

# Notstromversorgung in Krankenhäusern und Rechenzentren

**EXPERTEN SIND GEFRAGT** Fällt in einem Krankenhaus die Spannung an einem oder mehreren Außenleitern der Hauptverteilung der allgemeinen Stromversorgung über einen Zeitraum von mehr als 0,5s auf weniger als 90% der Netznominalspannung ab, muss nach DIN VDE 0100 Teil 710 selbsttätig und automatisch auf die Stromversorgung für Sicherheitszwecke umgeschaltet werden. In Rechenzentren existieren vergleichbare Anforderungen.



## AUF EINEN BLICK

**MESSUNGEN FÜR DEN ERNSTFALL** Die Autoren gehen zunächst kurz auf die Grundlagen der automatischen Stromversorgung für Sicherheitszwecke ein und erläutern danach Messungen, die sie in einem Krankenhaus und einem Rechenzentrum durchführten

**QUALIFIZIERTE MESSUNG** Die erforderliche Messtechnik muss Spannungen, Ströme, Leistungen und Frequenz mit einer hohen Auflösung von 10-ms-Effektivwerten erfassen können

kolbenverbrennungsmotoren (in der Regel Dieselmotoren) also Notstromdieselaggregate. Diese stellen ein Gebilde dar, das aus einem Dieselantrieb und einem Schenkelpol-synchrongenerator besteht. Der Dieselmotor und der Synchrongenerator erzeugen gemeinsam Wirkleistung. Der Synchrongenerator erzeugt außerdem Blindleistung. Die Spannungskonstanz hängt vom Spannungsregler, die Frequenzkonstanz vom Drehzahlregler und die Verhaltensweise bei überschwingungsbehafteter Last von der Dämpferwicklung ab.



Quelle: Blum / Sofic

**Bild 1:** Messaufbau mit Netzanalysator »PQ-Box 100« von Fa. A-Eberle GmbH & Co. KG an 500-kVA-Notstromdieselaggregat bei der Werksabnahme

Die erforderliche Umschaltung muss in der Energieflussrichtung betrachtet in der Hauptverteilungsebene hinter den einspeisenden Transformatoren und Spannungsquellen für Sicherheitszwecke erfolgen. Sie muss sicherstellen, dass die elektrischen Einrichtungen für Sicherheitszwecke innerhalb von 15s mit einer sicheren Spannungsquelle zur Versorgung von 24h verbunden sind. Eine Verringerung der Betriebsdauer von 24h auf 3h ist nur dann zulässig, wenn die medizinischen Behandlungen und Untersuchungen der Patienten ohne Gefahr für diese beendet

werden können und sich das Krankenhaus sicher evakuieren lässt.

## Sichere Spannungsquelle für Sicherheitszwecke

Elektrische Einrichtungen für Sicherheitszwecke in Krankenhäusern dienen dem Abwenden von Gefahren, der Brandbekämpfung sowie der Personenrettung. Gemeint sind die folgenden Anlagen:

- Sicherheitsbeleuchtung
- Bettenaufzüge
- Feuerwehraufzüge
- Brandmeldeanlagen
- Alarmierungsanlagen
- Wasserdruckerhöhungsanlagen zur Löschwasserversorgung
- elektrische Anlagen der medizinischen Gasversorgung einschließlich Druckluft
- Vakuumversorgung und Narkoseabsaugung und deren Überwachungsanlagen
- OP-Leuchten und medizinische Geräte im Bereich der Gruppe 2 und
- Entrauchungsanlagen.

Die genannte sichere Spannungsquelle für Sicherheitszwecke sind in Krankenhäusern die Stromerzeugungsaggregate mit Hub-

## Anforderungen an den Betrieb

Ein Notstromdieselaggregat sollte in der Lage sein, innerhalb von 15s mindestens 80% seiner Bemessungsscheinleistung bei einem Verschiebungsfaktor der Grundschwingung  $\cos \varphi = 0,8$  in maximal zwei Stufen zu erbringen. Den Rest von 20% seiner Bemessungsscheinleistung sollte es innerhalb weiterer 5s liefern.

Die Anforderungen hinsichtlich Spannungs- und Frequenzkonstanz der meisten elektrischen Verbrauchsmittel, die in Krankenhäusern eingesetzt werden, entsprechen den Verhältnissen, die während der Speisung aus der allgemeinen Stromversorgung, d. h. aus dem öffentlichen Netz, herrschen.

Bei der Versorgung eines Krankenhauses aus dem öffentlichen Netz steht das Verbundnetz im Verbundbetrieb mit dem Parallelbetrieb aller Kraftwerke bzw. aller Synchrongeneratoren in allen Kraftwerken zur Verfügung.

## Beachtung wichtiger Netzparameter

Laständerungen in Form von Zu- bzw. Abschaltungen großer Lasten in NS-Netzen

beeinflussen in der Regel kaum die Frequenz und die Spannung im Verbundbetrieb. Laständerungen werden nämlich im Verbundbetrieb auf viele Kraftwerke und ihre Synchrongeneratoren aufgeteilt und stellen für eine einzige Einheit keine merkliche Beanspruchung dar. Im Verbundnetz steht in der Regel eine sehr hohe Kurzschlusswechselstromleistung als Garant für hohe Spannungskonstanz zur Verfügung. Bei der Versorgung aus dem öffentlichen Netz wird die Kurzschluss-Wechselstromleistung hauptsächlich durch die Impedanz des einspeisenden Transformators begrenzt.

Eine Laständerung in Höhe der Bemessungsscheinleistung des einspeisenden Transformators ruft an den Transformatorklemmen einen Spannungsfall hervor, der maximal bis zum Bemessungswert seiner relativen Kurzschlussspannung betragen kann. Er hängt vom Effektivwert des Differenzlaststromes, der Transformatorresistenz, der induktiven Transformatorreaktanz bzw. dem Impedanzwinkel des Transformators und dem Lastwinkel der Belastung ab.

Bei einem geeigneten elektrischen Anschluss – in Form einer eigenen Transformatorstation – des Krankenhauses an das öffentliche Netz, können die Anforderungen an die hohe Frequenz- und Spannungsstabilität meistens problemlos realisiert werden.

### Anforderungen an den Generator

Bei Ausfall der allgemeinen Stromversorgung des Krankenhauses muss das Notstromdieselaggregat selbsttätig und automatisch die Versorgung der Anlagen für Sicherheitszwecke übernehmen und einen stabilen Inselnotstrombetrieb gewährleisten.

Im Inselnotstrombetrieb stellt das Notstromdieselaggregat aber die alleinige Spannungsquelle dar. Seine Antriebsmaschine wird mit Laständerungen konfrontiert, die bezogen auf ihre Bemessungsleistung verhältnismäßig groß sind. Sie können somit starke Frequenz- bzw. Spannungsschwankungen sowie Spannungseinbrüche verursachen.

Der im Generatorinselbetrieb hervorgerufene Spannungsfall an den Generator-Statorklemmen als Folge der Laständerung in Höhe der Generatorbemessungsscheinleistung hängt vom Effektivwert des Differenzlaststromes, der Statorresistenz, der induktiven transienten Reaktanz bzw. dem Winkel der transienten Generatorimpedanz und dem Lastwinkel der Belastung ab. Er kann dreimal größer sein als bei einem leistungsgleichen Verteilungstrans-



**Bild 2:** Aufschalten von 60 % (ohmsch-induktiv  $\cos \varphi = 0,8$ ) der Bemessungsscheinleistung des 500 kVA-Notstromdieselaggregates bei der Werksabnahme

formator. Das Notstromdieselaggregat muss hinsichtlich folgender Parameter ausgelegt werden:

- maximale Dauerverbraucherleistung
- maximale Zuschaltleistung
- erforderliche Ausführungsklasse
- statische und dynamische elektrische Betriebsgrenzwerte
- subtransiente, transiente und Dauerbemessungs-Kurzschluss-Wechselstromleistung
- Verhalten bei Überlast und Kurzschluss
- Verhalten bei Parallelbetrieb mit dem Netz sowie im Generatorinselbetrieb
- Verhalten bei Belastung durch ober-schwingungsbehaftete Lasten.

Eine auf den Verschiebungsfaktor der Grundschwingung bezogene Scheinleistungsdimensionierung garantiert, dass im Generatorinselbetrieb jede Laständerung lediglich nur eine vorübergehende Drehzahländerung des Dieselantriebes bzw. eine vorübergehende Frequenzänderung sowie eine vorübergehende Änderung der Generatorspannung darstellt. Hierbei werden dann auch die dynamischen elektrischen Betriebsgrenzwerte eingehalten.

### Netzschutz und Oberschwingungen

Die erfolgreiche selektive Löschung/Ab-schaltung von Kurzschlüssen, die normativ nach der DIN VDE 0100-710 gefordert wird, kann bei der fachgerechten Berücksichtigung der genannten Kurzschluss-Wechselstromleistungen mittels richtig dimensionierten Netzschutzes sichergestellt werden. Oft ist hierfür allerdings eine Überdimensionierung des Dieselantriebes und des Synchrongenerators erforderlich.

Selbst wenn das Notstromdieselaggregat bezüglich seiner Bemessungswirkleistung überdimensioniert ist, kann sich im Generatorinselbetrieb herausstellen, dass der Oberschwingungsgehalt in der Generatorspannung

auf Grund der zu versorgenden elektronischen Lasten – z. B. drehzahleregelte Antriebe, BSV-Anlagen, USV-Anlagen, Energiesparlampen, Büroelektronik etc. – so groß ist, dass die zulässigen Verträglichkeitspegel der relativen Spannungsharmonischen erheblich überschritten werden. Es kann dabei zu Funktionsstörungen der Geräte bzw. zum Totalausfall kommen.

Ob das projektierte Notstromdieselaggregat den in der Planungsphase gestellten Anforderungen gerecht ist, muss durch entsprechende messtechnische Untersuchungen verifiziert werden. Die Messungen sollten sowohl bei der Werksabnahme im Werk des Notstromdieselaggregatherstellers als auch am Aufstellungsort im Krankenhaus vorgenommen werden.

In den nachfolgenden Abschnitten stellen wir einige Merkmale aus vier kürzlich durchgeführten Messungen vor. Für solche messtechnischen Netzuntersuchungen sind leistungsfähige Netzqualitätsanalytoren notwendig. Die qualifizierte Auswertung der Messergebnisse erfordert hohes Verständnis der aufgezeichneten physikalischen Messgrößen und Ereignisse.

### Prüfung eines Notstromdieselaggregates beim Hersteller

Um im Krankenhaus später während des Generatorinselbetriebs keine bösen Überraschungen zu erleben, beginnen die Messungen schon bei der Werksabnahme (**Bild 1**). Neben der Notstromsteuerung wird auch das Einhalten der zulässigen statischen und dynamischen elektrischen Grenzwerte sowie des zulässigen Oberschwingungsgehaltes der Generatorspannung messtechnisch überprüft und nachgewiesen.

**Bild 2** stellt die Spannungen der einzelnen Phasen und die Frequenz dar. Nach dem Aufschalten von 60 % der Bemessungsscheinleistung (ohmsch-induktiv mit  $\cos \varphi = 0,8$ ) des 500-kVA-Notstromdieselaggregates

bricht die Spannung zuerst auf 201 V ein und nach kurzzeitiger Schwingung weiter auf 193 V. Danach schwingt sie auf einen Maximalwert von 237 V. Nach einer Zeitdauer von ca. 1,7 s hat sich der Spannungsschwingvorgang beruhigt und die Spannungen sind stabil.

Die Frequenz bricht von 50 Hz auf 45,4 Hz ein und schwingt auf 49,4 Hz ein. Nach einem Zeitfenster von ca. 4,2 s hat sich der Frequenzschwingvorgang beruhigt und die Frequenz ist stabil.

Für diese Messungen eignet sich z. B. der im Bild 1 dargestellte 10-ms-Effektivwertrekorder besonders gut. Zusätzlich zu den Spannungen und Strömen werden auch die Frequenz, die Wirk-, Blind- und Scheinleistung mit einer hohen Auflösung von 10 ms bei Effektivwerten aufgezeichnet. Die Aufzeichnungsdauer kann bis zu 120 s betragen. Wobei Vor- und Nachgeschichte des Ausdrucks frei einstellbar sind.

Das Notstromdieselaggregat hat hierbei die gemäß DIN 6280-13 (Anwendungsbereich 1 für medizinisch genutzte Einrichtungen) geforderten dynamischen elektrischen Betriebsgrenzwerte für die **Frequenz**

knapp eingehalten. Die geforderten dynamischen elektrischen Betriebsgrenzwerte für die **Spannung** konnten trotz der zeitlich korrekten Nachregelung nicht eingehalten werden.

### Prüfung im Krankenhaus bei Stern-Anlauf einer Sprinkleranlage

In der Projekt-Planungsphase eines anderen Krankenhauses sollte für den Anlauf einer in diesem Gebäude installierten 75-kW-Sprinkleranlage die rechnerische Abschätzung der Spannungsänderung am Sammelschienensystem der Niederspannungshauptverteilung für Sicherheitsstromversorgung (NSHV-SV) vorgenommen werden. Betrachtet wurde dieser Anlauf sowohl im Netzbetrieb (Parallelbetrieb von zwei Transformatoren mit je 800 kVA/6 %) als auch im 500-kVA-Generatorinselbetrieb. Es wurden dazu die technischen Regeln des VDN herangezogen und eine symmetrische Belastung vorausgesetzt.

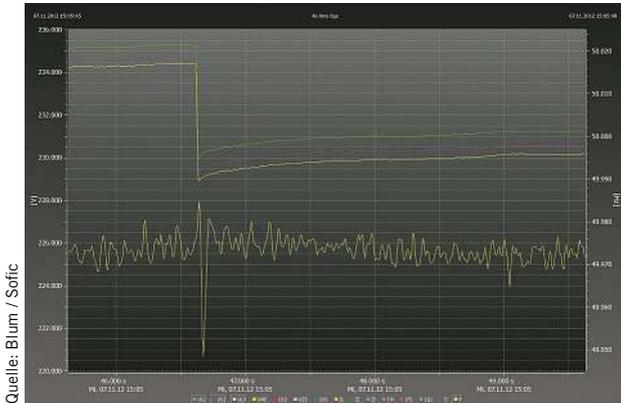
Es ergab sich rechnerisch ein relativer Spannungsfall für den Netzbetrieb von 1,95 % bei einer Kurzschluss-Wechselstrom-Scheinleistung von 19,2 MVA. Für den Generatorinselbetrieb ergab sich rechnerisch ein

relativer Spannungsfall von 15,39 % bei einer Kurzschluss-Wechselstrom-Scheinleistung von 2,39 MVA.

Nach der Fertigstellung des Projektes wurde der Anlauf der 75-kW-Sprinkleranlage messtechnisch getestet. Zuerst wurde hierzu der Anlauf bei Versorgung aus dem Netz durch zwei parallel betriebene Transformatoren je 800 kVA/6 % vorgenommen. Das **Bild 3** dokumentiert die relativen Spannungsfälle der einzelnen Phasen. Diese lagen bei 2,29 % (L1), 2,48 % (L2) und 2,37 % (L3).

Danach wurde das Netz abgeschaltet und der Anlauf mit Speisung aus dem 500-kVA-Notstromdieselaggregat aufgezeichnet. Dabei erfolgte die Zuschaltung der Sprinkleranlage beim leerlaufenden Generator ohne Vorbelastung. In diesem Generatorinselbetrieb wurden die relativen Spannungsfälle der einzelnen Phasen von 16,2 % (L1), 16,87 % (L2) und 16,96 % (L3) registriert und festgehalten (**Bild 4**). Diese Aufzeichnungen beziehen sich nur auf den Stern-Anlauf.

Die Aufzeichnungen wurden mit der PQ-Box 100 am gleichen Messpunkt nämlich in der NSHV-SV durchgeführt und zwar gleich



**Bild 3:** Stern-Anlauf einer 75-kW-Sprinkleranlage im Netzbetrieb (zwei Transformatoren mit je 800kVA / 6 % )



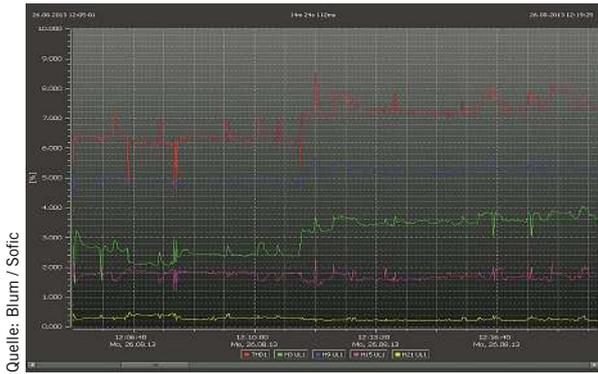
**Bild 4:** Stern-Anlauf der 75-kW-Sprinkleranlage im Notstrombetrieb (ein 500kVA-Notstromdieselaggregat)



**Bild 5:** Messaufbau zur Aufzeichnung der OS-Belastungen an der NSHV-SV im Netz- und Notstrominselbetrieb



**Bild 6:** THDu, Uh3; Uh9, Uh15 und Uh21 von L1 an der NSHV-SV im Netzbetrieb (drei Transformatoren mit je 1 000kVA/6 % )



**Bild 7:** THDu, Uh3; Uh9, Uh15 und Uh21 von L1 an der NSHV-SV im Notstrominselbetrieb (400-kVA-Notstromdieselaggregat)



**Bild 8:** Umschaltung einer USV-Anlage vom Netz auf eine NEA in einem Rechenzentrum

hinten den Sicherungen am Anfang der Zuleitung des Sprinklerschaltzschranke.

Die gravierenden Unterschiede der Frequenz- und Spannungsverhältnisse sind leicht erkennbar und eindeutig. Die Aufzeichnungen der Umschaltung von Stern auf Dreieck der 75-kW-Sprinklerpumpe der beiden Versorgungsbetriebsarten, welche ebenso erfasst wurden, werden hierbei nicht diskutiert.

### Blackout-Test im Krankenhaus – Simulation eines echten Ausfalls

In einem weiteren Krankenhaus wurde ein Blackout-Test vorgenommen, um bei einem echten Ausfall der allgemeinen Stromversorgung neben der Wirksamkeit der Umschaltung vom Netz- auf den Generatorinselbetrieb samt aller zugehörigen Merkmale auch die Spannungsqualität zu erkunden. In unseren weiteren Ausführungen gehen wir in diesem Zusammenhang nur auf die Spannungsqualität ein.

Im **Bild 5** ist der Messaufbau innerhalb der NSHV-SV zu sehen. Die Aufzeichnungen wurden mit zwei PQ-Boxen 100 vorgenommen, um sowohl den Energiefluss aus dem Netz als auch aus dem Generator zu erfassen. Aufgezeichnet wurde zuerst die Spannungsqualität am Sammelschienensystem der NSHV-SV bei der Speisung aus der allgemeinen Stromversorgung durch drei parallel betriebene Verteilungstransformatoren von je 1000kVA/6%. Danach wurde die allgemeine Stromversorgung abgeschaltet und das vorhandene 400-kVA-Notstromdieselaggregat übernahm die Versorgung der NSHV-SV im Generatorinselbetrieb.

Im **Bild 6** sind der THD-Wert sowie die Werte der relativen Spannungsharmonischen der Ordnungen 3, 9, 15 und 21 der Netzspannung an der NSHV-SV während der Versorgung aus der allgemeinen Stromversorgung aufgezeichnet.

Im **Bild 7** sind der THD-Wert sowie die Werte der relativen Spannungsharmonischen der Ordnungen 3, 9, 15, und 21 der Spannung an der NSHV-SV während der Versorgung aus dem Notstromdieselaggregat aufgezeichnet.

### Auswertung der Messergebnisse

Der kräftige Anstieg der Oberschwingungsbelastung der Generatorspannung ist eindeutig erkennbar. Die Bewertung der Oberschwingungsbelastung wurde gemäß EN 61000-2-4 class 2 bzw. VDE 0839-2-4 EMV-Umgebungsclass 2 durchgeführt.

Im Netzbetrieb liegen die Verträglichkeitspegel der genannten Oberschwingungen deutlich unter den zulässigen Pegeln. Im Generatorinselbetrieb wurden deutliche Überschreitungen der zulässigen Verträglichkeitspegel der Oberschwingungen in der Spannung bei den Ordnungen 9, 15 und 21 erfasst.

### Speisungsumschaltung einer USV-Anlage im Rechenzentrum

Viele moderne Rechenzentren verfügen über Netzersatzanlagen und statische USV-Anlagen. Auf Grund des in der Regel schlechten Leistungsverhältnisses der Netzersatzanlage (NEA) zur USV treten in diesem Umfeld oft massive Probleme und schwerwiegende Wechselwirkungen in deren Zusammenarbeit auf. In diesem Beitrag wollen wir zum Abschluss hier noch auf den Fall der Speisungsumschaltung einer USV-Anlage vom Netz auf eine NEA innerhalb eines Rechenzentrums eingehen (**Bild 8**). In diesem Beispiel wurde im betreffenden Rechenzentrum eine Netzersatzanlage unter realen Bedingungen mit einer USV-Anlage während eines Netzausfalls getestet.

In der Aufzeichnung kann man sehr deutlich das gegenläufige Schwingen des Netzes auf den Spannungen und der Frequenz erkennen. Zum Frequenzmaximum liegen die

Spannungen auf ihrem Minimum. Nach einigen Sekunden wurde das Aggregat durch ein Schutzrelais vom Netz getrennt.

Zunächst konnte das Aggregat zwar die geforderte Leistung liefern und war groß genug dimensioniert. Dennoch führten die starken Schwankungen der Spannung und Frequenz zu einem Auslösen des Schutzrelais, welches die komplette Anlage abschaltete.

### Fazit

Vor bösen Überraschungen schützen nur die entsprechende fachgerechte Projektierung sowie qualifizierte Messung. Die erforderliche Messtechnik muss verschiedene Anforderungen erfüllen. So sind Spannungen, Ströme, Leistungen und Frequenz mit einer hohen Auflösung von 10-ms-Effektivwerten zu erfassen. Eine Mittelwertbildung über 200ms oder 1s würde diese Netzschwankungen nicht mehr erkennen lassen.

Abweichungen der Sinusform und Spannungstransienten können mit Oszilloskopbildern festgehalten werden. Über vielfältige Triggermöglichkeiten wie ein Sinus-Hüllkurventrigger lassen sich noch weitere Informationen zur Störung bereitstellen.

### AUTOREN

**Jürgen Blum**  
Produktmanager Power-Quality,  
A-Eberle GmbH & Co. KG, Nürnberg

**Dragan Sofic**  
Netzberechnung, Planung, Netzanalyse  
EAB GmbH Rhein Main, Dietzenbach