

Experimentelle und rechnerische Qualifikation der Vibrationsfestigkeit von elektrotechnischen Großbaugruppen im Lastfall Erdbeben*

Steffen Rödling und
Bernd Brettner, Ottobrunn

Einrichtungen zur Übertragung und Erzeugung von elektrischer Energie werden in allen Regionen der Welt errichtet. Auch in solchen, in denen Erdbeben nicht ausgeschlossen werden können oder sogar erwartet werden müssen. Um die Sicherheit der Anlagen zu gewährleisten, ist hier der Nachweis der Standfestigkeit, Integrität und Funktion der Geräte und Komponenten unter erdbebenspezifischen Belastungen erforderlich. Der in der vorliegenden Veröffentlichung beschriebene experimentelle Nachweis an einem Laststufenschalter für Transformatoren wurde bei der IABG mbH, Ottobrunn, durch rechnerische Methoden begleitet und ergänzt. Auf diese Weise wurde ein mit statischen und dynamischen Versuchen abgeglichenes Rechenmodell erstellt, welches bei zukünftigen Qualifizierungen veränderter Baustände herangezogen werden kann. Durch Model-Update werden die so verifizierten Modelle und Methoden angepasst und zur Qualifikation veränderter Typen verwendet.

Komponenten in Kraftwerken, Umspannwerken und anderen Einrichtungen der Energietechnik unterliegen im Falle eines Erdbebens sehr hohen Beanspruchungen. Gleichzeitig hängt von der Funktionsfähigkeit der Komponenten nach einem Erdbeben die Aufrechterhaltung der Energieversorgung in einer Krisenregion ab. Diese Komponenten sind daher als sicherheitsrelevante Bauteile anzusehen und aus Sicht der Betriebsfestigkeit dementsprechend zu bewerten.

Da Erdbeben hinsichtlich ihres Zeitverlaufs und der Anteile von Vertikal- oder Horizontalbewegungen in den Regionen der Welt sehr unterschiedlich sein können, haben sich eine Vielzahl an Normen, Gesetzen und behördlichen Vorschriften entwickelt. Nahezu alle Hersteller von Energietechnikkomponenten beliefern Kunden weltweit und müssen daher alle relevanten

Normen [1-15] erfüllen und ihre Anlagen entsprechend qualifizieren.

Darüber hinaus ist ein weiteres Merkmal von energietechnischen Komponenten, dass die Stückzahlen im Vergleich zu anderen Industriebereichen sehr gering, die Variantenvielfalt dagegen hoch ist. Die Anforderung an die Nachweisführung zur Qualifikation von energietechnischen Komponenten hinsichtlich Erdbebenfestigkeit besteht also darin, mit geringen Prüflingszahlen eine große Zahl von Bauteilvarianten gegen eine Vielzahl an Normen zu prüfen und zu qualifizieren.

Der vorliegende Artikel beschreibt daher exemplarisch das Vorgehen zur Erdbebenqualifikation einer elektrotechnischen Großbaugruppe am Beispiel eines Laststufenschalters unter Berücksichtigung dieser Kriterien. Dabei wird neben der eigentlichen experimentellen Qualifikation ein mit statischen und dynamischen Versuchen abgeglichenes Rechenmodell erstellt, welches bei zukünftigen Betriebsfestigkeitsnachwei-

sen veränderter Baustände ohne die Durchführung von umfangreichen Versuchskampagnen herangezogen werden kann.

Experimentelle Qualifikation der Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben

Im Rahmen der experimentellen Qualifikation von Anlagen im Lastfall Erdbeben müssen Lastfälle mit kurzzeitigen rauschförmigen dynamischen Beanspruchungen berücksichtigt werden. Typische Beispiele für diese transienten Belastungen sind die Auswirkungen von Erdbeben, Explosionen und Transportvorgängen. Für den experimentellen Nachweis der Festigkeit von Bauteilen gegenüber diesen Belastungsarten gibt es in der Betriebsfestigkeit verschiedene Arten der Vibrationsprüfung (Bild 1), die im Rahmen der Erdbebenqualifikation eingesetzt werden.

Zunächst werden mit Gleitsinusversuchen sequenziell in allen Raumrichtungen

* Dieser Beitrag erschien bereits im DVM-Bericht 138

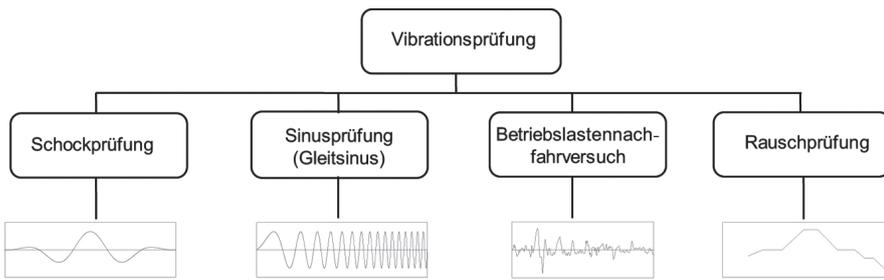


Bild 1. Beispiele für Anregungsarten für die ein- und mehraxiale Vibrationsprüfung [17]

Figure 1. Exemplary types of excitation for uniaxial and multi-axial vibration testing [17]

die Eigenfrequenzen und zugehörigen Dämpfungen des Aufbaus ermittelt. Dies dient zur Identifikation des Gesamtsystems über die Ermittlung der auftretenden Eigenfrequenzen und Dämpfungen.

Im Anschluss folgt der Nachweis der Funktion und der Haltbarkeit des Prüflings mit dreiachsigen Betriebslastennachfahrversuchen mit aus Anforderungsspektren erstellten Echtzeitsignalen. Die Norm IEC 68-2-57 [4] stellt hierfür den erforderlichen Prüfablauf und die Vorgehensweise zur Erstellung der Anforderungsspektren (RRS) zur Verfügung. Diese beschreiben die maximal auftretenden Antworten von Ein-Massen-Schwingern auf ein Anregungssignal als Funktion der Eigenfrequenz und der Dämpfung. Die Belastungshöhen der Spektren in Form des ZPA-Wertes (Zero Period Acceleration) müssen zusätzlich aus den relevanten Normen entnommen werden, die für den jeweiligen Anwendungsfall und -ort maßgeblich sind. Der ZPA-Wert ist die maximale Beschleunigung des Echtzeitsignals, welches das zugehörige Anforderungsspektrum abdeckt. Hierzu wird mit einer iterativen Regeneration aus dem gebildeten RRS ein Echtzeitsignal mit einer Zufallscharakteristik erstellt. Dieses Signal wird so optimiert, dass das daraus ermittelte Antwort-Spektrum (Test Response Spectrum - TRS) das geforderte Antwortspektrum (Required Response Spectrum - RRS) einschließt.

Zur Qualifikation der Anlagen werden mehrere Versuche mit Erdbebenlasten aus dem geforderten Betriebserdbeben (OBE -

Bild 2. Vorgehensweise zur Qualifikation und Modelloptimierung der Stufenschalter - Baureihe VR1300

Figure 2. Approach for the qualification and model update of an on-load tap changer - type VR1300

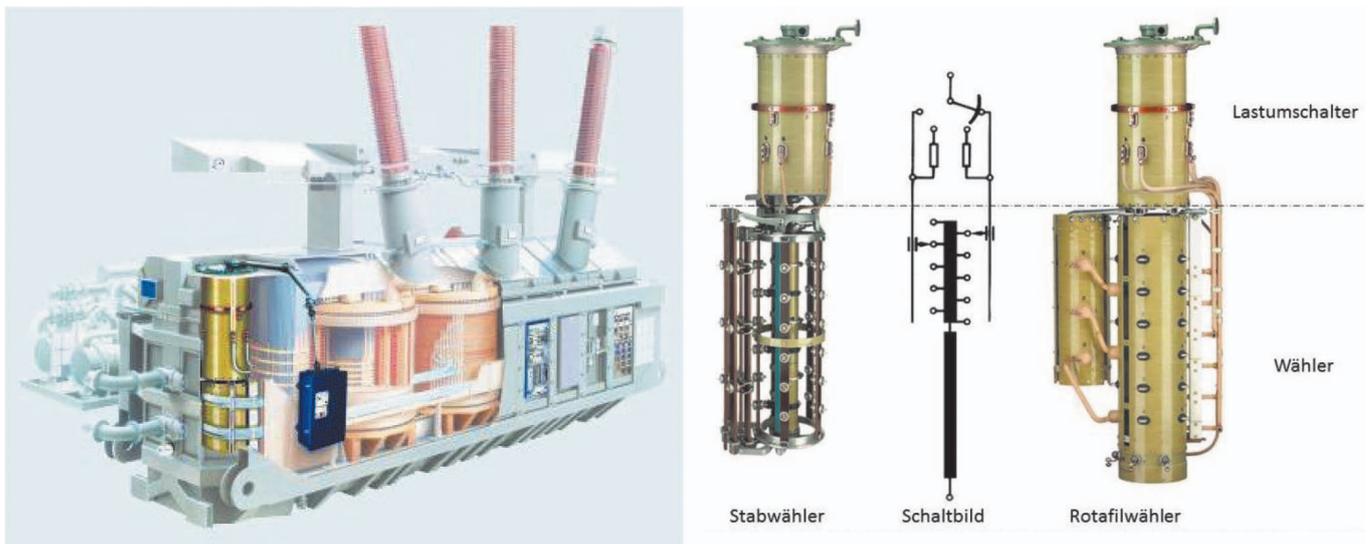
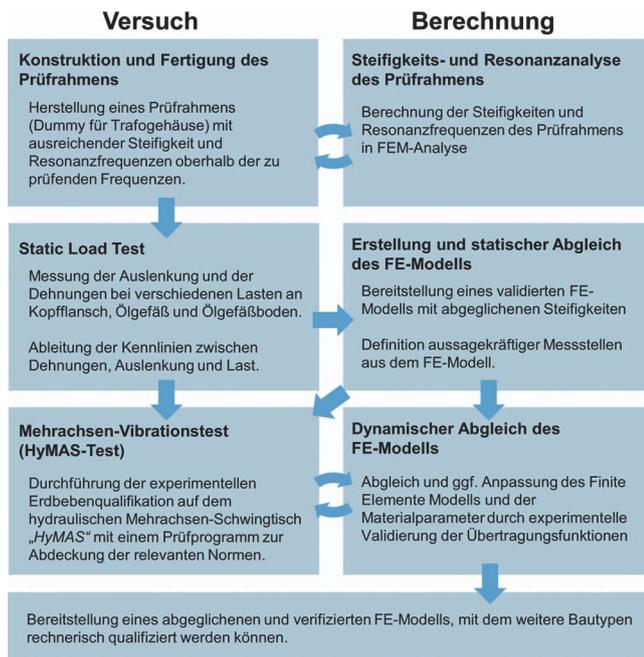


Bild 3. Transformator mit eingebautem Laststufenschalter sowie Bauvarianten und Schaltbild eines Stufenschalters [16]

Figure 3. Power transformer with built-in on-load tap changer and different selector variants and electric circuit of an on-load tap changer [16]

Operating Basis Earthquake) und aus dem Bemessungserdbeben (SSE - Save Shutdown Earthquake) durchgeführt [5]. Das OBE stellt die Anforderungen für den Nachweis der Funktion und der Haltbarkeit unter Erdbebenbelastung dar. Das SSE wird für den Nachweis einer sicheren Abschaltung der Anlage unter einer um Faktor 2 überhöhten Last verwendet. Die Gesamtdauer der Beanspruchung pro Test soll mindestens 30 s betragen.

Die Durchführung erfolgt jeweils im Wechsel mit Resonanzsuchläufen, um durch einen Frequenzabfall im Bereich der Eigenfrequenzen Steifigkeitsverluste im Prüfling als Maß für eine auftretende Schädigung detektieren zu können. Zusätzlich werden am Ende des Versuchsprogramms noch Schockprüfungen in Form von „Sinus Beats“ durchgeführt, um auftretende Sonderereignisse wie Flugzeugabsturz oder Transportbelastungen abdecken zu können. Tabelle 1 zeigt tabellarisch den prinzipiellen Ablauf einer experimentellen Erdbebenqualifikation.

Ableitung und Validierung einer rechnergestützten Variantenqualifikation der Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben

Für den Nachweis der Erdbebensicherheit eines Produktes ist der beschriebene experimentelle Nachweis unabdingbar. Dieser ist mit großem Aufwand verbunden und kann erst nach Vorliegen realer Bauteile erfolgen. Im Folgenden wird deshalb ein Konzept beschrieben, das einen rechnerischen Nachweis verschiedener Varianten einer Baureihe gestützt auf die experimentelle Untersuchung eines Repräsentanten der Produktfamilie ermöglicht. So kann aus dem experimentellen Nachweis der maximale Nutzen gezogen werden.

Die generelle Vorgehensweise der dargestellten Methode wurde vorab mit dem Ziel festgelegt, die elektrotechnische Großbaugruppe experimentell in Bezug auf Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben zu qualifizieren. Aufgrund der für den Anwendungsfall notwendigen zahlreichen Bauvarianten wurde jedoch zusätzlich ein statisch und dynamisch abgeglichenes Modell zur rechnerischen Qualifikation und damit zur Minimierung des experimentellen Aufwandes erstellt. Dabei wurde aus Gründen der Effizienz in Bezug auf Zeit und Kosten darauf geachtet, dass möglichst viele Schritte in Berechnung und Versuch parallel bearbeitet werden können. Bild 2 zeigt den entwi-

ckelten Ablauf der experimentellen Qualifikation, die zusätzlich benötigten Versuche und die Wechselwirkungen zwischen Versuch und Berechnung.

Für die auf der Versuchsseite notwendigen statischen und dynamischen Tests muss ein Prüfrahmen mit ausreichender Steifigkeit und entsprechend hoher erster Eigenfrequenz konstruiert und gefertigt werden. Zur iterativen Auslegung der Prüfvorrichtung wird bereits zu diesem Zeitpunkt ein FE-Modell des Halters und des Prüflings mit realer Massenverteilung und angenommenen Steifigkeiten erstellt und für eine erste rechnerische Optimierung der Vorrichtung verwendet.

Anschließend erfolgen im Static-Load-Test die Ermittlung der tatsächlichen Steifigkeiten des Prüflings und der erste Abgleich des Berechnungsmodells mit den erzielten Versuchsergebnissen.

Danach wird die dynamische Qualifikation der Baugruppe im Versuch gemäß der Beschreibung im vorhergehenden Kapitel durchgeführt. Während dieses Prozesses werden die in den Versuchen erzielten Ergebnisse immer wieder dazu verwendet, das bereits erstellte Rechenmodell zu verfeinern und mit dem realen Verhalten des Prüflings abzugleichen.

Als Ergebnis wird ein mit den statischen und dynamischen Versuchen abgeglichenes Rechenmodell erzielt. Durch Model-Update können die so verifizierten Modelle und Methoden angepasst und im Anschluss zur Qualifikation veränderter Ty-

pen herangezogen werden. Auf diese Weise wird eine deutliche Reduktion des experimentellen Aufwandes zur Qualifikation der Anlagen erzielt.

Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel eines Laststufenschalters der Fa. Maschinenfabrik Rheinhausen vorgestellt (vgl. Bild 3), der in elektrischen Großtransformatoren eingesetzt wird, um die Betriebszustände des Transformators an die Erfordernisse des Versorgungsnetzes anzupassen. Bild 3 zeigt zwei Varianten des Laststufenschalters und die Einbausituation im Transformatorgehäuse.

Der Prüfrahmen – Trafoersatzmodell zur Prüflingaufnahme

Zur realitätsnahen Lagerung des Prüflings wurde ein Ersatzmodell für das Transformatorgehäuse in Form eines Prüfrahmens konstruiert, der eine Befestigung des Prüflings entsprechend der realen Einbausituation auf allen verwendeten Prüfanlagen zuließ. Zur korrekten Einleitung der geforderten Beanspruchungen am Laststufenschalter musste eine Optimierung des Prüfrahmens so durchgeführt werden, dass die Anschlusssteifigkeiten des Transformatorgehäuses mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden konnten. Zusätzlich wurde eine Abschätzung der Eigenfrequenzen des Prüfaufbaus durchgeführt, um während der dynamischen Tests eine Verfälschung

Abfolge	Anregungssignal	Prüfprogramm	Prüfziel
1	Gleitsinus	Resonanzsuche	Systemidentifikation und Plausibilisierung der Sensorik
2	Echtzeit	high seismic performance level time-history test, OBE	Nachweis der Funktion und der Haltbarkeit unter Erdbebenbelastung
3	Gleitsinus	Resonanzsuche	Systemidentifikation und Vergleich zur ersten Identifikation zur Detektion von Strukturveränderungen
4	Echtzeit	OBE time-history test	normgemäße Wiederholung
5	Gleitsinus	Resonanzsuche	vergleichende Systemidentifikation zur Detektion von Strukturveränderungen
6	Echtzeit	OBE time-history test	normgemäße Wiederholung
7	Echtzeit	SSE time-history test	Nachweis sicherer Abschaltung unter der Belastung eines Sicherheitserdbebens
8	Gleitsinus	Resonanzsuche	vergleichende Systemidentifikation zur Detektion von Strukturveränderungen
9	Schock	transient load case	Haltbarkeit und Funktion unter transienten Belastungen aufgrund von Sonderereignissen

Tabelle 1. Prüfprogrammabfolge HyMAS [4]

Table 1. Test program steps on HyMAS [4]

der Beanspruchungen am Prüfling abschließen zu können.

Der Prüfling wird hängend in den Prüfraumen montiert. Die Einbausituation am Ölgefäßflansch ist mit den realen Einbaubedingungen vergleichbar und soll die Fußpunktanregung des hydraulischen Mehrachsenschwingtisches (HyMAS) der IABG während der Vibrationsprüfung so direkt und unbeeinflusst wie möglich in den Prüfling einleiten. Bild 4 zeigt den Prüfraumen mit eingebautem Prüfling auf dem hydraulischen Spannfeld „HydrA“ im Static-Load-Test zur Ermittlung der statischen Kennlinien.

Der Prüfling wurde im FE-Modell für die Auslegungsrechnungen des Prüfraumens als stark vereinfachtes Modell mit vom Hersteller bekannten Massenverteilungen dargestellt. Die Steifigkeiten des Prüflings wurden so angenommen, dass die erste Biegeeigenfrequenz bei ca. 6 Hz auftrat. Diese Erfahrungswerte stammen aus älteren Analysen eines ähnlichen Bautyps durch den Hersteller und wurden direkt als Eingangsdaten zur rechnerischen Optimierung des Prüfraumens bezüglich Steifigkeit und Eigenfrequenz verwendet.

Der Grundrahmen wurde mit sehr groß dimensionierten Stahlprofilen in Fachwerkbauweise realisiert, um eine möglichst hohe Steifigkeit zur direkten Lasteinleitung zu gewährleisten. Die Steifigkeitsoptimierung des Prüfraumens im Bereich der Anschlussplatte ergab eine Deckplatte aus Stahl mit 15 mm Stärke und Versteifungsrippen angelehnt an die Steifigkeitsverhältnisse und gängige Konstruktionsweisen von im Einsatz befindlichen Trafogehäusen.

Nach jeder konstruktiven Änderung des Prüfraumens zur Annäherung an die Steifigkeitsverhältnisse im realen Einbau im Trafogehäuse wurden die Eigenfrequenzen des gesamten Prüfaufbaus erneut berechnet. Der Prüfraumen wurde auf diese Weise im Rahmen eines iterativen Prozesses auf Eigenfrequenzen oberhalb der doppelten im Prüfprogramm vorkommenden maximalen Frequenz von 35 Hz optimiert.

Bild 5 zeigt den Prüfraumen in den ersten Eigenformen in X- und Y-Richtung bei 74,4 und 77,7 Hz.

Static-Load-Test – quasistatische Ermittlung der Steifigkeitskennlinien

Zur quasistatischen Ermittlung der Steifigkeitskennlinien wurde der Prüfling, wie in Bild 4 dargestellt, auf dem hydraulischen Spannfeld „HydrA“ aufgebaut und

mit einem höhenverstellbaren Hydraulikzylinder an im Rechenmodell definierten Positionen quasistatisch ausgelenkt. Im statischen Test wurden in vier Lastfällen mit unterschiedlichen Maximallasten die Kraft-Weg-Hysteresen am Belastungszyylinder, die Auslenkung in verschiedenen Ebenen und die Kraft-Dehnungs-Kurven an definierten Positionen am Prüfling aufgenommen.

Die maximalen Auslenkungen jedes Lastfalls sind in Bild 6 dargestellt. Diese

Auslenkungswerte wurden mit den Ergebnissen aus der statischen FE-Analyse verglichen und erlaubten eine erste Validierung und Optimierung des FE-Modells.

In diesem iterativen Abgleich des Rechenmodells wurden die Steifigkeiten über den E-Modul des Materials Rotafil (faserverstärktes Kunststoffrohr mit Glasfaserverwicklungen unterschiedlicher Steigungen) entsprechend dem Versuch angepasst, da für dessen stark anisotrope Eigenschaften keine Tabellenwerte verfügbar sind.



Bild 4. Prüfraumen mit Prüfling im Static-Load-Test

Figure 4. Test frame with specimen in static load test

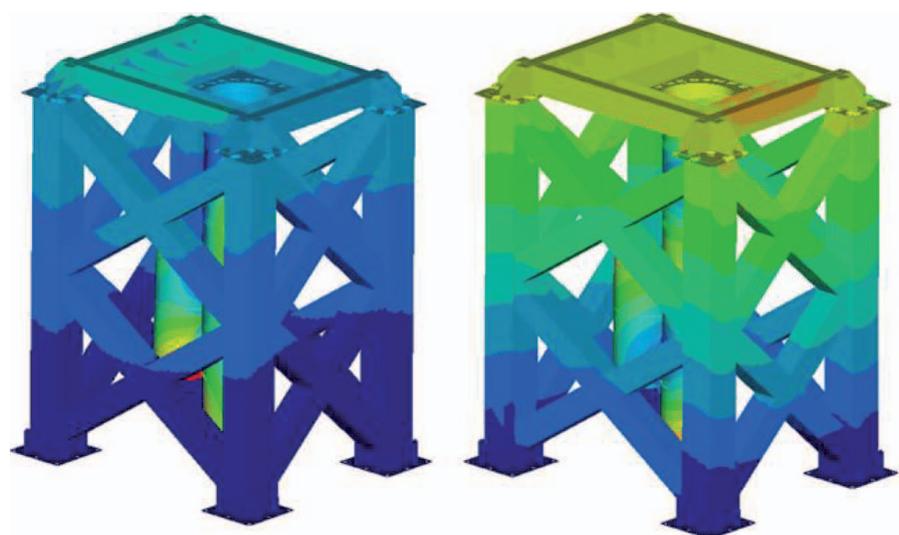


Bild 5. Prüfraumen mit Eigenformen

Figure 5. Test frame with mode shapes

Experimenteller Nachweis im dynamischen Versuch

Zur optimalen Auswahl von Messpunkten, die bei den dynamischen Versuchen appliziert und mitgemessen werden sollten, wurden erste dynamische Berechnungen mit dem statisch kalibrierten FE-Modell durchgeführt. Auf dieser Basis wurden Messstellen festgelegt, die sich aufgrund besonders hoher Verschiebungen oder Verformungen optimal für die Verifikation und Anpassung des FE-Modells eignen.

Zur geforderten experimentellen Qualifikation des Stufenschalters in Bezug auf die Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben wurde der Prüfling mit der definierten Sensorik ausgerüstet und auf dem Mehrachsenschwingtisch der IABG (HyMAS) aufgebaut. Bild 7 zeigt den hydraulischen Mehrachsenschwingtisch „HyMAS“ mit Prüfrahmen und eingebautem Prüfling sowie auf der rechten Seite die in der Berechnung als relevant festgelegten Messpositionen für die Beschleunigungssensoren.

Der verwendete Prüfstand ist in der Lage, bis zu 10 t schwere Prüflinge mit Frequenzen bis maximal 100 Hz und Beschleunigungen von maximal 150 m/s² zu testen. Der Prüftisch der Anlage ermöglicht mittels seiner vier vertikalen und drei horizontalen Hydraulikzylinder innerhalb seiner Leistungsgrenzen eine räumliche Bewegung in allen Freiheitsgraden. Am Prüfstand darstellbar sind Prüfsignale aus allen Bereichen der Vibrationsprüfung.

Im Rahmen des hier dargestellten experimentellen Nachweises wurden neben Gleitsinusanregungen Echtzeitverläufe als Anregung im Lastfall Erdbeben auf Basis vorgegebener Anforderungsspektren und Schockbelastungen in Form von Sinus-Impulsen, sogenannten „Sinus Beats“, verwendet. Diese stochastischen und transienten Beschleunigungsverläufe werden anhand von Anforderungsspektren nach den Beispiele angeführten spezifischen Prüfvorschriften erstellt [1-15]. Der Ablauf der Prüfungen entspricht dem in Tabelle 1 dargestellten Vorgehen.

Resonanzsuche mit Gleitsinusanregung

Die Gleitsinusanregung (Sinus Sweep) wurde zur Identifikation charakteristischer (Resonanz-)Frequenzen der Prüfkongfiguration nach [2] durchgeführt. Die so ermittelten Eigenfrequenzen dienen zur weiteren Abstimmung des Rechenmodells und werden im Rahmen der Qualifikation

des Prüflings zur Bewertung der Anregungs- und Antwortspektren bei der Erdbbensimulation sowie zur Definition der Schockprüfung benötigt.

Die Resonanzsuchläufe zu Beginn der Prüfabfolge, zwischen den Time-History-Tests und vor den Sinus Beats, wurden jeweils einmal pro Achse (X-, Y- und Z-Richtung) im Frequenzbereich von 1 bis 35 Hz mit einer Frequenzänderungsrate von 1

Octave/min und einer Anregungsamplitude von 1 m/s² ausgeführt. Bild 8 oben zeigt beispielsweise einen Gleitsinus als Anregungssignal, sowie darunter das zugehörige Antwortsignal an einem fiktiven Ein-Massen-Schwinger. Im Antwortsignal ist bei der ersten Eigenfrequenz eine deutliche Resonanzüberhöhung mit einer definierten Dämpfung zu erkennen. Änderungen in diesen Überhöhungsfunktionen

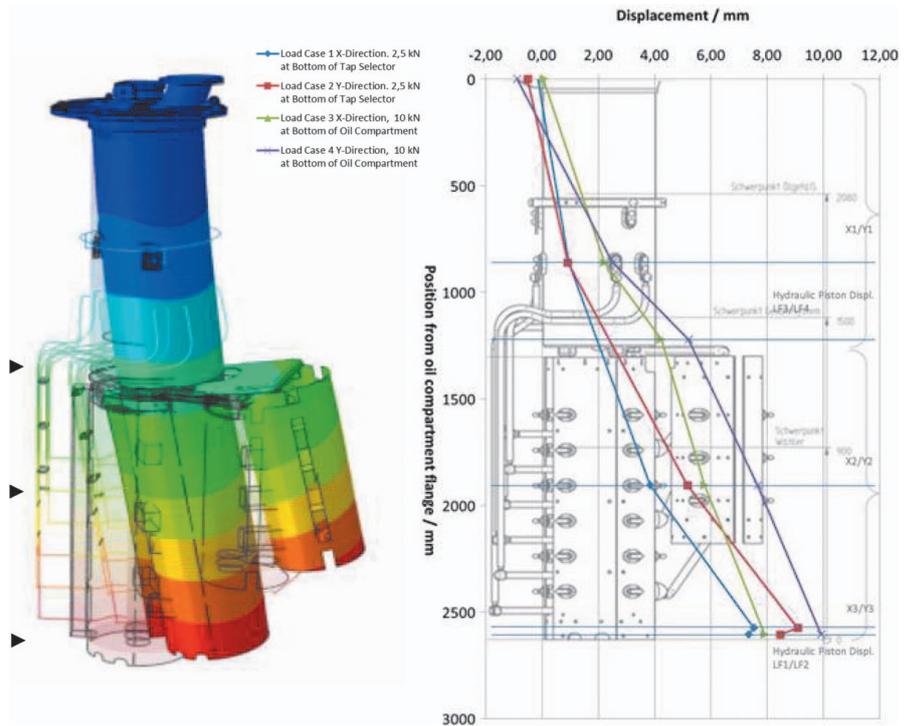


Bild 6. Lastfälle im Static Load Test und max. gemessene Auslenkungen

Figure 6. Load cases static load test and max. displacements



Bild 7. Hydraulischer Mehrachsenschwingtisch „HyMAS“ und Stufenschalter mit Messpositionen

Figure 7. Hydraulic multi axis shake table „HyMAS“ and Tap Changer with accelerometer positions

zeigen Veränderungen im dynamischen Verhalten des Prüflings auf und werden als Hinweis für Beschädigungen des Prüflings verwendet.

Qualifikationstests im Lastfall Erdbeben

Nach der Identifikation des Übertragungsverhaltens des Prüfrahmens und des Prüflings

folgte die eigentliche Qualifikation des Stufenschalters gemäß den einschlägigen Normen [1-4]. In dem hier dargestellten Fall wurden die Erdbebenlasten für den Test „IEEE 693-2005 high performance level“ nach der Time-History-Methode mit Spektren aus der Norm [6] generiert. Gefordert war der Nachweis nach einem sogenannten OBE-Spektrum, unter dem Haltbarkeit und Funktion nachzuweisen sind, sowie nach

einem um Faktor 2 stärkeren SSE-Spektrum, unter dem ein sicheres Abschalten des Prüflings gewährleistet werden muss.

Die Prüfanforderung wird dabei jeweils in Form von geforderten Antwortspektren (Required Response Spectra) definiert. Das zu verwendende Anregungssignal wird dabei nicht explizit beschrieben, sondern implizit durch die maximalen Antwortbeschleunigungen für beliebige schwingfähige Systeme mit einer angenommenen Dämpfung und unterschiedlichen Eigenfrequenzen vorgegeben. Bild 9 zeigt beispielsweise die geforderten Antwortspektren (RRS) für OBE und SSE, die sich für die Z-Richtung aus der Norm IEEE 693-2005 ergeben. Im unteren Teil des Diagramms ist beispielsweise ein aus den Spektren erstelltes Echtzeitsignal mit dem entsprechenden ZPA-Wert dargestellt.

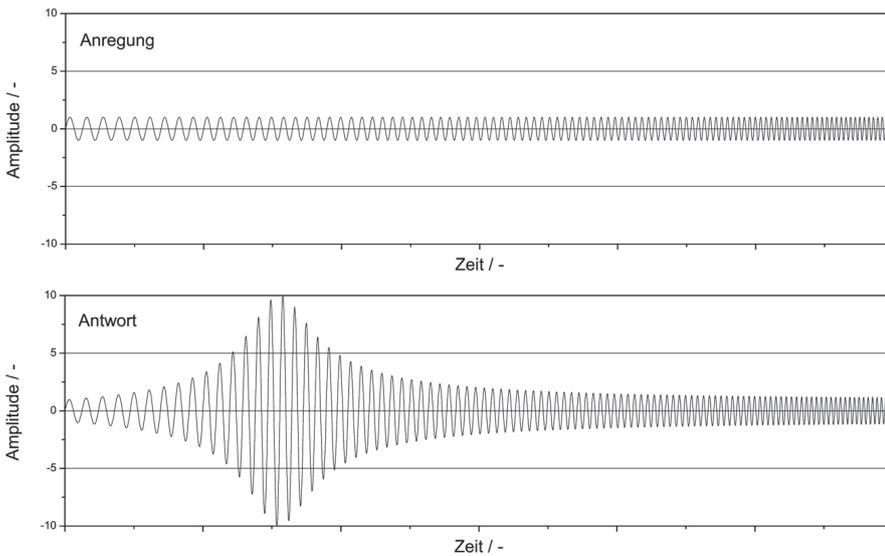


Bild 8. Gleitsinusanregung und Antwortsignal mit einer Resonanzüberhöhung

Figure 8. Sinus Sweep and response signal with a resonance rise

Schockprüfung mit Sinus Beats

Zusätzlich zur Simulation der Erdbebenfestigkeit mittels Echtzeitanregung werden transiente Belastungen wie z. B. Flugzeugabsturz oder Transportbelastungen mittels Schockprüfung in Form von Sinus Beats abgeprüft. Diese Belastungen sind zweiaxiale, gleichphasige Sinus-Impulse in den Kombinationen X/Z und Y/Z. Jeder Durchlauf besteht aus 20 Lastwechseln in der jeweiligen Prüffrequenz. Bild 10 zeigt beispielsweise die Anregungssignale für Sinus-Impulse mit 3, 5, 10 und 20 Lastwechseln und einer definierten Impulshöhe.

Das Anregungsniveau wird mit 8 m/s² in den horizontalen Richtungen und 6,4 m/s² in vertikaler Richtung gemäß dem ZPA-Wertes der vorherigen Erdbebenbelastung festgelegt. Die Prüffrequenz der Sinus-Impulse ergibt sich aus den in den Sinus Sweeps ermittelten Resonanzfrequenzen.

Bild 9. Anforderungsspektren und daraus erstelltes Echtzeitsignal

Figure 9. Required response spectra and related time history signal

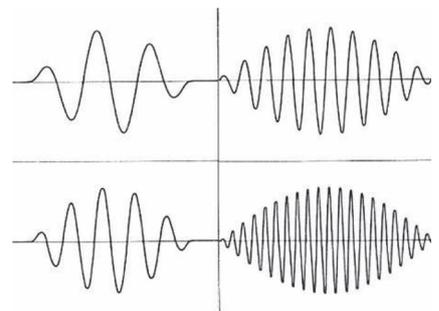
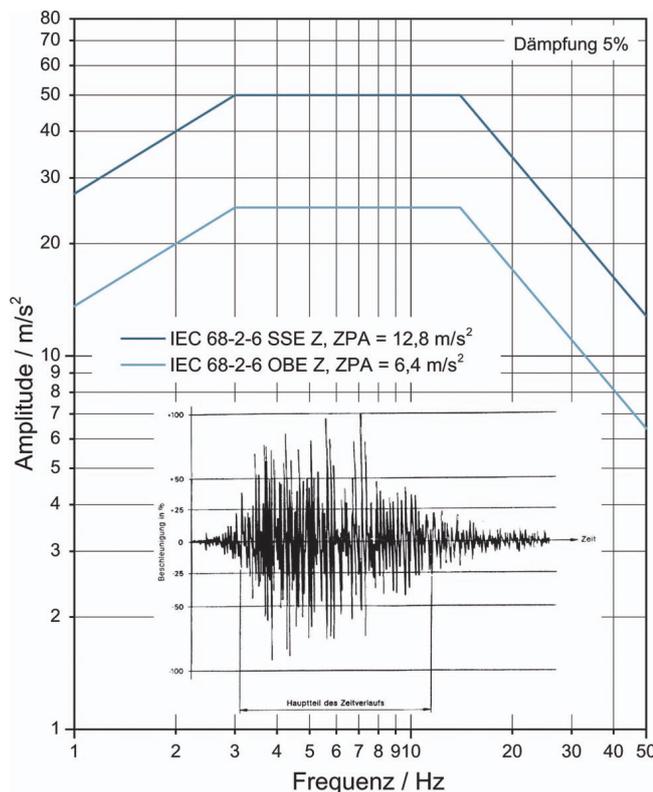


Bild 10. Sinus-Impulse als Schockprüfung mit 3, 5, 10 und 20 Lastwechseln [3]

Figure 10. Sine beats for shock testing with 3, 5, 10 and 20 load cycles [3]

Durch Anregung des Prüflings in seiner Eigenfrequenz sollen Worst-Case-Szenarien abgebildet werden. In diesem Fall wurden die Sinus-Impulse bei 9,6 Hz in X/Z- und 9 Hz in Y/Z-Richtung ausgeführt.

Ergebnisse der Qualifikationstests und Vergleich mit den begleitenden Rechnungen

Die durchgeführten Qualifikationstests an dem hier dargestellten Stufenschalter aus dem Bereich der Energietechnik konnten den Nachweis der Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben für die hier gewählten regionalen Anforderungen erbringen. Mit den durchgeführten Einzelversuchen konnten die bauteilspezifischen Kennwerte wie Steifigkeiten, die Eigenfrequenzen des Systems und die am Prüfling auftretenden Dämpfungen ermittelt werden.

Auf Basis der Testergebnisse aus dem Static-Load-Test und den Vibrationserprobungen wurde das FE-Rechenmodell in Bezug auf Massenverteilung, Steifigkeiten und Dämpfungen angepasst. Mit dem auf diese Weise optimierten Rechenmodell wurden die in Tabelle 1 dargestellten Qualifikationstests nachgerechnet. Bild 11 zeigt im oberen Diagramm die Übertragungsfunktionen des Stufenschalters zwischen der Tischanregung und der am Prüfling angebrachten Beschleunigungssensoren für einen Gleitsinus in horizontaler Richtung (X-Richtung). Es zeigen sich bei etwa 8 Hz und bei etwa 35 Hz deutliche Eigenfrequenzen im Versuch mit Überhöhungen von etwa 9 und 6.

Die Nachrechnung des Versuchs mit Gleitsinusanregung zeigt im unteren Diagramm von Bild 11 im Vergleich zum Test nahezu identische Eigenfrequenzen und eine sehr gute Übereinstimmung der Resonanzüberhöhungen. Damit konnte die FE-Modellierung in Bezug auf die angenommene Massenverteilung, die ermittelten Steifigkeiten und die berücksichtigten Dämpfungswerte verifiziert werden.

Mit dem so verifizierten FE-Rechenmodell wurden die drei Qualifikationstests für Erdbebenbelastungen nach IEEE 693-2005 und die geforderten OBE- und SSE-Erdbeben nachgerechnet. Dabei wurde das am Prüfstand gefahrene Test Response Spectrum (TRS) in allen drei Achsen als Eingangsgröße für die rechnerische Ermittlung der Prüflingsantwort des FE-Modells verwendet.

Bild 12 und 13 zeigen den Vergleich der im Versuch gemessenen und in der FE-Berechnung erhaltenen Maximaldehnungen

und maximalen Vergleichsspannungen. Als Beispieldargestellt sind die Ergebnisse eines IEEE-Spektrums und der OBE-Spektren gemäß IEC 68-2-57 in horizontaler Richtung. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung in den Lastfällen mit geringerer Dehnung. Die festzustellenden Abweichungen bei hohen Dehnungen zeigen tendenziell eine Überschät-

zung und führen so in der Berechnung zu einer konservativen Abschätzung der auftretenden Beanspruchungen.

Die auftretenden Abweichungen in den Dehnungen werden durch das im FE-Modell verwendete vereinfachte Materialmodell des Kunststoffrohrs mit gewickelten Glasfaserlagen als homogenes und isotropes Material verursacht. Die begleitende

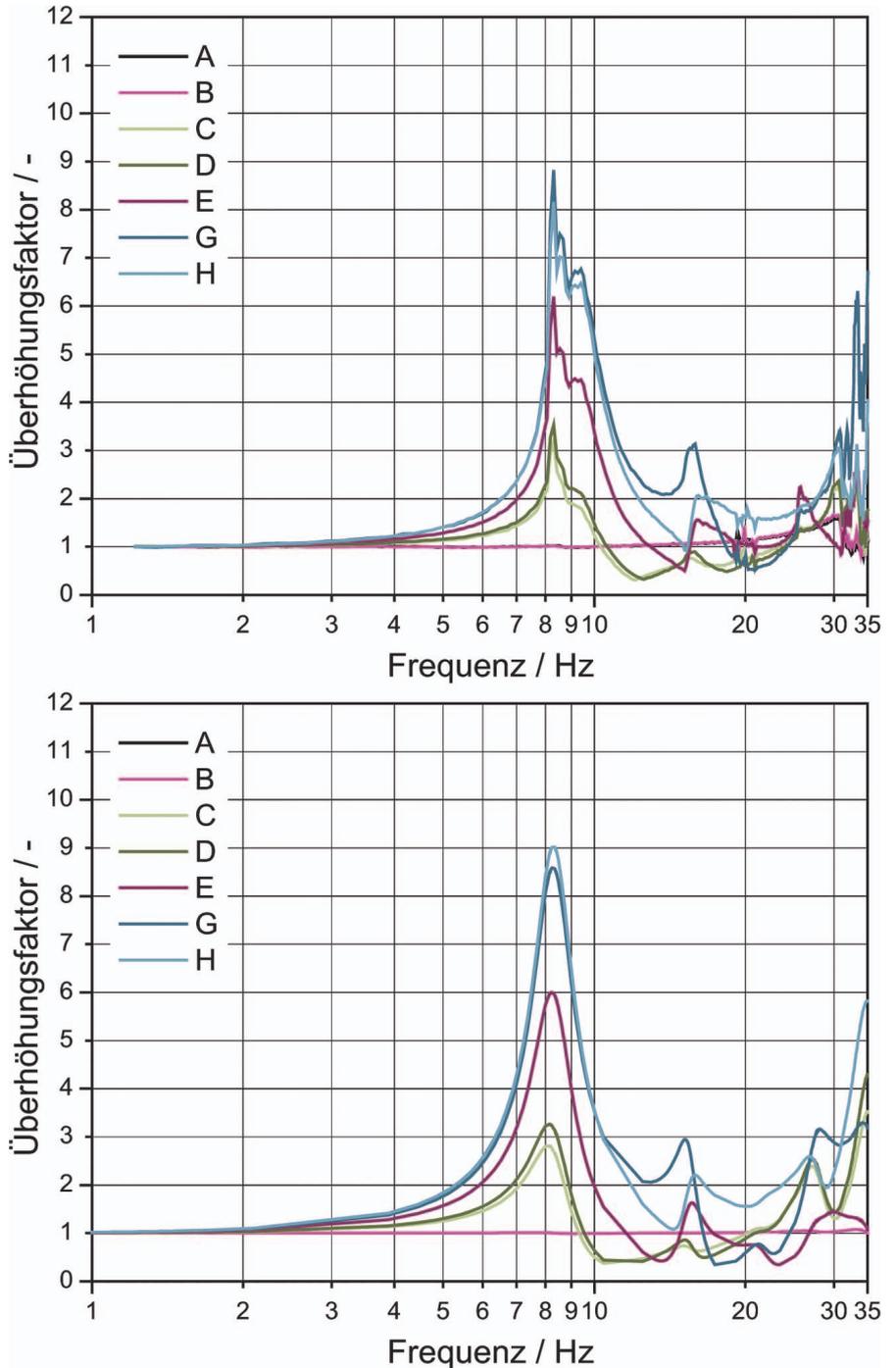


Bild 11. Vergleich der Amplitudenüberhöhungsfunktion aus Sinus-Sweep-Anregung in X-Richtung aus Versuch und Berechnung

Figure 11. Comparison of test and calculation transfer function of sinus sweep in X-direction

Berechnung erlaubt jedoch einen detaillierten Einblick in messtechnisch nur schwer zu erfassende Prüflingsbereiche.

Insgesamt konnte durch den Abgleich des FE-Modells mit den ermittelten experimentellen Daten im statischen sowie im dynamischen Versuch ein abgeglichenes Rechenmodell erstellt werden. Folgerechnungen der erforderlichen Lastfälle zeigten in den gemessenen und berechneten Dehnungen und Spannungen eine gute Übereinstimmung.

Zusammenfassung

Der beschriebene experimentelle Nachweis der Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben an einem Laststufenschalter für Transformatoren wurde durch rechnerische Methoden begleitet und ergänzt.

Im experimentellen Nachweis der Vibrationsfestigkeit wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm abgearbeitet. Zur Bestimmung der Steifigkeiten und der Dämpfungen wurden Versuche mit Gleitsinusan-

regung durchgeführt. Die Vibrationsfestigkeit wurde mit aus Anforderungsspektren der entsprechenden regional gültigen Normen ermittelten, dreiaxialen Echtzeitverläufen und daran angelehnten Schockbelastungen in Form von Sinus Beats nachgewiesen.

Im Bereich der begleitenden Rechnung wurde auf Basis der erzielten Versuchsergebnisse und zusätzlicher statischer Versuche ein abgeglichenes Finite-Elemente-Rechenmodell erstellt. Dieses Modell wurde während der Versuche immer wieder anhand der experimentellen Ergebnisse angepasst und zum Ende des Versuchsprogramms mit einer Nachrechnung der seismischen Qualifikationsversuche verifiziert.

Als Ergebnis liegt ein mit statischen und dynamischen Versuchen abgeglichenes und verifiziertes Rechenmodell vor, welches bei zukünftigen Qualifizierungen veränderter Baustände herangezogen werden kann. Damit können die zeit- und kostenintensiven experimentellen Nachweise auf ein Minimum reduziert werden. Ein gänzlicher Verzicht auf den experimentellen Nachweis kann jedoch nicht erfolgen, da bei sicherheitsrelevanten Einrichtungen stets die Unwägbarkeiten in Modellierung und Berechnung zuverlässig ausgeschlossen werden müssen.

Bild 12. Vergleich der maximalen Dehnungen aus Versuch und FE-Rechnung

Figure 12. Comparison of the max. strain out of test and FE-Analysis

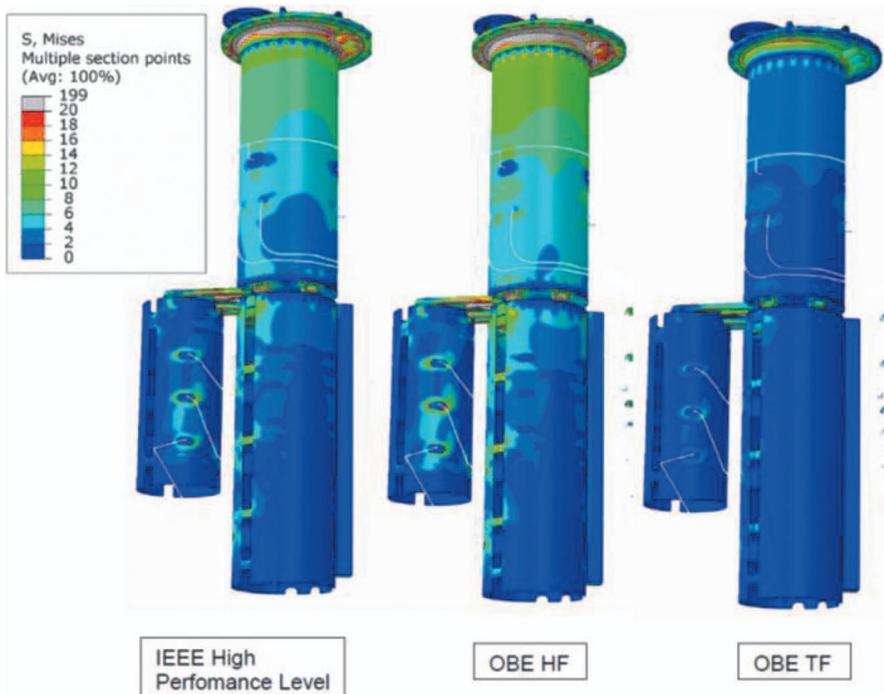
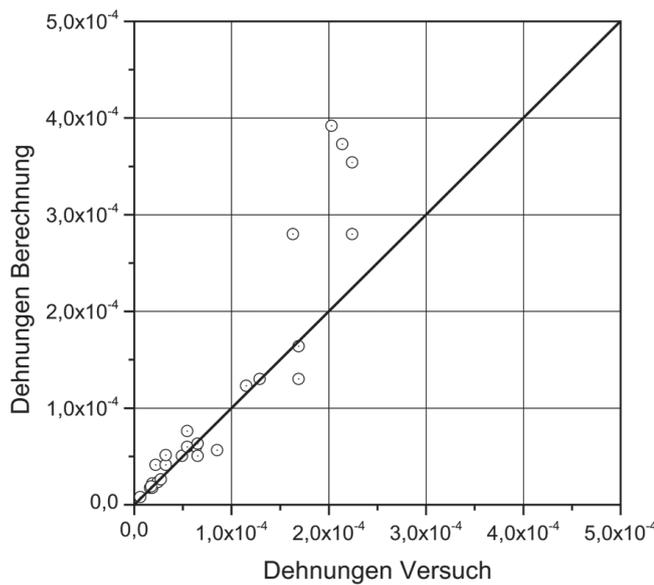


Bild 13. Max. Vergleichsspannungen (v. Mises) bei verschiedenen Belastungsspektren

Figure 13. Max. Stresses (v. Mises) in different load spectra

Literaturhinweise

- 1 IEC 68-3-3, German edition EN 60068, Part 3-3: Environmental testing, Seismic test methods for equipments, Guidance
- 2 IEC 68-2-6, German edition EN 60068, Part 2-6: Environmental testing, Test Fc and guidance: Vibration sinusoidal
- 3 IEC 68-2-59, German edition EN 60068, Part 2-59: Environmental testing, Test Fe and guidance: Vibration Sine-beat method
- 4 IEC 68-2-57, German edition EN 60068, Part 2-57: Environmental testing, Test Ff and guidance: Vibration Time-history method
- 5 IEEE 344: Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment
- 6 IEEE 693: Recommended Practice for Seismic Design of Substations
- 7 IEC 60980: Recommended practices for seismic qualification of electrical equipment of the safety system for nuclear generating stations
- 8 UBC: Uniform Building Code, Chapter 16, Division IV
- 9 IBC: International Building Code
- 10 Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
- 11 RCC-E Section B: Seismic qualification and approval
- 12 Transelec ETG-A.0.20: Consideraciones Antisismicas
- 13 IEC 1166: Guide for seismic qualification of high-voltage alternating circuit-breakers
- 14 KTA 2201.4: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen

- 15 JIS S 1018: Japanese Industrial Standard, Test Methods of Vibration and Earthquake
- 16 B. Brettner, S. Rödling, I. Becker, A. Brunn: Experimentelle und rechnerische Qualifikation der Vibrationsfestigkeit von elektrotechnischen Großbaugruppen im Lastfall Erdbeben, DVM-Bericht 138 (2011), 277-291
- 17 M. Decker, S. Rödling: FatIRAN - Optimized Generation of Spectra for Random Vibration Testing, Materials Testing 51 (2009), No. 7-8, pp. 444-455

Die Autoren dieses Beitrages

Dr.-Ing. Steffen Rödling, geboren 1973, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München und promovierte 2003 am Institut für Materialwissenschaften der Universität der Bundeswehr München, in Neubiberg. Im Juli 2005 wechselte er als Projektleiter für Beanspruchungsanalysen und Betriebsfestigkeitsuntersuchungen in den Bereich Tests und Analysen der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH in Ottobrunn. Seit 2007 ist er als Leiter der Abteilung für Betriebsfestigkeit, Bauteilprüfung, Prüfstände und als stellvertretender Leiter des akkreditierten Betriebsfestigkeitslabors der IABG in Ottobrunn verantwortlich für die Entwicklung von Prüfkonzepten, die Durchführung von Bauteilproben und den Betrieb von Großprüfständen.

Dipl.-Ing. (BA) Bernd Brettner, geboren 1977, studierte allgemeinen Maschinenbau, Fachrichtung Fertigungstechnik, an der Berufsakademie in Mannheim. Seit 2001 war er bei INA Schaeffler in Herzogenaurach im Bereich Versuch Automotive tätig und änderte 2004 mit dem internen

Wechsel in den Bereich Prüffeldbetrieb Betriebsfestigkeit seinen Verantwortungsbereich. 2007 wechselte er als Projektleiter für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen in den Bereich Tests und

Analysen der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH in Ottobrunn und ist dort bis heute in der Abteilung für Betriebsfestigkeit, Bauteilprüfung und Prüfstände tätig.

Abstract

Experimental and Computational Qualification of Vibration Strength of Electro Technical Components in the Load Case Earthquake. Equipment for generating and transporting of energy are built in every region on earth. Even in such where earthquakes cannot be excluded or even must be expected. To guarantee the safety of the equipment it's necessary to qualify the stability, structural integrity and the functionality of the equipment in case of earthquake load cases. The here given article describes the experimental verification of the earthquake qualification of an on-load tap changer for transformers. IABG mbH, Ottobrunn, used computational methods to accompany and supplement the experimental qualification. That way, a computational model was created aligned with static and dynamic tests to qualify modified versions of the test samples in future. By updating the calculation model the verified models and methods were optimized.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110355 on our website at www.materialstesting.de