

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizer Ingenieur und Architekt
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	108 (1990)
<b>Heft:</b>	13
<b>Artikel:</b>	Verfügbarkeit der Energieversorgung eines Grossrechenzentrums: Anwendung neuer, quantitativer Methoden
<b>Autor:</b>	Schaltegger, Peter / Huwiler, Urs P.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-77392">https://doi.org/10.5169/seals-77392</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:** 24.01.2026

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

# Verfügbarkeit der Energieversorgung eines Grossrechenzentrums

Anwendung neuer, quantitativer Methoden

**Die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Rechenzentren von Grossbanken sind extrem hoch. Das hat zur Folge, dass an die Energieversorgung höhere Ansprüche gestellt werden müssen als der heute branchenübliche, bereits hohe Standard. Eine systematische Planung der Verfügbarkeit der Energieversorgung erfordert Methoden der Zuverlässigkeitssicherung. Es wird hier aufgezeigt, dass diese Methoden in der Lage sind, eine quantitative Bewertung der Verfügbarkeit vorzunehmen. Sie erlaubt eine genauere Festlegung der benötigten Redundanzen. Bisher sind diese Methoden noch kaum auf Energiezentralen angewendet worden. Bauherren, Architekten und planende Ingenieure sollen auf diese Methoden zur Reduktion des Risikos aufmerksam gemacht werden.**

## Ausgangslage und Vorgehen

Die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Rechenzentren der Grossbanken sind extrem hoch. Sie werden als

VON PETER SCHALTEGGER,  
KÜSNACHT, UND  
URS P. HUWILER,  
ZÜRICH

Folge der zunehmenden Vernetzung sowohl bankintern als auch zwischen den Banken und der zunehmenden Bedeutung des internationalen Geschäfts noch anwachsen. Die heute erreichte Verfügbarkeit ist bereits sehr beachtlich. Es ereignen sich jedoch jedes Jahr noch einige Total- oder Teilausfälle, die zu Ausfallzeiten der Rechenleistung führen.

Die Komplexität der EDV-Systeme und deren Infrastruktur ist heute so hoch, dass sich wirksame Verbesserungsmassnahmen nicht mehr allein aufgrund von Erfahrung und Intuition treffen lassen. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise erfordert eine eingehende Systemanalyse, verbunden mit Berechnungen auf der Grundlage der Zuverlässigkeitssicherung. Die Schweizerische Bankgesellschaft, Zürich, hat deshalb die GSS Energie, Ingenieure SIA/ASIC AG, Küschnacht, mit der Durchführung entsprechender Studien beauftragt.

Die Verfügbarkeit der neuen Energiezentrale der Schweizerischen Bankgesellschaft in Zürich-Altstetten wurde projektbegleitend berechnet. Nachdem erste Konzepte vorlagen, wurden Berechnungen durchgeführt, die zu punktuellen Modifikationen führten.

Je weiter die Projektierung fortschritt, um so detaillierter konnten die Berechnungen durchgeführt werden. Der Bau der Energiezentrale ist inzwischen weit fortgeschritten.

## Zielsetzung

Die Verfügbarkeitsanalyse der neuen Energiezentrale soll eine Gesamtbeurteilung unter Berücksichtigung aller relevanten Teilsysteme ermöglichen:

- Elektrizitätsversorgung mit Energiesteuerung
- Kälteerzeugung und -verteilung mit Mess-, Steuerungs- und Regelungsteil (MSR)
- Hilfssysteme wie Druckluft, Kühl- und Lüftungssysteme

Für die Verfügbarkeit der Stromversorgung durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich lagen Angaben vor.

Die Verfügbarkeitsanalyse weist in erster Linie auf allfällige Schwachstellen hin. Die bisherigen Massnahmen beziehen sich auf die Struktur der Teilsysteme, insbesondere auf die Zuteilung von Redundanzen. Da die Analyse projektbegleitend entwickelt wurde, war eine Gesamtbeurteilung anfänglich nicht möglich. Der Einfluss von Ersatzteilen und der Organisation von Bedienung, Überwachung und Pikettdienst werden noch zu berücksichtigen sein. Von wesentlichem Einfluss ist auch die Instandhaltung. Hier ging man zunächst von Erfahrungswerten aus.

Für die Nichtverfügbarkeit der Energiezentrale wurde eine Zielsetzung festgelegt.

Die Genauigkeit der Analyse wird durch folgende Gegebenheiten begrenzt:

- Genauigkeit der verwendeten Modelle und Methoden
- Zugänglichkeit und Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Daten, im wesentlichen Ausfallraten und Reparaturzeiten der Komponenten
- Vereinfachungen der technischen Systeme, die im Interesse des Beurteilungsaufwandes zu treffen waren.

## Methodik

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe der Zuverlässigkeit- und Verfügbarkeitsanalyse durchgeführt, die u.a. in der Systemtechnik und der Elektronik verwendet wird. Die Methodik wurde in den letzten 30 Jahren schwerpunkt-mässig in den USA entwickelt. Es gibt darüber eine ausgedehnte Literatur. Bisher wurde die Fehlerbaumanalyse, wie sie z.B. beim Bau von Kernkraftwerken eingesetzt wird, nicht verwen-

## Definitionen

### Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich eine Betrachtungseinheit zu einem beliebigen Zeitpunkt in einem betriebsbereiten Zustand befindet.

### Redundanz

Ein System heißt redundant, wenn es funktionsfähig sein kann, ohne dass alle seine Komponenten funktionieren. Die Redundanz wird durch zusätzliche Komponenten erreicht, die für die Funktion nicht benötigt werden, solange die übrigen Komponenten funktionieren.

## Berechnungsformeln

$$\text{Verfügbarkeit: } V = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MDT}}$$

$$\text{Nichtverfügbarkeit: } NV = 1 - V$$

MTBF: Mittlerer Ausfallabstand (Meantime between failures)

MDT: Instandstellungsdauer (Mean down-time)

Serienschaltung mit zwei Komponenten K1 und K2:

$$V_S = V_{K1} V_{K2}$$

Parallelschaltung mit zwei gleichen Komponenten:

$$V_P = 2 V_K - V_K^2$$

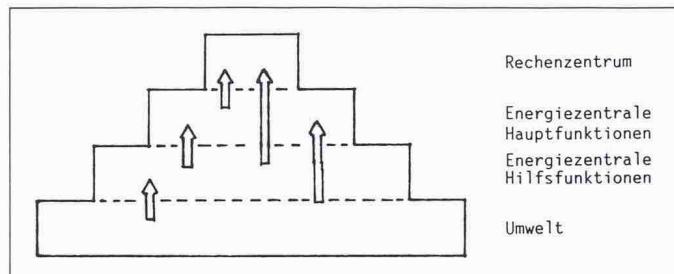


Bild 1. Hierarchisches Modell mit Einflussfaktoren

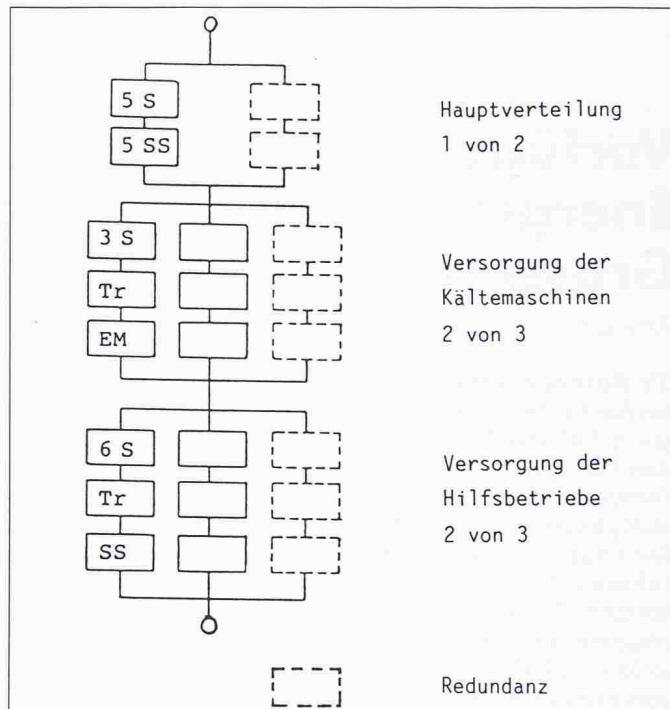


Bild 2. Blockdiagramm der Elektroversorgung, Ausschnitt

det. Fehlerbaumanalysen erhöhen zwar die Aussagefähigkeit, der Analyseaufwand steigt jedoch beträchtlich. Zudem benötigt man eine genaue Kenntnis der Anlage, was während der Projektierung nur beschränkt der Fall war. Die verwendeten Methoden sind bisher noch kaum für die Analyse von Energiezentralen eingesetzt worden. Kürzlich wurde eine ähnliche Analyse publiziert [1].

Unter der Verfügbarkeit der Energiezentrale versteht man die Verfügbarkeit von Energie (Elektrizität) und Energieträgern (Wasser, Luft), die für den Betrieb des Rechenzentrums unerlässlich sind. Aus methodischen Gründen wird neben der Verfügbarkeit vor allem die mittlere jährliche Nichtverfügbarkeit in Stunden als Masszahl verwendet, da sie eine bessere Beurteilung erlaubt.

Die wichtigsten Einflussfaktoren der Verfügbarkeit sind einerseits die Zuverlässigkeit der Komponenten und andererseits die Instandstellungszeiten bei Ausfällen. Letztere umfasst die Zeit vom Ausfall bis zum Beginn der Instandstellung, die Instandstellungszeit selbst und die Zeit bis zur Wiederinbetriebnahme. Die Wartung kann einen Einfluss auf die Verfügbarkeit haben, weil während der Wartung die Redundanz fehlt oder reduziert sein kann.

Eine extrem hohe Verfügbarkeit ist nur mit sehr grossem technischem Aufwand und entsprechenden Kosten erreichbar. Die Aufgabe bestand einerseits darin, zu überprüfen, ob diese Zielsetzung aufgrund des jeweiligen Projektstandes als erreicht angesehen werden konnte, und andererseits darin, genau soviel Redundanz einzusetzen,

wie zur Erreichung der Zielsetzung nötig war. Grundsätzlich führen einfache Lösungen und klare Konzepte zu höheren Verfügbarkeiten.

Energiezentralen weisen eine wesentlich höhere Lebensdauer auf als Computer. Die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Energiezentralen müssen sich deshalb an der Verfügbarkeit künftiger Computersysteme orientieren. Hier zeichnet sich eine deutliche Steigerung in den nächsten Jahren ab (ausfalltolerante Computer). Die Energiezentrale muss als Sekundäreinheit des Rechenzentrums ohnehin eher eine höhere Verfügbarkeit aufweisen.

### Konzept

Bei der Energiezentrale unterscheidet man Hauptfunktionen (Elektro- und Kälteversorgung) und Hilfsfunktionen (Druckluft, Lüftung, MSR, Energiesteuerung usw.). Die hohen Verfügbarkeitsanforderungen betreffen zunächst die Hauptfunktionen. Die Anforderungen an die Hilfsfunktionen richten sich nach dem Ausmass der möglichen Beeinträchtigung einer Hauptfunktion. Man kann im wesentlichen folgende Fälle unterscheiden:

- Erster Fall: Der Ausfall der Hilfsfunktion führt zum Ausfall der Hauptfunktion
- Zweiter Fall: Der Ausfall der Hilfsfunktion bewirkt eine Störung der Hauptfunktion
- Dritter Fall: Der Ausfall der Hilfsfunktion hat keine nennenswerte Auswirkung

Oft gibt es zwischen dem Ausfall der Hilfsfunktion und der Auswirkung auf die Hauptfunktion einen Zeitverzug. Ist diese Zeitspanne länger als die Instandstellungszeit, so besteht keine nennenswerte Auswirkung.

Beispielsweise führt ein Ausfall der Transformatorenlüftung mit der Zeit zu einer Erwärmung der Transformatoren und zu einem möglichen Ausfall. Kann die Instandsetzung der Lüftung beendet werden, bevor eine Überhitzung der Transformatoren erreicht wird, so ist die Beeinträchtigung der Hauptfunktion (Elektroversorgung) durch die Hilfsfunktion (Lüftung) gering.

Da die Zahl der Hilfsfunktionen höher ist als die der Hauptfunktionen und sich die Nichtverfügbarkeiten der Teilsysteme im wesentlichen addieren, muss ein Schneeballeffekt vermieden werden. An Hilfsfunktionen müssen noch höhere Anforderungen gestellt werden, sofern Fall 1 vorliegt. Im Fall 2 genügen etwa gleiche Anforderungen, während im Fall 3 ein guter Industriestandard genügt. Hilfsfunktionen dürfen nur einen sehr kleinen Beitrag an die Nichtverfügbarkeit leisten. Oft lässt sich eine hohe Verfügbarkeit bei Hilfsfunktionen mit kleinerem Aufwand erreichen als bei Hauptfunktionen. Es bestehen Wechselwirkungen zwischen Haupt- und Hilfsfunktionen, die nicht leicht zu überblicken sind.

Besondere Beachtung verdienen die Schnittstellen zwischen den Teilsystemen. Beim Bau der Energiezentrale spielt die Qualitätssicherung eine grosse Rolle. Die verwendeten Daten setzen voraus, dass alle Anlageteile eine einwandfreie Qualität aufweisen.

**Daten**

Die Komponentendaten (Ausfallraten, Instandstellungszeiten) stammen aus dem IEEE-Standard 500 [2]. Es handelt sich um Daten aus dem Kernkraftwerksbereich. Die Datensammlung wird von der Fachvereinigung IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) herausgegeben. Die Energiezentrale muss in einem vergleichbaren Qualitätsstandard erstellt werden, damit die Daten als repräsentativ betrachtet werden können. Die Instandstellungszeiten wurden, wo sie von erheblicher Bedeutung sind, mit der Betriebserfahrung bisheriger Energiezentralen und z.T. mit Lieferantangaben verglichen. Die Verfügbarkeit der Elektrizitätsversorgung durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich wurde aufgrund von Statistiken ermittelt. Von Interesse war die Verteilung der Ausfalldauern.

Die Resultate der Verfügbarkeitsanalysen sind Wahrscheinlichkeitsaussagen und entsprechend zu interpretieren. Eine Überprüfung kann nur über lange Zeiträume (5–10 Jahre) erfolgen.

Die Komponentenausfallraten bzw. die MTBF-Werte wurden aus einer einzigen Datensammlung entnommen. Damit ist die Homogenität der Daten sichergestellt. Die Vergleichbarkeit von Teilsystemen ist damit gewährleistet. Es gibt für Teilbereiche auch andere, z.T. bessere Daten. Die Gefahr der Inhomogenität hält uns davon ab, andere Quellen zu benutzen. Für die Startzuverlässigkeit der Notstromdieselmotoren lag eine Statistik des Auftraggebers vor, die den zunächst angenommenen Wert von 98% bestätigte.

**Berechnung der Verfügbarkeit:** Beispiel Elektrizitätsversorgung. Aus Platzgründen kann nicht auf die Berechnung aller Teilsysteme eingetreten werden. Wir beschränken uns auf die Elektrizitätsversorgung. Zunächst wird der Netzbetrieb, der den Normalfall darstellt, behandelt. Bei Netzausfall übernehmen Notstromdieselmotoren die Stromerzeugung. Man spricht dann von Netzersatzbetrieb.

Aufgrund der Prinzipschemata der Stromversorgung wird zunächst ein sog. Zuverlässigkeitsblockdiagramm entwickelt, das die relevanten Komponenten in ihrer logischen Verknüpfung darstellt. Die Elektroversorgung ist vollständig redundant aufgebaut, was sich in einem oder mehreren parallelen Pfaden im Blockdiagramm äußert.

Bild 2 zeigt das Zuverlässigkeitsblockdiagramm für die Elektrizitätsversorgung der wichtigsten Verbraucher. Die

Komponenten	MTBF (h)	MDT (h)	V
Schalter S	5 000 000	1	0,999 999
Sammelschiene SS	2 000 000	12	0,999 994
Transformator Tr	1 000 000	8	0,999 992
USV-Anlage USV	5 400	6	0,998 890
Elektromotor der Kältemaschinen EM	30 000	4	0,999 867
Notstromdiesel D	710	4	0,994 398
Startzuverlässigkeit von D			0,98
Generator G	50 000	8	0,999 840
Frequenzumrichter Ur	30 000	8	0,999 733

Tabelle 1. Verfügbarkeit der Komponenten

Teilsysteme	Verfügbarkeit Komponenten	Struktur	Verfügbarkeit Teilsysteme
Hauptverteilung	0,999 965	parallel	1
Versorgung Kältemaschinen	0,999 856	2 von 3	1
Versorgung Hilfsbetriebe	0,999 980	2 von 3	1
Kältezirkulation	0,998 872	parallel	1

Tabelle 2. Verfügbarkeit der Teilsysteme

Abkürzungen für die Komponenten sind in Tabelle 1 erklärt.

Tabelle 1 enthält die Ausgangsdaten für die Komponenten, nämlich den mittleren Ausfallabstand MTBF und die Instandstellungszeit MDT. Kabel wurden nicht berücksichtigt. Die MTBF-Werte stammen aus dem IEEE-Standard 500. Die Instandstellungszeiten wurden aufgrund der Erfahrung und z.T. nach Rücksprache mit Lieferanten festgelegt. Anschliessend erfolgte die Berechnung der Verfügbarkeit der Teilsysteme der Elektrizitätsversorgung. Sind 5 Sammelschienen und 5 Schalter in Serie geschaltet, wie in der Stromverteilung, so multiplizieren sich die Verfügbarkeiten der Komponenten. Da zwei gleiche, parallele Zweige vorhanden sind, liegt eine Parallelschaltung vor. Die Berechnung erfolgt nach den Formeln im Kästchen.

Die übrigen Teilsysteme der Elektrizitätsversorgung sind z.T. sog. 2-von-3-Systeme: Von 3 parallelen Zweigen sind zwei für den Normalbetrieb nötig, der dritte Zweig ist redundant. Tabelle 2 gibt die Verfügbarkeit der Teilsysteme an. Im Rahmen der gewählten Genauigkeit ist die Verfügbarkeit aller Teilsysteme 1. Damit besitzt auch die Elektrizitätsversorgung bei Normalbetrieb die Verfügbarkeit 1.

Die Verfügbarkeit des Netzersatzbetriebes wird entsprechend berechnet. Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Dieselaggregate eine wesentlich tiefere Verfügbarkeit aufweisen. Zudem wurde auf Redundanz verzichtet, da der Netzersatzbetrieb nur selten benötigt wird. Für den Netzersatzbetrieb erhält man eine Verfügbarkeit von 0,95. Um die Gesamtverfügbarkeit zu erhalten, muss

noch eine Gewichtung von Normal- und Netzersatzbetrieb vorgenommen werden. Sie ergibt sich aus der Statistik des Elektrizitätswerkes über Häufigkeit und Dauer der Stromunterbrüche. Kurze Unterbrüche werden durch die unterbruchsfreie Stromversorgung USV aufgefangen. Aufgrund der Gewichtung erhält man schliesslich eine Nichtverfügbarkeit der Elektrizitätsversorgung von 3 min pro Jahr.

## Beurteilung

Die perfekte Verfügbarkeit der Elektrizitätsversorgung bei Normalbetrieb lässt keine Wünsche offen. Hingegen kann man sich fragen, ob eine etwas weniger aufwendige Lösung nicht auch eine genügende Verfügbarkeit ergeben würde. Das ist in der Tat nicht der Fall. Der Verzicht auf Redundanz bei einem Teilsystem erhöht die Nichtverfügbarkeit wesentlich. Zudem erfordert die Elektrizitätsversorgung gelegentlich eine Wartung. Wäre keine Redundanz vorhanden, so würde die Wartung zu einem Unterbruch der Versorgung führen. Die Zielsetzung könnte nicht mehr erfüllt werden.

Die im vorangehenden Abschnitt angegebene Berechnung der Verfügbarkeit muss noch ergänzt werden, da während der Wartung mindestens ein Teilsystem ohne Redundanz auskommen muss. Da die Wartungszeiten im Verhältnis zu den Betriebszeiten zwischen zwei Wartungen kurz sind, ist die Auswirkung auf die Verfügbarkeit gering.

Bei der Kälteversorgung liegen die Dinge insofern anders, als ein Ausfall z.B. einer Kältemaschine nicht zu einem so-

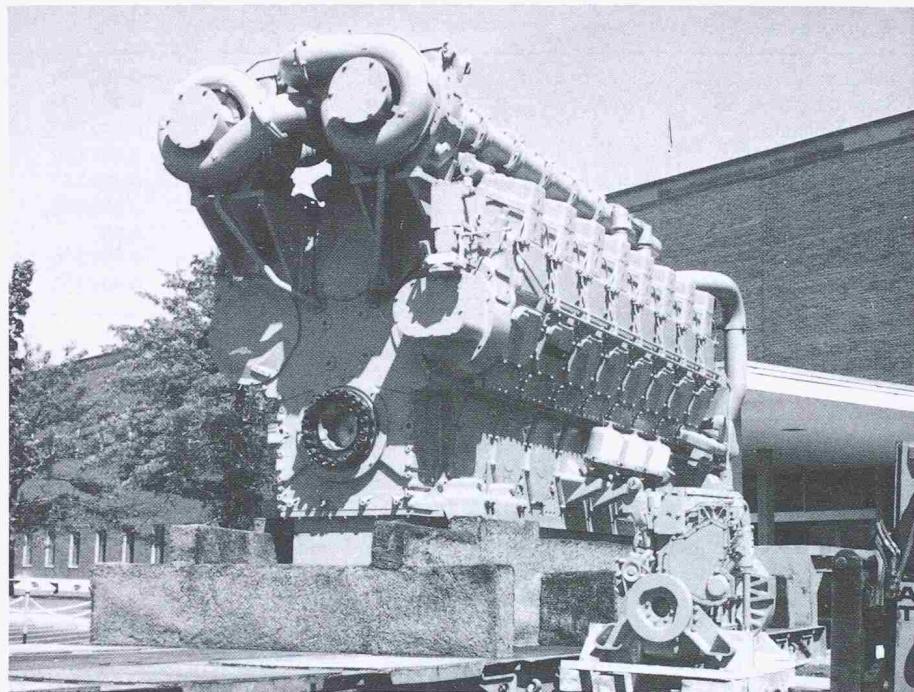


Bild 3. Notstromdieselmotor

fortigen Unterbruch der Kälteversorgung führt. Der Kaltwasserkreislauf weist eine gewisse Trägheit auf. Da mehrere Kältemaschinen die Kälteversorgung sicherstellen, bewirkt ein Ausfall einer Maschine allenfalls ein Defizit in der Kälteversorgung. Der Kältebedarf des Rechenzentrums ist nahezu konstant, während der Bedarf an Klimakälte von der Jahreszeit abhängig ist. Es sind zusätzliche Überlegungen anzustellen, wann der Ausfall eine derartige Unterdeckung des Kältebedarfs bewirkt, dass in kurzer Zeit eine unzulässige Temperaturerhöhung stattfindet. Die Trägheit der Kälteversorgung wird zudem durch Kaltwasserspeicher erhöht.

### Schlussfolgerungen

Natürlich stellt sich die Frage, ob die Verfügbarkeitsanalysen einen Nutzen bringen, der den Aufwand rechtfertigt.

### Literatur

- [1] Ralston A.H. Jr.: Reliability Program for a Financial Computer-Operations Center 1989, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, S. 368-372
- [2] IEEE Std. 500, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, 1984

Die projektierenden Ingenieure haben schon beim Bau früherer Energiezentralen Redundanz eingesetzt und hohe Verfügbarkeiten erreicht. Dazu ist zunächst generell zu bemerken, dass die Verfügbarkeitsanalyse eine quantitative Methode ist. Es ist genauer ersichtlich, wo wieviel Redundanz nötig ist. Die Entscheidungssicherheit wird grösser. In Grenzfällen war der Entscheid früher willkürlich. Zudem gab es langwierige Diskussionen über die Notwendigkeit von Redundanzen. Sie wurden versachlicht und abgekürzt. Zudem kann die Gesamtverfügbarkeit nur mit diesen Methoden abgeschätzt werden.

Konkret ergaben sich u.a. folgende Ergebnisse: Die USV-Anlagen müssen redundant sein, die Dieselaggregate nicht. Da beide Anlagen der Überbrückung von Stromunterbrüchen dienen, liegt zunächst der Schluss nahe, beide Anlagen gleich zu behandeln. USV-Anlagen sind viel wichtiger als Netzersatzdieselaggregate, da kurze Unterbrüche viel häufiger als langdauernde sind. Da der Start der Dieselaggregate rund 1 min beansprucht, kommen sie nur für Unterbrüche im Minuten- und Stundenbereich in Frage. Bei der Transformatorenlüftung konnte eine Lösung mit Teilredundanz gefunden werden. Verschiedene Varianten wurden zur Diskussion gestellt. Die Berechnung zeigte dann, wieviel Redundanz nötig ist. In diesem Fall war eine Redundanzoptimierung möglich. Bei der Druck-

luftversorgung bestand keine Klarheit, ob Redundanz nötig sei oder nicht. Die Berechnungen zeigten, dass Hauptverbraucher durch Druckluftflaschen bei einem Ausfall versorgt werden können. Bei der Anordnung der Schalter in der Elektrizitätsversorgung konnte gezeigt werden, dass eine Reduktion der Anzahl Schalter möglich ist, ohne dass die fast perfekte Verfügbarkeit reduziert wird. Dies war sowohl aus Platz- als auch aus Kostengründen wünschbar.

Mit Verfügbarkeitsberechnungen können auch Konzeptvarianten verglichen werden. Es kann insbesondere beurteilt werden, ob aufwendigere Konzepte auch wirklich eine höhere Verfügbarkeit zur Folge haben. In dieser Hinsicht gab es durchaus Überraschungen.

Schliesslich muss noch zur Aussagefähigkeit der Daten Stellung genommen werden. Die Daten sind nicht völlig repräsentativ. Die Berechnungen und insbesondere sog. Sensitivitätsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Schlussfolgerungen durch die Datengenauigkeit oft wenig beeinflusst werden. Der Einsatz von Redundanz bewirkt eine massive Erhöhung der Verfügbarkeit. Auch die Unterschiede in der Verfügbarkeit der Komponenten sind recht ausgeprägt und können als gesichert angesehen werden. In Anbetracht der grossen Bedeutung der Verfügbarkeit von Energiezentralen für Rechenzentren lohnt sich der Aufwand bei weitem. Der Analyseaufwand macht nur einen kleinen Bruchteil der Baukosten aus. Spätere Änderungen aufgrund schlechter Betriebserfahrungen sind viel teurer und zudem problematisch. Es stellt sich vielmehr die Frage, ob durch eine verfeinerte, aber auch aufwendigere Methodik die Aussagefähigkeit noch verbessert werden kann.

Adressen der Verfasser: P. Schaltegger, lic. math., GSS Energie, Ingenieure SIA/ASIC AG, Goldbacherstrasse 8, 8700 Küsnacht, und U.P. Huwiler, Arch. HTL, Schweiz. Bankgesellschaft, Abt. Liegenschaften, Bahnhofstrasse 45, 8021 Zürich.