





### **Impressum**

#### **ZVEI Leitfaden zur Verbesserung der Spannungsqualität in elektrischen Netzen**

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-  
und Elektronikindustrie e. V.

Fachverband Starkstromkondensatoren

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-251

Fax: +49 69 6302-407

E-Mail: [starkstromkondensatoren@zvei.org](mailto:starkstromkondensatoren@zvei.org)

[www.zvei.org](http://www.zvei.org)

Redaktion: Dr. Marcus Dietrich, ZVEI

Autoren:

Christophe Durandet	Vishay Electronic
Kansu Ekici	Schneider Electric
André Göddertz	Frako Kondensatoren- und Anlagenbau
Dr. Christian Kaehler	Hans von Mangoldt
Lukas Motta	TDK Electronics
Jürgen Reese	Condensator Dominit
Thomas Simon	Maschinenfabrik Reinhausen - Power Quality
Achim Tempelmeier	KBR Kompensationsanlagenbau

Juni 2021

Trotz größtmöglicher Sorgfalt übernimmt der ZVEI  
keine Haftung für den Inhalt. Alle Rechte, insbesondere  
die zur Speicherung, Vervielfältigung und Verbreitung,  
sowie der Übersetzung sind vorbehalten.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Qualität der Spannung</b>	<b>5</b>
2.1	Beeinflussung der Spannungsqualität	5
2.2	Ursachen und Wirkungen	6
<b>3</b>	<b>Feststellen und Bewerten der Spannungsqualität</b>	<b>9</b>
3.1	Messung der Spannungsqualität	9
3.2	Bewertung der Spannungsqualität	9
<b>4</b>	<b>Schaltungstechnische Maßnahmen zur Aufrechterhaltung &amp; Verbesserung der Spannungsqualität</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Maßnahmen zur Aufrechterhaltung &amp; Verbesserung der Spannungsqualität mit Geräten und Anlagen</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Referenzen</b>	<b>17</b>

# 1 Einleitung

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung haben sich in den zwei zurückliegenden Jahrzehnten viele Veränderungen ergeben. Dabei vollzog sich der Wandel von einer von Großkraftwerken mit leistungsstarken Synchrongeneratoren getragenen Energieversorgung, hin zu einem stark dezentral geprägten Versorgungsnetz. Dies bedingt eine hohe Zunahme an dezentralen Erzeugungsanlagen mit geringeren Erzeugungsleistungen und überwiegend leistungselektronisch gesteuerten Einspeisungen. Auf der „Erzeugerseite“ verändern sich dadurch die „inneren technischen Werte“ von Übertragungs- und Verteilnetzen. Die Netzimpedanzen steigen an, wodurch die Spannungen in den Netzen stärker durch die Lasten negativ beeinflusst werden.

Zeitgleich hat neben dem Wandel auf der „Erzeugerseite“ ein Wandel auf der „Lastseite“ stattgefunden, der auch weiterhin dynamisch anhält.

Sowohl in industriellen als auch in öffentlichen Netzen werden zur effizienten Nutzung der elektrischen Energie zunehmend eine Vielzahl leistungselektronischer Energiewandler eingesetzt. Hierzu zählen neben den - in sehr hoher Anzahl - verbauten Schaltnetzteilen in elektronischen Geräten auch die LED-Beleuchtung mit geringer Anschlussleistung im Watt-Bereich. Außerdem ist der kontinuierlich zunehmende Anteil an elektrischen Motoren in den industriellen Anwendungen und in den Infrastrukturen, die über Frequenzumrichter mit hoher Anschlussleistung im Kilowatt-Bereich in ihrer Drehzahl geregelt werden, zu nennen.

Aktuell steht der Aufbau der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität im Fokus der öffentlichen Diskussion. Die damit verbundene, stark zunehmende Nachfrage an elektrischer Energie spielt sich bezogen auf eine Einheit überwiegend im Kilowatt-Bereich ab.

Die Summe der installierten Leistungen und die stetige Zunahme dieser elektronischen Verbraucher - mit einer stark nicht linearen Strom-Charakteristik - wird die Spannungsqualität besonders in den Niederspannungs- und den Mittelspannungs-Verteilnetzen zunehmend beeinträchtigen.

Der vorliegende Leitfaden erläutert in kurzen Abschnitten die Beeinflussung der Qualität der Spannung und deren Ursachen und Wirkungen.

Um die jeweiligen Ursachen der negativen Beeinflussung der Spannungsqualität zu reduzieren, werden in der vorliegenden Broschüre technische Ansätze beschrieben, die mit den Lösungsanbietern detailliert beraten werden sollten.

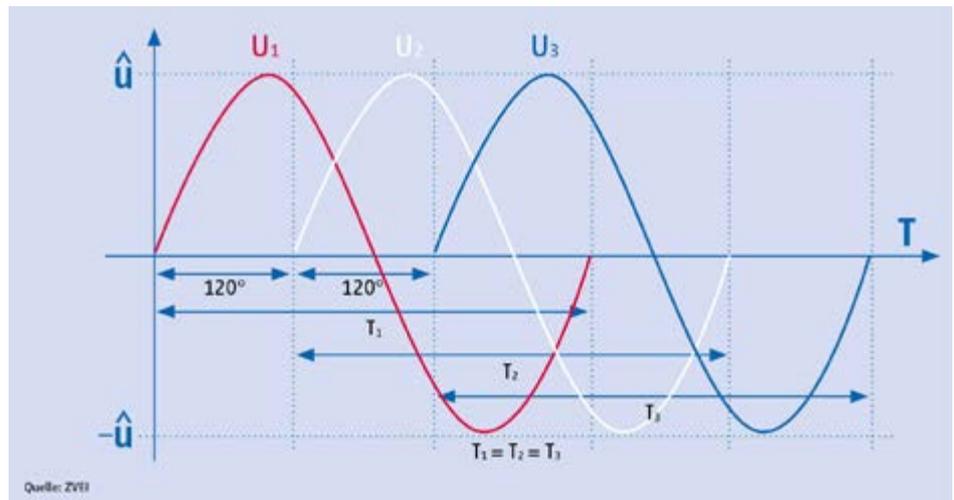
## 2 Qualität der Spannung

Für die optimale Nutzung elektrischer Energie ist die Gewährleistung einer hohen Qualität der Spannung wesentlich.

Die Spannungsqualität ist in den vorwiegend genutzten Dreiphasen-Wechselstromnetzen an den jeweiligen Verbraucher-Anschlusspunkten ideal, wenn die Spannungen

- zu jeder Zeit, ohne Unterbrechungen, eine symmetrisch konstante Höhe mit dem nominalen Wert
- zu jeder Zeit eine konstante Frequenz
- zu jeder Zeit einen sinusförmigen Verlauf aufweisen.

### Ideale Spannungsverläufe



Diese dargestellten, idealen Qualitätsmerkmale der elektrischen Spannung sind theoretischer Art und werden in realen Netzen nicht erreicht.

### 2.1 Beeinflussung der Spannungsqualität

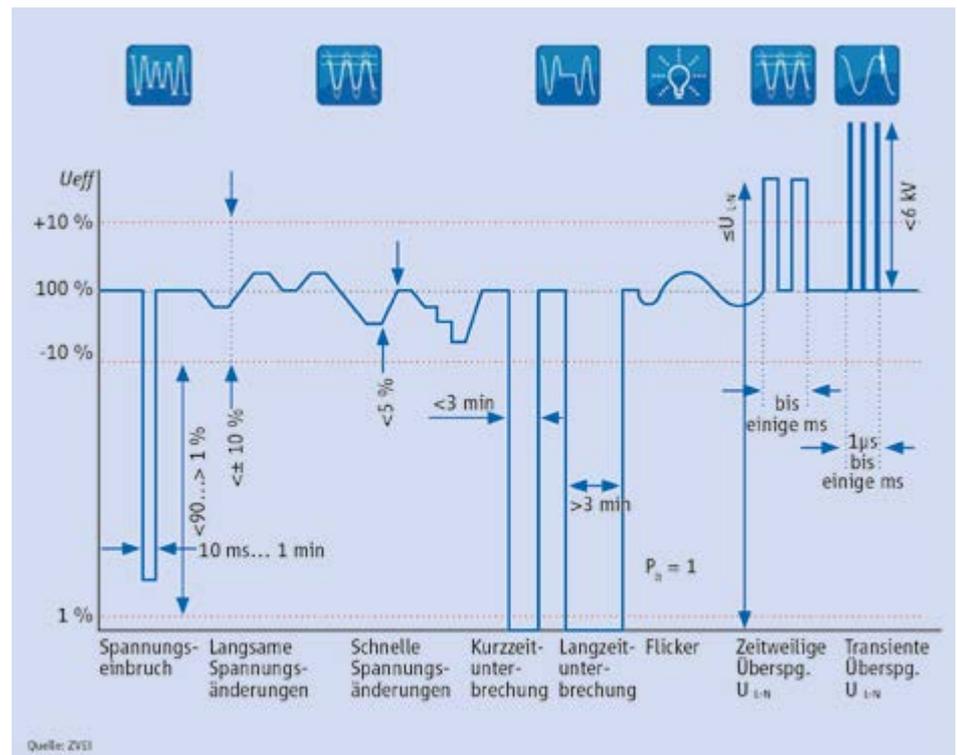
Grundlegend unterliegt die Spannung, die wir üblicher Weise aus öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungs-Versorgungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen als Netznutzer beziehen, vielfältigen Beeinflussungen.

Sowohl das öffentliche Versorgungsnetz als auch die an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossenen innerbetrieblichen Netze, unterliegen Lastschwankungen. Hinzu kommen netzrückwirkende Störeinflüsse von elektrischen Geräten und Anlagen und das Auftreten von Störungen, die vorwiegend durch äußere Ereignisse, wie zum Beispiel Leitungsbeschädigungen, Erdschlüsse durch Fremdkörper oder Blitzeinschläge, verursacht werden.

## 2.2 Ursachen und Wirkungen

Die Spannungsqualität wird am häufigsten durch die **Charakteristik des Stromflusses** der angeschlossenen Verbraucherlasten im Netz beeinflusst. Im Zusammenhang mit der **Netzimpedanz** vor dem Anschlusspunkt der Last verändert sich die Spannung entsprechend der Charakteristik des Stromflusses.

### Beeinflussung der Spannung entsprechend der Charakteristik des Stromflusses



**Langsame und schnelle Spannungsänderungen** werden durch „normale“ Laständerungen verursacht, die im Rahmen einer entsprechenden Auslegung der Netzbetriebsmittel (Transformatoren, Kabel- und Leistungsquerschnitte, etc.) bezüglich des Spannungsabfalls kein Problem darstellen sollten. Anders verhält es sich beim Zuschalten von großen Lasten oder bei Kurzschlüssen auf vorgelagerten Netzebenen, die je nach Netzimpedanz mehr oder weniger tiefe **Spannungseinbrüche** verursachen.

Kurze periodische Lasten oder pulsierende Lasten von zum Beispiel Pressen, Lichtbogenöfen, Schweißanlagen o. ä. bewirken kurze Spannungsschwankungen, die als Flicker benannt sind. **Flicker** erzeugen einen subjektiven Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen durch zeitliches Schwanken der Leuchtdichte oder der spektralen Verteilung. Die Wahrnehmbarkeit einer Leuchtdichteänderung wird erst ab einer bestimmten Wiederholrate als störend empfunden. Bei einer normierten Kurzzeit-Flickerstärke von  $P_{st} > 1$  werden die durch Spannungsschwankungen verursachten Leuchtdichteschwankungen bei 50% der Versuchspersonen als störend wahrgenommen.

Unter normalen Betriebsbedingungen darf die Spannung nicht mehr als 10% von dem Nennwert der Versorgungsspannung abweichen. **Zeitweilige Überspannungen** entstehen überwiegend durch Lastabtrennungen oder Leitungsumschaltungen in Hochspannungsnetzen, die durch Stufenschalter in den Leistungstransformatoren in den Toleranzbereich zurück geregelt werden. Diese Vorgänge können einige Sekunden dauern.

Das Abschalten von induktiven Netzbetriebsmitteln (z.B. Transformatoren) und das Auftreten von Blitzeinschlägen in der Nähe von oder an Elektrizitätsversorgungsnetzen sind die Ursachen für die Entstehung von **transienten Überspannungen** in entsprechenden Versorgungsnetzen. Diese Überspannungen haben Anstiegszeiten auf ihren jeweiligen Spitzenwert von etwa einer Mikrosekunde bis zu wenigen Millisekunden. Die Überspannungen können entweder als stark gedämpfte Schwingung auftreten oder haben einen steilen Anstieg und brechen anschließend nicht schwingend wieder auf null zusammen. Die ideale sinusförmige Versorgungsspannung wird anschließend in realen Versorgungsnetzen durch Oberschwingungsspannungen verzerrt. Die **Oberschwingungsspannungen** entstehen typischerweise durch Oberschwingungsströme von nichtlinearen Verbrauchern, die an den Netzimpedanzen Oberschwingungsspannungsabfälle verursachen, welche sich der sinusförmigen Versorgungsspannung überlagern. Nichtlineare Verbraucher sind üblicherweise alle Verbraucher mit Leistungselektronik (Schaltnetzteile, Gleichrichter, Frequenzrichter, etc.), deren charakteristischer Stromverlauf nicht sinusförmig ist. Der Strom besitzt dann relevante Oberschwingungsanteile deren Werte mit Bezug auf die jeweilige Ordnungszahl, dem jeweils ganzzahligen Mehrfachen der 50 Hz Grundschwingungsfrequenz, angegeben werden.

Das Spektrum der Oberschwingungsanteile ist abhängig von der Art der Schaltungsweise der Leistungselektronik. Übersteigen die Spannungspegel von einzelnen oder mehreren Ordnungen der Oberschwingungsspannungen in einem Netzbereich die genormten Verträglichkeitspegel, kommt es in der Regel zu Funktionsstörungen von zumeist elektronischen Verbrauchern.

Die Verträglichkeitspegel für Oberschwingungsspannungen der jeweiligen Ordnungszahl sind in den einschlägigen Normen [1, 2, 3, 4] bis zur 40. Ordnung beschrieben. Zu hohe Oberschwingungsspannungsverzerrungen sind heute der häufigste Grund für eine schlechte Spannungsqualität und für Funktionsstörungen.

Neben den im vorstehenden Abschnitt erläuterten Oberschwingungen mit ganzzahligen Ordnungszahlen, treten bei nichtlinearen Verbrauchern auch Ströme mit zwischenharmonischen Frequenzen auf, die an den Netzimpedanzen Spannungen mit zwischenharmonischen Frequenzen erzeugen, die sich ebenfalls mit der sinusförmigen Versorgungsspannung überlagern. Die als **Zwischenharmonische** bezeichneten Spannungen führen in Niederspannungsnetzen bei Frequenzen in der Nähe der Grundfrequenz (50 Hz oder 60 Hz) zu einer Amplitudenmodulation der Versorgungsspannung, auf die insbesondere Beleuchtungseinrichtungen empfindlich reagieren und eine Flickerwirkung entstehen kann. In der DIN EN 61000-2-2 [2] sind Verträglichkeitspegel als Anhaltswerte für zwischenharmonische Spannungen in Niederspannungsnetzen in der Nähe der Grundfrequenz angegeben, die mit dem Verträglichkeitspegel im Hinblick auf die Flickerwirkung korrespondieren. Darüber hinaus sind noch keine Verträglichkeitspegel für Spannungen von zwischenharmonischen Frequenzen in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen normativ vereinbart worden, da der Kenntnisstand zu möglichen Auswirkungen noch nicht ausreichend vorhanden ist. Es wird aber empfohlen, keine höheren Spannungspegel zuzulassen als die für die nächsthöhere geradzahligen Oberschwingung angegebenen Verträglichkeitspegel.

Für **Spannungsverzerrungen oberhalb der 40. Oberschwingungsordnung** (> 2 kHz), auch Supraharmonische genannt, spielt es allgemein keine Rolle ob die Frequenzen als Oberschwingung oder als Zwischenharmonische auftreten. Die Spannungsverzerrungen können sowohl als diskrete Frequenzen als auch in Frequenzbändern vorliegen. Für die EMV-Koordination bei der Festlegung von Aussendungsgrenzwerten für ungewollte symmetrische Aussendungen sind Verträglichkeitspegel für symmetrische Spannungsverzerrungen oberhalb der 40. Oberschwingungsordnung bis 9 kHz angegeben [2]. Die Spannungsverzerrungspegel werden in Bandbreiten von 200 Hz um eine Mittenfrequenz ermittelt. Die Mittenfrequenzen liegen bei 50 Hz Netzen im Bereich von 2600 Hz bis 8900 Hz.

**Kommutierungseinbrüche** entstehen im normalen Betrieb von Stromrichterschaltungen bzw. auch bei Diodenbrückenschaltungen mit natürlicher Kommutierung. Bei Stromrichtern wird periodisch zwischen den Thyristorventilen umgeschaltet, d.h. es zündet während des Kommutierungsvorgangs der jeweils nachfolgende Thyristor in der nächsten Phase, während der zu löschende Thyristor noch leitend ist. Durch diese Überlappung, auch Kommutierungsdauer genannt, werden zwei Phasen für einige Mikrosekunden kurzgeschlossen und es treten sehr hohe Kommutierungsströme auf, die an den Netzimpedanzen zu steilflankigen Spannungseinbrüchen führen können. Diese sogenannten Kommutierungseinbrüche wirken sich störend auf Betriebsmittel aus, die am gleichen Verknüpfungspunkt oder sogar an der vorgelagerten Netzebene angeschlossen sind.

Kommt es in einem Netzbereich zu einer sehr starken unsymmetrischen Strombelastung des Dreiphasen-Versorgungsnetzes, führt dies zwischen den Leitern zu ungleichen Effektivwerten der Spannungen. Die unsymmetrischen Strombelastungen werden zumeist von leistungsstarken einphasigen oder zweiphasigen Verbraucherlasten verursacht, die zwischen zwei Außenleitern bzw. zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter angeschlossen werden. Der Grad der **Spannungsunsymmetrie** wird mit hinreichender Genauigkeit als das Verhältnis der Gegenkomponente der Spannung (negative Halbschwingung) zur Mitkomponente der Spannung (positive Halbschwingung) ausgedrückt. Typische Auswirkungen der Spannungsunsymmetrie sind zum Beispiel die vom Gegensystem der Spannung aufgebauten Magnetfelder in elektrischen Maschinen. Die Magnetfelder wirken gegen die Drehrichtung des Läufers, reduzieren das Drehmoment der Maschine und erhöhen die thermischen Verluste durch die induzierten Ströme im Läufer. Neben den höheren Verlusten, die zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung führen und den reduzierten Drehmomenten der Maschinen, treten ggf. auch Rüttelmomente auf, die zu einer zusätzlichen mechanischen Beanspruchung und reduzierten Lebensdauer führen.

# 3 Feststellen und Bewerten der Spannungsqualität

## 3.1 Messung der Spannungsqualität

Bei der Messung der Spannungsqualität sind grundsätzlich Messgeräte der Klasse A nach IEC 61000-4-30 [5] einzusetzen. Damit sind die Messergebnisse normenkonform und können für die Bewertung uneingeschränkt verwendet werden.

Bei der Betrachtung der Spannungsqualität sollte das Augenmerk auch auf den Stromfluss der angeschlossenen Verbraucher gelegt werden. Es ist zwingend erforderlich neben der Spannung auch die Ströme messtechnisch zu erfassen.

Bei der verwendeten Messtechnik ist darauf zu achten, dass Spannungen und Ströme mit entsprechend hohen Frequenzen gemessen werden können, damit eine normkonforme Betrachtung der Messergebnisse möglich ist.

Um eine Bewertung im Zusammenhang mit Aufzeichnungen von Oberschwingungen vornehmen zu können, ist ein Zeitraster von zehn Minuten zu wählen. Moderne Messgeräte gestatten darüber hinaus auch eine Darstellung anderer Zeitintervalle. In vielen Fällen ist es erforderlich, die gemessenen zehn Minuten Mittelwerte zu hinterfragen, ob nicht Vorgänge im elektrischen Netz vorliegen, die eine hohe Dynamik besitzen. Aus diesem Grund sind je nach Qualität des Messgeräts 10 und/oder 200 ms Maximalwerte vorhanden, die in ihrem Einfluss auf die Spannungsqualität bewertet werden sollten.

## 3.2 Bewertung der Spannungsqualität

Die Auswertung von Messungen zur Spannungsqualität bzw. der Lastverhältnisse erfolgt nach den folgenden jeweils anwendbaren Normen oder Richtlinien:

- Die DIN EN 50160 [1] beschreibt die zu erwartenden Grenzen und Merkmale der Spannung in öffentlichen Energieversorgungsnetzen der Nieder-, Mittel- und Hochspannung an beliebigen Übergabestellen. Die in der Norm aufgeführten Grenzen und Merkmale der Spannung sind nicht anwendbar als Werte für die EMV-Verträglichkeit oder als Grenzwerte für die Aussendung von Netzurückwirkungen von Anlagen oder Geräten eines am öffentlichen Netz angeschlossenen Netznutzers.
- Die DIN EN 61000-2-2 [2] beschäftigt sich mit leitungsgeführten Störgrößen der Spannung und den Signalen von Netz-Kommunikationssystemen **in öffentlichen Niederspannungsnetzen** bis 690 V im Frequenzbereich von 0 Hz bis 150 kHz. Die angegebenen Verträglichkeitspegel gelten für den Verknüpfungspunkt - üblicher Weise dem Anschlusspunkt - mit dem öffentlichen Netz.
- Die DIN EN 61000-2-4 [3] beschäftigt sich mit leitungsgeführten Störgrößen der Spannung **in industriellen und nicht öffentlichen Wechselspannungsnetzen bis 35 kV**. Die Verträglichkeitspegel für Störgrößen der Spannung werden in die Umgebungsklassen 1 bis 3 eingeteilt.

Die Klasse 1 gilt für geschützte Versorgungsbereiche, wie beispielsweise technische Laboratorien oder Datenverarbeitungseinrichtungen. Die Verträglichkeitspegel für Störpegel der Spannung sind kleiner als die für öffentliche Versorgungsnetze.

Die Klasse 2 gibt Verträglichkeitspegel für Störpegel der Spannung an, die allgemein mit den Verträglichkeitspegeln der öffentlichen Nieder- und Mittelspannungsnetze identisch sind. Geräte und Anlagen, die für den Betrieb an diesen öffentlichen Netzen entwickelt worden sind, können in industriellen und nicht öffentlichen Versorgungsnetzen genutzt werden.

Die Klasse 3 gilt ausschließlich in industriellen Netzen für anlageninterne Anschlusspunkte mit überwiegenden Stromrichterlasten, Schweißmaschinen, großen Motoren die häufig gestartet werden, bzw. schnell schwankenden großen Verbraucherlasten.

- Die DIN EN 61000-2-12 [4] beschäftigt sich mit leitungsgeführten Störgrößen der Spannung im Frequenzbereich bis 9 kHz, mit einer Erweiterung auf 148,5 kHz speziell für Netz-Signalübertragungssysteme, **in öffentlichen Mittelspannungs-Versorgungsnetzen** mit Spannungen zwischen 1 kV und 35 kV. Die angegebenen Verträglichkeitspegel gelten für private Anschlusspunkte an das öffentliche Mittelspannungs-Versorgungsnetz oder für die Anschlusspunkte von Netzstationen, die in öffentliche Niederspannungs-Versorgungsnetze einspeisen.

# 4 Schaltungstechnische Maßnahmen zur Aufrechterhaltung & Verbesserung der Spannungsqualität

Mit schaltungstechnischen Maßnahmen, wie sie in der Fachliteratur der Elektrotechnik beschrieben werden, lassen sich negative Auswirkungen von Verbrauchern auf die Spannungsqualität in besonderen Anwendungsfällen reduzieren, bzw. können die Auswirkungen einer vorliegend mangelhaften Spannungsqualität auf die Verbraucher reduziert werden. Üblicherweise nutzt man diese schaltungstechnischen Maßnahmen schon bei der vorausgehenden Planung und Errichtung von Anlagen und Netzen. Nachträgliche Änderungen an Anlagen und Netzen sind dagegen meistens mit hohen Aufwendungen und Betriebsunterbrechungen verbunden.

Nachfolgend werden Beispiele von schaltungstechnischen Maßnahmen angeführt, wie sie detaillierter in der Fachliteratur beschrieben werden.

- **Verwenden einer höheren Pulszahl bei Gleichrichtern**

Durch die Auswahl einer höheren Pulszahl bei der Auslegung von leistungsstarken Gleichrichteranlagen, kann eine Verschiebung und Reduzierung von Oberschwingungsströmen in einen höheren Ordnungsbereich erzielt werden. Deshalb wird in der Literatur die Pulszahlerhöhung als Maßnahme zur Reduzierung der Oberschwingungsströme im Bereich der niedrigen Ordnungszahlen genannt.

- **Verwenden von Transformatoren mit unterschiedlichen Schaltgruppen**

Durch das Verwenden von Transformatoren mit gezielt ausgewählten unterschiedlichen Schaltgruppen werden die unterspannungsseitigen Oberschwingungsströme beispielsweise von zwei Netzen nicht phasengleich in das Netz auf der Oberspannungsseite übertragen. Es kommt zu teilweisen Auslöschungseffekten von Oberschwingungsströmen und somit zur Reduktion der Oberschwingungsstrompegel im gemeinsamen Oberspannungsnetz. Die beiden Netze auf der Unterspannungsseite können jedoch nicht gekuppelt werden, da die Spannungen nicht phasengleich sind.

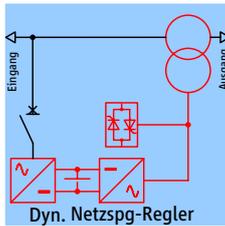
- **Auftrennung in Netzbereiche für empfindliche und unempfindliche Verbraucher**

Der Betrieb von größeren oder in hoher Anzahl vorkommenden schnell schwankenden großen Verbraucherlasten (Stromrichter, Schweißmaschinen, usw.) verursacht Spannungsschwankungen, Spannungseinbrüche und hohe Oberschwingungsbelastungen. Der gleichzeitige Betrieb von diesen unempfindlichen Verbrauchern zusammen mit empfindlichen Verbrauchern im gleichen Netz führt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu Betriebsstörungen. Bei der vorausgehenden Planung von neuen industriellen Netzen sollte daher überlegt werden ob es sinnvoll ist, zwei getrennte Netze, anstatt ein gemeinsames Netz aufzubauen. Der höhere Investitionsaufwand für zwei getrennt aufgebaute Netze ist nicht unerheblich. Ein Vergleich zu Maßnahmen zur Sicherung der Spannungsqualität mit Geräten und/oder Anlagen für einen gemeinsamen Betrieb mit einem Netz sollte geprüft werden.

# 5 Maßnahmen zur Aufrechterhaltung & Verbesserung der Spannungsqualität mit Geräten und Anlagen

In bestehenden innerbetrieblichen Netzen ist es größtenteils üblich, dass alle Verbraucher an gemeinsamen Teilnetzen betrieben werden. Je nachdem welche Verbraucher sich in den Teilnetzen befinden und wie die Teilnetze dimensioniert wurden, ergeben sich mehr oder weniger große Einflüsse auf die Spannungshöhe und die Spannungsform. Gleichzeitig unterliegen alle innerbetrieblichen Netze immer den Einflüssen aus vorgelagerten Netzen. Im nachfolgenden Abschnitt werden technische Ansätze beschrieben, welche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Spannungsqualität mit Geräten und Anlagen zur Verfügung stehen.

Merkmale der Spannung	Ausprägung	verursacht durch	Maßnahme mit Geräten und Anlagen	
Spannungshöhe	langsame Spannungsänderungen in vorgelagerten Netzen	tageszeitliche und/oder einspeiseabhängige Schwankungen	Transformator-Stufenschalter (Verteilnetzbetreiber)	
	schnelle Spannungsänderungen in vorgelagerten Netzen	Schalten großer Lasten im vorgelagerten Netz	dynamische Netzspannungsregler	
	Spannungseinbrüche in vorgelagerten Netzen	Kurzschluss oder Erdschluss im vorgelagerten Netz		
	zeitweilige Überspannungen in vorgelagerten Netzen	Lastabtrennungen oder Leitungsumschaltungen in Hochspannungsnetzen		
	transiente Überspannungen in vorgelagerten Netzen	Blitzeinschläge im vorgelagerten Netz	Überspannungsableiter	
	schnelle Spannungsänderungen im innerbetrieblichen Netz		Schalten großer Lasten im innerbetrieblichen Netz	(Motor-) Anlaufkompensation
				dynamische Kompensation (Thyro / Statcom)
	Flicker im innerbetrieblichen Netz		kurze periodische Lasten oder pulsierende Lasten im innerbetrieblichen Netz	dynamische Kompensation (Thyro / Statcom)
Spannungsunsymmetrie im innerbetrieblichen Netz		stark unsymmetrische Strombelastung im innerbetrieblichen Netz	Aktivfilter (stromgeführt) Dynamische Kompensation (Statcom)	
Spannungsform	Oberschwingungen (Spannung) in vorgelagerten Netzen	nicht lineare Verbraucher im vorgelagerten Netz (Parallelnetze)	Passivfilter	
			Geregelte Passivfilter	
			Aktivfilter (spannungsgeführt)	
	Oberschwingungen (Strom/Spannung) im innerbetrieblichen Netz	nicht lineare Verbraucher im innerbetrieblichen Netz	Passivfilter	
			Aktivfilter (spannungs- oder stromgeführt)	
	Kommütierungseinbrüche im innerbetrieblichen Netz	Stromrichter und/oder Frequenzumrichter im innerbetrieblichen Netz	Drosseln (am Netzanschluss SR / FU) Hochpassfilter	
			Hochpassfilter	
höherfrequente Störsignale im innerbetrieblichen Netz		Taktfrequenzen von elektronischen Lasten, Resonanzpunkte aus Kapazitäten u. Induktivitäten im Netz	Hochpassfilter	



Quelle: ZVEI

• **Dynamische Netzspannungsregler**

Dynamische Netzspannungsregler - auch Dynamic Voltage Restorer genannt - werden überall dort eingesetzt, wo schnelle Spannungsänderungen, Spannungseinbrüche oder zeitweilige Überspannungen zu ungeplanten und kostspieligen Produktionsstillständen führen. Darüber hinaus kann es zur Beeinträchtigung der Qualität der Produkte und/oder zu einem kostspieligen Verschleiß an Maschinen kommen. Der dynamische Netzspannungsregler wird in der Niederspannung zwischen Transformator und Niederspannungshauptverteilung oder vor der Einspeisung einer Unterverteilung mit zu schützenden Lastabgängen eingesetzt.

Mit der dargestellten prinzipiellen Bauweise – Serientransformator und AC-AC Converter mit DC-Zwischenkreis – ist es möglich Spannungseinbrüche von bis zu 30% oder 40% ausgangsseitig auf den Sollwert zu korrigieren. Ebenso ist es möglich zeitweilige Überspannungen bis 20% auf den Sollwert zu reduzieren. Die Online-Regelung erkennt quasi direkt (ca. 150 µs) eine Abweichung vom Sollwert und regelt die Abweichung innerhalb einer halben Netzspannungsperiode auf den Sollwert aus. Je nach Tiefe des Spannungseinbruchs und gerade benötigter Last, ist der dynamische Netzspannungsregler in der Lage den Sollwert der Spannung mindestens 30 Sekunden aufrecht zu erhalten. Bei Überlast und Kurzschlüssen schützt sich das System unterbrechungsfrei mit einem elektronischen Bypass-Schalter. Die Regelfunktion ist ohne Rückwirkungen mit einem mechanischen Bypass-Schalter (nicht dargestellt) dauerhaft deaktivierbar, um Wartungen zu ermöglichen oder Störungen zu beseitigen.



Quelle: ZVEI

• **Dynamische Kompensationsanlagen - thyristorgeschaltet**

Dynamische Kompensationsanlagen sind geregelte, thyristorgeschaltete Kondensatorstufen mit einer Schutzverdrösselung gegen zu hohe Oberschwingungsströme. Solche Kompensationsanlagen werden immer dann angewendet, wenn induktive Blindleistungs-Stoßbelastungen von Verbraucheranlagen mit schnellen Betriebszyklen, wie beispielsweise Schweißmaschinen, Krane, Förderanlagen, Aufzüge usw., kompensiert werden müssen. Das schnelle Ausregeln der Blindleistungs-Stoßbelastungen führt zur Reduktion von Spannungseinbrüchen und Flickern, die sich störend auf andere Verbraucheranlagen auswirken, bzw. störende visuelle Effekte verursachen.

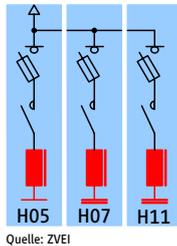


Quelle: ZVEI

• **Dynamische Kompensationsanlagen - Statcom**

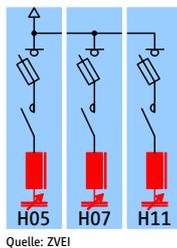
Als Statcom bezeichnet man eine statisch arbeitende Kompensationsanlage, die dynamisch kapazitive oder induktive Grundschwingungsblindleistung in einem weiten Leistungsbereich anpasst und für jeweilige Aufgaben zur Verfügung stellen kann. Im Unterschied zu rotierenden Phasenschiebern, mit entsprechendem mechanischem Verschleiß, wird die Blindleistung durch Leistungselektronik bereitgestellt und kann somit weitaus schneller und dynamischer auf Lastschwankungen reagieren.

Ein Statcom wird üblicher Weise für die dynamische Blindleistungsregelung und Flickerkompensation von Walzwerken, Fördermaschinen, Bahnkompensationen, sowie zur dynamischen Spannungsstabilisierung in schwachen Netzen oder bei langen Kabelverbindungen durch geregeltes Bereitstellen von kapazitiver oder induktiver Blindleistung genutzt.



• **Passivfilter**

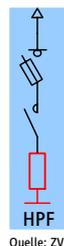
Bei den passiven Filtern klassischer Bauart wird die Eigenresonanzfrequenz der Filterstufe sehr nahe auf den zu filternden Oberschwingungsstrom eines Abnehmers oder einer Abnehmergruppe festgelegt. Dadurch wird dem jeweiligen Oberschwingungsstrom der Verursacher ein niederimpedanter Bypass parallel zur Netzimpedanz zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise wird der Oberschwingungsstrom wirksam gefiltert und nicht ins Verteilnetz übertragen. Dieses Verfahren funktioniert im Bereich der 3. bis 25. Harmonischen und benötigt für jede zu filternde Harmonische mindestens eine Filterstufe. Gerade bei passiven Filtern ist die Gefahr einer Überlastung besonders groß. Hier sind eine ständige Überwachung und eine regelmäßige Wartung unerlässlich. Weiterhin können sich die passiven Filter nur bedingt an Laständerungen anpassen. Durch die Kombination mit Widerständen parallel zur Filterkreisdrossel können für höhere Oberschwingungen Hochpass-Filter aufgebaut werden. Die genaue Berechnung der Wirkung von passiven Filterkreisen erfordert in den meisten Fällen eine leistungsfähige Simulations-Software und erfahrene Spezialisten.



• **Spannungsgeführte Passivfilter**

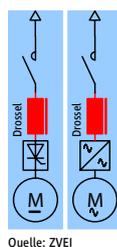
Wie auf den vorhergehenden Seiten beschrieben, ergibt sich bei den klassischen passiven Filtern der Konflikt, das Filter entweder mit großzügigen Reserven auszulegen sind oder Gefahr zu laufen, dass sich dieses gerade dann wegen Überlast abschaltet, wenn die Oberschwingungsbelastung am größten ist, also das Filter am nötigsten gebraucht wird. Eine Lösung dieses Problems liegt darin, den Filterstrom zu überwachen und die Abstimmfrequenz abhängig vom Filterstrom zu verändern.

Bei ansteigender Oberschwingungsspannung wird beim Überschreiten des zulässigen Filterstroms die Abstimmfrequenz reduziert. Dies hat einen Anstieg der Impedanz zur Folge und somit eine Reduktion des Filterstroms. Bei sinkender OS-Spannung und damit sinkendem Filterstrom wird dann die Abstimmfrequenz wieder erhöht. Für die Regelung der Abstimmfrequenz kann entweder die Kapazität oder die Induktivität der Filterstufe verändert werden. Dies kann z. B. mittels einem Stufenaufbau aus einer festen Induktivität, einem Hauptkondensator und kleinen geschalteten Regelkondensatoren erfolgen.



• **Hochpassfilter**

Der Hochpassfilter wird prinzipiell als Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator aufgebaut. Wie der Name schon sagt, lässt der Hochpassfilter Störspannungen mit hohen Frequenzen durch und sorgt somit dafür, dass die 50 Hz Grundschwingungsspannungen in Wechselspannungsnetzen von überlagerten hochfrequenten Störspannungen bestmöglich gefiltert werden. Störspannungen mit hohen Frequenzen werden durch Kommutierungsvorgänge und Taktfrequenzen in leistungselektronischen Schaltungen verursacht, können insbesondere bei LED-Beleuchtungen flackern und hörbare Geräusche in elektronischen Netzteilen bzw. Beleuchtungsvorschaltgeräten verursachen.



• **Drosseln**

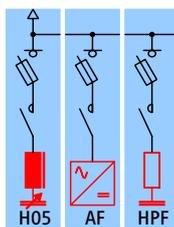
Um die Änderungsrate des Stroms bei Kommutierungsvorgängen wirksam zu begrenzen, sollten Drosseln vor leistungsstarke Stromrichter und Frequenzumrichter geschaltet werden. Da Stromspitzen zur Verzerrung der sinusförmigen Grundschwingung beitragen, bewirkt ihre Reduktion eine Abschwächung der Verzerrung und somit eine Reduzierung der Oberschwingungen und der Supraharmonischen.



Quelle: ZVEI

- **Aktivfilter**

Aktivfilter kompensieren Oberschwingungen bis zur 50. Harmonischen mit hoher Genauigkeit. Dazu messen Aktivfilter Strom und Spannung eines Netzabschnitts und speisen für das Eliminieren von Oberschwingungen aktiv Ströme mit entsprechenden Frequenzen und entgegengesetzter Phasenlage in den Netzabschnitt ein, um Oberschwingungsströme von Verbrauchern gezielt auszulöschen. Aktivfilter können jederzeit sehr genau auf die jeweiligen Anforderungen eingestellt bzw. angepasst werden und können nicht überlastet werden. Zusätzlich erfüllen aktuelle Aktivfilter ebenso die Funktionalitäten der Flicker-Kompensation und der Spannungssymmetrierung, indem der Effekt genutzt wird, dass induktive Blindleistung die Netzspannung absenkt und kapazitive Blindleistung diese erhöht.



Quelle: ZVEI

- **Aktivfilter in Kombination mit Passivfiltern**

In Kombination mit spannungsgeführten Passivfiltern für beispielsweise die 5. Harmonische und/oder Hochpassfilter können im Bedarfsfall ökonomische und breitbandige Filterlösungen bis 9 kHz erstellt werden.

## 6 Zusammenfassung

Die sich ändernde Versorgungssituation durch die Integration dezentraler, meist regenerativer Erzeuger in das öffentliche Versorgungsnetz sowie der stetig wachsende Anteil von elektronischen Verbrauchern wirken sich wie beschrieben negativ auf die Spannungsqualität aus. Da sich dieser Trend in den kommenden Jahren fortsetzen wird, ist es dringend erforderlich sich mit dem Thema Spannungsqualität auseinanderzusetzen.

Der vorliegende Leitfaden zeigt neben den Ursachen und Ausprägungen einer geringen Spannungsqualität auch verschiedene Lösungsansätze. Da sowohl die Ausprägung als auch Auswirkung geringer Spannungsqualität sehr unterschiedlich und individuell ausfallen können, ist eine detaillierte Analyse der Situation vor Ort dringend zu empfehlen.

Für den Fall, dass die beschriebenen Problematiken auftreten, empfiehlt der ZVEI grundsätzlich die Durchführung einer professionellen Netzanalyse. Die sich daraus ergebenden Ergebnisse sind die Voraussetzung für den Power Quality Experten, um eine verlässliche aber vor allem auch wirtschaftlich sinnvolle Lösung auszuarbeiten, welche aus einzelnen Komponenten und Filtern oder aber auch aus einer Kombination der vorgestellten Technologien bestehen kann.

Eine geringe Spannungsqualität kann aber auch vermieden werden. So gilt die Empfehlung, bereits bei der Planung von elektrischen Anlagen die zu erwartenden Netzzurückwirkungen zu identifizieren und im Vorfeld entsprechende Vorkehrungen zu treffen. Dies gilt neben der Installation von Neuanlagen auch für Erweiterungen von Maschinenparks oder Produktionslinien. Auch die Umrüstung von bestehenden Beleuchtungsanlagen auf die LED-Technologie ist hier zu nennen. Die Power Quality Experten des ZVEI stehen gerne für Fachfragen beratend zur Seite.

# 7 Referenzen

- [1] DIN EN 50160:2011-02 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung der EN 50160:2010 + Cor. :2010
- [2] DIN EN 61000-2-2:2020-05 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-2: Umgebungsbedingungen-Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen
- [3] DIN EN 61000-2-4:2003-05 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-4: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen
- [4] DIN EN 61000-2-12: 2004-01 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 2-12: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Mittelspannungsnetzen
- [5] DIN EN 61000-4-30:2016-01: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-30: Prüf- und Messverfahren - Verfahren zur Messung der Spannungsqualität
- [6] VDE-AR-N 4110: 2018-11: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb („TAR“)
- [7] VDE-AR-N 4120: 2018-11: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb („TAR“)
- [8] D-A-CH-CZ - Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen, (2. Ausgabe 2007)
- [9] Einsatz neuer Technologien zur Blindleistungskompensation in elektrischen Netzen, ZVEI Fachverband Starkstromkondensatoren, Dezember 2012
- [10] Empfehlungen zu Oberschwingungs- und Leistungsmessungen in elektrischen Netzen, ZVEI Fachverband Starkstromkondensatoren, April 2018



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-  
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9  
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

Fax: +49 69 6302-317

E-mail: [zvei@zvei.org](mailto:zvei@zvei.org)

[www.zvei.org](http://www.zvei.org)