

Neue Methoden zur systematischen Optimierung großer, gegossener Bauteile

New Methods for a systematical Optimization of large castings

Ernst du Maire, Thorsten Schmidt, Heidenreich & Harbeck AG, Mölln

Die derzeitige konjunkturelle Situation zwingt den Maschinenbau insbesondere an den Hochlohn-Standorten, alle Verbesserungs- und Einsparpotentiale schnell zu nutzen und in marktfähige Produkte umzusetzen. Da ist es eigentlich erstaunlich, dass das Innovationspotential, das die nahezu unbegrenzte Formgestaltungsfähigkeit durch Gießen erlaubt, oft nicht genutzt wird. Sie erlaubt überraschende, funktionale und wirtschaftliche Vorteile, wenn die herkömmliche Arbeitsteilung zwischen Gießerei und dem Maschinenbaukunden grundlegend verändert wird. Die Zusammenarbeit muss im frühesten Entwicklungsstadium begonnen werden, weil nur in diesem frühesten Stadium die Unbegrenztheit der Formgestaltung durch Gießen (Bild 1) ausgeschöpft werden kann.



Bild 2: Qualität aus einem Guss: Zusammenfassung aller Verrichtungen unter einem Dach

konstruktionsbegleitender Berechnung fast immer die Überlegenheit gegossener Konstruktionen beweisen. Ca. 40 % unseres Jahresumsatzes wird mit Bauteilen gemacht, die vor unserer konstruktiven Überarbeitung Schweißteile oder Reaktionsharzbetonteile waren.

Wir streben an, bereits in der Konstruktionsphase die komplette Funktionalität und Herstellbarkeit rechnergestützt zu optimieren. Nicht selten werden über 20 konstruktive und produktionstechnische Variationen im Rechner durchgespielt. Bild 3 zeigt die Vorgehensweise.

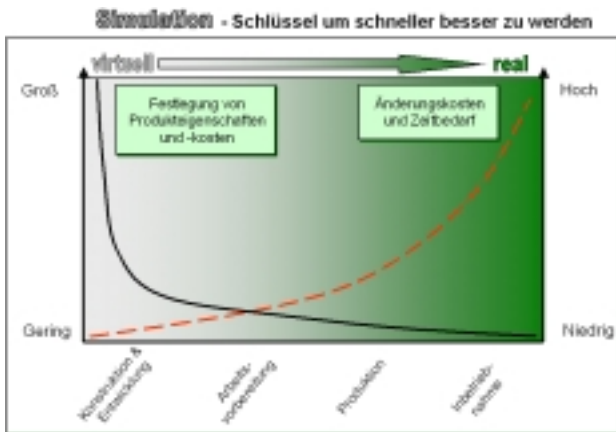


Bild 1: 80 % der Produkteigenschaften und -kosten werden in der Konstruktion festgelegt

Optimal ist es, wenn die Gießerei eine eigene Konstruktionsgruppe hat, die die gegossenen Komponenten konstruktionsbegleitend berechnen und so das funktionale und produktionstechnische Optimum finden kann. Im Hause des Verfassers ist eine solche Konstruktions- und Berechnungskompetenz seit über 10 Jahren neben der Gussherstellung und der Fähigkeit zur einbaufertigen Bearbeitung von großen, gegossenen Bauteilen etabliert. Weit über 200 Entwicklungsprojekte für alle Branchen des Maschinenbaus wurden seitdem erfolgreich durchgeführt. Bei der konstruktionsbegleitenden Berechnung werden gegenüber den ersten Entwürfen – egal, ob diese von vorhandenen Konstruktionen abgeleitet sind oder in unserem Haus entstehen - fast immer funktionale Schwachpunkte aufgedeckt und Funktionsverbesserungen bis ca. 50 %, bei gleichzeitiger Kostenreduzierung um durchschnittlich 20 %, erreicht. Im Wettbewerb zu Schweißkonstruktionen und Reaktionsharzbeton-Bauteilen konnten wir bei Ausschöpfung der formgestalterischen Möglichkeiten des Gießens und

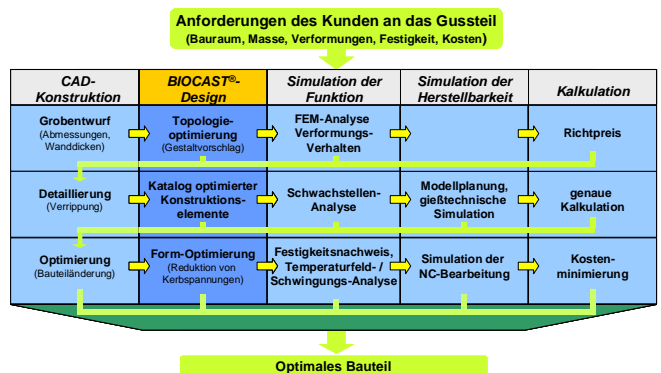
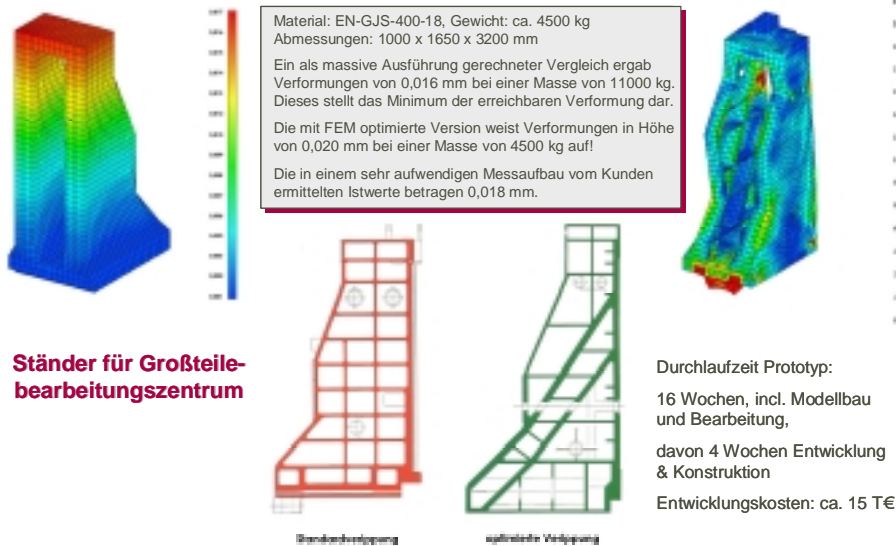


Bild 3: Ablaufdiagramm mit Übersicht der h u. h-Dienstleistungen für die Gussteilentwicklung

Entscheidend ist, dass neben der 3D-CAD-Konstruktionsdurchführung simultan FEM-Berechnungen, Schwingungs- und Wärmedurchgangsanalysen durchgeführt werden und uns die automatische Gestalt- (Topologie) und Form- (Shape) Optimierung bedarfsgerecht zur Verfügung steht. Mit den gleichen CAD-Daten wird konstruktionsbegleitend im frühest möglichen Stadium die gießtechnische Simulation, die Simulation der NC-Bearbeitung und eine begleitende Kalkulation durchgeführt.

Das ermöglicht die komplette virtuelle Entwicklung der Funktionalität und der Herstellbarkeit in einem extrem rationalen Entwicklungsprozess. Am Beispiel eines 3,2m hohen verfahrbaren Ständers für ein Großteilebearbeitungszentrum wird das Vorgehen erläutert (Bild 4).

zunächst als massiv ausgeführter Ständer mit einem Gewicht von 11 t betrachtet. Die berechneten Verformungswerte lagen mit 16 µm bereits im kritischen Bereich und stellten das absolute erreichbare Minimum dar. Im Laufe der Entwicklung wurden unzählige Varianten berechnet, indem immer wieder



Material dort angeordnet wurde, wo die FEM-Berechnung vergleichsweise hohe Spannungen zeigte, während in weniger beanspruchten Bauteilvolumen Material weggenommen werden konnte. Am Ende dieses Prozesses entstand eine von herkömmlichen Verrippungstypen stark abweichende, kraftflussgerechte Verrippung. Die so optimierte Version weist rechnerische Verformungen in Höhe von 20 µm bei einer Masse von nur noch 4.500 kg auf, deren Einhaltung in einem aufwändigen Messaufbau beim Kunden auch tatsächlich nachgewiesen werden konnten. An einem weiteren Beispiel (Bild 5) werden die systematische Vorgehensweise und die Vorteile des Innenbelassens von Kernsand erläutert.

Bild 4: Ständer für Großteile-Bearbeitungszentrum

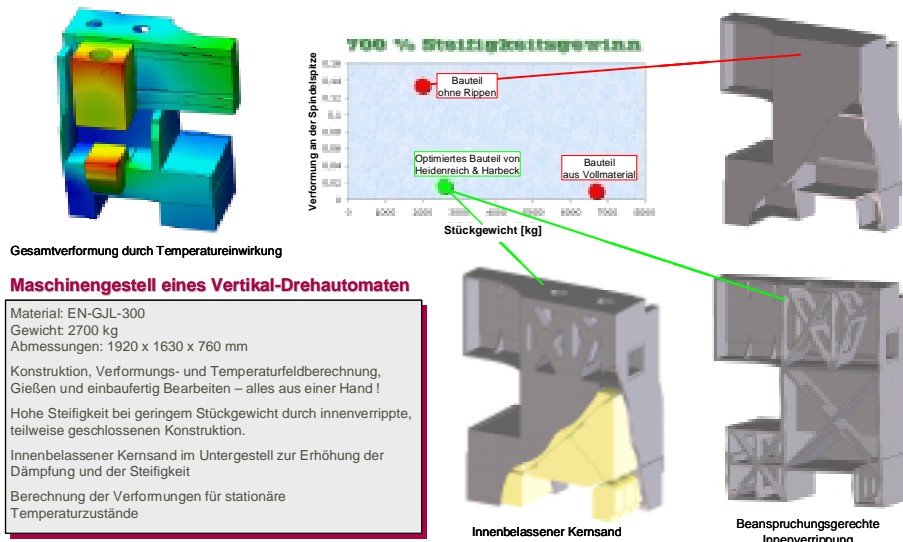


Bild 5: Maschinengestell eines Vertikaldrehautomaten

Trotzdem schöpfen die so gestalteten Bauformen die Formgebungsmöglichkeiten durch Gießen noch nicht voll aus. Die Natur sollte unser Lehrmeister sein! Sie hat in Millionen von Jahren belastungsoptimierte, anforderungsgerechte Bauformen geschaffen, die mit einem Minimum an Energie- und Materialeinsatz sich ideal an die jeweils geforderte Funktion anpassen. Bäume oder Knochen bauen selbstregelnd dort Material auf, wo Belastungsspitzen auftreten und dort wieder ab, wo die Materialeigenschaften nicht ausgelastet sind (Bild 6). So entstehen in der Natur spannungskonstante Oberflächen ohne die vielfach gefürchtete Kerbwirkung. Lokale Spannungsspitzen, die oft Auslöser für die

Unser Kunde garantierte bei dieser Neukonstruktion, dass die Verformung im obersten Bearbeitungsbereich bei maximaler Belastung kleiner als 20µm sein würde, was sich bald als extrem anspruchsvolle Forderung herausstellte. Denn der Bauraum für den Ständer war begrenzt und das Bauteilgewicht wegen der hohen Bewegungsgeschwindigkeiten gering zu halten. Der Heidenreich & Harbeck AG wurde die Aufgabe übertragen, diesen Ständer zu konstruieren und durch konstruktionsbegleitende FEM-Berechnungen zu optimieren. Um sicher zu gehen, dass die Aufgabe überhaupt lösbar war, wurde der gesamte verfügbare Bauraum

Rissbildung bei dynamischer Beanspruchung sind, werden in biologischen Strukturen vermieden.

Am Beispiel der Optimierung eines Durchbruches in einer auf Zug belasteten Platte kann man die überragenden Ergebnisse der Form- (Shape) Optimierung erkennen (Bild 7). Die praktische Bedeutung wird bei der Optimierung des Durchbruches einer Montageöffnung in einer Windkraftnabe verdeutlicht (Bild 8).

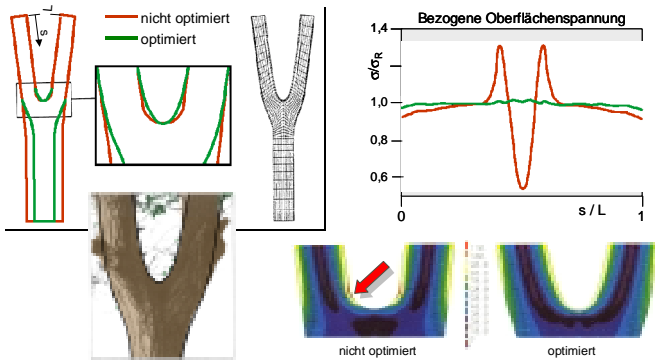


Bild 6: Formoptimierung an einer Stütze (nach Prof. C. Mattheck)

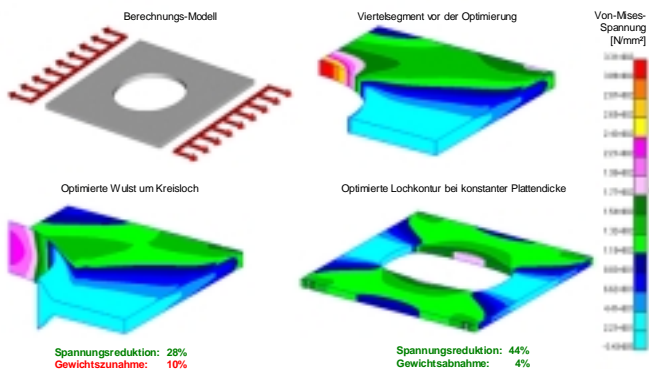


Bild 7: Formoptimierung an einer Lochplatte

Bei dieser Nabe, die im Hause des Verfassers konstruiert und einschließlich aller für die Zulassung erforderlichen Festigkeitsnachweise berechnet wurde, hätte eine konstruktionsbegleitende gießtechnische Simulation (Bild 9) wesentliche weitere Optimierungen erschlossen.

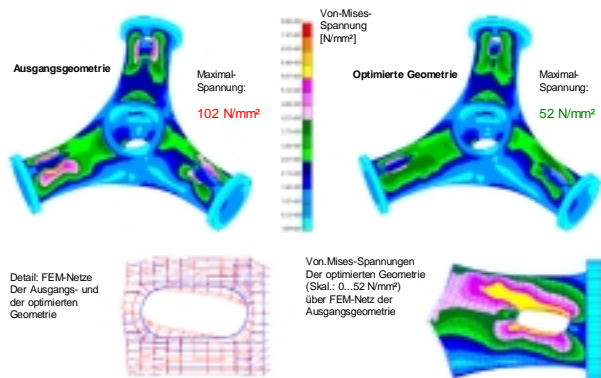


Bild 8: Formoptimierung der Montageöffnung an einer Windkraftnabe



Bild 9: Gießtechnische Simulation einer Windkraftnabe (EN-GJS-400-18, Gewicht: 1.800 kg)

Durch gleichzeitige Kenntnis von gießtechnischen Problemzonen und der lokalen Ausnutzung der physikalischen Werkstoffeigenschaften durch fundierte FEM-Berechnungen würden z.B. *ungleichmäßige* Wanddicken und lokal begrenzte *maßgeschneiderte* Prüfvorschriften entstehen können. Wenn dann noch kritische Kerbwirkungen durch die Formoptimierung nach spannungskonstanten Oberflächen sicher vermieden werden können, sind auch nach Einschätzung der Abnahmegesellschaften Reduzierungen von Sicherheitsbeiwerten um 30-50% möglich, was zu entsprechender Gewichtsreduzierung führen könnte!

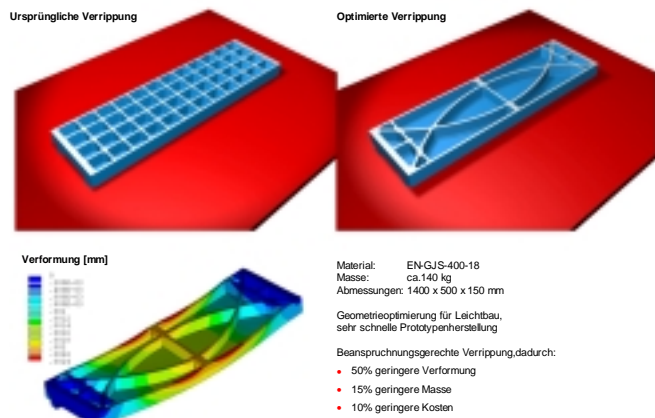


Bild 10: Manuelle Topologieoptimierung des Schlittens einer HSC-Fräsmaschine

Bei großen Konstruktionsteilen mit komplexen Funktionen und Belastungsstrukturen stellt es für den Konstrukteur immer wieder eine große Herausforderung und schwierige Aufgabe dar, die optimale Gestalt (Topologie) zu finden. Hier haben wir Rechenprogramme im Einsatz, die für einen vorgegebenen Bauraum mit eingepprägten äußeren Lasten Gestaltvorschläge ermitteln. In mehreren Iterationsschritten baut der Optimierungsalgorithmus, ähnlich dem Vorbild in der Natur, das wenig belastete Material ab, bis das Zielgewicht erreicht ist. Die dabei entstehenden Gestaltvorschläge zeichnen sich durch maximale Steifigkeit aus. Am Beispiel eines Hochgeschwindigkeitsschlittens in der konventionellen Ausführung und dessen Optimierung 'von Hand' (Bild 10) wird im Vergleich zur automatischen Topologie-Optimierung deutlich, wie groß die wirtschaftlichen Vorteile sind (Bild 11).

Am Beispiel der Konstruktion eines großen Maschinenbettes wird die Integration der Topologie-Optimierung in unserem Gestaltfindungsprozess verdeutlicht (Bild 12). Diese Methode zur systematischen, rechnergestützten Optimierung großer, gegossener Bauteile in funktionaler und produktionstechnischer Hinsicht werden – wohl weil die rechen-technischen Möglichkeiten erst seit kurzem zur Verfügung stehen - bisher noch erstaunlich wenig genutzt. Bei großen, komplexen Bauteilen, die noch nicht konstruktionsbegleitend berechnet wurden, kommen wir in 80 - 90 % der Fälle zu dem Ergebnis, dass bei erheblichen funktionalen Verbesserungen Kosteneinsparungspotentiale von mindestens 20 % erschlossen werden können.

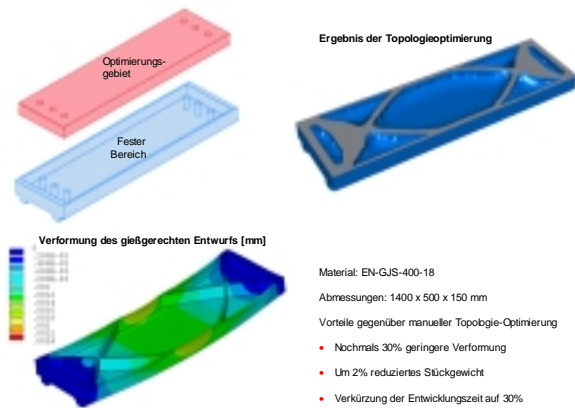


Bild 11: Automatische Topologieoptimierung des Schlittens einer HSC-Fräsmaschine mit TOSCA®

Eigentlich ist es unverantwortlich, dass diese Optimierung am virtuellen Prototypen, die gleichzeitig eine große Absicherung der gewünschten Funktionalität und Herstellbarkeit darstellt, so wenig genutzt wird. Es ist Stand der Technik und fahrlässig, auf diese Absicherung zu verzichten. Dabei kann der konstruktive und rechentechnische Aufwand durchaus an die erwartete Stückzahl angepasst werden. Meistens können schon signifikante Verbesserungen und Einsparungen mit einem Konstruktions- und Berechnungsaufwand, der nur das 2- bis 3-fache des Stückpreises eines Großussteils beinhaltet, erreicht werden.

Die Komplexität des Entwicklungsprozesses nimmt zwar zu, wenn konstruktionsbegleitend neben der Funktionalität ebenfalls die Herstellbarkeit optimiert wird. Den höheren

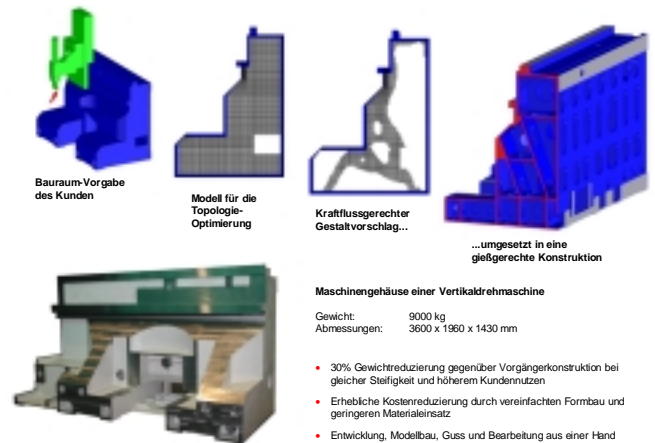


Bild 12: Topologieoptimiertes Drehmaschinenbett (Optimierungssoftware: SKO)

Aufwand rechtfertigt ein minimiertes Fehler-, Kosten- und Terminrisiko bei der Produktion, da wir neben der Verantwortung für die richtige Durchführung der Rechnung auch die Verantwortung für Termin und Preis übernehmen. Dieser Mehraufwand und die komplette virtuelle Erprobung in der Konstruktion führt nach unseren Erfahrungen letztlich immer auch zu einer Beschleunigung des Konstruktionsprozesses und der Entscheidungen, die in jedem Entwicklungsprozess gemeinsam getroffen werden müssen, da alle Fakten quantitativ nachvollziehbar sind und so zu Sachfragen werden, die schnell entschieden werden können. Insgesamt führt die rechnergestützte Optimierung in der Konstruktion immer zu einer erheblichen Verkürzung der Gesamtzeit vom Konstruktionsbeginn bis zur einbaufertigen Komponente.

Zusammenfassung

- Zunehmender Wettbewerbsdruck zwingt Gießereien und ihre Abnehmer zur intensiven Suche nach neuen Methoden, um schneller besser zu werden.
- Die größte Chance des Gießens ist die nahezu unbegrenzte Formgestaltungsfähigkeit. Sie kann nur in funktionale und wirtschaftliche Vorteile umgesetzt werden, wenn die herkömmliche Arbeitsteilung zwischen Gießerei und Kunde grundlegend verändert wird. Die Gießerei muss sich vom Rohteilelieferanten zum Innovations- und Entwicklungspartner, der eigenständig Konstruktionsaufgaben optimal durchführen kann, profilieren.
- Die ideale Funktionalität und die optimale Herstellbarkeit sollten heute zeitgleich zum Entwicklungsprozess simuliert werden. Die sinnvolle Koppelung von CAD/FEM/gießtechnische Simulation und Simulation der Bearbeitung führt schnell zu besseren Lösungen.
- Die Natur ist unser Vorbild. Die systematische Einbindung von Gestalt- und Formoptimierung in den Entwicklungsprozess führt zu völlig neuen Gestaltungsregeln und ergibt einen nicht versiegenden Quell von Innovationen.
- Ein systematischer Einsatz derartiger Softwarewerkzeuge in der Entwicklung und der schnellen Prototypenherstellung bringt neue Erfahrung und Ergebnisse.
- Einige spezielle konstruktive Möglichkeiten für die funktionsoptimierte Gestaltung von Großussteilen werden noch erstaunlich wenig genutzt.
- Durch Entwicklungspartnerschaft können Gießereien und ihre Abnehmer gemeinsam schneller besser werden.