



Thema: THD- Faktor, Erklärung, Berechnung, Abhilfemaßnahmen und Messung
Subject:

Datum: 07.07.2024
Date:

1. Allgemeines

Im Normalfall treibt eine sinusförmige Spannung auch einen sinusförmigen Strom durch die angeschlossenen ohmschen, induktiven und kapazitiven Lasten, sofern diese eine lineare Impedanz- Charakteristik aufweisen. In diesen Fällen folgt der Strom der Spannungs- Signalform, so dass dabei außer der Grundwelle keine weiteren Harmonischen generiert werden.

Bei Lasten mit nichtlinearen Impedanz- Verhalten, wie Frequenzumrichter für elektrische Antriebe oder Inverter für Lichtbogenanwendungen, folgt der Strom nicht mehr der Kurvenform der treibenden Spannung, sondern wird nach reglungstechnischen Kriterien, in einer Art Chopper- Betrieb, innerhalb einer Periodenlänge mehrfach zu- und abgeschaltet. Dadurch kommt es zur Ausbildung steiler Schaltflanken, in deren Folge harmonische Oberschwingungen entstehen. Diese Strom- Oberschwingungen übertragen sich auch auf die treibende Spannung, so dass deren Verlauf ebenfalls von der idealen Sinusform abweicht.

Diese Oberschwingungen tragen nicht zur Energieübertragung bei, sondern belasten lediglich die Kabel und Sammelschienen, indem sie zusätzliche Erwärmungen und magnetische Kreise durch zusätzliche Wirbelstromverluste verursachen.

Die von den Oberschwingungen hervorgerufenen Verzerrungen der Anlagenspannung können im weiteren Verlauf auch den Betrieb andere Anlagenteile, welche sich auf der gleichen Spannungsebene befinden, negativ beeinflussen. Dadurch können auch an diesen Anlagenteilen, die selbst keine Oberschwingungen generieren, Funktionsstörungen auftreten. Die Praxis hat gezeigt, dass besonders Erregeranlagen, deren Istwert- Eingänge nicht über entsprechende Oberwellenfilter verfügen, davon betroffen sind.

Eine weitere Entstehungsursache für Oberschwingungen in Energiesystemen, insbesondere der dritten Harmonischen, sind unkorrekte Verbindungen von gleichnamigen Schaltgruppen in Drehstromsystemen.

Wird beispielsweise ein in „Stern“ geschalteter Energieerzeuger mit einer ebenfalls in „Stern“ geschalteter Transformator- Wicklung verbunden und zusätzlich die beiden Sternpunkte geerdet oder miteinander verbunden sind, so ist die Ausbildung der dritten Oberwelle sehr wahrscheinlich.

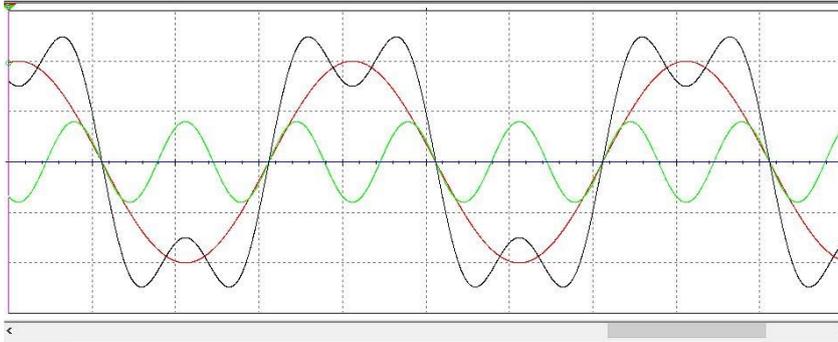
Bei geringen Impedanzen der beiden in „Stern“ geschalteten Wicklungsteile, kann der über den Null- Leiter fließende Oberwellenstrom die mehrfachen Beträge der momentanen Leiterströme annehmen. Abgeschmolzene Sammelschienen sind dabei keine Seltenheit.

Werden an Anlagenteilen Anzeichen von Oberwellen oder nicht zu erklärende Betriebsverhalten festgestellt, ist eine Netzanalyse, bei der auch der Oberschwingungsgehalt im Strom- und Spannungsbereich gemessen werden muss, dringend zu empfehlen.

2. Richtlinien und Empfehlungen für noch akzeptable Oberschwingungsanteile

Wie sieht beispielsweise eine Oberwellenbelastete Wechselspannung aus?

Das nachfolgende Bild zeigt ein Oszillogramm, indem die erste Harmonische in rot, die dritte Harmonische in grün und das Summensignal in schwarz dargestellt sind.



Im nebenstehenden Bild ist deutlich das Prinzip eines oberwellenhaltigen Strom- oder Spannungs-Signals zu erkennen.

Auf die erste Harmonische, also der Grundwelle, werden alle vorhandenen Harmonischen höherer Ordnung aufaddiert.

Im nebenstehenden Bild wird auf die Grundwelle h_1 von 10 V, 50 Hz, die dritte Harmonische h_3 von 4 V, 150 Hz aufaddiert, woraus sich die schwarze Linie des Summensignals ergibt.

Setzt man nun die Summe der Amplitudenwerte aller vorhandenen Oberschwingungsspannungen zur Amplitude der Grundschwingung ins Verhältnis, erhält man einen Faktor, der den gesamten Oberwellengehalt des Signals ausdrückt, nämlich den so genannten THD- Faktor. Die korrekte mathematische Beziehung lautet:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \text{ oder } = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_x^2}}{U_1} \text{ im vorstehenden fall wäre das THD} = \frac{\sqrt{4^2}}{10} \times 100 = 40\%$$

Dieser THD- Wert wurde auch von der verwendeten Simulations- Software „Multisim“ entsprechend berechnet.

Die Klassifizierung der in einer elektrischen Anlage vorhandenen Oberschwingungen bzw. Harmonischen zur Grundwelle basiert auf den nachfolgend genannten internationalen Normen.

[IEC 61000-4-7](#) „Prüf- und Messverfahren – Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten“.

Diese Norm beschreibt detailliert, die für die Berechnung von Oberschwingungen verwendeten Methoden. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Dokumente und Normen, einschließlich solcher von Energieerzeugungs- Unternehmen, welche dafür sorgen sollen, dass ihre Netzwerke stabil und zuverlässig funktionieren bzw. diese vor übermäßigen Energieverlusten oder Schäden geschützt werden.

Die beiden wichtigsten Normen, die weltweit verwendet werden, sind:

[EN 50160](#) „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsnetzen“

Diese Norm beschreibt eine breite Palette von Messungen der Netzqualität in Netzen < 1000 V. Die Norm

[IEEE 519](#) „Orientierungshilfen für akzeptable Pegel von Spannungs und Stromverzerrungen in Netzen bis 69 kV“

Die Gemeinsamkeit beider Dokumente ist, dass diese auf die nachfolgenden „Unternormen“

[IEC 61000-4-7](#) „Oberschwingungen“

[IEC 61000-4-15](#) „Flicker“

[IEC 61000-4-30](#) „Verfahren zur Messung der Spannungsqualität“

verweisen.

3. Bewertungsrichtlinien

THD- Grenzwerte für Oberschwingungs- Spannungen nach EN 50160 / 1999

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nicht Vielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung h	U _n in %	Ordnung h	U _n in %	Ordnung h	U _n in %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 bis 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Die vorstehende Tabelle legt die Grenzwerte für die einzelnen Harmonischen fest.

Der Gesamterschwingungsgehalt der Spannung (THD_U), gebildet aus allen Oberschwingungen bis zur Ordnungszahl 40, darf einen Wert von 8% nicht überschreiten.

Andere Dokumentationen sagen aus, dass es ausreichend ist, in Energie- Übertragungssystemen den THD- Faktor nur bis zur 20. Ordnungszahl zu bestimmen.

Obwohl die vorstehende Tabelle ausschließlich die Grenzwerte für die Spannungserschwingungen enthält (THD_U), sind in der Praxis die Oberschwingungsanteile des Stromes (THD_I) meist von größerer Bedeutung.

Der Grund dafür ist, dass beim Anlegen einer sinusförmigen Spannung an nichtlinearen Lasten, zunächst der Strom mit Oberschwingungen beaufschlagt wird.

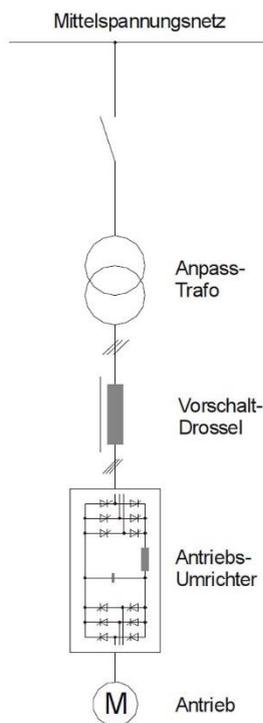
Das „WIKI Planungskompodium Energieverteilung“ schlägt daher folgende Grenzbewertung vor:

- THD_U < 5% Normale Situation, keine Gefahr für Funktionsstörungen.
- THD_U 5% – 8% Bedeutende Belastung des Netzes mit Oberschwingungen, einige Funktionsstörungen sind möglich. Es ist eine Analyse empfehlenswert.
- THD_U > 8% Schwerwiegende Belastung des Netzes mit Oberschwingungen, Funktionsstörungen an benachbarten Anlagenteilen sind wahrscheinlich. Es ist eine Analyse erforderlich.
- THD_I < 10% Normale Situation, keine Gefahr für Funktionsstörungen.
- THD_I 10% – 50% Bedeutende Belastung des Netzes mit Oberschwingungen mit der Gefahr eines Temperaturanstiegs und der damit verbundenen Notwendigkeit, die Kabel und Stromversorgungen überzudimensionieren.
- THD_I > 50% Schwerwiegende Belastung des Netzes mit Oberschwingungen, Funktionsstörungen sind wahrscheinlich. Eine gründliche Analyse des Netzes und Abhilfemaßnahmen sind erforderlich.

4. Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung von Oberschwingungen

Die vorgenommenen Abhilfemaßnahmen sind am effektivsten, je näher diese an der Oberschwingungsquelle installiert werden. Man kann vermuten, dass beim heutigen Stand der Antriebstechnik, der Großteil vorhandener Oberschwingungen in Energieanlagen, durch steuerbare Gleichrichter oder Antriebsumrichter verursacht werden.

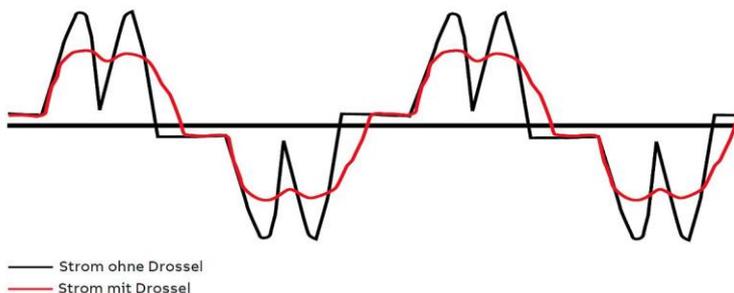
4.1. Abhilfemaßnahme durch Vorschalt- Induktivitäten



Die nebenstehende Bild zeigt die Prinzip- Skizze eines umrichter gesteuerten Drehstromantriebs. Durch Einfügen einer dreiphasigen Drossel- Induktivität kann ein Großteil der vom Umrichter generierten Oberschwingungen am Einfließen in das Mittelspannungsnetz gehindert und somit der THD- Faktor im Mittelspannungsnetz verringert werden.

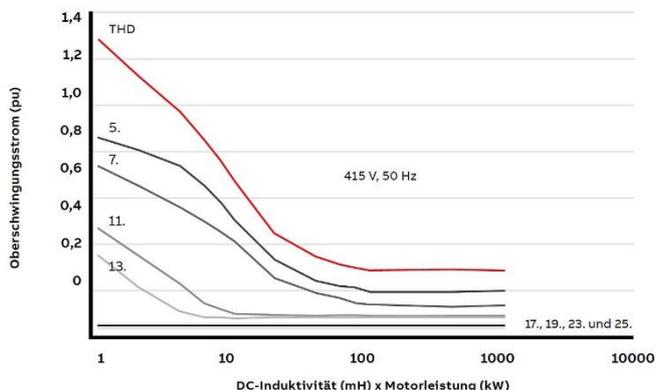
In der von der ABB veröffentlichten „Technische Anleitung Nr.6 – Oberschwingungen bei Frequenzumrichtern“, werden darüber hinaus noch Angaben über die Größe der Drossel angeführt.

Das nachfolgende Bild aus der vorstehend erwähnten ABB- Anleitung zeigt prinzipiell die Wirkung einer derartigen Vorschalt- Induktivität, auf die Kurvenform des Umrichter- Stroms.



Die von der ABB vorgeschlagene Dimensionierung der Drossel sollte im direkten Verhältnis zur Leistung der gesteuerten Antriebsmaschine stehen.

Das nachfolgende Diagramm, ebenfalls aus der ABB- Anleitung, zeigt dieses Verhältnis in Abhängigkeit zu dem pu- Wert, des zu erwartenden THD- Faktors.



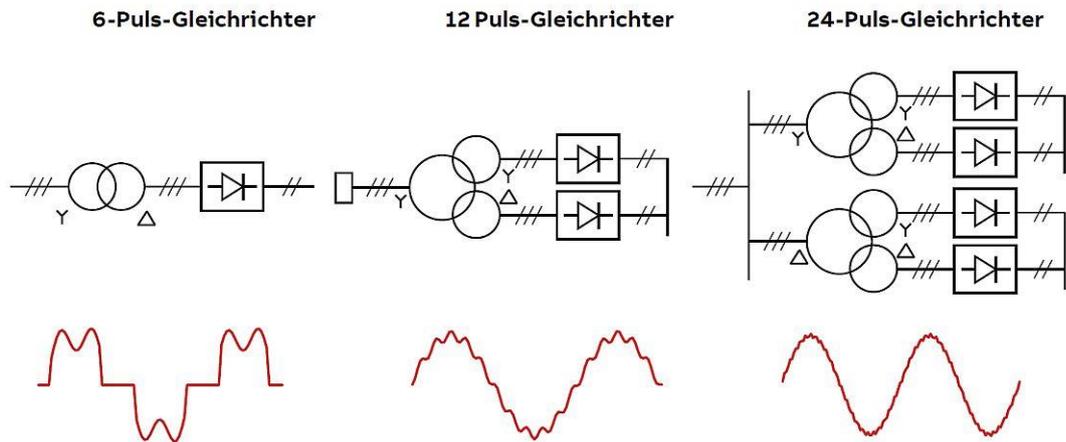
Die Vorschalt- Induktivität sollte so dimensioniert werden, dass das Produkt aus Induktivität in [mH], multipliziert mit der Motorleistung in [kW], in etwa einen Wert von ca. 25 ergeben sollte.

4.2. Abhilfemaßnahme durch Schaltgruppen- Variation

Werden zwei Drehstromkomponenten mit ungleichnamigen Schaltgruppenbezeichnungen miteinander verbunden, oder bei einem Dreiwickler- Trafo, beide Sekundärwicklungen mit unterschiedlichen Schaltgruppen ausgeführt, so wird dadurch eine Dämpfung der Oberschwingungen mit niedrigen Ordnungszahlen erreicht.

Theoretisch ist von der Primärseite der Transformatoren betrachtet, könnte als niedrigste Oberschwingung erst die 11. Harmonische auftreten.

Die nachfolgenden Skizzen, ebenfalls aus der bereits vorstehend erwähnten ABB- Anleitung entnommen, zeigen die prinzipiellen Schaltbilder.



4.3. Abhilfemaßnahmen durch passive Reihen- Schwingkreise auch Notch- oder Kerb- Filter bzw. Saugkreise genannt

Enthält der gemessenen THD- Faktor außer der Grundwelle nur eine oder wenige dominante Oberschwingungen, so können diese möglichst nahe an der Entstehungsquelle, durch einen so genannten Reihen- Schwingkreis gedämpft werden.

Wie der Name bereits vermuten lässt, muss der Reihen- Schwingkreis auf die Frequenz der zu dämpfenden Oberschwingung abgestimmt sein. Im Resonanzfall subtrahieren sich die induktiven und kapazitiven Blindwiderstände zu Null und es wirkt nur der reine ohmsche Widerstand der Induktivität. Ist dieser hinreichend gering, kann eine wirksame Ableitung der betreffenden Oberschwingung erreicht werden.

Sollten in dem Spektrum mehrere Oberschwingungen unterschiedlicher Frequenz enthalten sein, können auch mehrere Reihen- Schwingkreise parallel an der Oberschwingungsquelle angeordnet werden.

Der Nachteil bei der Verwendung passiver Filter besteht darin, dass diese Filter selbst Resonanzfrequenzen aufweisen, die ihrerseits zusätzliche Oberschwingungen generieren können. Daher sollte dieses Dämpfungsprinzip mit entsprechender Vorsicht angewendet werden.

Wesentlich effektiver und vor allen Dingen stabiler in der Wirkung, aber auch deutlich kostenintensiver, sind sogenannte Aktiv- Filter.

4.4. Abhilfemaßnahmen durch Aktiv- Filter

Neue Technologien in der Leistungselektronik ermöglichen die Herstellung von Strukturen, die Oberschwingungen durch aktive Steuerung kontrollieren und eliminieren können. Das Funktionsprinzip ist dabei relativ einfach.

Diese Aktiv- Filter kompensieren die vorhandenen Oberschwingungen im Versorgungsnetz dadurch, indem sie ihrerseits Oberschwingungen generieren, die zur vorhandene Oberschwingung frequenzgleich, aber in der Phase entgegengesetzt sind und dadurch die betreffende Oberschwingung „wegsubtrahiert“ wird.

Dieses Prinzip ist pro Filter nicht nur auf eine Oberschwingung anwendbar, sondern ein Aktiv- Filter kann auch mehrere Oberschwingungen unterschiedlicher Frequenzen kompensieren.

4.5. Versuche zur Eliminierung von Oberschwingungen in den Strom- und Spannungs- Istwerten von Erregersystemen

Jedes Erregersystem der verschiedenen Hersteller wird zur Generierung der internen Regelgrößen mit den Strom- und Spannungs- Istwerten des betreffenden Generators versorgt.

Aus den jeweils drei Strom- und Spannungs- Istwerten berechnet der interne Algorithmus die aktuellen Mittelwerte der Generatorspannung, des Generatorstroms, der Wirk- und Blindleistung, sowie des Leistungsfaktors.

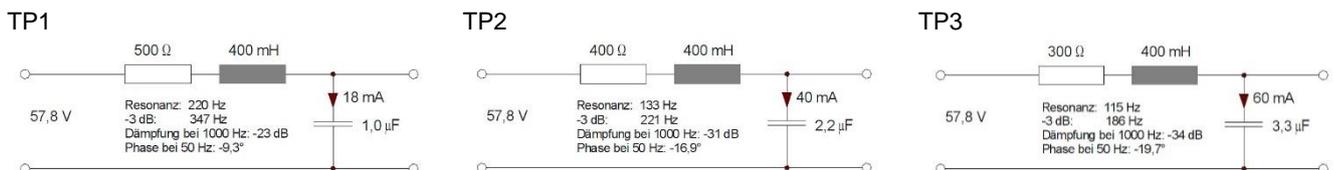
Da kein mir bekanntes Erregersystem an den Istwert- Eingängen über entsprechende Tiefpassfilter, zur Blockierung von evtl. vorhandenen Netz- Oberschwingungen verfügt, können vorhandene Oberschwingungen in den Berechnungs- Algorithmus eindringen und in Abhängigkeit der Zykluszeiten des Software- Algorithmus, die betreffenden Regelgrößen verfälschen, woraus Instabilitäten im Regelverhalten entstehen können.

In der Vergangenheit ist es bei Inbetriebnahmen wiederholt vorgekommen, dass Erregersysteme im Netzparallelbetrieb, die Generator- Spannung nicht stabil einregeln konnten. Als Ursache wurde in diesen Fällen jedes Mal ein erhöhter Oberschwingungsanteil, in den Spannungs- und/oder Strom- Istwerten festgestellt.

Nach einer FFT- Analyse der Strom- und Spannungs- Istwerte, in der die Frequenzen der vorhandenen Oberschwingungs- Anteile genau definiert werden, könnte man theoretisch versuchen, den Oberschwingungsanteil mit den größten Amplituden in den Spannungs- und Strom- Istwerten, durch geeignete Filterschaltungen zu eliminieren.

Passive Tiefpassfilter 2. Ordnung, mit einer Eckfrequenz von ca. 125 Hz und einer Steilheit von 12 dB/Oktave sind zwar dämpfungswirksam, aber verursachen auch eine Phasenverschiebung von ca. 20° bei 50 Hz.

Nachfolgend einige Dimensionierungsbeispiele.



Aus der Betrachtung der vorstehenden Skizzen resultieren einige Dimensionierungseinschränkungen, die bei der praktischen Umsetzung der Tiefpassfilter zu beachten sind. Voraussetzung dabei war, dass die Testfilter zunächst mit Bauteilen realisiert wurden, die im freien Handel verfügbar waren. Sonderanfertigungen wurden dazu nicht in Auftrag gegeben.

Als Dimensionierungsziel sollte die erreichte -3dB Eckfrequenz möglichst nahe an der dritten Harmonischen von 150 Hz liegen und einen möglichst geringen Phasenverschiebewinkel bei der Betriebsfrequenz von 50 Hz aufweisen.

Die am Filtereingang anliegende Leiter- Erdspannung der Spannungswandler von $100 \text{ V} / \sqrt{3} = 57,8 \text{ V}$ treibt einen sogenannten Querstrom durch die Induktivität und den Kondensator. Vom Hersteller der Induktivität wird dazu ein max. Strom von 40 mA erlaubt.

Daraus ergeben sich bereits folgende Einschränkungen. TP1 kommt nur bedingt in Frage, weil dessen -3dB- Eckfrequenz zu weit von der dritten Harmonischen entfernt ist. Falls höherfrequente Harmonische gedämpft werden sollen kann TP1 eingesetzt werden.

TP3 kommt ebenfalls nicht in Frage, weil der durch die Induktivität fließende Strom bereits 60 mA erreicht und damit deutlich den erlaubten Strom von max. 40 mA übersteigt.

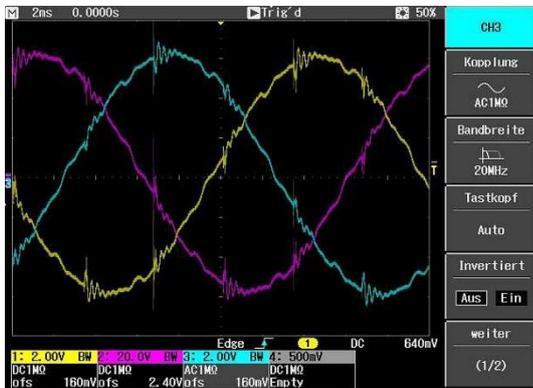
Um den Einfluss der systembedingten Phasenverschiebung dieser Tiefpassfilter zu eliminieren, sollten diese theoretisch an den Eingängen der Spannungs- und Strom- Istwerte gleichermaßen vorhanden sein, damit keine Differenzwinkel wirksam werden, die zur falschen P, - Q- und cosphi- Berechnung im Erregersystem führen.

Auf Grund der unterschiedlichen Eingangsimpedanzen beider Istwert- Eingänge ist diese Forderung physikalisch nicht umsetzbar. Beispielsweise beträgt am Digureg- Erregersystem die Eingangsimpedanz der Spannungs- Istwerte 116 k Ω und die der Stromeingänge 0,25 Ω . Somit ist eine Tiefpass- Struktur an den Stromeingängen physikalisch ausgeschlossen.

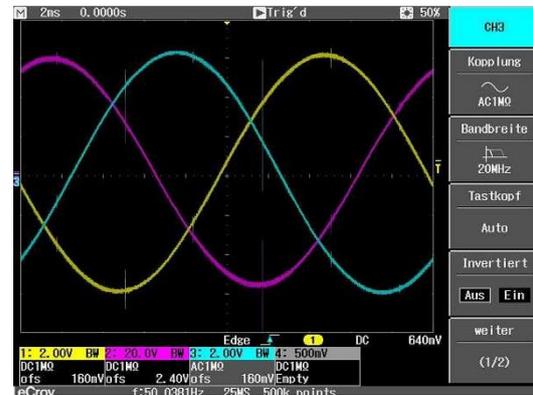
Bei den T400 Erregersystemen der Siemens AG konnten die TP- Filter direkt vor den AD- Wandlern beider Istwerte eingefügt werden, da die Eingangsimpedanzen aller AD- Wandler gleich waren.

Dieses Verfahren wurde von mir erfolgreich an einem Thyristor- Erregersystem in einem Lauf- Wasserkraftwerk an der Ruhr eingesetzt. Die nachfolgenden Bilder zeigen den Spannungs- Istwert- Verlauf vor und nach den Tiefpassfiltern.

Vor dem TP- Filter



Nach dem TP- Filter



Wie bereits vorstehend ausgeführt, unterscheiden sich die Eingangs- Impedanzen der Spannungs- und Strom- Eingänge an den heutigen Kompakt-Erregersystemen ca. um den Faktor 10^5 oder mehr, so dass für die Strom- und Spannungs- Eingänge kein gemeinsamer TP- Filtertyp mehr zur Anwendung kommen kann.

Ein alternativer Vorschlag meinerseits wäre, die dämpfende Wirkung für bestimmte ganzzahlige Harmonische der Grundwelle, durch einen Trenntrafo mit der Schaltgruppe Dd0, zwischen den Spannungswandlern und den Spannungs- Istwert- Eingängen des Erregersystems anzuordnen.

Aus der Theorie ist bekannt, dass harmonische Frequenzen, deren Ordnungszahlen durch drei teilbar sind, einen in Dd0 geschalteten Trenntrafo nicht durchlaufen können.

Durch das Einfügen von entsprechenden Zwischenwandlern, mit denen diese Strukturen verwirklicht werden können, lassen sich beispielsweise harmonische Oberschwingungen der Ordnungszahlen 3. 6. 9. 12. 15. usw. möglicherweise vom U- Istwert- Eingang des Erregersystems fernhalten, oder wenigstens in der Amplitude dämpfen.

Alle harmonischen Frequenzen, die nicht durch drei teilbar sind, durchlaufen leider den Dd0- Trenntrafo ungehindert.

Werden also bei einer zwingend durchzuführenden Oberschwingungsanalyse harmonische Frequenzen detektiert, deren Ordnungszahlen durch drei teilbar sind, so könnten die Amplituden dieser Frequenzen durch eine Trenntrafo- Baugruppe in der Schaltgruppe Dd0 gedämpft werden.

Harmonische mit höheren Ordnungszahlen, wie 15. 17. Oder 19. könnten zusätzlich mit einem nachgeschalteten LC- Tiefpass in ihren Amplitudenbeträgen reduziert werden.

Durch die serielle Kombination einer Dd0- Baugruppe mit einem LC- Tiefpass kann der Tiefpass auf die Dämpfung der höheren Harmonischen abgestimmt werden. Dadurch wird ein größerer Frequenzabstand zur Grundwelle, der 1. Harmonischen, erreicht und somit die Phasenbeeinflussung des 50 Hz Spannungs- Istwertes in der Praxis auf ein vertretbares Maß begrenzt.

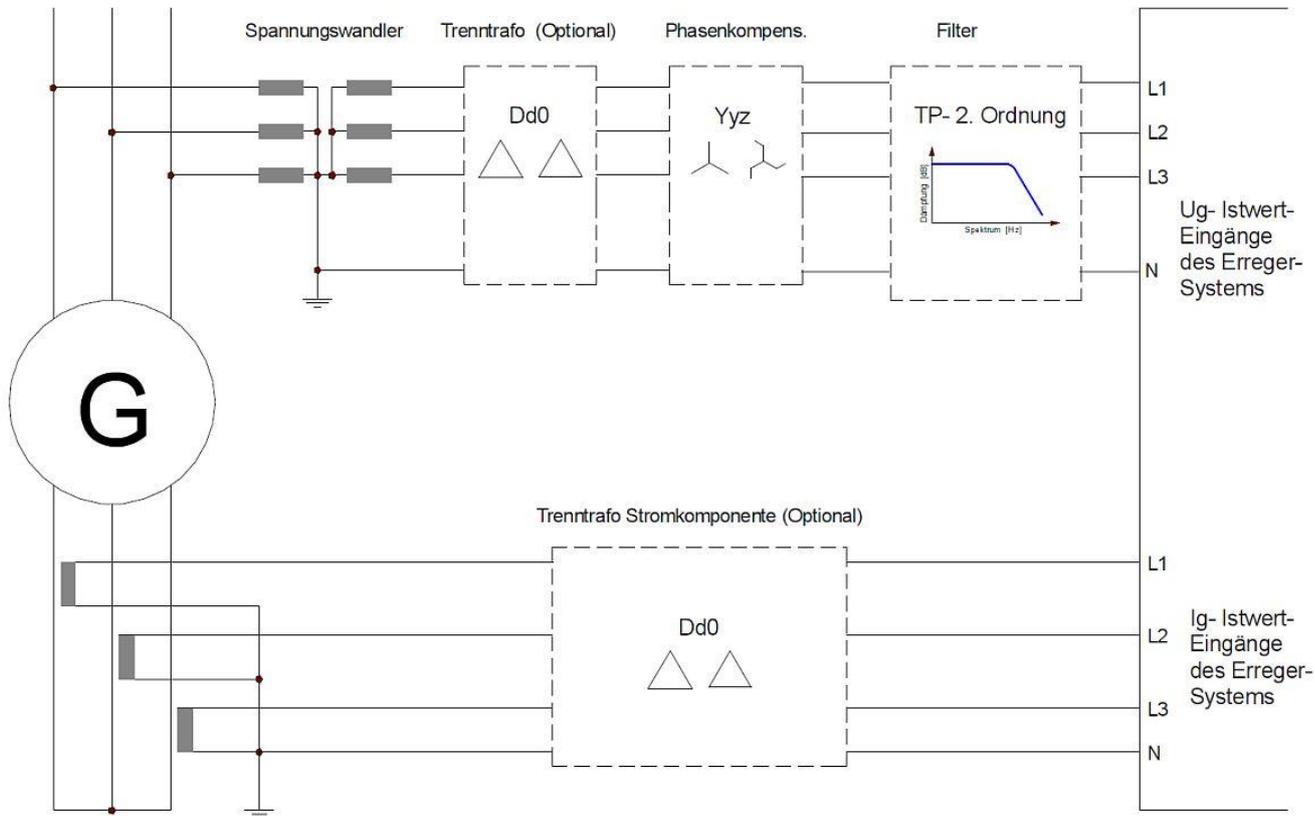
Auch wenn die Eckfrequenz des Tiefpasses auf die Harmonischen mit höheren Ordnungszahlen abgestimmt ist, verursacht dieser bei der Betriebsfrequenz von 50 Hz noch eine Phasenverschiebung von $8 - 10^\circ$ gegenüber dem Strom- Istwert. Durch die Anwendung einer „Zickzack- Schaltung“ kann theoretisch und auch praktisch dieser Phasenfehler kompensiert werden.

Das Prinzip beruht darauf, dass der Spannungs- Istwert vor den Tiefpässen bereits mit einem positiven Phasenwinkel gegenüber dem Strom- Istwert verschoben wird. Durch die anschließende negative Verschiebung des Phasenwinkels kann damit der gesamte wirksame Phasenwinkel zwischen den Spannungswandler- Ausgängen und den Spannungs- Istwert- Eingängen des Erregerstroms, zu Null kompensiert werden.

Damit bleibt die Filterwirkung der Tiefpässe erhalten, ohne dass der P / Q / Alpha- Algorithmus im Erregersystem falsche Leistungswerte berechnen kann.

Falls im Rahmen der Oberschwingungsanalyse auch der Strom- Istwert mit Oberschwingungen belastet sein sollte, kann auch dieser Istwert durch eine Dd0- Baugruppe, die jedoch aus Strom- Zwischenwandlern bestehen muss, positiv beeinflusst werden.

Die nachfolgende Skizze zeigt eine mögliche Variante.



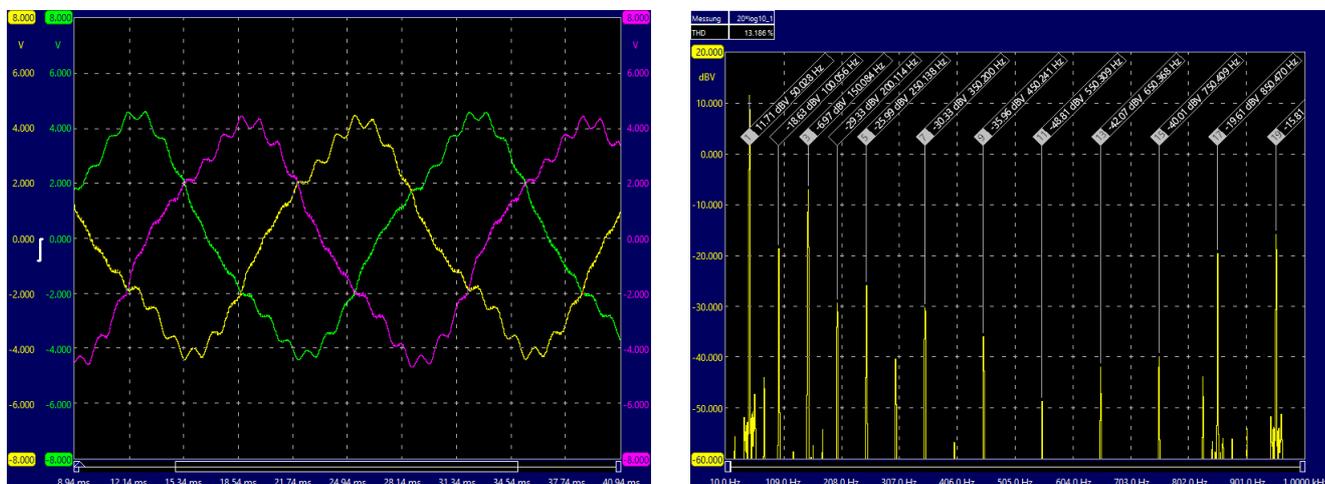
Durch diese kostengünstigen Zusatzbaugruppen könnten die Oberschwingungsanteile der Spannungs- und Strom- Istwerte in einem weiten Feld, mit vertretbarem Aufwand von den Istwert- Eingängen des Erregersystems zurückgehalten werden.

Zum praktischen Nachweis der vorstehend dargelegten theoretischen Dämpfungsmöglichkeiten von harmonischen Schwingungen, die den jeweiligen Istwerten Grundschwingung überlagert sind, erfolgten entsprechende Oberschwingungsanalysen an einem 15 kVA-Testgenerator, dessen Ständerspannungen besonders Oberschwingungsreich sind.

Leistungsdaten: 3 x 400 V, 21,7 A, 15 kVA, $\cos\phi_{hi} = 0,80$, 1500 U/min,
 Erregung: $I_{fn} = 5,7$ A, $I_{f0} = 2,25$ A, $I_{fk} = 3,2$ A

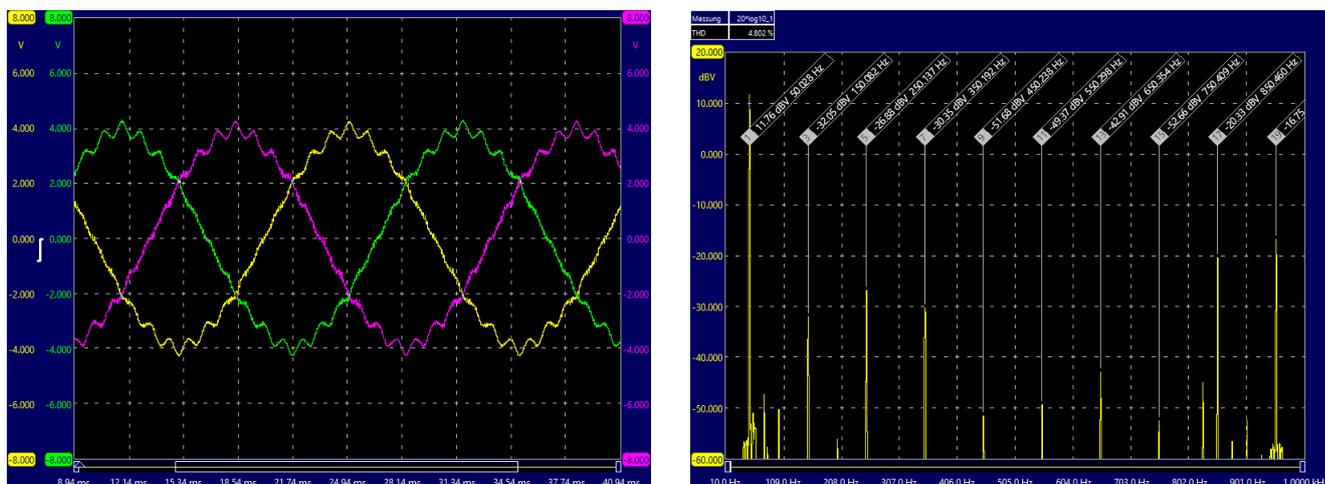
Zunächst erfolgte die Analyse der drei Leiter – Erdspannungen des Spannungs- Istwertes bei Nennspannungs- Erregung im Leerlauf.

Das linke Bild zeigt den Funktionsverlauf in der Zeitebene und das rechte Bild das Spektrum in der Frequenzebene.



Die Funktionsverläufe in der Zeitebene erinnern mehr an ein dreieckförmiges Signal als an eine Sinusform. Im rechten Bild werden die spektralen Inhalte dargestellt. Auffällig sind dabei die dominanten Amplituden der 2. 3. 5. 17. und 19. Harmonischen. Mit einem THD- Wert von 13,2% ist dieser deutlich größer als von den einschlägigen Standards erlaubt.

Die nächsten Bilder zeigen die Funktionsverläufe nach der zwischengeschalteten Dd0 Baugruppe.

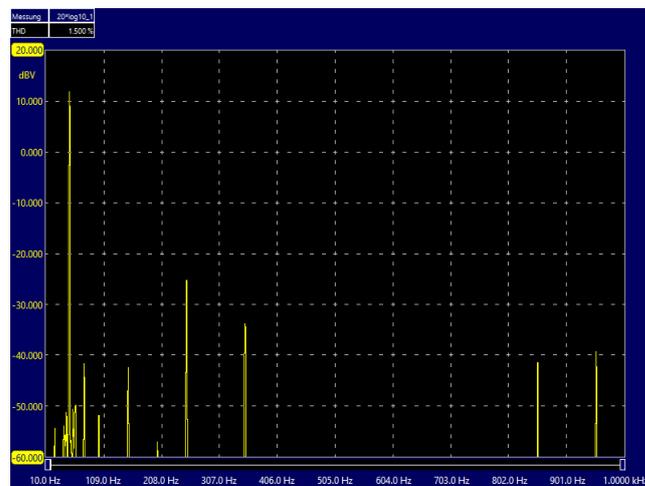
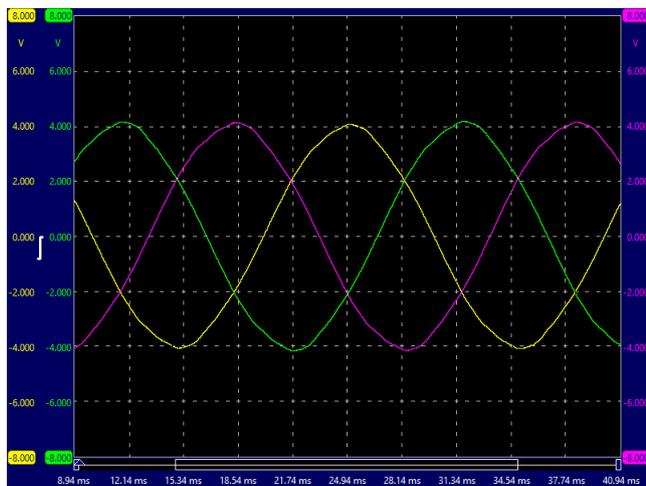


Die Funktionsverläufe in der Zeitebene ähneln im grundsätzlichen Verlauf schon mehr einer Sinusform. Auch in der spektralen Darstellung sind im Bereich der Harmonischen mit niedrigen Ordnungszahlen deutlich weniger Amplitudenanteile zu erkennen als im originalen Signal, ohne Dd0- Baugruppe. Auch der THD- Faktor wurde dadurch bereits von ehemals 13,2% auf 4,8% reduziert.

Die noch in der Zeitebene sichtbare Welligkeit wird vermutlich durch die nach wie vor vorhandenen 17. und 19. Harmonische verursacht.

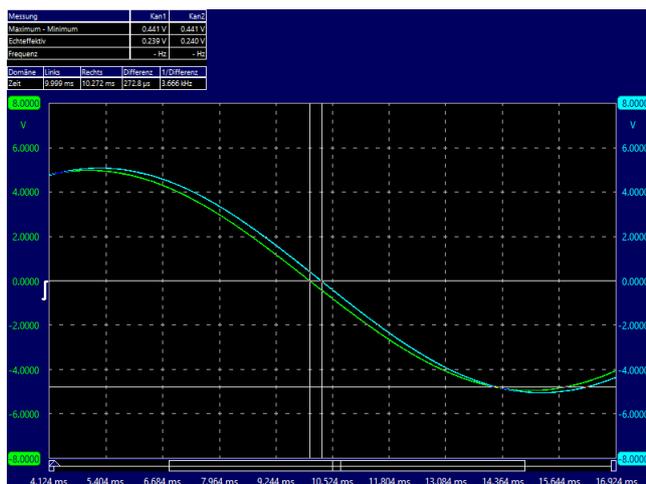
Da diese Harmonischen mit den Ordnungszahlen 17. Und 19. einen hinreichenden Abstand zur 1. Harmonischen, der 50 Hz Grundwelle aufweisen, erscheint das Nachschalten eines LC- Tiefpasses, in diesem Fall mit einer -3dB Eckfrequenz von 340 Hz, für erfolgversprechend. Durch den hinreichenden Frequenzabstand dürfte auch die Phasenbeeinflussung in akzeptablen Grenzen verbleiben.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Funktionsverläufe nach dem zusätzlich zur Dd0- Baugruppe eingefügten LC- Tiefpass mit einer Eckfrequenz von 340 Hz.



Die Funktionsverläufe in der Zeitebene enthalten kaum noch erkennbare Abweichungen von einer idealen Sinusform. Auch im spektralen Bereich zeigen die noch verbliebenen Oberschwingungen Amplitudenwerte im hundertstel Bereich der 50 Hz Grundschwingung.

Der THD- Faktor konnte durch die Kombination einer Dd0- mit einer TP- Baugruppe von ehemals 13,3% auf 1,5% verbessert werden.



Das nebenstehende Bild zeigt, die durch den realisierten Tiefpass, mit einer -3dB Eckfrequenz von 340 Hz, verursachte Phasenverschiebung der 50 Hz Grundschwingung.

Aus der gemessenen Zeitdifferenz der Nulldurchgänge des TP- Ein- und Ausgangssignals von 272,8 μ s ergibt sich ein Winkelversatz von 4,9°. Dieser Winkel entspricht einem cosphi von 0,996.

Wenn also dem Erregersystem ein cosphi- Sollwert von 1,0 vorgegeben wird, würde das Erregersystem einen tatsächlichen cosphi- Istwert im angeschlossenen Anlagenteil von 0,996 einregeln.

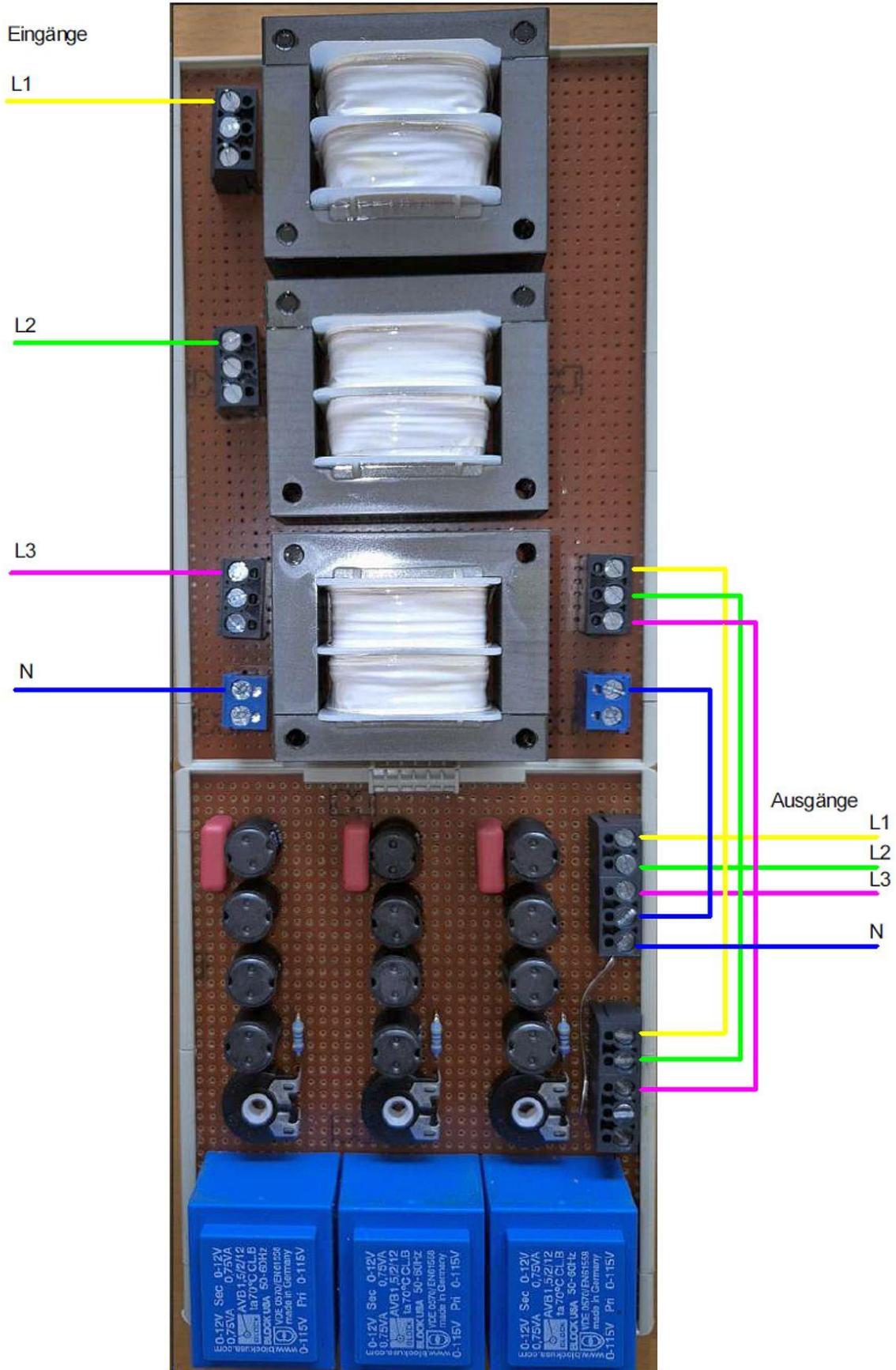
Aus der Erfahrung wissen wir, dass diese Differenz im praktischen Betrieb trotzdem eine wesentliche Rolle spielt.

Damit ist der zunächst theoretische Gedankenansatz, einen überschwingungsbelasteten Spannungs- Istwert durch die Serienschaltung einer Dd0- Struktur mit einem LC- Tiefpass zu filtern, in der Praxis durch die vorstehenden Messergebnisse an einer Synchronmaschine mit positivem Erfolg nachgewiesen.

Um die verbliebenen Phasenabweichung im Spannungs- Istwert vollständig zu kompensieren, wurde die Tiefpassbaugruppe noch mit der vorstehend erwähnten Zick- Zack- Schaltung, bestehend aus drei Stück Kleintransformatoren erweitert. Mit den erkennbaren drei Einstellreglern war es möglich, die verbliebenen Phasenfehler tatsächlich auf Null zu kompensieren.

Um den experimentellen Probeaufbau so zu modifizieren, dass dieser auch praxistauglich vor Ort im Schaltschrank eines Erregersystems montiert werden kann, wurden die einzelnen Bauteile auf lochraster- Platinen angeordnet, die ihrerseits in Hutschienenträgern arretiert sind.

Auf der Seite ist das aufgebaute Fertigerät einschließlich der Anschluss- Skizze dargestellt. Bei bestehendem Bedarf können vom Ingenieurbüro John geringe Stückzahlen dieser Dämpfungsbaugruppe gefertigt werden.

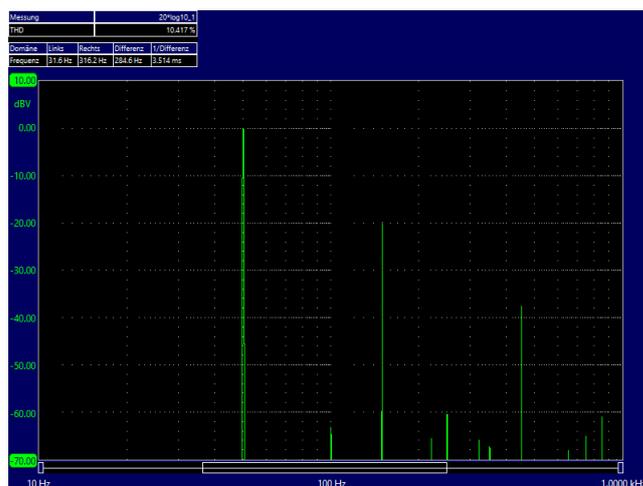
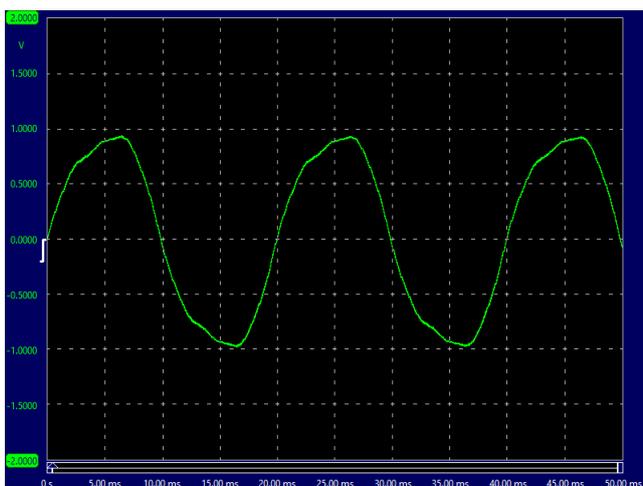


5. Versuchsaufbau zur Generierung von Spannungssignalen mit beliebigen THD- Werten

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, welche Frequenzen und Amplituden von Harmonischen, welche Kurvenform des Summensignals ergeben, wurde der nachfolgend abgebildete Mess- Aufbau entwickelt. Die in der Bildmitte abgebildete Summier- Einheit verfügt über vier, voneinander entkoppelte Eingänge. Damit kann ein THD- Signal aus vier Harmonischen beliebiger Frequenz und Amplitude generiert werden. In dem nachgeschalteten Oszilloskop vom Typ HS3, kann das generierte Summensignal, einmal in der Zeitebene als Funktionsverlauf und einmal in der Frequenzebene, als Spektrum dargestellt werden.



Nachfolgende Screenshots zeigen die beiden oben erwähnten Darstellungsformen. Das linke Bild entspricht dem Funktionsverlauf des Summensignals in der Zeitebene und das rechte Bild die Darstellung in der Frequenzebene. Das Summensignal setzt sich in diesem Fall aus Frequenzen der ersten Harmonischen 50 Hz als Grundwelle mit einer Amplitude von 0,0 dB, der dritten Harmonischen 150 Hz mit einer Amplitude von -20,0 dB und der neunten Harmonischen mit einer Amplitude von -37,8 dB zusammen. Gleichzeitig berechnet das HS3 auch den THD- Faktor aus den dargestellten spektralen Einzelfrequenzen mit $THD = 10,42\%$.



Als nächstes wird versucht, aus den abgelesenen spektralen Anteilen, den THD- Wert mathematisch selbst zu bestimmen. Dazu müssen zunächst die Spannungen der einzelnen Harmonischen aus den dB- Dämpfungswerten, durch folgende mathematische Beziehung berechnet werden.

$$\text{Spannungsverhältnis} = 10^{\left(\frac{\text{dB Wert}}{20}\right)}$$

Der interne Algorithmus des HS3 ordnet einem dB- Wert von 0,0 eine Spannung von 0,707 V an seinem Eingang zu, so dass alle weiteren Harmonischen an diesem Verhältnis skaliert werden müssen. Damit ergeben sich folgende Spannungswerte aus den vorstehenden Screenshots.

- 1. Harmonische (Grundwelle): $0,0 \text{ dB} = 10^{\left(\frac{0,0 \text{ dB}}{20}\right)} \times 0,707 \text{ V} = \underline{0,707 \text{ V rms}}$
- 3. Harmonische (Grundwelle): $-20,0 \text{ dB} = 10^{\left(\frac{-20,0 \text{ dB}}{20}\right)} \times 0,707 \text{ V} = \underline{0,0707 \text{ V rms}}$
- 9. Harmonische (Grundwelle): $-37,8 \text{ dB} = 10^{\left(\frac{-37,8 \text{ dB}}{20}\right)} \times 0,707 \text{ V} = \underline{0,00911 \text{ V rms}}$

Aus den vorstehend berechneten Spannungswerten der drei Harmonischen kann nun der THD- Faktor berechnet werden.

$$\text{THD [\%]} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{0,0707^2 + 0,00911^2}}{0,707} \times 100 = 10,08 \%$$

Unter Beachtung, dass die weiteren im Spektrum angezeigten Harmonischen, bei der vorstehenden Rechnung nicht berücksichtigt wurden, entspricht das Rechenergebnis von 10,08% in ziemlicher Näherung dem vom HS3 angezeigten THD- Wert von 10,42%.

Damit ist bewiesen, dass die Messtechnik zur Oberschwingungsanalyse und zur Bestimmung des THD- Faktors in vollem Umfang einsetzbar ist.