

**Modellierung des Zuverlässigkeitswachstums  
komplexer, reparierbarer Systeme**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

RALPH BEAT BRINKMANN

Dipl. El.-Ing. ETH  
geboren am 13. April 1962  
von Solothurn

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. A. Birolini, Referent  
Prof. Dr. J. Hugel, Korreferent



1997



00100003216355

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag auf dem Gebiet der Untersuchung der Zuverlässigkeit komplexer, reparierbarer Systeme dar. Thema ist die Modellierung des Zuverlässigkeitswachstums, d.h. die Modellierung der Verbesserung der Zuverlässigkeit aufgrund der Korrektur von Entwicklungs- und Konstruktionsfehlern, von Fehlern im Fertigungs- und Prüfablauf sowie aufgrund der Beseitigung von Schnittstellenproblemen, alles Fehler, die sich als Ausfälle systematischer Natur zeigen.

Neue Modelle auf der Basis des inhomogenen Poisson-Prozesses werden entwickelt, welche für die vorliegenden Datensätze eine passendere Beschreibung des Zuverlässigkeitswachstums als die bekannten Modelle erlauben.

Nach einer kurzen Einleitung in die Problemstellung werden die Grundlagen zum Begriff des Zuverlässigkeitswachstums dargelegt. Insbesondere wird auf die Bedeutung einer sauberen und detaillierten Testdatenerfassung und auf die Unterschiede zwischen reparierbaren und nichtreparierbaren Systemen eingegangen.

Der Übersicht über die verschiedenen Modelle zur Beschreibung des Zuverlässigkeitswachstums komplexer, reparierbarer Systeme wird genügend Platz eingeräumt, insbesondere der Darlegung der Modelle, die auf dem inhomogenen Poisson-Prozess beruhen. Die deterministischen Modelle werden nur kurz skizziert. Die Beschreibung der stochastischen Modelle umfasst die grundlegenden Modellgleichungen sowie die Verfahren zur Schätzung der Parameter. Die Modifikation eines verbreiteten Modells führt zu einem Modell, welches zur Beschreibung von Software-Qualität vorgeschlagen wurde. Zur Schätzung der Modellparameter wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Maximum-Likelihood Methode verwendet, da die Methode der kleinsten Quadrate bei einzelnen Modellen zu unrealistischen Resultaten führt.

Als Resultat umfassender Untersuchungen werden neue Modelle auf der Basis des inhomogenen Poisson-Prozesses vorgeschlagen, welche sich auf multiplikative Kombinationen von Mittelwertfunktionen verschiedener inhomogener Poisson-Prozesse stützen. Zum Schluss der Modellbetrachtungen wird ein Kostenmodell zur Bestimmung der kostenoptimalen Dauer eines Zuverlässigkeitswachstums-Programms vorgestellt.

Die neuen Modelle werden anschliessend zusammen mit den bekannten Modellen einem umfassenden Vergleich unterzogen, um ihre Praxistauglichkeit zu untersuchen. In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Daten visualisiert. Dabei musste im Hinblick auf eine sinnvolle Auswertung ein Datensatz in zwei Zeitabschnitte unterteilt werden, da der zugrundeliegende stochastische Prozess nicht über den gesamten Datenbereich als unverändert angesehen werden konnte. Im Anschluss daran wird eine Untersuchungsmethode dargelegt, welche einen eingehenden Vergleich der Modelle ermöglicht; als Basis für den Vergleich dienen sechs Testdatensätze von Zuverlässigkeitswachstums-Programmen aus der Literatur. Da das Datenmaterial für eine aussagekräftige Untersuchung vom Umfang her gesehen ungenügend ist (es steht jeweils nur *eine* Realisierung pro stochastischem Prozess zur Verfügung), wird eine Methode entwickelt, welche die Erzeugung zusätzlicher Realisierungen der betrachteten Prozesse ermöglicht, dies unabhängig von den Modellannahmen, sondern nur auf der Basis der Original-Datensätze und der Annahme des inhomogenen Poisson-Prozesses als Beschreibung der zugrundeliegenden stochastischen Prozesse; die Methode beruht auf einem Zusammenhang zwischen dem inhomogenen Poisson-Prozess und Ordnungsstatistiken.

Die Evaluation der Modelle bezüglich ihrer Eignung zur Beschreibung des Prozesses des Auftretens von systematischen Ausfällen geschieht einerseits anhand der Vergleichsgrößen  $D$  (Kolmogorow-Smirnow Statistik),  $W^2$  (Cramér-von Mises Statistik) und  $A^2$  (Anderson-Darling Statistik) sowie anhand der maximalen Werte der Likelihood-Funktionen, und andererseits auf der Basis von Testverfahren (Anderson-Darling Statistik  $A^2$ ), um erhärtete Aussagen zu erhalten. Der Vergleich der Modelle wird mit der Untersuchung der Extrapolationseigenschaften (statistische Vorhersage über den weiteren Verlauf aufgrund vorliegender Testdaten) abgeschlossen.

Zwei der im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen neuen Modelle erweisen sich, anhand der verwendeten sechs Testdatensätze, als den anderen Modellen überlegen in bezug auf die grundsätzliche Beschreibung des Zuverlässigkeitswachstums bzw. die Güte von Extrapolationen in die Zukunft.

Die Aufstellung einer Prozedur, die es dem Ingenieur in der Praxis erlaubt, für einen gegebenen Datensatz ein geeignetes Modell zu ermitteln, schliesst die Arbeit ab.

## Summary

The present work gives a contribution in the field of reliability growth modeling of complex repairable systems, i.e. of the modeling of the reliability improvement as a consequence of the elimination of design, manufacturing, assembling, or testing flaws / errors, which are the cause for systematic failures.

New models based on nonhomogeneous poisson processes are developed that allow a better description of the reliability growth as with the known models, at least for six data sets given in the literature.

Following a short introduction, the concept of reliability growth is discussed, insisting on the importance of a careful registration of the test data and on the difference between repairable and non-repairable systems.

Enough room is reserved to the description of the known reliability growth models for complex repairable systems, essentially based on nonhomogeneous poisson processes. The deterministic models are only sketched roughly. For the stochastic models considered, the basic equations as well as the procedures for the estimation of the model parameters are reviewed and extended. The modification of a well known model leads to a model that was proposed for the description of software quality. For the estimation of the model parameters, maximum likelihood is used, also because the method of least squares produces unrealistic results with some models.

As a result of comprehensive investigations, new models on the basis of nonhomogeneous poisson processes are proposed. These models are based on the combination by multiplication of mean value functions of nonhomogeneous poisson processes. Also a cost model for the determination of cost-optimum duration of a reliability growth program is presented.

In a further chapter, the new models are broadly compared with the known models, among other things to examine their suitability in practice. In a first step, the available failure data is visualized. One database had to be divided in two periods with regard to a sensible interpretation, because the underlying stochastic process could not be considered as unchanged over the whole range of data. A method of examination is expounded that allows a thorough comparison of the models. The basis for the comparison is formed by six sets of test data from reliability growth programs known in the literature. Because the size of the failure data is insufficient for a reasonably good statistical investigation (only *one* realization per stochastic process is available), a method is developed that makes it possible to produce additional realizations of the considered processes (merely based on the hypothesis of the nonhomogeneous poisson process as a description of the underlying stochastic processes). The method is based on a correlation between nonhomogeneous poisson processes and order statistics.

The evaluation of the models regarding their suitability to describe the process of the occurrence of the systematic failures, is done on the one hand based on the metrics of comparison  $D$  (Kolmogorow-Smirnow statistics),  $W^2$  (Cramér-von Mises statistics) and  $A^2$  (Anderson-Darling statistics) as well as maximum value of the Likelihood-functions, and on the other hand based on goodness-of-fit tests (Anderson-Darling statistics  $A^2$ ), to get confirmed evidence. The comparison of the models is concluded with the examination of the capacities of extrapolation, i.e. of the statistical prediction of the further development of the failure process based on the existing test data.

With regard to the six data sets used, two of the new models proposed in the present work turn out to be superior to the other models for the description of the reliability growth and for the quality of extrapolations to the future, respectively.

A procedure that allows to an engineer in the practice to find out a suitable model for an existing data set closes the present work.