



Thema: PRBS- Funktionsgenerator zur Erzeugung eines PSS- Testsignals  
Subject:

Datum: 31.03.2022  
Date:

### 1. Entstehung von Pendelschwingungen

Die landesweite Bereitstellung von Elektroenergie ist strukturell so aufgebaut, dass eine Anzahl von Energieerzeugungs-Anlagen, ein Verteilernetz speisen, welches die Elektroenergie bis an den Endverbraucher leitet.

Dieses Verteilernetz, einschließlich der angeschalteten Verbraucher, stellt mit seinen vielfältigen Querverzweigungen für die speisenden Erzeugungsanlagen eine sehr komplexe Last aus Reaktanzen, induktiven- und kapazitiven Blind- und Scheinwiderständen, sowie auch bestimmten Eigenresonanzen dar.

Ist nun diese komplexe Energie- Verteilungsnetz mit einer bzw. mehreren Erzeugungseinheiten in Form von Synchron- Maschinen verbunden, bildet dieses in seiner Gesamtheit ein schwingungsfähiges Gebilde, welches im eingeschwingenen Zustand einen gewissen Ruhezustand und damit Stabilität aufweist.

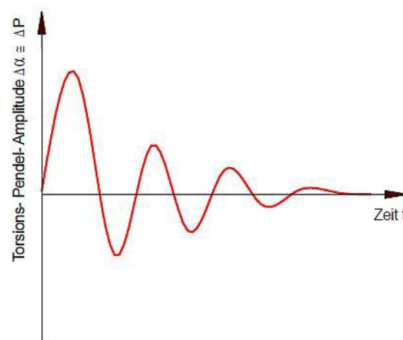
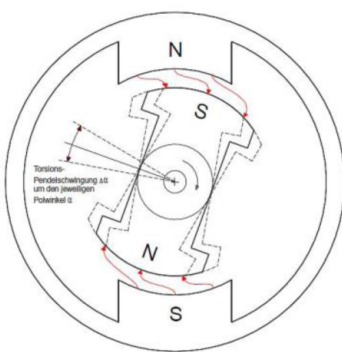
Treten nun plötzliche Lastschwankungen durch Ab- oder Zuschaltungen größerer Verbrauchereinheiten bzw. Änderungen in der Struktur des Verteilernetzes auf, kann es im gesamten, davon betroffenen Verteilernetz zu Wirk- und Blindleistungs- Schwingungen kommen. Diese Schwingungen liegen je nach Größe der Erzeugungseinheiten und den angeschlossenen Netzstrukturen, im Bereich von 0,5 Hz bis 2 Hz und weisen einen gedämpften Amplitudenverlauf auf.

Auf Grund der großen Periodendauer erscheint für dieses Phänomen der Begriff Last- Pendellungen geeigneter zu sein.

In der Themenschrift 1 auf dieser Web- Seite werden Ursache und Auswirkungen dieser, zwischen der Synchron- Maschine und dem Netz intermittierenden Wirkleistungs- Pendellungen näher beschrieben.

Neben den Instabilitäten auf der Netz- und Verbraucherseite, führt dieses Phänomen ebenfalls zu Pendelerscheinungen des Polwinkels zwischen den umlaufenden Ständer- und Läuferpolen im Inneren der Synchronmaschine bzw. zu Pendellungen der Umfangsgeschwindigkeit  $\omega$  des gesamten Wellenstranges eines Turbosatzes.

Die nachfolgend dargestellten Skizzen verdeutlichen die vorstehend beschriebenen Vorgänge.



Das linke Bild verdeutlicht die Torsions-Pendelbewegung des Generatorläufers gegenüber der Momentanstellung von 2 Ständerpolen um einen statischen Polwinkel.

Da der Polwinkel einer Synchron-Maschine wirkleistungsproportional ist, können diese Pendelbewegungen auch im Abbild der Maschinen-Wirkleistung über der Zeit nachgewiesen werden.

Die Baugruppen eines Generatorläufers weisen in der Regel keine größeren Durchmesser auf, so dass dessen Umfangsgeschwindigkeiten überschaubar bleiben. Somit ist die mechanische Beanspruchung, durch eine Torsions-Pendelbewegung relativ unkritisch.

Dieser technische Sachverhalt ist jedoch bei Nieder- und Mitteldruck Schaufelstufen einer Kondensationsturbine wesentlich kritischer zu bewerten. Durch die Torsions- Pendelbewegung werden diese Baugruppen einer wechselnden negativen und positiven Beschleunigung der Umfangsgeschwindigkeit ausgesetzt, was zu einer erhöhten Biegebeanspruchung im Bereich der Schaufelfüße führt.

Aus diesem Grund ist es daher notwendig, diese physikalisch bedingten Torsions- Pendelbewegungen auf ein Mindestmaß zu verringern bzw. durch geeignete Maßnahmen zu bedämpfen.

## 2. Technische Möglichkeiten zur Dämpfung auftretender Pendelschwingungen

Vorstehend wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Pendellungen der Umfangsgeschwindigkeit des Generatorläufers auch zu Pendellungen des Polwinkels der Synchronmaschine führen.

Das bedeutet, dass sich die jeweiligen Polmitten der Ständer- und Läuferpole während dieser Pendelbewegungen einmal voneinander entfernen und einmal aufeinander zu bewegen.

Durch eine Modulation des Erregerstroms mit der aktuellen Pendelfrequenz besteht nun die Möglichkeit, die magnetische Kraftschlüssigkeit zwischen den Ständer- und Läuferpolen zu beeinflussen.

Erfolgt die Modulation des Erregerstroms zur mechanischen Pendelbewegung mit der Phasenbeziehung einer Gegenkopplung, wird beispielsweise mit der Vergrößerung des Erregerstroms das momentane Entfernen beider Pole voneinander erschwert und im umgekehrten Fall durch Verringern des Erregerstroms, die magnetische Rückholkraft zwischen beiden Polen verkleinert.

Diese Modulation des Erregerstroms erfolgt durch ein so genanntes **Pendel- Dämpfungs- Gerät**, im nachfolgenden (PDG) genannt. Im englischen Sprachgebrauch wird diese Baugruppe mit dem Begriff **Power- System- Stabilizer (PSS)** bezeichnet.

Entsprechend einer Siemens- Empfehlung sollte ein Pendeldämpfungsgerät bei Maschinengrößen ab 100 MVA zwingend im Erregersystem vorhanden sein und aktiviert werden.

Bei kleineren Leistungsgrößen obliegt diese Forderung den örtlichen Gegebenheiten des Maschinen- Aufstellungsortes bzw. der Einschätzung und Forderung des Netzbetreibers in dessen Netz der Energieerzeuger einspeisen soll.

## 3. Optimierung eines PDG im Rahmen der Inbetriebnahme und Nachweis der Dämpfungsfunktion

Die Wirkungsweise eines PDG entspricht im Wesentlichen der eines Laufzeitfilters, welches durch Modulation des Erregerstroms, die Phasenbedingungen der Pendelschwingungen  $\Delta P$  und  $\Delta \omega$  so verändert, dass diese mit der mechanischen Torsions- Pendelbewegung des Wellenstranges eines Turbosatzes, eine Gegenkopplungsbedingung anstreben.

Vollständigkeitshalber muss dabei noch erwähnt werden, dass außer dem aktiven PDG im Erregersystem selbst, auch die im Generatorläufer vorhandene passive Dämpferwicklung mit zur Pendeldämpfung beitragen soll.

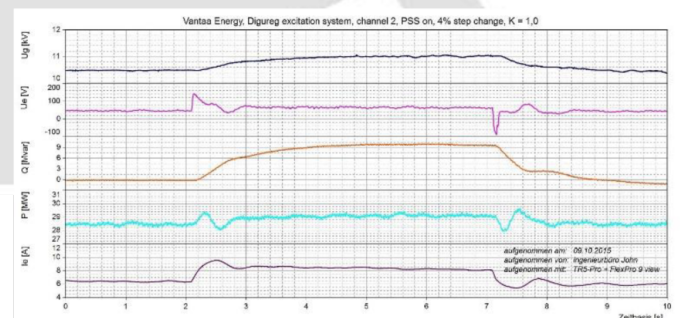
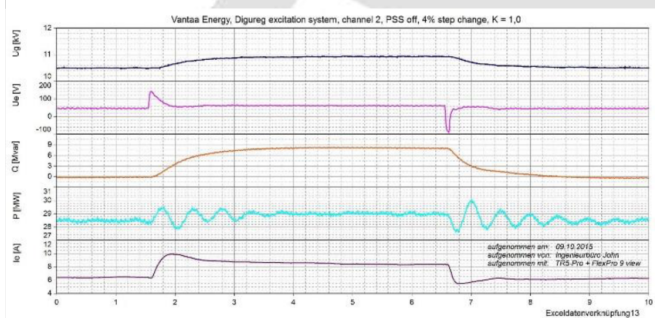
In der Praxis ist jedoch deren Einfluss auf die Pendelbewegung eher als gering zu bewerten.

Die Herausforderung bei jeder Inbetriebnahme besteht nun darin, durch entsprechende Parametrierung des Pendeldämpfungsgerätes (PDG) möglichst den idealen Gegenkopplungsfall zu treffen, so dass die Pendelschwingungen auf ein Mindestmaß reduziert bzw. gedämpft werden.

Grundsätzlich muss aber darauf hingewiesen werden, dass man nur Pendelschwingungen effektiv dämpfen kann, wenn die Energieerzeugungseinheit in Verbindung mit dem angeschlossenen Netzabschnitt auch schwingfähig ist und folglich überhaupt zu Pendel-Bewegungen angeregt werden kann.

Eine Aktivierung des Pendeldämpfungsgerätes um jeden Preis, wie oft von den Netz- und Anlagenbetreibern verlangt, macht daher, ohne messtechnische Analyse der örtlichen Gegebenheiten, vielfach keinen Sinn.

Die einfachste Möglichkeit zur Feststellung der Pendelfähigkeit besteht darin, bei hinreichend großer Wirkleistung von 70% bis 100% der Nenn- Wirkleistung, das Erregersystem mit einem Sollwertsprung zu beaufschlagen. Die Systemantwort des Turbosatzes wird dabei über der Zeit durch einen mehrkanaligen Transienten- Rekorder abgebildet.





Die vorstehenden Schriebe zeigen die Systemantworten eines 35,5 MVA Generators auf einen 4% Sollwertsprung mit ausgeschalteten PDG (links) und eingeschalteten PDG (rechts).

Im linken Bild sind die Pendelbewegungen des Generatorläufers im Wirkleistungssignal von ca. 28,5 MW zu erkennen. Das PDG war dabei deaktiviert.

Mit 8 Schwingungshalbwellen bei positiver Sprungrichtung und ca. 12 Halbwellen bei negativer Sprungrichtung erscheint das System daher hinreichend schwingfähig.

Im rechten Bild wurde das gleiche Sprungsignal bei gleicher Wirkleistung erneut ausgelöst, aber diesmal bei aktivierten PDG. Gegenüber dem linken Bild ist die dämpfende Wirkung des PDG deutlich erkennbar, indem die Anzahl der Pendelbewegungen in beiden Sprungrichtungen auf ca. 2 Halbwellen reduziert wurden.

Weiterhin ist der modulierende Einfluss des PDG im Verlauf der Erregerspannung  $U_e$  deutlich zu erkennen.

Bis vor wenigen Jahren waren die meisten Anlagen- und Netzbetreiber mit dieser Nachweisform zufrieden, obwohl man daraus eigentlich kein belastbares Dämpfungsmaß in dB ableiten kann.

Weiterhin vermittelt die vorstehende Darstellung auch nur einen grafischen Eindruck der Pendeldämpfung im Bereich der so genannten Resonanzfrequenz von ca. 1,87 Hz, (wurde aus der Periodendauer der dargestellten Schwingung ausgezählt). Hinsichtlich der Dämpfungseigenschaften im so genannten Interarea- Bereich, welcher den Frequenzbereich, von 0,1 Hz beginnend, bis zur Resonanzfrequenz beschreibt, können aus den Darstellungen in der Zeitebene ebenfalls keine belastbare Information abgeleitet werden.

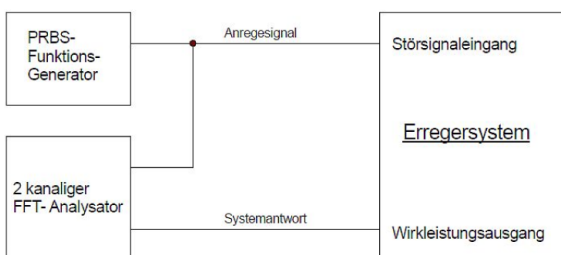
#### 4. Nachweis der PDG- Dämpfungs- Funktion durch Aufnahme eines Bode- Diagramms

Aus den vorstehenden Gründen drängen die Kraftwerks- und Netzbetreiber verstärkt darauf, die Dämpfungseigenschaften nicht nur in der Zeitebene, sondern auch in der Frequenzebene, als so genanntes Bode- Diagramm nachzuweisen.

In einem Bode- Diagramm werden die Dämpfungs- Eigenschaften des PDG in Dezibel (dB) über den gesamten untersuchten Frequenzbereich, einschließlich der Interarea- Zone, über der Anrege- Frequenz darstellt.

Weiterhin beinhaltet ein Bode- Diagramm neben dem Amplituden- auch den Phasengang zwischen dem Anrege- Signal und der Systemantwort des Messobjektes.

Zur Aufnahme eines Bode- Diagramms sind natürlich erweiterte messtechnische Voraussetzung an das verwendete Equipment erforderlich. Dieses übersteigt in der Regel den herkömmlichen messtechnischen Ausrüstungsumfang eines Inbetriebnahme- Ingenieurs. Nachfolgend ist ein solcher Messaufbau zur Aufnahme eines Bode- Diagramms schematisch dargestellt.



Dabei wird der Quotient aus Systemantwort / Anregesignal frequenzselektiv im FFT- Analysator berechnet und als Hüllkurve über der Frequenz dargestellt. Jeder handelsübliche 2 kanalige FFT- Analysator verfügt über eine solche Bode- Funktion, so dass diese keine Besonderheit darstellt.

Die technische Besonderheit dieser Anordnung besteht jedoch in der Generierung eines Anrege- Signals mittels eines PRBS- Funktionsgenerators.

Aus den bereits vorstehend beschriebenen Gründen sollen im Betrieb eines Turbosatzes periodisch wiederkehrende harmonische Torsionspendellungen verhindert, oder zu mindestens stark gedämpft werden.

Dies gilt nicht nur für den Netzparallelbetrieb des Turbosatzes, sondern auch für den Zeitraum der Funktionsprüfung und Optimierung des PDG.

Somit sind sinusförmige Anrege- Signale zur bewussten Herbeiführung von Torsions- Pendellungen des Wellenstranges während der Optimierungsversuche ungeeignet bzw. von den Betreibern nicht gewollt.

Im allgemeinen Sprachgebrauch sollten als Anrege- Signale ausschließlich so genannte „Rausch- Signale“, oder Abwandlungen davon verwendet werden. Ein Rauschsignal als solches besteht nicht aus periodischen Sinusschwingungen, sondern aus einer unstrukturierten Zufallsfolge von Einzelfrequenz- Anteilen.

Wird ein derartiges Anrege- Signal zur Aufnahme eines Bode- Diagramms benutzt, kann ein sinusförmiges Aufschwingen des Wellenstranges, während der PDG- Optimierung vermieden werden.

In der abschließenden Konsequenz nimmt der PRBS- Funktionsgenerator in dem vorstehend skizzierten Messaufbau zur Aufnahme eines Bode- Diagramms an einem Turbogenerator eine Hardware- Schlüsselrolle ein.

Natürlich kennen wir alle den typischen Klang eines so genannten „Weißen Rauschens“, mit all seinen Frequenzanteilen, beginnend vom unhörbaren Infraschall, über den akustisch wahrnehmbaren Bereich bis hin zum ebenfalls unhörbaren Ultraschall, im kHz- bzw. MHz- Bereich.  
 Zum Anregen einer Pendelschwingung im Frequenzbereich von 0 Hz bis 5 Hz ist daher ein „Weißes Rauschen“ im eigentlichen Sinn ungeeignet und demzufolge die Begriffsbestimmung „Weißes Rauschen“ für diesen Anwendungsfall unsinnig gewählt.

Das Anrege- Signal sollte schon über die Besonderheit einer unstrukturierten Zufallsfolge von Einzelfrequenzen verfügen, aber bandbegrenzt auf den Bereich von 0 bis 10 Hz sein. Höhere Frequenzen sind nicht erforderlich, da ein Wellenstrang eines Turbosatzes, auf Grund seiner Massenträgheit, Anrege- Frequenzen > 10 Hz ohnehin nicht folgen kann.

Unter vorstehenden Gesichtspunkt ist es folglich korrekter, in diesem Zusammenhang von einem bandbegrenzten Zufalls- Signal, als von einem „Rauschsignal“ oder gar „Weißem Rauschen“ zu sprechen.

5. Welche technischen Möglichkeiten gibt es nun, Rauschsignale bzw. bandbegrenzte Zufallsfolgen zu generieren

Jeder Halbleiter p-n- Übergang erzeugt bei einem Stromdurchfluss in Durchlassrichtung ein mehr oder weniger ausgeprägten analoges Rauschsignal- Spektrum, welches dem akustischen Eindruck eines „weißen Rauschens“ sehr nahekommt. Theoretisch könnte man durch Nachschalten von Tiefpässen sehr hoher Ordnungen, nur das interessierende Frequenzband aus dem gesamten Spektrum herausfiltern.  
 Energetisch betrachtet, würde ein stark bandbegrenzt analoges Rauschsignal für das geforderten Zielfrequenzband von 0 bis 10 Hz, nur noch Frequenzanteile sehr geringe Energiedichten liefern.  
 Somit bliebe nach der Filterung keine real nutzbare Anregungsenergie mehr übrig, so dass diese Methode real nicht praktikabel ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch aufwendige Programmierung eines Microprozessors eine bandbegrenzte Zufallsfolge eines Rechtecksignals zu erzeugen. Eine derartige Möglichkeit liefert sicherlich die besten Signalformen, setzt jedoch eine umfassende Programmiererfahrung voraus, die man eben mal so schnell nicht erlangen kann.

Eine dritte Möglichkeit wäre, dass bandbegrenzte Zufalls- Signal durch einen so genannten LFSR- Generator (Linear- Feedback- Shift- Register) zu generieren. Dabei handelt es sich um ein, nach bestimmten mathematischen Algorithmen rückgekoppeltes Schieberegister, das zur Erzeugung von streng determinierten Pseudozufallszahlenfolgen eingesetzt werden kann.

Im ITU- Standard (International Telecommunication Union) werden das Prinzip und die mathematischen Zusammenhänge zur Generierung eines PRBS- Signals auf der Basis von LFSR- Generatoren, einschließlich der linearen Rückkopplungen über logische XNOR, oder XOR Funktionsgruppen detailliert beschrieben.

The different types of PRBS and the suggested data-rates for the different PRBS types are described in the ITU-T standards O.150, O.151, O.152 and O.153.

PRBS type	Standard	Suggested Datarate [kbit/sec]	Feedback tap
$2^9 - 1$	ITU-T O.150 / O.153	up to 14.4	$5^{th} + 9^{th}$
$2^{11} - 1$	ITU-T O.150 / O.152 / O.153	64, $n \cdot 64$ ( $n=1..31$ ), 48 to 168	$9^{th} + 11^{th}$
$2^{15} - 1$	ITU-T O.150 / O.151	1544, 2048, 6312, 8448, 32064, 44736	$14^{th} + 15^{th}$
$2^{20} - 1$	ITU-T O.150 / O.151	1544, 6312, 32064, 44736	$17^{th} + 20^{th}$
$2^{20} - 1$	ITU-T O.150 / O.153	up to 72	$3^{rd} + 20^{th}$ (note 1)
$2^{23} - 1$	ITU-T O.150 / O.151	34368, 44736, 139264	$18^{th} + 23^{rd}$
$2^{29} - 1$	ITU-T O.150		$27^{th} + 29^{th}$
$2^{31} - 1$	ITU-T O.150		$28^{th} + 31^{st}$

Note 1 = an output bit is forced to be a ONE whenever the previous 14 bits are all ZERO.

PRBS bit-pattern are generated in a linear feed-back shift-register. This is a shift-register with a xored-feedback of the output-values of specific flip-flops to the input of the first flip-flop.

Nebenstehend ein Textauszug aus diesem Standard zur Information.

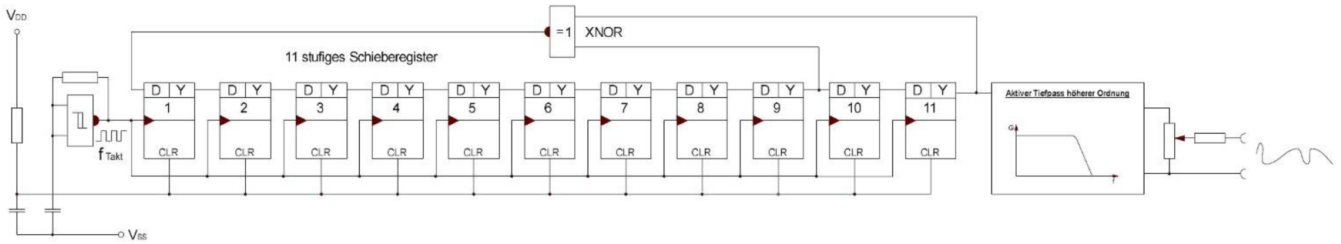
Für einen praktischen Nachbau von LFSR- Generatoren sind die Spalten „PRBS type“ und „Feedback tap“ besonders hilfreich, denn darin werden zum einen mögliche Register- Längen und die Anknüpfungspunkte der linearen Rückführungen angegeben.

Beispielsweise sollen an einem Schieberegister mit 11 Registerstufen die linearen Rückführungen am Ausgang der neunten und elften Registerstufe über ein XNOR an den D- Eingang der ersten Stufe rückgeführt werden.

Diese Möglichkeit ist wegen des geringen Hardwareaufwandes einfach umsetzbar.  
 Die Zufallsfrequenzen bei diesem Verfahren sind im Impuls- Pausenverhältnis des rechteckigen Ausgangs- Signals codiert und können durch Nachschalten von Tiefpässen in eine analoge Signalform dekodiert werden. Da es sich bei diesem Verfahren um eine digital generierte Zufallsfolge handelt, wird diese Signalform im allgemeinen als PRBS (Pseudo- Random- Binary- Signal) bezeichnet.



Nachfolgend ist ein solcher LFSR- Funktionsgenerator schematisch dargestellt, wobei das PRBS- Signal in einem rückgekoppelten 11Bit- Schieberegister binär generiert und in dem nachgeschalteten Tiefpass in einen analoge Signalverlauf dekodiert wird. Die beiden linearen Rückführungen werden gemäß *ITU-T O.150 / O.152 / O.153* am Ausgang der 9. Und 11. Registerstufe abgegriffen.



Das nutzbare PRBS- Ausgangs- Signal ist mit diesem Prinzip nicht nur ohne größeren Aufwand generierbar, sondern es können auch die technischen Eigenschaften durch wenige mathematische Beziehungen bestimmt werden. Wichtig dabei ist der Sachverhalt, dass erst alle möglichen Kombinationen auftretender Frequenzanteile generiert werden, wenn die Registerlänge (n) mindestens einmal komplett von der Taktfrequenz ( $f_T$ ) durchfahren wurde, was auch als Periodendauer des Registers bezeichnet wird. Mathematisch ergibt sich daraus folgende Beziehung:

$$\text{Periodendauer } (T_p) = (2^n - 1) \times 1/f_T$$

Nachdem nun das physikalische Prinzip zur Generierung einer bandbegrenzten Zufallsfolge von spektralen Frequenzanteilen vorstehend erläutert wurde, wenden wir uns nun der Frage zu, wie viele Registerstufen werden bei welcher Taktfrequenz zur Generierung eines PSS- Anrege- Signals zur Aufnahme eines Bode- Diagramms benötigt?

Zur Aufnahme eines Bode- Diagramms wird aber nicht nur ein Anrege- Signal, sondern auch ein mindestens zweikanaliger FFT- Analysator benötigt. Dieser muss über eine Mittelungsfunktion verfügen, welche eine einstellbare Anzahl von Messwiederholungen ermöglicht.

Beispielsweise benötigt der Transienten- Rekorder TR5-PRO in der Betriebsart „Bode- Plott“, mit einem Linienabstand von 0,030 Hz zur Darstellung des Diagramm- Verlaufs über einen Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 10 Hz, insgesamt 33 Sekunden für einen Messzyklus.

Damit auch das Anrege- Signal in dieser Zeit alle möglichen Spektralfrequenzen mindestens einmal enthält, muss die Periodendauer ( $T_p$ ) des LFSR- Anrege- Signals etwa der Zeit eines Mess- Zyklus des FFT- Analysators entsprechen. Idealerweise wäre es wünschenswert, wenn der Mess- Zyklus und die Periodendauer des Anrege- Signals synchronisiert wären, d.h. in einem Gerät erzeugt würden.

Im Fazit bedeutet dies, wenn die Aufnahme des Bode- Diagramms mit einem TR5-PRO erfolgt, sollte die Periodendauer des Anrege- Signals ca. 30 Sekunden betragen. Aus dieser Bedingung ergeben sich schon einmal die erforderlichen Taktfrequenzen ( $f_T$ ) für bestimmte Registerlängen. Um beispielsweise eine Periodendauer von ca. 30 Sekunden zu erreichen, müssen folgende Registerlängen mit folgenden Taktfrequenzen angesteuert werden:

- 8 Bit Schieberegister  $f_T = (2^8 - 1) / 30 = 8,5 \text{ Hz}$
- 11 Bit Schieberegister  $f_T = (2^{11} - 1) / 30 = 68,2 \text{ Hz}$
- 16 Bit Schieberegister  $f_T = (2^{16} - 1) / 30 = 2184,5 \text{ Hz}$

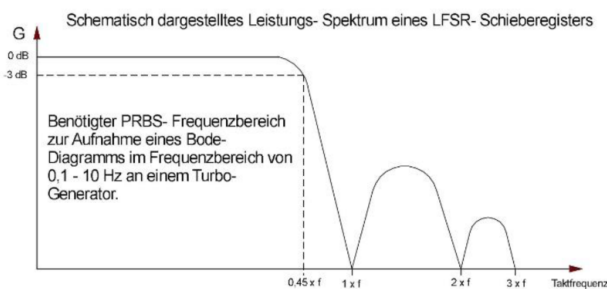
Aus den vorstehenden Berechnungen kann bereits die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass beispielsweise ein mit 16 Hz getaktetes 16-stufiges Schieberegister die vorstehenden Voraussetzungen nicht erfüllen kann. Die sich daraus ergebende Periodendauer ( $T_p$ ) würde eine zeitliche Länge von  $T_p = (2^{16} - 1) \times (1/16) = 4095 \text{ Sekunden}$  ergeben. Für den praktischen Messbetrieb vor Ort wäre eine Zykluszeit zwischen zwei Mess- Wiederholungen von einer Stunde und acht Minuten vollkommen unrealistisch bzw. unsinnig.

Das nachfolgende Beispiel zeigt wie die Anzahl der Registerstufen und die Schiebefrequenz bei der Vorgabe gewünschter Ausgangsdaten ermittelt werden können:

**Aufgabe:**

Ein PRBS- Funktionsgenerator soll zur Generierung eines PDG- Anregesignals eine unstrukturierte Zufallsfolge zwischen 0,1 Hz und 10 Hz erzeugen. Dabei ist zunächst eine Vorauswahl zwischen den Varianten eines 8Bit-, 10Bit oder 16Bit- Register zu treffen.

Wie bereits vorstehend aufgezeigt, sollte im praktischen Messbetrieb, bei dem das aufgenommene Bode- Diagramm einen gleichmäßigen und reproduzierbaren Linienverlauf zeigt, die Mess- Zykluszeit im Bereich von 25 – 30 Sekunden liegen. Das Anrege- Signal soll im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 10 Hz ein möglichst gleichmäßiges Leistungsspektrum aufweisen und bei Frequenzen > 10 Hz hinreichend in seiner Amplitude gedämpft werden.



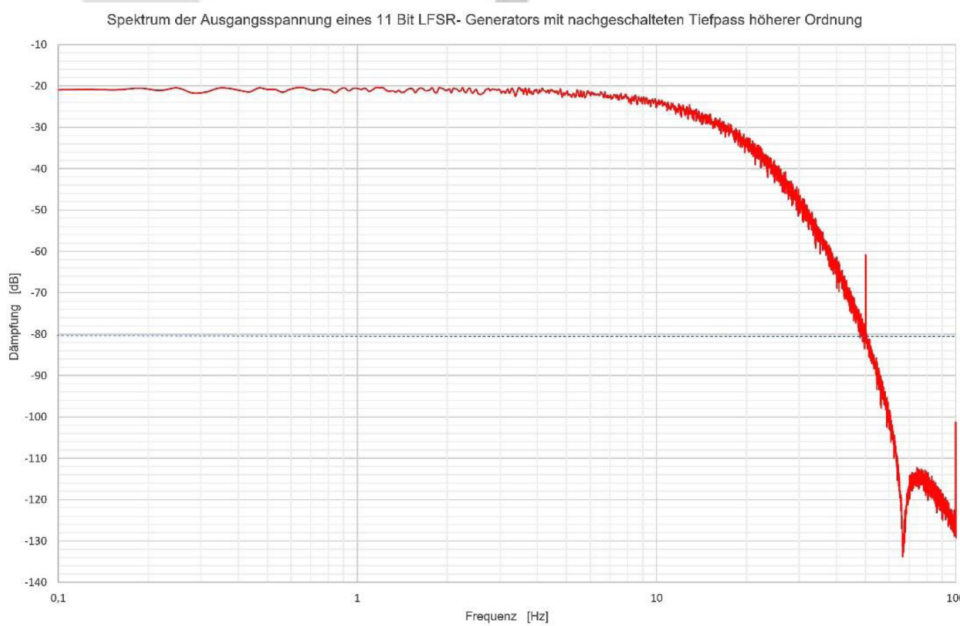
Die nebenstehende Grafik zeigt eine prinzipielle Darstellung eines LFSR- Generators. Bemerkenswert dabei ist, dass eine -3dB Signalabsenkung bereits bei  $0,45 \times f_T$  einsetzt und somit der nutzbare Frequenzbereich bei einer Taktfrequenz von  $< 0,45 \times f_T$  endet.

Bei einer Registerlänge von 8 Bit würde die -3 dB- Absenkung bereits bei  $8,5 \text{ Hz} \times 0,45 = 3,8 \text{ Hz}$  beginnen, so dass eine Registerlänge von 8 Bit für die Generierung eines PRBS- Anrege- Signals bereits im Vorfeld ausscheidet.

Die Benutzung einer Registerlänge von 16 Bit wäre zwar aus signaltechnischer Sicht möglich, aber auf Grund der hohen Taktfrequenz von 2184,5 Hz wäre das Nutz- Signal am Ausgang des analogen Tiefpasses deutlich kleiner als bei niedrigeren Taktfrequenzen.

Eine Alternativ- Lösung wäre eine Registerlänge von 11 Bit. Mit dieser Variante wird nicht nur die ITU- Standard- Empfehlung übernommen, sondern auch mit der erforderlichen Taktfrequenz von ca. 68 Hz, liegt der Dämpfungsverlauf des Registers auch auf der des nachgeschalteten Tiefpasses, der seine Absenkung mit -3dB bei ca. 10 Hz beginnt und bei 50 Hz bereits eine Dämpfung von -60 dB erreicht. Der spektrale Linienabstand beträgt bei einer Periodendauer von 30 Sekunden dem Kehrwert der Periodendauer von  $1/30 \text{ Sek.} = 0,033 \text{ Hz}$  und entspricht auch in etwa der Auflösung des FFT- Analysators TR5-PRO.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen das gemessene Ausgangs- Signalspektrum des aufgebauten 11 Bit LFSR- Generators sowie den Dämpfungsverlauf des Ausgangs- Signals nach dem analogen Tiefpass.

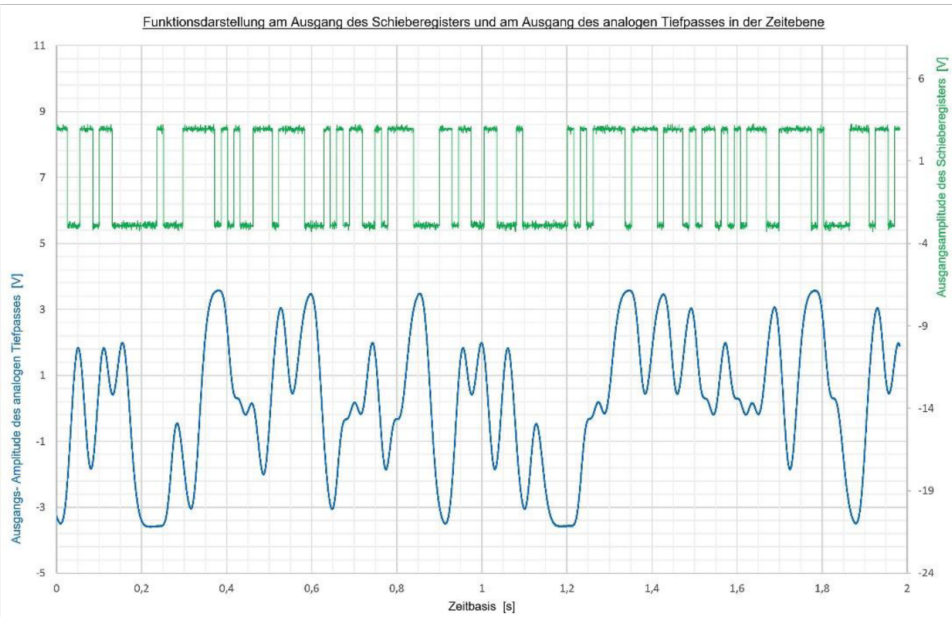


Die nebenstehende Grafik zeigt einen relativ gleichmäßigen spektralen Verlauf der generierten Linien- Abstände.

Die -3 dB Signalabsenkung beginnt bei ca. 10 Hz und erreicht bei 50 Hz bereits ein Dämpfungsmaß von -60 dB, was einer Amplitudendämpfung von 1/1000 entspricht.

Damit erfüllt der 11 Bit Eigen- Bau-PRBS- Generator alle Voraussetzung, um mit einem TR5-PRO oder anderen FFT- Analysatoren korrekte und auch reproduzierbare Bode- Diagramme aufzunehmen.





Das nebenstehende Bild zeigt die internen Generator- Signale in der Zeitebene.

Dabei beschreibt der obere, grün dargestellte Signalverlauf das Ausgangssignal am Ausgang der Registerstufe 11, also am Ausgang des Schieberegisters bzw. am Eingang des Tiefpass-Filters.

Die rein zufällig generierten Pausenverhältnisse sind in dieser „Momentaufnahme“ deutlich zu erkennen.

Der untere, blau dargestellte Signalverlauf zeigt den Ausgang des Tiefpassfilters, also den Ausgang des eigentlichen Signalgenerators.

Ganz besonders muss dabei erwähnt werden, dass bei der Projektierung des Schaltungsdesign darauf geachtet wurde, dass die Binärsignale am Ausgang des Schieberegisters sowie auch das quasianaloge Signal am Ausgang des Tiefpasses nullbezogen sind, d.h. keinen DC- Offset aufweisen.

Im praktischen Messbetrieb vor Ort wird das von diesem PRBS- Generator erzeugte Anrege- Signal über einen Analogeingang des Erregersystems, direkt auf den Spannungs- Sollwert aufaddiert. Ein zusätzlicher DC- Offset würde zu einer statischen Blindleistungserhöhung am zu prüfenden Turbosatz führen, die während der Messungen auf keinen Fall erwünscht ist.

Da im Einzelhandel derartige spezielle PRBS- Generatoren zur Prüfung von PSS- Strukturen an Erregersystemen von Energie- Erzeugungs- Anlagen nach meinem Wissen nicht erhältlich sind, hat das Ingenieurbüro John einen eigenen PRBS- Funktionsgenerator nach den vorstehenden Grundsatzüberlegungen entwickelt und gefertigt.

Die nachfolgenden Bilder zeigen das aufgebaute Gerät von verschiedenen Seiten.

