

Entwicklung und Realisierung einer Methodenplattform für die Spannungsanalyse von Al-Druckgussteilen mit Imperfektionen

Mathias Würkner, Sascha Duczek, Harald Berger, Heinz Köppe, Ulrich Gabbert

Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, mathias.wuerkner@ovgu.de, 0391/67/52886

Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Gussteilen aus Aluminium kommt es in der Regel zu ungewollten Imperfektionen. Mit Imperfektionen sind hier Poren gemeint. In der Regel sind die Abmaße der Poren im Vergleich zum Bauteil um ein Vielfaches kleiner. Spannungsanalysen mittels der klassischen Finite-Elemente-Methode (kurz: FEM) unter Berücksichtigung einer Vielzahl an Poren lassen sich daher nur mit erheblichem Rechenaufwand oder gar nicht durchführen, da infolge der Komplexität der Geometrie keine FE-Diskretisierung generiert werden kann. Eine leistungsfähige Alternative zur herkömmlichen FEM stellt die Finite-Zellen-Methode (englisch: finite cell method, kurz: FCM) dar. Der entscheidende Vorteil der Methode besteht darin, dass nicht auf Basis der realen Geometrie ein Elementnetz erzeugt wird, sondern ein erweitertes Gebiet die Grundlage bildet. Somit ist das Netz hinsichtlich des ursprünglichen Gebietes nicht mehr geometriekonform. Es genügt oft eine vereinfachte, relativ grobe Vernetzung als Berechnungsbasis.

In der Industrie wird hauptsächlich kommerzielle FE-Software wie zum Beispiel Ansys oder Abaqus zur Spannungsanalyse verwendet. Aus diesem Grund ist es aus industrieller Sicht vom Vorteil, eine Methodenplattform zu entwickeln, die eine Schnittstelle zwischen einer FE-Software und der FCM herstellt. In diesem Zusammenhang lassen sich auch benutzerdefinierte Subroutinen, welche in die FE-Software eingebettet werden können, nutzen. Darüber hinaus bietet die Plattform eine Schnittstelle zur Computertomographie (CT). CT-Daten, welche in einen STL-Datensatz überführt worden sind, dienen als Informationsquelle für Lage und Größe von Poren. Das Postprocessing erfolgt unter Nutzung weiterer Softwareschnittstellen. Auf Basis eines Visualisierungsnetzes (Abaqus) werden Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen berechnet. Anschließend können diese mittels geeigneter Visualisierungssoftware (Paraview) dargestellt werden.

In dem vorliegenden Beitrag werden wichtige Aspekte zur Umsetzung der Methodenplattform näher beleuchtet. Dazu gehören unter anderem eine nähere Beschreibung der FCM und der Methodenplattform sowie erste Tests anhand von einfachen Berechnungsbeispielen.

Schlüsselwörter: FCM, FEM, Imperfektionen, Spannungsanalyse

1. Einleitung

Infolge von EU-Richtlinien für die Verringerung der CO₂-Emissionen von Fahrzeugen ist die Automobilbauindustrie an der Entwicklung und Einführung neuer Leichtbaukonzepte interessiert. Eine Gewichtsersparnis würde gleichzeitig zu einem verminderten Kraftstoff- und CO₂-Ausstoß führen. Dies kann zum Beispiel durch eine geeignete Materialwahl des Bauteils und eine Geometrieoptimierung erreicht werden. Durch Druckgussteile aus Aluminium kann dem ersten Punkt für eine Gewichtsreduktion Rechnung getragen werden. Die Optimierung der Geometrie ist jedoch eine sehr schwierige und komplexe Thematik. Die Entwicklung eines optimalen Bauteils erfordert eine durchgängige Prozesskette vom Entwurf, über die Konstruktion, die Berechnung und Erprobung bis hin zur Fertigung und Montage [1]. Damit verbunden ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Fachleuten der einzelnen Bereiche. Nur dadurch kann eine erstklassige Qualität des betrachteten Bauteils gewährleistet werden.

Die Gestaltung der Druckgussform sowie der Fertigungsprozess eines Bauteils lassen sich durch eine große Bandbreite an veränderlichen Parametern bzw. Maschineneinstellungen und Umgebungsbedingungen beeinflussen, wodurch eine eindeutige Vorhersage der infolge des Fertigungsprozesses entstehenden Porenmorphologie deutlich erschwert wird. Des Weiteren haben bisherige Untersuchungen aufgezeigt, dass selbst bei gleichen Fertigungsparametern keine Eindeutigkeit erzielt werden kann [2]. Aktuell werden schnelle Computertomographen (CT) genutzt, um Bauteile hinsichtlich der Erfüllung von heuristischen Porenspezifikationen zu überprüfen. Aus einem CT-Scan lassen sich Bildpunktkoordinaten mit einem jeweiligen Grauwert (Hounsfield-Skala) gewinnen. In Kombination mit einer geeigneten Auswertesoftware kann so ein STL-

Datensatz (englisch: surface tessellation language, kurz: STL) erstellt werden, der die 3-D-Geometrie des Bauteils und der Poren beschreibt.

Der STL-Datensatz kann dazu verwendet werden, eine rechnerische Bewertung der Festigkeit von Gussteilen mit Poren durchzuführen. Somit wäre man in der Lage, dem Bereich der Fertigung eine Rückmeldung hinsichtlich kritischer Lage, Größe und Form von Poren geben zu können.

Die Festigkeits- und Lebensdauerbewertung von Gussteilen unter Berücksichtigung von Poren ist bis heute Gegenstand aktiver Forschungsbemühungen [3, 4, 5, 6]. Für die Bewertung eines Bauteils spielen lokale Spannungskonzentrationen an Gussporen, durch die in Abhängigkeit von der äußeren Bauteilbelastung Risse initiiert werden können, eine entscheidende Rolle. Laut aktuellem Stand der Technik werden Spannungskonzentrationen vorwiegend mittels FEM berechnet [7, 8], da diese Methode zu den am weit verbreitetsten numerischen Verfahren im Ingenieurwesen zählt.

Der vorliegende Beitrag liefert einen ersten Einblick in die Entwicklung und Realisierung einer Methodenplattform zur Spannungsanalyse von porenbehafteten Gussteilen unter Verwendung der Finite-Zellen-Methode (kurz: FCM). Dabei soll es möglich sein, die reale Porenmorphologie, welche als STL-Datensatz vorliegt, über eine Schnittstelle in die Spannungsanalyse einfließen zu lassen.

Der erste Teil des Beitrags befasst sich mit den Grundlagen der FCM. Dabei wird ein Einblick in die Theorie der Methode gegeben. Im zweiten Teil wird näher auf die Methodenplattform eingegangen. Abschließend werden erste Testrechnungen präsentiert.

2. Finite-Zellen-Methode (FCM)

Die FCM ist eine Erweiterung der herkömmlichen FEM und lässt sich prinzipiell den fiktiven Gebietsmethoden zuordnen. Infolge der Nähe zur FEM wird auf eine detaillierte Methodenbeschreibung verzichtet. Stattdessen wird eine Beschreibung gewählt, welche Unterschiede zur FEM aufzeigt und wichtige Grundgleichungen enthält. Hinsichtlich weiterer Informationen bzgl. der FEM und FCM wird auf [9, 10] bzw. [11, 12, 13] verwiesen.

2.1 Schwache Formulierung

Nehmen wir an, dass im Rahmen der linearen Elastizitätstheorie im Gebiet Ω ein elastisches Problem durch das folgende Differentialgleichungssystem in kartesischen Koordinaten gegeben ist

$$-\text{div } \underline{\underline{\tilde{\sigma}}} = \underline{\underline{0}} \quad . \quad (1)$$

Anhand der Gleichung lässt sich das Fehlen von Volumenlasten erkennen. Mit $\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}$ sei der Tensor der Cauchy-Spannungen gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf wird eine Voigt-ähnliche Notation verwendet, wodurch sich Spannungen (und Verzerrungen) in eine Vektorschreibweise überführt lassen. Vektoren und Matrizen sind im weiteren Verlauf mit einem Unterstrich bzw. zwei Unterstrichen gekennzeichnet.

Der Rand von Ω , welcher mit $\partial\Omega$ gekennzeichnet wird, setzt sich aus einem Dirichlet-, Γ_u , und Neumann-Rändern, Γ_σ und Γ_0 , zusammen, für die $\partial\Omega = \Gamma_u \cup \Gamma_\sigma \cup \Gamma_0$, $\Gamma_u \cap \Gamma_\sigma \cap \Gamma_0 = \emptyset$ gilt. Die Bedingungen auf den jeweiligen Rändern lauten (siehe Bild 1)

$$\underline{\underline{u}} = \underline{\underline{0}} \quad \text{auf } \Gamma_u \quad , \quad (2)$$

$$\underline{\underline{t}} = \underline{\underline{\bar{t}}} \quad \text{auf } \Gamma_\sigma \quad , \quad (3)$$

$$\underline{\underline{t}} = \underline{\underline{0}} \quad \text{auf } \Gamma_0 \quad . \quad (4)$$

Die Gln. (1)-(4) definieren ein Randwertproblem, welches unter der Verwendung einer Testfunktion $\underline{\underline{v}}$ und anschließender Integration über Ω in die folgende schwache Form überführt wird

$$\int_{\Omega} \left(\underline{\underline{D}} \underline{\underline{v}} \right)^T \underline{\underline{\sigma}} \, d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} \underline{\underline{v}}^T \underline{\underline{\bar{t}}} \, d\Gamma = \underline{\underline{0}} \quad . \quad (5)$$

$\underline{\underline{D}}$ ist die Differentialoperatormatrix, welche Verschiebungen in Relation zu Verzerrungen setzt

$$\underline{\underline{D}} \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{\varepsilon}} \quad . \quad (6)$$

Unter Verwendung des Hookeschen Gesetzes in Matrix-Vektor-Form ergibt sich letztendlich

$$\int_{\Omega} (\underline{D} \underline{v})^T \underline{C} \underline{D} \underline{u} \, d\Omega - \int_{\Gamma_{\sigma}} \underline{v}^T \underline{\bar{t}} \, d\Gamma = \underline{0} \quad , \quad (7)$$

wobei \underline{C} die Elastizitätsmatrix ist.

In der FCM wird das ursprüngliche Gebiet Ω um ein fiktives Gebiet Ω_{fic} erweitert. Das erweiterte Gebiet wird mit Ω_{ex} bezeichnet. Zur Vereinfachung wird hier angenommen, dass das fiktive Gebiet vollständig vom ursprünglichen Gebiet eingeschlossen ist (siehe Bild 1). Im Fall einer Gussteiluntersuchung bedeutet dies, dass sich Poren komplett innerhalb der Bauteilgeometrie befinden.

Unter der Berücksichtigung der Erweiterungen $\underline{u}_{\text{ex}}$ bzw. $\underline{v}_{\text{ex}}$ und stetigen Übergangsbedingungen von Randspannungen und Verschiebungen auf dem Rand $\Gamma = \partial\Omega_{\text{fic}} \cap \partial\Omega$ hat die schwache Form bzgl. des erweiterten Gebietes die folgende Gestalt

$$\int_{\Omega_{\text{ex}}} (\underline{D} \underline{v}_{\text{ex}})^T \underline{C}_{\text{ex}} \underline{D} \underline{u}_{\text{ex}} \, d\Omega - \int_{\Gamma_{\sigma}} \underline{v}_{\text{ex}}^T \underline{\bar{t}} \, d\Gamma = \underline{0} \quad . \quad (8)$$

Die modifizierte Elastizitätsmatrix $\underline{C}_{\text{ex}}$ ist dabei wie folgt definiert

$$\underline{C}_{\text{ex}} = \alpha(\underline{x}) \underline{C} \quad , \quad (9)$$

wobei

$$\alpha(\underline{x}) = \begin{cases} 1.0 & \forall \underline{x} \in \Omega \quad , \\ 0.0 & \forall \underline{x} \in \Omega_{\text{fic}} \quad . \end{cases} \quad (10)$$

Im Rahmen der numerischen Integration sollte im fiktiven Gebiet Ω_{fic} anstelle des Wertes $\alpha = 0.0$ ein hinreichend kleiner Wert nahe Null verwendet werden, da dieser im späteren Diskretisierungsprozess Einfluss auf die Kondition der Gesamtsteifigkeitsmatrix nimmt.

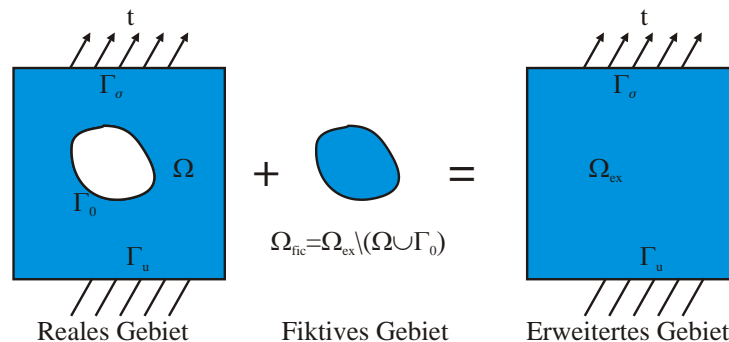


Bild 1: Erweiterung des realen Gebietes

In der FEM wird das Gebiet Ω in finite Elemente unterteilt. Im Unterschied zur FEM wird in der FCM das erweiterte Gebiet anstelle des ursprünglichen Gebietes diskretisiert. Die dazu verwendeten „Elemente“ unterscheiden sich von klassischen finiten Elementen dadurch, dass sie in der Regel nicht den geometriekonformen Regeln unterliegen und somit beispielsweise Elementgrenzen nicht an Materialgrenzen gebunden sind. Diese „Elemente“ werden im weiteren Verlauf als finite Zellen bezeichnet (in Anlehnung an [11, 13]), um eine Verwechslung mit klassischen finiten Elementen zu vermeiden.

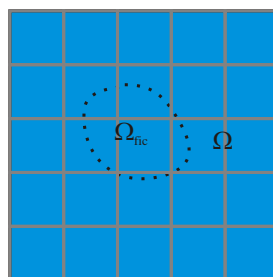


Bild 2: Diskretisierung des erweiterten Gebiets in 2-D durch quadratische Zellen

Das erweiterte Gebiet wird vollständig in finite Zellen unterteilt. In Bild 2 ist eine solche Unterteilung dargestellt. Eine einfache Vernetzung mit quadratischen Zellen für 2-D- oder mit würfelförmigen Zellen für 3-D-Anwendungen hat den Vorteil, dass eine konstante Jacobi-Matrix bei der Koordinatentransformation entsteht. Unter der Annahme, dass das erweiterte Gebiet vollständig in n finite Zellen unterteilt ist, verändert sich der erste Term aus Gl. (8) zu

$$\sum_{z=1}^n \int_{\Omega_z} \left(\underline{D} \underline{v}_{ex} \right)^T \underline{C}_{ex} \underline{D} \underline{u}_{ex} d\Omega . \quad (11)$$

Der zweite Term der Gleichung lässt sich analog dazu umformen.

Wie in der FEM werden die Verschiebungen in jeder Zelle durch Ansatzfunktionen approximiert

$$\underline{u}_{ex} = \underline{N} \hat{\underline{u}} , \quad (12)$$

wobei mit \underline{N} und $\hat{\underline{u}}$ die Matrix der Formfunktionen bzw. der Vektor der Verschiebungsfreiheitsgrade bezeichnet werden.

Unter Nutzung des Ansatzes $\underline{v}_{ex} = \underline{N} \hat{\underline{v}}$ und der Gln. (11), (12) lässt sich ein Gleichungssystem für eine finite Zelle

$$\underline{K} \hat{\underline{u}} = \underline{F} \quad (13)$$

herleiten. Das Gesamtgleichungssystem ergibt sich aus der Assemblierung der Gleichungssysteme aller Zellen

$$\underline{K}^G \hat{\underline{u}}^G = \underline{F}^G . \quad (14)$$

Durch die Verwandtschaft zwischen finiten Elementen und Zellen ergibt sich die Möglichkeit, zu jedem finiten Elementtyp einen entsprechend kompatiblen finiten Zellentyp zu definieren. Des Weiteren ist es möglich, ein hybrides Elemente-Zellen-Netz zu generieren. Ein solches hybrides Modell wird im weiteren Verlauf als FE-FZ-Modell bezeichnet.

2.2 Numerische Integration

Zum Bestimmen von \underline{K} und \underline{F} (siehe Gl. (13)) müssen Integrale berechnet werden. Dazu wird, wie in der klassischen FEM, auf das numerische Integrationsverfahren der Gauß-Quadratur zurückgegriffen. Dieses Verfahren konvergiert schnell im Fall von glatten Integranden. Dies gilt jedoch nicht im Fall von Integranden mit unstetigem Verlauf. Die Unstetigkeit wird hier durch die veränderliche Elastizitätsmatrix \underline{C}_{ex} hervorgerufen.

Daher ist es notwendig ein adaptives Integrationsschema zu verwenden, um die Unstetigkeit hinreichend genau erfassen zu können.

Im weiteren Verlauf wird sich auf den Fall beschränkt, dass das Integral einer finiten Zelle einen unstetigen Integranden enthält. Diese Zelle ist dann dadurch charakterisiert, dass sie von dem Rand Γ geschnitten wird. Für die numerische Berechnung des Integrals wäre eine herkömmliche Gauß-Quadratur ungeeignet. Stattdessen wird eine zusammengesetzte Integration verwendet. Diese Integration wird dadurch charakterisiert, dass das Integrationsgebiet geteilt wird. Im 2-D-Fall wird die in Bild 3 dargestellte Quadtree-Unterteilungsprozedur verwendet. Der Unterteilungsgrad wird mit k gekennzeichnet. Für $k = 1$ wird das Integrationsgebiet in vier gleich große Teilgebiete unterteilt. Diese Teilgebiete werden im weiteren Verlauf Subzellen genannt. Für $k = 2$ wird geprüft, ob eine Subzelle des Grades $k = 1$ von dem Rand Γ geschnitten wird. Trifft dies zu, so wird die Subzelle in vier weitere Subzellen zerlegt. Geschnittene Subzellen sind in Bild 3 grau hervorgehoben. Für jeden weiteren Unterteilungsgrad wird analog verfahren. Nach Beendigung der Unterteilungsprozedur wird auf jede Subzelle die Gauß-Quadratur angewendet.

Für dreidimensionale finite Zellen wird eine Octree-Unterteilungsprozedur genutzt. Hier wird die geschnittene Zelle in acht Subzellen unterteilt. Weitere Informationen, wie sich zum Beispiel die Gewichte und Integrationspunkte berechnen lassen, können aus [12] entnommen werden.

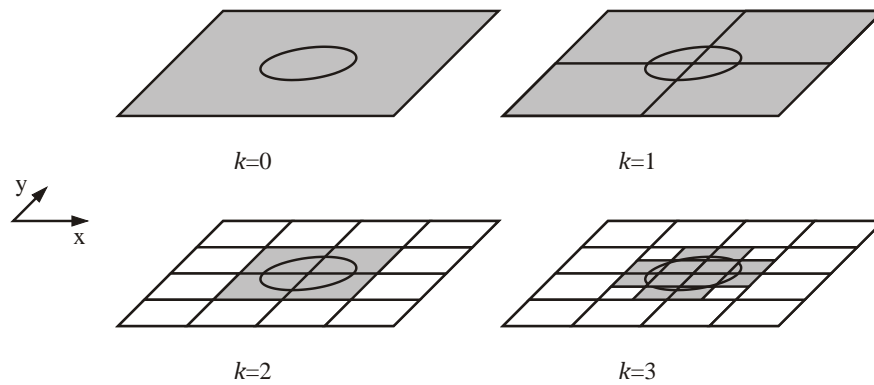


Bild 3: Quadtrees-Unterteilung einer finiten Zelle ($k = 0$) in 2-D

3. Konzept der Methodenplattform

Zur Entwicklung einer Methodenplattform wird die Software Matlab verwendet. Die Plattform ist prinzipiell in drei Bereiche eingeteilt. Dies sind der Preprocessor, der Solver und der Postprocessor.

Im Preprocessor werden das FE-Modell des idealen Bauteils (Abaqus) sowie Porendaten, welche in Form von einem STL-Datensatz (Topologie und Knotenkoordinaten der Porenoberflächentriangulierung) vorliegen, der Plattform bereitgestellt. Das Elementnetz des FE-Modells wird für die Finite-Zellen-Diskretisierung verwendet. Damit ist gemeint, dass die finiten Elemente durch finite Zellen ausgetauscht werden. Prinzipiell kann, wie im 2. Abschnitt erläutert, das ideale Bauteil vollständig mit finiten Zellen diskretisiert werden. Finite Zellen, die sich komplett im realen Bauteil befinden ($\alpha = 1.0$) sind in der numerischen Behandlung identisch zu klassischen finiten Elementen. Zellen, die sich komplett innerhalb einer Pore befinden ($\alpha = 0.0$), werden aus dem Modell entfernt, da sie aus theoretischer Sicht keinen Beitrag zum Gesamtgleichungssystem liefern und zusätzlich die Konditionszahl der Steifigkeitsmatrix signifikant erhöhen. Dadurch lässt sich zusätzlich das zu lösende Gleichungssystem reduzieren. Bei einer genauen Betrachtung des Austauschvorgangs wird deutlich, dass genau die Elemente durch finite Zellen ersetzt werden, deren Integrationsgebiet den Porenrand, d. h. die Materialunstetigkeit Gl. (9), beinhalten. Diese Materialunstetigkeit muss in der numerischen Integration hinreichend fein aufgelöst werden, um den Integrationsfehler klein zu halten.

Die Nutzung der Methodenplattform ist an die Bedingung geknüpft, dass das FE-Modell entweder vollständig aus Hexaeder- oder aus Tetraederelementen (Bild 4) bestehen muss. Prinzipiell ist eine Hexaedervernetzung einer Tetraedervernetzung vorzuziehen. Bei einer vorgegebenen Elementkantenlänge werden zudem weniger Elemente zur Vernetzung benötigt. Im Gegensatz dazu lassen sich komplexe Bauteilstrukturen, wie sie zum Beispiel in der Industrie vorkommen, meist nur mit Tetraederelementen vernetzen. Zum Aufstellen des FE-FZ-Modells werden dann die entsprechend kompatiblen finiten Zellen verwendet.

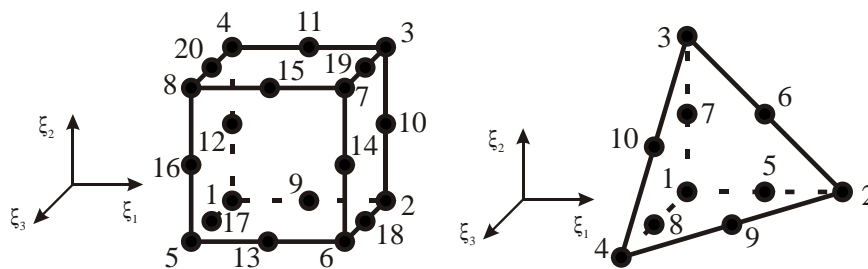


Bild 4: Finite Elemente: 20-Knoten-Hexaederelement (links), 10-Knoten-Tetraederelement (rechts)

Das entstandene FE-FZ-Modell sowie Integrationspunkte und -gewichte werden anschließend in geeigneter Form unter Nutzung von User-Subroutinen zum Aufstellen und Lösen des Gesamtgleichungssystems an Abaqus übergeben.

Danach wird im Postprocessor der berechnete Vektor der Unbekannten, d. h. die Verschiebungsfreiheitsgrade, von Abaqus an die Plattform weitergegeben. Mithilfe des dort abgelegten FE-FZ-Modells lassen sich dann Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen an beliebigen Punkten berechnen. Für die Darstellung dieser Größen ist das FE-FZ-Modell jedoch ungeeignet. Stattdessen wird ein geometriekonformes Visualisierungsnetz genutzt (siehe Bild 5). Dazu werden die Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen in den Knotenkoordinaten des Visualisierungsnetzes berechnet.

Für die Generierung eines geometriekonformen Visualisierungernetzes stellt die Plattform eine weitere Schnittstelle zu Abaqus bereit. Es werden eine Oberflächentriangulierung des FE-Modells (STL-Format) und die Porendaten übergeben. Für das Netz werden 4-Knoten-Tetraederelemente verwendet. Lässt sich infolge der Komplexität das reale Bauteil inklusive der Poren nicht ohne Weiteres mit Tetraedern vernetzen, so wird eine Oberflächentriangulierung, die sich mit Hilfe des FE-Modells des idealen Bauteils und dem STL-Datensatz erzeugen lässt, zur Darstellung der Berechnungsgrößen verwendet (siehe Bild 5).

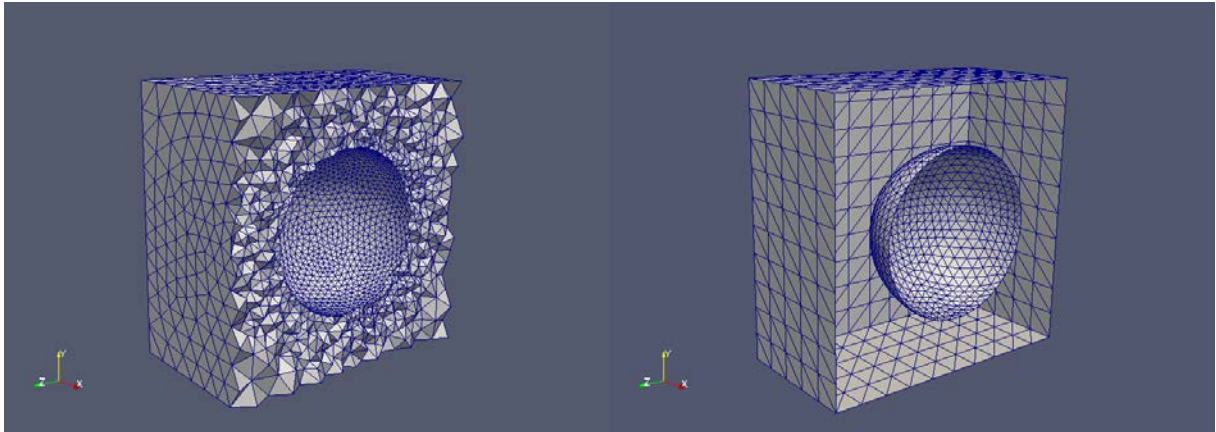


Bild 5: Visualisierungernetzvarianten: Geometriekonformes Netz (links), Oberflächennetz (rechts)

Für die eigentliche Darstellung der Berechnungsgrößen wird eine Schnittstelle zu Paraview genutzt. Mit Hilfe dieser Schnittstelle werden Daten der Berechnungsgrößen in geeigneter Form an Paraview übergeben. Zusätzlich wird die graphische Benutzeroberfläche von Paraview geöffnet, wodurch eine sofortige Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgen kann.

4. Berechnungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden zwei Testbeispiele unter Nutzung der Methodenplattform präsentiert. Die verwendeten Porengeometrien werden im Folgenden durch Kugeln repräsentiert.

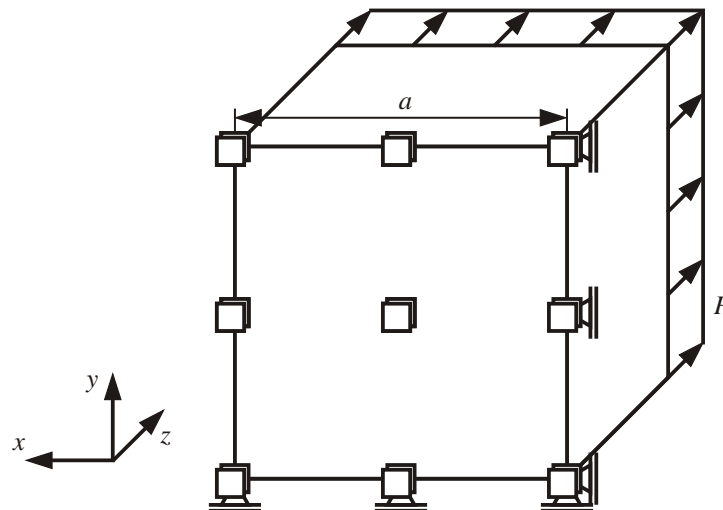


Bild 6: Geometrie und Randbedingungen der Berechnungsbeispiele

Im ersten Beispiel wird ein Würfel mit der Kantenlänge $a = 10$ m und eine kugelförmige Pore mit dem Radius $r = 2.9$ m, welche sich zentriert im Würfel befindet, betrachtet. Der Würfel ist so gelagert, dass die Querkontraktion zugelassen wird. Die z -Komponente der Verschiebung, u_z , derjenigen Randfläche, die normal zur negativen z -Richtung liegt, wird verhindert. Zusätzlich werden noch auf zwei Kanten dieser Fläche - eine Kante entlang der x -Achse und die andere entlang der y -Achse - die Verschiebungskomponenten u_y bzw. u_x fixiert

(siehe Bild 6). Auf die gegenüberliegende Randfläche wird eine Flächenlast $P = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ aufgebracht. Als Material wird Aluminium gewählt (Elastizitätsmodul = 70 GPa).

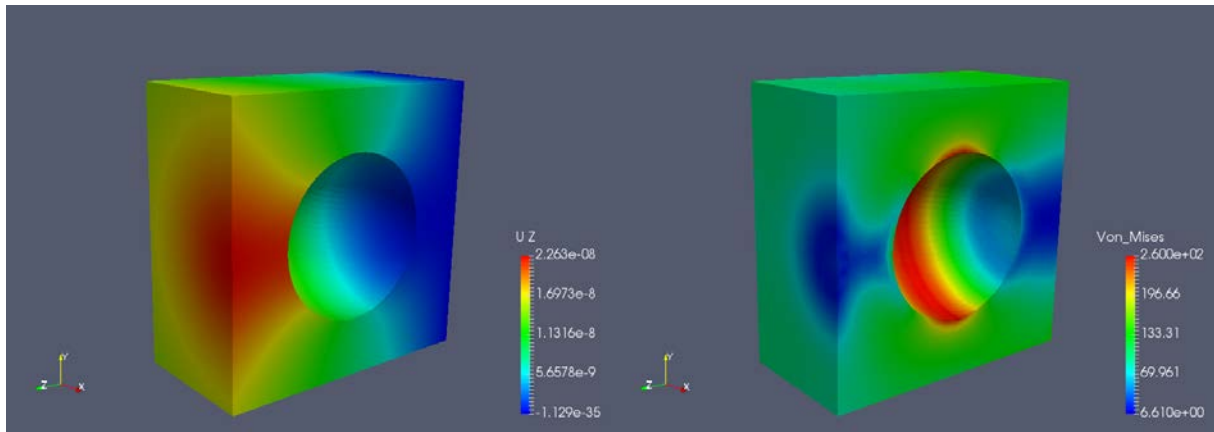


Bild 7: Verschiebung in z-Richtung (links) und von-Mises-Spannung (rechts) mittels Methodenplattform

In Bild 7 und 8 sind die Verschiebung in z-Richtung und die von-Mises-Spannung unter Verwendung von der Methodenplattform bzw. der herkömmlichen FEM (Abaqus) dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse festzustellen, wobei in der FEM 295613 Tetraederelemente und in der Methodenplattform ein FE-Gitter aus $20 \times 20 \times 20$ Hexaederelementen (erweitertes Gebiet) verwendet worden sind. Für die Octree-Unterteilung wurde $k = 4$ gewählt.

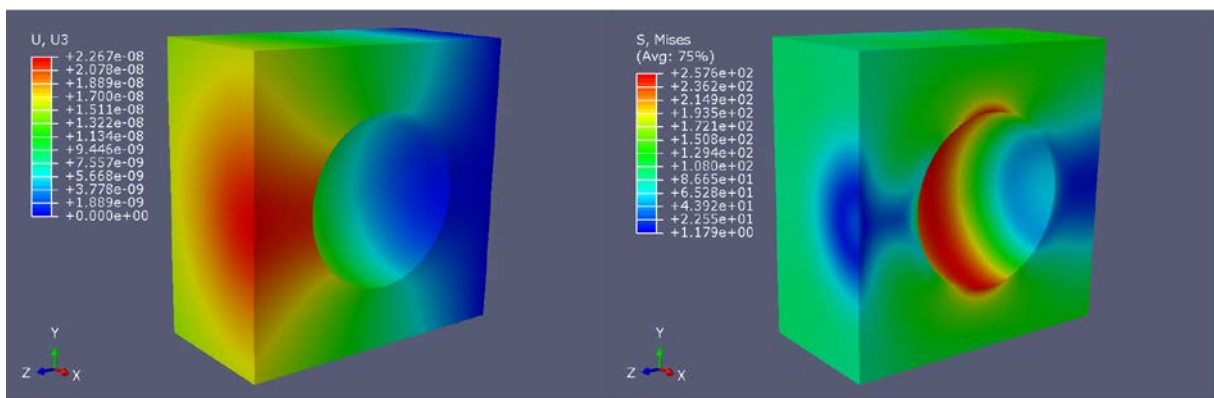


Bild 8: Verschiebung in z-Richtung (links) und von-Mises-Spannung (rechts) mittels FEM (Abaqus)

Als nächstes wird ein komplexeres Berechnungsbeispiel betrachtet. Hier sind unter Nutzung eines Zufallsgenerators fünf verschiedene Poren ($9 \text{ mm} \leq r \leq 11 \text{ mm}$) in einem Aluminium-Würfel ($a = 100 \text{ mm}$) verteilt. Die einzigen Beschränkungen bestehen darin, dass die Poren weder den Rand des Würfels noch sich untereinander schneiden dürfen. Des Weiteren müssen die Poren einen gewissen Abstand zum Würfelrand besitzen. Die Randbedingungen entsprechen denen aus Bild 6, wobei die Flächenlast $P = 20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ist.

Anhand der Bilder 9 und 10 lässt sich auch hier eine gute Übereinstimmung in den berechneten Größen feststellen. Für die Rechnungen sind 316756 Tetraederelemente (FEM in Abaqus) bzw. ein FE-Gitter aus $25 \times 25 \times 25$ Hexaederelementen (in der Methodenplattform) verwendet worden. Für die Octree-Unterteilung wurde $k = 3$ gewählt.

Im Großen und Ganzen lässt sich feststellen, dass sich für die behandelten Beispiele mittels der Methodenplattform unter Nutzung relativ grober FE-Gitter eine gute Übereinstimmung mit Berechnungsergebnissen aus der FEM (Abaqus) ergibt.

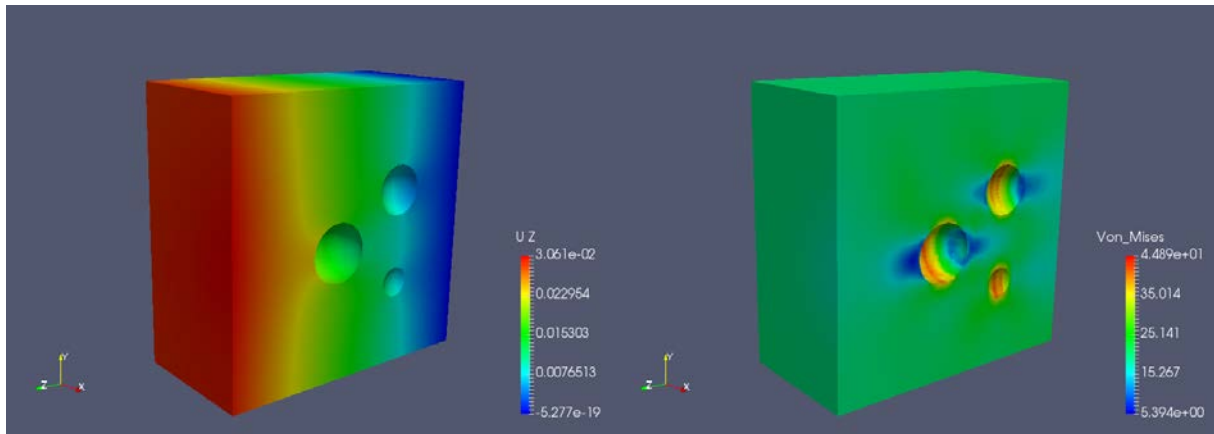


Bild 9: Verschiebung in z-Richtung (links) und von-Mises-Spannung (rechts) mittels Methodenplattform

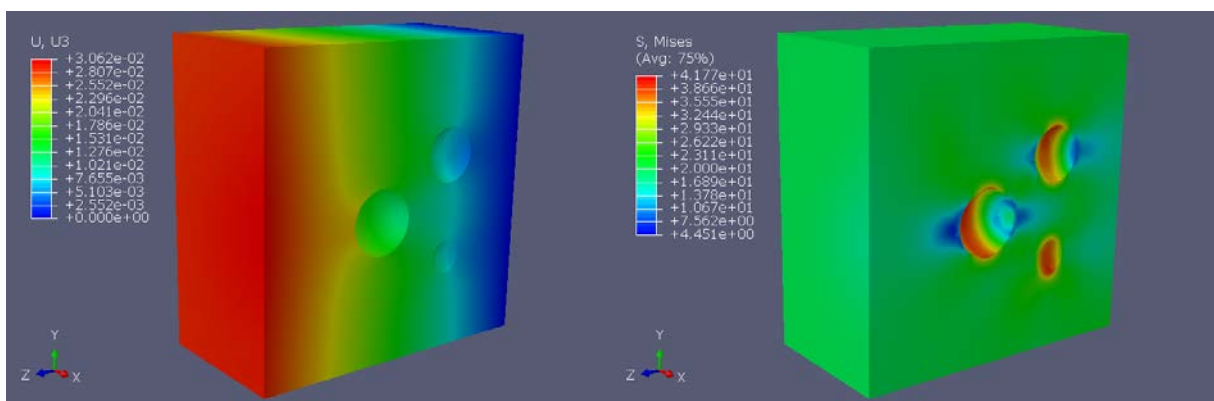


Bild 10: Verschiebung in z-Richtung (links) und von-Mises-Spannung (rechts) mittels FEM (Abaqus)

5. Ausblick

Ziel zukünftiger Arbeiten soll es sein, die Plattform hinsichtlich ihrer Prozessabläufe dahingehend weiter auszurichten, dass große Bereiche oder ganze Gussbauteile unter Berücksichtigung einer realen Porenmorphologie untersucht werden können. In diesem Zusammenhang ist auch die mögliche Eingliederung eines Bereinigungsprozesses von STL-Daten zu sehen, da es durchaus vorkommen kann, dass STL-Datensätze fehlerbehaftet sind.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Land Sachsen-Anhalt und bei der Europäischen Union (EFRE) für die finanzielle Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Duczek, S.; Berger, H.; Ambos, E.; Gabbert, U.: Eine neue Methode zur Berücksichtigung des Einflusses der Porosität in Al-Druckgussteilen auf die Festigkeit – Ein Beitrag zum Leichtbau, Giesserei-Rundschau, 2015, Bd. 62, Nr. 9/10, S. 222-227
- [2] Ambos, E.; Anders, U.; Schalk, S.; Bullick, M.; Reinhart, C.; Matzen, H.-U.; Besser, W.: Gussteilprüfung auf einem neuen Niveau – Neue Ergebnisse über den Einsatz schneller Computertomografen in Druckgießereien, Giesserei Erfahrungsaustausch, 2013, Bd. 11/12, S. 8-15
- [3] Redik, S.; Guster, C.; Eichlseder, W.: Bruchmechanische Lebensdauerbewertung von Aluminiumgussbauteilen mit Hilfe eines erweiterten Kitagawa-Diagramms, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2011, Bd. 156, Nr. 7, S. 275-280

- [4] Rehse, C.; Schmicker, D.; Maaß, A.; Bähr, R.: Ein Bewertungskonzept für computertomographisch ermittelte Porositäten in Gussteilen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die lokale Beanspruchbarkeit des Bauteils, *Giesserei-Rundschau*, 2013, Bd. 60, S. 106-110
- [5] Oberwinkler, C.; Eichlseder, W.: Berücksichtigung der Porenverteilung bei der betriebsfesten Auslegung von Aluminium-Druckgussbauteilen, *Giesserei-Rundschau*, 2009, Bd. 56, S. 168-173
- [6] Stroppe, H.; Sonsino, C. M.; Bähr, R.: Einfluss von Poren und Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit von Aluminiumgussteilen, *Giesserei*, 2011, Bd. 98, Nr. 8, S. 20-25
- [7] Gao, Y. X.; Yi, J. Z.; Lee, P. D.; Lindley, T. C.: The effect of porosity on the fatigue life of cast aluminium-silicon alloys, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2004, Bd. 27, Nr. 7, S. 559-570
- [8] Fröschl, J.; Gänsler, H.-P.; Gerstmayr, G.; Eichlseder, W.: Neuere Berechnungsansätze für die betriebsfeste Auslegung von Gussbauteilen in Leichtbauweise, *Giesserei-Rundschau*, 2007, Bd. 54, Nr. 9/10, S. 222-232
- [9] Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.: *The Finite Element Method - Volume 2: Solid Mechanics*, Butterworth-Heinemann, 2000
- [10] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*, Springer-Verlag, 2002
- [11] Düster, A.; Parvizian, J.; Yang, Z.; Rank, E.: The finite cell method for three-dimensional problems of solid mechanics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, Bd. 197, S. 3768-3782
- [12] Duczek, S.: Higher order finite elements and fictitious domain concept for wave propagation, *Doktorarbeit, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 458*, 2014
- [13] Parvizian, J.; Düster, A.; Rank, E.: Finite cell method: h- and p-extension for embedded domain problems in solid mechanics, *Computational Mechanics*, 2007, Bd. 41, S. 121-133