

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	69 (1978)
<b>Heft:</b>	4
<b>Artikel:</b>	Die Zuverlässigkeit als wirtschaftliche Grösse : Überlegungen am Beispiel von Stromversorgungsanlagen
<b>Autor:</b>	Aslaksen, E. W.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-914844">https://doi.org/10.5169/seals-914844</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die Zuverlässigkeit als wirtschaftliche Größe

Überlegungen am Beispiel von Stromversorgungsanlagen

Von E.W. Aslaksen

621.311.4:62-192: 657.47;

Mit zunehmender Größe und Komplexität industrieller Anlagen wird die Zuverlässigkeit immer wichtiger. Sie beeinflusst die Rentabilität der Anlagen sowohl direkt als auch indirekt über die von Ausfällen verursachten Folgeschäden. Das letztere ist bei Stromversorgungen besonders wichtig. Es wird ein Verfahren skizziert, wie man die verschiedenen, die Zuverlässigkeit beeinflussenden Faktoren in einer approximativen Weise quantifizieren kann und dann, durch numerische Analyse, die zu jeder verlangten Zuverlässigkeit der Anlage gehörenden minimalen Kosten berechnet.

Plus la grandeur et la complexité d'installations industrielles augmentent, plus la fiabilité devient importante. Elle influe sur la rentabilité de l'installation, aussi bien directement, qu'indirectement par les conséquences des pannes, qui peuvent être particulièrement graves dans le cas d'installations d'alimentation en courant. L'auteur indique un procédé permettant de quantifier approximativement les facteurs qui exercent une influence sur la fiabilité et, par analyse numérique, de calculer les coûts minimaux pour chaque fiabilité requise de l'installation.

## 1. Zuverlässigkeitsanforderungen an industrielle Anlagen

Bis vor wenigen Jahren war die gründliche Behandlung der Zuverlässigkeit von elektrischen Geräten und Anlagen auf gewisse Spezialgebiete beschränkt. Vielleicht am weitesten fortgeschritten waren die Telefongesellschaften, die dazu gezwungen wurden, um durch die Reparatur- und Unterhaltskosten der sehr gross gewordenen Netze deren weitere Expansion nicht zum Stillstand zu bringen. Beim Militär hatten die Umweltbedingungen es notwendig gemacht, genaue Vorschriften über die Zuverlässigkeit der Geräte auszuarbeiten, damit die immer komplizierter werdenden Ausrüstungen überhaupt noch eine nützliche Dauer zwischen zwei Ausfällen (MTBF Mean Time Between Failures) aufwiesen. So hat der Radar eines modernen Düsenjägers nach Einhaltung aller dieser Vorschriften eine MTBF von nur 100 Flugstunden. Eine dritte Gruppe bildeten Anwendungen, wo die Kosten eines Ausfalls extrem hoch wären, wie in der Raumfahrt oder in den Unterwasser-Fernmeldekabeln. Hier wurde die Zuverlässigkeit um praktisch jeden Preis hochgezüchtet.

Auch heute wird immer noch der grösste Teil der industriellen Elektronik ohne jegliche spezifische Anforderungen an die Zuverlässigkeit eingekauft. Diese Situation wird sich in der nächsten Zeit aus folgenden Gründen ändern: Erstens, weil industrielle Anlagen immer mehr Elektronik enthalten. Dies röhrt von der zunehmenden Automatisierung und von der immer aufwendigeren Überwachung und Messwerterfassung her. Diese quantitative Zunahme bedingt ein höheres Zuverlässigsniveau, damit die Unterhaltskosten nicht so stark ansteigen, dass sie die Wirtschaftlichkeit der Elektronik in Frage stellen. Zweitens, weil die industrielle Elektronik immer komplizierter wird. Diese qualitative Zunahme führt dazu, dass Fehler schwieriger zu lokalisieren und zu beheben sind und dass die Auswirkungen eines Fehlers sich weit ausbreiten können. Drittens, weil elektronische Geräte zunehmend wichtige Aufgaben übernehmen, wo eine Fehlentscheidung sowohl bezüglich Menschenleben als auch bezüglich Kosten schwerwiegende Folgen haben kann.

Unter den industriellen Anlagen und Geräten nehmen die Stromversorgungen einen besonderen Platz ein. Über einen langen Weg von den Generatoren über das Hochspannungsnetz, die lokale Verteilung und die Stromrichtergeräte gelangt die Energie an die Endverbraucher. Es ist klar, dass eine derart komplexe Kette, an die dazu noch strenge wirtschaftliche Forderungen gestellt werden, nicht eine beliebig kleine Ausfallrate haben kann. Nimmt man z.B. das 16-kV-Netz des Aargau-

ischen Elektrizitätswerkes, mit durchschnittlich drei Ausfällen pro Jahr mit mittlerer Dauer von je 20 min [1]<sup>1)</sup>, so darf man annehmen, dass die grosse Mehrheit der Strombezüger nicht gewillt wäre, eine Erhöhung der Strompreise in Kauf zu nehmen, um diese Ausfallrate noch weiter herunterzudrücken. Es bleiben aber viele Strombezüger, für die selbst diese sehr niedrige Ausfallrate zu unannehmbar hohen Kosten führen würde, darunter viele kontinuierliche Prozesse. In Ölraffinerien, wo ein Stromaussfall bis zu einer Million Franken kosten kann, strebt man heute eine Stromversorgung mit weniger als einem Ausfall innerhalb von zehn Jahren an. In solchen Fällen bleibt nichts anderes übrig, als die Zuverlässigkeit der Stromversorgung an einer oder mehreren Stellen der Versorgungskette durch geeignete Massnahmen zu erhöhen. Diese Massnahmen bedeuten Investitionen, und es stellt sich somit die Aufgabe, die Wirtschaftlichkeit derartiger Investitionen zu bestimmen.

## 2. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung

Jedes Investitionsvorhaben ist ein Optimierungsprozess. Den erwarteten Einsparungen oder Einkünften stehen Kosten gegenüber. Durch die Analyse der verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten sucht man jene Lösung zu finden, die die

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

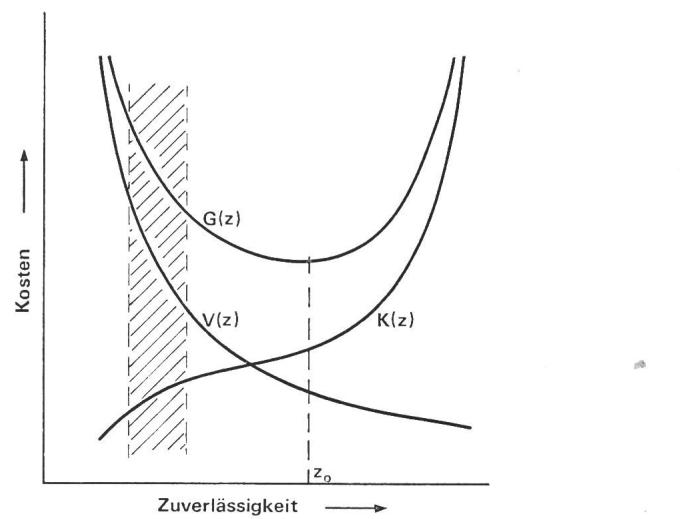


Fig. 1 Kosten in Funktion der Zuverlässigkeit

Die von der Zuverlässigkeit abhängigen Gesamtkosten  $G(z)$  setzen sich aus den durch Ausfälle verursachten Kosten  $V(z)$  und den zur Erreichung der Zuverlässigkeit aufgewendeten Kosten  $K(z)$  zusammen

Nettoeinsparung oder den Gewinn maximalisiert. Üblicherweise umfassen die Kosten Kapitalzinsen, Amortisation und Betriebskosten. Um die Zuverlässigkeit in die Rechnung zu bringen, müssen die Kosten herausgeschält oder neu addiert werden, die von der Zuverlässigkeit der Anlage abhängen. Es sind dies die Anschaffungskosten oder gewisse Teile davon, die Wartungskosten, die Reparaturkosten, und vor allem, die durch Ausfälle verursachten Kosten. Die Summe dieser Kosten sollte innerhalb den realisierbaren Grenzen auf ein Minimum gebracht werden.

Dies ist in Fig. 1 dargestellt. Die Kosten, die entstehen, um einen gewissen Wert  $z$  der Zuverlässigkeit zu erreichen, sind mit  $K(z)$  bezeichnet. Da es sich hier um die zu jedem Wert  $z$  minimalisierten Kosten handelt (vgl. Abschnitt 3), ist  $K$  eine monoton zunehmende Funktion von  $z$ . Die Funktion  $V(z)$  entspricht den durch Ausfälle verursachten Kosten; in vielen Fällen ist sie umgekehrt proportional zu  $z$ . Diese Aufteilung ist speziell bei Stromversorgungen zweckmäßig, bei denen die Folgen eines Ausfalls die Reparaturkosten an der Stromversorgung selber weit übersteigen. Die Summe  $G(z)$  der beiden Kostenanteile wird irgendwo ein Minimum haben, und der zugehörige Wert  $z_0$  entspricht der wirtschaftlichsten Wahl der Zuverlässigkeit, die in dieser Arbeit als MTBF (vgl. unten) ausgedrückt wird. Durch falsches Sparen an den Kosten  $K(z)$  liegen viele Anlagen im schraffierten Bereich.

Die Kosten eines Ausfalls sind meistens nicht exakt erfassbar. Neben den direkten Kosten, die durch Betriebsausfall und Reparaturkosten an der Anlage entstehen, spielen Faktoren wie Image der Unternehmung, Beeinflussung von zukünftigen Baubewilligungen, Beeinflussung von zukünftigen Sicherheitsbestimmungen, langfristige Umweltschäden usw. eine wesentliche Rolle. Es ist die Aufgabe des Auftraggebers, sich über diesen Fragenkomplex Klarheit zu schaffen, und durch eine Art Risikoanalyse zu entscheiden, wieviel ihm die Zuverlässigkeit wert ist.

Bevor die Funktion  $K(z)$  näher untersucht wird, soll noch kurz an einige statistische Grundbegriffe erinnert werden. Üblicherweise wird für die statistisch verteilten Ausfälle eine Exponentialverteilung angenommen. Diese Verteilung folgt aus der Annahme, dass die Anlage durch Unterhalt und Revision immer auf den gleichen Stand gehalten wird. D.h., die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage während  $(t_a + t_b)$  Zeiteinheiten oder länger ohne Ausfall funktionieren wird, unter der Annahme, sie habe schon  $t_b$  Zeiteinheiten ohne Ausfall hinter sich, ist von  $t_b$  unabhängig. Insbesondere ist sie gleich der Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage eine Zeitspanne  $t_a$  ohne Ausfälle durchstehen wird,

$$P[T > t_a + t_b \mid T > t_b] = P[T > t_a]$$

wobei  $T$  die Zeit zwischen zwei Ausfällen ist. Dann kann man zeigen, dass

$$P[T > t_a] = \exp(-\lambda t_a)$$

für irgendein  $\lambda > 0$  [2; 3]. Die Konstante  $\lambda$  wird als Ausfallrate bezeichnet, und der inverse Wert,  $1/\lambda$ , ist die «Mittlere Dauer zwischen Ausfällen», oder MTBF. Wenn eine Anlage eine MTBF von 10 Jahren hat, so bedeutet dies deshalb, dass innerhalb von 10 Jahren mit 37 % Sicherheit kein Ausfall auftreten wird. Möchte man eine 90 %ige Sicherheit, so muss die MTBF gleich 100 Jahre sein, und für eine 99 %ige Sicherheit müsste die MTBF 1000 Jahre betragen.

### 3. Die Funktion der Kosten

Die Zuverlässigkeit  $Z$  (also die MTBF) einer Anlage ist eine komplizierte Funktion von einer Vielzahl von Variablen  $x_i (i = 1, \dots, n)$ , die auch noch ganz verschiedener Natur sind. Als Variable werden Faktoren oder Gruppen von Faktoren betrachtet, die die Zuverlässigkeit beeinflussen, die sich von einander abgrenzen lassen, deren gegenseitige Beeinflussung definiert werden kann, und die durch irgendein Mass quantifiziert werden können. Als Beispiel sei eine einfache Notstromversorgung, bestehend aus Gleichrichter, Batterie und Wechselrichter, betrachtet. Eine Wahl der Variablen wäre:

- $x_1$ : MTBF des Gleichrichters
- $x_2$ : MTBF der Batterie
- $x_3$ : MTBF des Wechselrichters
- $x_4$ : Absenkung der Umgebungstemperatur durch Klimatisierung
- $x_5$ : Frequenz der periodischen Inspektion und Wartung

Für kompliziertere Anlagen muss man zuerst die allgemein gültigen Tatsachen herausschälen, dann Gruppen von Faktoren behandeln, und schlussendlich versuchen, die für jeden spezifischen Fall zutreffenden individuellen Faktoren zu quantifizieren.

Wird die Größe eines Faktors  $x_j$  variiert, während die anderen ( $n-1$ ) Faktoren festgehalten werden, so ergibt sich oft eine Kurve  $Z(x_j; \{n-1\})$ , wie die mit a in Fig. 2 bezeichnete. Sie entspricht dem Fall, wo der Faktor  $x_j$  als logisch in Serie mit der restlichen Anlage betrachtet werden kann, wie der Wechselrichter im obigen Beispiel. Die Ausfallrate der Anlage ist dann die Summe der Ausfallraten des Faktors  $x_j$  und der übrigen Anlage. Ist der Faktor  $x_j$  aber logisch parallel mit der übrigen Anlage oder einem Teil davon, wie es der Gleichrichter und die Batterie im obigen Beispiel sind, so ergibt sich die Kurve b [4; 5]. In beiden Fällen steigt die Zuverlässigkeit, solange der betrachtete Faktor gesteigert oder vermehrt wird. Es gibt aber auch Fälle, wo die Zuverlässigkeit ein Maximum erreicht, wie in den Kurven c und d dargestellt ist. Als ein Beispiel dafür dient die vorbeugende Wartung: Wird diese Wartung sehr häufig ausgeführt, so sinkt die Zuverlässigkeit als Folge von Frühausfällen und Fehlmanipulationen (das Problem ist als Optimum Maintenance Policy bekannt). Schliesslich gibt es auch Faktoren, die keinen direkten Einfluss

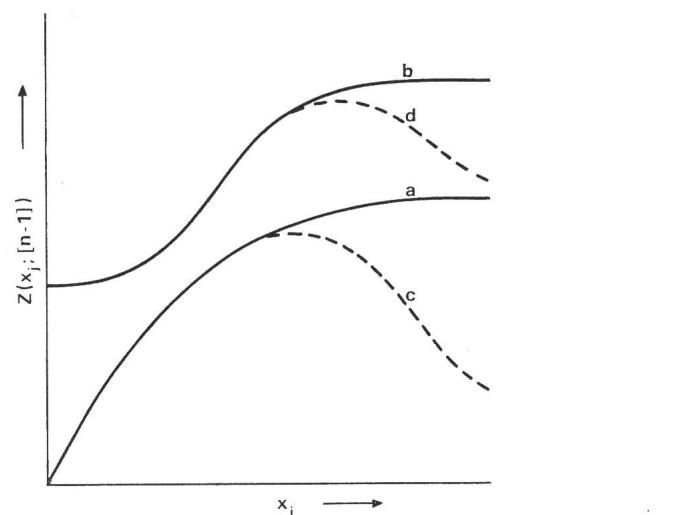


Fig. 2 Zuverlässigkeit in Funktion einer Variablen  $x_j$   
Die verschiedenen prinzipiellen Formen der Funktion  $Z(x_j; \{n-1\})$

auf  $Z$  haben, nur indirekt über andere Faktoren. Ein Beispiel dafür ist die Temperaturabsenkung im obigen Beispiel; sie erhöht  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$ .

Um einen bestimmten Wert des Faktors  $x_j$  zu realisieren, müssen gewisse Kosten  $K_j$ , aufgewendet werden. Die Höhe dieser Kosten wird nicht immer nur von  $x_j$  abhängen, sondern auch von den Werten der anderen ( $n - 1$ ) Faktoren, was durch die Schreibweise

$$K_j = K_j(x_j; \{n - 1\})$$

zum Ausdruck gebracht werden soll. Im Beispiel der Notstromversorgung kann ein bestimmter Wert der MTBF des Wechselrichters unter extremen Umgebungstemperaturbedingungen erreicht werden, indem man entweder einen sehr teuren Wechselrichter (MTL-Typ oder mit Redundanz) einsetzt, oder einen billigeren Wechselrichter verwendet, aber eine Klimaanlage installiert (also  $x_4$  erhöht). Die Funktionen  $K_j$  können als monoton zunehmend angenommen werden; meistens steigen die Kosten stark an, wenn man versucht,  $x_j$  über das handelsübliche Mass hinaus zu erhöhen. Durch Kombination der Funktionen  $Z(x_j; \{n - 1\})$  und  $K_j$  lässt sich die Zuverlässigkeit als Funktion der Kosten ausdrücken,  $Z = Z(K) = Z(K_1, \dots, K_n)$ .

Als Beispiel soll ein Fall betrachtet werden, wo die Zuverlässigkeit von zwei Faktoren abhängig ist, etwa von der MTBF der Komponenten, mit Kosten  $K_1$ , und von der Häufigkeit der vorbeugenden Wartung, mit Kosten  $K_2$ . Fig. 3 zeigt die Kurven konstanter Zuverlässigkeit in der  $(K_1, K_2)$ -Ebene. Die diagonalen Geraden sind die Kurven konstanter Gesamtkosten  $K = K_1 + K_2$ . Die Diagonale, die zu  $Z$  auch Tangente ist, entspricht den minimalen Kosten, mit denen eine bestimmte Zuverlässigkeit zu realisieren ist. Der Berührungs punkt gibt die entsprechenden Werte von  $K_1$  und  $K_2$  und damit von  $x_1$  und  $x_2$  an. Die Ortskurve aller Berührungs punkte entspricht der Funktion  $K(z)$ .

Wie schon erwähnt, wird eine zu häufige vorbeugende Wartung zu einer Abnahme der Zuverlässigkeit führen. Dies ist aus Fig. 3 ersichtlich, wenn man sich eine Gerade parallel zur  $K_2$ -Achse vorstellt und die Schnittpunkte mit den  $Z$ -Kurven betrachtet. Ferner sieht man, dass es sich nicht lohnt, bei kleinen Werten von  $K_1$  überhaupt eine vorbeugende Wartung einzuführen. Will man eine Zuverlässigkeitserhöhung in diesem Gebiet herbeiführen, so lohnt es sich, die zusätzlichen Mittel vollständig in bessere Komponenten zu investieren.

Wenn mehr als zwei Faktoren berücksichtigt werden, was meistens der Fall ist, ist es nicht mehr möglich, eine anschauliche Darstellung analog Fig. 3 zu erhalten. Die Funktion  $K(z)$  behält aber ihre gleiche Bedeutung bei, nämlich, als die zu jedem Wert der Zuverlässigkeit gehörenden minimalen Kosten,

$$K(z) = \min \left[ \sum_{i=1}^n K_i \right]_{Z=z} .$$

Nur in den seltensten Fällen wird die Funktion  $Z(K)$  bekannt sein. Man kann dann so vorgehen, dass man  $Z(K)$  als eine Summe und/oder ein Produkt von einfachen Basisfunktionen schreibt, die sich durch Variation von ein paar Parameter an die vorhandenen statistischen Daten anpassen lassen. Mit Hilfe dieser Parameter können auch die Verknüpfungen unter den Faktoren berücksichtigt werden. Die Funktion

$K(z)$  ist formell dadurch gegeben, dass man zu jedem Wert  $K$  das Maximum der Funktion  $Z(K)$  bestimmt, unter Erfüllung der Nebenbedingung

$$\sum_{i=1}^n K_i = K.$$

Mit

$$\Phi(K) = Z(K) + \alpha \left( \sum_{i=1}^n K_i - K \right)$$

bedeutet dies, dass man die Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{aligned} \partial \Phi / \partial K_i &= 0, \quad i = 1, \dots, n, \\ \partial \Phi / \partial \alpha &= 0 \end{aligned}$$

finden muss. In der Praxis wird man  $K(z)$  auf numerischem Weg, mit Hilfe eines Rechners bestimmen. Das entsprechende Programm ist nicht kompliziert, aber die Rechnerzeit ist proportional  $n^2$ . Eine andere Möglichkeit wäre, eine Vielzahl verschiedener Alternativen, Punkte im  $(x_1, \dots, x_n)$ -Raum, mit Hilfe einer Monte-Carlo-Methode zu berechnen und die optimale daraus zu wählen.

#### 4. Die Wahl einer zweckmässigen Menge von Faktoren

Die vorhergehenden Ausführungen mögen zuerst kompliziert erscheinen; wenn aber das Rechnerprogramm einmal erstellt ist und man ein wenig Erfahrung in der Festlegung der Parameterwerte hat, erfolgt die Bestimmung der Funktion  $K(z)$  mühelos. Und es geht ja nicht darum,  $K(z)$  mit grosser Genauigkeit zu bestimmen. Wichtig ist vor allem, dass man durch die numerische Analyse ein Gefühl dafür entwickelt, welche Faktoren eine wesentliche Rolle spielen und in welchem Gebiet der  $z$ -Achse sie eine wesentliche Rolle spielen.

Dazu ist es aber unerlässlich, dass man sich am Anfang der Analyse eine Liste von all jenen Faktoren macht, die irgendwie eine Rolle spielen können. Gerade in diesem Punkt wird oft gesündigt; insbesondere kann man immer wieder beobachten,

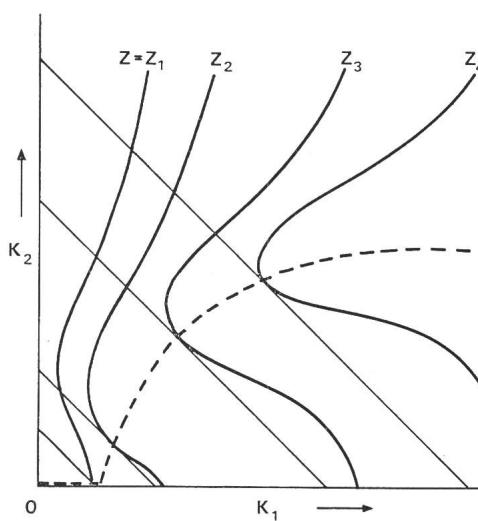


Fig. 3 Topologische Darstellung der Funktion  $Z(k)$  für einen Fall wo  $K$  zweidimensional ist

Die Diagonalen sind Kurven konstanter Kosten.  $Z_i$  bezeichnet Kurven konstanter Zuverlässigkeit, wobei  $Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4$ . Ihre Berührungs punkte liegen auf der gesuchten Kurve  $K(z)$ .

wie sog. Software-Faktoren oder System-Faktoren vernachlässigt werden. Auf vielen Gebieten sind Software-Bestandteile wie Systemanalyse, Ablaufprogramme, Personalausbildung und Industrial Design von grösster Wichtigkeit und werden z.T. ignoriert. So werden etwa Geräte eingekauft, ohne viele Gedanken über Wechselwirkungen, und wie sie zu einem System zusammengefügt werden sollen. Als Beispiel sei eine Notstromversorgung erwähnt, wo man, um so billig wie möglich einzukaufen, den Gleichrichter, den Wechselrichter, die Verteilungen und die Fernsteuerung je von einem anderen Lieferanten bezog und dabei gegenseitige Abhängigkeiten in der Überwachung und den Verbindungen übersah.

Die Anzahl der Faktoren wird davon abhängen, auf welcher Ebene die Analyse unternommen wird, d.h., mit welcher Feinheit die Zuverlässigkeit der Anlage beschrieben wird, und was man aus der Analyse herausholen will. In jedem Fall ist es empfehlenswert, zuerst gewisse Hauptgruppen von Faktoren zu betrachten und durch Verwendung einer Art Checkliste sich ein Bild von der Komplexität der Aufgabe zu schaffen. Dadurch wird einem auch klar, was für Daten beschafft werden müssen, um die Analyse durchführen zu können. Auf jedem Spezialgebiet wird man sich aus der Erfahrung eine optimale Gruppierung und Checkliste mit der Zeit aufstellen können.

#### 4.1 Systemaspekte

Die Systemaspekte zerfallen in zwei grosse Gruppen: Diejenigen, die von der Umgebung der Stromversorgung, also vom übrigen Teil der Anlage abhängig sind und diejenigen, die durch die internen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Geräten oder Komponenten der Stromversorgung bedingt sind. Als Beispiel für die erste Gruppe kann die Frage der Dezentralisierung dienen. Besteht die übrige Anlage aus mehreren ganz oder teilweise autonomen Teilen, so kann es sich lohnen, die Stromversorgung entsprechend funktionell und räumlich aufzuteilen. Dafür sprechen die kleinere Empfindlichkeit gegen Brand-, Wasser- und Explosionsschaden, die reduzierten Wirkungen einer Fehlbedienung und eventuell eine reduzierte Wirkung eines Defekts in der Stromversorgung selbst. Dagegen sprechen die höheren Kosten, da kleine Einheiten verhältnismässig teurer sind als grosse, die räumliche Beanspruchung grösser ist, und die Wartung der Batterien etwas aufwendiger ist.

Bei jeder Einflussgrösse muss man sich überlegen, wie wahrscheinlich sie ist. Es sei z.B. die Möglichkeit einer Fehlbedienung herausgegriffen. In einem Kraftwerk bleiben die Installationen während vieler Jahre ungeändert, die Bedienung der Stromversorgungsanlage ist auf ein Minimum reduziert, und dementsprechend ist auch die Wahrscheinlichkeit eines Bedienungsfehlers verschwindend klein. Auf der anderen Seite gibt es gewisse chemische Anlagen, wo Umstellungen recht häufig sind, die Stromversorgung ein- und ausgeschaltet wird, neue Verbraucher angehängt werden und die Verkabelung geändert wird. In diesem Fall tragen Bedienungsfehler wesentlich zu der gesamten Ausfallrate bei, typischerweise 50...75 %, und eine geeignete Dezentralisierung kann zu einer Verdopplung der Zuverlässigkeit führen.

In die zweite Gruppe gehört die On-line-Fehlerlokalisierung. Durch eine solche sofortige Fehlerlokalisierung lässt sich die effektive Reparaturzeit oft um einen Faktor 2...5 reduzieren, was zu einer entsprechenden Erhöhung der Zuverlässigkeit und/oder der Verfügbarkeit führt.

#### 4.2 Geräte und Komponenten

In diese Hauptgruppe fallen Faktoren wie die Anforderungen an die Bauteile, künstliche Alterung, um Frühausfälle zu vermeiden, und Abnahmeverordnungen. Als Beispiel sei die Abnahmeprüfung unter simulierten Betriebsbedingungen erwähnt. Je wirklichkeitsstreuer diese Prüfung gestaltet wird, um so teurer wird sie; sie kann 5...10 % der Auftragssumme ausmachen. Aber die Erfahrung zeigt, dass durch diese Prüfung oft Ausfallursachen entdeckt werden, die bei der Auslegung des Systems übersehen wurden.

#### 4.3 Ausbildung

Die Ausbildung des Bedienungs- und Servicepersonals beeinflusst die Wahrscheinlichkeit einer Fehlbedienung und die Reparaturzeit. Ein relativ bescheidener Aufwand, etwa 1...2 % der Auftragssumme, kann in vielen Fällen bis zu einem Viertel aller Ausfälle eliminieren.

#### 4.4 Unterhalt

Die Unterhaltsstrategie (maintenance policy) spielt eine ganz wesentliche Rolle für die Betriebssicherheit einer Anlage. Dazu gehören die Ersatzteil-Bewirtschaftung, der Bestand an Messgeräten und Prüfeinrichtungen, die Verfügbarkeit des Personals usw. Ein sehr einfaches Beispiel ist das Anbringen eines abschliessbaren Kastens mit Ersatzsicherungen in unmittelbarer Nähe der Stromversorgung, und das Erlassen einer schriftlichen Verordnung über die Anzahl der Sicherungen jeder Art, die vorhanden sein müssen, sowie über die Verantwortlichkeit. Der Aufwand ist minimal, aber es ist mehr als einmal vorgekommen, dass ein Gerät nach einem Ausfall nur deswegen nicht sofort wieder in Betrieb genommen werden konnte, weil Ersatzsicherungen fehlten.

#### 4.5 Dokumentation

Eine klar aufgebaute, auf die Bedürfnisse und Voraussetzungen des Lesers zugeschnittene Dokumentation ist eine wesentliche Bedingung für eine andauernde, hohe Betriebssicherheit. Dies wurde schon lange beim Militär realisiert, wo eine Menge Arbeit auf diesem Gebiet geleistet worden ist, wie z.B. das FOMM (Functionally Oriented Maintenance Manual)-Konzept, das im MIL-HDBK-242 dargestellt ist. Wie bei allen zuverlässigkeitserhöhenden Faktoren ergibt sich bei der Dokumentation natürlich auch eine Nutzen/Kosten-Kurve mit Sättigung, und der optimale Aufwand lässt sich nur in Verbindung mit den anderen Faktoren festlegen. Aber für Stromversorgungssysteme wird dieser Aufwand meistens im Bereich 5...15 % der Hardware-Kosten liegen, und sollte deshalb in einem Angebot als separater Posten ausgewiesen werden.

#### 4.6 Schlussfolgerung

Die Verknüpfungen zwischen den Faktoren sind zum Teil offensichtlich. Z.B. werden die anlagenspezifische Ausbildung und die ganze Dokumentation mit dem allgemeinen Ausbildungsniveau, die vorbeugende Wartung mit den Anforderungen an die Komponenten, der Reserveteile-Bestand mit den Lieferfristen des Herstellers usw. verbunden sein. Um hier mehr in Details zu gehen, bedarf es aber einen konkreten Fall. Und damit stösst man wieder auf den Kern dieser ganzen Darstellung: Es gibt kein universelles System, das für jede Anlage passt. Es gibt keine Geräte, die für jeden Einsatzfall optimal

sind. Ohne eine seriöse Systembearbeitung (system engineering) ist es ein reiner Zufall, wenn das Verhältnis von Zuverlässigkeit zu Kosten nicht wesentlich unter dem Optimum liegt.

#### Adresse des Autors

Erik W. Aslaksen, Aslaksen AG, 5430 Wettingen.

#### Literatur

- [1] E. W. Aslaksen: Zuverlässigkeit statischer Notstromanlagen. Bull. SEV/VSE 66(1975)8, S. 421...422.
- [2] E. Parzen: Modern probability theory and its applications. New York and London, Wiley, 1960.
- [3] G. S. Young: The linear functional equation. American Mathematical Monthly 65(1958)1, p. 37...38.
- [4] R. E. Barlow and F. Proschan: Statistical theory of reliability and life testing. Probability models. New York a. o., Holt, Rinehart and Winston, 1975.
- [5] R. Billinton, R. J. Ringlee and A. J. Wood: Power-system reliability calculations. Cambridge/Mass., MIT Press, 1973.

## Literatur – Bibliographie

DK: 681.32/33 : 681.34

SEV-Nr. A 673

**Elektronische Analog/Digital-Umsetzer.** Verfahren, Bauelement, Beispiele. Von Dieter Seitzer. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1977. Hochschultext. 8°, VII/143 S., 103 Fig. Preis: kart. DM 39.-.

Das Buch setzt sich mit dem heiklen Problem der A/D-Wandler auseinander und richtet sich vorwiegend an die Studenten an Hochschulen.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Mikroprozessoren, jedoch auch für digitale Nachrichtensysteme, werden A/D- und D/A-Wandler immer wichtiger in der Anwendung, so dass sich der Aufwand für eine solche Vorlesung rechtfertigt. Die systematische Darstellung des Zusammenspiels der wichtigen Parameter, wie Genauigkeit, Geschwindigkeit und Aufwand für solche Wandler entspricht denn auch dem Lehrziel dieses Buches.

Neben der guten Einführung in die verschiedenen Codier-, Zähl- und Umsetzer-Verfahren wird den elementaren, längst bekannten Transistor-Eigenschaften etwas zuviel Aufwand gewidmet. Dem Leser dürfte der Inhalt im mittleren Teil des Buches allzu weitschweifig vorkommen. Es schiene dem Rezensenten wichtiger, die Herleitung der A/D-Grundlagen noch besser zu zeigen, und sehr interessant wäre sicher die Berechnung und labormässige Realisierung von Schaltungen. Sehr gut sind dagegen die Literaturangaben und die Zusammenfassungen nach jedem Kapitel.

W. Linggi

DK: 62-52 : 62-82 : 621.3.024

SEV-Nr. S 18A/19

**Geregelte Gleichstromantriebe.** Einführung in die Praxis der Stromrichter- und Regelungstechnik. Von Jürgen Langhoff und Eckart Raatz. Berlin, Elitera-Verlag, 1977. – AEG-Telefunken-Handbücher Bd. 19 – 8°, 164 S., 218 Fig., 2 Tab. – Preis: gb. DM 38.-.

Dieses Buch ist vor allem als Einführung in das Gebiet der Gleichstromantriebstechnik gedacht, denn es setzt lediglich die Grundkenntnisse der Elektrotechnik voraus. Daneben kann es aber auch als Arbeitsmittel für in der Praxis tätige Ingenieure verwendet werden, wobei als Einschränkung hinzuzufügen ist, dass es nur Leuten etwas bietet, für welche der Stoff ein Randgebiet ihrer Tätigkeit ist.

Gut einen Drittel des Buches nimmt das Kapitel über Stromrichtertechnik ein. Die Autoren beschränken sich dabei auf Schaltungen, die in der Gleichstromantriebstechnik verwendet werden, also netzgeführte Stromrichter mit natürlicher Kommutierung (inkl. Antiparallel-Schaltungen). Nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise von Diode und Thyristor werden die einzelnen Schaltungen behandelt, wobei bewusst auf mathematische Beschreibungen verzichtet wird. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt über Leistungsdefinitionen; dieser ist etwas unglücklich ausgefallen, weil nur die Grundwellenleistungen berücksichtigt werden. Praktisch sind hingegen die Dimensionierungsregeln für die Schutzbeschaltung von Thyristoren am Schluss des Kapitels.

Nachdem das Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine kurz erläutert worden ist, werden die Verstärkerschaltungen mit Operationsverstärkern behandelt. Im Vergleich mit dem im

gleichen Verlag erschienenen Buch «Berechnung von Regelkreisen in der Antriebstechnik» gehen die Autoren dabei etwas tiefer. Im Kapitel über die Optimierung der Regelungen sind Begriffe wie Normierung, Blockschaltbild und Frequenzgang definiert, und anschliessend werden sie auch angewandt. Nach der Behandlung einiger Sonderprobleme und verschiedener Regelungsverfahren werden am Schluss des Buches noch praktische Hinweise zur Optimierung von Antriebsregelungen gegeben, die einem auf dem Gebiet wenig Vertrauten sehr nützlich sind.

Das Buch ist, vielleicht mit Ausnahme von Kapitel 2 (Stromrichtertechnik), klar gegliedert und allgemein sehr übersichtlich. Vor allem kann es als Hilfsmittel für den Lehrbetrieb empfohlen werden.

R. Gutzwiller

DK: 621.382.049

SEV-Nr. A 649

**Halbleiter-Schaltungstechnik.** Von U. Tietze und C. Schenk. Korrigierter Nachdruck der 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1976; 8°, XII/686 S., 889 Fig. Preis: Ln DM 98.-.

Bei der Darstellung und Erklärung elektronischer Halbleiter-Schaltungen können grundsätzlich zwei Wege beschritten werden. Man kann fertig dimensionierte Schaltungen mit einer qualitativen Beschreibung geben. Oder man kann mit Hilfe der Vierpoltheorie die Schaltung exakt durchrechnen. Sowohl die eine wie die andere Methode hat Nachteile. Im ersten Fall ist es schwierig, eine gegebene Schaltung den eigenen Bedingungen anzupassen, wenn nicht bekannt ist, aufgrund welcher Kriterien die Dimensionierung vorgenommen wurde. Im zweiten Fall erhält man komplizierte Formeln, mit denen nicht leicht umzugehen ist. Außerdem müssen für derartige Rechnungen die Daten der Halbleiter in der Regel viel genauer bekannt sein, als sie vom Hersteller normalerweise angegeben werden.

Die Autoren haben daher bewusst untergeordnete Effekte vernachlässigt und damit wesentliche Vereinfachungen der Formeln erreicht, ohne dass sich dadurch die numerischen Ergebnisse nennenswert verändern. Zur Stabilisierung der Schaltungen wurde grosses Gewicht auf Gegenkopplungen gelegt, denn Halbleiterbauelemente unterliegen nicht nur grossen Herstellungstoleranzen, auch die Temperaturabhängigkeit ist in vielen Fällen beträchtlich. Wirkungsweise und Schaltungstechnik der Gegenkopplung werden am idealen Operationsverstärker beschrieben, ohne auf dessen innere Schaltung einzugehen. Die sich dann an praktisch realisierbaren Operationsverstärkern ergebenden Änderungen werden einzeln besprochen. Die mit diesen Gesichtspunkten entwickelte Denkweise lässt sich auf viele Schaltungen anwenden und trägt sehr dazu bei, deren Funktionsweise besser überblicken zu können.

Den in letzter Zeit dank der starken Verbilligung integrierter Schaltungen immer interessanter gewordenen aktiven Filtern ist ein eigenes Kapitel gewidmet. Das Werk bietet Studierenden an Hoch- und Fachschulen, wie auch dem Praktiker eine ausgedehnte Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik. Dank dem Verzicht auf allzu komplizierte Formeln und mathematische Ableitungen ist es gut verständlich, ohne dass dadurch der Exaktheit unzulässiger Abbruch getan wird, und bringt eine Fülle von Anregungen und Ideen.

D. Kretz