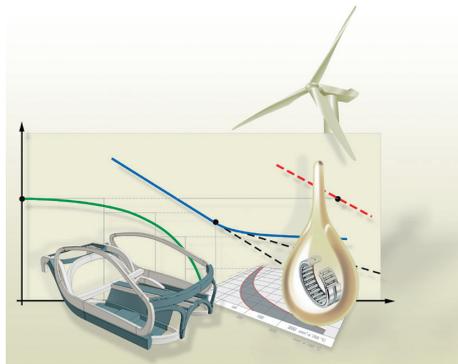


40. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit als eine Schlüsselfunktion für die Mobilität der Zukunft





DEUTSCHER VERBAND FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG e.V.

Gutshaus, Schloßstraße 48, 12165 Berlin

Tel.: +49 (0)30 811 30 66 · Fax: +49 (0)30 811 93 59

office@dvm-berlin.de - www.dvm-berlin.de

DVM-Bericht 140

Die Betriebsfestigkeit als eine Schlüsselfunktion für die Mobilität der Zukunft

40. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit

09. + 10. Oktober 2013

Herzogenaurach

Obmann des Arbeitskreises:

Dr.-Ing. M. Brune

BMW Group

München

KOMBINIERTE RECHNERISCHE UND EXPERIMENTELLE QUALIFIKATION DER VIBRATIONSFESTIGKEIT VON ELEKTROTECHNISCHEN GROSSBAUGRUPPEN AUS FASERVERBUNDWERKSTOFFEN

B. Brettner*, S. Kinscherf*, S. Rödling*

*) IABG mbH, Einsteinstraße 20, 85521 Ottobrunn

Zusammenfassung:

Die Aufrechterhaltung der Energieversorgung gerade nach einem Erdbebenfall ist lebenswichtig für die betroffene Region und die darin lebenden Menschen. Die Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff in elektrischen Großbaugruppen bietet, neben der elektrischen Isolationsfähigkeit, auch den Vorteil hoher Festigkeit bei geringem Gewicht. Dadurch gelingt es, die Eigenfrequenzen der Baugruppen relativ hoch und damit günstig im Hinblick auf die seismischen Anregungsspektren abzustimmen. Dieser Vortrag beschäftigt sich mit der kombinierten rechnerischen und experimentellen Qualifikation der Großbaugruppe „Laststufenschalter“. Nach einem ausführlichen FE-Modellabgleich erfolgte die Qualifikation eines Derivats auf rein rechnerischer Basis.

Stichwörter: Vibrationsfestigkeit, FE-Berechnung, Glasfaserverstärkter Kunststoff

COMBINED QUALIFICATION OF THE VIBRATIONAL STRENGTH OF ELECTROTECHNICAL COMPONENTS FROM FIBER REINFORCED PLASTICS ON BASIS OF CALCULATION AND EXPERIMENTS

Abstract:

Maintaining the power supply especially after an earthquake is vitally important for the impacted region and the people living there. The use of glass fiber reinforced plastics offers, besides its electrical insulation, the advantage of great strength at moderate weight. This enables to adjust the eigenfrequency at a relative high level and therefore positively with respect to the excitation spectra. This article describes the combined computational and experimental qualification of the main assembly “On-Load Tap-Changer”. Having performed a detailed adjustment of the dynamic FE-model properties based on test results allowed a standalone computational qualification of a derivate of the Tap-Changer.

Keywords: vibrational strength, FE-Analysis, glass fiber reinforced plastics

Einleitung

Energetikkomponenten, wie sie in Kraftwerken und Umspannwerken weltweit zum Einsatz kommen, sind für die Energieversorgung ganzer Regionen unerlässlich. Ein erdbebenbedingter Ausfall eines Hochspannungsisolators, einer Stromdurchführung oder eines Stufenschalters hätte einen Zusammenbruch der Infrastruktur zur Folge. Weltweit werden daher große Anstrengungen unternommen Erdbebenverläufe zu erfassen, zu klassieren und schlussendlich Auslegungsprüfungen daraus abzuleiten. Daraus sind einschlägige Normenwerke entstanden, nach denen heutige Erdenbenqualifikationen auf dafür vorgesehenen Vibrationstischen durchgeführt werden. Ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung der Komponenten ist die Funktionssicherheit während und nach einem Erdbeben. Daher sind insbesondere die niedrigen Eigenfrequenzen der Gesamtstruktur von besonderer Bedeutung, die auf die zu erwartenden Anforderungsspektren abgestimmt sein müssen. Da geringes Gewicht und hohe Steifigkeit hohe Eigenfrequenzen ermöglichen, greift man für die tragenden Gehäusestrukturen bei Stufenschaltern und anderen Komponenten unter anderem im Zuge des Leichtbaus auf glasfaserverstärkte Kunststoffe zurück.

Dieser Vortrag beschreibt die eng vernetzte Zusammenarbeit von Versuch und Berechnung bei der Erstellung eines kombinierten rechnerischen und experimentellen Ansatzes, der die aufwandsoptimierte Qualifikation einer ganzen Stufenschalterbaureihe einschließlich der Derivate erlaubt.

Stellvertretend für eine ganze Modellpalette, bestehend aus einem Baukastensystem, wurde ein Prüflingstyp mit den für die zu erwartende Belastung kritischsten Abmessungen ausgewählt. Mit diesem Prüfling wurden quasistatische und seismische Tests durchgeführt. Die dabei gewonnenen Informationen zu Materialeigenschaften, dynamischem Verhalten, Dämpfungs- und Steifigkeitskennwerten wurden für einen hochpräzisen FE-Modellabgleich herangezogen und dienen in Zukunft zur Unterstützung einer rein rechnerischen Festigkeitsbewertung von Derivaten.

In einem Folgeprojekt wurde ein weiterer aus dieser Modellpalette stammender Stufenschalter rein rechnerisch analysiert. Es werden Ausschnitte aus dem komplexen FE-Modell und Beispiele für Bewertungsergebnisse gezeigt. Weiterhin wird ein kurzer Überblick über die FE-Analysemethoden gegeben.

Der Prüfling - Laststufenschalter VACUTAP VR1300

Laststufenschalter passen das Transformationsverhältnis eines Transformators an die Leistungsabnahme im versorgten Netzgebiet an.

Dazu werden Regelwindungen des Transformators angezapft und jeweils eine dieser Regelwindungen mit den Zu- oder Ableitungen des Trafos verbunden. Der Stufenschalter erlaubt das unterbrechungsfreie Umschalten auf die jeweils benötigte Stufe des Trafos. Abbildung 1 zeigt einen exemplarischen Transformator mit eingebautem Laststufenschalter. Der Stufenschalter (im Bild gelblich dargestellt) wird von oben in den Transformator gehängt und am Kopfflansch verschraubt.

Die Laststufenschalter der Baureihen Vacutap des Herstellers Maschinenfabrik Reinhausen GmbH aus Regensburg bestehen aus einem Lastumschalter und einem

Wähler. Beide Baugruppen gibt es in mehreren Varianten (Aus Rotafil-Kunststoffrohr aus gewickeltem Glasfaserlaminat oder aus Hartpapierstäben, jeweils in einphasigen bis dreiphasigen Ausführungen). Durch die räumliche Erstreckung und Massenverteilung sowie die Einbausituation können durch Vibrationsbelastungen örtlich hohe Beanspruchungen entstehen, die Funktion und Haltbarkeit beeinträchtigen können. Dies muss durch geeignete Nachweisführung ausgeschlossen werden.

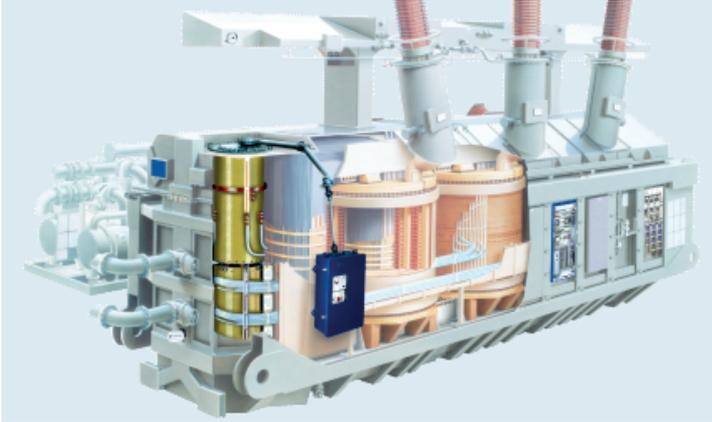


Abbildung 1: Transformator mit eingebautem Laststufenschalter / Power transformer with built-in on-load tap changer (Quelle: Maschinenfabrik Reinhausen)

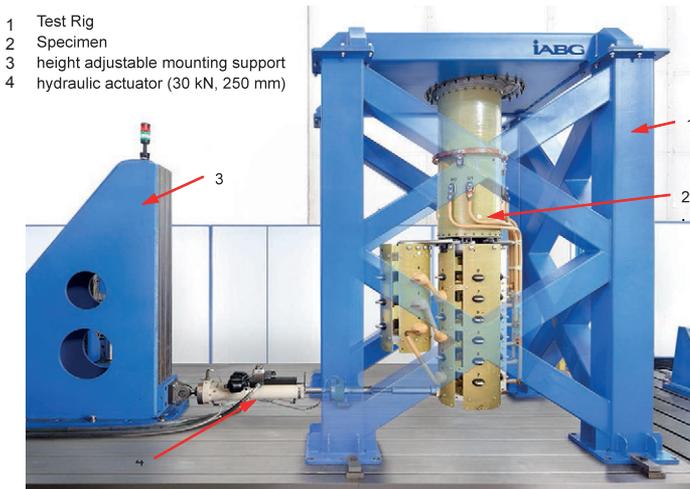


Abbildung 2: Prüfrahmen mit Prüfling im Static Load Test / Test frame with specimen in static load test

Testplan und Vorgehensweise

Die generelle Vorgehensweise wurde vorab festgelegt mit dem Ziel, möglichst viele Schritte parallel bearbeiten zu können. Tabelle 1 zeigt die geplanten und durchgeführten Arbeitsschritte.

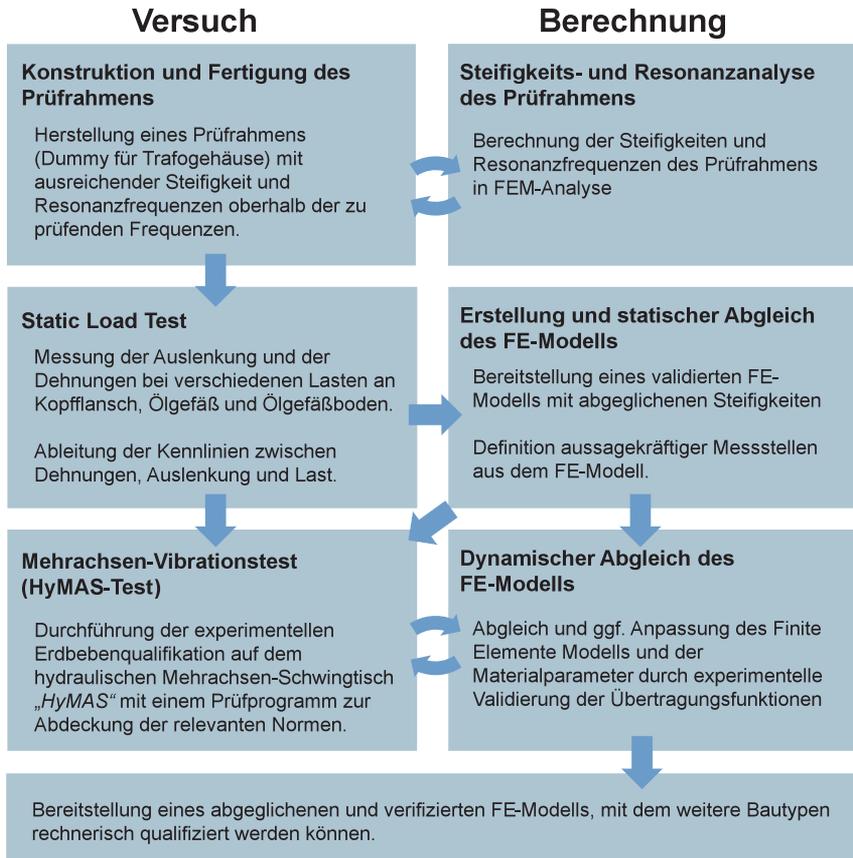


Tabelle 1: Vorgehensweise zur Qualifikation und Modelloptimierung der Stufenschalter - Baureihe VR1300 / Approach for the qualification and model update of an on-load tap changer – type VR1300

Die quasistatische Ermittlung von Kraft-Weg- und Kraft-Dehnungs-Kurven – Der „Static Load Test“

Im statischen Test wurden anhand von vier Lastfällen Kraft-Weg und Kraft-Dehnungs-Kurven aufgenommen. Die Lastfälle umfassten auf Höhe des Bodens des Lastumschalter-Ölgefäßes und auf Höhe des Wählerbodens jeweils eine

Biegebelastung in X- und Y Richtung. Für jeden Belastungsfall wurde die Auslenkung in drei Ebenen, sowie zusätzlich der Kolbenweg des Belastungszylinders und die Ausweichbewegung des Prüfrahmens gemessen.

Die maximalen Auslenkungen jedes Lastfalls sind in Abbildung 3 dargestellt. Diese Auslenkungswerte lassen sich sehr einfach mit dem parallel gerechneten FE-Modell vergleichen und erlauben eine erste Validierung und Anpassung.

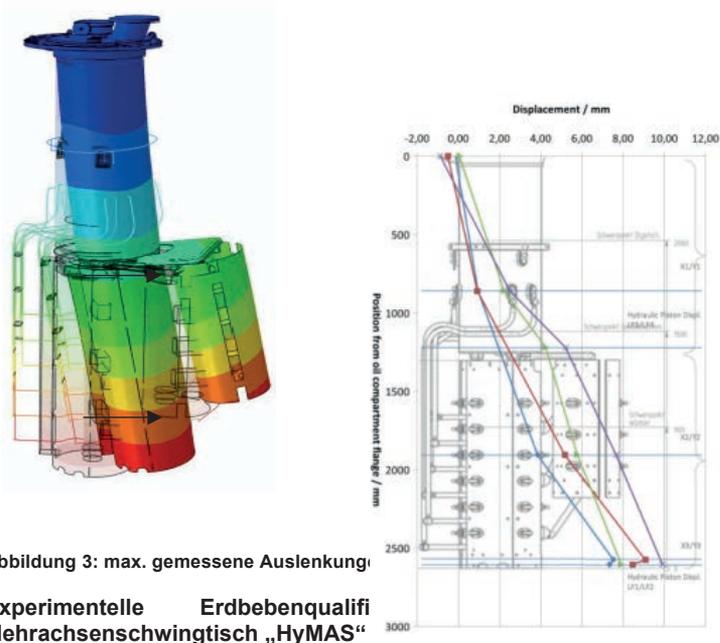


Abbildung 3: max. gemessene Auslenkung

Experimentelle Erdbebenqualifikation des Mehrachsenschwingtisch „HyMAS“

hydraulischen

Zur optimalen Auswahl von Messpunkten, die bei den dynamischen Versuchen appliziert und mitgemessen werden, werden erste dynamische Berechnungen mit dem statisch kalibrierten FE-Modell durchgeführt. Auf dieser Basis werden 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 wird der Prüfling mit der definierten Sensorik ausgerüstet und auf dem Mehrachsenschwingtisch der IABG (HyMAS) aufgebaut. Abbildung 4 zeigt den hydraulischen Mehrachsenschwingtisch „HyMAS“ mit Prüfrahmern und eingebautem Prüfling.



Abbildung 4: Hydraulischer Mehrachsenschwingtisch „HyMAS“ / hydraulic multi axis shake table „HyMAS“

Der verwendete Prüfstand ist in der Lage, bis zu 10 t schwere Prüflinge mit Frequenzen bis maximal 80 Hz und Beschleunigungen von maximal 30 m/s^2 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 sind Prüfsignale aus allen Bereichen der Vibrationsprüfung darstellbar.

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, sogenannter „Sinus Beats“, verwendet. Diese stochastischen und transienten Beschleunigungsverläufe werden anhand von Anforderungsspektren nach den beispielhaft 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 Erdbebensimulation 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/s^2 ausgeführt. Abbildung 5 oben zeigt beispielhaft 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 zu erkennen. Das Verhältnis von Antwort- zu Anregungsamplitude ist dabei charakteristisch für die Dämpfung des Schwingensystems. Änderungen in diesen Überhöhungsfunktionen zeigen zudem Veränderungen im dynamischen Verhalten des Prüflings auf und werden als Hinweis für Beschädigungen des Prüflings verwendet.

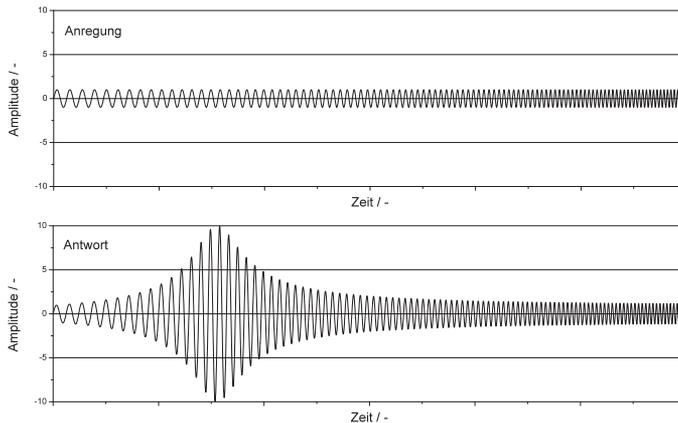


Abbildung 5: Gleitsinusanregung und Antwortsignal mit einer Resonanzüberhöhung / Sinus Sweep and response signal with a resonance rise

Qualifikationstests im Lastfall Erdbeben

Nach der Identifikation des Übertragungsverhaltens des Prüfrahmens und des Prüflings folgt die experimentelle Qualifikation des Stufenschalters gemäß der relevanten Normen [1-4]. In dem hier dargestellten Fall werden 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 (Operating Basis Earthquake – Betriebserdbeben), unter dem Haltbarkeit und Funktion nachzuweisen sind, sowie nach einem um Faktor 2 stärkeren SSE Spektrum (Safe Shutdown Earthquake), 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. Abbildung 6 zeigt beispielhaft 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 beispielhaft ein aus den Spektren erstelltes Echtzeitsignal mit dem entsprechenden ZPA-Wert [1] dargestellt.

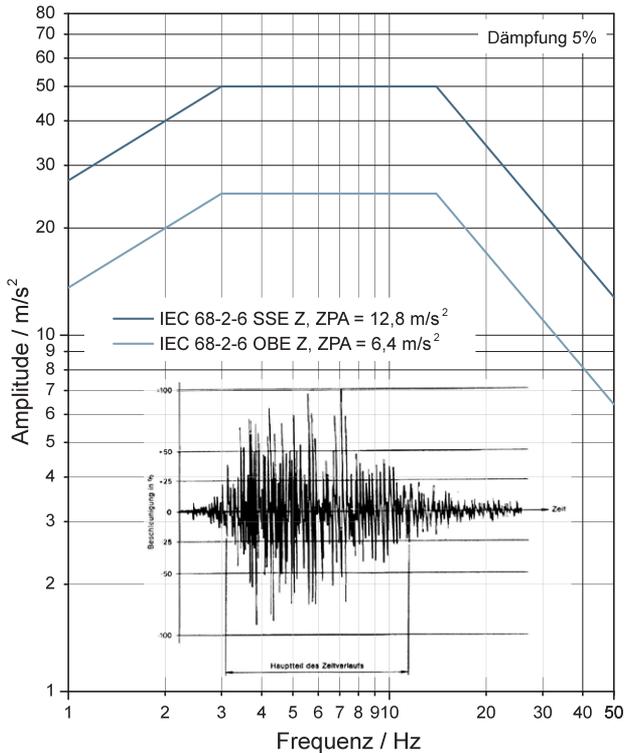
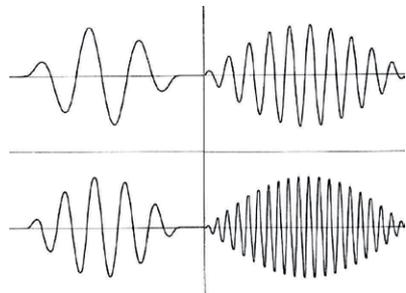


Abbildung 6: Anforderungsspektren und daraus erstelltes Echtzeitsignal / Required response spectra and related time history signal

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. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Anregungssignale für Sinus Impulse mit 3, 5, 10 und 20 Lastwechseln und einer definierten Impulshöhe.



Das Anregungsniveau wird mit 8 m/s^2 in den horizontalen Richtungen und $6,4 \text{ m/s}^2$ in vertikaler Richtung gemäß des ZPA-Wertes der vorherigen Erdbebenbelastung

festgelegt. Die Prüffrequenz der Sinus Impulse ergibt sich aus den in den Sinus Sweeps ermittelten Resonanzfrequenzen. 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 FE-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 wird das FE-Rechenmodell in Bezug auf Massenverteilung, Steifigkeiten und Dämpfungen angepasst. Mit dem auf diese Weise optimierten Rechenmodell werden die in Tabelle 1 dargestellten Qualifikationstests nachgerechnet. Abbildung 8 zeigt im oberen Bild die Übertragungsfunktionen des Stufenschalters zwischen der Tischanregung und den 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.

Mit dem FE-Modell des Stufenschalters werden Frequenzantwortanalysen durchgeführt, um die zum Sinussweep-Test passenden Übertragungsfunktionen zu ermitteln. Die Test- und Berechnungsergebnisse zeigen nach Anpassung der Steifigkeits- und Dämpfungswerte der verschiedenen Materialien eine sehr gute Übereinstimmung. Damit ist die FE- Modellierung in Bezug auf die angenommene Massenverteilung, die ermittelten Steifigkeiten und die berücksichtigten Dämpfungswerte für nachfolgende Antwortanalysen verifiziert.

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

Erdbeben-FE-Analysen werden mittels dem "Response Spectrum" Verfahren mit dem FE-Solver Abaqus [13] durchgeführt. Dieses Verfahren arbeitet im Frequenzbereich und betrachtet jeden Mode einzeln. Die modalen Zustände werden dabei so skaliert, dass sich die geforderte Antwortbeschleunigung einstellt, welche auch von der modalen Dämpfung des Modells abhängt. Analysen für unterschiedliche Dämpfungsgrade können durch in Abhängigkeit der modalen Dämpfung interpolierte Kurven berücksichtigt werden. Die sich dabei ergebenden modalen Beanspruchungen in den drei Raumrichtungen werden nach dem SRSS-Verfahren (square root of the sum of the squares) superpositioniert.

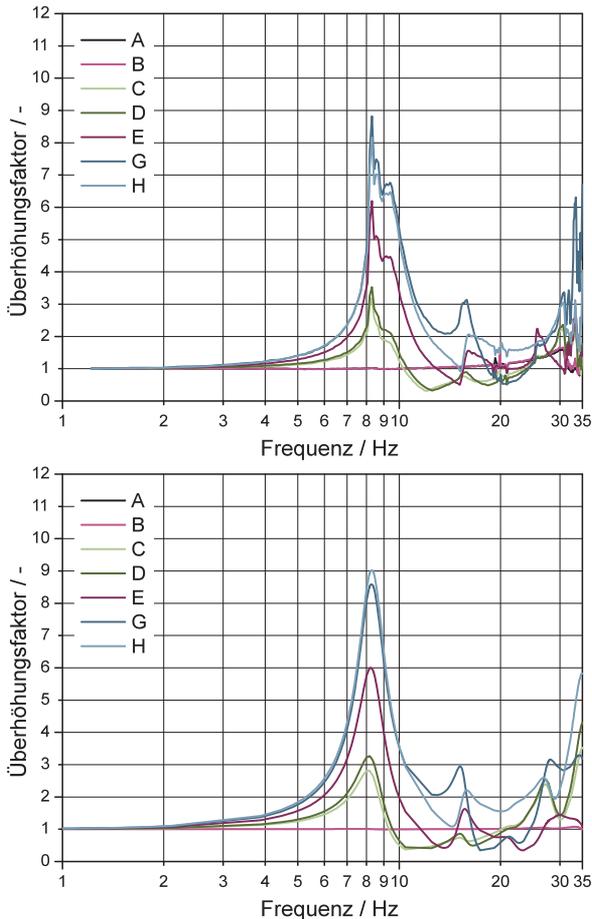
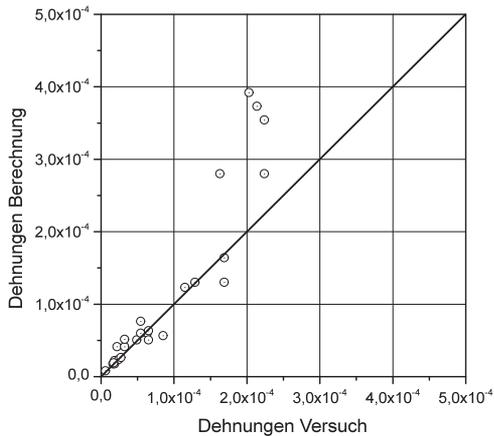


Abbildung 8: Vergleich der Amplitudenüberhöhungsfunktion aus Sinus Sweep Anregung in X-Richtung aus Versuch und Berechnung / Comparison of test and calculation transfer function of sinus sweep in X-direction

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der im Versuch gemessenen und in der FE Berechnung erhaltenen Maximaldehnungen. Beispielhaft dargestellt 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 Überschätzung und führen so in der Berechnung zu einer konservativen Abschätzung der auftretenden Beanspruchungen.



Die begleitende FE-Analyse ermöglicht zusätzlich einen detaillierten Blick in messtechnisch nur schwer zu erfassende Prüflingsbereiche und erlaubt eine Aussage zu der quantitativen Auslastung der Struktur, die über die „digitale“ Testaussage hinausgeht. Der Anwender bekommt einen Überblick über die Beanspruchungssituation der Gesamtkonstruktion und kann ggf. vorliegende konstruktive Schwachpunkte aus lokalen Spannungskonzentrationen und dem Verformungsbild erkennen.

Abbildung 9: Vergleich der maximalen Dehnungen aus Versuch und FE-Rechnung / Comparison of the max. strain out of test and FE-Analysis

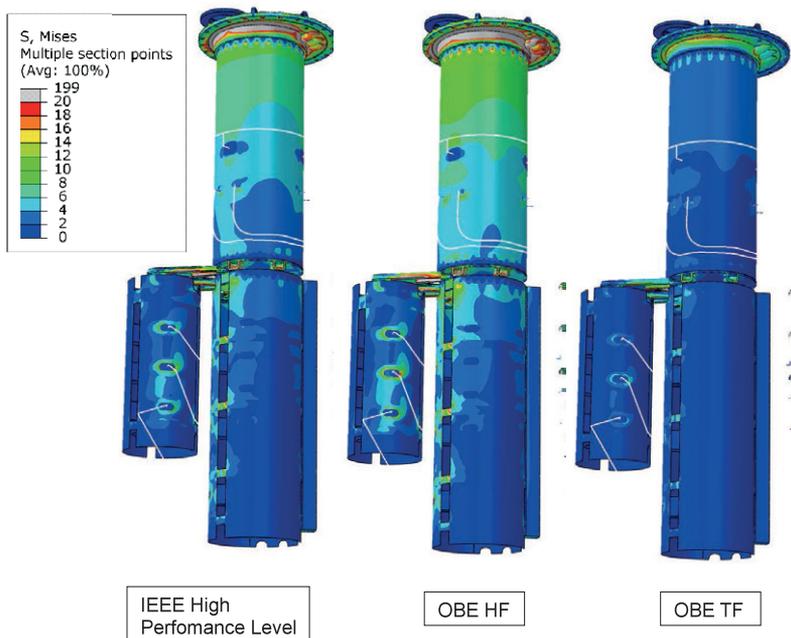


Abbildung 10: Max. Vergleichsspannungen (v. Mises) bei verschiedenen Belastungsspektren / max. Stresses (v. Mises) in different load spectra

Ein Vergleich der unterschiedlichen Antwortspektren ist in Abbildung 10 dargestellt.

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.

Rechnerische Qualifikation der Baureihe VM

Der Laststufenschalter der Baureihe VM soll nun rein rechnerisch bewertet werden. Im Unterschied zum Laststufenschalter VR ist der Stufenschalter der VM Baureihe ein sog. Stabwähler. D.h. die Struktur der Wählerbaugruppe ist aus Hartpapierstäben statt aus Rotafil Schalenelementen. Die Lastumschalterbaugruppe im Ölgefäß ist (nahezu) baugleich.

Die rechnerische Vorgehensweise ist weitgehend dieselbe wie für den Stufenschalter der Baureihe VR:

- Erstellung des FE-Modells mit modaler Dämpfung aus Vorgängerprojekt
- Errechnung der Eigenformen mittels Modalanalyse
- FE-Antwortspektren-Analyse (Response Spectrum Analysis)
- Vergleich mit gemessenen und errechneten Beanspruchungen des VR Stufenschalters sowie allgemeine Festigkeitsbewertung

Modellbildung

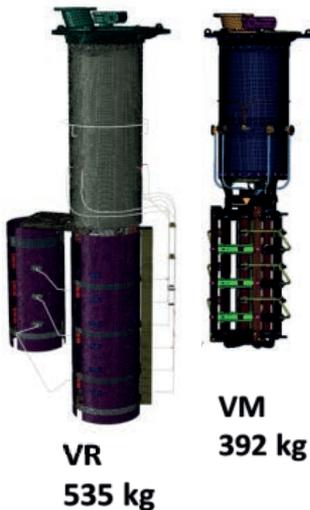


Abbildung 11: Die Lastumschalterbaureihen VR und VM / different On-Load Tap-Changers VR and VM

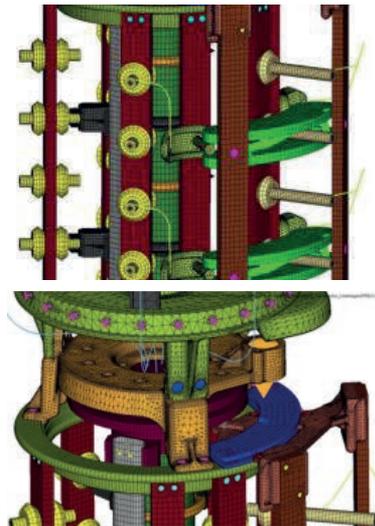


Abbildung 12: Ausschnitt aus FE-Vernetzung des Wählergetriebes / Detailed view on the FE-Net of the Tap-Changer

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die untersuchten Baureihen VR (links) aus dem vorangegangenen Projekt (experimentell und rechnerisch) und VM (rechts) mit rein rechnerischer Qualifikation.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt einen Ausschnitt der detaillierten Modellierung des Stufenschalters der Baureihe VM. Insbesondere die hoch belasteten Bauteile aus Gussmaterialien werden besonders fein vernetzt. Hoch belastete Schraubverbindungen werden mit Koppel-Balkenelementen ausgestattet, um Reaktionskräfte auswerten zu können.

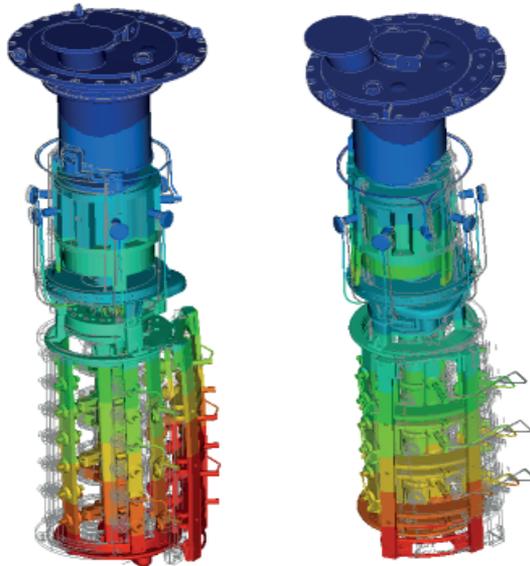


Abbildung 13: Eigenmode (12,7 Hz) und 3. Eigenmode (17 Hz) / Eigenmode (12,7 Hz) and 3. Eigenmode (17 Hz)

Modalanalyse

Mittels der Modalanalyse wird die modale Basis für die Folgeanalysen aufgestellt. Die Kenntnis der Eigenfrequenzen, Eigenformen und effektiven Massen hilft, das Verhalten des Modells zu verstehen. Bereits die Lage der ersten Eigenfrequenzen gegenüber dem Antwortspektrum und die Visualisierung der Eigenformen helfen bei der Auffindung konstruktiver Schwächen.

FE-Antwortspektren-Analyse

Es wurden drei verschiedene Antwortspektren gerechnet, welche den im Versuch angewandten TRS-Antwortspektren entsprechen. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sieht man die unterschiedlichen Belastungsniveaus der drei Antwortspektren. Alle auftretenden Beanspruchungen sind grundsätzlich geringer als bei Laststufenschaltern der Baureihe VR, was vor allem auf die

geringere Baulänge und eine günstigere Schwerpunktlage des Systems zurückzuführen ist.

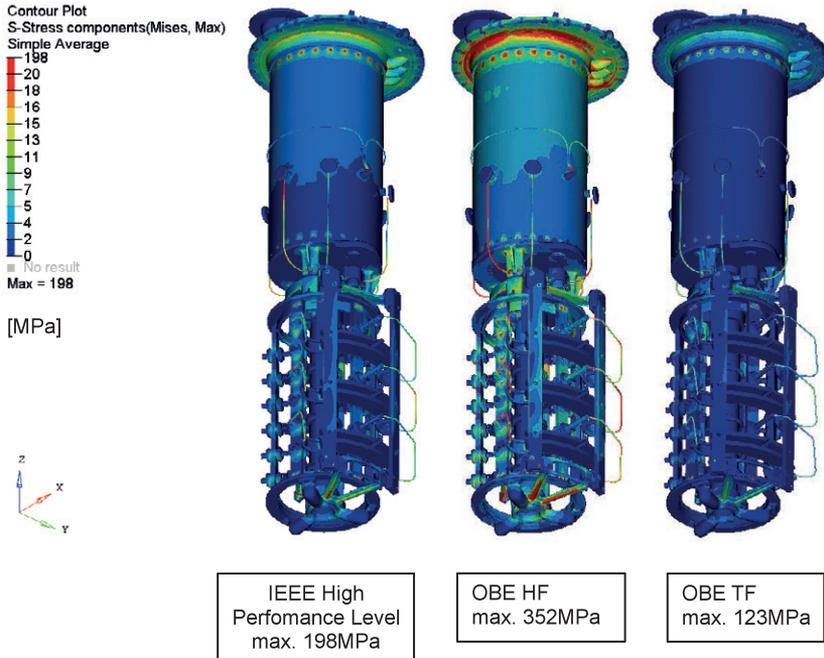


Abbildung 14: Unterschiedliche Beanspruchungsniveaus für die drei Antwortspektren / different stress levels for the three response spectra

Bewertung und Einzelnachweise

Die Festigkeitsbewertung ist unterteilt in „vergleichende“ und „absolute“ Verfahren. Zum einen können gemessene Beanspruchungen aus den Versuchen mit dem Stufenschalter VR für einzelne Materialien zum Vergleich herangezogen werden. Ebenfalls können errechnete Reaktionskräfte aus den FE-Modellen beider Stufenschalter untereinander verglichen werden. Ansonsten werden „absolute“ Verfahren wie z.B. eine Festigkeitsbewertung nach FKM-Richtlinie durchgeführt.

In Tabelle 2 sind beispielhaft Möglichkeiten zur absoluten Festigkeitsbewertung aufgeführt.

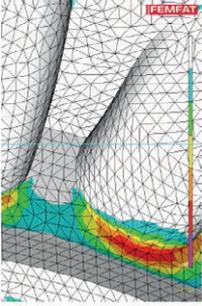
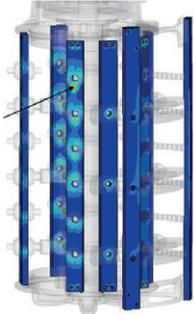
Metallteile (Sandguss, Kokillenguss oder Stahlbauteile)	Wählerstäbe und Rotafilschalenelemente	Schraubverbindungen
Nachweis gemäß FKM-Richtlinie Oder: Nachweis der statischen Festigkeit mit FEMFAT BREAK	Nachweis anhand von bauteilnahen Proben oder Bauteilausschnitten in statistisch ausreichender Anzahl	Errechnung der Kräfte in der Schraubverbindung. Nachweis mittels VDI-Richtlinie 2230-2003 gegen Vorspann-kraftverlust, Quergleiten der Fügeflächen und Lösen bzw. Klaffen der Schraubverbindung
		 Section Force SF1-3

Tabelle 2: Detailbewertungen der identifizierten Hot-Spots

Zusammenfassung

Der beschriebene experimentelle Nachweis der Vibrationsfestigkeit im Lastfall Erdbeben wurde durch rechnerische Methoden begleitet und ergänzt. Dazu wurde im experimentellen Nachweis ein umfangreiches Prüfprogramm abgearbeitet. Die Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften wurden mit Gleitsinusversuchen ermittelt. Die Anforderungen der vielen regionalen, nationalen und internationalen Regelwerke an die Vibrationsfestigkeit wurden mit dreiaxialen Echtzeitverläufen geprüft, die die von den Normen geforderten Anforderungsspektren einschließen.

Das begleitend erstellte Finite-Elemente-Modell unterstützte die Versuchsdurchführung und wurde gleichzeitig laufend anhand der erzielten Ergebnisse angepasst. Durch Nachrechnung der seismischen Qualifikationsversuche konnte das Rechenmodell am Ende verifiziert werden.

Mit dem gegen Experimente abgeglichenen, bewährten Modell wurde das Derivat ebenfalls gegen Erdbebenbelastungen qualifiziert. Dabei wurden die Spannungen gegen die aus dem vorangegangenen Experiment bekannten Materialgrenzen verglichen.

Beim Einsatz von Materialien, die im abgeglichenen Modell nicht verwendet wurden, muss eine absolute Festigkeitsbewertung durchgeführt werden. Dabei kann auf Werkstofftabellen zurückgegriffen werden.

Ausblick

Durch die große Anzahl an Modellvarianten bei relativ kleiner Stückzahl je Variante bietet die rechnerische Erdbebenqualifikation das Potential mit vertretbarem Einsatz aufwändige experimentelle Seismik-Simulationen zu ersetzen. Der Abgleich einzelner ausgewählter ggf. auch kritischer Baureihen auf dem Seismik-Schwingtisch sichert dabei die Basis einer verlässlicher FE-Analysen ab.

Die begleitende Materialcharakterisierung anhand von bauteilnahen Proben erarbeitet im Laufe der Zeit eine Datenbasis um absolute Festigkeitsbewertungen anhand von Betriebsfestigkeitsmethoden wie der FKM-Richtlinie oder der rechnerischen Lebensdauerbewertung anhand der verschiedenen Konzepte vornehmen zu können.

Literaturhinweise

- [1] IEC 68-3-3, German edition EN 60068, part 3-3 Environmental testing; Seismic test methods for equipment; 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 693, Recommended Practice for Seismic Design of Substations.
- [6] JIS S 1018, Japanese Industrial Standard, Test Methods of Vibration and Earthquake.
- [7] IABG TA34-PB-010/11-01, Earthquake Qualification of On-Load Tap-Changer
- [8] IABG TA34-PB-167/10-01, Seismic Qualification report
- [9] IABG TA33-TM13/11, FE-Analysis for the Seismic Qualification of an On-Load Tap-Changer
- [10] „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, 5. Erweiterte Ausgabe 2003, VDMA Verlag
- [11] „Systematic calculation of high duty bolted joints – joints with one cylindrical bolt“, VDI 2230-2003
- [12] Schraubenberechnungsprogramm HEXAGON/SR1 13.6, HEXAGON Industrie-software GmbH – www.hexagon.de
- [13] Abaqus, the 3DS logo, SIMULIA, CATIA, and Unified FEA are trademarks or registered trademarks of Dassault Systèmes or its subsidiaries in the United States and/or other countries, Version 6.11-1
- [14] FEMFAT Software, Engineering Center Steyr GmbH & CO KG, Version 5.0