

Überlegene Gusskonstruktionen dank Formoptimierung

Dr.-Ing. Th. Schmidt, Mölln

Algorithmen zur Form-Optimierung

Das Ziel der Form- oder Shape-Optimierung, die idealerweise in der Detaillierungsphase zum Einsatz kommt, ist die Vermeidung bzw. Reduzierung von Kerbspannungen, die in komplexen, hochbelasteten Bauteilen fast immer anzutreffen sind.

Die Algorithmen der überaus komplexen Software sind den Wachstumsprozessen in der Natur nachempfunden und gehen ursprünglich auf Arbeiten des 'Baum-Professors' C. Mattheck am Forschungszentrum Karlsruhe zurück. Sie werten die aus den Lasten und Randbedingungen resultierenden Spannungen an den im Optimierungsgebiet befindlichen Oberflächen-Knoten eines FEM-Modells aus. Diese werden mit dem gewünschten maximalen Spannungsniveau verglichen. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Spannung steuert anschließend die Verschiebung der Oberflächen-Knoten, so dass analog zu biologischen Systemen in überlasteten Bereichen Material aufgetragen wird. Dieser Prozess wird iterativ wiederholt, bis im gesamten Optimierungsbereich ein homogenes Spannungsniveau oder ein anderes Abbruchkriterium erreicht wird.

Da neben der Bauteilgeometrie die Lasten und Randbedingungen sehr starken Einfluss auf die Spannungsverhältnisse im Bauteil haben, wird die Formoptimierung primär für die Homogenisierung der Oberflächenspannungen an kompletten Bauteilen eingesetzt. Doch auch wiederkehrende Konstruktionselemente lassen sich mit diesem Werkzeug robuster gestalten.

Optimierung wiederkehrender Konstruktionselemente

T-förmiger Rippenübergang

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde von den Projektpartnern ein Bauteilkatalog mit in Gusskonstruktionen häufig wiederkehrenden Konstruktionselementen und dazugehörigen Lastfällen erstellt. Für die Fälle, bei denen die Kombination aus Geometrie und Belastung lokale Spannungsspitzen hervorruft, wurden unter Ausnutzung der gießtechnischen Möglichkeiten robuste Formen entwickelt. Exemplarisch sei ein Rippenübergang betrachtet, der bei Biegebeanspruchung einer ausgesprochenen Kerbwirkung ausgesetzt ist (Abbildung 1).

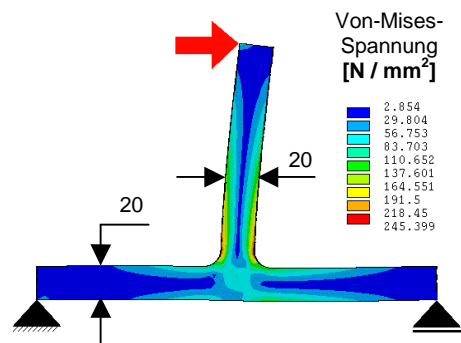


Abbildung 1: Rippenübergang mit Querkraft

Die Formoptimierung liefert hierfür einen Geometrievorschlagn mit vorgegebener, konstanter Oberflächenspannung (Abbildung 2). Per Erstarrungssimulation wird die Lage etwaiger Gefügeungängen bei ungünstigen Gießbedingungen berechnet (eingefärbter Bereich in Abbildung 3) und in einer weiteren Form-Optimierung berücksichtigt.

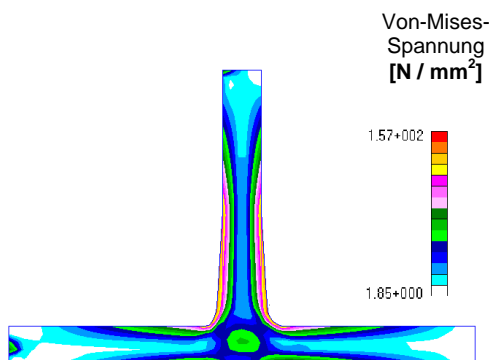


Abbildung 2 Formoptimierter Rippenübergang

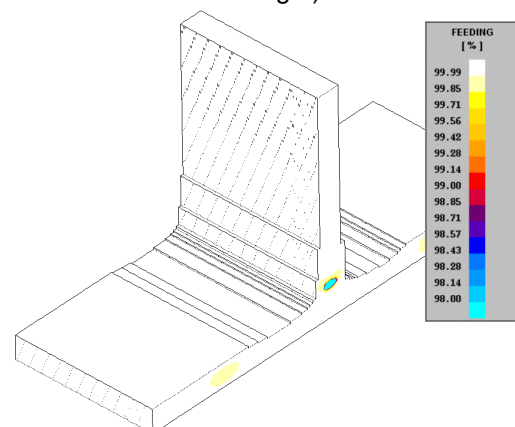


Abbildung 3: Vorhersage von Gefügeungängen per Erstarrungssimulation

Das dabei berechnete und anschließend für den handwerklich geprägten Modellbau geometrisch vereinfachte Profil weist eine ausgesprochene Robustheit gegenüber Gefügeungängen, Rohmaßtoleranzen und Eigenspannungen auf. Die Überlegenheit des optimierten Rippenübergangs bei hochbeanspruchten Konstruktionen gegenüber der konventionellen Verrundung geht deutlich aus Abbildung 4 hervor.

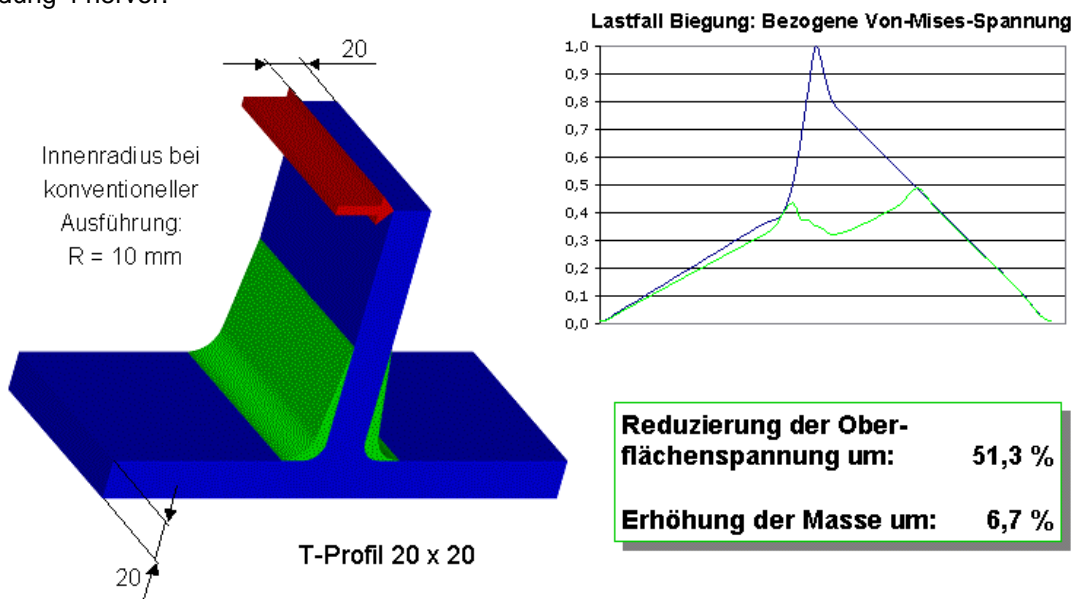


Abbildung 4: Optimierter Rippenübergang und Verlauf der Oberflächenspannung bei Querkraft

Einen noch größeren Nutzen weisen belastungsgerecht ausgeführte gegossene Konstruktionselemente gegenüber geschweißten Konstruktionen aus (Abbildung 5). Gemäß einer IIW-Empfehlung ist bei der Festigkeitsberechnung für den Schweißnahtübergang ein effektiver Kerbradius von 1mm anzusetzen. Die **Spitzenspannungen** in der Kehlnaht übertreffen das Spannungsniveau des optimierten Übergangs um **300%** ! Trotz des höheren E-Moduls von Stahl ($2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ gegenüber $1,7 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ bei EN-GJS-400) liegt auch die maximale **Verformung** (im vorliegenden Beispiel um immerhin **42%** !) und wegen der höheren Dichte von Stahl auch das **Gewicht** (um **3,8%**) über den Werten des optimierten Gusselements. Auch wenn sich diese Ergebnisse nicht vollständig auf komplexe Bauteile übertragen lassen wird dennoch deutlich, welches enorme Potenzial das Fertigungsverfahren Gießen in Kombination mit modernster Softwaretechnik für hochbelastete (Leichtbau-) Konstruktionen bietet.

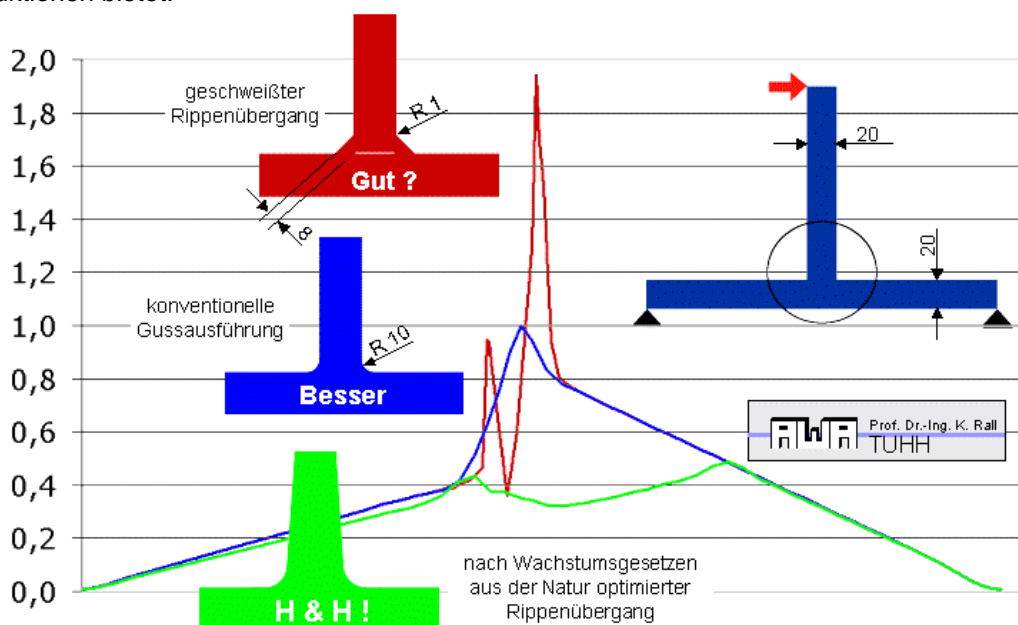


Abbildung 5: Vergleich Guss- versus Schweißkonstruktion / Normierte Spannungsverläufe

Montageöffnung

Das Einbringen von Montageöffnungen in höherbelasteten Wandbereichen eines Gussteils kann hohe Kerbspannungen zur Folge haben. Auch hier kann die Form-optimierung entscheidende Hinweise auf wirksame Maßnahmen zur Spannungs-reduktion liefern, wie das Beispiel einer Platte unter Zugbeanspruchung (Abbildung 6) zeigt.

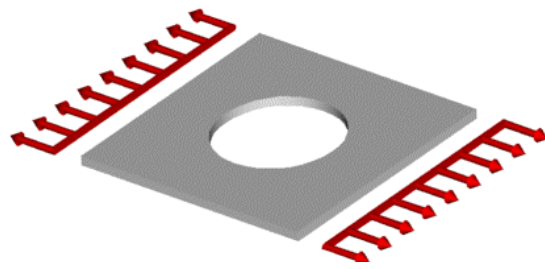


Abbildung 6: Lochplatte unter Zugbelastung
(Maße: 800mm x 800mm x 30mm, Ø: 400 mm)

Ausgangszustand:
 $\sigma_{\max} = 331 \text{ N/mm}^2$

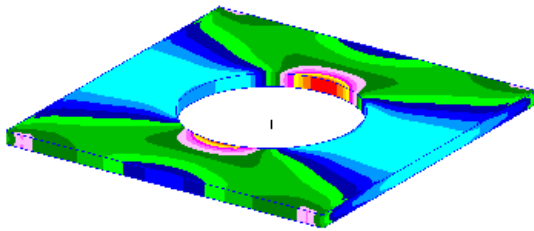


Abbildung 7: Von-Mises-Spannungen der Platte mit Kreisloch

Die durch den kreisförmigen Ausschnitt in der Platte verursachten Kerbspannungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

Wenn eine Einschnürung des Öffnungsquerschnitts aus Funktions- oder Montagegründen nicht akzeptiert werden kann, bietet das Angießen einer beidseitigen Verstärkung um den Ausschnitt herum einen praktikablen Weg zur Spannungsreduktion.

Dieses Konstruktionselement 'Wulst' wurde optimiert, wobei neben einem an der Wulstoberfläche zu erreichenden Spannungsniveau fertigungsvereinfachende Symmetriebedingungen vorgegeben wurden.

In der Innenfläche sinkt das Spannungsniveau um fast 30% bei unveränderter Öffnungsfläche und einem **Mehrgewicht** von **10%** (Abbildung 8).

Mit der gießgerechten Gestaltung des Konstruktionselements Wulst wird sich ein späterer Beitrag detaillierter befassen.

15. Iteration:
 $\sigma_{\max} = 239 \text{ N/mm}^2$
(- 28%)

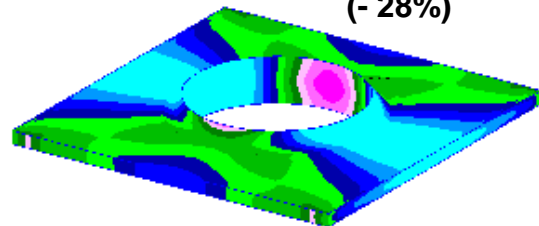


Abbildung 8: Platte mit Kreisloch und Wulst

Nicht nur für ausgesprochene Leichtbaukonstruktionen bietet sich die Modifikation der Öffnungskontur zwecks Erhöhung der Bauteilfestigkeit an, denn die Form der Öffnung hat erheblichen Einfluss auf die Kerbwirkung im belasteten Wandbereich.

Eine entsprechende Form-Optimierung wurde über eine Beschränkung der Knotenverschiebungen auf die Plattenebene gesteuert. Der ursprüngliche Kreisquerschnitt (Ø 400mm) verjüngt sich quer zur Belastungsrichtung auf 310 mm. Senkrecht dazu wächst sie überproportional, so dass sich die Fläche der Öffnung um 13% erhöht (Abbildung 9). Durch die optimierte Öffnungskontur wird die Kerbspannung bei konstanter Wanddicke und **4% Materialeinsparung** um weit über 40% gesenkt.

35. Iteration:
 $\sigma_{\max} = 185 \text{ N/mm}^2$
(- 44%)

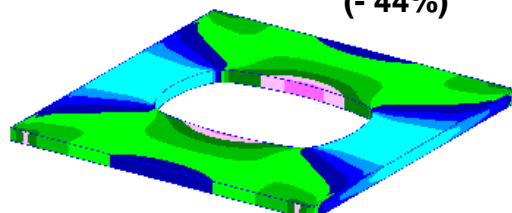


Abbildung 9: Optimierte Lochkontur

Optimierung einer Windkraftnabe

Als Beispiel für die Formoptimierung an einem komplexen Bauteil wurde eine 250MW-Windkraftnabe herangezogen, die in einem früheren Projekt bei Heidenreich & Harbeck entwickelt wurde und in größeren Stückzahlen gefertigt wird. Für einen Sonderlastfall mit Spannungskonzentrationen im Bereich der Montageöffnungen soll automatisch ein Designvorschlag mit drastisch reduzierten Spannungswerten generiert werden. Die Blattflansche und der mittlere Nabenbereich sind dabei von der Optimierung ausgenommen. Abbildung 10 zeigt die gleich skalierten Von-Mises-Spannungen für die Ausgangssituation und für das Ergebnis der 38. Iteration.

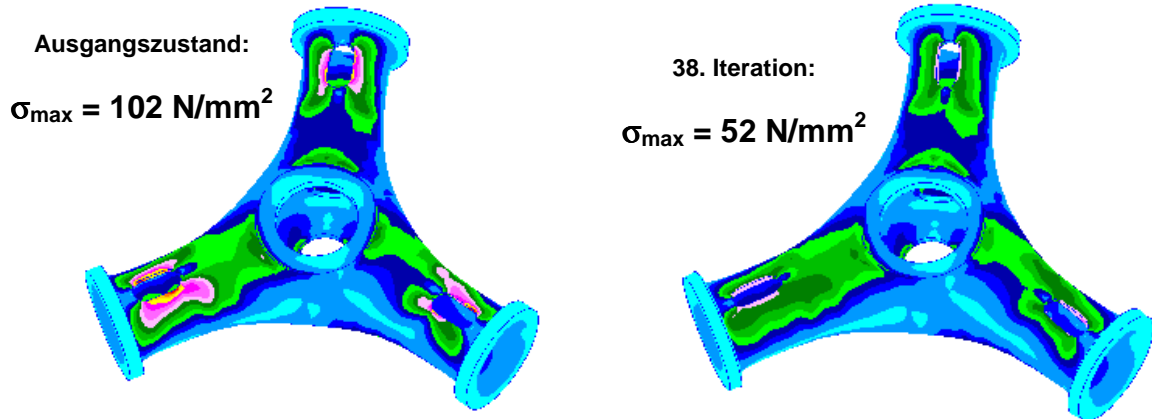


Abbildung 10: Von-Mises-Spannungen an der Oberfläche einer WKA-Nabe

Die fast 50%ige Spannungsreduktion wurde automatisch durch Aufdickungen im Randbereich der verjüngten und gleichzeitig leicht aus der Achse gedrehten Montageöffnung erreicht. In Abbildung 11 sind links die FEM-Netze vor (blau) und am Ende der Optimierung (rot) sowie rechts die Spannungen auf der Oberfläche des optimierten Bauteils dargestellt. Das FEM-Netz der Ausgangsgeometrie ist in den Bereichen mit automatisch vergrößerter Wandstärke verdeckt.

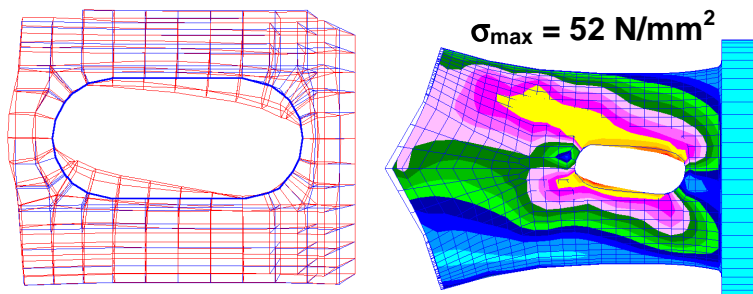


Abbildung 11: FEM-Netze um Montageöffnung

Bei der Umsetzung der Optimierungsergebnisse in reale, beanspruchungsgerecht ausgeführte Leichtbaukonstruktionen ist zunehmend von bisher üblichen Prozessen abzuwei-

chen. Wie dieses Beispiel erkennen lässt, führt der zukünftige Weg auch für größere Gussteile weg vom konventionellen Modellbau mit parallelen oder rotationssymmetrischen Oberflächen hin zu Freiformflächen und variablen, der Bauteilfunktion angepassten Wanddicken. Hierauf hat sich Heidenreich & Harbeck bereits vorbereitet.

Profitieren auch Sie von unseren Möglichkeiten ! Lassen Sie Ihre hochbelasteten Bauteile nach dem Stand der Technik entwickeln und berechnen, ohne selbst in teure Berechnungstools investieren zu müssen.

Denn überschlägige Auslegungen von höher beanspruchten Bauteilen sollten Sie tunlichst vermeiden. Im günstigsten Fall führt dies zu einer Überdimensionierung mit unnötig hohem Materialeinsatz und Mehrkosten z.B. für leistungsfähigere Antriebe. Gravierender ist jedoch die Underdimensionierung hochbelasteter Komponenten. Die häufig nicht akzeptierten Mehrkosten für eine fundierte FEM-Berechnung sind vernachlässigbar gegenüber dem immensen Schaden, der bei nicht ausreichenden Produkteigenschaften für Zulieferer und Abnehmer entstehen kann.