

TECHNISCHER BERICHT

über die

**Messung der
Oberschwingungsanteile niederfrequenter
magnetischer Flussdichten und elektrischer Feldstärken
sowie von Strömen und Spannungen
ausgewählter 380-kV-Freileitungen der Verbund-APG**

im Auftrag von Verbund-Austrian Power Grid AG (APG)

Bericht Nr.: 2006-25

02. Juni 2006

1. Veranlassung und Umfang der Untersuchungen

1.1 Aufgabenstellung und Vorgangsweise

Im Zusammenhang mit den Genehmigungsverfahren zu 380-kV-Leitungen der APG traten Fragestellungen zu Oberschwingungen im 380-kV-Netz auf. Zur Beantwortung wurden folgende Aufgaben formuliert, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durch das Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz behandelt wurden:

- Analyse der seitens der TU Wien, Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik, im Oktober 2005 zur Messung des Frequenzspektrums von Hochspannungsfreileitungen eingesetzten Messeinrichtungen. Diese Messung im Oktober 2005 wies ungewöhnlich hohe Oberschwingungsanteile aus, weshalb die Zweckmäßigkeit und die Einstellmöglichkeiten des Messaufbaus der TU Wien in einem Labor-Messaufbau an der TU Graz verifiziert wurden. Dabei wirkten Herr Dipl.-Ing. Abart als Vorsitzender des VEÖ-AK EMF und Frau Dipl.-Ing. Friedl seitens Verbund-APG mit.
- Durchführung von Messungen und Bewertung der Ströme und Spannungen sowie der magnetischen Flussdichten und der elektrischen Feldstärken bis zur 13. harmonischen Oberschwingung im UW Wien Südost und an ausgewählten 380-kV-Freileitungen, durch das Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz. Diese Messergebnisse ersetzen die Ergebnisse der Messungen der TU Wien vom Oktober 2005.
- Durchführung von begleitenden Berechnungen der elektrischen und magnetischen Felder ausgewählter 380-kV-Freileitungen.

1.2 Voraussetzungen für die Messungen und Berechnungen

An folgenden drei seitens der Verbund-APG spezifizierten Messorten wurden Messungen der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte durchgeführt und dokumentiert (diese werden im Kapitel 6 als Messorte 1,2 und 3 bezeichnet):

1. 380-kV-Freileitung Wien Südost – Győr (Ltg. Nr. 443 Mast Nr. 1062 - 1063)
2. 380-kV-Freileitung Wien Südost – Győr (Ltg. Nr. 443 Mast Nr. 1009 - 1010)
3. 380-kV-Freileitung Dürnrohr – Ernsthofen (Ltg. Nr. 433/434 B Mast Nr. 381 - 382)

Zusätzlich wurden zur Verifizierung der berechneten Feldverläufe Messungen in der Nähe von Graz auf folgenden Leitungen durchgeführt (siehe Kapitel 5):

4. 380-kV-Freileitung Kainachtal – Maribor (Ltg. Nr. 473/474 Mast Nr. 9 - 10)
5. 380-kV-Freileitung Kainachtal – Obersielach (Ltg. Nr. 471/472 Mast Nr. 242 - 243)

Die Bodenabstände der untersten Phasenseile und Erdseile der betreffenden Leitungen an den Orten der Feldmessungen wurden mit einem optischen Messgerät der Verbund-APG am Tag der Messungen direkt gemessen. Für den Vergleich der Messung mit der Berechnung der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke werden gemessene Spannungen und Ströme (am Tag der Messungen) verwendet. Es lagen zum Zeitpunkt der Messung bestimmte Stromflüsse und Spannungsverhältnisse vor, die sich aus der aktuellen Last- und Einspeisesituation ergaben.



2. Elektromagnetische Felder

2.1 Allgemeines zum Thema elektromagnetische Felder

Das elektrische Feld wird durch elektrische Ladungen verursacht (elektrische Spannung), das magnetische Feld durch bewegte Ladungsträger (elektrischer Strom). Im Unterschied zu den natürlichen, nur sehr langsam veränderlichen Feldern (verursacht durch Wolken, Schichten der Atmosphäre und dem Erdmagnetfeld) sind die Felder in der Umgebung von elektrischen Anlagen in Europa meist Wechsel- bzw. Drehfelder, die 50 mal in der Sekunde bei öffentlichen 50-Hz-Stromversorgungsanlagen ihre Richtung ändern.

Elektromagnetische Felder¹ sind bis zu einer bestimmten Schwelle nicht wahrnehmbar, jedoch existieren fundierte physikalische Beschreibungen, sowie die erforderlichen Voraussetzungen zur Berechnung und Erfassung der entsprechenden Größen. Dennoch reicht der heutige Stand der Erkenntnisse nicht aus, um Wirkungen auf biologische Systeme vollständig beschreiben zu können. Viele, oft auch nicht erwiesene Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen werden in der Öffentlichkeit diskutiert und sind Thema der aktuellen und künftigen Forschung.

Für die Bewertung der elektrischen und magnetischen Felder sind in Österreich die Referenzwerte der gültigen Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850, Ausgabe: 2006-02-01 „Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz – Beschränkung der Exposition von Personen“ [1] heranzuziehen.

2.2 Wirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Menschen

Elektrische und magnetische Wechselfelder verursachen im Körperinneren des Menschen elektrische Ströme. Sehr starke Felder können daher zur Stimulation von Nerven und Muskeln führen. Gesundheitliche Gefährdungen und Störungen des Wohlbefindens sind bei Einhaltung der – in Übereinstimmung mit den Richtlinien von WHO und ICNIRP (1998) [3] – in der Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850, Ausgabe: 2006-02-01 festgelegten Referenzwerte und Basisgrenzwerte nach heutigem Kenntnisstand nicht zu erwarten.

Die ICNIRP-Referenzwerte² zur Begrenzung der Exposition wurden von ICNIRP nach sorgfältiger Auswertung der veröffentlichten wissenschaftlichen Literatur entwickelt. Die bei der Auswertung der Literatur (durch ICNIRP) zu Grunde gelegten Kriterien wurden auf die Überprüfung der Glaubwürdigkeit der verschiedenen berichteten Ergebnisse hin ausgelegt. Als Grundlage für die vorgeschlagenen Expositionsgrenzwerte wurden nur nachgewiesene Wirkungen herangezogen.

¹ Grundsätzlich kann bis zu Frequenzen von ca. 9 kHz das elektrische und das magnetische Feld mathematisch getrennt betrachtet werden, oberhalb dieser Frequenz nehmen die Beiträge der Kopplung des elektromagnetischen Feldes zu, sodass diese Kopplung nicht mehr vernachlässigt werden darf.

² Diese Referenzwerte wurden von der EU sinngemäß übernommen (EU-Ratsempfehlung, 1999) [4] und stellen auch die Referenzwerte der Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850, Ausgabe: 2006-02-01 dar.

2.3 Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Das Feld kann z.B. durch Feldlinien veranschaulicht werden, die bei einem einzelnen Leiter konzentrische Kreise um den Leiter bilden oder es kann auch z.B. durch eine Farbdarstellung die Ortsabhängigkeit der Beträge der Feldstärke (Ersatzfeldstärken, RMS) in einer angenommenen Schnittebene visualisiert werden.

Die magnetische Flussdichte einer Leiterkonfiguration, z.B. der Strom führenden Leiter einer Hochspannungsfreileitung, kann nach dem Gesetz von Biot-Savart aus der Superposition von Teilfeldern der einzelnen Leiterseile berechnet werden. Für die Bewertung der Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente Magnetfelder wird in der Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850 die entsprechende magnetische Ersatzflussdichte B_e herangezogen, die sich aus den Beträgen der Feldstärkekomponenten in den drei aufeinander normalen (orthogonalen) Raumrichtungen (den Vektorrichtungen x, y, z) gemäß folgender Definition ergibt:

$$B_e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Formelzeichen: B_e magnetische Ersatzflussdichte³
 B_x, B_y, B_z magnetische Flussdichte in $x/y/z$ - Richtung

Einheit: $[B] = 1 \text{ T (Tesla)}, 0,000\ 001 \text{ T} = 1 \mu\text{T}$

2.4 Berechnung der elektrischen Ersatzfeldstärke

Die Ursache für elektrische Felder sind elektrische Ladungen Q . Befinden sich im Raum elektrische Ladungsträger, so ist zwischen jeweils zwei Punkten eine Potenzialdifferenz, also eine elektrische Spannung, vorhanden (im Raum liegt damit zwischen den zwei Punkten die elektrische Feldstärke \vec{E} vor). Da es nicht möglich ist, einzelnen Punkten eine Spannung zuzuordnen, wird für sämtliche Feldpunkte ein gemeinsamer Bezugspunkt festgelegt ($\varphi(\infty) = 0$). Die auf diesen Punkt bezogenen elektrischen Spannungen werden dann als elektrische Potentiale $\varphi(x,y,z)$ bezeichnet. Die elektrische Feldstärke \vec{E} kann durch den negativen Gradienten des skalaren Potentials $\varphi(x,y,z)$ dargestellt werden: $\vec{E}(x,y,z) = -\nabla\varphi(x,y,z)$.

Für die Bewertung der Exposition nach Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850 ergibt sich, äquivalent zu Abschnitt 2.3, für elektrische Felder die elektrische Ersatzfeldstärke E_e aus den Beträgen der Feldstärkekomponenten in den drei aufeinander normalen Raumrichtungen:

$$E_e = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Formelzeichen: E_e Elektrische Ersatzfeldstärke³
 E_x, E_y, E_z elektrische Feldstärke in $x/y/z$ -Richtung

Einheit: $[E] = 1 \text{ V/m (Volt pro Meter)}, 1000 \text{ V/m} = 1 \text{ kV/m}$

³ Die magnetische Ersatzflussdichte bzw. die elektrische Ersatzfeldstärke wird unter angenommener Vernachlässigung der gegenseitigen Phasendifferenzen bestimmt und ist damit größer oder gleich der tatsächlich auftretenden maximalen Größe (B oder E). Die drei Vektorkomponenten in $x/y/z$ -Richtung stellen Effektivwerte (RMS) dar.

2.5 Messung der magnetischen Ersatzflussdichte

Grundlage für die Messung niederfrequenter magnetischer Wechselfelder mit einer Spule ist das Induktionsgesetz. Als Sensor wird dabei eine Spule mit der Fläche \vec{A} (Betrag und Richtung) und der Windungszahl N verwendet. Es werden sowohl Spulen mit Ferritkernen, als auch solche ohne Kern verwendet. Hochpermeable Kerne verursachen eine Verdichtung des Flusses durch die Spulenfläche und erhöhen so die Empfindlichkeit. Tritt ein zeitlich veränderlicher magnetischer Fluss, hervorgerufen durch zeitlich veränderliche Ströme, durch die Spule, so wird eine ebenso zeitlich veränderliche Spannung U_{ind} in der Spule induziert. Die Spannung zwischen den Enden einer leer laufenden Spule ist proportional der zeitlichen Änderung des von ihr umfassten magnetischen Flusses Φ . Der Zeitverlauf der Spannung entspricht der zeitlichen Ableitung der Messgröße.

$$U_{\text{ind}} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Φ magnetischer Fluss in Weber (Wb) $\Phi = \int_A \vec{B} \circ d\vec{A}$
 N Windungszahl der Induktionsspule
 U_{ind} induzierte Spannung in Volt (V)



Abb. 2-1 : *Dreiaxsiges Messsystem (EFA-3, Wandel&Goltermann) B-Feldmessung mit Kugelsonde, E-Feldmessung mit Würfelsonde, LWL-Verbindung zur Anzeige, Stativ*

Der Frequenzgang der Messwertumformung kann durch eine aktive oder passive Komponente kompensiert werden. Als aktives Glied wird meist ein Integrator verwendet. Darüber hinaus sorgt üblicherweise ein Bandpassverhalten höherer Ordnung sowohl für die Unterdrückung der Bewegungsinduktion im Erdmagnetfeld als auch für die Begrenzung auf den ELF-Bereich⁴ (3 – 300 Hz). Manche Sonden sind auch mit Selektivfiltern ausgestattet, um beispielsweise bahnhäufige Felder mit 16 $\frac{2}{3}$ Hz von 50-Hz-Feldern unterscheiden zu können, oder um spezielle Frequenzen individuell zu messen.

Moderne Geräte gestatten neben der Ermittlung der magnetischen Ersatzflussdichte auch eine frequenzselektive Beurteilung der magnetischen Flussdichte. Dazu werden entweder Filter eingesetzt oder die betreffenden Frequenzkomponenten durch FFT (Fast-Fourier-Transformation) ermittelt.

2.6 Messung der elektrischen Ersatzfeldstärke

Zur Messung der elektrischen Feldstärke wird üblicherweise der influenzierte Strom zwischen zwei isolierten Elektroden bzw. Platten gemessen: Diese Technik wird oft für bodennahe Messungen verwendet. Gemessen wird der zwischen zwei voneinander isolierten Platten influenzierte Strom. Je nach Geometrie der Elektroden erhält man verschiedene Zusammenhänge zwischen dem Strom und der anliegenden äußeren elektrischen Feldstärke. Die Auswerteelektronik inklusive Stromversorgung ist zwischen den Platten eingebracht. Das Messsignal wird über einen, das Feld nicht beeinflussenden, Lichtwellenleiter an eine Anzeigeeinheit übertragen (Abb. 2-1). Die Kalibrierung der Messsonden erfolgt in homogenen Feldern bekannter Feldstärke, wie sie z.B. durch eine Anordnung zweier paralleler Platten einer bestimmten Dimensionierung hergestellt werden können, an die eine bekannte elektrische Spannung angelegt wird.

⁴ ELF: Extra Low Frequency

3. Oberschwingungen in elektrischen Hochspannungsnetzen

Die idealen Spannungen bzw. die idealen Ströme in 50-Hz-Drehstromenergieversorgungsnetzen sind im stationären Fall sinusförmig. Durch Rückwirkungen nichtlinearer Verbraucher, leistungselektronischer Einrichtungen etc. kommt es zu einer geringen Verzerrung der Kurvenform und damit zu einer Abweichung von der Sinusform. Diese Verzerrung lässt sich durch Zerlegung der Spannung in eine 50-Hz-Grundschiwingung und in Oberschwingungen charakterisieren und quantifizieren. Die Oberschwingungen weisen ganzzahlige Vielfache der 50-Hz-Grundfrequenz auf (z.B. ergibt sich für die 5. Oberschwingung eine Frequenz von 250 Hz). Aufgrund der vorherrschenden Symmetrieeigenschaften der Spannung bzw. des Stroms treten bei stationären Verhältnissen in den Spektren nur Oberschwingungen mit ungeradzahligter Ordnungszahl auf (in Höchstspannungsnetzen typisch 5., 7. und 11. Oberschwingung, Oberschwingungen der 9. Ordnung treten hier üblicherweise nicht auf). Bei transienten Vorgängen (wie z.B. Schaltvorgängen) können kurzzeitig auch geradzahligere Spektralkomponenten (Oberschwingungen) auftreten. Der für Oberschwingungen in Energieversorgungsnetzen relevante Frequenzbereich erstreckt sich von > 0 Hz bis maximal 2500 Hz (50. Oberschwingung), wobei die Erfahrung zeigt, dass die Pegel ab der 11. Harmonischen (d.h. > 550 Hz) in Höchstspannungsnetzen (z.B. 380 kV) bezogen auf die Grundschiwingung vernachlässigbar klein sind.

Oberschwingungen werden in Energieversorgungsnetzen durch Verbraucher mit nichtlinearer Strom-Spannungskennlinie bzw. deren daraus resultierenden Stromüberschwingungen verursacht. Die wichtigste Gruppe von Oberschwingungserzeugern stellen die Stromrichter dar (z.B. Frequenz-Umrichter, Netzteile elektronischer Geräte). Es sind dies über Dioden, Thyristoren oder Transistoren gesteuerte Lasten. Eine Einteilung hinsichtlich der Oberschwingungsproblematik erfolgt am besten über die Kurvenform des Stromes. In der Regel weist das Spektrum von Stromrichtern die charakteristischen Oberschwingungen mit der Ordnung 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... auf. Weiters kann es auf Grund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie des Eisenkernes von Transformatoren zu Sättigungserscheinungen und in weiterer Folge zu Verzerrungen von Spannungen und/oder Strömen kommen.

3.1 Oberschwingungsspannungen

Die eingepprägten Oberschwingungsströme I_h mit der Ordnungszahl h , die vor allem im Niederspannungsnetz eingespeist werden, verursachen an der frequenzabhängigen Netzimpedanz entsprechende Oberschwingungsspannungen. Aus diesem Grund treten im Allgemeinen in den Niederspannungsnetzen die höchsten Oberschwingungsspannungspegel auf. In den darüber liegenden Spannungsebenen nehmen diese Oberschwingungspegel mit zunehmender Kurzschlussleistung bzw. abnehmender Netzimpedanz ab, die niedrigsten Pegel treten daher im Allgemeinen im 380-kV-Netz auf. Die Oberschwingungspegel zeigen einen ausgeprägten tageszeitabhängigen Verlauf, sowie eine geringe Abhängigkeit vom Wochentag und der Jahreszeit. Die Angabe der Oberschwingungsspannungspegel erfolgt üblicher Weise in Prozent bezogen auf die Grundschiwingung. Die langjährige Messkampagne des VEÖ zeigt für die 5. Oberschwingung zeitlich eine leicht sinkende Tendenz, während die 7. Oberschwingung im Wesentlichen konstant bleibt [11].

3.2 Oberschwingungsströme

Die Anteile der Oberschwingungsströme, bezogen auf die Grundschiwingung, sind im Allgemeinen höher als die entsprechenden Oberschwingungsspannungen. Aufgrund der stark schwankenden Bezugsgröße (Grundschiwingungsstrom) erfolgt eine Angabe der Oberschwingungsströme einheitlich in Ampere (Absolutwerte). Die auf den Leitungen auftretenden Oberschwingungsströme sind prinzipiell entkoppelt vom 50-Hz-Lastfluss zu betrachten. Erstere spiegeln ausschließlich das Verhalten der Verbraucher wider, während die 50-Hz-Ströme zusätzlich durch den Kraftwerkseinsatz und Stromhandel geprägt sind (Lastfluss). Die Abb. 3-1 zeigt beispielhaft den auf einer 380-kV-Freileitung gemessenen Oberschwingungsstrom der 5. Oberschwingung, Abb. 3-2 den gleichzeitig gemessenen 50-Hz-Strom.

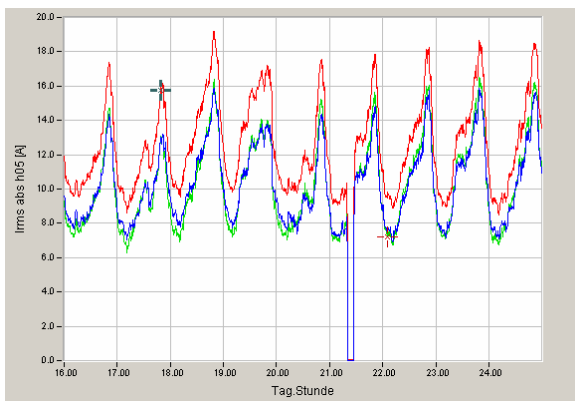


Abb. 3-1 Oberschwingungsstrom der 5. OS (250 Hz) auf der 380-kV-Freileitung Wien Südost – Győr (443), 16. bis 24. März 2006
blau: I_{L1} , rot: I_{L2} , grün: I_{L3} , absolute Werte in A

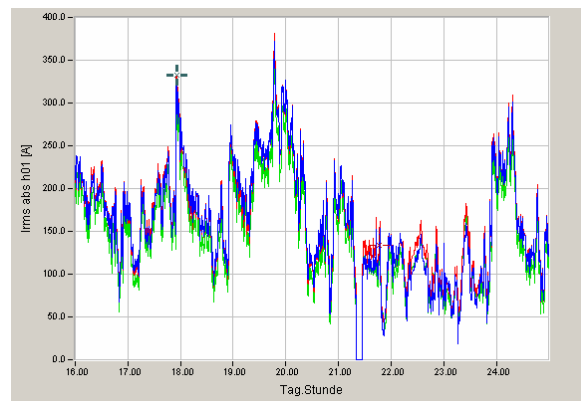


Abb. 3-2 Grundsicherungsstrom (50 Hz) auf der 380-kV-Freileitung Wien Südost – Győr (443), 16. bis 24. März 2006
blau: I_{L1} , rot: I_{L2} , grün: I_{L3} , absolute Werte in A

Man erkennt, dass zwischen diesen Größen keine Korrelation besteht – d.h. die Oberschwingungsströme sind praktisch unabhängig von der 50-Hz-Leitungsbelastung (Lastfluss oder Lastfall). Die lineare Umrechnung von Oberschwingungsströmen, die bei einer bestimmten Belastung der Leitung ermittelt wurden, auf andere (Stark-)Lastfälle ist daher nicht zulässig (dies gilt auch für Oberschwingungskomponenten im magnetischen Feld). Die Oberschwingungsströme zeigen, genauso wie die Oberschwingungsspannungen, einen ausgeprägten tageszeitabhängigen Verlauf sowie eine leichte Abhängigkeit vom Wochentag und der Jahreszeit.

4. Ergebnisse der Messung des Grund- und Oberschwingungsgehalts der elektrischen Ersatzfeldstärke und der magnetischen Ersatzflussdichte (50 Hz ... 650 Hz)

Die folgenden Abbildungen stellen für einen Fall beispielhaft die Oberschwingungskomponenten der Messergebnisse der elektrischen Ersatzfeldstärke bzw. magnetischen Ersatzflussdichte dar. Die Ergebnisse der Messungen an den Messorten 1, 2 und 3 sind im Abschnitt 6 zusammenfassend dargestellt. Im Rahmen der Messungen wurde die Höhe des untersten Leitungsseiles seitens der TU Graz mit einem optischen Messgerät der Verbund-APG am Tag der Messung bestimmt. In den Abbildungen (linearer Maßstab) erscheint der 50-Hz-Wert abgeschnitten; sein jeweiliger Betrag ist in den Bildunterschriften und in den Tabellen im Kapitel 6 (Messort 2) wiedergegeben. Die Sondenhöhe bei den Messungen betrug einheitlich 1 m über Grund.

Legende für die folgenden Abb. 4-1 und 4-2:

- Rot:** Der Anzeigewert liegt unter jenem Grenzwert (0,006 kV/m bzw. 0,04 μ T), oberhalb dessen der Sondenhersteller die angegebenen Messtoleranzen garantiert. Die Grenze ist in den Diagrammen als rote Linie eingetragen.
- Grau:** Der Anzeigewert ist auf Grund von Filter-Effekten für weitere Auswertungen nicht heranzuziehen. Aufgrund der Filtercharakteristik (endliche Steilheit der Filterkurven) werden benachbarte Frequenzanteile vorgetäuscht.
- Grün:** Der Anzeigewert ist mit entsprechender Messtoleranz dargestellt, er stellt einen gültigen Messwert dar und kann für weitere Auswertungen herangezogen werden.

4.1 Elektrische Felder: 380-kV-Leitung UW Wien Südost – Győr (Bruck a.d. Leitha)

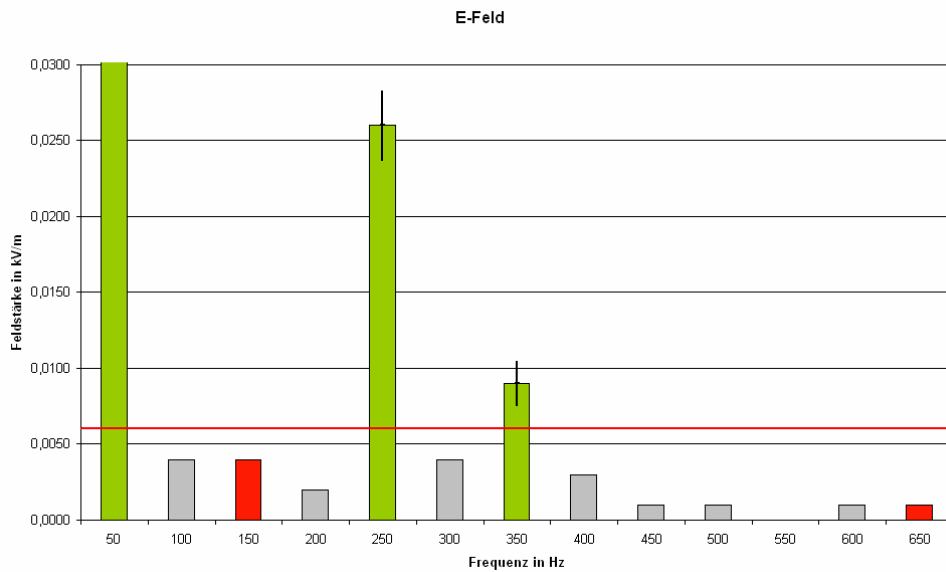


Abb. 4-1: E-Feld 380-kV-Leitung UW Wien Südost – Győr (nahe Bruck a. d. Leitha, in Trassenmitte)

Leistungsnummer: 443

Mastnummern: Mast 1009 – Mast 1010, Messort 2

Bodenabstand des untersten Seils: ca. 13,2 m

50-Hz-Grundschiwingung: 2,040 kV/m

4.2 Magnetische Felder: 380-kV-Leitung UW Wien Südost – Győr (Bruck a.d. Leitha)

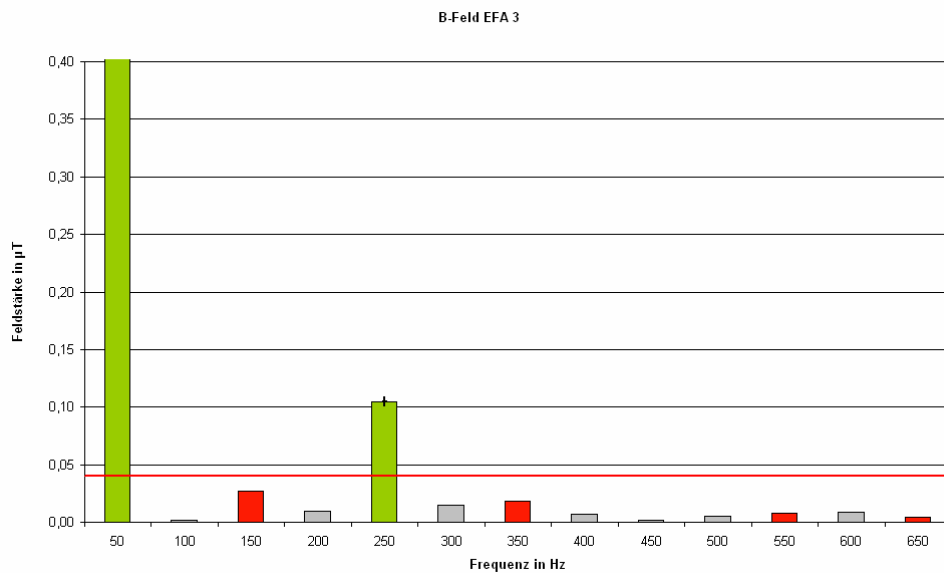


Abb. 4-2: B-Feld 380-kV-Leitung UW Wien Südost – Győr (nahe Bruck a. d. Leitha, in Trassenmitte)

Leistungsnummer: 443

Mastnummern: Mast 1009 – Mast 1010, Messort 2

Bodenabstand des untersten Seils: ca. 13,2 m

50-Hz-Grundschiwingung: 0,89 µT

5. Vergleich zwischen Messung und Berechnung von E- und B-Feldern

Der Vergleich der Berechnungen und Messungen für das E- und B-Feld von zwei-systemigen 380-kV-Freileitungen⁵ die seitens des Instituts für Elektrische Anlagen der TU Graz in der Nähe des UW Kainachtal durchgeführt wurden, zeigen, dass Rechnung und Messung sehr gut übereinstimmen (Abb. 5-1a, b). Für das B-Feld muss angemerkt werden, dass zum Zeitpunkt der Messungen die sehr kleinen Ströme im Bereich 30 A ... 50 A stark und rasch schwankten – somit sind die in der Abb. 5-1a dargestellten Messwertstreuungen erklärbar (diese Belastungsschwankungen wurden rechnerisch korrigiert). Für die Beurteilung von Feldimmissionen in der Umgebung von elektrischen Anlagen können daher sowohl Rechnungen als auch Messungen empfohlen werden; Rechnungen insbesondere, um im Planungszustand von Anlagen Aussagen über die Feldsituation treffen zu können, Messungen, um die tatsächlichen Immissionen an bestimmten ausgewählten Punkten zu verifizieren.

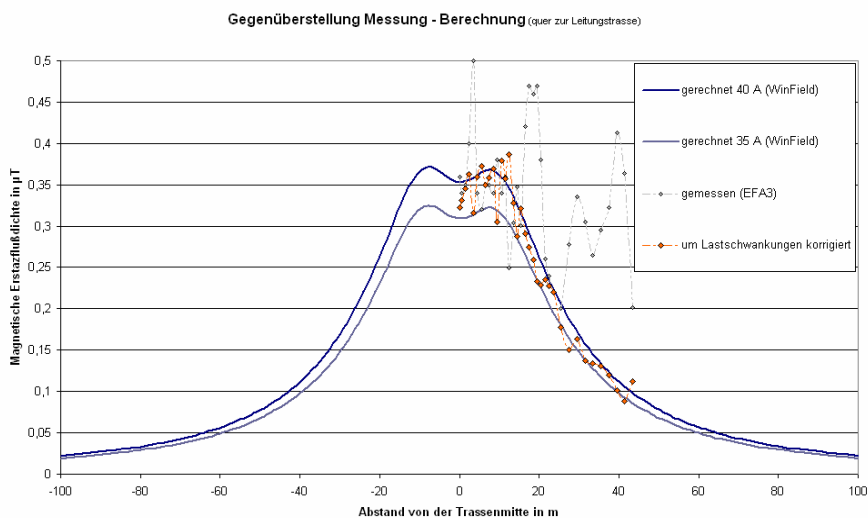


Abb. 5-1a: B-Feld Vergleich von Messung und Rechnung (Leitung Kainachtal – Obersielach)

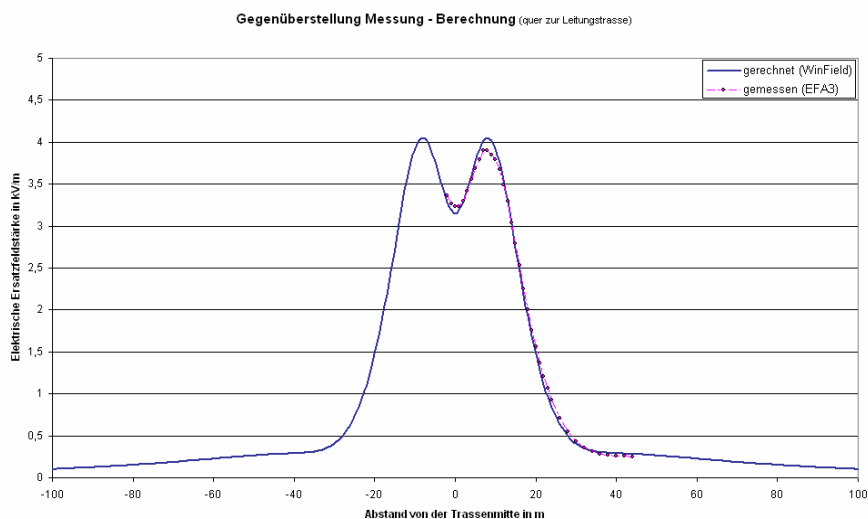


Abb. 5-1b: E-Feld Vergleich von Messung und Rechnung (Leitung Kainachtal – Maribor)

⁵

B-Feld: 380-kV-Freileitung Kainachtal – Obersielach (Mastbild: Tonne), siehe Abschnitt 1.2 Punkt 5.

E-Feld: 380-kV-Freileitung Kainachtal – Maribor (Mastbild: Tonne), siehe Abschnitt 1.2 Punkt 4.

WinField: EFC-400 V 4.02 – Magnetic and Electric Field Calculation Program, Fa. Wandel und Goltermann & Partner

6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen

Die Aufgabenstellungen sowie die Ergebnisse des vorliegenden Technischen Berichts können wie folgt zusammengefasst werden:

Analyse der seitens der TU Wien vom Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik im Oktober 2005 zur Messung des Frequenzspektrums von Hochspannungsfreileitungen eingesetzten Messeinrichtungen in einem Labor-Messaufbau an der TU Graz.

- Es konnten die im Bericht der Technischen Universität Wien, Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik, dargestellten ungewöhnlich hohen Oberschwingungsanteile im E- und B-Feld (Spektralverteilungen mit hohen Anteilen bis zu 25 % der geradzahigen sowie der 3. und 5. harmonischen Oberschwingung) als Anzeigen der Messgeräte in einem Laborreferenzaufbau nachvollzogen werden. Dabei stellte sich heraus, dass auf Grund von Clipping-Effekten⁶ und der folgenden Fast-Fourier-Transformation diese hohen scheinbaren Oberschwingungsanteile entstehen. Die Messungen der TU Wien sind aufgrund des Clipping-Effektes nicht korrekt durchgeführt worden. Diesbezüglich wurde das Messprotokoll der TU Wien (datiert mit November 2005) mit dem Schreiben vom 29.3.2006 von der TU Wien wegen Fehlerhaftigkeit der Messung zurückgezogen.
- Als Ergebnis der Laboruntersuchungen ist bei Messungen von Oberschwingungen zusätzlich insbesondere auf Spectral-Leakage-Effekte (Filtereffekte) sowie bedeutsames Rauschen der elektronischen Komponenten des Messsystems auf Grund sehr kleiner Messgrößen und der Messbereichswahl bei den Messgeräten zu achten.

Durchführung von Messungen und Bewertungen der Ströme und Spannungen sowie der elektrischen Feldstärken und der magnetischen Flussdichten bis zur 13. harmonischen Oberschwingung an ausgewählten 380-kV-Freileitungen der APG, durch das Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz (als Ersatz für die Messungen der TU Wien vom Oktober 2005).

- **Messung der Oberschwingungsspannungen**

Die Messung der Oberschwingungsspannungen an der 380-kV-Sammelschiene im UW Wien Südost, die von Fr. 17.3.2006, 0:00 Uhr bis Sa. 25.3.2006, 0:00 Uhr durchgeführt wurde, zeigt eine stark ausgeprägte Abhängigkeit von der Tageszeit. Die höchsten Oberschwingungsanteile werden jeweils am Abend zwischen 20:00 Uhr und 22:00 Uhr erreicht. Durch die nichtlineare Übertragungskennlinie des Typs des Hochspannungswandlers und auftretenden Resonanzen wird die 5. und 7. Oberschwingung bei der Messung überbewertet. Für Oberschwingungen höherer Ordnung kann praktisch keine Aussage getroffen werden, da hier trotz gleicher Type jeder Spannungswandler ein individuelles Verstärkungs- oder Dämpfungsverhalten aufweist.

- **Messung der Oberschwingungsströme**

Auf den Systemen 435 (Wien Südost-Dürnrohr), 443 (Wien Südost-Győr) und 477 (Wien Südost-Südburgenland) wurden die Oberschwingungsströme von Freitag 17.3.2006, 0:00 Uhr bis Samstag 25.3.2006, 0:00 Uhr über Stromwandler im UW Wien Südost gemessen. Die Belastungen der Systeme lagen in diesem Zeitraum zwischen 2 % und 21 % bezogen auf den Grenzstrom von 2300 A. Die gemessenen Oberschwingungsströme weisen eine starke tageszeitliche Abhängigkeit auf, es zeigt sich, dass keine Proportionalität zum 50-Hz-Grundsicherungsstrom vorliegt (vgl. auch Abb. 3-1 und 3-2). Für die 3. Oberschwingung wurden Werte bis 3,3 A ermittelt, für die 5. Oberschwingung Werte bis 16 A, für die 7. Oberschwingung bis 3,3 A, für die 11. Oberschwingung bis 2,0 A und für die 13. Oberschwingung bis 1,8 A.

⁶ Abscheiden des Messsignals durch Übersteuerung des Eingangskanals des Messsystems.



Grundsätzlich ist zu beachten, dass bezüglich der Oberschwingungsströme keine Korrelation einer stark bzw. schwach belasteten Hochspannungsfreileitung besteht – d.h. die Oberschwingungsströme sind praktisch unabhängig von der 50 Hz-Leitungsbelastung (Lastfluss oder Lastfall). Die lineare Umrechnung von Oberschwingungsströmen, die bei einem bestimmten Belastungszustand (Lastfluss) ermittelt wurden, ist auf andere (Stark-) Lastfälle daher nicht zulässig (dies gilt auch für Oberschwingungskomponenten im magnetischen Feld).

- **Messung der Oberschwingungskomponenten im magnetischen Feld**

Die Messergebnisse für die in Abschnitt 1.2 angeführten Messorte 1, 2 und 3 unter den Leitungen in Trassenmitte⁷ führten zu folgenden magnetischen Flussdichten (Oberschwingungspegeln in Absolutwerten als μT):

B-Feld

Frequenz	Messort 1	Messort 2	Messort 3
	magnetische Flussdichte	magnetische Flussdichte	magnetische Flussdichte
in Hz	in μT	in μT	in μT
50 (GS)	0,700	0,890	5,068
150	0,031	0,027	0,003
250	0,101	0,105	0,037
350	0,017	0,018	0,007
450	0,002	0,002	0,006
550	0,010	0,008	0,008
650	0,006	0,004	0,016

Farbschema wie in Kapitel 4 auf Seite 7 beschrieben:

Rot: Anzeigewert unterhalb der garantierten Messtoleranzen ($0,04 \mu\text{T}$)

Grau: Aufgrund von Filtereffekten nicht für weitere Auswertungen heranziehbarer Wert

Grün: Gültiger Wert für weitere Auswertungen

Eine lineare Umrechnung auf andere 50 Hz-Grundschiwungsströme ist nicht zulässig (vgl. oben: Messung der Oberschwingungsströme)

⁷ Bei der Messung der TU Wien von Oktober 2005 finden sich sechs Messungen zu den genannten drei Messorten. Da aber direkt unter der Leitung die Oberschwingungskomponenten bereits vielfach unter den garantierten Messtoleranzen des Sondenherstellers liegen, ist eine Messung in 100 m Entfernung nicht zweckmäßig.

- **Messung der Oberschwingungskomponenten im elektrischen Feld**

Die Messergebnisse für die in Abschnitt 1.2 angeführten Messorte 1, 2 und 3 unter den Leitungen in Trassenmitte⁷ führten im ungünstigsten Fall (mit worst case Multiplikationsfaktor⁸) zu folgenden elektrischen Feldstärken (Oberschwingungspegeln in % bezogen auf die 50 Hz-Grundschiwingung (GS = 100 %)):

E-Feld

Frequenz	Messort 1 elektrische				Messort 2 elektrische				Messort 3 elektrische			
	elektrische Feldstärke		worst case Multiplikationsfaktor	Feldstärke (worst case)	elektrische Feldstärke		worst case Multiplikationsfaktor	Feldstärke (worst case)	elektrische Feldstärke		worst case Multiplikationsfaktor	Feldstärke (worst case)
	in kV/m	in %		in %	in kV/m	in %		in %	in kV/m	in %		in %
50 (GS)	2,850	100,00	1,00	100,00	2,040	100,00	1,00	100,00	2,380	100,00	1,00	100,00
150	0,007	0,25	1,02	0,25	0,004	0,20	1,00	0,20	0,024	1,01	0,89	0,90
250	0,032	1,12	1,20	1,35	0,026	1,27	1,11	1,41	0,021	0,88	1,17	1,03
350	0,011	0,39	1,08	0,42	0,009	0,44	1,09	0,48	0,004	0,17	1,31	0,22
450	0,001	0,04	1,00	0,04	0,001	0,05	1,00	0,05	0,001	0,04	1,00	0,04
550	0,002	0,07	1,00	0,07	0,000	0,00	1,00	0,00	0,001	0,04	1,00	0,04
650	0,003	0,11	1,00	0,11	0,001	0,05	1,00	0,05	0,001	0,04	1,00	0,04

Farbschema wie in Kapitel 4 auf Seite 7 beschrieben:

Rot: Anzeigewert unterhalb der garantierten Messtoleranzen (0,006 kV/m)

Grau: Aufgrund von Filtereffekten nicht für weitere Auswertungen heranziehbarer Wert

Grün: Gültiger Wert für weitere Auswertungen

Die Durchführung einer begleitenden Kontrollrechnung für elektrische und magnetische Felder an ausgewählten 380-kV-Hochspannungsfreileitungen der APG hat zu folgendem Ergebnis geführt:

- Die Kontrollrechnung des Instituts für Elektrische Anlagen der TU Graz zeigt eine sehr gute Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit den Messergebnissen.
- Die Berechnung ermöglicht eine sehr gute Aussagequalität im Planungszustand.
- Die Messung gestattet die Berücksichtigung von realen Gegebenheiten.

Graz, 02. Juni 2006

Dr. Ernst Schmutzger
a.o.Univ.-Prof. Dr. Herwig Renner
Projektleiter

Univ.-Prof. Dr. Lothar Fickert
Institutsvorstand

⁸ Der worst case Multiplikationsfaktor berechnet sich aus dem Quotienten der Oberschwingungsspannung zum Zeitpunkt der E-Feldmessung und der Oberschwingungsspannung zum Referenzzeitpunkt (Maximalwert OS-Spannung in der Messperiode bei der Messung der OS-Spannungen im UW Wien Südost). Mit diesem Korrekturfaktor werden die gemessenen Spektralkomponenten des E-Feldes auf die Oberschwingungssituation zum Zeitpunkt der maximalen Spannungsverzerrung umgerechnet.



Literaturverzeichnis und weiterführende Literatur

Sofern Verweise im gegenständlichen technischen Bericht nicht referenziert sind, stellen die angeführten Quellen weiterführende Literatur dar.

- [1] Vornorm ÖVE/ÖNORM E 8850, Ausgabe: 2006-02-01 Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz – Beschränkung der Exposition von Personen.
- [2] Vornorm ÖNORM S 1119 (ÖVE EMV 1119): Niederfrequente elektrische und magnetische Felder. Zulässige Expositionswerte zum Schutz von Personen im Frequenzbereich 0 Hz bis 30 kHz, 1. Jänner 1994.
- [3] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, 98).
- [4] Empfehlung 1999/519/EG des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz).
- [5] IEC 62110: Measurement Procedures of Electric and Magnetic Field levels Generated by AC Power Systems with Regard to Human Exposure. 106/108 Committee Draft (CD) 20-01-2006.
- [6] ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-1, 2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe (2002-09-01). Teil 6-2: Fachgrundnormen - Störfestigkeit für Industriebereich (2002-09-01).
- [7] Schmutzer, E.; Muhr, M.: Elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Anlagen. Vorlesungsskriptum. Technische Universität Graz, 2004.
- [8] Renner, H.: "Beitrag zur Problematik der Oberschwingungsimpedanz- und Oberschwingungsemissionsermittlung in Elektrischen Energieversorgungsnetzen", Diss. an der TU Graz, 1994.
- [9] Douglass D.A., "Current transformer accuracy with asymmetric and high frequency fault currents", IEEE Transact. on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, 1981, S.1370-1375.
- [10] CIGRE WG 36-05: "Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network", Electra No.77, 1981, S.35-54.
- [11] Arbeitskreis Spannungsqualität des VEÖ: "Spannungsqualität: Koordinierte Messungen österreichischer EVU", VEÖ-Journal Juni/Juli 05, S. 40-43.