

Machbarkeitsstudie für ein flächendeckendes PQ-Monitoring in Österreich

Studie im Auftrag der E-Control GmbH
Dezember 2005



Institut für Elektrische Anlagen

Technische Universität Graz
A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Institutsleiter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Wissenschaftliche Ausarbeitung
Dipl.-Ing. Walter Hipp
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
1.1	Allgemeine Grundlagen.....	4
1.2	Bedeutung der Spannungsqualität im liberalisiertem Strommarkt	5
1.3	Messverfahren zur Erfassung der Spannungsqualität	7
1.3.1	Kurzfristige, anlassbedingte Messung	7
1.3.2	Dauermessung.....	7
1.3.3	Anforderungen an die Messsysteme.....	7
1.4	Aufgabenstellung.....	8
2	Berechnungsgrundlagen.....	9
2.1	Beschreibung des Netzes durch Admittanz- bzw. Impedanzmatrix	9
2.2	Nachbildung von Netzelementen	11
2.2.1	Begriffsfestlegung für Netze.....	11
2.2.2	Kabel, Freileitungen	11
2.2.3	Generatoren	11
2.2.4	Verbraucher	12
2.2.5	Oberschwingungsfilter.....	12
2.3	Beeinträchtigung der Spannungsqualität durch Überlagerung entsprechender Ströme.....	13
3	Methodik	14
3.1	Generierung fiktiver Messreihen	14
3.1.1	Oberschwingungen	14
3.1.2	Flicker.....	17
3.1.3	Spannungseinbrüche (Dips), Spannungsunterbrechungen	18
3.2	Korrelation und Regression.....	21
3.2.1	Korrelation.....	21
3.2.2	Regression	21
3.3	Automatische Messknotenbestimmung.....	23

4	Anwendung auf Beispielnetz und Diskussion der Ergebnisse..	25
4.1	Oberschwingungen	26
4.1.1	Zufällig generierte Oberschwingungsquellen	26
4.1.2	Spezifische Oberschwingungszeitreihen	26
4.1.3	Einfluss der Oberschwingungsordnung	27
4.1.4	Einfluss von Oberschwingungsfiltern	29
4.1.5	Last und Generatorimpedanzen.....	29
4.1.6	Störungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen	30
4.1.7	Ergebnisse bei Oberschwingungsstörungen.....	32
4.2	Flicker.....	33
4.2.1	Zufällig generierte Flickerströme.....	33
4.2.2	Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen	34
4.2.3	Unterschiedliche Flickerkoeffizienten je Lastkategorie	35
4.2.4	Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen und unterschiedlichen Flickerkoeffizienten je Lastkategorie	36
4.2.5	Einfluss von Last und Generatorimpedanzen	37
4.2.6	Ergebnisse bei Flickerstörungen.....	37
4.3	Spannungseinbrüche (Dips) und Unterbrechungen	38
4.4	Gesamteinfluss von Last- und Generatorimpedanzen	38
4.5	Unterschiedliche Schaltzustände	39
5	Messergebnisse	40
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	41
6.1	Grundsätzliche Ergebnisse	41
6.2	Anzahl der notwendigen Messstellen.....	42
6.3	Messdauer.....	42
7	Literaturverzeichnis	44
8	Anhang.....	45
8.1	Netzkonfiguration des Beispielnetzes	45
8.2	Simulationsoberfläche.....	46
8.3	Lastkategorien.....	47

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Grundlagen

Wie jedes andere Produkt muss auch das Produkt "Elektrizität" gewisse Mindestanforderungen an die Qualität erfüllen. Für die Produktgüte, also die Qualität der gelieferten Spannung bzw. elektrischen Energie, gibt es, je nach Betrachtungsweise, verschiedene und der Bedeutung nach unterschiedliche Bezeichnungen. Demnach beschreibt die **Versorgungssicherheit** und die **Spannungsqualität** die **Versorgungsqualität** eines Netzes. Der internationale Ausdruck „Power Quality“ ist von der Bezeichnung her nicht so eingeschränkt wie der im deutschen Sprachraum üblicher Weise verwendete Begriff "Netzspannungsqualität", da der Bereich der Ströme sowie Wirk- bzw. Blindleistungen mit dieser Bezeichnung nicht erfasst wird. Im Folgenden wird aber der Begriff "Spannungsqualität" ohne Einschränkung auf Spannungen mit der umfassenderen Bedeutung von "Power Quality" verwendet.

Folgende Parameter sind nach Europeanorm EN50160 für die Netzspannungsqualität relevant:

- Spannungshöhe, langsame Spannungsänderungen
- Versorgungsunterbrechungen (kurz, lang)
- Spannungseinbrüche
- Schnelle Spannungsänderungen, Flicker
- Spannungsunsymmetrie
- Spannungsform (Oberschwingungen, Zwischenharmonische, Signalspannungen)
- transiente und netzfrequente Überspannungen
- Frequenz

Betrachtet man die Ursachen für mangelnde Netzspannungsqualität, müssen mehrere Bereiche berücksichtigt werden. Einerseits kommt es infolge von Netzrückwirkungen durch Kundenanlagen zu Spannungsverzerrungen und Flickererscheinungen. Der Einfluss der Störer auf die Spannungsqualität ist dabei in den einzelnen Netzknoten unterschiedlich und nimmt im Allgemeinen in Richtung der Netzeinspeisung – also in Richtung steigender Kurzschlussleistung - ab. Neben den Auswirkungen an der Störquelle ist also die Ausbreitung der Störung im Netz von großer Bedeutung.

Andererseits kommt es infolge von mangelnder Spannungsqualität in übergeordneten oder parallelen Netzen zu entsprechenden Netzrückwirkungen. Im weiteren Sinne spielt auch die Erzeugungszuverlässigkeit eine Rolle bei der Spannungsqualität.

Entsprechend einer Umfrage bei 12 österreichischen Elektrizitätsversorgungsunternehmen im Jahr 1998 ergibt sich folgende Reihung der Netzspannungsqualitätsminderung durch Netzzrückwirkungen.

- Bei allen befragten EVUs traten Kundenbeschwerden wegen **Flicker** und **Spannungsschwankungen** auf.
- 6 EVUs berichteten über Kundenbeschwerden wegen **Zwischenharmonischen**.
- 5 EVUs berichteten über Kundenbeschwerden wegen **Kommutierungseinbrüchen**.
- 4 EVUs berichteten über Kundenbeschwerden wegen **Oberschwingungen**.
- **Spannungsunsymmetrie** stellte für keines der befragten EVUs ein Problem dar.

Nicht abgefragt wurden in diesem Zusammenhang die Parameter „Spannungsniveau“, „Spannungseinbrüche und -unterbrechungen“ und „transiente Überspannungen“.

1.2 Bedeutung der Spannungsqualität im liberalisiertem Strommarkt

Im Zuge der Liberalisierung der Strommärkte entwickelt sich neben den wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekten insbesondere die Produktqualität des „elektrischen Stromes“ als Faktor, welcher in der Lieferanten-Kunden-Beziehung eine zunehmende Bedeutung hat und bei den zukünftigen Entwicklungen der elektrischen Energieversorgung beachtet werden sollte. Im österreichischen Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (EIWOG), wird u.a. als Ziel definiert, *„einen Ausgleich für gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen im Allgemeininteresse zu schaffen, die den Elektrizitätsunternehmen auferlegt wurden und die sich auf die Sicherheit, einschließlich der Versorgungssicherheit, die Regelmäßigkeit, die Qualität und den Preis der Lieferungen sowie auf den Umweltschutz beziehen.“*

Die Europäische Kommission hat mit ihrem Grünbuch "Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit" im Herbst 2000 die Debatte über die Energieversorgungspolitik und im Speziellen über die Energieversorgungssicherheit in Gang gebracht. Im Juni 2002 hat die Kommission den Abschlussbericht über dieses Grünbuch vorgelegt, in diesem wird erstmals wieder auf die Notwendigkeit einer Politik in Richtung Beherrschung der Energienachfrage und einer besseren Energieeffizienz hingewiesen.

Die Spannungsqualität bildet einen wesentlichen Bestandteil der Versorgungsqualität, welche zusätzlich über die Versorgungszuverlässigkeit, die operative Versorgungssicherheit und die kommerzielle Qualität beschrieben wird.

Wegen der absehbaren stärkeren Auslastung der Netze und reduzierter Ausbaustrategien ist ohne weitere Maßnahmen eine Verschlechterung der Spannungsqualität zu erwarten.

Im Rahmen einer zukünftigen Qualitätsregulierung kann der Netzbetreiber verbindliche Vorgaben für die Qualität der Netze und seiner Dienstleistungen, unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Erzeugungsanlagen, übergeordneter und paralleler Netze sowie Netzzurückwirkungen, erhalten, die auch eine Planungssicherheit für den Netzbetreiber schaffen. So sollen insbesondere ausreichende Instandhaltungsmaßnahmen und Netzausbaumaßnahmen die Versorgungsqualität auch in Zukunft sichern.

Spannungsqualitätsparameter	Einflussfaktor	technisch verantwortlich			
		Erzeuger	110 kV	5..30 kV	Kunden
Unterbrechungen	Fehler im Netz		X	X	
Spannungseinbrüche	Fehler im Netz		X	X	
	Fehler oder hohe Einschaltströme bei Kundenanlagen				X
Spannungsniveau	MS, NS: Transformatorstellung			X	
	HS: Blindleistungsbilanz		X		
Unsymmetrie	unsymmetrische Belastung				X
Oberschwingungen, Zwischenharm.	Oberschwingungsströme				X
	unzulässige Oberschwingungsspannungen trotz zulässiger Oberschwingungsströme		X	X	
Flicker	unruhige Belastung				X
Frequenz	Wirkleistungsbilanz	X			
Transiente Überspannungen	atmosphärische Überspannungen, Schalthandlungen		X	X	

Tabelle 1-1 Technische Verantwortung für die Einhaltung von Netzspannungsqualität, Netzzurückwirkungen sind schattiert dargestellt

1.3 Messverfahren zur Erfassung der Spannungsqualität

Im Prinzip gibt es zwei Messstrategien, die unterschieden werden müssen:

1.3.1 Kurzfristige, anlassbedingte Messung

Treten in Kundenanlagen Probleme auf, die möglicherweise auf mangelnde Spannungsqualität zurückzuführen sind, muss diese durch eine Messung überprüft werden. Messort ist in diesem Fall meist der Anschlusspunkt der Kundenanlage an das öffentliche Netz. Neben der Messung der Spannungsqualität kann die Registrierung von Begleitinformationen (Lastgang, Analyse des Stromes) für die Ermittlung der Ursache der Probleme hilfreich sein. Sinnvoll ist weiters eine Messung der Spannungsqualität bei potenziellen Störquellen, wobei auch hier zusätzliche Messgrößen, die Informationen über den Betriebszustand liefern, mitregistriert werden sollten.

1.3.2 Dauermessung

Dauermessungen dienen der langfristigen Beobachtung der Spannungsqualität und etwaiger Entwicklungstendenzen. Weiters können aus flächendeckenden Dauermessungen Kennwerte, welche die Spannungsqualität eines Netzes charakterisieren, gewonnen werden. Während bei kurzfristigen Messungen die Daten meist lokal gespeichert, und erst nach Beendigung der Messung ausgewertet werden, sollte bei Dauermessungen die Datenübertragung an einen zentralen Messdatenserver erfolgen. Die Übertragung kann über Festnetz- oder GSM-Modems oder Netzwerkverbindungen (LAN) erfolgen.

Um entsprechende Trends erkennen zu können und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen setzen zu können, ist eine **flächendeckende Dauerüberwachung** der Spannungsqualität notwendig. Diese wird bereits von einigen österreichischen Netzbetreibern durchgeführt bzw. aufgebaut. Weiters werden durch den Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ) koordinierte Messungen an ausgewählten Messpunkten über längere Zeit durchgeführt.

1.3.3 Anforderungen an die Messsysteme

Die Messeinrichtungen zur Spannungsqualitätserfassung müssen die Spezifikationen nach IEC 61000-4-30 erfüllen. Zweckmäßig ist weiters die Möglichkeit über binäre Eingänge Schalterstellungen erfassen zu können, alternativ kann dies aber auch über das Anlagenleitsystem erfolgen.

1.4 Aufgabenstellung

Ausgehend von der Aufgabe, die Spannungsqualität Österreichweit zu überprüfen, werden im Rahmen der Machbarkeitsstudie die Messstellen in den Mittelspannungsnetzen bestimmt, die ein Optimum bezüglich Messaufwand (Gerätezahl) und Aussagekraft aufweisen. Bei diesen Messungen stellt sich nicht zuletzt aus ökonomischen Gründen die Frage nach der minimal nötigen Anzahl der Messstationen und deren Einbauort. Redundante Messergebnisse sind ebenso wie Informationsverluste nach Möglichkeit zu vermeiden.

Es soll ein Werkzeug entwickelt werden, das mit den entsprechenden Informationen über die Netztopologie und Kundenstruktur (überwiegend Haushalt, Gewerbe oder Industrie) bestimmte Netzpunkte für ein flächendeckendes Monitoring der Spannungsqualität in der Mittelspannung bestimmt. Die Algorithmen zur Optimierung werden nachvollziehbar und transparent dargestellt.

Zusätzlich zur Erfassung der Spannungsqualität gemäß EN 50160 soll eine Erfassung der Spannungsunterbrechungen, die länger als 3 Minuten sind, möglich sein.

Es wird weiters untersucht, welche Netzparameter in Abhängigkeit der Spannungsebene und Netzstruktur für die Messstellenoptimierung erforderlich sind. Im Speziellen wird der Einfluss folgender Parameter untersucht bzw. berücksichtigt:

- Netztopologie (Strahlennetz, vermaschtes Netz)
- Netzimpedanzen (Leitungslängen, Kabel/Freileitung)
- Lage möglicher Störquellen
 - einzelne, voneinander unabhängige Störquellen mit großer Leistung (z.B. Stahlwerk als Flickerverursacher)
 - gleichmäßig verteilte Störquellen mit ähnlicher Charakteristik (z.B. TV-Geräte als Oberschwingungsverursacher)
- Vorbelastung durch übergeordnete oder parallele Netze

Die Erfassung der Messwerte im Rahmen des PQ-Monitoring kann mit eigenen stand-alone-Geräten erfolgen, es sind aber auch andere technische Lösungen möglich.

Weiters wird der erforderliche Messstellenbedarf für eine großräumige koordinierte Spannungsmessung abgeschätzt. Diese Untersuchungen können die Basis für ein koordiniertes Monitoring der Spannungsqualität in Österreich bilden.

2 Berechnungsgrundlagen

2.1 Beschreibung des Netzes durch Admittanz- bzw. Impedanzmatrix

In den meisten Fällen erfolgt die Berechnung unter Annahme quasistationärer, linearer Verhältnisse. Man reduziert die in diesen Fällen redundante Information der mit Netzfrequenz periodischen Zeitverläufe auf komplexe Effektivwerte. Die Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung werden durch die komplexe Systemadmittanzmatrix \underline{Y} des Netzes gebildet. Die Elemente der Admittanzmatrix werden entsprechend (2.2) und (2.3) ermittelt.

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{U} \quad (2.1)$$

\underline{I} Vektor der komplexen Knotenströme

\underline{U} Vektor der komplexen Knotenspannungen

\underline{Y} Systemadmittanzmatrix

Eigenadmittanz Y_{ii} (Hauptdiagonalelement): Summe aller Zweigadmittanzen zu benachbarten Knoten und zu dem Bezugsknoten

$$\underline{Y}_{ii} = \sum_j \frac{1}{\underline{Z}_{ij}} \quad (2.2)$$

Koppeladmittanz Y_{ij} (Nebendiagonalelement): negative Zweigadmittanz

$$\underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ji} = -\frac{1}{\underline{Z}_{ij}} \quad (2.3)$$

Polyfrequente Probleme können unter Annahme linearer Verhältnisse über die Fouriertransformation in monofrequente Problemstellungen transformiert und voneinander entkoppelt behandelt werden, wobei für jede Frequenz die entsprechend angepasste Admittanzmatrix zu erstellen ist.

Für Drehstromsysteme ist es zweckmäßig, die Erstellung der Knotenadmittanzmatrix nicht in Phasengrößen sondern in symmetrischen Komponenten vorzunehmen. Dies hat den Vorteil, dass die einzelnen Komponentensysteme in den meisten Fällen voneinander entkoppelt behandelt werden können.

Für Untersuchungen der Flickerausbreitung wird das Mitsystem benötigt, und für die Betrachtung der Oberschwingungsausbreitung wird je nach Oberschwingungsordnung das Mit-, Gegen- oder Nullsystem benötigt.

Für die Behandlung von transienten Vorgängen und nichtlinearen Netzelementen erfolgt die Berechnung im Zeitbereich. Das elektrische Netz wird als nichtlineares Differentialgleichungssystem 1. Ordnung dargestellt und durch geeignete numerische Integrationsverfahren gelöst. Diese Problemstellung wird im Weiteren nicht behandelt.

Aus der Systemadmittanzmatrix \underline{Y} lässt sich durch Inversion die komplexe Systemimpedanzmatrix \underline{Z} ermitteln:

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1} \quad (2.4)$$

\underline{Y} Systemimpedanzmatrix

\underline{Z} Systemadmittanzmatrix

Die Störstromzeitreihen, im Folgenden mit $\underline{\Delta I}$ bezeichnet, führen zu spannungsqualitätsmindernden Spannungsänderungen $\underline{\Delta U}$, welche für lineare Systeme mit Gleichung (2.5) berechnet werden.

$$\begin{pmatrix} \underline{\Delta U}_{11} & \cdots & \underline{\Delta U}_{1T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{\Delta U}_{K1} & \cdots & \underline{\Delta U}_{KT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{11} & \cdots & \underline{Z}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{K1} & \cdots & \underline{Z}_{KK} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{\Delta I}_{11} & \cdots & \underline{\Delta I}_{1T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{\Delta I}_{K1} & \cdots & \underline{\Delta I}_{KT} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

K Knotenanzahl

T Zeitreihenanzahl der Störströme

Vorbelastungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen, welche als Störspannungszeitreihen anzusetzen sind, können berücksichtigt werden, indem sie in äquivalente Stromquellen umgerechnet werden.

2.2 Nachbildung von Netzelementen

2.2.1 Begriffsfestlegung für Netze

Die den untersuchten Mittelspannungsnetzen unterlagerten Mittelspannungsnetze mit niedrigerer Spannung, Niederspannungsnetze und Industrienetze werden in weiterer Folge als Verbraucher (für das untersuchte Mittelspannungsnetz) bezeichnet.

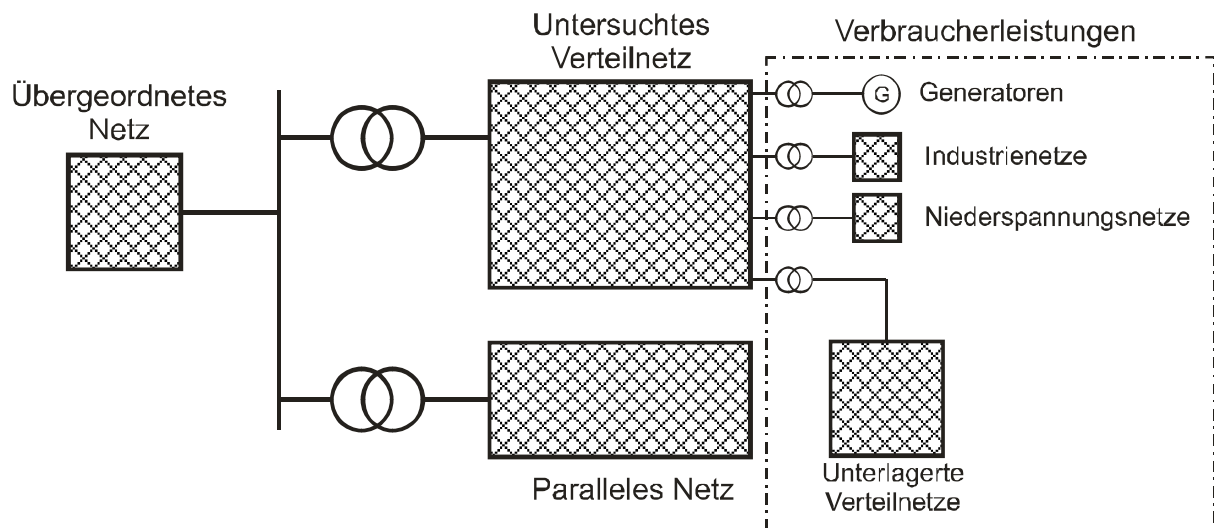


Abbildung 2-1 Übersichtsplan

2.2.2 Kabel, Freileitungen

Kabel und Freileitungen werden in der klassischen π -Ersatzschaltung mit ihren frequenzabhängigen, komplexen Längs- und Querimpedanzen nachgebildet.

2.2.3 Generatoren

Der Einfluss von Generatoren wird für die Aufgabenstellung über die subtransiente Kurzschlussimpedanz der Maschine berechnet. Weiters wird vorausgesetzt, dass gemäß der VEÖ-Richtlinie, dezentrale Generatoren bei Netzinselbildung abgeschaltet werden.

$$Z_K'' = \frac{U_N}{S_N} x_d'' \quad (2.6)$$

Z_K'' Kurzschlussimpedanz des Generators

x_d'' subtransiente Reaktanz in p.u. (0.2 p.u. wenn nicht bekannt)

U_N Nennspannung des Generators

S_N Nennscheinleistung des Generators, wenn diese nicht bekannt ist, wird die eingespeiste Leistung herangezogen.

2.2.4 Verbraucher

Der Einfluss von Verbrauchern wird neben den eingespeisten Störströmen über deren Ersatzimpedanz, die aus einer angenommenen Lastflusssituation ermittelt wird, simuliert.

$$Z_L = \frac{U_N}{S_A} \quad (2.7)$$

Z_L	Impedanz der Last
U_N	Nennspannung
S_N	Bezugsscheinleistung der Last

2.2.5 OberschwingungsfILTER

OberschwingungsfILTER können speziell für die Verteilung der Oberschwingungsbelastung maßgeblich sein und werden als RLC-Shunt-Elemente (Bandpassfilter mit endlicher Güte) berücksichtigt.

2.3 Beeinträchtigung der Spannungsqualität durch Überlagerung entsprechender Ströme

Eine Spannungsqualitätsminderung wird im Allgemeinen durch Spannungsabfälle an Netzimpedanzen durch Änderungen der Verbraucherströme, oder durch Fehlerströme bewirkt. Die Ströme können

- Stromänderungen einer Anlage mit schwankender Leistungsaufnahme
- Oberschwingungsströme
- unsymmetrische Lastströme
- Kurzschlussströme

sein, die ihrerseits

- Spannungsschwankungen
- Oberschwingungsspannungen
- Spannungsunsymmetrien
- Spannungseinbrüche
- in den Netzknoten verursachen.

Die Ermittlung der Spannungsqualitätsparameter erfolgt im Allgemeinen durch Mittelung der gemessenen 20-ms-Effektivwerte über vorgegebene Mittelungszeitintervalle, meist 10 Minuten. Eine lineare Überlagerung des Effektes unterschiedlicher Störquellen ist in diesem Fall nur dann korrekt, wenn die einzelnen Anteile während des betrachteten Mittelungsintervalls annähernd konstant waren. Dies ist beispielsweise für Oberschwingungen in Gebieten mit überwiegend Haushalts- oder Bürolast hinreichend erfüllt.

Eine andere Situation ergibt sich bei dem Qualitätsparameter "Flicker". Hier ergibt sich die Störung gerade aus der, meist stochastischen Änderung der Effektivwerte. Für den P_{st} -Wert, der das Maß für die Flickerstärke darstellt und über ein Zeitintervall von 10 Minuten gebildet wird, gilt näherungsweise ein kubisches Überlagerungsgesetz. Für die vorliegende Problemstellung ergibt sich damit folgende Formel:

$$P_{st_{k,t}} \sim \sqrt[3]{\sum_{i=1..K} |I_{i,t} \cdot Z_{k,i}|^3} \quad (2.8)$$

k k-te Knoten von K Knoten (1...K)

i Störstrom im Knoten k (1...K)

t Zeitreihenindex (1...T)

3 Methodik

Die Auswahl der Messorte hängt stark von der Messaufgabe ab. Folgende Parameter müssen bei der Messortauswahl berücksichtigt werden:

- Netztopologie (Strahlennetz, vermaschtes Netz)
- Netzimpedanzen (Leitungslängen, Kabel/Freileitung)
- Lage möglicher Störquellen
- einzelne, voneinander unabhängige Störquellen mit großer Leistung (z.B. Stahlwerk als Flickerverursacher)
- gleichmäßig verteilte Störquellen mit ähnlicher Charakteristik (z.B. TV-Geräte als Oberschwingungsverursacher)
- Vorbelastung aus übergeordneten oder parallelen Netzen

Um die optimalen Messorte für Dauermessungen zu bestimmen, werden fiktive Messzeitreihen für die relevanten Spannungsqualitätsparameter erzeugt.

3.1 Generierung fiktiver Messreihen

Für die Erzeugung fiktiver Messreihen der Spannungsqualitätsparameter in den einzelnen Netzknoten wurden folgende Annahmen getroffen:

3.1.1 Oberschwingungen

Die maßgeblichen Oberschwingungsverursacher, die für die größten Oberschwingungspegel verantwortlich sind, fallen in den Bereich der Endgeräte. Die höchste Oberschwingungsbelastung tritt im Allgemeinen in den Abendstunden während der Hauptfernsehzeit auf. Die Störquellen sind gleichmäßig im Netz verteilt, die Einschaltzeiten weisen eine starke Kohärenz auf.

Die dominante Spektralkomponente stellt die 5. Oberschwingung dar. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus der einzelnen Störer (Brückengleichrichter mit kapazitiver Glättung) weist die Phasenlage der 5. Stromharmonischen pro Verbrauchergruppe nur eine geringe Streuung auf. In den Berechnungen erfolgt eine lineare Überlagerung der durch die einzelnen Oberschwingungsströme gleicher Ordnung in den Knoten hervorgerufenen Oberschwingungsspannungen.

Die Matrix der eingespeisten Störströme weist K Zeilen entsprechend der Anzahl der Netzknoten und T Spalten entsprechend der Anzahl der simulierten Zeitwerte. Für die vorliegenden Untersuchungsergebnisse wurde eine Zeitdauer von 1 Woche durch 1008 10-min-Werte nachgebildet.

Bei der Generierung der Messreihen werden 2 unterschiedliche Möglichkeiten untersucht:

1.) Zufällige, unabhängige Störquellen

Die Störquellen sind gleichmäßig im Netz verteilt. Amplituden sowie auch Winkel der komplexen Störströme werden per Zufallsgenerator generiert und können folgende Werte annehmen:

$$\underline{I}_v = A \cdot e^{j\varphi_v}$$

\underline{I}_v komplexer Strom der v-ten Oberschwingung

A Zufalls-Effektivwert $0 < A < 1$ [p.U.]

φ_v Zufalls-Winkel ($-90^\circ < \varphi_v < 90^\circ$) der v-ten Oberschwingung

2.) Lastkategorieabhängige Störquellen

Wenn für ein Netz in jedem Knoten die versorgten Lastkategorien (Haushalt, Gewerbe, Landwirtschaft, usw.) bekannt sind, kann man den einzelnen Störern spezifische Oberschwingungszeitreihen (Abbildung 3-1) zuordnen. Damit nicht innerhalb einer Lastkategorie jede Last mit exakt der gleichen Zeitreihe nachgebildet wird und damit eine tatsächlich nicht vorhandene Kohärenz vortäuscht, werden die einzelnen Zeitreihen einer Lastkategorie noch in Amplitude und Winkel per Zufall um einige Prozent variiert, und auch zeitlich um einige 10 Minuten verschoben.

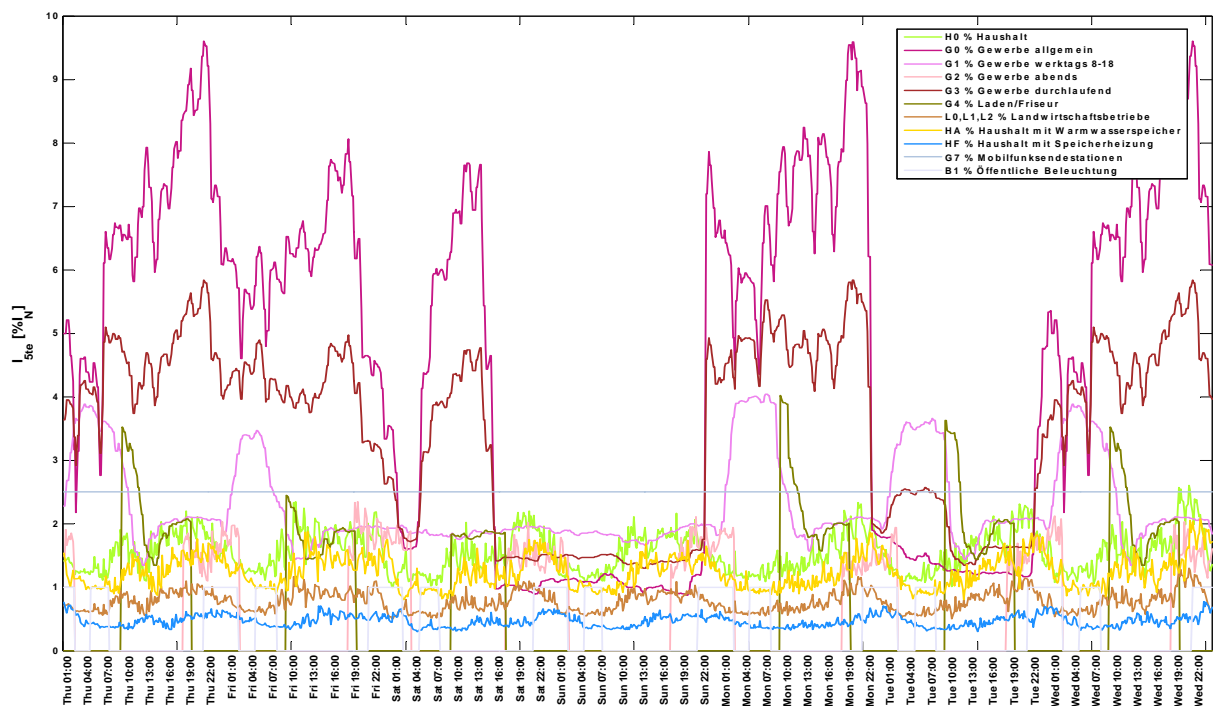


Abbildung 3-1 spezifische Oberschwingungszeitreihen

3.1.2 Flicker

Als Flicker bezeichnet man den subjektiven Eindruck von Leuchtdichteschwankungen an Beleuchtungseinrichtungen, hervorgerufen durch Schwankungen der Versorgungsspannung. Flickerrelevante Schwankungen der Versorgungsspannung entstehen durch sich wiederholende Laständerungen, welche zu einem sich ändernden Spannungsabfall an den Leitungsimpedanzen führen.

Die Matrix der eingespeisten Störströme weist K Zeilen entsprechend der Anzahl der Netzknoten und T Spalten entsprechend der Anzahl der simulierten Zeitwerte. Für die vorliegenden Untersuchungsergebnisse wurde eine Zeitdauer von 1 Woche durch 1008 10-min-Werte nachgebildet.

Bei der Generierung der Messreihen werden folgende 4 Möglichkeiten untersucht:

1.) Zufällige, unabhängige Störquellen

In vielen Fällen existieren weder im Mittel- noch im Niederspannungsnetz leistungsstarke, dominante und lokal dominierende Flickerstörquellen. Also können die Flickerstörquellen gleichmäßig im Netz verteilt angenommen werden. Die komplexen Störströme der einzelnen Quellen weisen keine Abhängigkeit untereinander auf. Daher wird die Amplitude und der Winkel des komplexen Störstroms in den einzelnen Stationen per Zufall ermittelt, und kann folgende Werte annehmen:

$$\underline{I}_{FI} = A \cdot e^{j\varphi}$$

\underline{I}_{FI} komplexer Störstrom

A Zufalls-Effektivwert $0 < A < 1$ [p.u.]

φ Zufalls-Winkel in einem vorgegebenen Winkelbereich

2.) Störquelle proportional zu Leistung

Wenn in jedem Knoten als Kenngröße die Anschlussleistung bekannt ist, wird der Störstrom wie in Punkt 1.) ermittelt, jedoch liegt die Amplitude des Zufallsstroms in diesem Fall im Bereich $0 < A < I_N$ [p.u.]. Dadurch ergibt sich, dass Knoten mit höheren Leistungen auch stärkere Flickerquellen sind. Die Flickerströme sind also proportional der im Knoten vorhandenen Last.

3.) Lastkategorieabhängige Störquellen

Wenn die Lastkategorien in jedem Knoten bekannt sind, kann man diesen eine bestimmte Flickerintensität nach Abbildung 3-2 zuweisen. Die Stärke der Störströme wird per Zufalls-generator generiert und kann entsprechend der Flickerintensität Werte zwischen 0 und 1 p.u. annehmen.

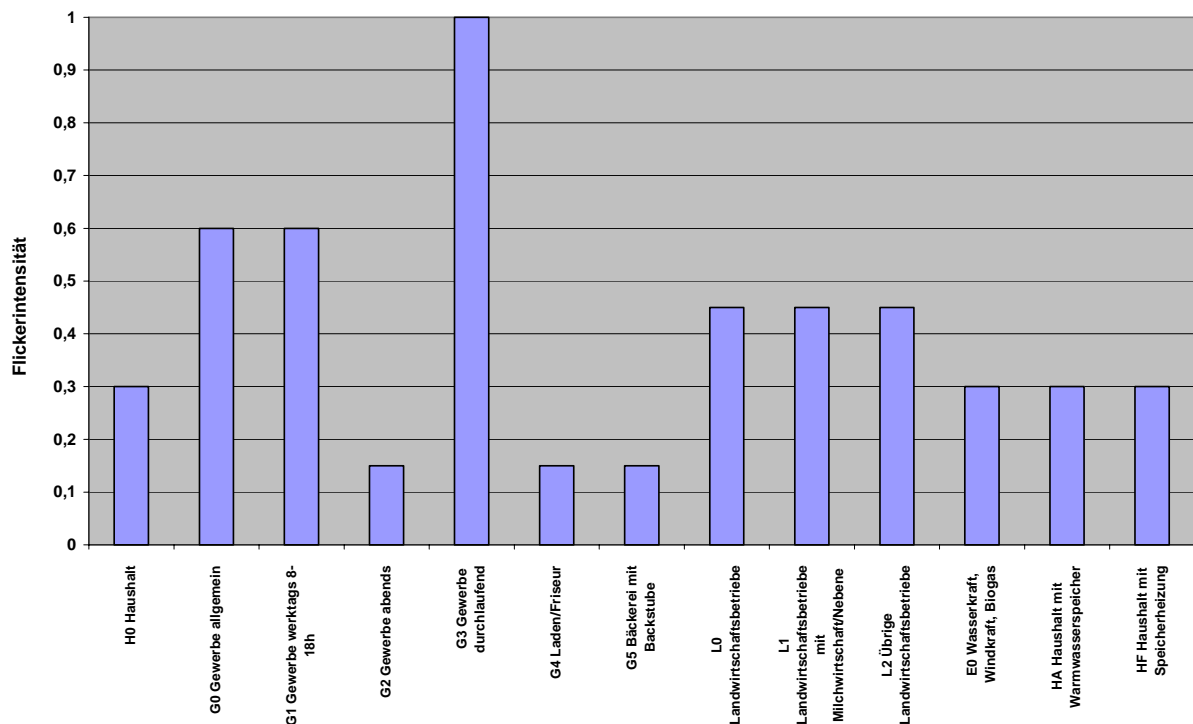


Abbildung 3-2 Flickerintensität

4.) Last- und Lastkategorieabhängige Störquellen

Eine Kombination aus 2.) und 3.) wird ebenfalls untersucht.

3.1.3 Spannungseinbrüche (Dips), Spannungsunterbrechungen

Im Falle von Spannungseinbrüchen können die Störströme, die in diesem Fall Kurzschlussströme sind, nicht stochastisch angenommen werden. Sie ergeben sich deterministisch aus der jeweiligen Netzkonfiguration bzw. den Kurzschlussleistungen in den einzelnen Netzknoten. Als Fehlerort werden alle im Netz vorhandenen Knoten gewählt. Die Kurzschlussimpedanz entspricht dem jeweiligen Hauptdiagonalelement in der Systemimpedanzmatrix.

Der Fehlerstrom $I_{K,f}$ in den einzelnen Fehlerknoten f , ergibt sich durch:

$$I_{K,f} = \frac{U_L}{Z_{ff}} \quad (3.4)$$

Das Auftreten von Mehrfachfehlern kann aufgrund der geringen Auftrittswahrscheinlichkeit vernachlässigt werden. Die Matrix der Störströme besteht damit aus einer reinen Diagonalmatrix

Bei Strahlennetzen mit passiven Abgängen (keine dezentrale Einspeisung) kann auf die aufwändige Berechnung mittels der Systemadmittanzmatrix verzichtet werden, die Elemente der Impedanzmatrix \underline{Z} können direkt ermittelt werden. Entsprechend Abbildung 3-3 ergeben sich folgende Fallunterscheidungen:

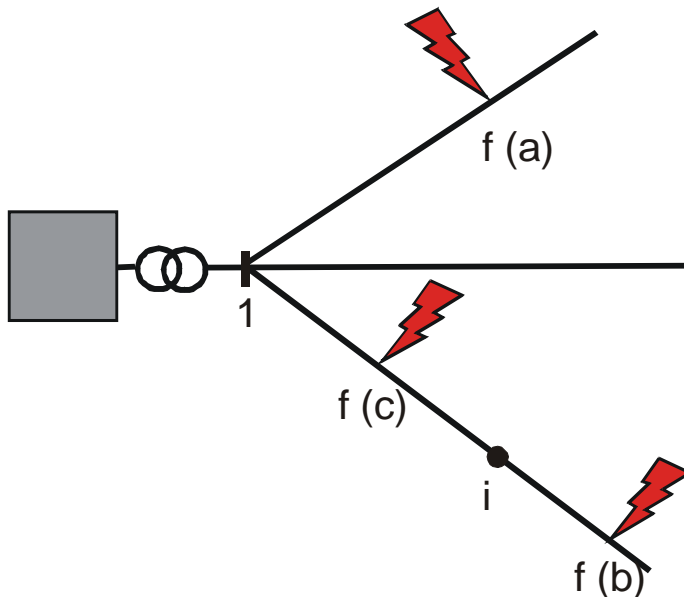


Abbildung 3-3 Vereinfachungen für Strahlennetze,

- 1 speisende Sammelschiene
- i Beobachtungspunkt
- f Fehlerknoten für die Fälle a, b, c

Fall a: f und i liegen in unterschiedlichen Abzweigen

$$\underline{Z}_{if} = \underline{Z}_{11} \quad (3.5)$$

Fall b: f und i liegen im gleichen Abzweig, i liegt näher an der Einspeisung

$$\underline{Z}_{if} = \underline{Z}_{ii} \quad (3.6)$$

Fall c: f und i liegen im gleichen Abzweig, f liegt näher an der Einspeisung

$$\underline{Z}_{if} = \underline{Z}_{ff} \quad (3.7)$$

- Z_{ff} Kurzschlussimpedanz im Knoten f
- Z_{ii} Kurzschlussimpedanz im Knoten i
- Z_{11} Kurzschlussimpedanz an der Sammelschiene

Die meisten Mittelspannungsnetze sind als Strahlennetze und damit schutztechnisch sehr einfach aufgebaut, wobei nur die Abzweige in den Umspannwerken mit Leistungsschaltern ausgestattet werden. In diesen Netzen führen Fehler im betroffenen Abzweig zu dessen Abschaltung und damit zu einer Spannungsunterbrechung. Das bedeutet für die Fälle b und c, dass es im Beobachtungspunkt i zu einer Spannungsunterbrechung kommt und das Ereignis als Versorgungsunterbrechung und nicht als Spannungseinbruch gewertet wird. Für Fall a folgt aus (2.7), (3.4) und (3.5).

$$\Delta \underline{U}_i = \underline{Z}_{if} \cdot \Delta \underline{I}_f = \underline{Z}_{if} \cdot \frac{\underline{U}_L}{\underline{Z}_{ff}} \stackrel{\text{für Fall a}}{=} \underline{Z}_{11} \cdot \frac{\underline{U}_L}{\underline{Z}_{ff}} \quad (3.8)$$

Das heißt, das der in einem beliebigen Knoten i beobachtete Spannungseinbruch ΔU_i unabhängig vom Beobachtungsort ist und nur durch das für alle Beobachtungspunkte konstante Verhältnis von Kurzschlussimpedanz im Umspannwerk zu Kurzschlussimpedanz am Fehlerort bestimmt wird. In diesem Fall lässt sich mit einer einzigen Power-Quality-Messstation im Umspannwerk, dass neben den analogen Größen (Spannung, Strom) auch digitale Eingangssignale (Schalterstellungen, Schutzrelaismeldungen, ...) verarbeiten kann, die komplette Spannungseinbruchscharakteristik des Netzes erfassen.

Weiters können mit Hilfe einer hinterlegten Kundendatenbank und der Registrierung der Schalterstellungen näherungsweise die Zuverlässigkeitskenngrößen SAIFI und SAIDI zur Beschreibung der Versorgungszuverlässigkeit ermittelt werden.

Stufenweise Wiederversorgungen können allerdings mit diesem System nicht automatisch richtig erfasst werden, hier ist eine im Allgemeinen manuelle Nacharbeit unter Einbeziehung von Informationen aus dem Leitsystem oder aus manuell geführten Schaltprotokollen erforderlich.

3.2 Korrelation und Regression

Durch Regressions- und Korrelationsanalysen lassen sich Netzknoten mit ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich der gemessenen, oder über fiktive Störstromzeitreihen berechneten, Spannungsqualitätsparameter identifizieren und damit die Anzahl der notwendigen Messorte reduzieren.

3.2.1 Korrelation

Die Korrelationsanalyse stellt fest, ob es zwischen zwei Variablen einen erkennbaren, linearen Zusammenhang gibt. Für einen Korrelationskoeffizienten $r_{xy} = 1$ liegen die Werte der Variablen x und y exakt auf einer Geraden, für einen Korrelationskoeffizienten $r_{xy} = 0$ liegt kein erkennbarer Zusammenhang der Variablen vor. Im Folgenden wurde als Grenzwert für gute Korrelation beispielhaft ein Korrelationskoeffizient $r_{xy} > 0,8$ gewählt.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

3.2.2 Regression

Die Regressionsanalyse bestimmt den Einfluss einer Variablen x auf eine Variable y . Die allgemeine Regressionsgleichung

$$y = a_0 + a_1 \cdot x \quad (3.2)$$

stellt den analytischen Zusammenhang zwischen den Variablen her, die entstehende Gerade passt sich den Messpunkten optimal an. Regressionskoeffizienten von $a_1 = 1$ und $a_0 = 0$ ($y = x$) lassen auf ein identisches Verhalten der Messwerte schließen. Die Koeffizienten von a_0 sind für die Auswertung nicht erforderlich, und für a_1 wurden in den folgenden Auswertungen beispielhaft folgende Grenzen gewählt:

$$0,8 < a_1 < \frac{1}{0,8} \quad (3.3)$$

Ausgangspunkt für die Korrelations- und Regressionsanalysen sind die berechneten Zeitreihen der Qualitätsparameter in den einzelnen Umspannwerken bzw. Stationen. Die Analysen werden für alle Messreihenkombinationen durchgeführt. Graphisch lassen sich die Ergebnisse in einer Matrix entsprechend Abbildung 3-4 darstellen. Wenn der Regressionskoeffizient bzw. der Korrelationskoeffizient einer Variablenkombination einen guten Zusammenhang erkennen lässt ($r_{xy} > 0,8$ und $0,8 < a_1 < 1,25$) wird das entsprechende Matrixelement gekennzeichnet. Die Hauptdiagonale enthält die Autokorrelationskoeffizienten und Autoregressionskoeffizienten und ist immer besetzt.

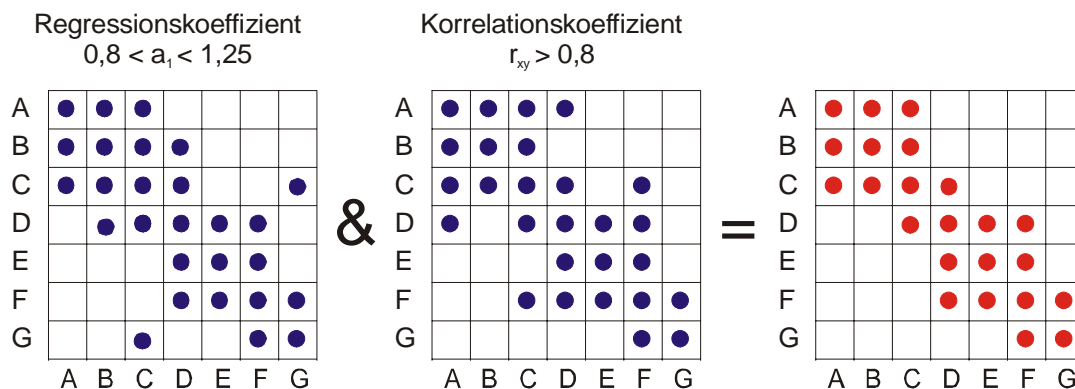


Abbildung 3-4 Graphische Darstellung der Korrelations- und Regressionsanalyse

A,B,C,... Netznoten (Umspannwerke, Netzstationen,..)

3.3 Automatische Messknotenbestimmung

Als Ausgangspunkt für die Messknotenbestimmung dient die Ergebnismatrix aus der Korrelations- Regressionsanalyse (3.1) für Oberschwingungen, Flicker und Spannungseinbrüche. Bei einem Netz mit z.B. 7 Knoten könnte dieses Ergebnis die Form, wie in Abbildung 3-5 dargestellt, haben. Jene Knoten, mit den meisten Einträgen in einer Zeile werden zuerst als Messknoten verwendet. Das ist in diesem Fall Knoten F mit 4 Einträgen. Im Fall, dass mehrere Knoten mit gleich vielen Einträgen vorhanden sind, wird ein beliebiger dieser Knoten als Messknoten verwendet. Das Verhalten der Knoten D, E, F und G kann also in Knoten F gemessen werden. Zur Bestimmung des nächsten Messknotens wird die Ergebnismatrix um diese 4 Knoten (D, E, F, G) reduziert, und das gleiche Verfahren wiederholt. In diesem Fall existieren 3 Knoten mit jeweils 3 identischen Einträgen, folglich ist es gleichgültig, in welchen dieser 3 Knoten gemessen wird. In jedem Fall wird das Verhalten der Knoten A, B und C registriert. Wird die Ergebnismatrix nun um die 3 Knoten (A, B, C) reduziert, bleibt kein weiterer Knoten übrig, und das Messknotenbestimmungsverfahren ist beendet.

A	•	•	•				
B	•	•	•				
C	•	•	•				
D				•	•	•	
E				•	•	•	
F				•	•	•	•
G						•	•
	A	B	C	D	E	F	G

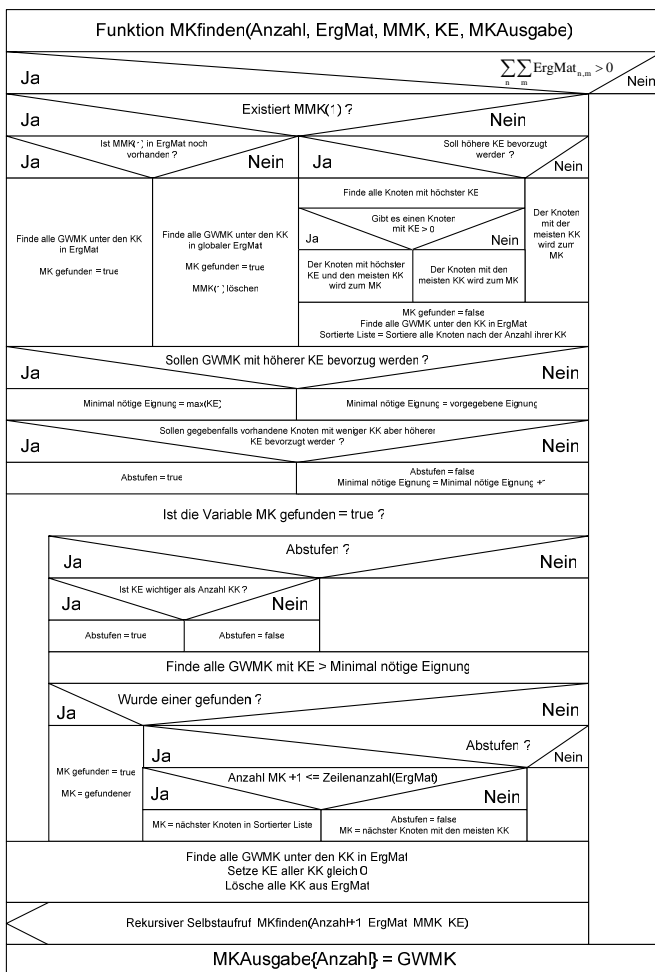
Abbildung 3-5 Ergebnismatrix

A	•	•	•
B	•	•	•
C	•	•	•
	A	B	C

Abbildung 3-6 reduzierte Ergebnismatrix

Um die Verteilung der Messstationen möglichst ökonomisch zu gestalten, wird jeder Station, abhängig von ihrer Ausstattung (Spannungswandler, Leistungsschalter, ...), Lage und Datenanbindungsmöglichkeiten, eine Knoten-Eignungszahl (KE) zugewiesen, so dass Stationen bei der Messknotenbestimmung bevorzugt ausgewählt werden können. Zusätzlich wurde die Möglichkeit zur manuellen Messknotenauswahl implementiert.

Die Funktion, mit welcher eine solche Messknotenbestimmung durchgeführt werden kann, ist in Form eines Struktogramms in Abbildung 3-7 dargestellt.



- ErgMat** Ergebnismatrix
- MMK** Liste manuell gewählter Messknoten
- MK** Messknoten
- KK** alle mit einem Knoten korrelierende Knoten
- GWMK** gleichwertige Messknoten (Knoten ,deren KK identisch mit den KK des Messknotens sind)
- KE** Knoteneignung (Liste, welche die Eignung einer Station zur Messstation als Zahl ausdrückt, z.B. Stationen mit Spannungswandlern = 4)
- MKAusgabe** Liste der ermittelten GWMK pro Cluster

Abbildung 3-7 Funktion zur Messknotenbestimmung

4 Anwendung auf Beispielnetz und Diskussion der Ergebnisse

Für die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Ermittlung der optimalen Messstandorte wurde ein typisches, auf einem realen 30-kV-Mittelspannungsnetz basierendes Beispielnetz gewählt (siehe Anhang 8.1). Das Netz hat eine Gesamtleitungslänge von 170 km bei einem Verkabelungsgrad von 11 %. Es besitzt 200 Stationen, wobei an 4 Knoten Generatoren mit einer Gesamtleistung von 1,4 MW einspeisen. Bei einer Gesamtverbraucherleistung von 4,3 MW und 50 kW Mittelspannungs-Netzverluste beträgt die vom übergeordneten Netz bezogene Leistung 2,95 MW.

Folgende Einflüsse wurden untersucht:

- Spannungsqualitätsparameter
- Modell für die Störquellengenerierung
- Einfluss dezentraler Erzeugung
- Einfluss von Oberschwingungsfiltren
- Vorbelastung aus übergeordneten oder parallelen Netzen

In den folgenden Auswertungen wird immer davon ausgegangen, dass im Umspannwerk ein Messstelle installiert wird, da sich das Umspannwerk auf Grund seiner zentralen Lage und der dort bereits vorhandenen Spannungswandler und der meist vorhandenen Kommunikationsinfrastruktur sehr gut als Messstation eignet.

Geeignete Messstandorte im Mittelspannungsnetz sind in den folgenden Abbildungen rechteckig, die von diesen Messstellen erfassten Knoten rund und in gleicher Farbe dargestellt. Wenn es zu Überlappungen kommt, werden die weiteren Messcluster in der entsprechenden Clusterfarbe kleiner und ebenfalls rund dargestellt. Das Vorhandensein mehrerer Messstandorte (Rechtecke) gleicher Farbe bedeutet, dass es sich um gleichwertige Standorte handelt, wobei nur jeweils einer dieser Standorte benötigt wird.

Strichlierte Verbindungen in den Abbildungen weisen auf offene Netztrennstellen hin.

4.1 Oberschwingungen

4.1.1 Zufällig generierte Oberschwingungsquellen

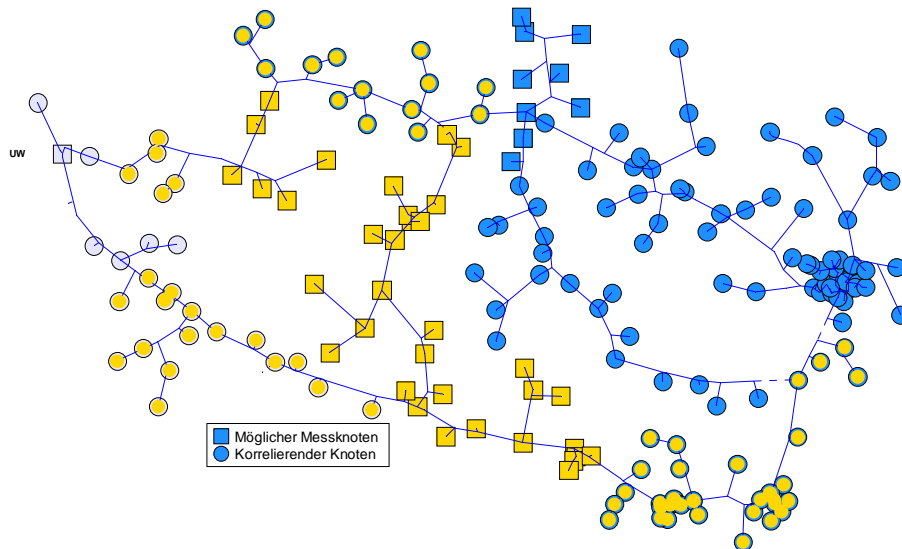


Abbildung 4-1 Segmentierung nach der 5. Oberschwingung mit Zufallsströmen

Bei dieser Untersuchung zeigt sich, dass bei fixer Vorgabe des Umspannwerks als Messstandort 3 Messstandorte benötigt werden. Verzichtet man auf den Standort im Umspannwerk, der sich allerdings aufgrund der vorhandenen Infrastruktur meist anbietet, könnte die Messung der Oberschwingungsbelastung durch lediglich 2 Messstationen erfolgen.

4.1.2 Spezifische Oberschwingungszeitreihen

Zur Klärung der Frage, ob man über die Kategorie der Oberschwingungsstörer und deren Verteilung im Netz Bescheid wissen muss, dient ein Vergleich von Abbildung 4-1 mit Abbildung 4-2.

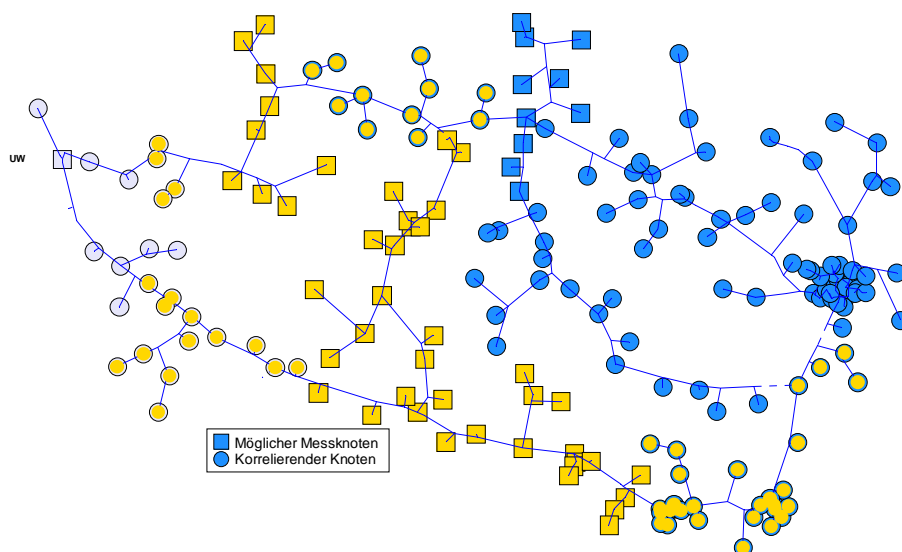


Abbildung 4-2 Segmentierung nach der 5. und 7. Oberschwingung mit spezifischen Oberschwingungszeitreihen

Da die Clusterung in diesen Ergebnissen fast identisch ist, kann festgestellt werden, dass es zur Ermittlung der Anzahl und Standorte von PQ-Messstellen nicht erforderlich ist, mit last-spezifischen Oberschwingungszeitreihen zu rechnen. Es ist daher auch nicht nötig, die Laststruktur im Verteilnetz zu erfassen.

Da die Daten über die Lasttypaufteilung, für dieses Beispielnetz bereits zur Verfügung standen werden die folgenden Untersuchungen jedoch weiterhin mit lastspezifischen Oberschwingungszeitreihen durchgeführt.

4.1.3 Einfluss der Oberschwingungsordnung

In Abbildung 4-2 wurde bereits die Clusterung bei der 5. und 7. Oberschwingung in einer Abbildung dargestellt, da die Ergebnisse identisch sind. Es stellt sich die Frage, welche Segmentierung sich bei weiter steigender Oberschwingungsordnung ergibt. Da bei diesen Simulationen keine Störungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen angenommen werden, muss nicht berücksichtigt werden, dass Oberschwingungen höherer Ordnung kleinere Amplituden aufweisen als z.B. die 5. Oberschwingung. Die Berücksichtigung von Störungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen wird in (4.1.6) abgehandelt.

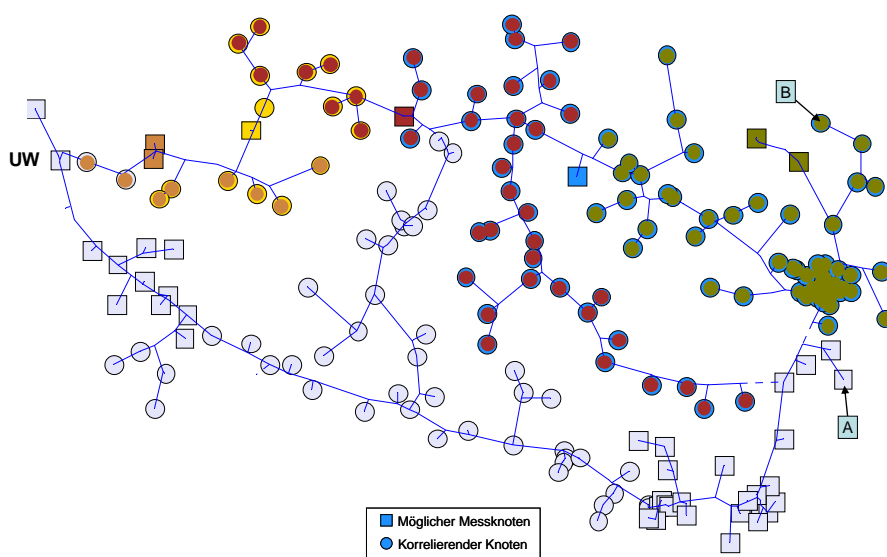


Abbildung 4-3 Segmentierung nach der 11. Oberschwingung mit spezifischen Oberschwingungszeitreihen

Es ist zu erkennen, dass die Segmentierung mit steigender Oberschwingungsordnung zunimmt. Ausschlaggebend für die zunehmende Segmentierung mit steigender Oberschwingungsordnung ist das frequenzabhängige Verhalten der einzelnen Knotenimpedanzen. In Abbildung 4-4 bis Abbildung 4-5 ist der Frequenzgang der Netzimpedanz einiger Knoten des untersuchten Netzes dargestellt.

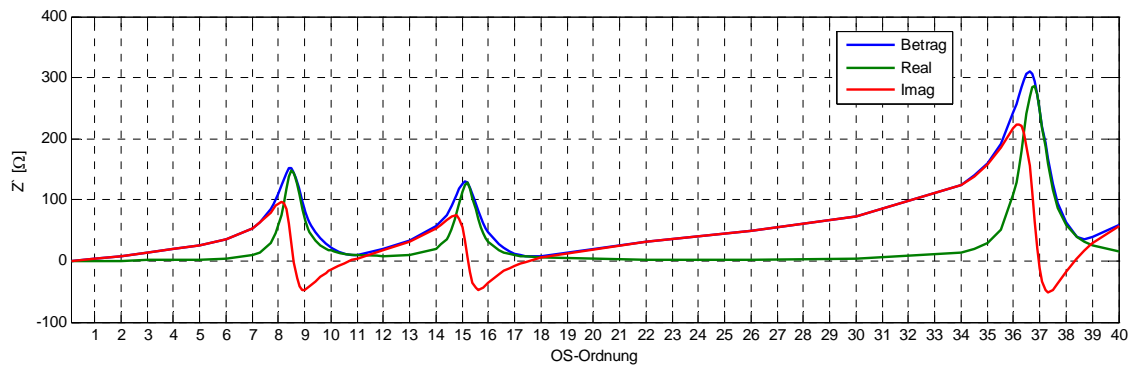


Abbildung 4-4 Frequenzgang der Netzimpedanz im Umspannwerk

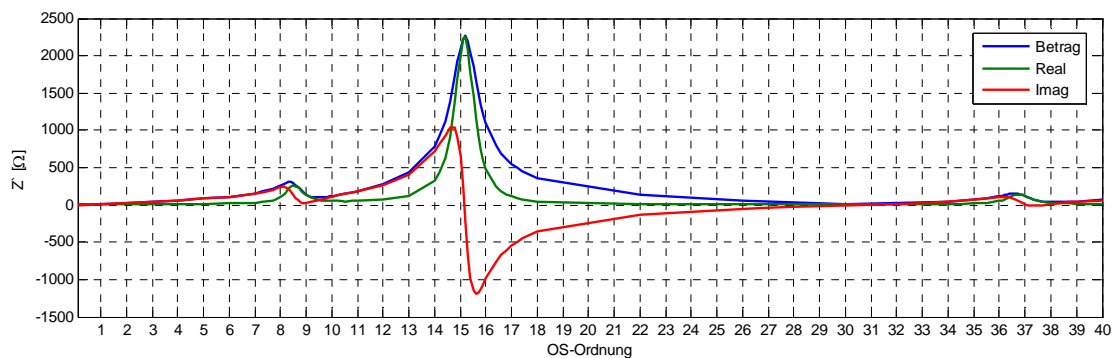


Abbildung 4-5 Frequenzgang der Netzimpedanz am Ende des unteren Netzausläufers A

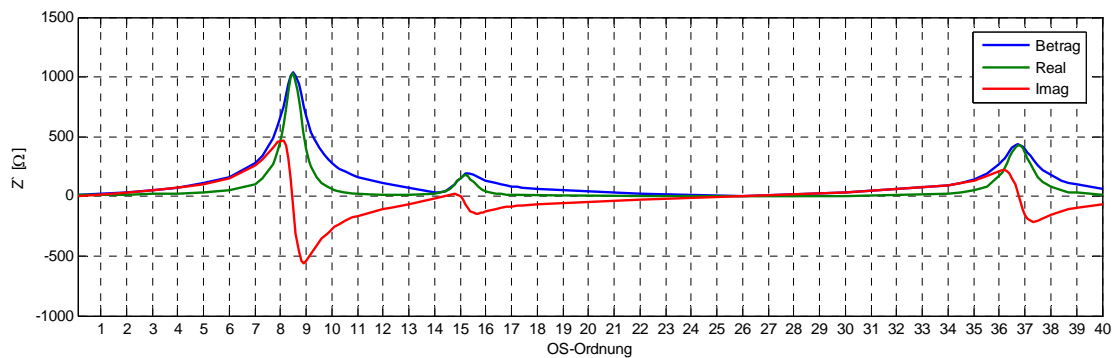


Abbildung 4-6 Frequenzgang der Netzimpedanz am Ende des oberen Netzausläufers B

Auf Grund dieser unterschiedlichen Frequenzgänge kommt es im Netz örtlich zu unterschiedlichen Resonanzstellen.

4.1.4 Einfluss von Oberschwingungsfiltern

Allfällige Oberschwingungsfilter im Netz können den Frequenzgang, und somit unter Umständen auch das Segmentierungsergebnis beeinflussen. Um die Auswirkung eines solchen Filters auf die Segmentierung zu visualisieren, wurde das Beispielnetz mit zwei Saugkreisfilter für die 5. Oberschwingung bestückt und die Ergebnisse in Abbildung 4-7 dargestellt.

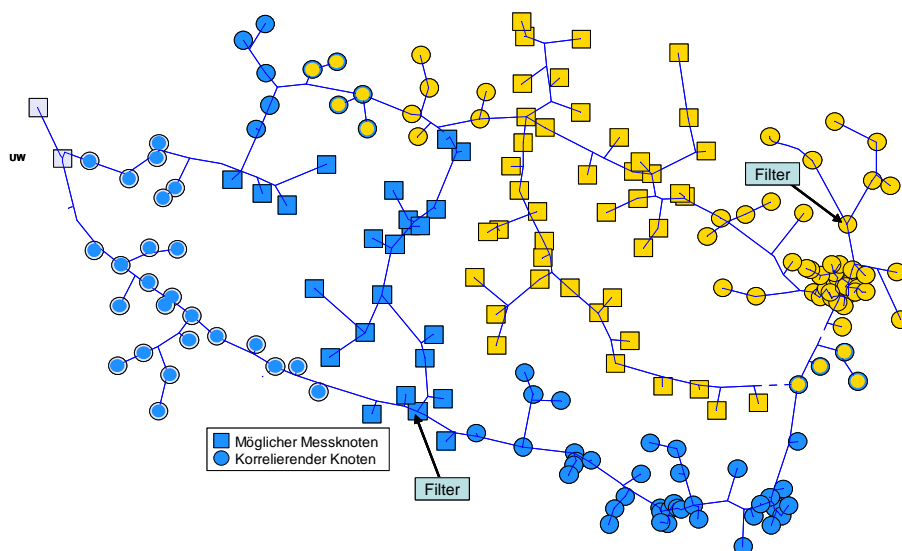


Abbildung 4-7 Segmentierung nach der 5. Oberschwingung mit zwei Oberschwingungsfilter

Ein Vergleich von Abbildung 4-1 (Segmentierung bei 5. Oberschwingung ohne Filter) mit Abbildung 4-7 macht ersichtlich, dass der Einfluss von Filtern keinen relevanten Einfluss auf die Messknotenwahl hat. Erst bei unrealistisch hoher Grundschwingungsleistung der Filter in der Größenordnung eines Vielfachen der typischen Verbraucherleistung ist ein relevanter Einfluss bemerkbar.

4.1.5 Last und Generatorimpedanzen

Bei den bisherigen Untersuchungen wurden in der Admittanzmatrix neben den Leitungsimpedanzen und der Kurzschlussimpedanz des Umspannwerks auch die Impedanzen der Generatoren und Lasten berücksichtigt. Dadurch können sich die eingepprägten Störströme auch über Last- und Generatorimpedanzen schließen. Der Unterschied, der sich bei Vernachlässigung der Last- und Generatorimpedanzen ergibt, wird in Abbildung 4-8 aufgezeigt werden.

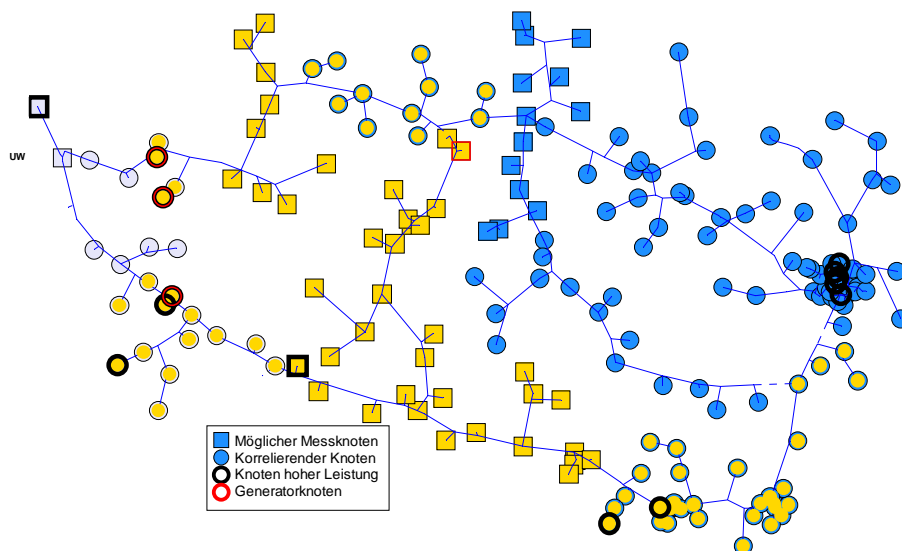


Abbildung 4-8 Segmentierung nach der 5. Oberschwingung ohne Berücksichtigung der Last- und Generatorimpedanzen

Da die Last-, bzw. die Generatorimpedanzen des Beispielnetzes nach Abbildung 4-8 kaum Einfluss auf das Ergebnis haben, wurden weitere Untersuchungen mit bedeutend höheren Generatorleistungen durchgeführt. Dabei ergab sich, dass erst subtransiente Generatorkurzschlussleistungen in der Größenordnung der subtransienten Kurzschlussleistung am Umspannwerk die Bestimmung der Messknotenlage beeinflussen können. Dadurch ist auch hier die Information über die Art und Größe der Lasten (Generatoren) in den einzelnen Knoten nicht erforderlich, und das bedeutet eine wesentliche Vereinfachung bei der Bestimmung der nötigen PQ-Messstellen.

4.1.6 Störungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen

Um den Einfluss der Oberschwingungsvorbelastung aus übergeordneten oder parallelen Netzen auf die Segmentierung zu ermitteln, wird angenommen, dass der Oberschwingungsspannungsanteil übergeordneter oder paralleler Netze an der Sammelschiene maximal gleich groß ist wie der im Verteilnetz erzeugte. Die simulierten Oberschwingungsströme in den Stationen bewirken einen Spannungsverlauf an der Sammelschiene des Umspannwerks welcher, in Abbildung 4-9 dargestellt ist.

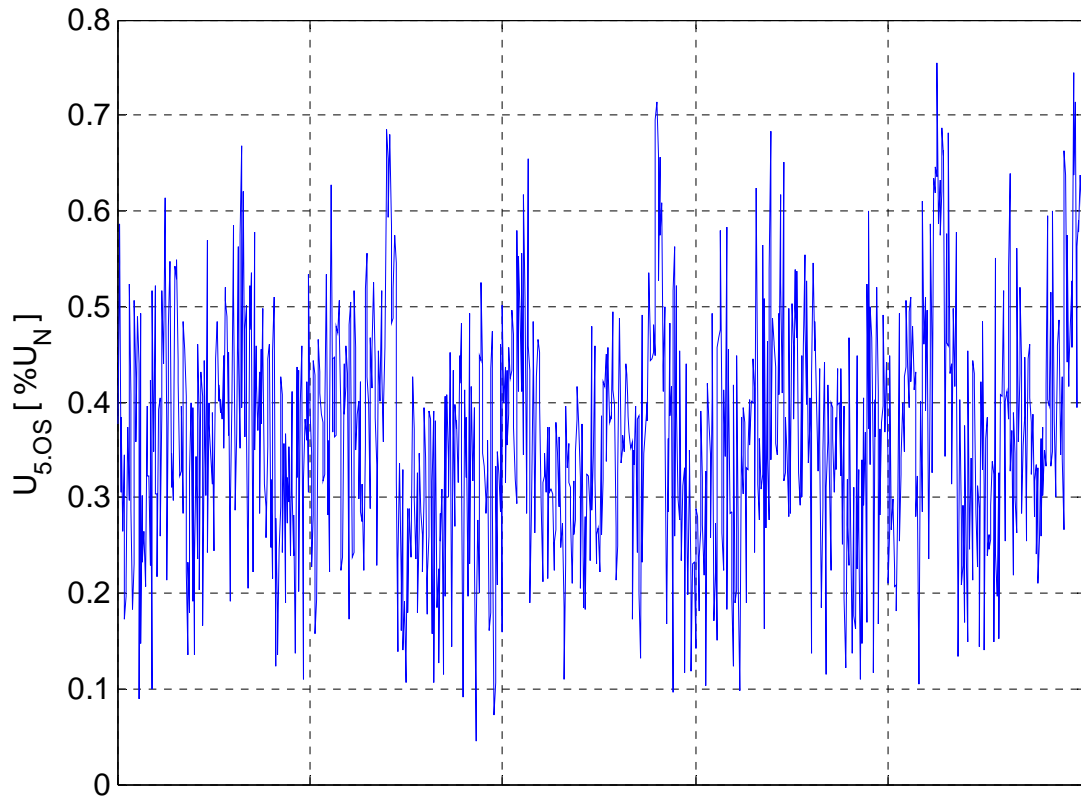


Abbildung 4-9 Verlauf der im Netz erzeugten 5.Oberschwingungsspannungen am Umspannwerk

Die höchsten Oberschwingungsspannungspegel betragen etwa 0,8 % der Nennspannung. Es wird in Folge untersucht, wie sich Oberschwingungsvorbelastungen aus übergeordneten oder parallelen Netzen mit 0,5 %, 0,75 % und 1 % der Nennspannung auf die Anzahl der benötigten Messstellen auswirken.

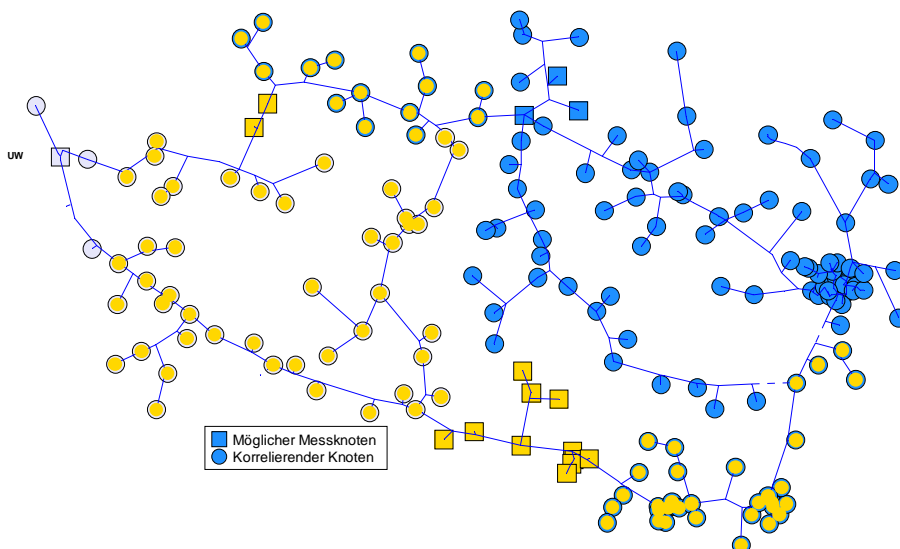


Abbildung 4-10 Segmentierung bei 5. Oberschwingung mit zusätzlich 0,5 % Oberschwingungsspannung am Umspannwerk

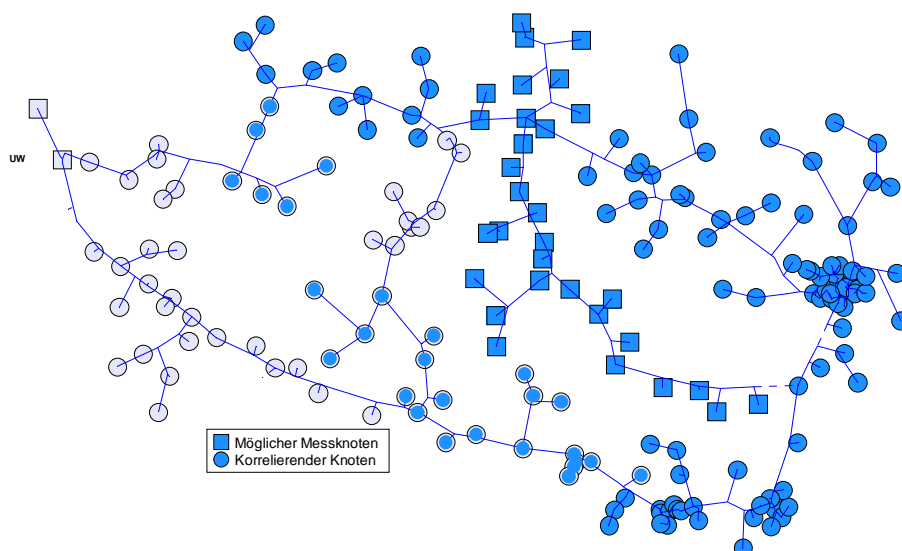


Abbildung 4-11 Segmentierung bei 5. Oberschwingung mit zusätzlich 0,75 % Oberschwingungsspannung am Umspannwerk

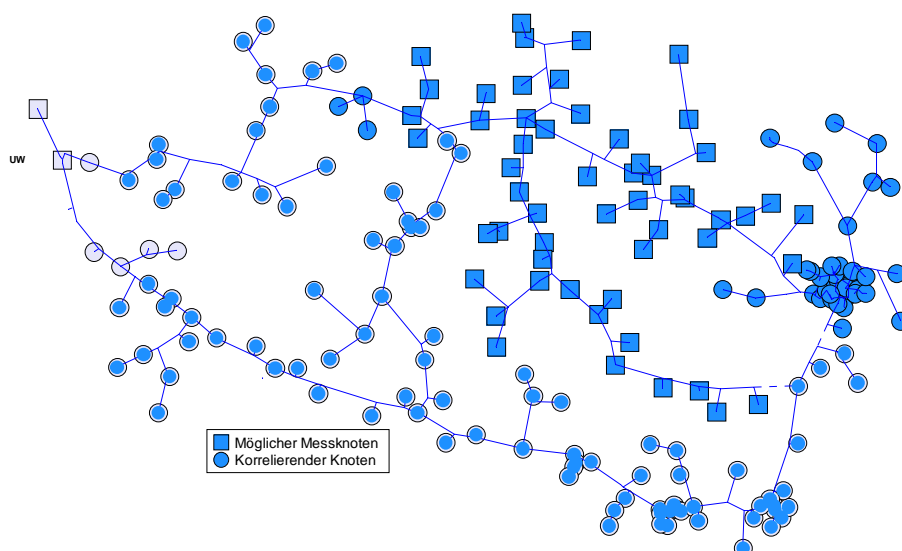


Abbildung 4-12 Segmentierung bei 5. Oberschwingung mit zusätzlich 1 % Oberschwingungsspannung am Umspannwerk

Es ist ein sehr starker Einfluss der übergeordneten oder parallelen Netze auf die Clusterung zu erkennen. Würde die Oberschwingungsvorbelastung in übergeordneten, oder parallelen Netzen in der gleichen Größenordnung liegen (hier $\sim 0,8 \% U_N$), wie Oberschwingungsspannung, die durch die Summe der Störströme an der Sammelschiene auftreten, so wäre eine einzige Messstelle zur Erfassung der Oberschwingungsbelastung im Verteilnetz ausreichend.

4.1.7 Ergebnisse bei Oberschwingungsstörungen

Die Untersuchungen ergaben, dass zur Erfassung der Oberschwingungsbelastung in einem Verteilnetz von allen Netzdaten nur die Systemadmittanzmatrix (Leitungs- und Transforma-

tordaten) benötigt wird. Die Lage, Amplitude und der Phasenwinkel der Störquellen darf im Allgemeinen gleichmäßig im Netz verteilt angenommen werden, ohne dass sich die Messstellenverteilung verändert. Ebenso kann der Einfluss von Lasten, Generatoren und Oberschwingungsfiltern vernachlässigt werden.

Ein hoher Einfluss übergeordneter oder paralleler Netze homogenisiert die Oberschwingungsbelastung in den Verteilnetzen, wodurch unter Umständen eine Messstelle am Umspannwerk ausreichend ist.

Die Segmentierung, die aus den Oberschwingungsströmen hervorgeht, ist meist nicht sehr stark ausgeprägt, nimmt aber mit höherer Oberschwingungsordnung zu.

4.2 Flicker

4.2.1 Zufällig generierte Flickerströme

Um korrelierende Flickerzonen in einem Netz bestimmen zu können, werden vorerst zufällig generierte, gleichmäßig im Netz verteilte Flickerquellen simuliert, deren Störströme die Werte 0..1 p.u. annehmen.

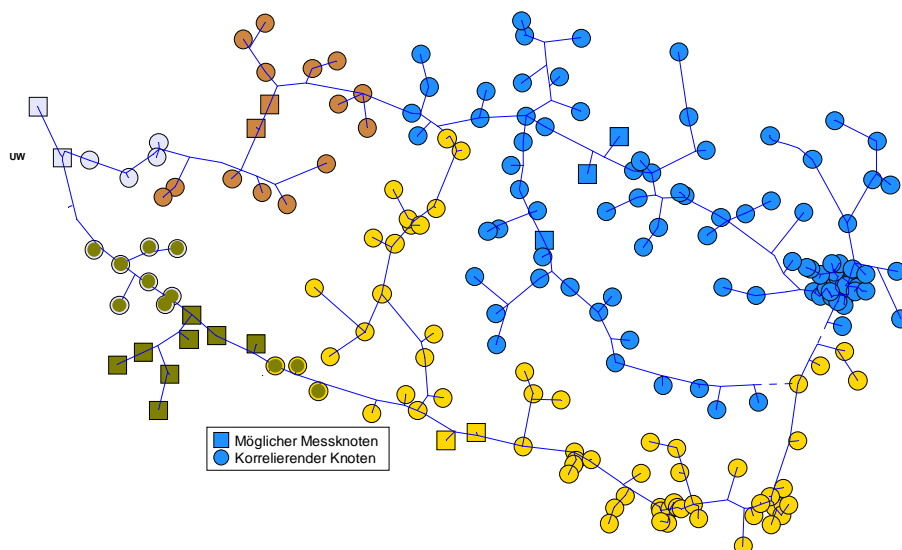


Abbildung 4-13 Segmentierung nach 0..1 p.u. Zufallsflicker

Dieses Ergebnis gilt für gleichmäßig im Netz verteilte Flickerquellen. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der nötigen PQ-Messstellen zur Flickererfassung höher ist, als jene zur Erfassung der Oberschwingungsbelastung.

4.2.2 Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen

Da Lasten höherer Leistung auch höhere Leistungsänderungen aufweisen können, wird festgestellt, ob es zu Änderungen in der Messstellenverteilung kommt, wenn die Flickerintensität proportional zu den Verbraucherleistungen ist.

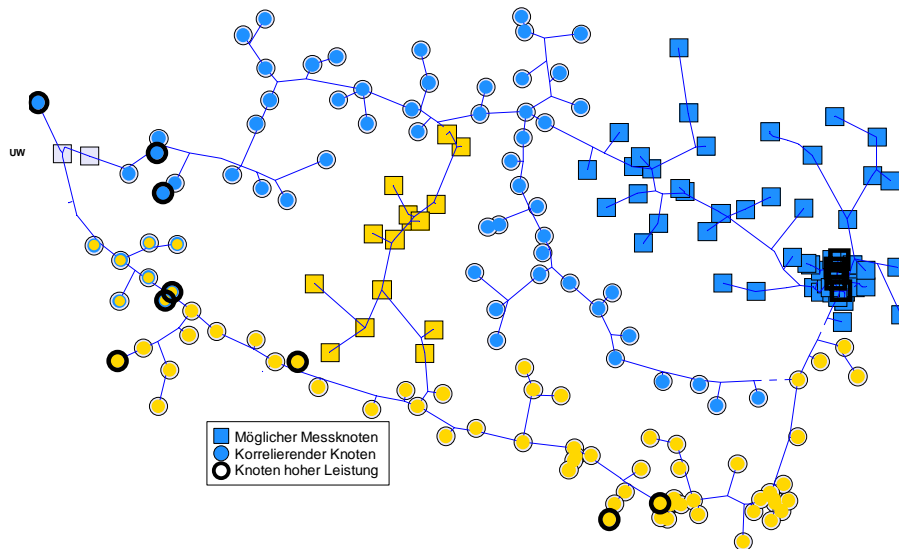


Abbildung 4-14 Segmentierung bei Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen

Durch Annahme von lastproportionalen Flickerquellen kommt es zu einem geringeren Messstellenaufwand als durch die Annahme gleichmäßig verteilter Flickerquellen. Die Messstellenverteilung wird durch einzelne, signifikante Flickerquellen (höchste Verbraucherleistungen) bestimmt. Diese Aufteilung gilt jedoch nur für eine bestimmte Lastsituation. Sollte die signifikante Störquelle außer Betrieb genommen werden, würde sich eine vollkommen andere Verteilung ergeben. Aus diesem Grund erscheint es im Sinne der Erfassungssicherheit zweckmäßiger, die Flickerquellen gleichmäßig im Netz verteilt anzunehmen.

4.2.3 Unterschiedliche Flickerkoeffizienten je Lastkategorie

Führt man nach Kapitel 3.1.2 unterschiedliche Flickerkoeffizienten für jede Lastkategorie ein, so ergibt sich eine etwas größere Segmentierung.

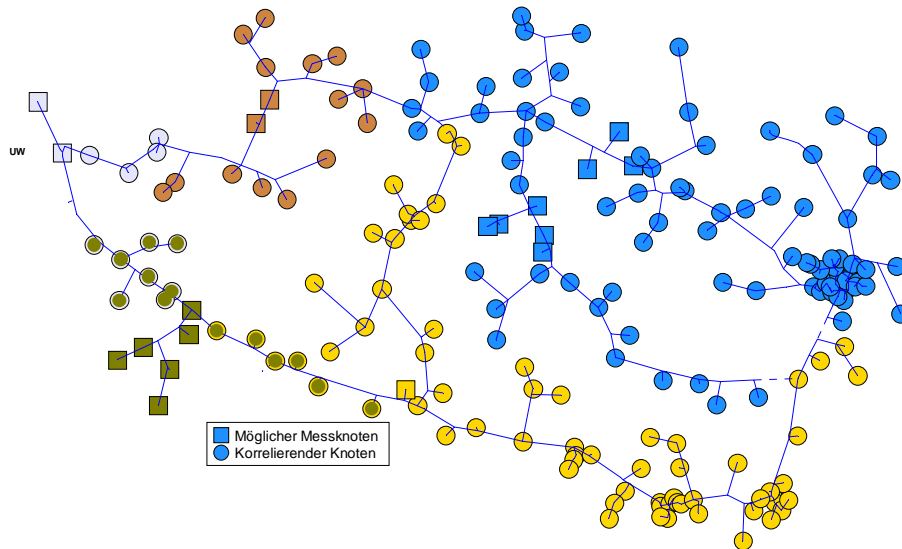


Abbildung 4-15 Segmentierung mit unterschiedlichen Flickerkoeffizienten je Lastkategorie

Das Ergebnis in Abbildung 4-13 ist jenem in Abbildung 4-15 sehr ähnlich. Somit ist der Aufwand, die exakte Lastaufteilung nach Kategorien in allen Knoten zu erfassen, um gewichtete Flickerkoeffizienten zuordnen zu können, nicht erforderlich.

4.2.4 Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen und unterschiedlichen Flickerkoeffizienten je Lastkategorie

Es wird noch untersucht, ob sich durch Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen mit unterschiedlichen Flickerkoeffizienten eine andere Segmentierung ergibt.

Die Abbildung 4-16 stellt eine Auswertung nach Kapitel 4.2.2 als auch nach Kapitel 4.2.3 dar. Diese Kombination führt zur stärksten Segmentierung in Bezug auf flächendeckendes Flickermonitoring.

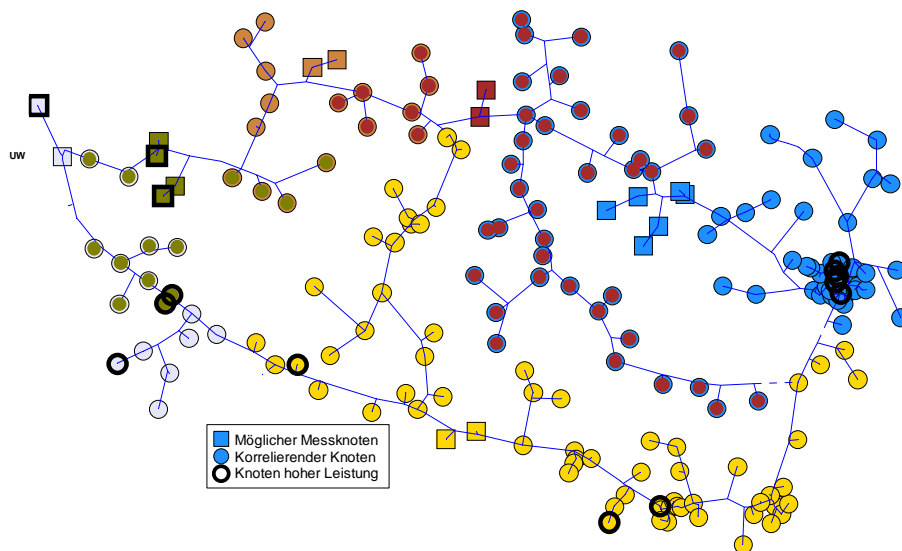


Abbildung 4-16 Berücksichtigung von lastabhängigen Störströmen und von Flickerkoeffizienten je Lastkategorie

Das Ergebnis dieser Simulation weicht nur geringfügig von jener in Abbildung 4-13 ab, und führt durch die Wahl eines minimal niedrigeren Korrelationskoeffizienten zum gleichen Ergebnis. Also ist auch in diesem Fall die Kenntnis über die Lastverteilung nicht notwendig.

4.2.5 Einfluss von Last und Generatorimpedanzen

Die folgende Untersuchung wurde wie in Kap. 4.1.5 ohne Verwendung der Last- bzw. Generatorimpedanzen durchgeführt und soll zeigen, ob bei der Flickerbetrachtung Kenntnis über die einzelnen Verbraucherleistungen bzw. über die einzelnen Generatorleistungen notwendig ist.

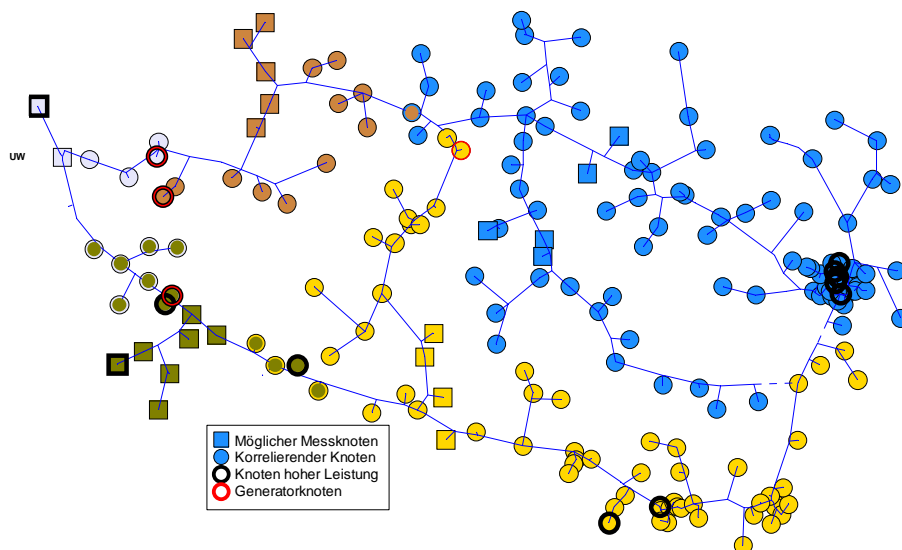


Abbildung 4-17 Segmentierung nach 1 p.u. Zufallsflicker ohne Last- und Generatorimpedanzen

Ein Vergleich zwischen Abbildung 4-13 und Abbildung 4-17 zeigt, dass die Ergebnisse praktisch gleichwertig sind. Folglich ist die Kenntnis über Lasten und Generatoren, wie sich dies schon bei den Oberschwingungsbetrachtungen herausstellte, nicht erforderlich.

4.2.6 Ergebnisse bei Flickerstörungen

Hinsichtlich Flicker ergibt sich eine stärkere Segmentierung des Netzes als bei der Oberschwingungsbetrachtung.

Die Kenntnis über die Leistung der Lasten und Generatoren ist wie schon bei der Oberschwingungsbetrachtung nicht erforderlich. Nur Generatoren mit subtransienten Kurzschlussleistungen in der Größenordnung der subtransienten Kurzschlussleistung am Umspannwerk sind bei der Messknotenbestimmung berücksichtigt werden.

4.3 Spannungseinbrüche (Dips) und Unterbrechungen

Die Untersuchung auf Spannungseinbrüche mit simulierten Kurzschlussströmen zeigte, dass Kurzschlüsse an jeder Station zu einem Dip am Umspannwerk führen. Dies bestätigt den Ansatz aus 3.1.3, wonach eine einzige Messstelle, welche in der Lage ist die Schaltspiele aller Leistungsschalter aufzuzeichnen, ausreichend ist.

4.4 Gesamteinfluss von Last- und Generatorimpedanzen

In Kapitel 4.1.5 und 4.2.5 konnte bereits festgestellt werden, dass der Einfluss von Generator- und Lastimpedanzen vernachlässigbar ist. Folglich ist anzunehmen, dass dies auch bei der Überlagerung aller Ergebnisse der Fall ist. Dies wird hier nochmals durch die sich ergebende, identische Segmentierung in Abbildung 4-18 dargestellt.

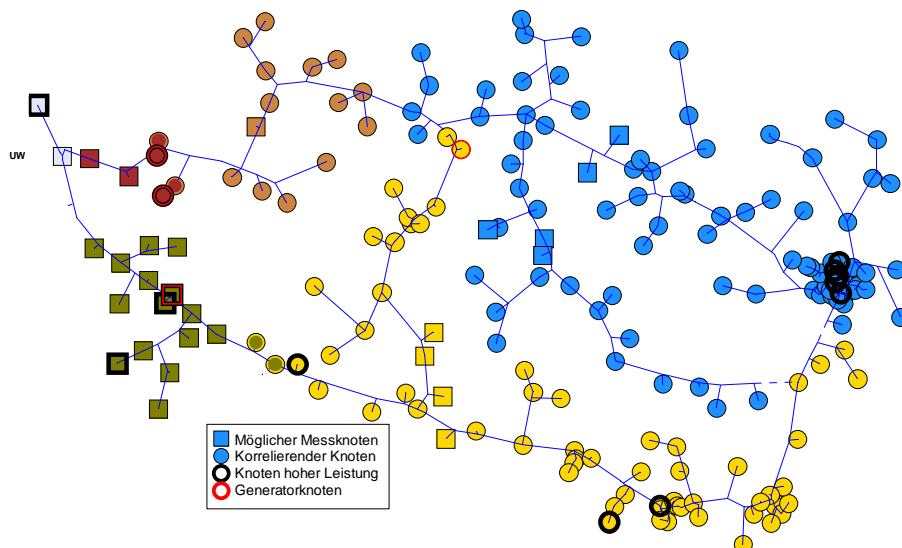


Abbildung 4-18 Segmentierung nach Oberschwingungen und Flicker ohne Last- und Generatorimpedanzen

4.5 Unterschiedliche Schaltzustände

Es ist noch zu beachten, dass sich in offen betriebenen, vermaschten Netzen durch einen anderen Schaltzustand die Clusterungen verändern können. In Abbildung 4-19 wird der linke vertikale Mittelspannungszweig (C) von oben, und der rechte (D) von unten angespeist, wodurch sich eine andere Messstellenaufteilung ergibt. Um ein Netz in jedem Schaltzustand vollkommen überwachen zu können, ist zu prüfen, ob die gewählten Messstandorte auch in anderen Schaltzuständen des Netzes für eine ausreichende Qualitätsüberwachung geeignet sind.

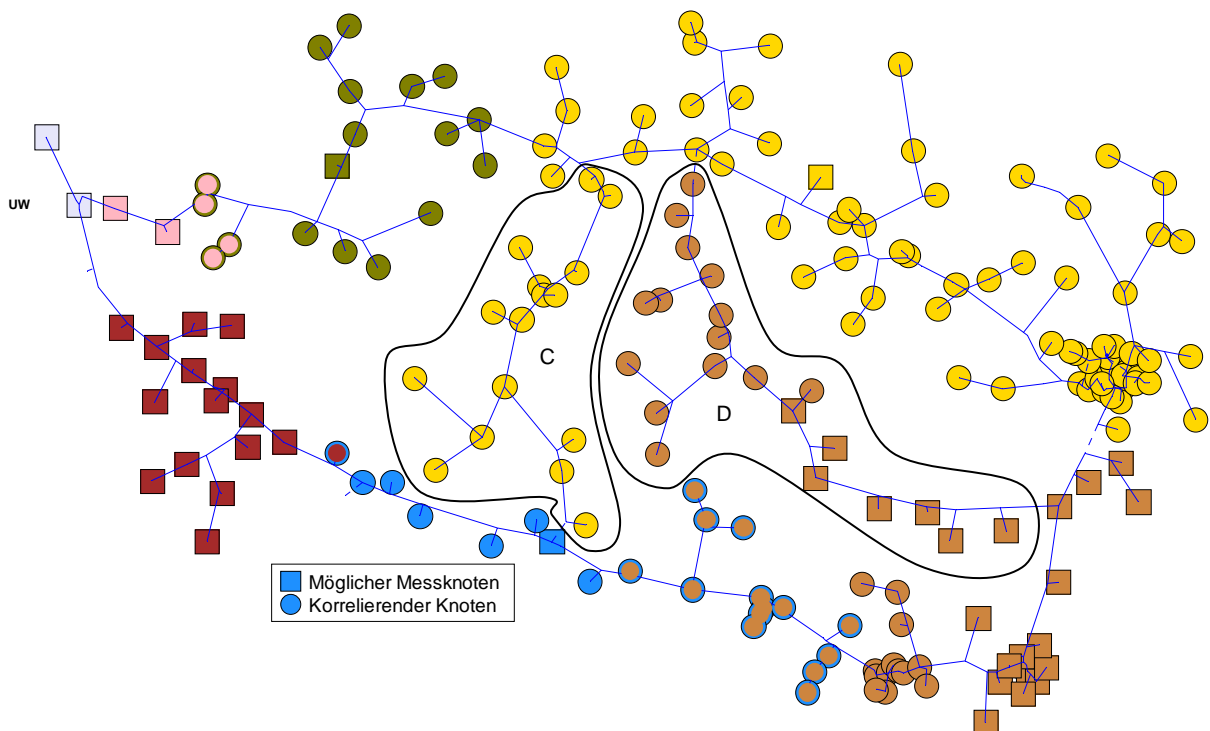


Abbildung 4-19 Segmentierung für einen geänderten Schaltzustand

Ein Vergleich mit Abbildung 4-18 zeigt, dass sich ein geänderter Schaltzustand auf die Wahl der Messstandorte auswirkt.

Wenn ein Netz saisonal in unterschiedlichen Schaltzuständen betrieben wird, ist grundsätzlich auch dieser weitere mögliche Schaltzustand bei der Messstellenberechnung zu berücksichtigen und führt in den meisten Fällen zu ein bis zwei zusätzlichen Messstellen. Revisions-, oder störungsbedingte Umschaltung im Netz, welche nur für kurze Zeit auftreten, sind im Sinne einer ökonomischen Vorgangsweise zu vernachlässigen.

5 Messergebnisse

In einem ländlichen Mittelspannungsnetz wurden im Umspannwerk sowie in zwei weiteren Netzknoten Spannungsqualitätsmessgeräte installiert und zeitgleiche Messungen über einen Zeitraum von ca. 2 Monaten durchgeführt. In weiterer Folge wurden die Korrelations- und Regressionsfaktoren für die drei Messstandorte sowohl für die tatsächlichen Messergebnisse als auch für fiktiv generierte Messreihen ermittelt.

Der Vergleich brachte folgende Ergebnisse:

- Die Anzahl der Messstellen wird, wie theoretisch vorausgesagt, in erster Linie durch den Qualitätsparameter Flicker bestimmt.
- Für Oberschwingungen ergab sich bei der Messung eine bessere Korrelation als bei den fiktiven Messreihen. Hier scheint der Einfluss der Oberschwingungsvorbelastung seitens übergeordneter oder paralleler Netze in der Realität einen größeren Einfluss zu haben, wodurch sich ein geringerer Messstellenaufwand zur Erfassung der Oberschwingungsbelastung ergeben kann. Da der Messstellenaufwand jedoch in erster Linie durch die Flickererfassung bestimmt wird, ist ein Einfluss auf die Anzahl der Messstellen nicht zu erwarten.
- Für Flicker ergeben sich ähnliche Korrelationswerte für reale Messung und fiktive Messreihen. Dies bedeutet, dass die getroffenen Annahmen zur Flickererfassung sehr gut mit der Realität übereinstimmen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Grundsätzliche Ergebnisse

Eine flächendeckende Spannungsqualitätsüberwachung nach EN 50160 ist mit vertretbarem Aufwand für folgende Qualitätsparameter möglich.

- **Spannungshöhe, langsame Spannungsänderungen**
- **Versorgungsunterbrechungen (kurz, lang)**
- **Spannungseinbrüche (Dips)**
- **Schnelle Spannungsänderungen, Flicker**
- **Spannungsunsymmetrien**
- **Oberschwingungen bis zur 9. Harmonischen**
- **Frequenz**

Zur Erfassung von **Oberschwingungsspannungen hoher Ordnung** sowie **transienter Überspannungen** müssten sehr viele Stationen über eine Messstelle verfügen.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen war festzustellen, dass die Anzahl der nötigen Messstellen zur Power-Quality-Überwachung eines Mittelspannungsnetzes in erster Linie durch die **Flickererfassung** bestimmt wird.

Die Anzahl der nötigen Messstellen zur Erfassung von Oberschwingungen wird unter anderem stark durch die Oberschwingungsvorbelastung aus übergeordneten oder parallelen Netzen geprägt (sinkender Messstellenaufwand mit steigender Vorbelastung). Dies konnte auch durch reale Messungen gezeigt werden.

Um die Messstellenverteilung in einem Netz bestimmen zu können benötigt man nur die Systemadmittanzmatrix des Netzes (Leitungs- Transformator Daten) und die Position der Leistungsschalter.

Da es, wie in der Studie durch Vergleich nachgewiesen wurde, nicht unbedingt erforderlich ist, mit lastspezifischen Störströmen zu rechnen, muss auch die Verbraucherstruktur nicht bekannt sein. Ebenso nicht nötig ist die Implementierung von Lastimpedanzen, wodurch die Information über bestimmte Lastzustände nicht benötigt wird.

Allfällige Generatoren müssen erst dann berücksichtigt werden, wenn deren Kurzschlussleistung in der Größenordnung der Kurzschlussleistung des Umspannwerks von durchschnittlich 200 MVA liegen.

6.2 Anzahl der notwendigen Messstellen

Durch die Simulation unterschiedlicher Mittelspannungsnetze ergab sich für die Oberschwings- und Flickeranalyse eine Messstellenabdeckung von 18..60 Stationen pro Messstelle (Abbildung 6-2) oder, auf die Leitungslänge bezogen, etwa 14..40 km pro Messstelle (Abbildung 6-1). Die Dip-Analyse ist nicht abhängig von Knotenanzahl oder Leitungslänge, denn sie wird nur durch die Anzahl der Leistungsschalter bzw. Schutzzonen bestimmt, und kann deshalb ebenso wie die Erfassung der Spannungsunterbrechungen durch Aufzeichnung der Schaltspiele aller Leistungsschalter im Netz bei nur einer vorhandenen Messstelle (z.B. am Umspannwerk) durchgeführt werden.

Die in Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 dargestellten Ergebnissen beziehen sich auf Mittelspannungsnetze mit einem Freileitungsanteil über 50 % (blau) sowie ein reines Mittelspannungskabelnetz (rot). Die Regressionsgerade zur Abschätzung der notwendigen Messstellen in Abhängigkeit von Leitungslänge und Stationsanzahl bezieht sich somit auf Freileitungsnetze. Für reine Kabelnetze kann mit Hilfe des zur Verfügung stehenden Datenmaterials keine Aussage getroffen werden. Tendenziell ist aber zu erwarten, dass die Anzahl der notwendigen Messstellen aufgrund der niedrigeren Kabelimpedanz niedriger als in Freileitungsnetzen liegt.

6.3 Messdauer

Prinzipiell ist anzustreben, die Messstationen dauerhaft zu installieren, um die Spannungsqualität unter saisonal unterschiedlichen Last- und Betriebszuständen erfassen zu können. Weiters ist in diesem Fall der Installationsaufwand nur einmalig zu erbringen. Im Allgemeinen sollten fix installierte Messeinrichtungen über entsprechende Kommunikationswege an einen zentralen Datenserver angeschlossen werden.

Sofern der Netzbetreiber ausreichend über die saisonalen Änderungen im Netz informiert ist, können mobile Messstationen halbjährlich über einen Zeitraum von 4 Wochen zur Datenerfassung installiert werden. Die Auswahl der Zeitfenster hat netzspezifisch so zu erfolgen, dass möglichst unterschiedliche Netzbelastungszuständen gemessen werden. Die dezentral

gespeicherten Messwerte sind nach der Messperiode zu sammeln und auf Spannungsqualität auszuwerten.

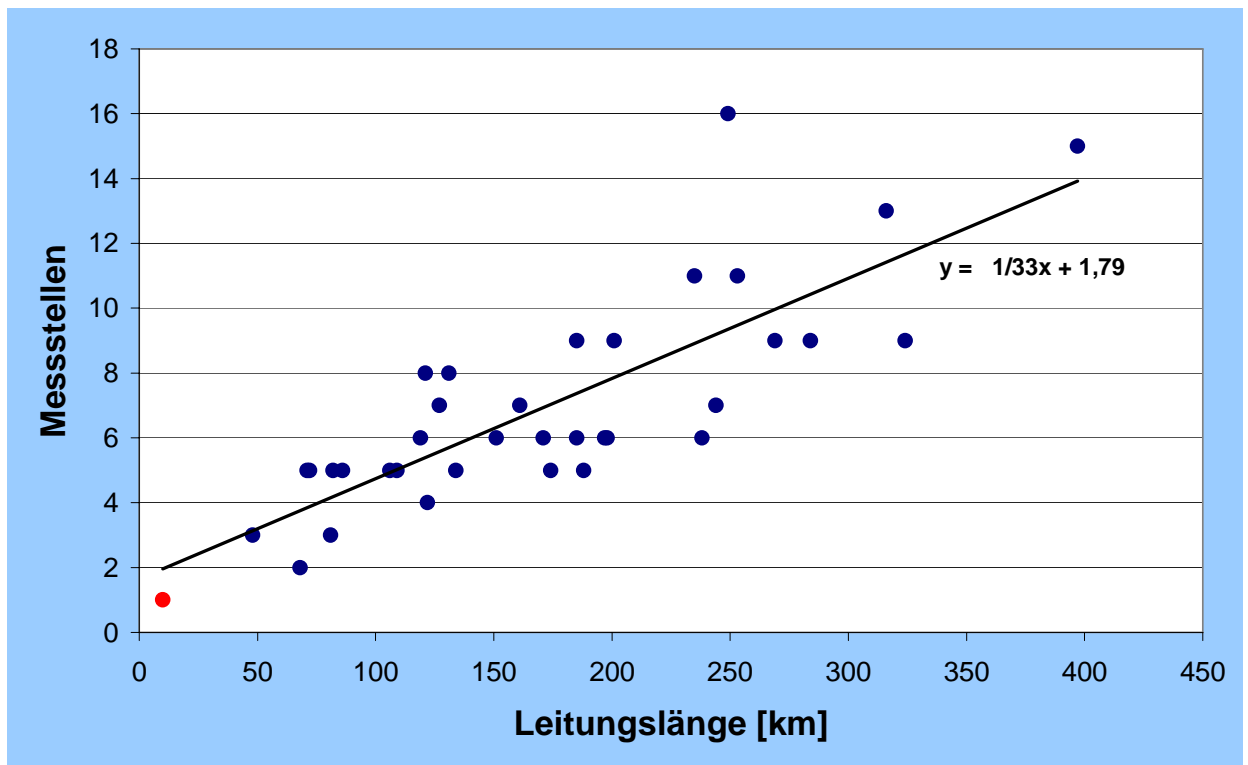


Abbildung 6-1 Messstellen pro km Mittelspannungsleitungslänge eines Mittelspannungsabzweigs

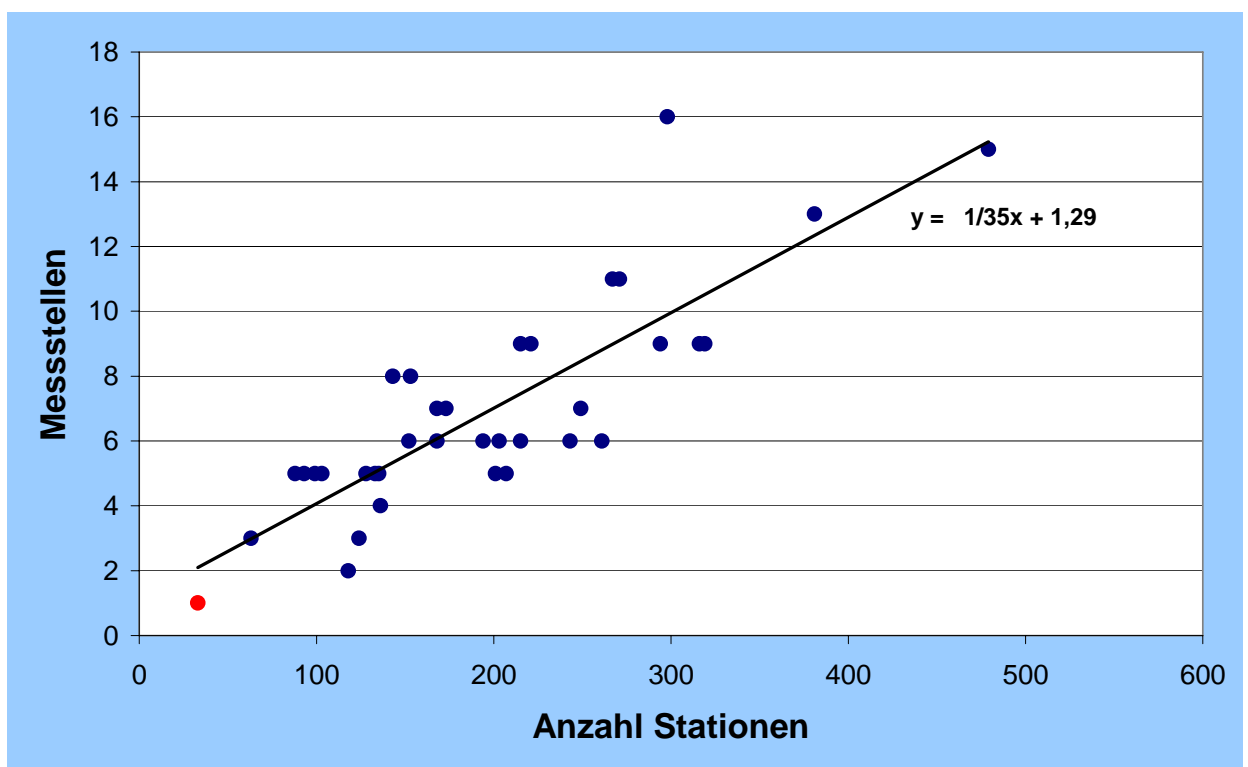


Abbildung 6-2 Messstellen pro Stationen eines Mittelspannungsabzweigs

7 Literaturverzeichnis

- [1] ÖVE EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, 2000
- [2] IEC 60000-4-30, Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods
- [3] A. Haber, Entwicklung und Analyse eines Qualitätsregulierungsmodells für die österreichischen Mittelspannungsnetze, Dissertation an der TU Graz, 2005
- [4] H. Renner, Netztechnische Analysen zur Beurteilung der Spannungsqualität, Habilitationsschrift an der TU Graz, 2002
- [5] C. Ammer, H. Renner, Determination of the Optimum Measuring Positions for Power Quality Monitoring, 11. International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12.-15.9.2004, Lake Placid

8 Anhang

8.1 Netzkonfiguration des Beispielnetzes

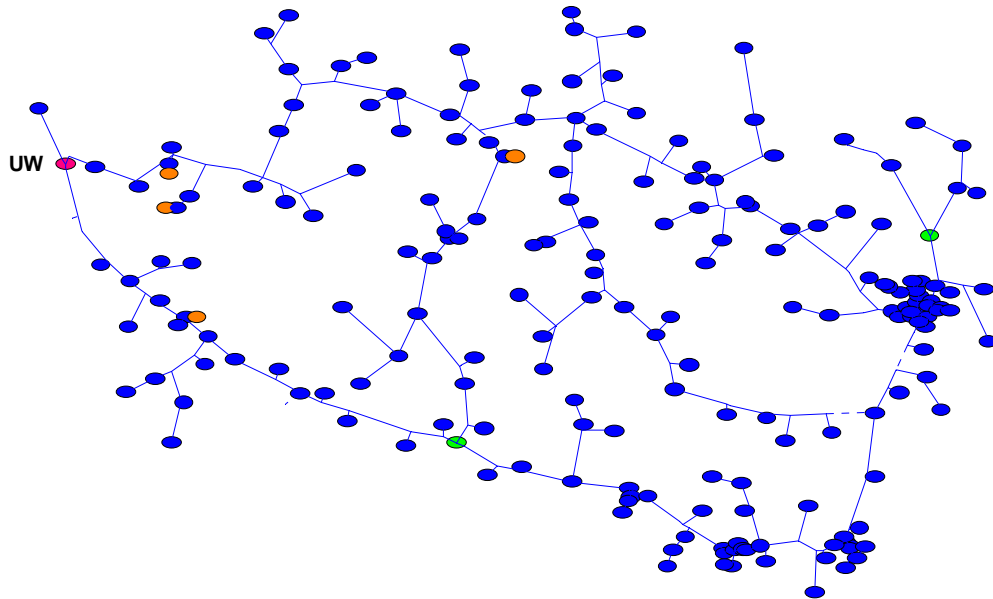


Abbildung 8-1 Netzkonfiguration mit Legende

Legende:

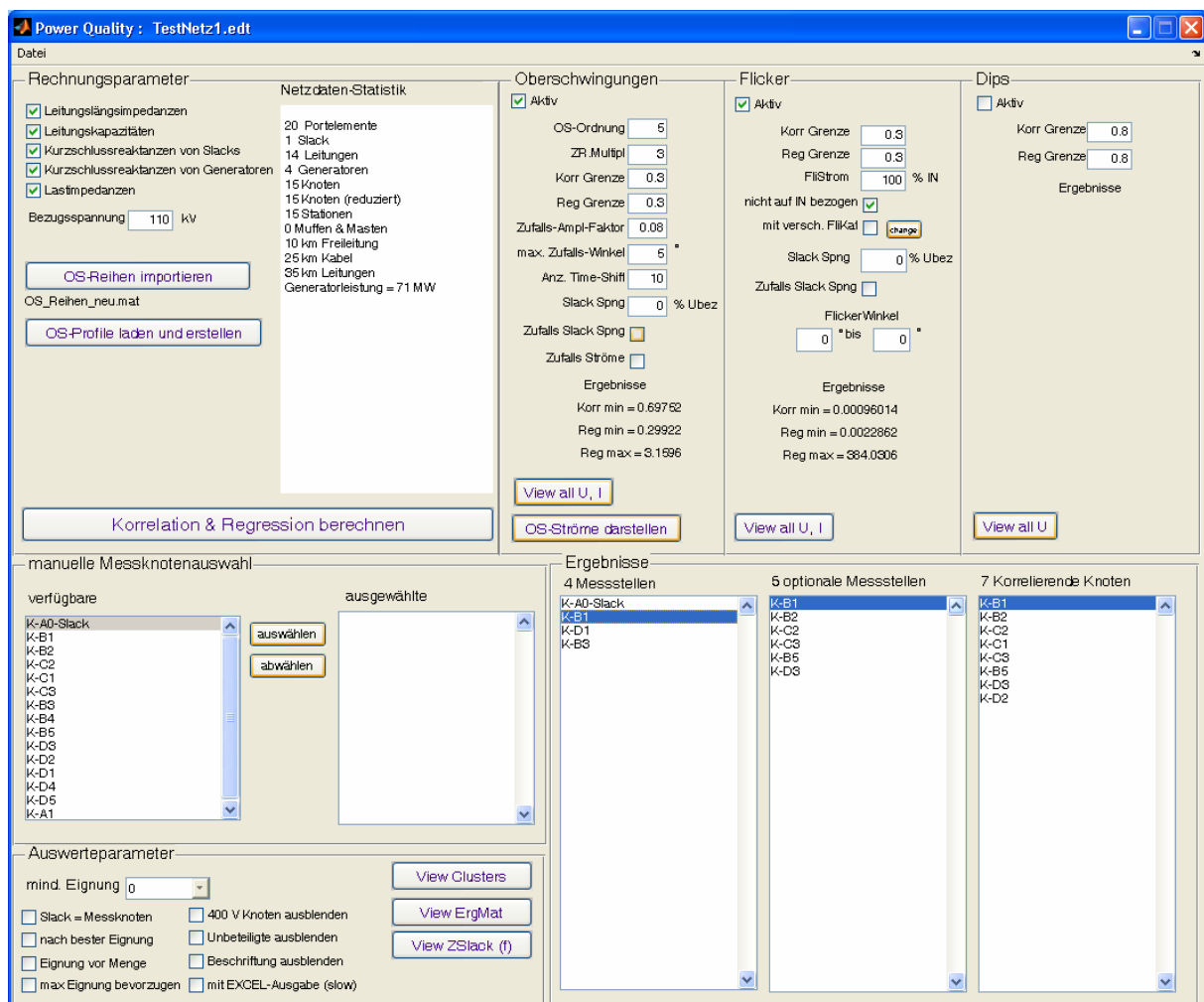
- Umspannwerk
- Generatorknoten
- Filterknoten
- Stationen
- Leitung
- - - abgeschaltete Leitung

8.2 Simulationsoberfläche

Die Berechnungen zur Messknotenoptimierung wurden mit Matlab durchgeführt. Um reale Netze untersuchen zu können, wurde ein Konvertierungsalgorithmus entworfen, der bestehende Netze, die am Institut für Elektrische Anlagen der TU-Graz als Neplan-Files vorliegen, auslesen kann. Zur Visualisierung der Ergebnisse wurde auch die Netztopologie aus den Neplan-Dateien übernommen.

Zur übersichtlichen Steuerung der verschiedenen Berechnungsmethoden und -parameter wurde eine Programmoberfläche erzeugt (Abbildung 8-2), welche sich in 3 Hauptbereiche gliedert:

- 1) Allgemeine Rechnungsparameter
- 2) Spezifische Rechnungsparameter (Oberschwingungen, Flicker, Dip)
- 3) Messknotenbestimmung (automatisch, halbautomatisch)



The screenshot shows the 'Power Quality : TestNetz1.edt' software interface. It is divided into several main sections:

- Rechnungsparameter (Calculation Parameters):** Includes checkboxes for 'Leitungslängsimpedanzen', 'Leitungskapazitäten', 'Kurzschlussreaktanzen von Slacks', 'Kurzschlussreaktanzen von Generatoren', and 'Lastimpedanzen'. A 'Bezugsspannung' (reference voltage) is set to 110 kV. Buttons for 'OS-Reihen importieren' and 'OS-Profilen laden und erstellen' are present.
- Netzdaten-Statistik (Network Data Statistics):** A list of network components including 20 Portelemente, 1 Slack, 14 Leitungen, 4 Generatoren, 15 Knoten (reduziert), 15 Stationen, 0 Muffen & Masten, 10 km Freileitung, 25 km Kabel, 35 km Leitungen, and a Generatorleistung of 71 MW.
- Oberschwingungen (Overvoltages):** Parameters include OS-Ordnung (5), ZR Multipl (3), Korrr Grenze (0.3), Reg Grenze (0.3), Zufalls-Ampl-Faktor (0.08), max. Zufalls-Winkel (5), Anz. Time-Shift (10), Slack Spng (0 % Ubez), Zufalls Slack Spng, and Zufalls Ströme. Results show Korrr min = 0.69752, Reg min = 0.29922, and Reg max = 3.1596.
- Flicker:** Parameters include Korrr Grenze (0.3), Reg Grenze (0.3), FilStrom (100 % IN), and FlickerWinkel (0 bis 0). Results show Korrr min = 0.00096014, Reg min = 0.0022662, and Reg max = 384.0306.
- Dips:** Parameters include Korrr Grenze (0.8) and Reg Grenze (0.8). Results show Korrr min = 0.00096014, Reg min = 0.0022662, and Reg max = 384.0306.
- manuelle Messknotenauswahl (Manual Measurement Node Selection):** A list of available nodes (K-A0 to K-A1) and a list of selected nodes. Buttons for 'auswählen' and 'abwählen' are provided.
- Auswerteparameter (Evaluation Parameters):** Includes 'mind. Eignung' (minimum suitability) set to 0, and checkboxes for 'Slack = Messknoten', 'nach bester Eignung', 'Eignung vor Menge', 'max Eignung bevorzugen', '400 V Knoten ausblenden', 'Unbeteiligte ausblenden', 'Beschriftung ausblenden', and 'mit EXCEL-Ausgabe (slow)'. Buttons for 'View Clusters', 'View ErgMat', and 'View ZSlack (f)' are present.
- Ergebnisse (Results):** Three columns showing results for '4 Messstellen', '5 optionale Messstellen', and '7 Korrelierende Knoten'. The first column lists K-A0-Slack, K-B1, K-B2, K-D1, and K-B3. The second column lists K-B1, K-B2, K-C2, K-C3, K-B5, and K-D3. The third column lists K-B1, K-B2, K-C2, K-C1, K-C3, K-B5, K-D3, and K-D2.

Abbildung 8-2 Programmoberfläche

8.3 Lastkategorien

Unterschiedliche Lastkategorien wurden wie jene, in den synthetischen Lastprofilen der APCS Power Clearing And Settlement AG verwendeten, definiert.

H0	Haushalt
G0	Gewerbe allgemein
G1	Gewerbe werktags 8-18
G2	Gewerbe mit starkem bis überwiegendem Verbrauch in den Abend-Nachtstunden
G3	Gewerbe durchlaufend
G4	Laden/Friseur
G5	Bäckerei mit Backstube
G6	Wochenendbetrieb
L0	Landwirtschaftsbetriebe
L1	Landwirtschaftsbetriebe mit Milchwirtschaft/Nebenerwerbsbauern
L2	Übrige Landwirtschaftsbetriebe
U0	Warmwasserbereitung unterbrechbar
U1	Heizung unterbrechbar
E0	Wasserkraft, Windkraft, Biogas
E1	Photovoltaik
ULA	Warmwasserspeicher ohne Tagnachladung
ULB	Warmwasserspeicher mit Tagnachladung
ULC	Nachtspeicherheizung ohne Tagnachladung
ULD	Nachtspeicherheizung mit Tagnachladung
ULE	Mischanlage ohne Tagnachladung
ULF	Mischanlage mit Tagnachladung
EAGU1	EAG Nachtspeicherheizung ohne Tagnachladung
EAGU2	EAG Nachtspeicherheizung mit Tagnachladung
HA	Haushalt mit Warmwasserspeicher an einem Zählpunkt
HF	Haushalt mit Speicherheizung an einem Zählpunkt
G7	Mobilfunksendestationen
B1	Öffentliche Beleuchtung

Tabelle 8-1 Liste der Lastkategorien