



Schwingungserreger für sehr hohe Beschleunigungen zur Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern

Schaut man sich die für die Kalibrierung bzw. Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern geeigneten Schwingungserreger an, dann stellt man fest, dass die maximal erreichbaren Beschleunigungsamplituden bauartbedingt auf ca. $100 g_n$ (1.000 m/s^2) begrenzt sind. Oberhalb dieser Grenze werden für gewöhnlich Stoßerreger eingesetzt, um noch höhere Beschleunigungsamplituden zu erreichen. Letztere haben jedoch den Nachteil, dass der Stoß auch hochfrequente Anteile beinhaltet, die den Beschleunigungsaufnehmer in der Nähe seiner Resonanzfrequenz anregen können und damit zu ungenauen, schwer vergleichbaren Ergebnissen oder sogar zu seiner Zerstörung führen können.

Wie lassen sich dann aber Beschleunigungsaufnehmer für die Messung hoher Beschleunigungen in ihrer Amplitudenlinearität charakterisieren oder sogar bei hohen Amplituden kalibrieren, die nicht für die Messung stoßförmiger Signale entwickelt wurden? So zum Beispiel Sensoren, die sich wegen ihres hohen Gewichts oder ihres eingeschränkten Frequenzganges nicht für die Stoßkalibrierung eignen. Und ließen sich nicht auch Beschleunigungsaufnehmer, die für die Messung transienter Stoßereignisse gedacht sind, besser durch eine sinusförmiger Anregung mit ausreichend hoher Beschleunigung kalibrieren anstatt mit Stößen? Es scheint hier eine Lücke bei den Schwingungserregern im Bereich hoher Beschleunigungen zu geben, die solche Messungen bisher nicht erlaubte.

Im Folgenden sollen zwei neue Schwingungserreger vorgestellt werden, die diese Lücke füllen können. Anhand des Beispiels einer Beschleunigungsmesskette die telemetrisch Beschleunigungen an einer Welle misst, werden darüberhinaus erfolgreiche Messungen in der Praxis vorgestellt, welche die Leistungsfähigkeit dieser Schwingungserreger eindrucksvoll demonstrieren.

Mit dem SE-R101 hat SPEKTRA bereits im letzten Jahr einen Schwingungserreger für Beschleunigungen bis $400 g_n$ (4.000 m/s^2) auf den Markt gebracht (Bild 1). Versucht man bei elektrodynamischen Schwingungserregern normalerweise Resonanzen zu vermeiden, so wurde bei diesem Erreger genau der andere Weg beschritten und die Resonanz bewusst ausgenutzt, um eine möglichst hohe Beschleunigung zu erreichen. Dazu wird der Schwingkopf an drei einstellbaren Federn befestigt und bildet so einen Einmassenschwinger mit veränderbarer Resonanzfrequenz. Regt man den Schwingungserreger nun genau in der jeweils eingestellten Resonanzfrequenz an, lassen sich mühelos große Beschleunigungen erreichen, ohne dass dazu eine große elektrische Leistung in den Erreger eingespeist werden muss, die zu einer Erwärmung des Prüflings führen könnte. Durch die Federeinspannung werden zudem Querbeschleunigungen des Schwingkopfes im Arbeitsbereich des SE-R101 sehr gering gehalten, so dass er die Grenzen der ISO Norm 16063-21 einhält. Da der Schwingungserreger ein internes Bezugsnormale hat, benötigt man keinen Back-to-Back- Aufnehmer als Bezugsnormale, der bei den hohen Beschleunigungen zu mechanischer Instabilität und Base-Strain Effekten neigt. So lässt sich dieser Schwingungserreger nicht nur zu Untersuchungen der Schwingfestigkeit kleiner Bauteile einsetzen, sondern auch zur Kalibrierung gemäß Vergleichsverfahren (Sekundärkalibrierung) oder zur Absolutkalibrierung mittels Laservibrometer (Primärkalibrierung).

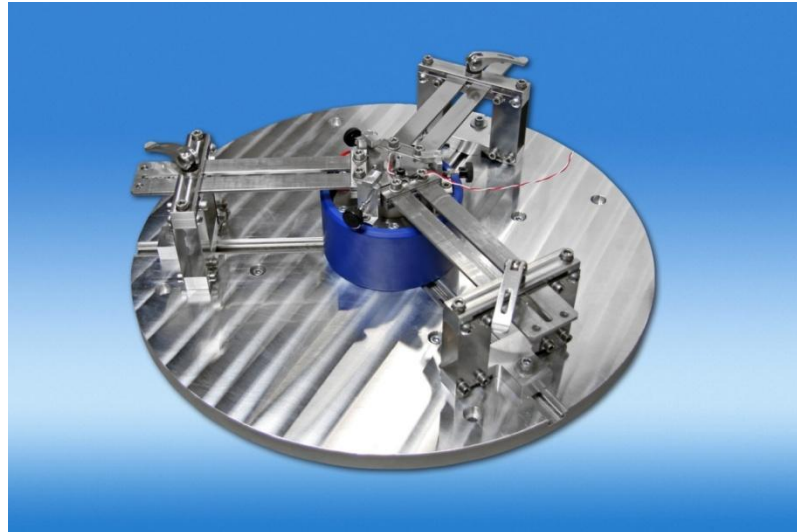


Bild 1 Schwingungserreger SE-R101 für sehr hohe Beschleunigungen

Will man noch höhere Beschleunigungen erreichen, kommt man mit dem Funktionsprinzip des SE-R101 sowohl an konstruktive Grenzen, als auch an Grenzen der Handhabbarkeit des Schwingungserregers. Als Alternative bietet sich dann die resonante Anregung eines Stabes in seiner Längsachse an. Grob betrachtet bildet der Stab hier die Feder und der Prüfling die schwingende Masse. Zur Anregung des Stabes wird dieser mit einem Ende auf einem Schwingungserreger befestigt während am anderen Ende der Prüfling befestigt wird. Die Resonanzfrequenz des Systems ergibt sich im Wesentlichen aus der Elastizität des Stab-Materials und der effektiv schwingenden Masse von Prüfling und Stab. Sie ist bei gegebenem Stabmaterial somit nur beschränkt über die Stablänge bzw. Zusatzmassen einstellbar.

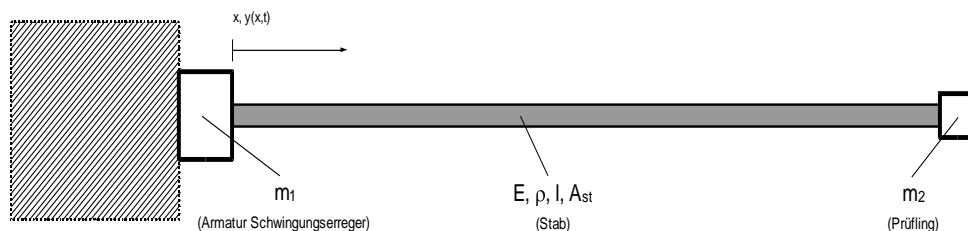


Bild 2 Prinzipskizze SE-R201 Schwingungserreger

Wichtig für die Effizienz des Erregers ist die Wahl der Stabmaterialien. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse für einen Metallstab (Stab 1) und einen Kunststoffstab (Stab 2) gezeigt. Die Beschleunigung a_1 ist dabei die gemessene Beschleunigung am Kopf des Schwingungserregers, der den Stab anregt, und a_2 die Beschleunigung an dem Stabende an dem der Prüfling befestigt ist. Der Parameter n bezeichnet die unterschiedlichen Schwingungsmoden des Stabes.

Stab	n	Messung				
		f_n in Hz	$a_{1 \max}$ [m/s^2]	$a_{2 \max}$ [m/s^2]	P_{\max} [W]	k_{\max} [%]
1	1	1440	3777	10000	16	0,5
	2	3590	1322	10000	42	0,4
	3	5850	279	10000	24	0,3
2	1	300	1100	1100	225	< 5
	2	650	800	1500	225	< 5
	3	1027	700	1450	225	< 5

Tab. 1 Messergebnisse an zwei Stab-Resonatoren aus unterschiedlichen Materialien

Beim Metallstab konnten in allen drei angeregten Schwingungsmoden 10.000 m/s^2 am Prüflingsende bei sehr kleinen Klirrfaktoren ($<0,5\%$) erreicht werden. Die benötigte elektrische Leistung des Schwingungserregers war dabei in allen Fällen klein. Interessant ist, dass an der Armatur des Schwingungserregers trotz der geringen Eingangsleistung hohe Beschleunigungen erreicht wurden und dass bei höheren Schwingungsmoden das Übersetzungsverhältnis zwischen Beschleunigung an der Armatur und Beschleunigung am Prüfling massiv ansteigt.

Der Kunststoffstab erwies sich als völlig ungeeignet und konnte trotz großer elektrischer Leistung am Schwingungserreger keine nennenswert hohen Beschleunigungen erreichen. Ursache hierfür ist im Wesentlichen die innere Dämpfung des Materials. Da sich der Resonanzstabschwingungserreger nicht mehr als einfacher Einmassenschwinger beschreiben lässt, wurde ein numerisches Modell des Schwingungserregers entwickelt, mit dem sich dessen Verhalten in gewissen Grenzen berechnen lässt und das zur Optimierung des Erregers herangezogen werden konnte.

In dem oben bereits angesprochenen Projekt zur Kalibrierung einer telemetrischen Beschleunigungsmesskette sollte ein Sensor von ca. 230 Gramm Gewicht untersucht werden, der zur Messung von Beschleunigungen an rotierenden Wellen eingesetzt wird (siehe Bild 3). Ziel war es neben einer Kalibrierung der Messkette auf einem konventionellen Schwingungserreger, diese auch im Bereich sehr hoher Beschleunigungen bezüglich ihrer Amplitudenlinearität zu überprüfen.

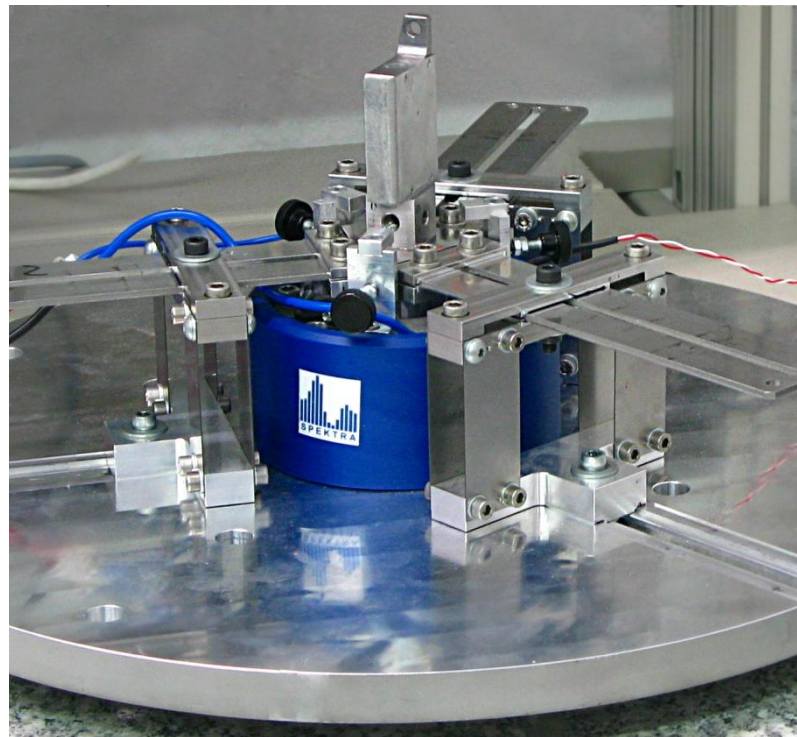


Bild 3 Prüfling montiert auf dem Schwingungserreger SE-R101

In einem ersten Schritt wurde der Frequenzgang der Messkette mittels eines Gleitsinus auf einem normalen Schwingungserreger mit einer Beschleunigung von $20 g_n$ (200 m/s^2) aufgenommen (siehe Bild 4). Damit sollte sichergestellt werden, dass die Messkette voll funktionsfähig ist und keine Sprünge im Frequenzgang auftreten, die auf einen Defekt hindeuten oder einfach den nutzbaren Frequenzbereich einschränken würden. Dann wurde eine „normale“ Sekundärkalibrierung durchgeführt.

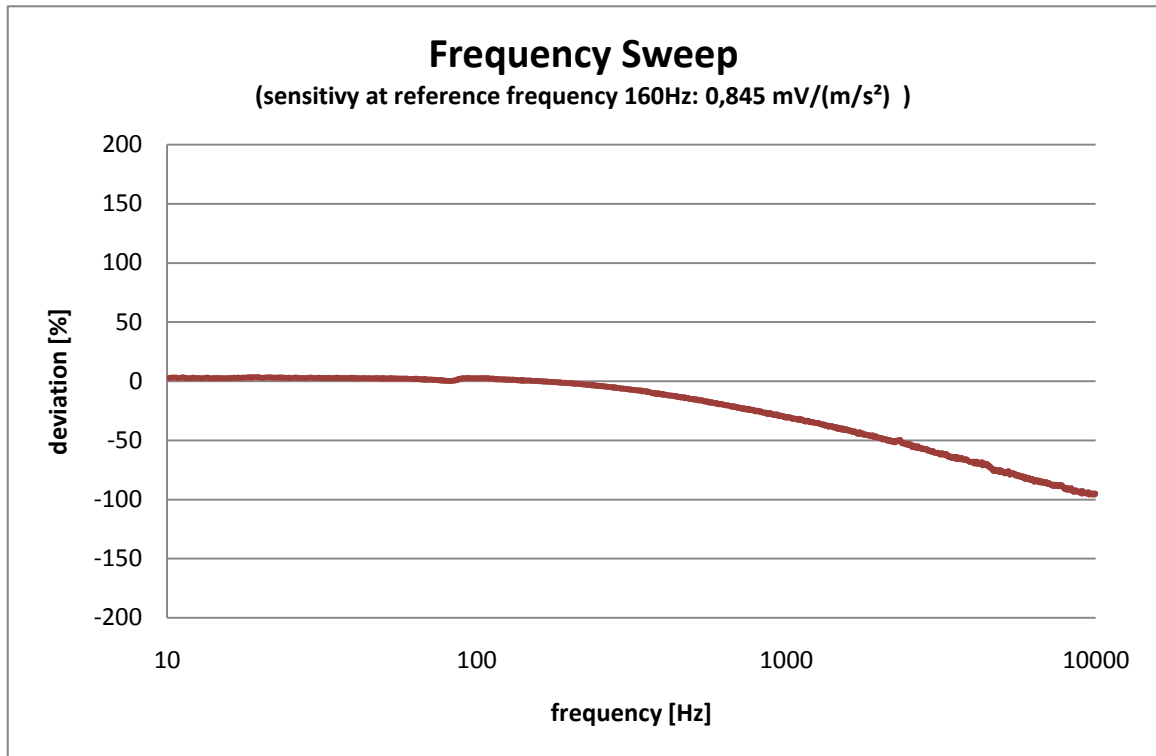


Bild 4 Gleitsinus-Messung zur Überprüfung der Stetigkeit der Übertragungsfunktion

Nachdem Überprüfung und Kalibrierung erfolgreich waren, wurde nun die Amplitudenlinearität an zwei Frequenzen überprüft. Auf einem SE-R101 wurde die Beschleunigung dazu bei einer Frequenz von ca. 350 Hz schrittweise bis auf 270 g_n (2.700 m/s²) erhöht (Bild 5). Die Messungen zeigten sehr gute Ergebnisse mit Änderungen der Sensorempfindlichkeit kleiner 0,5%.

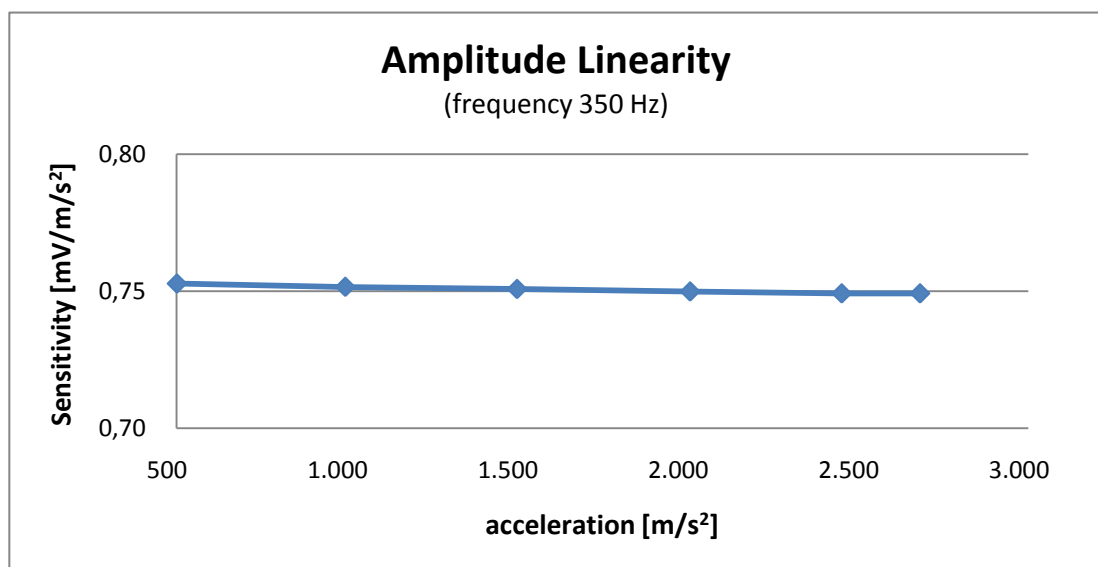


Bild 5 Untersuchung der Amplitudenlinearität auf einem SE-R101

Um noch höhere Beschleunigungen zu erzielen, wurde der Sensor auf einen Stabresonator SE-R201 befestigt und bei ca. 850 Hz bis zu 500 g_n (5.000 m/s²) beschleunigt (Bild 6). Auch hier veränderte sich die Sensorempfindlichkeit um nicht mehr als 0,5%.

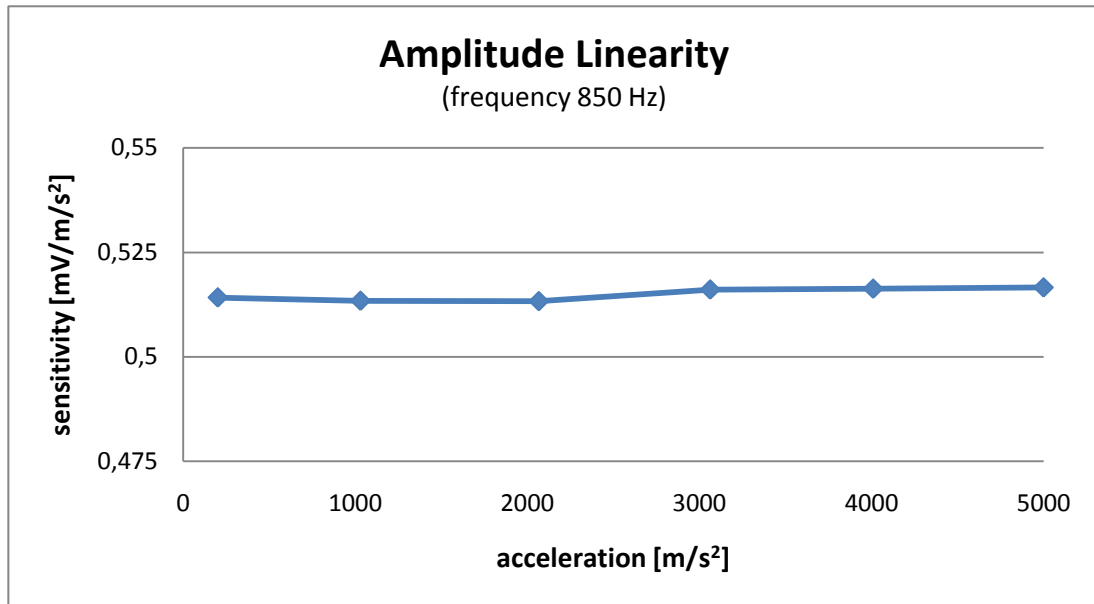


Bild 6 Untersuchung der Amplitudenlinearität auf einem SE-R102 Stabresonator

Die obigen Messungen zeigen, dass die neuen SPEKTRA Schwingungserreger SE-R101 und SE-R201 eine Lücke füllen, die zwischen den mäßigen Beschleunigungen konventioneller Schwingungserreger für die Sinuskalibrierung und den Stoßerregern für hohe Beschleunigungen existierte. Sensoren, die zwar für hohe Beschleunigungen ausgelegt sind, aber aufgrund ihres Gewichtes oder des eingeschränkten Frequenzganges nicht für die Kalibrierung auf Stoßerregern geeignet sind, können hier erstmals bis zu Amplituden $1.000 g_n$ (10.000 m/s^2) kalibriert oder überprüft werden.

Die Hochbeschleunigungs-Schwingungserreger könnten auch eine interessante Alternative für die Kalibrierung von Stoßsensoren z.B. für Crash-Tests im Automobil-Bereich sein. Erstmals können sinusförmige Beschleunigungen in metrologischer Qualität bis zu Amplituden von $1.000 g_n$ (10.000 m/s^2) erzeugt werden. Die Sensoren ließen sich so über ihren gesamten Amplitudenbereich kalibrieren, ohne dass die für transiente Beschleunigungen (Stoß) typischen Probleme der mangelnden Vergleichbarkeit von Kalibrierungen auf verschiedenen Stoßerregern entstehen können. Diese Probleme haben ihre Ursache im breiten Spektrum der Stoßsignale, das stark von den Eigenschaften des Stoßerregers (erreichbare Stoßbreite) abhängt. Im Zusammenspiel von Stoßspektrum mit Frequenzgang des Sensors können die Kalibrierergebnisse je nach Stoßerreger recht unterschiedlich ausfallen. Eine Kalibrierung des Sensors bei mittleren Beschleunigungsamplituden kombiniert mit einer Untersuchung der Amplitudenlinearität bei hohen Amplituden an einer sinnvoll gewählten Frequenz, könnte hier die Eigenschaften des Sensors wesentlich besser beschreiben, als eine Stoßkalibrierung. Zudem wäre diese Kalibrierung wahrscheinlich sogar noch schneller durchzuführen, als die Kalibrierung auf einem üblichen Stoßpendel. Die Möglichkeiten dieser Schwingungserreger sind also noch längst nicht ausgeschöpft und weitere Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet könnte noch andere interessante Anwendungen zu Tage fördern.