

Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung

Michael Frisch, Andreas Dörnhöfer, Florian Nützel, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth

Email: michael.frisch@uni-bayreuth.de; Internet: [http:// www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de](http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de)

Inhalt: Die Integration von Fertigungsrestriktionen in den Topologieoptimierungsablauf ermöglicht es dem Benutzer, ein optimiertes und zugleich fertigungsgerechtes Bauteil zu erstellen. Kommerzielle Optimierungsprogramme stellen bereits heute eine Auswahl an Restriktionen für die Fertigung zur Verfügung. Nur für wenige Fertigungsverfahren sind diese Fertigungsrestriktionen jedoch direkt wählbar. Der Großteil der Fertigungsverfahren kann indirekt über eine Kombination von Fertigungsrestriktionen auf Kosten der Rechenzeit und tatsächlichen Wirksamkeit definiert werden. Andere Fertigungsverfahren, wie z.B. Fräsen, Drehen oder Sintern, sind bisher nicht über Restriktionen in der Optimierung berücksichtigt. Auch fehlen quantitative Angaben zur normgerechten Gestaltung für unterschiedliche Werkstoffe bei gleichem Fertigungsverfahren. Eine direkte Einbindung dieser Punkte in Optimierungsprogramme würde den Entwicklungsprozess verkürzen und verbessern.

Abstract: The integration of manufacturing constraints for topology optimization allows the user to create a part, which is optimal and suitable for production. A range selection of manufacturing constraints exists in commercial tools. But the choice for direct constraints of the manufacturing process is limited: Most of the constraints for the manufacturing process can be reached by an indirect combination of other constraints. Disadvantages for such combinations are the calculating time and the efficiency of this procedure. Other manufacturing practices like milling, rotating or sintering are not integrated in the process of optimization, yet. Even quantitative data for a standardized structuring of different materials for the same manufacturing process are missing. To improve and shorten the process of development a direct integration of these items is desirable.

Stichwörter: Topologieoptimierung, Fertigungsrestriktionen, Fertigungsverfahren

Keywords: Topology optimization, Manufacturing constraints, Manufacturing process

1 Einleitung

Eine hohe Produktivität bei der Entwicklung und Fertigung ist für viele Unternehmen wettbewerbsentscheidend. Wichtige Merkmale, um diese zu steigern, sind z.B. die Einsparung von Materialkosten und die Verringerung von Entwicklungszeiten. Je nach Fertigungsprozess besteht die Möglichkeit, mittels Kostenwachstumsgesetzen aufzuzeigen, wie die Kosten der Fertigung eines Bauteils variieren. Dabei kann beispielsweise das Verhältnis der

Materialeinzelkosten und Fertigungseinzelkosten für den Grundentwurf berechnet und analysiert werden [1]. Aspekte bei der Entwicklung eines neuen Produktes, die heute zum Stand der Technik zählen, sind die Konstruktion mittels CAD-Werkzeugen (Computer Aided Design) [2] sowie die anschließende numerische Simulation [3],[4]. Ein geeignetes Mittel, um Iterationen aus virtuellen und realen Prototypen bei der Entwicklung zu reduzieren, ist der Einsatz von Software zur Strukturoptimierung [5]. Die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen in den mathematischen Optimierungsalgorithmen hilft dabei, den konstruktiven und fertigungstechnischen Prozess deutlich zu beschleunigen, Materialkosten zu senken und so die Produktivität zu steigern.

2 Topologieoptimierung

Eine Möglichkeit zur automatisierten Erzeugung einer „optimalen“ Bauteilgeometrie im virtuellen Entwicklungsprozess ist die Topologieoptimierung. Diese ist ein Teilgebiet der Strukturoptimierung und beinhaltet eine Synthese aus Finite-Elemente-Analyse (FEA), Optimierungsalgorithmen sowie der Einbindung von Restriktionen zur Fertigung [6].

In der Topologieoptimierung können Zielfunktionen, wie z.B. Steifigkeit, Eigenfrequenzen oder Gewicht durch Änderung der Designvariablen (z.B. Elementdichten) und unter Berücksichtigung von Randbedingungen (z.B. Bauteilvolumen, Verschiebungen oder Fertigungsrandbedingungen) maximiert oder minimiert werden [5],[7]. Für die Lösung des Optimierungsproblems können u.a. Homogenisierungsverfahren, wie bspw. der SIMP-Ansatz (Solid Isotropic Material Penalisation) [7], oder empirische Algorithmen, wie z.B. der SKO-Ansatz (Soft Kill Option) [8] Verwendung finden.

Abhängig von Optimierungsverfahren, Implementierung und Software unterscheiden sich die Ergebnisse von Topologieoptimierungsprogrammen z.T. deutlich [5]. Neben bekannten und weitverbreiteten kommerziellen Tools gibt es zahlreiche zur freien Verfügung stehende, wissenschaftliche Algorithmen [9],[10], die als Basis für eigene Weiterentwicklungen dienen können [11].

3 Fertigungsrandbedingungen

Fertigungsgerechtes Gestalten strebt durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie eine anforderungsgemäße Einhaltung fertigungsabhängiger Qualitätsmerkmale an [1]. Jeder Werkstoff besitzt demnach funktionsbestim-

mende Merkmale, die in Kombination mit dem jeweiligen Fertigungsverfahren unter genormten Restriktionen bei der Herstellung berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden unterschiedliche Fertigungsverfahren sowie deren direkte Einbindung in den Topologieoptimierungsprozess über Fertigungsrandbedingungen exemplarisch aufgezeigt.

3.1 Fertigung

Für eine fertigungs- und beanspruchungsorientierte Gestaltung gibt es, je nach Werkstoff und Prozess, gemäß [12], zahlreiche Gestaltungsrichtlinien (Bild 1). Diese Richtlinien lassen sich in Hinweise, Empfehlungen und Vorgaben untergliedern. Am Beispiel von Gussteilen können Gestaltungsrichtlinien anschaulich verdeutlicht werden. So sollten bereits in der Konstruktion Aushebeschrägen festgesetzt, scharfe Kanten vermieden und Wanddicken nur in zulässigen Grenzen modelliert werden. Neben einer modellformgerechten Gestaltung müssen auch die Werkzeugausläufe im Fokus stehen.

| | | Fertigungsverfahren | | | | | | |
|---|--------------------------------------|---------------------|-------|-----------|---------|--------|--------|---------|
| | | Guss | Stanz | Schneiden | Pressen | Drehen | Fräsen | Sintern |
| Randbedingungen in der Fertigung | Entformungs-schrägen | X | X | X | X | / | / | X |
| | Unterschnitte/ Hinterschneldungen | X | X | X | X | X | X | X |
| | Winkelmaße | / | X | / | / | X | X | / |
| | Wanddickenmaße | X | X | / | X | X | X | X |
| | Symmetrische Konturen | X | X | X | X | X | X | X |
| | Tiefenmaße | X | X | / | X | X | X | X |
| | Schleifbare Querschnitte | X | X | X | X | X | X | X |
| | Freischnitt / -stich | / | / | / | / | X | X | / |

Bild 1: Zu berücksichtigende Fertigungsrandbedingungen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens

Qualitative Formulierungen sind in den DIN-Taschenbücher 454 und 455 explizit beschrieben. So werden anhand des Beispiels Guss die Formschrägen für innere und äußere Flächen an Modellen sowie an Kernmarken je nach Höhe mit unterschiedlichen Schrägenwinkeln angegeben [16]. Weiterführend sind für unterschiedliche, gießbare Werkstoffe (z.B. Stahlguss, Temperguss, Gusseisen mit Kugelgraphit oder Lamellengraphit) Abmaße für Dicken (Wanddicken, Stege, Rippen) vorgeschrieben [14],[15]. Für andere Fertigungsverfahren, wie z.B. Pressen oder Umformen, sind analog zum Guss ebenfalls Richtlinien, Normen und Empfehlungen mit Konstruktionshinweisen verfügbar.

3.2 Topologieoptimierung

Um eine schnelle und automatisierte Umsetzbarkeit von Gestaltungsrichtlinien im virtuellen Konstruktionsprozess zu gewährleisten, ist deren direkte Berücksichtigung in der Bauteilsynthese durch Topologieoptimierung notwendig. Nur so lassen sich manuelle Iterationen auf Kosten von Entwicklungszeit und Optimierungsergebnis vermeiden. Fertigungsrestriktionen sind in begrenztem Maße bereits heute in kommerziellen Topologieoptimierungsprogrammen integriert. Deren Anwendung setzt jedoch gerade bei realen Praxisbeispielen oft Expertenwissen voraus. Die genaue Funktionsweise und die Implementierung derartiger Restriktionen im Code sind in der Literatur nur vereinzelt beschrieben. So befassen sich z.B. *Zou et al.* mit Herstellungs- und Bearbeitungsrandbedingungen, die dabei helfen sollen Bauteilkonturen ohne eingeschlossenen Hohlraum zu erzeugen und symmetrische Anordnungen bei der Optimierung zu berücksichtigen [22]. Rippenmodellierungen zur Versteifung werden von *Harzheim* erörtert und ein Vergleich von Gussrandbedingungen bei kommerziellen Tools wird dargestellt [18],[19]. Einen neuen Ansatz zur Einbindung von Gussrestriktionen mittels einer Heaviside-Design-Parametrisierung zeigt *Gersborg*, um die Anzahl an Designvariablen zu minimieren und somit die Berechnungszeit zu verkürzen [21]. Fertigungsrestriktionen werden bei kommerziellen Tools vorrangig von der Anwenderseite aus betrachtet [23],[24],[25]. Genauere Informationen über Implementierungen sind meist nicht bekannt.

Anhand zweier weit verbreiteter Optimierungsprogramme wurden exemplarisch die Funktion und Anwendbarkeit von Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung untersucht (Bild 2).

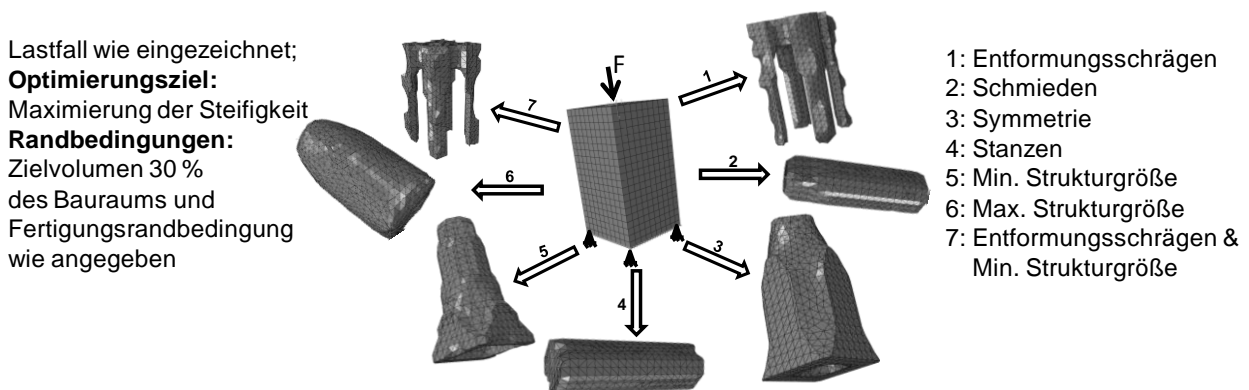


Bild 2: Topologieoptimierung unter Fertigungsrestriktionen bei einem einfachen Testbeispiel

Diese an einfachen Testbeispielen und realen Bauteilen durchgeführten Beispielrechnungen zeigen, dass die in Topologieoptimierungsprogrammen integrierten direkten Restriktionen einzeln angewendet nicht alle gängigen Fertigungsverfahren abdecken (Bild 3). Durch Kombination von mehreren direkten Restriktionen wurde versucht, eine indirekte Berücksichtigung dieser Fertigungsverfahren zu erzielen.

| | | Fertigungsverfahren | | | | | | |
|---|---------------------------|---------------------|---------|-----------|---------|--------|--------|---------|
| | | Gießen | Stanzan | Schmieden | Pressen | Drehen | Fräsen | Sintern |
| Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung | Minimale Strukturgröße | X | / | / | ⊠ | / | / | ⊠ |
| | Maximale Strukturgröße | X | / | / | ⊠ | / | / | ⊠ |
| | Entformungs- richtung | X | X | X | ⊠ | / | / | ⊠ |
| | Symmetrie | X | X | X | ⊠ | ⊠ | ⊠ | ⊠ |
| | Fixierte Elemente | X | X | X | ⊠ | ⊠ | ⊠ | ⊠ |

Bild 3: Direkte Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung

Bei den untersuchten klassischen Fertigungsverfahren, wie z.B. Strangpressen, Spritzgießen, Fräsen, Drehen, Gesenkformen, Pressen oder auch neuen generativen Verfahren wie z.B. Lasersintern gelingt dies z.T. nur partiell oder mit unbefriedigendem Ergebnis. Zum einen sind einige direkte Restriktionen gar nicht oder in nicht ausreichendem Maße verfügbar (Berücksichtigung der Zustellung bei Fräsbearbeitung), zum anderen ist eine Kombination unterschiedlicher Restriktionen in einem Optimierungsprozess nur eingeschränkt möglich, da teilweise explizit durch die Software ausgeschlossen, teilweise durch die schlechte Güte des Optimierungsergebnisses und die lange Berechnungszeit nicht sinnvoll. Sind in einem Programm verschiedene Optimierungsalgorithmen vorhanden, so sind darüber hinaus auch nicht alle Restriktionen damit kombinierbar [23]. Die sinnvolle Anwendung und Kombination der direkten Restriktionen verlangt angesichts dieser Schwierigkeiten nach Expertenwissen und Erfahrung.

Ein Lösungsansatz dafür könnte daraus bestehen, alle vorhandenen Restriktionen des Optimierungsprogramms sowie die für zahlreiche Fertigungsverfahren benötigten direkten Restriktionen und Kombinationen daraus in eine benutzerfreundliche und einfach bedienbare GUI (Graphical User Interface) einzubinden. *Alber-Laukant* beschreibt für die FEA ein solches Modell, welches dem Benutzer eine intuitive Hilfe und Vereinfachung der Simula-

tion bietet [17]. Dieses Beispiel kann als Grundlage für den Einsatz in der Topologieoptimierung mit Fertigungsrandbedingungen dienen. Der Benutzer soll nach Definition der Zielfunktion und der Designvariablen das Fertigungsverfahren und den Werkstoff für das zu optimierende Bauteil auswählen können. Bei der Selektion des Verfahrens können dabei die zu berücksichtigten Restriktionen nach Norm (z.B. Rundungs-, Tiefen-, Winkeltoleranzen, Abmessungsgrenzen und -verhältnisse, Freistiche, Fräsflächen, etc.) in einer Maske eingegeben und die Randbedingungen dem Bauraum bzw. den restriktiven Oberflächen zugewiesen werden. Durch die Logik der GUI werden dem Benutzer nur sinnvolle und nach Norm kombinierbare Restriktionen vorgeschlagen und quantitative Werte empfohlen. Auf diese Weise wird die Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens in der Topologieoptimierung auch ohne Expertenwissen möglich.

Die optimierten Ergebnisse der Topologieoptimierung sind nicht geglättet und weisen eine zerklüftete Elementstruktur an der Oberfläche auf. Dieses Resultat soll durch eine nachgeschaltete Glättung verbessert werden. Ein aktuell noch nicht zufrieden stellend gelöster und nach wie vor notwendiger Punkt in der Prozesskette ist die manuelle Neumodellierung des optimierten Bauteils im CAD-System [26]. Das Optimierungsergebnis muss dabei per Schnittstelle in das CAD-Programm als grafische Vorlage überführt werden. Hier gestaltet der Konstrukteur die optimierte Struktur fertigungsgerecht nach und übergibt das virtuelle Bauteil dem Fertigungsprozess. Durch eine direkte Berücksichtigung der Fertigungsrandbedingungen in der Topologieoptimierung kann dieser Schritt zwar nicht vermieden werden, der Aufwand zur Neumodellierung reduziert sich jedoch durch größere Modellnähe zwischen Optimierungsergebnis mit bereits berücksichtigtem Fertigungsverfahren und Neumodell drastisch. Darüber hinaus weist das Neumodell meist Bauteileigenschaften auf, die näher am rechnerischen Optimum liegen als bei einer alleinigen Berücksichtigung der Fertigung durch den Konstrukteur.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um Fertigungskosten und Materialbedarf im Herstellprozess zu minimieren, ist die Simulation mit Hilfe der Topologieoptimierung ein geeignetes Mittel. Die direkte Berücksichtigung des gewünschten Fertigungsverfahrens im Optimierungsprozess hilft dabei, die Integration in die Prozesskette deutlich zu verbessern. Einzelne Restriktionen wie Entformungsrichtungen, minimale und maximale Größenanordnungen oder Symmetrieeigenschaften sind

in kommerziellen Programmen bereits heute verfügbar. Je nach Anwendung können diese jedoch nur sehr allgemeingültig definiert werden. Reale Fertigungsverfahren erfordern oft auch nicht nur die Anwendung einer einzelnen Restriktion, sondern die Kombination aus mehreren. Eine gezielte Auswahl des Fertigungsverfahrens, wie z.B. Fräsen, Drehen oder Strangpressen mit einer kontextsensitiven Wahl von Restriktionen und quantitativen Parametern nach definierten Normen und Richtlinien ist bisher nicht möglich. Dies könnte durch die Einbindung in eine GUI verbessert werden, die darüber hinaus eine Auswahl an Fertigungsrandbedingungen mit quantitativen Normmaßen beinhaltet und diese in die Optimierung integriert. Die Kombination von einzelnen Restriktionen in einem Optimierungsschritt ist bereits jetzt möglich, aber aufgrund von Ergebnislänge und Rechenzeit nicht in jedem Fall zielführend. Gezielte Verbesserungen in der Implementierung der Restriktionen unter dem Aspekt bestimmter Kombinationen erscheinen hier für den praxisgerechten Einsatz notwendig.

Grundlage für die flächendeckende Nutzung der Topologieoptimierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen ist es insbesondere, die Bedienbarkeit von Fertigungsrestriktionen im Speziellen und der Topologieoptimierung im Allgemeinen zu vereinfachen und an die spezifischen Bedürfnisse der jeweiligen KMUs anzupassen.

Literatur

- [1] Rieg, F.: *Kostenwachstumsgesetze für Baureihen*. Darmstadt. 1982.
- [2] Troll, A.; Zapf, J.; Rieg, F.: *Analysis of CAx-Interdependencies for an Efficient Business-Oriented Training*. In: *The Design Society: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design – ICED 09*. Stanford, USA. 2009.
- [3] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [4] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 3. Aufl. München: Hanser-Verlag, 2009.
- [5] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt am Main: Harri Deutsch-Verlag, 2008.
- [6] Dörnhöfer, A.: *Leichtbau mit partikelverstärkten Magnesiumlegierungen*. Bayreuth, 2008.
- [7] Bendsoe, M.; Kikuchi, N.: *Generating optimal topologies in optimal design using a homogenization-method*. In: *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Bd. 71, S. 197-224, 1988.
- [8] Baumgartner, A.; Harzheim, L.; Mattheck, C.: *SKO (Soft Kill Option): The biological way to find an optimum structure topology*. In: *Int. J. Fatigue*, Bd. 14, S. 387-393, 1990.
- [9] Andreassen, E.; Clausen, A.; Schevenels, M.; Lazarov, B. S.; Sigmund, O.: *Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. In: *Struct. Multidisc. Optim.*, Bd. 43, S. 1-16, 2010.

-
- [10] Svanberg, K.: *MMA and GCMMA – version September 2007*. Technical Report, KTH, Stockholm, Schweden, 2007.
- [11] Cho, T. M.; Lee, B. C.: Reliability-based design optimization using a family of methods of moving asymptotes. In: *Struct. Multidisc. Optim.*, Bd. 42, S. 255-268, 2010.
- [12] DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [13] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [14] DIN-Taschenbuch 454: *Gießereiwesen 1 – Stahlguss und Gusseisen*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [15] DIN-Taschenbuch 455: *Gießereiwesen 2 – Nichteisenmetallguss*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [16] DIN EN 12890: *Gießereiwesen - Modelle, Modelleinrichtungen und Kernkästen zur Herstellung von Sandformen und Sandkernen*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [17] Alber-Laukant, B.; Roith, B.; Zapf, J.; Hackenschmidt, R.; Rieg, F.: *Program design meets engineer's requirements – a new concept of a freeware finite-element-program*. In: NAFEMS World Congress. Boston, USA, 2011.
- [18] Harzheim, L.: *Anwendung der Topologieoptimierung mit Fertigungsrestriktionen für Gussteile*. In: Industriearbeitskreis Strukturoptimierung, Karlsruhe, 2005.
- [19] Harzheim, L.; Graf, G.: *A review of optimization of cast parts using topology optimization*. In: *Struct. Multidisc. Optim.*, Bd. 31, S. 388-399, 2005.
- [20] Sigmund, O.: *Manufacturing tolerant topology optimization*. In: *Acta Mech. Sin.*, Bd. 25, S. 227-239, 2009
- [21] Gersborg, A. R.; Andreasen, C. S.: *An explicit parameterization for casting constraints in gradient driven topology optimization*. In: *Struct. Multidisc. Optim.*, 2011.
- [22] Zuo, K.-T.; Chen, L.-P.; Zhang, Y.-Q.; Yang, J.: *Manufacturing- and machining-based topology optimization*. In: *Int. J. Manuf. Technol.*, Bd. 27, S. 531-536, 2005.
- [23] Anonymous: *TOSCA-Manual, Version 7.0*. Karlsruhe: FE-Design, 2009.
- [24] Thomas, H; Zhou, M.; Schramm, U.: *Issues of commercial optimization software development*. In: *Struct. Multidisc optim.*, Bd. 23, S. 97-110, 2002.
- [25] Roos, D.; Nelz, J.; Grosche, A.; Stoll, P.: *Workflow-Konzepte zum benutzerfreundlichen, robusten und sicheren Einsatz automatischer Optimierungsmethoden*. In: 21th CAD-FEM Users` Meeting, Berlin, 2003.
- [26] Roy, R.; Hinduja, S.; Teti, R.: *Recent advances on engineering design optimization: Challenges and future trends*. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Bd. 57, S. 697-715, 2008.