

Dezember 2003

Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit

ausgearbeitet durch

Marcel Held
EMPA

Zentrum für Zuverlässigkeit
Überlandstr. 129
8600 Dübendorf

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Résumé	3
Abstract.....	4
Riassunto	5
1. Ausgangslage, Vorgehen.....	6
1.1 Bedeutung	6
1.2 Projektpartner	6
1.3 Projektziele	7
1.4 Vorgehen	7
2. Resultate.....	8
2.1 Festlegung Server	8
2.2 Evaluation Ausfallratenmodell	8
2.3 Modellparameter	9
2.4 Umgebungsbedingungen und Einsatzprofile	10
2.5 Komponentendaten	13
2.6 Resultate der Berechnung System-Board	13
2.7 Festplattenlaufwerke und Stromversorgung	23
3. Zusammenfassung der Resultate	25
4. Quellenverzeichnis	25
5. Anhang	27

Zusammenfassung

Untersuchungen im Auftrag des Bundesamtes für Energie haben gezeigt, dass ein erhebliches Energiesparpotenzial durch das Ausschalten von Servern während Ruhezeiten besteht. Dem stehen jedoch Bedenken der Betreiber unter anderem bezüglich der Auswirkungen eines Betriebes *Ein und Aus* auf die Zuverlässigkeit der Hardware gegenüber.

Anhand eines für dieses Projekt evaluierten Modells RDF2000 werden die vorausgesagten Ausfallraten von Komponenten des System-Boards eines typischen KMU-Servers unter Berücksichtigung der Betriebsarten *Dauernd Ein*, *Ein und Idle* sowie *Ein und Aus* exemplarisch berechnet. Das Ausfallratenmodell erfasst dabei als wichtige Grössen sowohl den Einfluss der Temperatur auf die Ausfallrate als auch die thermomechanischen Effekte, die durch Last- und Temperaturänderungen provoziert werden und die ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Ausfallrate elektronischer Komponenten haben.

In der Betriebsart *Dauernd Ein* arbeitet der Server permanent und mit einer konstanten Last. In der Betriebsart *Ein und Idle* ist der Server während 12 Stunden pro Arbeitstag mit derselben, konstanten Last in Betrieb und läuft über Nacht und an Wochenenden mit reduzierter Last weiter. Im Unterschied dazu wird der Server in der Betriebsart *Ein und Aus* während den untätigen Phasen ganz abgeschaltet.

Für das System- Board kann die kleinste Ausfallrate für den Betrieb *Dauernd Ein* erwartet werden. Für die meisten Komponenten auf dem System-Board führen die Betriebsarten *Ein und Aus* sowie *Ein und Idle* zu einer Erhöhung der Ausfallrate im Vergleich zum Betrieb *Dauernd Ein*. Hingegen resultiert für Ventilatoren, Elektrolytkondensatoren, Stecker und die Leiterplatte eine Verringerung der Ausfallrate, da bei ihnen die positiven Effekte der reduzierten Last oder des Abschaltens besonders ins Gewicht fallen. Die Ausfallraten zeigen eine starke Abhängigkeit von Temperaturzyklen, deren Amplitude bestimmt wird durch die Last während untätigen Phasen.

Da Server nur abgeschaltet werden können, wenn sie nicht gebraucht werden, ist der Vergleich der Betriebsarten *Ein und Aus* und *Ein und Idle* von besonderem Interesse. Dabei zeigt sich, dass die Last während untätigen Phasen bei *Ein und Idle* ein entscheidendes Kriterium ist. Unter Annahme einer Last von weniger als 50% während untätigen Phasen kann aufgrund dieser Berechnungen und Abschätzungen erwartet werden, dass sich die Umstellung auf einen Betrieb *Ein und Aus* insgesamt vorteilhaft auf die Zuverlässigkeit eines Servers auswirkt. Als allgemeine Regel kann abgeleitet werden: je kleiner die Last während untätigen Zeiten, umso günstiger wirkt sich das Abschalten auf die Zuverlässigkeit aus.

Verglichen mit einem Betrieb *Ein und Idle* mit einer Last >50% und mit dem Betrieb *Dauernd Ein* ergibt eine Umstellung auf einen Betrieb *Ein und Aus* nur eine geringfügige Erhöhung der Ausfallrate von höchstens etwa 20%.

Da die mittels Ausfallratenmodellen berechnete vorausgesagte Zuverlässigkeit mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist und lediglich eine grobe Schätzung der wahren Zuverlässigkeit darstellt, sollten die ermittelten Resultate in ihrer Tendenz und nicht in absoluten Werten interpretiert werden. Es kann somit abgeleitet werden, dass für Server die Umstellung von einem Betrieb *Dauernd Ein* mit konstanter Last auf einen Betrieb *Ein und Aus* zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit führt. Die Umstellung von einem Betrieb *Ein und Idle* auf einen Betrieb *Ein und Aus* führt tendenziell zu einer leichten Verbesserung der Zuverlässigkeit.

Résumé

Des études réalisées sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie ont montré que l'arrêt des serveurs en dehors de heures de travail recèle un potentiel d'économie d'énergie important. Les exploitants ont toutefois des doutes pour ce qui est, entre autres, des effets de l'arrêt et du redémarrage sur la fiabilité du matériel.

Un modèle, dénommé RDS 2000, évalué pour ce projet a été utilisé pour calculer à titre d'exemple les taux de défaillance prévisibles des composants de la carte mère d'un serveur typique pour PME pour les modes *exploitation continue*, *marche-idle* et *marche-arrêt*. Pour ce qui est des facteurs d'influence les plus importants, le modèle de calcul des taux de défaillance tient compte aussi bien de la température que des effets thermomécaniques provoqués par l'enclenchement et le déclenchement qui peuvent eux aussi exercer une influence sur le taux de défaillance des composants électroniques.

En mode *exploitation continue*, le serveur fonctionne en permanence et sous charge constante. En mode *marche-idle*, le serveur est en exploitation 12 heures par jour ouvrable sous la même charge constante et il continue à fonctionner, mais sous charge réduite la nuit et les week-ends. A la différence de cela, en mode *marche-arrêt*, le serveur est arrêté complètement pendant les phases d'inactivité.

Pour la carte mère, le taux de défaillance est le plus faible avec le mode *exploitation continue*. Pour la majorité des composants de la carte mère les modes *marche-arrêt* et *marche-idle* conduisent à une augmentation des taux de défaillance par rapport au mode *exploitation continue*. Par contre pour les ventilateurs, les condensateurs électrolytiques, les fiches et les cartes de circuits imprimés, il en résulte une baisse du taux de défaillance car pour ces composants les effets positifs de la charge réduite ou de l'arrêt l'emportent. Les taux de défaillance présentent une forte dépendance vis-à-vis des cycles de température dont l'amplitude est déterminée par la charge durant les phases d'inactivité.

Comme les serveurs ne peuvent être arrêtés que lorsqu'ils ne sont pas utilisés, les modes *marche-arrêt* et *marche-idle* présentent un intérêt tout particulier. Il apparaît que pour le mode *marche-idle*, la charge durant la phase inactive est un critère décisif. En posant comme hypothèse une charge inférieure à 50% durant les phases inactives, ces calculs et estimations montrent qu'un passage à un mode *marche-arrêt* exerce un effet globalement positif sur la fiabilité du serveur. On peut en déduire comme règle générale que plus la charge est faible durant les phases inactives, plus l'effet sur la fiabilité du passage au mode *marche-arrêt* est favorable.

Par rapport aux modes *marche-idle* avec une charge supérieure à 50% et *exploitation continue*, le passage au mode *marche-arrêt* n'induit qu'une faible augmentation du taux de défaillance (20% au plus).

Etant donné que la fiabilité prévue selon les modèles de calcul des taux de défaillance est entachée d'incertitude et qu'elle ne représente qu'une estimation grossière de la fiabilité effective, il convient d'interpréter les résultats obtenus selon leur tendance et non selon leur valeur absolue. On peut ainsi déduire que, pour les serveurs, le passage d'une exploitation continue avec charge constante à une exploitation *marche-arrêt* n'entraîne aucune diminution essentielle de la fiabilité. Le passage du mode *marche-idle* au mode *marche-arrêt* s'accompagne, quant à lui, d'une légère tendance vers une amélioration de la fiabilité.

Abstract

Investigations on behalf of the Swiss Federal Office of Energy have shown a large potential for energy savings by the switch-off of servers during idle periods. This fact is however confronted by user concerns - among others- about possible effects of intermittent operation on hardware reliability.

On the basis of the Model RDF 2000 evaluated in this project, the predicted failure rates of components of a typical SME (small and medium enterprises) server are exemplarily calculated for three operational modes: *continuous operation*, *on and idle*, and *on and off*. The failure rate model includes as fundamental values the influence of temperature on failure rates as well as thermo-mechanical effects caused by load and temperature changes also having a substantial impact on failure rates of electronic components.

In operational mode *continuous operation* the server works permanently with a constant load. In mode *on and idle* the server works with the same constant load for 12 hours every labour day and with a reduced load during the night and over weekends. In distinction to that the server will be completely switch off during idle phases in mode *on and off*.

The smallest failure rate of the system board can be expected for *continuous operation*. For the majority of components on the system board the modes *on and off* as well as *on and idle* lead to an increase in failure rate compared to *continuous operation*. However, a decrease in failure rate results for cooling fans, electrolytic capacitors, connectors, and the printed circuit board due to the dominating positive effects of the reduced load or of non-operational times. Failure rates show a strong dependence on temperature cycles whose amplitude is determined by the load during idle phases.

Because servers can only be switched off when they are not used the comparison of the modes *on and off* and *on and idle* is of particular interest. It is shown that the load during idle phases in mode *on and idle* is a decisive criterion. Assuming of a load of less than 50% during idle phases it can be expected – based on these calculations and estimations – that a changeover to the mode *on and off* is all in all favourable for the reliability of a server. As a general rule it can be derived: the smaller the load during idle phases the more favourable is the effect of switching-off on reliability.

A change to the operational mode *on and off* results in a slight increase of the failure rate of maximum 20% compared to the operational modes *on and idle* with loads >50% and *continuous operation*.

Because the predicted reliability based on failure rate models have a high uncertainty and represent only a coarse estimate of the true reliability, the achieved results should be interpreted in their tendency and not in absolute values. It can be therefore derived that the change of the operational mode from *continuous operation* to *on and off* will not lead to a substantial impairment of the reliability of servers. The change from the operational mode *on and idle* to *on and off* tends to result in a slight improvement of reliability.

Riassunto

Indagini condotte su mandato dell'Ufficio federale dell'energia hanno dimostrato che esiste un notevole potenziale di risparmio energetico grazie allo spegnimento di server durante le pause di lavoro. A questa constatazione si contrappone però lo scetticismo degli operatori riguardo agli effetti di spegnimento e riaccensione sull'affidabilità della hardware.

Sulla base di un modello RDF2000 analizzato per questo progetto, vengono calcolati a titolo di esempio le quote prevedibili di guasti dei componenti di system-boards di un tipico server IPM (Imprese Piccole e Medie), tenendo conto dei modi di funzionamento: *continuo*, *accensione e riduzione di potenza* e *d'accensione e spegnimento*. Questo modello considera come valori principali sia l'influsso della temperatura sulla quota di guasti sia gli effetti termomeccanici provocati dai cambiamenti di potenza e di temperatura, che hanno anch'essi un notevole influsso sulla quota di guasti dei componenti elettronici.

Nel modo di funzionamento *continuo* il server funziona in permanenza e ad una potenza costante. Nel modo di funzionamento *accensione e riduzione di potenza* il server è in funzione durante 12 ore per ogni giorno lavorativo alla medesima, costante potenza e continua a funzionare a potenza ridotta durante la notte e i fini settimana. Nel modo di funzionamento *accensione e spegnimento* il server è invece completamente spento nelle fasi inattive.

Nel *system-board*, il funzionamento *continuo* è caratterizzato dalla minore quota di guasti. Per la maggior parte dei componenti del *system-board*, i modi di funzionamento *accensione e spegnimento* ed *accensione e riduzione di potenza* causano un aumento della quota di guasti rispetto al modo *continuo*. Al contrario, per ventilatori condensatori elettrolitici, spine e per la scheda di conduzione risulta una diminuzione della quota di guasti, poiché in questi apparecchi gli effetti positivi della riduzione di potenza oppure di spegnimento incidono in modo particolare. Le quote di guasti dipendono fortemente dai cicli di temperatura, la cui ampiezza è determinata dalla potenza durante le fasi inattive.

Poiché i server possono essere spenti solamente quando non vengono utilizzati, il confronto dei modi di funzionamento *accensione e spegnimento* ed *accensione e riduzione di potenza* è particolarmente interessante. La potenza durante le fasi inattive del modo *accensione e riduzione di potenza* rappresenta un criterio decisivo. Supponendo una potenza minore del 50 % durante le fasi inattive e basandosi su questi calcoli ed approssimazioni, si può dedurre che il passaggio ad un funzionamento *accensione e spegnimento* tutto sommato è vantaggioso in termini di affidabilità del server. Come regola generale vale: quanto più piccola è la potenza durante i tempi inattivi, tanto più lo spegnimento si rivela positivo in termini di affidabilità.

Rispetto ad un funzionamento *accensione e riduzione di potenza*, con una potenza >50% e con un esercizio continuo, il passaggio ad un modo di funzionamento *accensione e spegnimento* comporta soltanto un aumento minimo della quota di guasti (massimo + 20%).

Poiché il grado di affidabilità, calcolato mediante modelli relativi alle quote di guasti, comporta un elevato margine di insicurezza e rappresenta soltanto una stima approssimativa, i risultati ottenuti devono essere interpretati come tendenze e non come valori assoluti. Se ne può dedurre che l'affidabilità dei server non è compromessa notevolmente passando da un modo di funzionamento continuo con potenza costante a un modo di funzionamento *accensione e spegnimento*. La transizione da un modo di funzionamento *accensione e riduzione di potenza* a un funzionamento *accensione e spegnimento* comporta tendenzialmente un lieve miglioramento dell'affidabilità.

1. Ausgangslage

Untersuchungen im Auftrag des Bundesamtes für Energie haben gezeigt, dass ein erhebliches Energiesparpotenzial durch das Ausschalten von Servern während Ruhezeiten besteht [1,2]. Dieses Potenzial wird in der Praxis jedoch nur zu einem geringen Teil ausgeschöpft. Unter anderem haben Hersteller und Betreiber Bedenken bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit ihrer Systeme, die durch das Ein- und Ausschalten entstehen könnten.

Die Zuverlässigkeit von Servern wird von den Herstellern sichergestellt. Üblicherweise wird auf die Hardware eine Garantie von einem Jahr gegeben. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und die Erbringung von Serviceleistungen werden während drei Jahren garantiert. Dabei wird keine bestimmte Betriebsart, z.B. Dauerbetrieb vorgeschrieben. Das Ein- und Ausschalten und die möglichen Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit werden daher nicht spezifiziert.

Ob die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit bei Servern günstig oder ungünstig sind, kann nicht aufgrund von Erfahrung oder der bestehenden Literatur [3-11] zu gleichen und verwandten Fragestellungen gesagt werden.

1.1 Bedeutung

Um das Energiesparpotenzial durch das Ausschalten von Servern voll ausschöpfen zu können, müssen alle damit verbundenen Auswirkungen untersucht werden. Die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit sind dabei von grosser Bedeutung. So wären eine erhebliche Verschlechterung der Zuverlässigkeit und deren Folgekosten für die Betreiber nicht akzeptabel.

Somit ist es notwendig, diese Auswirkungen zu untersuchen um dem Betreiber einen wichtigen Entscheidungsparameter für den Betrieb seiner Server zu liefern.

1.2 Projektpartner

Um der Untersuchung der Zuverlässigkeit ein praxisgerechtes Fundament zu verleihen, wird die Zusammenarbeit mit den Schweizer Vertretungen der Server-Hersteller IBM und Hewlett-Packard (früher Compaq) etabliert. Deren Erfahrung und die von Ihnen zur Verfügung gestellten Daten sind von grosser Wichtigkeit für die erfolgreiche Durchführung des Projektes.

IBM
Produkt Sicherheit und Umweltaspekte
Bruno Oldani
Postfach (AL2)
8010 Zürich

Hewlett-Packard (Schweiz) GmbH
Thomas Fierz
Ueberlandstrasse 1
8600 Dübendorf

1.3 Projektziele

Ziel des vorliegenden Projektes ist abzuklären, ob und welche Auswirkungen eines Ein- und Ausschaltbetriebes auf die Zuverlässigkeit der betroffenen Server-Hardware bestehen. Die Untersuchung adressiert ausschliesslich die Server-Hardware, d.h. alle anderen Faktoren, die für einen Ein- Ausschaltbetrieb relevant sind, z.B. Eignung des Betriebssystems, Softwareaspekte, operationelle Erfordernisse usw., werden hier nicht untersucht.

Ziel ist es, die möglichen positiven und negativen Auswirkungen eines Ein- und Ausschaltbetriebes auf die Zuverlässigkeit zu identifizieren und quantifizieren. Damit kann ein Vergleich mit der Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb erstellt werden.

1.4 Vorgehen

Die Zuverlässigkeit eines Systems kann auf verschiedene Arten analysiert werden.

Durch umfangreiche *statistische Qualifikations- und Zuverlässigkeitsprüfungen* können aussagekräftige Angaben zur Zuverlässigkeit von Geräten und zur Identifikation ihrer Schwachstellen erzielt werden. Diese Art der Analyse ist in diesem Projekt jedoch nicht vorgesehen.

Mit der Auswertung von gezielt gesammelten und detaillierten *Felddaten* sind ebenfalls brauchbare und besonders praxisnahe Zuverlässigkeitsanalysen möglich. Von den Projektpartnern können jedoch keine Felddatenauswertungen zur Verfügung gestellt werden. Allfällig vorhandene Felddaten dürften sich auf Dauerbetrieb beziehen. Es ist nicht davon auszugehen, dass Felddatenauswertungen zu KMU-Servern mit Betrieb Ein und Aus überhaupt existieren, da diese Betriebsart wenig verbreitet ist.

In diesem Projekt kommt daher die *Berechnung der vorausgesagten Ausfallraten* anhand von Ausfallratenmodellen für elektronische Komponenten zum Einsatz. Die vorausgesagte Zuverlässigkeit basiert auf den Ausfallraten der Komponenten eines Systems und stellt eine Abschätzung der wahren Zuverlässigkeit dar. Der absolute Wert von so erzielten Voraussagen ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Der Nutzen liegt viel mehr in der Identifizierung potentieller Schwachstellen, dem relativen Vergleich der Zuverlässigkeit unter verschiedenen Betriebs- und Umweltbedingungen und von alternativen Designs.

Zusammen mit den Projektpartnern wurde beschlossen, einen typischen Server für Kleinbetriebe auszuwählen um eine konkrete Ausfallratenberechnung durchführen zu können. Für die Analyse der Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit muss zunächst ein geeignetes Ausfallratenmodell evaluiert werden. Die Kriterien der Evaluation sind festzulegen und zu begründen. Ausserdem sind mögliche Spezialfälle zu identifizieren, die im evaluierten Ausfallratenmodell eventuell nicht berücksichtigt werden.

Das Vorgehen wird wie folgt gegliedert:

1. Festlegung Server
2. Evaluation Ausfallratenmodell
3. Bestimmung der Modellparameter
4. Definition der Umgebungsbedingungen und Einsatzprofile
5. Beschaffung der Inputdaten bei Projektpartnern
6. Berechnung und Vergleich der vorausgesagten Ausfallraten für Dauerbetrieb und Ein- Ausschaltbetrieb
7. Identifikation und Analyse möglicher Spezialfälle

2. Resultate

2.1 Festlegung Server

Zusammen mit Herrn Fierz von Hewlett Packard wurde der Server HP ProLiant ML350-G3 als typisches Modell für elektronische Post, Druck- und Internetdienste sowie Arbeitsgruppenanwendungen in Kleinbetrieben ausgewählt. Der HP ProLiant ML350-G3 ist erhältlich im Rack- oder Towergehäuse und kann mit einem oder zwei Intel Xeon Prozessoren (2.0 oder 2.2 GHz Taktfrequenz) ausgerüstet werden. Die Spezifikationen dieses Modells sind in [12] gegeben.

2.2 Evaluation Ausfallratenmodell

Die folgenden Kriterien wurden definiert, um ein für dieses Projekt geeignetes Ausfallratenmodell zu evaluieren:

- a) Verbreitung/Akzeptanz
- b) Standardisierung
- c) Aktualität
- d) Praktische Aspekte (Verfügbarkeit Basis-Ausfallraten, Integration in Softwaretools)
- e) Berücksichtigung von Ein- Ausschaltzyklen

Die in Frage kommenden Ausfallratenmodelle und die Angaben zur Erfüllung obiger Kriterien sind:

1. MIL-HDBK-217F *Reliability Prediction of Electronic Equipment* [13]

- a) Ur-Modell der Ausfallratenvoraussage des US Department of Defense, weite Verbreitung
- b) kein internationaler Standard
- c) letztes Update 1995, wird nicht weitergeführt
- d) Basis-Ausfallraten vorhanden, in vielen Softwaretools integriert
- e) Ein- Ausschaltzyklen nicht berücksichtigt.

2. Telcordia SR332 *Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment* [14]

- a) aus MIL-HDBK entstanden, Verbreitung v.a. in Nordamerikanischer Telekommunikationsindustrie
- c) letztes Update 2001, Weiterführung unklar
- d) Basis-Ausfallraten vorhanden, in vielen Softwaretools integriert
- e) Ein- Ausschaltzyklen nicht berücksichtigt.

3. IEC 61709 *Electronic components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion* [15]

- a) aus DIN-Norm entstanden, wenig verbreitet
- b) IEC-Standard
- c) letztes Update 1996, Weiterführung unklar
- d) keine Basis-Ausfallraten vorhanden, kaum in Softwaretools integriert
- e) Ein- Ausschaltzyklen nicht berücksichtigt

4. UTE C 80-810 RDF2000: Reliability Data Handbook, A universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment [16]

- a) Modell der France Telecom, Verbreitung vor allem in Europa
- b) wird Ende 2003/Anfang 2004 ein internationaler Standard (IEC 62380)
- c) letztes Update 2000, wird weitergeführt
- d) Basis-Ausfallraten vorhanden, wird zunehmend in Softwaretools integriert
- e) Ein- Ausschaltzyklen berücksichtigt

Tabelle 1 zeigt das Resultat der Evaluation. Die einzelnen Kriterien wurden dabei mit tief (•), mittel (••) und hoch (•••) bewertet.

Tabelle 1 Vergleich der Ausfallratenmodelle

	MIL-HDBK-217F	Telcordia SR332	IEC 61709	RDF 2000
Verbreitung	•••	••	•	••
Standardisierung	••	••	•••	•••
Aktualität	•	••	•	••
Praktische Aspekte	••	••	•	••
Berücksichtigung Ein/Aus	•	•	•	•••
Summe	9	9	7	12

Fazit:

Das Modell RDF2000 ist das am Besten geeignet, in diesem Projekt die vorausgesagten Ausfallraten abzuschätzen. Insbesondere ist es das einzige Modell, bei dem Ein- und Ausschaltzyklen berücksichtigt werden können.

2.3 Modellparameter

Das Ausfallratenmodell nach RDF 2000 verlangt nach genauen Angaben zu komponentenspezifischen Merkmalen und operationellen Bedingungen. Für jede der 15 Komponentenfamilien gibt es eine spezifische Formel zur Berechnung der vorausgesagten Ausfallrate.

Die Komponentenfamilien und ein mathematisches Modell der Ausfallratenberechnung sind im Anhang A1 dargestellt.

Die Ausfallrate λ von Komponenten ist im Wesentlichen die Summe von zwei Ausfallraten:

$$\lambda = \lambda_{\text{temp}} + \lambda_{\text{zyklen}} \quad (1)$$

wobei:

1. λ_{temp} Ausfallrate bestimmt durch die absolute Temperatur
2. λ_{zyklen} Ausfallrate aufgrund von Temperaturzyklen

Die Ausfallrate λ_{temp} wird von thermischen Effekten bestimmt und von einem Arrhenius-Gesetz beschrieben, d.h. je länger der Betrieb bei hoher Temperatur und je höher die Aktivierungsenergie, desto höher die Ausfallrate.

Die Ausfallrate λ_{zyklen} wird von thermomechanischen Effekten bestimmt und von einem Coffin-Manson-Gesetz beschrieben, d.h. je mehr Temperaturzyklen und je höher die Amplitude der Zyklen und je grösser die Differenz der Ausdehnungskoeffizienten von Komponentenmaterial α_C und Substrat α_S , desto höher die Ausfallrate.

2.4 Umgebungsbedingungen und Einsatzprofile

2.4.1 Umgebungsbedingungen

Es wird angenommen, dass die betrachteten Kleinserver in Büroumgebungen im Einsatz sind. Dies ist gemäss RDF2000 die mildeste Umgebung und wird als *Ground, stationary, weather protected* klassifiziert. Dies bedeutet, dass alle äusseren Einflüsse wie Umgebungstemperatur, Umgebungstemperaturschwankungen, Feuchtigkeit, Vibrationen und Staubentwicklung als unkritisch angesehen werden können. Für die Berechnung der vorausgesagten Ausfallrate sind noch zwei essentielle Parameter zu bestimmen:

$T_{ae, avg}$ durchschnittliche Umgebungstemperatur ausserhalb des Gerätes

$T_{ac, avg}$ durchschnittliche Umgebungstemperatur auf der Leiterplatte in der Nähe der Komponenten bei einem Server in Betrieb

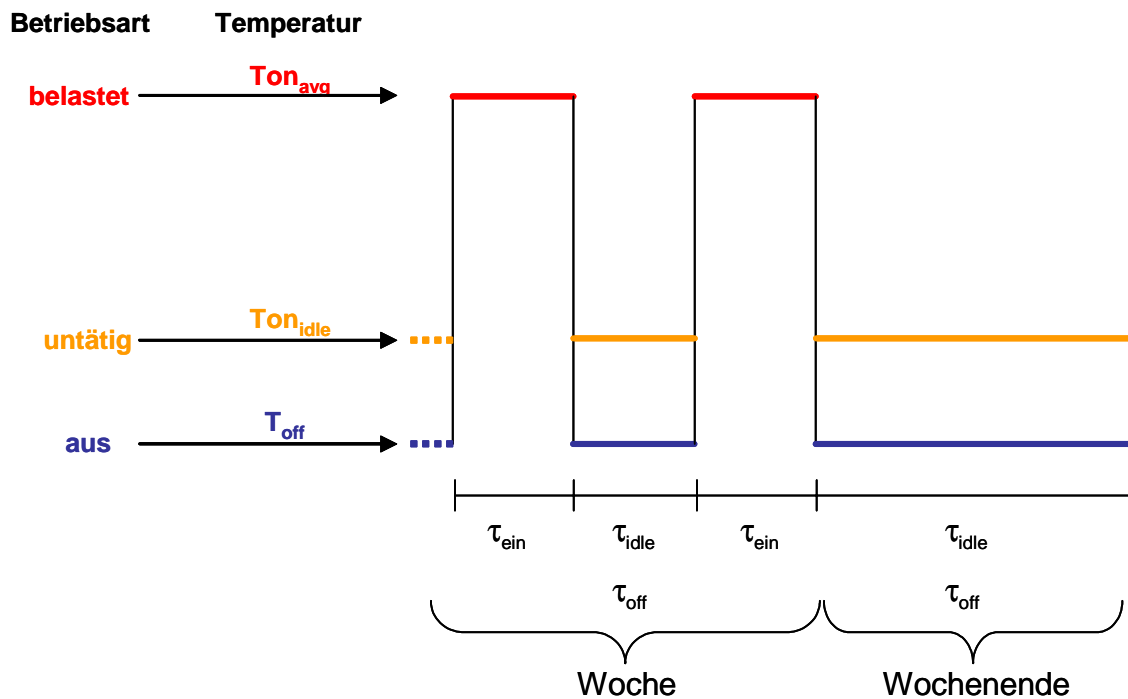
Zwecks Bestimmung dieser Temperaturparameter wird ein Messversuch an einem Server HP ProLiant ML-350 G3 durchgeführt. Die Resultate des Messversuches sind im Anhang A5 dargestellt. Aufgrund dieser Messung werden die für die Berechnung notwendigen Parameter wie folgt festgelegt: $T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{ac, avg} = 40^{\circ}\text{C}$.

Zu Vergleichszwecken werden die Berechnungen ebenfalls für eine höhere Umgebungstemperatur von $T_{ae, avg} = 30^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass alle anderen Umgebungs- und Komponententemperaturen um 10K höher liegen, also z.B. $T_{ac, avg} = 50^{\circ}\text{C}$.

2.4.2 Einsatzprofile

Ein Abschalten von Servern macht nur dann Sinn, wenn dieser während gewissen Phasen nicht gebraucht wird. Es wird also angenommen, dass der Server nur zu Bürozeiten arbeitet und zwischenzeitlich, d.h. in der Nacht und an Wochenenden, untätig ist bzw. sich in einer Art Standby-Modus befindet. Im Standby-Modus sind die elektronischen Bauteile und Baugruppen nur teilweise belastet. Der Übergang von einer Arbeitsphase zum Standby-Modus und umgekehrt führt jedoch zu einem Lastwechsel und somit auch zu einem Temperaturzyklus. Wird der Server ganz abgeschaltet statt im Standby-Modus weiterzulaufen, tritt dieser Temperaturzyklus ebenfalls auf, allerdings mit einer höheren Amplitude.

Die zwei Betriebsarten können schematisch wie in Figur 1 dargestellt werden



Figur 1 Schematische Darstellung der Einsatzprofile

Für die Berechnungen werden die Einsatzprofile wie folgt definiert:

- Dauernd Ein:** der Server ist im Dauerbetrieb unter voller Last, wobei die Komponenten eine mittlere Temperatur $T_{on, avg}$ aufweisen.
- Ein und Idle:** der Server ist während $\tau_{on} = 12$ Std. pro Tag belastet, wobei die Komponenten eine mittlere Temperatur $T_{on, avg}$ aufweisen. In der Nacht und über das Wochenende ist der Server untätig bzw. im Standby-Modus mit reduzierter Last, wobei die Komponenten während diesen Zeiten τ_{idle} eine mittlere Temperatur $T_{on, idle}$ aufweisen.
- Ein- und Aus:** der Server ist während $\tau_{on} = 12$ Std. pro Tag belastet wie in a). In der Nacht und über das Wochenende ist der Server ganz abgeschaltet. Die Komponenten weisen während diesen Zeiten τ_{off} eine mittlere Temperatur T_{off} auf. T_{off} entspricht dabei der durchschnittlichen Umgebungstemperatur ausserhalb des Gerätes $T_{ae, avg}$.

Tabelle 2 zeigt die sich dadurch ergebenden Ein- und Ausschaltzeiten sowie die Anzahl der Zyklen. Für die Berechnung auf ein Jahr werden vereinfachend 52 identische Wochen angenommen.

Tabelle 2 Definition der Einsatzprofile auf Wochenbasis

Einsatzprofil	Einsatzdauer belastet τ_{on}	Einsatzdauer untätig τ_{idle}	Ausgeschaltet τ_{off}	Zyklen (pro Jahr)
a) Dauernd Ein	168h (100%)	0h	0h	0
b) Ein und Idle	60h (36%)	108h (64%)	0h	5 (260)
c) Ein- und Aus	60h (36%)	0h	108h (64%)	5 (260)

Für die *Betriebsphasen Dauernd Ein, Ein und Idle* und *Ein und Aus* werden folgende Ausfallraten definiert:

Tabelle 3 Definition der Ausfallraten

Phase	<i>Dauernd Ein</i>	<i>Ein und Idle</i>	<i>Ein und Aus</i>
Eingeschaltet, belastet	$\lambda_{\text{temp, belastet}}$	$\lambda_{\text{temp, belastet}}$	$\lambda_{\text{temp, belastet}}$
Eingeschaltet, idle	—	$\lambda_{\text{temp, idle}}$	-
Ausgeschaltet	-	-	λ_{off}
Zyklus belastet-idle	—	$\lambda_{\text{Zyklen, idle}}$	-
Zyklus belastet-ausgeschaltet	-	-	$\lambda_{\text{Zyklen, on-off}}$

Für die Gesamtausfallrate einer Komponente ergibt sich somit:

$$\text{Dauernd Ein} \quad \lambda_{\text{tot}} = \lambda_{\text{temp, belastet}} \quad (2)$$

$$\text{Ein und Idle} \quad \lambda_{\text{tot}} = \lambda_{\text{temp, belastet}} \times \tau_{\text{on}} + \lambda_{\text{temp, idle}} \times \tau_{\text{idle}} + \lambda_{\text{Zyklen, idle}} \quad (3)$$

$$\text{Ein- und Aus} \quad \lambda_{\text{tot}} = \lambda_{\text{temp, belastet}} \times \tau_{\text{on}} + \lambda_{\text{off}} \times \tau_{\text{off}} + \lambda_{\text{Zyklen, on-off}} \quad (4)$$

wobei $\tau_{\text{idle}} = \tau_{\text{off}}$ und $\tau_{\text{on}} + \tau_{\text{off}} = 1$. Die Ausfallraten $\lambda_{\text{temp, idle}}$ und $\lambda_{\text{Zyklen, idle}}$ sind abhängig von der Belastung während der untätigen Einsatzdauer τ_{idle} . Dafür wird ein Belastungsfaktor $L_{\text{idle}} = 0, \dots, 1$ definiert, der die Last während τ_{idle} als Teil der Last während τ_{on} ausdrückt.

Die Ausfallrate $\lambda_{\text{temp, idle}}$ ist eine Funktion der Temperatur $T_{\text{on, idle}}$, die in Abhängigkeit des Belastungsfaktors L_{idle} wie folgt bestimmt wird:

$$T_{\text{on, idle}} = T_{\text{ae, avg}} + L_{\text{idle}} \times (T_{\text{on, avg}} - T_{\text{ae, avg}}) \quad (5)$$

Wird $T_{\text{on, idle}}$ auf diese Weise berechnet, dann ist bereits berücksichtigt, dass sich die Umgebungstemperatur T_{ac} ebenfalls in Funktion von L_{idle} zwischen $T_{\text{ae, avg}}$ und $T_{\text{ac, avg}}$ verändert.

Der zur Berechnung der Ausfallrate λ_{Zyklen} benötigte Temperaturunterschied ΔT ergibt sich aus:

$$\Delta T = T_{\text{on, avg}} - T_{\text{on, idle}} = (1 - L_{\text{idle}}) \times (T_{\text{on, avg}} - T_{\text{ae, avg}}) \quad (6)$$

Mit einem Belastungsfaktor $L_{\text{idle}} = 0$ kann dabei die Ausfallrate $\lambda_{\text{Zyklen, on-off}}$ für den Betrieb *Ein und Aus* berechnet werden.

2.5 Komponentendaten

Aus firmeninternen Gründen war es den Projektpartnern nicht möglich, detaillierte Informationen zu ihren Servern zur Verfügung zu stellen. Insbesondere konnten auch zum untersuchten Server HP ProLiant ML350-G3 weder eine Stückliste noch die Datenblätter der Komponenten weitergegeben werden. Deshalb wurden die Komponenten auf dem System-Board in Familien eingeteilt und ihre Anzahl gezählt oder geschätzt, siehe auch Tabelle 3. Mittels Datenblättern der wichtigsten Komponenten können sinnvolle Schätzungen der Berechnungsparameter gemacht werden. Damit wird eine exemplarische Abschätzung des Einflusses des Betriebes *Ein und Aus* auf die vorausgesagten Ausfallraten im Vergleich zum Betrieb *Dauernd Ein* bzw. *Ein und Idle* vorgenommen. Die Unterteilung in Familien für die Komponenten auf dem System-Board wurde wie folgt vorgenommen:

IC:	Mikroprozessor; SDRAM, IC VLSI, IC LSI
Diskrete Halbleiter:	Dioden low power, Transistoren low und high power
Kondensatoren:	Keramik Klasse 1 und 2; Alu solid
Widerstände:	SMT
Verschiedene:	Stecker, Ventilator für Mikroprozessor, System-Ventilatoren

Für Verbindungen haben im Modell RDF 2000 nur Handlötungen, Crimp-, wire/wrap-Verbindungen usw. ein eigenes Ausfallratenmodell. Das untersuchte System-Board enthält jedoch nur Lötstellen in Durchsteck- und Oberflächentechnologie, womit die Lötstellen in die Berechnung der Komponentenausfallrate integriert sind.

2.6 Resultate der Berechnung System-Board

2.6.1 Vorbemerkungen

Für alle Komponenten werden die Ausfallraten in Funktion des Lastfaktors L_{idle} berechnet. Für Kondensatoren wurde angenommen, dass das Verhältnis von angelegter Spitzenspannung zu maximal zulässiger Spannung kleiner oder gleich dem in den Modellen vorgeschriebenen Werten für den jeweiligen Kondensatortyp und die jeweilige Anwendung ist. Für alle Widerstände wurde ein Belastungsfaktor von 0.2 zugrunde gelegt.

Für Ventilatoren von Mikroprozessoren und Ventilatoren mit Gleitlager oder Kugellager sind im Modell konstante Ausfallraten angegeben. Es wird also davon ausgegangen, dass die Ausfallrate im Betrieb lastunabhängig und unabhängig von Temperaturzyklen ist.

Typische Herstellerangaben zur Lebensdauer für qualitativ hoch stehende Ventilatoren mit Kugellagern liegen im Bereich von 40'000 bis 80'000h bei Raumtemperatur. Im Modell RDF 2000 werden Ventilatoren mit Kugellagern mit einer fixen Ausfallrate von 1'500 FIT, bzw. von 500FIT für Prozessorventilatoren, berücksichtigt. Diese relativ hohen Ausfallraten stimmen mit der Erfahrung überein, dass Ausfälle von Kühlventilatoren zu den häufigsten Hardware-Störungen von Servern gehören. Ventilatoren unterliegen im Betrieb dem Verschleiss ihrer Lager, weshalb auch ihre Lebensdauer begrenzt ist. Für die Ausfallrate von Ventilatoren kann daher angenommen werden, dass sie sich durch das Ausschalten während der Nacht und über das Wochenende proportional zur Ausschaltzeit verringert. Wegen der offensichtlichen Bedeutung der Ventilatoren wird jedoch

noch ein zweiter Berechnungsansatz betrachtet, der davon ausgeht, dass die Ausfallrate proportional abhängig ist von der Belastung L_{idle} während der untätigen Zeit. Dieser Ansatz lässt sich als direkte Abhängigkeit der Ausfallrate von der – mit L_{idle} ebenfalls belastungsabhängigen - Drehzahl interpretieren. Für Ventilatoren werden also folgende Berechnungsansätze verwendet:

$$\lambda_{Vent} = \lambda_{RDF} \quad \text{Ausfallrate entsprechend Modell RDF 2000}$$

$$\lambda_{Vent} = f(L_{idle}) = \lambda_{RDF} \times L_{idle} \quad \text{Ausfallrate entsprechend Modell RDF 2000} \times L_{idle}$$

Bei der Berechnung der Ausfallrate aller Komponenten für den Betrieb *Ein und Aus* wird angenommen, dass die Ausfallrate im ausgeschalteten Zustand gleich Null ist. Diese Annahme ist insofern vernünftig, als die Komponenten in diesem Zustand nicht durch eine angelegte Spannung bzw. durch einen Stromfluss gestresst werden und darüber hinaus bei konstanter Umgebungstemperatur auch kein thermischer Stress vorliegt.

Die Resultate der Berechnungen der Ausfallraten λ sind in FIT, Failure In Time, gegeben. Ein FIT entspricht dabei einem Ausfall in 10^9 Bauteilbetriebsstunden. Für den Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit MTBF (Mean Time Between Failure) gilt unter Annahme konstanter Ausfallraten λ dann:

$$MTBF = 1/\lambda \quad (7)$$

2.6.2 Resultate

In den folgenden Diagrammen sind die Ausfallraten bei $T_{ae,avg} = 20^\circ\text{C}$ für den Betrieb *Ein und Aus* bei $L_{idle} = 0$ eingetragen. Die Werte bei $L_{idle} = 1$ entsprechen den Ausfallraten im Betrieb *Dauernd Ein*.

Bild 1 zeigt exemplarisch die Zusammensetzung der Ausfallrate als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle} für einen Mikroprozessor mit $T_{javg} = 100^\circ\text{C}$. Je höher der Belastungsfaktor L_{idle} während der untätigen Zeit, desto höher ist auch die entsprechende Ausfallrate (idle). Hingegen sinkt mit zunehmendem L_{idle} die Ausfallrate aufgrund der Temperaturzyklen (cycle). $L_{idle} = 1$ entspricht einem Betrieb *Dauernd Ein* bei $T_{javg} = 100^\circ\text{C}$ und somit ohne Temperaturzyklen. Die Werte bei $L_{idle} = 0$ entspricht der Ausfallrate im Betrieb *Ein und Aus*, bei dem die Temperaturzyklen die maximale Amplitude aufweisen. Die gestrichelte Linie entspricht der mit τ_{on} gewichteten bei $T_{javg} = 100^\circ\text{C}$

Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Ausfallrate eines Mikroprozessors von L_{idle} für vier Temperaturen $T_{javg} = 60$ bis 120°C .

In Bildern 3 bis 8 wird die Abhängigkeit der Ausfallrate der auf dem System-Board befindlichen Komponenten von L_{idle} aufgezeigt. Die Werte bei $L_{idle} = 0$ entsprechen wiederum den Ausfallraten im Betrieb *Ein und Aus* bzw. bei $L_{idle} = 1$ den Ausfallraten im Betrieb *Dauernd Ein*.

Die Bilder 9 und 10 zeigen das Verhältnis der Ausfallraten im Betrieb *Ein und Aus* zu den Ausfallraten unter *Ein und Idle*, ausgedrückt durch einen Faktor γ , für Belastungsfaktoren L_{idle} während der untätigen Zeit zwischen 0% (*Ein und Aus*) und 100% (*Dauernd Ein*). Es zeigt sich, dass γ für einen bestimmten Wert von L_{idle} praktisch konstant ist, d.h. praktisch unabhängig ist von der Belastung während der Einschaltzeit. Dies ist gut ersichtlich in Bildern 2-5, in denen die Verhältnisse der Ausfallraten für verschiedene Temperaturen dargestellt sind. Die Ausfallrate im Betrieb *Ein und Idle* wird dann berechnet mit:

$$\text{Ausfallrate } \textit{Ein und Idle} = \text{Ausfallrate } \textit{Ein und Aus} / \gamma \quad (8)$$

In Bild 11 wird deutlich, dass sich die Ausfallrate von Ventilatoren durch den Betrieb *Ein und Aus* massiv verringern, da für die Zeit im ausgeschalteten Zustand eine Ausfallrate von Null angenommen wird.

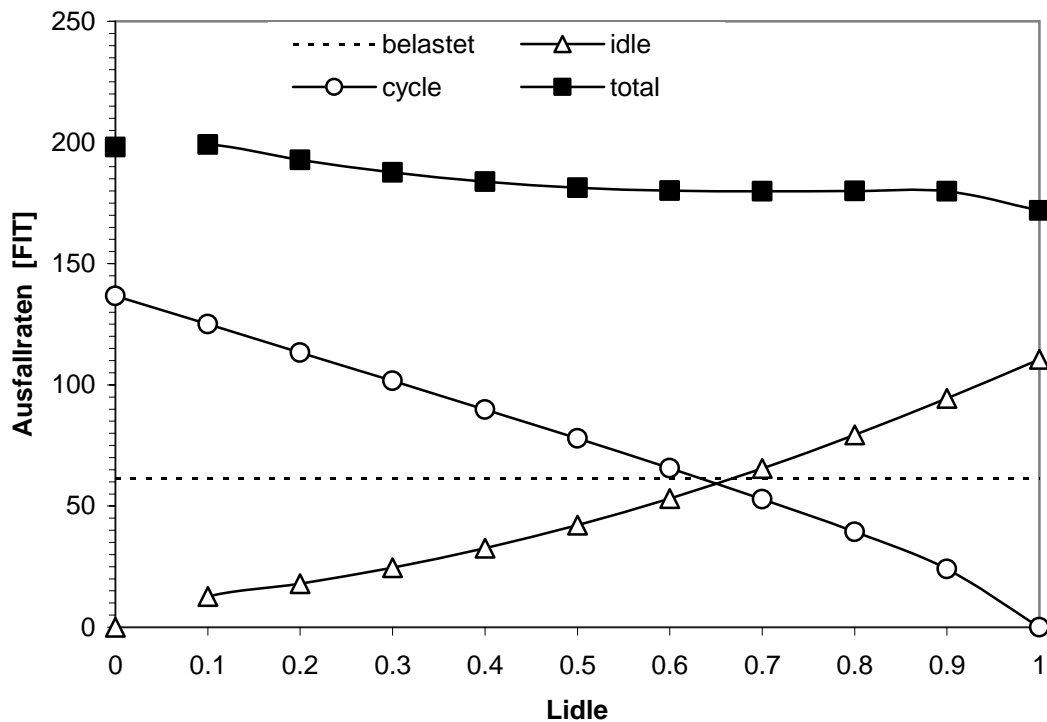


Bild 1 Mikroprozessor: Zusammensetzung der Ausfallrate als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle} für $T_{javg} = 100^\circ\text{C}$

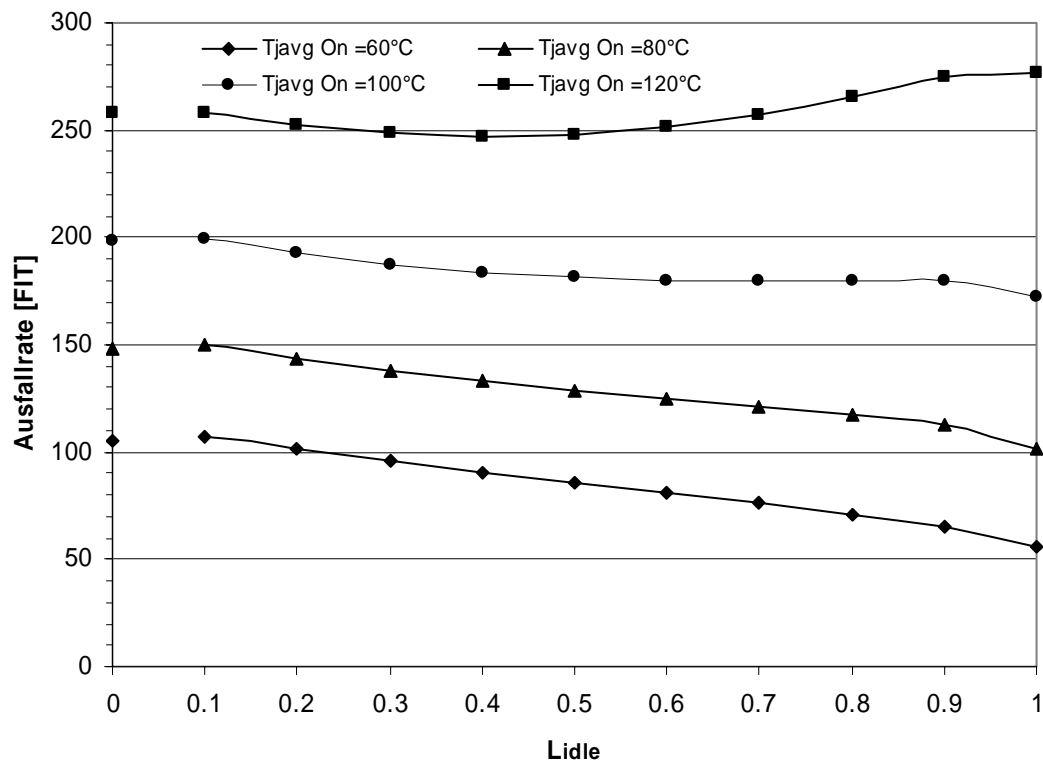


Bild 2 Mikroprozessor: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle} für $T_{javg} = 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 120^\circ C$

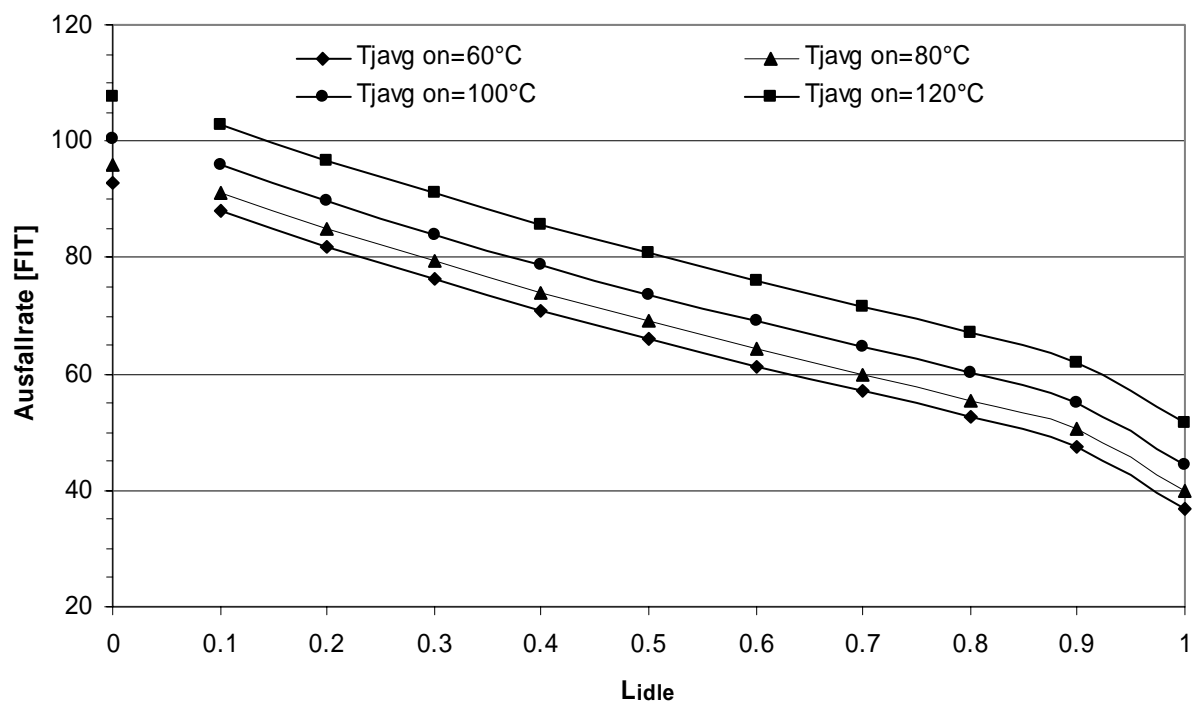


Bild 3 SDRAM 128MB: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle} für $T_{javg} = 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 120^\circ C$

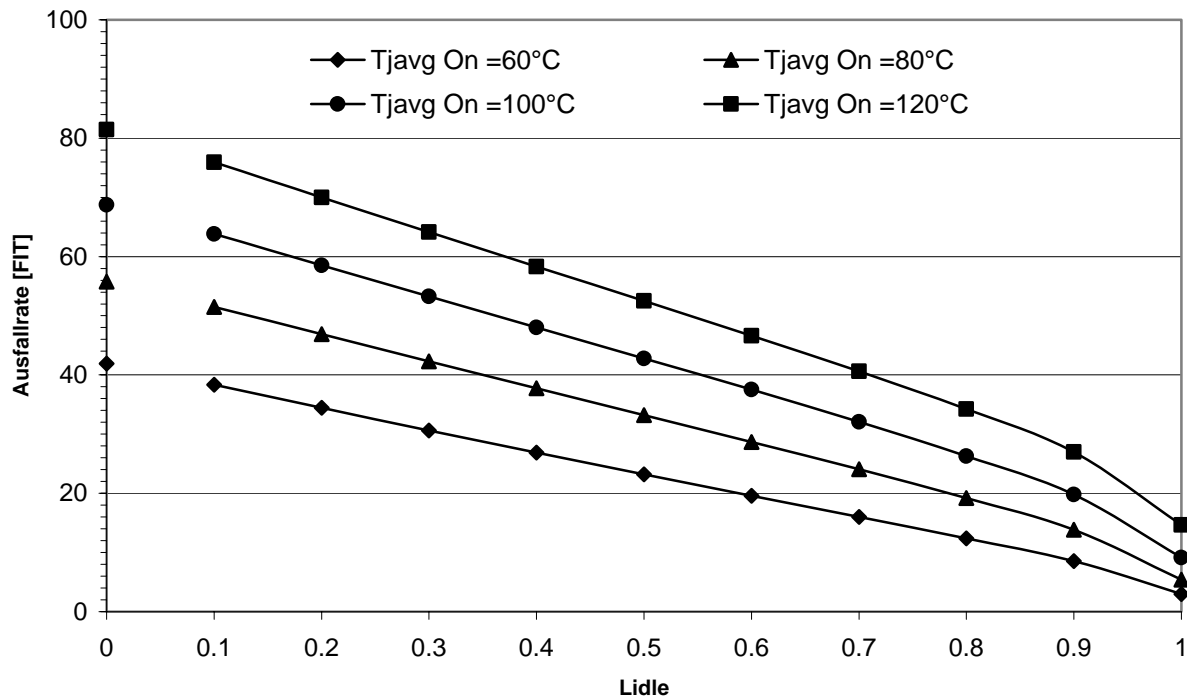


Bild 4 IC VLSI: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle} für T_{javg} = 60°, 80°, 100°, 120°C

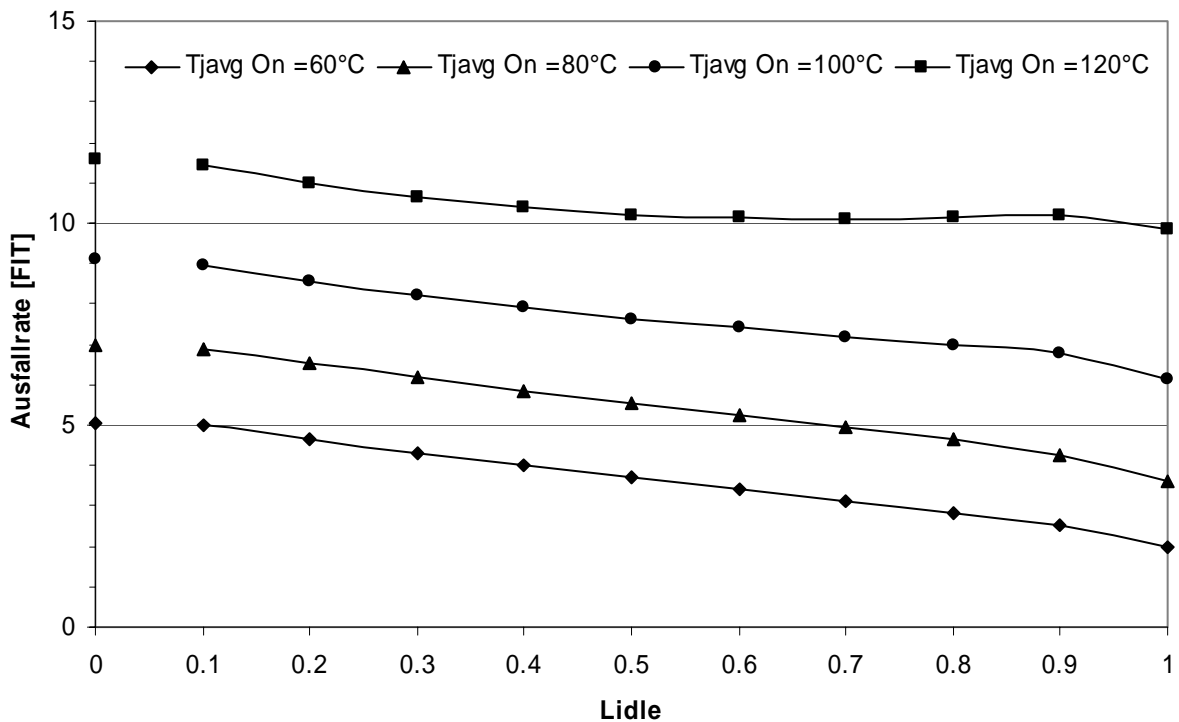


Bild 5 IC LSI: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle}

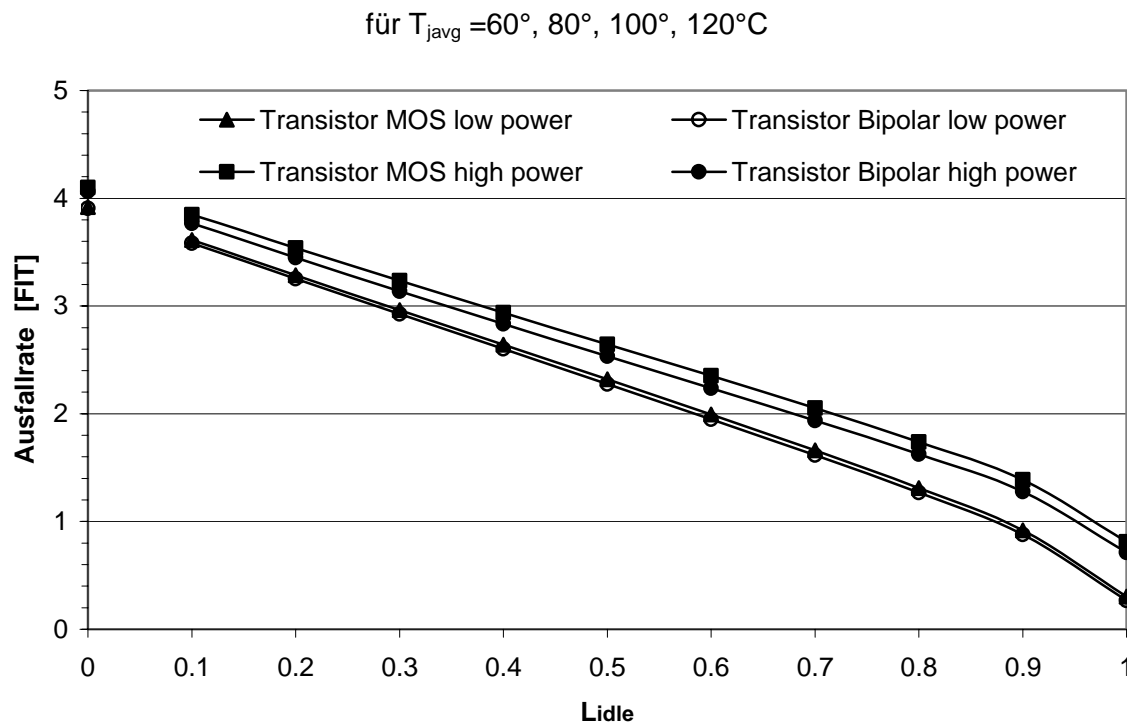


Bild 6 Transistoren: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle}
während τ_{idle} für $T_{\text{avg}} = 85^\circ\text{C}$

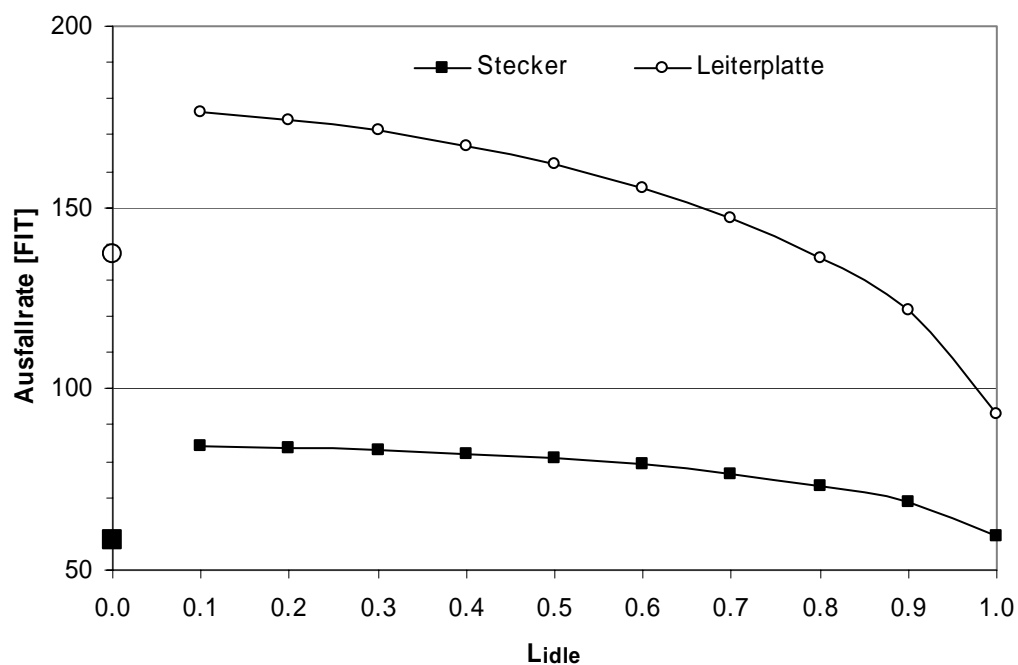


Bild 7 Stecker und Leiterplatte: vorausgesagte Ausfallraten als
Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle}

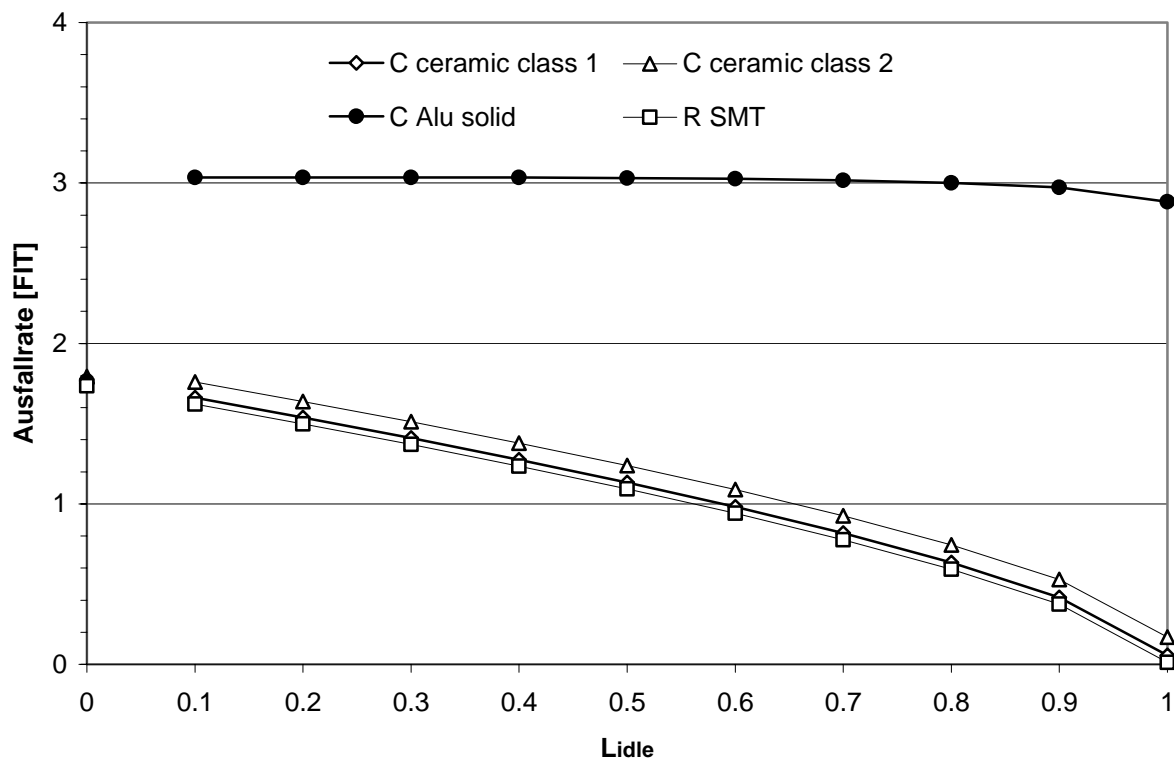


Bild 8 Kondensatoren und Widerstände: vorausgesagte Ausfallraten als Funktion der Belastung L_{idle} während τ_{idle}

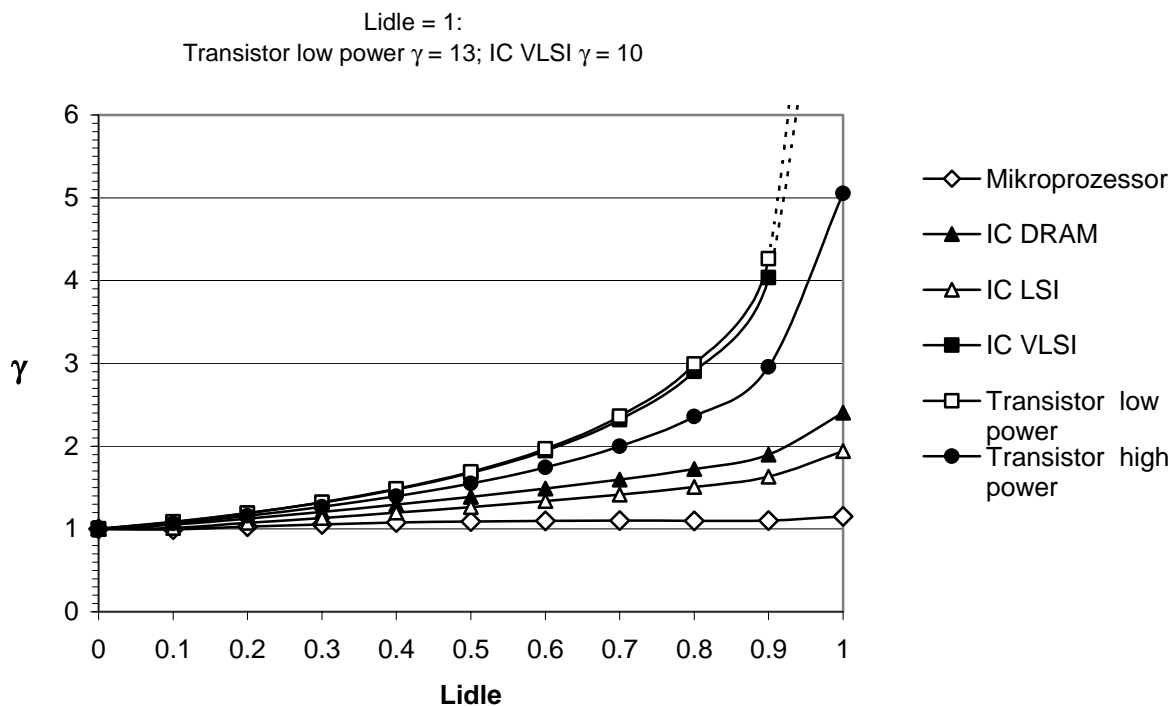


Bild 9 γ als Funktion von L_{idle} ; $T_{javg} = 100^\circ\text{C}$ für Mikroprozessor bzw. 80°C für ICs, $T_{javg}=85^\circ\text{C}$ für Transistoren

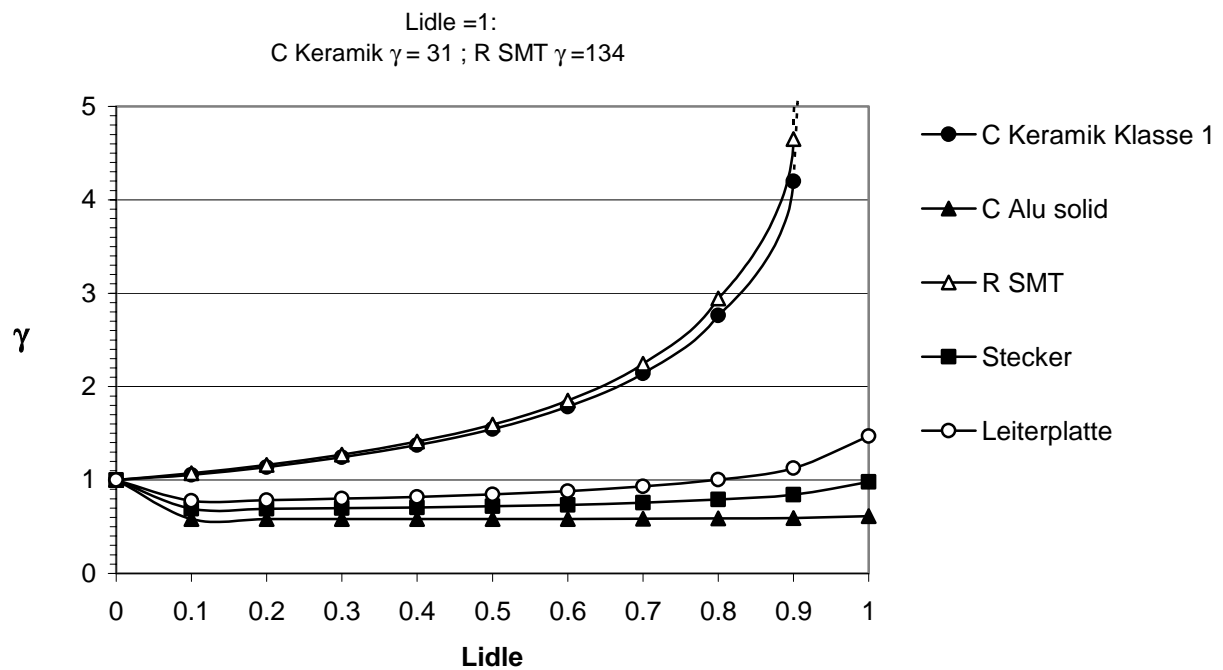
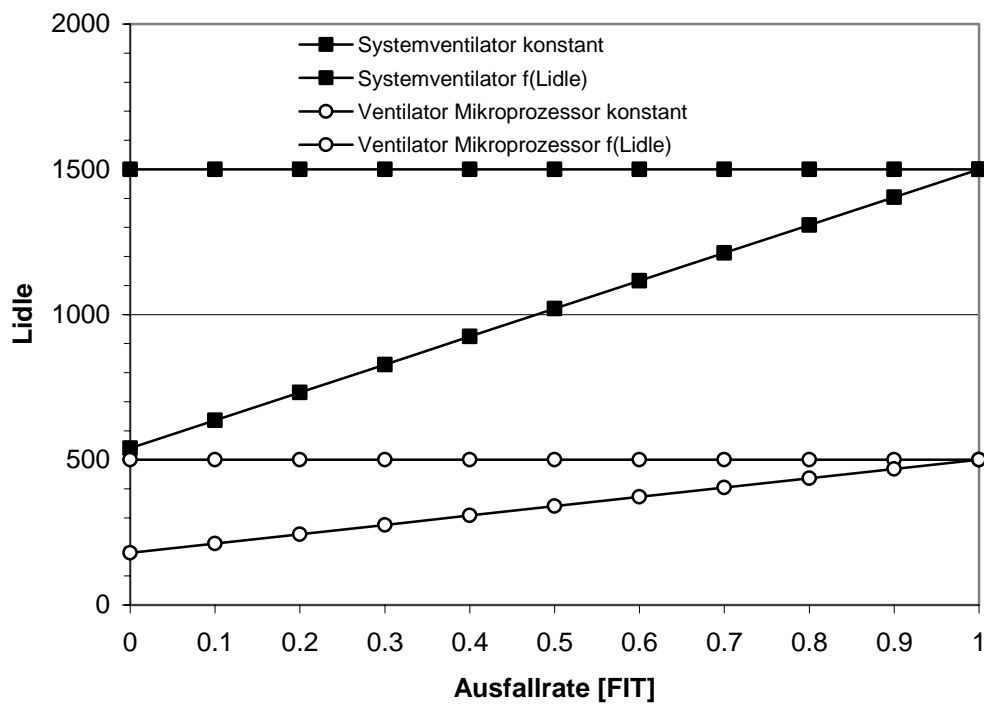
Bild 10 γ als Funktion von L_{idle} , passive Komponenten

Bild 11 Vorausgesagte Ausfallraten Ventilatoren

Für die Berechnung der Gesamtausfallrate des System-Boards werden die Ausfallraten der einzelnen Komponenten mit ihrer Anzahl multipliziert und summiert. Die detaillierten Werte sind im Anhang A4 gegeben. Für den Betrieb *Ein und Idle* sind die entsprechenden Werte zuerst durch γ für eine Belastung L_{idle} von 0.1 bis 1 zu dividieren. Die Resultate der Gesamtausfallraten sind für die Betriebsarten *Dauernd Ein*, *Ein und Aus* sowie exemplarisch *Ein und Idle* mit $L_{idle} = 0.2$, 0.4 und 0.6 in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Vorausgesagte Ausfallraten des System-Board

Umgebungs- bedingung	$\Sigma\lambda$ Dauernd Ein [FIT]	$\Sigma\lambda$ Ein- und Aus [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.2$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.4$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.6$ [FIT]
$T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$	5821	7297	9579 / 7562*	8908 / 7580*	8180 / 7305*
$T_{ae, avg} = 30^{\circ}\text{C}$	6297	7482	10095 / 8078*	9426 / 8098*	8701 / 7826*

* die erste Zahl für γ ist hier das Verhältnis $\tau_{on}/(\tau_{on}+\tau_{off})$, die zweite Zahl ist gleich $\gamma = f(L_{idle})$

Die Schätzung für die Ausfallrate des System-Boards bei $T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$ ergibt für den Betrieb *Ein und Aus* 7'297 FIT, was einem MTBF von 15.6 Jahren entspricht. Bei $T_{ae, avg} = 30^{\circ}\text{C}$ sinkt der MTBF auf 15.26 Jahre bzw. um etwa 2.5%.

Für den Betrieb *Dauernd Ein* ergeben sich bei $T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$ 5821 FIT bzw. ein MTBF von 19.6 Jahren. Bei $T_{ae, avg} = 30^{\circ}\text{C}$ sinkt der MTBF auf 18.1 Jahre bzw. um etwa 8.2%.

Für Belastungen $L_{idle} \leq 0.6$ sind die Gesamtausfallraten höher als in den Betriebsarten *Dauernd Ein* und *Ein und Aus*.

Die Größenordnung der vorausgesagten Ausfallraten stimmen dabei mit der vom Hersteller für das System-Board verwendeten MTBF >100'000h (11.4 Jahre) bzw. <10'000FIT überein [22].

Bild 12 zeigt das Verhältnis der Ausfallraten des System-Boards für die drei Betriebsarten mit den zwei Berechnungsansätzen für die Ausfallrate der Ventilatoren. Daraus ist klar ersichtlich, dass die tiefste Ausfallrate im Betrieb *Dauernd Ein* erzielt wird, wobei der berechnete Wert von 5821 FIT etwa 20% tiefer ist als im Betrieb *Ein und Aus*. Vom Punkt *Dauernd Ein* steigt die Ausfallrate mit abnehmender Belastung L_{idle} während den untätigen Zeiten. Die höchste Ausfallrate von ca. 10'400FIT würde erzielt, wenn $L_{idle} = 0$ wäre, das System-Board aber nicht ausgeschaltet würde. Die vergleichsweise tiefe Ausfallrate im Betrieb *Ein und Aus* ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass für ausgeschaltete Komponenten ein Ausfallrate $\lambda_{off} = 0$ angenommen wird, was insbesondere die inhärent hohe Ausfallrate der Ventilatoren erheblich senkt.

Für den ersten Berechnungsansatz $\lambda_{vent} = \lambda_{RDF}$ ist die Ausfallrate des System-Boards im Betrieb *Ein und Aus* kleiner als im Betrieb *Ein und Idle*, wenn die Belastung L_{idle} kleiner als 0.8 ist.

Für den zweiten Berechnungsansatz $\lambda_{vent} = \lambda_{RDF} \times L_{idle}$ ist die Ausfallrate des System-Boards im Betrieb *Ein und Aus* kleiner als im Betrieb *Ein und Idle*, wenn die Belastung L_{idle} kleiner als 0.6 ist.

Als Resultate können in jedem Falle festgehalten werden:

1. Ist die Belastung des untersuchten Servers während den untätigen Zeiten kleiner als 50% der Belastung während der aktiven Zeit, dann erzielt man mit seiner Abschaltung für das System-Board eine Verringerung der Ausfallrate bzw. eine Erhöhung der Zuverlässigkeit.
2. Als allgemeine Regel kann abgeleitet werden: je kleiner die Belastung während untätigen Zeiten, umso günstiger wirkt sich das Abschalten auf die Zuverlässigkeit aus.

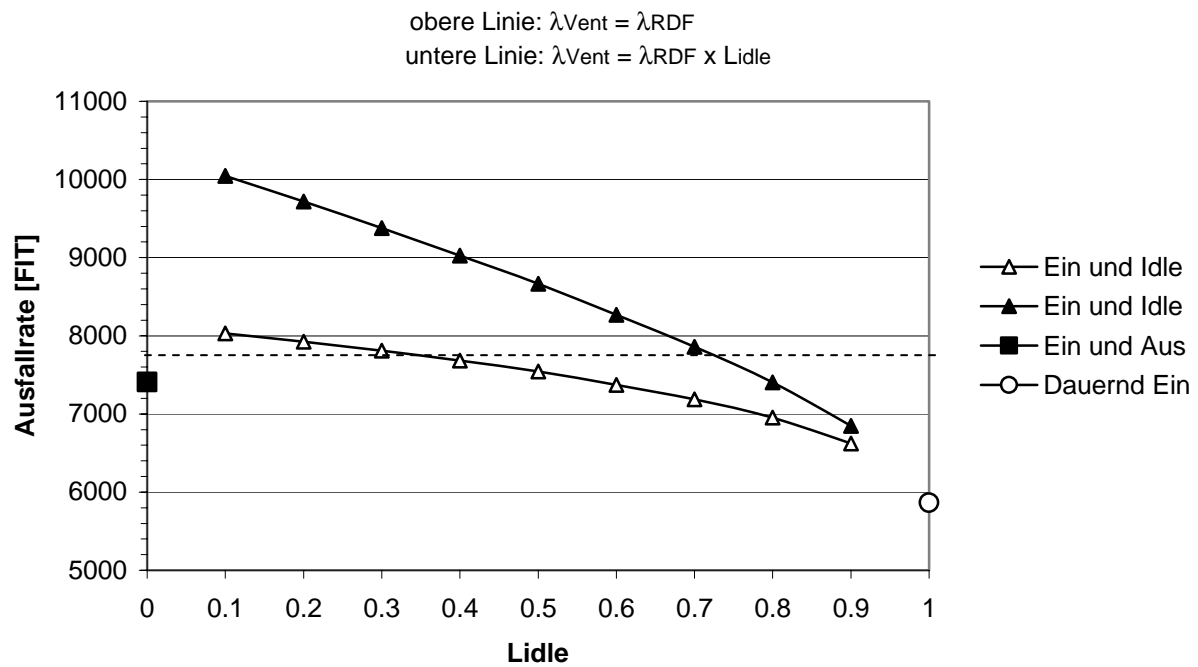


Bild 12 Ausfallrate des System-Board für *Ein und Aus*, *Dauernd Ein* sowie *Ein und Idle*,
 $T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$

2.7 Festplattenlaufwerke und Stromversorgung

Im untersuchten Server HP ProLiant ML350-G3 können je nach Kundenanforderung ein oder mehrere Festplattenlaufwerke sowie Stromversorgungen verschiedener Hersteller eingesetzt werden. Da detaillierte Stücklisten nicht zur Verfügung standen, können diese Baugruppen daher im Rahmen dieser Untersuchung nur allgemein betrachtet und der Einfluss des Betrieb *Ein und Aus* grob eingeschätzt werden.

2.7.1 Festplattenlaufwerke

Festplattenlaufwerke werden im Modell RDF 2000 mit einer fixen Ausfallrate von 2800 FIT ausgewiesen. Spezifikationen von Herstellern von qualitativ hoch stehenden Festplattenlaufwerken, wie sie in Servern eingesetzt werden, weisen einen MTBF von typisch 1'000'000h aus, was einer Ausfallrate von 1000 FIT entspricht. Im einfachsten Ansatz kann diese Ausfallrate als proportional zur Zeit im ausgeschalteten Zustand verringert betrachtet werden. Damit ergäbe sich für den Betrieb *Ein und Aus* eine Ausfallrate von 1008 FIT gemäss RDF 2000 bzw. von 360 FIT nach Herstellerangaben.

Dieser Ansatz lässt sich auch durch eine genauere Betrachtung der Betriebsarten von Festplattenlaufwerken stützen. Moderne Festplattenlaufwerke verfügen oft über ein ausgeklügeltes power management. Dabei werden im Wesentlichen vier Zustände eingenommen: *Normal*, d.h. suchen und Lesen/Schreiben, *idle*, *standby* und *sleep*. Die üblicherweise verwendeten Laufwerke des untersuchten Servers sind gemäss [22] bei Nichtgebrauch in der Regel im Zustand *idle*, d.h. der Spindelmotor dreht, der Schreib/Lesekopf ist jedoch nicht aktiv. In Analogie zu den Ventilatoren kann angenommen werden, dass die mechanisch bewegten Teile den grössten Anteil zur Ausfallrate eines Laufwerkes beitragen. Obwohl also wie beim System-Board die Ausfallrate einiger elektronischer Komponenten durch die Temperaturzyklen des Betriebes *Ein und Aus* erhöht wird, kann für das gesamte Festplattenlaufwerk mit einer Verringerung gerechnet werden.

Eine weitere Betrachtung ist jedoch notwendig, da der Betrieb *Ein und Aus* zu Start/Stopp-Zyklen des Schreib/Lesekopfes führt. Beim Aufstarten des Laufwerkes wird die Festplatte beschleunigt und die dadurch entstehende Bildung des Luftkissens führt zum Abheben des Schreib/Lesekopfes. Beim Ausschalten wird die Festplatte abgebremst, das Luftkissen verschwindet und der Schreib/Lesekopf landet auf der Festplatte. Dieser Vorgang wird als *contact start/stop* CSS-Zyklus bezeichnet. Der Kontakt mit der Festplatte findet dabei auf einer speziellen Landezone statt, auf der keine Daten gespeichert sind. Jeder Start und Stopp führt zu geringfügigen Abnutzungen auf der Festplatte, dem Schreib/Lesekopf und an anderen Komponenten wie zum Beispiel dem Spindelmotor. Aus diesem Grund wird die minimale Anzahl der CSS-Zyklen für Festplattenlaufwerke spezifiziert, wobei übliche Werte für Laufwerke von Arbeitsplatzrechnern und Server im Bereich von 40'000 bis 50'000 liegen [17,18]. Mit der von IBM entwickelten „load/unload“ Technologie [19] können noch weit höhere Werte (>300'000) erreicht werden.

Unter der ungünstigsten Annahme einer täglichen Ein- und Ausschaltung, liegt die Anzahl der resultierenden CSS bei einer Einsatzdauer von fünf Jahren bei weniger als 2000 und somit weit unterhalb der üblicherweise spezifizierten 40'000 bis 50'000 Start/Stopp-Zyklen. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die von einem Ein- Ausschaltbetrieb verursachten zusätzlichen CSS nicht zu einer Verschlechterung der Zuverlässigkeit der Festplattenlaufwerke führen. Im konkreten Fall muss abgeklärt werden, ob die Spezifikation der Start/Stopp-Zyklen der eingesetzten Festplattenlaufwerke einen Betrieb *Ein und Aus* zulassen.

2.7.2 Stromversorgung

In den Spezifikationen von Stromversorgungen gibt es keine Limitierung bezüglich der Anzahl zulässiger Ein- und Ausschaltoperationen. Moderne Schaltnetzteile verfügen zudem über Schutzeinrichtungen (*inrush current limiter, soft start control, power good signaling* etc.), die den durch das Ein- und Ausschalten entstehenden elektrischen Stress von der Elektronik fernhalten. Eine Veränderung der Ausfallrate durch andere als die im Modell RDF2000 berücksichtigten thermischen und thermomechanischen Effekte muss daher nicht angenommen werden.

Typische Herstellerangaben für qualitativ hoch stehende Stromversorgungen für Server weisen einen MTBF >100'000h aus, was einer Ausfallrate <10'000 FIT entspricht. In Analogie zur Berechnung der Ausfallraten für das System-Board kann wiederum erwartet werden, dass einerseits die Ausfallrate einiger elektronischer Komponenten durch den Betrieb Ein und Aus ansteigen wird. Andererseits kann eine erhebliche Verringerung der Ausfallraten von Elektrolytkondensatoren und dem Kühlventilator der Stromversorgung erwartet werden. Damit kann insgesamt eine Verringerung der Ausfallrate durch den Betrieb *Ein und Aus* erwartet werden.

3. Zusammenfassung der Resultate

Die exemplarischen Berechnungen der vorausgesagten Ausfallraten für das System-Board zeigen:

1. Die Ausfallrate ist am kleinsten für den Betrieb *Dauernd Ein*, d.h. für einen Dauerbetrieb mit konstanter Belastung und damit ohne Temperaturzyklen.
2. Die Ausfallrate für den Betrieb *Ein und Aus* ist etwa 20% höher als für den Betrieb *Dauernd Ein*. Der MTBF reduziert sich dabei von 19.7 Jahren auf 15.6 Jahre. Dies repräsentiert jedoch den schlechtesten Fall der eintreten kann, wenn auf einen Betrieb *Ein und Aus* umgestellt wird.
3. Die Ausfallrate für den Betrieb *Ein und Idle* ist stark abhängig von der Belastung L_{idle} während der untätigen Zeit τ_{idle} . Je kleiner die Belastung L_{idle} umso höher ist die Ausfallrate.
4. Die Ausfallrate für den Betrieb *Ein und Aus* ist tiefer als für den Betrieb *Ein und Idle*, falls L_{idle} weniger als 50% der Belastung während aktiven Zeiten beträgt.
5. Ventilatoren haben eine inhärent hohe Ausfallrate und tragen wesentlich zur Gesamtausfallrate des System-Boards bei. Ihr Abschalten wirkt sich deshalb besonders günstig auf die Zuverlässigkeit aus.
6. Die vorausgesagten Ausfallraten liegen in einem Bereich von 5'800 bis 10'400FIT und stimmen mit der Herstellerangabe von $< 10'000$ FIT überein.
7. Eine Erhöhung der Umgebungstemperatur von $T_{ae,avg} = 20^{\circ}\text{C}$ auf 30°C führt je nach Betriebsart zu einer Erhöhung der Ausfallrate um 2.5% (*Ein und Aus*), 8.2% (*Dauernd Ein*) bzw. 5 bis 7% (*Ein und Idle*, $L = 0.2 \dots 0.6$).

Die Größenordnung der Ausfallrate beträgt 10'000FIT für eine Stromversorgung und 1'000 FIT für ein Festplattenlaufwerk. Für einen Kleinserver mit einer einzigen Stromversorgung und 1 bis 2 Festplattenlaufwerken sind demzufolge Änderungen ihrer Ausfallraten aufgrund verschiedener Betriebsarten für die Gesamtausfallrate des Servers entsprechend zu gewichten.

In Analogie zu den Berechnungen für das System-Board kann für Stromversorgungen und Festplattenlaufwerke ebenfalls abgeschätzt werden, dass sich ein Betrieb *Ein und Aus* unter gewissen Voraussetzungen ebenfalls günstig auf die Zuverlässigkeit auswirkt. Voraussetzungen sind eine genügend hoch spezifizierte Anzahl von Start/Stopp-Zyklen für Festplattenlaufwerke und Schutz-einrichtungen in den Stromversorgungen, die den durch das Ein- und Ausschalten entstehenden elektrischen Stress von der Elektronik fernhalten.

Gewichtet werden können diese Abschätzungen mit der Erfahrung, dass Komponenten mit elektromechanisch bewegten Teilen, wie Festplattenlaufwerke und Ventilatoren, die am häufigsten genannten Verursacher von Ausfällen sind. In Ruhezeiten tritt kein Verschleiss an diesen Komponenten und Baugruppen auf, womit ihre Anwendungsdauer in Kalenderzeit verlängert wird.

Unter Annahme einer Belastung von weniger als 50% während untätigen Zeiten kann aufgrund dieser Berechnungen und Abschätzungen erwartet werden, dass sich die Umstellung auf einen Betrieb *Ein und Aus* insgesamt vorteilhaft auf die Zuverlässigkeit eines Servers auswirkt.

Als allgemeine Regel kann abgeleitet werden: je kleiner die Belastung während untätigen Zeiten, umso günstiger wirkt sich das Abschalten auf die Zuverlässigkeit aus.

4. Quellenverzeichnis

- [1] „Schalten von Servern in KMU's“ / Marktbedarf und Pilotanlagen, Schlussbericht 2001, Alois Huser, en-control GmbH. Projekt-Nr. 69542 im Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- [2] „Servernutzung in Klein- Und Mittelbetrieben“, Schlussbericht 2000, Michael Gubler und Matthias Peters, IPSO. Projekt-Nr. 38191 im Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- [3] „Raumtemperaturerhöhung in Rechenzentren und ihre möglichen Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Rechenanlagen“, Bericht Z23, 25. Juli 1994, L. Miteff, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [4] „Wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zum Zusammenhang zwischen Schaltheufigkeit und Zuverlässigkeit bei elektronischen Geräten“, Bericht Z13, 11. 12.1992, L. Miteff, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [5] „Standby-Leistungsaufnahme-Reduzierung und ihre Auswirkung auf die Zuverlässigkeit des Video-Recorders HR-FC 100E/EG“, Bericht Z1, 18.11.1991, A. Birolini, L. Miteff, T. Winter, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [6] „Standby-Leistungsaufnahme-Reduzierung und ihre Auswirkung auf die Zuverlässigkeit des Telefax-Gerätes Panafax UF-150“, Bericht Z2, 18.11.1991, L. Miteff, T. Winter, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [7] „Auswirkung der Ein-/Ausschaltheufigkeit auf die Zuverlässigkeit von PC-Monitoren“, Bericht Z5, 31.5.1992, A. Birolini, L. Miteff, D. Ratchev, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [8] „Senkung des Standby-Leistungsverbrauchs eines Fotokopierers und daraus resultierende Konsequenzen für seine Zuverlässigkeit“, Bericht Z12, 15.10.1992, L. Miteff, D. Ratchev, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH Zürich.
- [9] „Quality and Reliability of Technical Systems“, A. Birolini, Springer Verlag, 2nd Edition 1997.
- [10] „Practical Reliability Engineering“, Patrick O'Connor, Heyden & Son Ltd, 1981.
- [11] „Electronic Component Reliability“, Finn Jenssen, John Wiley & Sons, 1995.
- [12] Compaq ProLiant ML350 Generation 3, Version 8, 27. November 2002.
- [13] Military-Handbook 217F: „Reliability Prediction of Electronic Equipment“, Department of Defense, USA, 1995.
- [14] Telcordia Technologies Special Report SR 332: „Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment“, Issue 1, 2001.
- [15] IEC 61709 „Electronic components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion“
- [16] UTE RDF 2000: „Universal Model for Reliability Prediction of Electronics Components, PCBs and Equipment“, 2000.
- [17] IBM Deskstar™ 180GXP hard disk drives, Jahr 2002
- [18] Maxtor Hard Disk Drive Specifications Models: 546106, 53073H4, 52049H3, 51536H2, Jahr: 2000
- [19] IBM hard disk drive load/unload technology, <http://www.hgst.com/hdd/library/whitepap/load/load.htm>
- [20] Fujitsu Hard Drive <http://www.fcpa.com>
- [21] www.thermaltake.com, www.papstplc.com
- [22] Persönliche Kommunikation T. Fierz, Hewlett-Packard (Schweiz) GmbH, 10.2.2004.

5. Anhang

A1 Komponentenfamilien nach RDF2000

EQUIPPED PCBs, HYBRID CIRCUITS
 INTEGRATED CIRCUITS
 DIODES AND THYRISTORS, TRANSISTORS, OPTOCOUPLERS
 OPTOELECTRONICS
 CAPACITORS AND THERMISTORS (NTC)
 RESISTORS AND POTENTIOMETERS
 INDUCTORS AND TRANSFORMERS
 MICROWAVE PASSIVE COMPONENTS
 PIEZOELECTRIC COMPONENTS AND SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTERS
 RELAYS
 SWITCHES AND KEYBOARDS
 CONNECTORS
 DISPLAYS AND SOLID STATE LAMPS
 PROTECTION DEVICES
 ENERGY DEVICES, THERMAL MANAGEMENT, DISK DRIVE

A2 Mathematisches Modell RDF2000

Beispiel: Integrierte Schaltungen

$$\lambda = \left(\left(\lambda_1 \times N \times e^{-0.35 \times a} + \lambda_2 \right) \times \left(\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i \times \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right) + \left(2.75 \times 10^{-3} \times \Pi_\alpha \times \left(\sum_{i=1}^z (\pi_n)_i \times (\Delta T_i)^{0.68} \right) \times \lambda_3 \right) + \{ \Pi_I \times \lambda_{EOS} \} \right) \times 10^{-9} / h$$

Dabei sind:

- λ_1 Basisausfallrate pro Transistor der integrierten Schaltung, pro Familie, nach Tabelle
- N Anzahl Transistoren der integrierten Schaltung
- a Produktionsjahr minus 1998
- λ_2 Ausfallrate bezogen auf Technologiebeherrschung, pro Familie, nach Tabelle
- $(\pi_t)_i$ i-ter Temperaturfaktor bezogen auf die i-te Junctiontemperatur des Missionsprofils
 z.B für MOS/BiCMOS: $\pi_t = e^{\frac{A(1/328 - 1/(T_j + 273))}{E_a}}$, mit T_j = Junctiontemperatur, $A=3840$ ($E_a=0.3\text{eV}$)
- τ_i i-ter *Zeitanteil im Betrieb* des Missionsprofils
- τ_{on} totaler Zeitanteil im Betrieb. Mit $\tau_{on} = \sum \tau_i$
- τ_{off} Zeitanteil nicht im Betrieb. Mit $\tau_{on} + \tau_{off} = 1$
- Π_α Faktor bezogen auf die Differenz der Ausdehnungskoeffizienten von Komponentenmaterial α_C und Substrat α_S : $\Pi_\alpha = 0.06 \times (|\alpha_S - \alpha_C|)^{1.68}$
- $(\pi_n)_i$ i-ter Einflussfaktor bezogen auf die jährliche Anzahl von Temperaturzyklen des Gehäuses, mit Amplitude ΔT_i . $(\pi_n)_i = n_i^{0.76}$ für $n_i \leq 8760$
- n_i Jährliche Anzahl Zyklen mit Amplitude ΔT_i
- ΔT_i i-te Temperaturamplitude des Missionsprofils, $\Delta T_i = (\Delta T_J/3 + (T_{ac})_i) - (T_{ae})_i$
- $(T_{ae})_i$ durchschnittliche Umgebungstemperatur ausserhalb des Gerätes, während der i-ten Phase des Missionsprofils
- $(T_{ac})_i$ durchschnittliche Umgebungstemperatur auf der Leiterplatte in der Nähe der Komponenten, während der i-ten Phase des Missionsprofils
- λ_3 Basisausfallrate des IC-Package, nach Tabelle
- π_i Faktor bezogen auf Anwendung (Interface oder nicht)
- λ_{EOS} Ausfallrate bezogen auf den elektrischen Überstress der Anwendung

A3 Berechnungsparameter Komponenten

Mikroprozessor, SBGA, 672 Pins λ chip λ_1 (table 13) 3.40E-06 Number of Transistors 55000000 Year of Manufacturing 2002 λ_2 (table 13) 1.7 A (Ea = 0.3eV) 3480 λ package α S (substrate, table 11) 16 α C (component, table 11) 21.5 $\Pi\alpha = 0.06x(\alpha_S - \alpha_C)^{1.68}$ 1.05186637 λ_3 (package, table 14, Epoxy BGA) 74 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10	SDRAM 128MB, 66 Pins, TSOPII λ chip λ_1 (table 13) 1.00E-07 Number of Transistors 134217728 Year of Manufacturing 2002 λ_2 (table 13) 5.6 A (Ea = 0.3eV) 3480 λ package α S (substrate, table 11) 16 α C (component, table 11) 21.5 $\Pi\alpha = 0.06x(\alpha_S - \alpha_C)^{1.68}$ 1.05186637 λ_3 (package, table 14, TSOPII) 41.45 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10
IC VLSI TSOP II 0.4Pitch, 60Pins λ chip λ_1 (table 13) 3.40E-06 N Transistors 1000000 year 2002 λ_2 (table 13) 1.7 A (Ea=0.3eV) 3480 λ package α S (substrate, table 11) 16 α C (component, table 11) 21.5 $\Pi\alpha$ 1.05186637 λ_3 (package, table 14) 35.452 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10	IC LSI SOP, 20 Pins λ chip λ_1 (table 13) 3.40E-06 N Transistors 1000 year 2002 λ_2 (table 13) 1.7 A (Ea=0.3eV) 3480 λ package α S (substrate, table 11) 16 α C (component, table 11) 21.5 $\Pi\alpha$ 1.05186637 λ_3 (package, table 14) 3.757 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10
Diode low (high) power λ chip λ_0 low (high) power 0.07 (0.7) Π_U 1 A (Ea=0.4eV) 4640 λ package λ_B (package, table 15) 1 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10	Transistor low (high) power λ chip λ_0 low (high) power 0.75 (2) Π_S charge factor 0.6 A MOS/IGBT (Ea = 0.3eV) 3480 A Bipolar (Ea = 0.4eV) 4640 λ package Constant 0.00275 λ_B (package, table 15) 2.5 λ overstress Π_I (0 = no interface) 0 λ_{EOS} 10

Kondensatoren				Stecker	
	Constant 1	Constant 2	A	λ_0	3
Ceramic Cl. 1	0.05	0.0033	1160	Π_C	4.47213595
Ceramic Cl. 2	0.15	0.0033	1160	Π_M (Tin/Tin)	3
Alu solid	2.4	0.0014	1740	Π_I	1
Widerstände				A	1740
	Constant 1	Constant 2	A	Π_M (Tin/Tin)	3
Metallfilm	0.1	0.0014	1740	Π_I	1
Kohleschicht	0.5	0.0014	1740	A	1740
SMT	0.01	0.0033	1740	Contacts	20
Load factor =0.2 für alle				Ventilatoren	
Leiterplatte				λ_0 [FIT]	
Π_C (Layers)			1.4	Ventilator CPU	500
Surface (cm ²)			1426	Ventilator	2500
Nt Through holes			1000	Sleeve Bearing	
Np Tracks			1000	Ventilator	1500
Π_L (track width 0.08mm)			6	Ball Bearing	
Hard Disk Drive					
	λ_0 [FIT]				
Long Duration Disk Drive	2800				

Anhang A4

Tabelle A 4-1 Vorausgesagte Ausfallraten des System-Board bei $T_{ae, avg} = 20^{\circ}\text{C}$

Komponente / Baugruppe	Anzahl	λ^* Dauernd Ein [FIT]	$\Sigma\lambda$ Dauernd Ein [FIT]	λ^* Ein- und Aus [FIT]	$\Sigma\lambda$ Ein- und Aus [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.2$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.4$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.6$ [FIT]
1. Mikro-prozessor	1	172	172	198	198	192	183	180
2. Memory DRAM	10	40	400	96	960	850	738	644
3. IC Digital VLSI	12	5.4	64.8	56	672	565	454	346
4. IC Digital LSI	50	3.6	180	7	350	327	292	261
5. Transistor Power	20	0.8	16	4	80	69	57	46
6. Transistor low power	80	0.3	24	4	320	267	216	162
7. Kondensator Keramik SMT	600	0.06	36	1.75	1050	921	766	590
8. Widerstand SMT	600	0.013	7.8	1.7	1020	879	723	551
9. Kondensator Al solid	50	2.9	145	1.8	90	155	155	155
10. Stecker	20	59	1180	58	1160	1681	1657	1589
11. Leiterplatte	1	95	95	137	137	173	167	156
12. Ventilator CPU	1	500	500	180	180	500/ 212**	500/ 310**	500/ 375**
13. Ventilator System	2	1500	3000	540	1080	3000/ 1271**	3000/ 1862**	3000/ 2250**
Summe System-Board			5821		7297	9579/ 7562**	8908/ 7580**	8180/ 7305**

* Wert für $T_{j, avg} = 100^{\circ}\text{C}$ (μP) bzw. 80°C für ICs und 85°C für diskrete Halbleiter

** die erste Zahl für γ ist hier das Verhältnis $\tau_{on}/(\tau_{on}+\tau_{off})$, die zweite Zahl ist gleich $\gamma = f(L_{idle})$

Tabelle A 4-2 Vorausgesagte Ausfallraten des System-Board bei $T_{ae, avg} = 30^{\circ}\text{C}$

Komponente / Baugruppe	Anzahl	λ^* Dauernd Ein [FIT]	$\Sigma\lambda$ Dauernd Ein [FIT]	λ^* Ein- und Aus [FIT]	$\Sigma\lambda$ Ein- und Aus [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.2$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.4$ [FIT]	$\Sigma\lambda$ $L_{idle}=0.6$ [FIT]
1. Mikro-prozessor	1	219	219	215	215	217	213	215
2. Memory DRAM	10	42	420	98	980	875	756	667
3. IC Digital VLSI	12	7.1	85	56.4	677	574	467	360
4. IC Digital LSI	50	4.7	235	7.4	370	359	330	306
5. Transistor Power	20	4	80	4.2	84	74	62	51
6. Transistor low power	80	0.4	32	4	320	276	219	167
7. Kondensator Keramik SMT	600	0.06	36	1.75	1050	921	766	593
8. Widerstand SMT	600	0.015	9	1.7	1020	879	729	554
9. Kondensator Al solid	50	3.4	170	2	100	179	182	182
10. Stecker	20	70	1400	62	1240	2000	1968	1879
11. Leiterplatte	1	111	111	166	166	241	234	227
12. Ventilato CPU	1	500	500	180	180	500/ 212**	500/ 310**	500/ 375**
13. Ventilator System	2	1500	3000	540	1080	3000/ 1271**	3000/ 1862**	3000/ 2250**
Summe System-Board			6297		7482	10095/ 8078**	9426/ 8098**	8701/ 7826**

* Wert für $T_{j,avg} = 110^{\circ}\text{C}$ (μP) bzw. 90°C für ICs und 95°C für diskrete Halbleiter

** die erste Zahl für γ ist hier das Verhältnis $\tau_{on}/(\tau_{on}+\tau_{off})$, die zweite Zahl ist gleich $\gamma = f(L_{idle})$

Anhang A5

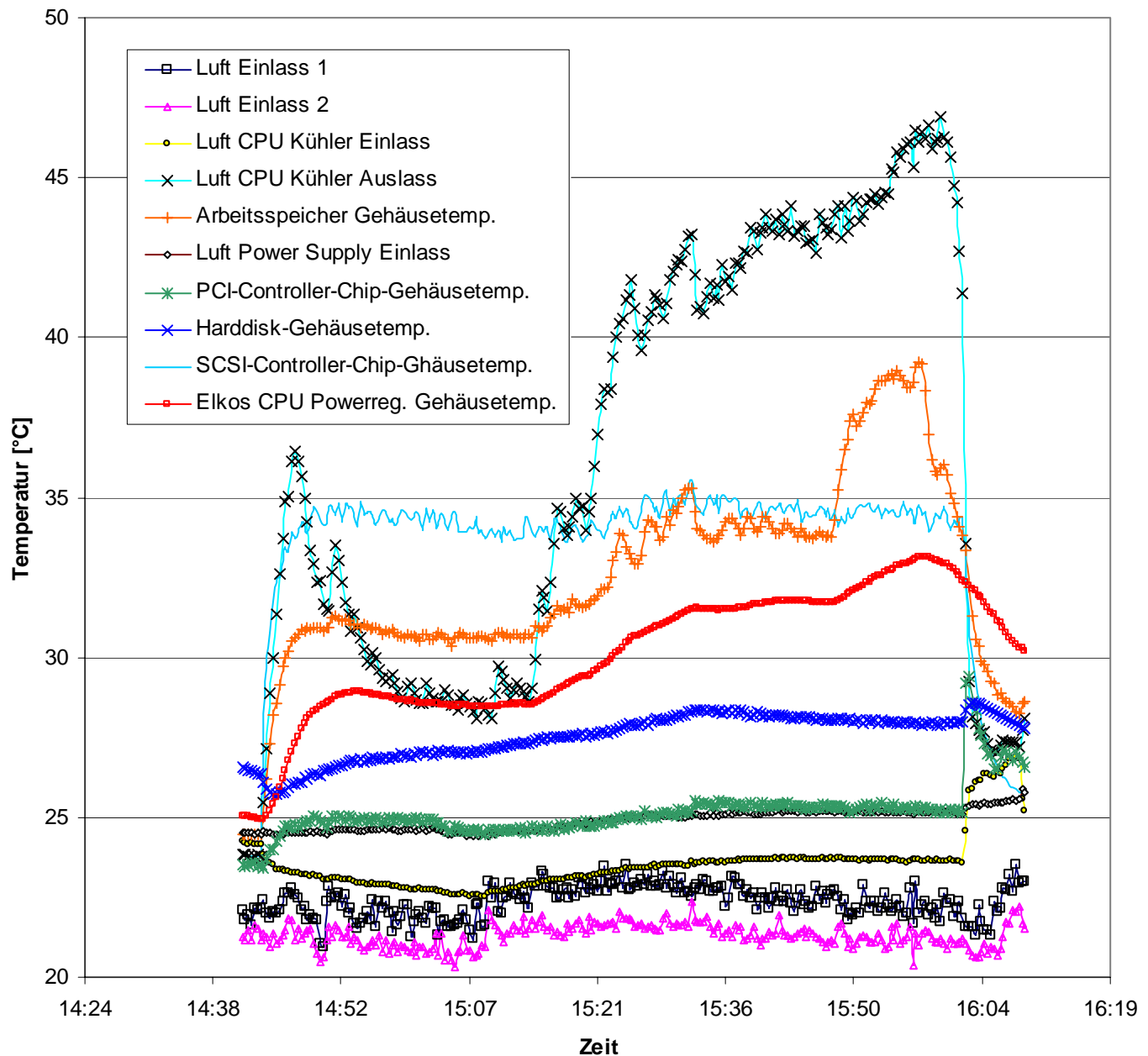


Bild A5-1 Temperaturmessungen HP ProLiant ML350-G3

Prüfmittel

Temperaturmesskette bestehend aus:

- Thermoelemente TC-K 235 bis 244 an Eingang 1 bis 10 von:
- Kompensationsbox EMPA für TC-K, IDNr.22
- DMM Keithley 2000-20, SNr.0696993, LOG173.2905.02, EMPA-Nr.M31920
- PC mit LabWindows Programm Temp4.c 30.06.2000

Messunsicherheit

$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (zweifache Standardmessunsicherheit) Die Messunsicherheit beinhaltet die Unsicherheitsbeiträge der Referenzen und Quellen.