



SIEMENS



Totally Integrated Power

Technische Schriftenreihe Ausgabe 14

Einfluss moderner Technik auf Oberschwingungen im Verteilungsnetz

www.siemens.de/tip-cs

1. Versorgungsqualität

Die Versorgungsqualität in den Stromnetzen wird durch drei Faktoren bestimmt:

$$\text{Versorgungsqualität} = \text{Spannungsqualität} + \text{Verfügbarkeit} + \text{Servicequalität}$$

Im Niederspannungsverteilungsnetz beeinflusste die technische Entwicklung bei Stromverbrauchern und bei Erzeugern elektrischer Energie in den letzten 10 bis 20 Jahren wesentlich die Spannungsqualität. Gleichzeitig nimmt die Empfindlichkeit von Verbrauchern gegenüber Störungen bei der Spannungsqualität zu. Die EN 50160 beschreibt folgende Hauptmerkmale der Versorgungsspannung an den Anschlüssen in öffentlichen Netzen:

- Spannungshöhe und langsame Spannungsänderungen
- Schnelle Spannungsänderungen, Flicker
- Spannungseinbrüche
- Versorgungsunterbrechungen
- Spannungsunsymmetrie
- Oberschwingungsspannung und zwischenharmonische Spannung
- Netzfrequente und transiente Überspannungen
- Frequenzschwankungen

In Tab. 1 werden die Pegel und Anhaltgrößen für die zulässige Spannung im elektrischen Versorgungsnetz nach EN 50160 aufgelistet. Eine einfache Zuordnung von Problemen bei der Spannungsqualität hinsichtlich Ursachen und Folgen finden Sie in Kap. 5 von [1]. Die Spannungsqualität wird bestimmt durch die gebotene Netzqualität der Versorgungs- und Verteilungsnetzstruktur und durch Netzzrückwirkungen, die von den angeschlossenen Verbrauchern und den dezentralen Energieerzeugern in das Verteilungsnetz eingebracht werden. Um die Netzqualität zu bestimmen, können Messgeräte wie zum Beispiel SICAM Q80 oder auch SENTRON 7KM PAC3200/4200 verwendet werden. Da im Prinzip alle Anschlussnehmer im Verteilungsnetz von Problemen in der Spannungsqualität betroffen sind und sich stets betriebsbedingte Änderungen ergeben können, ist bereits bei der Planung auf eine passende Messtechnik zu achten. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Spannungsqualität ein Kriterium für Regressansprüche oder Preisänderungen sein wird, und dass der Nachweis durch den Betreiber erbracht werden soll.

Aufgrund der Umstrukturierung des Energieerzeugungskonzepts - weg von geregelten Kraftwerken in der Nähe der Verbrauchszentren, hin zur dezentralen Stromversorgung, die witterungs- und zeitabhängig ist sowie von lokalen Gegebenheiten beeinflusst wird - sind intelligente Konzepte wie z. B. Smart Grid gefordert. Der effiziente Einsatz von Mess- und Automatisierungstechnik, Speichertechnologien, Energieverbrauchssteuerungen sowie steuerbarer Energiewandlungstechnologien wie Frequenzumformer für Motorantriebe, unterbrechungsfreier Stromversorgungen, Schaltnetzteile und Ladesäulen für Elektrofahrzeuge muss vom Planer bedacht werden.

Tab. 1: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach EN 50160

Merkmal	Anforderungen	Messintervall	Betrachtungszeitraum
Netzfrequenz	Verbundnetz: 50 Hz +4 % / -6 % dauernd; 50 Hz ± 1 % während ≥ 99,5 % eines Jahres Inselbetrieb: 50 Hz ± 15 % dauernd; 50 Hz ± 2 % während ≥ 95 % einer Woche	10-s-Mittelwert	1 Jahr 1 Woche
Langsame Spannungsänderungen	$U_{\text{nenn}} +10 \% / -15 \%$ dauernd $U_{\text{nenn}} \pm 10 \%$ während ≥ 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Flicker / schnelle Spannungsänderungen	Langzeitflickerstärke $P_{\text{lt}} < 1$ während ≥ 95 % einer Woche und $\Delta U_{10\text{ms}} < 2 \% U_{\text{rated}}$	2 h (Flickermeter gemäß IEC 61000-4-15; VDE 0847-4-15)	1 Woche
Spannungsunsymmetrie	U (Gegensystem) / U (Mitsystem) < 2 % während ≥ 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Oberschwingungen $U_{n2} \dots U_{n25}$	< Grenzwert nach EN 50160 und $THD < 8 \%$ während > 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert jeder Harmonischen	1 Woche
Zwischenharmonische	in Beratung		1 Woche
Signalspannungen	< Normkennlinie = $f(f)$ während ≥ 99 % eines Tages	3-s-Mittelwert	1 Tag
Spannungseinbrüche	Anzahl < 10 ... 1.000 / Jahr; davon > 50 % mit $t < 1$ s und $\Delta U_{10\text{ms}} < 60 \% U_{\text{nenn}}$	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} = 1 \dots 90 \% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Kurze Spannungsunterbrechungen	Anzahl < 10 ... 1.000 / Jahr; davon > 70 % mit Dauer < 1 s	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} \geq 1 \% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Lange Spannungsunterbrechungen	Anzahl < 10 ... 50 / Jahr; davon > 70 % mit Dauer < 3 min		1 Jahr
Zeitweilige Überspannung (L-N)	Anzahl < 10 ... 1.000 / Jahr; davon > 70 % mit Dauer < 1 s	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} > 110 \% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Transiente Überspannung	< 6 kV; $\mu\text{s} \dots \text{ms}$		k. A.

2. Oberschwingungen

Gerade durch den verstärkten Einsatz von

- nichtlinearen Lasten, z. B. Vorschaltgeräten für Lampen, Dimmern und Netzteilen mit Halbleiterschaltern
- Umrichtern mit Leistungselektronik, z. B. Dioden, Thyristoren und Transistoren in Frequenzumrichtern, Batterieladern und USV-Geräten
- Wechselrichtern für die Netzeinspeisung, wie z. B. bei Photovoltaik- und Windkraftanlagen

sowie durch Ein- und Ausschalt effekte bei den Verbrauchern entstehen verstärkt Oberschwingungen im Verteilungsnetz

und damit Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz. Durch das periodische Schalten von Halbleiterbauteilen entstehen Oberschwingungsströme, die, in Abhängigkeit von der Netzimpedanz, der Spannungsgrundschiwingung Oberschwingungsspannungen überlagern. Im Planungshandbuch [1] (Kap. 5.1.2.) finden Sie Näheres dazu sowie zu den zulässigen Pegeln der Oberschwingungsspannungen und zum Gesamtoberschwingungsgehalt THD_U der Versorgungsspannung (en: THD = total harmonic distortion; THD_I ist der Gesamtoberschwingungsgehalt für den Strom) entsprechend EN 50160. Abb. 1 zeigt ein Beispiel, wie Oberschwingungen den sinusförmigen Verlauf der 50-Hz-Grundschiwingung verformen.

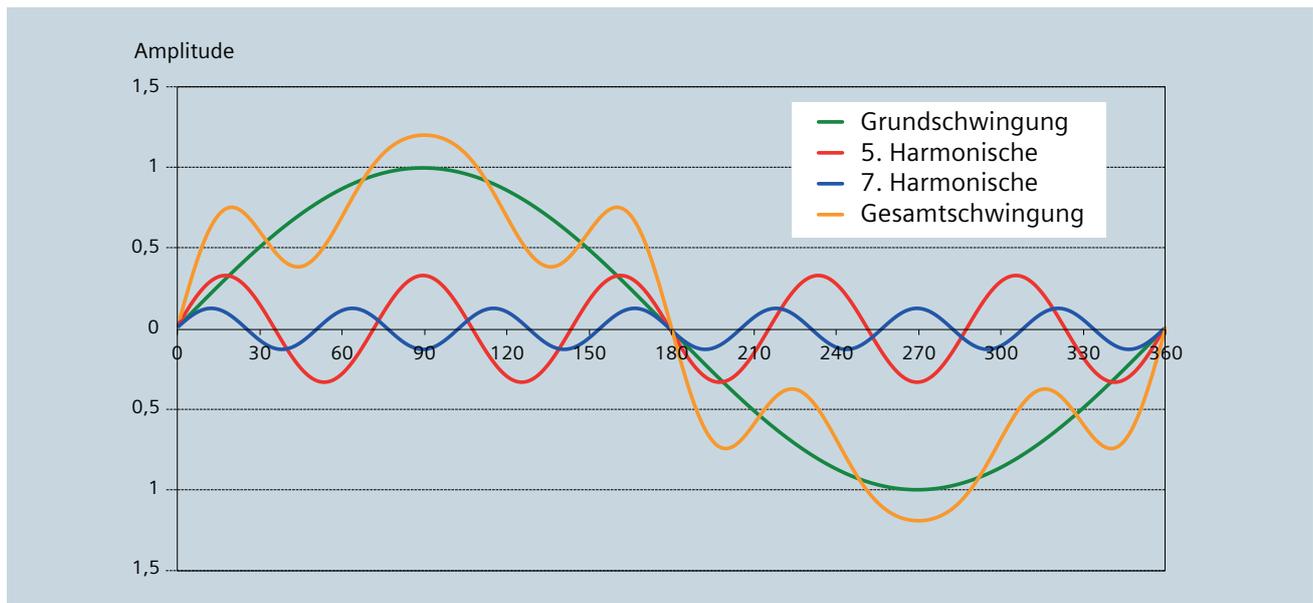


Abb. 1: Einfluss von Oberschwingungen auf eine sinusförmige Grundschiwingung

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} I_v^2}}{I_1}$$

Die Höhe der einzelnen Oberschwingungsströme von Lasten und Umrichtern sollten in den Gerätedatenblättern angegeben sein oder müssen beim Hersteller erfragt werden. Zu beachten ist, dass bei der üblichen Bezeichnungsweise die Grundschiwingung der ersten Harmonischen entspricht. Dabei ist die Frequenz der n-ten Harmonischen das n-fache der Grundschiwingung:

$$n = 1: f_1 = 1 \cdot 50 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz (Grundschiwingung)}$$

$$n = 2: f_2 = 2 \cdot 50 \text{ Hz} = 100 \text{ Hz (1. Oberschwingung)}$$

$$n = 3: f_3 = 3 \cdot 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz (2. Oberschwingung)}$$

$$n = 4: f_4 = 4 \cdot 50 \text{ Hz} = 200 \text{ Hz (3. Oberschwingung)}$$

$$n = 5: f_5 = 5 \cdot 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz (4. Oberschwingung)}$$

D. h., die n-te Harmonische entspricht der (n-1)-ten Oberschwingung.

Im Drehstromnetz kann bei der Vektordarstellung des Dreiphasensystems jede Lastkurve zerlegt werden (Tab. 2) in ein

- mit der Grundfrequenz drehendes System (mit-drehende Komponenten $n = 3 \cdot k + 1$)
- mit der Grundfrequenz gegen den Uhrzeiger drehendes System gegen-drehende Komponenten $n = 3 \cdot k + 2$)
- ein stationäres System (Null-Komponenten $n = 3 \cdot k$)

Dadurch wird deutlich, dass nichtlineare Verbraucher und Erzeuger von Oberschwingungen

- zu zusätzlichen Erwärmungen in Leitern, Spulen und Transformatoren sowie zur Überlastung des Neutralleiters führen können, da die Null-Komponenten der Oberschwingung zu Strömen im Nullsystem führen, die sich im Neutralleiter aufaddieren
- zu einem bremsenden Drehfeld und zu einem niedrigeren Drehmoment in rotierenden Maschinen führen können, wenn Anteile des Gegensystems entstehen
- zu einer ungewollten Beschleunigung und einem höheren Drehmoment von Motoren führen können, wenn zusätzliche Anteile im Mitsystem durch Oberschwingungen entstehen.

Tab. 2: Zerlegung der Oberschwingungen in rotierende Bezugssysteme (+ 50 Hz; 0; - 50 Hz)

Harmonische	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Frequenz in Hz	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Vorzeichen	+	-	0	+	-	0	+	-h	0	+	-
Ordnung	0	h=3k-1	h=3k	h=3k+1	h=3k-1	h=3k	h=3k+1	h=3k-1	h=3k	h=3k+1	h=3k-1
Vorzeichen		Rotation				Konsequenzen					
Positiv (+)		Vorwärts (Mitsystem)				Erwärmung von Leitern und Schutzrelais					
Negativ (-)		Rückwärts (Gegensystem)				Erwärmung von Leitern und Schutzrelais + Motorprobleme					
Null (0)		Keine (Nullsystem)				Addition der Ströme und Erwärmung im Neutralleiter					

k = 1, 2, 3, ...

Gibt es in der Stromverteilungsanlage keine Erzeuger von Oberschwingungen, wird nur Scheinleistung für die Grundschwingung (S_1) benötigt. Sie wird für 3-phasigen Drehstrom aus der Wirkleistung ($P_1 = P$) und der Blindleistung für die Grundschwingung (Q_1) und dem Wirkfaktor $\cos \varphi$ (Grundschwingung) bestimmt:

$$P = P_1 = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

$$Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$$

Oberschwingungsblindleistung D , auch Verzerrungsblindleistung genannt, wird durch die Anforderungen nichtlinearer elektrischer Baugruppen erzeugt:

$$D = U \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}$$

Die gesamte Scheinleistung ergibt sich aus:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}$$

Der Leistungsfaktor λ (auch Powerfaktor genannt) wird als Verhältnis von Wirkleistung $P (= P_1)$ zur Scheinleistung S bestimmt:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S_1}$$

ohne Verzerrungsblindleistung ist $S = S_1$ und damit $\lambda = \cos \varphi$

Auch wenn die Grundschwingungsblindleistung vollständig kompensiert wird ($\cos \varphi = 1$), kann Verzerrungsblindleistung und somit Blindleistung im Netz gefordert werden. Dementsprechend kann der Leistungsfaktor λ kleiner sein als der $\cos \varphi$ (Abb. 2).

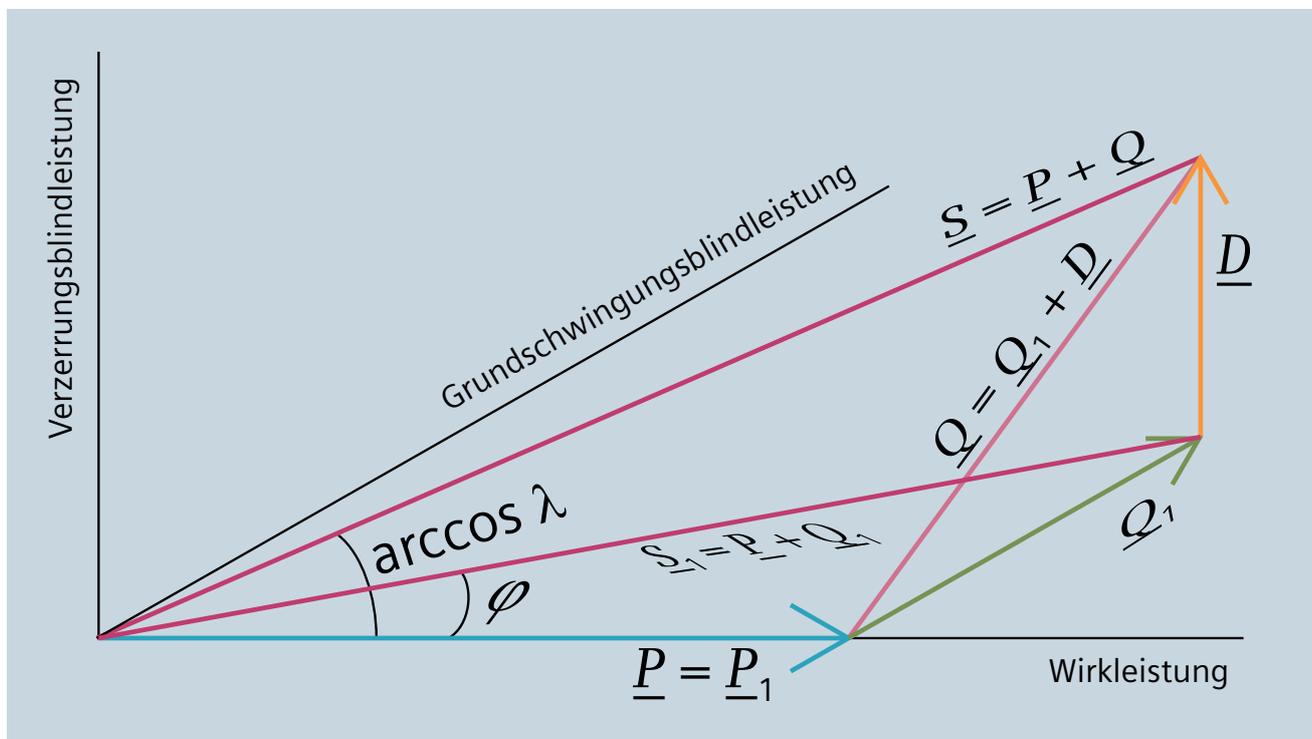


Abb. 2: Vektordarstellung von Wirkleistung P_1 , Blindleistung Q_1 für die Grundschwingung und D für die Verzerrungsblindleistung sowie die Scheinleistung S und S_1 für die Grundschwingung

(Anmerkung: In der Grafik sind Vektoren durch Unterstreichen gekennzeichnet; es handelt sich um vektorielle Addition, nicht um arithmetische Addition)

3. Oberschwingungen im Verteilungsnetz

Für Oberschwingungen sorgen nicht nur die Verbraucher mit nichtlinearer Leistungsaufnahme, sondern auch Energieerzeuger, die z. B. über Umrichter in das Verteilungsnetz einspeisen. Die Auswirkungen der Oberschwingungserzeuger lassen sich aber nicht allein aus der Kenntnis über all die verschiedenen Erzeuger festlegen. Vielmehr muss auch die Netzeinspeisung, der Verteilungstransformator und, im Falle der Sicherheitsstromversorgung, eine Netzersatzanlage im Inselbetrieb in eine Gesamtbetrachtung (Abb. 3) eingeschlossen werden. Weitere Betrachtungen in diese Richtung sind im Planungshandbuch [1] zu finden oder in den „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“ [2].

Die Kurzschlussleistung der Erzeuger (Generator der Netzersatzanlage und Photovoltaikanlage) ist im Inselbetrieb meist deutlich geringer als die der Netzeinspeisung vom Versorgungsnetz, sodass sich dann die Netzimpedanz erhöht.

Dadurch erhöht sich bei gleichem Oberschwingungsstromanteil im Inselbetrieb die Spannungsverzerrung und, selbst wenn im Normalbetrieb (Netzeinspeisung und Photovoltaik-einspeisung) die Forderung $THD_U < 8\%$ nach EN 50160 eingehalten wird, ist dies im Inselbetrieb nicht zwangsläufig gewährleistet. Dementsprechend werden Geräte und Verbraucher stärker beansprucht und unter Umständen ist sogar deren Funktionsfähigkeit in Gefahr.

Außerdem darf die Belastung des Neutralleiters nicht außer Acht gelassen werden. Bei einer unsymmetrischen Verteilung 1-phasiger Verbraucher auf die Außenleiter fließen die Differenzströme zwischen den einzelnen Außenleitern auf dem Neutralleiter zurück. Dazu kommen noch die Ströme des Nullsystems (Tab. 3). Diese Oberschwingungsströme der Außenleiter mit einer ganzzahlig durch 3 teilbaren Frequenz (150, 300, 450 Hz, ...) addieren sich im Neutralleiter.

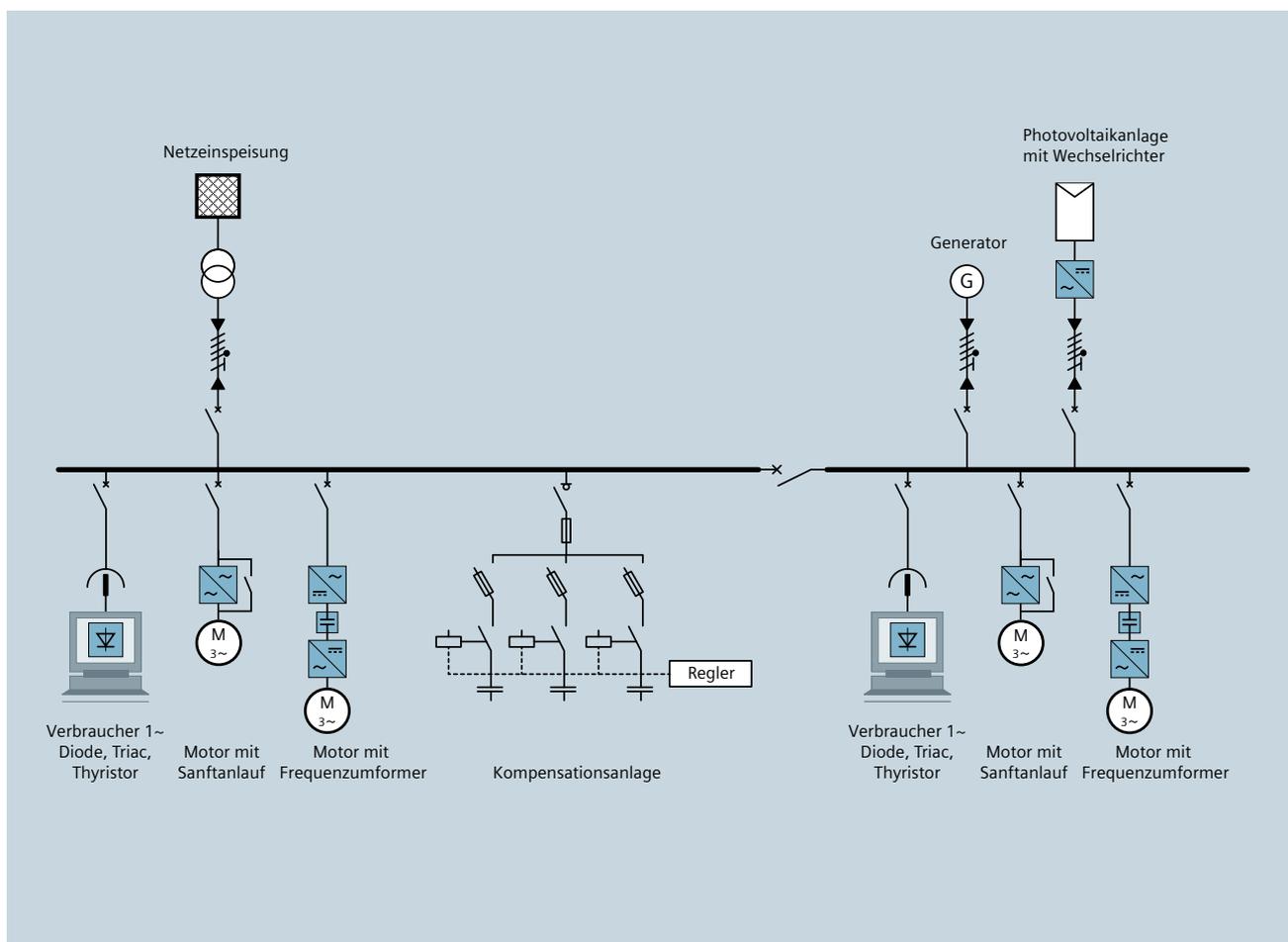


Abb. 3: Verteilungsnetz mit nichtlinearen Verbrauchern, versorgt über Verteilungstransformator und Photovoltaikanlage oder über Netzersatzanlage und Photovoltaikanlage im Inselbetrieb

4. Oberschwingungsverhalten einzelner Komponenten des Verteilungsnetzes

Im Folgenden werden exemplarisch einige Komponenten des Verteilungsnetzes hinsichtlich ihres Verhaltens bei Nichtlinearitäten betrachtet. Bei Transformatoren und Generatoren sind die Rückwirkungen bei der Auslegung zu beachten. Diese Rückwirkungen können durch die Auswahl der nichtlinearen Verbraucher und insbesondere der Halbleiterschaltungen beeinflusst werden.

4.1 Transformatoren

Transformatoren werden nach der maximal angenommenen Last ausgelegt. Die Belastung ist symmetrisch auf die Außenleiter aufzuteilen, sodass keine oder nur sehr geringe Ausgleichsströme über den Neutralleiter fließen. In der Regel ist der Transformatorsternpunkt bezüglich des Neutralleiterstroms nur zu maximal 100% des Transformator-nennstroms belastbar. Bei Stromrichtertransformatoren [1] steigt die Belastbarkeit auf bis zu 150%. Werden höhere Belastbarkeiten gefordert, kann der Transformator zusätzlich überdimensioniert werden.

Oberschwingungen verursachen in Transformatoren zusätzliche Leerlaufverluste (magnetische Streuverluste und Wirbelstromverluste im Eisenkern) und Lastverluste (Wirbelstromverluste in den Kupferwicklungen). Zusätzliche Verluste bedeuten eine zusätzliche Erwärmung und damit eine Lebensdauerverkürzung für die Transformatorisolierung.

Nach IEC 60076-1 (VDE 0532-76-1) sind die üblichen Betriebsbedingungen für Leistungstransformatoren bezüglich des Oberschwingungsgehalts:

- THD_U und THD_I jeweils kleiner oder gleich 5% der Bemessungsgröße
- Gesamtoberschwingungsgehalt für geradzahlige Oberschwingungen kleiner oder gleich 1%

Bei einem Gesamtoberschwingungsgehalt des Volllaststroms kleiner 5% ist im Allgemeinen keine merkliche Verkürzung seiner Lebensdauer zu erwarten. Jedoch kann seine Bemessungs-Übertemperatur (nach IEC 60076-2 und -11 bzw. VDE 0532-76-2 und -11) erreicht werden. Dann sollte eine zusätzliche Kühlung z. B. durch Anbaulüfter (Querlüfter) in Betracht gezogen werden. Übersteigt der

THD_I , die 5%, kann ein Stromrichtertransformator (nach IEC 61378) verwendet werden. Derzeit werden diese überwiegend in der Industrie verwendet.

Alternativ kann eine Überdimensionierung der Transformatoren erfolgen. Gleichzeitig werden dadurch die Auswirkungen der Oberschwingungsströme im Verteilungsnetz gedämpft:

- Transformator mit größerer Bemessungsscheinleistung
- Transformator mit geringerer relativer Bemessungskurzschlussspannung
- Zusätzlicher Paralleltransformator zur Erweiterung einer bestehenden Anlage

Diese Maßnahmen führen zu größeren Kurzschlussströmen, die wiederum Rückwirkungen auf die Auswahl von Schalt- und Schutzgeräten, sowie Kabeln bzw. Leitungen und Schienenverteilern haben. Die Selektivität zwischen den Schutzgeräten ist neu zu bewerten.

Die vergrößerte Bemessungsscheinleistung von Transformatoren wirkt sich auch auf die Stromwärmeverluste aus. Beim Verlustvergleich müssen die Leerlaufverluste und die Kurzschlussverluste addiert werden. Die Kurzschlussverluste steigen quadratisch mit zunehmender Belastung, während die Leerlaufverluste unverändert bleiben. Darum müssen bei der Suche nach dem verlustorientierten Betriebsoptimum die Leerlaufverluste und die Kurzschlussverluste in Abhängigkeit von der Lastgangkurve erfolgen (siehe [1] Kap. 14.2). Bei der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung müssen Investitionskosten und Servicekosten berücksichtigt werden. Entsprechende Kalkulationen kann der Consultant Support von Siemens TIP durchführen.

4.2 Generatoren

Generatoren versorgen bei einem Netzausfall die an die Sicherheitsstromversorgung SV angeschlossenen Verbraucher weiter oder unter Umständen sogar zusätzlich einige ausgewählte Verbraucher der Allgemeinen Stromversorgung AV. Dabei müssen die Betriebsbedingungen für den SV-Betrieb eingehalten werden. Typische Anforderungen an eine Stromquelle für Sicherheitszwecke sind in IEC 60364-5-56 (VDE 0100-560) angegeben und werden in Betriebsstätten-spezifischen Normen, wie z. B. der IEC 60364-7-705 (VDE 0100-705) für landwirtschaftliche und gartenbauliche Betriebsstätten, IEC 60364-7-710 (VDE 0100-710) für medizinisch genutzte Bereiche und IEC 60364-7-718 (VDE 0100-718) für öffentliche Einrichtungen und Arbeitsstätten konkretisiert.

Generatoren können auch zum Lastmanagement genutzt werden, um die Spitzenlast und damit den Leistungsanteil des durchschnittlichen Strompreises zu senken (siehe [1] Kap. 14.5). Zunehmend erstellen die Verteilnetzbetreiber den Betreibern von Netzersatzanlagen günstige Angebote, wenn sie ihre Generatoren zur Abdeckung kurzzeitiger Lastspitzen einsetzen und damit das Netz des Verteilnetzbetreibers stützen.

Die typische subtransiente Reaktanz eines Generators ist in der Regel mit 8 bis 14% deutlich größer als die Bemessungs-kurzschlussspannung u_{kr} eines Transformators. Dadurch werden die mit Nichtlinearitäten verbundenen Spannungsverzerrungen im Inselbetrieb des Generators größer sein als im Netzbetrieb. Zudem hängt das Leistungsverhalten eines Generators häufig stark vom Powerfaktor λ ab. Abb. 4 zeigt ein typisches Heyland-Diagramm, aus dem deutlich wird, dass ein Verbrauchernetz mit kapazitiven Lasten starke Leistungsreduzierungen für den Generator erforderlich machen kann.

Werden beispielsweise in einem Bürohaus sehr viele Rechner mit einfachen Netzteilen (Kondensatoren zur Powerfaktorkorrektur) an der SV-Versorgung betrieben, kann es im Inselbetrieb dazu kommen, dass der Generator für die erforderliche kapazitive Belastung nicht ausreichend ist.

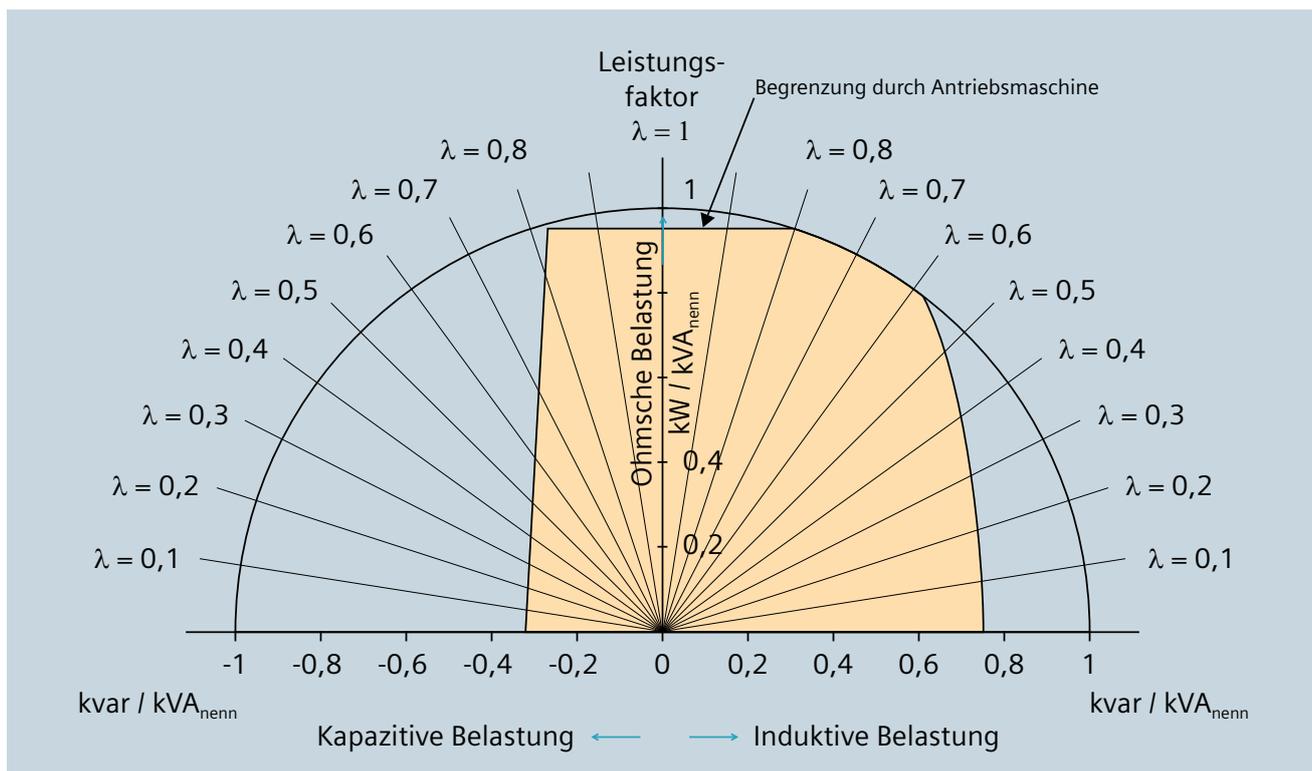


Abb. 4: Beispiel für die Belastungskurve eines Generators als Heyland-Diagramm

4.3 1-phasige elektronische Geräte

Typische Beispiele für 1-phasige Geräte bzw. Gerätekombinationen, die Oberschwingungen erzeugen, sind:

- Netzteile mit einem ungesteuerten Diodengleichrichter
- Leuchtstoffröhren mit konventionellen oder verlustarmen Vorschaltgeräten und ihren Induktivitäten
- Dimmer mit gesteuerten Thyristoren oder Triacs, deren Phasenanschnitt- oder Phasenabschnittsteuerung zu den Störungen führt

Für eine typische 1-phasige Gleichrichterschaltung mit einer ungesteuerten 2-pulsigen Brücke B2 ergibt sich ein theoretisches Oberschwingungsspektrum entsprechend Abb. 5.

Oberschwingungsströme des Nullsystems (3-te, 6-te, 9-te, ..., $3 \cdot n$ -te Harmonische) addieren sich arithmetisch im Nullleiter und können bei einer stark unsymmetrischen Phasenauslastung zu einem sehr hohen Neutralleiterstrom führen.

Da Beleuchtungseinrichtungen und auch Elektronikgeräte aus Effizienzgründen nur für die eigentliche Nutzungsdauer ein- und dann wieder ausgeschaltet oder geregelt werden, macht eine Oberschwingungsreduktion für die einzelnen Verbraucher Sinn. Netzteile mit passiver Powerfaktorkorrektur (PFC, en: power factor correction) durch eine Drossel werden meist nur für kleinere Leistungen bis etwa 200 W eingesetzt. Eine deutliche Verbesserung bei der Leistungsfaktorkorrektur, bis typischerweise $\lambda \approx 0,98$ erreicht wird, liefert die aktive PFC mit einem sogenannten „Aufwärts-wandler“, bei dem geregelte Halbleiterbauelemente genutzt werden.

Durch Schaltfrequenzen der aktiven Bauelemente im Bereich von 10 kHz und deutlich mehr, werden dem Verteilungsnetz hochfrequente Störungen überlagert. Gerade beim Einsatz vieler solcher Elemente, wie z. B. beim Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) für Kompaktleuchtstofflampen, scheinen die hochfrequenten Störungen Probleme zu bereiten [3].

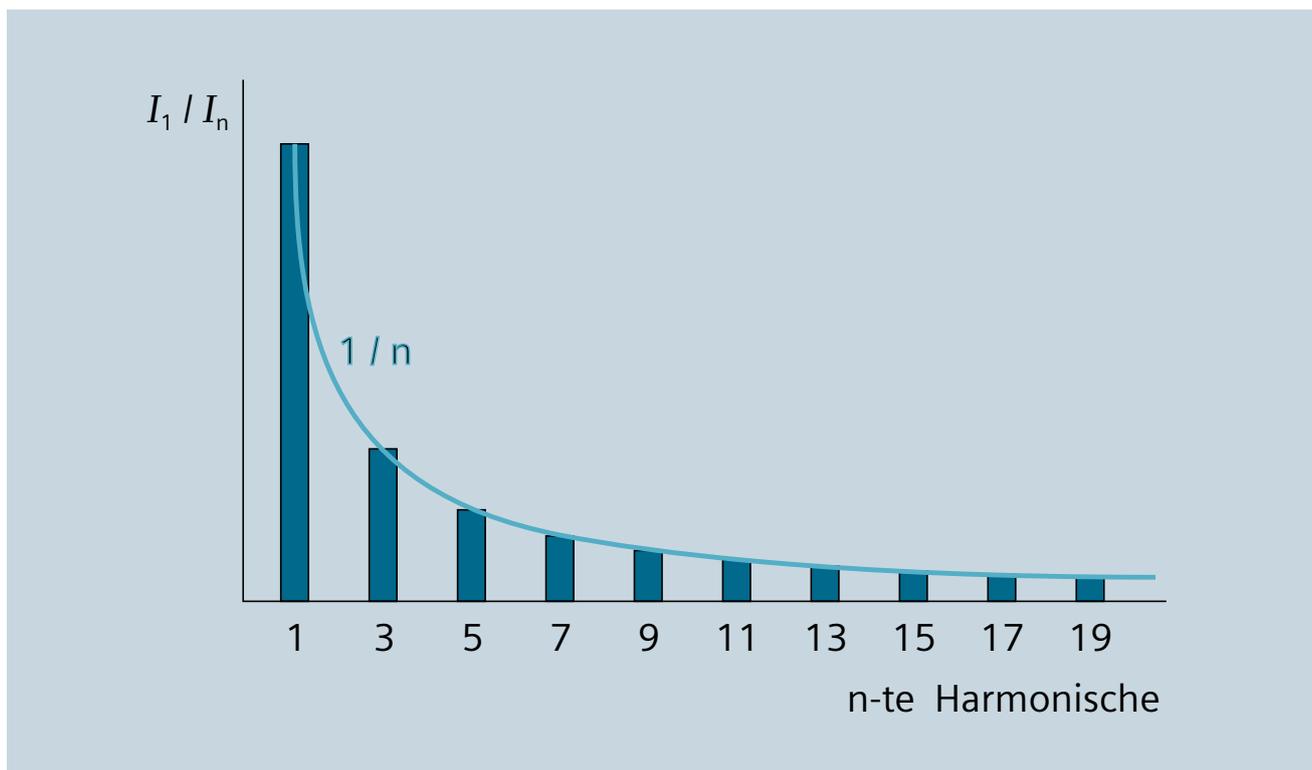


Abb. 5: Oberschwingungsspektrum für eine B2-Brückenschaltung

4.4 Drehstromrichter für Sanftanlauf und Frequenzumformer beim Motorenbetrieb

Sowohl für den Sanftanlauf von Drehstrommotoren als auch für die häufige Regelung der Motordrehzahl bei optimalem Drehmoment eignen sich üblicherweise Drehstrombrücken- oder Drehstrommittelschaltungen, die zu Oberschwingungen führen. Für die unterschiedlichen Aufgaben haben sich verschiedene typische Halbleiterschaltungen bewährt.

Für den Sanftanlauf soll der Motor entsprechend der gewünschten Drehmomentanlaufkurve stufenlos bis zur Betriebsspannung gefahren werden. Üblich ist die Phasenschnittsteuerung einer geregelten Thyristorbrückenschaltung eines Sanftstarters (Abb. 6), bis die Betriebsspannung erreicht ist. Dann wird auf den Bypass umgeschaltet, sodass keine Verluste über die Brückenschaltung und auch keine Oberschwingungen mehr auftreten.

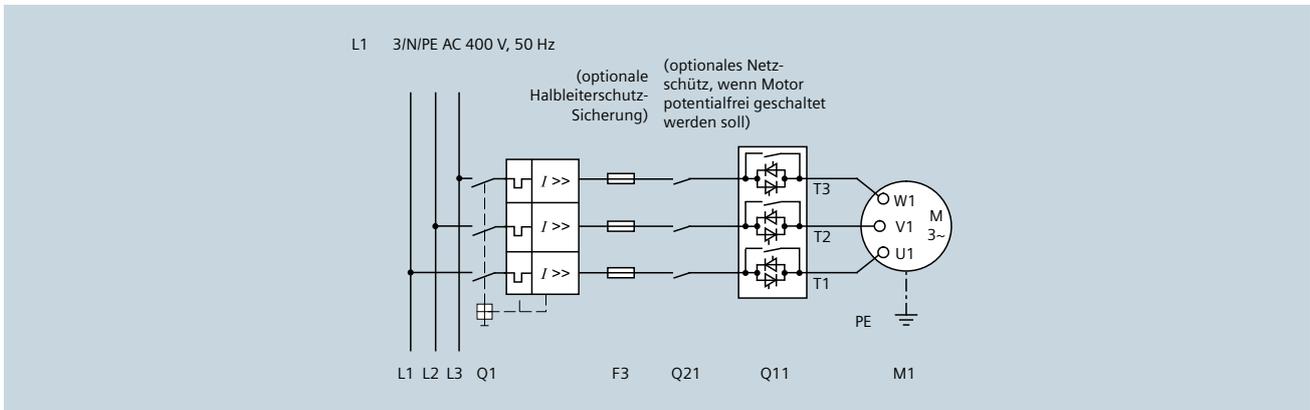


Abb. 6: Vereinfachtes Schaltbild eines Sanftstarters SIRIUS 3RW44

Bei Frequenzumformern erfolgt eine doppelte Wandlung: Von der Netzwechselspannung in die Zwischenkreisgleichspannung und wieder in die Antriebswechselspannung für den Motor. Große Unterschiede gibt es beim Gleichrichter. Eine ungesteuerte B6-Diodenbrücke mit Elektrolytkondensatoren im Zwischenkreis erzeugt Stromharmonische der 5-ten, 7-ten, 11-ten, 13-ten, 17-ten, 19-ten, ..., n-ten Ordnung – also nur ungeradzahlig, nicht durch 3 teilbare Oberschwingungsströme. Werden im Gleichrichter gesteuerte Thyristoren verwendet, entstehen durch Kommutierungseinbrüche Netzbelastungen entsprechend den Schaltlücken im sinusförmigen Stromverlauf. Maßnahmen zur Beschränkung der Netzbelastung durch Filter, Transformatoren, Erhöhung der Pulszahl für die Brückenschaltung oder Verwendung von IGBTs anstelle von Dioden oder Thyristoren werden kurz im Kapitel 5 beschrieben.

Im Frequenzumformer entstehen zudem hochfrequente Störaussendungen durch die schnellschaltenden IGBT-Wechselrichter. Die Störströme können zu Geräuschen und zu einer zusätzlichen Erwärmung im Motor führen. Die hochfrequenten Ableitströme müssen über die Kapazitäten der Motorleitung und der Motorwicklung zur Erde fließen und auf geeignetem Wege zurück zu ihrer Quelle, zum Wechselrichter. Ohne Filter im Umrichter, die den hochfrequenten Störströmen einen geeigneten niederohmigen Rückweg zum Wechselrichter bieten, müssten die Störströme vollständig über den netzseitigen PE-Anschluss des Umrichters zum Sternpunkt des Transformators fließen und von dort aus weiter über das Drehstromnetz zurück zum Umrichter. Auf diesem Wege würden sie die Netzspannung mit hochfrequenten Störspannungen überlagern und somit alle Verbraucher stören, die am selben Netzanschlusspunkt PCC angeschlossen sind (Abb. 7).

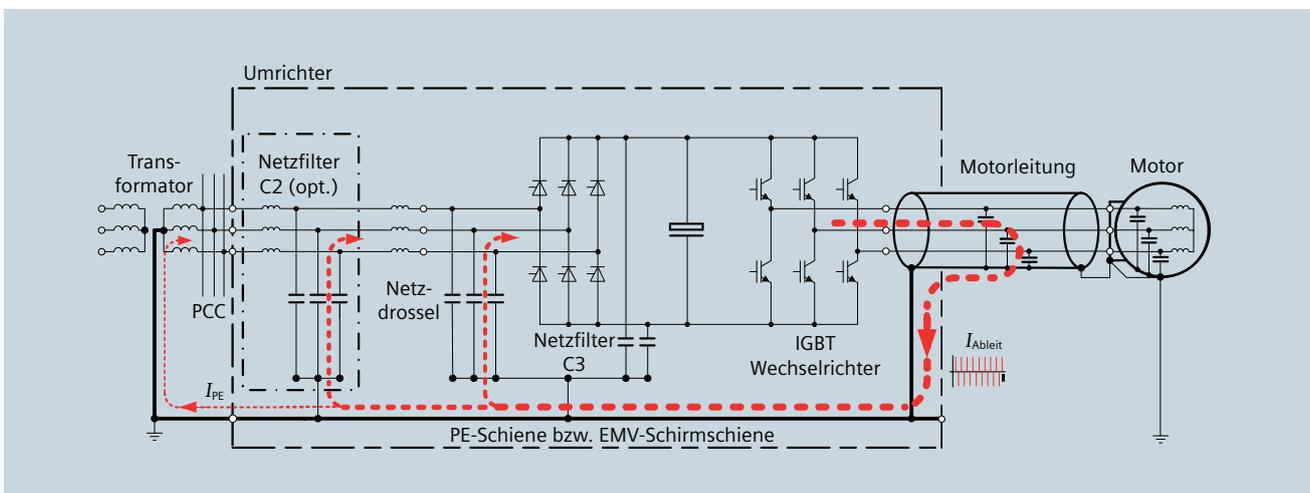
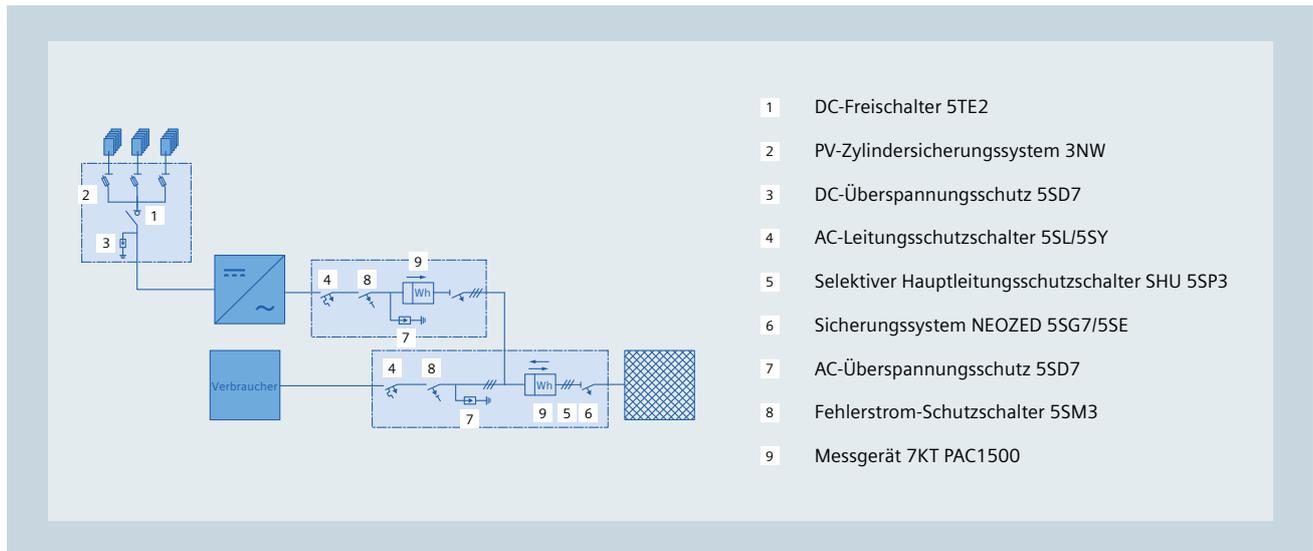


Abb. 7: Filterung von Ableitströmen beim Frequenzumformer

4.5 Photovoltaik-Wechselrichter

Ähnlich wie bei Sanftstartern und Frequenzumformern gibt es eine Vielzahl verschiedener Schaltungstypen für Photovoltaik-Wechselrichter, auch Solarwechselrichter genannt. Es gibt 1- und 3-phasige Wechselrichter, netz- und selbstgeführt, mit Thyristoren und Transistoren, mit und ohne Hochsetzsteller, mit und ohne 50Hz- oder HF-Transformator und mit vielen weiteren Unterscheidungsmerkmalen, wie z. B. bei Filtern und Powerfaktorkorrektur. Entsprechend unterschiedlich sind die Oberschwingungsspektren der Anlagen, da auch die Einspeiseleistung stark variieren kann. Neben den allgemein zu beachtenden Normen müssen für

den netzparallelen Anschluss einer PV-Anlage unter anderem die Normen IEC 60364-7-712 (VDE 0100-712), IEC 60269-6 (VDE 0636-6), IEC 62109-1 und -2 (VDE 0126-14-1 und -2), die Reihe IEC 61000 (VDE 0838) und die deutsche Richtlinie VDE-AR-N 4105 beachtet werden. Darum müssen beim Anschluss z. B. eine DC-seitige und eine AC-seitige Trennung der PV-Module sowie der Überspannungsschutz und gegebenenfalls ein Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD; en: residual current device) der Klasse B oder B+ (siehe Kap. 11.2 in [1]) eingesetzt werden (Abb. 8).



- 1 DC-Freiswitcher 5TE2
- 2 PV-Zylindersicherungssystem 3NW
- 3 DC-Überspannungsschutz 5SD7
- 4 AC-Leitungsschutzschalter 5SL/5SY
- 5 Selektiver Hauptleitungsschutzschalter SHU 5SP3
- 6 Sicherungssystem NEOZED 5SG7/5SE
- 7 AC-Überspannungsschutz 5SD7
- 8 Fehlerstrom-Schutzschalter 5SM3
- 9 Messgerät 7KT PAC1500

Abb. 8: Anschluss einer Photovoltaikanlage an das Verteilungsnetz

Eine bestehende Einrichtung mit PV-Anlage und Generator kann mit einem eigenständigen Speichersystem beispielsweise aus einer Batterieanlage und einem selbstgeführten 4-Quadrantenwechselrichter in der Lade-/Entladeeinrichtung erweitert werden, um sowohl im Netzbetrieb als auch im Inselbetrieb eine optimale Nutzung der Solarenergie zu ermöglichen (Abb. 9).

Für den Inselbetrieb wird in IEC 62109-2 (VDE 0126-14-2) ein maximal zulässiger THD_U von 10% für einen Wechselrichter mit sinusförmiger Ausgangsspannung ausgewiesen und die einzelnen Oberschwingungspegel dürfen 6% nicht übersteigen. Für einen Wechselrichter mit nicht-sinusförmiger Ausgangsspannung darf der Gesamt- THD_U -Wert die 40% nicht übersteigen. Bei Netzbetrieb gelten die Angaben der EN 50160.

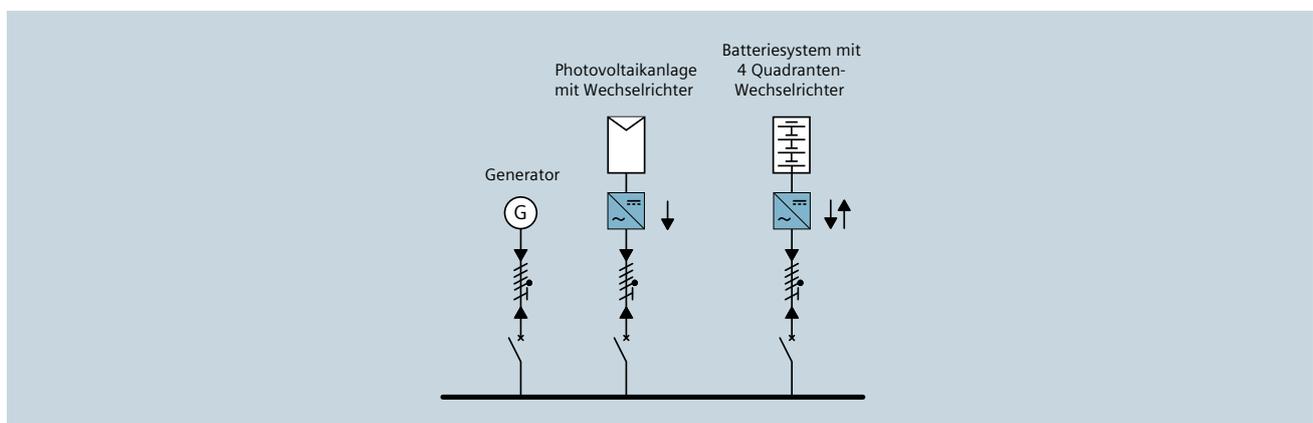


Abb. 9: Energieversorgung im Inselnetz mit Generator, PV-Anlage und Batteriespeicher

4.6 Kabel / Leitungen

Bei der Netzdimensionierung werden die Kabelquerschnitte entsprechend den erforderlichen Stromtragfähigkeiten der Kabel ermittelt, um den Schutz von Kabeln und Leitungen bei Überlast bestimmen zu können. Dazu werden für die Berücksichtigung der Verlege- und Umgebungsbedingungen die Angaben aus der deutschen Norm DIN VDE 0298-4 genommen. Nach DIN VDE 0298-4 muss der Nennquerschnitt des Neutralleiters mindestens dem der Außenleiter entsprechen, wenn der THD_1 für die Oberschwingungsströme einen Anteil von mehr als 15 % hat. Die Erwärmung der Leiter durch Oberschwingungsströme wird durch Reduktionsfaktoren (Tab. 3) berücksichtigt. Die Angaben in DIN VDE 0298-4 gelten allerdings nur für symmetrisch belastete Drehstromnetze ohne den Einfluss von Oberschwingungen.

Aus Tab. 3 lässt sich ableiten, dass bereits ein Stromanteil der 3. Harmonischen von etwa 15 % eine Überwachung der Neutralleiterströme sinnvoll macht, selbst wenn die IEC 60364-4-43 (VDE 0100-430) sehr allgemein bleibt. Gefordert wird eine Überlasterfassung für den Neutralleiter nur dann, wenn zu erwarten ist, dass der Anteil der Oberschwingungen des Außenleiterstroms so groß ist, dass der Strom im Neutralleiter die Dauerstrombelastbarkeit dieses Leiters übersteigt. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass ein PEN-Leiter in TN-C-Netzen zwar überwacht, aber nicht geschaltet werden darf.

Das Normenbeiblatt DIN VDE 0100-520 Bbl3 geht ergänzend zur DIN VDE 0298-4 auf die Bedeutung von Oberschwingungen für die Auslegung von Kabeln und Leitungen ein. Dabei werden die Stromanteile der 3. Oberschwingung bezogen auf den Gesamtstrom im Außenleitern wie in Tab. 3 eingeteilt: > 15 bis 33 %, > 33 bis 45 % und > 45 %. In DIN VDE 0100-520 Bbl3 wird auch eine Erläuterung zu den Korrekturfaktoren von Tab. 3 (sowohl in DIN VDE 0298-4 als auch in DIN VDE 0100-520 Bbl3 aufgeführt) gegeben.

Zur genaueren Bestimmung der Kabel-/Leitungsdurchmesser in Abhängigkeit von den Oberschwingungsströmen – verglichen mit den Korrekturfaktoren aus Tab. 3 – werden in DIN VDE 0100-520 Bbl3 zwei Verfahren angegeben.

- i) Mit einer Näherungstabelle für Korrekturfaktor:
In Abhängigkeit vom Anteil nichtlinearer Lasten wird ein Korrekturfaktor gemäß Tab. 4 bestimmt und bei den Stromtragfähigkeiten in den Tabellen von DIN VDE 298-4 berücksichtigt.
- ii) Mit einer Abschätzung der Stromaufnahme und der Verzerrungsströme für verschiedene Verbraucher:
Hierzu werden in einer Tabelle von DIN VDE 0100-520 Bbl3 die Daten typischer 1-phasiger Verbraucher im Büro (Tab. 5) angegeben. Daraus ergeben sich Außenleiterstrom und Oberschwingungsströme sowie der Neutralleiterstrom für die einzelnen Verbraucher, die dann addiert werden können. Der Quotient aus den Oberschwingungsströmen der Außenleiter und den Außenleiterströmen legt den Anteil der Oberschwingungsströme fest. Mit der prozentualen Belastung und der Neutralleiterbelastung können die Kabel-/Leiterquerschnitte bestimmt werden.

Tab. 3: Reduktionsfaktoren zur Berücksichtigung der Ströme der 3. Harmonischen bei der Auslegung von Kabeln / Leitungen nach DIN VDE 0298-4

Anteil der 3. Harmonischen am Außenleiterstrom	Reduktionsfaktor	
	Belastbarkeit Außenleiter	Neutralleiterstrom
0 bis 15 %	1,0	
> 15 bis 33 %	0,86	
> 33 bis 45 %		0,86
> 45 %		1,0

Tab. 4: Umrechnungsfaktoren bei der Berücksichtigung von Oberschwingungsbehafteten Verbrauchern nach DIN VDE 0100-520 Bbl 3

Anteil der Leistung	Umrechnungsfaktor (für Verteilerstromkreise)
0 bis 15 %	1,00
> 15 bis 25 %	0,95
> 25 bis 35 %	0,90
> 35 bis 45 %	0,85
> 45 bis 55 %	0,80
> 55 bis 65 %	0,75
> 65 bis 75 %	0,70
> 75 %	0,65

Tab. 5: Beispiele für Verzerrungsströme typischer Büroverbraucher nach DIN VDE 0100-520 Bbl3

Elektronisches Verbrauchsmittel	Leistungsaufnahme P in W	Stromaufnahme I_{Last} in A	Verzerrungsstrom I_V in mA
Leuchtstofflampe > 25 W mit induktiven Betriebsgeräten ohne Kompensation	62	0,60	67
LED-Leuchtröhre (Ersatz für 58 W T8-Leuchtröhre mit induktivem Vorschaltg.)	26	0,12	16
120° gedimmte Glühlampe 200 W	38	0,38	220
Büro-PC (Büro-Alltag) ohne aktive PFC	85	0,48	270
Büro-PC (Büro-Alltag) mit aktiver PFC	82	0,38	57
Röhrenmonitor	60	0,38	200
Flachbildschirm 100% Helligkeit	32	0,24	137
Flachbildschirm 20% Helligkeit	22	0,17	97
Laptop 75 W (stark beansprucht)	24	0,20	115
Faxgerät (Tagesmittelwert)	22	0,17	83
Büro-Multifunktionskopierer (Tagesmittelwert)	103	0,61	144

5. Halbleiterschaltungen, Kompensation und Filterung

Wenn Oberschwingungen Probleme bereiten, ist es ratsam, sie erst gar nicht entstehen zu lassen. Durch Halbleitertechnologie, Schaltungstechnik und Steuerungsmöglichkeiten lassen sich Netzurückwirkungen beeinflussen. Da aber nicht immer und überall netzurückwirkungsfreie Verbraucher mit geringen Oberschwingungen im Netz betrieben werden, kann der Einsatz von passiven oder aktiven Filtern die Netzqualität verbessern. Netzurückwirkungen durch Oberschwingungen im Verteilnetz können entweder durch Erhöhung der Netzkurzschlussleistung oder durch Kompensation gemindert werden. Eine Erhöhung der Netzkurzschlussleistung ist in der Regel durch einen größeren oder zusätzlichen Transformatoren und Generatoren zu erreichen. Dies wird im Folgenden nicht näher betrachtet. Da die Erzeuger von Oberschwingungen teilweise auch zu deren Kompensation und Filterung genutzt werden können, genügt eine Unterscheidung in passive und aktive Komponenten.

5.1 Passive Filterung und Kompensation von Oberschwingungen

Ebenso wie der Wirkfaktorrekorrktur ($\cos \varphi$) durch Kompensationseinrichtungen können die zu Oberschwingungen gehörigen Netzurückwirkungen durch auf die jeweilige Frequenz abgestimmte passive Filter, sogenannte Saugkreise, beschränkt werden (siehe [1] Kap. 5.4). Da während der Planung nur sehr schwer abgeschätzt werden kann, wieviel Verzerrungsblindleistung benötigt wird, ist es empfehlenswert, zunächst nur räumliche Möglichkeiten zur Installation von Kompensationsanlagen vorzusehen. Im laufenden Betrieb kann der benötigte Verzerrungsblindleistungsbedarf ermittelt und eine entsprechende Kompensation mit passiven oder gar aktiven Filtern (siehe 5.3) eingerichtet werden.

5.2 Halbleiterschaltcharakteristiken und deren Verschaltung

Wie in Kap. 4 angedeutet, können für die Stromumrichtung unterschiedliche Halbleiterbausteine und eine Vielzahl von Schaltungstypen verwendet werden. Charakteristische Bausteine sind Diode, Thyristor und Transistor. Am Beispiel

der Drehstrombrückenschaltung soll deren Verhalten aufgezeigt werden (Abb. 10). Da für die Diode keine Steuerung der Umschaltung möglich ist, erfolgt die Kommutierung immer netzgeführt. Neben der Filterung von Netzurückwirkungen über eine Netzdrossel und/oder eine DC-Drossel im Gleichspannungskreis kann durch eine phasenverschobene Verschaltung von mehreren 6-Puls-Brücken (12-Puls- oder 24-Puls-Brückenschaltung) eine deutliche Reduktion der Netzurückwirkungen erreicht werden.

Thyristoren können über ihre Steuerspannung ein- oder ausgeschaltet werden (Phasenanschnitt- oder Phasenabschnittsteuerung) und können deshalb genauso wie Transistorschaltungen sowohl netzgeführt als auch eigengeführt eingesetzt werden. Auch bei Thyristoren bewirkt die Verschaltung mehrerer Brücken eine Verringerung der Netzurückwirkungen.

Transistoren lassen sich ein- und ausschalten, sodass ein nahezu lineares Verhalten erreicht werden kann. In Abb. 10 ist eine Schaltung für den 4-Quadrantenbetrieb dargestellt. Allerdings verursacht die Taktung beim Schalten der Halbleiter hochfrequente Oberschwingungsanteile im Kilohertzbereich, die bei der Bestimmung von THD_U und THD_I noch wenig beachtet werden.

5.3 Aktive Filterung

Für die aktive Filterung werden selbstgeführte Transistoren oder Operationsverstärker eingesetzt, die eine eigene Spannungsversorgung für die Steuerung benötigen. Ein großer Vorteil aktiver Filter ist die Möglichkeit, sich auf unterschiedliche Störsignale einstellen zu können. D. h. selbst in komplexen Netzkonfigurationen und bei Änderungen bei nichtlinearen Verbrauchern oder bei der Einspeisung während des Betriebs erfolgt eine flexible Anpassung des Filters. Die auftretenden Netzurückwirkungen werden erfasst und ein um 180° phasenverschobenes Signal erzeugt, sodass sich die beiden Signale überlagern und Störungen reduziert werden. Durch geeignete Filter kann zudem vermieden werden, dass eine hochfrequente Störaussendung der Halbleitertaktung ins Netz gespeist wird.

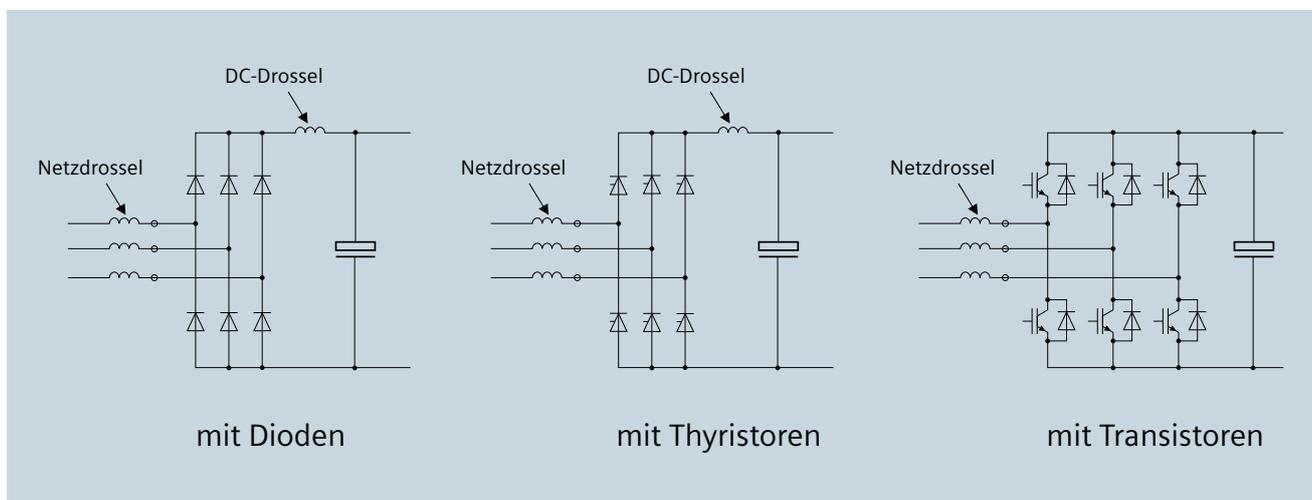


Abb. 10: Energieversorgung im Inselnetz mit Generator, PV-Anlage und Batteriespeicher

6. Fazit

Oberschwingungen sind weder eine typische Kenngröße der Stromerzeugung oder der Stromverteilung noch eine eindeutige Produkteigenschaft. Vielmehr müssen bei der Beurteilung von Netzwirkungen durch Oberschwingungen stets Einspeisung, Netztopologie und Verbrauchereigenschaften gemeinsam betrachtet werden. Wesentlichen Einfluss auf die steigende Bedeutung von Oberschwingungen hat der verstärkte Einsatz von Leistungselektronik in allen Bereichen: in Frequenzumrichtern zur Motorsteuerung, in Umrichtern für PV- und Windkraftanlagen, für Elektrogerätenetzeile und Dimmer sowie in Umrichtern für E-Car-Ladesäulen oder Batterieladegeräten in E-Cars.

Eine Preis-Leistungs-optimierte Begrenzung von Oberschwingungen ist stets projektabhängig und zumeist betriebsspezifisch. Darum sollte eine zukunftsgerichtete Beurteilung des Betriebs in die Planung einfließen. Bei sehr großer Ungewissheit, was das Oberschwingungsverhalten von angedachten Verbrauchern betrifft, sollte der Betreiber auf die hohen Kosten einer aktiven Filterung hingewiesen werden, falls kein Einfluss auf die Verbrauchereigenschaften oder auf die Einspeisung vom Verteilnetzbetreiber genommen werden kann. Wenn eine Filterung der Oberschwingungen vorgesehen wird, sollte dies mit dem Verteilnetzbetreiber abgestimmt werden. Unter Umständen kann eine Filterung zu einer Verschlechterung im vorgelagerten Netz führen.

Bei Fragen können Sie sich an Ihren lokalen Ansprechpartner wenden:

www.siemens.de/tip-cs/kontakt

Literatur:

- [1] Siemens AG, 2014, Planung der elektrischen Energieverteilung – Technische Grundlagen, Bestell-Nr.: IC1000-G320-H191
- [2] VEÖ, VSE, CSRES, VDN, VWEW, 2007, D-A-CH-CZ - Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen
- [3] Elektropraktiker-Sonderheft: Oberschwingungen; als pdf-File einer Artikelreihe in 2013 und 2014; Artikel-Nr. 39211150010)

TIP Planungshandbuch: Planung der elektrischen Energieverteilung - Technische Grundlagen

Die Komponenten der Energieverteilung werden mit Totally Integrated Power integriert betrachtet und zu einem Ganzen zusammengebracht. Totally Integrated Power bietet alles, was man von einer zukunftsorientierten Energieverteilung erwarten kann: Offenheit, Durchgängigkeit, effiziente Engineering-Tools, vielfältige Kommunikationsmöglichkeiten und selbstverständlich eine deutliche Effizienzsteigerung.

www.siemens.de/tip-cs



Siemens AG
Energy Management
Medium Voltage & Systems
Mozartstr. 31 c
91052 Erlangen
Deutschland
E-Mail: consultant-support.tip@siemens.com

Änderungen vorbehalten • 04/15
© 2015 Siemens AG • Alle Rechte vorbehalten.

Die Informationen in dieser Broschüre enthalten lediglich allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.

Alle Erzeugnisbezeichnungen können Marken oder Erzeugnisnamen der Siemens AG oder anderer, zuliefernder Unternehmen sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen kann.