

# Simulation und Optimierung von Bauteilverbindungen

R. Helfrich, I. Pflieger

INTES GmbH, Stuttgart, Germany

## **Zusammenfassung:**

Die Modellierung von Bauteilverbindungen bestimmt in entscheidendem Maße die Qualität der Simulationsergebnisse. Andererseits ist die Abbildung von Verbindungsdetails aufwändig und man sucht daher nach vereinfachten Verbindungsmodellen mit ausreichender Genauigkeit. Bauteilverbindungen befinden sich also im Spannungsfeld zwischen Modellierungsaufwand und Ergebnisgüte. Nachdem sich in den vergangenen Jahren in der Simulation auch die Optimierung von Bauteilen immer weiter verbreitet, sollen natürlich auch die Bauteilverbindungen in den Optimierungsprozess eingebunden werden. Daraus ergeben sich erweiterte Potenziale für den Entwurf von Bauteilen und ihrem Zusammenbau.

Hauptgegenstand des Artikels sind Schraubverbindungen. Dabei spielen auch inkompatible Netze der verbundenen Teile und Kontakt in der Verbindungsfläche eine wesentliche Rolle. Der Nutzen dieser Vorgehensweise bei der Optimierung von Schrauben- und Rippenpositionen in statischen und dynamischen Anwendungen wird vorgestellt.

## **Keywords:**

Inkompatible Netze, Schraubenmodellierung, Schraubenvorspannung, Formoptimierung von Schrauben und Rippenpositionen, Kontakt und Schwingungsverhalten, Motorberechnung

## 1 Einführung

Die Qualität der Ergebnisse von Finite-Elemente-Berechnungen (FE-Berechnungen) hängt wesentlich davon ab, wie Bauteilverbindungen modelliert werden. Allerdings ist die sorgfältige Modellierung der Verbindungsdetails manchmal kompliziert und zeitaufwändig. Deshalb wollen Berechnungsingenieure für die verschiedenen Verbindungsarten einfache Modelle, die zufriedenstellende Ergebnisse gewährleisten. Bauteilverbindungen befinden sich also im Spannungsfeld zwischen Modellierungsaufwand und Ergebnislösung. Das Ziel vereinfachter Verbindungsmodelle ist es oft, zunächst das globale Strukturverhalten ausreichend zu beschreiben. Dabei wird das lokale Verhalten in der Verbindung eigenen Untersuchungen mit Hilfe von verfeinerten Modellen überlassen. Allerdings wird bei einer großen Anzahl von Verbindungen (wie bei Schweißpunkten in einer Rohkarosserie) eine Trennung zwischen lokalen und globalen Modellen schwierig, da nicht jede einzelne Verbindung getrennt untersucht werden kann. Deshalb besteht die Herausforderung darin, die vereinfachten Verbindungsmodelle soweit zu verbessern, dass auch lokale Qualitätsanforderungen erfüllt werden, ohne dass dazu der Modellierungsaufwand steigt.

In diesem Artikel liegt der Schwerpunkt bei Verschraubungen in Verbindung mit inkompatiblen Netzen und Kontakt. Nach einer allgemeinen Einführung von Bauteilkopplungen mit Hilfe von inkompatiblen Netzen werden Schrauben und ihre Vorspannung genauer betrachtet. Auch die Frage nach optimalen Schraubenpositionen wird behandelt, und wie dabei inkompatible Netze sehr praktisch eingesetzt werden können. Danach wird die Verschraubung in Motormodellen betrachtet, und wie man mit Sperren von Kontaktverbindungen („Contact Locking“) den Übergang von statischen zu dynamischen Berechnungen von Motoren bewältigen kann. Schließlich wird die Optimierung von Rippenpositionen auf einem Motorblock dargestellt, um damit die Schallabstrahlung an der Motoroberfläche zu reduzieren. Am Ende folgen einige abschließende Bemerkungen.

## 2 Bauteilverbindung mit inkompatiblen Netzen

Das Konzept inkompatibler Netze erleichtert die Modellierung von komplexen Bauteilen und Baugruppen. Davon profitieren unter anderem folgende Anwendungen:

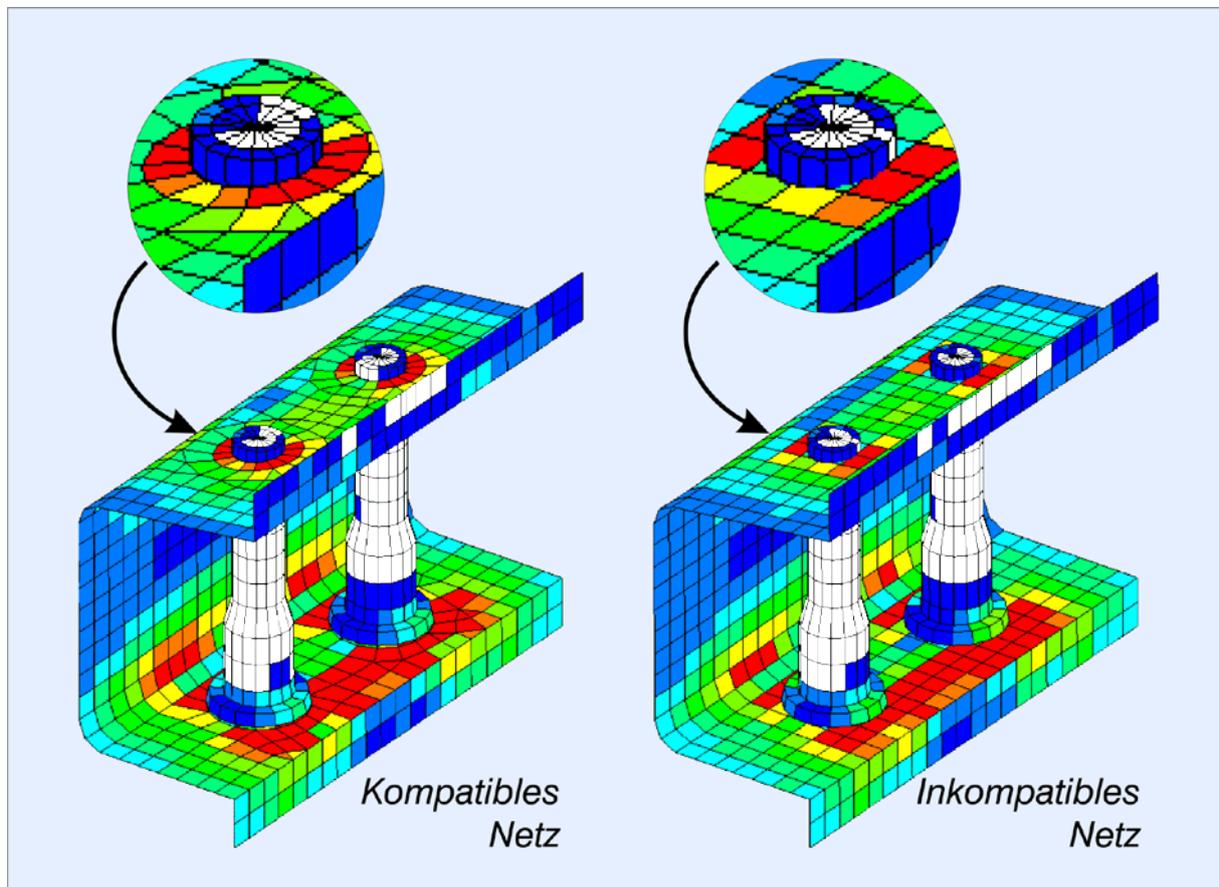


Abb. 1: Spannungen in einer Schraubenverbindung mit kompatiblen und inkompatiblen Netzen

- Lokale Netzverfeinerungen,
- Die Kopplung von Teilen mit unterschiedlichen Elementtypen,
- Getrennt vernetzte Bauteilverbindungen erleichtern den einfachen Wechsel von Position und Abstand der Schrauben (siehe Abb. 1),
- Getrennt vernetzte Rippen erleichtern den einfachen Wechsel von Position und Ausrichtung der Rippen (siehe Abb. 2),
- Die automatische Erzeugung von Schweißpunktelementen und ihre Kopplung mit inkompatibel vernetzten Flanschen,
- Kontakt zwischen unterschiedlich vernetzten Teilen (siehe Abb. 8).

Die inkompatiblen Netze werden dabei über Projektion und Interpolation verbunden. Die Knoten auf den verbundenen Oberflächen (oder Randlinien) werden auf die Gegenseite projiziert und dort unter Verwendung der jeweiligen Ansatzfunktionen der Elemente (d.h. linear oder quadratisch) und den Randknoten der betroffenen Elemente mit ihren Freiheitsgraden interpoliert, um eine kinematische Verträglichkeit der Verbindung mit den verwendeten Elementen herzustellen.

Das Hauptverdienst dieses Konzepts ist die Steigerung der Produktivität in der FE-Vernetzung. Die damit verbundenen Vorteile sind:

- Die netzunabhängige Modellierung von komplexen Bauteilen,
- Der schnellere Austausch von einzelnen Teilen, ohne die angrenzenden Bauteile zu verändern,
- Die flexiblere Modellierung durch bauteilorientierte Vernetzung,
- Die verbesserte Netzqualität der verbundenen Bauteile (und damit verbunden eine bessere Qualität der Ergebnisse),
- Die Anwendbarkeit für alle Berechnungsarten.

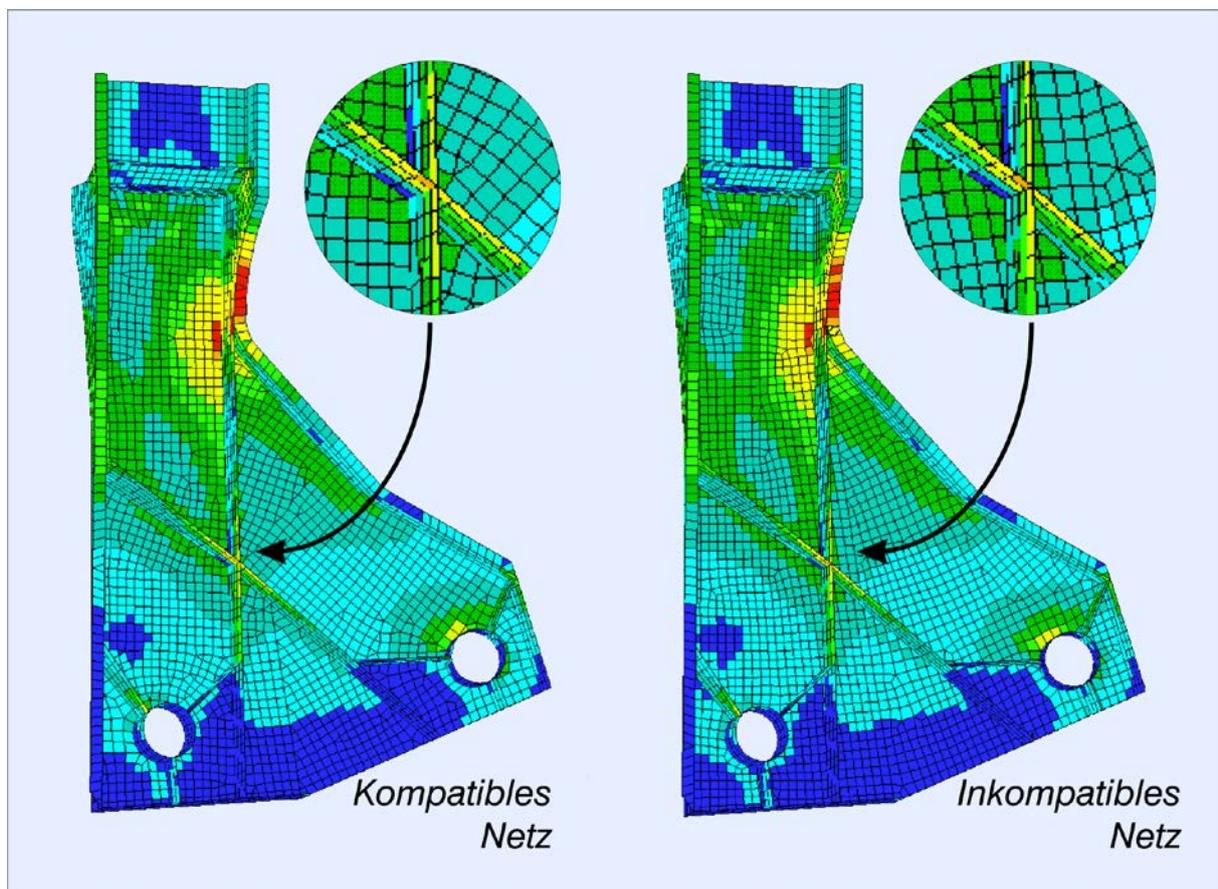


Abb. 2: Spannungen in einer Struktur mit kompatibel und inkompatibel vernetzten Rippen

Dabei muss man bedenken, dass sich der Netzübergang bei inkompatiblen Netzen in den gekoppelten Flächen (oder Linien) konzentriert. Deshalb sind abgeleitete Ergebnisse wie Spannungen dort möglicherweise nicht genauso verlässlich wie in den ungestörten Netzbereichen. Im Falle von Lebensdauerbetrachtungen an diesen Stellen sollte eine kompatible Vernetzung oder die Verwendung von Submodell-Techniken (sog. „Spannungslupe“) erwogen werden. Im Falle von Schweißpunkten ist dies allerdings keine Lösung, da die Anzahl der Schweißpunkte im Modell sehr groß sein kann. Zusammenfassend muss gesagt werden, dass es die Aufgabe des Berechnungsingenieurs ist, die geeignete Vernetzungsmethode auszuwählen und an der Berechnungsaufgabe und den verlangten Ergebnissen zu orientieren.

### 3 Schraubenmodellierung

Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall gibt es viele Möglichkeiten zur Modellierung von Schraubenverbindungen (siehe Abb. 3):

- **Balkenmodell:** Die Endknoten sind mit der Struktur starr verbunden (sog. Rigid Regions). Die Bohrung für die Schraube wird dabei nicht modelliert. Die Vorspannung kann über Anfangsdehnungen aufgebracht werden (z.B. eine Temperaturdifferenz). Zwei Balkenelemente sind nötig, wenn die Vorspannung über Kontakt aufgebracht wird.
- **Mit getrenntem Schraubenschaft:** Dazu wird ein Volumenmodell des Schraubenschafts ohne Gewinde benötigt. Die Schraubenbohrung wird modelliert. Der Gewindebereich von Schraube und Bohrung wird gekoppelt (über kompatible oder inkompatible Netze). Im ungestörten Schaftbereich wird die Schraube durchgeschnitten und dort ein Kontakt definiert, um über eine Durchdringung die Verlängerung der vorgespannten Schraube zwischen zwei Knoten vorzugeben. Das ist nicht empfehlenswert im Falle von kurzen Schrauben, da eine Verwölbung des Schaftquerschnitts nicht berücksichtigt wird. Für lange Schrauben ist das kein Problem, aber diese Technik führt zu einer Verkürzung der Schraube, was nicht der Realität entspricht.

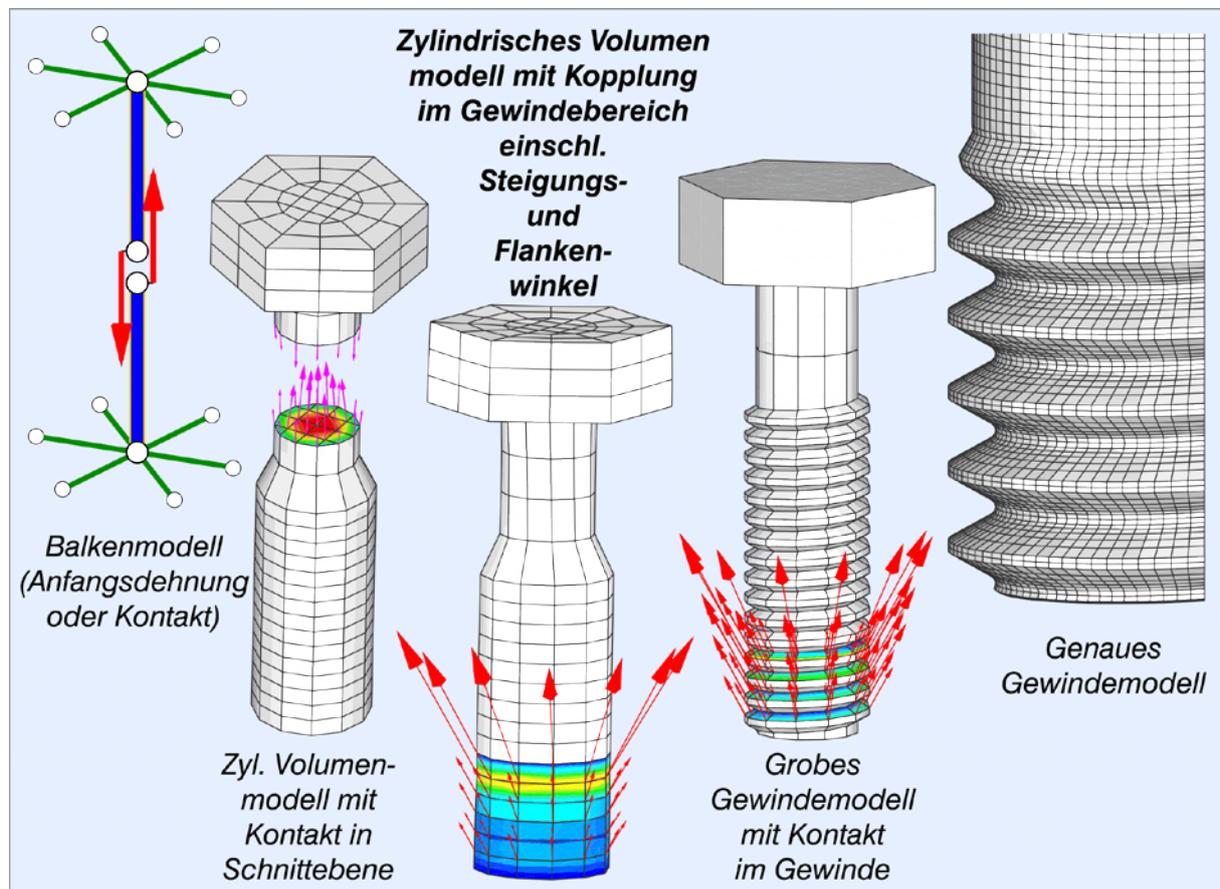


Abb. 3: Breites Spektrum von Modellen für Schraubenverbindungen

- Schraube mit Gewindekopplung: Dazu wird auch ein Volumenmodell des Schraubenschafts ohne Gewinde benötigt. Die Schraubenbohrung oder die Mutter werden modelliert. In automatischer Weise werden Gewinde und Bohrung (kompatibel oder inkompatibel) miteinander verbunden. Schaft und Bohrung bleiben dabei elastisch und benötigen keine zusätzliche Kopplungsbedingung. Zusätzlich werden Flanken- und Steigungswinkel des Gewindes berücksichtigt. Das führt zu nicht-axialen Kräften im Gewindebereich, die zu einer Aufweitung der Bohrung bzw. zu einer Verdrehung des Schaftes führen. Die Vorspannung wird hier automatisch über einen Kontakt im Gewindebereich eingebracht. Deshalb kann diese Methode auch für kurze Schrauben verwendet werden. Der Schraubenschaft wird dabei verlängert und zeigt korrekte Spannungen.
- Schraube mit einer Gewindemodellierung: Ein Volumenmodell der Schraube wird benötigt und Kontakt ist erforderlich entlang des gesamten Gewindes. Die Gewindebohrung muss entsprechend modelliert werden. Das Netz des Gewindes ist ziemlich grob und kann so die Spannungen im Gewinde nicht exakt abbilden. Die Schraubenvorspannung ist nicht so einfach einzubringen (außer über eine Verdrehung der Schraube).
- Schraube mit exakter Gewindemodellierung: Gegenüber dem vorgenannten Modell wird hier das Gewinde mit ausreichender Auflösung vernetzt. Das erhöht die Qualität der Spannungen im Gewinde erheblich. Allerdings steigt dabei der Modellierungsaufwand ebenfalls sehr deutlich (und der Berechnungsaufwand). Damit ist diese Lösung nur für einzelne Schraubenverbindungen durchführbar.

Aus diesen Beispielen lässt sich leicht ableiten, dass die Modellierung des Schraubenschafts ohne Gewinde aber unter Berücksichtigung von Flanken- und Steigungswinkel einen brauchbaren Kompromiss zwischen Modellierungsaufwand und Ergebnisqualität darstellt. Abb. 4 zeigt drei Anwendungsfälle für die Schaftverlängerung, die Aufweitung der Bohrung und die Verdrehung des Schraubenschafts. Weitere Möglichkeiten sind ein Linksgewinde und ein Doppeltgewinde.

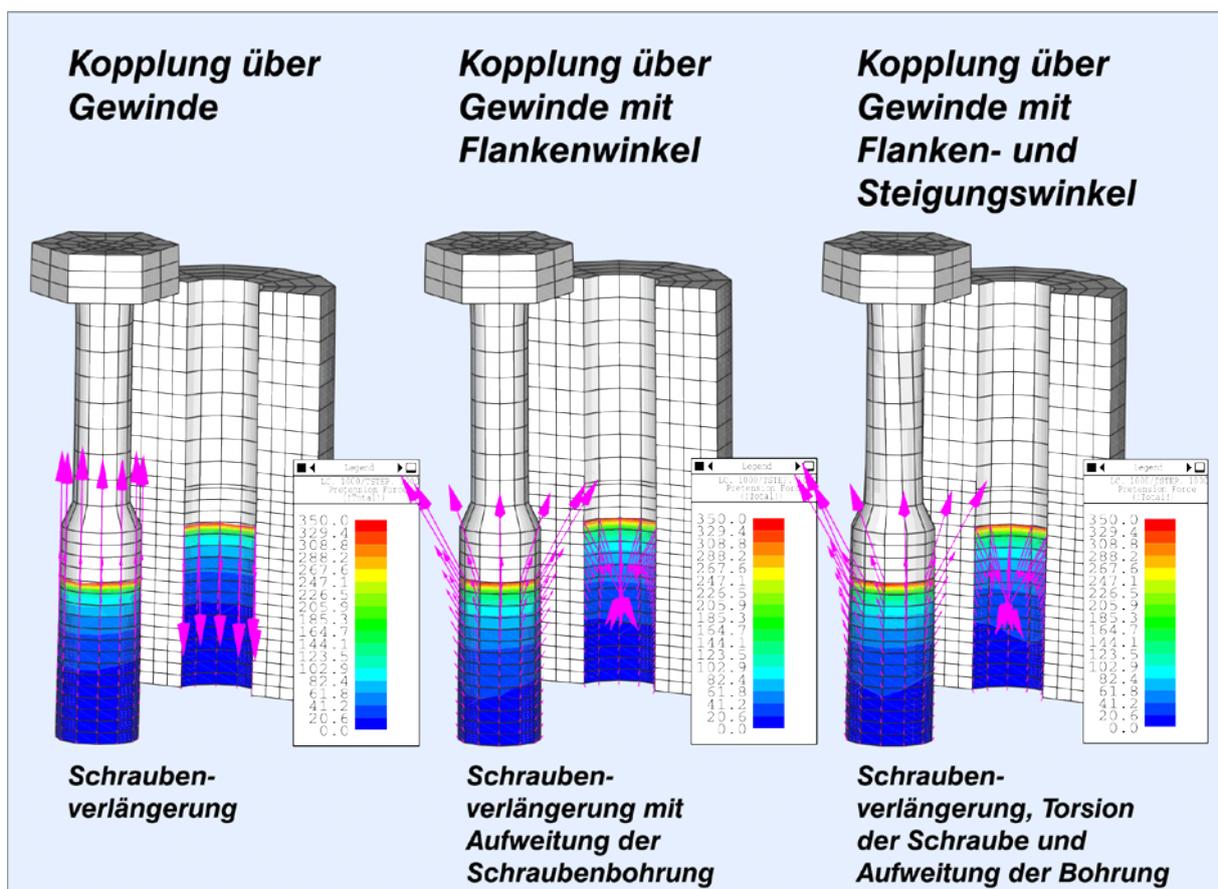


Abb. 4: Vereinfachtes Schraubenmodell mit Flanken- und Steigungswinkel

Ein wichtiger Hinweis betrifft die Vernetzung der Schraube. Sie muss im Querschnitt ein symmetrisches Netz erhalten, um Biegeeffekte aus einer Zugkraft auszuschließen. Außerdem sind

Hexaederelemente (evtl. mit Pentaederelementen) günstig, da Tetraederelemente eine gewisse Richtungsabhängigkeit bei den Verschiebungen zeigen. Deshalb ist eine automatische Vernetzung der Schrauben (und Muttern) mit Tetraederelementen nicht zu empfehlen.

Auf der anderen Seite können Schraubenkopf und Struktur durchaus auch inkompatibel vernetzt werden.

#### 4 Schraubenvorspannung

Die Schraubverbindung von Blechen ist ein gutes Beispiel für die Vorteile der Vorspannung von Schrauben über den Gewindebereich im Vergleich zu einem Schnitt durch den Schraubenschaft, da hier kurze Schrauben mit Muttern Verwendung finden. Dadurch wird die Verwölbung des Schaftquerschnitts berücksichtigt. Abb. 5 zeigt dazu die Schraubenverformung unter Vorspannung und nach einer zusätzlichen Drucklast.

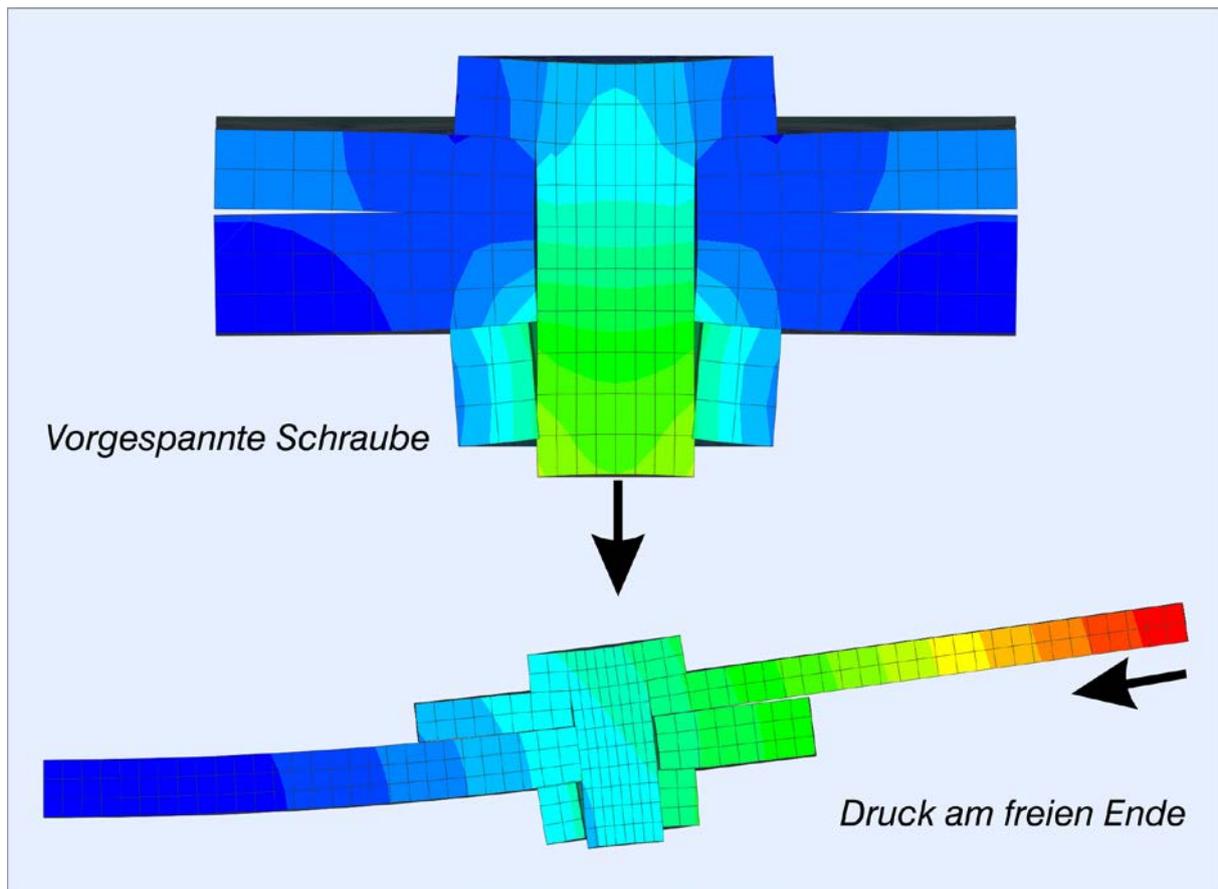


Abb. 5: Vorgespannte Schraube unter Druckbelastung

Die Schraubenvorspannung führt zu einer Kontaktzone unter Schraubenkopf und Mutter. Außerhalb dieses Bereichs kommt es zu einem Abheben, wo kein aktiver Kontakt wirkt.

Dieses Beispiel zeigt auch das Gleiten zwischen den Blechen. Durch die hohe Vorspannkraft in der Schraube kommt es zu einem gleitenden Reibkontakt zwischen den Blechen, der nach der Vorspannung wieder in Haften übergeht. Beim Aufbringen der Drucklast beginnen die Bleche wieder zu gleiten. Außerdem kommt das obere Blech in Kontakt mit dem Schraubenschaft (siehe Abb. 6), was auch für das untere Blech gilt.

Außerhalb des Reibkontakts liegt aufgrund der Vorspannung kein aktiver Kontakt vor, mit Ausnahme eines Knotens am Rand des oberen Blechs, wo sich die beiden Bleche wegen der Biegung wieder berühren und dabei gegeneinander gleiten.

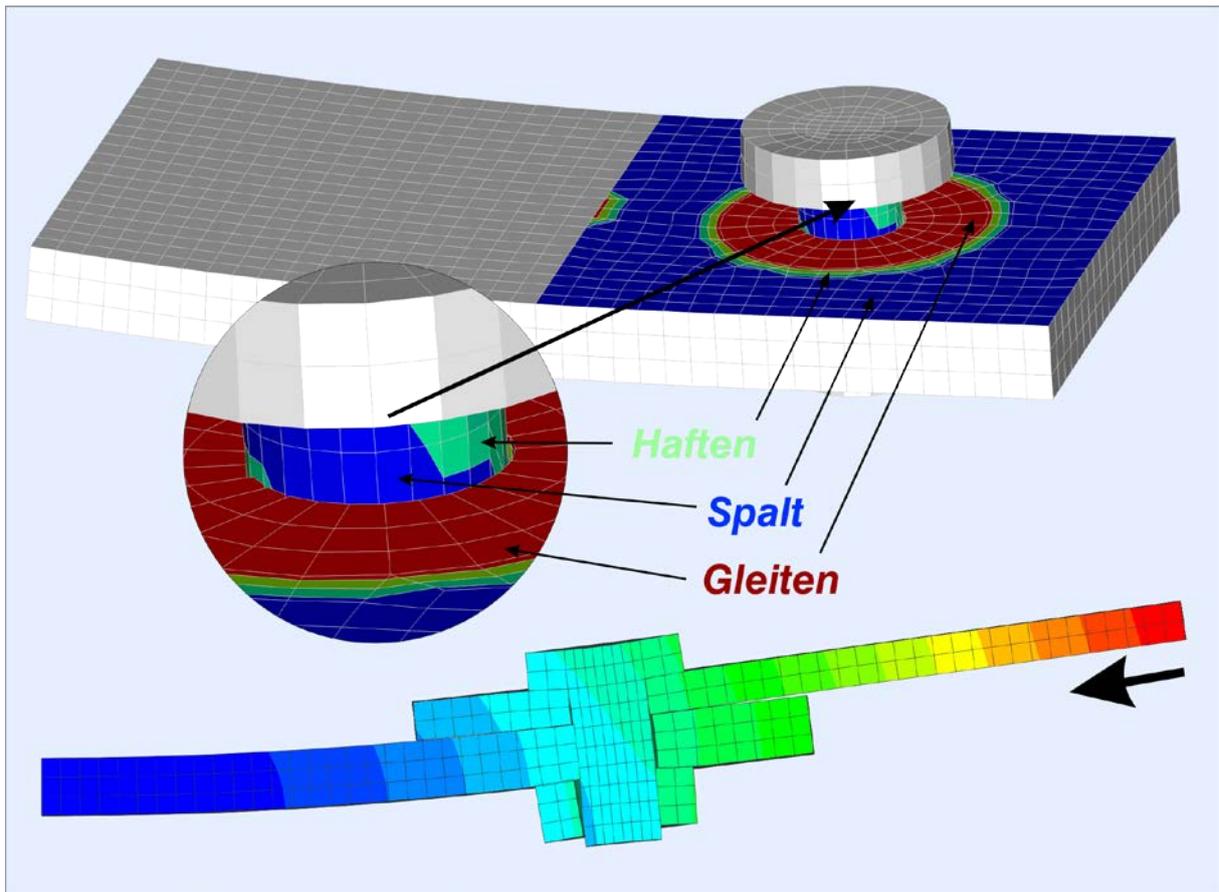


Abb. 6: Kontaktstatus einer vorgespannten Schraubverbindung

## 5 Optimierung von Schraubenpositionen

Abb. 7 zeigt ein Beispiel für den gemeinsamen Einsatz von Schraubverbindungen, inkompatiblen Netze und Formoptimierung. Der Bügel wird durch zwei Knotenkräfte an der oberen Seite belastet und ist an der hinteren Seite unten fest eingespannt. Die beiden Seiten des Bügels sind durch drei Schrauben zusammengehalten, welche die aufgebrachtten Kräfte von der Ober- zur Unterseite übertragen.

Die Modellierung von Bügel und Schrauben ist vollständig inkompatibel, d.h. der Bügel ist ohne Schrauben vernetzt worden und auch die Schraubenmodelle sind unabhängig vom Netz des Bügels.

Die Formoptimierung wird nun auf die Position aller drei Schrauben angewandt, um eine identische Schraubenkraft zu erreichen. Das Diagramm in Abb. 7 zeigt die Entwicklung der Schraubenkräfte während der Optimierung. Während der Optimierung werden Durchdringungen der Schrauben vermieden. Die Endposition der Schrauben ist symmetrisch, obwohl dies keine Nebenbedingung des Optimierungsprozesses ist, wie es aber erwartet werden muss.

Bei dieser Optimierung werden keinerlei Veränderungen des Netzes vorgenommen, d.h. die relative Position der Knoten zueinander bleibt erhalten. Trotzdem ist es eine Formoptimierung, da die Koordinaten der Schraubenpositionen verändert werden.

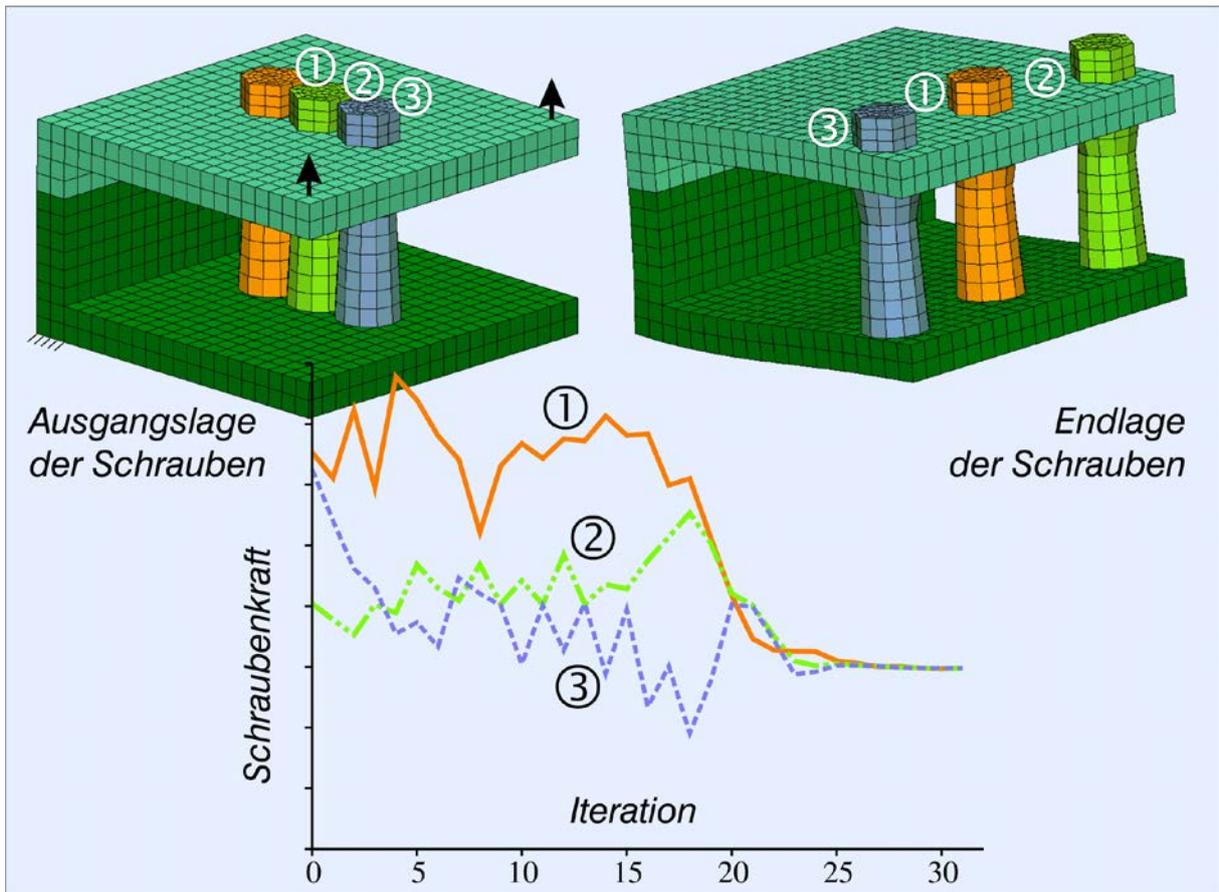


Abb. 7: Optimierung der Schraubenpositionen in einem Bügel

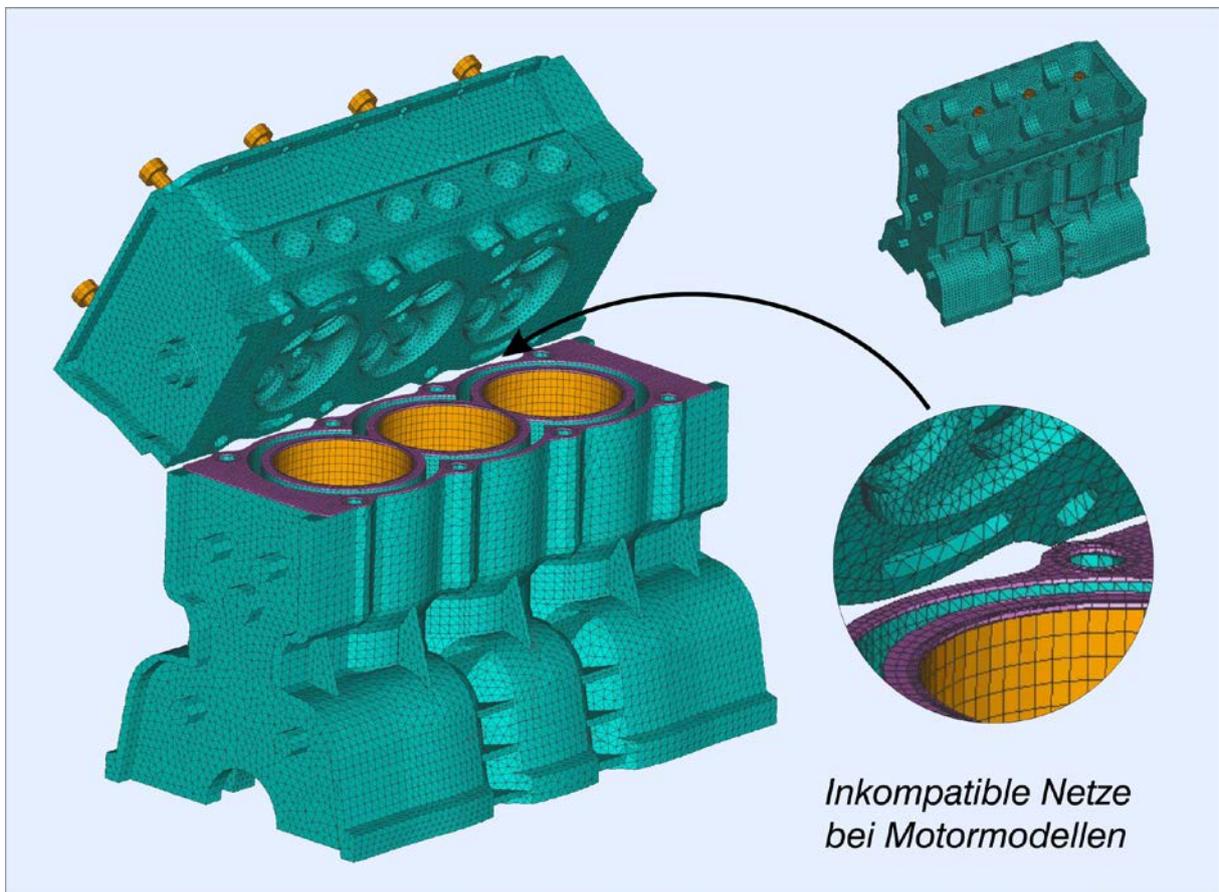


Abb. 8: Motormodell mit Zylinderkopf, Motorblock, Zylinderbüchsen, Schrauben und Dichtung

## 6 Motormodell mit Schraubenvorspannung

In der Motorberechnung werden inkompatible Netze und vorgespannte Schrauben sehr häufig verwendet. Abb. 8 zeigt ein typisches Motormodell mit Zylinderkopf, Motorblock, Schrauben und Zylinderkopfdichtung.

Während der Zylinderkopf und der Motorblock mit Tetraederelementen automatisch vernetzt wurde, sind die Zylinderbüchsen mit Hexaedern vernetzt und Schrauben sowie Dichtung mit Hexaedern und Pentaedern. Alle Modellteile sind mit inkompatiblen Netzen verbunden, wobei zusätzlich Kontaktbedingungen zwischen Dichtung und Zylinderkopf und zwischen Schraubenköpfen und Zylinderkopf bestehen.

Abb. 9 zeigt den Effekt der Schraubenvorspannung auf die Vergleichsspannung im Motor. Die Schraubenschäfte sind unterhalb des Schraubenkopfs und am Anfang des Gewindebereichs am stärksten aufgrund von Zug- und Biegekräften beansprucht. Die Biegekräfte ergeben sich aus der unsymmetrischen Steifigkeitsverteilung um die Schrauben herum.

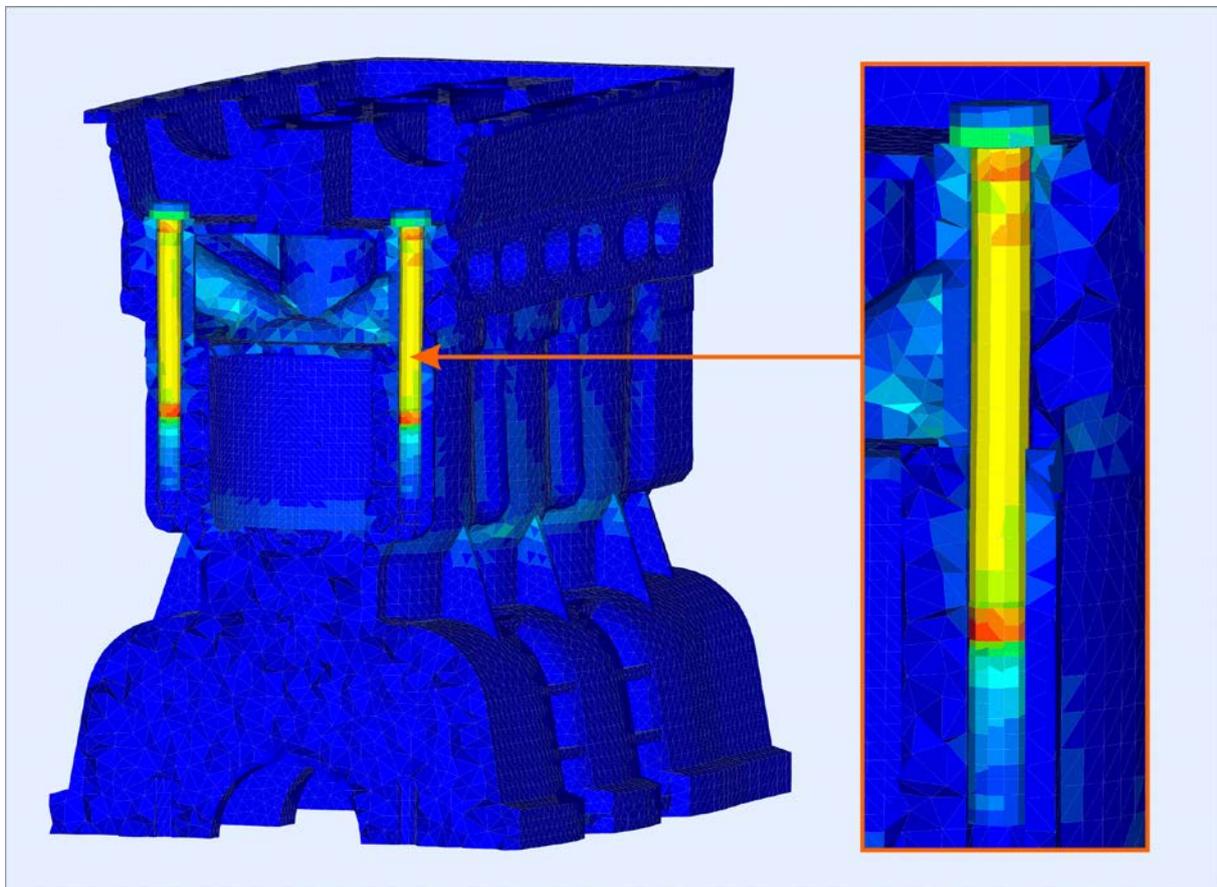


Abb. 9: Spannungen im Motor aufgrund der Schraubenvorspannung

## 7 Schallabstrahlung des Motors

Neben einer thermomechanischen Berechnung von Motoren spielt auch das Schwingungsverhalten der Motoren eine wichtige Rolle, um z.B. die Schallabstrahlung am Motorblock zu reduzieren. Ohne Schraubenvorspannung zeigen die einzelnen Teile des Motors eigene Schwingungsformen, aber nach der Schraubenvorspannung ergibt sich ein gemeinsames Schwingungsverhalten aller Motorteile. Aus Sicht der Berechnung ergibt sich dieses gemeinsame Schwingungsverhalten durch die Kopplung von Kontakten dort, wo die Teile sich berühren. Andere Bereiche, die nicht im Kontakt sind, bleiben dagegen ungekoppelt.

Abb. 10 zeigt die Schallabstrahlungsleistung auf der Oberfläche des Motorblocks als Ergebnis einer Frequenzganganalyse aufgrund einer harmonischen Anregung am Zylinderkopf. Die obere Kurve erhält man durch eine modale Frequenzganganalyse nach einer Kopplung der aktiven Kontakte in Folge der Schraubenvorspannung. Die untere Kurve erhält man, wenn man Zylinderkopf und Dichtung auf der vollen Verbindungsfläche koppelt. Die erheblichen Unterschiede beider Kurven zeigen, wie wichtig die richtige Kopplung für das Schwingungsverhalten ist.

Die spezifische Schallabstrahlungsleistung zeigt die Oberflächenbereiche hoher potentieller Schallabstrahlung. Sie ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit der Strukturschwingung normal zur Oberfläche. Aus Abb. 10 kann der untere mittlere Bereich des Motorblocks als besonders akustisch aktiv identifiziert werden. Dabei ist dieses Ergebnis bei der Anregungsfrequenz ermittelt worden, wo die Summe der Abstrahlungsleistung von der gesamten Motorblockoberfläche die höchste Amplitudenspitze zeigt.

Dann wurde die Formoptimierung eingesetzt, um diese Amplitudenspitze zu verringern, indem man die Rippen mit Hilfe inkompatibler Netze auf der Motorblock-Oberfläche verschiebt. In Abb. 11 zeigt das linke Bild die Ausgangslage der Rippen, während das rechte Bild die optimierten Positionen der Rippen wiedergibt. Da der mittlere Bereich des Motorblocks für die Schallabstrahlung bei dieser Amplitudenspitze vor allem ausschlaggebend ist, verschiebt die Optimierung die Rippen zur Mitte des Motorblocks, um dort eine Versteifung zu erreichen. Die neue Amplitudenspitze ist etwas niedriger und zu einer leicht höheren Frequenz verschoben.

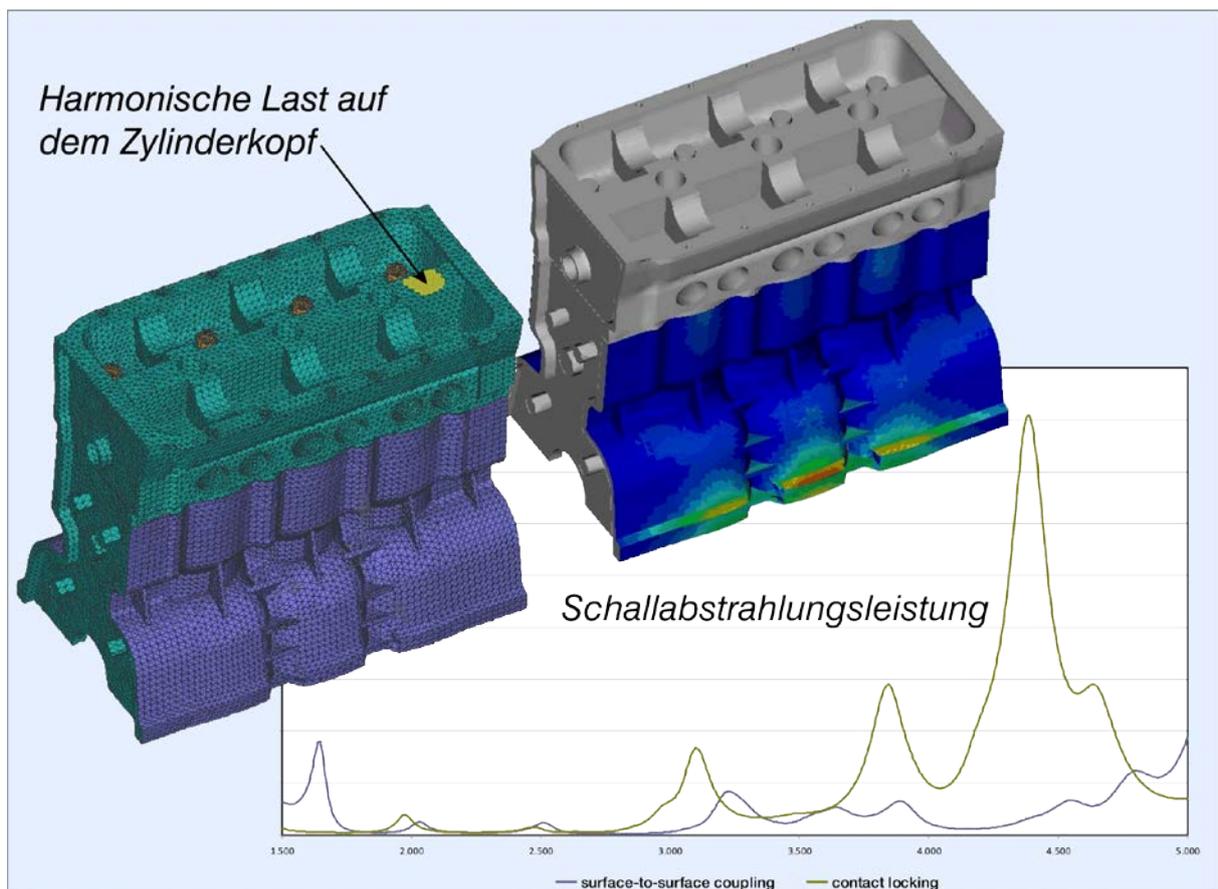


Fig. 10: Frequenzgang der Schallabstrahlungsleistung von einem Teil der Motorblockoberfläche

Das ist wieder ein Beispiel für die Formoptimierung mit Hilfe inkompatibler Netze, ohne dass dabei eine Änderung der jeweiligen Netze von Motorblock oder Rippen erforderlich wäre. Die Rippen werden einfach auf der Motorblockoberfläche verschoben, um bestimmte Nebenbedingungen zu erfüllen.

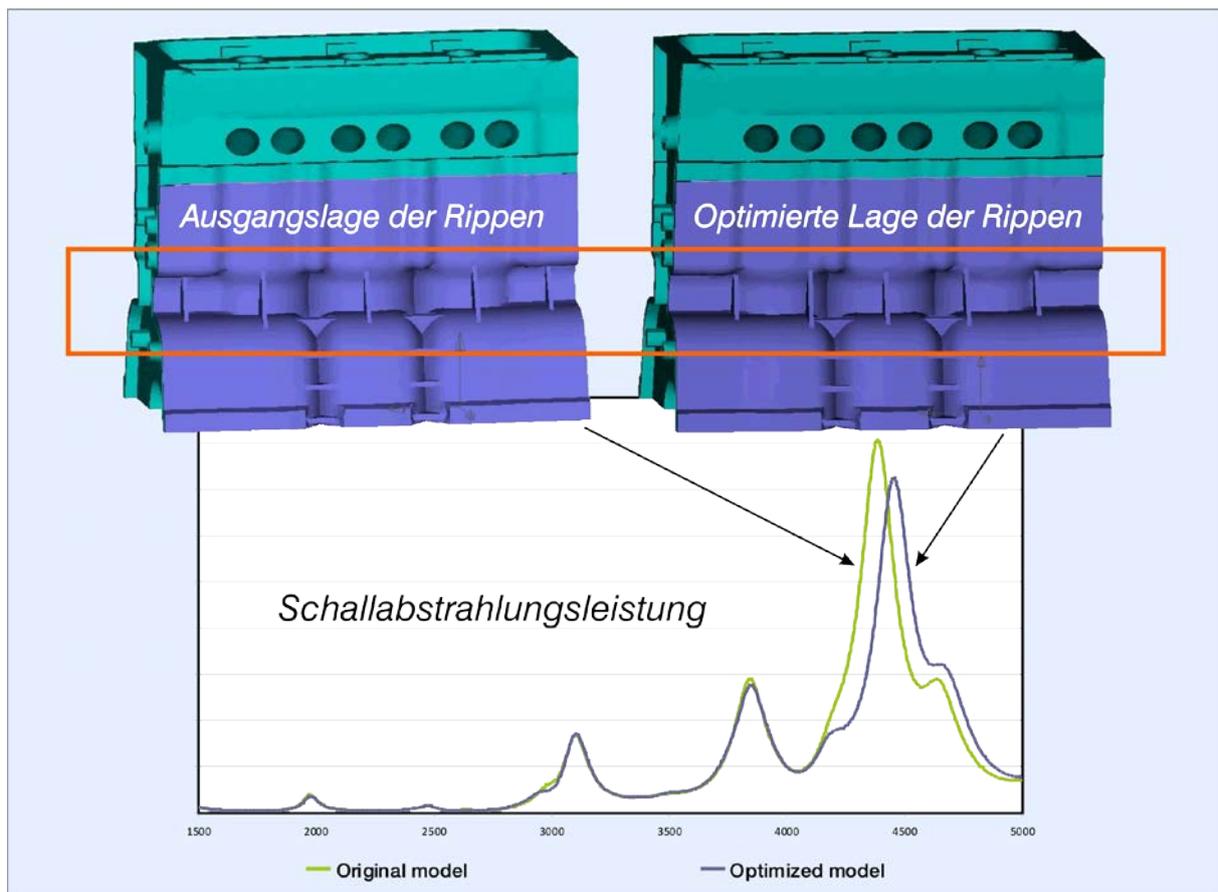


Abb. 11: Optimierung der Rippenpositionen zur Reduktion der Schallabstrahlungsamplitude

## 8 Abschließende Bemerkungen

Der Artikel zeigt einige innovative Berechnungsansätze bei Bauteilverbindungen:

- Durch den Einsatz inkompatibler Netze,
- Durch Schraubenmodelle unter Berücksichtigung von Flanken- und Steigungswinkel des Gewindes und deren Vorspannung,
- Durch Formoptimierung für Schrauben- und Rippenpositionen ohne Netzänderung,
- Durch Ermittlung des Schwingungsverhaltens vorgespannter Teile mit Kontakt.

Die Kombination dieser Ansätze erlaubt den durch Berechnung getriebenen Entwurf von Bauteilen bei geringem Modellierungsaufwand, leichter Herstellung von Strukturvarianten und einem durch Optimierungstechniken verbesserten Strukturverhalten.

Die vollen Vorteile dieser Entwurfsmethodik können vor allem mit einer integrierten FE-Software erreicht werden, die alle nötigen Analysefunktionen mit umfangreichen Optimierungsfunktionen verbindet. Durch die Integration werden außerdem geringstmögliche Rechenzeiten erreicht.