VIBRATION RESEARCH

THE INNOVATOR IN

SOUND & VIBRATION TECHNOLOGY

Innotesting 2022

WWW.VIBRATIONRESEARCH.COM

TEST-NORMEN - EINHEITLICHE & WIEDERHOLBARE TEST - EIN WUNSCH ODER WIRKLICH MACHBAR?

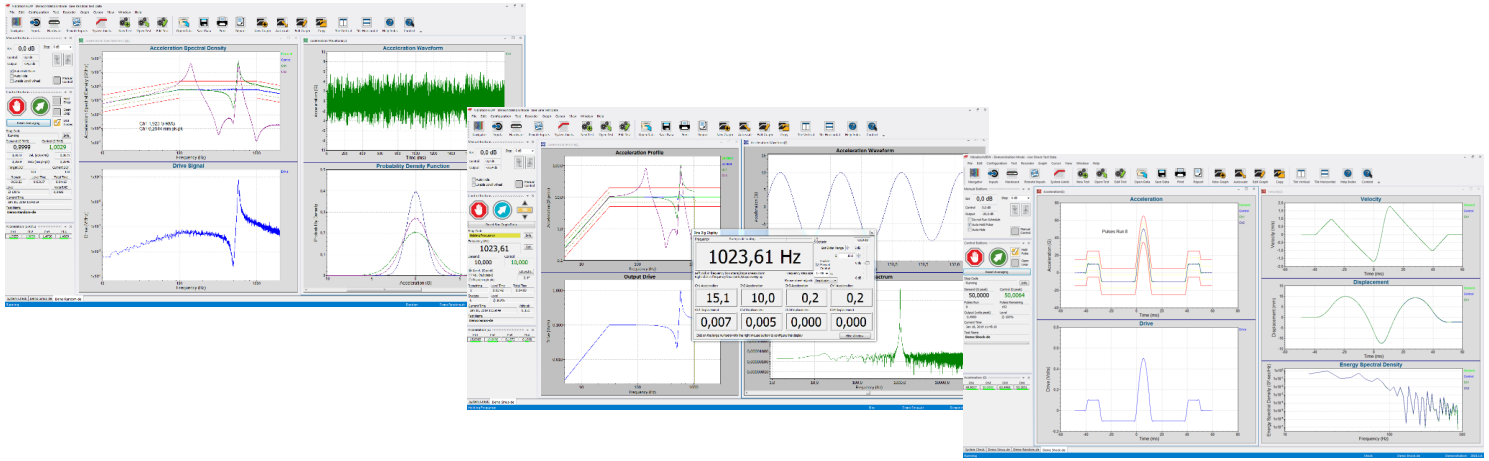
Holger Boller
Vibration Research Europe GmbH

Marc Brown
Vibration Research (UK)

VERGLEICH VON NORMEN UND PRÜFANFORDERUNGEN

INHALT

- **Übersicht der betrachteten Test Standards**
- **Allgemeine Anforderungen an das Prüfequipment**
- **Allgemeine Anforderungen an die Schwingungsregelung**
  - Einzelpunktregelung, Mehrpunktregelung, Notchen und Limiting
- **Anforderungen Random Test**
- **Anforderungen Sinus Test**
- **Anforderungen Schock Test**



TEST STANDARDS (AUSWAHL)

NATO STANDARD

STANAG 4370
(AECTP 400)

NATIONAL DEFENCE STANDARDS
(EINSCHLIEßLICH DER MEISTEN MILITÄRFLUGZEUGE)

USA
MIL Std 810
Method 514 & 516

UK
Def Stan 00-35
Test M1 and M3

AEROSPACE / KOMMERZIELLE AIRCRAFT

USA
RTCA - DO160
Sektion 8 & 7

Europe
EUROCAE / ED-14
Sektion 8 & 7

KOMMERZIELLE STANDARD

International (EN 60068 & IEC 60721)

Sinus	Rauschen	Schock
EN 60068-2-6	EN 60068-2-64	EN 60068-2-27

(Querverweise in vielen IEC ISO Standards)

Es gibt viele andere Normen, im Bereich der mechanischen Umweltsimulation die mit ANDEREN spezifischen Branchen verbunden sind (z.B. im Raumfahrtsektor, optische Industrie, Bahnapplikationen...),

Aber die meisten Normen haben ihre Wurzeln in diesen Normen oder beziehen sich auf diese Normen, oder verwenden die Regelparameter und Strategien, Toleranzen oder andere Begriffe aus diesen Normen.

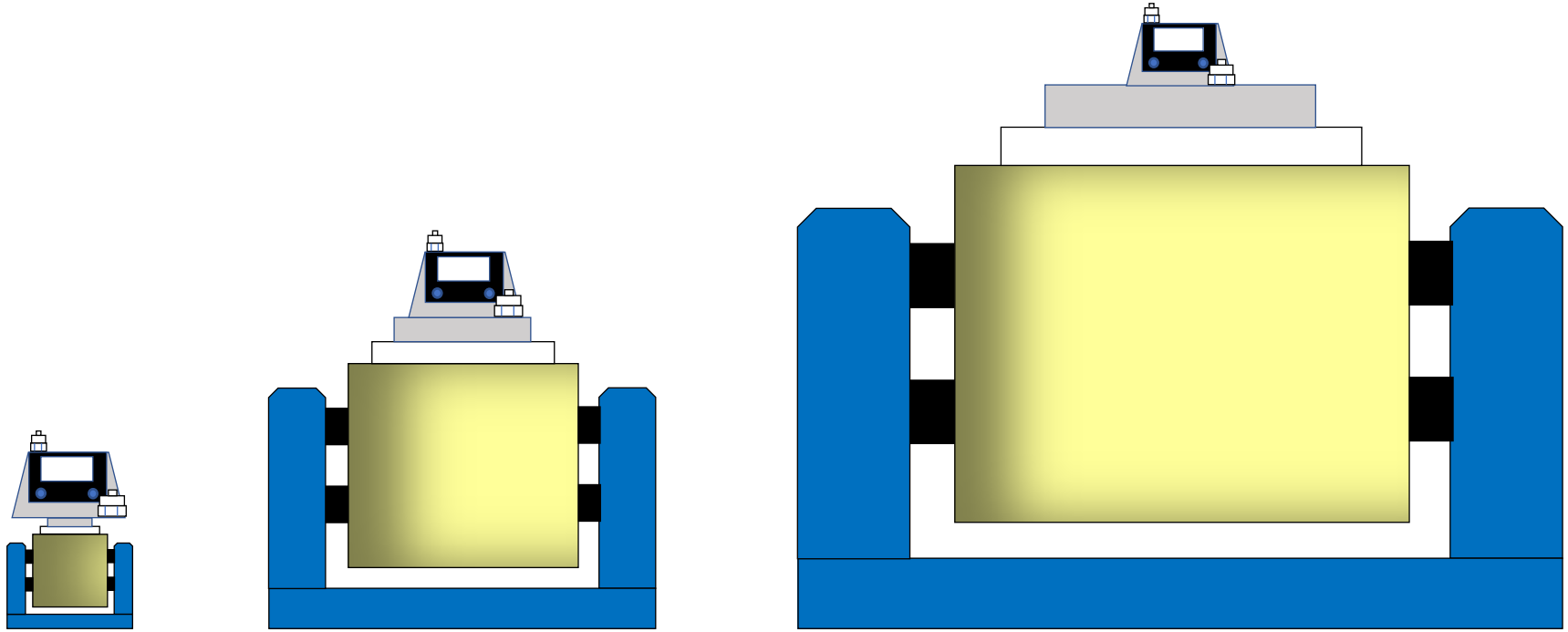
WIE KANN MAN KONSTANTE UND WIEDERHOLBARE ERGEBNISSE ERZIELEN?

- **Schwingerreger, Aufspannvorrichtungen und deren Einfluss auf die Prüfung**
- **Aussagen über die Qualität der verwendeten Prüfsignale**
- **Regelpunkt(e)**
  - Wo müssen wir die spezifizierte Testamplitude anwenden oder garantieren?
- **Welche Regelstrategie soll angewendet werden oder wird gefordert?**
  - Mittelwert / Gewichteter Mittelwert / Vektor / Maximum / Minimum
  - Wie viele Kanäle wollen (müssen) wir für die Regelung verwenden?
- **Messpositionen, was ist notwendig und wie viele Punkte benötigen wir?**
  - Zusätzliche Messpositionen - Warum sind sie wichtig?
- **Kontrolle der Anregungsrichtungen - Querbewegungen**
  - Gleichförmige Anregung
  - Dreh- und Taumelbewegungen
- **Notching und Limiting**
  - Notwendige Begrenzung von Anregungs- und Antwortamplituden
  - Schutz vom Prüfling oder Prüfequipment

WIE KANN MAN KONSTANTE UND WIEDERHOLBARE ERGEBNISSE ERZIELEN?

Einfluss der Größe (Leistungsfähigkeit) des verwendeten Schwingerregers

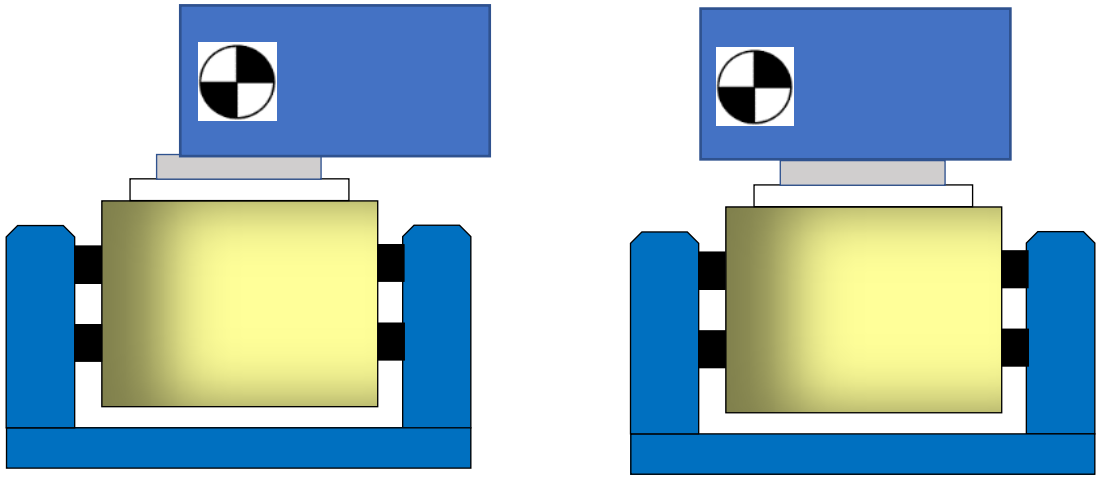
- Kann ich oder muss ich einen kleinen oder großen Schwingerreger verwenden?
- Hierzu wird man in den verschiedenen Normen keine Aussage finden.
  Die Festlegung trifft der Prüfingenieur.
- Betrachtung der inneren Impedanz – Ausweg - Kraftregelung

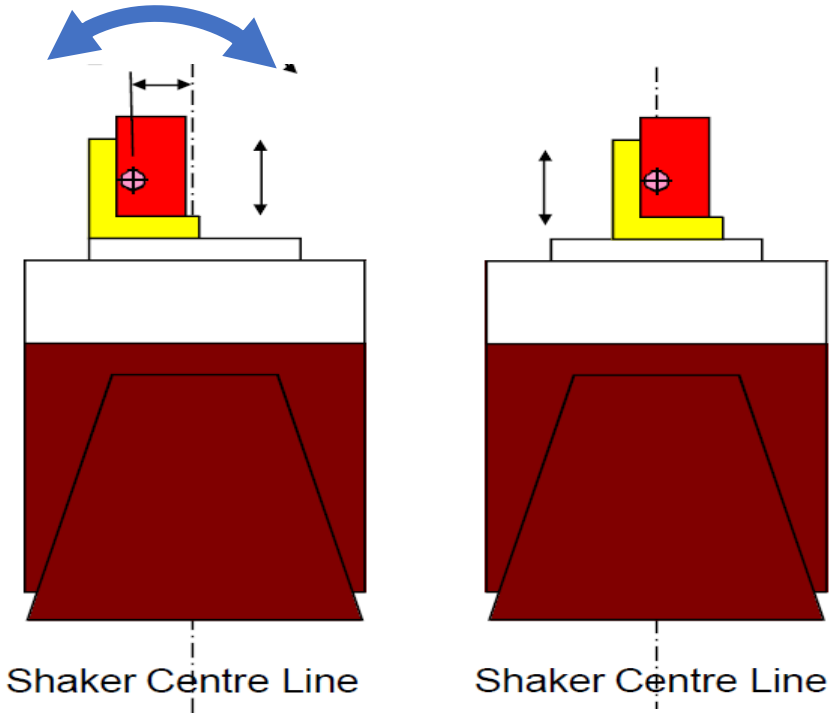


WIE KANN MAN KONSTANTE UND WIEDERHOLBARE ERGEBNISSE ERZIELEN?

Einfluss der Ausrichtung des Prüflings auf den Schwingerreger

- Ist der dynamische Massenschwerpunkt nicht in der Mittenachse vom Schwingerreger treten sofort hohe Querbelastungen für den Schwingerreger auf.
- Hohe Querbeschleunigung (Querbelastungen) für den Prüfling wären die Folge.
- Hierzu gibt es in den verschiedenen Normen Aussagen.

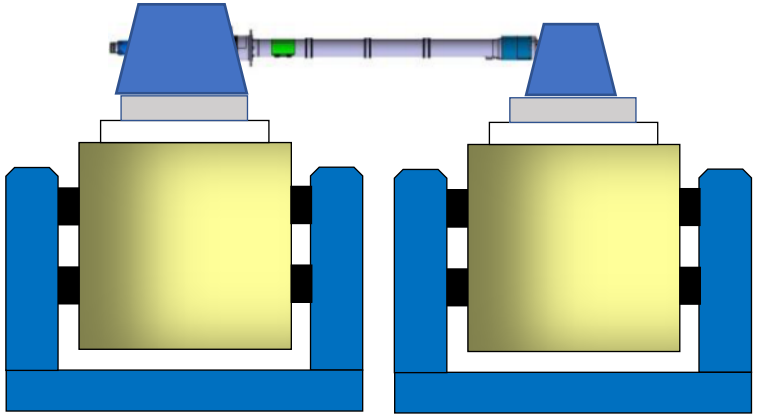


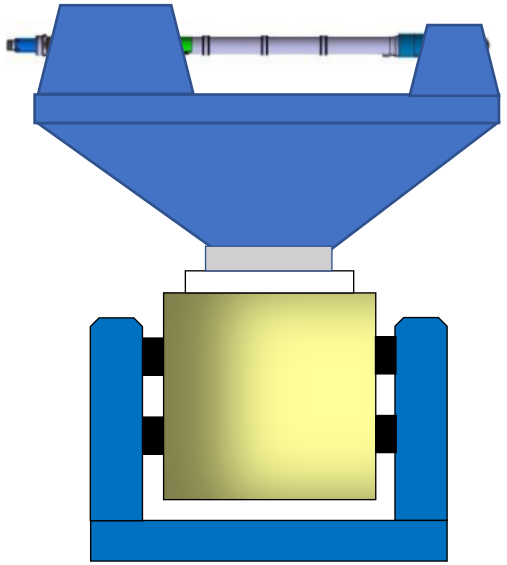


WIE KANN MAN KONSTANTE UND WIEDERHOLBARE ERGEBNISSE ERZIELEN?

Wie wird der Prüfling befestigt?

- Ist eine große Aufspannfläche hilfreich oder ist es besser große Prüflinge über mehrere Schwingerreger anzuregen?
- Welchen Einfluss hat die Art der Aufspannung auf unser Testergebnis?
- Gibt es hier Vorgaben oder Empfehlungen in den Standards?

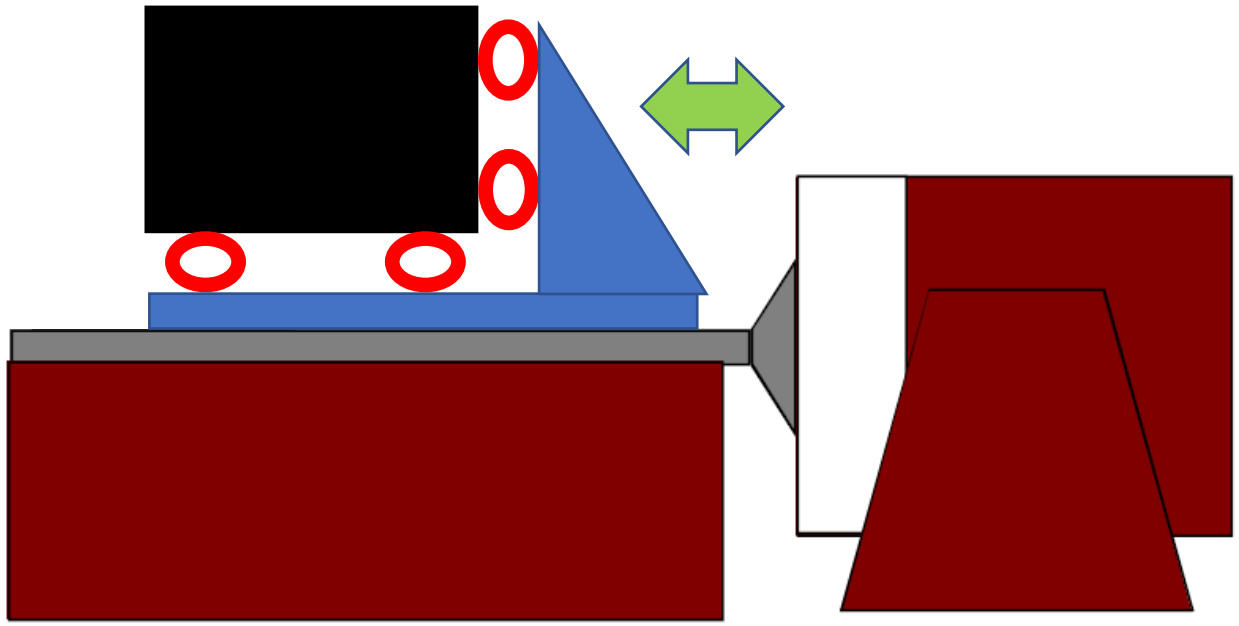


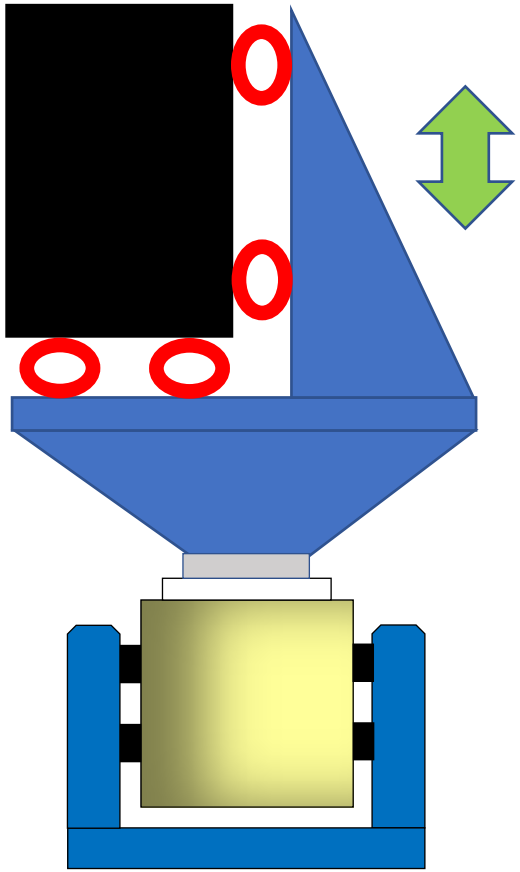


WIE KANN MAN KONSTANTE UND WIEDERHOLBARE ERGEBNISSE ERZIELEN?

Wie wird der Prüfling befestigt?

- Kann ich den Prüfling drehen, oder ist er nur in der Einbaulage betriebsfähig?
- Gibt es hier Vorgaben oder Empfehlungen in den Standards?

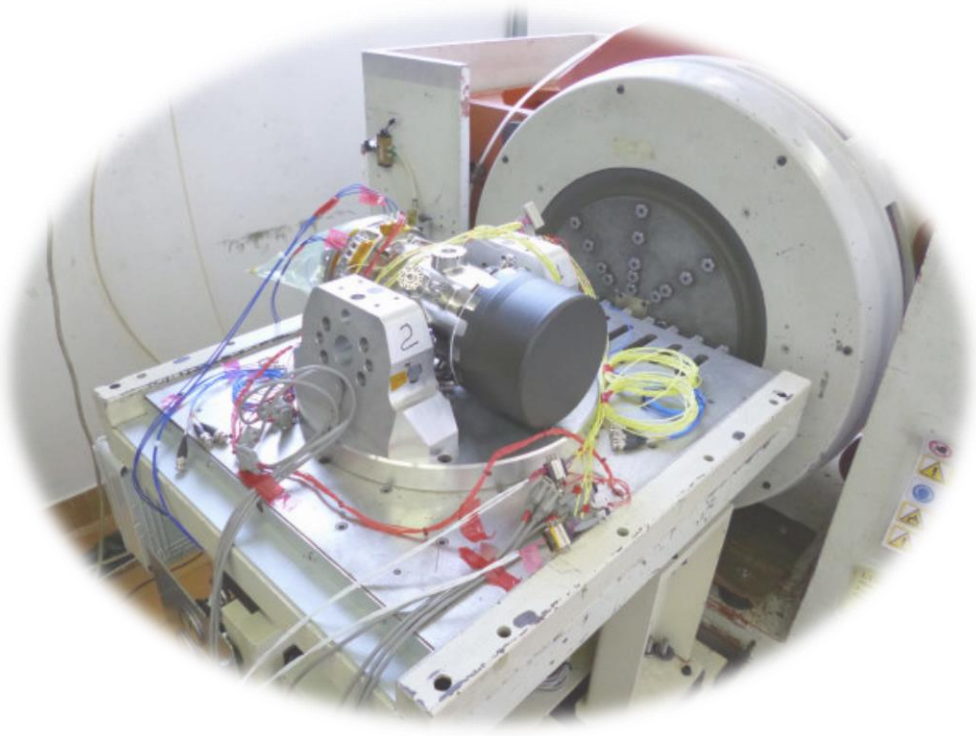




TERMINOLOGIE FÜR KONTROLL- UND MESSSTELLEN

In den Standards verwendete Terminologie für Punkte (Messungen und Befestigung)

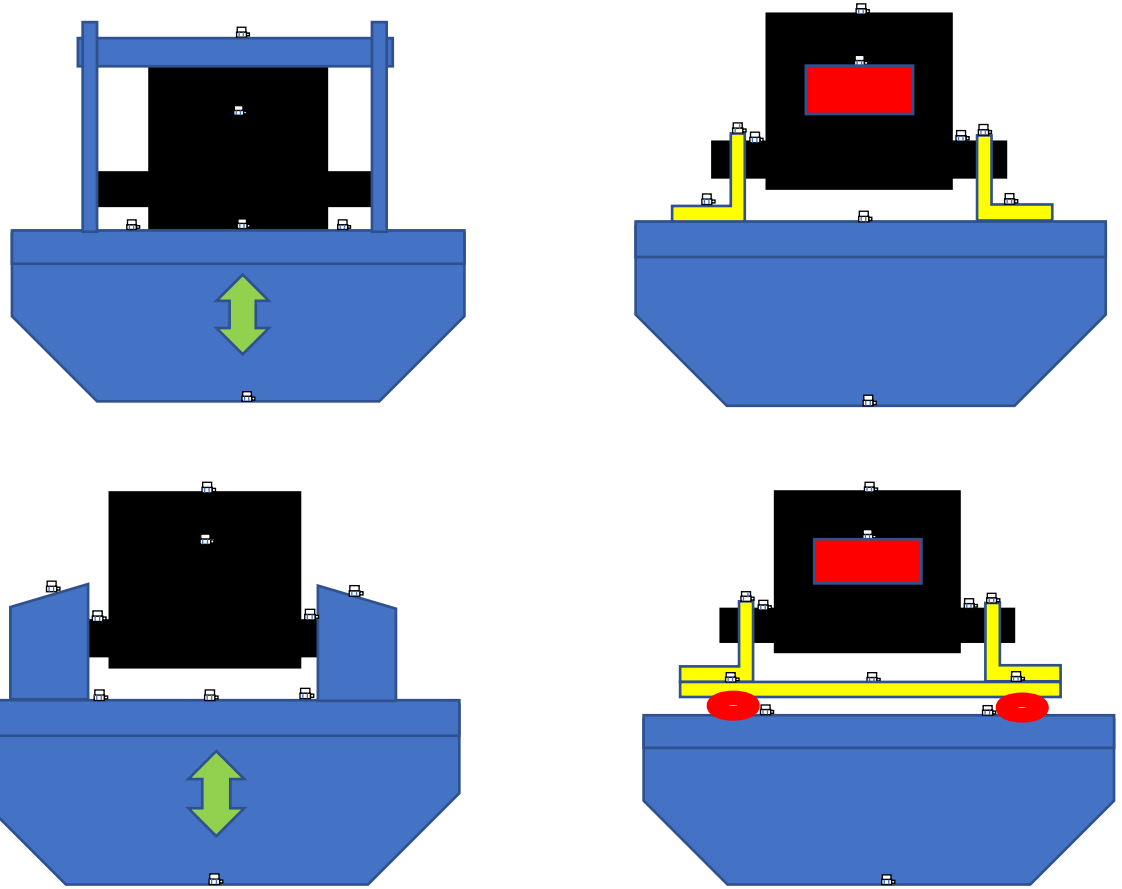
- Befestigungspunkte
  - Schnittstelle Vorrichtung / Prüfling
- Messpunkte
- Antwortpunkte
- Kontrollpunkte
- Klar definierter Bezugspunkt
  - Einzelpunktregelung
- Fiktive Bezugspunkte
  - Mehrpunktregelung



TERMINOLOGIE FÜR KONTROLL- UND MESSSTELLEN

In den Standards verwendete Terminologie für Punkte (Messungen und Befestigung)

- Befestigungspunkte
  - Schnittstelle Vorrichtung / Prüfling
- Messpunkte
- Antwortpunkte
- Kontrollpunkte
- Klar definierter Bezugspunkt
  - Einzelpunktregelung
- Fiktive Bezugspunkte
  - Mehrpunktregelung

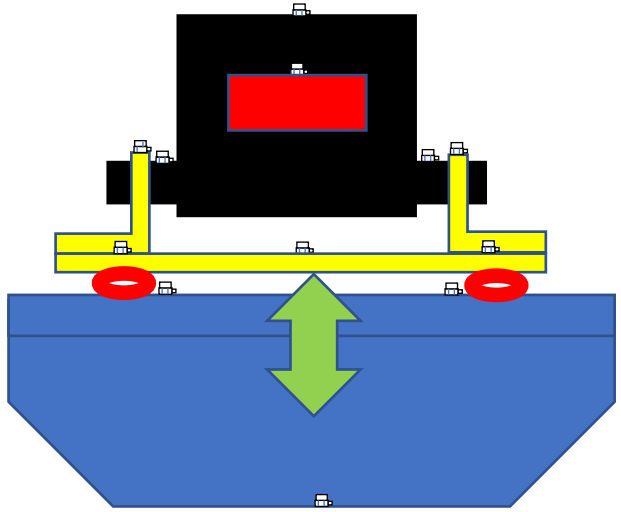


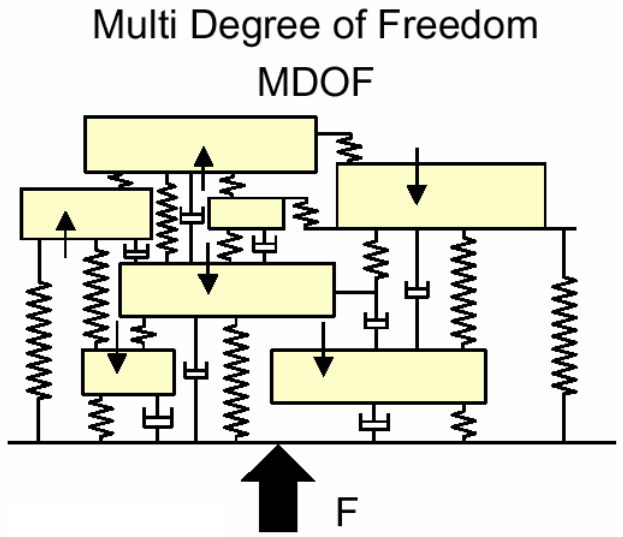
POSITIONEN FÜR DIE MESS- UND REGELKANÄLE

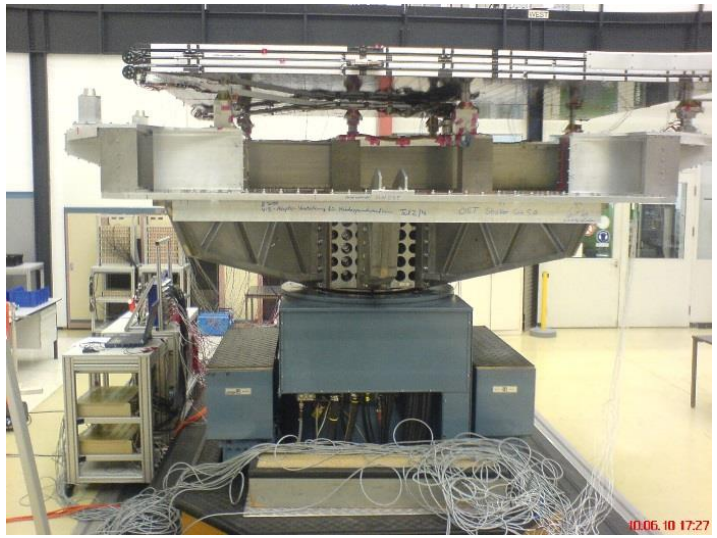
Die Frage nach der "richtigen" oder "wahren" Beschleunigung am Prüfling ist nicht einfach zu beantworten.

In den meisten Prüfspezifikationen gibt es nur "vage" Informationen und Aussagen zur Position des Regelaufnehmers.

Die gewählte Position des Regelaufnehmers bestimmt jedoch die Beschleunigung bei der Vibrationsprüfung und damit den gesamten Prüfablauf.







POSITIONEN FÜR DIE MESS- UND REGELKANÄLE

Kontrollpunkt

„Dieser ist ein Punkt an der Aufspannvorrichtung, dem Schwingtisch oder dem Prüfling, der so ***dicht wie möglich*** bei einem Befestigungspunkt liegt und in ***jedem Falle eine steife Verbindung*** zu ihm haben muss.“

Erlaubte Abweichungen nach EN 60068 Teil 2-6
+/- 25 % entspricht + 1,9 dB / -2,5 dB bis 500 Hz
+/- 50 % entspricht +3,5 dB / - 6,0 dB ab 500 Hz

„Mit der Messung an einem oder mehreren Kontrollpunkten wird die Einhaltung der Prüfbedingungen nachgewiesen“

„Wenn vier oder weniger Befestigungspunkte vorhanden sind, ist jeder von Ihnen als Kontrollpunkt zu verwenden“

„Wenn mehr als vier Befestigungspunkte vorhanden sind, legt die Einzelbestimmung vier von ihnen als repräsentativ fest, die als Kontrollpunkte verwendet werden müssen.“

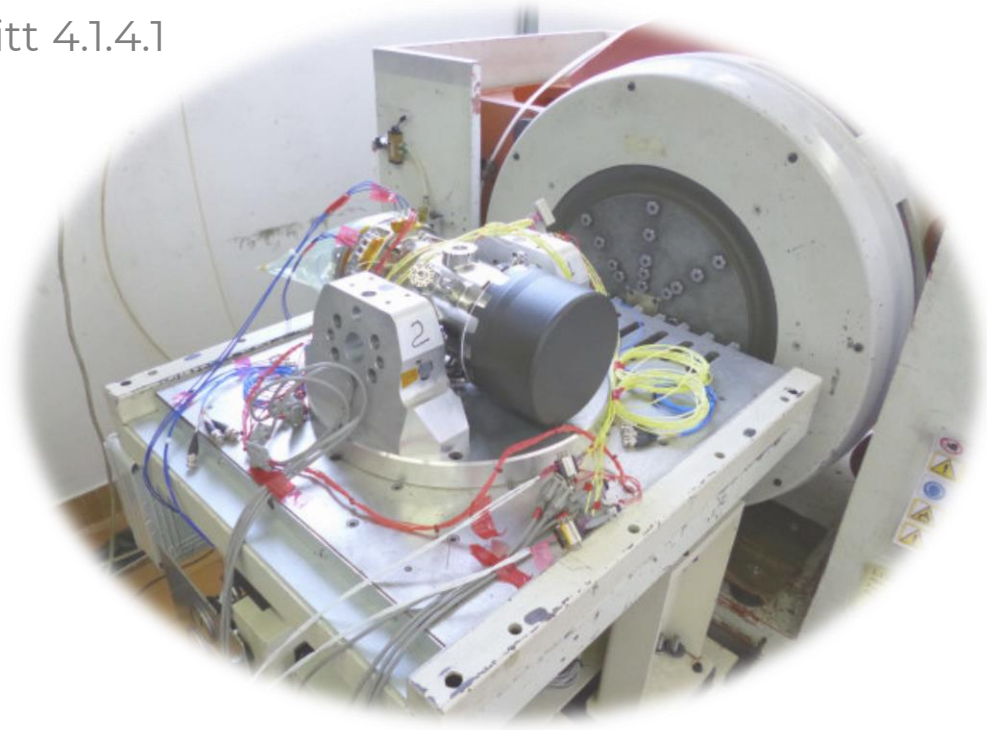
TERMINOLOGIE FÜR KONTROLL- UND MESSSTELLEN

Bezugspunkt (Regelpunkt)

„Er ist ein ausgewählter Kontrollpunkt, dessen Signal zur Regelung der Prüfeinrichtung gemäß den Angaben dieser Norm verwendet wird.“

Erlaubte Abweichungen nach EN 60068-2-6 - Abschnitt 4.1.4.1

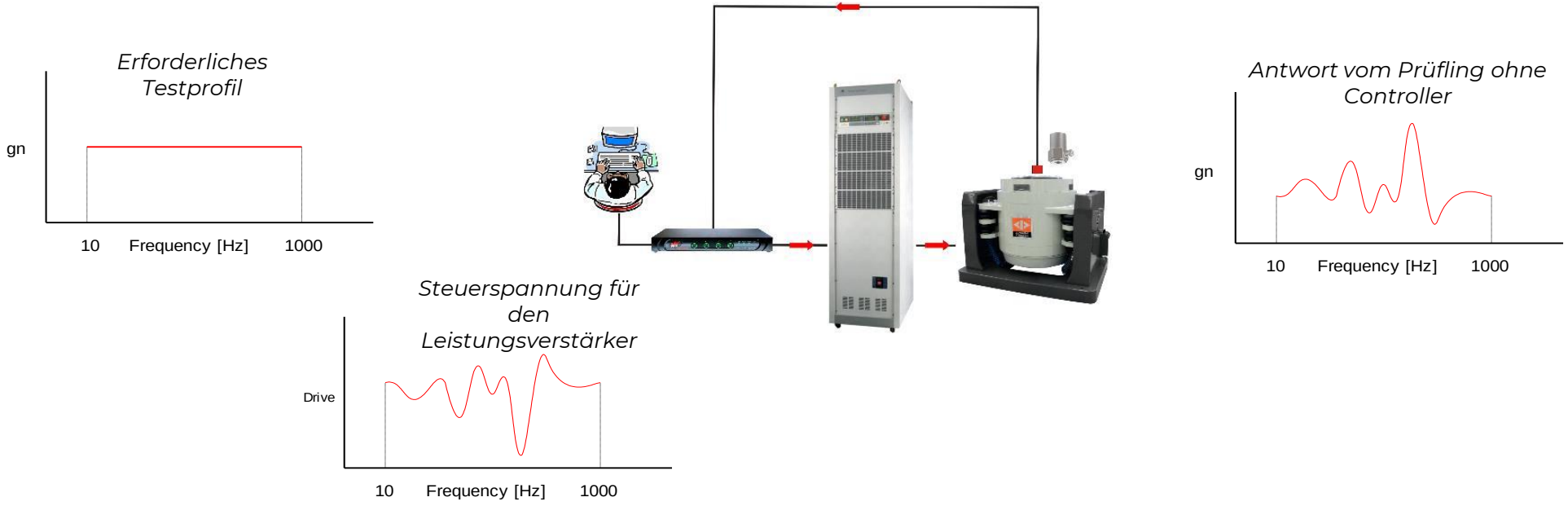
+/- 15 % entspricht + 1,2 dB / - 1,4 dB



FUNKTION UND AUFGABE DES SCHWINGREGELSYSTEMS

Besteht die Aufgabe des Regelsystems darin, dass das programmierte Beschleunigungsprofil mit der tatsächlich gemessenen Beschleunigung übereinstimmt?

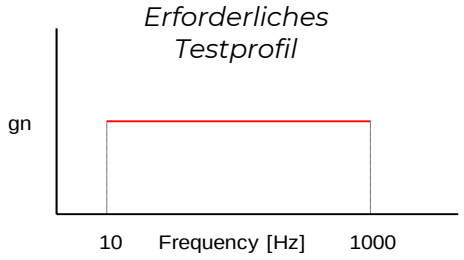
- Voraussetzung ist, dass das Regelsystem und die Aufnehmer regelmäßig kalibriert werden.
- Allgemein gilt: Das Regelsystem überwacht die Antwort der Beschleunigungsaufnehmer und passt die Ausgangsspannung zum Leistungsverstärker des Schwingprüfsystems an.

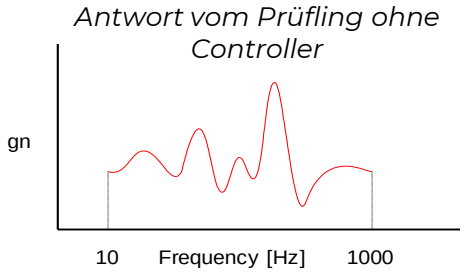


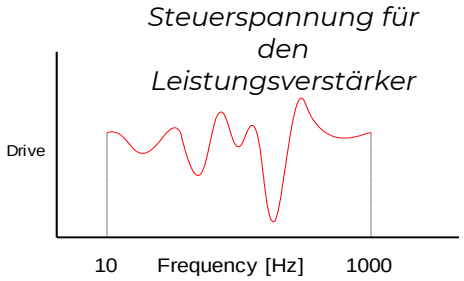
FUNKTION UND AUFGABE DES SCHWINGREGELSYSTEMS

Oder besteht die Aufgabe des Regelsystems darin, dass das programmierte Testprofil (Testsetup) mit dem zugrunde liegenden Standard übereinstimmt?

- Hier ist der Anwender gefragt. Er interpretiert den Standard und den Prüfauftrag, definiert die Position der Regel- und Messaufnehmer, legt die Regelstrategie fest und entwickelt Prüfaufnahmen.
- Das Regelsystem überwacht „nur“ die Antwort der Beschleunigungsaufnehmer und passt die Ausgangsspannung - unter Vorgaben der Testdefinition - zum Leistungsverstärker des Schwingprüfsystems an.



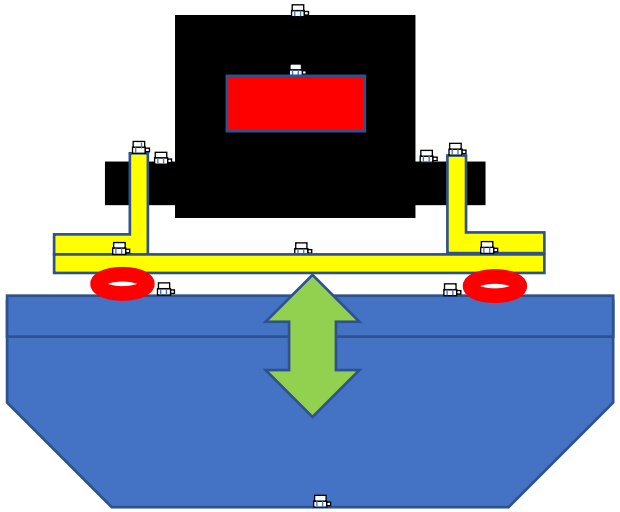




ARTEN DER SCHWINGUNGSREGELUNG

Verwendete Terminologie bei der Regelstrategie

- **Kontrolle der Anregung**
- **Kontrolle der Antwort**
- **Einzelpunktregelung**
- **Mehrpunktregelung**
- **Kontrolle von Grenzwerten**
  - Limit und Notchen
  - Boost Funktion
- **Überwachung der Grenzwerte des Prüfsystems**



ARTEN DER SCHWINGUNGSREGELUNG

Arten der Mehrpunktregelung

MAX – Regelung nach dem größten Amplitudenwert

- Es erfolgt keine Übertestung an den Messpunkten

MIN – Regelung nach dem kleinsten Amplitudenwert

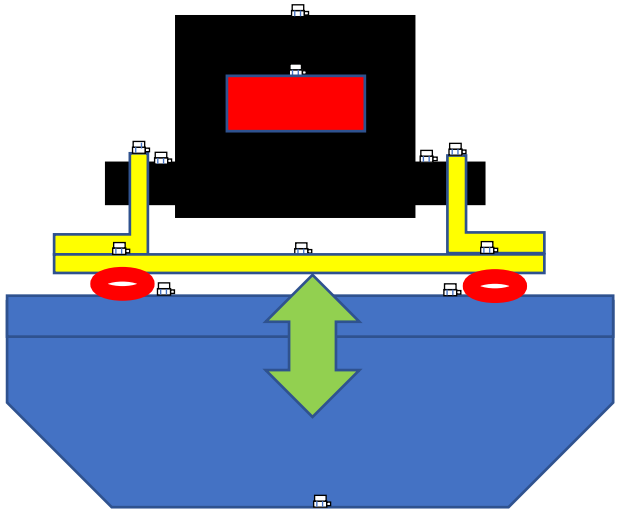
- Es erfolgt keine Untertestung an den Messpunkten

MITTELUNG – Zusammenfassung von Regelpunkten

- Arithmetische oder gewichtete Mittelung für individuelle Messpunkte
- Welche Grenzen gibt es für die einzelnen Regelpunkte?

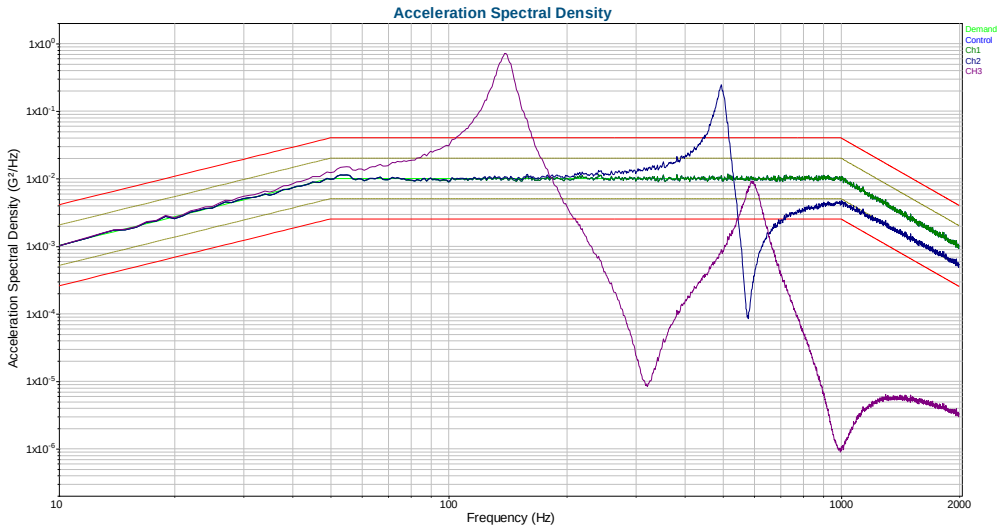
LIMIT – Begrenzung von Teilkomponenten mit eigenem Profil

- Abschwächung des Referenzprofils

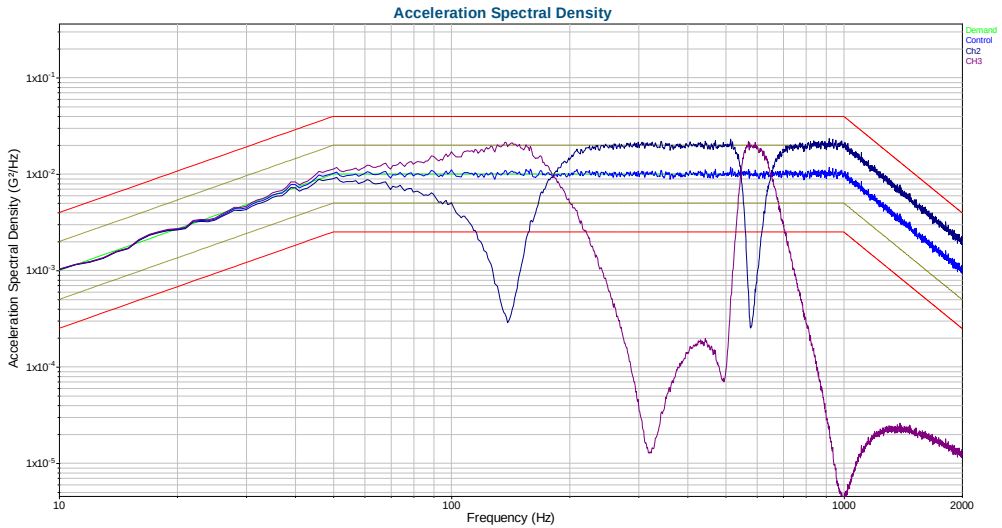


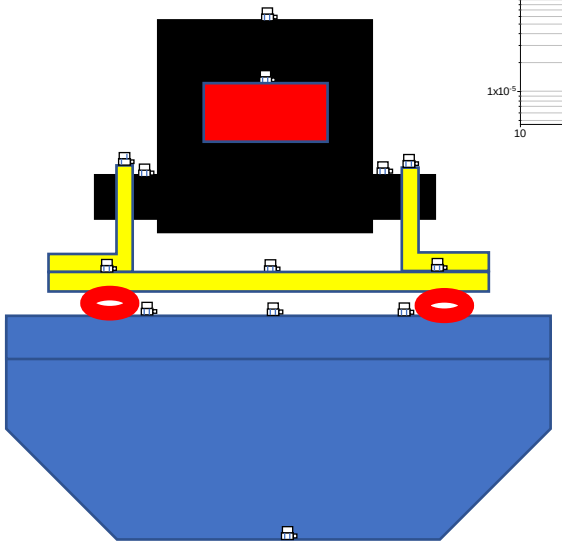
ARTEN DER SCHWINGUNGSREGELUNG

Einpunktregelung



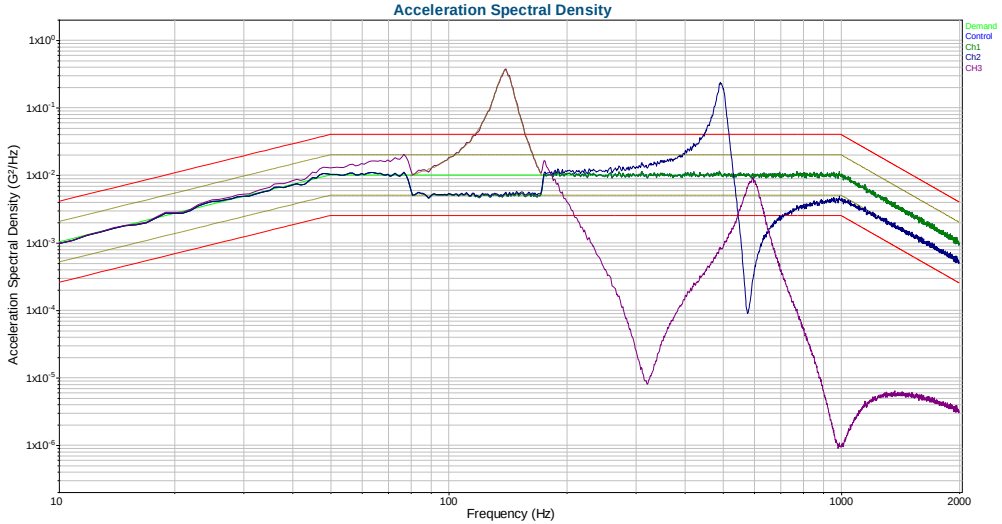
Mehrpunktregelung

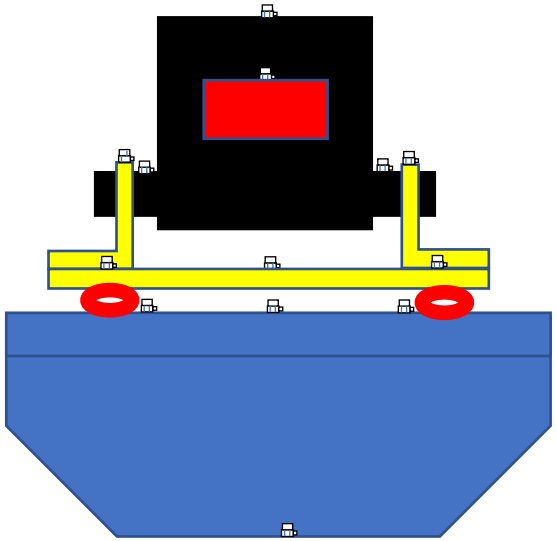




ARTEN DER SCHWINGUNGSREGELUNG

Notchen und Limiting (Begrenzung)



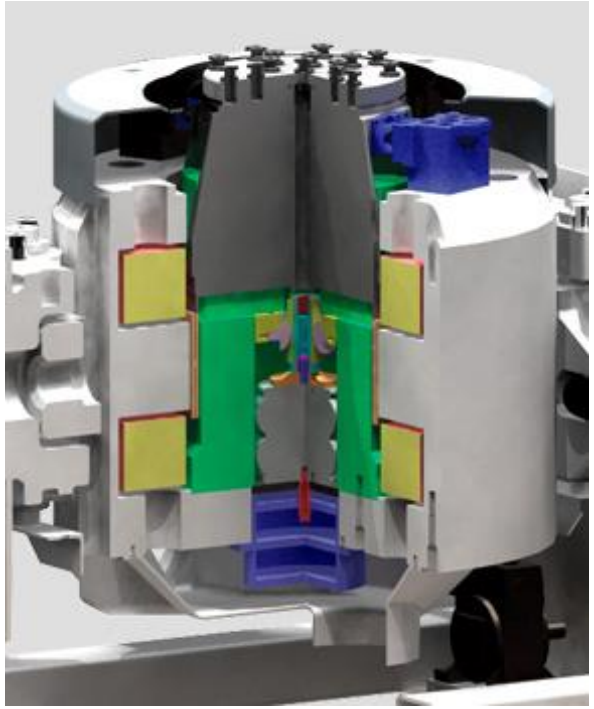


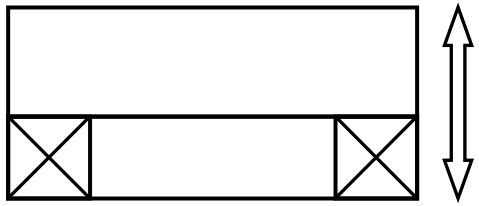
KONTROLLE DER BEWEGUNGSFORMEN AM SCHWINGERREGER

Uniaxiale Prüfung

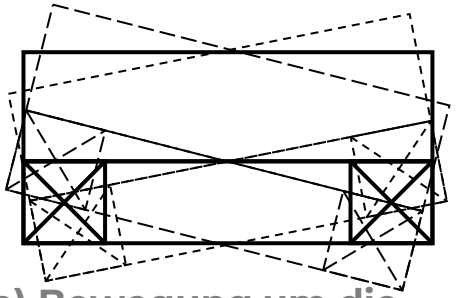
Die vom Schwingerreger erzeugte Bewegung sollte so beschaffen sein, dass sich die Befestigungspunkte des Prüflings im ***Wesentlichen*** parallel zur Anregungsachse bewegen.

Was bedeutet das für unser Shaker-System?

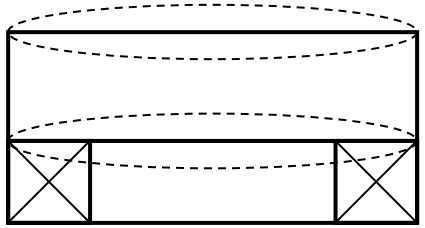




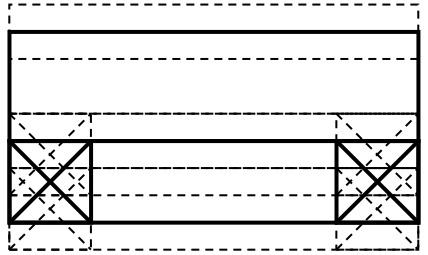
a) Idealfall rein Translatorisch



b) Bewegung um die Schubachse



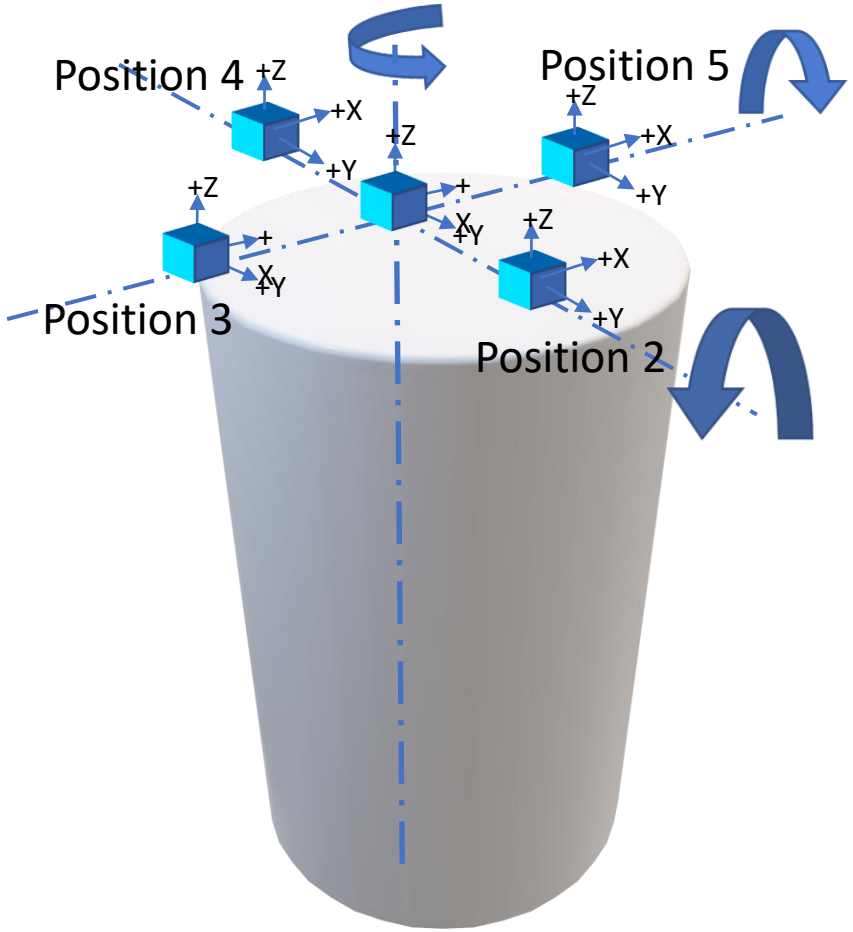
c) Durchbiegung der Schwingarmatur



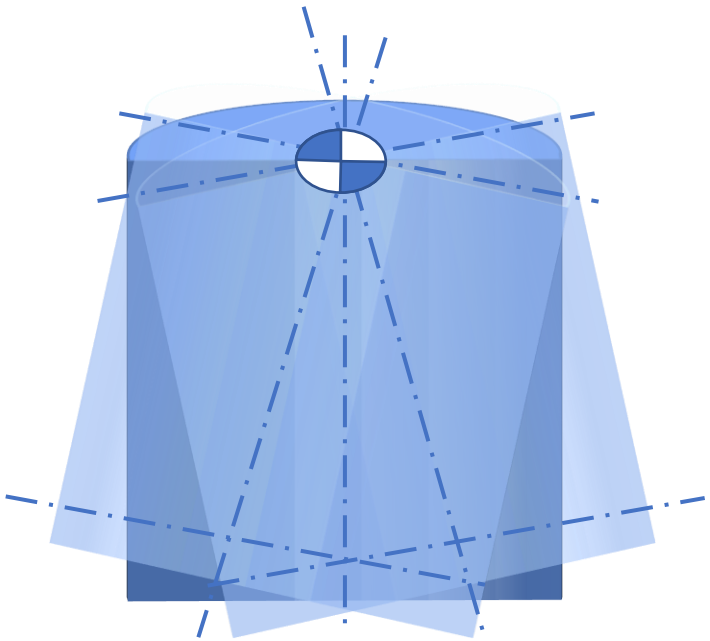
d) Axialresonanz der Schwingarmatur

BEWEGUNGSFORMEN AM SCHWINGERREGER

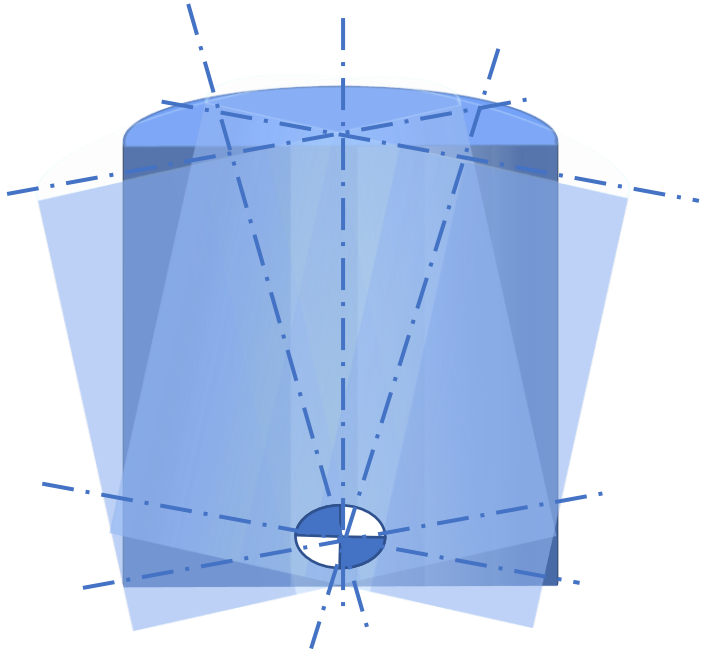
Messungen an der Schwingarmatur



Drehung um das obere Führungssystem

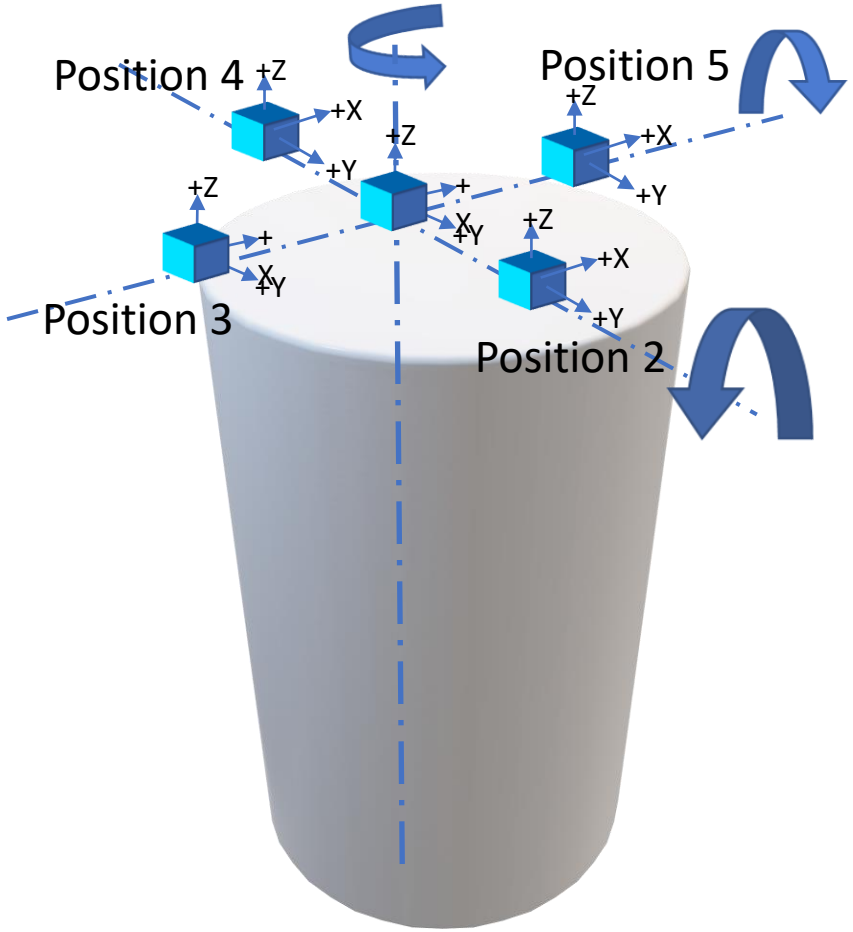


Drehung um das untere Führungssystem



BEWEGUNGSFORMEN AM SCHWINGERREGER

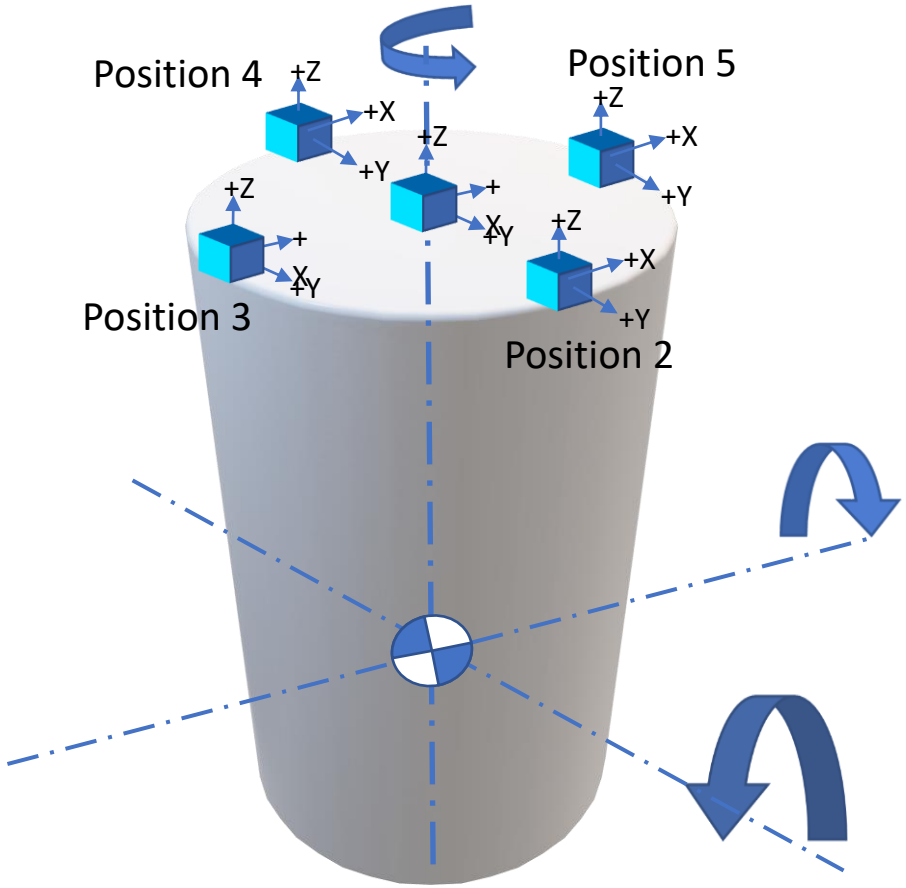
Messungen an der Schwingarmatur



Bewegung	Messposition				
	1	2	3	4	5
Rotation um die Z Achse	-	+X Achse	+Y Achse	-X Achse	-Y Achse
Rotation um die Y Achse	-	-	-Z Achse	-	+Z Achse
Rotation um die X Achse	-	-Z Achse	-	+Z Achse	-

BEWEGUNGSFORMEN AM SCHWINGERREGER

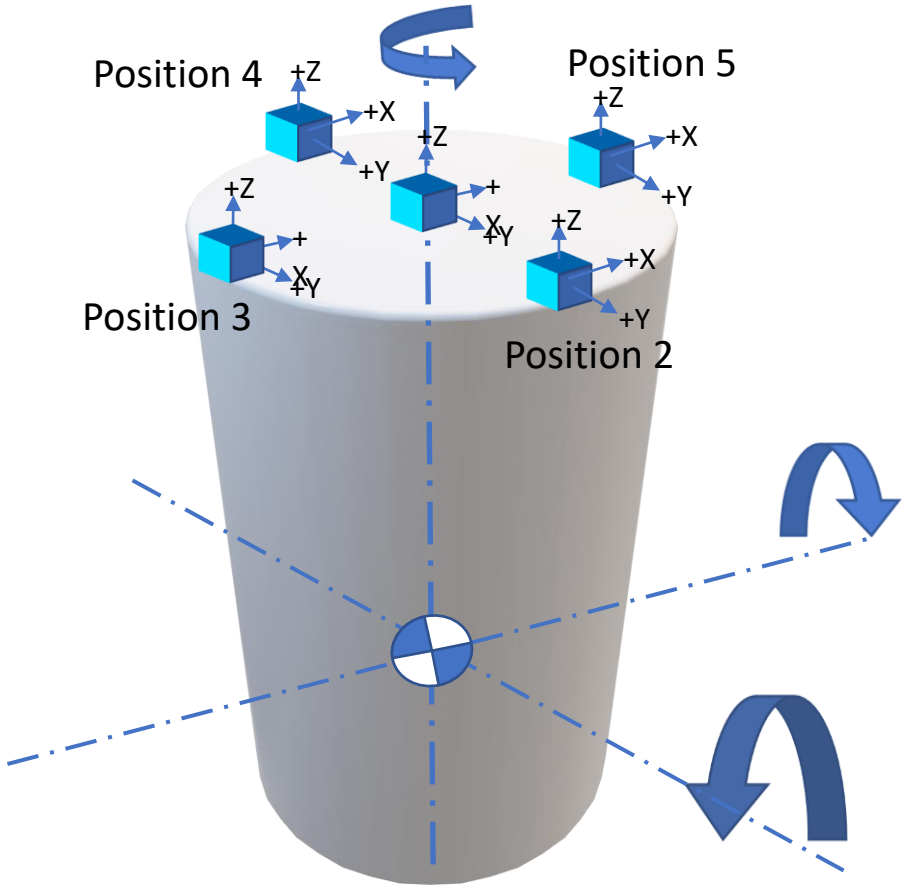
Messungen an der Schwingarmatur

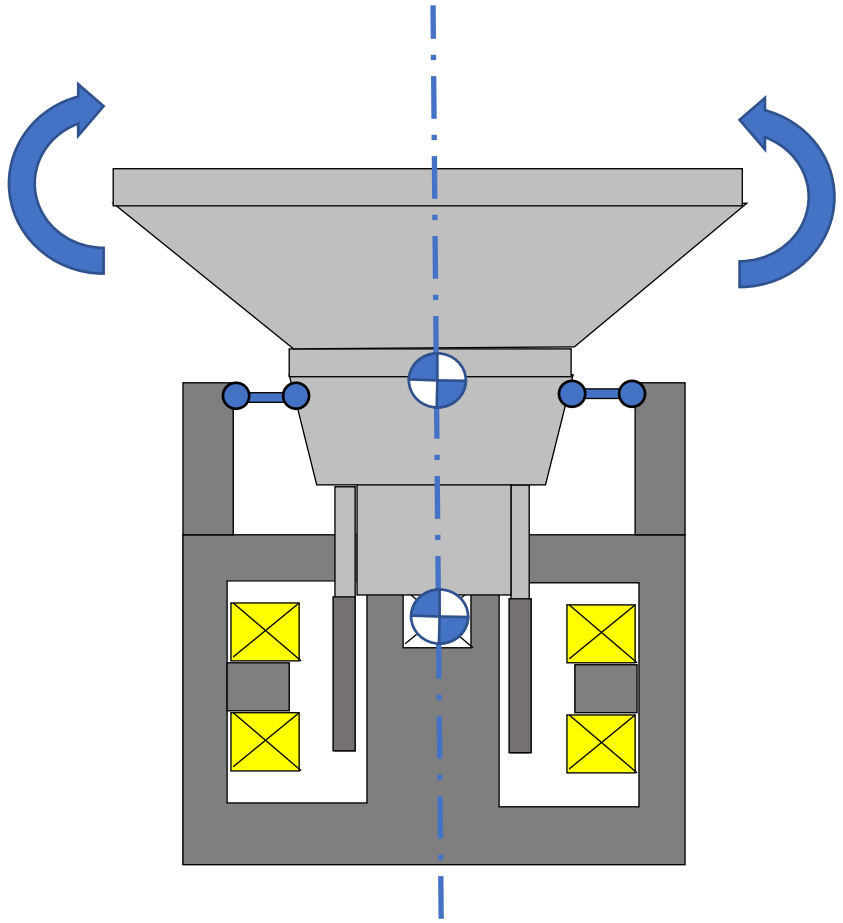


Bewegung	Messposition				
	1	2	3	4	5
Rotation um die Z Achse	-	+X Achse	+Y Achse	-X Achse	-Y Achse
Rotation um die Y Achse	+Y Achse	+Y Achse -Z Achse	-Z Achse	+Y Achse +Z Achse	+Z Achse
Rotation um die X Achse	-X Achse		-X Achse +Z Achse		-X Achse -Z Achse

BEWEGUNGSFORMEN AM SCHWINGERREGER

Messungen an der Schwingarmatur





THEMA QUERBESCHLEUNIGUNG MIL 810

Standard	Aussagen in der Norm	Zusätzliche Hinweise
MIL Std 810H	weniger als 50% unter 500 Hz weniger als 100% über 500 Hz	Bei Überschreitung ist die Ursache zu ermitteln und zu beseitigen.
MIL Std 810G	weniger als 45% der Anregungsrichtung (20% für die spektrale Leistungsdichte)	Keine Angabe der Referenzfrequenz. Bei Überschreitung ist die Ursache zu ermitteln und zu beseitigen.
MIL Std 810F	weniger als 45% der Anregungsrichtung (20% für die spektrale Leistungsdichte)	Außerdem ist zu beachten, dass die Spektrale Leistungsdichte in der Querachse oft hohe schmale Spitzen aufweist. Eine Anpassung der Toleranzen für die Querachsen sollte in Betracht gezogen werden.
MIL Std 810E	KEINE ANFORDERUNG	
MIL Std 810D	KEINE ANFORDERUNG	

THEMA QUERBESCHLEUNIGUNG DEF STANDARD

Standard	Aussagen in der Norm	Zusätzliche Hinweise
DEF STAN 00-35 Issue 5 (2017)	weniger als 50% unter 500 Hz weniger als 100% über 500 Hz Der Effektivwert der Beschleunigung um die Anregungsrichtung sollte 50 % der angegebenen Beschleunigung in Anregungsrichtung nicht über-schreiten.	Bei Überschreitung ist die Ursache zu ermitteln und zu beseitigen.
DEF STAN 00-35 Issue 4 (2006)	RANDOM: Im Prüffrequenzbereich darf der RMS Wert der Querbeschleunigung 50% des RMS Wertes der Beschleunigung in Anregungsrichtung nicht über-schreiten. SINUS: weniger als 50% unter 500 Hz weniger als 100% über 500 Hz	Werden bei bestimmten Frequenzen oder bei großen oder schweren Produkten die Quer- oder Drehbewegungen, aus der Anforderungen überschritten, sind sie zu überwachen und im Prüfbericht anzugeben.

THEMA QUERBESCHLEUNIGUNG
RTCA DO-160

Standard	Aussagen in der Norm	Zusätzliche Hinweise
RTCA DO-160G Section 8 (2010)	Keine besondere Anforderung. "Die Bewegung sollte parallel und die Aufspannvorrichtung starr und symmetrisch sein.“	Die Prüftoleranzen / Regelparameter scheinen seit 1997 nicht mehr aktualisiert worden zu sein. Es kann jedoch zusätzliche Hinweise in DO-357 – User Guide Supplement to DO-160G geben.
RTCA DO-160F Section 8 (2007)		
RTCA DO-160E Section 8 (2007)		
RTCA DO-160D Section 8 (1997)		

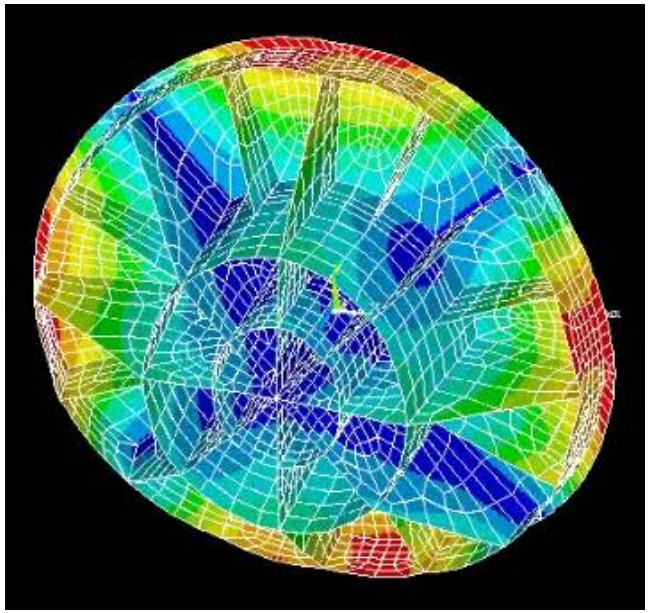
THEMA QUERBESCHLEUNIGUNG EN60068-2

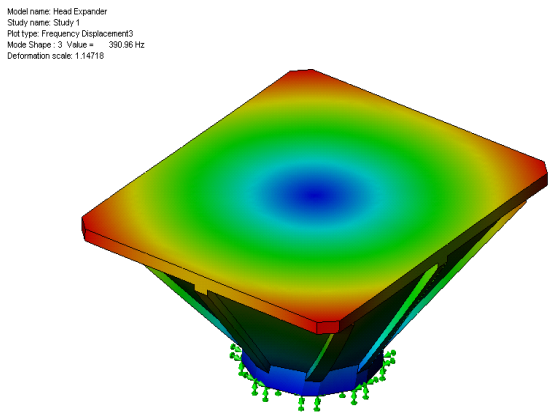
Standard	Aussagen in der Norm	Zusätzliche Hinweise
EN600-68-2-6	weniger als 50% unter 500 Hz weniger als 100% über 500 Hz	„Die Einzelbestimmung kann, beispielsweise für kleine Prüflinge, vorgeben, dass die zulässige Querbewegung insoweit begrenzt wird, dass sie –3 dB der Grund-bewegung überhaupt nicht überschreitet.“ „Querbewegungen, von denen bekannt ist, dass sie keine Bedrohung für den Prüfling darstellen, brauchen nicht überwacht werden.“ „Werden bei bestimmten Frequenzen oder bei großen oder schweren Produkten die Quer- oder Drehbewegungen, aus der Anforderungen überschritten, sind sie zu überwachen und im Prüfbericht anzugeben.“
EN600-68-2-64	„Die spektrale Beschleunigungsdichte… darf in keiner zur spezifizierten Achse senkrechten Richtung den spezifizierten Werte der spektralen Beschleunigungsdichte für Frequenzen über 500Hz überschreiten. Unter 500Hz dürfen -3dB des spezifizierten Wertes nicht überschritten werden. Der Effektivwert der Beschleunigung in Querrichtung darf 50% des Effektivwertes der Beschleunigung in der spezifizierten Achse nicht überschreiten.“	

FIXTURE MODE SHAPES

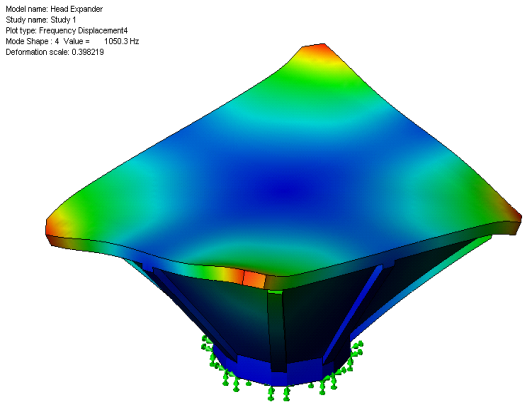
Membranbewegungen der Armatur und Resonanz der Aufspannvorrichtung führen zu einem Biegemode und können bei bestimmten Frequenzen großen Bewegungen quer zur Achse erzeugen.

Die Betrachtung der Phasenänderungen für die Messkanäle hilft entsprechende Probleme zu erkennen.

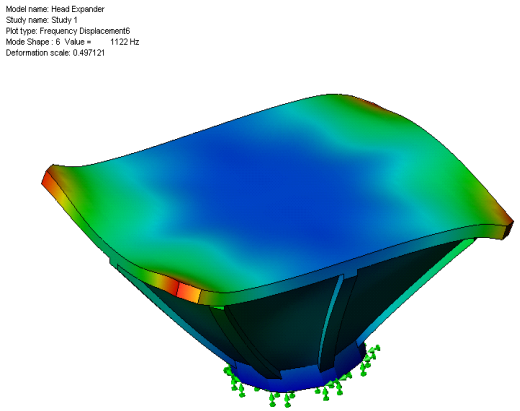




f = ~390Hz



f = ~1.050Hz

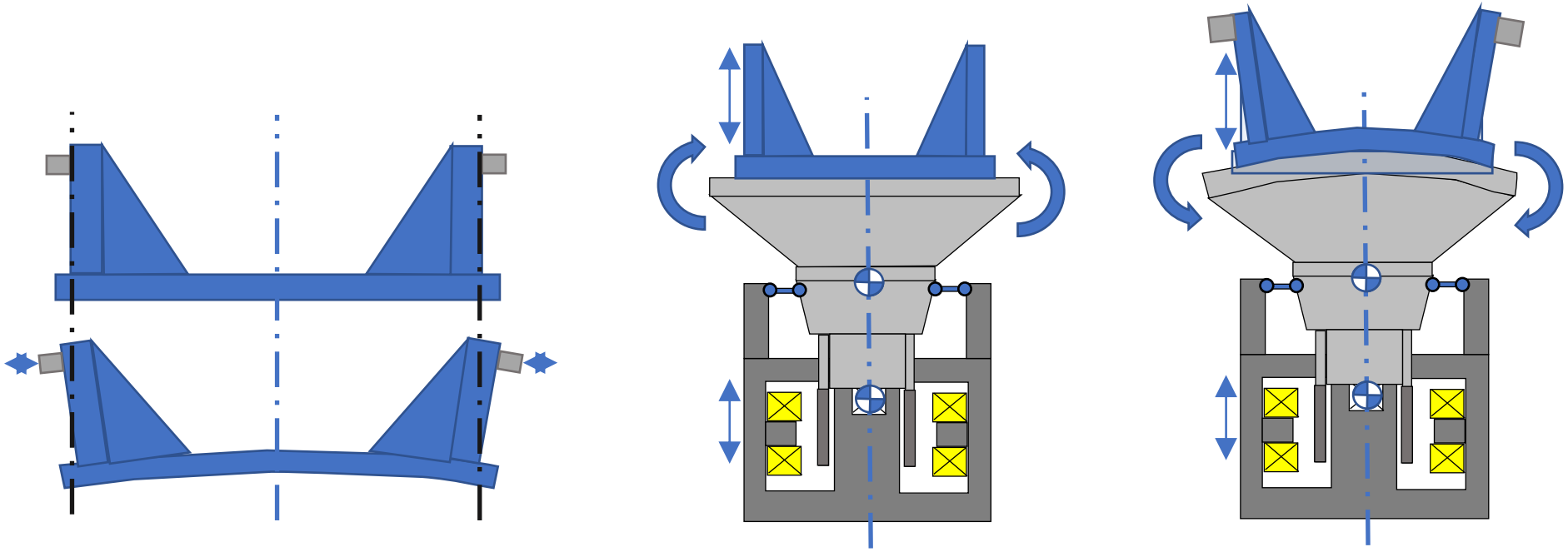


f = ~1.120Hz

ARMATURE / FIXTURE MODE SHAPES BEEINFLUSSEN DIE QUERACHSENANREGUNG

Membranbewegungen der Armatur und Resonanz der Aufspannvorrichtung führen zu einem Biegemode und können bei bestimmten Frequenzen großen Bewegungen quer zur Achse erzeugen.

Die Betrachtung der Phasenänderungen für die Messkanäle hilft entsprechende Probleme zu erkennen.



KONTROLLE DER QUERBESCHLEUNIGUNG

Maßnahme	Aussagen in der Norm	Maßnahmen im Laborbetrieb
Vorbeugende Wartung	▪ Leere Armatur / Gleittisch Charakterisierung der Bewegungsform und regelmäßige Vergleiche	▪ Planung eines regelmäßigen Wartungstests ▪ Vergleich der Messungen mit vorherigen Messungen z.B. nach einer Reparatur oder Wartung
Weitere Messkanäle hinzufügen	▪ Ausmessen der Beschleunigungen auf der Oberfläche der Armatur zur Charakterisierung der Bewegung ▪ Messen der Querbeschleunigung während des Tests	▪ Hinzufügen von zusätzlichen Messkanälen z.B. 5 triaxiale Aufnehmer bedeuten 16 Kanäle? ▪ Hinzufügen von Messungen in den 3 Achsen der Aufspannvorrichtung zu den Prüfberichten ▪ Hinzufügen von „Math Trace“ zur Anzeige von Grenzwerten
Analyse-funktionen vom Regelsystem	▪ Resonanzsuche an der verwendeten Aufspannvorrichtung ▪ Low-Level-Test mit montiertem Testobjekt	▪ Analysefunktionen zur Überprüfung von Transferfunktionen, Kohärenz, Phasenbeziehungen, Kreuzspektrum

KONTROLLE DER QUERBESCHLEUNIGUNG

Maßnahme	Aussagen in der Norm	Maßnahmen im Laborbetrieb
Regel- und Messaufnehmer	▪ Position in der Nähe der Schnittstelle Prüfling-/ Aufspannvorrichtung (Krafteinleitung in den Prüfling)	▪ Mehrkanalregelung – Mittelwert / Maximal ▪ Messung der Beschleunigung in der Querachse während des Tests
Abbruch-grenzen		▪ Sinnvolle Definition zulässiger Grenzen für die Messkanäle
Spektrum Notching / Limiting	▪ Nach der Identifizierung der Ursache für die Bewegung in der Querachse - Erstellen eines Grenz- oder Notch Profils	▪ Begrenzungs- und Notch-Funktion in der Regelsoftware nutzen

PARAMETER FÜR EINEN RANDOM TEST

Spektrale Leistungsdichte

Anzahl der statistischen Freiheitsgrade (DOF)

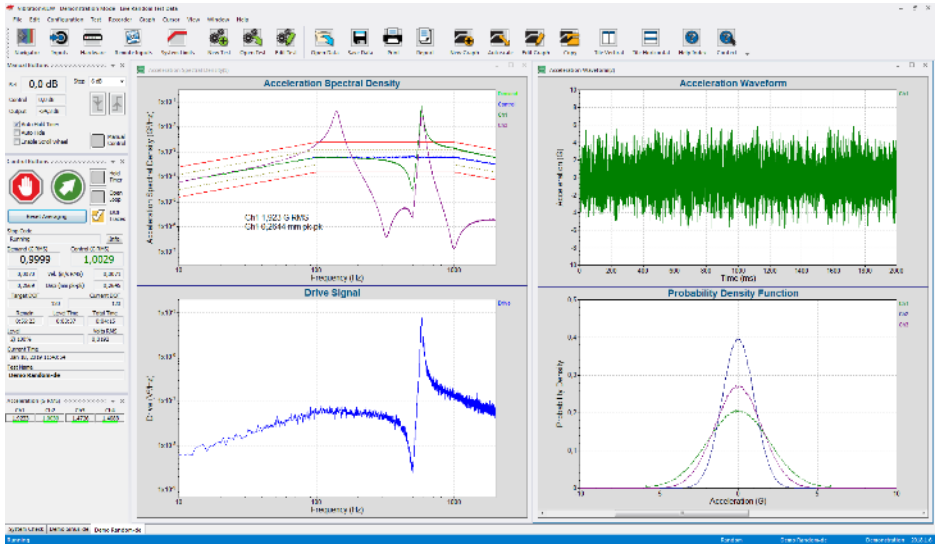
Frequenzbandbreite des Analysators (Anzahl der Spektrallinien / Auflösung)

Frequenzgang außerhalb des Prüfprofiles

Effektivwert (RMS) (IN BAND und OUT OF BAND)

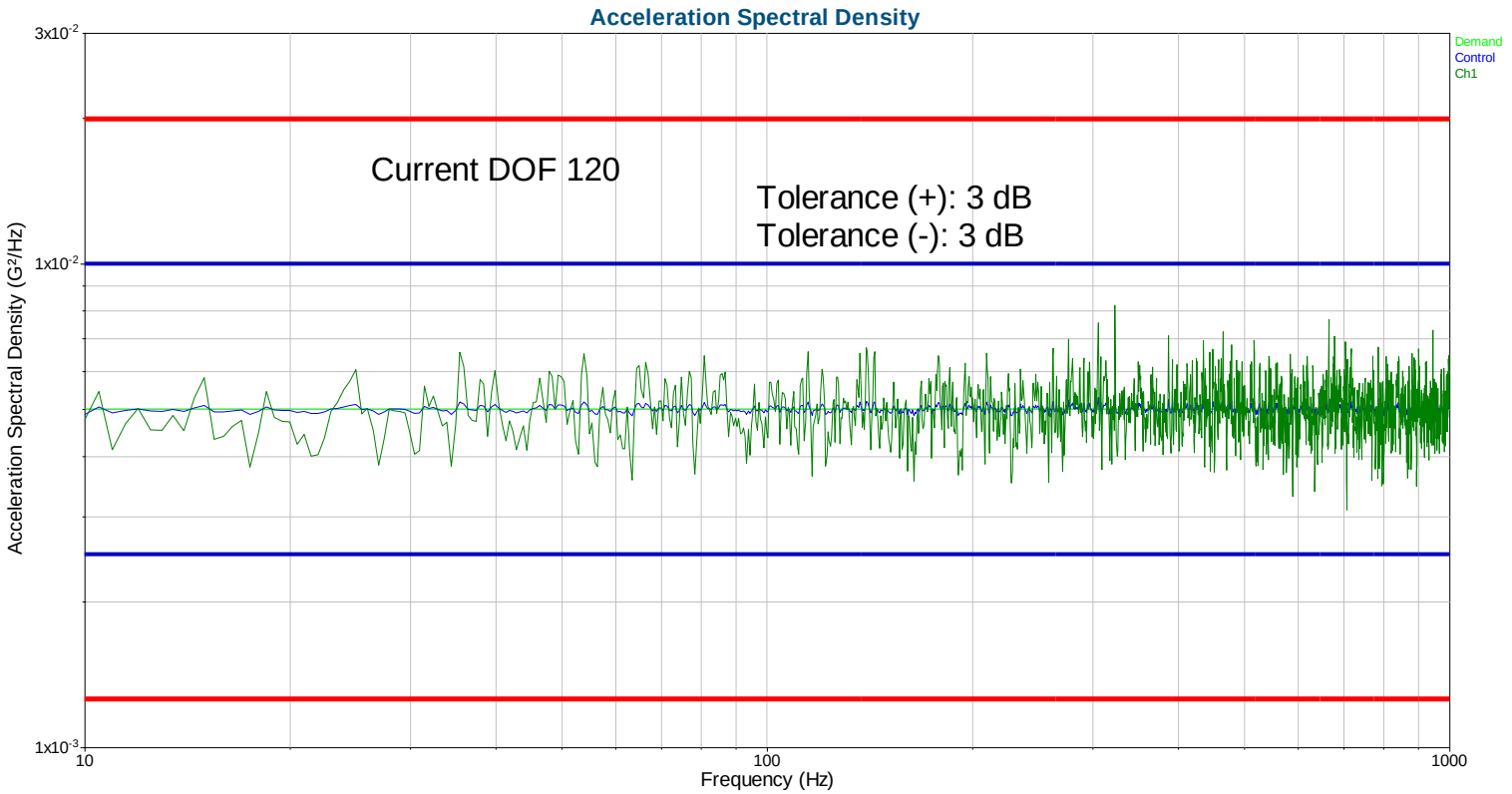
Amplitudenverteilung / Kurtosis

Schiefe



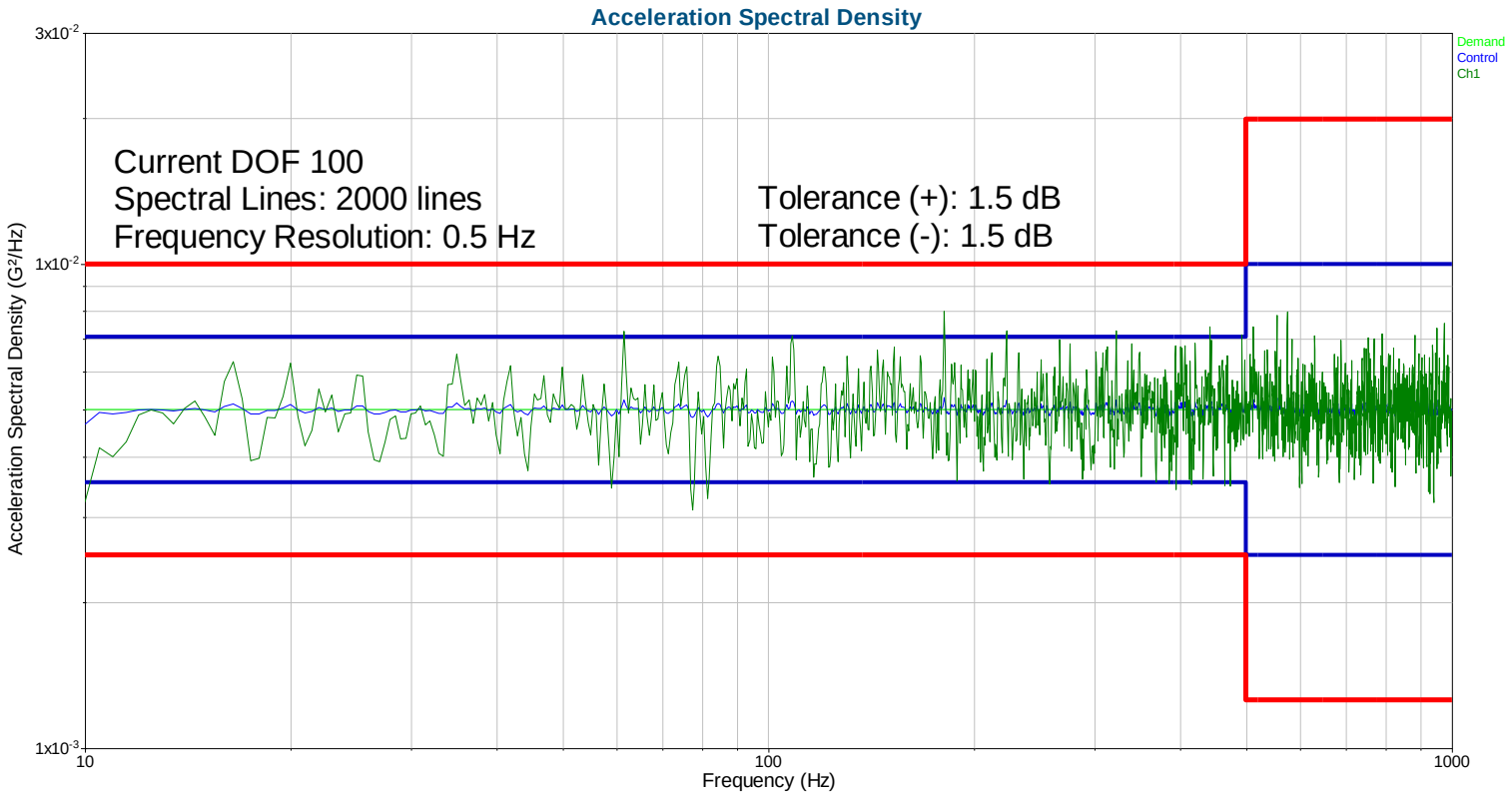
SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE EN60068-2-64

Maximale Abweichung der Amplitude vom IST-ASD (Regelung) in Bezug auf das SOLL-ASD ± g^2/Hz Toleranz (normalerweise in Dezibel)



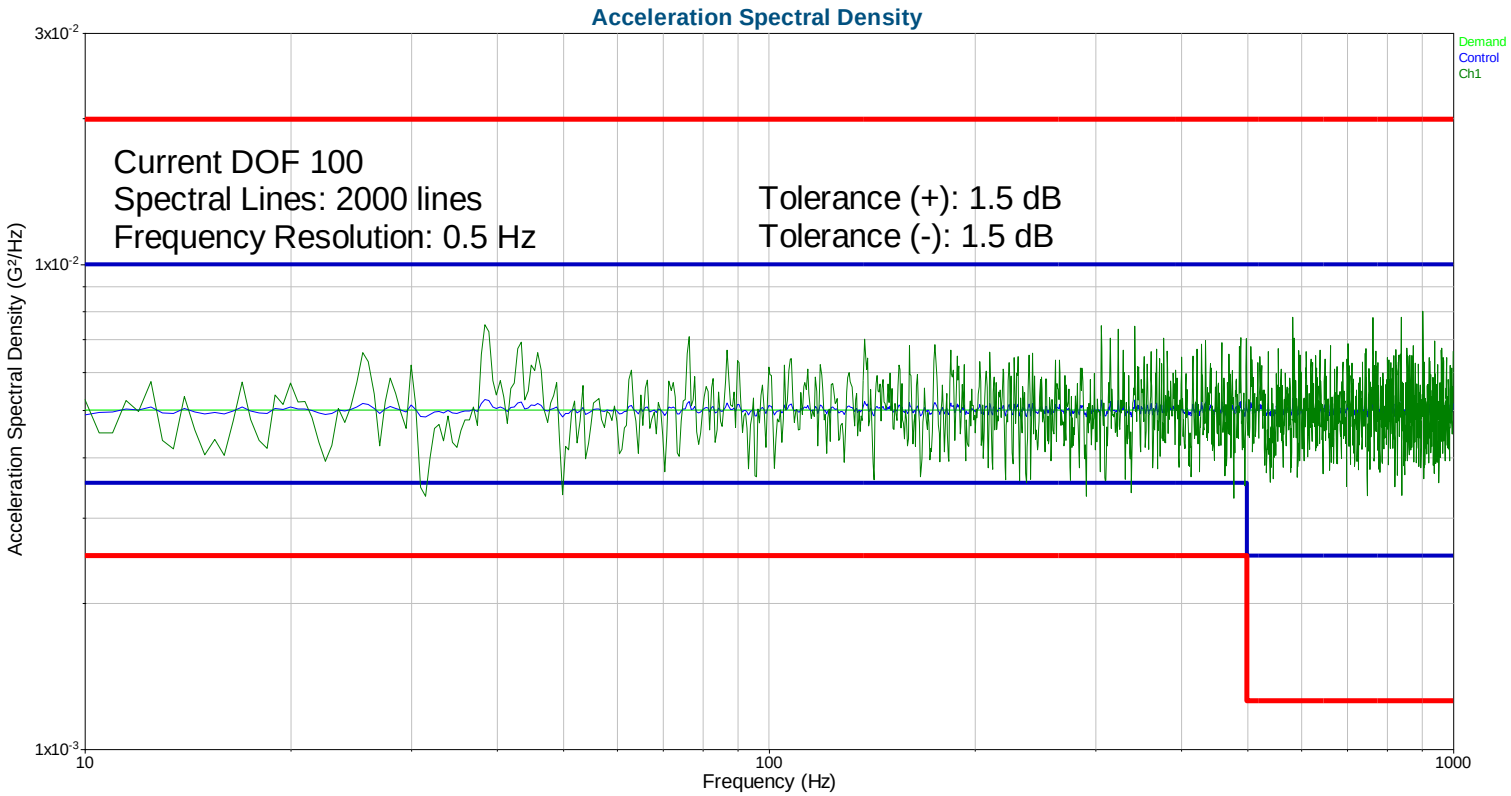
SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE RTCA DO160

Maximale Abweichung der Amplitude vom IST-ASD (Regelung) in Bezug auf das SOLL-ASD ± g^2/Hz Toleranz (normalerweise in Dezibel)



SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE UND STATISTISCHE GENAUIGKEIT - FREIHEITSGRADE (DOF)

Maximale Abweichung der Amplitude vom IST-ASD (Regelung) in Bezug auf das SOLL-ASD ± g^2/Hz Toleranz (normalerweise in Dezibel)

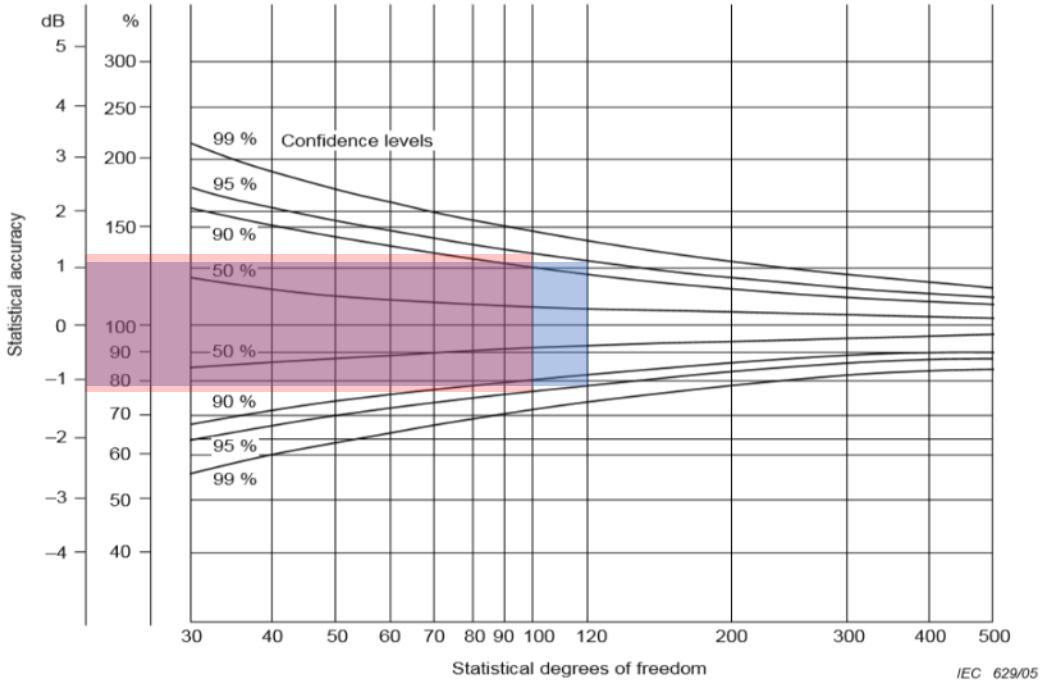


SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE UND STATISTISCHE GENAUIGKEIT - FREIHEITSGRADE (DOF)

Statistische Freiheitsgrade = 2 x Frequenzauflösung x Mittelungszeit
(Jede FFT Schleife bietet 2 DOF) - Keine Überlappung

95% Vertrauensbereich

MIL Std 810	≥ 120 DOF
DEF Stan 00-35	≥ 120 DOF
EN 60068-2-64	≥ 120 DOF
AECTP 400	≥100 DOF
RTCA 160G	≥100 DOF



SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE UND STATISTISCHE FREIHEITSGRADE

Standard	Statistische Freiheitsgrade Degrees of Freedom	PSD Toleranzen (Regelung)
MIL Std 810	≥ 120 DOF	± 3 dB
DEF STAN 00-35	≥ 120 DOF	± 3 dB
RTCA DO160	≥100 DOF	+3dB / -1,5 dB unter 500 Hz ± 3 dB über 500 Hz
AECTP 400	≥100 DOF	± 3 dB unter 500 Hz ± 6 dB über 500 Hz
EN 60068-2-64	≥ 120 DOF	± 3 dB

SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE UND STATISTISCHE FREIHEITSGRADE

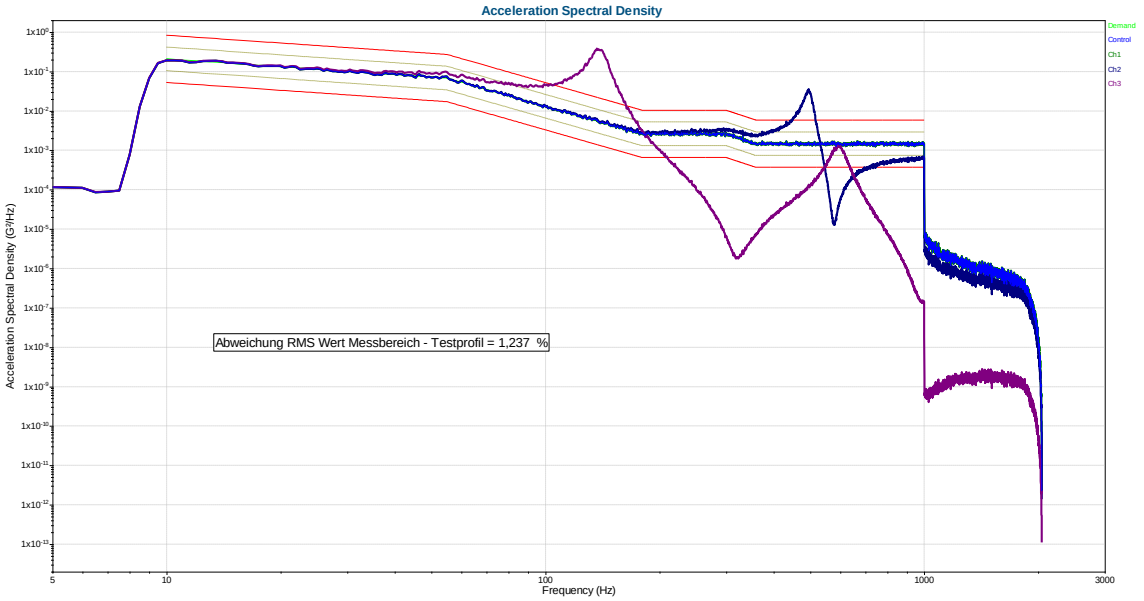
Standard	PSD Toleranzen (Regelung)	Zusätzliche Hinweise	
MIL Std 810	± 3 dB unter 500 Hz ± 6 dB über 500 Hz ± 10% Gesamt g_{rms}	Mittelwertregelung ± 6 dB unter 500 Hz ± 9 dB über 500 Hz ± 25% Gesamt g_{rms}	Maximalwertregelung - 6 dB / + 3 dB unter 500 Hz - 9 dB / + 6 dB über 500 Hz ± 25% Gesamt g_{rms}
DEF STAN 00-35	± 3 dB	Oberhalb von 500 Hz sind ±6 dB zulässig. (aber nicht mehr als 5% der Frequenzen) Mehrpunkt-Regelung: +5dB / -10dB an jedem Regelpunkt	
RTCA DO160	+3 dB / -1,5 dB unter 500 Hz ± 3 dB über 500 Hz		
AECTP 400	± 3 dB unter 500 Hz ± 6 dB über 500 Hz	maximal 5 % der gesamten Bandbreite des Profils	
EN 60068-2-64	± 3 dB	Bei großen oder schweren Prüflingen es schwierig die Grenzen einzuhalten. .... betreffende Einzelbestimmung müssen eine größere Abweichung vorgeben.	

FREQUENZAUFLÖSUNG EN 60068-2-64

RANDOM Test – Anzahl der FFT Linien

$$B_e = f_{High}/n$$

B_e	Filterbandbreite
f_{High}	Er sollte größer als 2 x f_2 sein
n	Anzahl der Spektrallinien (mindestens 200)



B_e muss so gewählt werden, dass als Mindestanforderung eine Frequenzlinie mit f_2 (Ende des Prüffrequenzbereiches) übereinstimmt und dass die erste Frequenzlinie bei 0,5 f_1 liegt, so dass zwei Frequenzlinien den Anstieg des Spektrums festlegen.

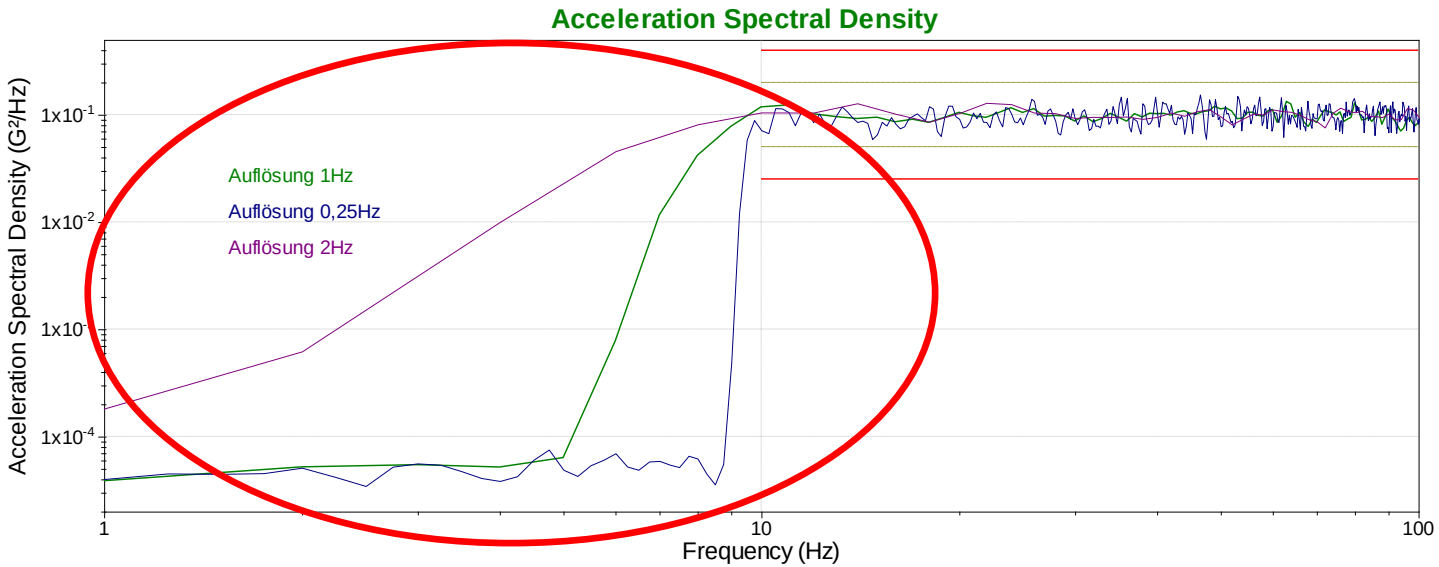
Falls dies zwei verschiedene Werte ergibt, ist der kleinere von beiden zu wählen.

FREQUENZAUFLÖSUNG UND SCHWINGWEG

RANDOM Test - Anzahl der FFT-Linien und späterer Schwingweg

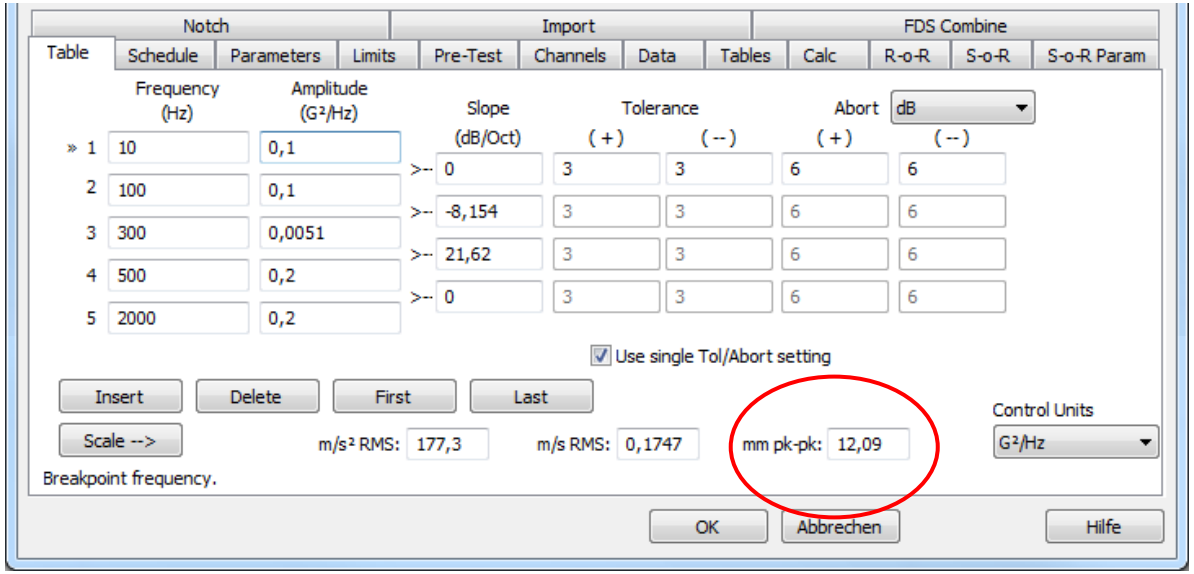
$$G_d(f) = \frac{G_a(f)}{\Omega^4}$$

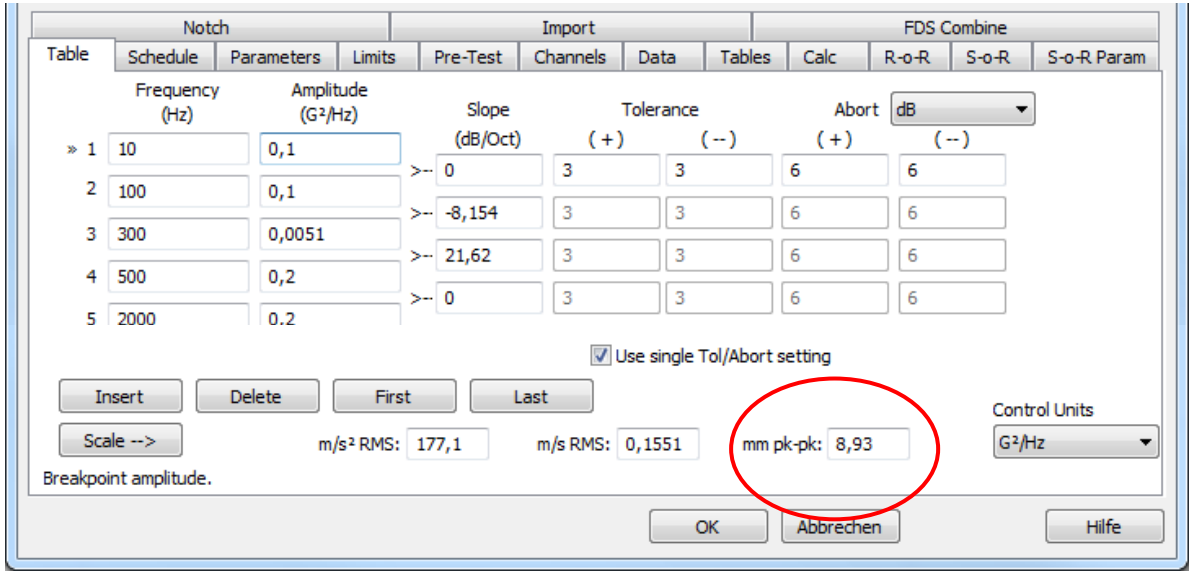
$$d_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{G_i \cdot \Delta f}{\Omega_i^4}} = \sqrt{\frac{\Delta f}{(2\pi)^4}} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{G_i}{f_i^4}$$



FREQUENZAUFLÖSUNG UND SCHWINGWEG

RANDOM Test - Anzahl der FFT-Linien und späterer Schwingweg





500 FFT-Linien ergeben eine Auflösung von 5 Hz (entspricht der EN-Norm)

4.000 FFT-Linien ergeben eine Auflösung von 0,5 Hz und eine Reduzierung des erforderlichen Schwingweges um ca. 25%.

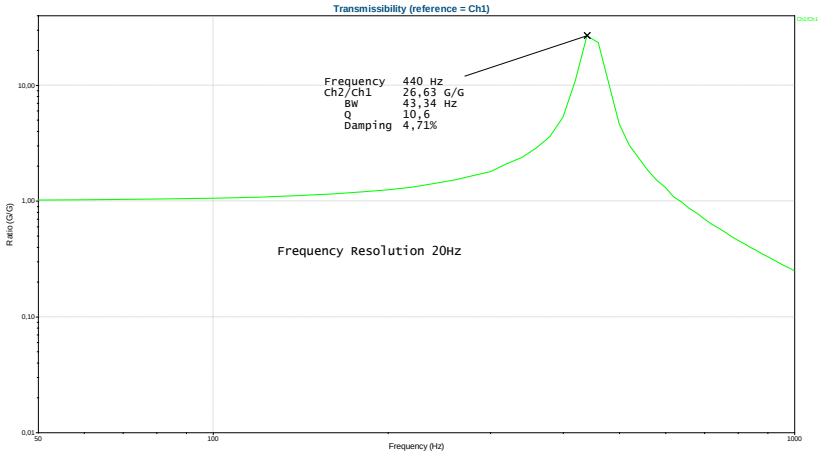
FREQUENZAUFLÖSUNG RESONANZBANDBREITE

Höhere Linienanzahl = bessere Frequenzauflösung für die Regelung

Für eine genaue und präzise Regelung bei Resonanzen sollten mindestens 5x FFT-Linien in der 3 dB-Frequenzbandbreite der Resonanz vorhanden sein.

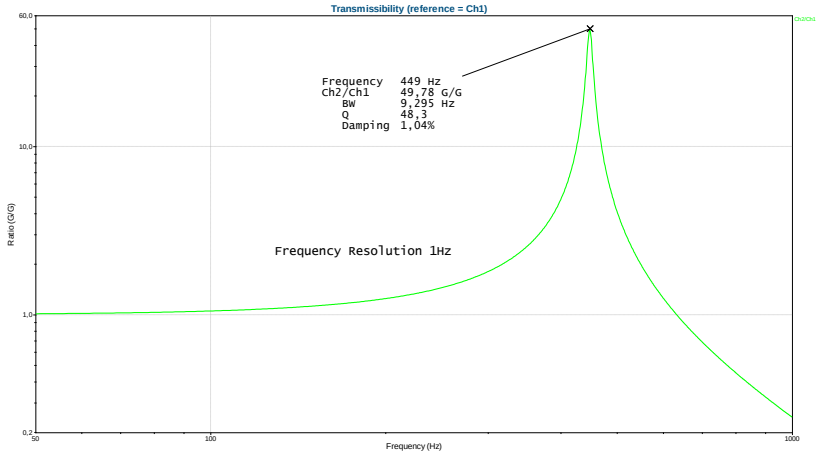
Test 1

- Frequenzauflösung 20Hz
- BW 43,43Hz / Q - Faktor 10,6
- Antwortamplitude $3{,}8g_{RMS}$



Test 2

- Frequenzauflösung 1Hz
- BW 9,3Hz / Q - Faktor 48,3
- Antwortamplitude $4{,}3g_{RMS}$



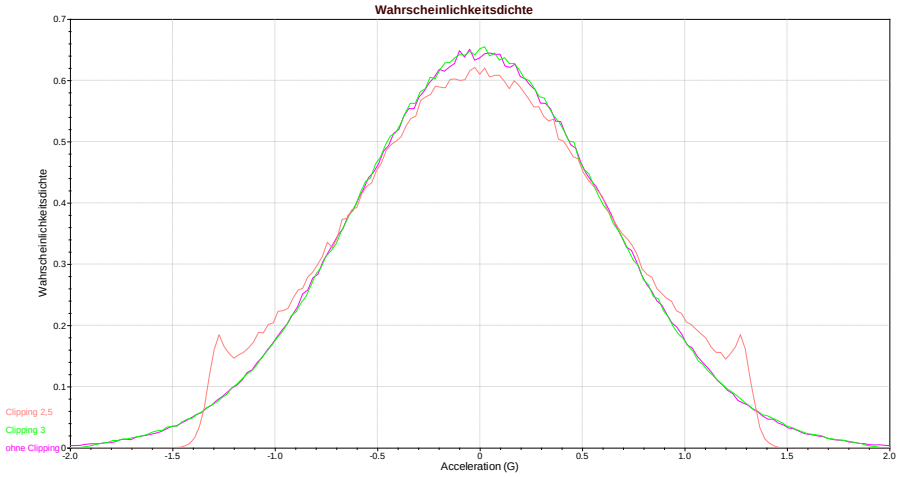
FREQUENZAUFLÖSUNG

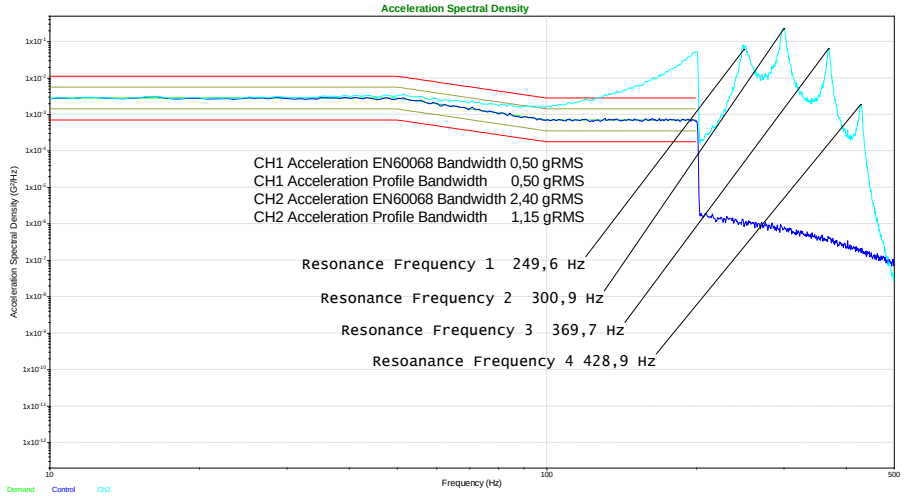
Standard	Aussagen in der Norm
MIL Std 810	2,5 Hz bei 25 Hz oder darunter 5 Hz über 25 Hz (aber es soll eine dem Test entsprechende Frequenzauflösung gewählt werden, z.B. bei Radfahrzeug ist 1Hz ausreichend
DEF STAN 00-35	Nicht größer als 5Hz (Es müssen mindestens 5 Spektrallinien bei ½ der Resonanzbandbreite bei allen Resonanzen vorhanden sein)
RTCA DO160	Weniger als 5 Hz
AECTP 400	Nicht spezifiziert
EN 60068-2-64	… muss so gewählt werden, dass als Mindestanforderung eine Frequenzlinie mit f_2 (Ende des Prüffrequenzbereiches) übereinstimmt und dass die erste Frequenzlinie bei 0,5 f_1 liegt, so dass zwei Frequenzlinien den Anstieg des Spektrums festlegen. Falls dies zwei verschiedene Werte ergibt, ist der kleinere von beiden zu wählen.

ANREGUNGEN AUßERHALB DES PRÜFFREQUENZBEREICHES

Die Normen schreiben hier vor, dass die Anregung außerhalb der Prüffrequenzbereiches minimiert werden muss.

Höhere Amplitudenwerte außerhalb des Prüffrequenzbereiches können durch nichtlineare Effekte, wie z.B. Clipping vom Regelsystem oder eine Übersteuerung des Leistungs-verstärkers hervorgerufen werden.

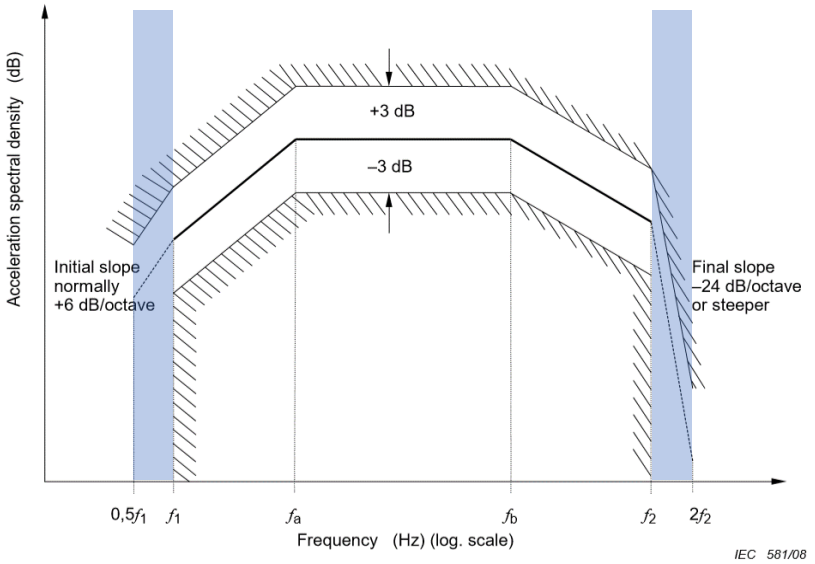




ANREGUNGEN AUßERHALB DES PRÜFFREQUENZBEREICHES

Parameter in Verbindung mit dem Frequenzbereich

- Messfrequenzbereich (OVER SAMPLING)
- Flanke am Anfang und Ende des Prüffrequenzbereiches
- Betrachtung der In-Band und Out-of-Band RMS Werte



ABWEICHUNGEN RMS WERTE

Standard	g_{rms} Toleranz (Regelung)	Zusätzliche Hinweise	
MIL Std 810H	± 10% Gesamt g_{rms}	Mittelwertregelung Einzelkanäle ± 25% Gesamt g_{rms}	Maximalwertregelung Einzelkanäle ± 25% Gesamt g_{rms}
DEF STAN 00-35 Issue 5	±10% am Referenzpunkt	± 2 dB am Referenzpunkt	
RTCA DO160G	+20% -5%		
AECTP 400	±10% des voreingestellten RMS-Wertes am Regelpunkt	Einzelne Befestigungspunkte ±25% des voreingestellten RMS-Wertes	
EN 60068-2-64	±10% am Referenzpunkt		

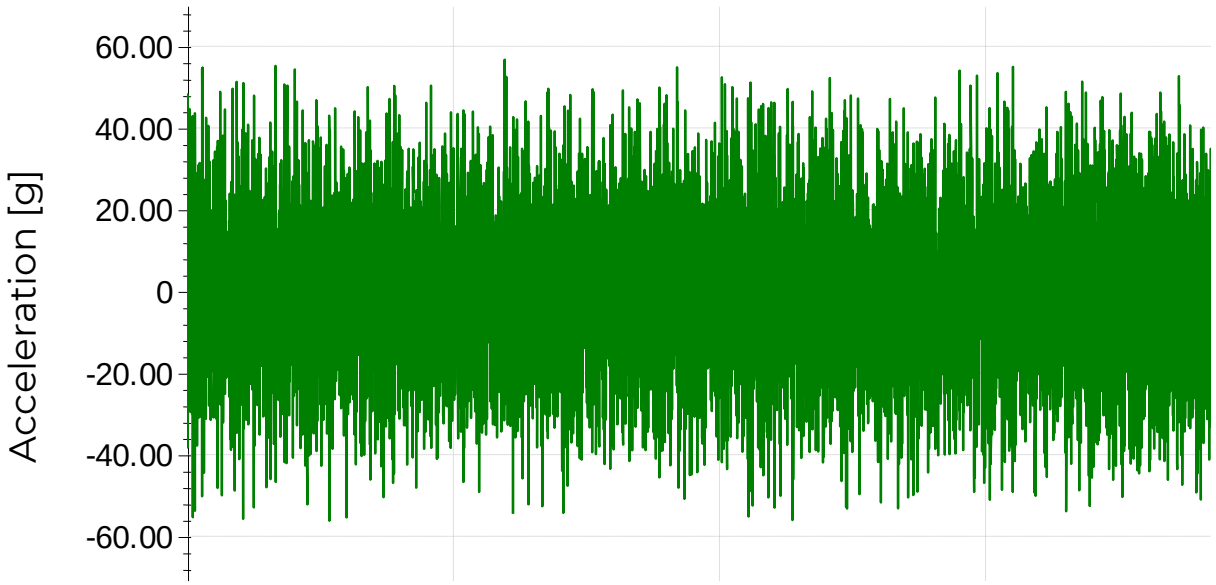
ABWEICHUNGEN RMS WERTE

Standard	Out-of-Band Grenzen	Frequenzbereich
MIL Std 810H	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert
DEF STAN 00-35 Issue 5	Der RMS Wert der „Out of Band“ Anregung muss kleiner als 20% sein.	Die Frequenzen außerhalb der Prüffrequenz-bereiches werden bis zu 5.000 Hz oder dem 5-fachen der oberen Prüffrequenz gemessen, je nachdem, welcher Wert kleiner ist.
RTCA DO160G	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert
AECTP 400	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert
EN 60068-2-64	Nicht spezifiziert	Der Frequenzbereich des Messsystems muss sich von mindestens dem 0,5-fachen Wert der kleinsten Frequenz (*f*1) bis zum 2-fachen Wert der größten Frequenz (*f*2) des Prüffrequenzbereichs erstrecken.

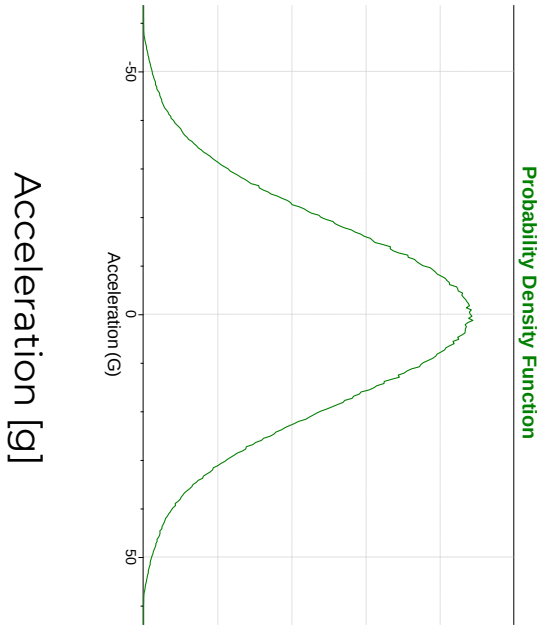
$$\textit{Anregung außerhalb des Prüfbereichs} = \left(\frac{Messbereich\ G_{RMS}}{Prüfbereich\ G_{RMS}} - 1\right) * 100\%$$

AMPLITUDEVERTEILUNG CLIPPING UND KURTOSIS

Gauß Verteilung bei einer RANDOM Prüfung



Amplitude distribution



σ	p(σ)	P(-σ,+σ)
0	0,39894228	0,00000000
0,5	0,35206533	0,38292492
1	0,24197072	0,68268949
1,5	0,12951760	0,86638560
2	0,05399097	0,95449974
2,5	0,01752830	0,98758067
3	0,00443185	0,99730020
3,5	0,00087268	0,99953474
4	0,00013383	0,99993666
4,5	0,00001598	0,99999320
5	0,00000149	0,99999943
5,5	0,00000011	0,99999996
6	0,00000001	1,00000000

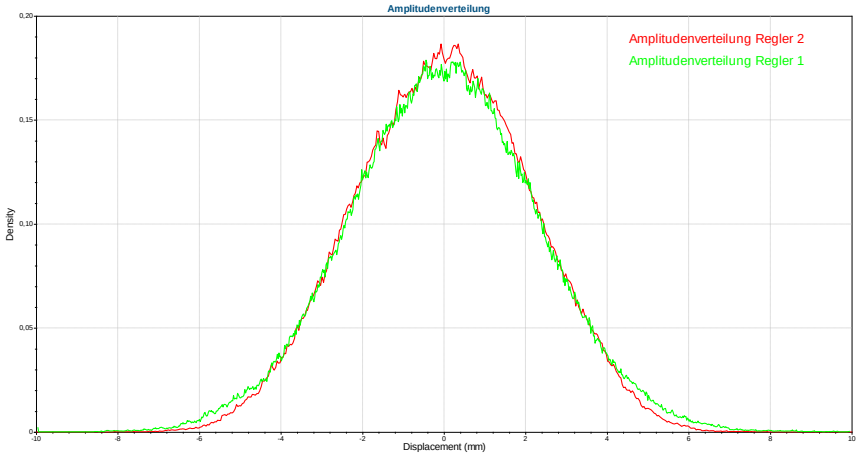
AMPLITUDE DISTRIBUTION - CLIPPING AND KURTOSIS

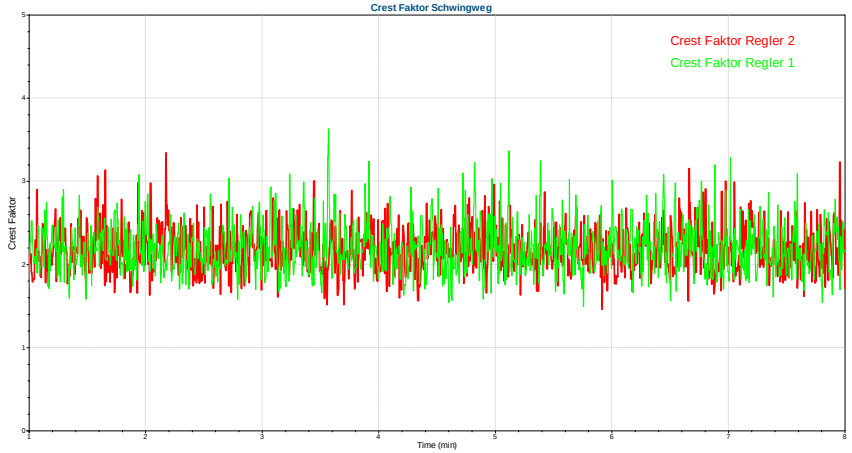
Standard	Amplitudenverteilung	Zusätzliche Hinweise
MIL Std 810H	Gauß-Verteilung für das Drive Signal	Die Drive Begrenzung sollte nicht verwendet werden und darf niemals unter 3 liegen.
DEF STAN 00-35 Issue 5	Nominell Gauß-Verteilung	Enthält alle Werte bis zu 2,7 SD, während Werte über 3 SD auf ein Minimum reduziert werden müssen.
RTCA DO160G	Das Random Signal soll eine Gauß-Verteilung haben.	Die PEAK Amplituden können auf das 3-fache des g_{rms} Wertes begrenzt werden.
AECTP 400	Nominell Gauß-Verteilung	Enthält alle Werte bis zu 2,7 SD, während Werte über 3 SD auf ein Minimum reduziert werden müssen.
EN 60068-2-64	Die Momentan Werte am Bezugspunkt müssen annähernd normalverteilt sein (Gauß).	Der Crest Faktor muss mindestens 2,5 betragen, am Bezugspunkt überprüft und mindestens das 3-fachen des spezifizierten RMS Wertes umfassen.

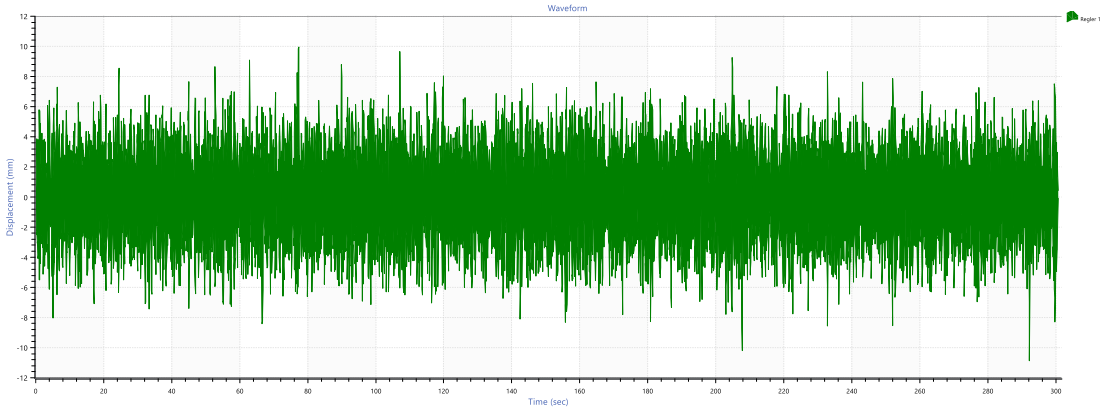
AMPLITUDEVERTEILUNG - SCHWINGWEG CLIPPING UND KURTOSIS

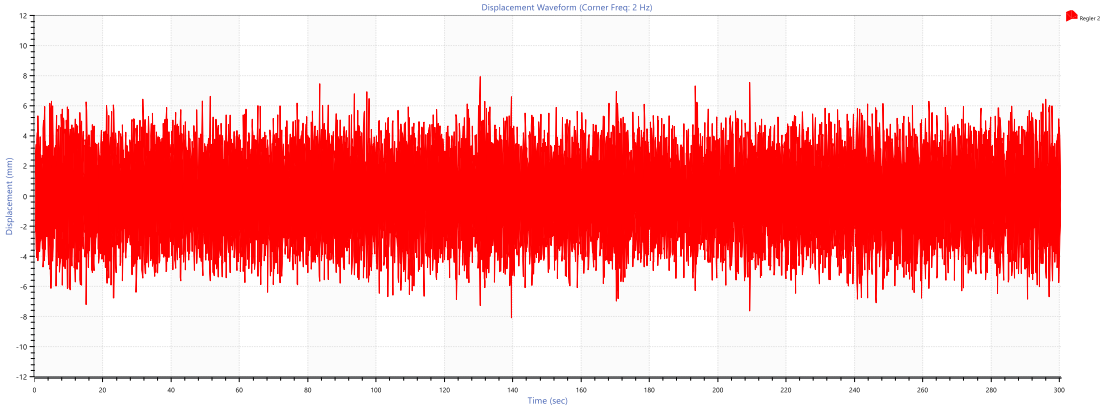
Vorgabe aus dem Prüfprofil ist ~12mm$_{p-p}$

Regler 1 erreicht im Zeitsignal ~ 11mm$_{p-p}$; Regler 2 erreicht im Zeitsignal ~8mm$_{p-p}$









PARAMETER FÜR EINEN SINUS TEST

Amplitude (G_{peak})

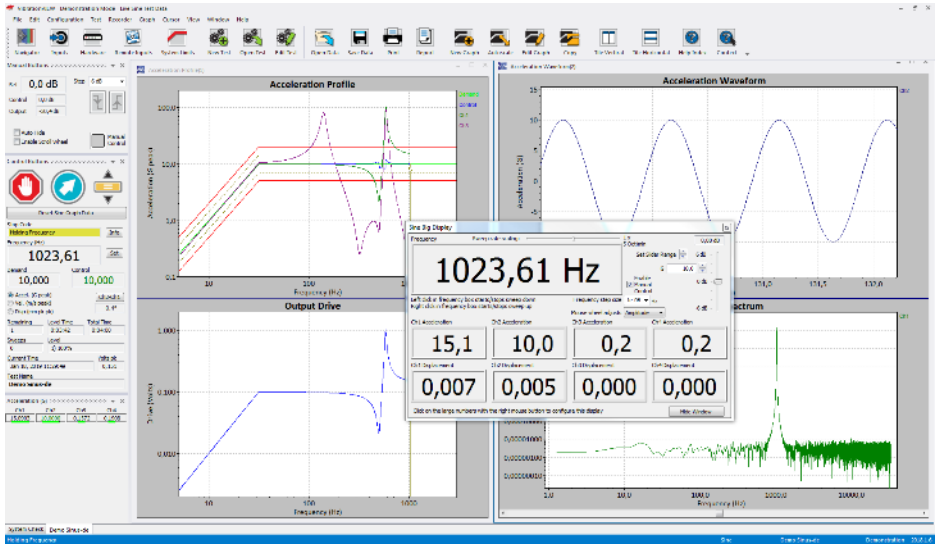
Einpunktregelung

Mehrpunktregelung (Mittelwert / Maximalwert)

Frequenz

Signal Toleranz / Klirrfaktor

Mitlauffilter - Bandbreite



REGELPARAMETER FÜR EINEN SINUS TEST

Standard	Amplitude	Zusätzliche Amplitudentoleranz	
MIL Std 810H	Test Level Regelung **±10%**	Mehrpunktregelung	
		Mittelwert Regelung ± 25% unter 500 Hz ± 50% über 500 Hz	Maximum Regelung +10% / -25% unter 500 Hz +10% / -50% über 500Hz
DEF STAN 00-35 Issue 5	Test Level Regelung **±10%**	± 5 dB bei jedem Kontrollpunkt Weiterführende Begrenzung : ±10% unter 500Hz, ±20% über 500Hz **Amplituden außerhalb des Bereichs von ±10 % des angegebenen Wertes sollten insgesamt nicht mehr als 5 % des Prüfbereiches betragen.**	
RTCA DO160G	Test Level Regelung **±10%**	Keine zusätzlichen Toleranzen angegeben	
AECTP 400	Test Level Regelung **±15%**	± 25% an den Befestigungspunkten bis 500 Hz ± 50% an den Befestigungspunkten über 500 Hz	

REGELPARAMETER FÜR EINEN SINUS TEST

Standard	Amplitude	Zusätzliche Amplitudentoleranz
EN 60068-2-6	Test Level Regelung **±15%**	Kontrollpunkte ±25% unter 500Hz Kontrollpunkte ±50% über 500Hz (Die Toleranz enthält einen Messfehler von ±5 %.)

FREQUENZGENAUIGKEIT BEI EINEM SINUS TEST

Standard	Frequenz Toleranz
MIL Std 810H	Frequenzgenauigkeit ± 0,1 %
DEF STAN 00-35	±2% oder ±1,0 Hz des angegebenen Wertes, je nachdem, welcher Wert größer ist.
RTCA DO160G	±2% (Genauigkeit der Messmittel)
AECTP 400	Testprofil Frequenzen ±0,05 Hz bis 0,25 Hz; ±20 % von 0,25 Hz bis 5 Hz; ±1 Hz von 5 Hz bis 50 Hz; ±2 % über 50 Hz. Messung kritischer Frequenzen ±0,05 Hz bis 0,5 Hz; ±10 % von 0,5 Hz bis 5 Hz; ±0,5 Hz von 5 Hz bis 100 Hz; ±0,5 % über 100 Hz

FREQUENZGENAUIGKEIT BEI EINEM SINUS TEST

Frequenz Toleranz
Dauerprüfung Feste Frequenzen: ±2 % Beim Sweep: ±0,05 Hz bis 0,25 Hz; ±20 % von 0,25 Hz bis 5 Hz; ±1 Hz von 5 Hz to 50 Hz; ±2 % über 50 Hz. Messung kritischer Frequenzen ±0,05 Hz bis 0,5 Hz; ±10 % von 0,5 Hz bis 5 Hz; ±0,5 Hz von 5 Hz bis 100 Hz; ±0,5 % über 100 Hz

SIGNALTOLERANZ / KLIRRFAKTOR BEI EINEM SINUS TEST

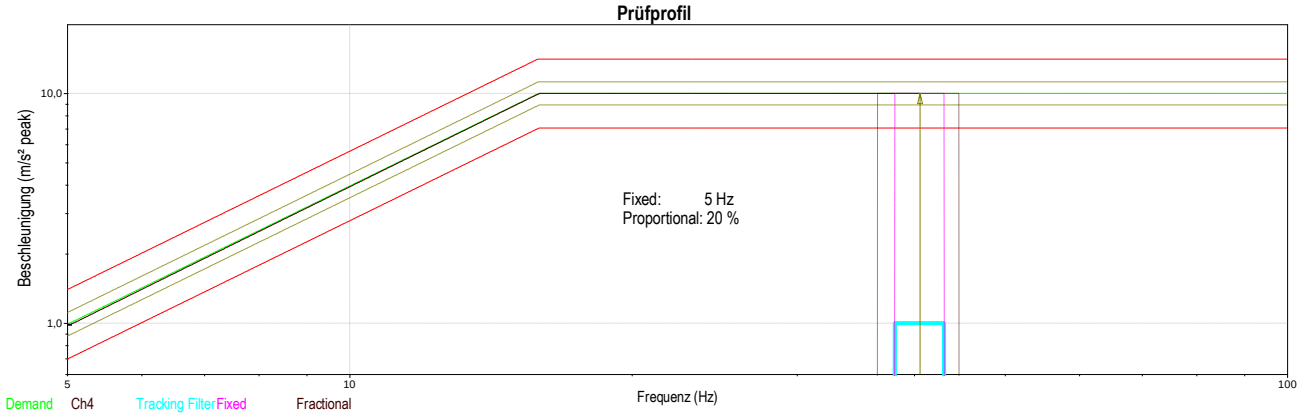
Standard	Signaltoleranz / Klirrfaktor	Zusätzliche Hinweise
MIL Std 810H	±5% zu den G_{rms}-Werten	Siehe die unten angeführte Berechnung
DEF STAN 00-35 Issue 5	< 5%	Ungefilterte Messung bis zu 5.000Hz oder dem 5-fachen der Erregerfrequenz, je nachdem, welcher Wert *kleiner* ist.
RTCA DO160G	Nicht spezifiziert	Siehe die unten angeführte Berechnung
AECTP 400	±5% zu den G_{rms}-Werten	
EN 60068-2-6	< 5%	Ungefilterte Messung bis zu 5.000Hz oder dem 5-fachen der Erregerfrequenz, je nachdem, welcher Wert *kleiner* ist. (Ein Mitlauffilter muss verwendet werden, wenn die Signaltoleranz über 5% liegt.)

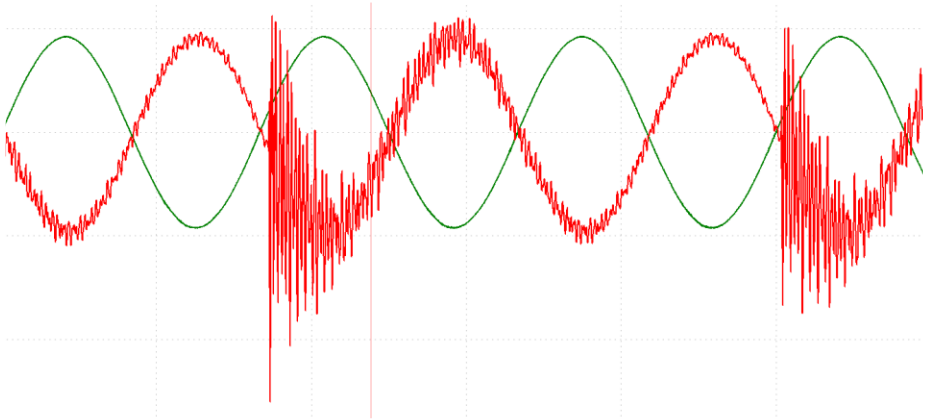
SINUS TEST PARAMETER
EINSTELLUNG MITLAUFFILTER

Bei klappernden Prüflingen ist die Berechnung des "richtigen" Regelwertes der SINUS-Anregung notwendig. Dabei ist es wichtig,

ob der Test mit oder ohne Nachlauffilter durchgeführt wurde.

Eigenschaften wie Bandbreite und Filtergüte des Nachlauffilters sind entscheidend für die Amplitudenbestimmung.

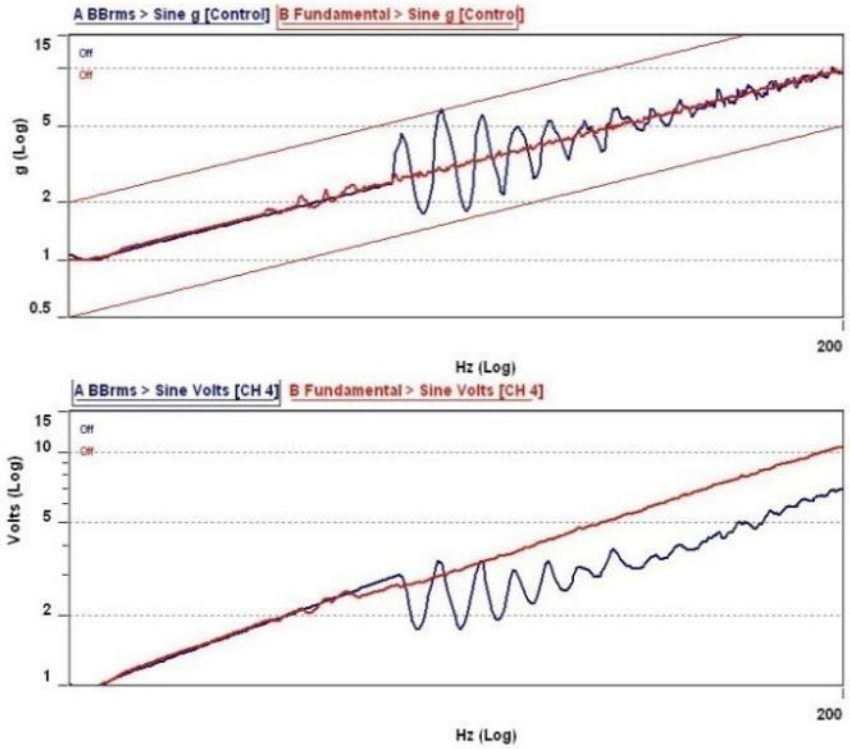




SINUS TEST PARAMETER
EINSTELLUNG MITLAUFFILTER

Einfluss auf die Testergebnisse

- Je nachdem ob ein Mitlauffilter verwendet wird oder nicht, ergibt sich ein höheres / oder niedrigeres Testniveau.



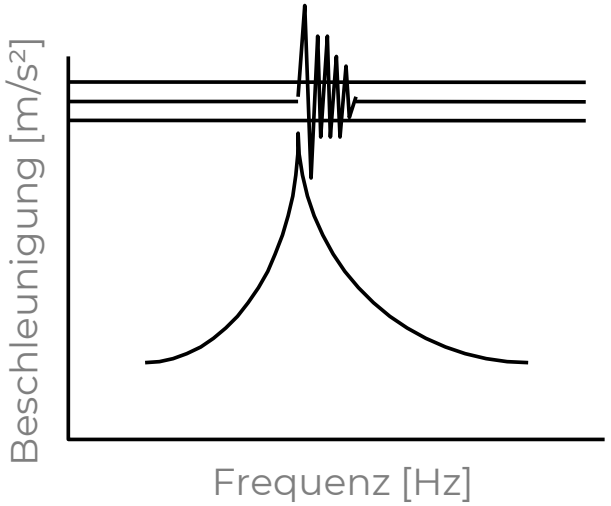
Die Messung ohne Mitlauffilter zeigt deutlich das Schwingen bei der Regelung, hervorgerufen durch das Klappern des Prüfaufbaus und dem ungünstigen Verhältnis von Regel-, Sweep Geschwindigkeit und Bandbreite des Mitlauffilters.

Das Drive Signal mit Mitlauffilter liegt höher, als bei der Messung ohne Mitlauffilter, was eine höhere Belastung am Prüfling bewirkt.

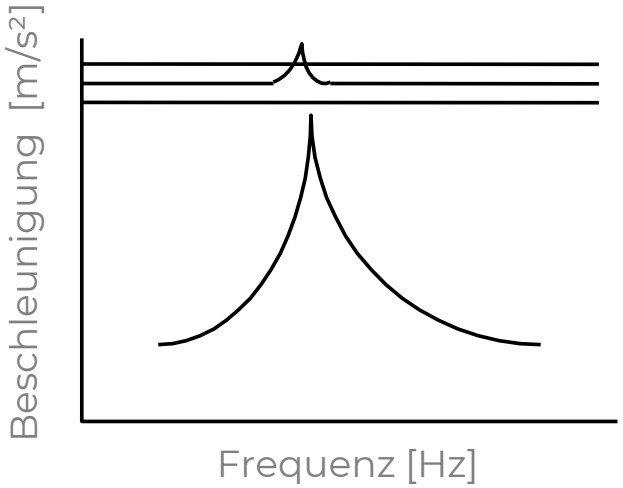
SINUS TEST PARAMETER EINSTELLUNG MITLAUFFILTER

Die Beachtung der Gesetzmäßigkeiten aus der Signalanalyse

- Je kleiner die Bandbreite und je steiler der Amplitudenanstieg, je länger ist die Einschwingzeit
- Bei sehr dynamischen Signalen und der Verwendung von Mitlauffilter kann das Regelsignal instabil werden.



Eine zu hohe Regelgeschwindigkeit bewirkt das Schwingen des Mitlauffilters.



Eine geringe Regelgeschwindigkeit verhindert das Schwingen des Mitlauffilters.

MITLAUFFILTER BEI EINEM SINUS TEST

Standard	Zusätzliche Hinweise
MIL Std 810H	Nicht erwähnt
DEF STAN 00-35 Issue 5	Die Ansprechzeit des Mitlauffilters sollte mindestens das 5-fache der Kompressionsgeschwindigkeit des Reglers betragen. Die Filterbandbreite sollte kleiner als die Anregungsfrequenz sein.
RTCA DO160G	Konstante Bandbreite: 10Hz maximal von 10Hz-200Hz; 50Hz maximal von 200Hz bis 2kHz Konstante prozentuale Bandbreite: weniger als 23%
AECTP	Nicht erwähnt
EN 60068-2-6	Die Ansprechzeit des Mitlauffilters sollte mindestens das 5-fache der Kompressionsgeschwindigkeit des Reglers betragen. Die Filterbandbreite sollte kleiner als die Anregungsfrequenz sein.

Reaktionszeit (t_R) = 1 / (Filterbandbreite (Hz))

10Hz konstante Bandbreite = 100ms Reaktionszeit

10 % konstante prozentuale Bandbreite = 10 Perioden der Anregungsfrequenz

PARAMETER FÜR EINEN SCHOCK TEST

Toleranzen beim Klassischen Schocktest

Pulsformen

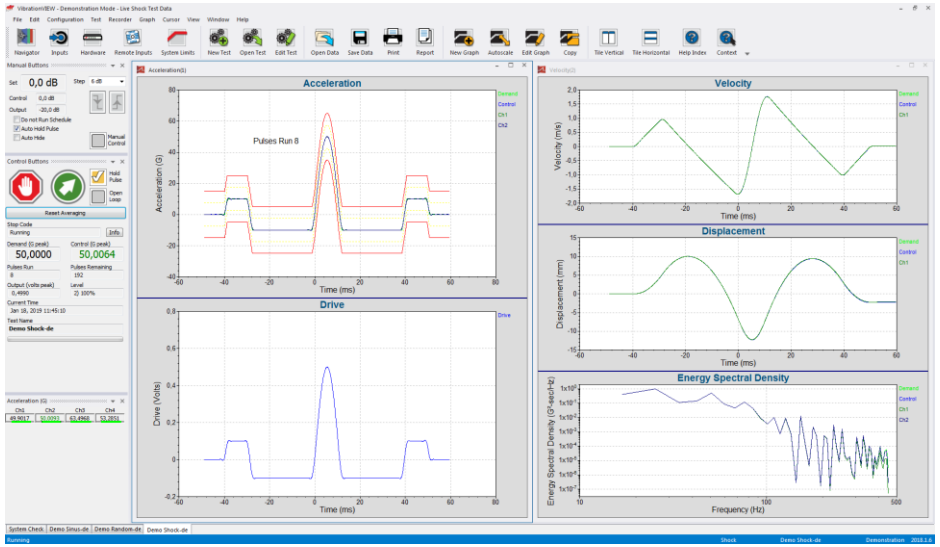
Verlauf der Beschleunigung

Geschwindigkeitsänderung

Frequenzgang

Art der Kompensationspulse

Frequenzgehalt



ÜBERSICHT KLASSISCHE PULSE

Standard	Kurvenform					
	Halbsinus	Sägezahn Terminal	Trapez	Gedämpfte Sinus Schwingung	Schock Antwort-spektrum	Wiedergabe Zeitsignal
MIL Std 810 H Method 516	✓	✓	✓		✓	✓
Def STAN 00-35 Issue 5 M3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RTCA DO160G Section 7		✓				
AECTP 400 (Method 403) 415 417	✓	✓	✓		✓	✓
EN 60068-2-27 und -81	✓	✓	✓		✓	✓

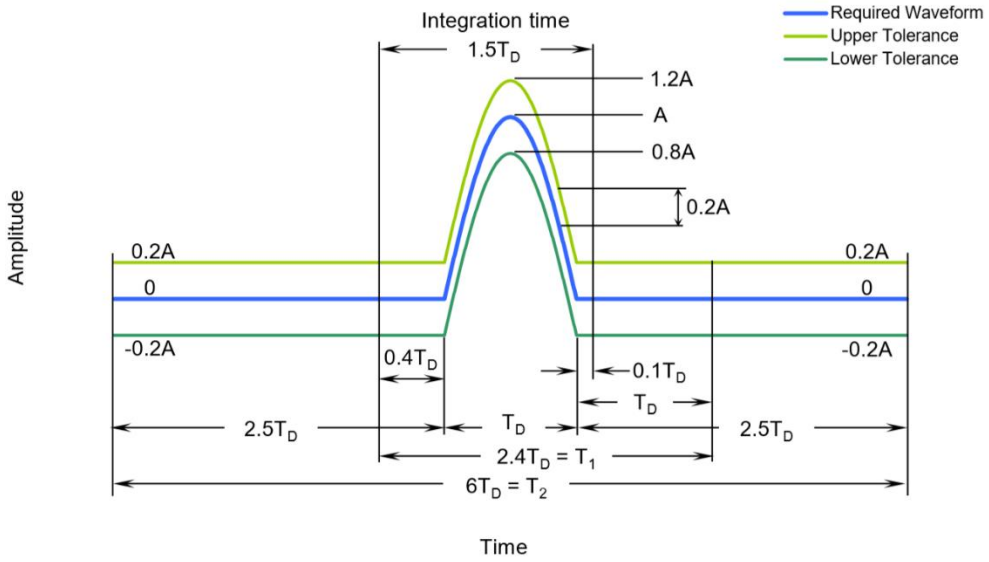
TOLERANZ- UND ABBRUCH PARAMETER KLASSISCHER PULS

T_D : Dauer des Pulses (Die Toleranz beträgt ± 10%).

A : Spitzenbeschleunigung des Nennimpulses

T_1 : Mindestdauer, während der Puls überwacht wird, wenn der Puls mit einer mechanischen Schocktestmaschine erzeugt wird.

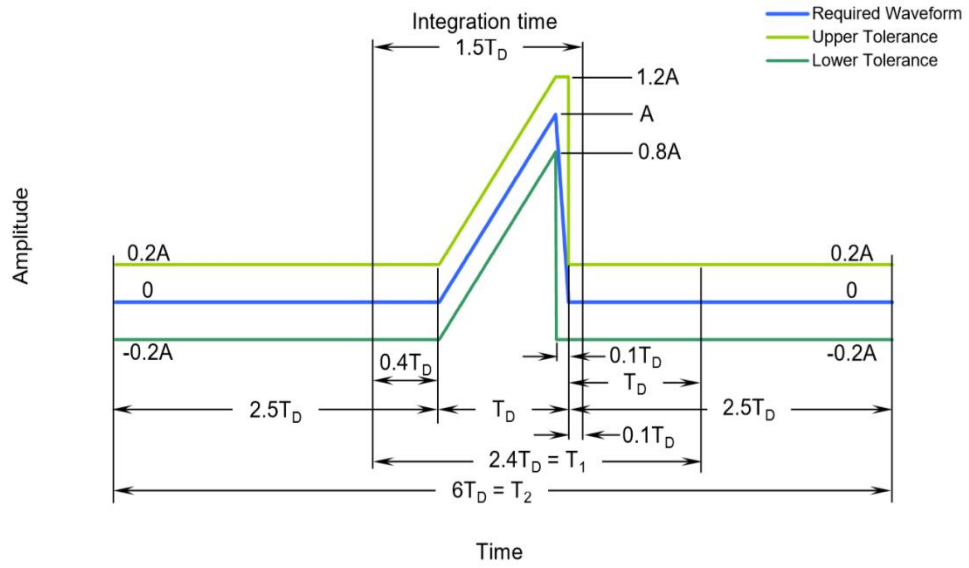
T_2 : Mindestdauer, während der Puls überwacht wird, wenn der Puls mit einem Schwingerreger erzeugt wird.

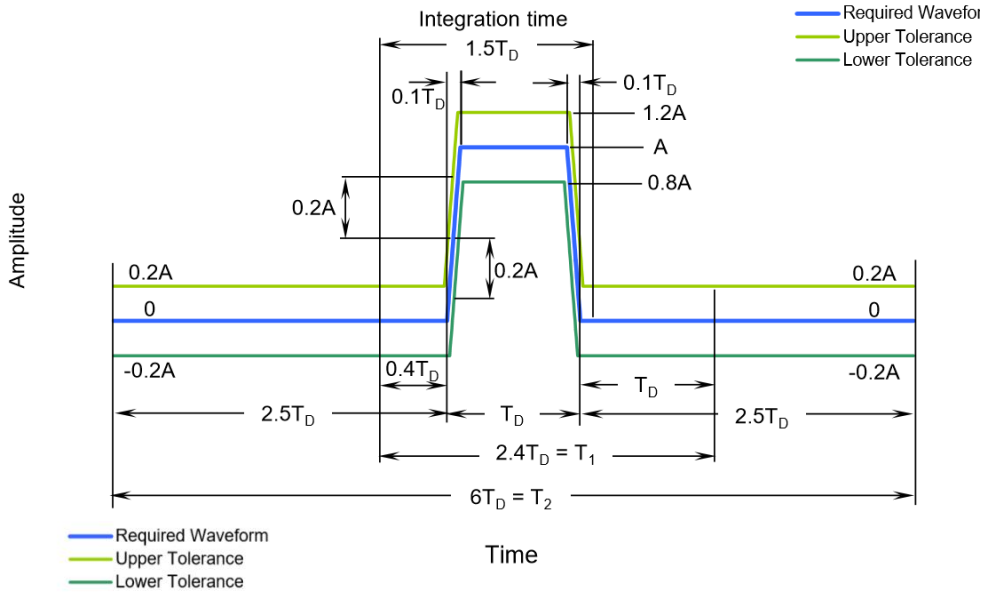


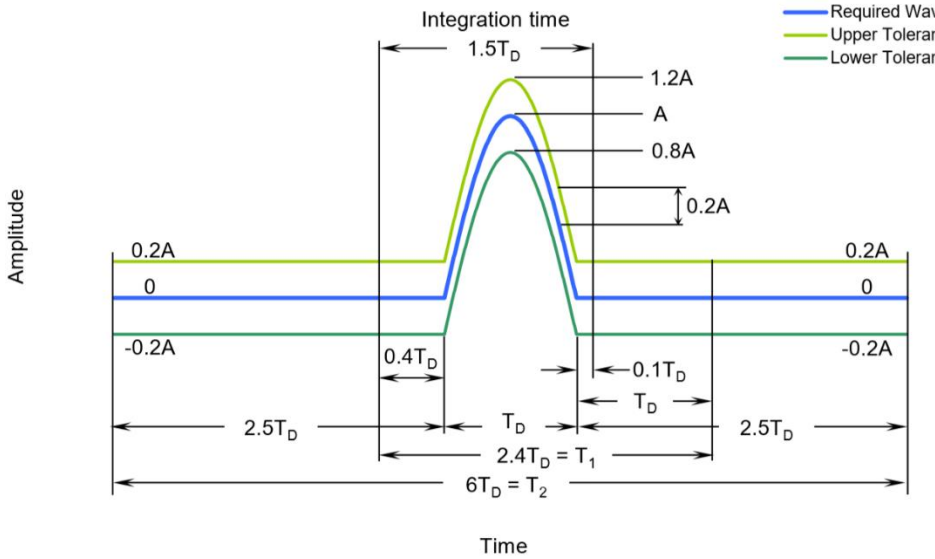
Die Dauer für den Nachpuls bei einem Sägezahn Puls, und die Dauer für den Vor- und Nachpuls bei einem Trapez Puls, sollte weniger als 10% der nominellen Pulsdauer betragen.

Die zulässige Toleranz für die Geschwindigkeit, die sich aus der Kombination von Amplituden- und Impulsbreite für den Puls ergibt, ist auf ± 20 % der Nenngeschwindigkeit des Pulses begrenzt.

TOLERANZ- UND ABBRUCH PARAMETER KLASSISCHER PULS





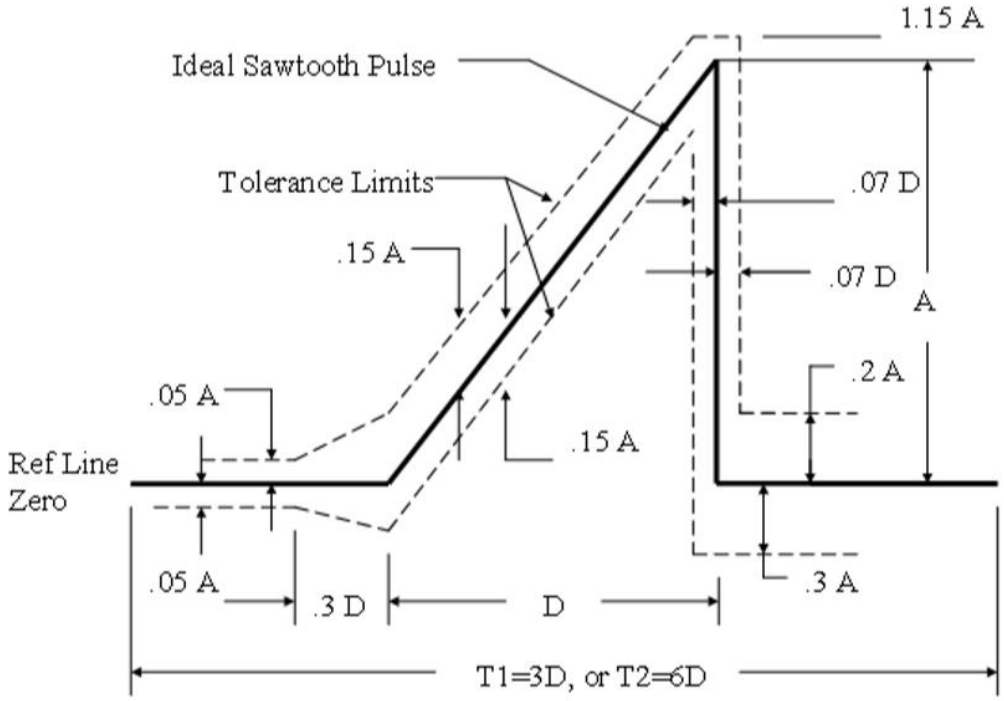


TOLERANZ- UND ABBRUCH PARAMETER KLASSISCHER PULS

Toleranzgrenzen für den Sägezahn Puls

Die Toleranz für die Geschwindigkeitsänderung:

- ±10% vom Nenngeschwindigkeit
- Integrationszeit
  - 0,4TD vor dem Puls und
  - 0,1TD nach dem Puls



TOLERANZ- UND ABBRUCH PARAMETER KLASSISCHER PULS

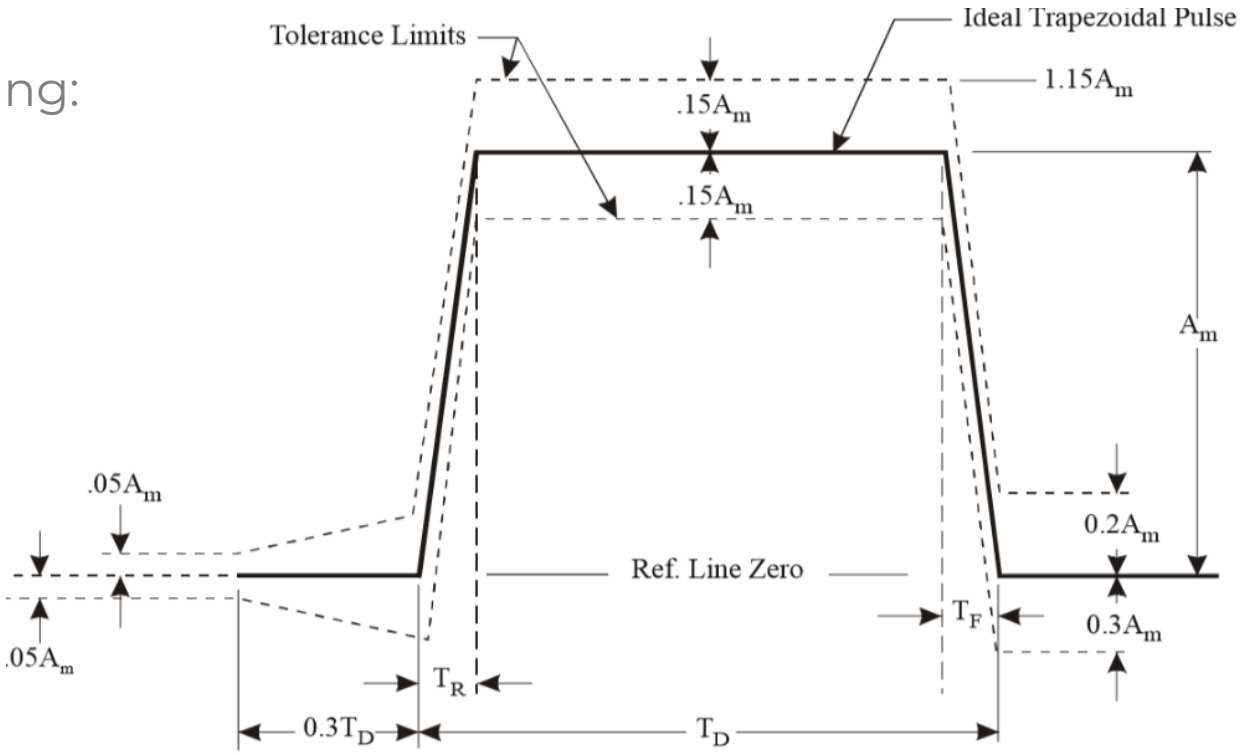
Toleranzgrenzen für den Trapez Puls

Der Zeitverlauf muss für eine Zeitdauer von 3x T_D überwacht werden

Die Toleranz für die Geschwindigkeitsänderung:

- ±10% vom Nenngeschwindigkeit
- Integrationszeit
  - 0,4TD vor dem Puls und
  - 0,1TD nach dem Puls

T_R und T_F = kleiner oder gleich $0{,}1T_D$

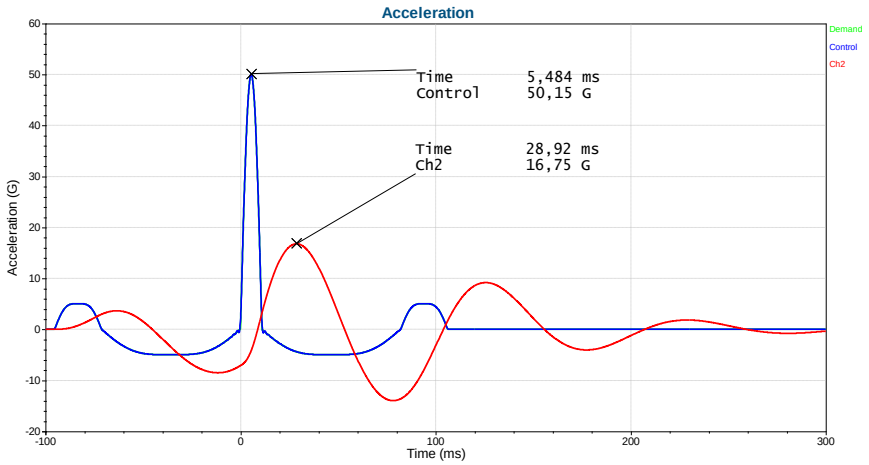


EINFLUSS DER GEWÄHLTEN KOMPENSATIONSPULSE

Anregung: $a_{ClasPuls}(t)$, Halbsinus-Puls, Amplitude $50g_{PEAK}$, Impulsbreite 11ms ($f_{max,1}$ = 136Hz), Bewegungskompensation: Sinus, Rechteck

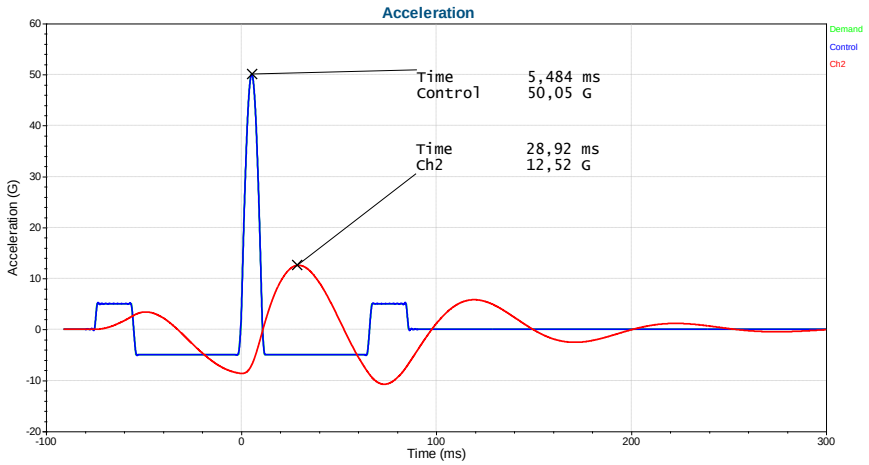
Test 1, $a_{Antwort}(t)$ bei Sinus-Kompensation

- ✓ Vor- und Nachpuls 10%,
- Amplitude am Bauteil ≈ $17g_{PEAK}$



Test 2, $a_{Antwort}(t)$ bei Rechteck-Kompensation

- ✓ Vor- und Nachpuls 10%,
- Amplitude am Bauteil ≈ $13g_{PEAK}$

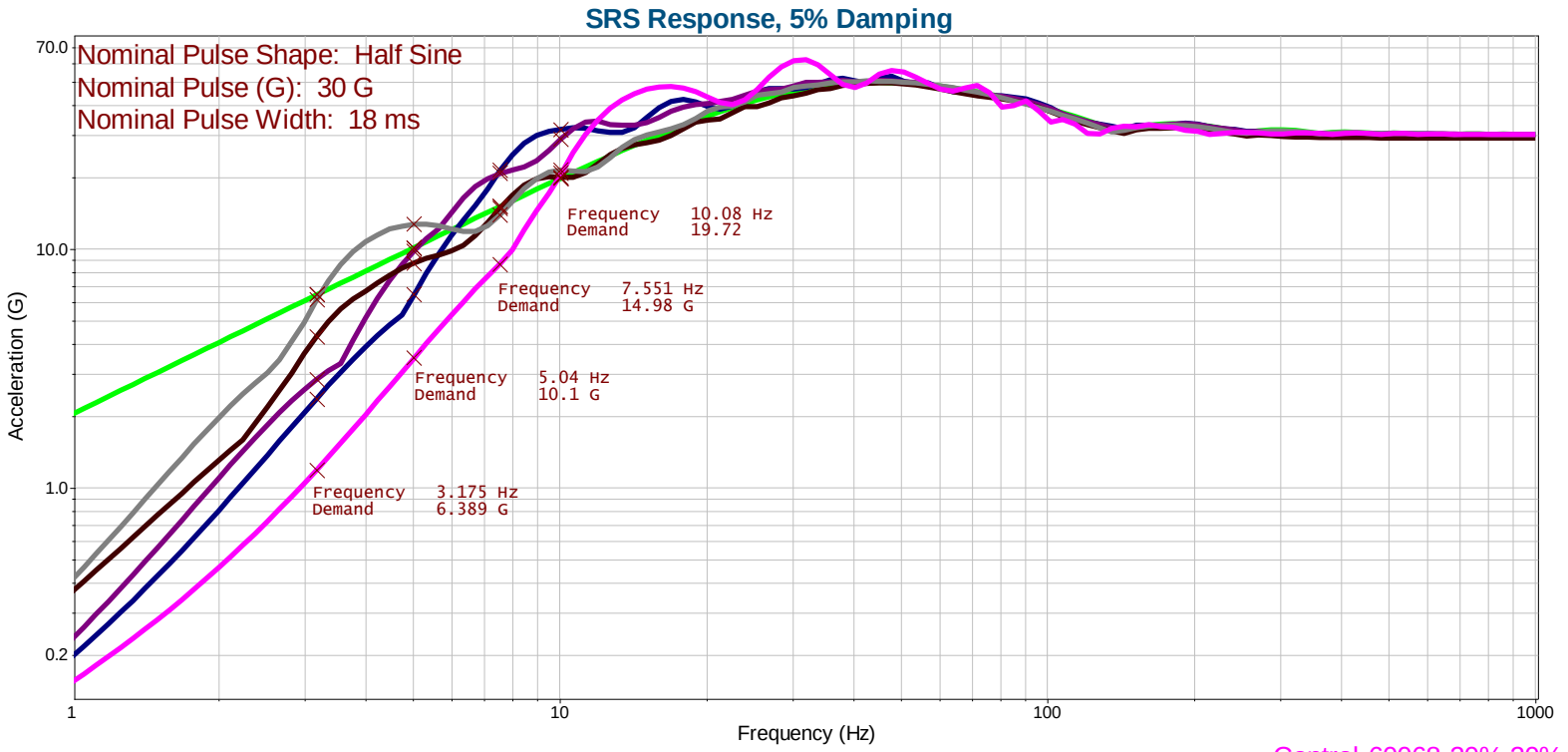


etwa 30% geringere Beschleunigung $a_{Antwort}(t)$ beim Test 2 mit Rechteck-Kompensation.

- Die Antwort des Prüflings ist im Test 2 mit $13g_{PEAK} < 17g_{PEAK}$, 30% geringer, weil der Hauptfrequenzbereich des 11ms-Pulses endet bei $f_{max,1}$ (11ms) = 136Hz und damit noch unter der 1. Resonanz bei 140Hz, damit bekommen die unteren Frequenzen Einfluss.

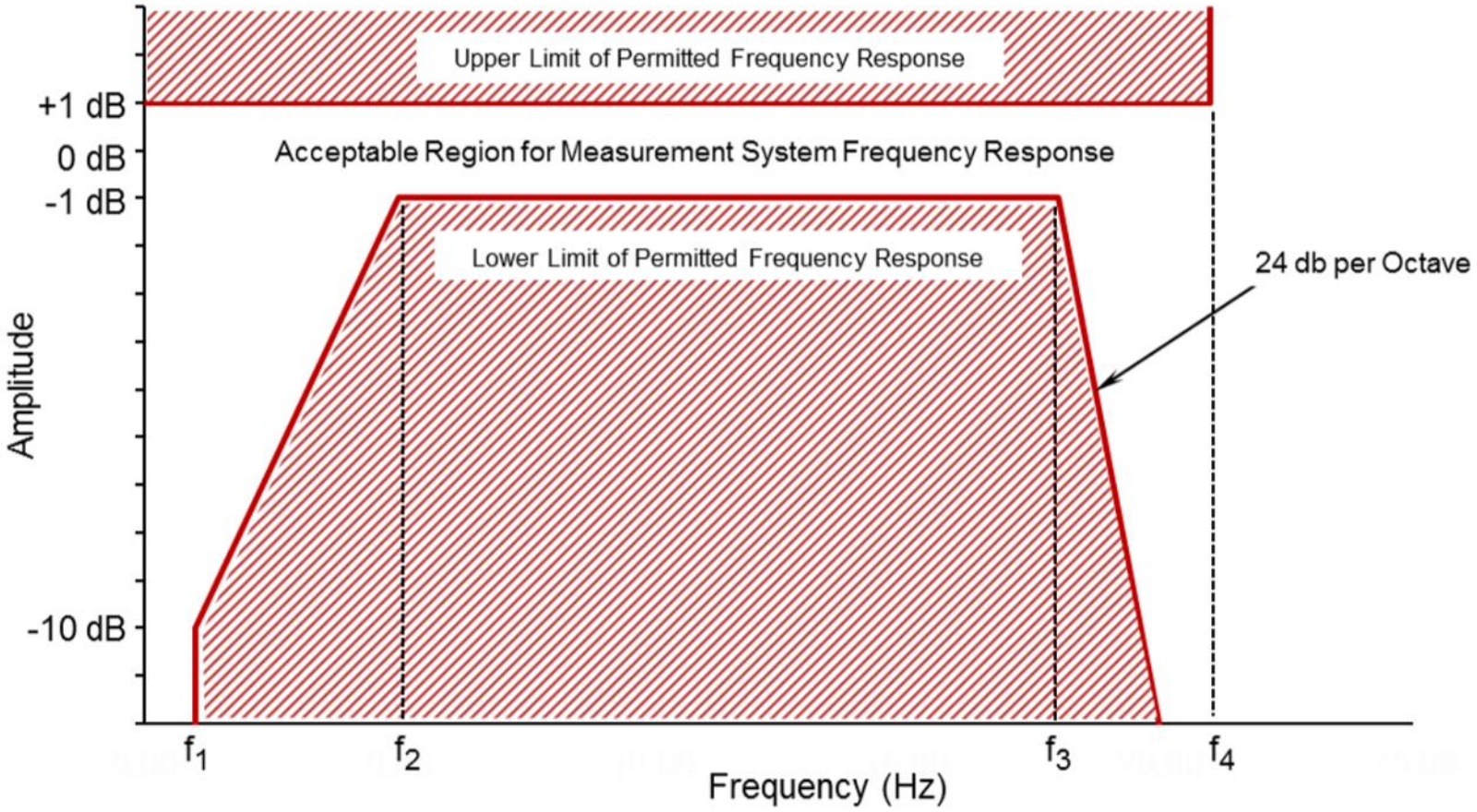
EINFLUSS DER GEWÄHLTEN KOMPENSATIONSPULSE

Der Abfall bei f_1 gilt nur dann als akzeptabel, wenn die niedrigste Resonanzfrequenz des Prüflings (f_N) um den Faktor zwei oder mehr größer als f_1 ist ($f_N \geq 2 * f_1$).



FREQUENZBEREICH KLASSISCHER PULS

Übersicht Frequenzgang der verwendeten Messtechnik



GEFORDERTER FREQUENZGANG DEF STAN 0035

Duration of Pulse (ms)	Low Frequency Cut Off (Hz)		High Frequency Cut Off (kHz)	Frequency at Which Response May Rise Above +1 dB (kHz)
	f_1	f_2	f_3	f_4
16, 18, 25 and 30	0.2	1	1	2
11	0.5	2	1	2
5 and 6	1	4	2	4
2 and 3	2	10	5	10
1	4	20	10	20
0.5	10	50	15	30
0.2 and 0.3	20	120	20	40

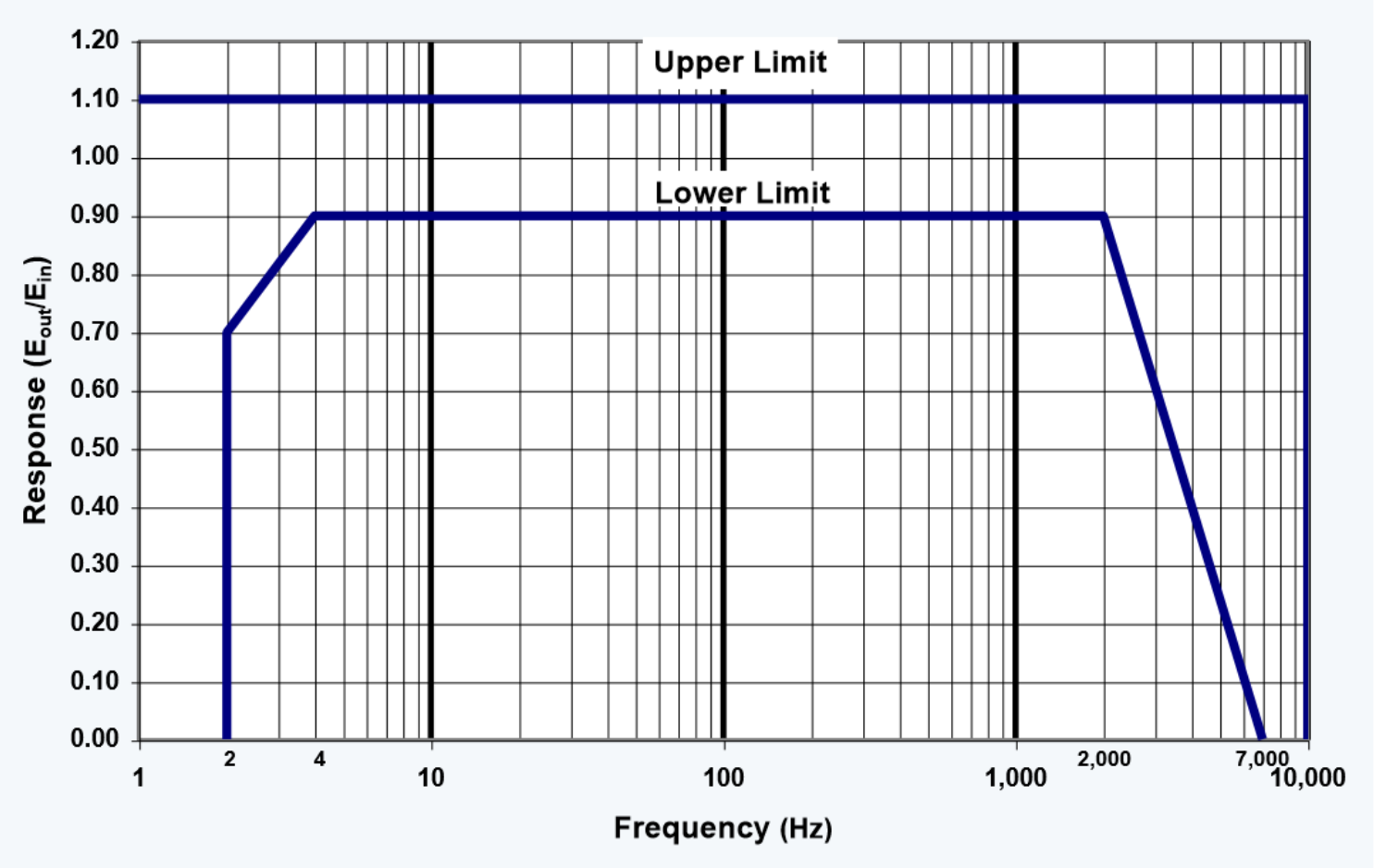
Note: Ideally there should be no significant phase shift over the frequency range of the measurement. However, a constant phase shift for all measurement channels may be acceptable with the agreement of the Test Specifier.

The requirements apply to the acceleration frequency response of the measuring system without the use of a low-pass filter on the control signal. When a low-pass filter is used, the characteristics of the filter should be such that its cut-off frequency (–3 dB point) is not lower than:

$$f_{3dB} > \frac{1{,}5}{Impulsdauer\ [ms]}$$

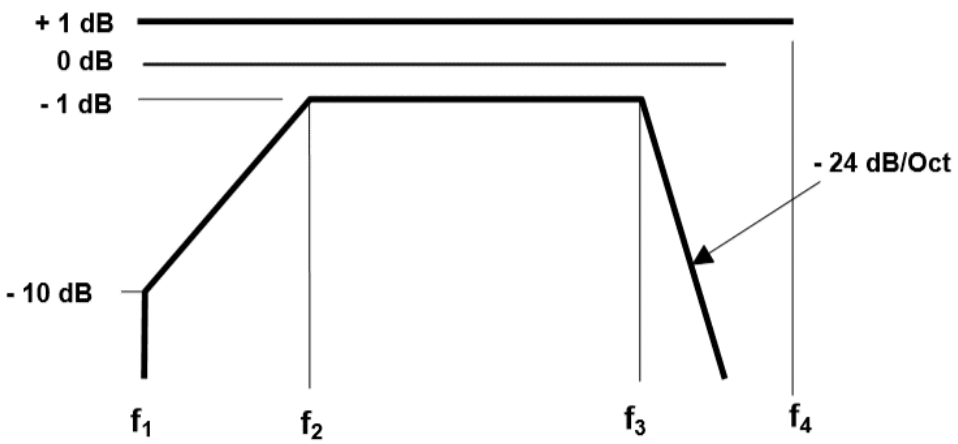
GEFORDERTER FREQUENZGANG RTCA 160G

RTCA Operational and Crash Safety Shock - Die Dauer beträgt entweder 11ms oder 20ms



GEFORDERTER FREQUENZGANG AECTP 403

Ist eine genaue Messung der Puls Form erforderlich, können bei einer Pulsdauer < 3 ms die angegebene oberen Grenzfrequenzen und die +1dB Antwortfrequenz nicht ausreichend sein.



Duration of Pulse (ms)	Low frequency Cut off (Hz)		High frequency Cut Off (kHz)	Frequency at which response may rise above +1 dB (kHz)
	f_1	f_2	f_3	f_4
25	0.2	1	1	2
11	0.5	1	1	2
6	1	4	2	4
3	4	16	5	25
<3	4	16	15	25

GEFORDERTER FREQUENZGANG EN 60068-2-27

Half-Sinus Schock mit $50g_{PEAK}$ und 11ms

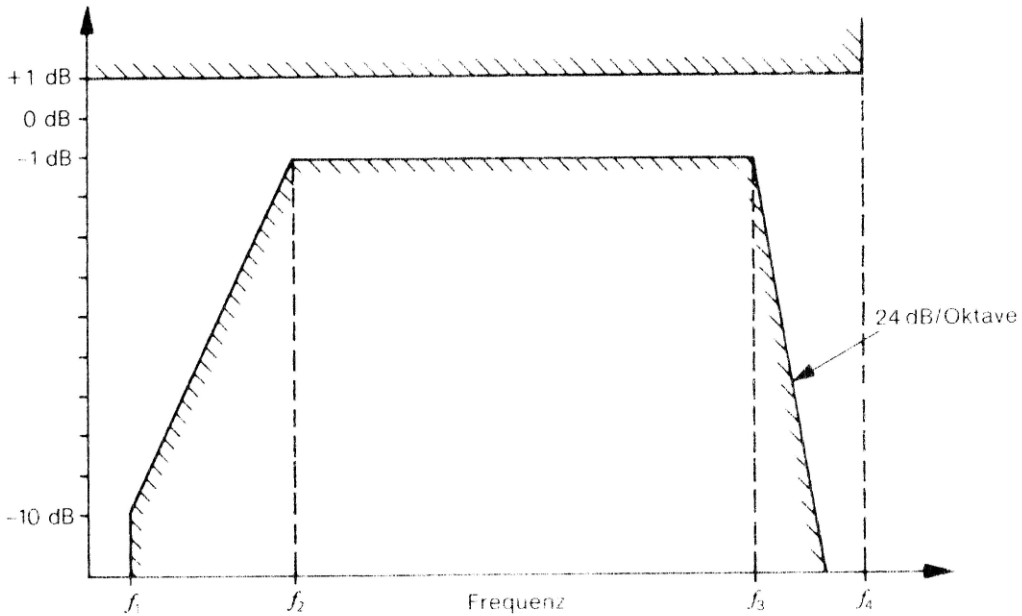
untere Frequenz f_u :

$$f_u = \leq \frac{1}{2 \cdot \pi} \frac{1}{20 \cdot D} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \frac{1}{20 \cdot 0{,}011s} = 0{,}7Hz$$

obere Frequenz f_o :

$$f_o = \geq \frac{10}{D} = \frac{10}{0{,}011s} = 909Hz$$

Pulsdauer ms	untere Frequenz f_u Hz		obere Frequenz f_o kHz
	f_1	f_2	f_3
6	1	4	2
11	0,5	2	1
18	0,2	1	1



VIBRATION RESEARCH

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT.

FRAGEN ODER ERGÄNZUNGEN ??

Vibration Research Europe GmbH

Marker Höh 16

96524 Föritztal

+49 (0)36764 816363 / +49 (0) 151 2202 4566

holger@vibrationresearch.de

VibrationResearch.com