

Zuverlässigkeit elektrischer Komponenten im Bordnetz:

Jedes Bauteil zählt



https://www.shutterstock.com/de/image-photo/wiring-harnesses-vehicles-automotive-industry-manufacturing-1255747276?src=qXlzz_PEMEvYJhSFbfqoLw-1-13

Anlaufbild (Bild: Roman Demkiv | shutterstock.com)

Durch den Trend zum autonomen Fahren steigen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit aller elektrischen Bauteile. Da Tests zeit- und kostenaufwändig sind, kann die Zuverlässigkeit auch durch genaue physikalische Alterungsmodelle und belastbare mathematische Hochrechnungen ermittelt werden.

Von Sven-Joachim Kimmerle und Hans-Dieter Ließ

Neben den Anstrengungen zum automatisierten beziehungsweise autonomen Fahren und dem Trend zur Elektromobilität werden auch weitere elektrische Funktionen in der Automobiltechnik eingeführt. Es ist abzusehen, dass damit die Wertschöpfung im Bereich der Elektrotechnik die der Mechanik überholen wird. An wirklich sicherheitsrelevanten Stellen, etwa der Lenksäule, wird allerdings auf den Vorrang der Mechanik noch nicht verzichtet und der Elektrik lediglich eine Unterstützungsfunktion zugestanden.

Das steht im Gegensatz zur Luftfahrttechnik, der für die Entwicklung offensichtlich die Funktion eines Schrittmachers zukommt. „Fly-by-wire“ wurde mit ausreichender Redundanz bereits seit 1987 immer mehr zum Stand der Technik. Allerdings hat es hier mit der ISO 26262 zur funktionalen Sicherheit, dem FIDES-Guide [1] und mit den darin beschriebenen FIT-Raten schon sehr früh intensive und firmenübergreifende Bemühungen einer Standardisierung der Wege zur Verbesserung der Systemzuverlässigkeit gegeben.

Die Bemühungen der Automobilindustrie diverse Fahrerassistenzsysteme bis hin zum autonomen Fahren einzuführen, erfordern naturgemäß eine hohe Zuverlässigkeit der elektrischen Komponenten und Systeme. Entsprechende Angaben mit belastbaren Zahlen stehen aktuell in dem erforderlichen Maße nicht zur Verfügung.

Nachfolgend wird die Auswirkung der Alterung am Beispiel von elektrischen Leitungen untersucht – die Methodik lässt sich auf weitere Komponenten übertragen.

Methoden zur Zuverlässigkeitsbestimmung

Das FIDES-Regelwerk beruht auf a priori-Zuverlässigkeitsabschätzungen anhand von Erfahrungswerten und bekannten Gesetzen aus der „physics of failure“, wie beispielsweise dem Arrhenius-Beschleunigungsfaktor (Kasten 1). Hierdurch kann die Zuverlässigkeit vorab abgeschätzt werden, ohne Feldausfälle oder zeit-, energie- und kostenaufwändige Messungen zur Verfügung zu haben.

Eine Alternative zu Messreihen unter realen Belastungen sind Tests unter Überlast (beispielsweise höhere Temperatur), die beschleunigtes Alterungsverhalten zeigen und unter Modellannahmen, wie dem Arrhenius-Gesetz, eine Hochrechnung auf das wirkliche Alterungsverhalten erlauben.

Ausfallkriterium und Ausfallzeit

Der erste Schritt zur Zuverlässigkeitsabschätzung kann ausschließlich auf Komponenten-Ebene beginnen. Hier muss analysiert werden, unter welchen Bedingungen und in welcher Zeit ein Bauelement seine ihm zugedachten Funktionen erfüllen kann. Die Bestimmung der Ausfallzeit beziehungsweise der Lebensdauer setzt allerdings auch die Festlegung eines Ausfallkriteriums voraus, das dem Einsatz in der Praxis möglichst nahekommen sollte. Unterschiedlich scharfe Ausfallkriterien bedingen Ausfallzeiten, die sich zum Teil um Größenordnungen unterscheiden. Da übliche Prüfungsmethoden meist nicht zerstörungsfrei sind, geht die Bestimmung immer mit einem hohen Aufwand an Prüf-Mustern und -Einrichtungen einher.

Da die Ausfallzeit grundsätzlich stochastischen Schwankungen unterliegt, wird sie als „mean-time-to-failure“ (MTTF) angegeben. Die statistische Verteilung der gemessenen Ausfälle bezüglich der Zeit $t \geq 0$ ist durch die Verteilungsfunktion $F(t)$ beschrieben. Eine Verteilungsfunktion ist streng monoton wachsend und hat als Wahrscheinlichkeit Werte von 0 bis 100 Prozent. Demnach bezeichnet $W(t) = 1 - F(t)$ die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Bauteils bis zum Zeitpunkt t . Die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$, die die Anzahl der Ausfälle zu einem Zeitpunkt t in Prozent pro Stunde angibt, ergibt sich über den Zusammenhang $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$. Der Bezug der Anzahl der

Ausfälle auf die noch vorhandenen intakten Bauteile ergibt als Funktion der Zeit die Ausfallrate:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{W(t)}.$$

Ausfallraten werden typischerweise in der Einheit FIT („*failure-in-time*“) gemessen, was einem Ausfall in einer Milliarde Stunden entspricht. Hierbei werden meist, wie im FIDES-Guide [1], Stunden Lebensdauer einschließlich Standzeiten herangezogen – nicht lediglich Betriebsstunden. Wird eine hinreichend große Anzahl von Bauteilen betrachtet, die unabhängig voneinander ausfallen können, relativiert sich die scheinbar kleine Einheit für Ausfälle. Im Allgemeinen wird eine Funktionseinheit ab circa 1.000 FIT als kritisch für die Zuverlässigkeit erachtet.

Meist ist es sinnvoll als statistische Verteilung für Ausfälle eine Weibullverteilung zu betrachten (Kasten 2). Der Spezialfall einer zeitunabhängigen Ausfallrate λ ist die Exponentialverteilung – dann ist λ gerade der Kehrwert der MTTF.

Alterung von elektrischen Leitungen

Als Ausfallkriterium wurde bei der unbegrenzten Bordnetz-Verkabelung (so genannte Meterware) die Versprödung der Isolierung mit Hilfe der sogenannten Wickelprüfung bei Raumtemperatur untersucht – vergleiche IEC 60216 (Elektroisoliertstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens). Alternative Ausfallkriterien sind die Kältewickelprüfung oder ein Zugtest. Je nach Ausfallkriterium werden verschiedene Ausfallzeiten gemessen, die sich zum Teil stark unterscheiden können.

Bestimmung der Weibull-Parameter für eine konstante Temperatur

Für eine gegebene Testtemperatur wird eine Messreihe für Ausfallzeiten betrachtet, die stochastischen Fluktuationen unterliegt. Aufgrund der zerstörenden Prüfmethode sind zusätzlich noch geeignete statistische Filtermethoden erforderlich, um die Messdaten zunächst für die weitere Datenanalyse aufzubereiten. Mithilfe der Maximum-Likelihood-Methode oder eines Zugangs über empirische Verteilungsfunktionen wird an die gefilterten Messdaten eine Weibullverteilung angepasst (**Bild 1**).

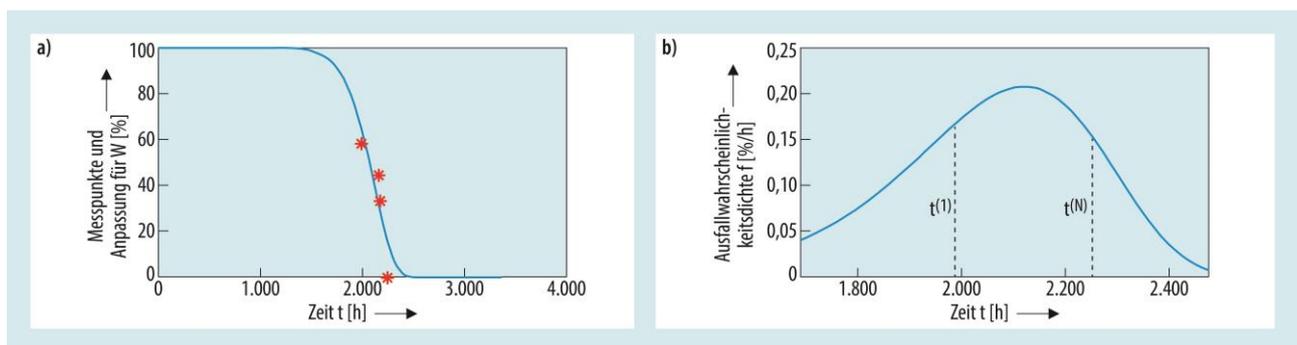


Bild 1. Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit basierend auf Messungen eines Leitungsherstellers für eine konstante Temperaturlast von 120 °C bei einer PVC-Leitung mit Querschnitt 0,5 mm² in einem Programm von Physical Software Solutions (PSS) in Matlab.
a: Gemessene Überlebenswahrscheinlichkeiten nach Filterung (rote Sterne) und Anpassungskurve für $W(t)$ durch nichtlineare Regression.
b: Aus dem gefitteten $W(t)$ abgeleitete Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ mit erstem und letzten Ausfallzeitpunkt in der Messung.

(Quelle: Physical Software Solutions)

Für eine Weibullverteilung gilt für den Erwartungswert μ für die Ausfallzeit näherungsweise $\mu \approx \tau$, wenn β größer 10 ist. μ wird mit der linken Seite der Arrhenius-Gleichung (1) identifiziert (Kasten 1). Ein ähnliches Modell, analog zu Gleichung (1), gilt auch für die Standardabweichung, die für eine Weibullverteilung näherungsweise $\sigma \approx \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{\tau}{\beta}$ ist. Für eine feste Temperatur lässt sich aus den beiden so erhaltenen Gleichungen (μ und σ) τ und β eindeutig umrechnen – zudem kann die Temperaturabhängigkeit der beiden Parameter angegeben werden. Die Ergebnisse werden als Referenzwerte hinterlegt und können mit einer begrenzten Sicherheit auch auf die außerhalb des Messbereichs liegenden Temperaturen hochgerechnet werden.

Extrapolation auf Temperaturbereich für konstante thermische Lasten

Durch die kleinste Quadrate-Methode kann für einen begrenzten Temperaturbereich der Erwartungswert μ der Ausfallzeit an ein Arrhenius-Gesetz wie Gleichung (1) angepasst werden. Ebenso wird eine kleinste-Quadrate-Anpassung für die Standardabweichung σ durchgeführt. Damit wird es möglich, die Erwartungswerte der Ausfallzeit mit den zugehörigen Konfidenzbereichen für beliebige konstante Temperaturen anzugeben.

Bei der numerischen Anpassungsrechnung werden, ausgehend von den Messwerten für unbegrenzte Leitungen, nachfolgende charakteristische Invarianten gefunden, mit denen ihr Verhalten unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu beschreiben ist:

- t_r , die reaktionskinetische Periodendauer in h
- T_a , die materialabhängige Aktivierungsenergie in Kabs
- T_∞ eine eingeführte Erstarrungstemperatur in °C

Die Ergebnisse der numerischen Datenanalyse und der Ausgleichsrechnungen, die für die logarithmierten Gleichung erfolgen, zeigt **Bild 2** für einen Temperaturbereich.

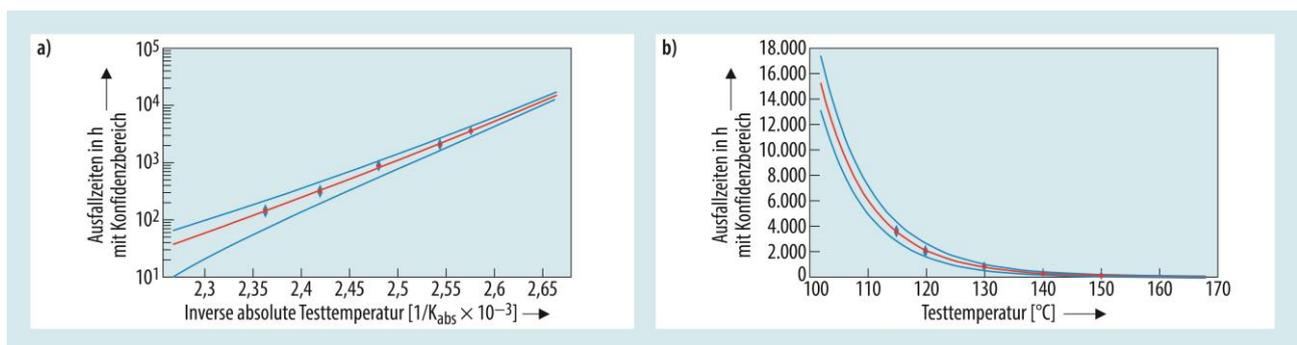


Bild 2. Interpolation der Ausfallzeiten über einen Temperaturbereich basierend auf Messungen eines Leitungsherstellers für verschiedene konstante Temperaturlasten bei einer PVC-Leitung mit Querschnitt $0,5 \text{ mm}^2$ in einem Programm von Physical Software Solutions (PSS) in Matlab. Erwartungswerte zu Messungen (rote Punkte) mit Konfidenzintervall (blaue Dreiecke), interpolierte mittlere rote Kurve Erwartungswert μ , obere und untere blaue Kurve $\mu \pm 3 \sigma$.

a: Semilogarithmierte Darstellung, in der die Ausgleichsrechnung erfolgt.

b: Zurückgerechnete Arrhenius-Kurve mit Exponentialfunktion.

(Quelle: Physical Software Solutions)

Die realistischen Ausfallzeiten sind demnach deutlich größer als die überschätzenden Mindesthaltbarkeitsdauern, die Normen oder auch interne Vorschriften von Anwendern für feste Normtemperaturstufen vorschreiben. Die rote Linie (**Bild 2a**) ist keine Gerade, sondern leicht gekrümmt, was auf die Beachtung der Erstarrungstemperatur T_{∞} zurückzuführen ist. Die Einführung von T_{∞} ergibt eine bessere Güte der Anpassungskurve – eine hohe Genauigkeit ist für weitere Betrachtungen essenziell.

Temperaturabhängige Ausfallzeiten

Als weit anspruchsvoller erweist sich bei der Weiterführung der Ausfallzeiten-Berechnung das Auffinden statistisch beschreibbarer Zusammenhänge für Komponenten, die nacheinander verschiedenen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind. So zeigen die Messergebnisse unter anderem, dass auch die Reihenfolge der unterschiedlichen Temperaturbelastungen mit in die statistische Streuung der Lebensdauer-Angaben eingeht, was in der Standard-Literatur nicht behandelt wird [2]. Messungen für zunächst eine höhere Temperaturlast und anschließend eine niedrigere Temperaturlast zeigen für typische thermische Belastungszeiten eine kürzere Ausfallzeit unter größerer Streuung als umgekehrt. Der Sachverhalt konnte allerdings durch eine Erweiterung der zur Beschreibung entwickelten und zugrunde gelegten Theorie nachvollzogen werden [3]. Auch in der allgemeinen Situation kann neben dem Erwartungswert auch eine Standardabweichung berechnet werden, die eine Angabe von Konfidenzbereichen zulässt.

Weitere Analysen

In einem nächsten Schritt müsste das beschriebene Untersuchungsverfahren auf weitere Ausfallkriterien und andere Isoliermaterialien erweitert werden.

Alterung weiterer Komponenten

Mit der Einführung einer für jede Leitung begrenzten Länge wird zu weiteren Komponenten des Bordnetzes übergeleitet, die auf vergleichbare Weise untersucht werden können – Steckverbindingssysteme, Kabelschuhe, Sicherungen, Massebolzen bis hin zu Stromquellen und -aufnehmern. Hier sind dann die nachweisbaren Abhängigkeiten der charakteristischen Invarianten der einzelnen Komponenten durch die gegenseitige Beeinflussung im Bordnetz zu berücksichtigen.

Zusammenspiel im Bordnetz als Herausforderung

Bei der Optimierung der elektrischen Bordnetz-Systeme und -Komponenten hinsichtlich ihrer Leistungsgewichte wird deutlich, dass die Analyse nicht für jedes Bauteil isoliert betrachten werden kann. Die einzelnen Bauelemente korrespondieren nicht nur elektrisch, sondern tauschen auch teilweise Wärmeleistungen (oder auch Schwingungsenergie) aus, weshalb nur eine komponentenübergreifende Optimierung zu einer realistischen Lösung führen kann – das wird in aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten untersucht.

Da ein heutiges Fahrzeugbordnetz ein komplexes Bauteil mit zahlreichen Einzelleitungen und Kontakten und zugleich die längste und schwerste Funktionseinheit mit einem großen Anteil manueller Fertigung ist, wird die Notwendigkeit aber auch die Chance einer Optimierung deutlich.

Literatur

- [1] FIDES Guide 2009, Edition A, Reliability Methodology for Electronic Systems, aktualisierte Version, Institut pour la Maîtrise des Risques, Gentilly, Frankreich, September 2010
- [2] N. Balakrishnan, C.R. Rao (editors): Handbook of Statistics 20, North-Holland (Elsevier, Amsterdam), 2001.
- [3] S.-J. Kimmerle, K. Dvorsky, H.-D. Liess, R. Avenhaus: Time-to-Failure under Varying Thermal Stresses, Preprint, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2019.

Kasten 1

Temperaturabhängige Alterung nach Arrhenius

Die Ausfallzeit t_k eines Bauteils hängt nach dem Arrhenius-Modell wie folgt von der Temperatur T in °C ab:

$$t_k(T) = t_r \exp\left(\frac{T_a}{T - T_\infty}\right)$$

Gleichung (1)

Dabei wird ein Alterungsverhalten wie bei einer chemischen Reaktion erster Ordnung zugrunde gelegt. Da durch Messungen bei höheren Temperaturen Rückschlüsse auf die Alterung bei niedrigeren, praktisch relevanten Temperaturen gezogen werden können (in denen die Ausfallzeiten in der Größenordnung von Jahren liegen können), wird der Exponentialausdruck rechts auch Arrhenius-Beschleunigungsfaktor genannt.

Kasten 2

Weibull- und Exponentialverteilung

Eine gängige Wahrscheinlichkeitsverteilung für Ausfälle ist die Weibullverteilung mit Dichte:

$$f(t) = \frac{\beta}{\tau^\beta} t^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right)$$

Die Verteilung für Zeiten $t \geq 0$ hat 2 Parameter:

- Zeitkonstante τ in h, die einer typischen Zeitskala für die Ausfallzeit entspricht
- Nicht-negativer, dimensionsloser Formparameter β , der die Änderung der Ausfallrate wie folgt beschreibt:
 - i: Für $\beta < 1$, nimmt die Ausfallrate mit der Zeit ab, modelliert das eine Phase der Behebung von „Kinderkrankheiten“ beziehungsweise eine „Lernphase“.
 - ii: Für $\beta = 1$, ist die Ausfallrate konstant, sind die Ausfälle rein stochastisch. Das ist der Spezialfall einer Exponentialverteilung mit Parameter τ .
 - iii: Für $\beta > 1$, nimmt die Ausfallrate zu, liegt Alterung beziehungsweise Verschleiß vor.

Es scheint, dass bei typischen Bauelementen alle 3 Ausfallmodi gemeinsam vorkommen und dass in erster Näherung gegenseitige Unabhängigkeit angenommen werden kann. Damit können die Ausfallraten der Phasen (i), (ii) und (iii) wie folgt addiert werden:

$$\Lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2 + \lambda_3(t) = \frac{\beta_1}{\tau_1^{\beta_1}} t^{\beta_1-1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{\beta_3}{\tau_3^{\beta_3}} t^{\beta_3-1}$$

(Gleichung 2)

Die Gesamtausfallrate $\Lambda(t)$ ist damit durch die 3 Zeitkonstanten τ_i ($i=1,2,3$), für die 3 Betriebsphasen und 2 Formfaktoren β_i ($i=1,3$) zu beschreiben – das ergibt die typische Badewannenkurve (**Bild 3**).

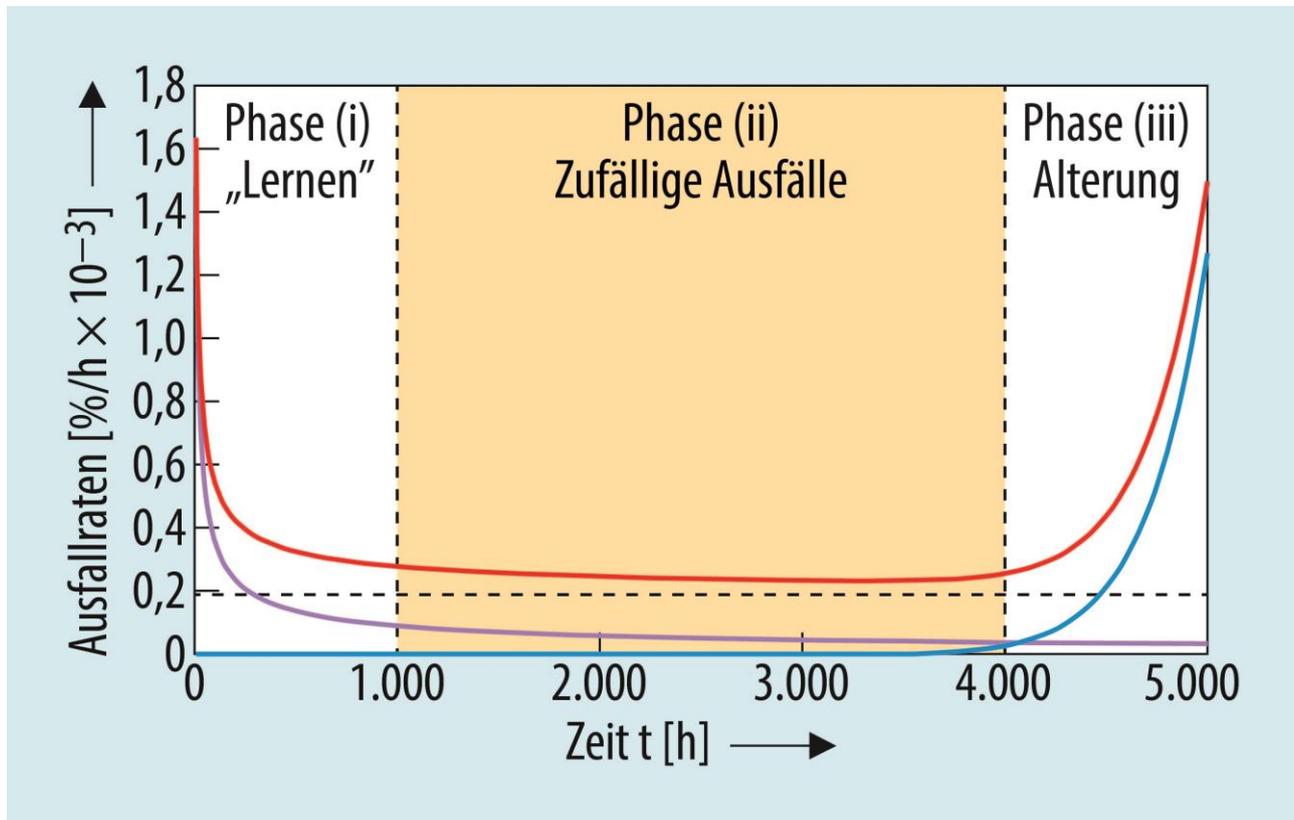


Bild 3. Weibullverteilungen für die drei typischen Ausfalltypen, die nacheinander dominieren: Phase (i) mit zeitlich sinkender Ausfallrate $\lambda_1(t)$ (Magenta), Phase (ii) mit konstanter Ausfallrate $\lambda_2(t)$ (schwarz gestrichelt) und Phase (iii) mit steigender Ausfallrate $\lambda_3(t)$ (Blau). Die Überlagerung ergibt eine charakteristische Badewannenkurve für die Ausfallrate $\Lambda(t)$ (Rot).

(Quelle: Physical Software Solutions)

Da die Anwendung die Alterung der Isolation von Leitungen ist, ergibt sich ein β deutlich größer als 1. Durch Einführung einer von 0 bis t gemittelten Ausfallrate $\bar{\lambda} = 1/\bar{\tau}$ (zeitlich konstant) ergibt sich eine Exponentialverteilung mit Zeitkonstante $\bar{\tau}$.

Dr. Sven-Joachim Kimmerle



ist Mitarbeiter bei Physical Software Solutions und nebenberuflicher Dozent an der Universität der Bundeswehr München, wo er zuvor wissenschaftlicher Mitarbeiter war und 2016/2017 die Professur für Ingenieurmathematik und Ingenieurinformatik vertrat. Nach seinem Studium der Mathematik und Physik promovierte er 2009 über die mathematische Modellierung und Simulation von Phasenübergängen bei der Halbleiterherstellung an der Humboldt-Universität zu Berlin. Seine Forschung ist interdisziplinär und umfasst die mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung komplexer Anwendungsprobleme (von Mehrkörperproblemen über Wasserstoffbrennstoffzellen und -elektrolyse bis zu elektrischen Netzwerken und Komponenten).

Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Ließ



promovierte nach seinem Studium der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule München auf dem Gebiet der Halbleiterphysik an der Technischen Universität in Berlin. Seit 1976 ist er Professor für Allgemeine Elektrotechnik an der Universität der Bundeswehr München. Die Tätigkeit seiner Forschergruppe hat sich in den letzten 20 Jahren auf mathematisches Ingenieurwesen konzentriert. In dem Rahmen entwickelt die Gruppe die Grundlagen für die Bordnetz-Berechnung. 2014 erfolgte zusammen mit Mitarbeitern der Universität die Ausgründung der Physical Software Solutions für die mathematische Berechnung von physikalischen Fragestellungen.