



Thema: Aufnahme von Bode- Diagrammen an Turbosätzen zum Nachweis der
Subject: Pendeldämpfung mit dem Transienten- Rekorder TR5-PRO

Datum: 18.10.2023
Date:

Im Bestreben der deutschen Energiewirtschaft, die weltweit gesetzten Klimaziele einzuhalten, ist eine weitere, über das jetzige Maß hinausgehende Reduzierung, der von der Industrie ausgestoßenen CO₂ Emissionen und anderer, die Erderwärmung fördernder Gase, zwingend erforderlich.

Die größten Mengen von CO₂ entstehen bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas und Holz in den Kohle- und Gaskraftwerken, den Verbrennungsmotoren des Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehrs auf den Weltmeeren sowie der individuellen Wärmeversorgung von Wohneinheiten.

Dementsprechend kann sich das Potential der Energiewirtschaft nur darauf beschränken, die Verbrennung fossiler Energieträger in den Kraftwerken zu minimieren oder in ferner Zukunft gänzlich darauf zu verzichten, aber wodurch sollen die entstandenen Energiedefizite mittelfristig kompensiert werden, mit Wind und Sonne, bei der jetzigen Versorgungsinfrastruktur und deren momentane Ausbaugeschwindigkeit, wohl kaum.

Leider haben die derzeitig politisch Verantwortlichen auch in der Energiepolitik wieder einmal den zweiten Schritt vor dem ersten getan, indem die wenigen, noch in Deutschland laufenden Kernkraftwerke abgeschaltet wurden. Kernkraftwerke stellen auf Grund ihrer Größe sogenannte Grundlasterzeuger dar, die für eine Netzstabilität eines Landes unverzichtbar sind. Zur Erreichung der gesteckten Klimaziele wäre es mittelfristig wesentlich dienlicher gewesen, an Stelle der Kernkraftwerks- Einheiten große Kohlekraftwerke, als einer der CO₂ Haupterzeuger, vom Netz zu nehmen.

Wie auch immer, die Kernkraftwerke als Grundlast- Energieerzeuger fehlen, was der Netzstabilität in Deutschland nicht gerade förderlich ist. Das Risiko, von auftretenden Netz- Instabilitäten in extremen Situationen, z.B. bei größeren Lastsprüngen ist dadurch wahrscheinlicher geworden.

Um derartigen Erscheinungen entgegenzuwirken und auf das Netz stabilisierend einzuwirken, verfügen die größeren Energie- Erzeugungseinheiten in ihren Erregersystemen über so genannte **Pendel- Dämpfungs- Geräte** (PDG), die auftretende Netzpendel- Erscheinungen hinreichend gut kompensieren können. Eine ältere Siemens- Empfehlung nennt beispielsweise eine Leistungsgröße von ≥ 100 MVA, für das Vorhandensein eines PDG.

Die physikalischen Grundlagen für die Entstehung von so genannten Pendelschwingungen an Synchronmaschinen im Netzparallelbetrieb und deren Auswirkungen sind in der Themenschrift 1 dargestellt.

In der jüngeren Vergangenheit zeichnet sich jedoch, vielleicht auch gerade deswegen, ein Trend ab, dass immer mehr Netzbetreiber auch bei kleineren installierten Energieerzeugungsanlagen ein vorhandenes und optimiertes PDG fordern. Damit steigt jedoch auch der Aufwand, während der Inbetriebnahme, zusätzlich die dämpfende Wirkung des PDG dokumentieren zu müssen.

Auf Grund der zunehmenden Akzeptanz des Standards VDE AR 4110 bei den Netzbetreibern, resultieren daraus abgeleiteten Forderungen an die Betreiber von Energie- Erzeugungsanlagen (EEA), unter anderem auch die Pendelfähigkeit bzw. deren Dämpfungsverhalten von Turbosätzen im Netzparallelbetrieb nachzuweisen.

Das ebenfalls im vorstehenden Standard vorgeschriebene Verfahren sieht vor, dass die EEA mit einem bandbegrenzten Zufalls- Signal, im neudeutsch auch PRBS = **P**seudo- **R**andom- **B**inary- **S**ignal genannt, angeregt und die Systemantwort gemeinsam mit dem Anregesignal aufgezeichnet wird.

In der Themenschrift 15 wurde die Erzeugung eines PRBS- Signals beispielsweise durch ein rückgekoppeltes Schieberegister auf einfache Weise dargestellt.

Verknüpft man diese beiden Signale mathematisch miteinander und stellt das Ergebnis in der Frequenzebene dar, erhält man ein so genanntes Bodediagramm.

Messanordnungen zur Aufnahme von Bode- Diagrammen werden im einschlägigen Fachhandel in den unterschiedlichsten Preissegmenten angeboten, aber die wenigsten sind dafür geeignet, Bode- Diagramme im subfrequenten Bereich von 0,1 bis 5,0 Hz aufzunehmen und zusätzlich ein PRBS- Signal als Anrege- Frequenz generieren zu können.

Im hochpreisigen Segment ist da der FFT- Analysator mit integrierten Funktionsgenerator „Photon+“ der Fa. Brüel und Kjaer zu nennen, der hinsichtlich seiner kompakten und leichten Bauweise vorzüglich für den mobilen Einsatz geeignet ist,

Alternativ dazu ist im kostengünstigeren Segment der Transienten- Rekorder TR5-PRO der Fa. HSP zu erwähnen. Ursprünglich als 5 kanaliger Transienten- Rekorder zur Darstellung von Signalen in der Zeitebene konzipiert, kann dieser neuerdings unter Anwendung einer neuen Software auch als zweikanaliger FFT- Analysator eingesetzt werden, wobei dessen Einsatzbereich ausschließlich für den Frequenzbereich von 0,2 Hz bis 5 Hz ausgelegt und optimiert wurde.

Da jeder, aus meiner ehemaligen Ingenieurgruppe über einen TR5 verfügt, lag es daher nahe, diese Messanordnung auf seine Eignung als so genannten Bode- Plotter zu überprüfen.

Denn bevor dieses Gerät in der Praxis vor Ort, meist im Beisein eines Vertreters des Netzbetreibers, eingesetzt werden kann, sollte sichergestellt sein, dass die vom TR5 gemessenen Amplituden- und Phasengänge der Realität entsprechen.

Die nachfolgend dargestellten Diagramme wurden alle an einem L/C Parallelresonanzkreis als Messstrecke, dem TR5 als Bode- Plotter und als Anregesignal den im Photon integrierten PRBS- Generator, mit den Frequenzgrenzen von 0,1 Hz bis 10 Hz aufgenommen.

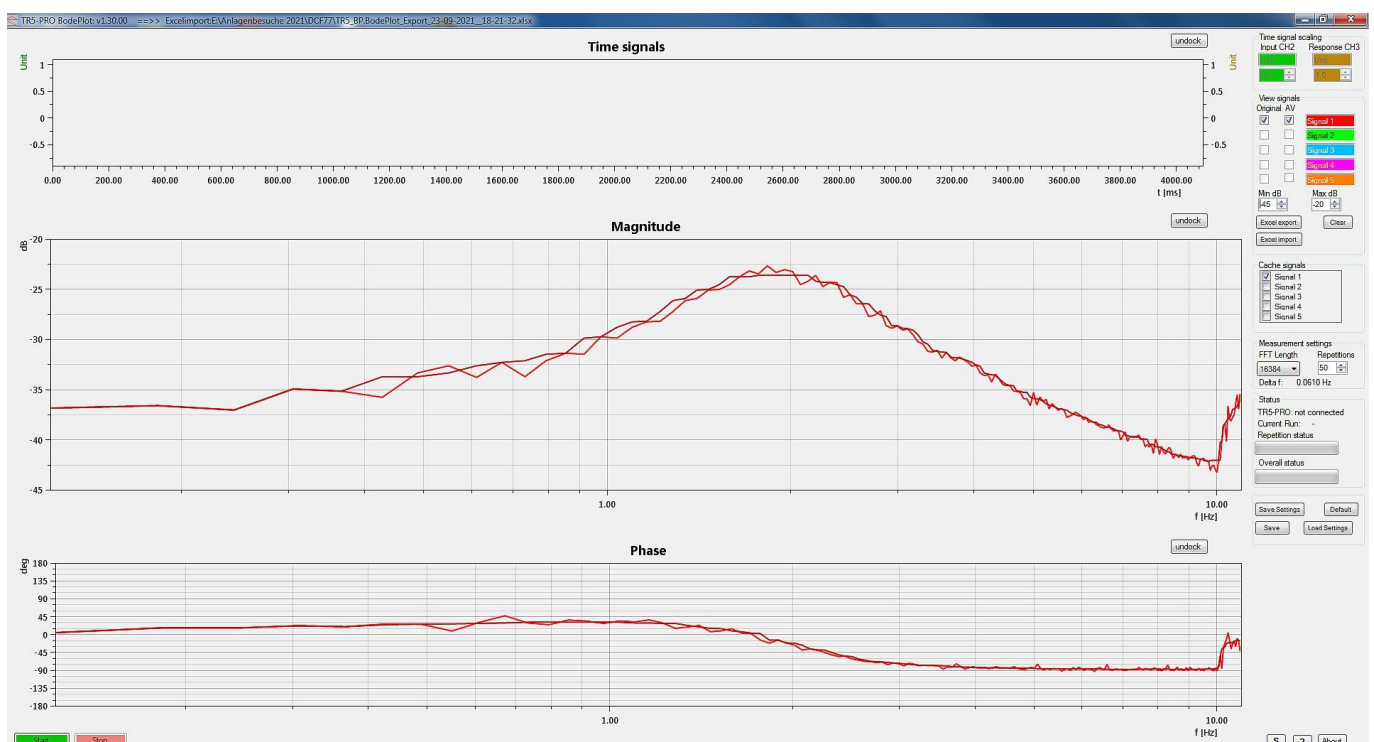
Doch zunächst einige Bemerkungen zur Oberfläche der von HSP entwickelten Bode- Plott- Software.

Die Oberfläche ist erstaunlich gut gelungen und anwendungstechnisch gut durchdacht. Durch das Weglassen von nicht Funktionsrelevanten Bedienelementen wurde eine sehr übersichtliche Oberflächenstruktur geschaffen, die schon fast als selbsterklärend bezeichnet werden kann.

Kurz gesagt, es ist alles da, was zur Skalierung und Aufzeichnung erforderlich ist und zudem noch sehr übersichtlich angeordnet. Bezüglich der Oberflächenstruktur bestehen meinerseits keine Änderungswünsche.

Allerdings wären dabei ein paar nachfolgende Kleinigkeiten zu nennen, die mehr den Algorithmus als die Oberfläche betreffen.

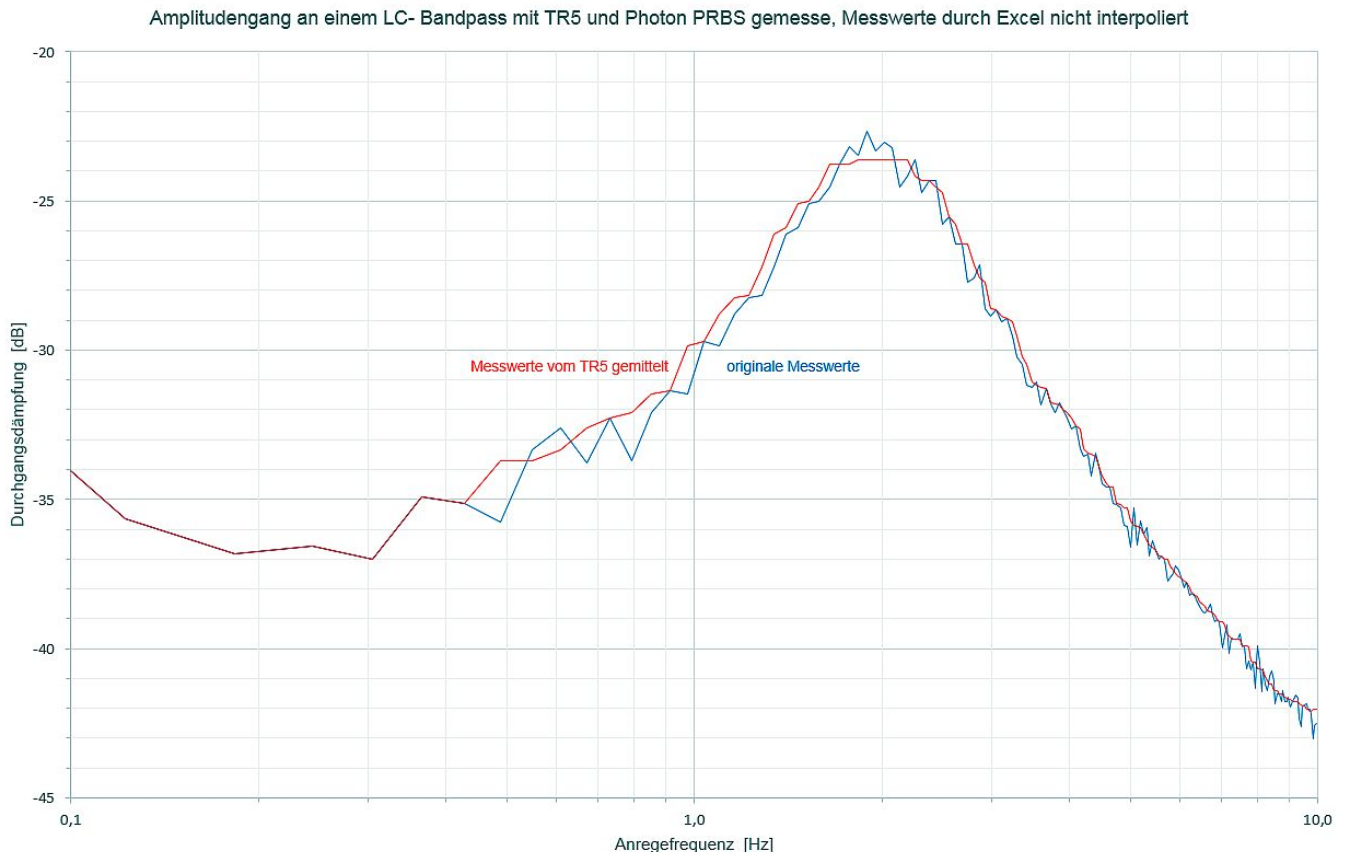
- Die Null- Linie im Fenster „Time signal“ kann mit der rechten Maustaste verschoben werden, um die dargestellten Zeitsignale mittig zu platzieren. Bei laufender Messung geht das leider nicht, weil die Null- Linien beider Eingangssignale auf den unteren Fensterrand „geklemmt“ werden. Signale im negativen Bereich sind daher nicht sichtbar.
- Nach Erreichen der im Fenster „Repetitions“ parametrisierten Anzahl von Messwiederholungen, sollte auch die Messung automatisch auf „Stop“ gesetzt werden. Jetzt läuft die Messung permanent weiter.



Doch nun zum Hauptproblem, der im Algorithmus realisierten Mittelungsfunktion (AV). Im oberen Bild zwar erkennbar, aber stellt man die vom TR5 aufgenommenen Daten durch die „Export- Funktion“ in Excel dar, wird der Mittelungsfehler noch deutlicher sichtbar, d.h. das dargestellte Bode- Diagramm entspricht nicht der Realität. Die grüne Linie zeigt die aufgenommenen Momentanwerte und die rote Linie die Mittelung davon.

Wenn also im üblichen Szenario, der Netzbetreiber zeitgleich mit seiner Messanordnung an gleicher Stelle im Maschinenhaus einen abweichenden Kurvenverlauf misst, wird die Messung des TR5 komplett in Frage gestellt, d.h. die so genannte Zertifizierung ist nicht bestanden, mit all ihren Konsequenzen.

Nachfolgend der gleiche Funktionsverlauf des vorstehenden Bildes, aber mit den nach Excel exportierten Daten.



Auch wieder ein selbsterklärendes Bild. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Linienvverlauf am linken Bildrand nicht mit dem in der TR5 Darstellung übereinstimmt.

In der TR5- Darstellung verläuft die Linie von 0,1 Hz bis 0,2 Hz nahezu bei ca. -37 dB parallel während das in der Exceldarstellung im gleichen Frequenzbereich nicht der Fall ist.

Dieser Frequenzbereich ist der so genannte „Interarea- Bereich“ und gehört daher zu den „Steckenpferden“ der Netzbetreiber, d.h. er steht besonders im Fokus eines aufgenommenen Bode- Diagramms. Bei einem derartigen Kurvenverlauf ist man von vornherein schon durchgefallen.

Der Mittelungsfehler ist im Resonanzpunkt bei ca. 1,95 Hz am gravierendsten. Der TR5- Algorithmus verschluckt in der gemittelten Darstellung das eigentliche Resonanzmaximum.

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden. Der Transienten- Rekorder TR5 ist mit der speziellen „Bode- Plott- Software“ für eine grundlegende Pendeldämpfungs- Analyse an Synchronmaschinen geeignet, zumal der Hersteller HSP auf Grund der vorstehend beschriebenen Unzulänglichkeiten, die Software nochmals überarbeitet hat.

In Verbindung mit einem einfachen PRBS- Signalgenerator auf der Basis eines rückgekoppelten Schieberegisters, der die Vorgaben Linienabstand ca. 0,05 Hz und einer Zykluszeit zur Generierung aller vorkommenden Frequenzen von 0,1 Hz bis 10 Hz in ca. 20 Sekunden benötigt, ist die Gerätekombination in der Lage, ein Bodediagramm der angeschlossenen Synchronmaschine aufzunehmen.

Damit wäre zunächst die Voraussetzung gegeben, zum einen die Pendelfähigkeit der Synchronmaschine und zum anderen ansatzweise die Dämpfung des im Erregersystem vorhandenen PDG- Algorithmus in einem Bodediagramm darzustellen.

Leider entspricht der ebenfalls von HSP gefertigte PRBS- Generator hinsichtlich seiner technischen Konzeption nicht den praktischen Anforderungen. Gemäß HSP wurde der Signalgenerator als so genannter LFSR- Generator, mit einer Taktfrequenz von 16 Hz konzipiert. Die vorstehende Bezeichnung steht für den Begriff **Linear- Feedback- Shift- Register** und beinhaltet ein Schieberegister mit einer Länge von 16 Bit, also 16 Registerstufen mit entsprechenden Rückführungen. Ein LFSR- Generator muss einmal vollständig durchlaufen werden, um alle Frequenzen im entsprechenden Linienabstand mindestens einmal an seinem Ausgang bereitzustellen. Die dafür benötigte Periodendauer kann wie folgt berechnet werden:

$$T_{\text{Periode}} = (2^{\text{Anzahl der Registerstufen}} - 1) \times T_{\text{Taktfrequenz}} = (2^{16} - 1) / 16 \text{ Hz} = 4095,9 \text{ Sekunden} = 68,3 \text{ Minuten}$$

Um ein reproduzierbares Bodediagramm zu erhalten, hat es sich in der Praxis bewährt, dieses mit mindestens 10 Mess- Wiederholungen aufzunehmen. Damit würde die Messzeit für ein Bodediagramm ca. $10 \times 68,3 \text{ min} = 683 \text{ min} = 11,4 \text{ Stunden}$ dauern, was vollkommen unrealistisch und nicht durchführbar ist.

Um diesen LFSR- Generator zu modifizieren bzw. an die Messaufgabe anzupassen, müsste lediglich die Periodendauer so reduziert werden, dass diese in einem Zeitrahmen von ca. 30 Sekunden liegen müsste.

Da die Taktfrequenz von 16 Hz ihrerseits wieder die obere Frequenzgrenze des Ausgangssignals darstellt, kann die Periodendauer nur durch Reduzierung der Register- Stufenzahl erreicht werden.

Mit einer Registerlänge von 9 Bit und einer Taktfrequenz von 16 Hz würde sich beispielsweise eine Periodendauer von:

$$T_{\text{Periode}} = (2^{\text{Anzahl der Registerstufen}} - 1) \times T_{\text{Taktfrequenz}} = (2^9 - 1) / 16 \text{ Hz} = 31,9 \text{ Sekunden ergeben.}$$

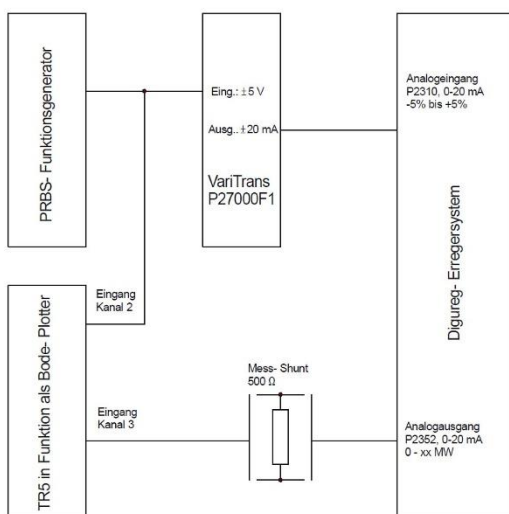
Der Linienabstand, d.h. der Abstand der auftretenden Teilfrequenzen würde $1 / T_{\text{Periode}} = 0,031 \text{ Hz}$ betragen.

Da die Realisierung des Schieberegisters nicht durch eine diskret aufgebaute Hardware, sondern als Softwarelösung durch eine CPU realisiert ist, wäre eine derartige Modifizierung durch HSP mit vertretbarem Aufwand möglich.

Weiterhin ist das Ausgangssignal dieses Generators nicht „nullsymmetrisch“, d.h. der Signalpegel bewegt sich zwischen 0 und + 10 V. Da dieses Signal im Erregersystem während der Messungen als so genannte „Störgröße“ auf den Spannungs- Sollwert aufaddiert wird, kann es bei bestimmten Generator- Arbeitspunkten zu Instabilitäten kommen.

Vollständigkeitshalber muss an dieser Stelle noch darauf hingewiesen werden, dass mit der vorstehend beschriebenen Gerätekonstellation, PRBS- Generator mit Spannungsausgang und TR5 im Bodebetrieb, ohne zusätzliche Hardware- Komponenten kein Bodediagramm an einem Digureg- Erregersystem aufgenommen werden kann.

Der Grund dafür ist, dass die analogen Ein- und Ausgänge des Digureg keine Spannungs- sondern Stromkanäle sind.



Die nebenstehende Skizze zeigt den Messaufbau eines Bodediagramms an einem Synchrongenerator mit Digureg- Erregersystem sowie die dazu zusätzlichen Komponenten.

Diese bestehen aus einem Universal- Messwertumformer, der die Ausgangsspannung des PRBS- Generators in ein für den Digureg lesbares Stromsignal, sowie einen Mess- Shunt, der das Wirkleistungssignal am Analogausgang des Digureg in ein für den TR5 lesbares Spannungssignal umformt.

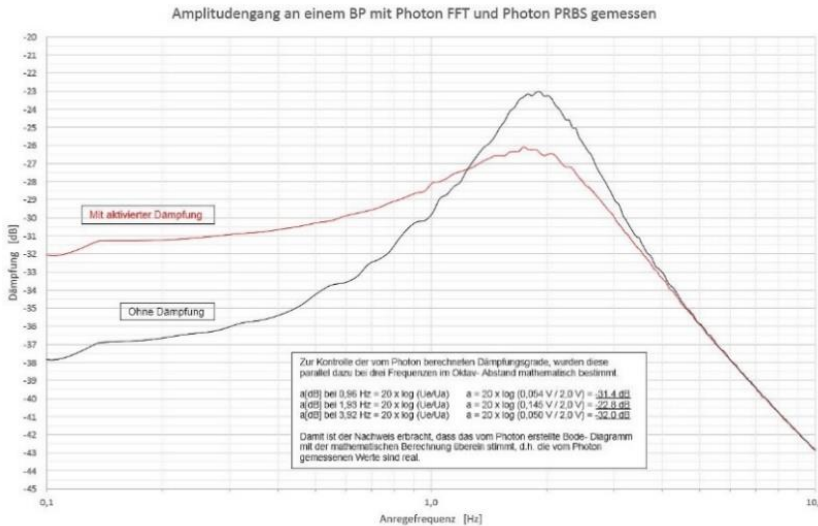
Unabhängig vom gewählten Mess- System sind die zusätzlichen Komponenten bei der Messung an einem Digureg immer erforderlich.

Praxisversuche haben aber auch gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit von mehrfach am gleichen Messobjekt aufgenommenen Bodediagrammen, besonders im unterfrequenten Bereich, dem so genannten „Interarea- Mode“, einer relativ großen Streuung unterliegen.

Viele Netzbetreiber legen Wert darauf, dass auch in diesem Frequenzbereich eine Dämpfung zwischen den Messzuständen „PSS ist ein“ und „PSS ist aus“ im Bodediagramm zu erkennen ist.

Sollte also im Rahmen einer Anlagenzertifizierung auch die Wirkung des im Erregersystem enthaltenen Pendel- Dämpfungs- Systems bewertet werden, empfehlen wir die Verwendung eines hochpreisigen Mess- Systems, wie beispielsweise dem „Photon+“.

Das Ingenieurbüro John verfügt über eine derartige Messtechnik.



Das nebenstehende Bild zeigt zum Vergleich ein mit dem Mess- System „Photon+“ aufgenommenes Bodediagramm.

Bereits am Linienverlauf ist eine deutlich verringerte Welligkeit zu erkennen. Auch bei Messwiederholungen liegen die aufgenommenen Diagramme nahezu deckungsgleich übereinander, so dass auch ein Ergebnisvergleich mit vom Kunden durchgeführten Parallelmessungen keine Probleme bereiten dürften.