

Zur Schwingungsberechnung vorgespannter Schraubverbindungen

R. Helfrich, A. Schünemann, N. Wagner

INTES GmbH, Stuttgart, www.intes.de

1 Einführung

Viele Maschinenbauteile weisen Schraubverbindungen auf, wie Flansche, Gehäuse und Motoren. Dabei sorgt die Schraubverbindung mit ihrer Vorspannung sowohl für eine Kraftübertragung zwischen den Bauteilen als auch für eine Abdichtung des Zusammenbaus. Will man die Schwingungen des Zusammenbaus berechnen, muss man den Kontaktzustand an den Schraubflächen berücksichtigen. Da Kontaktanalysen stark nichtlinear sind, Schwingungsberechnungen aber meistens ein lineares System voraussetzen, kommt der Linearisierung des Modells die entscheidende Bedeutung zu. Für diese Linearisierung können die Ergebnisse der Kontaktanalyse unter Schraubenvorspannung wie Kontaktstatus und Kontaktdruck in Frage. Nach der Linearisierung erfolgt dann eine klassische Eigenwertanalyse mit nachfolgender modaler Frequenzganganalyse (oder auch eine Analyse im Zeitbereich).

Häufig kommt wie bei einem Verbrennungsmotor noch die Dichtung zwischen den Bauteilen hinzu. Dabei ist die Frage zu klären, welchen Einfluss das häufig sehr nichtlineare Dichtungsverhalten auf die Schwingungen hat.

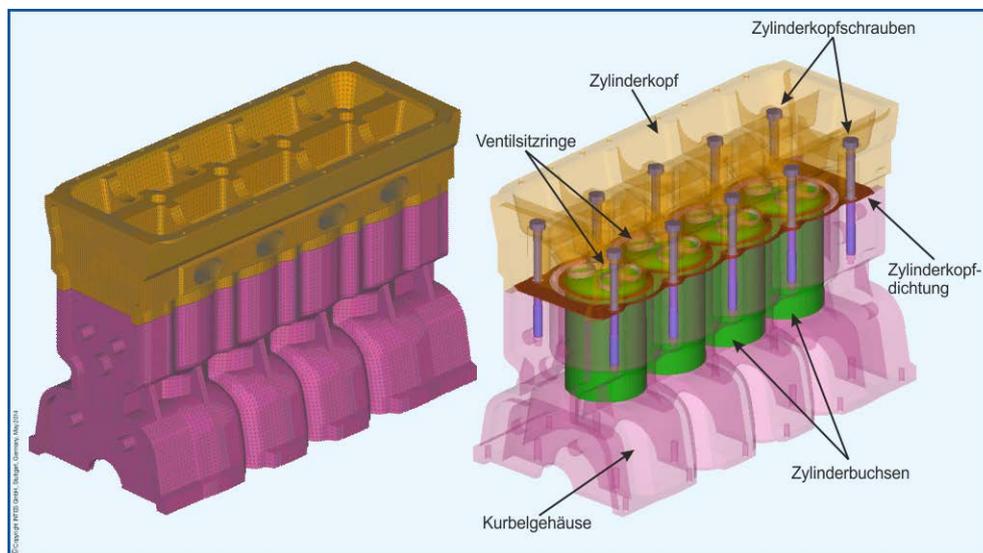


Abb. 1: Modell eines Verbrennungsmotors

2 Modell eines Verbrennungsmotors

Im Folgenden legen wir das Modell eines Verbrennungsmotors nach Abb. 1 zugrunde. Die Dichtungscharakteristik ist aus Abb. 2 ersichtlich. Die Schraubenvorspannung erfolgt einheitlich mit 45 kN. Weitere Lastfälle wie Temperatur und Zylinderdrücke werden zunächst ausgeblendet.

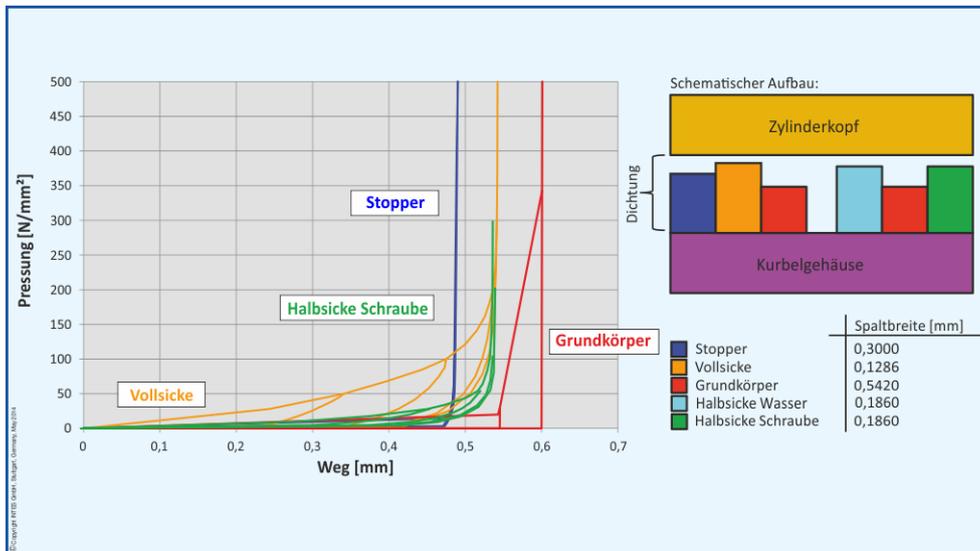


Abb. 2: Aufbau der Zylinderkopfdichtung mit nichtlinearer Druck-Verschluss-Kurve

3 Linearisierung des Kontakts

Als Ergebnis aus der Berechnung der Schraubenvorspannung stehen der Kontaktstatus und der Kontaktdruck zur Verfügung. Abb. 3 zeigt den Kontaktdruck, wobei die Bereiche im Kontakt und nicht im Kontakt unterschieden werden. Die aktiven Kontakte zeigen einen Kontaktdruck, die passiven keinen. Das entspricht dem Kontaktstatus. Die Linearisierung des Kontakts besteht dann darin, dass alle aktiven Kontakte fest gekoppelt werden. Für das so veränderte Modell erfolgt dann eine Eigenwertanalyse. Dabei wird für alle Dichtungsbereiche jeweils eine konstante Elastizität vorgegeben.

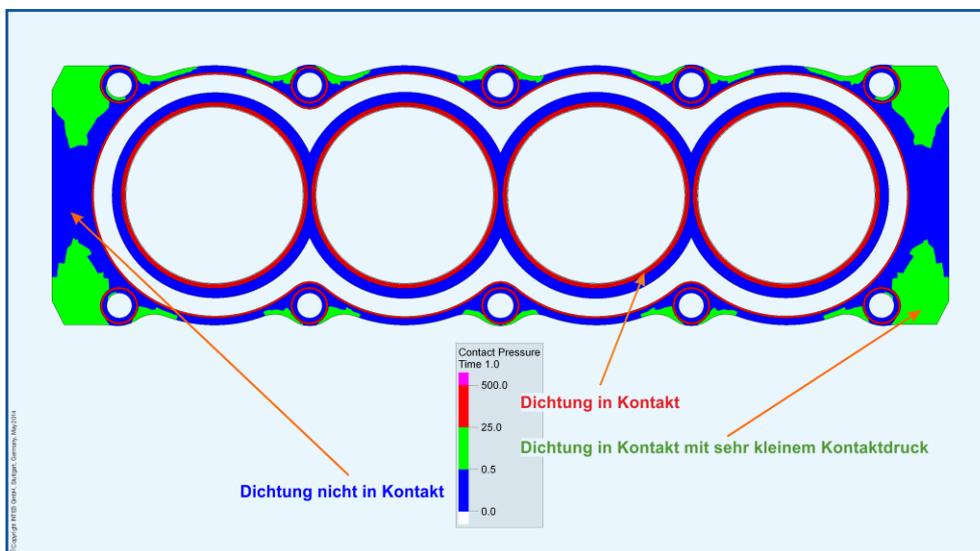


Abb. 3: Kontaktdruck an der Zylinderkopfdichtung nach der Schraubenvorspannung

4 Linearisierung der Dichtung

Als weiterer Schritt wird die Linearisierung der Dichtung in der Weise durchgeführt, dass jedes finite Element der Dichtung die Elastizität erhält, wie sie sich aus seiner aktuellen Verformung und der jeweils gültigen Druck-Verschluss-Kurve ergibt. Zusammen mit der bereits durchgeführten Linearisierung des Kontakts erhält man dann neue Eigenwerte und Eigenformen, die sich geringfügig von den Ergebnissen ohne Linearisierung der Dichtung unterscheiden. Abb. 4 zeigt den Vergleich für die ersten 50 Moden (bis ca. 4400 Hz). Bei einem Vergleich der Frequenzen bis 10000 Hz liegen die Abweichungen bei unter 7%.

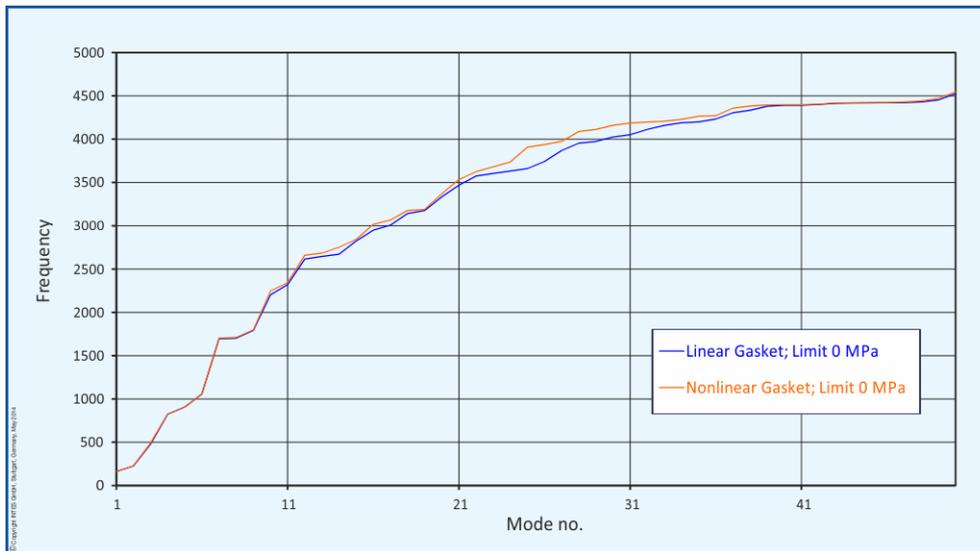


Abb. 4: Vergleich der Eigenfrequenzen mit und ohne Linearisierung der Dichtung

Zusätzlich zum Vergleich der Eigenfrequenzen können auch die MAC-Faktoren (Modal Assurance Criterion) zum Vergleich der Eigenformen herangezogen werden. Abb. 5 zeigt diesen Vergleich entsprechend zu Abb. 4 für die ersten 50 Moden. Dabei kommt es zu einigen Vertauschungen von Moden.

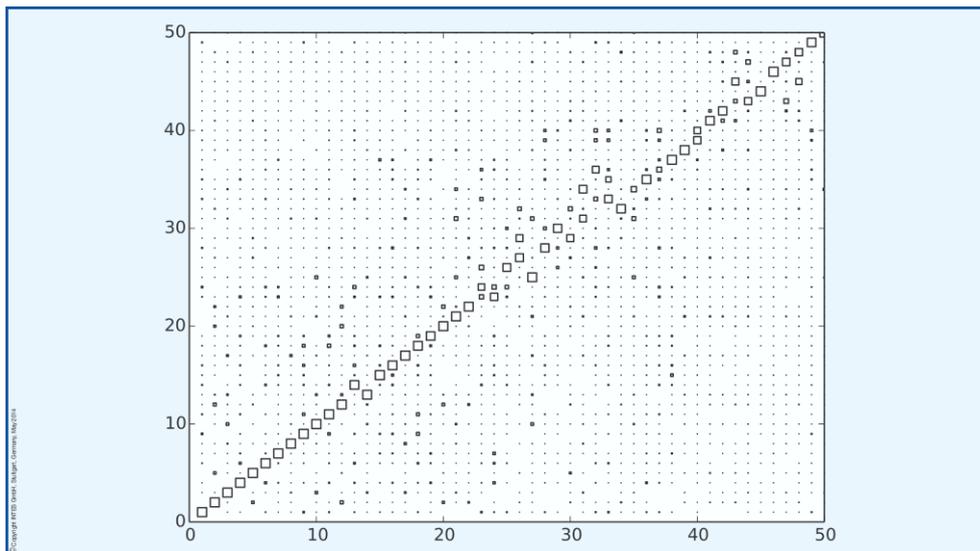


Abb. 5: Vergleich der Eigenfrequenzen mit und ohne Linearisierung der Dichtung

5 Druckabhängige Linearisierung des Kontakts

Wenn alle aktiven Kontakte gekoppelt werden, dann wird der Kontaktdruck dabei nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass bei sehr geringem Druck davon ausgegangen wird, dass die Kontaktpartner an dieser Stelle gemeinsam schwingen und keine Relativverschiebungen zeigen. Was bei großen Kontaktdrücken einleuchtet, muss bei sehr geringen Drücken nicht mehr gelten. Daher ist es sinnvoll, einen Schwellwert für den Kontaktdruck einzuführen, ab dem die Kopplung der Kontakte erfolgt. Für die aktiven Kontakte mit kleineren Drücken bleibt der Kontakt offen. Nach Abb. 3 wurde hier ein Schwellwert von 25 MPa verwendet. Kombiniert man die Linearisierung des Kontakts und der Dichtung mit diesem Schwellwert ergibt sich der Vergleich in Abb. 6 gegenüber der reinen Linearisierung des Kontakts. Hier liegen die Abweichungen der Frequenzen bis 10000 Hz bei unter 5%. Allerdings müsste der Schwellwert noch durch einen Vergleich mit dem Versuch bestimmt werden.

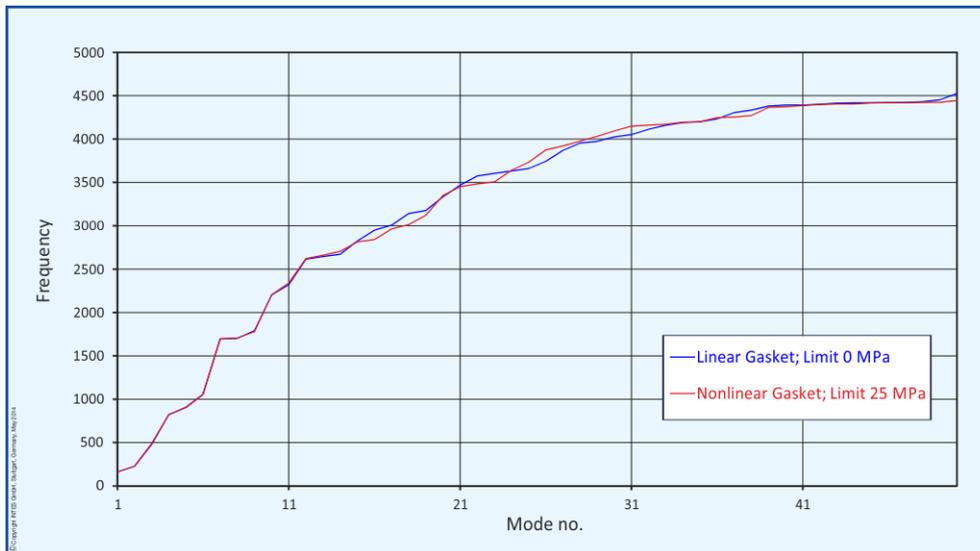


Abb. 6: Vergleich der Eigenfrequenzen mit und ohne Linearisierung der Dichtung kombiniert mit einem Schwellwert

6 Frequenzgang der Schallabstrahlungsleistung des Motorblocks

Wie sich die Unterschiede in den Eigenfrequenzen und Eigenformen auf den Frequenzgang der Schallabstrahlungsleistung an der Außenfläche des Motorblocks auswirken zeigt die Abb. 7 bis 2000 Hz. Hier wurde keine Dämpfung verwendet. Die Anregungskräfte wurden an den Ventilsitzen mit einer geeigneten Phasenverschiebung aufgebracht. Der Einfluss der Dichtung und des Schwellwerts scheint dabei im unteren Frequenzbereich vernachlässigbar zu sein. Danach werden größere Einflüsse sichtbar.

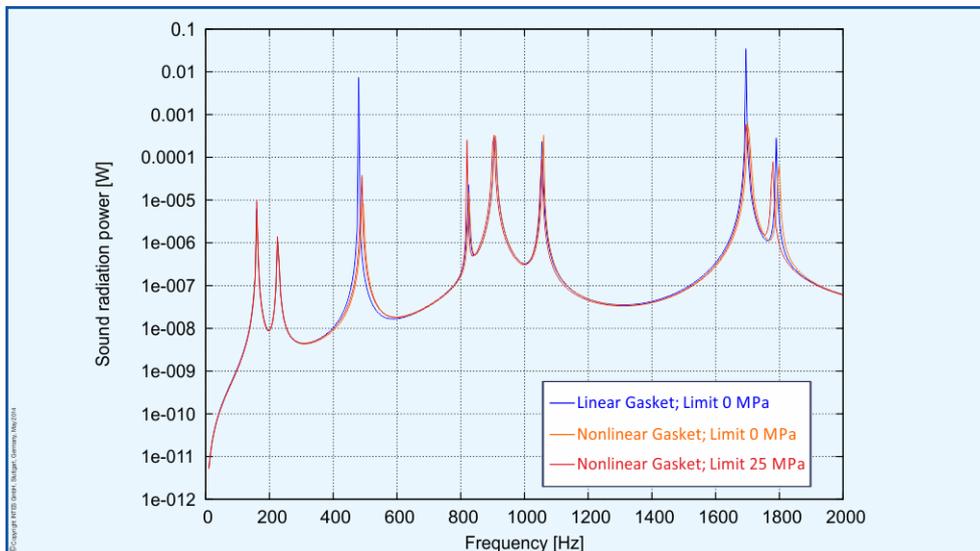


Abb. 7: Vergleich der Frequenzgänge der Schallabstrahlungsleistung

7 Ausblick

Die Schallabstrahlung verschraubter Bauteile basiert im Wesentlichen auf der Linearisierung des Kontakts. Das nichtlineare Verhalten evtl. vorhandener Dichtungen kann einen gewissen Einfluss haben wie auch die Abhängigkeit der Linearisierung des Kontakts von einem zu bestimmenden Schwellwert. Der Schwellwert dürfte von der Oberflächenrauigkeit der Kontaktpartner abhängen und wird am besten über den Versuch und den Vergleich mit der Berechnung bestimmt. Das verwendete Beispiel eines Verbrennungsmotors zeigt bei niedrigen Frequenzen nur einen geringen Einfluss der Dichtung und des verwendeten Schwellwerts auf die Schallabstrahlungsleistung. Der Einfluss der Dämpfung muss noch untersucht werden.