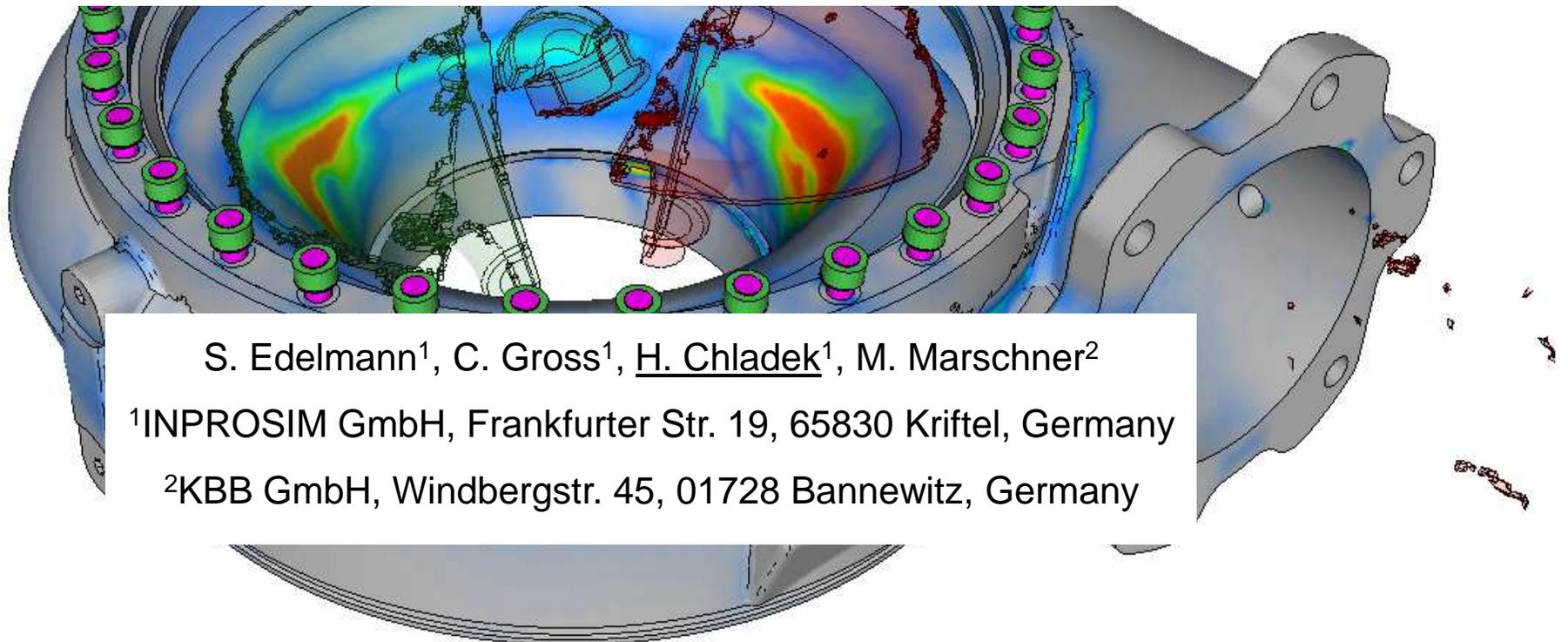


## Abbildung von Gussgehäusen und Schrauben in der Containment Simulation



# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

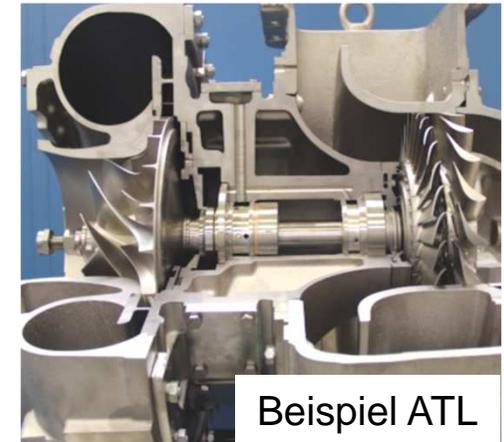
10. - 12. Oktober, Bamberg



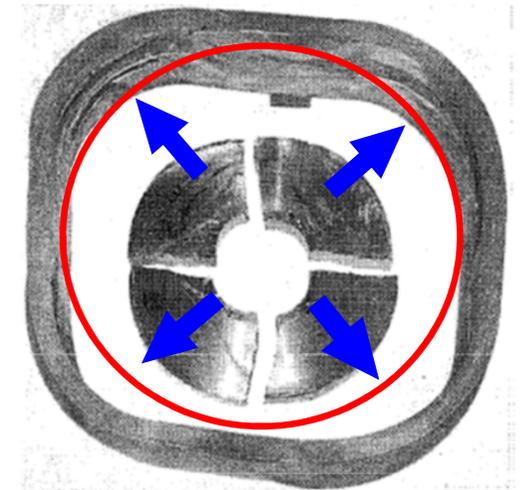
- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- Materialbeschreibung
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang



- Anforderung
  - Um im Motorenbereich die Ziele an Leistungsdichte, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz zu erreichen bedarf es der Aufladung
  - Bei der Aufladung mit Abgasturboladern (ATL) sind Anforderungen der Containment Sicherheit beim Laufradbersten zu erfüllen
  - Ziel ist es der Schutz von Menschen / Gütern
- Umsetzung
  - Diese Containment Sicherheit, ehemals nur im Versuch verifiziert, wird nun zusehends auch im Motorenbereich in der Simulation betrachtet



- Anforderung
  - Beim Bruch bzw. Bersten eines Laufrades müssen die Bruchstücke zurückgehalten werden; dies erfordert eine Balance von
    - hohe kinetische Energie der Bruchstücke des Laufrades
    - hohes Rückhaltevermögen der Struktur (innere Energie)
    - Interaktion der Bauteile innerhalb weniger Millisekunden
  - In der Simulation sind hierbei Nichtlinearitäten in Geometrie, Kontakt und Material zu erfassen
- Umsetzung
  - Um in dieser Containment Simulation eine hohe Aussagegüte zu erreichen hat sich ein gewisser Standard in den CAE Techniken etabliert

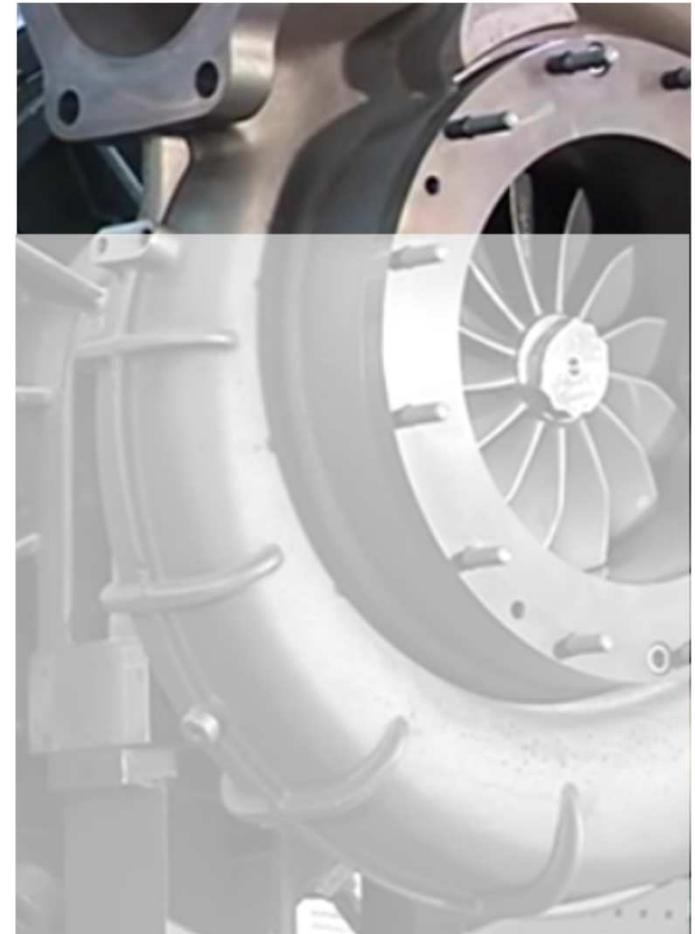


# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

10. - 12. Oktober, Bamberg

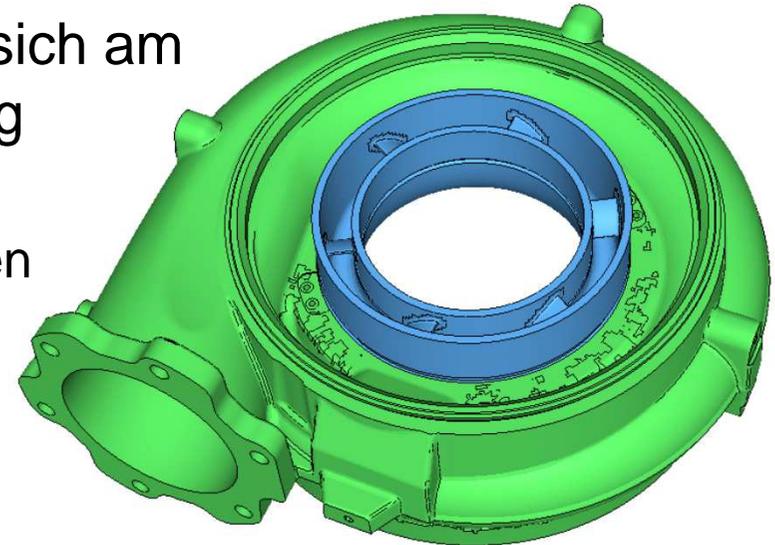


- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- Materialbeschreibung
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang



- Anforderung

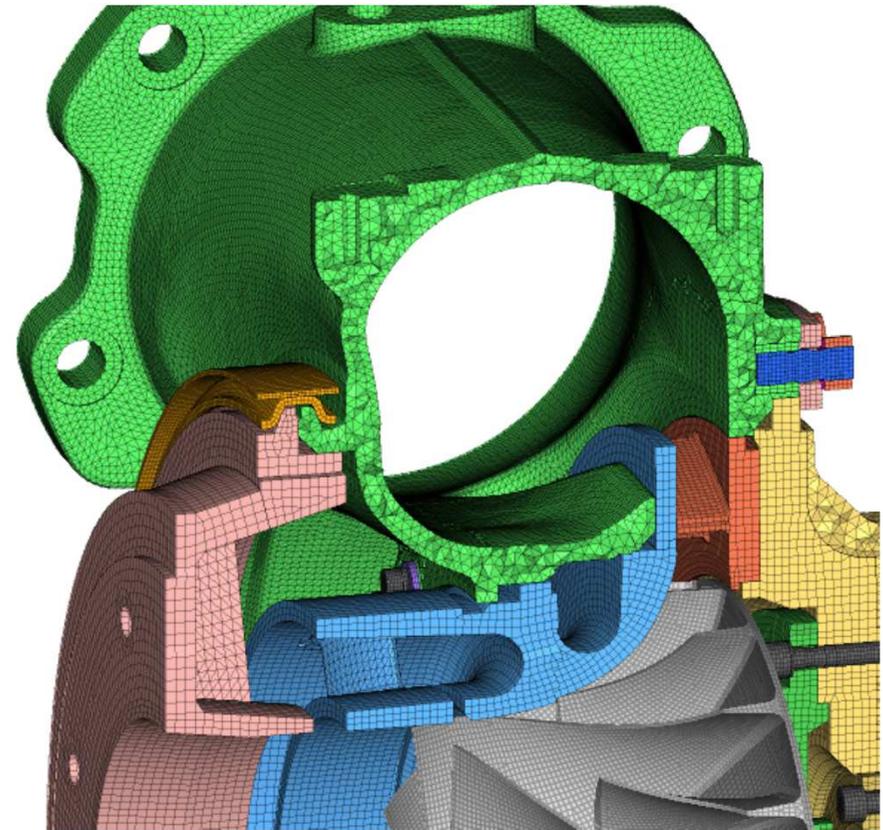
- Die Geometrie Modellierung orientiert sich am ATL Design und an der Berst-Belastung
  - Asymmetrie und hohe Komplexität der Gehäusebauteile bei den spiralförmigen Verdichter- und Turbinengehäusen
  - Lokale Belastung im Aufprallbereich



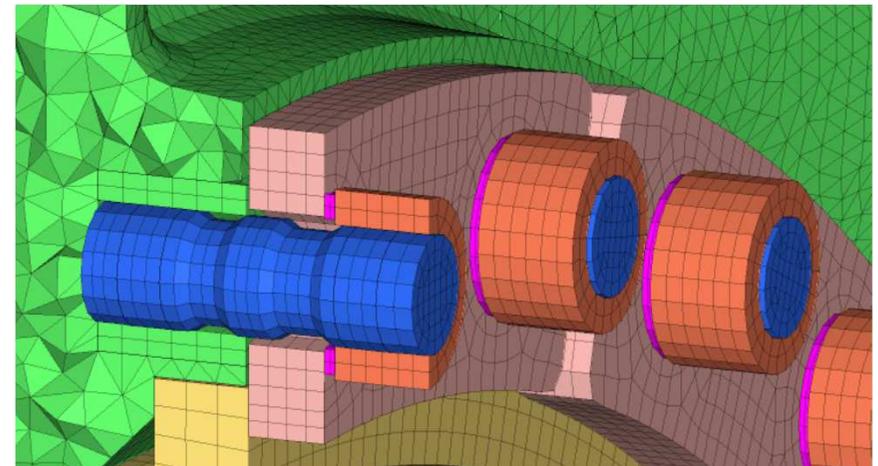
- Umsetzung

- Design- und belastungsgerechte Vernetzung im CAE Modell
  - Geometrie-getreue Vernetzung der Bauteile und Verbindungen, d.h. überwiegend 3D SOLID Vernetzung (BRICK / TETRA)
  - Rotationssymmetrische 2.5D Vernetzung nur in Konzeptstudien

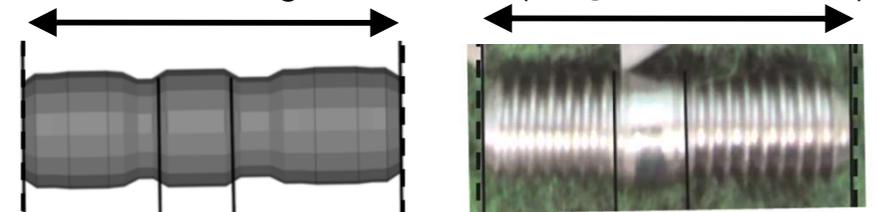
- Abbildung von Gehäuse
  - Geometrie-getreue 3D SOLID Vernetzung ist „State of the Art“
    - BRICK Vernetzung in rotations-symmetrischen Bereichen
    - TETRA Vernetzung in komplexen Bereichen
  - Vernetzungsregeln
    - Min. 3, besser 5 Elemente über der Höhe in relevanten Bereichen
    - Höhere Anzahl an Elementreihen im Bereich des Durchschlags
    - 2 Elementreihen um Bohrungen
    - Berücksichtigung von Spielen



- Abbildung von Schrauben
  - Geometrie-getreue 3D SOLID Vernetzung ist „State of the Art“
    - BRICK Vernetzung aller relevanter Schrauben und Verbindungen
  - Vernetzungsregeln
    - Berücksichtigung von Gewinde- und Spannungsquerschnitten
    - Abbildung von Dehnungs- sowie Kerb- und Fügequerschnitten
    - Min. 4, besser 6 Elemente über den Schraubendurchmesser
    - Vereinfachte runde Abbildung von Schraubenkopf und Mutter
    - TIED Verbindung an Struktur

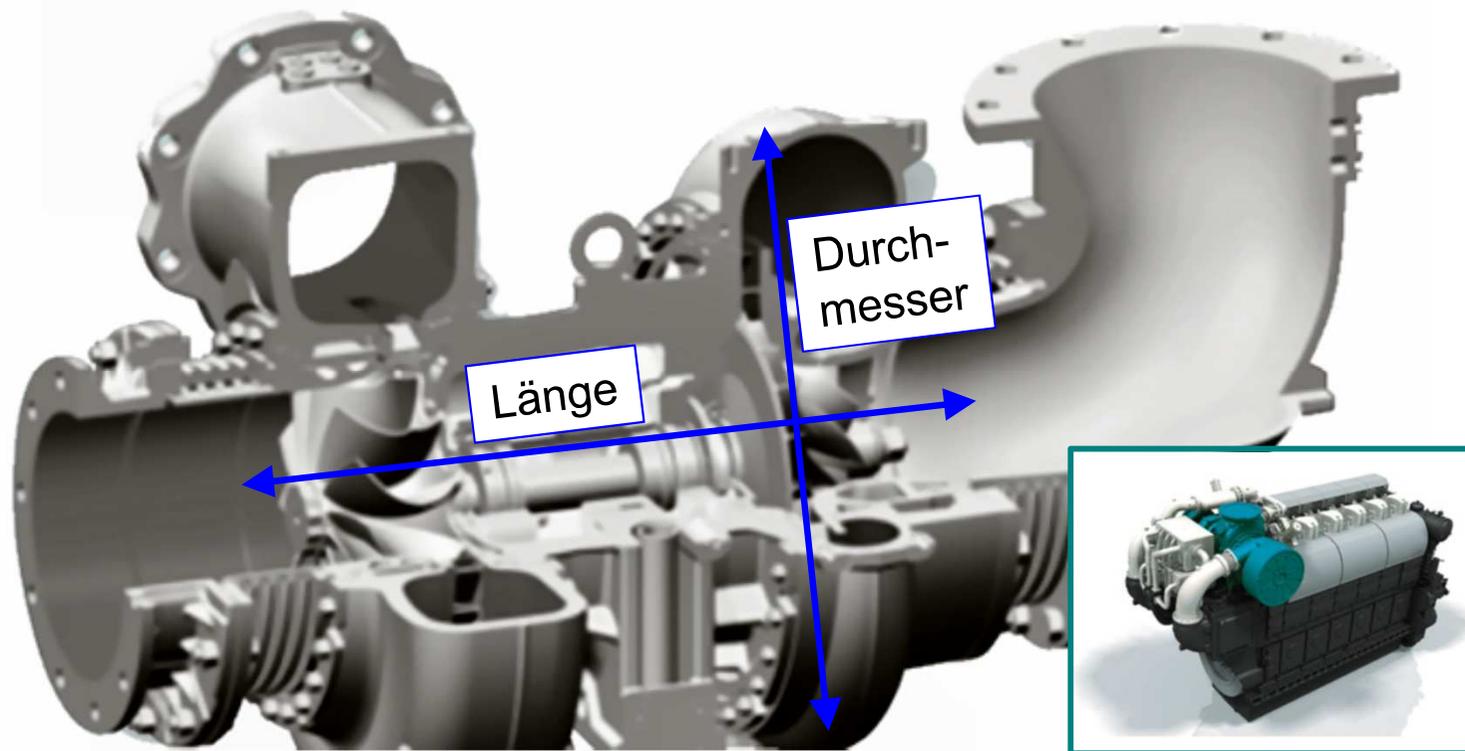


Detail Abbildung Schrauben (Länge, Querschnitte)



- CAD Basis Design

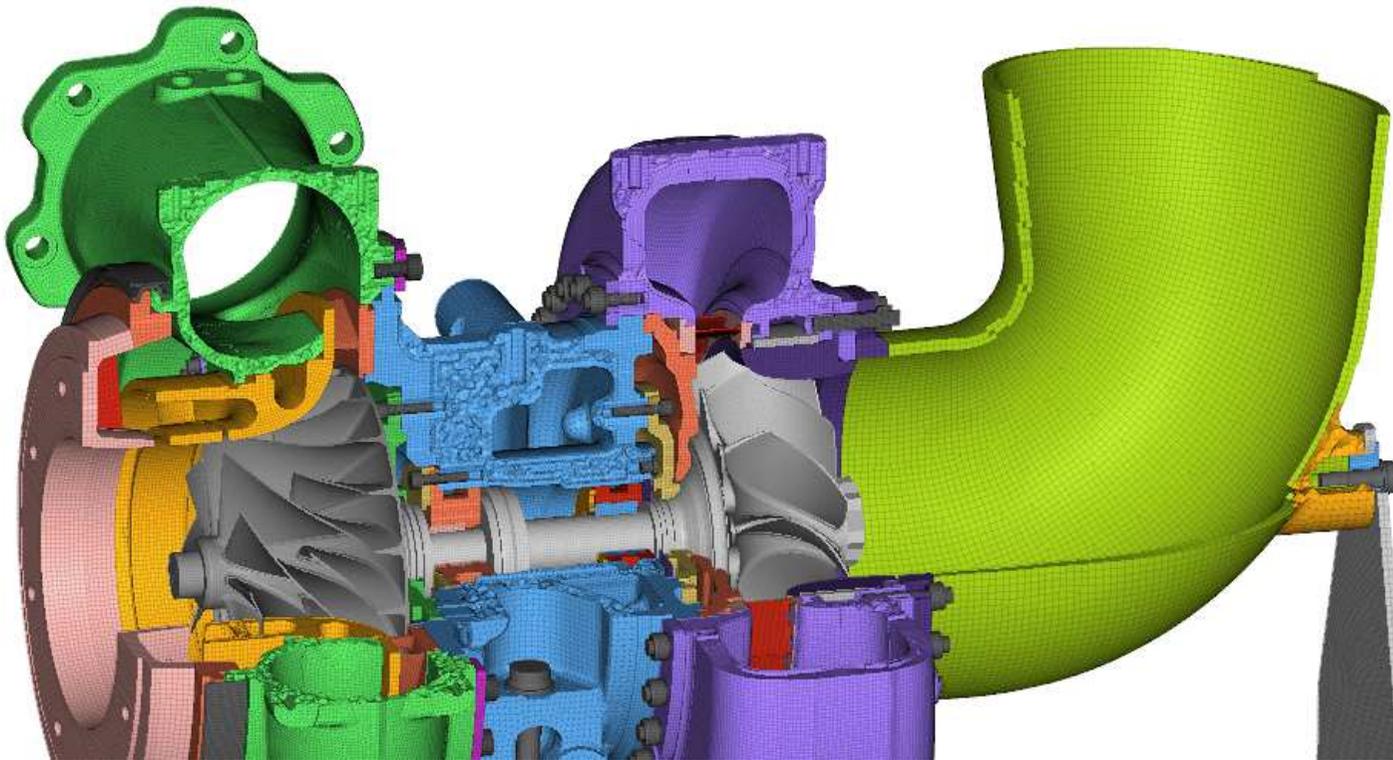
- Typisches Design eines modernen ATL für den Einsatz bei großen Diesel, Heavy Duty und Gas Motoren



## Exemplarische Dimensionen

- 500-800 mm Länge
- 500-700 mm Durchmesser
- 300-500 kg Gewicht
- Beispiel für den Einsatz auf einem Motor

- CAE MASTER Modell
  - Geometrie-getreues CAE Modell „State of the Art“ des komplett aufgebauten ATL mit Rotorgruppe, Gehäuse und Anbindung



typische CAE  
Modell Daten

- 4 - 8 Mio.  
Elemente
- 3 -7 Mio.  
Knoten
- 0,5 bis 5mm  
Kantenlänge
- 100 - 200  
Parts
- 50 -100  
Materialen

# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

10. - 12. Oktober, Bamberg



- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- **Materialbeschreibung**
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang

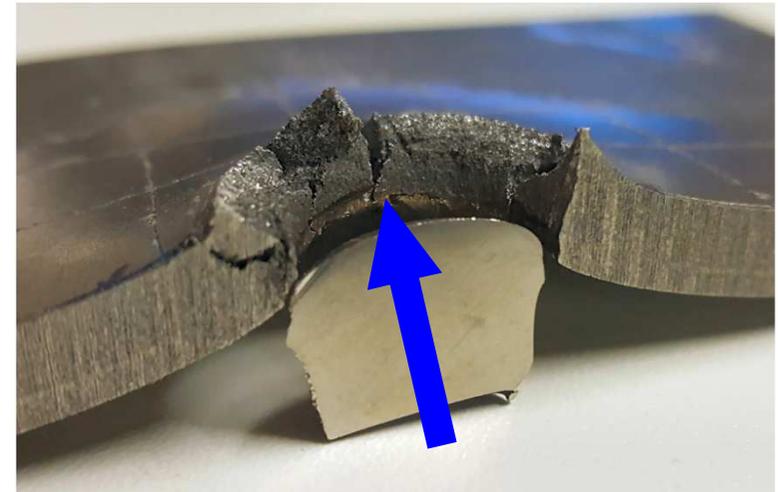


- Anforderungen

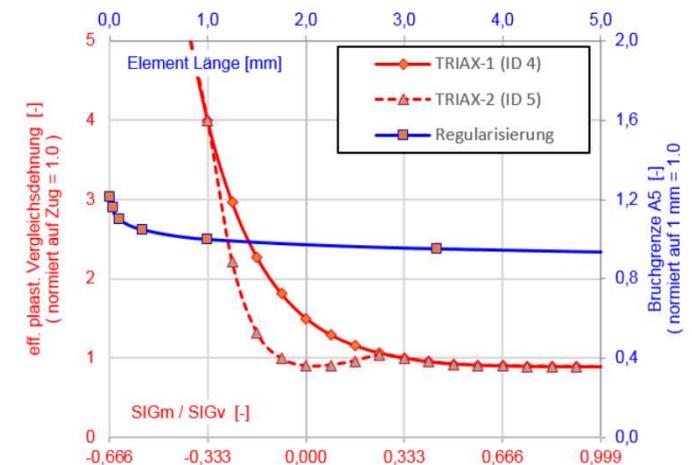
- Abbildung des dyn. Verformungs- und Versagensverhalten bis zum Bruch
- Einfluss der Bauteiltemperatur
- Abbildung lokaler Effekte in der Vernetzung der Bauteile

- Umsetzung

- Abbildung von temperaturabhängigen Fließkurven unter hoher dynamischer sowie mehrachsiger Belastung bis zum Bruch
- LS-DYNA bietet diverse Materialbeschreibungen für diese Abbildung, z.B. Johnson-Cook und seine Derivate, GISSMO mit Entfestigung und MAT224 mit umfassender tabulierter Eingabe



- Abbildung als MAT120\_JC
  - MAT120\_JC (Gurson) mit Johnson-Cook Ansatz hat sich als eine mögliche Materialbeschreibung über die letzten Jahre etabliert
    - Tabulierte Fließkurven und Dehnraten
    - Effektives, plastisches Versagenskriterium
    - Tabulierte Erfassung der Elementgröße
    - Stabiles und schnelles Laufverhalten in der Containment Simulation
    - Einfacher Aufbau, anwenderfreundlich
  - Druckverfestigung nur indirekt über die Triaxialität abgebildet
  - Beschreibung für einzelne Temperaturen, keine innere Erwärmung
  - Beschränkte Anwendbarkeit bei sehr spröden Werkstoffen



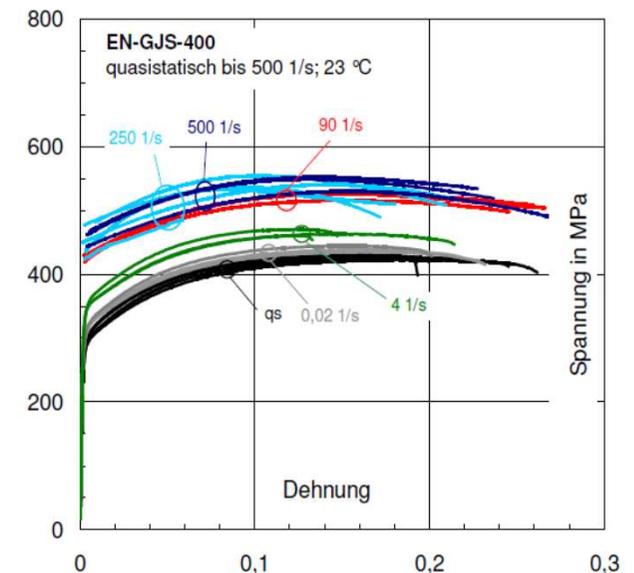
- Beispiel für ein Gehäuse

- Basis Parameter für die Materialbeschreibung ist die Kenntnis der Fließkurve mit den Stützstellen  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$  und  $A_5$

- Normung, Literatur, Forschungsergebnisse
- Individuelle Probenversuche (Zug, Biegung)
- Überlagerung der anderen Parameter aus Versuchen bzw. oft auch nur in Analogie

- Verdichtergehäuse

- Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-400 als Werkstoff mit hoher Festigkeit und Duktilität
- Umfangreiche Daten zur Charakterisierung nach Norm und über diverse Forschungsuntersuchungen liegen vor (DIN EN 1563, FVV 0936, etc)

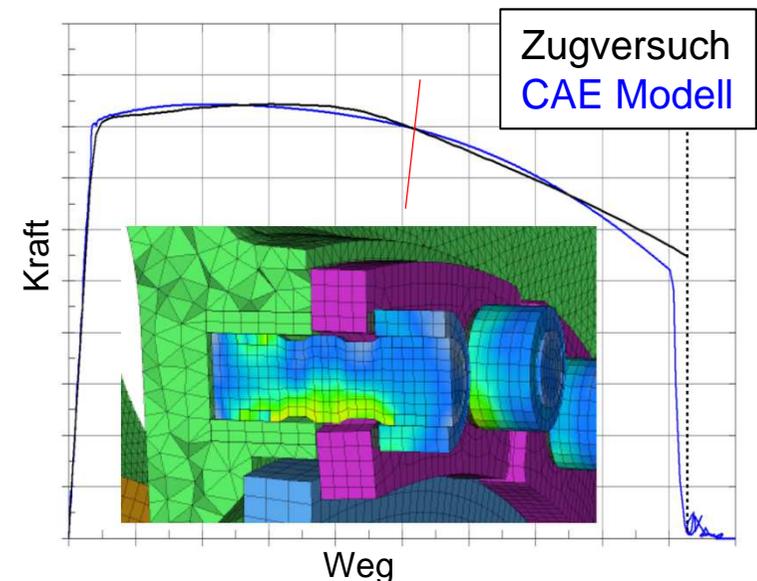


- Beispiel für eine Schraube

- Basis Parameter für die Materialbeschreibung ist die Kenntnis der Fließkurve mit den Stützstellen  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$  und  $A_5$ 
  - Analoge Ansätze für die Parameter zur Daten Basis wie beim Gehäuse
  - Konservativer Ansatz über die Festigkeitsklassen 8.8, 10.9, 12.9

- Schrauben

- Für Containment-relevante Schrauben wird der Abgleich von Zugversuch und Simulation im Vorfeld empfohlen
- Bei Schrägzug über 3 Grad ist die überlagere Biegebelastung von Bedeutung
- Einfluss hoher Temperatur bei Turbinen
- Design Limit in der Auslastung



# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

10. - 12. Oktober, Bamberg



- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- Materialbeschreibung
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang



- Anforderung
  - Um der Herstellerverantwortung zu genügen bedarf es in der ATL Entwicklung der Betrachtung der Containment Sicherheit
  - Diese Betrachtung kann frühzeitig mittels der Simulation erfolgen
  - Der Versuch kann den Erfolg im Design nur final bestätigen
- Umsetzung
  - Bei der Entwicklung einer neuen Verdichterstufe wurde die Simulation in der Auslegung der Containment Sicherheit genutzt
  - Final wurde der Erfolg der Entwicklung im Vergleich der Prognose der Simulation zu einem Berst-Versuch überprüft

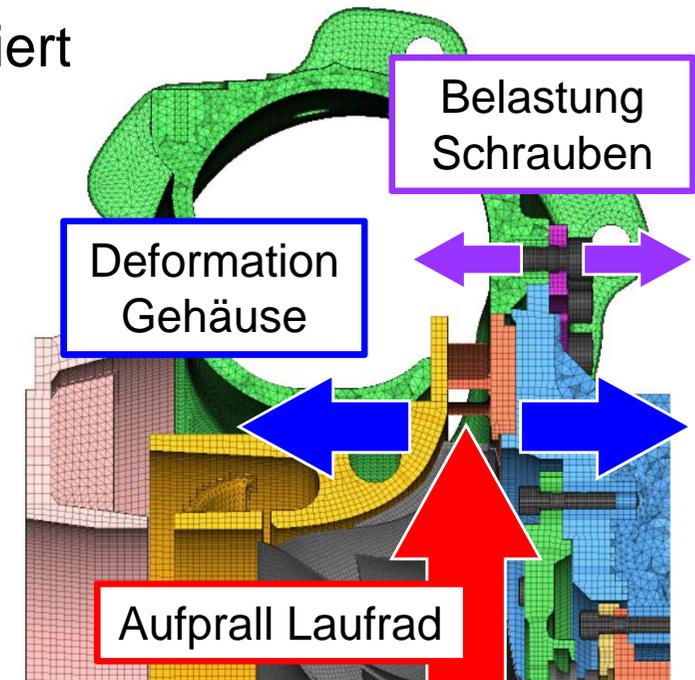


- Containment Betrachtung

- In der Containment Sicherheit wird die Rückhaltung der Bruchstücke beim Bersten einer Laufrades innerhalb der Gehäuse gefordert
- Herstellerverantwortung: Schutz von Menschen / Gütern im Umfeld
- In der Simulation kann das Design analysiert und optimiert werden

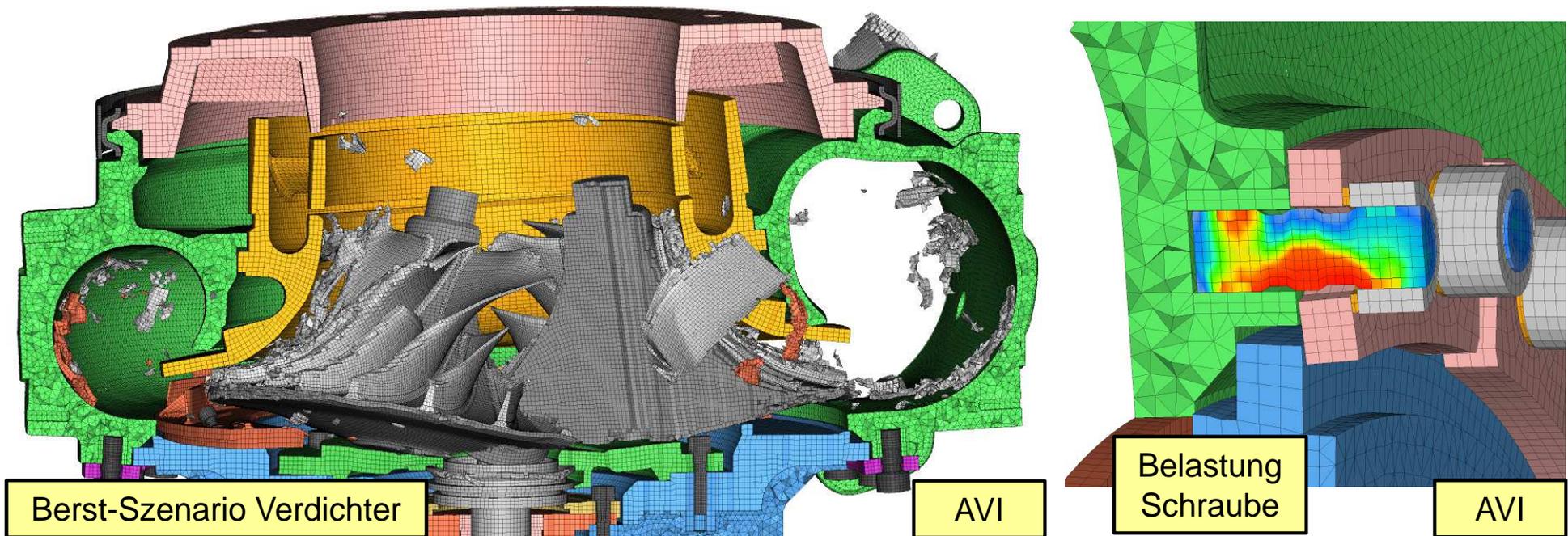
- Design Parameter

- Strukturelles Design und Wandstärke der relevante Gehäuse
- Verbindungselemente wie z.B. Anzahl und Größe der Schrauben

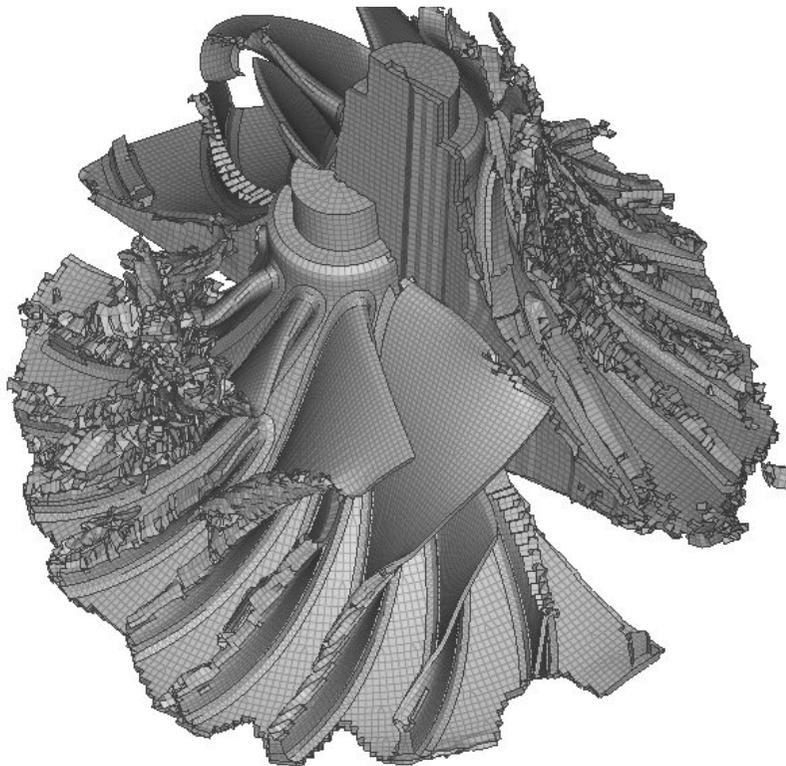


# Vergleich Versuch

- Vergleich Simulation und Versuch
  - In der Simulation wie im Versuch wird das Laufrad präpariert, um einen Bruch des Laufrades bei der Prüfdrehzahl abzubilden
    - Der Vergleich zum Versuch erfolgte ohne CAE Tuning der Simulation

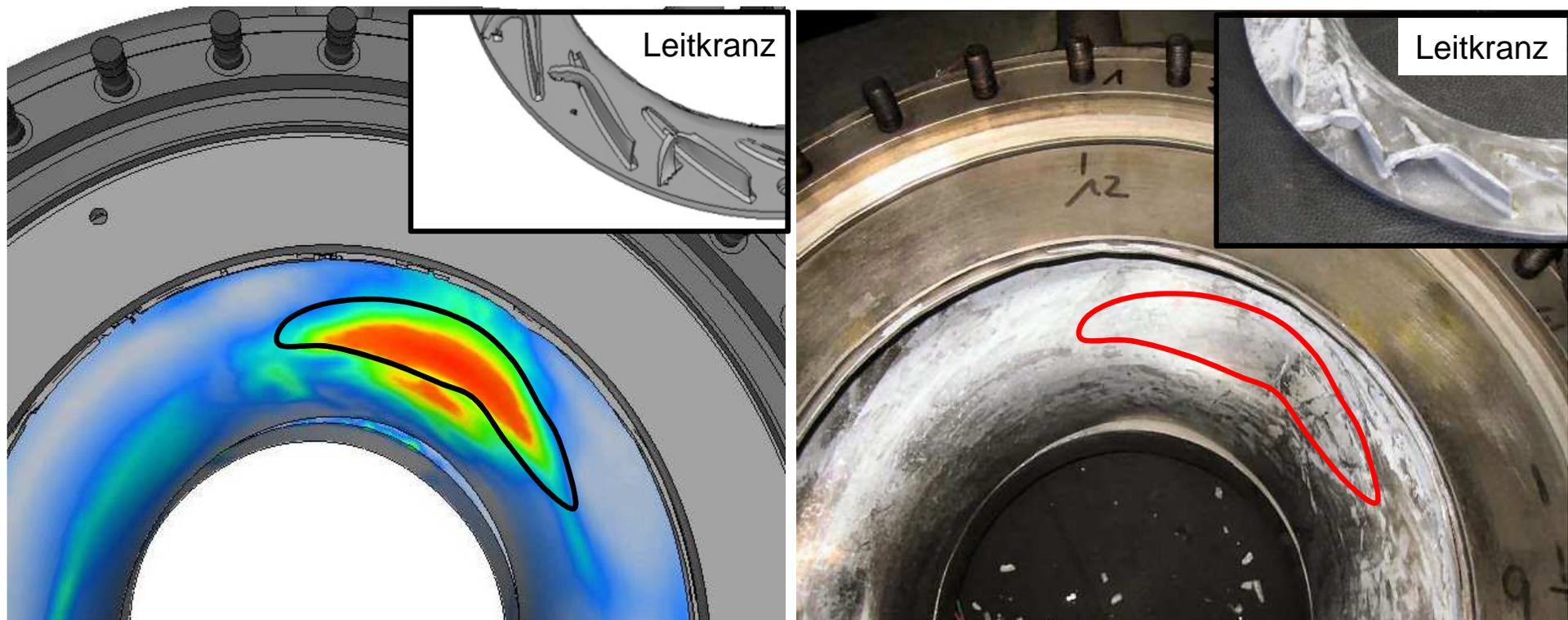


- Vergleich Simulation und Versuch
  - Versagensbild für den 2-teiligen Bruch des Verdichterlaufrades
    - Deformation des Rades bis hin zur Zerstörung der Schaufelstruktur



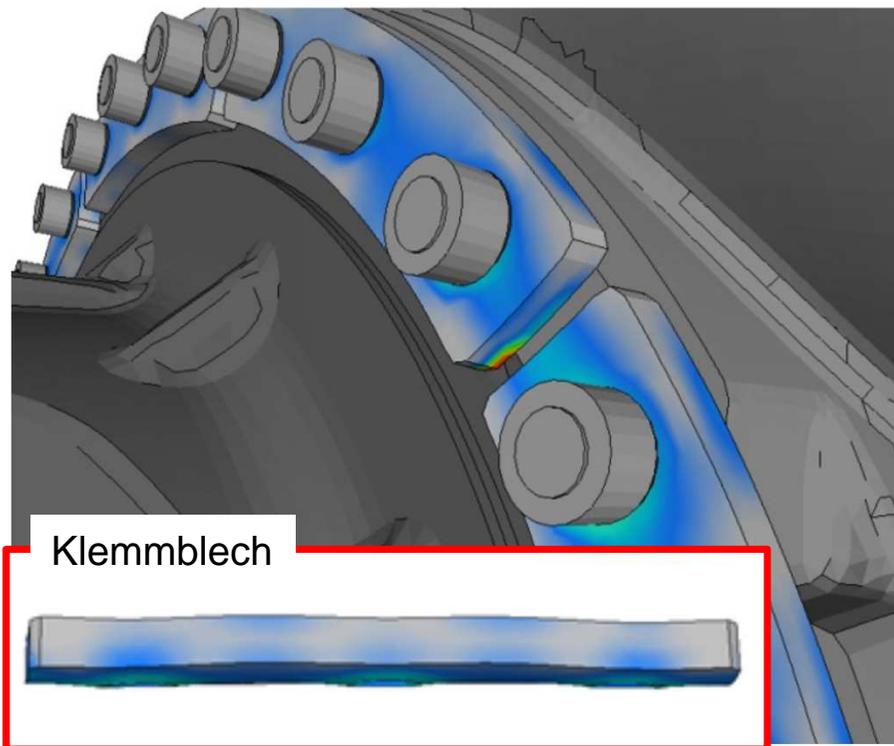
# Vergleich Versuch

- Vergleich Simulation und Versuch
  - Lokale Deformation im Aufprallbereich Einsatz Verdichtergehäuse
    - Plastische Deformation am Limit zum Riss im Gussgehäuse



# Vergleich Versuch

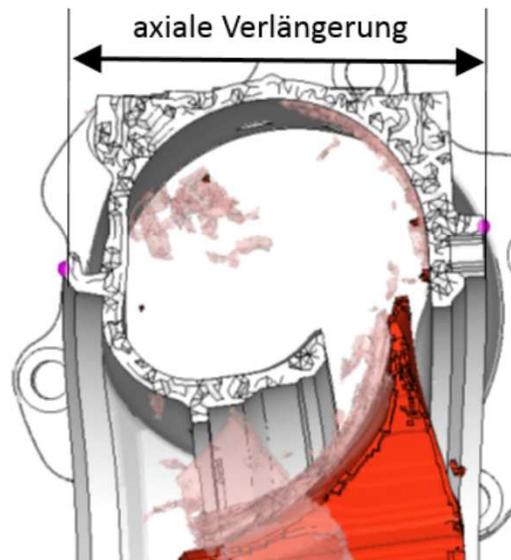
- Vergleich Simulation und Versuch
  - Hochbelastete Klemmverbindung Verdichter-Lagergehäuse
    - Lokale Deformation der Schrauben und der Laschen der Verbindung



# Vergleich Versuch

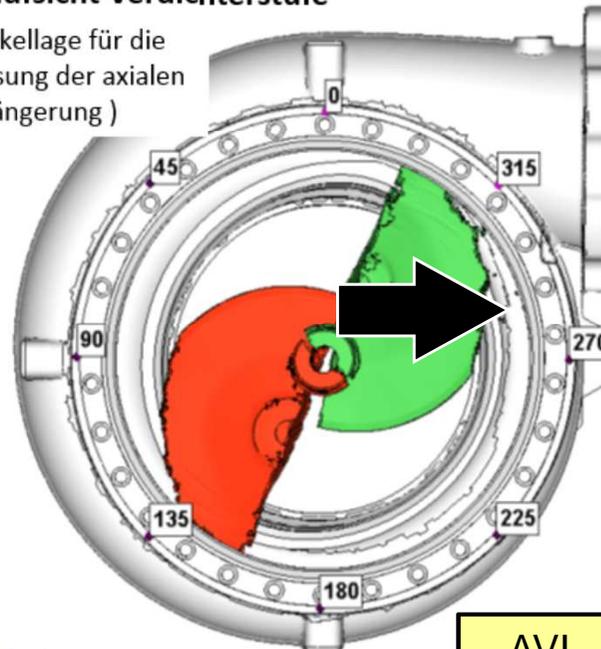
- Vergleich Simulation und Versuch
  - Axiale Verlängerung der Verdichterstufe nach dem Berstversuch
    - Notwendigkeit der Abbildung der 3D Geometrie über den Umfang

**Schnitt durch Verdichterstufe**  
(nur Gehäuse und Laufrad und Maß der axialen Verlängerung dargestellt)

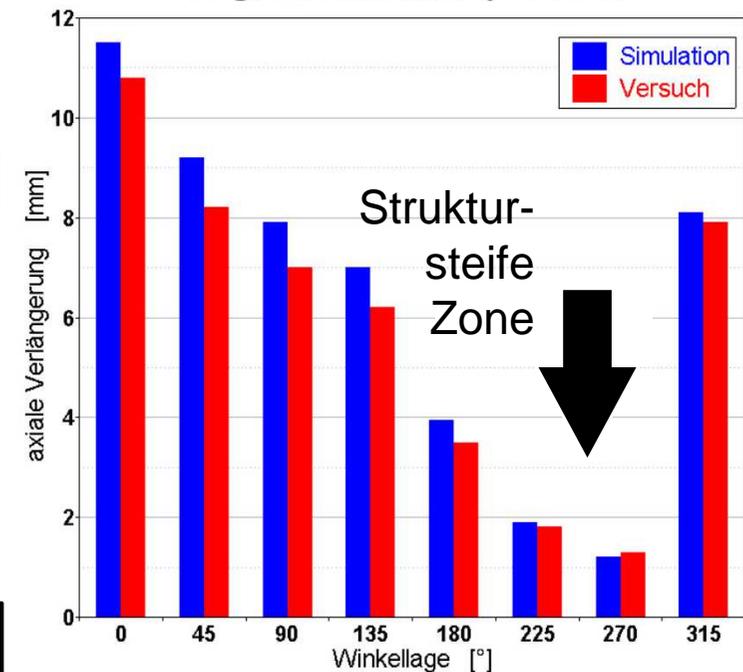


**Draufsicht Verdichterstufe**

(Winkellage für die Messung der axialen Verlängerung)



**Vergleich Simulation / Versuch**



# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

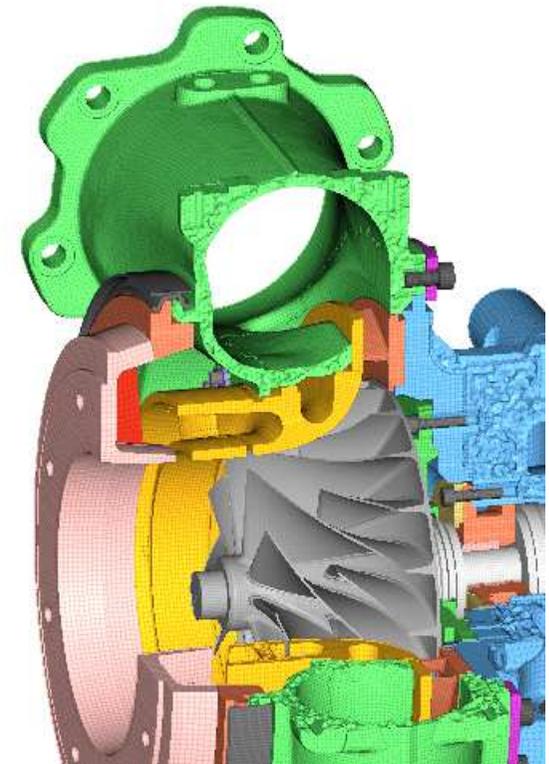
10. - 12. Oktober, Bamberg



- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- Materialbeschreibung
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang

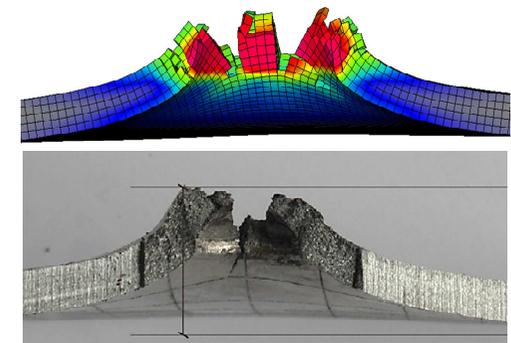


- Anforderung
  - Im Hinblick auf die geforderte Sicherheit bedarf es für eine effiziente ATL Entwicklung der Simulation mit hoher Aussagegüte
- Umsetzung
  - Dazu haben sich gewisse CAE Techniken als „State of the Art“ etabliert
    - Geometrie-getreue 3D SOLID Abbildung aller relevanten Bauteile mit hoher Elementdichte
    - Verformungs- und Versagensverhalten mit dyn. Verfestigung, Triaxialität, Elementeinfluss
    - Abgleich Containment-relevanter Schrauben im Schrauben Zugversuch bis zum Bruch



- **Ausblick**

- Die Containment Simulation hat mit den aktuellen CAE Techniken als „State of the Art“ Eingang in die ATL Entwicklung gefunden
- Der Vergleich von Simulation und Versuch bestätigt die Aussagegüte in der Bewertung sicherheitsrelevanter Bauteile
- Die Freigabe einzelner ATLs in einer Produktfamilie über die Simulation ist möglich
- In der Versagensbeschreibung bis zum Bruch sind die CAE Techniken weiter zu entwickeln
- Eine ATL Freigabe allein über die Containment Simulation wird langfristig angestrebt



# 14. Deutsches LS-DYNA Forum

10. - 12. Oktober, Bamberg



- Einleitung
- Geometrie Modellierung
  - Abbildung von Gehäuse und Schrauben
- Materialbeschreibung
  - Parameter in der Containment Simulation
- Vergleich zum Versuch
  - Vergleich Simulation und Versuch
- Zusammenfassung
- Anhang



- Danksagungen

- Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V.

- Vielen Dank für die Umsetzung des Forschungsprojektes FVV 0936 „Containment Sicherheit“, bei dem ATL Gusswerkstoffe im Detail unter dem Einfluss von Dehnraten, Temperatur und Mehrachsigkeiten untersucht wurden
    - Ferner vielen Dank an das BMWi und die beteiligten Unternehmen, welche die finanziellen Mittel und die Werkstoffe für das Projekt bereit gestellt haben
    - [www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de)



- Kompressorenbau Bannewitz (KBB) GmbH

- Vielen Dank für die Unterstützung mit Versuchsergebnissen innerhalb der Entwicklung einer Verdichterstufe, mit denen es möglich wurde, die entwickelten CAE Techniken bzgl. ihrer Aussagegüte im Detail zu überprüfen und die Qualität dieser „State of the Art“ Ansätze zu bestätigen
    - [www.kbb-turbo.de](http://www.kbb-turbo.de)



- Quellen / Literaturverzeichnis

- Edelmann, S., Groß, C., Chladek, H.: "Simulation of a clamping ring under high dynamic loading", 7<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference, 14 - 15 May 2009, Salzburg, Austria
- Edelmann, S., Walter, M., Chladek, H.: "Material Model for Deformation and Failure of Cast Iron for High-Speed Impacts", 3<sup>rd</sup> European Hyperworks Technology Conference, 2 - 4 November 2009, Ludwigsburg, Germany
- Kompressorenbau Bannewitz (KBB): "Turbochargers, Boost Your Power, Boost Your Efficiency", Produktbroschüre zu K2B, ST, HPR, R und M Series, KBB, 07 / 2016, Bannewitz, Germany
- Australian Transport Safety Bureau: "In-flight unconstrained engine failure, Airbus A380-842, VH-OQA, 4 November 2010", Safety Report AO-2010-089, Final-27 June 2013, Canberra, Australia
- Stamper, E., Hale, S.: "The Use of LS-DYNA Models to Predict Containment of Disk Burst Fragments", 10<sup>th</sup> International LS-DYNA Conference, 8 -10 June 2008, Dearborn, Michigan, USA

- Quellen / Literaturverzeichnis

- LS-DYNA® Aerospace Working Group (AWG): "Modeling Guidelines Document", Version 15-1 dated August 2015, <http://awg.lstc.com/tiki/tiki-index.php>, USA
- Erhard, T.: "Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA", LS-DYNA Forum, 12 - 13 October 2011, Filderstadt, Germany
- LS-DYNA® Keyword User's Manual: "Volume I Keywords User's Manual", LS-DYNA R7.1, May 26, 2014 (revision: 5471), Livermore Software Technology Corporation (LSTC), USA
- LS-DYNA® Keyword User's Manual: "Volume II Material Models", LS-DYNA R7.1, May 19, 2014 (revision: 5442), Livermore Software Technology Corporation (LSTC), USA
- LS-DYNA® Aerospace Working Group (AWG): "MAT\_224 User Guide", AWG Resources, 3 June 2016, <http://awg.lstc.com/tiki/tiki-index.php>, USA
- Winter, T., Dr. Huß, A., Beck, H.: "Simulation of Containment Tests of fast spinning Rotor by explizit FEM", 6<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference, 29 - 30 May 2007, Gothenburg, Sweden

- Quellen / Literaturverzeichnis

- LS-DYNA® Aerospace Working Group (AWG): "FAA Rotorburst and Fan Blade Out Research Reports Listing", May 2016, <http://awg.lstc.com/tiki/tiki-index.php>, USA
- Fras, T., Colard, L., Reck, B.: "Modeling of Ballistic Impact of Fragment Simulating Projectiles against Aluminium Plates", 10<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference 2015, 15<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> June 2015, Würzburg, Germany
- Häcker, R., Knothe, E., Dr. Memhard, D., Dr. Andrieux, F.: "Containment Sicherheit", FVV Vorhaben Nr. 936, Abschlussbericht, Heft 928 - 2011, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V., 4. April 2011, Frankfurt am Main, Germany
- Dr .Memhard, D., Andrieux, F., Dr. Sun, D.-Z., Häcker, R.: "Development and Verification of a Material Model for Prediction of Containment Safety of Exhaust Turbochargers", 8<sup>th</sup> European DYNA Conference, 23 - 24 May 2011, Strasbourg, France
- Dr. Haufe, A., Dr. Feucht, M., Neukamm, F., DuBois, P., Dr. Borvall, T.: "Recent Developments in Damage and Failure Modeling with LS-DYNA", Nordic LS-DYNA Forum, 14 October 2010, Göteborg, Sweden