentsatz der Zeit während dem die Betrachtungseinheit zur Verfügung steht. Oft werden hier auch die Mittelwerte der Arbeitszeiten ***MUT*** (Mean Up Time) und der Ausfallzeiten (für Reparatur oder anders) ***MDT*** (Mean Down Time) gebraucht.

Die **Aktivitäten** zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit (inklusive Instandhaltbarkeit und

Wartbarkeit) werden in enger Zusammenarbeit mit jener für die Qualitätssicherung durchgeführt. Für Grossprojekte werden sie oft in einem projektspezifischen Qualitäts- und Zuverlässigkeits-Sicherungsprogramm (RAMS assurance program) festgelegt, das in der Regel auch die Sicherheitsaspekte berücksichtigt (***RAMS*** steht für Reliability, Availability, Maintainability, Safety). Typische Struktur und Inhalt eines solchen Programms mit einem Vorschlag für die Zuteilung der Kompetenzen für die Durchführung der entsprechenden Aufgaben werden ausführlich im Kapitel 1.3 und Anhang A3 von [3] dargelegt. Speziell für Grossprojekte werden auch die logistische Unterstützung in der Nutzungsphase und Kostenbetrachtungen besonders wichtig.

Zuverlässigkeitsanalysen in der Entwicklungsphase

Die Zuverlässigkeit muss in der Entwicklungsphase in ein Produkt (Betrachtungseinheit) hineinentwickelt und während der Fabrikation, Transport und Nutzung aufrechterhalten werden. Das gilt auch für die Sicherheit, und für reparierbare Betrachtungseinheiten auch bezüglich der Instandhaltbarkeit und Wartbarkeit.

Wichtig für die Sicherstellung der Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit sind, neben **geeigneten Analysen**, auch die Festlegung und Befolgung von **Entwicklungsrichtlinien** (Design Guidelines) und die Durchführung von **Entwurfsüberprüfungen** (Design Reviews). Eine umfassende Liste von Entwicklungsrichtlinien für Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit (inklusive ergonomische sowie Sicherheit Aspekte) und Softwarequalität sind im Kapitel 5 von [3] gegeben. Ausführliche Fragenkataloge für Entwurfsüberprüfungen sind im Anhang A4 von [3] zusammengestellt.

Die Prozedur für die **Zuverlässigkeitsanalyse einer nichtreparierbaren Betrachtungseinheit** (bis zum Ausfall auf Niveau Betrachtungseinheit) ist in Bild 1 dargestellt.

Die Durchführung der ***FMEA*** (Failure Modes and Effects Analysis) unterstützt die **Ausfallartenanalyse** und ist unentbehrlich, wo **Redundanz** auftritt oder die **Sicherheit** im Vordergrund steht [2, 3].

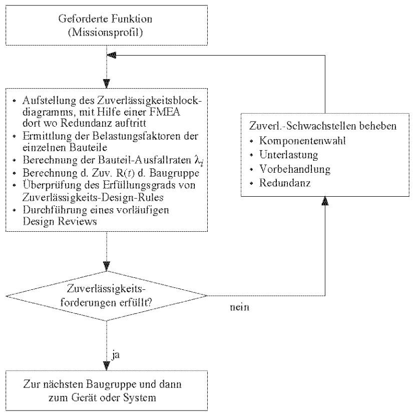


Bild 1 Prozedur für die Zuverlässigkeitsanalyse einer Baugruppe [2, 3]

Das ***Zuverlässigkeitsblockdiagram*** (ZBD) ist ein Ereignisdiagramm, es gibt die Antwort auf die Frage: Welche Elemente müssen zur Erfüllung der geforderten Funktion funktionieren und welche dürfen ausfallen (***Redundanz***). Die Aufstellung erfolgt, indem man die Betrachtungseinheit in Elemente zerlegt, die eine klar umrissene Aufgabe erfüllen. Diese Elemente werden dann zu einem Blockdiagramm derart zusammengefügt, dass die für die Funktionserfüllung notwendigen Elemente **in Serien-** und redundante Elemente **in Parallelschaltung** erscheinen; die **Ausfallart** des betreffenden Elements ist dabei zu berücksichtigen (FMEA). Mit dem ZBD wird stets beim höchsten Integrationsniveau (System zur Vereinheitlichung der Bezeichnung) begonnen. Für jede tiefere Stufe wird die entsprechend geforderte Funktion formuliert und das zutreffende ZBD aufgestellt. Dies solange möglich/notwendig ist. Weil das ZBD ein Ereignisdiagram ist, dürfen für jedes Element nur zwei Zustände (gut/ausgefallen) und eine Ausfallart angenommen werden.

Die Berechnung der **Ausfallraten** am tieferen Niveau des ZBD (Bauteil oder Baugruppe) erfolgt mit Hilfe von etablierten Ausfallratenkatalogen vorhanden in der Regel auf Bauteile-Ebene (siehe z. B. [2.20-2.30] in [3]), oder aus firmeninternen Daten.

Die Berechnung der Zuverlässigkeit der Betrachtungseinheit erfolgt dann mit Hilfe folgender zwei Grundformeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung (Pr steht für Wahrscheinlichkeit)

$\Pr\{A \cap B\} = \Pr\{A\}\Pr\{B\}$, für 2 ***unabhängige Ereignisse*** A und B, (1)

$\Pr\{A \cup B\} = \Pr\{A\} + \Pr\{B\} - \Pr\{A \cap B\}$, für 2 ***beliebige Ereignisse*** A und B. (2)

Gleichung (1) kommt zur Anwendung für die Serienschaltung von Elementen, und Gleichung (2) für die Parallelschaltung. Tabelle 1 fasst die Resultate für einige wichtige ZBD-Strukturen zusammen [2, 3].

Zur Betonung, dass die Betrachtungseinheit neu zur Zeit $t = 0$ ist, wird in [3] das Index S (für System) mit $S0$ konsequent verwendet. $MTTF_{S0}$ folgt dann aus

$$MTTF_{S0} = \int_0^\infty \mathrm{R}_{S0}(t)\,dt. \tag{3}$$

Für **reparierbare Betrachtungseinheiten** werden die Bestimmung der Reparaturraten für jedes Element im ZBD, und die Berechnung der vorausgesagten Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Betrachtungseinheit in der Prozedur von Bild 1 hinzugeführt. Die Berechnung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit muss mit Hilfe von stochastischen Prozessen erfolgen. ***Stochastische Prozesse*** sind mathematische Modelle für Zufallserscheinungen, die in der Zeit ablaufen, wie z. B. das Auftreten eines Ausfalls. Die Untersuchungen sind besonders einfach, wenn man annehmen kann, dass **Ausfallraten und Reparaturraten zeitunabhängig** (konstant) sind. In diesen Fällen hat man mit sogenannten (zeithomogenen) ***Markoff-Prozessen*** zu tun. Die Verallgemeinerung der Reparaturraten führt zu regenerativen Prozessen mit mindestens einem regenerativen Zustand, und die Verallgemeinerung von Ausfall- und Reparaturraten führt in der Regel zu nicht regenerativen Prozessen mit entsprechenden mathematischen Schwierigkeiten. Anhang A7 von [3] gibt eine umfassende Einführung in all diese Prozesse und Kapitel 6 von [3] wendet diese Prozesse zur Untersuchung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit üblicher Zuverlässigkeitsstrukturen an.

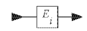
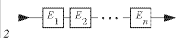
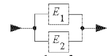
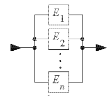
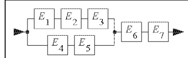
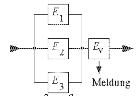
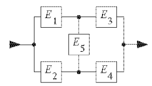
Zuverlässigkeitsblockdiagramm	Zuverlässigkeitsfunktion $R_S = \mathrm{R}_{S0}(t)$; $R_i = \mathrm{R}_i(t)$, $\mathrm{R}_i(0) = 1$	Bemerkungen
1 	$R_S = R_i$	Einzelelement $\lambda_i(t) = \lambda_i \Rightarrow R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$
2 	$R_S = \prod_{i=1}^{n} R_i$	Serienmodell $\lambda_{S0}(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)$
3 	$R_S = R_1 + R_2 - R_1 R_2$	Redundanz 1 aus 2 $\mathrm{R}_1(t) = \mathrm{R}_2(t) = e^{-\lambda t}$ $\Rightarrow \mathrm{R}_{S0}(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
4 	$E_1 = \ldots = E_n = E$ $\rightarrow R_1 = \ldots = R_n = R$ $R_S = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i}$	Redundanz k aus n, für $k = 1$ gilt $\Rightarrow R_S = 1 - (1-R)^n$
5 	$R_S = (R_1 R_2 R_3 + R_4 R_5 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) R_6 R_7$	Serien-/Parallelstruktur
6 	$E_1 = E_2 = E_3 = E$ $\rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R$ $R_S = (3R^2 - 2R^3) R_v$	Majoritäts-Redundanz (allgemeiner Fall n+1 aus 2n+1, n=1, 2, ...)
7 	$R_S = R_5(R_1 + R_2 - R_1 R_2) \cdot (R_3 + R_4 - R_3 R_4) + (1 - R_5) \cdot (R_1 R_3 + R_2 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4)$	Brückenschaltung (Zweiwegverbindung E_5)

Tabelle 1 Typische Strukturen von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen und entsprechenden Zuverlässigkeits-Funktionen (Annahmen: nichtreparierbar (bis zum Systemausfall), heisse Redundanz, unabhängige Elemente neu zur Zeit $t = 0$; der Index S bezieht sich auf die Betrachtungseinheit (System), und steht für $S0$ weil neu zur Zeit $t = 0$, i auf das Element E_i) [2, 3]

Im Folgenden wird das Beispiel einer Redundanz 1 aus 2 mit Serienelement E_v kurz betrachtet [2, 3]. Die getroffenen Annahmen sind:

- 2 gleiche Elemente $E_1 = E_2 = E$ in ***heisser Redundanz*** (das Reserveelement in der Redundanz ist wie das Arbeitselement belastet);
- **konstante** Ausfallraten λ, λ_v und Reparaturraten μ, μ_v;
- nur eine Reparaturmannschaft steht zur Verfügung und für das Serienelement E_v gilt die ***Priorität der Reparatur*** (eine allfällige Reparatur auf E_1 oder E_2 wird beim Ausfall von E_v unterbrochen und E_v wird repariert);
- bei einem Ausfall auf Systemebene (System down, d. h. E_v oder E_1 und E_2 sind ausgefallen) wird der Betrieb unterbrochen, kein weiterer Ausfall kann auftreten und es wird repariert mit Priorität der Reparatur auf E_v.

Bild 2 gibt das entsprechende **Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten** in (t, t+δt). Das Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten in $(t, t + \delta t)$ vom Bild 2 kann leicht interpretiert werden:

- in Z_0 und Z_2 ist das System im Betrieb (up);
- in Z_1, Z_3, Z_4 ist das System ausgefallen (down, und kein weiterer Ausfall kann auftreten);
- in Z_0 sind alle Elemente neu;

- in Z_1 ist das Serienelement E_v ausgefallen, wird repariert und das System ist down;
- in Z_2 ist das Arbeitselement oder das Reserveelement ausgefallen, er wird repariert und das arbeitsfähige Element führt den Betrieb weiter; in diesem Zustand kann neben der Reparatur des ausgefallenen Elements auch (mit einer viel kleineren Wahrscheinlichkeit) entweder das Serienelement E_v ausfallen (das System geht in Z_3), oder das jetzige Arbeitselement ausfallen (das System geht in Z_4);
- infolge der angenommenen konstanten Ausfall- und Reparaturraten, ist das System ohne Gedächtnis, damit ist in $(t, t+\delta t)$ der Übertritt von einem Zustand zum anderen unabhängig von t (d. h. vom ganzen Zeitverhalten in $(0, t)$) und nur abhängig vom Zustand zur Zeit t $(\lambda\delta t, \mu\delta t$ usw.).

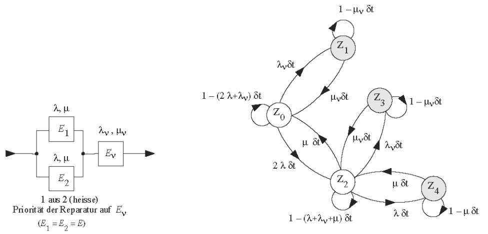


Bild 2 Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Diagramm der Übergangswahrscheinlichkeiten in $(t, t+\delta t)$ einer heissen Redundanz 1 aus 2 mit Serienelement (Vergleichselement/Umschalteinrichtung) E_v [2, 3]

Infolge der angenommenen zeitunabhängigen Reparaturrate μ wird in Z_4 die Reparatur für das ausgefallene Arbeits- oder Reserveelement in Z_0 neu gestartet, das gleiche gilt bei einem Übergang von Z_3 zu Z_2. Man sieht damit, wie die Annahme einer konstanten Reparaturrate unrealistisch ist. Deshalb wurde in [3] die Verallgemeinerung der Reparaturraten systematisch untersucht bis an die Grenze, wo der involvierte Prozess keinen einzigen regenerativen Zustand mehr enthält (Untersuchungen mit nicht regenerativen Prozessen können schwierig werden).

Die Berechnung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit erfolgt mit der Methode der Differential- oder der Integralgleichungen und führt, im Falle vom Bild 2, zu [2, 3]

$$MTTF_{S0} = \frac{1}{\lambda_v + 2\lambda^2/(3\lambda + \lambda_v + \mu)} \approx \frac{1}{\lambda_v + 2\lambda^2/\mu}\,, \tag{4}$$

$$PA_S = AA_S = \frac{1}{1 + \lambda_v/\mu_v + 2(\lambda/\mu)^2/(1 + 2\lambda/\mu)} \approx 1 - \frac{\lambda_v}{\mu_v} - \frac{2(\lambda/\mu)^2}{1 + 2\lambda/\mu}. \tag{5}$$

Die Näherungen berücksichtigen, dass in praktischen Anwendungen $\lambda < \lambda_v \ll \mu, \mu_v$ gilt. Das 0 beim $S0$ deutet an, dass zur Zeit $t = 0$ alle Elemente neu sind (Zustand Z_0 im Bild 2). Für die Verfügbarkeit gibt man hier nur den stationären Wert PA_S an, weil $PA_{S0}(t)$ sehr schnell zu PA_S konvergiert. Man erkennt, dass das Serienelement E_v die Werte von $MTTF_{S0}$ und PA_S bestimmt.

Zuverlässigkeitsprüfungen

Zuverlässigkeitsprüfungen sind wichtig, um die bei einer Betrachtungseinheit **erreichte Zuverlässigkeit** beurteilen zu können. Je früher damit begonnen wird, desto schneller können

Schwachstellen, die in den Zuverlässigkeitsanalysen nicht zum Vorschein kamen, entdeckt und mit geringem Aufwand behoben werden. Dadurch entsteht ein Lernprozess, der zu einer gezielten Verbesserung der Zuverlässigkeit und damit zu einem serienreifen Produkt führt. Da Zuverlässigkeitsprüfungen in der Regel aufwendig sind, müssen sie soweit wie möglich mit anderen Prüfungen koordiniert werden. Die Prüfbedingungen sollen nahe bei den reellen Einsatzbedingungen liegen.

Im Folgenden wird man sich auf die **Bestimmung und den Nachweis einer konstanten Ausfallrate λ oder von $MTBF = 1/\lambda$** beschränken (siehe Anhang A8 und Kapitel 7 von [3] für eine umfassende Darlegung).

Für die ***Schätzung*** einer konstanten (zeitunabhängigen) Ausfallrate λ oder einer $MTBF = 1/\lambda$ wird in der Regel folgende Prozedur verwendet [2, 3]:

- wenn in T fest gegebenen kumulativen Betriebsstunden genau k Ausfälle aufgetreten sind, so ist die Maximum-Likelihood ***Punktschätzung*** der unbekannten λ gegeben durch [2, 3]

  $$\hat{\lambda} = k/T\,, \qquad k = 0, 1, 2, \ldots; \tag{6}$$

  das Dach über λ deutet darauf hin, dass es sich um eine ***Schätzung*** handelt; die ausgefallenen Betrachtungseinheiten sollen unverzüglich durch neue ersetzt (oder repariert) werden [3, p. 330], das gilt insbesondere wenn die Anzahl der involvierten Betrachtungseinheiten nicht sehr gross ist; infolge der **konstanten Ausfallrate** λ, kann die ***kumulative Betriebszeit*** T theoretisch mit einer beliebigen Anzahl identischer Betrachtungseinheiten zusammengestellt werden (eine praktische Faustregel ist jedoch nicht mehr als etwa λT identische Betrachtungseinheiten zu haben [3, p. 328]);
- für die **Interwallschätzung** einer unbekannten Ausfallrate λ, können die Vertrauensgrenzen $\hat{\lambda}_l$ und $\hat{\lambda}_u$ aus Bild 3 abgelesen werden [2, 3]; dabei ist $[\hat{\lambda}_l, \hat{\lambda}_u]$ das ***Vertrauensintervall*** und γ das ***Vertrauensniveau*** (Aussagewahrscheinlichkeit), d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass $[\hat{\lambda}_l, \hat{\lambda}_u]$ den wahren (unbekannten) Wert von λ überdeckt;

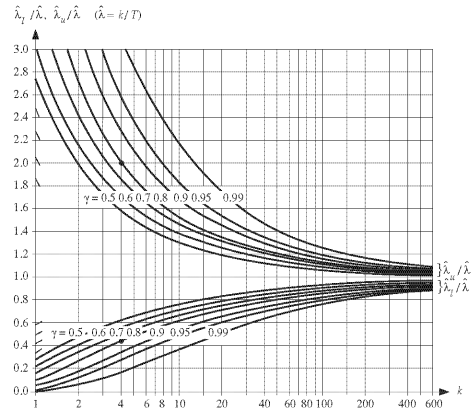


Bild 3 Vertrauensgrenzen $\hat{\lambda}_l$ und $\hat{\lambda}_u$ für eine unbekannte konstante (zeitunabhängige) Ausfallrate λ (T = kumulative Betriebszeit, k = Anzahl Ausfälle während T, γ = Vertrauensniveau = $1 - \beta_1 - \beta_2$ hier mit $\beta_1 = \beta_2$); für praktische Anwendungen gilt auch $MT\hat{B}F_u = 1/\hat{\lambda}_l$ und $MT\hat{B}F_l = 1/\hat{\lambda}_u$ [2, 3]

• für praktische Anwendungen kann

$$MT\hat{B}F = T/k\,, \qquad k = 1, 2, 3, \ldots, \tag{7}$$

für die Punktschätzung einer unbekannten $MTBF$ verwendet werden ($T/(k+1)$ wäre erwartungstreu).

Im Zusammenhang mit der Abnahmeprüfung einer Betrachtungseinheit wird oft der ***Nachweis*** einer Ausfallrate λ oder einer $MTBF = 1/\lambda$ verlangt. Dabei geht es um folgendes:

Die Betrachtungseinheiten sollen mit einer Wahrscheinlichkeit näherungsweise gleich (aber nicht kleiner als) $1-\alpha$ *angenommen werden, falls die wahre (unbekannte)* λ *kleiner als* λ_0 *ist, und sie sollen mit einer Wahrscheinlichkeit näherungsweise gleich (aber nicht kleiner als)* $1-\beta$ *zurückgewiesen werden, falls die wahre* λ *grösser als* λ_1 *ist* $(\lambda_1 > \lambda_0)$*; dabei sind* λ_0 *bzw.* λ_1 *die spezifizierte bzw. die maximal akzeptierbare* λ *und* α *bzw.* β *das Lieferanten- bzw. das Abnehmerrisiko (Risiko für einen falschen Entscheid).*

Es handelt sich hier um eine ***Hypothesenprüfung***, und der oft verwendete Test ist die sogenannte **zweiseitige Einfachprüfung** mit $\alpha = \beta$. Tabelle 2 gibt die üblichen Parameterwerte für solche Prüfungen an [2, 3].

	$\lambda_1/\lambda_0 = 1.5$	$\lambda_1/\lambda_0 = 2$	$\lambda_1/\lambda_0 = 3$
$\alpha \approx \beta \lessapprox 0.1$	$c = 40$ $\lambda_0 T \approx 32.98$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.098)$	$c = 14$ $\lambda_0 T \approx 10.17$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.093)$	$c = 5$ $\lambda_0 T \approx 3.12$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.096)$
$\alpha \approx \beta \lessapprox 0.2$	$c = 17$ $\lambda_0 T \approx 14.33$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.197)$	$c = 6$ $\lambda_0 T \approx 4.62$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.185)$	$c = 2$ $\lambda_0 T \approx 1.47$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.184)$
$\alpha \approx \beta \lessapprox 0.3$	$c = 6$ $\lambda_0 T \approx 5.41$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.2997)$	$c = 2$ $\lambda_0 T \approx 1.85$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.284)$	$c = 1$ $\lambda_0 T \approx 0.92$ $(\alpha \approx \beta \approx 0.236)$

Tabelle 2 Anzahl c der zugelassenen Ausfälle während der kumulativen Betriebszeit T und Werte von $\lambda_0 T$ zum Nachweis von $\lambda < \lambda_0$ gegen $\lambda > \lambda_1$ mit $\lambda_1 > \lambda_0$ (gilt auch für die Prüfung einer $MTBF = 1/\lambda$ und einer unbekannten Wahrscheinlichkeit *p,* siehe die Bemerkung zur Gl. (6) für die kumulative Betriebszeit *T*) [2, 3]

Zusammenarbeit mit der Industrie

Infolge der Vielseitigkeit bzw. Interdisziplinarität der Zuverlässigkeitsprobleme, ist die Zusammenarbeit mit allen an einem Projekt beteiligten Linienstellen / Mitarbeitern innerhalb einer Firma sowie zwischen Hochschule und Industrie nicht nur wünschenswert, sondern unbedingt notwendig. An der ETH Zürich war die Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik (Reliability Laboratory) und über 30 mittelgrossen und grossen Firmen in der Schweiz und in Europa sehr intensiv und in 5-Jahres-Verträgen auf folgender Basis aufgebaut:

• **Vorteile für die Industrie**: Teilnahme an der Planung und Realisierung von grossen Forschungsprojekten, kostenlose Lösung von firmenspezifischen Problemen bis zu 10 Tagen pro Jahr und Firma (mit der nötigen Vertraulichkeit), und Austausch von Erfahrung und Know-how;

• **Vorteile für die ETH**: CHF 20'000.- pro Jahr und Firma zur Unterstützung bei der Anschaffung von grossen Prüfeinrichtungen, Zugang zu Zuverlässigkeitsproblemen in der Industrie, und Inputs für Doktorarbeiten (speziell von grossen Halbleiter-, Geräte- oder Systemherstellern).

Dank dieser Zusammenarbeit wurde ein Laboratorium mit 20 Ingenieuren, Physikern und Technikern (6 von der ETH finanziert, 8 Doktoranden) aufgebaut, wo mit über 6 Mill. CHF hochstehenden Einrichtungen[i], elektrische Prüfungen, Umwelt- und Zuverlässigkeitsprüfungen, sowie Auslallanalysen an hochintegrierten Schaltungen (VLSI) und komplexen Baugruppen durchgeführt wurden. Es war damit möglich, insbesondere auch mit grossen internationalen Halbleiterherstellern, Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprobleme konkret zu besprechen. Diese Zusammenarbeit war für alle sehr fruchtbar, siehe [1] und in die Mitte der Seite IX von [3] für weitere Details.

Ausblick

Neben den Zuverlässigkeitsaspekten in neuen technischen Entwicklungen (Nanotechnologie, Neumaterialien, neue Prozesse usw.), die in Zusammenarbeit mit Fachleuten auf diesen Gebieten gelöst werden müssen, bleiben insbesondere die Untersuchung / Modellierung von fehlertoleranten Strukturen, von vernetzten Systemen, von der Auswirkung multipler Ausfallarten / Ausfallmechanismen, sowie der Softwarequalität, wichtige Forschungsgebiete der Zuverlässigkeitstechnik. Gewiss trägt die Zuverlässigkeitstechnik zur Verbesserung der Nachhaltigkeit bei. Die Technik allein reicht aber nicht, trotz künstlicher Intelligenz und der Hoffnung auf die Eroberung anderen Planeten[ii], alle anstehenden grossen Probleme der Menschheit zu lösen. Konkrete, auch wenn zum Teil idealistische Vorschläge dazu wurden 2019 dem Club of Rome unterbreitet [4], siehe auch [5] für erste Hinweise.

Literatur

[1] Birolini A., Reliability Engineering: Cooperation between University an Industry at the ETH Zürich, *Quality Engineering*, Vol. 8, No. 4, 1996, pages 659-674.

[2] Birolini A., *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*, Springer 1997 (als 5. Aufl., incl. die 2. bereinigte Aufl. 1990, von *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*, Springer, 1. Aufl. 1985).

[3] Birolini A., *Reliability Engineering: Theory and Practice*, 8th Edition, Springer 2017 (1st Ed. 1994).

[4] Birolini A., *10 concrete suggestion for a new, sustainable world* (in German), www.birolini.ch, 13 April 2019.

[5] Bacivarov I. C., Lesson from a life dedicated to reliability: Interview with Prof. A. Birolini, *Quality Assurance (Asigurarea Calitatii),* Vol. 16, No. 64, 2010, pages 5-7.

[i] U. a. eine Sentry S 50 mit 128 Pins, ein IDS 5000, eine grosse Kammer für thermische Zyklen mit bis zu 80°C/min innerhalb der Prüflinge, und Einrichtungen für umfassende Ausfallanalysen.

[ii] Bezüglich künstlicher Intelligenz bleibt die Gefahr von Roboten überrollt zu werden hypothetisch, denn man kann immer noch den Stecker ziehen; zur Eroberung anderer Planeten, werden die nötigen Ressourcen und Energien, sowie jahrelange Reise, Grenzen setzen.