

Zuverlässigkeit und Stromverbrauch

Impressum

<i>Bestellnummer</i>	724.328 d
<i>Herausgeber</i>	Bundesamt für Konjunkturfragen, Belpstrasse 53, 3003 Bern
<i>Geschäftsstelle</i>	RAVEL, c/o Amstein+Walthert AG, Leutschenbachstrasse 45, 8050 Zürich, Tel. 01 311 91 11, Fax 01 311 92 14
<i>Ressort</i>	RAVEL Ressort Prozesse in Dienstleistung und Gewerbe. Ressortleiter: Jean Marc Chuard, Enerconom AG, Hochfeldstrasse 34, 3012 Bern, Tel. 031 301 97 23, Fax 031 302 63 53
<i>Autor</i>	Othmar Humm, Fachjournalist Technik+Energie, Postfach, 8050 Zürich, Tel. 01 312 09 09, Fax 01 312 05 40
<i>Fachliche Begleitung</i>	Dr. Bernard Aebischer, Forschungsgruppe Energieanalysen, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Tel. 01 632 41 95, Fax 01 632 10 50
<i>Seitenherstellung</i>	Kurz & Ehrensperger, Tramstrasse 71, 8050 Zürich, Tel. 01 312 72 77, Fax 01 312 60 11
<i>Druck und Vertrieb</i>	EDMZ, 3000 Bern, Fax 031 322 39 75. Copyright: Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, Juni 1994. Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt.

Zu diesem Heft

Zuverlässigkeit ist eine der wesentlichen Eigenschaften technischer Geräte und Systeme. Zuverlässigkeit muss bereits im Konzept in das Gerät «hineinentwickelt» und die entsprechenden Anforderungen bei der Planung der Gesamtsysteme berücksichtigt werden. Grosse Zuverlässigkeit und hohe Verfügbarkeit ist mit Redundanz, Überdimensionierung oder flankierenden Massnahmen relativ einfach erreichbar: Je nach Konfiguration sind damit aber höhere Investitionskosten und – während der ganzen Lebensdauer des Systems – ein unverhältnismässig hoher Stromverbrauch programmiert. Der Stromverbrauch und die Investitionskosten für sekundäre Dienstleistungen, wie Klimatisierung, etc., wachsen mit der Anzahl zusätzlicher oder zu grosser Komponenten. Das Heft zeigt einfache Massnahmen zur Verringerung des Stromverbrauches auf, ohne gegebene Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu missachten.

Die Zuverlässigkeitstechnik ist eine verhältnismässig junge Disziplin: Sie entstand in den 50er Jahren in den USA, einige Jahre später fand diese Wissenschaft Vertreter in Europa. Trotz des geringen Alters verfügt die Zuverlässigkeitstechnik über einen ansehnlichen Bestand an Literatur. Leider neigt ein Grossteil dieser Schriften zur Überbetonung der mathematischen und analytischen Aspekte des Themas, mit dem Ergebnis, dass Planer und Konstrukteure Zuverlässigkeitstechnik als typisches «Hochschulthema» betrachten. Die Folgen sind verheerend: Weltweit werden technische Systeme mit falsch «dimensionierter» Zuverlässigkeit geplant und realisiert. Die Postulate der Wirtschaftlichkeit im allgemeinen und der rationellen Energieverwendung im speziellen kommen dabei zu kurz. RAVEL beteiligt sich auch hier an der dringend nötigen Umsetzungsarbeit: Zuverlässigkeit bedarf unbedingt eines Kosten-Nutzen-Designs.

Inhalt

1	7 wichtige Punkte für die Bauherrschaft	2
2	Begriffe	
	Zuverlässigkeitstechnik	4
	Energietechnik	8
3	Zuverlässigkeit und Stromverbrauch	
	Wege zur Verbesserung der Zuverlässigkeit	10
	Zuverlässigkeit und Redundanz	12
4	Postulate zur rationellen Verwendung von Strom	
	Postulat 1: Zuverlässigkeitskategorien schaffen	15
	Postulat 2: Aus- und Einschalten	15
	Postulat 3: Redundanzen «tief» legen	16
	Postulat 4: Systeme und Redundanzen modular aufbauen	16
	Postulat 5: Kalte statt heisse Redundanzen	17
	Postulat 6: Nebenwirkungen beachten	18
5	Checkliste	19
6	Beispiele	
	Rechenzentrum	20
	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	22
	Kassenanlagen	24
7	Weiterführende Informationen	27

7 wichtige Punkte für die Bauherrschaft

Punkt 1: Informieren

Verwenden Sie diese Broschüre, insbesondere die Liste der Postulate (Inhaltsverzeichnis) und die Checkliste (Abschnitt 5), als Info-Mittel für beteiligte Architekten, Planer und betriebliche Kader. Was den Zeitpunkt dieses Briefings betrifft: je früher, desto besser. Sie sparen Investitionskosten und Betriebskosten und Sie vereinfachen betriebliche Abläufe.

Punkt 2: Differenzieren

Definieren Sie die Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit für alle betrieblichen Funktionen getrennt. Schaffen Sie Zuverlässigkeitskategorien. Verbraucher oder Funktionen mit gleichen oder ähnlichen Zuverlässigkeitsanforderungen können allenfalls in Zonen oder Räumen zusammengefasst werden.

Punkt 3: Vergleichen

Verlangen Sie Vergleiche von Systemlösungen mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit und Stromverbrauch. Setzen Sie dem Grenznutzen die Grenzkosten gegenüber.

Punkt 4: Schalten

Legen Sie die zeitliche Abfolge der betrieblichen Funktionen fest. Die meisten Systeme und Geräte müssen nicht 7 Tage und 24 Stunden in Betrieb sein. Automatisieren Sie, wenn immer möglich, die dann notwendigen Schaltvorgänge (Ein, Aus).

Punkt 5: Ausgleichen

Achten Sie auf durchgehend hohe Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit (Homogenität). In einer Kette von Systemen oder Komponenten sind oftmals schwache Glieder eingebaut. Die Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit dieser Glieder bestimmen naturgemäss die Gesamtzuverlässigkeit. Denken Sie an den menschlichen Einfluss und hüten Sie sich, diesen zu unterschätzen.

Punkt 6: Anpassen

Pochen Sie auf modular aufgebaute Systeme, die aufgrund zukünftiger betrieblicher Änderungen angepasst werden können. Nicht nur die betrieblichen Aufgaben, sondern die Angebote auf dem Markt an Komponenten und Systemen unterliegen stetigen Modifikationen.

Punkt 7: Sparen

Fragen Sie nach den Kosten der Zuverlässigkeit, wenn möglich getrennt nach Investitions-, Energie- und Personalkosten. Suchen Sie Einsparmöglichkeiten und realisieren Sie diese.

2 Begriffe

Zuverlässigkeitstechnik

Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist das Mass für die Eigenschaft einer Einheit – Funktions- oder Konstruktionseinheit – während einer bestimmten Zeitspanne funktionstüchtig zu bleiben. Zuverlässigkeit ist also nichts anderes als die Wahrscheinlichkeit, dass das System (Einheit) durch keinen Ausfall beeinträchtigt wird. (Über den Ausfall redundanter Teile einer Einheit ist damit noch nichts gesagt.) Mit der Zuverlässigkeitsangabe sind gleichzeitig die geforderte Funktion, die Arbeitsbedingungen sowie die Dauer des Einsatzes zu definieren. Zuverlässigkeit wird mit Werten zwischen 0 und 1 quantifiziert.

Ausfall, Ausfallrate

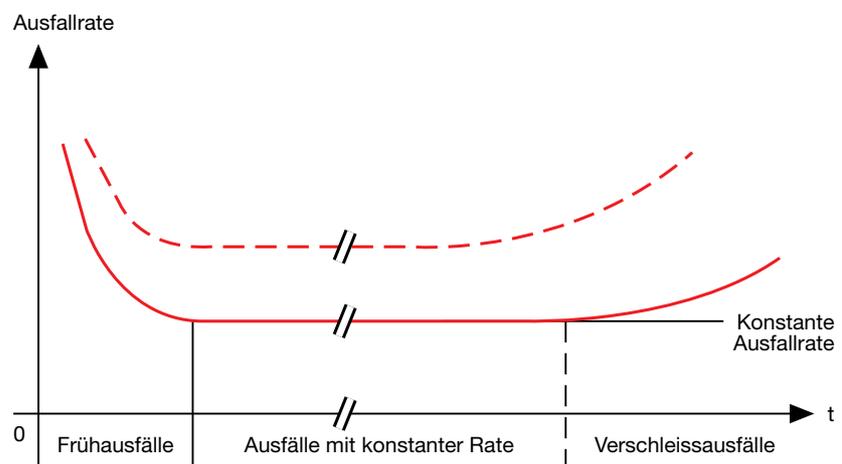
Erfüllt eine Einheit die geforderte Funktion nicht oder nicht mehr, ist von Ausfall die Rede. Häufig ist der Ausfall mit dem Einschalten des Gerätes oder des Systems gekoppelt; in diesen Fällen ist die Betriebszeit naturgemäss sehr kurz. Zudem gilt, dass Ausfälle an *fehlerfreien* Einheiten passieren, andernfalls fand der Ausfall vorher statt.

Mit Ausfallrate wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit der eine Einheit innerhalb der definierten Einsatzzeit ausfällt.

In der Praxis – beispielsweise bei elektronischen Geräten – werden schwache Einheiten durch Selektion ausgeschieden; in derartigen Fällen ist die Ausfallrate über die Einsatzdauer annähernd konstant. Zur Vereinfachung werden oft konstante Ausfallraten angenommen.

Die Ausfall-Analyse unterscheidet zwischen *Frühhausfällen*, *Ausfällen mit konstanter Rate* und *Verschleissausfällen*. Die Rate der Frühhausfälle nimmt nach dem Einschalten rasch ab. In der Phase der konstanten Ausfallrate treten die Ausfälle rein zufällig auf. Die Verschleissausfälle schliesslich haben mit zunehmender Einsatzdauer eine steigende Rate und sind auf Alterung und Abnutzung des Systems zurückzuführen. Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Ausfallrate zweier Belastungszustände.

Abbildung 1: Typischer Verlauf der Ausfallrate einer unendlich grossen Grundgesamtheit statistisch identischer Einheiten für zwei Betriebszustände. (Die obere Kurve zeigt die Ausfallrate von elektronischen Bauteilen bei erhöhter Belastung, beispielsweise aufgrund einer höheren Umgebungstemperatur.)
Quelle: (3)



Die Angabe, ein Bauteil weise eine konstante Ausfallrate von $10^{-6}/h$ aus, besagt, dass beim Betrieb eines Kollektives dieser Bauteile nach Ablauf einer Stunde im Mittel 1 Millionstel der betrachteten Bauteile ausgefallen sind. Ausfallraten dieser Grössenordnung liegen durchaus im Rahmen von Zuverlässigkeitsforderungen, die an viele Bauteile gestellt werden (müssen). Der experimentelle Nachweis derart niedriger Ausfallraten wirft prinzipielle Probleme auf, da er lange Prüfzeiten und eine grosse Anzahl von Prüflingen erfordert. Bei einer konstanten Ausfallrate von $10^{-6}/h$ ist zum Beispiel beim Test von 100 Prüflingen über 10 000 Stunden – also mehr als ein Jahr! – nur mit einem Ausfall zu rechnen. Dabei ist es durchaus nicht sicher, ob der Ausfall tatsächlich eintritt oder mehrere Prüflinge ausfallen.

Mean Time To Failure

Der Mittelwert der ausfallfreien Einsatzdauer oder Arbeitszeit ist eine wesentliche Grösse in der Zuverlässigkeitstheorie; die sogenannte Mean Time To Failure (MTTF) wird aus der Zuverlässigkeit abgeleitet oder berechnet. Bei konstanten Ausfallraten – wie in der Praxis häufig angenommen – gilt zudem: MTTF ist der reziproke Wert der Ausfallrate. Die Begriffe MTTF und MTBF (Mean Time Between Failures) sind eng verwandt (vergleiche «Mean Time To Repair»); in vereinfachten Betrachtungen werden MTBF und MTTF gleichgesetzt. Analog diesen Bezeichnungen werden Mittelwerte von Reparatur- und Wartungszeiten mit MTTR (Mean Time To Repair) oder MTTPM (Mean Time To Preventive Maintenance) bezeichnet.

Mean Time To Repair

Spricht man über Zuverlässigkeit, ist die Unterscheidung zwischen reparierbaren und nicht reparierbaren Produkten wichtig. Bei nicht reparierbaren Systemen (Beispiel: Glühbirne) entspricht die Zuverlässigkeit der Wahrscheinlichkeit, die erwartete Lebensdauer zu «erleben». Die mittlere Lebensdauer – bis zum ersten und einzigen Ausfall – entspricht der MTTF (Mean Time To Failure). Sie ist reziprok zur Ausfallrate. Reparierbare Systeme werden mit der MTBF (Mean Time Between Failures) beschrieben: Die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen. Da Reparaturen Zeit in Anspruch nehmen, muss auch die Verfügbarkeit reparierbarer Teile berücksichtigt werden. Sowohl Häufigkeit der Ausfälle (Ausfallrate) als auch Wartungsdauer (MTTR – Mean Time To Repair) haben Einfluss auf die Verfügbarkeit. Es gilt für den einfachsten Fall:

$$\text{Verfügbarkeit: } \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist ein Mass für die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt funktionstüchtig zu sein. Sie wird als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt. In der Praxis hat allerdings die *Nicht-Verfügbarkeit* (in Stunden pro Jahr) die grössere Bedeutung.

Redundanz

Mit Redundanz wird der Mehraufwand bezeichnet, der für die Funktion eines technischen Systems – einer Einheit – direkt nicht nötig ist. Das Einfügen von Redundanz in ein System ist, neben der Überdimensionierung, die gebräuchlichste Möglichkeit zur Erhöhung der Zuverlässigkeit; dies kann auf der Ebene der Bauelemente oder der Geräte bzw. Systeme erfolgen.

In der einfachsten Form lässt sich Redundanz durch zusätzliche Elemente erreichen, die die gleiche Funktion wie die betrachtete Einheit erfüllen. Im Blockdiagramm (Abbildung 2) sind redundante Elemente parallel geschaltet. Redundanz bedeutet nicht unbedingt eine Vervielfachung der Hardware; geeignete Kodierungen, Software oder Sequenzierungen erzeugen ebenfalls redundante Effekte. Falls redundante Elemente die geforderte Funktion nur teilweise erfüllen, handelt es sich um *Pseudoredundanz*.

Mit heisser Redundanz – auch: aktive oder parallele Redundanz – wird eine Struktur bezeichnet, in der das redundante Element gleich belastet ist wie das arbeitende.

Warme Redundanz oder leicht belastete Redundanz: Das Redundanzelement ist bis zum Ausfall des arbeitenden Elementes – oder bis zu seinem eigenen Ausfall – einer kleineren Belastung ausgesetzt.

Kalte Redundanz, Stand-by-Redundanz oder unbelastete Redundanz: Das Redundanzelement ist bis zum Ausfall des arbeitenden Elementes keiner Belastung ausgesetzt.

Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Das Blockdiagramm der Zuverlässigkeit eines Systems ist ein Ereignisdiagramm und beantwortet die Frage nach den notwendigen und den verzichtbaren Elementen zur Erfüllung einer Funktion der Betrachtungseinheit. Im Block erscheinen die notwendigen Elemente in Serie-, die verzichtbaren (redundanten) Elemente in Parallelschaltung. Die Reihenfolge seriell verbundener Elemente spielt naturgemäss keine Rolle. Für jedes Element kommen nur zwei alternative Zustände vor: gut oder ausgefallen. Zuverlässigkeitsdiagramme sind häufig mehrstufig, entsprechend dem Integrationsniveau. Abbildung 2 zeigt eine Abfolge derartiger Zuverlässigkeitsdiagramme.

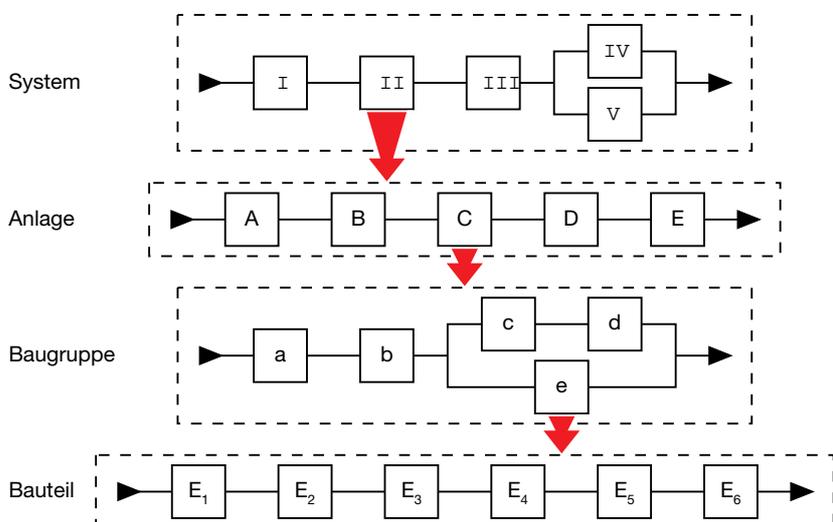


Abbildung 2: Mehrstufiges Zuverlässigkeitsdiagramm für System, Anlage, Baugruppe und Bauteil. Quelle: (3)

Beispiel: Einfacher Rundfunkempfänger

Der in Abbildung 3 dargestellte Rundfunkempfänger arbeitet ohne Redundanz; für den ungestörten Rundfunkempfang müssen alle Elemente funktionieren.

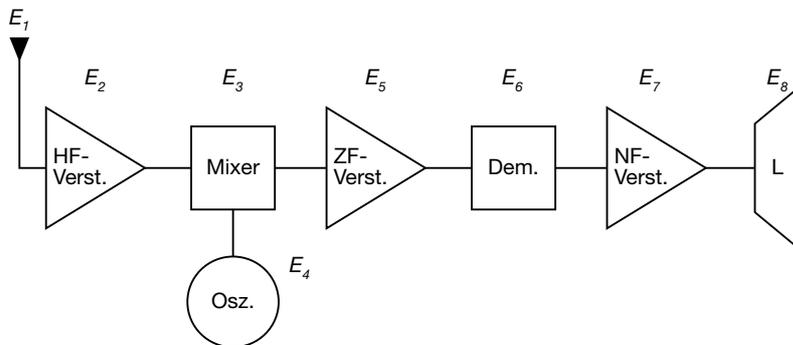


Abbildung 3: Schaltbild und Zuverlässigkeitsblockdiagramm eines Rundfunkempfängers ohne redundante Elemente.
Quelle: (3)

Beispiel: Elektronischer Schalter

Die beiden Transistoren E4 und E5 des elektronischen Schalters sind zueinander redundant (Abbildung 4), falls als Ausfallart ein Kurzschluss zwischen Emittter (E) und Kollektor (C) angenommen wird. Widerstände fallen in der Regel durch Unterbrechung aus.

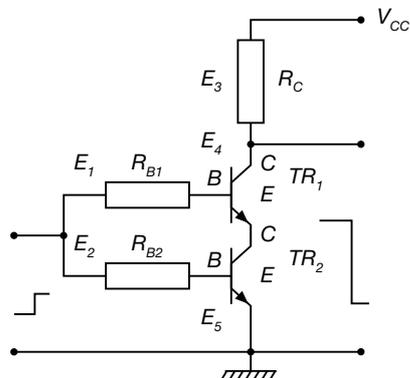


Abbildung 4: Schaltbild und Zuverlässigkeitsblockdiagramm eines elektronischen Schalters mit Redundanz.
Quelle: (3)

Energietechnik

Graue Energie

Neben dem direkten Stromverbrauch zum Betrieb von Geräten und Komponenten ist der «indirekte» Energieverbrauch für deren Herstellung zu beachten, die sogenannte graue Energie. Für viele Geräte ist die graue Energie grösser als dies allgemein vermutet wird. Eine umfassende Energiebilanz berücksichtigt die graue Energie, auch wenn oft nur Abschätzungen möglich sind. Eine Faustformel besagt, dass für jeden Franken an Investitionskosten mit 1 bis 2 kWh an grauer Energie gerechnet werden muss.

Betriebsarten

Es werden in der Regel sechs Betriebsarten unterschieden, die in ihrem Stromverbrauch stark differieren: Normalbetrieb, Redundanter Betrieb, Stand-by, Sleep-mode, Plug-in, AUS-Betrieb.

Stand-by

Zustand der Bereitschaft: Das Gerät ist eingeschaltet und betriebsbereit, arbeitet aber nicht und erbringt keine eigentliche Dienstleistung. Der Energieverbrauch im Stand-by ist je nach Gerät beträchtlich. Dies gilt insbesondere bei Geräten, die im Verhältnis zu den Arbeitszeiten lange Stand-by-Zeiten aufweisen.

Sleep-mode

Auch als Deep-sleep-mode, tiefer Stand-by, Schlaf- oder Sparmodus bezeichnet. Das Gerät ist ausgeschaltet, kann aber Signale empfangen und daraufhin den regulären Betriebszustand herstellen. Der Unterschied zum Stand-by-Zustand besteht nur in längeren Wartezeiten. Bei vielen Gerätetypen ist der Sleep-mode nicht möglich.

Plug-in

«Ausgeschaltetes» Gerät, dessen Netzstecker aber in der Steckdose steckt. Nicht immer ist der Energieverbrauch deswegen null, weil kleine Verbraucher noch aktiviert sind (zum Beispiel Netzfilter, allenfalls sogar Eingangstransformatoren, etc.).

USV

Unterbrechungsfreie Stromversorgung: Einrichtung zur Überbrückung von (kurzzeitigen) Ausfällen des Elektrizitätsversorgungsnetzes. USV-Anlagen haben eine besondere Bedeutung beim Betrieb empfindlicher Verbraucher, bei denen ein Stromausfall Schäden verursachen könnte, beispielsweise aufgrund von Prozessunterbrüchen, Arbeitsausfällen etc. Es wird grundsätzlich zwischen Online- und Offline-Anlagen unterschieden. Die Online-Anlage ist immer zwischen Netz und Verbraucher geschaltet (und wird damit vom ganzen Laststrom durchflossen), die Offline-Anlage wird erst bei Ausfall des Netzes zugeschaltet.

«Gemischte» Anlagen, die teilweise vom regulären Betriebsstrom durchflossen sind, gibt es in zahlreichen Varianten. Entsprechend ihrer Wärmeentwicklung werden die Anlagen auch als «heiss», «warm» oder «kalt» bezeichnet. Bei der energiesparenden Offline-Variante «Cold-Stand-by» ist nur die Steuerung ständig in Betrieb, um im Bedarfsfall die USV zu aktivieren.

Zur Typologie von USV-Anlagen. Quelle (7)

Bei Standard-Online-USV-Anlagen fließt Strom im Normalbetrieb über Gleich- und Wechselrichter zum Verbraucher. Die Energieverluste hängen vom Wirkungsgrad dieser Komponenten ab. In Abbildung 8 ist eine Online-USV-Anlage dargestellt.

In reversiblen Online-USV-Anlagen fließt Strom im Normalbetrieb über die Drossel und den Ausgangstransformator zum Verbraucher. Die Verluste sind im Nennbetrieb kleiner als bei Online-Anlagen, hängen aber stärker von den Betriebsbedingungen ab.

Bei Offline-USV-Anlagen fließt Energie im Normalbetrieb über den statischen Schalter und allenfalls über den Ausgangstransformator zum Verbraucher. Bei Netzverhältnissen, die für die Verbraucher kritisch sein können, wird der betriebsbereite Wechselrichter aufgestartet. Die Verbraucher werden innerhalb von 3 ms (auch bei Netz-Kurzschluss) mit Energie aus der Batterie versorgt. Diese Anlagen haben die kleinsten Energieverluste. Offline-Anlagen sind allerdings bislang nur für kleine und mittlere Leistungen erhältlich. Qualitativ gute, reine Offline-Anlagen gibt es bis ca. 5 kVA.

Online-Anlagen im Offline-Betrieb: Je nach Verbraucher kann die Anforderung an die USV-Anlage über verschiedene Betriebszeiten schwanken. So existieren Anwendungen, die nur während den Arbeitszeiten auf eine USV-Anlage angewiesen sind und in den Zwischenzeiten ohne USV-Versorgung laufen. Für diese Anwendungsfälle existieren Online-USV-Anlagen, die auf einen Offline-Betrieb umschaltbar sind (automatische Leerlaufabschaltung), respektive auf Offline-Betrieb (Cold-Stand-by) programmierbar sind.

USV-Anlage im AUS-Betrieb: In vielen Fällen lässt sich die USV-Anlage ohne Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit mittels Relais vom Netz trennen. Ein mögliches Schaltregime lautet wie folgt: Die USV-Anlage ist werktags von 19 bis 6 Uhr, und am Wochenende rund um die Uhr auf AUS geschaltet. Der Verbraucher, beispielsweise eine Servergruppe, ist dauernd in Betrieb.

3 Zuverlässigkeit und Stromverbrauch

Wege zur Verbesserung der Zuverlässigkeit

Es gibt grundsätzlich drei Möglichkeiten, mit technischen Mitteln die Zuverlässigkeit eines Systems oder einer Komponente zu verbessern: *Überdimensionierung*, *Redundanzen* und *flankierende Massnahmen* (Tabelle 1). Alle drei Wege sind mit höheren Investitions- und Betriebskosten verbunden, wobei letztere sich aus Energie- und teilweise Wartungskosten zusammensetzen.

Tabelle 1: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Grad der möglichen Beeinflussung: xxx grosser, xx mittlerer, x geringer Einfluss.

	Gerätehersteller	Planer	Betreiber
Überdimensionierung:			
Komponenten	xxx	x	x
Anlagen	x	xxx	xx
Redundanzen			
	xxx	xxx	x
Flankierende Massnahmen			
	x	xxx	xxx

Durch Überdimensionierung sinkt die Belastung des einzelnen Bauteiles, was eine Erhöhung der Zuverlässigkeit zur Folge hat. Augenfällig ist dieser Zusammenhang bei Temperaturschwankungen infolge Änderung der Belastung oder der Betriebsart.

Redundanzen haben auf die Zuverlässigkeit eines Systems oder Bauteiles ebenfalls eine positive Wirkung. Je nach Art der Redundanz kann der Ausfall eines Elementes ohne oder mit nur geringer Beeinträchtigung des Betriebes überbrückt werden.

Durch flankierende Massnahmen und ergänzende Installationen oder Einrichtungen kann die Zuverlässigkeit von technischen Systemen ebenfalls günstig beeinflusst werden. Typische Einrichtungen dieser Art sind unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen (USV), Klimaanlage, Backups, etc.

Nichttechnische Lösungen sind oftmals billiger

Als Alternative oder Ergänzung technischer Massnahmen steht dem Betreiber, Gerätehersteller oder Planer eine ganze Palette von personellen und organisatorischen Möglichkeiten offen. Als Beispiele seien erwähnt: Ausbildung des Personals und Änderung des Arbeitsablaufes.

Die erwähnten technischen Massnahmen sind nicht immer der kostengünstigste Weg zur Verbesserung der Zuverlässigkeit. Entsprechende Abklärungen – vorteilhafterweise in Form einer Zuverlässigkeitsanalyse – sind insbesondere dort angezeigt, wo Systeme dauernd oder periodisch von Menschen bedient oder beeinflusst werden. Verschiedene Erhebungen zeigen, dass Ausfälle von Systemen zum grössten Teil auf «menschliches Versagen» zurückzuführen sind. Technische Massnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit haben deshalb vielfach nicht die erhoffte Wirkung.

Der menschliche Einfluss

Erst 1958 erkannte der Amerikaner H. L. William als einer der ersten, dass «die Zuverlässigkeit des menschlichen Elementes in die Vorhersage der Systemzuverlässigkeit integriert werden muss, da sonst die vorberechnete Zuverlässigkeit des Systems kein korrektes Bild abgeben kann». Quelle (2). In der Folge von Williams Aufsatz wurde der menschliche Einfluss auf die (Un-) Zuverlässigkeit quantifiziert. Auch die Gründe menschlichen Fehlverhaltens wurden in den sechziger Jahren erforscht. Als wichtigster Grund wurde – und wird – Stress in seinen verschiedenen Formen genannt. Die Intensität des Stresses wird mit der Stressrate beschrieben. Neben Stress ist Unkenntnis ein wesentlicher Beeinflussungsfaktor der Zuverlässigkeit.

Tätigkeit	Wahrscheinlichkeit menschlichen Fehlverhaltens
Ablesen eines grafischen Aufzeichnungsgerätes	0,006
Ablesen eines Analogmessgerätes	0,003
Lesen von Diagrammen	0,01
Unkorrektes Interpretieren von Anzeigelampen	0,001
Unter hohem Stress in der falschen Richtung korrigieren	0,5
Eine Verbindungsklemme setzen	0,01

Tabelle 2: Schätzwerte für die Wahrscheinlichkeit menschlichen Fehlverhaltens bei ausgewählten Tätigkeiten. Ohne Kenntnis der Rahmenbedingungen sind die aufgeführten Daten selbstverständlich nicht übertragbar. Quelle (2).

Overtooled

In vielen Betrieben sind Einrichtungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit ohne Rücksicht auf die hohe Verfügbarkeit der benutzten Dienste in Betrieb. Der unverhältnismässig grosse Aufwand ist besonders offensichtlich bei Vorkehrungen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung als Alternative zu einem Netz, das über eine eigene hohe Zuverlässigkeit verfügt. Statistiken über die Verfügbarkeit öffentlicher Versorgungsnetze sind nur spärlich vorhanden, dafür ist die Unsicherheit diesbezüglich umso grösser. Vielfach wird dieser Mangel an Kenntnissen mit zusätzlichen Geräten oder Installationen kompensiert. Derartige Aufwendungen sind teilweise von der Sache her nicht zu begründen und sind volks- und betriebswirtschaftlich wenig sinnvoll. Forderung: Das Verhältnis von Zuverlässigkeit und Kosten von Netz und USV-Anlagen ist unter allen Umständen koordiniert zu optimieren.

Anlagen	89	90	91	92	93
Übertragung 220/150/50kV					
Kurzschluss Nachbarnetze	34	76	54	63	54
Kurzschluss EWZ-Netz	19	16	24	28	14
Ausfall Unterwerk Sammelschiene	4	3	4	3	4
Verteilung					
11/22 kV	8	10	5	12	7
500 V	1	3	3	4	0
230/400V	49	66	67	38	50
Total Verteilung	58	79	75	54	57

Tabelle 3: Störungen im Netz der Elektrizitätswerke der Stadt Zürich 1989 bis 1993. Quelle: EWZ

Störungsfrequenz sinkt mit steigendem Spannungsniveau

Die Tabelle 3 zeigt, dass Störungs- und Schadenfälle in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen selten sind. Weitergehende Statistiken belegen zudem, dass die Störungen mit steigendem Spannungsniveau abnehmen. Dieser Zusammenhang hat für all jene Einrichtungen eine Bedeutung, deren empfindliche Verbraucher insgesamt oder teilweise aus Mittelspannungsnetzen direkt versorgt werden.

Investitionskosten senken durch Energieoptimierung

Energieeinsparungen allein haben meist zu wenig Gewicht, um betriebliche und technische Konzepte grundsätzlich zu überdenken und zu modifizieren. Eine mögliche Senkung der Investitionskosten ist dagegen ein starkes Argument. Einer der Gründe liegt in der stetigen Anpassung eines Unternehmens an sich ändernde externe Bedingungen. Lange Pay-back-Zeiten passen aber schlecht zu einer hohen betrieblichen Änderungsrate. Auch der Abzinsungsmechanismus (Diskontierung) wirkt in die gleiche Richtung: Ein Franken heute ist mehr wert als ein Franken morgen. Investitionskosten haben aus den genannten Gründen im Vergleich zu den Betriebskosten im Unternehmerentscheid ein ungleich stärkeres Gewicht. (Unter Diskontierung wird die Verminderung eines zukünftigen Kapitalbetrages um Zinsen verstanden, die von der Gegenwart bis zur Zahlung des Betrages berechnet werden. Der Zinssatz wird als Abzinsungs- oder Diskontierungsfaktor bezeichnet.) Diesen Sachverhalt gilt es bei der Planung von Komponenten und Systemen zu berücksichtigen.

Zuverlässigkeit und Redundanz

Viele Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit von Geräten und Systemen sind ohne Redundanz schlechterdings nicht erfüllbar. Im folgenden ist für einige häufige redundante Strukturen der Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Energieverbrauch dargestellt.

Redundanz

Mit heisser Redundanz – auch: aktive oder parallele Redundanz – wird eine Struktur bezeichnet, in der das redundante Element gleich belastet ist wie das arbeitende. Es handelt sich in der einfachsten Form um zwei gleiche, parallel geschaltete Elemente. Die Ausfallrate des Reserveelementes ist naturgemäss gleich derjenigen des Arbeitselementes.

Warme Redundanz oder leicht belastete Redundanz: Das Redundanzelement ist bis zum Ausfall des arbeitenden Elementes – oder bis zu seinem eigenen Ausfall – einer kleineren Belastung ausgesetzt. Die Ausfallrate im Reservezustand ist kleiner als die Ausfallrate im Arbeitszustand.

Kalte Redundanz, Stand-by-Redundanz oder unbelastete Redundanz: Das Redundanzelement ist bis zum Ausfall des arbeitenden Elementes keiner Belastung ausgesetzt. Die Ausfallrate im Reservezustand wird gleich null gesetzt.

Beispiel: Parallelmodelle

Ein Parallelmodell besteht aus n Elementen, die aus Gründen der Zuverlässigkeit parallel geschaltet sind. Für die Erfüllung der geforderten Funktion sind k Elemente notwendig, $n - k$ Elemente bilden demzufolge die Reserve. Eine derartige Struktur heisst *Redundanz k aus n* . Bei einem speziellen Fall geht es um die heisse Redundanz *1 aus 2*. Die Gesamtzuverlässigkeit dieser Struktur ist die *Differenz aus Summe und Produkt* der beiden Teilzuverlässigkeitsfunktionen. (Oder: Die Gesamtzuverlässigkeit ist die Summe der Zuverlässigkeit der beiden Einzelemente, vermindert um die Wahrscheinlichkeit, dass beide Elemente gleichzeitig nicht funktionieren.) Die MTTF bzw. die MTBF eines nicht reparierbaren Systems bezieht sich auf das Anderthalbfache der MTBF der einzelnen Elemente – ein insgesamt erstaunlich kleiner Gewinn an Zuverlässigkeit. Dazu zwei Ergänzungen:

1. In derartigen parallelen Schaltungen mit heissen Redundanzen ist die Zuverlässigkeit naturgemäss grösser, wenn Reparaturen ohne Betriebsunterbrechungen erlaubt sind (reparierbare Systeme).
2. Für kurze Einsatzzeiten – das heisst, die Mission ist sehr viel kürzer als die mittlere ausfallfreie Arbeitszeit – ist der Zuverlässigkeitsgewinn auch im nicht reparierbaren Fall gross.

Struktur	MTTF des Systems (Zuverlässigkeit)
1 aus 2	1,5 MTTF des einzelnen Elementes
1 aus 3	1,83 MTTF des einzelnen Elementes
2 aus 3	0,83 MTTF des einzelnen Elementes

Tabelle 4: Mittlere ausfallfreie Arbeitszeiten (MTTF) als Mass der Zuverlässigkeit dreier unterschiedlicher heisser Redundanzen eines nicht reparierbaren Systems.

Gemischte Serie-Parallel-Strukturen lassen sich sukzessive auf Serie- und Parallel-Strukturen reduzieren. Am Beispiel von Variante 5 der Tabelle auf Seite 21 ist das schrittweise Vorgehen nachfolgend dargestellt.

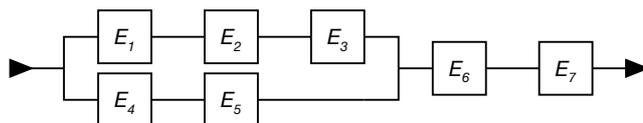
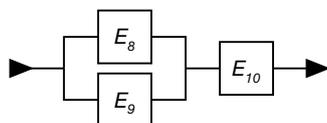
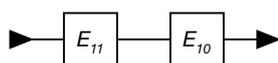


Abbildung 5: Schrittweise Reduktion einer gemischten Serie-Parallel-Struktur (Beispiel).

1. Schritt: Die Serieschaltungen von E1, E2 und E3 sowie von E4 und E5 sowie von E6 und E7 werden durch E8, E9 oder E10 ersetzt.



2. Schritt: Anstelle der parallelen Elemente E8 und E9 wird E11 gesetzt.



3. Schritt: Die Zuverlässigkeitsfunktion der seriellen Struktur ist jetzt durch Multiplikation der Zuverlässigkeitswerte der Elemente zu berechnen.

Naturgemäss bringen kalte Redundanzen den grösseren Zuwachs an Zuverlässigkeit als heisse. Am Beispiel der erwähnten 1-aus-2-Redundanz präsentiert sich die Rechnung gemäss Tabelle 5.

Tabelle 5: Vergleich der mittleren ausfallfreien Arbeitszeiten von Systemen mit heisser und kalter Redundanz, am Beispiel der 1-aus-2-Redundanz. Bei reparierbaren Systemen hängt die mittlere ausfallfreie Arbeitszeit naturgemäss von der mittleren Reparaturzeit ab. Die Grösse α berücksichtigt diese mittlere Reparaturzeit; α ist viel grösser als 1.

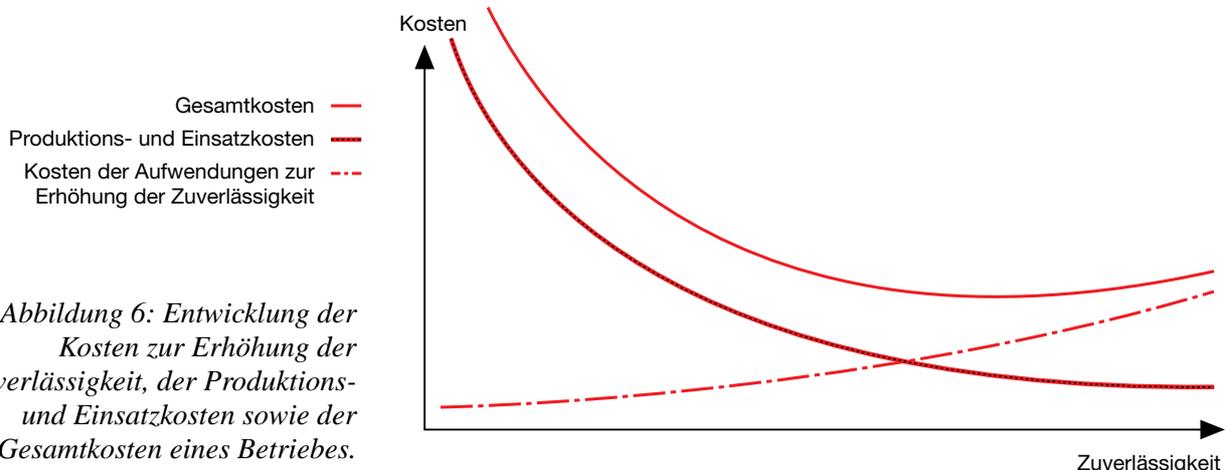
	Mittlere ausfallfreie Arbeitszeit von Systemen: nicht reparierbare	reparierbare
Einzelelement	100 %	100 %
Heisse Redundanz 1 aus 2	150 %	50 % α
Kalte Redundanz 1 aus 2	200 %	100 % α
Unterschied kalter zu heisser Redundanz	33 %	100 %

Zuverlässigkeit und Redundanz versus Energieverbrauch und Kosten

Die Vorteile in bezug auf die Zuverlässigkeit korrelieren mit der Bilanz des Energieverbrauches: Heisse Redundanzen brauchen in der Regel gleich viel Strom wie das Arbeitselement; für kalte oder warme Redundanzen ist allenfalls der Stand-by-Verbrauch aufzubringen. Zu diesem Vergleich müssten die Energieaufwendungen für die Klimatisierung – beispielsweise von Computerräumen – noch addiert werden. (Faustregel: Die Klimaanlage braucht ebensoviel Strom wie die EDV-Anlage!)

Kosten

Die Kosten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit bzw. der Verfügbarkeit sind verhältnismässig einfach zu bestimmen. Sie setzen sich in der Regel aus Kapital-, Energie- und Wartungskosten zusammen. Schwieriger ist die Quantifizierung des Nutzens, weil mögliche Schäden aufgrund verminderter Zuverlässigkeit in ihrer Grösse oft nur abgeschätzt werden können. Noch schwieriger ist eine Aussage darüber zu machen, wie sich eine bestimmte Massnahme quantitativ auf die Zuverlässigkeit auswirkt (Grenznutzen). Völlig unzulässig ist beispielsweise die «Hochrechnung» des Zuverlässigkeitszuwachses auf das ganze System aufgrund einer technischen Massnahme an einem einzelnen Teil. Besonders zu beachten sind menschliche sowie allgemein betriebliche Einflüsse. Abbildung 6 zeigt eine typische Kostenentwicklung in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit.



4 Postulate zur rationellen Verwendung von Strom

Postulat 1:

Zuverlässigkeitskategorien schaffen

Eines der wichtigsten Postulate ist die Schaffung von Zuverlässigkeitskategorien. Erst danach sind allfällig notwendige Massnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit bzw. zur Reduktion des Energieverbrauches vorzusehen. Höchste Ansprüche an die Zuverlässigkeit stellen nur ganz wenige Bereiche unseres Lebens (Flugzeuge, Kernkraftwerke, Medizin). Für zentrale Dienstleistungen und Anlagen in grossen Verwaltungssystemen wie Banken, Kommunen, etc. sind in der Regel ebenfalls hohe Ansprüche an die Zuverlässigkeit massgebend. Gerade hier wird aber offenbar, was das Denken in Zuverlässigkeitskategorien bringen kann: Von grossen EDV-Systemen ist meist nur der kleinste Teil, in der Regel der Server, hochempfindlich gegenüber Netzstörungen. (Die Daten dürfen keinesfalls verloren gehen!) Periphere Geräte – Terminals und vor allem Drucker – gehören ohne Zweifel in eine tiefere Zuverlässigkeitskategorie, für die keinerlei Massnahmen notwendig sind. Andere Geräte in Büro, Gewerbe, Haushalt und Industrie sind als Einzelgeräte genügend zuverlässig, beziehungsweise verursachen bei einem Ausfall nur geringen Schaden.

Den Bestrebungen nach Kategorisierung steht in vielen Fällen die Kostenminimierung bei der Installation entgegen: Nach Kategorien getrennte Stromversorgungen können einen zusätzlichen Aufwand in der Planung, beim Bau und im Unterhalt der verschiedenen Netze bedeuten. Durch Konzentration der Bereiche mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen auf einem Stockwerk oder in einem Gebäudeteil lassen sich aber auch hier vertretbare Lösungen finden.

Die Einstufung in eine bestimmte Kategorie sollte, wenn immer möglich, zeitlich differenziert erfolgen. Denn nicht das Gerät an sich, sondern die damit zu erbringende Dienstleistung bestimmt die Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit. Deshalb darf der eigentliche Arbeitseinsatz nicht die Leitgrösse der Zuverlässigkeitsanforderungen in Warte- und Ruhezeiten (Stand-by) sein.

Beispiel: Die USV-Anlage einer Servergruppe kann nachts und am Wochenende ohne Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit ausgeschaltet werden.

Postulat 2: Aus- und Einschalten

Ausschalten ist zweifelsohne die einfachste Massnahme zur Einsparung von Energie. Diese Massnahme hat – entgegen allfälliger Vermutungen – keinen relevanten Einfluss auf die Lebensdauer und die Funktionstüchtigkeit von Geräten und Anlagen. Dies geht aus einer Untersuchung hervor, die an der Eidgenössischen Technischen Hoch-

schule (ETH) in Zürich an fünf verschiedenen Gerätetypen gemacht wurde. Quelle (6). Beispiel: Bei 5 Ein-Aus-Schaltungen pro Tag steigt die Häufigkeit der Defekte an einem PC-Monitor erst nach 20 bis 30 Betriebsjahren, und erst nach 20 000 Schaltzyklen – was 20 Betriebsjahren entspricht – lässt die Emissionsstärke der Kathoden nach. Die übrigen Bauteile sind vom Ein- oder Ausschalten nicht betroffen. Die Wissenschaftler an der ETH haben die kritische Einschaltdauer errechnet: Sie beträgt für PC-Monitore 15 Minuten. Es lohnt sich also, vor Arbeitspausen, die länger als 15 Minuten dauern, den Monitor auszuschalten. Die Ergebnisse an den getesteten Monitoren können – auch das ein Resultat der Untersuchung – mit gewissen Einschränkungen für alle elektronischen Geräte verallgemeinert werden. Leider erschweren viele handelsübliche Gerätekonzeptionen häufiges Ein- und Ausschalten, weil der Bedienungskomfort ungenügend ist.

Mit einem automatischen Power Management kann der Schaltaufwand begrenzt werden. Eine elektronische Schaltung setzt automatisch oder aufgrund eines fallweise ändernden Befehles das Arbeitsgerät ausser Betrieb bzw. schaltet das Gerät ein. Diese Technik ist insbesondere dort sinnvoll, wo eine höhere Zuverlässigkeit nur zeitweise gefordert ist und sich die Geräte in der übrigen Zeit im Stand-by oder Sleep-mode befinden bzw. ausgeschaltet sind. Power Management schaltet Geräte sanfter, mit weniger Strom- und Spannungsspitzen, ein.

Postulat 3: Redundanzen «tief» legen

Um eine geforderte Zuverlässigkeit zu erreichen, bleibt dem Anwender oft nur die Verdoppelung oder Verdreifachung von Komponenten oder ganzen Anlagen. Besonders drastisch zeigt sich dies am Beispiel von Grossrechenanlagen, die einerseits zueinander redundante Rechner und andererseits die notwendigen Kälteanlagen umfassen. Dagegen kann der Hersteller Redundanz auf der Ebene der Module oder sogar von Einzelteilen herstellen, was den Energieverbrauch sehr stark reduziert. Bei vielen Rechenanlagen würde es genügen, die eigentlichen Datenspeicher (Server) doppelt auszulegen und zu betreiben.

Dieses Postulat richtet sich vor allem an die Entwicklungsabteilungen der Gerätehersteller. Die Planer und Betreiber, also die Abnehmer der Geräte, lösen ihrerseits durch eine entsprechende Nachfrage nach Systemen mit Redundanzen auf tiefem Niveau energiesparende Lösungen aus.

Postulat 4: Systeme und Redundanzen modular aufbauen

Komponenten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sind, wie die Arbeitseinheiten selbst, in ihren Leistungen und Kapazitäten oft wenig flexibel. Die Folge davon sind teilbelastete Systeme, die mit einem schlechten Wirkungsgrad arbeiten. Denn weder die mittel- und langfristigen Veränderungen noch die täglichen und wöchentlichen Belastungen von technischen Systemen sind für den Planer vorhersehbar. Erfahrungen

zeigen diesbezüglich ein deutliches Bild: Zwischen *Soll* und *Ist*, zwischen *geplant* und *tatsächlich in Betrieb* sind grosse Diskrepanzen feststellbar. Zudem ändern sich die installierten elektrischen Leistungen bei Geräten von Generation zu Generation.

Modular aufgebaute Systeme sind dagegen wesentlich anpassungsfähiger, was sich auf den Stromverbrauch vorteilhaft auswirkt. Die Vorteile des modularen Aufbaus gelten für Redundanzen und für USV-Anlagen ganz besonders. Dieses Postulat erfüllen einige Hersteller bereits, entsprechende Angebote sind auf dem Markt erhältlich.

Postulat 5: Kalte statt heisse Redundanzen

Kalte Redundanzen sind heissen bezüglich Energieverbrauch und Zuverlässigkeit überlegen. Trotzdem können kalte Redundanzen überall dort nicht eingesetzt werden, wo eine Dienstleistung bei Ausfall des Arbeitsgerätes ohne Unterbruch erfüllt werden muss. Dazu zählen in erster Linie gewisse Computeranwendungen; bei zentralen Anlagen sind voll in Betrieb stehende, redundante Geräte je nach Konfiguration notwendig.

Für die dezentrale Datenspeicherung bei kleinen und mittleren EDV-Geräten erübrigen sich heisse Redundanzen; das Verhältnis von Energieaufwand und möglichem Schaden rechtfertigt keine derartigen Betriebsweisen. Zudem ist meist eine kalte Redundanz in Form eines Zweitgerätes disponibel. Regelmässige Backups reduzieren allfällige Schadenfolgen.

In Systemen, in denen redundante Einheiten notwendigerweise gleichzeitig arbeiten, sind die Betriebszeiten nach Möglichkeit zu begrenzen. Mittels elektronischen Schaltern lassen sich energiesparende Schaltregimes automatisieren.

Die zur Verfügung stehende Zeit beim Wechsel vom aktuellen Arbeitselement auf ein disponibles kaltes oder warmes Redundanzelement ist ausschlaggebend beim Ersatz von heissen Ersatzgeräten. Grundsätzlich sind dazu zwei Bauteile notwendig: Ein Detektor oder Fühler zur Feststellung des Ausfalles des Arbeitselementes sowie ein Schalter (Umschalter), der das Ersatzelement aktiviert. Je nach Konfiguration dauert es nach einem Ausfall einige Millisekunden bis Minuten, bis das Ersatzelement voll betriebsfähig ist.

Beispiel: USV-Anlagen unter 5 kVA können kalt (Offline) betrieben werden, da die Umschaltung sehr schnell (unter 5 ms) möglich ist. Für die Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass auch grössere Anlagen kalt betrieben werden können. Kurze Umschaltzeiten sind besonders in bezug auf Wechselstromrelais gefordert. Diese selbsthaltenden Relais fallen bei Unterbrüchen von mehr als 5 ms häufig ab.

Postulat 6: Nebenwirkungen beachten

Kleinere Systeme und weniger Geräte haben nicht nur einen geringeren Stromverbrauch zur Folge. Die Kosten für Investitionen und Räume, für Unterhalt und Wartung sinken ebenfalls. In vielen Fällen korreliert ein niedriger Energieverbrauch mit einem einfacheren Arbeitsablauf, was allfällige Aufwendungen mehr als aufwiegt. Interessant ist auch der Zusammenhang zwischen höherer Zuverlässigkeit bei gleichzeitig reduziertem Stromverbrauch, wie das durch viele Erfahrungen belegt ist.

Beispiel: Die ursprüngliche Zielsetzung bei der Entwicklung eines PC von IBM war eine 5jährige Garantie. Da die Zuverlässigkeit der elektronischen Bauteile mit steigender Temperatur stark abnimmt, musste in allererster Linie der Energieverbrauch, das heisst die Wärmeabgabe, minimiert werden. Heute wird das energiesparende Gerät als «Energy Desktop» angepriesen, was eindeutig als Nebeneffekt der Bemühungen um mehr Zuverlässigkeit gewertet werden kann.

5 Checkliste

Die Liste enthält eine Auswahl von Massnahmen und Beurteilungskriterien zur rationellen Verwendung von Elektrizität ohne Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit.

- Definition optimaler Forderungen bezüglich Zuverlässigkeit und Ausfallraten (optimal bezüglich des Verhältnisses von Kosten und Nutzen).
- Prüfen, ob sich die Zuverlässigkeit durch nichttechnische, allenfalls kostengünstigere Massnahmen verbessern lässt.
- Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit zeitlich definieren.
- Prüfung mehrerer Varianten mit unterschiedlichem Energieverbrauch bei akzeptabler Zuverlässigkeit.
- Vergleich der Grenznutzen von Zuverlässigkeit und Betriebskosten, insbesondere Energiekosten.
- Können Komforteinbussen – ohne Verlust an Zuverlässigkeit – toleriert werden, beispielsweise im Zusammenhang mit Ein- und Ausschaltpflichten, etc. ?
- Energieverbrauch der beteiligten Komponenten quantifizieren; vom Hersteller Verbrauchsdaten verlangen und auf ihre Plausibilität überprüfen. Bei bereits installierten Komponenten: Effektive Last bestimmen, Angaben auf dem Typenschild sind zuwenig präzise!
- «USV-Pflichtigkeit» von Verbrauchern kritisch hinterfragen.
- Wenn USV-Anlagen eingesetzt werden müssen: Sind Offline- oder Cold-Stand-by-Varianten möglich ?
- Angaben zum Wirkungsgradverlauf der USV-Anlage einfordern und bewerten.
- Qualität von Einzelgeräten bezüglich Lebensdauer und Zuverlässigkeit vergleichen.
- Etablierung der Redundanz auf der Ebene der Module, Geräte oder Bauteile.
- Einsatz von kalten oder warmen, statt heissen Redundanzen.
- Geräte mit tiefem Stand-by-Verbrauch (Sleep-mode) vorziehen.
- Möglichkeiten zur Ein- und Ausschaltung von Geräten und USV-Anlagen vorsehen.
- Ein- und Ausschaltung im Betrieb überwachen.
- Schaltvorgänge wenn immer möglich automatisieren, allenfalls in Kombination mit einem intelligenten Power Management.

6 Beispiele

Rechenzentrum

Für ein Rechenzentrum werden verschiedene Systemvarianten bezüglich Zuverlässigkeit und Energieverbrauch bewertet. Im Vordergrund stehen die drei Komponenten *Netz* (allein oder mit unterbrechungsfreier Stromversorgung), *Rechenanlage* (Grossrechner oder Workstations) sowie *Klimaanlage*. Im dargestellten Vergleich sind die unterschiedlichen Betriebszeiten nicht berücksichtigt: Während Grossrechner in der Regel rund um die Uhr in Betrieb sind, arbeiten Workstations lediglich während den Bürozeiten.

Tabelle 6: Mittelwerte der ausfallfreien Arbeitszeit (MTTF) und geforderte Leistungen der beteiligten Komponenten. Alle Komponenten haben eine konstante Ausfallrate.

	Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit	Durchschnittlich bezogene Leistung
Netz	100 h	–
USV	100 000 h	5,0 kW
Klimaanlage	5 000 h	40,0 kW
Grossrechner	4 000 h	20,0 kW
Workstation	40 000 h	0,5 kW

Abbildung 7 mit Tabelle: 6 Varianten für ein Rechenzentrum.

Konfiguration	Mittelwert der ausfallfreien Arbeitszeit	Geforderte Leistung
Variante 1 Netz, Grossrechner und Klimaanlage ohne Redundanz	100 h	60 kW
Variante 2 Wie Variante 1, aber mit Redundanz auf Netz mit USV	2 200 h	65 kW
Variante 3 Netz mit Redundanz (Annahme für die USV: doppelte Leistung, gleiche Ausfallrate), 2 Grossrechner in Redundanz (1 aus 2) und Klimaanlage (doppelte Leistung, gleiche Ausfallrate)	3 000 h	130 kW
Variante 4 2 geographisch getrennte Anlagen, jede wie Variante 1, mit 2 getrennten Netzen	140 h	120 kW
Variante 5 Netz mit Redundanz (USV), Workstations (gleicher Energieverbrauch wie 2 Grossrechner in Redundanz 1 aus 2, 50% der Workstations erfüllen die Forderung, Redundanz 40 aus 80), keine Klimaanlage (die Workstations sind räumlich verteilt)	24 700 h	50 kW
Variante 6 Wie Variante 5, aber die Workstations sind mit 2 redundanten Fileservern vernetzt	22 300 h	50 kW

Variante	Zuverlässigkeits-Blockdiagramm
1	
2	
3	
4	
5	 40 aus 80
6	 39 aus 78

Fazit:
Die beiden Varianten 5 und 6 schneiden bezüglich Zuverlässigkeit und Energieverbrauch deutlich besser ab als die anderen Fälle.

C = Grossrechner
N = Netz
K = Klimaanlage
U = USV-Anlage
W = Workstation

Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Unterbrechungsfreie Stromversorgungen überbrücken Netzstörungen und kurze Netzunterbrüche (bis etwa 10 Minuten). Für die meisten Computeranlagen sind Netzunterbrüche unter 20 ms kein Problem; eingehende Untersuchungen zeigen indessen, dass selbst «stabile» Netze durchschnittlich alle 100 Stunden während 130 bis 700 ms unterbrochen werden (vgl. zur Typologie von USV-Anlagen Seite 9).

Für die Stromversorgung grosser Rechenanlagen wird aus betrieblichen Gründen eine *mittlere ausfallfreie Arbeitszeit* von über 300 000 h gefordert. Beim Einsatz von Online-USV-Anlagen ist dazu ein Betrieb von 2 Anlagen in heisser Redundanz notwendig (Tabelle 7). Der Einsatz von Offline-Anlagen ist heute bei Grossrechnern noch nicht möglich, weil keine guten Anlagen mit Leistungen über 5 kVA erhältlich sind.

Der Energieverbrauch einer USV-Anlage ist wesentlich durch ihren Wirkungsgrad bestimmt. Der Verlauf des Wirkungsgrades als Funktion der Last ist, neben der Identifizierung der Schnittstellen-Elemente und der Verifizierung der eingebauten Prüfmöglichkeiten, ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der USV-Anlage. Typischerweise beträgt der Wirkungsgrad von grossen USV-Anlagen bei Viertellast 85 % und zwischen halber und ganzer Last 92 bis 95 %.

Tabelle 7: Ausfallrate in $10^{-6}/h$ der Online-USV-Anlagen mit und ohne Redundanz.

	Ausfallrate (in $10^{-6}/h$) der USV-Anlage:	
	ohne Redundanz Abbildung 9	mit Redundanz Abbildung 10
Netz	10 000	10 000
USV-Anlage (Gleichrichter, Batterie und Wechselrichter)	40	40
NetZRückschalteinheit	6	–
Synchronisation und Lastaufteilung	–	4
Steuerung	–	6
Steuersignale	–	0,5
Mittlere ausfallfreie Arbeitszeit (in h)	120 000	1 000 000

Tabelle 8: Energieverbrauch (Verlust mal Zeit) einer typischen Online-USV-Anlage ohne Redundanz gemäss Abbildung 9, bezogen auf den Energieverbrauch der Computeranlage.

Zeitanteil	Last	Wirkungsgrad	Verlust	Verbrauch
60,0%	100,0%	94,0%	6,4%	3,8%
40,0%	50,0%	92,0%	8,7%	3,5%
			Summe	7,3%

Der zusätzliche Stromverbrauch für den Betrieb der USV-Anlage beläuft sich auf 7,3 % des Verbrauches der Last (Computer); 6,4 % würde der Mehrverbrauch bei durchgehend 100-%-Last betragen. Der Verlust der USV-Anlage steigt auf rund 12 % des Lastverbrauches, falls diese redundant betrieben und lediglich jeweils 80 % der Last gedeckt wird. Bei tiefen Belastungen – unter 50 % – kann eine der redundanten Anlagen abgeschaltet werden.

Als Alternative bietet sich der Redundanzbetrieb im sogenannten Cold-Stand-by-Mode an. (Im Cold-Stand-by-Mode ist nur die Steuerung in Betrieb, um im Bedarfsfall Gleich- und Wechselrichter der USV-Anlage zu aktivieren.) Diese Betriebsart ist heute mit bis zu 9 Anlagen möglich. In einer derartigen Konfiguration arbeiten (bis zu) 9 Anlagen parallel, wobei 8 bzw. $n-1$ für die Sicherstellung des Betriebes ausreichen.

Wirkungsgrade:
 bei 25% Last: grösser 92%
 bei 50% Last: grösser 96%
 bei 100% Last: grösser 98%

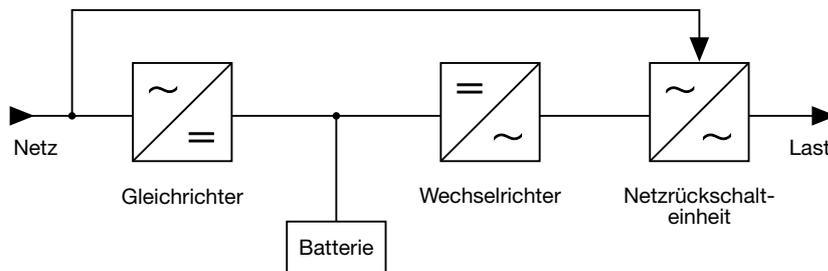


Abbildung 8:
 Blockdiagramm einer
 Online-USV-Anlage.

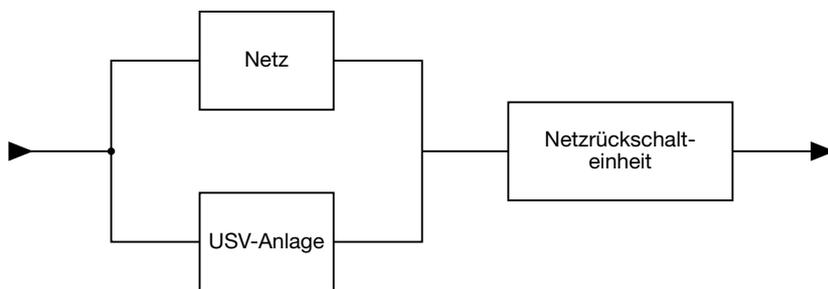


Abbildung 9:
 Zuverlässigkeitsdiagramm
 einer Online-USV-Anlage
 ohne Redundanz.

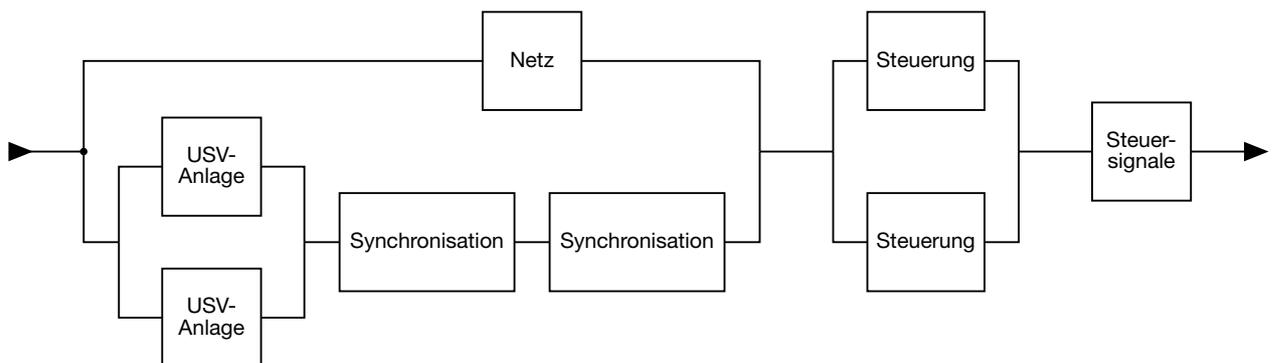


Abbildung 10: Zuverlässigkeits-
 diagramm mit zwei Online-USV-
 Anlagen in heisser Redundanz.

Kassenanlagen

Mit vernetzten Kassensystemen, auch als POS-Systeme – Point of Sale – bezeichnet, werden beträchtliche Geldmengen umgesetzt. Die Forderungen bezüglich Verfügbarkeit sind entsprechend hoch. Es sind zwei Ziele, die für den Kassenbetreiber im Vordergrund stehen. Die Daten müssen bei einem Stromausfall gespeichert werden können, um keine Daten zu verlieren; dazu ist der Netzersatz nicht mehr als eine halbe Minute notwendig. Davon unabhängig sollen die noch im Laden anwesenden Kunden bedient werden können, was nach einem Netzausfall rund 30 Minuten dauert.

Vereinfacht dargestellt werden zwei Kassentypen unterschieden: Geräte, die technisch einem PC entsprechen, sowie sogenannte RAM-ROM-Kassen. Während RAM-ROM-Geräte Stromausfälle ohne Datenverlust überstehen, weil die dezentralen Speicher mit Batterien unmittelbar gepuffert sind, sind PC-Kassen auf eine USV-Anlage angewiesen, damit sie bei einem Stromausfall genügend Zeit haben, um die Daten auf der Hard-Disc zu sichern. (Es ist technisch möglich, die Speicher von PC-Kassen mittels Batterien zu puffern. Einige wenige Anbieter haben das bereits realisiert (zum Beispiel IBM); vorläufig bildet diese Konfiguration aber die Ausnahme.)

Ausreichende Zuverlässigkeit kann bei derartigen Kassensystemen auf verschiedenen Wegen – mit unterschiedlichem Stromverbrauch – realisiert werden. Redundanz kann insbesondere bei den Kassen, bei den Servern und bei der Stromversorgung eingebracht werden. Falls vollständig auf redundante Elemente verzichtet wird, muss im Falle eines Stromausfalles auf Handabrechnung umgestellt werden. Dies ist, wie Erfahrungen zeigen, in kleinen Läden ohne weiteres möglich. In grossen Läden, die mit PC-Kassen ausgerüstet sind, ist eine USV-Anlage – allenfalls kombiniert mit einer Notstromanlage – unumgänglich.

Tabelle 9: Beispiele von Wirkungsgraden einer USV-Anlage in Abhängigkeit der Last.

Last in %	Wirkungsgrad in %
10	60
20	72
30	81
40	87
50	91
60 und mehr	92

Tabelle 10: Leistungswerte von Kassen.

Komponente	Messwerte
PC-Kassen	48 bis 83 W
RAM-ROM-Kassen	23 bis 30 W
Server (PC-Technik)	100 bis 200 W

Server

PC-Kassen speichern in der Regel die Daten nach dem Kundenabschluss auf einen separaten Server. Bei Ausfall einer Kasse, beispielsweise kombiniert mit dem Verlust der Daten auf der dezentralen Speicherplatte, sind die Daten gesichert. In hochredundanten Systemen werden die Daten zwischen zwei Servern gespiegelt: Redundanz auf Geräte- und Datenebene. Schliesslich sei noch auf Kombinationen hingewiesen. Gewisse RAM-ROM-Geräte legen Daten in mehreren Kas-

sen ab. Oder: In einigen Kassen sind Diskettenlaufwerke eingebaut, um periodisch Daten der Hard-Disc zu kopieren.

Ganz allgemein erhöhen die angegebenen Redundanzen und Sicherheitsmassnahmen den Stromverbrauch, sofern sie mit zusätzlichen, für die reguläre Funktion verzichtbaren Geräten realisiert sind. Das Kopieren von Daten an sich erhöht den Strombedarf nicht, weil dieser von der Art der Aktivität weitgehend unabhängig ist.

Warenhaus mit 90 Kassen

Ausgangslage: In einem grossen Warenhaus mit 90 Kassen werden durch Abschaltung der Kassen abends und an Wochenenden 26 000 kWh pro Jahr eingespart. Im gleichen Haus liegt die Auslastung der USV-Anlage unter 20%.

Massnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches

Massnahme Nr. 1: Ausschalten

Geräte, wenn immer möglich, abschalten. Es empfiehlt sich, die Ausschaltung zu automatisieren, was aber eine separate Versorgungsleitung erfordert. Bei nachträglichem Einbau ist diese Massnahme mit hohen Kosten verbunden. Die Installation von Schaltuhren ist zu prüfen.

Durch das Ausschalten und, am anderen Morgen, gleichzeitige Wiedereinschalten der Kassen können sich im Server Probleme ergeben: Die Überlastung aufgrund zu vieler gleichzeitiger Anfragen von Kassen kann dazu führen, dass der Server in einer Programmroutine steckenbleibt («aufhängt»). Neue Softwareversionen sind gegen diese Gefahren weitgehend gefeit. Falls Schaltuhren im Einsatz sind, empfiehlt es sich, diese zeitlich verschoben zu programmieren, beispielsweise im Minutentakt.

Das gleichzeitige Einschalten der Endgeräte macht auch der USV-Anlage zu schaffen, denn aufgrund der hohen Einschaltströme der Kassen tritt eine kurzfristige Überlastung der USV ein. Abhilfe bietet eine Bypass-Schaltung in der USV oder die gruppenweise Einschaltung von Kassen.

Eine Kasse muss lediglich während den Öffnungszeiten – plus 1 Stunde Reserve – in Betrieb sein, mithin also während 37% des ganzen Jahres. Mit einer einzigen Kasse kann allein durch das Aus- und Einschalten 300 kWh Strom, entsprechend 50 Franken, eingespart werden.

Selbst Computer, die nachts über ein Modem telefonisch abgefragt werden, können abgeschaltet werden, sofern sie mit einer automatischen Wiedereinschaltung ausgerüstet sind.

Beispiel: In einer einfachen Installation bei 10 Kassen mit Flachbett-Scannern soll eine zentrale Schaltuhr die Geräte um 20 Uhr aus- und um 7 Uhr einschalten (sonntags weder noch). Um die Energieeinsparung zu berechnen, ist die Reduktion der Betriebszeit von 4680 h mit den gemessenen Leistungen (0,07 kW für eine Kasse und 0,02 kW für

einen Scanner) zu multiplizieren. Insgesamt ergibt sich ein Minderverbrauch von 4212 kWh oder, bei einem mittleren Strompreis von 22,5 Rp./kWh, 950 Fr. pro Jahr. Die Massnahme kostet 1000 Fr. – Elektriker baut eine Schaltuhr in das Tableau ein – und ist in einem Jahr amortisiert.

Massnahme Nr. 2: USV

Fazit: Aufgrund der Typenschildangaben hätten eine 5-kVA- und eine 30-kVA-USV-Anlage installiert werden müssen. Die Investitionskosten einsparung – im Vergleich zur gewählten Konfiguration – beträgt 16 500 Franken. Die grössere Anlage zeigt im Betrieb eine Auslastung von 55 %. Damit sind die Verluste um mehr als 30 % geringer als bei der nach dem Typenschild geplanten Anlage. Die Einsparung an Elektrizität beziffert sich auf jährlich 3200 kWh oder 500 Franken.

Nur die Geräte an die USV anschliessen, für die dies unbedingt erforderlich ist. (Jedes Gerät, das über eine USV geführt ist, verursacht in dieser USV zusätzliche Verluste.) In vielen Filialen sind die USV-Anlagen mit rund 15 % ausgelastet (Wirkungsgrad um 60 %). Umfragen ergaben, dass dem Planer der USV-Anlagen die Leistungswerte der Kassen gar nicht bekannt waren! Zudem erfolgt die Auslegung fast durchwegs mit überrissenen Reserven. Modular aufgebaute USV-Anlagen schneiden diesbezüglich besser ab, da ihre Leistung jederzeit und einfach erhöht werden kann.

Am Beispiel einer Kassenanlage sei die Forderung *USV-Anlage richtig dimensionieren* illustriert (Quelle 4).

Vorbemerkung: Zur Bestimmung der Last müssen die korrekten Leistungswerte der Kassen bekannt sein. Diese können mit Handmessgeräten erfasst werden. (Für USV-Anlagen muss indessen aus der Wirkleistung P und der Blindleistung Q die Scheinleistung S berechnet werden.)

Dieses Vorgehen zeitigte bei einer mittelgrossen Kassenanlage die in Tabelle 11 aufgeführten Resultate.

Tabelle 11: Vergleich von Typenschildangaben und Messwerten einer mittelgrossen Kassenanlage (Quelle 4).

Kassen und Geräte	Typenschild	Messwert	Gewählte USV-Leistung
Do it yourself	2,79 kVA	1,2 kVA	2,0 kVA
Hauptgeschäft	25,74 kVA	10,6 kVA	20,0 kVA

7 Weiterführende Informationen

(1) *Zuverlässigkeitstechnik. Grundlagen und Anwendung.* Von Patrick T. O'Connor. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1990.

Kommentar: Das 500seitige Buch bietet auf weite Strecken einen praxisorientierten Überblick über die Zuverlässigkeitstechnik. Zusammenhänge zwischen Zuverlässigkeit und Stromverbrauch sind allerdings in diesem Band keine zu finden.

(2) *Zuverlässigkeitstechnik. Einfluss des Menschen.* Von Balbir S. Dhillon. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988.

Kommentar: Standardwerk mit 270 Seiten zum Thema «Mensch und Zuverlässigkeit». Das Buch thematisiert den Zusammenhang zwischen den beiden Faktoren Mensch und Maschine.

(3) *Zuverlässigkeit und Energieverbrauch von elektronischen Geräten und Systemen.* Von Alessandro Birolini. Materialien zu RAVEL. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1992. Bestellnummer: 724.397.13.56 d. Bezug: EDMZ, 3000 Bern, Fax 031 322 39 75.

Kommentar: 2 Beispiele dieses Heftes stammen aus der Broschüre von A. Birolini. Die Schrift ist für Leser interessant, die bereits über mathematische und analytische Kenntnisse der Zuverlässigkeitstechnik verfügen. Zum Titelthema Zuverlässigkeit und Energieverbrauch sind nur wenig Informationen enthalten.

(4) *Energieverbrauch von Rechner- und Kommunikationsanlagen im Detailhandel. Schlussbericht des RAVEL-Untersuchungsprojektes 13.53.* Von Rolf Moser. Materialien zu RAVEL. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1993. Bestellnummer 724.397.13.53 d. Bezug: EDMZ, 3000 Bern, Fax 031 322 39 75.

Kommentar: Das Thema «Zuverlässigkeit und Stromverbrauch» ist am Beispiel des Detailhandels dargestellt. Das Heft zeigt die grossen Potentiale dieser Elektrizitätsanwendung auf und schlägt geeignete Massnahmen und Planungsrichtlinien vor. Praxisorientiert.

(5) *Miniwatt-Report. Rationeller Energieeinsatz in der Informationstechnik und in der Unterhaltungselektronik. Internationales Meeting für «Insider» am 19. März 1992, ETH Zürich, Zürich 1993.* Von C. Bachmann, B. Aebischer und R. Brüniger. Der Miniwatt-Report ist gratis erhältlich bei ENET, Postfach 142, 3000 Bern 6. Texte von Referaten der Tagung sind erhältlich bei der Forschungsgruppe Energieanalysen, c/o Bernard Aebischer, ETL, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Kommentar: Eines der seltenen Papiere, die Informationen zum Thema Geräteinsatz und Energieverbrauch beinhalten. Dünnes, aber gehaltvolles Heft.

(6) *Zusammenhang zwischen Schalthäufigkeit und Zuverlässigkeit bei elektronischen Geräten. Von Alessandro Birolini und Ludmil Miteff, Bericht Z14: 10. Februar 1993, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.*

Kommentar: Einige der sehr interessanten Ergebnisse dieser Studie sind auch im vorliegenden Heft enthalten.

(7) *USV für Planer. Energieoptimale Planung von USV-Anlagen. Ein Leitfaden für Elektroplaner. Von Andreas Neyer und Gilbert Schnyder. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994. Bezug: Bundesamt für Energiewirtschaft, 3003 Bern, Fax 031 382 44 03.*

Kommentar: Broschüre mit prägnantem und praxisorientiertem Inhalt.

(8) *RAVEL-Handbuch Strom rationell nutzen. Umfassendes Grundlagenwissen und praktischer Leitfaden zur rationellen Verwendung von Elektrizität. 320 Seiten, durchgehend illustriert. Verlag der Fachvereine, Zürich 1992. Im Buchhandel erhältlich.*

Kommentar: Das RAVEL-Handbuch ist als Übersicht hilfreich, enthält aber keine Informationen zur Zuverlässigkeitstechnik.