

Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit als Standortfaktor

**Dr.-Ing.
Serafin von Roon**

Geschäftsführer der
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH



Co-Autor:

Tim Buber, wissenschaftlicher Mitarbeiter der FfE GmbH

Abstract

Umfragen und Medienberichte im Jahr 2012 zeigten, dass deutsche Unternehmen sich zunehmend über die Qualität der Stromversorgung im Zuge der Energiewende sorgen. Die Bayerische IHK beauftragte die FfE GmbH daher, einen Leitfaden zu diesem Thema auf Basis von Gesprächen mit Unternehmen und Netzbetreibern zu erstellen. Der Vortrag stellt die zentralen Ergebnisse dieser Untersuchung vor.

Zunächst werden Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit definiert, deren Kennwerte und dazugehörigen Normen erläutert sowie Ursachen für mögliche Beeinträchtigungen aufgezeigt. Monitorings geben Aufschluss darüber, wo Deutschland im internationalen Vergleich steht und wie sich die Versorgungszuverlässigkeit über die letzten Jahre entwickelt hat. Explizit wird auf die Problematik der beim SAIDI (System Average Interruption Duration Index) nicht erfassten so genannten Kurzunterbrechungen eingegangen. Die Auswirkungen dieser Kurzunterbrechungen auf das produzierende Gewerbe werden anhand konkreter Fallbeispiele aus der Befragung aufgezeigt. Zum Abschluss des Vortrags werden Möglichkeiten dargestellt, diese Beeinträchtigungen mit dezentralen oder zentralen Ansätzen zu vermeiden.

1 Motivation

Störungen der Stromversorgung verursachen häufig sehr hohe Folgeschäden in Unternehmen. In aller Regel kann für diese Ausfälle niemand haftbar gemacht werden und die damit verbundenen Schäden wirken sich unmittelbar auf das Betriebsergebnis aus. Die vergleichsweise hohe Zuverlässigkeit der deutschen Stromnetze ist daher ein klarer Standortvorteil, der erhalten bleiben sollte.

Der Industrie- und Handelskammer wurde von Seiten ihrer Mitgliedsunternehmen von Sorgen berichtet, dass es aufgrund der Energiewende häufiger zu kurzen und längeren Versorgungsunterbrechungen kommen könnte. Vor diesem Hintergrund beauftragten die Industrie- und Handelskammern in Bayern die FfE GmbH eine Studie zur Versorgungszuverlässigkeit und -qualität zu erstellen. Die Untersuchung stützt sich auf Interviews mit einer Reihe von Unternehmen unterschiedlicher Branchen in Bayern und Verteilnetzbetreibern.

2 Versorgungsqualität

Die Güte der elektrischen Energie aus Sicht des Verbrauchers wird durch veränderliche Merkmale bestimmt. Von besonderer Bedeutung ist, dass die Versorgungsspannung eine konstante Frequenz, eine perfekte Sinus-Kurvenform und eine konstante Höhe hat. Die Qualität der Versorgungsspannung kann durch unterschiedliche Einflüsse beeinträchtigt werden und wird von jedem Netznutzer durch die Höhe der Leistungsnachfrage beeinflusst. Die Versorgungsspannung resultiert aus dem Zusammenwirken aller Komponenten eines Netzes. Schwankungen ergeben sich durch Änderungen der Höhe des Stromverbrauchs und dem Grad des zeitgleichen Zu- oder Abschaltens von Verbrauchern. Gründe für Beeinträchtigungen oder Unterbrechungen der Stromversorgung können auch in dem Versagen von Komponenten des Systems von Erzeugungs-, Übertragungs-, und Verteilanlagen liegen. Ursachen dafür sind unter anderem extreme Wetterbedingungen, Abnutzungs- und Alterungsprozesse sowie Störungen durch menschliche Eingriffe, Vögel oder andere Tiere. Das Versagen einzelner Komponenten kann sich entweder auf einzelne oder eine Vielzahl von Netznutzern auswirken. /DIN-03 11/

Die Netzfrequenz ergibt sich durch die Bilanz von Erzeugungsleistung und dem Strombedarf aller Netznutzer. Durch die Veränderung von Last und Erzeugungsleistung – insbesondere durch Störungen im Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilsystem – besteht jederzeit das Risiko eines unausgeglichenes Verhältnisses, welches sich durch Frequenzschwankungen auswirkt. Durch ein großes, übergeordnetes Verbundnetz können die Auswirkungen einzelner Störungen minimiert werden, wenn Änderungen im Verhältnis zur der gesamten Erzeugungsleistung gering sind. /DIN-03 11/

Während des Betriebs ist die Versorgungsspannung Änderungen unterworfen, die sich durch Lastschwankungen, Störeinflüsse von bestimmten Anlagen sowie durch Fehler (vorwiegend durch äußere Ereignisse) ergeben. Einige Störungen, werden durch unvermeidbare kurzzeitige Ereignisse im Versorgungsnetz selbst hervorgerufen. Diese Störungen beruhen auf Schalthandlungen oder atmosphärischen Erscheinungen, wie zum Beispiel Blitzschlag. Störende Effekte gehen von Verbrauchern aus, welche die Kurvenform der Spannung beeinflussen, die Höhe der Spannung ändern oder Signalspannungen der Spannung überlagern. /DIN-03 11/

Mit der gegenwärtigen Zunahme von Geräten, von denen solche negativen Effekte ausgehen, verstärken sich die Auswirkungen. Gleichzeitig ist auch eine Verbreitung von Anlagen zu verzeichnen, die empfindlich auf solche Störaussendungen reagieren. /DIN-03 11/ Verursacher sind zum Beispiel

Gleich- und Wechselrichter, Frequenzumrichter für Drehzahlregelungen, Lichtbogenöfen, Induktionsöfen, Schweißgeräte oder Netzteile. Sensible Anlagen sind zum Beispiel Kondensatoren, Stromrichter, Messtechnik, Smart Meter oder Anlagen mit empfindlicher Steuerungs- und Regelungstechnik.

Im Folgenden werden Merkmale der Versorgungsspannung beschrieben, wie sie gemäß der DIN EN 50160:2010 vom Februar 2011 an der Übergabestelle zum Netznutzer in öffentlichen Wechselstrom-Versorgungsnetzen im Spannungsbereich von 1 kV bis 36 kV zu erwarten sind. In dieser Norm wird zwischen kontinuierlichen Erscheinungen, die dauerhaft mit moderaten Änderungen auftreten, und plötzlichen Spannungsereignissen mit Änderungen im erheblichen Ausmaß unterschieden /DIN-03 11/.

Kontinuierliche Erscheinungen

Kontinuierliche Erscheinungen beschreiben Abweichungen vom Nennwert, die dauerhaft über die Zeit auftreten und überwiegend auf Lastmuster, Laständerungen oder nichtlineare Lasten zurückzuführen sind.

Die **Netzfrequenz** spiegelt das Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch im Verbundnetz wider. Der Nennwert der Frequenz der Versorgungsspannung muss 50 Hz betragen. Der 10-Sekunden-Mittelwert der Grundfrequenz muss in Netzen, die synchron an ein Verbundnetz angeschlossen sind – unter normalen Bedingungen – zu 99,5 % eines Jahres zwischen 49,5 Hz und 50,5 Hz liegen. Nach der DIN darf die Netzfrequenz nie die Marke von 47 Hz beziehungsweise 52 Hz unter- oder überschritten werden. Im Gebiet der ENTSO-E werden jedoch bereits wesentlich früher Maßnahmen zur Frequenzstützung ergriffen. Durch den Einsatz von Regelenergie können die Schwankungen deutlich unter den eingeräumten Toleranzen gehalten werden. Die Netzfrequenz wird durch Regelenergiekraftwerke im normalen Betrieb auf +/- 0,4 % ausgeregelt, bei Frequenzfehlern vom über +/- 1 % wird das Netz abgeschaltet. In dem Zeitraum von Juli 2011 bis Juli 2012 lagen der Maximalwert der Sekundenmittelwerte bei 50,16 Hz und der Minimalwert bei 49,85 Hz. /GOB-01 11/ Durch die rotierenden Massen der am Netz angeschlossenen Generatoren und Motoren weist der Verlauf keine sprunghaften Änderungen auf.

Als **Spannungsänderungen** werden langsame Änderungen der Bezugsspannung bezeichnet. Von dieser sollte unter normalen Bedingungen nicht um mehr als 10 % abgewichen werden. Eine Erhöhung oder Abnahme der Spannung wird üblicherweise durch Laständerungen hervorgerufen. Die geforderte Leistung im Hinblick auf Menge eines einzelnen Verbrauchers und Verstärkung durch zeitgleiche Laständerungen mehrerer Verbraucher ist nicht genau prognostizierbar und muss in gewissen Grenzen einkalkuliert werden.

Als **Flicker** werden kurzzeitige Spannungsschwankungen bezeichnet. Der Name rührt daher, dass diese Schwankungen vom menschlichen Auge durch eine Unstetigkeit der Leuchtdichte von Lampen wahrgenommen werden.

Oberschwingungen ergeben sich aus sinusförmigen Spannungen, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen der Grundschwingungsfrequenz der Versorgungsspannung entspricht, siehe **Abbildung 2-1**. Sie werden überwiegend durch nichtlineare Lasten der Verbraucher, deren Stromaufnahme nicht proportional zur Spannung ist, hervorgerufen und belasten das Versorgungsnetz, wenn sie an dieses angeschlossen sind. Sie werden zum Beispiel durch Lichtbogenöfen, Schweißgeräte oder Netzteile verursacht und können Kondensatoren, Stromrichter oder Messtechnik beeinflussen.

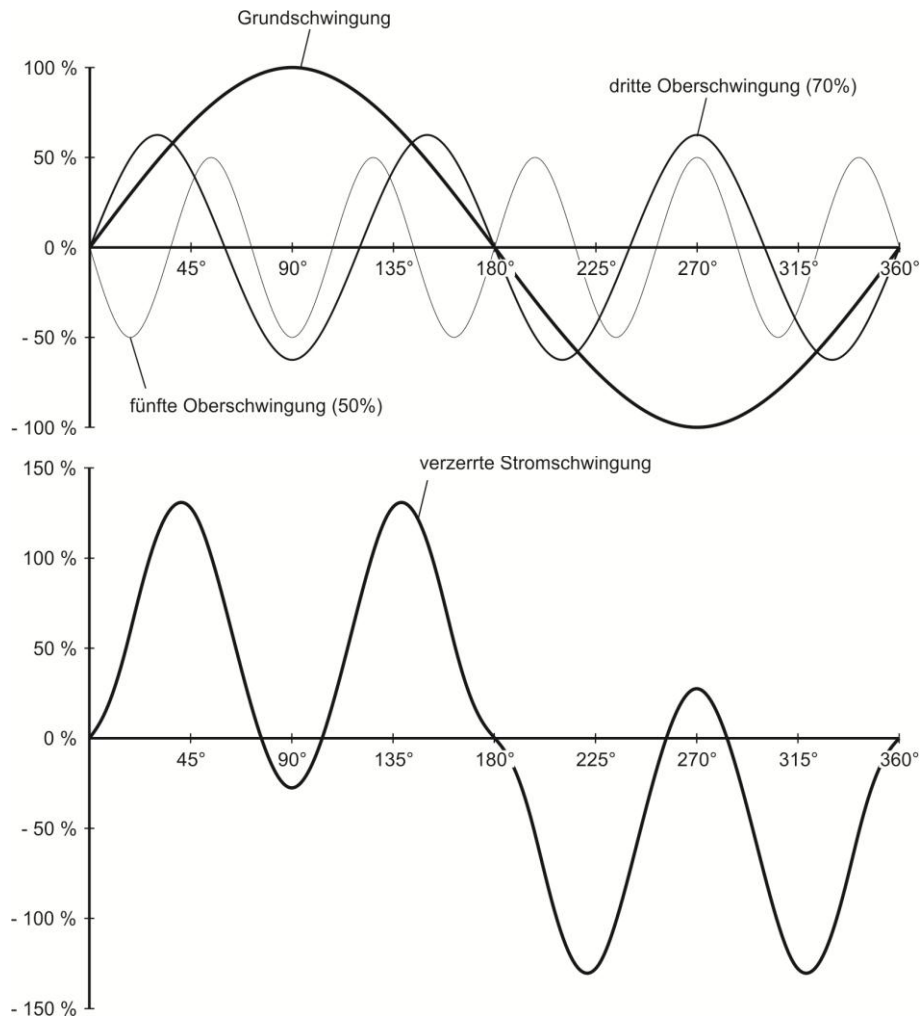


Abbildung 2-1: *Oberschwingungen und verzerrte Stromschwingungen, eigene Darstellung*

Spannungsereignisse

Spannungsereignisse sind plötzliche Abweichungen von der Nenn- oder Kurvenform in erheblichem Ausmaß. Gründe sind typischerweise unvorhersehbare Ereignisse oder die Einwirkung von äußeren Ursachen, wie zum Beispiel Wetterbedingungen oder Einwirkungen durch Dritte.

Unterbrechungen der Versorgungsspannung sind weitgehend unvorhersehbar und variieren hinsichtlich des Ortes und der Dauer. Repräsentative statistische Daten der Häufigkeit und Dauer von Kurzunterbrechungen der Versorgungsspannung liegen nicht vor. Die Dauer der überwiegenden Mehrzahl von kurzen Unterbrechungen dürfte erfahrungsgemäß weniger als einige Sekunden betragen.

Schnelle Änderungen der Versorgungsspannung werden als **Spannungseinbrüche** bzw. **Spannungsüberhöhungen** bezeichnet, wenn sie um mehr als 10 % von der Bezugsspannung abweichen. Sie werden meistens durch Laständerungen, einer bedeutenden Änderung der Leistungsaufnahme in Anlagen der Netznutzer, Schalthandlungen oder durch Fehler im Netz verursacht.

Als Spannungseinbruch wird ein schnelles Abfallen der Spannung auf oder unter eine Restspannung von 90 % der Bezugsspannung bezeichnet. Die Ursachen für Spannungseinbrüche sind typischerweise ein Kurzschluss und dessen Beendigung im Versorgungsnetz oder in Anlagen der Netznutzer. Die Dauer eines Spannungseinbruchs ist abhängig von der Schutzstrategie des Netzbereiches, die durch

die Netzstruktur und der Erdung des Neutralleiters beeinflusst wird. Die meisten Spannungseinbrüche dauern kürzer als eine Sekunde und unterschreiten 40 % der Bezugsspannung nicht. In Abhängigkeit von Lasten benachbarter Netznutzer können Spannungseinbrüche mit Restspannungen zwischen 90 % und 85 % der Bezugsspannung auftreten.

Als Spannungsüberhöhung wird ein schneller Anstieg der Spannung auf mindestens 110 % der Bezugsspannung bezeichnet. Die Auslöser von Spannungsüberhöhungen sind oftmals Schalthandlungen oder Lastabtrennungen.

Die Auswirkungen von Fehlerströmen im Mittelspannungsnetz hängen von der Art der Erdung des Netzes ab. In Netzen mit starr oder halbstarr geerdetem Neutralleiter darf die Bezugsspannung in der Regel nicht um 70 % überschritten werden. In Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation darf die Bezugsspannung bis zu 100 % überschritten werden.

Transiente Überspannungen bezeichnen kurzzeitige Überspannungen mit einer Dauer von einigen Millisekunden. Sie entstehen in der Regel in Folge von Schalthandlungen, dem Auslösen von Sicherungen oder durch Blitzeinschläge.

3 Versorgungszuverlässigkeit

Versorgungszuverlässigkeit beschreibt die Fähigkeit eines elektrischen Systems, seine Versorgungsaufgaben unter vorgegebenen Bedingungen während einer bestimmten Zeitspanne zu erfüllen. Die Versorgungszuverlässigkeit wird ausgedrückt durch Unterbrechungshäufigkeit, Unterbrechungsdauer und Nichtverfügbarkeit. Diese Kenngrößen sind international und europaweit abgestimmt und auf Kriterien ausgerichtet, die durch den Netzbetreiber beeinflusst werden können, damit diese als Grundlage für Qualitätsregulierung dienen können. Es werden allerdings nur Unterbrechungen erfasst, die länger als drei Minuten andauern. International einheitlich werden folgende drei Kennzahlen unterschieden /HAB-01 12/:

1. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)
2. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)
3. CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

Die mittlere Anzahl der Versorgungsunterbrechungen lässt sich über den SAIFI ausdrücken. Üblicherweise wird als Bezugsgröße für die Summe aller betroffenen Kunden je Versorgungsstörfall die Gesamtzahl der versorgten Kunden herangezogen. Die Berechnung des SAIFI erfolgt somit nach **Formel (1)**:

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum (\text{unterbrochene Kunden je Fall})}{\text{Gesamtzahl versorgter Kunden}} \left[\frac{1}{a} \right] \quad (1)$$

Wie lange im Mittel eine Versorgungsunterbrechung dauert, kann durch den SAIDI ausgedrückt werden. Dieser ergänzt die Berechnung des SAIFI im Zähler um den Faktor der Unterbrechungsdauer je Anlassfall. Somit ergibt sich **Formel (2)** für die Erhebung des SAIDI:

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum [(\text{unterbrochene Kunden je Fall}) \cdot (\text{Dauer je Fall})]}{\text{Gesamtzahl versorgter Kunden}} \left[\frac{\text{min}}{a} \right] \quad (2)$$

Die dritte wesentliche Kennzahl ist der CAIDI. Er beschreibt die durchschnittliche Unterbrechungsdauer je unterbrochenem Kunden. Der CAIDI - **Formel (3)** - berechnet sich, indem

man die Anzahl der betroffenen Kunden mit der Unterbrechungsdauer multipliziert und durch die Anzahl der betroffenen Kunden dividiert.

$$\text{CAIDI} = \frac{\sum [(\text{unterbrochene Kunden je Fall}) \cdot (\text{Dauer je Fall})]}{\sum (\text{unterbrochene Kunden je Fall})} \text{ [min]} \quad (3)$$

4 Monitoring der Versorgungszuverlässigkeit

Die Bundesnetzagentur veröffentlicht jährlich einen Monitoringbericht, welcher unter anderem die Entwicklungen in den verschiedenen Wertschöpfungsketten des Elektrizitätsmarkts dokumentiert, analysiert und bewertet. Ein Teil dieses Monitoringsberichts befasst sich mit der Versorgungssicherheit im deutschen Stromnetz.

Gemäß § 52 Energiewirtschaftsgesetz haben die Netzbetreiber der Bundesnetzagentur jährlich einen Bericht über die Versorgungsunterbrechungen des vergangenen Jahres vorzulegen. Dieser muss mindestens Zeitpunkt, Dauer, Ausmaß sowie Ursache der einzelnen Versorgungsunterbrechungen enthalten.

Im September 2012 hat die Bundesnetzagentur den SAIDI für 2011 veröffentlicht. Mit insgesamt 15,3 Minuten (12,7 Minuten in der Mittelspannung und 2,6 Minuten in der Niederspannung) liegt dieser leicht über dem Vorjahreswert, die Versorgungssicherheit hat sich folglich geringfügig verschlechtert /BNETZA-02 12/. Die SAIDI-Werte der letzten Jahre sind **Abbildung 4-1** – aufgeteilt nach Mittel- und Niederspannung – zu entnehmen. Es zeigt sich ein deutlicher Verbesserungstrend in den Jahren 2006 bis einschließlich 2008. Seit 2009 ist dann ein leichter Anstieg des SAIDI-Wertes zu verzeichnen. Auf den Mittelspannungsbereich entfällt in jedem Jahr mit 80 bis 90 % der größte Anteil am gesamten SAIDI.

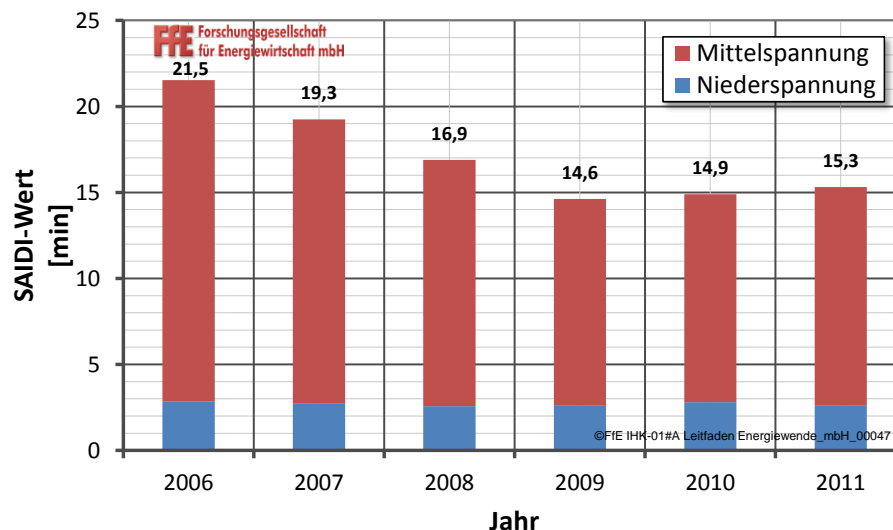


Abbildung 4-1: Entwicklung des SAIDI von 2006 bis 2011 in Mittel- und Niederspannung, eigene Darstellung nach /BNETZA-08 11/ und /BNETZA-02 12/

Der Rat der europäischen Energieregulierungsbehörden (Council of European Energy Regulators = CEER) beteiligt sich mit seiner Arbeit am Ziel der Errichtung eines EU-Energie-Binnenmarktes. Mitglieder des CEER sind die europäischen Energieregulierungsbehörden – unter anderem auch die deutsche Bundesnetzagentur. Das CEER führt ein Monitoring der Versorgungsqualität in Europa durch. Dieses ist in die drei Hauptbereiche operative Versorgungssicherheit, Spannungsqualität und kommerzielle Qualität untergliedert.

Wichtige Informationen liefert das Monitoring des CEER vor allem im Hinblick auf die internationale Vergleichbarkeit der Versorgungsqualität. Die SAIDI-Werte der Jahre 2006-2010 sind – soweit verfügbar – in **Abbildung 4-2** für 20 europäische Staaten der Höhe nach geordnet dargestellt. Allerdings ist beim Vergleichen der verschiedenen Länder darauf hinzuweisen, dass teilweise unterschiedliche Erfassungsmodalitäten vorliegen, was die Aussagekraft eines internationalen

Vergleichs leicht schmälert. Trotzdem lassen sich Tendenzen und grundlegende Sachverhalte aus der Abbildung ablesen.

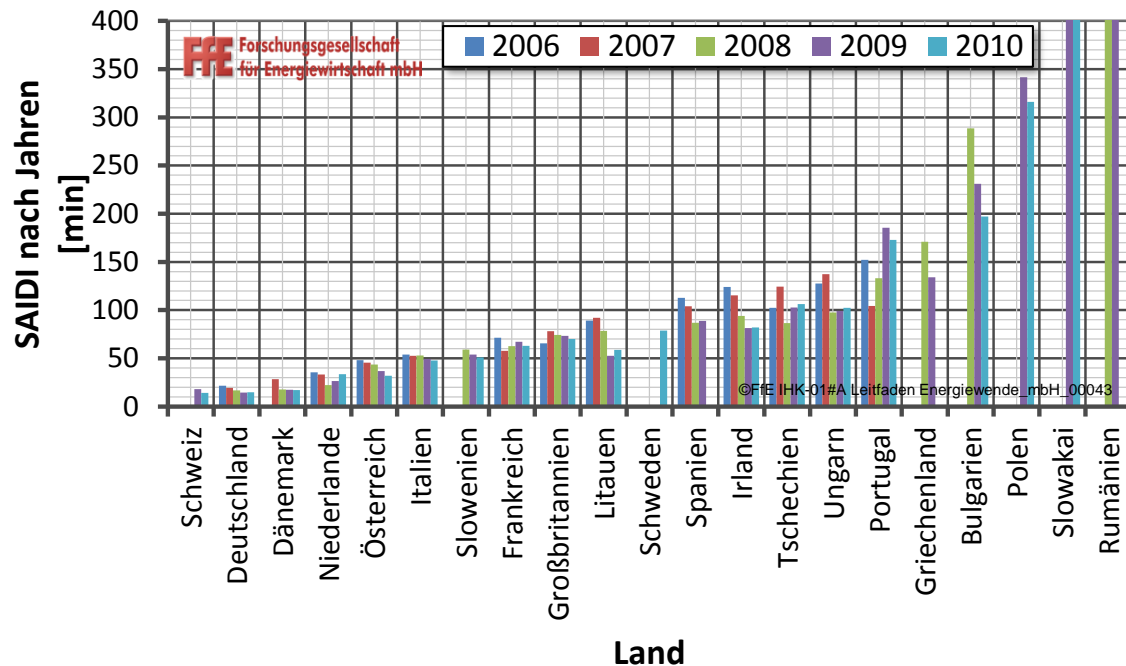


Abbildung 4-2: SAIDI-Werte im europäischen Vergleich, eigene Darstellung nach /CEER-01 12/, /ELCOM-01 10/ und /ELCOM-01 11/

Es zeigt sich, dass der deutsche SAIDI, neben dem der Schweiz und Dänemarks, den geringsten und somit besten Wert der berücksichtigten europäischen Staaten aufweist. Die Slowakei und Rumänien haben dagegen den ungünstigsten SAIDI. 2009 lag der slowakische SAIDI bei rund 400 Minuten; im gleichen Jahr wurde für Rumänien ein Wert von mehr als 600 Minuten errechnet. /CEER-01 12/

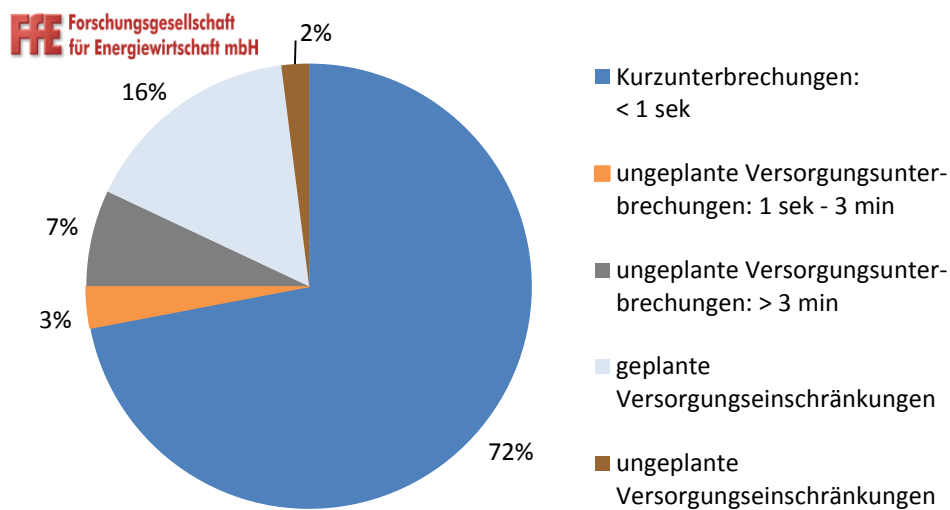
5 Kurzunterbrechungen

Der Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK) hat im Rahmen der VIK Versorgungsqualitätsumfrage Daten zu Versorgungsunterbrechungen und der grundsätzlichen Einschätzung des Ist-Zustands erhoben. Der Betrachtungszeitraum der nicht repräsentativen Umfrage erstreckt sich auf die Jahre 2009 bis 2011. Befragt wurden 45 Unternehmen mit 62 Standorten der Branchen Papier, Chemie, Zement und Nahrung.

Im Ergebnis sind 78 % der konsultierten Unternehmen mit der angebotenen Versorgungssicherheit zufrieden. Allerdings erwarten 40 % der Teilnehmer eine Verschlechterung der Situation in den nächsten fünf Jahren. Sehr bedeutend ist die Erkenntnis, dass 72 % der Versorgungsstörungen Kurzunterbrechungen sind. Diese sind definiert als Spannungseinbrüche um mehr als 5 % vom Sollwert, bei einer Dauer von bis zu einer Sekunde. Bei ungeplanten Versorgungsstörungen nehmen diese Abweichungen sogar einen Wert von 85 % an. Laut DIN EN 50160 sind Änderungen bis zu 10 % vom Sollwert der Versorgungsspannung toleriert /DIN-03 11/. Somit liegen die Teile der erfassten Versorgungsstörungen im Bereich der Toleranz.

Abbildung 5-1 zeigt die vom VIK ermittelte Verteilung der Kurzunterbrechungen – sowie der geplanten beziehungsweise ungeplanten Versorgungseinschränkungen und Versorgungsunterbrechungen. Versorgungsunterbrechungen decken den Zeitraum von einer Sekunde bis mehr

als drei Minuten ab. Versorgungseinschränkungen sind definiert als Lastreduzierungen um weniger als 100 %.



©FfE IHK-01#A Leitfadene EnergieWende_mBH_00042

Abbildung 5-1: Aufteilung der Versorgungsstörungen nach Vorfalltyp, eigene Darstellung nach /VIK-01 12/

Bei den befragten Unternehmen findet ein Großteil der Versorgungsstörungen im Zeitraum kleiner als drei Minuten statt. Die oben genannten SAIDI-Werte der Bundesnetzagentur verlieren durch diese Erkenntnis an Aussagekraft, da beim SAIDI-Wert nur Unterbrechungen berücksichtigt werden, die länger als drei Minuten andauern. Der VIK regt daher an, das Monitoring der Bundesnetzagentur auf Versorgungsstörungen mit einer Zeitdauer kleiner als drei Minuten auszuweiten. /VIK-01 12/

Die Mehrzahl der bei der FfE Studie beteiligten Unternehmen berichtete, dass der größte Störfaktor der Stromversorgung die Kurzunterbrechungen und Spannungseinbrüche seien. Als vermutete Ursachen dafür wurden oft Wetterextrema – wie Sturm oder Blitzeinschläge – benannt. Es ist anzumerken, dass die Ursachen für Störungen nicht von allen Unternehmen immer genau angegeben werden können, da sie keine Messung der Versorgungsqualität vornehmen. Die Versorgungsstörungen führen teilweise zum Ausfall von Anlagen, wobei die Prozesse in einigen Fällen umgehend wieder neu gestartet werden können. In anderen Fällen kann die Wieder-Inbetriebnahme jedoch bis zu einer Stunde dauern. In seltenen Fällen kommt es in Folge einer Kurzunterbrechung zu einem Defekt von Bauteilen, so dass Ersatzteile beschafft werden müssen. Hierdurch kann es zu länger andauernden Stillständen kommen.

Längere Unterbrechungen der Versorgungsspannung treten selten auf und sind auf außerordentliche Ereignisse zurückzuführen. Zu solchen Begebenheiten zählen zum Beispiel ein Transformatorenbrand oder die Beschädigung einer Hochspannungsleitung durch einen Blitzeinschlag. Bei besonders sensiblen Prozessen führen bereits Spannungsschwankungen innerhalb der eingeräumten Toleranzen zu Problemen. Von größeren Überspannungen wurde ebenfalls berichtet, allerdings treten diese deutlich seltener auf als Kurzunterbrechungen und sie führen auch nicht so häufig zu bedeutenden Problemen.

Von Seiten der interviewten Verteilnetzbetreiber in Bayern konnte eine Zunahme der Kurzunterbrechungen nicht bestätigt werden.

Die VIK-Befragung und weitere Presseberichte zur Problematik der Kurzunterbrechungen führten zu einer Verunsicherung auf Seiten der Unternehmen und der Politik. Daher wurde ein Arbeitskreis im

BMWi zu diesem Thema ins Leben gerufen. Das im Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) angesiedelte Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) hat in Fortsetzung der VDEW-Störungsstatistik ein Monitoring der elektrischen Energieversorgung entwickelt. Der besondere Aspekt des FNN-Ansatzes ist die Erfassung von Störungen und Versorgungsunterbrechungen aus Sicht der Letztverbraucher – unabhängig davon, in welcher Spannungsebene der Fehler auftritt. Ziel des FNN-Monitorings ist es, die Versorgungsqualität mit Strom durch geeignete Kennzahlen zu dokumentieren. Hierbei wird darauf geachtet, dass die gängigen, zuvor beschriebenen Kennzahlen auch aus dem FNN-Monitoring abgeleitet werden können. Durch diese Kompatibilität wird mehrfacher Erfassungsaufwand vermieden. Somit kann beispielsweise die Bundesnetzagentur in ihrer jährlichen Erhebung des SAIDI auf die Daten des FNN zurückgreifen. Im FNN-Monitoring werden 80 % der deutschen Stromnetze repräsentativ erfasst. In die Statistik werden alle Störungen oder Versorgungsunterbrechung mit einer Dauer von über einer Sekunde aufgenommen. /FFN-01 11/ Der FFN als Teilnehmer des BMWi-Arbeitskreises hat mit Hilfe der erfassten Daten eine Auswertung gemacht, inwiefern sich die Anzahl der Ereignisse, die ursächlich für Spannungseinbrüche sind, in den letzten Jahren entwickelt haben (vgl. **Abbildung 5-2**).

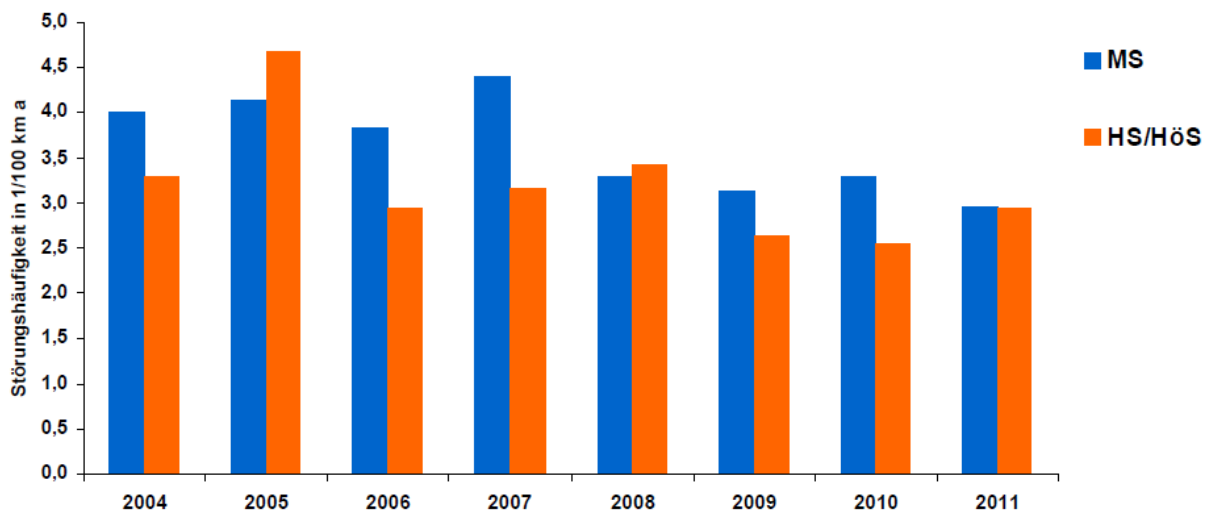


Abbildung 5-2: *Entwicklung der Ereignisse, die ursächlich für Spannungseinbrüche sind – Auswertung auf Basis der FNN Störungsstatistik /FNN-01 13/*

Die Auswertung zeigt, dass bis zum Jahr 2011 keine Zunahme von Ereignissen zu verzeichnen ist, die zu Spannungseinbrüchen führen.

6 Gefahren durch eingeschränkte Versorgungsqualität und – zuverlässigkeit

Die Interviews mit den Unternehmen zeigten, dass erhebliche Beeinträchtigungen durch Störungen der Versorgungsqualität oder Versorgungsunterbrechungen entstehen können.

Versorgungsqualität

Die kurzfristigen Abweichungen beinhalten transiente Überspannungen, Spannungsüberhöhungen, Spannungseinbrüche, das Fehlen von Halbwellen und Netzfrequenzabweichungen.

Aus Blitzschlägen resultierende transiente Überspannungen können zur Zerstörung von Betriebsmitteln (Transformatoren, Kabel, Produktionsanlagen) durch die überhöhte Spannung, den dadurch getriebenen Strom oder die dabei entstehenden Kräfte führen. Auch Personenschäden können im Extremfall nicht ausgeschlossen werden.

Spannungsüberhöhungen und Spannungseinbrüche sowie fehlende Halbwellen führen zu kurzfristigen Leistungsschwankungen der Anlagen. Da die Leistung bei unregelmäßigen Verbrauchern (ohne Frequenzrichter) quadratisch zur Spannung variiert, kann die Produktqualität verändert oder die Lebensdauer der Anlagen verkürzt werden. Periodisch auftretende Spannungsschwankungen können zu Leistungspendelungen und Schwingungen in Anlagen führen. Ebenso kann ein Versagen der Steuerungselektronik auftreten, was unter Umständen zu Fehlfunktionen oder Ausfällen von Anlagen führt. So kann zum Beispiel die Steuerung auf definierte Ausgangswerte zurückgesetzt werden (Reset) und ein erneutes Anfahren der Anlage zu Problemen führen.

Netzfrequenzabweichungen führen nur bei Anlagen, welche die Netzfrequenz als Zeitgeber nutzen (zum Beispiel netzgeführte Photovoltaik-Umrichter, alte Synchronuhren, alte Funksender), zu merklichen Abweichungen. Bei Asynchron- und Synchronmotoren ändert sich die Drehzahl ebenfalls mit der Netzfrequenz. Da nur sehr geringe Abweichungen auftreten können und keine schnellen Änderungen stattfinden, sind in der deutschen Industrie jedoch keine Schäden oder Probleme durch Frequenzabweichungen bekannt.

Versorgungszuverlässigkeit

Bei Versorgungsunterbrechungen können auf mehreren Wegen Kosten für das Unternehmen entstehen.

Mangelhafte Produkte: Werden Be- oder Verarbeitung unterbrochen, so kann zum Beispiel bei CNC-Fräsmaschinen das Werkstück unbrauchbar werden. Außerdem ist es möglich, dass Prozessparameter nicht mehr eingehalten werden können, wodurch der gesamte Reaktorinhalt verworfen werden muss. Neben den Kosten der vorgelagerten Produktionskette treten auch Entsorgungskosten auf.

Schäden an Maschinen: Bei kurzen Versorgungsunterbrechungen oder eingeschränkter Versorgungsqualität können Steuerungen von Anlagen Schaden nehmen, was zu einem Stillstand der Maschine führen kann. Bei längeren Versorgungsunterbrechungen kann zum Beispiel bei Aluminiumschmelzen die Schmelze erstarren, wodurch der gesamte Schmelzofen unbrauchbar wird.

Entgangener Gewinn und fixe Kosten: Bei länger andauernden Versorgungsunterbrechungen steht die Produktion still, während die Kosten für Arbeiter und Maschinen weiter zu zahlen sind (kein Deckungsbeitrag). Auch wenn keine laufenden Kosten anfallen, sind die entgangenen Gewinne als Opportunitätskosten zu berücksichtigen.

Folgekosten: Mit einem Produktionsausfall können sich Lieferverzögerungen und damit zu zahlende Konventionalstrafen ergeben. Besonders bedeutend ist dies bei der just-in-time Produktion. Bei einer Nachholung der Produktion können sich zum Beispiel Zuschläge für Nacharbeit ergeben.

7 Ansätze zur Erhöhung der Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit

Zunächst sollte überprüft werden, ob die Anlagen auf die Normalbedingungen der eingehenden Versorgungsqualität ausgelegt sind und Spannungseinbrüche beherrschen (DIN EN 50 160 und DIN EN 61 000-4). Auch durch die Optimierung der Steuerungseinrichtungen können Erfolge im Hinblick auf die Störanfälligkeit der Anlagen erzielt werden. Um die Ursachen von Störungen aufzudecken, kann es sinnvoll sein, eine Messung der Versorgungsqualität vorzunehmen. Darauf aufbauend können dann geeignete Maßnahmen bestimmt werden. Der zuständige Netzbetreiber kann grundsätzlich bei der Ursachenfindung helfen und Lösungsvorschläge unterbreiten.

Am häufigsten treten in Stromnetzen kurzfristige Abweichungen von den Normalbedingungen – mit einer Dauer von unter einer Sekunde – auf, welche als eingeschränkte Versorgungsqualität bezeichnet werden. Diese Art der Störungen wurde auch von einer Mehrzahl der befragten Unternehmen als häufigste Ursache für Mängel genannt. Viele Verbraucher, wie zum Beispiel Motoren oder Leuchtstofflampen, tolerieren eine eingeschränkte Versorgungsqualität, wobei die auftretenden Schwankungen in Drehmoment oder Helligkeit mitunter die Produktionsqualität beeinflussen können. Bei empfindlichen Anlagen können bereits diese kurzfristigen Abweichungen zu einem Stillstand führen.

Ein längerer Ausfall der Versorgung (> 1 s nach /FFN-01 11/) wird als Versorgungsunterbrechung bezeichnet. Systeme ohne Energiespeicher liefern während der Unterbrechung keine Leistung, was häufig zu einer Produktionsunterbrechung führt.

In Anbetracht der Kosten zur Sicherstellung einer nahezu perfekten Stromversorgung ist für jeden Anwendungsfall getrennt eine Risikoanalyse durchzuführen. Je höher ein möglicher Schaden und je häufiger ein Schadensereignis auftritt, desto mehr Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden sind sinnvoll. Je umfassender ein Schutz ausgeführt wird, desto teurer wird er. So ist häufig nur der Schutz von kritischen Prozessen oder einzelnen Anlagensteuerungen wirtschaftlich sinnvoll.

Bei neuen Anlagen sollte in der Ausschreibung die Forderung nach sicherem Abfahren bei Spannungsabfall enthalten sein; die Steuerung sollte eine Sekunde Stromausfall ohne Ausfall überstehen.

Versorgungsqualität

Transiente Überspannungen und starke Spannungsüberhöhungen können durch **Überspannungsableiter** unschädlich gemacht werden. Diese bestehen häufig aus mehreren Komponenten, um sowohl kleine Überspannungen schnell und präzise aufnehmen als auch energiereiche Spannungsspitzen zerstörungsfrei ableiten zu können.

Im einfachsten Fall sind dies Hornableiter am Transformator, an welchen sich bei sehr hohen Spannungen ein Lichtbogen bildet, der die Energie gegen Erde ableitet. Dieser Kurzschluss führt zur Spannungsunterbrechung während der Ableitung. Da der Lichtbogen Zeit zum Aufbau benötigt, sind bei schnellen Transienten weitere Ableiter notwendig.

Varistoren sind spannungsabhängige Widerstände, die bei Überschreiten einer definierten Spannung stark leitend werden und damit den Spannungsanstieg begrenzen. Sie sind deutlich schneller und

reduzieren die Spannung nur auf einen maximalen Wert, dafür sind sie aber auch teurer und empfindlicher als Hornableiter.

Elektrische Schaltungen können durch **Suppressordioden** oder **Gasableiter** geschützt werden, welche jedoch nur geringe Energiemengen aufnehmen können und gegebenenfalls nach einem Einsatz ausgetauscht werden müssen.

Häufig ist ein Staffelschutz anzutreffen, der am Werkstransformator die größten Überspannungen aufnimmt, in Unterverteilungen mit empfindlichen Anlagen präziser auch kleinere Störungen abfängt und in empfindlichen Schaltkreisen die restlichen kleinen Störungen unterbindet.

Der Schutz gegen transiente Überspannungen ist nicht mit einem Blitzschutz zu verwechseln. Blitzschutzanlagen leiten direkte Blitzentladungen ab und reduzieren damit die direkt auftretenden Schäden. Dennoch können transiente Überspannungen in Strom- oder Datenleitungen bei einem von einer Blitzschutzanlage abgeleiteten Blitzeinschlag auftreten.

Zum Schutz gegen geringe Spannungsüberhöhungen und kurzfristige Spannungseinbrüche können **Frequenzumrichter** (FU) genutzt werden. Frequenzumrichter erzeugen eine in Amplitude und Frequenz veränderbare Wechselspannung, die aus einem Gleichstromzwischenkreis gespeist wird. Der Gleichstromzwischenkreis wird mit geregelter Leistungselektronik vom Stromnetz gespeist, wodurch höhere Netzspannungen keinen Einfluss haben. Kurze Spannungseinbrüche oder fehlende Halbwellen können über den Gleichstromzwischenkreis gepuffert werden.

Netzfrequenzabweichungen können außerdem durch Umrichter – zum Beispiel für Zentrifugen – ausgeglichen werden.

Frequenzumrichter ermöglichen auch einen Sanftanlauf von Motoren. Dadurch verringern sich die Einschaltströme und damit auch die Spannungseinbrüche/Flicker beim Einschalten großer Verbraucher auf dem Werksgelände. Frequenzumrichter haben den zusätzlichen Vorteil, dass durch die einstellbare Frequenz eine Drehzahl- und damit eine Leistungsänderung von Pumpen oder Gebläsen möglich ist. Dies ermöglicht eine Anpassung an das tatsächlich benötigte Fördervolumen und trägt damit zur Energieeinsparung bei.

Die Induktivitäts- und Kapazitätsbeläge von Stromleitungen sowie Induktivitäten im Betrieb (Asynchronmotoren, konventionelle Vorschaltgeräte) generieren Blindleistung, die zu Spannungserhöhungen führen kann. Durch Kompensation (zum Beispiel Einsatz von **Kondensatoren** bei Induktivitäten) kann die Spannungserhöhung reduziert werden. In manchen Fällen ist auch eine Spannungserhöhung erwünscht. In Industriebetrieben sind häufig dreistufig schaltbare Blindstromkompensationen mit Kondensatoren anzutreffen. Bei Energieübertragungsnetzen gibt es auch feiner dosierbare Kompensationsanlagen, bei denen Spulen beziehungsweise Kondensatoren mit Leistungselektronik gesteuert stufenlos zuschaltbar sind (Flexible-AC-Transmission, Static Synchronous Compensator).

Für Verteilnetze wird diskutiert, inwiefern es wirtschaftlich ist, wenn zum Beispiel Photovoltaik-Umrichter durch zusätzliche Generierung von Blindleistung die von ihnen generierte Spannungserhöhung kompensieren können.

Mit dem verstärkten Aufkommen von Leistungselektronik (z.B. Frequenzumrichter) mit aktiven und passiven Bauteilen kann es zu Konstellationen kommen, in denen sich Schwingkreise zwischen Bauteilen ausbilden. Werden diese Schwingkreise angeregt, dann können sich Resonanzen bilden, welche auf der Netzspannung aufmoduliert sind. Dies führt zu Schwebungen mit kurzzeitigen Spannungsüberhöhungen, wodurch empfindliche Anlagenteile zerstört werden können. Als Abhilfe

werden **Filter** eingesetzt. Dies sind sehr schmalbandige Frequenzfilter, welche auf die stärkste Resonanzfrequenz eingestellt sind und sie als Saugkreis dämpfen.

Versorgungszuverlässigkeit

Bei einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) steht die kontinuierliche Stromversorgung zum Beispiel von Computern im Fokus. Meist ist eine USV nur auf eine kurze Betriebsdauer ausgelegt, um zum Beispiel Anlagen kontrolliert herunter zu fahren (Fail-Safe) oder die Zeit des Hochfahrens einer Notstromversorgung zu überbrücken.

Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme dienen der Sicherstellung einer Versorgungsqualität, welche durch die öffentliche Stromversorgung nicht gewährleistet werden kann. Eine USV-Anlage ist zunächst dafür ausgelegt, die ständige Wechselstromversorgung sicherzustellen. Darüber hinaus kann sie zur Verbesserung der Qualität der Wechselstromversorgung dienen und zur Spannungs- und/ oder Frequenzumwandlung genutzt werden. Abhängig von der Art der Energiespeicherung können USV einige Sekunden bis zu rund einer Stunde überbrücken. Da 97 % aller Störungen im Stromnetz weniger als drei Sekunden dauern /AEE-01 11/, stellen USV-Anlagen für viele Zwecke eine hinreichende Absicherungen gegen Versorgungsunterbrechungen dar. Für die Absicherung eines längeren Zeitraums ist die Zuschaltung eines Notstromaggregates üblich.

Es wird zwischen drei Klassen von unterbrechungsfreien Stromversorgungssystemen unterschieden, die in Abhängigkeit der Bedürfnisse zum Einsatz kommen. Sie unterteilen sich gemäß der Produktnormen IEC 62040-3 des International Engineering Consortium und DIN EN 50091-3 der Europäischen Union in die folgenden Klassen.

Standby- oder Offline-Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme sind die einfachsten und günstigsten USV. Sie verfügen über einen Batteriespeicher, der im Normalfall geladen wird. Bei einem Netzausfall schalten sie den Verbraucher von Netzbetrieb auf den eigenen Umrichter um. Sie werden nach IEC 62040-3.2.20 als USV-Klasse 3 bezeichnet (VFD – Voltage and Frequency Dependent from mains supply). Es werden nur Netzausfälle und kurzzeitige Ereignisse kompensiert. Robuste Verbraucher wie Telefonanlagen lassen sich mit dieser USV-Klasse absichern.

Bei **Netzinteraktiven Unterbrechungsfreien Stromversorgungssystemen** ist der Batterie-Umrichter fortwährend aktiv und kann damit auch im Netzbetrieb die Verbraucherspannung beeinflussen. So können auch Spannungsschwankungen ausgeglichen werden. Beim Auftreten eines Netzfehlers wird eine Netztrennung durchgeführt. Sie werden als USV-Klasse 2 bezeichnet (VI – Voltage Independent).

Online- Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme nutzen die Batterie als Gleichstrom-zwischenkreis. Aus dem Netz wird Strom zur Speisung der Batterie entnommen, gleichzeitig ist ein Umrichter in Betrieb, welcher aus der Batterie die Verbraucher versorgt. Dadurch ist die Stromversorgung von Spannung und Frequenz des Netzes unabhängig. Wegen der fortwährenden Belastung der Komponenten ist dieser USV-Typ der teuerste, er wird als USV-Klasse 1 bezeichnet (VFI – Voltage and Frequency Independent).

In **Tabelle 1** sind die von den USV-Klassen kompensierten Störungen zusammengefasst. Dabei kann eine kleinere Klasse alle Störungen der höheren Klassen ausgleichen.

Tabelle 1: *Netzstörungen und USV-Lösungen, eigene Darstellung nach EN 62040 3 /SIE-01 12/*

Netzstörung	Zeit	EN 62040-3	USV-Lösung
1. Netzausfälle	> 10 ms	VFD (Voltage + Frequency Dependent)	Klassifizierung 3 Passiver Standby-Betrieb (Offline)
2. Spannungsschwankungen	< 16 ms		
3. Spannungsspitzen	4...16 ms		
4. Unterspannungen	kontinuierlich	VI (Voltage Independent)	Klassifizierung 2 Line-Interactive-Betrieb
5. Überspannungen	kontinuierlich		
6. Spannungstöße (Surge)	< 4 ms	VFI (Voltage + Frequency Independent)	Klassifizierung 1 Double-Conversion-Betrieb (Online)
7. Blitzeinwirkungen	sporadisch		
8. Spannungsverzerrungen (Burst)	periodisch		
9. Spannungsüberschwingungen	kontinuierlich		
10. Frequenzschwankungen	sporadisch		

Kondensatoren und Doppelschichtkondensatoren (SuperCaps) zeichnen sich durch hohe Entladeströme aus; die Energiedichte ist deutlich geringer als bei Batterien. Sie werden nur für kurzfristige Energiespeicherung eingesetzt.

Schwungmassespeicher nutzt die Rotationsenergie als Speicher, weshalb er auch als dynamischer Speicher (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) bezeichnet wird. Wegen der bewegten Elemente sind die Speicherverluste höher als bei anderen Speichern, dafür ist die Energie sehr schnell verfügbar. Schwungspeicher werden als USV eingesetzt, indem sie fortwährend von einem Motor angetrieben werden. Bei Netzverlust wird der Elektromotor als Generator verwendet und versorgt die Verbraucher.

Bei **dieseldynamischen USV-Systemen** Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.wird dann ein vorgewärmter Dieselmotor an die Welle angekoppelt und mit dem Schwung angeworfen. Sobald der Dieselmotor Leistung bringt, werden Schwungrad und Stromgenerator von dem Dieselmotor angetrieben. Diese Art der USV hat den Vorteil, dass bei Netzstörungen eine komplett unterbrechungsfreie Spannungsversorgung sichergestellt werden kann.

Die meisten USV speichern die Energie in **Batterien**. Häufig werden Bleibatterien verwendet, welche wartungsintensiver als zum Beispiel Lithium-Ionen Akkus –in der Anschaffung aber deutlich günstiger – sind.

Eine **Notstromversorgung** ist auf die längerfristige Versorgung von Verbrauchern ausgelegt. Nur bei Bedarf wird sie mit USV gekoppelt. Häufig werden ausschließlich sensible Verbraucher mit USV ausgerüstet, während die Notstromversorgung einen Großteil oder alle Verbraucher versorgen kann. Die meisten Notstromversorgungen bestehen aus Dieselmotor und Generator. Aus kaltem Zustand dauert es ca. 10 bis 15 Minuten vom Start bis zum Erreichen der Nennleistung. Brennstoffzellen werden wegen des höheren Preises sehr selten verwendet; ihre Vorteile liegen in der geringeren Wartung gegenüber Dieselaggregaten.

8 Zusammenfassung und Fazit

Die hohe Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit sind wesentlicher Standortvorteile in Deutschland. Die Gespräche mit Verteilnetzbetreibern, das Monitoring durch die BNetzA sowie die Auswertungen des Forums Netztechnik/Netzbetrieb zeigen, dass weder Unterbrechungen größer drei Minuten (im SAIDI enthalten) noch die Ereignisse für Unterbrechungen kleiner drei Minuten in den letzten Jahren zugenommen haben. Dennoch haben die Gespräche mit Unternehmen gezeigt, dass es zunehmend zu Problemen aufgrund von mangelnder Versorgungsqualität kommt. Dies war allerdings häufig auf die sensibleren Anlagen zurückzuführen. Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen auf lokaler Ebene mangelnder Versorgungsqualität und Versorgungsunterbrechungen vorzubeugen. Die Umsetzung kann den individuellen Ansprüchen angepasst werden und ist somit unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten einer flächendeckenden Erhöhung der Versorgungsqualität für alle Netzkunden vorzuziehen.

9 Quellen/Literatur:

- AEE-01 11 Renews Spezial - Strom speichern. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2011
- BNETZA 08 11 Monitoringbericht 2011 - gemäß § 63 Abs. 4 EnWG i.V.m. § 35 EnWG. Bonn: Bundesnetzagentur (BNetzA), 2011
- BNETZA-02 12 Pressemitteilung: Große Zuverlässigkeit in der Stromversorgung in: http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1912/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2012/120903_SAIDI_Wert_Strom.html?nn=65116. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2012
- CEER-01 12 5th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply 2011 in: http://www.energyregulators.eu/portal/page/portal/EER_HOME/CEER_5thBenchmarking_Report.pdf. Brüssel: Council of European Energy Regulators (CEER), 2012
- DIN-03 11 DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen - DIN EN 50160. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2011
- DKI 01 02 Leitfaden Netzqualität - Oberschwingungen Ursachen und Auswirkungen. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut, 2002
- ELCOM-01 10 ElCom: Stromversorgungsqualität 2009 - Auswertung der bei der ElCom eingereichten Versorgungsunterbrechungen in: http://www.elcom.admin.ch/themen/00006/00119/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCDdIB4gWym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--. Bern: Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, 2010
- ELCOM-01 11 ElCom: Stromversorgungsqualität 2010 - Auswertung der bei der ElCom eingereichten Versorgungsunterbrechungen in: http://www.elcom.admin.ch/themen/00006/00119/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCDdIJ2gGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--. Bern: Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, 2011

- FFN-01 11 FFN: Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik - Anleitung - Systematische Erfassung von Störungen und Versorgungsunterbrechungen in elektrischen Energieversorgungsnetzen und deren statistische Auswertung in: http://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/documents/svs_anleitung_2011-04.pdf. Berlin: Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), 2011
- FFN-01 13 Forum Netztechnik: Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität; Vortrag von Heike Kerber im BMWi; Berlin 2013
- GOB-01 11 Gobmaier, Thomas: Netzfrequenzmessung - Messung der Netzfrequenz und Berechnung der aktuellen Primärregelleistung in: www.netzfrequenzmessung.de. München, 2011
- HAB-01 12 Haber, Alfons, Dr.; Rodgarkia-Dara, Aria, Dr.: Qualitätsregulierung - Theorie und internationale Erfahrungen in: http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/strom/dokumente/pdfs/WP16_20051212.pdf. Wien: E-CONTROL, 2012
- SIE-01 12 Innovative Energieverteilung für Rechenzentren – Konzept für eine wirtschaftliche und sichere elektrische Energieverteilung. Regensburg: Sektor Infrastructure & Cities – Low and Medium Voltage Division, 2012
- VIK-01 12 Bier, Christoph Dr.: Die Qualität der Stromversorgung für Industriekunden - die Entwicklung in den Jahren 2009 bis 2011 in: <http://vik.de/pressemitteilung/items/aktuelle-vik-untersuchung-zeigt-stromversorgungsqualitaet-unter-hohem-druck-mehr-als-90-prozent-der-stromunterbrechungen-werden-.html>. Essen: VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., 2012