



Thema: Die Diodenausfallüberwachung (DÜW), Wirkungsweise und Anwendung  
Subject:

Datum: 01.03.2016  
Date:

### 1. Allgemeines

Es ist Stand der Technik, dass Elektroenergie- Erzeuger überwiegend mit einer so genannten RG- Erregung ausgestattet sind. Die von den Synchronmaschinen benötigte Erregerleistung wird dabei nicht mehr durch Gleichstrom- Kommutator-Maschinen erzeugt, sondern durch Erregermaschinen bei denen der Kommutator durch eine rotierende Gleichrichterbrücke ersetzt wurde. Dadurch entfällt nicht nur der enorme Wartungsaufwand für die Pflege der Kommutatoroberfläche und der darauf laufenden Kohlebürsten, sondern auch das Schleifring- System der Synchronmaschine selbst, über das die Erregerleistung dem eigentlichen Läufer der Synchronmaschine zugeführt werden musste.

Das Prinzip der RG- Erregung ermöglicht somit die Herstellung von Energie- Erzeugungseinheiten, die nahezu als wartungsfrei bezeichnet werden können.

Die technischen Grenzen werden beim heutigen Stand der verfügbaren Leistungselektronischen Baugruppen nicht mehr durch die Leistungsgröße des Energieerzeugers bestimmt, sondern durch dessen Anwendung oder konstruktiver Ausführung. Beispielsweise sind große Synchronmaschinen, die von Wasserturbinen angetrieben werden, extreme Langsamläufer mit relativ großen Durchmessern. Elektromechanische Erregermaschinen, ob mit Kommutator oder rotierenden Diodenbrücken, müssten dann wegen der niedrigen Drehzahlen ebenfalls mit großen Durchmessern ausgelegt werden, so dass es günstiger erscheint, diese Generatoren durch statische Erregersysteme zu versorgen.

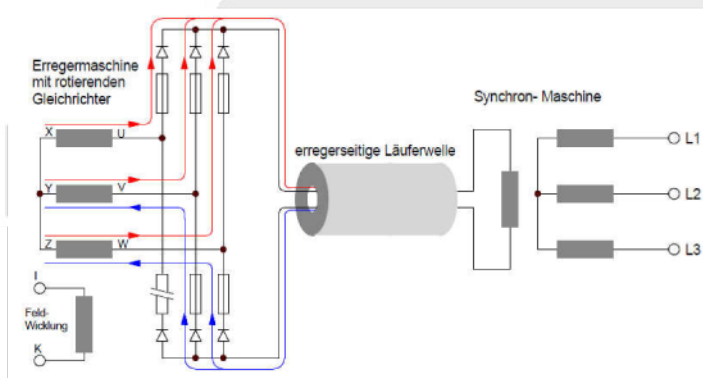
Weiterhin ermöglicht das Prinzip einer RG- Erregung kein Anfahren des Maschinensatzes durch einen so genannten Anfahrumschalter. Dazu muss die Synchronmaschine bereits im Stillstand erregt werden, damit das erforderliche Anfahr- Drehmoment aufgebracht werden kann.

Als letztes Beispiel möchte ich an dieser Stelle noch eine Gruppe von Elektroenergie- Erzeugern nennen, die häufig auftretende Laststöße abfangen und ausregeln müssen. Typische Vertreter dafür sind Turbosätze in Industriekraftwerken von Stahl- und Walzwerken.

Die an derartigen Aufstellungsorten erforderlichen regeldynamischen Anforderungen sind nur mit statischen Erregersystemen zu erreichen.

Abgesehen von den vorstehend genannten Sonderanwendungen stellt das Prinzip der RG- Erregung für den normalen Betrieb in Grundlast- und Industriekraftwerken eine ideale Technologie dar, um einen Turbosatz mit einem Minimum an Wartungsaufwand zu betreiben.

### 2. Elektrisches Wirkprinzip eines RG- erregten Turbosatzes und der Dioden- Fehlererkennung



Das nebenstehende Bild zeigt den Signalfluss im primären und sekundären Erregerkreis einer RG- erregten Synchronmaschine. Die Ankerwicklung der Erreger-Maschine speist dabei eine aus Dioden bestehende Sechspuls- Brückenschaltung, die ebenfalls mit der Läuferwicklung rotiert.

Die Gleichstromseite der Brückenschaltung ist durch die Welle hindurch, direkt mit der Läuferwicklung der Synchronmaschine verbunden.

Mit der Einführung dieser Technologie wurde zunächst jede Diode mit einer eigenen Halbleitersicherung versehen, die im Fehlerfall einer Diode, in Form eines internen Kurzschlusses abschmilzt und dadurch eine thermische Überlastung des ebenfalls kurzgeschlossene Wicklungsteil der Erregermaschine verhindert.

Unabhängig vom wirklichen Dioden- Fehler, Kurzschluss oder Unterbrechung, ist durch das Abschmelzen der Sicherung immer nur der Fehlerfall „Dioden- Unterbrechung“ im System wirksam. Dieser Fehlerfall führt im Betrieb des Generators lediglich zu einer Reduzierung von ca. 16 - 20% der Erregerspannung  $U_i$ , die aber vom Spannungsregler mühelos ausgeglichen und somit der Turbosatz zunächst für eine beschränkte Zeit weiter betrieben werden kann. Eine sofortige Zwangsabschaltung des Turbosatzes ist bei Eintritt einer Dioden- Unterbrechung demzufolge nicht zwingend erforderlich.

Eine Dioden- Ausfallüberwachung konnte an RG- Läufern, deren Dioden- Brücke mit zusätzlichen Sicherungen bestückt sind, in einfacher Weise mit einem Stroboskop erfolgen. Die Sicherungen waren dabei nummeriert und ein abgeschmolzener Zustand wurde an der Sicherung optisch signalisiert, so dass im laufenden Maschinenbetrieb die Zustände der Sicherungen, stellvertretend für ihre zugeordneten Dioden, jeder Zeit mit geringem Aufwand durch ein Kontrollfenster überprüft werden konnten.

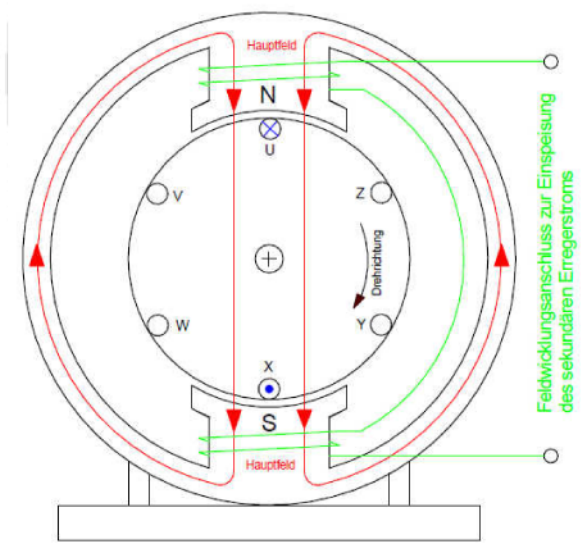
Im Verlauf der weiteren Entwicklung der RG- Erregertechnologie wurde bei Turbosätzen im kleinen und mittleren Leistungsbereich, an denen keine Parallelschaltung von Dioden- Brücken erforderlich waren, auf den Einbau von Schmelz- Sicherungen in die rotierende Dioden- Brücke verzichtet.

Damit musste natürlich auch nach einer anderen Methode zur Dioden- Ausfallerkennung gesucht werden.

Verdeutlichen wir uns dazu nochmal den Teil der Ankerwicklung und der Dioden- Brücke in der auf Seite 1 dargestellte Skizze. Liegt kein Dioden- oder Sicherungsfehler vor, werden die drei Phasen der Ankerwicklung durch die Dioden- Brücke symmetrisch belastet, d.h. die vektorielle Summe aller Ankerströme ist null.

Im Fall einer Dioden- oder Sicherungsunterbrechung kann, wie in der Skizze dargestellt, im Wicklungsstrang U- X kein Wechselstrom mehr fließen, sondern nur noch ein Gleichstromanteil.

Feldverteilung in einer Erregermaschine



Im nebenstehenden Bild ist dieser Gleichstromanteil durch das Kreuz- und Punktsymbol im Wicklungsstrang U – X dargestellt, der natürlich auch sein eigenes Magnetfeld erzeugt.

Dieses mit der Läuferdrehzahl umlaufende magnetische Gleichfeld induziert wiederum beim Passieren der einzelnen Hauptpole eine Spannung in der Hauptfeldwicklung mit der Frequenz  $f = \text{Drehzahl} \times \text{Polpaarzahl der Feldwicklung} / 60$ .

Der ebenfalls in der Feldwicklung fließende Erregerstrom  $I_e$  wird dadurch quasi mit der Spannung moduliert, die im Dioden- Fehlerfall durch den umlaufenden Gleichfeldanteil in den Feldspulen induziert wird, d.h. die Information über einen evtl. vorliegenden Dioden- Fehler ist in dem Gesamtsignal des Erregerstroms  $I_e$  als spektraler Frequenzanteil enthalten und muss nur in geeigneter Weise detektiert werden.

Aus diesem Zusammenhang ergeben sich zur wirksamen und sicheren Detektierung eines Dioden- Fehlers folgende Grundsätze:

- Die Information über das Vorhandensein eines Dioden- Fehlers liegt nur in dem Vorhandensein einer bestimmten Frequenz  $f = n \times 2P / 60$  im spektralen Gesamtgemisch, der in das Verbindungskabel zwischen dem Erregersystem und der Feldwicklung hinein induzierten EMV- Störungen. Eine fehlerfreie Detektierung eines Dioden- Fehlers setzt daher zwingend eine frequenzselektive Bewertung des Erregerstroms  $I_e$  voraus. Nicht frequenzselektive Auswerteverfahren sind daher ungeeignet und erfüllen ihre Aufgabe nur zum Teil.
- Der spektrale Anteil des Fehlersignals ist vom Betrag des arithmetischen Mittelwertes abhängig und muss daher an diesem relativiert werden, um ein dimensionsfreies Verhältnis in pu oder Prozent zu erhalten.

Einige Hersteller, von DÜW- Systemen ignorieren bis heute die vorstehenden Grundsätze und bieten Ihren Kunden nicht selektiv arbeitende Systeme an, die eine DÜW- Funktion daher gar nicht oder nur teilweise erfüllen können.

### 3. Grenzwerte zur Abschaltung eines Turbosatzes bei eingetretenen Dioden- Fehlern

Jedes System zur Überwachung einer bestimmten Prozessgröße benötigt die Vorgabe von Grenzwerten. Sollte die Prozessgröße diese Grenzwerte über- oder auch unterschreiten, muss das Überwachungssystem eine entsprechende Information darüber generieren und als Binärsignale bereitstellen.

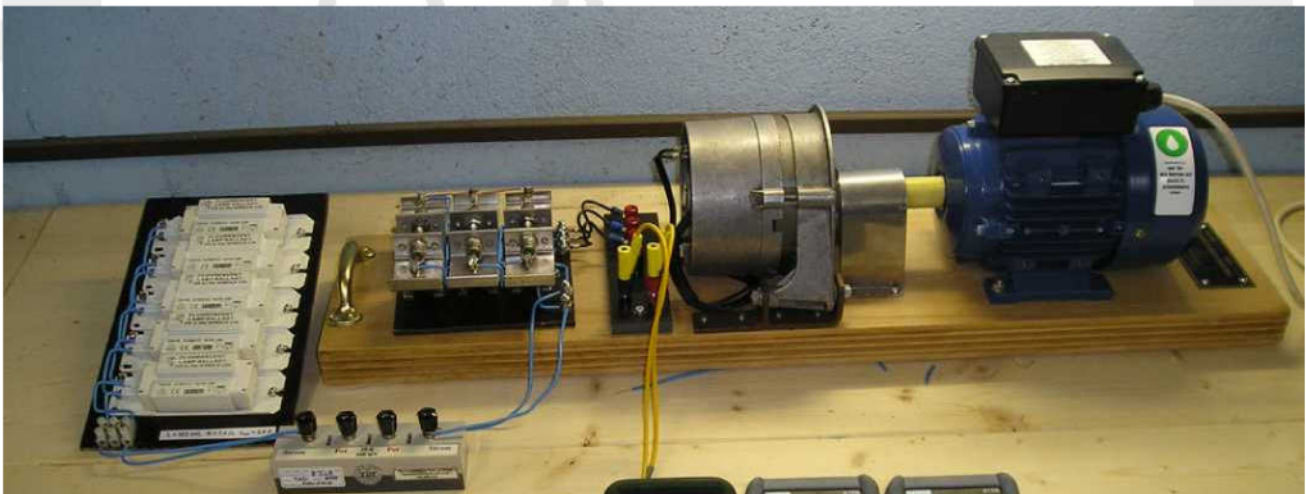
Auch für eine Dioden- Überwachung müssen Grenzwerte definiert werden, die bei Eintreten einer Dioden- Unterbrechung oder eines Dioden- Kurzschlusses zu erwarten sind.

In den 60er Jahren erfolgten auf den Prüfständen im Siemens Dynamowerk und im Siemens Werk Mülheim Versuche und oszillografische Messungen an dafür präparierten RG- Erregermaschinen. Gemäß dem damaligen Stand der Messtechnik wurden alle Oszillogramme mit sogenannten Schleifenoszillografen aufgenommen, deren Schriebe wegen des dabei verwendeten Fotopapiers, heute leider nicht mehr lesbar sind. Auch in der einschlägigen Literatur sind zu Grenzwerten im Dioden- Fehlerfall nur wenige und zum Teil widersprüchliche Angaben zu finden.

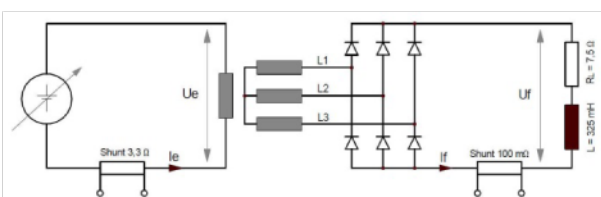
1997 hatte ich als damaliger Mitarbeiter des Siemenswerkes Erfurt, im gemeinsamen Interesse mit der Erregerfachabteilung in Erlangen, das Thema erneut aufgegriffen und mich bemüht, auf dem Prüfstand des Siemens Werkes Erfurt diese Versuche zu wiederholen um definitive Grenzwerte bei auftretenden Dioden- Fehlern zu erhalten.

Obwohl auf der fachlichen Ebene dazu ein gemeinsames Interesse bestand, konnten sich die Kaufleute beider Bereiche über die Kostenverteilung nicht einigen, so dass wieder einmal die technischen Notwendigkeiten auf der Strecke blieben und diese Versuche leider nicht stattfinden konnten.

Wenn also Versuche an den realen Objekten nicht möglich sind, kann man nur versuchen, ein Simulationsmodell zu konstruieren, welches in seinen technischen Parametern der Realität soweit wie möglich entspricht, um an diesem die benötigten Versuchsergebnisse zu erhalten. Das nachfolgende Bild zeigt das von mir konzipierte und von der Fa. Lieder & Schülke GmbH gefertigte Model eines RG- Erreger- Systems.

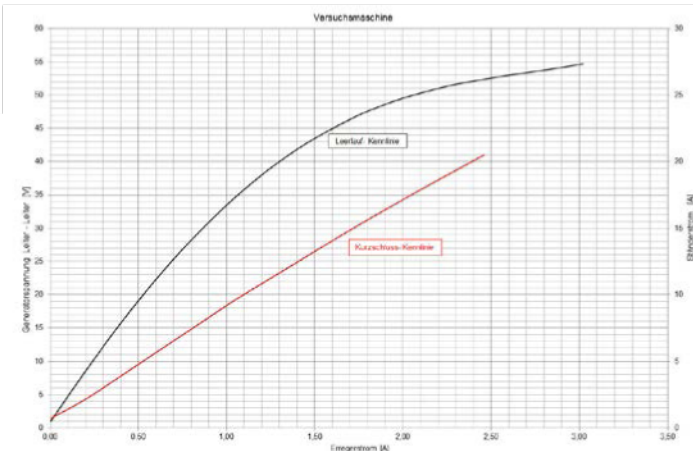


Das Model besteht aus einer 24 V Drehstromlichtmaschine als Simulation einer Erregermaschine, die mit einem 2 poligen Drehstrom- Antriebsmotor flexibel gekuppelt ist. Da es sich bei der Lichtmaschine um eine 10 polige Innenpolmaschine handelt, ist die Sechspuls- Brückenschaltung nicht rotierend und konnte im Bild, links neben der Lichtmaschine angeordnet werden, so dass die Simulation einer Dioden- Unterbrechung oder eines Dioden- Kurzschlusses relativ einfach zu realisieren war. Am linken Bildrand befindet sich die aus 10 parallelgeschalteten Leuchtstofflampen- Vorschaltgeräten bestehende Last mit den Parametern  $7,5 \Omega$  und  $325 \text{ mH}$ . Diese Last ist an der DC- Seite der Sechspuls- Brücke angeschlossen und simuliert die Rotor- Wicklung des eigentlichen Kraftwerksgenerators. Am unteren Bildrand ist ein Shunt sichtbar mit dem der Laststrom, in Realität der Erregerstrom  $I_f$  gemessen wurde.



Nebenstehend die gesamte Messschaltung mit der die nachfolgenden Oszillogramme aufgenommen wurden.

Da zu dieser Drehstromlichtmaschine nur die Ladespannung des ehemaligen Bordnetzes von 24 V bekannt war, erfolgte zunächst die Aufnahme der Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie, um den Sättigungsbeginn der Maschine einordnen zu können.



Die nebenstehenden Kennlinien zeigen keine abnormalen Verläufe, so dass bei den durchgeführten Versuchen zunächst realitätsnahe Ergebnisse zu erwarten waren.

Mit einer Läufer- Polzahl von  $2P = 5$  und einer Antriebs-Drehzahl von ca. 2950 U/min ergibt sich eine Ausgangs-Frequenz der Ankerspannung von  $2950 \times 5 / 60 = 246$  Hz. Auch diese Speisefrequenz der Sechspulsbrücke ist mit denen von realen RG- Erregermaschinen nahezu identisch.

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden alle mit dem gleichen sekundären Erregerstrom  $I_e$  von 0,42 A d.h. im geradlinigen Teil der Leerlaufkennlinie durchgeführt.



Das nebenstehende Oszillogramm zeigt die Brücken-Ausgangsspannung  $U_f$  (grün) mit einem Mittelwert von 14,7 V und einen Laststrom  $I_f$  (hellblau) von 1,98 A über die vorstehend beschriebene Last von ca. 7,5  $\Omega$ .

Sinn dieses Oszillogramms ist der Nachweis, dass alle sechs Dioden in den drei Brücken-zweigen in Ordnung und an der Gleichrichtung beteiligt sind.

Mit einer Periodendauer der Welligkeit von 673  $\mu$ s ergibt sich eine Gleichrichter- Oberwelle von 1486 Hz, was einer Speisefrequenz von  $1486 / 6 = 248$  Hz entspricht.



Das nebenstehende Oszillogramm zeigt die Spannungs- und Stromverhältnisse bei Unterbrechung einer Diode. Der Mittelwert der Brückenausgangsspannung  $U_f$  (grün) wurde dabei mit 11,69 V und der Ausgangsstrom  $I_f$  (hellblau) mit 1,64 A gemessen. Da der Stromverlauf kein „Lücken“ aufweist, ist die Last- Induktivität von 325 mH für diese Versuche ausreichend.

Das Versuchsergebnis zeigt, dass bei Eintritt einer Dioden- Unterbrechung, die Erregerspannung  $U_f$  bei gleichbleibenden sekundären Erregerstrom  $I_e$  auf ca. 80% des Fehlerfreien Zustandes zurückgeht.



Das nebenstehende Bild zeigt das Zeitsignal des sekundären Erregerstroms  $I_e$  an einem 3,3  $\Omega$  Shunt- Widerstand bei Unterbrechung einer Diode.

Die aufmodulierte DÜW- Größe ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Mit den am Shunt gemessenen Spannungen

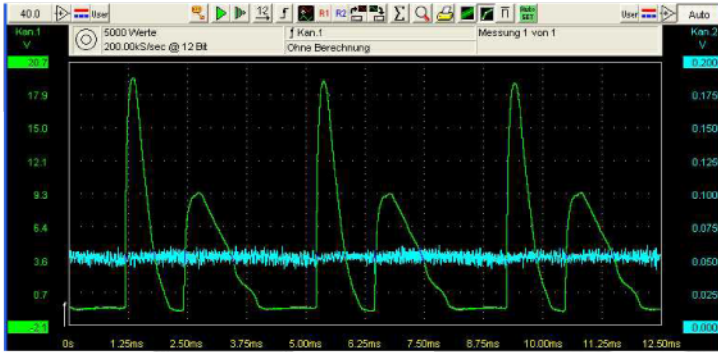
$$\begin{aligned} U_{I_e\text{-Shunt max.}} &= 1,550 \text{ V,} \\ U_{I_e\text{-Shunt min.}} &= 1,250 \text{ V,} \\ U_{I_e\text{-Shunt Mittelw.}} &= 1,407 \text{ V} \end{aligned}$$

ergibt sich ein prozentualer Ansprechwert für die DÜW- Einstellung im Unterbrechungsfall von:

$$\text{DÜW Unterbrech.} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{Mittelw.}}} = \frac{1,550 - 1,250}{1,407} = \mathbf{21,3\%}$$

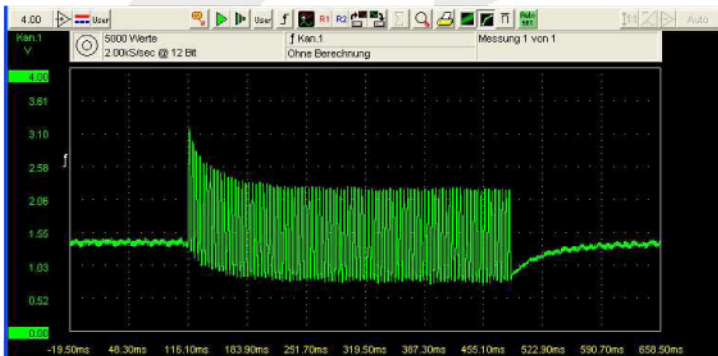
Wenn der Fehlerfall Dioden- Unterbrechung sicher erkannt werden soll, müsste der Einstellwert des DÜW-Parameters demzufolge 18 – 20% betragen.

Die nachfolgend dargestellten Oszillogramme beschreiben die Verhältnisse im primären Erregerkreis bei Eintritt eines Dioden-Kurzschlusses.



Im nebenstehenden Oszillogramm wurde die Brücken-Ausgangsspannung  $U_f$  (grün) mit 4,20 V und der Ausgangsstrom  $I_f$  (hellblau) mit 0,52 A gemessen. Da der Stromverlauf auch bei Dioden- Unterbrechung kein „Lücken“ aufweist zeigt, dass die Last- Induktivität von 325 mH auch für diesen Versuch ausreichend war.

Das Versuchsergebnis weist aus, dass bei Eintritt eines Dioden- Kurzschlusses, die Erregerspannung  $U_f$  bei gleichbleibenden sekundären Erregerstrom  $I_e$ , auf ca. 29% des Fehlerfreien Zustandes zurückgeht.



Das nebenstehende Bild zeigt das Zeitsignal des sekundären Erregerstroms  $I_e$  bei Eintritt eines Dioden-Kurzschlusses an einem 3,3  $\Omega$  Shunt- Widerstand. Die aufmodulierte DÜW- Größe ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Mit den am Shunt gemessenen Spannungen

$$\begin{aligned} U_{Ie\text{-Shunt max.}} &= 2,22 \text{ V,} \\ U_{Ie\text{-Shunt min.}} &= 0,78 \text{ V,} \\ U_{Ie\text{-Shunt Mittelw.}} &= 1,39 \text{ V} \end{aligned}$$

ergibt sich ein prozentualer Ansprechwert für die DÜW- Einstellung im Fall eines Dioden- Kurzschlusses von:

$$\text{DÜW Kurzschluss.} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{mittelw.}}} = \frac{2,22 - 0,78}{1,39} = \mathbf{103,6\%}$$

**Wenn der Fehlerfall Dioden- Kurzschluss sicher erkannt werden soll, müsste der Einstellwert des DÜW-Parameters demzufolge 80 – 100% betragen.**

Die vorstehenden Berechnungen zeigen, dass die unterschiedlichen Lastfälle auch im Dioden- Kurzschluss prinzipiell keinen Einfluss auf die fehlerbedingte Welligkeit des sekundären Erregerstromes  $I_e$  haben.

Die Auswerte- Einheit zur Erkennung eines Dioden- Fehlers muss also einerseits eine hinreichende Empfindlichkeit aufweisen, um ein DÜW- Signal im Unterbrechungsfall mit einer Welligkeit von ca. 20 % sicher zu detektieren und andererseits über einen relativ großen Dynamikbereich verfügen, um die bis zum Faktor 5 größeren Welligkeitsamplituden im Kurzschlussfall einer Diode sicher verarbeiten zu können.

Ohne eine frequenzselektive Erfassung und Auswertung ist eine sichere Fehlererkennung über diesen Dynamikbereich, unter Berücksichtigung der im Kraftwerksbereich vorhandenen EMV- Störungen, definitiv nicht zu erreichen.

Die vorstehenden Oszillogramme dokumentieren die Ereignisse im primären Erregerkreis in der Zeitebene bei Eintritt von Dioden- Fehlern im Unterbrechungs- und Kurzschlussfall.

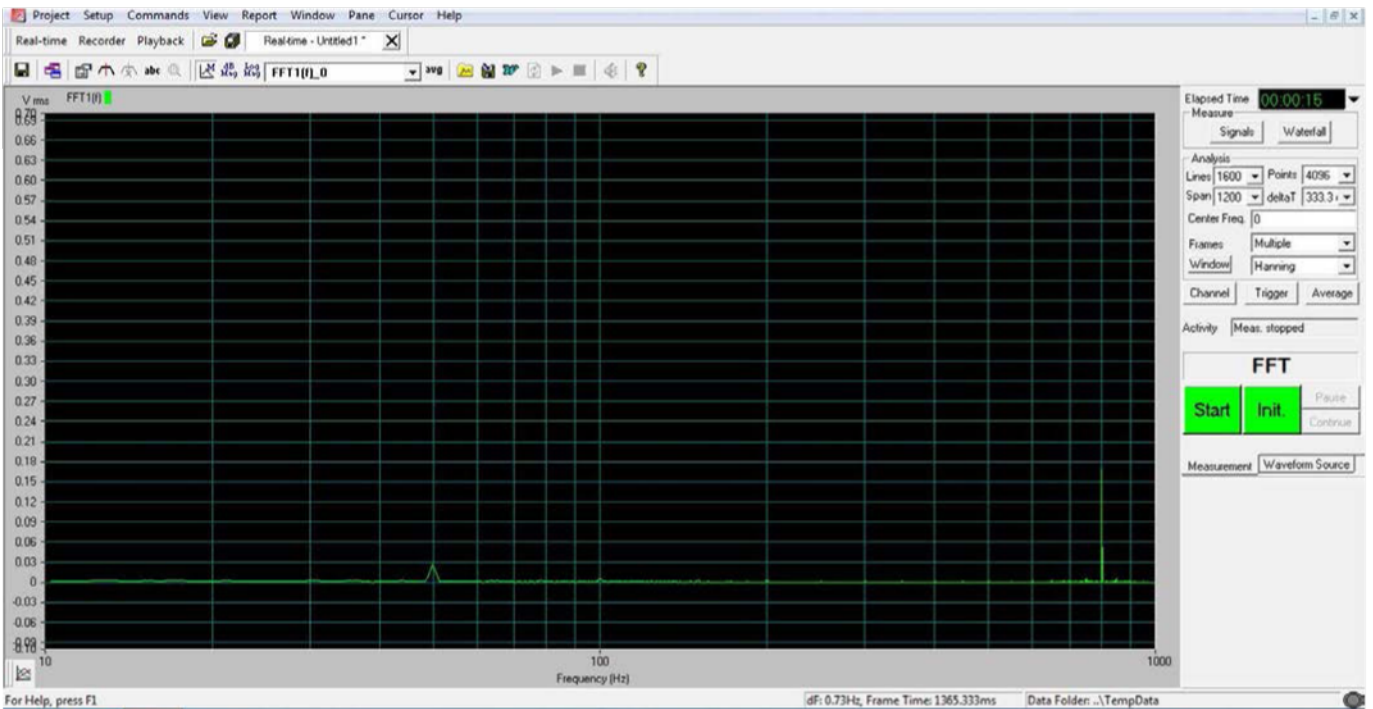
Da vorstehen auch mehrfach auf die Schmalbandigkeit der DÜW- Information hingewiesen wurde, möchte ich nachfolgend auch die Darstellung des Fehlersignals in der Frequenzebene ergänzen.

Die Aufnahmen der FFT- Analysen erfolgten mit einem 4 kanaligen FFT- Analysator, dem als Eingangssignal der Spannungsabfall des sekundären Erregerstroms  $I_e$  an einem Mess- Shunt von 3,3  $\Omega$  zugeführt wurde.

Um die Versuchsbedingungen noch realistischer zu gestalten, wurde die Feldwicklung des RG- Erregers- Modells nicht wie zuvor aus einer regelbaren Gleichspannungsquelle sondern aus einem Digureg-1 Kompakt-Erregersystem, in der Betriebsart ECR gespeist.

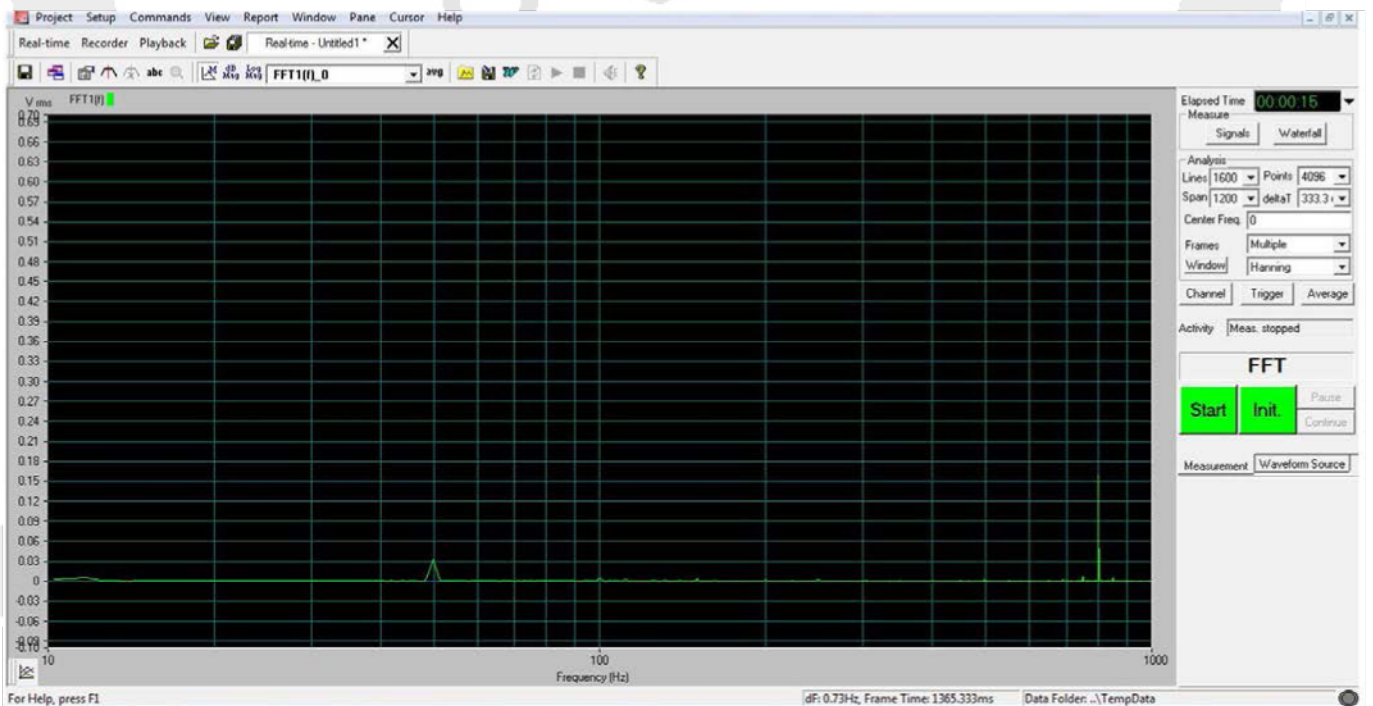
Nachfolgend sind die Screenshots der FFT- Analysen bei unterschiedlichen Dioden- Fehlerzuständen dargestellt.

Feldstrom  $I_e = 0,4$  A aus einem Digireg-1, Maschine im Stillstand,  $n = 0$ .



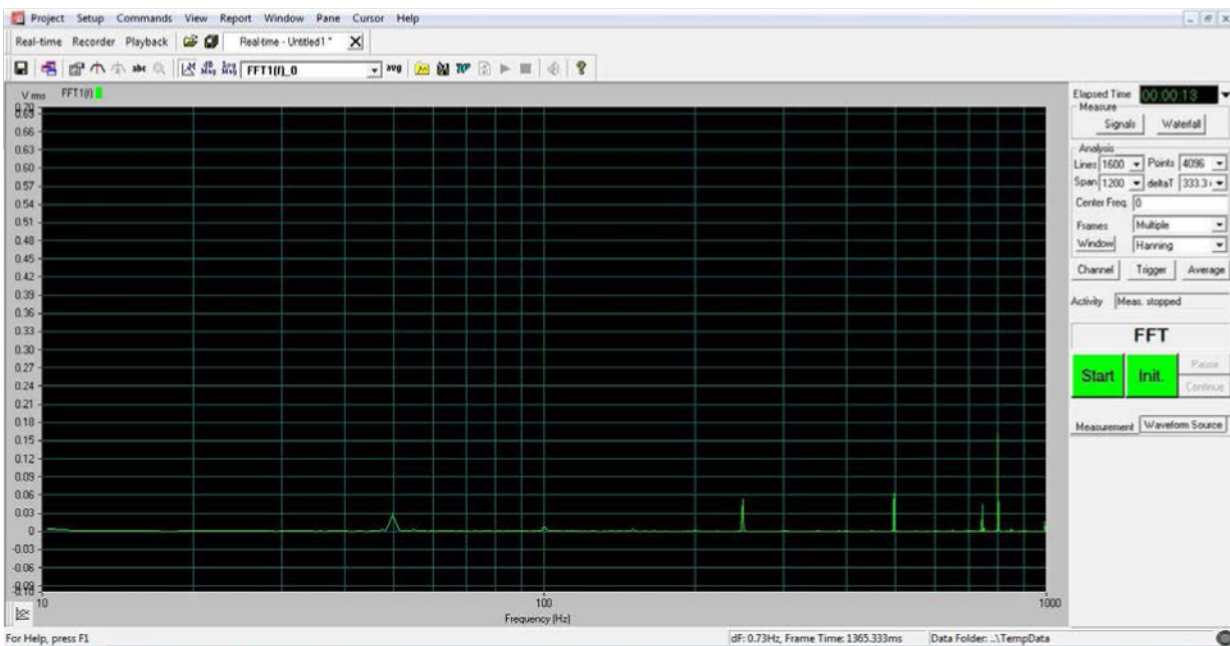
Das vorstehende Bild zeigt, dass der Messplatz relativ EMV- frei ist. Lediglich die 800 Hz Chopperfrequenz des Digireg ist mit geringem Amplitudenbetrag vorhanden.

Feldstrom  $I_e = 0,4$  A aus einem Digireg-1, Maschine auf Nenndrehzahl, kein Diodenfehler.



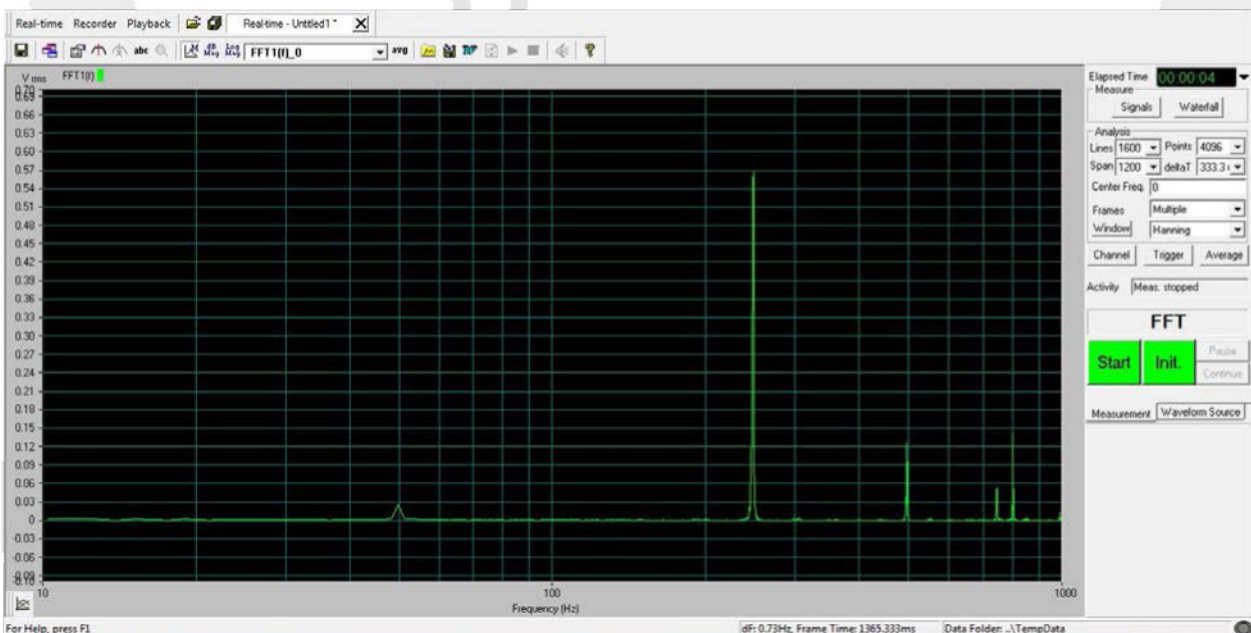
Auch bei mit Nenndrehzahl laufender Maschine sind außer dem 800 Hz Choppersignal keine weiteren Frequenzanteile erkennbar.

Feldstrom  $I_e = 0,4 \text{ A}$  aus einem Digireg-1, Maschine auf Nenndrehzahl, Fehlerfall Dioden- Unterbrechung.



Das vorstehende Bild zeigt die spektrale Verteilung der auftretenden Frequenzanteile bei Eintritt einer Dioden- Unterbrechung. Außer dem DÜW- Signal mit ca. 247 Hz ist zusätzlich die 2 und 3. Harmonische des DÜW- Signals sowie die Digireg Chopperfrequenz erkennbar. Hier wird noch einmal die Notwendigkeit deutlich, die Grundwelle des DÜW- Signals aus dem, in diesem Beispiel noch relativ EMV- freien Frequenzgemisch heraus zu filtern, um den erforderlichen Störabstand zu erreichen. Alle DÜW- Erkennungs- Systeme die nicht selektiv arbeiten, können daher eine Dioden- Unterbrechung nicht mit hinreichendem Störabstand erkennen und sind daher als DÜW- Überwachungssystem nur bedingt tauglich.

Feldstrom  $I_e = 0,4 \text{ A}$  aus einem Digireg-1, Maschine auf Nenndrehzahl, Fehlerfall Dioden- Kurzschluss.



Die vorstehende Darstellung des Dioden- Kurzschlussfalls zeigt die erste Harmonische wesentlich dominanter als die restlichen Frequenzanteile, so dass ein hinreichender Störabstand gegeben ist, um eine Sichere Erkennung dieses Dioden- Fehlers zu gewährleisten.

Fazit:

Aus der Zusammenfassung der vorstehend Messergebnisse resultiert die Schlussfolgerung, wenn man einen Dioden- Fehler sicher detektieren möchte, sollten zunächst die technischen Grundlagen für das daraus resultierende Systemverhalten hinreichend bekannt sein.

Aus meinen Erfahrungen beginnt damit das Problem bereits bei vielen Projektanten, die z.T. nicht über das erforderliche Hintergrundwissen zur Entstehung eines DÜW- Fehlersignals verfügen und dadurch auch die Erkennungssysteme nicht korrekt auslegen können.

Diese Themenschrift 5 soll einen Beitrag dazu leisten, zukünftig die DÜW- Systeme zielgerichteter zu konzipieren.

Professionell konzipierte DÜW- Systeme sollten daher generell selektiv ausgeführt werden.

Auf Grund der großen Amplituden-Unterschiede des Fehlersignals zwischen Dioden- Unterbrechung und Kurzschluss, sollten die Systeme grundsätzlich über zwei getrennt voneinander parametrierbare Ansprechschwellen und damit auch über zwei binäre Ausgangssignale verfügen.

Der erste Ansprechwert könnte mit ca. 18% parametrierbar werden und erkennt damit eine Dioden- Unterbrechung. Dieses Binär-Signal darf ausschließlich eine Warnung aber keine Auslösung generieren.

Der zweite Ansprechwert wird auf ca. 80% festgelegt und erkennt damit den Fehlerfall Dioden- Kurzschluss. Beim Ansprechen dieses Binärsignals muss quasi eine unverzögerte Abschaltung des RG- Turbosatzes erfolgen, da in diesem Fall Teile der Ankerwicklung der Erregermaschine thermisch stark beansprucht werden.

Alle DÜW- Erkennungssysteme, die den vorstehenden Spezifikationen nicht entsprechen, können die Kriterien einer Fehlererkennung gar nicht oder nur zum Teil erfüllen und sind daher im Rahmen der Inbetriebnahme nur mit Vorbehalt zu parametrieren.

Der DÜW- Ansprechwert an nicht selektiv arbeitenden Systemen sollte daher nicht kleiner als 60% gewählt werden, da sonst ein hinreichender Störabstand des DÜW- Nutzsignals zu dem Gesamtanteil, der auf dem sekundären Erregerstrom aufmodulierten Störanteile nicht mehr eingehalten werden kann und damit das Risiko von Fehlauflösungen relativ groß wird.