

Aktive Lagerung eines Schiffs-Dieselmotors

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hopt¹, Dr. sc. techn. Jürgen Salm²

¹ MTU Friedrichshafen GmbH, 88045 Friedrichshafen, Deutschland, Email: andreas.hopt@mtu-online.com

² MTU Friedrichshafen GmbH, 88045 Friedrichshafen, Deutschland, Email: juergen.salm@mtu-online.com

Einleitung

Um den steigenden Kundenanforderungen an Komfort gerecht zu werden und um akustische Grenzkurven in exklusiven Yacht- und Marineanwendungen sicher erfüllen zu können, sind bei der Entwicklung von Motor- und Antriebssystemen intensive Untersuchungen zur Reduktion der Luft- und Körperschallemissionen notwendig. Bei den Anforderungen an Körperschalleinleitung von Antriebsanlagen treten die heute üblichen passiven Systeme - unter Berücksichtigung der Aspekte Bauraum, Fundamentimpedanz, Gewicht - an die Grenze des Erreichbaren. Deshalb wurden neue hybride aktive Lagerelemente - bestehend aus einer passiven Elastomer- und einer leistungsfähigen aktiven Komponente - gemeinsam mit unserem Partner StopChoc für Dieselmotoren an Bord von militärischen und kommerziellen Schiffen entwickelt und im Versuch bei MTU verifiziert.

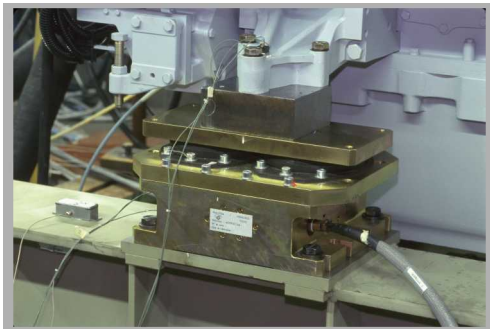


Abbildung 1: Aktives Lagerelement im Test

In diesem Beitrag sollen die Erprobungsergebnisse in der Anwendung der aktiven elastischen Motorlagerung eines Hochleistungsdiesel-Schiffmotors vorgestellt und die Leistungsfähigkeit demonstriert werden.

Das Körperschallspektrum eines Verbrennungsmotors wird im Wesentlichen durch die Pegelspitzen der Motorordnungen geprägt. Zur Reduktion dieser Körperschallanteile wird die neu entwickelte aktive Lagerungseinheit vorgestellt, die es erlaubt, verbleibende dominante einzelne Pegelspitzen um mehr als 30 dB zu reduzieren. Das aktive Lagerungssystem wurde auf einem MTU-Prüfstand unter realen Bedingungen untersucht und erprobt. Die Dämmung sehr guter konventioneller Gummielemente wurde dabei insbesondere in den dort noch auffälligen Motorordnungen deutlich übertroffen. Die entwickelte Regelung ermöglicht die gezielte Abstimmung des Lagerungssystems auf die dominierenden Motorordnungen auch vor Ort und die individuelle Anpassung an die vorhandene Einbausituation.

Aufbau - Wirkprinzip

Das neue aktive Lagerungssystem basiert auf einer Entwicklung des Lagerherstellers Paulstra/StopChoc in Kooperation mit dem Motorenhersteller MTU Friedrichshafen GmbH. Es stellt die Weiterentwicklung eines konventionellen passiven Lagerelements mit aktiven Komponenten zu einem Hybridlager dar. Passives und aktives Element befinden sich hierbei in paralleler Anordnung. An den Auflagerpunkten des Motors wird mittels Aktuatoren ein um 180° phasenverschobenes Signal eingespeist. Durch Überlagerung des ankommenden Signals mit dem phasenverschobenen Signal kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Amplitude. Informationen bzgl. der Beziehung zwischen Amplitude und Phase sind dabei von elementarer Bedeutung.



Abbildung 2: Prinzip aktiver Lärm-/Schwingungsbekämpfung.

Jedes der 4 Motorlagerelemente - in der hier untersuchten Version mit einer Nominallast von bis zu 2 to - ist mit 3 Aktuatoren und 3 Sensoren für die 3 Raumrichtungen (hoch, quer längs) bestückt. Zusätzlich wurden 8 externe Sensoren (optional) auf dem Prüfstandsfundament appliziert. In Verbindung mit der hierfür entwickelten Software steuert eine Regeleinheit (gewählter Algorithmus: Higher Harmonic Control, HHC) die insgesamt 12 Aktuatoren, um die Vibrationen auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Vibrationen wiederum werden von den insgesamt 20 Sensoren erfasst und an die Regeleinheit weitergeleitet. Die Software ermöglicht es, gezielt vorzugebende dominierende Motorordnungen zu bekämpfen. Zum Zeitpunkt der Messungen wurde mit 5 bzw. 8 Ordnungen operiert. Inzwischen steht ein Software-Update zur Verfügung, welches die Abstimmung auf 12 Ordnungen ermöglicht.

Erprobung

Auf dem MTU-Motorenprüfstand wurde ein Schiffs-Dieselmotor des Typs 12V 4000 M70 (Nennleistung 1740 kW @ 2000 1/min) mit dem neu entwickelten aktiven Element aufgebaut. Um die Leistungsfähigkeit und Praxisanwendbarkeit zu demonstrieren, wurde die Fundamentimpedanz variiert. Neben Messungen auf dem MTU-Referenz- bzw. Standardprüfstandsfundament mit steifem Lagerschienen aus Polymerbeton, wurde auch ein

relativ „weiches“ Stahlfundament, womit ein Schiffsfundament mit schlechter Impedanz simuliert werden sollte, untergebaut, um das Verhalten des aktiven Systems auf derartige Einflüsse und die geforderte System-Robustheit zu untersuchen.

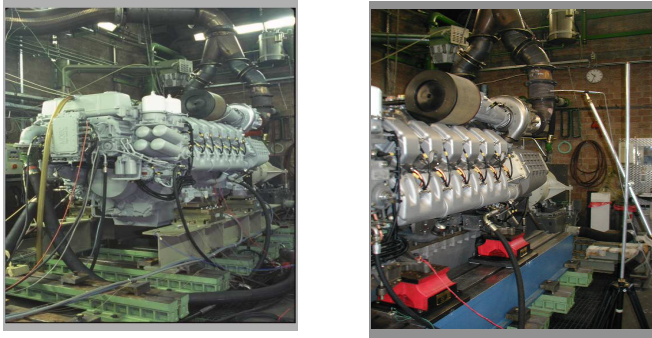


Abbildung 3: Prüfstands Aufbau 12V 4000 M70 mit „weichem“ Fundament (links) und „steifem“ Fundament (rechts)

Mittels Messungen am Motorträger (über Lagerung) und am Fundament (unter Lagerung) wurde die Durchgangsdämmung ermittelt. Zudem wurde auch an weiter entfernt liegenden Messpunkten das Körperschallsignal erfasst, um zu veranschaulichen, dass die Wirkung sich nicht nur lokal auf den Bereich des Lagerelements begrenzt, sondern auch an beliebigen Punkten an der Fundament- bzw. Schiffsstruktur Verbesserungen zeigen wird. Mittels dynamischer Hochläufe konnte die Reaktionszeit des Systems geprüft werden. Zur Beurteilung der akustischen Qualität wurden Vergleichsmessungen am selben Motor mit einem optimierten Elastomerlagerelement durchgeführt. Die Baugröße und das Lochbild des aktiven Elements wurden so ausgelegt, dass sie genau denjenigen des ursprünglich vorgesehenen - und im Markt eingeführten - passiven Elements entsprachen. Dies ermöglicht auf dem Prüfstand ein einfaches Austauschen und an Bord ein problemloses Nachrüsten.

Ergebnisse

Unterhalb des passiven Elements verblieben bei hohen Drehzahlen - insbesondere bei den typischen Motorordnungen - noch erkennbare Körperschallspitzen, wenn auch auf niederem Level, aber doch nicht ganz den hohen Ansprüchen genügend. Bereits mit dem ersten Setup der aktiven Lagerung - mit 5 geregelten Motorordnungen - konnte eine deutliche Pegelreduzierung am Fundament festgestellt werden.

Noch deutlicher fiel die Wirkung auf dem „weichen“ Stahlfundament und mit einer angepassten Software mit hier 8 zu minimierenden Ordnungen aus: Hierbei konnten einzelne Pegelspitzen in Hochnichtung um bis zu 30 dB reduziert werden (s. Abbildung 4).

Die Untersuchungen erfolgten außer in vertikaler Ausbreitungsrichtung auch in Quer- und Längsrichtung. Hierbei konnten ebenso signifikante Pegelreduzierungen nachgewiesen werden.

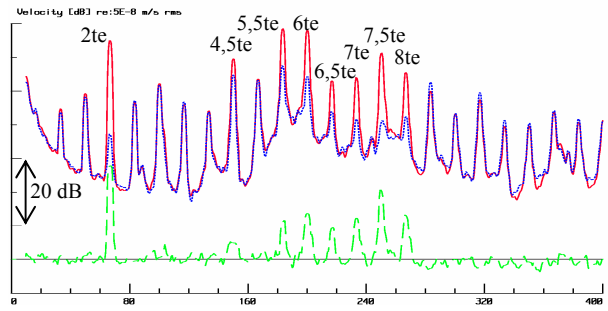


Abbildung 4: Schwingungsgeschwindigkeitspegel in dB auf „weichem“ Prüfstandsfundament mit aktiver Lagerung „aus“ (rot) und „an“ (blau) sowie Dämmungsverbesserung durch aktive Einheit (grün).

Auf dem Prüfstand wurde die Auswahl der zu bekämpfenden Motorordnungen an das Geräuschprofil des Motors angepasst, um so eine optimale Wirksamkeit zu erzielen. Dabei wurden anhand einer Vorabmessung die störenden Frequenzen ermittelt und direkt vor Ort die Software darauf abgestimmt. Dieses Verfahren ermöglicht es z.B. auf einem Schiff an kritischen Orten (z.B. Eigenerkabine) die störenden Frequenzen zu bestimmen und mittels Software-Tuning gezielt zu bekämpfen.

Der Einsatz dieser aktiven Lagerelemente birgt kein technisches Risiko im Betrieb. In die Regelungssoftware sind mehrstufige Selbstprüfungen und Überwachungen eingebracht, sodass auch bei Störungen die Regelung entsprechend reagiert und ein sicherer Betrieb gewährleistet wird. Selbst wenn die Elektronik-Einheit ausfallen sollte, wirkt aufgrund des gewählten Aufbaus der bewährte passive Teil als elastische Lagerung und es besteht keine Einschränkung im Schiffsbetrieb.

Für eine Luxusyacht war eine anspruchsvolle Körperschallgrenzkurve vorgegeben worden. Die Einhaltung war im Rahmen des Abnahmelaufes auf dem Prüfstand nachzuweisen. Mit dem neu entwickelten aktiven Lagerelement war im gesamten Frequenzbereich eine signifikante Unterschreitung der Grenzkurve möglich. Dadurch ergeben sich deutliche Geräuschvorteile an Bord.

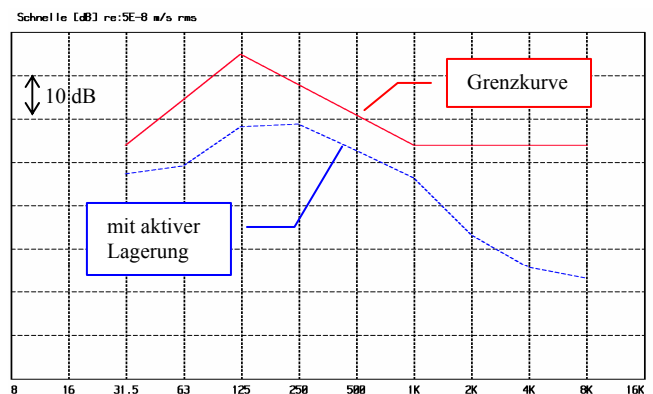


Abbildung 5: Schwingungsgeschwindigkeitspegel in dB (re: 5E-8 m/s) auf „steifem“ Prüfstandsfundament mit aktiver Lagerung (blau) im Vergleich zur Grenzkurve (rot).

Zur Zeit (März 2006) wird die aktive Lagerung in eine Luxusyacht eingebaut, die Inbetriebnahme und Abnahme erfolgt im Herbst 2006.