

C A E
PARTNER

CAOSS[®]

Parameterfreie Formoptimierung von Bauteilen

Sonderdruck aus Infografik 2/1994, März

CAE Partner GmbH
Schubertstr. 8b, D-35043 Marburg
Tel.: 0 64 21/4 30 80 Fax: 0 64 21/5 18 00



Parameterfreie Formoptimierung von Bauteilen

Erfahrungen mit einem Optimierungssystem im industriellen Einsatz

Klaus Kasper, Matthias Friedrich, Jürgen Sauter, Albert Albers

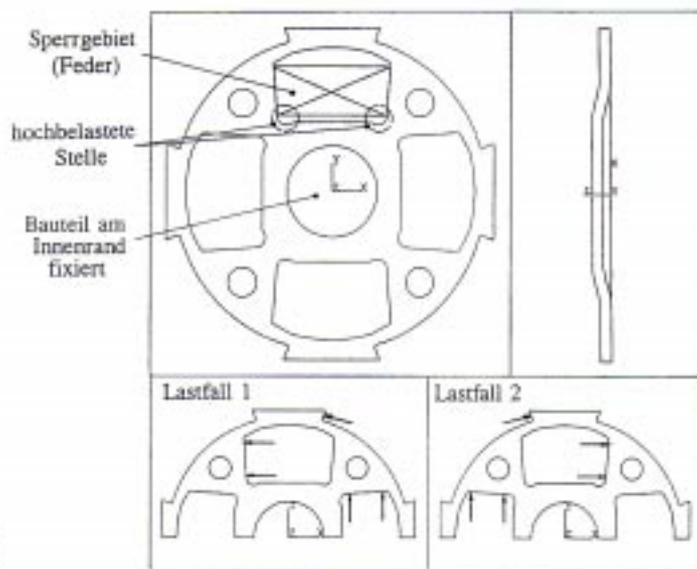
Der stetig steigende Druck der Automobilindustrie nach Leichtbau kann mit neuen Arbeitsmitteln begegnet werden. Zur Formoptimierung ist der Einsatz der parameterfreien Gestaltoptimierung auf Basis von Optimalitätskriterien, wie es das Programm CAOSS realisiert, sinnvoll.

Im verschärften internationalen Wettbewerb können Kfz-Zulieferer nur dann bestehen, wenn sie neben einer hohen technologischen Innovationskraft vor allem auch kostenoptimale Produkte bieten können. Daher wird in modernen Entwicklungsstrukturen wie dem Simultaneous Engineering der Berechnungsingenieur verstärkt bereits in der Konzeptionsphase von Bauteilentwicklungen mit einbezogen. Für eine effiziente Arbeitsweise ist dies zwingend nötig, dem Berechnungsingenieur zur Unterstützung beim Entwurf und in der Detailverbesserung, ergänzend zu den bewährten diskreten Berechnungsverfahren (FEM/BEM), Optimierungsalgorithmen zur Verfügung zu stellen. In der Industrie erfolgt die Formoptimierung bisher überwiegend im 2D-Bereich. Im dreidimensionalen Raum beschränkte man sich auf eine Dimensionierung von Balken- und Schalenstrukturen. Hier soll nun eine Möglichkeit zur Formoptimierung realer dreidimensionaler Strukturen vorgestellt werden, wobei insbesondere auf die Einbindung von fertigungstechnologischen und funktionsbedingten Randbedingungen eingegangen wird.

Am Institut für Maschinenkonstruktionslehre der Universität Karlsruhe wurde ein Ansatz zur Formoptimierung entwickelt. Das Grundprinzip besteht darin, daß man keinen mathematischen Optimierungsalgorithmus verwendet, sondern einen sehr einfachen Regler aufbaut. Die Eingangsgröße ist die lokale Beanspruchung des Bauteils, die Ausgangsgröße ist lokale Geometrieänderung. An Stellen hoher Beanspruchung „wächst“ das Bauteil, an weniger ausgelasteten Stellen kann die Struktur „schrumpfen“. Nach wenigen Zyklen erhält man eine beanspruchungsminimale Bauteilgestalt.

In den Regelalgorithmen ist das Wissen über die Physik des Optimierungsproblems implizit enthalten, der Regler besitzt quasi eine

Abb. 1 Nabenflansch: Geometrie und Lastfalldefinition



Intelligenz. Für den Bereich von mechanisch belasteten Bauteilen wurden neue Optimalitätskriterien entwickelt. Als Basis dienten die Arbeiten von Baud, Neuber, Schnack und Mattheck. Das gleiche Regelungsprinzip ist auch beim Wachstum von biologischen Strukturen anzutreffen.

Computerprogramm CAOSS

Das Programmsystem CAOSS® basiert auf dieser Strategie. Es ist ein Zusatzmodul zu FEM-Programmen zur Gestaltoptimierung von Bauteilen und auf verschiedenen Rechnerplattformen lauffähig – PC, Workstation (HP, SGI, IBM, DEC, SUN) und Vektorrechner (SNI VP600/S). Das Programmsystem CAOSS hat folgende Eigenschaften:

- die parameterfreie Problembeschreibung bedeutet eine Minimierung des Preprocessing-Aufwandes für die Optimierungsprozedur, das FE-Modell muß nicht parametrisiert sein,
- die Formfindung wird nicht durch die Wahl und Anzahl der Parameter beschränkt,
- die Konvergenzgeschwindigkeit und die Anzahl der notwendigen Iterationen ist nahezu unabhängig von der Anzahl der Designvariablen, so daß auch komplexe 3D-Bauteile optimiert werden können,
- einzelne Optimierungsschritte sind für den Anwender nachvollziehbar und verständlich,

weil die Optimalitätskriterien auf physikalischen Überlegungen basieren. Es stellt sich ein Lerneffekt ein, der bei Neukonstruktionen genutzt werden kann.

● mit CAOSS ist eine Beanspruchungs- und Gewichtsminimierung sowie Steifigkeitsmaximierungen von mechanisch belasteten Bauteilen möglich.

Beispiele zur 3D-Formoptimierung

Nabenflansch einer Pkw-Kupplung

Das hier vorgestellte tiefgezogene Stanzteil ist typisch für die Kfz-Zulieferindustrie. Derartige Teile lassen sich in Großserien kostengünstig herstellen, sie müssen jedoch funktionsbedingt umgeformt werden. Wie Abbildung 1 zeigt, wird der Nabenflansch wechselnd belastet. Da die Wechsellasten nicht symmetrisch sind, wird das Bauteil einer Wechselbiegebelastung unterworfen, deren Mittelspannung von Null verschieden ist. Die am höchsten belasteten achsnahen Fenster-ecken werden daher formoptimiert, wobei beide Lastfälle simultan berücksichtigt werden. Um das Bauteil fertigungs- und funktionsgerecht zu optimieren, müssen folgende Restriktionen berücksichtigt werden:

- der Flansch muß ein Stanzteil mit symmetrischen Fenstergeometrien bleiben,



- für eine NC-Werkzeugfertigung müssen die Stanzflächen glatte Übergänge haben,
- die beim Tiefziehen erzeugte Form muß erhalten bleiben,
- funktionsbedingt darf die Kontur das in der Abbildung 2 gekennzeichnete Sperrgebiet nicht schneiden.

Zur Formoptimierung wurde das Computerprogramm CAOSS benutzt. Zusätzlich benötigt man zur Strukturierung einen Preprozessor und zur Strukturanalyse ein FE-Programm. CAOSS besitzt derzeit Schnittstellen zu COSMOS/M und ANSYS, weitere Schnittstellen werden entwickelt. Die folgenden Berechnungen wurden mit dem FE-Programm ANSYS durchgeführt.

Bei einem Vergleich mit mathematischen Optimierern wird deutlich, wie einfach die Definition der Designvariablen ist. Eine Parameterbestimmung ist nicht notwendig. Die Auswahl der frei beweglichen Oberflächenknoten kann über geometrische Beziehungen erfolgen (Abb. 2). Auch die Funktionsrestriktion bezüglich des Sperrgebietes erfolgt bei dem

Programm CAOSS sehr einfach über eine Geometriedefinition. Die Ergebnisse in der Abbildung 3 zeigen, daß die Maximalspannung um ca. 17% reduziert werden konnte (bei 5 Iterationen). Die weitgehend homogene Spannungsverteilung an der Oberfläche des Variationsgebietes beweist, daß das Optimum schon annähernd erreicht ist. Es ist aber auch deutlich erkennbar, daß die Fertigungsrestriktion einer stetig differenzierbaren Oberflächenkontur nicht erfüllt werden konnte. Die optimierte Struktur besitzt noch einen Knick in der Oberfläche, ein fertigbares Bauteil muß also aufbauend auf den Optimierungsergebnissen überarbeitet werden.

Primärschwungmasse einer torsionsgedämpften Pkw-Kupplung

Um die Leistungsfähigkeit von CAOSS zu untersuchen, wurde die Formoptimierung einer kompletten Baugruppe untersucht. Das vollständige 3D-Modell besitzt ca. 30 000 Freiheitsgrade und berücksichtigt das geome-

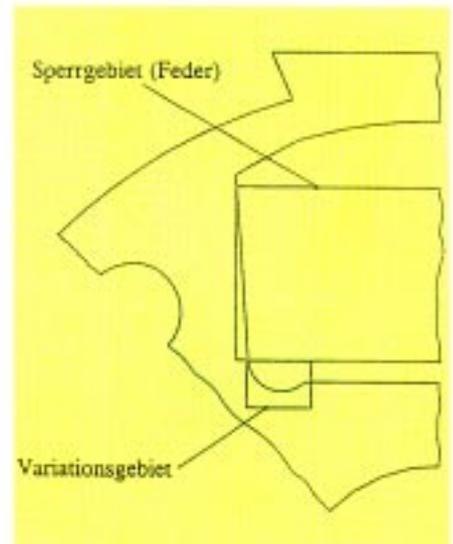
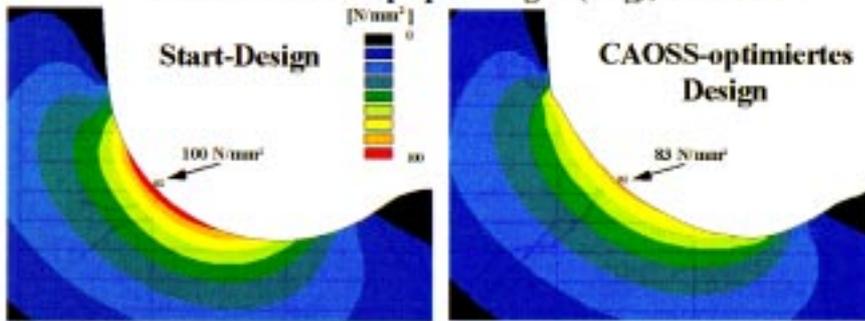
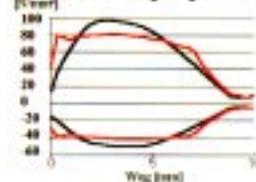


Abb. 2 Optimierung mit CAOSS: Definition der Wachstums- und Sperrgebiete

Verlauf der 1. Hauptspannungen (Zug), 1. Lastfall



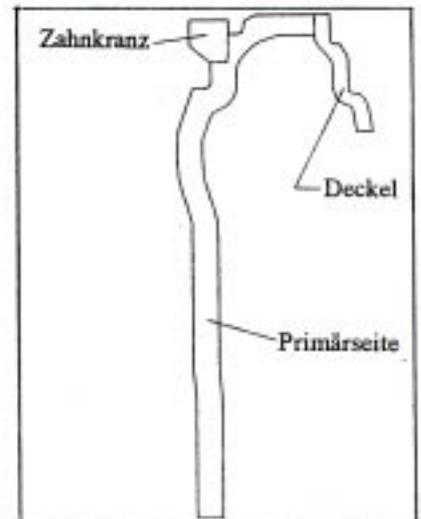
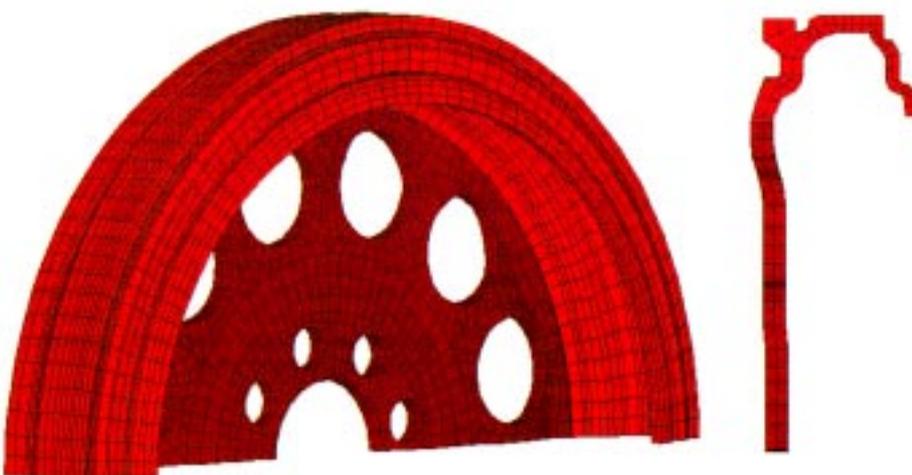
1. und 3. Hauptspannungen



trisch nichtlineare Strukturverhalten. Die Baugruppe besteht aus drei zusammenschweißten Teilen (Abb. 4). Die Primärseite und der Deckel sind Tiefziehteile, der Zahnkranz wird spanend bearbeitet. Die Primärschwungmasse wird wechselnd belastet. Durch die Rotation der Bauteile entstehen Fliehkräfte sowohl durch die Masse der Baugruppen selbst als auch durch Sekundärbauteile, die innerhalb der Baugruppe liegen. Zudem wirkt durch ein Fluid zwischen Primärseite und Deckel ein hydrostatischer Druck. Diesen Kräften wird zusätzlich ein wechselndes Drehmoment überlagert. Da die maximale Wechselbelastung in den Belüftungsbohrungen entsteht, wird deren Form optimiert,

Abb. 3 Optimierung mit CAOSS: Ergebnisse (v.l.n.r. oben: Ausgangsstruktur, CAOSS-optimierte Struktur ($\sigma_1 = -17\%$), unten: Geometrievergleich, Spannungsverlauf

Abb. 4 Primärseite: Geometrie



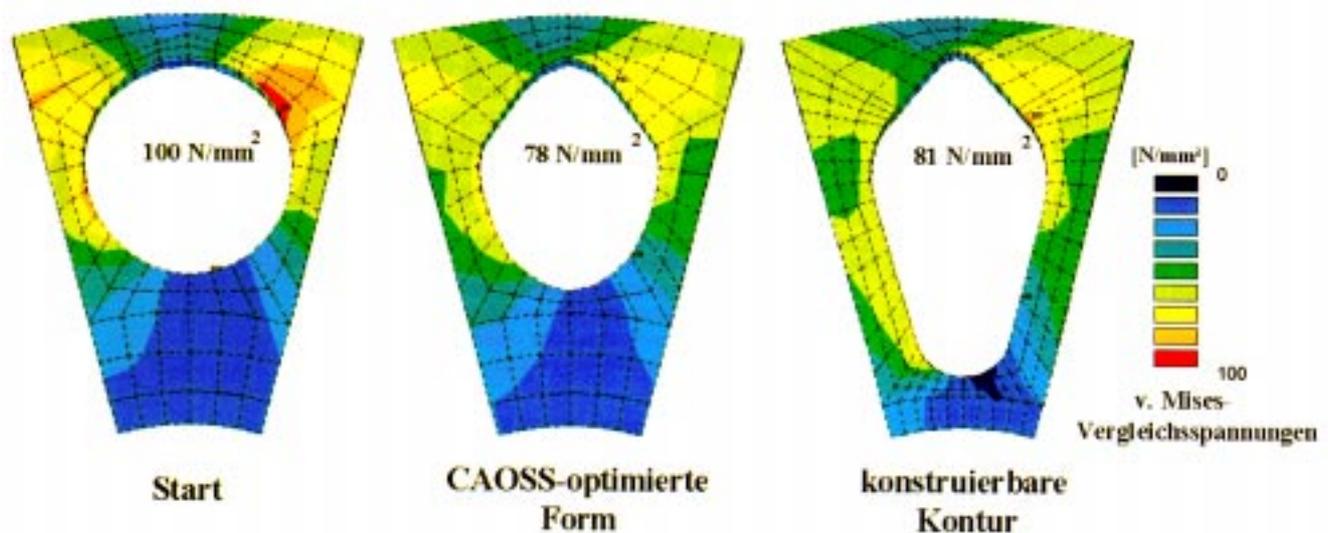


Abb. 5 Primärseite: Vergleich der Spannungsverläufe (v.l.n.r. Ausgangskontur, CAOSS-optimierte Kontur ($\sigma_{\max} = -22\%$), Konstruierbare Kontur ($\sigma_{\max} = -19\%$))

wobei funktionsbedingt eine möglichst große Lochfläche erwünscht ist. Fertigungs- und funktionstechnisch sind folgende Restriktionen zu beachten:

- Die Primärseite muß weiterhin als tiefgezogenes Stanzteil herstellbar sein,
- die Belüftungsbohrungen müssen identische Geometrien haben,
- die äußere Kontur der Primärseite darf sich nicht verändern.

Das Ziel der Optimierung war es hier, die Lochform derart zu verändern, daß die Wechselbelastung durch die beiden Lastfälle minimiert wird. Bei der Optimierung durften sich alle Ränder der Belüftungsöffnungen verschieben. Die Forderung nach einer symmetrischen Geometrie der Belüftungslöcher ließ sich über eine Kopplung der sich entsprechenden Knoten an den verschiedenen Öffnungen relativ leicht realisieren. Auch die Fertigungsrestriktion nach konstanter Bauteildicke konnte über eine Kopplung der Knotenverschiebungen über der Bauteildicke umgesetzt werden.

Nach 4 Iterationen lag folgendes Ergebnis vor: Wie die Abbildungen 5 und 6 zeigen, konnten die Maximalspannungen um ca. 22% reduziert werden. Eine Analyse des Spannungsverlaufes entlang des Lochrandes (Abb. 6) zeigt, daß die Spannungsspitzen der Originalstruktur zwar abgebaut wurden, eine vollständige Homogenisierung liegt jedoch noch nicht vor. Insbesondere der achsnahe Lochbereich wird relativ wenig aufgelastet. Um die Lochform weiter zu optimieren, wären mehr Iterationsschritte und ein feineres Elementnetz nötig. Da nach einer solchen Optimierung das Bauteil sowieso in eine konstruierbare Form gebracht werden mußte, wurde hier aufgrund der Optimierungsergebnisse eine neue Version des Bauteils erzeugt.

Hierdurch erhöhte sich das Beanspruchungsniveau gegenüber der CAOSS-optimierten Struktur nur geringfügig, die Fläche der Entlüftungsöffnungen vergrößerte sich jedoch beträchtlich.

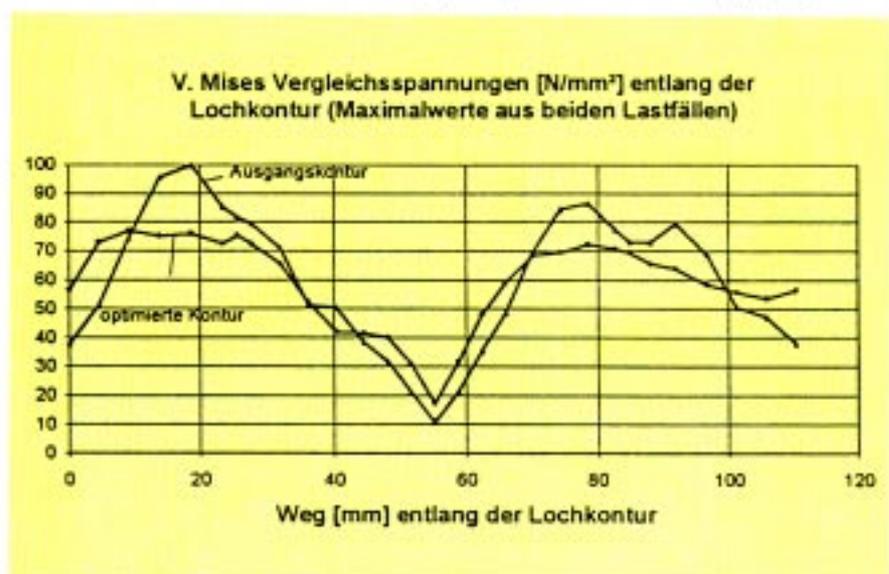


Abb. 6 Primärseite: Spannungsverläufe der Ausgangs- und optimierten Struktur

Erfahrungen mit dem Einsatz von CAOSS

Die Einarbeitung in die Theorie und die ersten Berechnungen anhand ausführlicher Unterlagen in CAOSS sind problemlos. Wurde die Philosophie der Optimierungsstrategie verstanden, lassen sich die integrierten Funktionalitäten sehr effizient einsetzen. Bei zweidimensionalen Problemen ist dies sehr schnell möglich. Der Aufwand bei 3D-Problemen ist wesentlich höher. Hier sind methodenspezifische Erfahrungen, die man an zwei- oder einfachen dreidimensionalen Problemen sammeln sollte, sehr von Vorteil. Probleme können am Übergang von Variationsgebieten und bei großen Geometrieänderungen auftreten. Bei geschicktem Einsatz der vorhandenen Möglichkeiten sind komplexe Probleme wirtschaftlich lösbar. Der Aufwand reduziert sich drastisch, wenn ähnliche Bauteile schon einmal optimiert wurden. Außerdem wird ein Lerneffekt beim Berechnungsingeni-

eur hervorgerufen. Bei Folgeprojekten, bei denen kein Optimierungsprogramm eingesetzt wurde, waren die Ergebnisse der von Hand nach demselben Prinzip veränderten Bauteile durchweg positiv. Die Beanspruchungshomogenisierung war jedoch nicht optimal, da die Spannungsreduktion aufgrund von relativ kleinen Verschiebungen oft unerwartet hoch ist. Deshalb ist eine „Von-Hand“-Optimierung problematisch. Die Optimalitätskriterien zur Beanspruchungsminimierung wurden zur Beurteilung des noch vorhandenen Optimierungspotentials benutzt. Dies ist für eine wirtschaftliche und ingenieurmäßige Arbeitsweise von großem Vorteil, man kann anhand des Spannungsverlaufes sehr gut abschätzen, ob sich ein weiterer Aufwand lohnt.

Weitere Informationen **Infografik 797**