

Stromversorgung für Rechenzentren

Kiloampere, Sicherheit, Redundanz und der Preis dafür

Erschienen in der Fachzeitschrift Elektrotechnik 07-08/01

– Markus Gehrig –

An die Stromversorgung für Rechenzentren von Telekommunikationsanbietern und Internetfirmen werden sehr hohe Anforderungen an die Verlässlichkeit und Leistungsfähigkeit gestellt. Was dahinter steckt und welche Konsequenzen das auf die Planung und den Betrieb solcher Anlagen hat lesen sie im folgenden Bericht.

Seit einigen Jahren, in der Zeit der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes, bauen immer mehr Firmen, oft mit Hauptsitz in England oder USA, in der Schweiz ihre eigenen Netze auf. Zudem trägt der Boom im Internet-hosting und E-Commerce in den letzten zwei Jahren zusätzlich zum Nachfragesog nach immer leistungsfähigeren Stromversorgungen bei. Zuverlässigkeit und Time-to-market sind in dieser rasant wachsenden Branche die wichtigsten Erfolgskriterien. Hohe Leistungs- und Verfügbarkeitsanforderungen nach angelsächsischen Massstäben an die Stromversorgungen sind Folgen davon. Meistens sind die Leistungsanforderungen so hoch angesetzt, dass im Betrieb diese Leistungen kaum je fließen. Abnahmeprüfungen werden, wenn überhaupt, nur mit linearer Last gemacht. Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit wird mit Redundanz gleichgesetzt.

Hohe Elektrobausummen und wenig Planungsarbeit durch exzessives Lieferanten-Engineering locken immer mehr weniger erfahrene Elektroplaner in den lukrativen Megawattbereich. Ob die Cash-Cow tatsächlich so einfach gemolken werden kann und wo allenfalls die Tücken liegen wird im folgenden Praxisbericht aufgezeigt und erläutert.

Anforderungen an die Verfügbarkeit

Verfügbarkeitsanforderungen sind nicht rein rational beurteilte Kriterien, welche als Grundlage für die Planung zur Verfügung gestellt werden. Von international tätigen Firmen wird die Verfügbarkeit oft in Form von Standardlösungen vorgegeben, die bereits in anderen Erdteilen realisiert wurden. Oft werden

schaltungstechnische Freiheitsgrade zur Absicherung bereits vorhandener Redundanzen geschaffen. Das führt zur emotionalen Sicherheit welche etwa einem Notfallschirm eines Gleitschirmfliegers gleichkommt. Dass solche Schaltungen oft nicht das halten was sie versprechen, zeigt das folgende Beispiel:

Im vorliegenden Fall sind zwei redundante und unabhängige USV-Versorgungssysteme mit Statischen Schaltern so zusammengeschaltet, dass die nachgeschalteten Unterverteilungen stets von der einen oder anderen Quelle mit Spannung versorgt werden. Die Umschaltung erfolgt gegebenenfalls im Millisekundenbereich. Siehe Abbildung 1: Schema Doppelversorgung mit Statischen Schaltern.

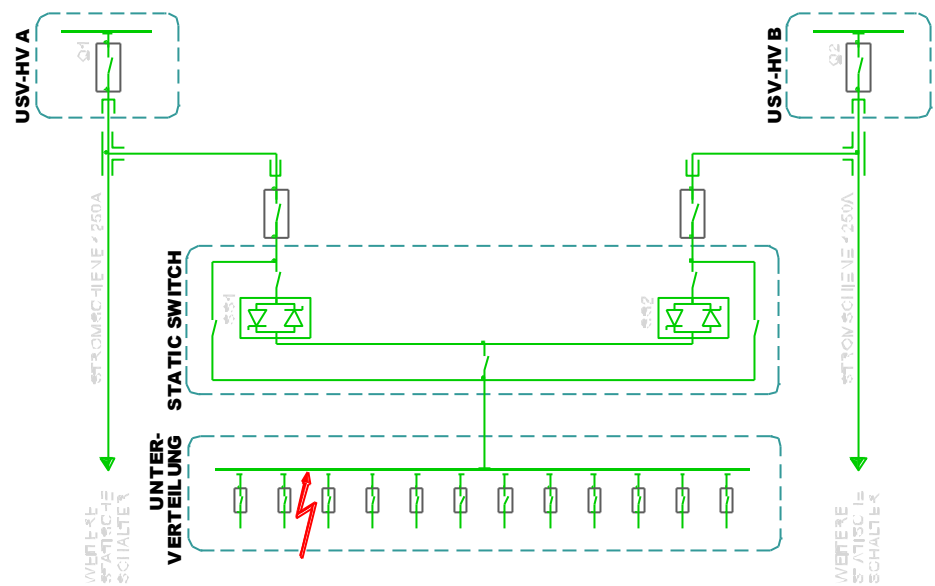


Abbildung 1: Schema Doppelversorgung mit Statischen Schaltern

Ein Elektriker wollte in einer Unterverteilung unter Spannung ein LS auswechseln, dabei hat er einen Kurzschluss gegen Erde verursacht.

- Der Kurzschlussstrom verursachte ein sofortiges Ansprechen des strombegrenzenden Leistungsschalters (Q1) in der USV Verteilung (Spannungsausfall Speisung B) sowie das Abschmelzen der Sicherungen im Statischen Schalter
- Der Statische Schalter detektierte den Spannungsausfall und schaltete den noch nicht gelöschten Kurzschluss auf die Speisung A (die Auslösung bzw. die Umschaltung des statischen Schalters war so schnell, dass die USV B noch nicht auf Bypass schalten musste)
- Der Kurzschlussstrom auf der Speisung A veranlasste die USV A zur Umschaltung auf Bypass und verursachte die Auslösung des strombegrenzenden Leistungsschalters (Q2)
- Damit haben beide Netze keine Spannung mehr gehabt.

Somit sind USV versorgte Verbraucher ausgefallen, welche eigentlich nicht betroffen waren.

Zum zeitlichen Ablauf ist zuzusagen, dass sich das oben beschriebene Szenario innerhalb einiger Millisekunden abspielte. Eine selektive Auslösung hintereinander geschalteter Leistungsschalter kann mit hohen Kurzschlussströmen nicht gewährleistet werden, da die Kurzschlussauslöser der Leistungsschalter alle im gleichen Zeitbereich ausschalten. Die Kennlinien der Halbleitersicherungen schneiden jene der Leistungsschalter ein bis zweimal was die Voraussage der Abschaltreihenfolge verunmöglicht.

Die oben beschriebene Ursache (Kurzschluss in Unterverteilung) muss nicht zwingend immer zu dem oben beschriebenen Szenario führen. Auf welche Art ein solcher Fall abläuft hängt stark von den Anfangswerten ab. Das heisst es spielen noch die folgenden weiteren Kriterien eine Rolle:

- Phasenlage der Spannung beim Kurzschlusseintritt (Einfluss auf Leistungsschalterausschaltzeit und Umschaltzeit der Statischen Schalter)
- Kurzschlussimpedanz (je nachdem wie der Kurzschluss verursacht wird ist der wirksame Wechselstromwiderstand anders und damit der Kurzschlussstrom grösser oder kleiner)
- Kurzschlussart (Erdschluss/1-poliger Kurzschluss, 2-poliger Kurzschluss, 3-poliger Kurzschluss, oder 3-poliger Kurzschluss mit Erdberührung)

Anfangswertsensitive Systeme sind prinzipiell schlecht reproduzierbar und schlecht in der Auswirkung voraussagbar. Sie sind charakterisiert durch eine gewisse strukturelle Komplexität. Da wo Sicherheit gefragt ist, muss die Komplexität möglichst tief gehalten werden. Siehe Abbildung 2: Verfügbarkeit und Komplexität.

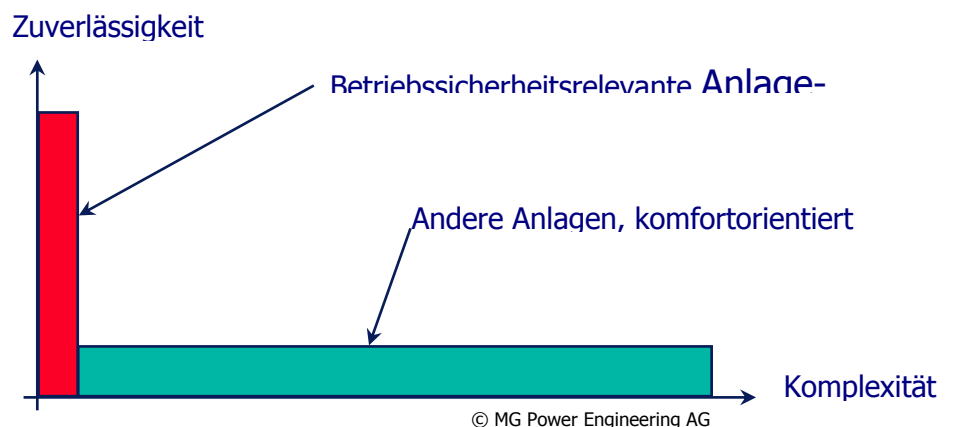


Abbildung 2: Verfügbarkeit und Komplexität

Das Wort Redundanz heisst Überflüssigkeit, Überreichlichkeit, Üppigkeit und hat an sich nichts mit Zuverlässigkeit oder Betriebssicherheit zu tun. In der Stromversorgung und auch in der Kommunikationstechnik wird oft ein überflüssiges Gerät bereit gestellt, damit wenn ein Gerät ausfällt noch eins in Reserve vorhanden ist. In wie weit sich diese Überreichlichkeit mit ihren üppigen Investitions- und Energiekosten auf die Verfügbarkeit auswirkt hängt vielmehr vom Schaltungs- aber auch vom Betriebskonzept ab.

Leistungsanforderungen

Die Leistungsanforderungen sind nicht weniger üppig bemessen. Leistungsdichten von 600 bis 1500 W/m² in Systemräumen sind heute state of the art. Noch vor wenigen Jahren reichten Leistungen im Bereich von 300 bis 500 W/m² für Rechenzentren. Zunehmende Packungsdichten bei der Hardware und nicht in gleichem Masse rückläufige Strombedarfswerte, wie beispielsweise die Expertengruppe Energieszenarien (Eges) in ihrem Szenario für die Kommunikationsgesellschaft vor 13 Jahren [1] angenommen hatte, sind die Ursachen und rechtfertigen eine moderate Steigerung der spezifischen Leistungsdichten.

Doch kann eine Leistungsdichte angegeben in Watt pro Quadratmeter unterschiedliche Qualitäten haben.

- 10 Glühbirnen à 100 Watt oder
- Ein Gerät mit 1250 VA und $\cos \phi$ 0.8 oder
- Ein Computer mit 1430 VA mit $\cos \phi$ 0.98 und PF 0.7 (verzerrte Last)

nehmen eine Wirkleistung von 1000W auf. Die Belastung der elektrischen Energieübertragungseinrichtungen werden aber auf grundlegend verschiedene Arten belastet. Da in den Geräten der Computertechnik vorwiegend primär getaktete Schaltnetzgeräte eingesetzt werden, sind die Lasten in den Data-Centers und Internethotels nicht linear.

Für die Auslegung von USV-Anlagen und Generatoren ist die Art der Blindleistung (Verzerrungsblindleistung oder Grundwellenblindleistung ausserordentlich wichtig. Die Beziehungen zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung können nach [2] wie in Abbildung 3: Leistungsdiagramm dargestellt werden. Diese Darstellung ist sehr anschaulich und ist korrekt wenn die Spannung als sinusförmig angesehen werden kann.

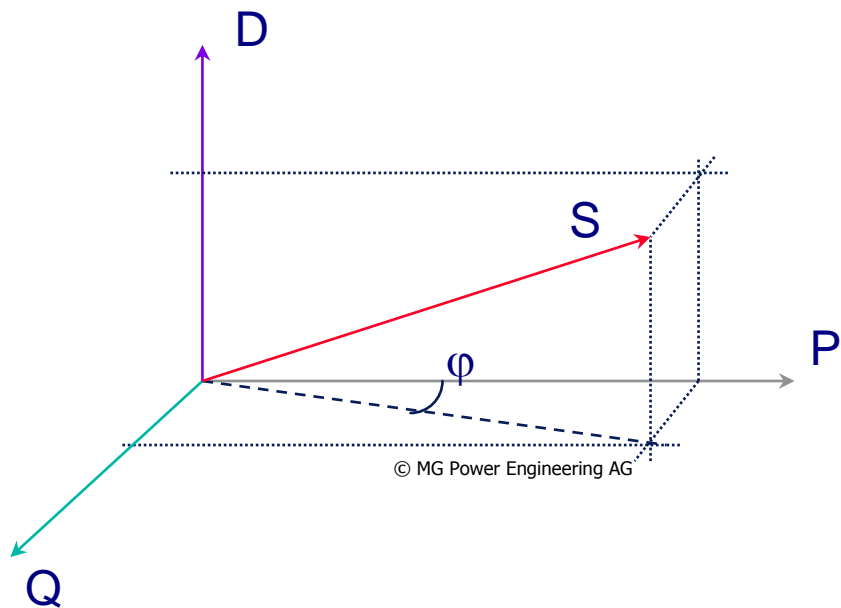


Abbildung 3: Leistungsdiagramm

Beispiel einer USV-Auslegung:

Geforderte Wirkleistung:	600 kW
Geforderte Redundanz:	100%
Auslegungsscheinleistung USV:	952 kVA
Anzahl USV Module à 500 kVA (kalk. Leistungsträger):	2 Stk.
Anzahl redundante Module:	2 Stk.
Total Anzahl Anlagen à 500 kVA	4 Stk.

Zu beachten ist besonders, dass der Blindleistungsbedarf verursacht durch die nicht linearen Lasten in den Rechenzentren erheblich ist. Es stellt sich daher berechtigt die Frage, ob ein solcher Betrieb noch wirtschaftlich ist oder ob mit entsprechenden leistungselektronischen Aktivfiltern die Oberschwingungsblindleistung kompensiert werden soll. Dazu kommt noch, dass die USV-Anlagen bei zu knapper Dimensionierung grosse Spannungsverzerrungen am Ausgang erzeugen. Zu gross ausgelegte Anlagen verursachen hohe Opportunitätskosten¹ in Folge hoher Verluste (welche mit Energieaufwand abgeführt werden müssen) und nicht optimal investiertem Kapital, welches in kurzer Zeit abgeschrieben werden muss.

Die Auslegung einer USV-Versorgung mit derart divergierenden Anforderungen erfordert ausgeklügelte Tools, denn die Maximierung eines Kriterium führt oft zur Verschlechterung eines anderen.

Nichtlineare Lasten welche nach EN 50091 bis zu 100% verzerrt sind, stellen keine Seltenheit dar. Schaltnetzgeräte verursachen fast keine Winkelverschiebung zwischen Strom und Spannung, daher wird der $\cos \varphi$ praktisch 1. USV-Anlagen sind oft nicht hierfür ausgelegt. Der Wechselrichter wird normalerweise für

¹ Opportunitätskosten sind Kosten welche durch die nicht optimale Wahl oder durch eine nicht wahrgenommene Gelegenheit entstehen.

einen $\cos \varphi = 0.9$ ausgelegt. Die Abbildung 4: Vektordiagramm Wechselrichterlast zeigt, dass die IGBT's überlastet werden können, wenn der $\cos \varphi$ gegen 1 geht. Der maximale Laststrom muss demnach als Funktion des DPF betrachtet werden.

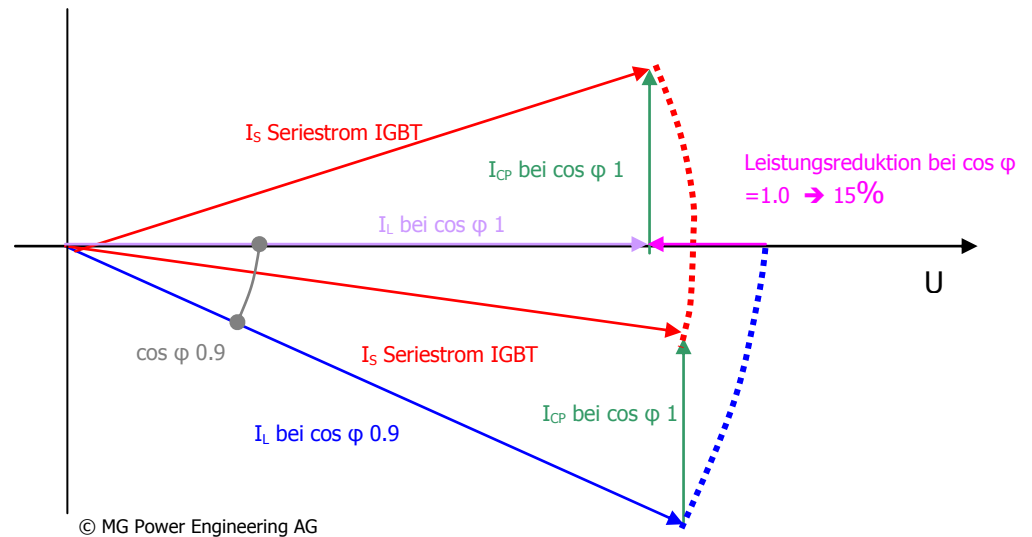


Abbildung 4: Vektordiagramm Wechselrichterlast

Für Telekommunikationseinrichtungen werden Gleichstromversorgungen mit nur 48 Volt Spannung benötigt. Entsprechend sind für 100 kW etwa 2000 Ampere notwendig. Diese Anlagen müssen entsprechend den kundenseitigen Anforderungen für Autonomiezeiten von sechs bis acht Stunden gebaut werden. Dazu sind ca. 30 Tonnen Batterien notwendig. Und das obwohl auch eine Dieselnotstromanlage gefordert wird, welche ja nach einer kurzen Unterbrechung die Stromversorgung für die 48 Volt-Gleichrichter und die Klimaanlage wieder sicherstellt. Die Batterieanlage stellt keine echte Redundanz zu der Netzersatzanlage dar, da während eines Netzausfalles und gleichzeitiger Störung des Dieselaggregates die Klimaanlage nicht versorgt ist. Je nach Last und thermischer Zeitkonstante der Räumlichkeiten steigt in einem solchen Falle die Temperatur ohne Klimatisierung in 10 bis 15 Minuten auf unzulässige Werte an. Das führt dazu dass die Systemräume weit vor der Entladung der Batterien nicht mehr betreibbar sind.

Zweckmässigkeit solcher Anforderungen

Oft werden uns als Planungsgrundlage Konzepte oder Konzeptfragmente vorgelegt, welche andernorts in Europa oder Übersee erfolgreich eingesetzt wurden. Um die Zweckmässigkeit eines Konzeptimportes diskutieren zu können, müssen einige grundsätzliche Gegebenheiten dargelegt werden: Wir befinden uns mitten in Europa, da wo die grösste Kraftwerksdichte und die grösste Vernetzungsdichte herrschen.

In der Schweiz ist es üblich, dass nicht mehr als zwei Transformatoren mit 1000 kVA Leistung parallel geschaltet werden. Damit bleibt der Kurzschlussstrom in etwa unter 50 kA. Wenn aber gefordert wird dass 4000 kVA Trafos eingesetzt werden, so sind erheblich viel teurere Schaltgeräte(kombinationen) notwendig. Ausserdem muss bei solchen Transformatoren die Kurzschlussspannung derart hoch ausgelegt werden, dass jener physikalisch im Netz fast wie eine Drosselpule daherkommt. Damit wird die Kurzschlussleistung auf der Niederspannungsseite in einem wirtschaftlich einigermaßen sinnvollen Rahmen gehalten. Dadurch nimmt aber die Spannungsbeeinflussung durch Oberschwingungen relativ zu, da das Verhältnis Kurzschlussleistung zu USV Leistung [3] geringer wird.

Besser wäre wenn die Stromversorgung systematisch geteilt wird, und zwar so, dass auch das Schadensausmass geteilt wird, was die entscheidenden Vorteile bringt:

- Geringere Kurzschlussleistungen (tiefere Investitionskosten)
- Grösseres Verhältnis Kurzschlussleistung/Trafoleistung (geringere Netzurückwirkungen)
- Geringeres Ausfallrisiko (Teilausfall führt zu geringerem Schadensausmass)
- Modularer, etappenweiser Ausbau besser möglich. (adäquate Investitionsvolumen)

Dazu sollte bei der Projektierung als Grundlage für das entstehende Konzept ein Verfügbarkeitsblockdiagramm erstellt werden. Darin muss die Klimaanlage und die Klimasteuerung genauso Niederschlag finden wie die Installation in den Systemräumen selbst. Nur so können Redundanzen effektiv eingesetzt werden.

Projektierungstücken und Bauleitungsgefahren

Bei der Planung sind Netzurückwirkungen und Kurzschlussverhalten genau zu planen. Mit der Auslegung der Kurzschlussleistung wird neben den Netzurückwirkungen auch die Verfügbarkeit beeinflusst. Das hat dann wieder Einfluss auf die Art und Einstellung der Leistungsschalter.

Grosses Optimierungspotential ist besonders auch bei der Auslegung der Kühlung und Lüftung der USV-Anlagen und Batterien vorhanden. Bei Notstromanlagen kann nicht ohne weiteres die Verantwortung an den Lieferanten delegiert werden, wenn es darum geht die Lärmschutzverordnung einzuhalten, oder den Wärmehaushalt zu optimieren, oder Beeinflussungen anderer Anlagen oder Geräte zu vermeiden. Alle anlagenspezifischen Daten fliessen dann in einen Layoutplan ein, welcher die Grundlage für die Koordination mit anderen Gewerken und für den Bau der Anlagen ist.

Die Fachbauleitung koordiniert die Einbringung der Anlagen, Überprüft Transportwege auf Abmessungen und Tragfähigkeit. Oft müssen die Anlagen unter enormem Zeitdruck installiert werden. Gefährlich wird es besonders dann, wenn die ersten Anlagen eingeschaltet werden müssen, obschon noch andere

Bauhandwerker arbeiten und noch nicht alle Türen vorhanden sind. Neben der Gefahr eines elektrischen Schlages besteht bei solchen Anlagen auch die Gefahr von sehr starken und nachhaltigen Verbrennungen, verursacht durch Kurzschlussströme welche teilweise Werte über 50 kA annehmen können. Der grosse Anteil schlecht oder gar nicht ausgebildetem Personal auf heutigen Baustellen verschärft die Situation zusätzlich. Die Fachbauleitung ist verantwortlich, dass die Gesamtsicherheit gewährleistet ist. Sie haftet für ihr Tun und Unterlassen privatrechtlich² als Vertreter der Bauherrschaft (OR 58) und strafrechtlich (StGB 270).

Wenn die Anlagen in Betrieb gehen ist der Werkeigentümer dazu verpflichtet ein Sicherheitskonzept auszuarbeiten (StV 12). Darüber hinaus ist es m. E. sinnvoll bei hochverfügbaren Anlagen nicht nur die Sicherheit auf Personen und Sachschaden zu untersuchen, sondern auch den störungsfreien Betrieb im Konzept zu erfassen. Beratung und Schulung in solchen Konzepten erfordert spezifisches Wissen und Erfahrung über Starkstromanlagen und deren effizienten Betrieb.

Ausblick und Optimierungspotential

Die Optimierung divergierender Anforderungen wie etwa Verfügbarkeit, Ausbaubarkeit und Energieverbrauch erfordern ein spezifisches Erfahrungswissen, gut entwickelte PC-basierende Planungstools. Die Forderungen nach immer kürzeren Realisierungsterminen verlangen vom Elektroingenieur zunehmend, dass er über genügend Datenmaterial, konsolidiert in adäquaten Berechnungstools, verfügbar hat. Zeiteinsparungen, gewonnen aus ungenügend ausgearbeiteten Standardaus-schreibungen von bestimmten Herstellern oder aus dem gänzlichen Verzicht auf eine Spezifikation, rächen sich oft bei Streitigkeiten in Ausführungsdetails und beim Auswerten der Offerten, wenn Äpfel mit Birnen verglichen werden müssen.

Es lohnt sich – sei es als Bauherr oder als Elektroplaner – einen Elektroingenieur zu engagieren, welcher ein fundiertes und praxiserprobtes Fachwissen vorweisen kann. Dabei kommt es nicht darauf an, dass er seit 30 Jahren Elektroplanung betreibt und alle drei bis vier Jahre eine grössere Energieversorgung projektiert, sondern, dass er alle Jahre zwei bis fünf Anlagen selbst projektiert, ausschreibt und die detaillierte Ausführungsplanung erstellt und eine kompetente Fachbauleitung mit Kostenkontrolle und Inbetriebsetzung anbieten kann.

Dass ein solcher Ingenieur nicht der billigste sein kann liegt auf der Hand, denn die Halbwertszeiten seines Wissens betragen nur wenige Jahre. Daher muss er sich auch ständig weiterbilden, Planungshilfen entwickeln und die Planungsverfahren laufend optimieren um noch schneller zu guten Lösungen zu kommen. Bestimmt ist er aber der günstigste. Denn was kann der zentralere Fokus sein als die Kundenzufriedenheit.

² Die Fachbauleitung vertritt den Bauherr als Werkeigentümer

Abkürzungen und Glossarium

DPF	=	Displacement Power Faktor entspricht dem $\cos \varphi$
PF oder auch TPF	=	Total Power Factor entspricht dem Verhältnis aus Wirk- und Scheinleistung
IGBT	=	Insulated Gate Bipolar Transistor (Halbleiterbauelemente des Wechselrichterleistungsteils)
Statischer Schalter		Gerät zur (fast) unterbrechungsfreien Umschaltung von Lasten. Besteht prinzipiell aus zwei Thyristorschaltern vergleichbar mit einem Statischen Bypassschalter einer USV-Anlage.

Quellen:

- 1 **Tages-Anzeiger**; 28.03.2001; Seite 42, Strombedarf des Internets
- 2 **Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty**; 1996; McGraw-Hill, Electrical Power Systems Quality; Seite 132 f
- 3 **VSE und VEÖ (gemeinsame Hrsg.)**; 1995; Empfehlung für die Beurteilung von Netzurückwirkungen

Autor:

Markus Gehrig
Dipl. El. Ing. TS/REG B
MG Power Engineering AG
Strehlgasse 32, 8600 Dübendorf
Telefon: 044 882 17 18
Telefax: 044 882 17 19
Internet: www.power-engineering.ch
E-mail: m.gehrig@power-engineering.ch