

Oberschwingungen – Harmonics – Harmônicos – Armonía - Harmonie

Mit unserem Weitblick aus vielen Wissensgebieten, verknüpft mit internationaler Erfahrung und Erkenntnissen aus Berufserfahrungen vorheriger Altersgenerationen zeichnet vor allem uns aus, herstellerunabhängig Antworten zu finden, wo die meisten Planungsbüros an ihre Grenzen stoßen. Folgender Artikel soll hierzu ein Beitrag leisten.

1 Allgemeines	4
1.1 Basisliteratur	4
1.2 Experten-Literatur	4
2 Berechnung von Oberschwingungen (Bsp. Windparkanschlussplanung)...	6
2.1 Oberschwingungen bei Windparks (Allgemeines).....	6
2.2 Korrekte Eingabe der Oberschwingungen in PowerFactory.....	7
2.3 Berechnung und Darstellung von Oberschwingungen am NAP	xx
2.4 Beschreibung der Netzveränderung durch PQ-Anlagen	xx
2.5 Alternativen zu PowerFactory: Schritt für Schritt per Handrechnung zum Ziel*	xx
3 Ansatz Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*.....	xx
2.1 Oberschwingungen in der Mathematik.....	xx
2.2 Oberschwingungen in der Physik.....	xx
2.3 Oberschwingungen in der Metrologie	xx
2.4 Oberschwingungen in der Leistungselektronik	xx
4 Oberschwingungen im Netzbetrieb	xx
4.1 Oberschwingungsquellen und Trennung Oberwelle vs. Oberschwingung	xx
4.2 Oberschwingungsfortleitung	xx
4.3 Oberschwingungen - Maßnahmen im Netzbetrieb.....	xx
5 Oberschwingungen - Spezialwissen Elektrische Maschinen	xx
6 Oberschwingungen - Spezialwissen Netzberechnung	xx
7 Oberschwingungen - Spezialwissen Elektrotechnik	xx
8 Oberschwingungen - Spezialwissen Netzschutztechnik	xx
9 Oberschwingungen - Spezialwissen PowerQuality	12
10 Oberschwingungen bei Erneuerbaren Energien (Photovoltaik)	xx
11 Oberschwingungen bei Erneuerbaren Energien (Wasserkraftanlagen)	xx
12 Oberschwingungen bei Erneuerbaren Energien (Windenergie)	xx
13 Planung & Projektierung einer Filteranlage bei Grenzwertüberschreitung	xx
14 Fachfirmen für die Messung von Oberschwingungen	xx

1 Allgemeines

Auf Grundlage der besuchten Vorlesungen „Versorgungsqualität – Dr.-Ing. Jan Mayer“ und der genialen Vorlesung „Netzbetrieb in der elektrischen Energieversorgung – Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Winkler“ an der TU Dresden wurde das Thema Oberschwingungen als Bestandteil des international geläufigen Begriffs Power Quality behandelt und durch diverse Basis- und Spezialliteratur im Selbststudium von uns im Nachgang aufbauend mit Berufspraxis auf internationaler Ebene vertieft. Folgende Literatur wurde gelesen, ausgearbeitet und deren Erkenntnisse in einer eigens programmierten Datenbank zum schnellen Abruf für unsere Kunden hinterlegt. Für den Interessierten Leser habe ich eine subjektive Rezension vorgenommen.

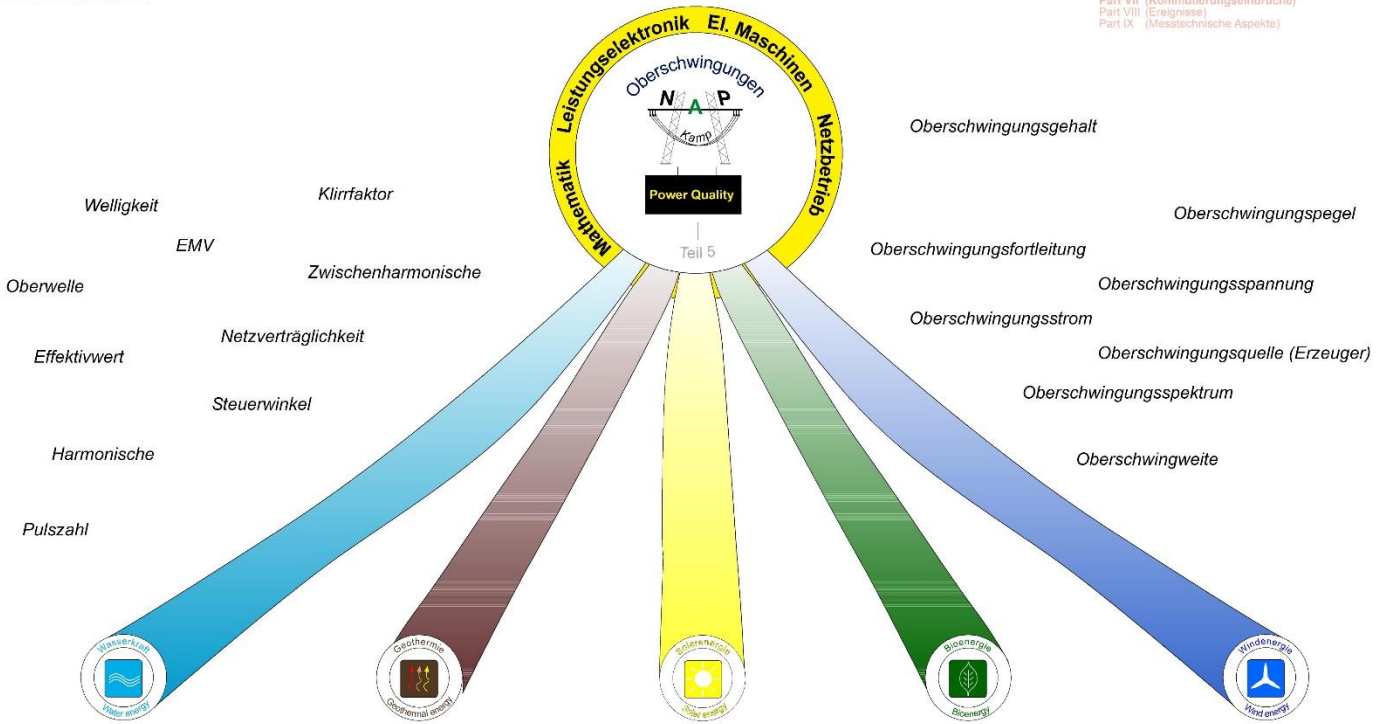
Der Nachteil von Netzberechnungsprogrammen ist der fehlende Rechenweg – wir zeigen Ihnen Ursachen, Wirkung und Maßnahmensteuerung zum Nachvollziehen und Verständnis. Besonderen Wert legen wir bei unseren Berechnungen auf den Wissensstand unserer Kunden, denn nur wer versteht ist auch zufrieden und empfiehlt uns weiter. Ihre NAP – Netzanschlussplanung erneuerbarer Energien

Oberschwingungen (Kleine Übersicht zu den Begriffen)

Power Quality

Planung / Projektierung und Bewertung

- Part I (Grundlagen)
- Part II (Normen)
- Part III (Spannungsänderungen)
- Part IV (Blinder)
- Part V (Oberschwingungen)**
- Part VI (Unsymmetrie)
- Part VII (Kommütierungseinbrüche)
- Part VIII (Ereignisse)
- Part IX (Messtechnische Aspekte)



1.1 Basisliteratur

- [01] **Oberschwingungen – Netzurückwirkungen der Leistungselektronik**, A. Kloss, VDE Verlag, 2. Aufl., 1996
Inhaltlich sehr gut, besonders schön auch der geschichtliche Abriss zu den Anfängen
- [02] **Harmonics, Power Systems and Smart Grids**, F.C. de la Rosa, CRC Verlag, 2015
Gut und anschaulich, Bezug zu Nordamerika
- [03] **Stromrichter-Netzurückwirkungen und ihre Beherrschung**, Peter Büchner, VEB Grundstoffindustrie, 1982
Klassiker und Bestseller zur damaligen Zeit
- [04] **Power Quality – Entstehung und Bewertung von Netzurückwirkungen**, Mombauer / Schlabbach, VDE Verlag, 2009
Bestseller, besonders schön sind die praktischen Beispiele
- [05] **Netzurückwirkungen**, ETG Tagung 1986, VDE Verlag
Praxisnah
- [06] **Wissenswertes zu Netzurückwirkungen**, Fender/Dorner, VDE Verlag, 2013
Gutes Grundlagenbuch, jedoch sehr normenlastig. An manchen Stellen zu kurz, jedoch sehr schön zu lesen. Verwendete Software muss käuflich erworben werden (Nachteil)
- [07] **Grundsätze für die Beurteilung von Netzurückwirkungen**, VWEV-Verlag, 1992
Inhaltlich gut, knappe Darstellung (auf den Punkt gebracht)
- [08] **Untersuchung von Netzurückwirkungen durch netzgekoppelte Photovoltaik- und Windkraftanlagen**, Forschungsbericht Detlef Schulz, VDE Verlag, 2002
Bestseller, sollte jeder Netzbetreiber wie auch Projektierer/Planer der mit Oberschwingungen zu tun hat gelesen haben
- [09] **Netzurückwirkungen – Theorie, Simulation, Messung und Bewertung**, Detlef Schulz, VDE Verlag, 2004
gut
- [10] **Netzurückwirkungen**, Schlabbach/Just/Hormann, VDE Verlag, 2009
Gutes Einsteigerbuch, Berechnungsbeispiele sehr knapp gefasst
- [11] **Netzurückwirkungen von NS Geräten**, Mombauer, VDE Verlag,
nützliches Buch
- [12] **Power Quality – Problems and Mitigation Techniques**, Singh/Chandra/Haddad, Wiley, 2015
Bestseller-Buch, schöne Rechenbeispiele mit hohem Bezug zur Leistungselektronik
- [13] **Handbook of Power Quality**, Baghini, Wiley, 2008
Sehr gutes Buch, vor allem Ursachenbeschreibung von Netzphänomenen durch Netzurückwirkungen
- [14] **Power Quality – Mitigation Technologies in a Distributed Environment**, Munoz, Springer, 2007
Sehr nützlich, Rechenbeispiele zu knapp
- [15] **Electric Power Quality**, Heydt, SIACP, 1991
Gut zu lesendes Buch mit schönen Rechenbeispielen

-
- [16] **Power Quality in Electrical Systems**, Kusko/Thompson, McGraw-Hill, 2007
Bestseller-Buch, schöne Rechenbeispiele mit hohem Bezug zur Leistungselektronik
- [17] **Electrical Power System Quality**, Drugan/Mc Granaghan/Santoso/Beaty, McGraw-Hill, 2003
Gute Enzyklopädie über das gesamte Fachgebiet
- [18] **Power Quality**, Sankaran, CRC, 2002
Sehr schönes Buch und gut zu lesen, auch was die Interpretation von Kurvenverläufen betrifft
- [19] **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**, Fuchs/Mohammed, AP, 2007
Bestseller, Schöner Vergleich zur ANSI/IEEE mit Beispielen
- [20] **Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen**, Seinsch, Teubner, 1992
Gutes Buch zur numerischen Berechnung für Elektrische Maschinen

1.2 Spezialliteratur

- [21] **Spannungsverhalten gepulster Stromrichteranlagen**, Dissertation Dirk Machst, Isle Verlag, 2000
Inhaltlich sehr gut, vor allem über die Entstehung von OS bezugnehmend zur modernen LE und deren Modellierung für die Netzberechnung
- [22] **Untersuchungen an einem Antrieb mit Doppelpulswechselrichter zur Reduzierung der Strom-Oberschwingungen im Gleichspannungszwischenkreis**, Dissertation Volker Weisgerber, 1994, *Ergänzung insbesondere im Bezug zu Wechselrichtern im Bereich Elektrische Maschinen*
- [23] **Analyse der Oberschwingungsverluste zweipoliger Induktionsmaschinen am Pulsumrichter**, Dissertation Dirk Machst, Isle Verlag, 2000
Grundlagen zum Verständnis des Oberschwingungsverhalten bei Käfigläufer-Maschinen und deren Temperaturverhalten (Einfluss), sehr gut
- [24] **Harmonics in Offshore Wind Power Plants**, Dissertation Jakob B. Glasdam, 2016, *Die Wind-Offshore Anschlussvarianten werden ausführlich dargestellt, deren Probleme aufgezeigt und sehr praxisnah gelöst, ein Bestseller*
- [25] **Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen hinsichtlich Fertigbarkeit und Oberschwingungen**, Dissertation David Kappel, 2015, *erfordert ein tiefes Fachwissen, insbesondere zur Magnetlagertechnik/Wicklungsverfahren bei der SM, inhaltlich sehr gut*
- [26] **Kompensation von sättigungsbedingten Harmonischen in den Strömen feldorientiert geregelter Synchronmaschinen**, Dissertation Robert Michel, 2016, *gut und anschauliches Werk, insbesondere nützlich zur Auffrischung der FOR bei Synchronmaschinen*
- [27] **Zentrale Kompensation von Oberschwingungen in MS-Netzen**, Dissertation Thomas Göke, 1997
Ursachen, Planung von Filter-Anlagen zur Maßnahmensteuerung aber auch zur Modellierung für die Netzberechnung machen diese Dissertation für den Netztechniker besonders
- [28] **Blindleistungs- und Oberschwingungskompensation aus regelungstechnischer Sicht**, Dissertation Henrich A. Wied, 1987
Problemdarstellung von Netzurückwirkungen wie auch deren Regelung in technischen Systemen, sehr interessant

-
- [29] **Power System Harmonics – Computer Modelling and Analysis**, Enrique Acha, Wiley, 2001
Sehr hohe Mathematik, die für die Modellierung erforderlich sind (Netzberechnung), für den normalen Anwender schwer zu lesen, sehr schön die vielen MATLAB-Beispiele
- [30] **Vergleichende Untersuchungen der Netzurückwirkungen von Umrichtern mit Zwischenkreis bei Beachtung realer industrieller Anschlußstrukturen**, Dissertation Manfred Fender, 1997
Aktuelles Thema, sollte jeder gelesen haben, der mit Anschlussbewertung zu tun hat
- [31] **Bewertung und Modellierung der Elektroenergiequalität auf statistischer Basis unter besonderer Berücksichtigung komplexer Abnehmerstruktur**, Dissertation Jan Mayer, 2004
Bestseller

Neben dieser Auswahl an Fachliteratur speziell zum Thema Power Quality, Netzurückwirkungen oder Oberschwingungen findet man insbesondere in folgenden Fachbüchern hilfreichen Rat zu Oberschwingungen:

- *Elektrische Maschinen*
- *Elektronik / Leistungselektronik*
- *Mathematik*
- *Messtechnik*
- *Messwandler und Transformatoren*
- *Netzberechnung und Netzbetrieb / Ausgleichsvorgänge*
- *Photovoltaik*
- *Physik*
- *Schutztechnik*
- *Technische Mechanik*
- *Windkraftanlagen*

Sollten Sie Fragen zum Thema Berechnung, Bewertung oder Maßnahmensteuerung haben – wir helfen Ihnen unabhängig und zeitnah durch unser aufgebautes Expertenwissen auf diesem Fachgebiet. Schreiben Sie uns an!

Ihr Vorteil:

- *Die Anschaffung von Literatur oder Normen ist nicht erforderlich*
- *Durch unsere Erfahrungen müssen wir das Rad nicht neu erfinden und wissen worauf es bei der Bewertung ankommt und wo die Schwachstellen liegen*
- *Durch unsere freien Mitarbeiter (Home-Office), garantieren wir den günstigsten Preis bei hoher Qualität für herstellerunabhängige Dienstleistungen. Sollten wir einmal über den marktüblichen Preis liegen, erstatten wir die Differenz*
- *Informations-Update bei Neuerungen**
- *Kontakt zum Energieversorger bei Abstimmungen / Problemen stellen wir nicht extra in einem Nachtrag in Rechnung*
- *Wir zeigen den Rechenweg*

2 Berechnung von Oberschwingungen (Bsp. Windpark Anschlussplanung)

2.1 Oberschwingungen bei Windparks

Grundlage für die Berechnung ist das Messprotokoll aus der Einheitenvermessung des Einheitenzertifikats (EZE) gemäß den FGW Richtlinien der TR3 und 4.

Es gibt hierfür drei Tabellen. Einen Bericht zu den Oberschwingungen, den Zwischenharmonischen sowie Höherfrequenten.

In den Tabellen gibt es für die jeweiligen Frequenzbereich / Ordnungszahl mehrere Spalten pro Leistungs-Bin, weil eine Windenergieanlage durchaus kleinere/größere Oberschwingungen erzeugt, nachdem sie unter Voll- bzw. Teillast läuft. Der größte Wert hierzu ist bewertungsrelevant. In keinem Betriebsfall dürfen die Grenzwerte überschritten werden, d.h., pro Zeile muss der größte Wert durchsucht werden.

Durchführung der Berechnung:

In einfachen Fällen wird der Oberschwingungsstrom der einzelnen Windenergieanlage genommen und mit der Anzahl der angeschlossenen Windenergieanlagen dividiert. Die bdew-Mittelspannungsrichtlinie hat einen Anhang B. Bei pulsmodellierten Wechselrichtern wird bis zur 12. Harmonischen arithmetisch aufsummiert, darüber und bei den Zwischenharmonischen wird quadratisch aufsummiert. Sofern die Pulsfrequenz des Wechselrichters größer als 1 kHz ist, darf man oberhalb der 2. Harmonischen quadratisch aufsummieren (bdew). Bei Kabeln hat man ohmsch-induktive Anteile, dadurch werden Ströme des Netzes beeinflusst. Im Falle von Resonanzproblemen muss nach bdew genauer gerechnet werden (Näheres unter Expertenbericht „Resonanzen im Netz“ in Kürze)

Warum sind Grenzwertüberschreitungen zugelassen worden?

Es gab ein praktisches Problem in der Vermessung. Wird irgendwo ein Prototyp an das Netz angeschlossen, dann vermessen. Das Netz ist aber keine ideale Spannungsquelle, sondern vorbelastet mit Harmonischen. Die Windenergieanlagen sind aber nicht nur Oberschwingungserzeuger, sondern haben auch eine Impedanz und können deshalb Ströme aufnehmen. Sollte die Netzspannung verzerrt sein, fließen diese Ströme (Verzerrungen) auch in die Windenergieanlage hinein. Offensichtlich ist dies bei der doppelt gespeisten Asynchronmaschine, weil wir dort sehen, dass die Stratorreaktanz parallelgeschaltet zum Converter ist. Auch bei Anlagen mit Vollumrichter, also wo der Stromrichter am Netz angebunden ist sieht es so aus, man bedient sich einer solchen EZE durch die Überführung eines Norton-Äquivalents was heißt, dass man nicht immer eine OS-Quelle hat, sondern auch parallel dazu eine Admittanz und diese sorgt dafür, dass diese EZE auch

Oberschwingungsströme aus dem Netz aufnimmt wenn eine Spannungsverzerrung vorliegt. Das Problem in der Vermessung ist, dass es sehr schwer ist, den Oberschwingungsstrom der gerade gemessen wird seitens des Netzes oder aus der Windenergieanlage herkommt, zu beurteilen. Bewertungsrelevant ist nur, was die Windenergieanlage erzeugt.

Wenn man den Strom als ideale Stromquelle einspeist, erhält man zu hohe Ergebnisse. Abhilfe ist das Zugeständnis, einige Grenzwertüberschreitungen zu erlauben.

In PowerFactory kann man das Norton-Äquivalent nachbilden, allerdings muss man die Impedanz der Windenergieanlage wissen (schwierig, da Herstellerangabe)

Welche Werte müssen für die Bewertung entnommen werden?

Harmonic Currents* in % from I_n											
P_{bin} [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Order	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n	I_v/I_n
2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6
3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6	1,2	1,2
6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0
8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
15	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4
16	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
17	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

* Strom auf der Niederspannungsseite bei Nennwirkleistung

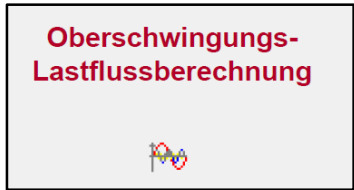
Aus dem Einheitenzertifikat werden die Oberschwingungsströme (Abb. 1) entnommen. Vermessen werden die Oberschwingungen inzwischen weit über die erforderliche 180. Harmonische hinaus. Pro Zeile muss der größte Wert entnommen gemäß Abb. 1 entnommen werden (Worst case Fall).

Abb. 1: Auszug aus einer Einheitenvermessung nach IEC 61000

2.2 Korrekte Eingabe der Oberschwingungen in PowerFactory

Das Ergebnis hängt ab, mit welchem Generator bewertet werden soll. In unserem Fall soll der doppelt speisende Asynchrongenerator beurteilt werden. Die Maschine selbst erzeugt als passives Element in der Netzberechnung keine Oberschwingungen. Verwendet man die Maschine als ideale Stromquelle (Generator), so kann in PowerFactory eine Maschinenimpedanz hinterlegt werden. Als dritte Möglichkeit für die Eingabe der Daten kann das Norton-Äquivalent verwendet werden, wo neben der Stromquelle eine Impedanz parallelgeschaltet wird und somit Oberschwingungen erzeugt wie auch aufgenommen werden können.

Es gibt verschiedene Tabellen, die gefüllt werden können, bewertungsrelevant ist jedoch die IEC 61000. In unserem hiergezeigten Beispiel sind die Oberschwingungsströme nur in Betrag, jedoch nicht in der Phasenlage bekannt. Die IEC 61000 arbeitet auch so, also nur mit Beträgen. Die Oberschwingungen werden durch das Pulsmuster bei höherfrequenten bestimmt. Die Einstellung erfolgt also nach IEC 61000 ohne Phasenlage.



Typ der Oberschwingungsquellen: IEC 61000

- Das Spektrum ist symmetrisch
- Amplituden sind auf Nennstrom bezogen

$$I_h = k_h \cdot I_N / 100$$

- Keine Angabe des Phasenwinkels
- Ganzzahlige Ordnungszahlen und Zwischenharmonische

Order	Output Power (kW)	Harmonic Current (% of In)
2	850	0.2
3	860	0.2
4	400	0.1
5	750	0.6
7	300	0.3
9	400	0.3
10	830	0.1

Abb. 2.: Eingabe der OS-Ströme in PowerFactory

Schritte:

- Generator → Oberschwingungen →
- Oberschwingungsmodell: Stromquelle →
- Oberschwingungsströme → Neues Projekt: Art der
- Oberschwingungsquelle: IEC 61000 → f/fn = rechten
- Mausklick und größten Wert je Zeile eintragen → ok

Die Angabe der Werte wird als bezogener Wert angegeben, also prozentual gemessen bei der Bemessungsscheinleistung. In der Praxis erfolgt die Vermessung jedoch als Nenn-Wirkbetrieb, wo man den Blindleistungsregler auf null stellt, also reiner Wirkstrom fließt. Die Prozentwerte beziehen sich also auf den Nenn-Wirkstrom und nicht auf den Nenn-Scheinstrom.

Beachten Sie bitte bei der Eingabe, dass beim klassischen Generator die Angabe der Oberschwingungsströme auf die Bemessungsscheinleistung bezogen wird, weil so die Maschinenmodelle erstellt werden. Wenn man diese Werte einfach so dem Asynchrongenerator übernehmen würde, hätte man zu hohe Oberschwingungsströme, weil nicht auf den Wirkstrom Bezug genommen wurde. Umgehen kann man diese Stolperfalle bei Verwendung eines *Statischen Generators* → *Windgenerator*, wo sich leicht auf der Basisdaten-Registerkarte die Bemessungsdaten ändern lassen.

Der Bericht wird in Kürze fortgesetzt...