

## Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag erläutert die theoretischen Grundlagen sowie die praktische Durchführung der im Jahre 2000 gestarteten Messkampagne im Rahmen des "Arbeitskreises Spannungsqualität" des Verbandes der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ), deren Ziel die Ist-Zustandserhebung und Trendanalyse der Spannungsqualität gemäß EN50160 [1] in den öffentlichen elektrischen Netzen Österreichs über alle Spannungsebenen ist. Dabei wird die Strategie zur Auswahl der Messpunkte und die Abschätzung des notwendigen Stichprobenumfanges erörtert und eine statistische Auswertung der Messergebnisse präsentiert.

## Abstract

The present article explains the theoretical basis as well as the practical realisation of the measurement campaign, started in the year 2000 within the „Arbeitskreis Spannungsqualität“ of the Association of Austrian Electricity Companies (VEÖ), whose ambition is the investigation of the actual situation and trend of the voltage quality according to EN50160 [1] in the public electricity networks of Austria over all voltage levels. Thereby the sampling strategy for the measuring points is discussed and a statistical evaluation of the measurement results is presented.

## 1 Einleitung

Im Rahmen des VEÖ wurde im Jahr 2000 eine koordinierte Messreihe gestartet, die ca. halbjährlich durchgeführt wird und als Zielsetzung die Ist-Werterhebung der Merkmale der Betriebsspannung in öffentlichen Netzen gemäß den Festlegungen der EN50160 hat. Gemessen werden jeweils die Höhe der Versorgungsspannung, Oberschwingungen, Spannungseinsenkungen (voltage dips) und die Flickerstärke. Die Ergebnisse der Messkampagne fließen auf europäischer Ebene in die Arbeiten des NE Standardisation of the Union of the Electricity Industry (EURELECTRIC) [2] ein. Der Ist-Zustand der Spannungsqualität in Europa hat ein entscheidendes und unersetzbares Gewicht auf die notwendige Standardisierungsarbeit betreffend der

- Koordination der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der
- Beschreibung des Produktes „Elektrizität“ [1], das dem Produkthaftungsgesetz unterliegt.

Zur Dokumentation werden die Messergebnisse auch laufend im VEÖ-Journal [3] publiziert.

## 2 Allgemeines

Die strategische Ausrichtung der mittlerweile 16 ausgewerteten koordinierten Messreihen basiert auf folgenden Kerngedanken:

- Aus ökonomischen Gründen erfolgen jeweils Stichprobenmessungen über ein Wochenintervall.
- Als Grundgesamtheit wurde das gesamte Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz festgelegt, wobei in der Praxis nur existierende und zugängliche Messpunkte ausgewählt werden.
- Die Auswahl der Stichprobenmesspunkte erfolgt im wissenschaftlichen Sinne der mathematischen Statistik nach dem Zufallsprinzip, d.h. jeder Netzbetreiber hat die „gleiche Chance“ ausgewählt zu werden. Neben einer gewünschten Neuaufnahme ist auch ein Wechsel der Messpunkte zur Absicherung der Ergebnisse zulässig.  
Anmerkung: Die Randomisierung wurde bei der VEÖ-Messkampagne speziell bei den ersten Messreihen noch nicht durchgängig angewendet, so dass die Strategie zur Stichprobenauswahl bei etlichen Messpunkten dieser Messreihen im Dunklen liegt und dadurch die Repräsentativität der Stichproben möglicherweise nicht gegeben ist!
- Durch den Gebrauch der mathematischen (schließende oder induktive) Statistik können aus den Stichproben objektive Aussagen mit hoher Validität über die Grundgesamtheit, d.h. über alle potentiellen Messpunkte in Österreich, hinsichtlich der Merkmalsausprägung der Spannungsqualität erfolgen.

- Die halbjährliche Wiederholung der Messung (1 Winter- und eine Sommermessung) hat in erster Linie einen organisatorischen Hintergrund, da konkrete festgeschriebene Termine im Gegensatz zu unbestimmten Verständigungen durch die teilnehmenden Netzbetreiber wesentlich verlässlicher wahrgenommen werden.

Zur Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfangs  $n$  bei gegebener Länge des Konfidenzintervalls ist eine Vorkenntnis über die Streuung (Varianz), etwa in Form einer oberen Schranke erforderlich. Da die Freiheitsgrade  $m$ , auf der rechten Seite der Gleichung 4 auch noch von  $n$  abhängen, kann  $n$  nur iterativ berechnet werden.

$$n = \frac{t_{m,1-\alpha/2}^2 \cdot s^2}{d^2} \quad \text{Gl (4)}$$

## 2.1 Wie groß muss die Anzahl der Stichproben sein?

Um eine repräsentative Aussage über einzelne Merkmale der Netzspannung zu erhalten ist ein Mindeststichprobenumfang erforderlich. Zur Abschätzung des notwendigen Stichprobenumfangs wird in den folgenden Punkten für verschiedene Schätzer, wie der Mittelwert, die Varianz oder die Quote, die über einem bestimmten Schwellwert liegt (Quantil), der Zusammenhang zwischen Irrtumswahrscheinlichkeit, Vertrauensintervall und notwendiger Stichprobenumfang aufgezeigt [4].

$t_{m,1-\alpha/2}$  Quantil der t-Verteilung mit  $m$  Freiheitsgraden der Ordnung  $1-\alpha/2$   
 $d$  Halbe Breite des Konfidenzintervalls

Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 1\%$  und einer im Zuge der koordinierten Messreihen zur Spannungsqualität des VEÖ festgestellten empirischen Streuung  $s^2$  der Maximalwerte 5. Oberschwingungsspannung von

$$s^2 = 1,31\% \text{ in der Niederspannung und } s^2 = 0,69\% \text{ in der Mittelspannung}$$

ergeben sich für ein Konfidenzintervall von  $2d = 0,5\%$ , folgende erforderliche Stichprobenumfänge  $n$ :

### 2.1.1 Konfidenzintervall für den Mittelwert $\mu$ der normalverteilten Grundgesamtheit bei unbekannter Streuung $\sigma^2$

Zur Bestimmung eines Konfidenzintervalls für den Mittelwert  $\mu$  der normalverteilten Grundgesamtheit bei fehlender Kenntnis der Streuung  $\sigma^2$  der Grundgesamtheit kann eine geeignete Schätzung aus der Stichprobe verwendet werden. Dabei bietet sich die empirische Streuung oder Varianz  $s^2$  eines Merkmales einer Stichprobe aus  $n$  Messpunkten  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , gemäß Gleichung 1 an.

$$n_{\text{Niederspannung}} = \frac{t_{m,1-\alpha/2}^2 \cdot s^2}{d^2} = \frac{2,58^2 \cdot 0,0131^2}{0,0025^2} = 183 \quad \text{(Gl 5)}$$

$$n_{\text{Mittelspannung}} = \frac{t_{m,1-\alpha/2}^2 \cdot s^2}{d^2} = \frac{2,58^2 \cdot 0,0069^2}{0,0025^2} = 51 \quad \text{(Gl 6)}$$

Anmerkung: Die 5. Oberschwingungsspannung weist gemäß VEÖ-Messkampagne die größte Varianz aller Harmonischen einschließlich des  $\text{THD}_U$  auf. Aufgrund der großen Streuung, starken Ausprägung und stetigen Verteilung der 5. Harmonischen, eignet sich dieses Merkmal zur Festlegung des erforderlichen Stichprobenumfangs.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{(Gl 1)}$$

Der Durchschnittswert  $\bar{x}$  bzw. das arithmetische Mittel berechnet sich aus Gleichung 2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{(Gl. 2)}$$

Zur Konstruktion des Konfidenzintervalls für  $\mu$  geht man dann von der Stichprobenfunktion

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s} \cdot \sqrt{n} \quad \text{(Gl. 3)}$$

aus, wobei  $s$  die empirische Standardabweichung bedeutet. Die Stichprobenfunktion besitzt die stetige Dichteverteilung der von W.S.Gosset gefundenen und nach seinem Pseudonym benannten Student- oder t-Verteilung mit  $m = n-1$  Freiheitsgraden.

### 2.1.2 Konfidenzintervall für die Streuung $\sigma^2$ der normalverteilten Grundgesamtheit

Ebenso wie für den Mittelwert  $\mu$  der normalverteilten Grundgesamtheit lassen sich auch für ihre Streuung  $\sigma^2$  bzw. ihre Standardabweichung  $\sigma$  Konfidenzgrenzen an Hand einer Stichprobe vom Umfang  $n$  ermitteln. Die mit der empirischen Streuung  $s^2$  gebildete Stichprobenfunktion

$$\chi^2 = \frac{(n-1) \cdot s^2}{\sigma^2} \cdot \sqrt{n} \quad \text{(Gl. 7)}$$

besitzt eine  $\chi^2$ -Verteilung mit  $m = n-1$  Freiheitsgraden. Der notwendige Stichprobenumfang  $n$  zur Schätzung der Standardabweichung kann mittels Gleichung 8 berechnet werden. Für eine Schätzung der Standardabweichung mit einer relativen Genauigkeit von  $g = (s-\sigma)/\sigma = 0,15$  und einer Wahrscheinlichkeit der Konfidenzschätzung von  $\varepsilon = 99\%$ , sind näherungsweise

$$n \approx 1 + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{2g^2} = 1 + \frac{2,57583^2}{2 \cdot 0,15^2} = 149 \quad (\text{Gl. 8})$$

Stichproben erforderlich.

$z_q = z_{1-\alpha/2}$  Quantil der standardisierten Normalverteilung  
 $\alpha = 1 - \varepsilon$  Irrtumswahrscheinlichkeit  
 $\varepsilon$  Wahrscheinlichkeit der Konfidenzschätzung  
 $g$  relative Genauigkeit  $g = (s-\sigma)/\sigma$

### 2.1.3 Konfidenzintervall für die Wahrscheinlichkeit p der alternativen Grundgesamtheit

Für eine alternative Grundgesamtheit, bei der nur die beiden zufälligen Ereignisse A und A\* mit der Wahrscheinlichkeit p und  $p^* = 1 - p$  eintreten können, kann das Konfidenzintervall der unbekannt Wahrscheinlichkeit p des dichotomen Merkmals (d.h. zweigeteiltes Merkmal, z.B.: Störpegel oberhalb oder unterhalb eines Randwertes, Münzwurfszufallsvariable: Kopf oder Zahl, weiße oder schwarze Kugeln in Urne etc.) berechnet werden. Die Näherungsformel für die Ober- und Untergrenze des Konfidenzintervalls bei großer Stichprobenanzahl n lautet:

$$g_{o,u} = \frac{1}{n + z_{1-\alpha/2}^2} \left( x + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{2} \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{x \cdot (n-x)}{n} + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{4}} \right) \quad (\text{Gl. 9})$$

$z_q = z_{1-\alpha/2}$  Quantil der standardisierten Normalverteilung  
 $\alpha = 1 - \varepsilon$  Irrtumswahrscheinlichkeit  
 $\varepsilon$  Wahrscheinlichkeit der Konfidenzschätzung  
 $n$  Stichprobenanzahl  
 $x$  Anzahl der Stichproben mit Merkmal (z.B. Messungen die über einem Randwert liegen)

Der notwendiger Stichprobenumfang n zur Schätzung der Wahrscheinlichkeit p der alternativen Grundgesamtheit mit einer Genauigkeit  $\Delta p$  bei unendlicher Grundgesamtheit kann näherungsweise nach

$$n \approx \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{\Delta p^2} \cdot \tilde{p} \cdot (1 - \tilde{p}) \quad (\text{Gl. 10})$$

berechnet werden.

Die Wahrscheinlichkeit  $\tilde{p}$ , die z.B. der Quote jener Messwerte entspricht, die über einem bestimmten Schwellwert liegen, wird dabei als Vorinformation benötigt. Die erforderliche Stichprobenanzahl n erreicht sein Maximum für  $\tilde{p} = 0,5 = 50\%$ .

Wird z.B. als Vorinformation  $\tilde{p} = 0,05 = 5\%$  gewählt, d.h. es wird angenommen, dass 5% der Messwerte über einem Schwellwert liegen, so kann z.B. die Quote der Messwerte die oberhalb des Schwellwertes liegen mit einer Genauig-

keit von  $\Delta p = 5\%$  und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 1\%$  durch die Ziehung von

$$n \approx \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{\Delta p^2} \cdot \tilde{p} \cdot (1 - \tilde{p}) = \frac{2,58^2}{0,05^2} \cdot 0,05 \cdot (1 - 0,05) = 127$$

Gl. (11)

Stichproben abgeschätzt werden.

Bild 1 zeigt das Diagramm des notwendigen Stichprobenumfangs als Funktion der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  zur Schätzung jener Quote  $\tilde{p}$  an Messungen gemäß Gleichung 10, die über einem bestimmten Schwellwert liegen.

Da die Verteilung (logarithmische Normalverteilung, Weibull-Verteilung, Beta- oder Gammaverteilung etc.) der einzelnen Merkmale der Spannungsqualität unterschiedlich und unbekannt sind und sich zudem im Laufe der Zeit ändern können, scheint diese Methode der Abschätzung des notwendigen Stichprobenumfangs besonders geeignet zu sein, da für diese Abschätzung die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit irrelevant ist. Zudem eignet sich die Angabe der 95%-Auftrittswahrscheinlichkeit als statistische Maßzahl (Kennzahl) zur quantitativen Beschreibung der einzelnen Merkmale der Spannungsqualität, da diese nicht durch unrepräsentative statistische Ausreißer, die als Maximalwerte angegeben werden, verzerrt wird.

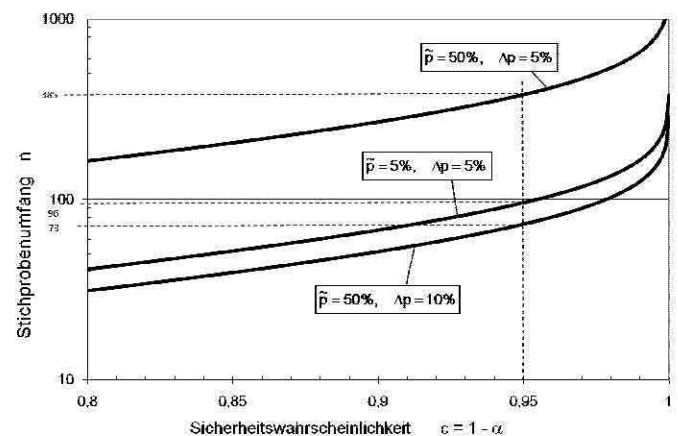


Bild 1 Minimal erforderlicher Stichprobenumfang n für eine alternative Grundgesamtheit in Abhängigkeit der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  zur Schätzung der Quote  $\tilde{p}$  mit einer Genauigkeit  $\Delta p$  gemäß Gleichung 10

Auf Basis der in den Punkten 2.1.1 bis 2.1.3 durchgeführten Abschätzung für den notwendigen Stichprobenumfang und den bisherigen praktischen Erfahrungen werden mit einer Stichprobenanzahl von 100 bis 200 Messpunkten reliable, valide und objektive Ergebnisse erzielt, wobei auch

schon mit ca. 50 Stichproben eine akzeptable Aussagen gewonnen werden kann.

Reliable wissenschaftliche Ergebnisse sind frei von Zufallsfehlern, d.h. bei Wiederholung eines Experimentes unter gleichen Rahmenbedingungen würde das gleiche Messergebnis erzielt. Die Reliabilität ist ein Maß für die Replizierbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen und stellt neben der Validität (Gültigkeit bzw. argumentatives Gewicht der Aussage) und der Objektivität (Unabhängigkeit des Ergebnisses von der untersuchenden Person) eines der drei wichtigsten Gütekriterien für empirische Untersuchungen dar.

### 3 Ergebnisse der VEÖ-Messreihen

#### 3.1 Datenbasis der Messreihen

Die **Tabelle 1** zeigt die Anzahl der teilnehmenden Netzbetreiber und Messpunkte in der Niederspannung (NS), Mittelspannung (MS) und Hochspannung (HS) der bisher ausgewerteten 16 koordinierten VEÖ-Reihenmessungen, beginnend mit dem Jahr 2000. Die Erhaltung derselben Stichproben über mehrere Jahre war bei einer Beteiligung von ca. 15 Netzbetreibern nur schwer realisierbar. Aus diesem Grund und zur Absicherung der Informationsqualität wurde ein Wechsel der Messpunkte und eine Verbreiterung der Datenbasis durch die Neuaufnahme von Messpunkten zugelassen.

Messreihe Nr.	Termin	Teilnehmende Netzbetreiber Anzahl	Anzahl der Messungen über 1 Wochenintervall		
			NS	MS	HS
1	6/2000	17	24	8	8
2	1/2001	15	34	9	11
3	6/2001	12	31	9	10
4	1/2002	12	34	17	11
5	6/2002	14	41	21	12
6	1/2003	13	38	20	17
7	6/2003	8	14	4	9
8	1/2004	14	33	10	11
9	7/2004	15	51	30	8
10	1/2005	15	47	30	9
11	6/2005	15	63	32	9
12	1/2006	12	47	29	11
13	6/2006	12	50	28	10
14	1/2007	13	47	29	11
15	6/2007	12	50	28	11
16	2/2008	13	87	27	11

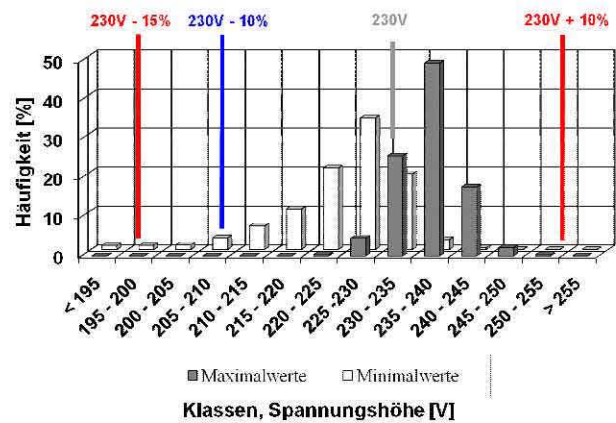
**Tabelle 1** Übersicht der 16 Messreihen beginnend mit dem Jahr 2000

#### 3.2 Höhe der Versorgungsspannung

Das Histogramm mit den relativen Klassenhäufigkeiten der maximalen und minimalen 10-Minuten-Mittelwerte der Spannungshöhe aller Wochenmessungen, die in der Niederspannung bislang über 16 Messreihen erfasst wurden, ist in **Bild 2** dargestellt und zeigt eine weitgehende Aus-

nutzung des Bandes zwischen 230V +10% und -10% (207 bis 253V).

Auffallend ist die geringere Streuung der Maximal- gegenüber der Minimalwertverteilung. Dies ist auf die übliche Schwachlastphase in den Nachtstunden zurückzuführen, in der das gesamte Netz in etwa auf die Leerlaufspannung angehoben wird. Die große Streuung bei den Minimalwerten der Spannungshöhe resultiert aus den stark unterschiedlichen Kurzschlussleistungen der ausgewählten Messpunkte. Von den insgesamt 693 Wochenmessungen aus 16 Messreihen war kein Maximalwert über 110%, 27 Maximalwerte zwischen 106% bis 110%, 19 Minimalwerte zwischen 90% bis 85% und 7 Minimalwerte unter 85% der Nennspannung von 230V. Mit Ausnahme von 7 Messungen mit Minimalwerten unter 85% der Nennspannung lagen somit alle 10-Minuten Effektivwerte der Versorgungsspannung innerhalb der 100%-Randwerte der EN50160 von 230V +10% und -15%.



**Bild 2** Maximale und minimale 10-Minuten-Mittelwerte der Effektivwerte der Spannungshöhe; Histogramm der relativen Klassenhäufigkeiten; Datenbasis: 16 Messreihen (2000 bis 2008)

230V +10%/-15% entspricht den 100%-Randwerten der Versorgungsspannung gemäß EN50160 [1]

Gemäß EN50160 können jedoch in entlegenen Regionen Spannungen außerhalb dieses Bereiches von 230V +10% und -15% auftreten. Der Kunde sollte hiervon jedoch informiert werden.

Inwieweit dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA) die Spannungshöhe beeinflussen, wird im Zuge dieser Messkampagne nicht untersucht.

#### 3.3 Oberschwingungsspannungen

In der VEÖ-Messkampagne werden die Oberschwingungsspannungen (OS) der 3., (nur in der Niederspannung), 5., 7., 11. und 13. Ordnung sowie der Gesamtoberschwingungsgehalt ( $THD_U$ ) erfasst. Für den Maximalwert des  $THD_U$  wird auch die Uhrzeit und der jeweilige Wochentag

des Auftretens, klassifiziert nach Werktag, Samstag und Sonn- oder Feiertag, registriert.

In **Bild 3** bis **Bild 5** sind die 95%-Quantile der Summenhäufigkeit (entspricht der 95% Auftretenswahrscheinlichkeit) der 95%-Werte aller 10-Minuten-Mittelwerte des Spannungseffektivwertes der einzelnen Harmonischen und des THD<sub>U</sub> – also jene Schwellwerte, die nur von 5% der Stichproben je Messreihe überschritten werden – der bisherigen 16 Reihenmessungen dargestellt. Die in **Bild 3** bis **Bild 5** angegebenen 95%-Werte können somit direkt mit den in der EN50160 angegebenen Randwerten verglichen werden.

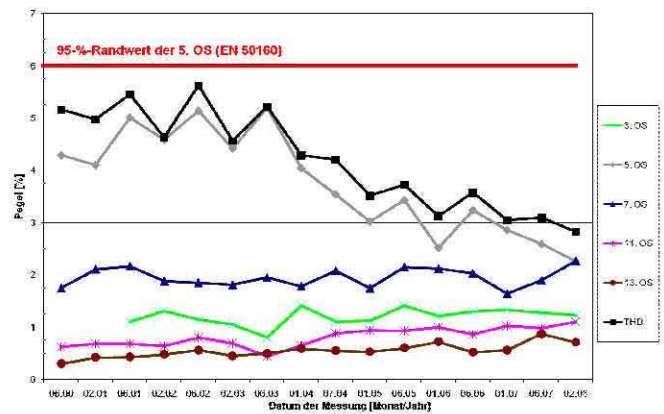
Da die dominante 5. Harmonische den geringsten Abstand zum Randwert der EN50160 aufweist, wurde in **Bild 6** für die 5. Harmonische in der Niederspannung zusätzlich das 95%-Quantil der empirischen Summenhäufigkeit aller Maximalwerte, der höchste Maximalwert und der höchste 95%-Wert der 10-Minuten-Mittelwerte der Wochenintervalle je Messreihe dargestellt.

Der höchste der gemessenen 95%-Werte der 5. Oberschwingungsspannung liegt mit 5,72% (4. Messreihe im Jänner 2002) nur knapp unter dem Verträglichkeitspegel und Randwert der EN50160 von 6%. Der höchste Maximalwert wurde mit 7,02 % in der 5. Messreihe im Juni 2002 gemessen.

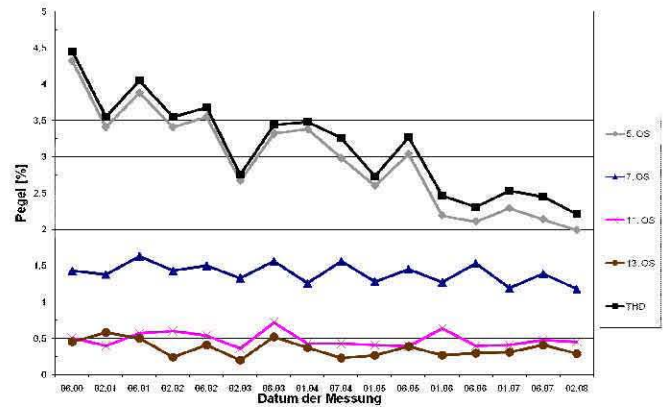
Der THD<sub>U</sub> und die 5. Harmonische zeigt durchgängig für alle Spannungsebenen deutlich eine sinkende Tendenz. Diese sinkende Tendenz betrifft nicht nur das 95%-Summenhäufigkeitsquantil sonder, wie in **Bild 6** ersichtlich, auch die jeweils höchsten 10-Minuten-Maximalwerte pro Messreihe.

Die höchsten Pegel der 5. Harmonischen werden durchwegs in den Abendstunden („Fernsehspitze“) bzw. an Sonn- und Feiertagen auch in den Nachmittagsstunden erreicht. Die Feststellung der Ursache für den allgemeinen Rückgang der 5. Oberschwingungsspannung ist nicht Gegenstand der Messkampagne. Prinzipiell kommen dafür mehrere Ursachen in Frage. Als möglicher Grund könnte ein geänderter Verbrauchermix mit einer gesteigerten gegenseitige Aufhebung (Kompensation) der einzelnen Verbrauchergruppen aufgrund unterschiedlicher Phasenlage der einspeisenden Oberschwingungsströme, eine geringere Resonanzausprägung durch eine erhöhte Netzauslastung (größere Lastdämpfung) etc. sein.

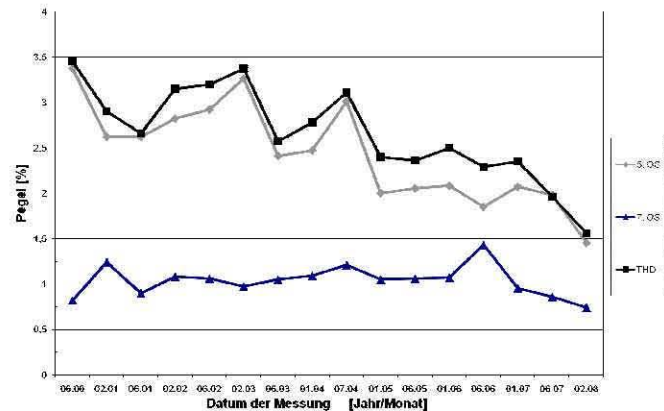
Die Trendlinien für die 3., 7., 11. und 13. Harmonische zeigen für alle Spannungsebenen annähernd einen waagrecht Verlauf und eine wesentlich geringere Streuung als jene für die 5. Oberschwingungsspannung.



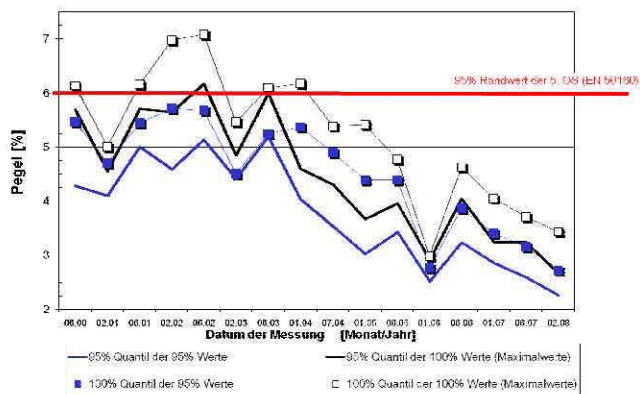
**Bild 3** Entwicklung der empirischen 95%-Summenhäufigkeitsquantile der 95%-Werte der 3., 5., 7., 11. und 13. Oberschwingung und des THD<sub>U</sub> in der **Niederspannung** über 16 Messreihen



**Bild 4** Entwicklung der empirischen 95%-Summenhäufigkeitsquantile der 95%-Werte der 5., 7., 11. und 13. Oberschwingung und des THD<sub>U</sub> in der **Mittelspannung** über 16 Messreihen



**Bild 5** Entwicklung der empirischen 95%-Summenhäufigkeitsquantile der 95%-Werte der 5. und 7. Oberschwingung und des THD<sub>U</sub> in der **Hochspannung** über 16 Messreihen



**Bild 6** 5. Oberschwingung: Maximalwerte und 95%-Summenhäufigkeitsquantile der maximalen 10-Minuten-Mittelwerte und der 95%-Werte der 10-Minuten-Mittelwerte je Messreihe in der Niederspannung

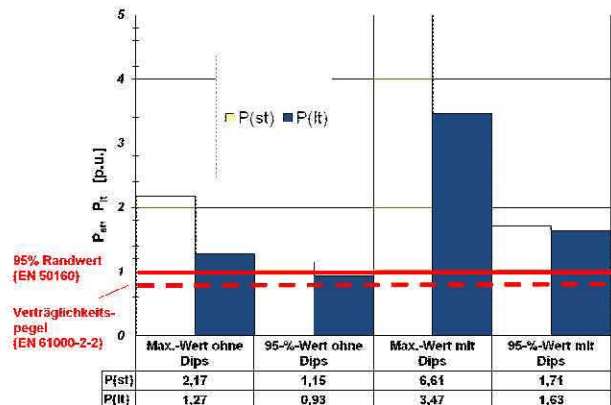
### 3.4 Flicker

Generell wurden bei allen Reihenmessungen einzelne Messpunkte mit überhöhter Langzeitflickerstärke  $P_{lt}$  registriert. Über alle 16 Messreihen gesehen liegt, wie in **Bild 7** dargestellt, die 95%-Auftrittswahrscheinlichkeit des  $P_{lt}$ -Wertes für Messungen ohne Spannungseinsenkungen (Dips) mit 0,93 p.u. knapp unter dem Randwert der EN50160 und deutlich über dem Verträglichkeitspegel von 0,8 p. u. gemäß EN 61000-2-2 [5]. Die entsprechenden Kurzzeitflickerpegel  $P_{st}$  liegen als Maximalwert deutlich über dem Maximalwert der Langzeitflickerstärke und nur geringfügig über dem 95%-Wert der  $P_{lt}$ -Werte.

Inwieweit das Messergebnis auch durch Spannungsunterbrechungen und Überspannungen (swells) beeinflusst ist, kann nicht verifiziert werden, da Unterbrechungen, d.h. Einbrüche unter 1% der Nennspannung und Überspannungen bislang im Zuge dieser Messkampagne nicht erfasst wurden. Bei den meisten Messgeräten führt jedoch eine kurzzeitige Spannungsunterbrechung oder eine Überspannung zu hohen Flickerpegeln. Korrekterweise müssten diese und auch durch Dips verursachte Flickerpegel eliminiert werden.

Künftig werden Messgeräte vermehrt in der Lage sein, durch Dips, Überspannungen oder Unterbrechungen beeinflusste Flickerpegel entsprechend dem Standard ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30 [6] automatisch nach dem „flagging concept“ auszublenden.

Da das Störempfinden von Leuchtdichteschwankungen jedoch deutlich von der Tageszeit und Wiederholrate abhängt, treten weitaus weniger Kundenbeschwerden bezüglich Leuchtdichteschwankungen auf, als die Messergebnisse vermuten lassen.



**Bild 7** 95%- Summenhäufigkeitsquantil der Maximal- und 95%-Werte der Kurzzeitflickerstärke  $P_{st}$  und Langzeitflickerstärke  $P_{lt}$  aus 16 Messreihen in der NS, unterteilt in Messpunkte mit und ohne Dips

### 3.5 Spannungseinsenkungen (Dips)

Eine Spannungseinsenkung wird gemäß EN50160 als Ereignis klassifiziert, unabhängig von der Form und der Anzahl der Phasen, die betroffen sind. Dips mit größerer Tiefe werden vornehmlich durch nicht normale Betriebsbedingungen, d.h. überwiegend durch Fehler in Kundenanlagen oder im öffentlichen Netz, verursacht und sind daher weitgehend zufallsgeprägt, nicht vorhersehbar und stark unterschiedlich in der Auftretenshäufigkeit in Abhängigkeit der Netzstruktur und -beschaffenheit. Für die Anzahl der zu erwartenden Dips können daher in der EN50160 nur Anhaltswerte gegeben werden. Sollten für ein bestimmtes Netz spezifischere Informationen hinsichtlich der Häufigkeit, der Einbruchtiefe und -dauer erforderlich sein, so können diese durch bisherige mehrjährige Aufzeichnungen am konkreten Netz bzw. eines Vergleichsnetzes gewonnen werden.

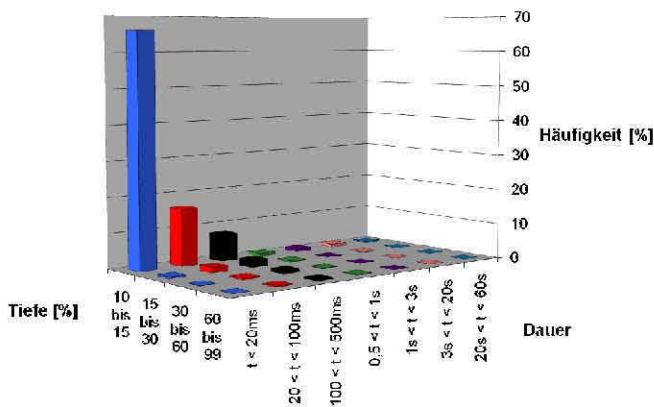
Die zeitliche Verteilung von Spannungseinsenkungen kann über das Jahr sehr unregelmäßig sein. In Netzen mit geringer Kurzschlussleistung oder niedrigem Betriebsspannungsniveau können aufgrund von Lastschaltungen häufig Spannungseinbrüche mit geringer Tiefe, d.h. zwischen 10% und 15% der Nennspannung  $U_n$ , auftreten.

Ca. 50% der Messungen aus allen 16 Messreihen waren während der Aufzeichnungsdauer frei von Spannungseinsenkungen. Dabei zeigten einige Messpunkte eine extrem hohe Anzahl an Dips (der Maximalwert lag bei 1.650 Dips pro Woche).

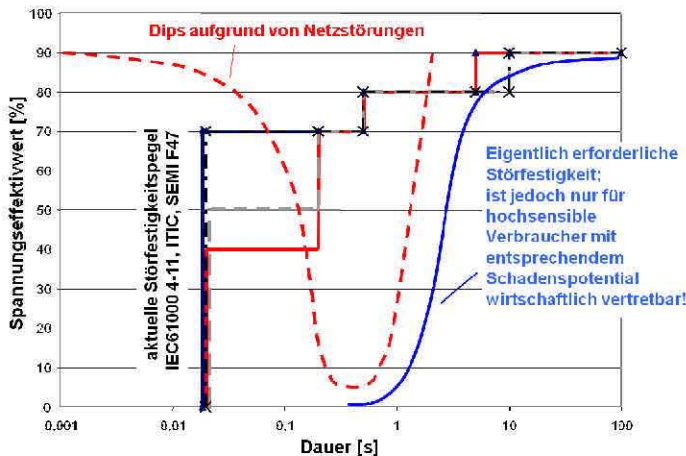
	Dauer $t < 20 \text{ ms}$	$20 \text{ ms} \leq t < 100 \text{ ms}$	$100 \text{ ms} \leq t < 0,5 \text{ s}$	$0,5 \text{ s} \leq t < 1 \text{ s}$	$1 \text{ s} \leq t < 3 \text{ s}$	$3 \text{ s} \leq t < 20 \text{ s}$	$20 \text{ s} \leq t < 60 \text{ s}$
Tiefe							
10% $< d < 15\%$	21368	5231	2512	267	258	288	117
15% $\leq d < 30\%$	150	501	649	116	52	22	11
30% $\leq d < 60\%$	19	156	314	32	7	0	0
60% $\leq d < 99\%$	4	107	136	52	9	4	0

**Tabelle 2** Gemessene Anzahl der Dips über 693 Wochenmessungen (entspricht 13,2 Jahre) in öffentlichen Niederspannungsnetzen, klassifiziert nach UNIPED

Da die zu erwartende Anzahl an Dips aufgrund des unregelmäßigen und nicht vorhersehbaren Auftretens über den Beobachtungszeitraum eines Jahres angegeben werden [1], bei der Messkampagne jedoch nur Wochenmessungen durchgeführt werden, sind in **Tabelle 2** und **Bild 8** alle Dips der insgesamt 693 Wochenmessungen aus 16 Messreihen in Summe dargestellt. Diese entspricht einem Beobachtungszeitraum von 13,2 Jahren.



**Bild 8** Relative Häufigkeit der Dips gemäß Tabelle 2



**Bild 9** Einbruchtiefe und -dauer von Dips aufgrund von Netzstörungen versus den Grenzkurven aktueller Störfestigkeitsstandards für Geräte

Dips mit größerer Einbruchtiefe werden durch Kurzschlussereignisse im Mittel- und Hochspannungsnetz verursacht und liegen daher im Bereich der typischen Fehlerklärungszeiten von 60ms bis 1s. Die aktuellen Störfestig-

keitsstandards betreffend Dips, wie die IEC61000-4-11 [7], ITIC-Curve des *Information Technology Industry Council* [8] oder die SEMI F47-Curve als "*Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity*" [9], sind dem ungeachtet, resultierend aus wirtschaftlichen Überlegungen, lediglich für Dips mit wesentlich kürzerer Dauer bei großer Einbruchtiefe festgelegt. **Bild 9** zeigt die Diskrepanz zwischen typischen Dips, wie sie durch Netzkurzschlüsse auftreten und den Grenzkurven der genannten Störfestigkeitsstandards.

## 4 Zusammenfassung

Das Ziel, der seit 8 Jahren laufenden Messkampagne, ist eine allgemeine Aussage betreffend der Qualitätsmerkmale der Versorgungsspannung gemäß EN50160 in den öffentlichen Netzen Österreichs zu gewinnen. Die Wertigkeit der Kampagne hinsichtlich der Abbildung des Ist-Zustandes wird entscheidend durch eine strikte Randomisierung bei der Auswahl der Stichproben gesteigert. Der notwendige Stichprobenumfang kann durch geeignete statistische Methoden abgeschätzt werden. Laut den theoretischen Überlegungen und praktischen Erfahrungen werden die wichtigsten Gütekriterien für empirische statistische Untersuchungen wie, Reliabilität, Validität und Objektivität mit ca. 100 bis 200 Zufallsstichproben bereits erfüllt, wobei auch schon mit ca. 50 Stichproben eine akzeptable Aussage gewonnen werden kann.

- Das Spannungstoleranzband wird weitgehend im Bereich zwischen 230V +10% und -10% (-15%) ausgenutzt. Der erst kürzlich, nach der Übergangsregelung, freigegebene Bereich zwischen 230V +6% und +10%, bietet derzeit noch eine gewisse Reserve, die für dezentrale Erzeugungsanlagen genutzt werden kann.
- Der Pegel der 5. Harmonischen und somit auch der Gesamtüberschwingungsgehalt THD<sub>U</sub> zeigt in allen Spannungsebenen eine fallende Tendenz. Für die 3., 7., 11. und 13. Harmonische wurde eine geringe Streuung der Pegelhöhe und in etwa eine waagrechte zeitliche Trendlinie festgestellt.
- Das 95%-Summenhäufigkeitsquantil der Maximal- und 95%-Werte der Flickerstärke für Messpunkte in der Niederspannung, bei denen keine Dips beobachtet wurden, liegt mit 1,27 p.u. bzw. 0,93 p.u. jeweils über dem Verträglichkeitspegel von 0,8 p.u.. Der 95%-Randwert der EN 50160 von 1 p.u. wird mit 0,93 p.u. nahezu erreicht.
- Dips mit geringer Tiefe und Dauer treten relativ häufig auf. Dips mit großer Tiefe liegen im typischen Bereich der Abschaltzeiten (60ms bis 1s) von Netzkurzschlüssen im Hoch- und Mittelspannungsnetz. Netzkurzschlüsse sind Ereignisse, de-

ren Auftreten vorwiegend durch Witterungseinflüsse bestimmt wird. Sie sind daher hinsichtlich ihrer Häufigkeit nicht vorhersehbar.

Die Grenzwerte bzw. Anhaltswerte der EN 50160 werden speziell bei den Minimalwerten der Versorgungsspannung, der Flickerstärke und der Dip-Häufigkeit erreicht.

## 4 Literatur

- [1] ÖVE/ÖNORM EN 50160: „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“, 2005-01-01
- [2] EURELECTRIC-Report „Power Quality in European Electricity Supply Networks“, February 2002; 2nd edition November 2003
- [3] VEÖ-Journal: Spannungsqualität, Koordinierte Messungen österreichischer EVU,,: Teil I, H.11/2000; Teil II, H.7/2001; Teil III, H.8/2001; Teil IV, H.8/2002; Teil V, H.2-3/2003; Teil VI, H.10/2003, Teil VII H.1-2/2004, Teil VIII H. Okt. 2004, Teil IX/X, H. Juni/Juli 2005; Teil XI, H. Dez./Jän. 2005 u. H. Feb. 2006; Teil XII, H. Nov. 2006; Teil XIII/XIV, H. April 2007
- [4] Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle, 10. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig – Köln, 1995, ISBN 3-343-00871-0
- [5] ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-2: „Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen“, 2003-04-01
- [6] ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30: „Prüf- und Messverfahren - Verfahren zur Messung der Spannungsqualität“, 2004-03-01
- [7] ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-11: Prüf- und Messverfahren - Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen, 2005-04-01
- [8] <http://www.itic.org/archives/iticurv.pdf>
- [9] [f47testing.epri.com/f47background.html](http://f47testing.epri.com/f47background.html)