

---

**Dr. Alexander Koch, Knorr Bremse SfN GmbH**  
**Dr. Stefan Wittmann, Teraport GmbH**

## **Robuste, verkürzte Prozesskette durch DfX-Workbenches: Praxisbeispiel Gussgerechtigkeit**

### **1 Motivation**

Die Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH (SfN) entwickelt und produziert u. a. Kupplungs- und Getriebeaktuatoren und -steuereinheiten für Nutzfahrzeuge, bei denen pneumatische und mechanische Systeme sowie elektronische Baugruppen gemeinsam in Aluminium-Druckgussgehäuse integriert werden. Diese hochkomplexen Produkte stellen den Entwickler immer wieder vor die Aufgabe, vielfältigen Anforderungen an Funktion und Fertigung der Gussgehäuse gerecht zu werden. Eine von Knorr-Bremse durchgeführte Marktanalyse kam zu dem Schluss, dass die aktuell kommerziell verfügbaren Softwarelösungen den Produktentwickler hier nicht ausreichend unterstützen.

Es existieren zwar über den gesamten Entwicklungsprozess zahlreiche hochspezialisierte Software-Werkzeuge (CAx-Tools), die dem Entwickler helfen, Bauteile und Produkte anforderungsgerecht (Design for X) zu gestalten. Meist sind es proprietäre Werkzeuge, die über komplexe (oft nur unidirektionale) Schnittstellen mit andern Werkzeugen kommunizieren können. Hieraus ergibt sich, dass auf dem Weg zu einem optimal gestalteten Produkt eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkzeugen genutzt und naturgemäß ebenso viele Schnittstellen bedient bzw. „überwunden“ werden müssen.

---

Dieser Beitrag zeigt einen Ansatz für eine Workbench, die über die Bündelung und Integration vieler einzelner Analysemöglichkeiten für die früheren Entwicklungsphasen sowie eine bidirektionale Schnittstelle zum Erzeugersystem einen wichtigen Beitrag für die Verkürzung der Entwicklungsprozesskette darstellt. Die vorgestellte Workbench behandelt in einem ersten Schritt das Thema Gussgerechtigkeit (speziell Druckguss). Der generelle Aufbau und die zugehörigen Abläufe innerhalb der Workbench sind jedoch themenunabhängig und können auf weitere/andere Analysen übertragen werden.

## 2 Aufgabenstellung

Mit steigender Funktionsdichte sowie immer härteren Umwelt- und Lebensdaueranforderungen steigt die Komplexität von Gussteilen z. B. für elektropneumatische Getriebeaktuatoren und somit der Aufwand für deren gussgerechte Gestaltung bei gleichzeitigem Wunsch nach stetig kürzeren Entwicklungs- und Innovationszyklen. Hierbei gibt es vielfältige Regeln und Richtlinien, die beachtet werden müssen, um schnell und mit wenig Ausschuss den Serien-Gießprozess hochzufahren. Je früher der Entwickler verlässliche Aussagen über die Gießbarkeit und mögliche zukünftige Problemstellen bekommt, desto eher kann er agieren anstatt später zu reagieren, wenn das Gusswerkzeug bereits erstellt ist.

Ein wesentlicher Punkt sind Materialanhäufungen. Werden sie nicht rechtzeitig erkannt und wenn möglich vermieden, können hierdurch entscheidende Nachteile für ein Druckluft führendes Bauteil entstehen. Grundsätzlich entsteht ein hoher Aufwand, um an Stellen mit großen Wandstärken z. B. die Lunkerbildung zu verhindern oder weitgehend einzuschränken. Eine einfache Möglichkeit wäre es, direkt im 3D-CAD-System in unterschiedlichen Richtungen die Wandstärke zu messen – vorausgesetzt man erkennt, wo ein potenzielles Problem vorliegt. Das Auffinden dieser Problemstellen in einem komplexen Bauteil ist in der Praxis sehr schwierig. Ebenfalls möglich wäre eine aufwändige und sehr präzise Gussimulation, die über das gesamte Bauteil eventuelle Risiken aufzeigen kann. Derartige Analysen bedeuten aber zumeist den Einsatz von Spezialsoftware und müssen oft von Experten außerhalb der Konstruktion durchgeführt und interpretiert werden.

Bild 1 zeigt ein Beispiel für einen sehr komplexen Bereich eines Gussgehäuses, an dem nur durch mehrere Iterationen (erst in der Simulation und dann im Gusswerkzeug) eine akzeptable Lösung gefunden werden konnte. Ein Tool wie die hier beschriebene Workbench hätte entscheidend zur Reduzierung der Iterationsschleifen beitragen können, indem der Konstrukteur immer wieder

nach jeder kleinen oder großen Änderung selbst und schnell ein Feedback über die Materialanhäufung erzeugen und auswerten hätte können.

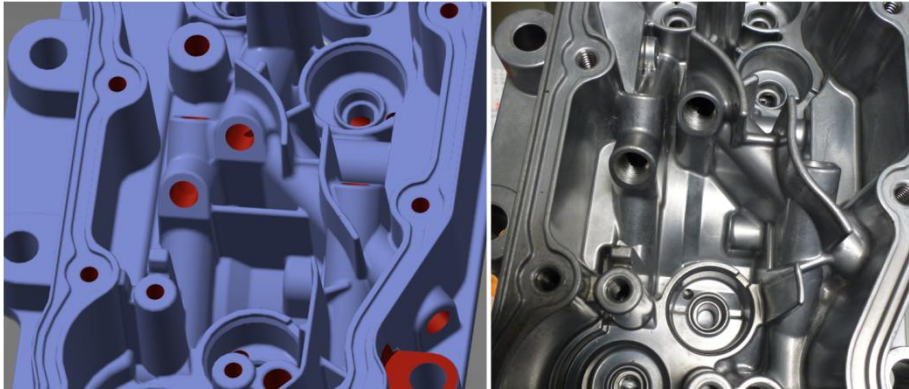


Bild 1: Beispiel für eine komplexe Geometrie mit Potenzial für Lunker- und Porenbildung im Gussprozess (links: früher Design-Stand, rechts: optimierter Bereich nach externer Analyse)

Bild 2 zeigt die Ergebnisrepräsentation einer konventionellen kosten- und zeitintensiven lieferantunabhängigen Simulation hinsichtlich Lunker-Erwartung als 2D-Screenshots. Dargestellt sind Wahrscheinlichkeitsräume, also Bereiche mit entsprechend höherer Wahrscheinlichkeit an Lunkerbildung, die jedoch in den 2D-Darstellungen nur äußerst schwierig lokalisiert werden können. Hierdurch wird eine sinnvolle und effiziente Weiterverwendung der Ergebnisse deutlich erschwert. Das Beispiel zeigt, dass auch bei einer hohen Ergebnisqualität die Weiterverwendung im Prozess berücksichtigt werden muss.

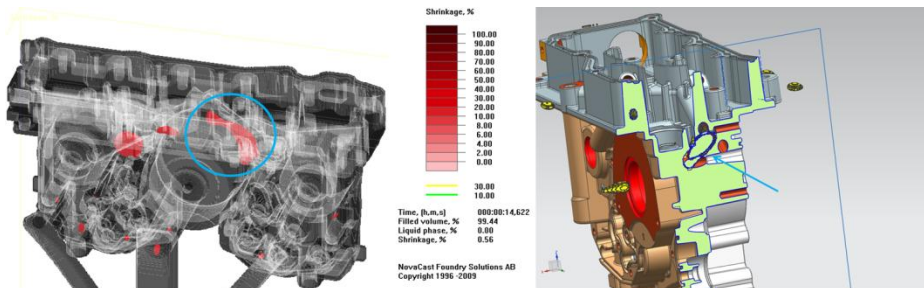


Bild 2: Beispiel für die Ergebnisrepräsentation einer konventionellen Guss- und Erstarrungssimulation in 2D-Darstellung

---

### 3 Herangehensweise

Zur Lösung der oben genannten Aufgabenstellung und zur Reduzierung der Iterationen und somit zur nachhaltigen Verkürzung der Prozesskette bei der Entwicklung von Gussgehäusen und Pneumatik-Baugruppen wird derzeit von der Teraport GmbH in Zusammenarbeit mit Knorr-Bremse SfN ein Softwarewerkzeug (eine Workbench, im weiteren Sinne auch als Assistenzsystem zu verstehen, vgl. [6]) entwickelt. Die Zielsetzungen dieser Workbench sind im Folgenden aufgeführt und erläutert.

#### 3.1 Zusammenfassen aller wichtigen Prüfverfahren für die jeweilige DfX-Domäne

Bei der Konstruktion und Entwicklung von komplexen Gussteilen spielt die Erfahrung eine wesentliche Rolle. Daher ist es wichtig, dass von der Workbench keine absoluten Entscheidungskriterien erwartet werden (z. B. Wandstärke kleiner 1,0 mm grundsätzlich nicht zulässig o. ä.). Vielmehr muss das Ergebnis mit Erfahrung und Sachverstand interpretiert werden, um eine entsprechende Entscheidung fällen zu können. Es sind somit vom Konstrukteur nicht nur die verfahrensbedingten Herstellgrenzen zu berücksichtigen, sondern auch Entscheidungen im Hinblick auf minimalen Fertigungsaufwand und zahlreiche weitere Gerechtheiten zu fällen, vgl. [4]. Bestimmte Konstruktionsfeatures wie Dome und Rippen sind zwar bei richtiger Dimensionierung problemlos fertigbar, verursachen jedoch im Werkzeugbau erhöhte Kosten und stellen somit Optimierungspotenzial dar.

Die Workbench erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden derzeit nur für KB wichtige Regeln implementiert wie zum Beispiel Wandstärkeanalyse und Hinterschnitterkennung. Die Regeln selbst stellen Grundlagenwissen dar und können diversen Standardwerken der Konstruktionsmethodik entnommen werden (vgl. [3], [5], [7]). Selbstverständlich bietet die Workbench Möglichkeiten zum späteren Ausbau und zur Ergänzung weiterer Regeln und Analysen.

#### 3.2 Minimale Anforderungen an Art und Inhalt der Eingangsdaten

Die Workbench stellt an die Eingangsdaten die geringstmögliche Anforderung: Es muss lediglich eine Geometriebeschreibung vorliegen, die eine Verarbeitung des Bauteils als Solid ermöglicht. Selbst kleine Fehlstellen (wie z. B. Löcher in der Bauteiloberfläche) werden toleriert. Es können sowohl verbreitete CAD-Formate (Catia, Pro/ENGINEER bzw. Creo, NX, SolidWorks etc.) als auch

---

Oberflächennetze (VRML, JT, STL usw.) analysiert werden. Die geometrieorientierte Implementierung der Analysen gestaltet sich dadurch zwar z. T. aufwendiger als ein schlichtes Auswerten von Metadaten, dafür besteht für die Workbench keine Abhängigkeit von einem bestimmten CAD-System, einem Datenformat oder einer Schnittstellenversion.

### **3.3 Einfache, intuitive Bedienbarkeit ohne Experten**

Wie bereits oben erwähnt ist es eine wesentliche Anforderung an die Workbench, dass sie direkt in das Arbeitsumfeld des Konstrukteurs integriert werden kann und keine Fachabteilung oder externer Dienstleister mit Spezial-Know-how erforderlich ist. Nur wenn der Konstrukteur selbst und direkt im Arbeitsablauf analysieren kann, ist ein wirklicher Mehrwert im Vergleich zu existierenden Lösungen erzielbar.

### **3.4 Kurze Rechenzeiten für sofortiges Feedback**

Jede der in der vorgestellten Workbench umgesetzten Analysen ist nach kurzer Rechenzeit (im Sekunden- bis niedrigen Minutenbereich) abgeschlossen. Auf diese Weise wird beim Konstrukteur die Hemmschwelle für den selbständigen Tooleinsatz gesenkt und eine entwicklungsbegleitende Prüfung und Anpassung („Mikrozyklus“) gefördert. Lange Iterationszyklen, wie sie beim Einsatz rechenintensiver Analysetools oder bei der Beauftragung von Guss-Simulationen mit Weitergabe der Daten über mehrere Abteilungen bzw. Firmen hinweg entstehen, werden effektiv vermieden oder zumindest eingespart. Im Idealfall ist die erste von der Konstruktionsabteilung ausgearbeitete Bauteilgeometrie bereits fertigbar.

### **3.5 Aussagekräftige, verständliche visuelle Aufbereitung der Ergebnisse**

Auch hier ist es entscheidend, dass der Konstrukteur/Anwender die Ergebnisse selbst auswerten und interpretieren kann, um daraus weiterführende Handlungen abzuleiten. Hierbei spielt die Visualisierung eine wesentliche Rolle, wie schon z. B. in [2] und [8] beschrieben. Daher wird zu jedem Analyseergebnis (z.B. einer Wanddickenunterschreitung) ein geometrisches Visualisierungsobjekt erzeugt. Der Konstrukteur erhält dadurch die Möglichkeit, in seiner Domäne (am konstruierten Bauteil) Problemstellen zu untersuchen. Zu diesem Zweck stehen ihm in der Workbench zahlreiche Hilfsmittel wie Fokusfunktion, automatische Schnittebenen und transparente Darstellung zur Verfügung.

Eine Analyse anhand der Workbench ermöglicht eine erste zuverlässige Aussage, ob die gewählte Bauteilgestalt gussgerecht gestaltet ist. Wie bereits ausgeführt sind einige der enthaltenen Analysen keine Neuerung – aber in der Gesamtheit und Einfachheit der Bedienung stellt die erstrebte Lösung einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Entwicklungsproduktivität dar.

#### 4 Praxisbeispiel: Fertigungsgerechtigkeit Druckguss

Die Workbench ist als Plug-In eines universellen 3D-Viewers implementiert, so dass alle verbreiteten CAD-Formate gleichermaßen analysierbar sind. Der Anwender wählt für das jeweilige Bauteil eine Analysedomäne (momentan umgesetzt: Gussgerechtigkeit). Die zugeordnete Oberfläche enthält mehrere Analysen, die auf einzelne Reiter aufgeteilt sind und nacheinander abgearbeitet werden können (vgl. Bild 3). Durch die Anordnung der Reiter wird dem Anwender eine sinnvolle Abarbeitungsreihenfolge empfohlen. Die Workbench umfasst zum jetzigen Zeitpunkt die Analysefelder Verwaltung, Maxima, Minima, Isoflächen, Hinterschnitte und Abmaße, die im Folgenden vorgestellt werden.

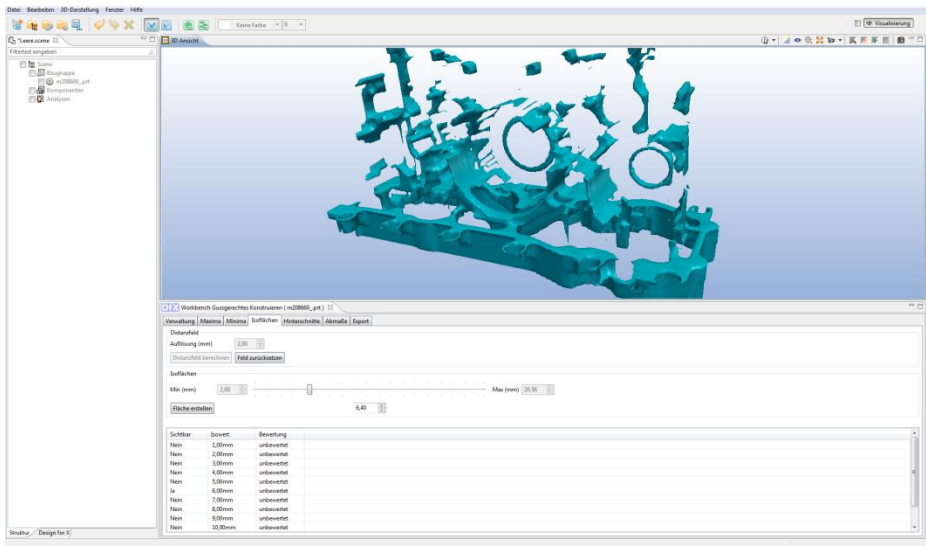


Bild 3: Screenshot des 3D-Viewers mit einem Analysebeispiel „Isoflächen“ (vgl. 4.4) – im unteren Fensterbereich sind die Reiter der Workbench zu sehen

## 4.1 Verwaltung

Dieser Reiter hat rein administrativen Charakter und dient der Verwaltung der durchzuführenden Analyse. Anhand der hier erfassten Daten kann das Analyseergebnis später einfach im unternehmenseigenen Datenverwaltungssystem (PLM-System) eingepflegt und gelenkt werden. Protokollierte Daten sind beispielsweise Projektname, Projektphase, Bauteil und Analysedatum.

## 4.2 Analyse „Maxima“

Ziel der Maxima-Analyse ist das Aufdecken möglicher Materialanhäufungen. Anwendbar wäre hier beispielsweise die von Wlodawer vorgestellte Methodik [8], nach der für bestimmte Konstruktionsfeatures (z.B. 3-Wand-Eckstoß) bei vorgegebenen Wandstärken der Modul M bestimmbar ist, der wiederum Aussagen über das Abkühlverhalten zulässt. Da für diese Methodik jedoch nur Kennwerte für einige wenige Konstruktionsfeatures verfügbar sind, wurde ein Verfahren in Anlehnung an die sog. Kreismethode nach Heuvers [1] **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entwickelt. Hierbei werden über das gesamte Bauteilvolumen hinweg die maximal einbeschreibbaren Kugeln bestimmt. Der Kugelradius entspricht annähernd dem Modul M. Zusätzlich angezeigt wird ein Kegel, der auf der Bauteiloberfläche aufsetzt. Die Kegelspitze zeigt in Richtung Kugelmittelpunkt, siehe Bild 4.

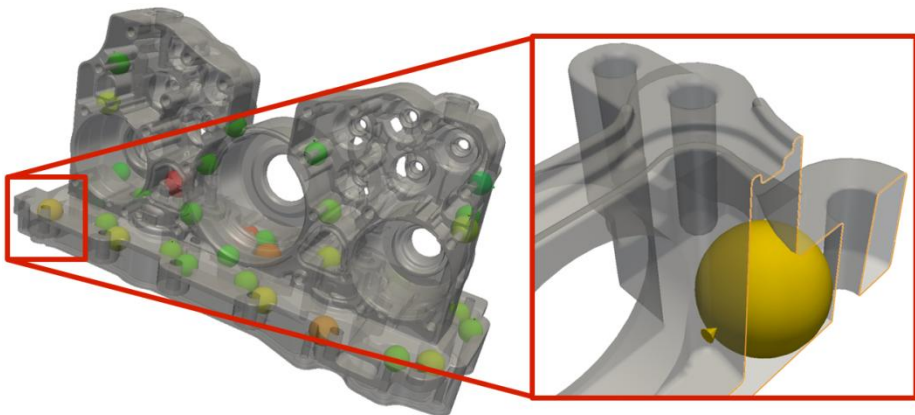


Bild 4: Beispiel einer Maxima-Analyse mit Schnitt durch ein lokales Maximum

### 4.3 Analyse „Minima“

Abhängig vom Fertigungsverfahren müssen die Bauteile eine bestimmte Mindestwandstärke aufweisen. Andernfalls sind die Bauteile nicht gieß- und erstarrungsgerecht: an Stellen mit Dickenunterschreitungen erstarrt die Schmelze früher bzw. ggf. zu früh und aus Sicht der Richtung der Formfüllung dahinter liegende Bereiche können nicht mehr mit Schmelze versorgt werden bzw. die Wärme optimal abgeben. Hierdurch entstehen Wärmenester, die wiederum die Lunkerbildung begünstigen (vgl. z. B. [5]).

Der Anwender gibt einen Grenzwert für zu markierende Dickenunterschreitungen vor. Diese werden anschließend durch zwei mit einer Linie verbundene, ins Material zeigende Kegel markiert (vgl. Bild 5). Um bei großflächigen Unterschreitungen nicht zu viele Meldungen zu erzeugen, kann der Anwender die Anzahl der Meldungen pro Volumen beschränken.

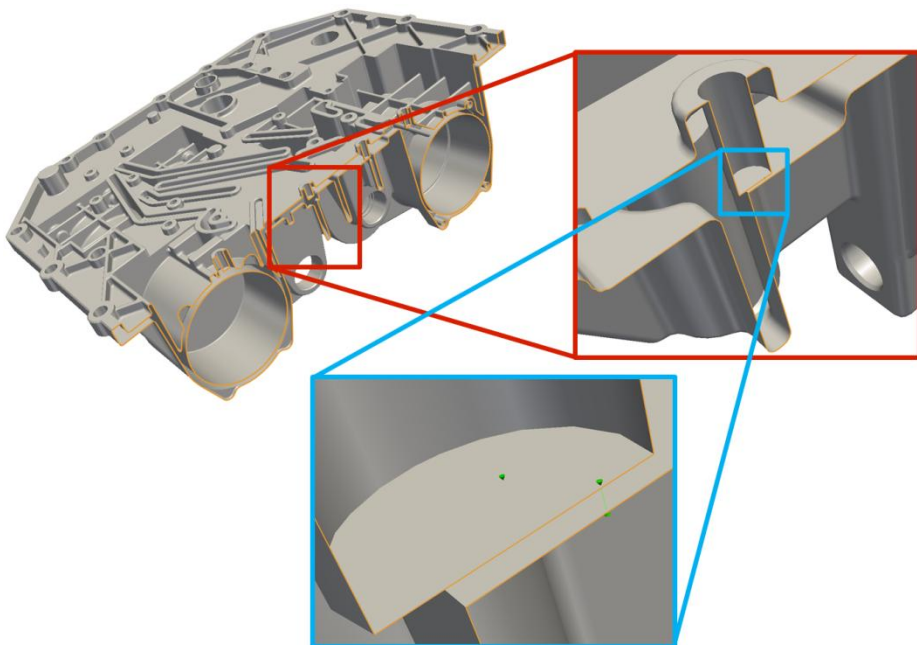


Bild 5: Beispiel einer Minima-Analyse mit erkannter Problemstelle an einem Sackloch





#### 4.4 Analyse „Isoflächen“

Die Isoflächenanalyse visualisiert Bereiche mit gleicher Materialdicke: Jeder Punkt auf einer in der Analyse erzeugten Isofläche besitzt den gleichen Abstand zur Bauteiloberfläche. Der Anwender kann im Inneren eines Bauteils Isoflächen für einen oder mehrere Dickenwerte anlegen (vgl. Bild 6 mit vier dargestellten Isoflächen). Vorteil dieser Analyse gegenüber Maxima-Kugeln ist, dass nicht nur das Zentrum der maximalen Materialanhäufung markiert wird, sondern die gesamte Materialverteilung im Bauteil sichtbar wird. So lässt sich erkennen, ob Probleme wie Materialanhäufungen, Einschnürungen und schroffe Wanddickensprünge vorliegen. Bereits ohne Gieß- oder Erstarrungssimulation kann der Materialnachfluss durch Speiser, das Abkühlverhalten und mögliche Lunkerentstehung eingeschätzt werden.

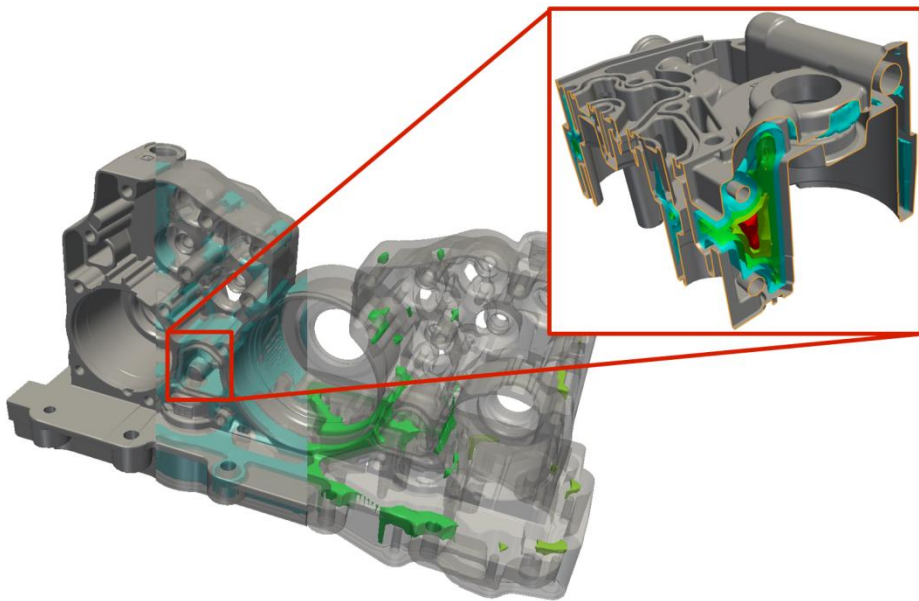


Bild 6: Beispiel einer Isoflächenanalyse, dargestellt sind von links nach rechts unterschiedliche Dickenwerte

#### 4.5 Analyse „Hinterschnitte“

Nach manueller Festlegung einer Trennebene, die vorgibt, in welche Richtung sich die Werkzeughälften öffnen, werden automatisch alle Hinterschnitte erfasst. Die Hinterschnitte werden als Volumenkörper (Voxel) gemeinsam mit

dem Bauteil dargestellt (vgl. Bild 7). Der Konstrukteur kann daraufhin entscheiden, ob sich bestehende Hinterschnitte vermeiden lassen oder ob z. B. zusätzliche Aushebeschrägen vorzusehen sind. Anhand der Form und Position der Hinterschnitte zeigt sich, ob eine Fixierung der Kerne und eine einfache Kernherstellung möglich sind. Nach Berechnung der Hinterschnitte kann entschieden werden, wie diese im Werkzeugbau zu behandeln sind. Durch die Zuteilung mehrere Hinterschnitte zu einem Schieber kann geprüft werden, ob das Bauteil trotz vorhandener Hinterschnitte kostengerecht umsetzbar ist.

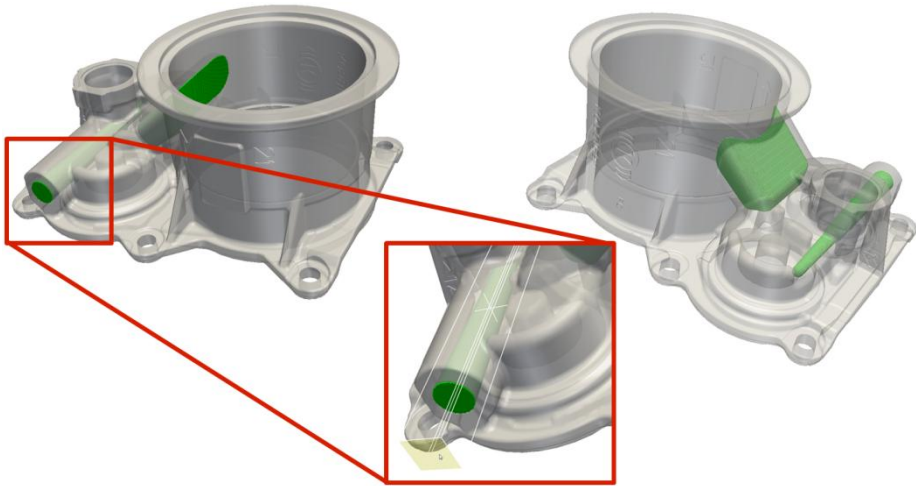


Bild 7: Beispiel einer Hinterschnittanalyse mit symbolischer Zuweisung eines Schiebers (in Detailansicht)

#### 4.6 Analyse „Abmaße“

Basierend auf der festgelegten Trennebene lassen sich weitere abgeleitete Kennwerte des Bauteils bestimmen: Die Mindestabmaße (Länge, Breite, Höhe) des Werkzeugs werden anhand eines Hüllquaders um das Bauteil bestimmt, der innerhalb der referenzierten Trennebene vom Anwender rotierbar ist. Weiterhin lässt sich die projizierte Fläche des Bauteils bestimmen. Mit dem Werkzeuginnendruck lässt sich die Werkzeugauftriebkraft berechnen, die wiederum für die Auswahl des Werkzeugtyps von Bedeutung ist. Zur Veranschaulichung können die beiden Werkzeughälften als konzeptionelle Geometriemodelle einblendet werden.



---

## 5 Ausblick/Weitere Möglichkeiten

Die Entwicklung der Workbench Gussgerechtheit ist mit den aufgezeigten Analysen noch nicht abgeschlossen. Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen Teraport und Knorr-Bremse werden weitere Analysen getestet und wenn möglich in die Workbench integriert.

Geometrische Ergebnisse können zum aktuellen Zeitpunkt im standardisierten JT- oder VRML-Format hinterlegt und mit Fremdsystemen ausgetauscht werden. Eingeplant sind in diesem Zusammenhang Funktionen zur Dokumentation gewonnener Analyseergebnisse (Reporting) und zum direkten Datenaustausch mit dem angebotenen CAD-System, beispielsweise über Programmierschnittstelle.

Ebenso soll die Workbench basierend auf dem vorgestellten Ansatz zu einem Werkzeug zur Analyse für pneumatische Anwendungen weiterentwickelt werden. Hierfür ist es wichtig, nicht nur die materialgefüllte Geometrie sondern auch die entstanden Hohlräume (das luftführende System) eines Einzelteils (Gussteil) und auch in einer Baugruppe (z. B. Struktur aus Gussgehäuse, Dichtung und Deckel) zu analysieren – also Hohlräume, die erst durch das Fügen einzelner Teile zu einer Baugruppe entstehen. Auf diese Weise können weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die Aussagen zur Festigkeit (Wandstärken um luftführende Kanäle) oder auch zu Systemverhalten und -dynamik (z. B. Be- und Entlüftungszeiten) ermöglichen.

Weiterhin ist zu evaluieren, ob neben den Analyse- und Diagnosefunktionen ein zusätzliches Beratungsmodul für den Konstrukteur hilfreich wäre. So könnten beispielsweise kontextsensitiv für die jeweils verletzte Gerechtheit Erläuterungen und Änderungsvorschläge, z.B. in Form von Gut-/Schlecht-Beispielen angezeigt werden.

### Literatur

- [1] Heuvers, A: "Stahlguß-Gießereitechnik", Die Giesserei 30 Heft 18/19, 1943
- [2] Koch, Alexander: „Entwicklung einer Methode zur Visualisierung der Auswirkungen von Form- und Lagetoleranzen auf die Bauteilgestalt“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
- [3] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.

- 
- [4] Räse, U.: "Gußgerechtes Konstruieren mit CAD – Möglichkeiten zur Beschreibung und Analyse von Gußteilen", Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1991.
  - [5] Spur, G; Neugebauer, R; Hoffmann, H: "Handbuch Urformen", Hanser Verlag, 2012
  - [6] Wartzack, S: "Predictive Engineering - Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte", Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 2000, VDI-Verlag Düsseldorf.
  - [7] Wartzack et al.: "Technische Produktgestaltung", Vorlesungsskript Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2015.
  - [8] Wittmann, S: "Verfahren zur Simulation und Visualisierung toleranzbedingter Bauteilabweichungen", Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 2011
  - [9] Wlodawer, R: "Erstarrungszeitmessungen in Knotenpunkten an Stahl- und Eisengußstücken und deren Auswertung zur Berechnung der Speiserverhältnisse", Gießerei 52, Heft 21, 1965