

Simulation von Bersttests schnelllaufender Rotoren mit der expliziten FE-Methode – ein Vergleich mit dem Versuch

Ziel eines Containment-Tests ist es zu demonstrieren, dass die Gehäusestruktur eines Turboladers ausreichend dimensioniert ist, um im Falle eines Nabenversagens keine Bruchstücke nach außen dringen zu lassen. Die bisher durchgeführten praktischen Verfahren sind allerdings sehr teuer und zeitaufwändig, zumal das zu gewinnende Wissen über die ablaufenden Hochgeschwindigkeitsverformungsprozesse eher begrenzt ist. Dies sind die Hauptgründe für die Durchführung der Containment-Tests mittels der im LS-DYNA Code implementierten expliziten FE-Methode. Die Ergebnisse der praktischen Validierung zeigten hierbei sehr gute Übereinstimmungen mit der Simulation sowohl globale und lokale Deformationen betreffend, als auch beim mechanischen Verhalten der Turboladerkomponenten. Die Resultate verdeutlichen außerdem, dass mit LS-DYNA auch andere Anwendungsfälle mit schnell drehenden Bauteilen realistisch abbildbar sind.

Beschreibung des untersuchten Turboladers

Der vorliegende Untersuchungsgegenstand ist ein Axialturbolader mit einer maximalen Leistungsabgabe von 5.100 kW, der u.a. bei Schiffsdieselmotoren Anwendung findet. Er setzt sich zusammen aus einem Radialverdichter und einer Axialturbine, einem Gaseinlassgehäuse und einem Diffusor auf der Turbinenseite, sowie verdichterseitig einem Nachleitapparat und einem Spiralgehäuse. Die Welle, auf der Turbinenläufer und Verdichterrad montiert sind, ist im Lagergehäuse gelagert. Die maximal zulässige Drehzahl beträgt 26.000 min^{-1} . Der Turbolader weist eine Gesamtmasse zwischen 1.050 und 1.350 kg auf, bei einer Länge von 1.300 – 1.900 mm, einer Höhe von 1.400 mm und einer Breite von 950 mm.

Modellierung

Wie in jeder Simulation hängt auch beim Containment-Test die Qualität der Simulationsergebnisse zu einem großen Teil direkt von der Qualität der getroffenen Randbedingungen und Grundannahmen ab. Es muss ebenso auf eine sinnvolle Abbildung der Struktur wie auch auf eine realitätsnahe Aufbringung von Randbedingungen und Ableitung von Werkstoffgesetzen geachtet werden. Bild 1 zeigt hierzu das Gesamtmodell des Turboladers. Es besteht sowohl aus Volumen-, als auch aus Schalen- und Balkenelementen. Schalen werden meist in Regionen eingesetzt, die eine nicht so hohe Bedeutung für lokale mechanische Effekte des Laufradversagens besitzen, Balken und Starrkörper werden als Verbindungselemente genutzt. Das gesamte Modell besteht aus ca. 630.000 Elementen.

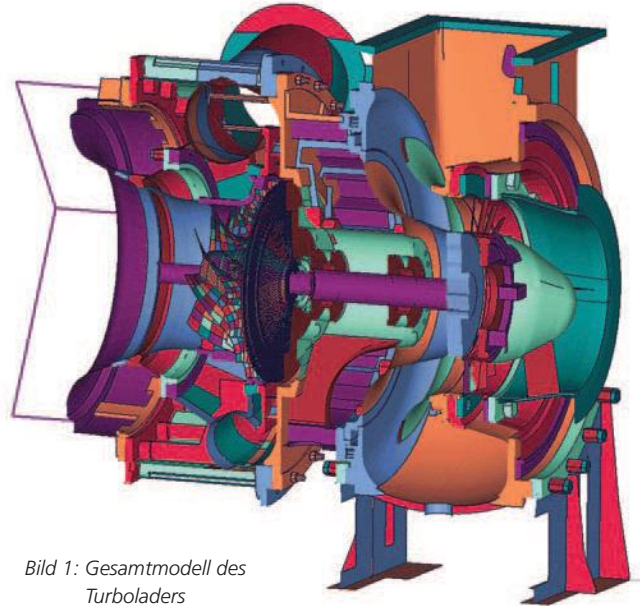


Bild 1: Gesamtmodell des Turboladers

Berechnung

In der Simulation werden verschiedene Arten von Nichtlinearitäten berücksichtigt. Geometrische Nichtlinearitäten wie Kontakte und große Deformationen der Struktur werden ebenso abgebildet wie Materialnichtlinearitäten, z.B. Plastizität und Dehnrateneffekte. Die Materialbeschreibung im nichtlinearen Bereich besteht überwiegend aus tabellarischen Verfestigungskurven („wahre“ Spannung über „wahrer“ Dehnung) für mehrere Dehnraten und verschiedene Bauteiltemperaturen. Diese Kurven müssen aus Testdaten für jedes verwendete Material abgeleitet werden.

Das Modell wurde mit der expliziten FE-Software LS-DYNA simuliert. Der gesamte Containment-Test, dessen relevanter Teil hier ca. 2,5 ms dauert, wurde simuliert in ca. 75.000 Zeitschritten von $0,035 \mu\text{s}$. Unter Verwendung eines LINUX-Cluster mit vier CPUs betrug die Simulationszeit ca. 20 Stunden.

Ergebnisverlauf

Zu Simulationsbeginn befinden sich die drei bereits geteilten Segmente des Verdichterradlaufrades noch auf der Welle. Durch die Definition einer anfänglichen Winkelgeschwindigkeit werden von Anfang an Zentrifugalkräfte aufgebaut. Diese führen zu einer Radialbewegung der Laufradteile und resultieren im Kontakt der Segmente mit der Gehäusestruktur nach einer simulierten Dauer von 0,1 ms. Bis zu einem Zeitpunkt von etwa 1,2 ms dringen die Bruchstücke in die Gehäusestruktur ein und werden dann gestoppt. Durch die

dynamischen Trägheitseffekte wird die maximale Belastung der Struktur erst mit einer Verzögerung von 0,5 ms erreicht. Nach dieser Zeit werden die Laufradsegmente infolge der elastischen Kräfte im Gehäuse wieder zurück in Richtung Welle beschleunigt. Ungefähr 50 % der gesamten kinetischen Energie des Laufrades wird in den ersten 2 ms des Crashverlaufes in Verformungsenergie der Struktur umgewandelt, ein Großteil der verbleibenden kinetischen Energie wird in Reibung umgesetzt.

Validierung

Zu Validierungszwecken wurde ein realer Containment-Test auf dem Prüfstand der Firma MAN B&W durchgeführt. Nach dem erfolgreichen Verlauf wurde der Turbolader demontiert, um Fotografien der Einzelteile anfertigen zu können. Diese Bilder können mit den jeweiligen Teilen aus der Simulation

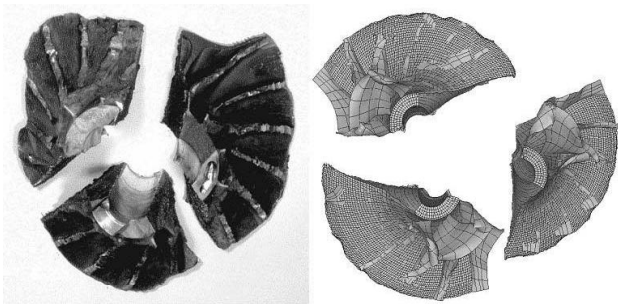


Bild 2: Laufradsegmente

verglichen werden. Die Bilder 2 – 4 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Test und Simulationsergebnissen.

Den meisten Materialien wurde kein Versagenskriterium zugewiesen, ein Bruch der Struktur konnte daher in der Simulation nicht auftreten. Dennoch kann eine plastische Dehnung von 35 – 40 % als eine realistische Bruchdehnung angesehen werden. Bild 3 zeigt die Ergebnisse für das Einsatzstück. Risse treten in den Bereichen mit plastischen Dehnungen über 40 % auf. Die simulierten Verformungen der Labyrinthischeibe in Bild 4 stimmen gut mit den Testergebnissen überein. Die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Testergebnissen ist ausgezeichnet. Die vorhergesagten Schädigungen der Komponenten sind sehr

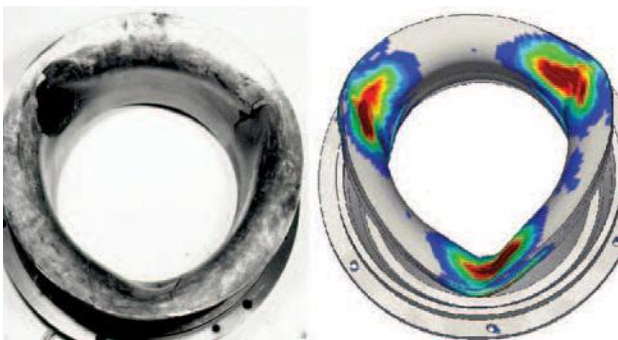


Bild 3: Einsatzstück

ähnlich zu den beobachteten Schädigungen an der realen Struktur. In Bereichen, die ohne Materialversagen im Werkstoffgesetz abgebildet wurden und in der realen Struktur Beschädigungen aufweisen, können hohe plastische Dehnungen nachgewiesen werden.

Die numerische Analyse kann hochbelastete Regionen und mögliche Risse in den Bauteilen vorhersagen. Zudem zeigt sich ein hohes Potential für den Einsatz dieser Methode während des Entwicklungsprozesses von Turboladern und anderen schnell drehenden Maschinen wie z.B. Werkzeugmaschinen. Der Einblick in Mechanik und Kinematik des Laufradberstens geht durch den Einsatz der numerischen Simulation wesentlich tiefer. Die Auswirkungen konstruktiver Änderungen können hiermit schneller und kostengünstiger evaluiert werden als durch Tests auf dem Prüfstand. Die gezeigten Ergebnisse stimmen selbst an Stellen ohne modelliertes Materialversagen gut überein. Verstärktes Augenmerk wird für zukünftige Simulationen sicherlich auf dem Einsatz eines Versagenskriteriums, z.B. in Form einer Bruchdehnung liegen.

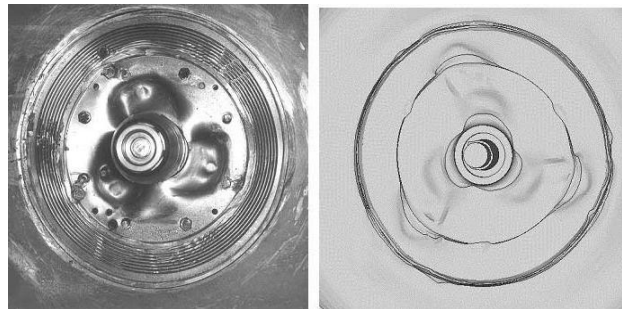


Bild 4: Labyrinthischeibe

Der Artikel ist die Kurzfassung eines Beitrags, der auf dem 22. CADFEM Users' Meeting 2004 in Dresden gehalten wurde. Die ausführliche Version kann auf www.cadfem.de heruntergeladen werden.

Autoren

- Thomas Winter, MAN B&W Diesel AG, München
- Dr.-Ing. Armin Huß, Ingenieurbüro Huß & Feickert, Liederbach
- Heiko Beck, Ingenieurbüro Huß & Feickert, Liederbach

Ansprechpartner für

- LS-DYNA

Wolfgang Lietz
CADFEM GmbH
Tel.: +49 (0)163 – 96 36 19 65
E-Mail: wlietz@cadfem.de

Homepage des Ingenieurbüro Huß & Feickert
www.ihf-ffm.de

Homepage von MAN B&W Diesel AG, München
www.manbw.com