

Test Based Modeling Approaches for Vehicle Cooling Modules

Radu Visinescu, Michael Weil, Bernd Gosolits

Adam Opel GmbH, Rüsselsheim, Germany

Summary:

This paper presents different modeling techniques to verify and validate the local and global structural deformation for the radiator package and cooling modules. The verification and calibration work for the investigated numerical models is based on a simplified punch and bending test (crush) procedure.

The main focus of this work is the proper test definition and in parallel the gradual generation of the FE-Models for the numerical simulation. On one hand this was represented by the identification of relevant response features from tested specimens and on the other hand, the interpretation of this information according to the LS-DYNA modeling capability.

The purpose was to generate equivalent numerical models for each cooling component in respect to the test results, in order to get a combination basis to obtain one suitable radiator-assembly for the validation effort of the full car crash scenario.

The modeling approach is based on the simplified test procedures and follow, a pragmatic engineering practice. The model has to meet the best compromise concerning:

- engineering effort - modeling work in order to generate a robust numerical model
- confidence level - phenomenological relevance
- computational resource

Keywords:

Modeling of Hybrid Structures, Failure and Damage, EFG, SPH

1 Einführung

Bei der Erstellung von Fahrzeug-Berechnungsmodellen gewinnt die exakte Modellierung von Package-Komponenten (Kühlmodul, Motor, Getriebe, Reifen, Bremskraftverstärker etc.) zunehmend an Bedeutung. Stetig steigende Gesetzesanforderungen, die Einsparung von Prototypen sowie verkürzte Entwicklungszeiten verlangen während der Fahrzeugentwicklung immer genauere prädiktive Aussagen über lokale Deformationen. Um das breite Spektrum von Verbrauchertests, Gesetzestests und internen Anforderungen abdecken zu können, muss das Verhalten von Package-Bauteilen während eines Crash-Ereignisses und die Wechselwirkung mit der umliegenden Blechstruktur realitätsnah abgebildet werden. Daher richtet sich der Fokus mehr und mehr auf eine genaue Charakterisierung solcher Bauteile bezüglich Deformationseigenschaften, Kinematik und Struktur-Response.

Das Kühlmodul beeinflusst im Frontalaufprall die Krafteinleitung und die Kraftflussverteilung im Motorraum und steuert damit auch die Deformationsmoden der umliegenden Fahrzeugstruktur (Crashbox, Vorderrahmen, Vorderachsträger).

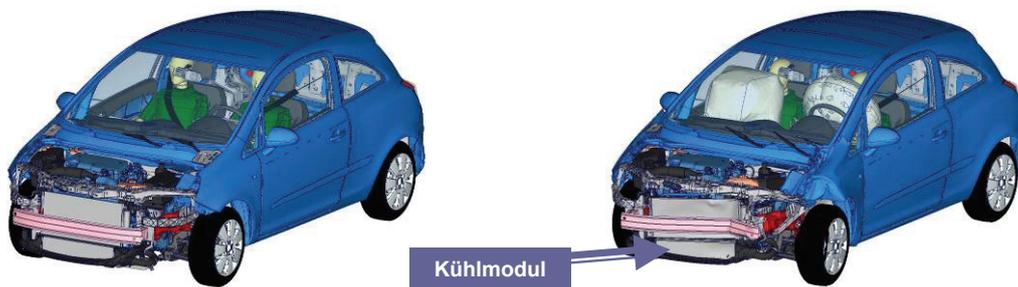
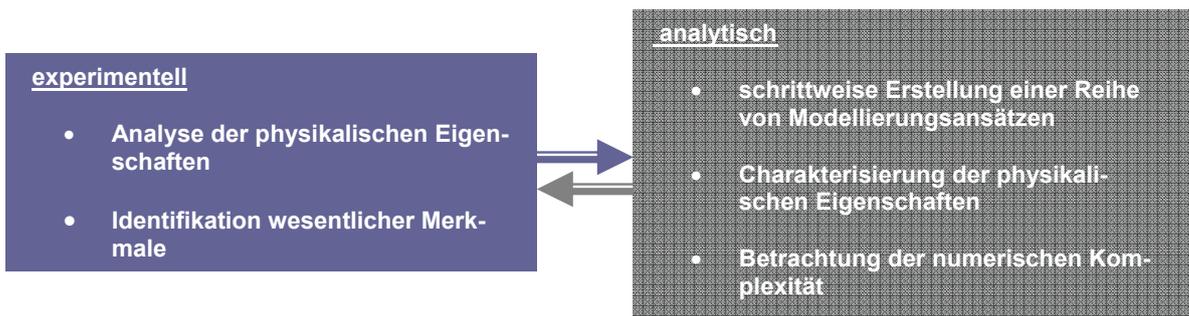


Fig.0-1 unverformte und verformte Frontstruktur

Darüber hinaus bestimmt die Wechselwirkung zwischen Kühlmodul und Frontstruktur maßgeblich das Verzögerungsverhalten des Fahrzeugs im US-NCAP-Test (56kph, 100%, starre Wand).

2 Problemdefinition

Basierend auf einer Reihe von Komponententests wurden verschiedene Modellierungsansätze erarbeitet, um das physikalische und kinematische Verhalten des Kühlmoduls zu charakterisieren. Die Entwicklung dieser Ansätze gliedert sich in zwei Aufgabenfelder:



Zwischen Versuchsdurchführung und Modellierungsstrategie besteht dabei eine enge Verzahnung. Weitere Schwerpunkte dieser Untersuchung bilden die Hybridmodellierung der Aluminium-Wabenstruktur mit Kunststoffteilen sowie die Modellierung der Verbindungselemente.

3 Komponentenversuche

Das in Fig. 3-1 dargestellte Modul besteht aus vier Komponenten:

- Kondensator (A)
- Ladeluftkühler (B)
- Kühler (C)
- Lüftereinheit (D)

Das Kühlmodul ist durch Gummielemente am fahrzeugseitigen Längsträger befestigt und durch zwei Kunststoffstifte an den Achsträger gekoppelt.

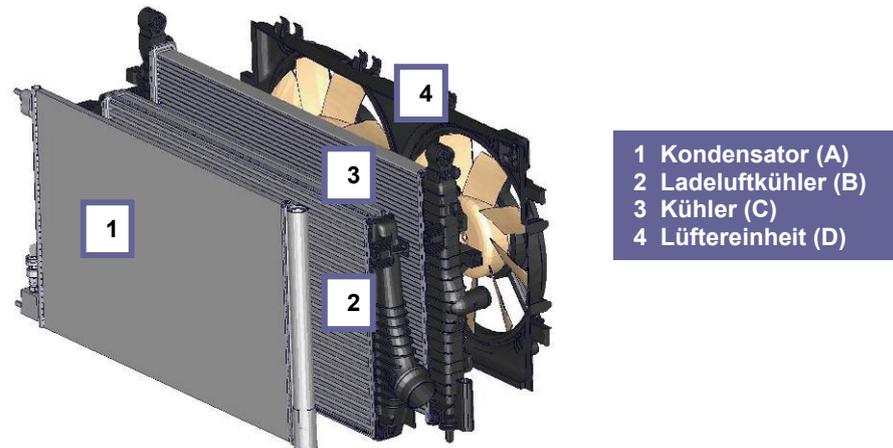


Fig.3-1 Aufbau des Kühlmoduls

Um die physikalischen Eigenschaften der Kühlmodule experimentell zu ermitteln, wurden zwei Versuchsreihen definiert:

- quasistatische Druckversuche
- quasistatische Biegeversuche

Tab. 3-1 zeigt die durchgeführten Testkombinationen.

Testobjekt	quasistatische Druckversuche	quasistatische Biegeversuche
Einzelmodule	getestet	
Gesamtmodul mit Lüftereinheit		getestet
Gesamtmodul ohne Lüftereinheit	getestet	getestet

Tab.3-1 Übersicht der durchgeführten Versuche

Die Einzelbaugruppen des Kühlmoduls sind topologisch vergleichbar und unterscheiden sich nur in der geometrischen Dimensionierung (Fig. 3-2).

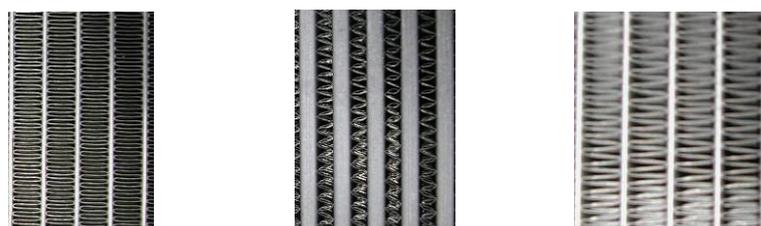


Fig. 3-2 Kühlermatrix von Kondensator (li.), Ladeluftkühler (mi.), Kühler (re.)

Bei allen drei Baugruppen ist der Abstand zwischen den Wellrippen im Verhältnis zu den im Frontalaufprall vorkommenden Impaktorflächen sehr klein, so dass die Wellrippen als homogene, orthotrope Volumen betrachtet werden können.

3.1 Quasistatische Druckversuche

Der Testkörper liegt frei auf einer ebenen, 60 mm dicken Stahlplatte auf und wird bei konstanter Prüfgeschwindigkeit mit einem zylindrischen Prüfstempel in vertikaler Richtung mittig belastet (Fig. 3-3).



Fig. 3-3 Versuchsaufbau Druckversuch Kondensator

Für die Testreihe wurden drei verschiedene Geschwindigkeiten gewählt (5 mm/min, 200 mm/min, 500 mm/min).

3.2 Quasistatische Druckversuche an den Einzelmodulen

Die Schaubilder zeigen jeweils die Kraft-Weg-Kurven der Einzelmodule bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten (Fig. 3-4 bis 3-6).

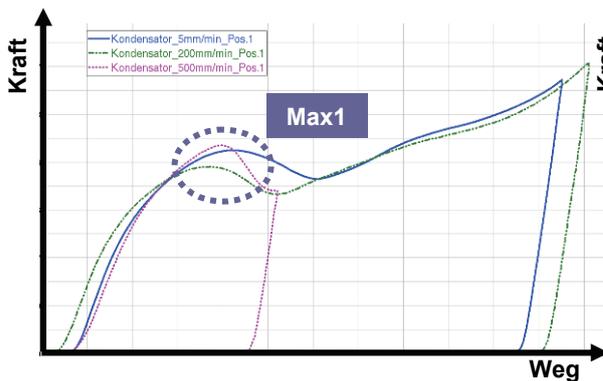


Fig. 3-4 Kraft-Weg-Kurve Kondensator

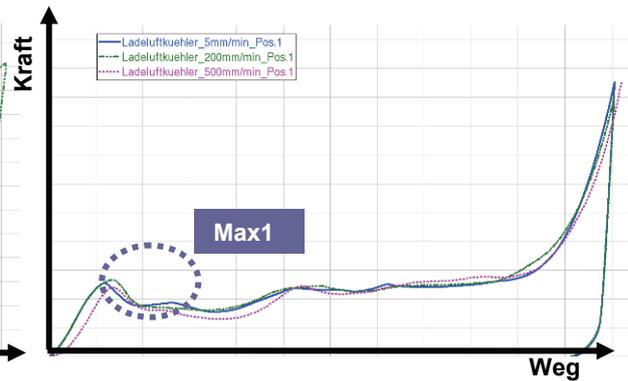


Fig. 3-5 Kraft-Weg-Kurve Ladeluftkühler

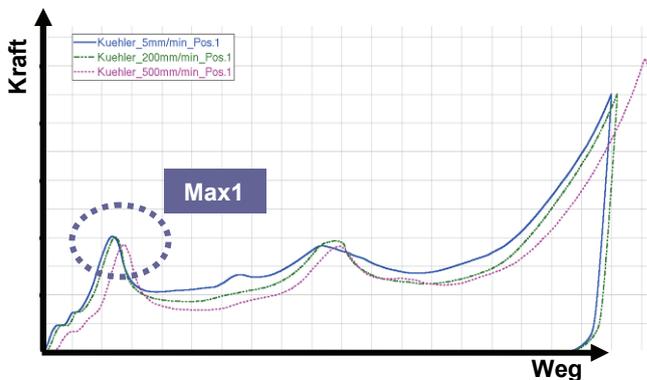


Fig. 3-6 Kraft-Weg-Kurve Kühler

Der Steifigkeitsverlauf lässt sich beim Druckversuch in drei typische Phasen einteilen:

1. **Instabilität der Struktur**
2. **Absorptionsbereich**
3. **Materialverdichtung (Blockbildung)**

Die drei typischen Phasen sind für Kondensator, Ladeluftkühler und Kühler jeweils verschieden stark ausgeprägt. Die Abweichungen resultieren aus den geometrischen Unterschieden der Einzelmodule. Durch die Kombination aus Zug- und Schubbeanspruchung tritt am Rand des Druckbereichs ein Versagen der Lötverbindungen zwischen Wellrippen und Rechteckrohren auf.

Die Verformungen lokalisieren sich nur im direkten Kontaktbereich mit dem Stempel (Fig. 3-7 und Fig. 3-8).

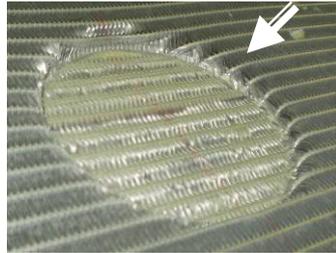


Fig. 3-1 Versagen der Lötverbindungen



Fig. 3-8 Längsschnitt Kondensator

3.3 Quasistatische Druckversuche am Gesamtmodul

Durch die Kopplung von Kondensator, Ladeluftkühler und Kühler im Gesamtmodul erhält man eine Überlagerung von Druck- und Biegebeanspruchung. Zudem können die physikalischen Eigenschaften der Verbindungselemente zwischen den einzelnen Baugruppen untersucht werden (Fig. 3-9 und Fig. 3-10).



Fig. 3-9 Versuchsaufbau



Fig. 3-10 Druckversuch

Das Diagramm in Fig. 3-11 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf des Gesamtmoduls.

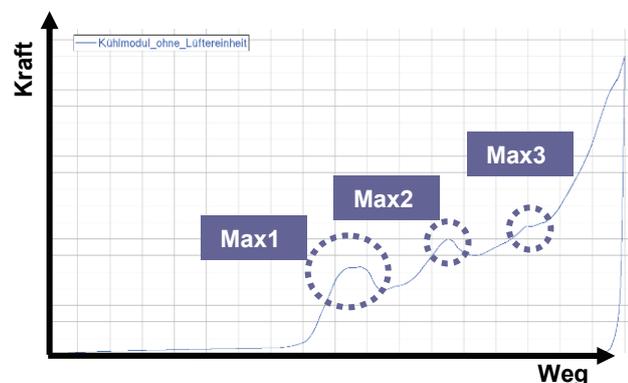


Fig. 3-11 Kraft-Weg-Kurve Gesamtmodul

Im Kurvenverlauf bilden sich drei lokale Maxima aus. Die Maxima beschreiben das Versagen der Rechteckrohre im Kühler (Max1), die Instabilität der Rechteckrohre im Ladeluftkühler (Max2) und die Blockbildung im Deformationsbereich des Stempels (Max3). Die Schraub- und Klemmverbindungen zwischen den Einzelmodulen zeigen keine sichtbaren Verformungen.



Fig. 3-12 Verformungen an Boden und Seitenteilen



Fig. 3-13 Versagen der Lötverbindungen

Die starke Einschnürung der Seitenteile resultiert hauptsächlich aus der Zugbeanspruchung in den Rechteckrohren während der Durchbiegung des Kühlers (Fig. 3-12). Im Verformungsbereich des Stempels tritt ein Versagen der Lötverbindungen auf (Fig. 3-13).

3.4 Quasistatische Biegeversuche

Die quasistatischen Biegeversuche ermöglichen eine Aussage über die Relation zwischen lokaler Belastung des Kühlmoduls (Prüfstempel) und Gesamtbiegesteifigkeit. Zusätzlich lässt sich das Verhalten der Kopplungspunkte zwischen den Einzelmodulen sowie die Festigkeit der vier Lagerstifte untersuchen.

Zwei Versuchskonfigurationen wurden definiert (Fig. 3-14):

- Biegeversuch des Kühlmoduls mit Lüftereinheit (D)
- Biegeversuch des Kühlmoduls ohne Lüftereinheit (D)

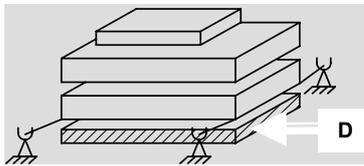


Fig. 3-14 Schematischer Versuchsaufbau

Das Kühlmodul ist an vier Punkten über Stifte gelagert. Um die Durchbiegung der gesamten Baugruppe zu ermöglichen, ist der rotatorische Freiheitsgrad um die Stiftachsen frei (Fig. 3-15).

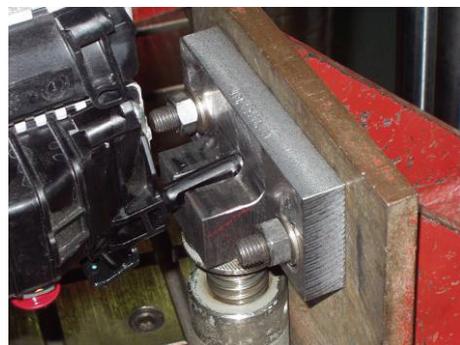
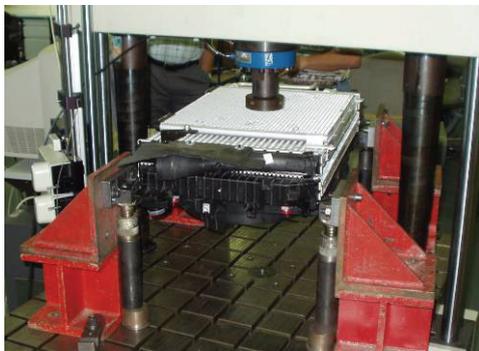


Fig. 3-15 Versuchsaufbau und Lagerung

Für beide Testkonfigurationen beträgt die Prüfgeschwindigkeit 5mm/min. Der Prüfstempel ist jeweils auf die Kondensatormitte ausgerichtet. Das nachfolgende Diagramm (Fig. 3-16) zeigt die Kraft-Weg-Kurven für das Kühlmodul mit und ohne Lüftereinheit.

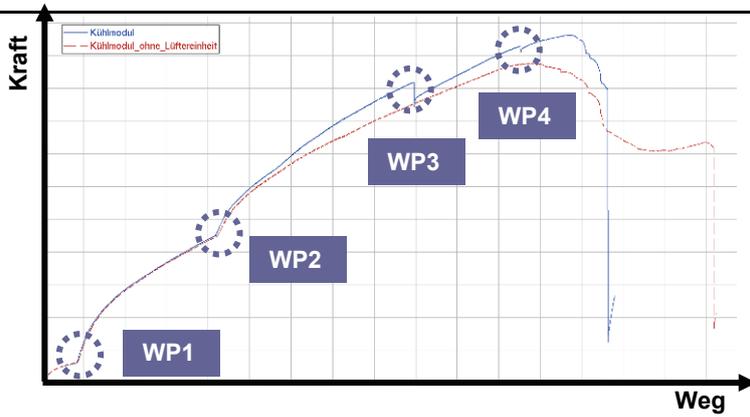


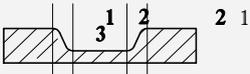
Fig. 3-16 Kraft-Weg-Kurve Gesamtmodul mit und ohne Lüftereinheit

In der Anfangsphase sind die Kurvenverläufe identisch. Der erste Wendepunkt WP1 beschreibt jeweils den Kontakt zwischen Kondensator und Ladeluftkühler. Im zweiten Wendepunkt WP2 lokalisiert sich der Kontakt zwischen Kondensator, Ladeluftkühler und Kühler. Zwischen den Wendepunkten findet Energieabsorption durch Verformung der Struktur statt. Das Lösen von Anbindestellen zeigt sich durch ein plötzliches Abfallen des Kraftniveaus (WP3, WP4).



Fig. 3-17 Biegeversuche am Gesamtmodul

Tab. 3-2 fasst die Ergebnisse der quasistatischen Druck- und Biegeversuche zusammen.

<p>Quasistatischer Druckversuch</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Steifigkeitsverlauf = f(Stabilität Rechteckrohre) ➤ Phasen: Instabilitätsphase/Absorptionsphase/Materialverdichtung ➤ Instabilitäten = lokale Maxima in Kraft-Weg-Kurven ➤ 3 Belastungszonen: (1) geringe/keine Deformation, (2) Schubbeanspruchung/ Versagen der Lötverbindung, (3) Materialverdichtung 
<p>Quasistatischer Biegeversuch</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Steifigkeitsverlauf = f(Stabilität der Rechteckrohre) ➤ Instabilitäten = Wendepunkte im Steifigkeitsverlauf ➤ in den Phasen zwischen den Wendepunkten Energieabsorption durch Strukturverformung ➤ schichtweise Aktivierung der Biegesteifigkeiten in den Einzelmodulen ➤ Lüftereinheit bestimmt maßgeblich Biegesteifigkeit des Gesamtmoduls. ➤ Lagerstifte versagen aufgrund Materialbruchs.

Tab.3-2 Zusammenfassung der Ergebnisse

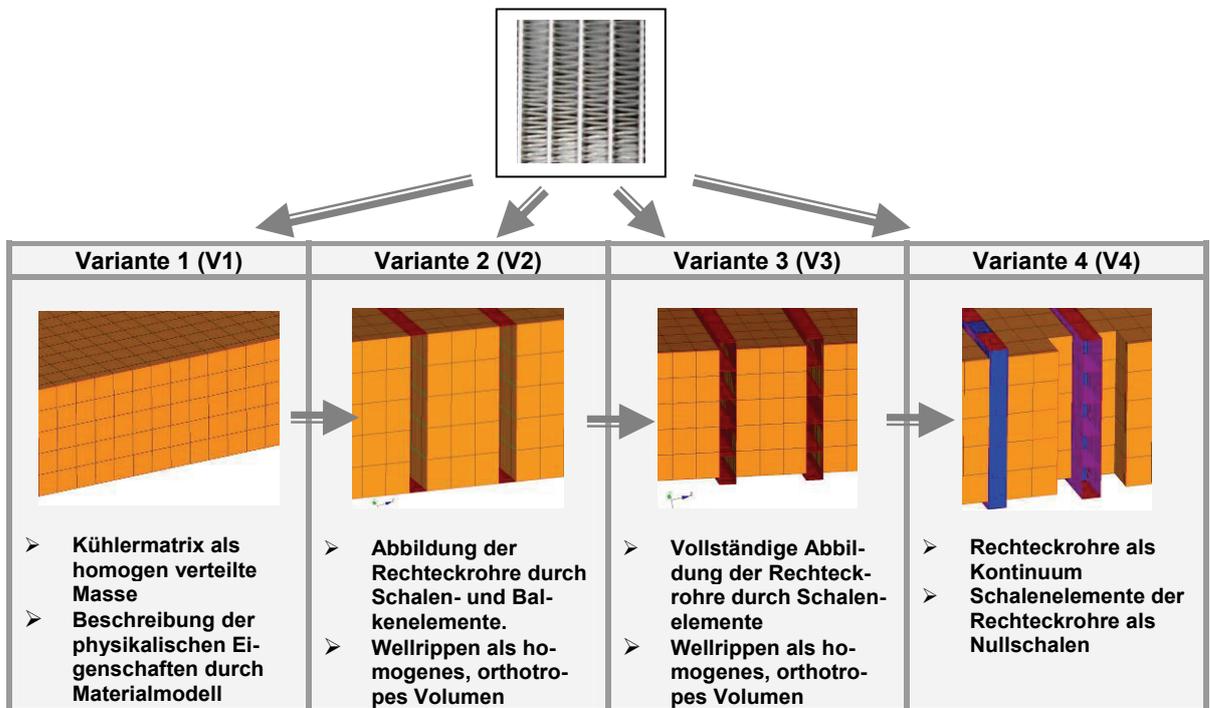
4 Simulation der Komponentenversuche

Bei der bisherigen Modellierung der Kühlermatrix wird diese vereinfacht als homogen verteilte Masse abgebildet. Die Beschreibung der physikalischen Eigenschaften reduziert sich dabei auf das Materialmodell. Das Materialmodell resultiert aus der Annahme, dass die Struktur der Kühlermatrix als homogene Wabenstruktur abgebildet werden kann. Diese Art der Approximation wird auch bei der Modellierung von Barrieren verwendet (EURO-NCAP, IIHS etc.) (Fig. 4-1).



Fig. 4-1 FE-Modell ODB-Barriere (li.) und Kühlmodul (re.)

Kinematik und Absorptionsmechanismen reduzieren sich auf die zulässigen Deformationsmoden eines 3D-Kontinuums mit orthotropen Eigenschaften. Diese Klasse von Modellen bildet eine erste Approximationsebene. Daher ist ein realitätsnäheres Modell notwendig, welches in der Lage ist, die physikalischen Eigenschaften und die geometrische Komplexität des Kühlmoduls genauer zu beschreiben.



Tab. 4-1 Modellierungsvarianten

Für die Simulationsergebnisse wurden folgende Bewertungskriterien ausgewählt:

- **Physikalische Genauigkeit:**
 - physikalische Merkmale und kinematisches Verhalten (Tab. 4-2 und Tab. 4-3)
 - Variation der Modellparameter zur Erhöhung der Simulationsgüte



Tab. 4-2 Physikalische Vergleichskriterien



Tab. 4-3 Verhalten der Schraub- und Clipsverbindungen

- **Numerische Qualität:**
- Numerische Stabilität
 - Wirtschaftlichkeit (Rechendauer, Modellgröße)

Das folgende Schaubild (Fig. 4-2) beschreibt den Iterationsprozess:

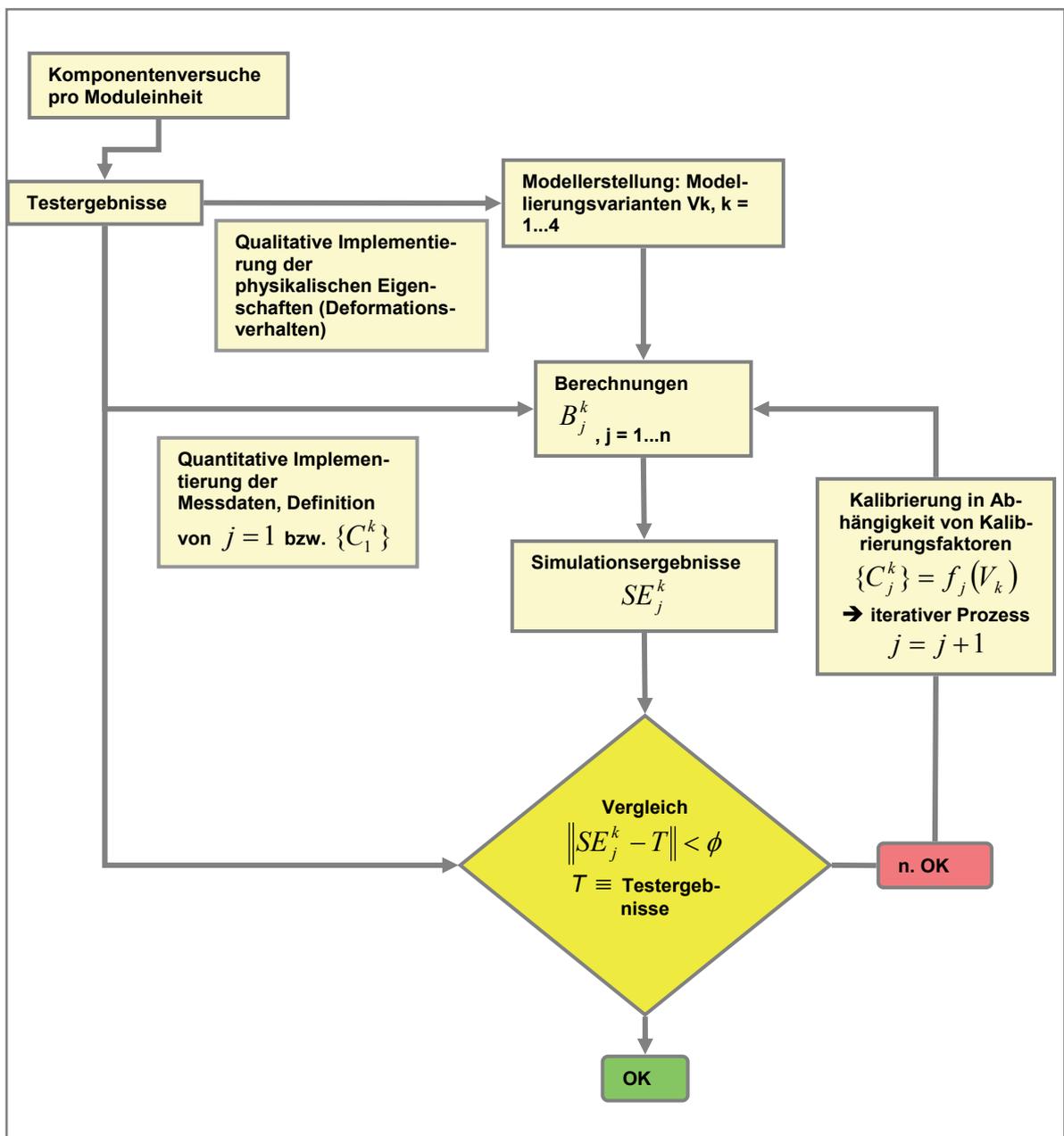


Fig. 4-2: Arbeitsschritte zur Kalibrierung der Modellierungsvarianten

4.1 Variante 1 - Kühlermatrix als homogen verteilte Masse

Die Modellierungsvariante 1 bildet die Ausgangsbasis für die Untersuchung und definiert die untere Grenze der Modellierung, um die physikalisch relevanten Eigenschaften der Struktur zu erfassen. Die Kühlermatrix wird als homogene Wabenstruktur betrachtet und durch Volumenelemente als orthotropes Kontinuum abgebildet (Fig. 4-3).

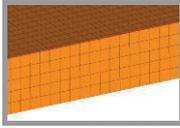


Fig. 4-3 Kühlermatrix Modellvariante 1

Zur Beschreibung der Wabenstruktur mit orthotropem Verhalten wird das MAT_MODIFIED_HONEYCOMB [1] Materialmodell verwendet. Die Orthotropie wird durch Eingabe von Spannungs-Dehnungskurven für jede Komponente des Spannungstensors definiert. Grundlage für die Eingabe der Materialparameter sind die Ergebnisse aus den Komponentenversuchen.

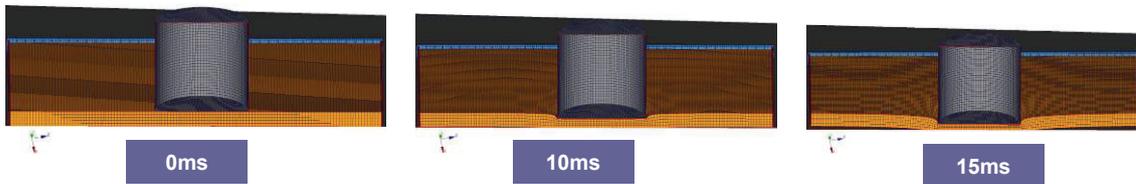


Fig. 4-4 Deformationsphasen Modellvariante 1

Im Druckbereich des Stempels kommt es zu einer Blockbildung der Volumenelemente (Fig. 4-5), wobei die Elemente im Randbereich durch die Schubbeanspruchung stark verzerrt sind. Die Ausprägung der Deformationsmuster im Druck- und Randbereich lässt sich als direkte Funktion der Materialparameter durch Skalierung der Materialkurven steuern.

Die Deformationen durch die Druckbelastung konzentrieren sich auf den lokalen Bereich des Druckstempels.

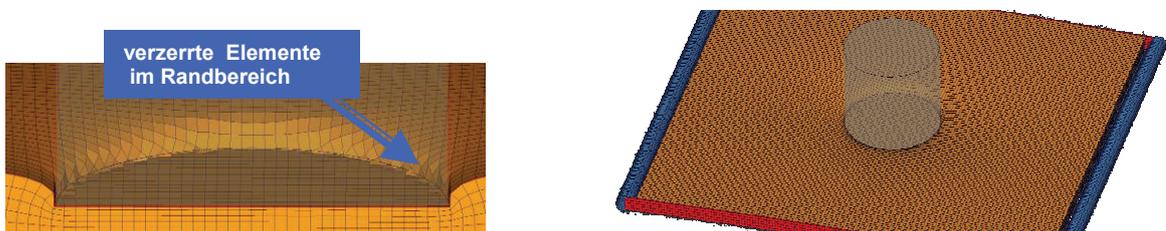


Fig. 4-5 lokaler Deformationsbereich

Der Steifigkeitsverlauf aus dem Komponentenversuch kann durch das Materialgesetz nicht exakt wiedergegeben werden. Da sich mit dieser Modellvariante keine Stabilitätsphänomene beschreiben lassen, kann vor allem der monotone Verlauf der Testkurve (rot) - verursacht durch lokale Strukturinstabilitäten im Versuch - nicht dargestellt werden (Fig. 4-6).

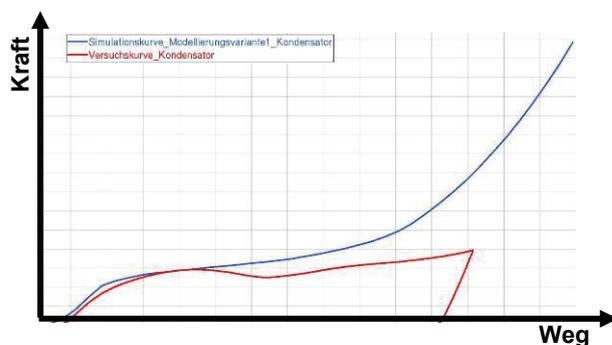


Fig. 4-6 Kraft-Weg-Kurven Versuch und Simulation

4.2 Variante 2 - Orthotropes Volumen mit Schalen- und Balkenelementen

Die Modellvariante 2 stellt den ersten Schritt zur genaueren Approximation der Matrixstruktur dar. Die Rechteckrohre werden durch eine Kombination aus Schalen- und Balkenelementen abgebildet (Fig. 4-7).

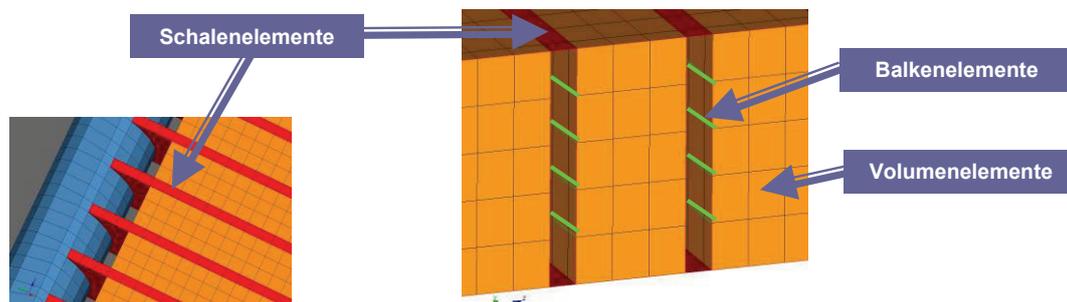


Fig. 4-7 Kühlermatrix Modellvariante 2

Die Wellrippen zwischen den Rohren sind mit Volumenelementen modelliert und werden als orthotropes Kontinuum betrachtet (\rightarrow Variante 1). Die Schalenelemente erlauben die Anbindung der Rechteckrohre an die seitlichen Rohre des Kondensators. Dadurch ist eine bessere Abbildung des globalen Deformationsbildes möglich. Die Balkenelemente berücksichtigen die Quersteifigkeit der Rechteckrohre. Definiert man die Geometrie der Flachrohre über klassische Balkenelemente (Hughes-Liu-Beam mit Integration über den Querschnitt), dann treten im Druck- und Randbereich des Stempels numerische Instabilitäten auf (Fig. 4-8).

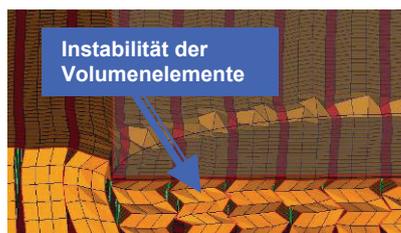


Fig. 4-8 lokaler Deformationsbereich

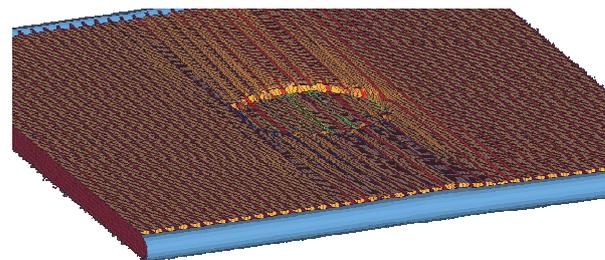


Fig. 4-9 Deformationsmoden mit Hughes-Liu-Beams

Durch die Kopplung der Quer- und Längssteifigkeiten stellen sich Deformationsmoden ein, die in den Komponentenversuchen nicht auftreten (Fig. 4-9). Diese Moden können durch Entkopplung der Quer- und Längssteifigkeiten unterdrückt werden. Mit der Verwendung von Diskreten Balken (SECTION DISCRETE) [1], ist es möglich, die Relativbewegungen der Elementknoten über Federkennlinien zu definieren (MAT_GENERAL_NONLINEAR_6DOF [1]). Die Deformationen sind nun auf den lokalen Belastungsbereich beschränkt (Fig. 4-10).

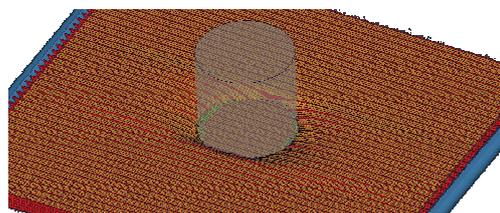


Fig. 4-10 lokaler Deformationsbereich

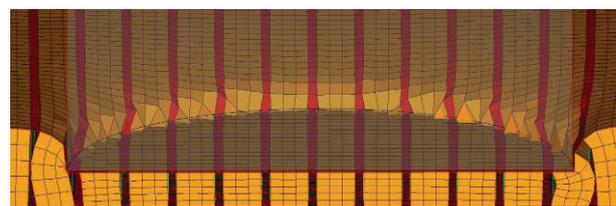


Fig. 4-11 Deformationsmoden mit Diskreten Balken

Aufgrund der strukturellen Trennung von Wellrippen und Flachrohren ist es nicht möglich, eine homogene Blockbildung zu erreichen (Fig. 4-11). Der Verformungsmodus der Volumenelemente ist abhängig von der Stützwirkung der Balken. Die Schubbeanspruchung im Randbereich des Stempels wird durch die Volumenelemente übertragen. Die Inkompatibilität zwischen Volumen- und Schalenelemente verstärkt zusätzlich den Schubeffekt.

Die Modellvariante 2 ermöglicht eine erste Darstellung der Instabilitätsphase im Steifigkeitsverlauf (Fig. 4-12). Das Krafniveau im Instabilitätsbereich und das Energieniveau werden gut angenähert. Das Versagen zwischen Wellrippen und Flachrohren ist mit dieser Modellvariante nicht darstellbar.

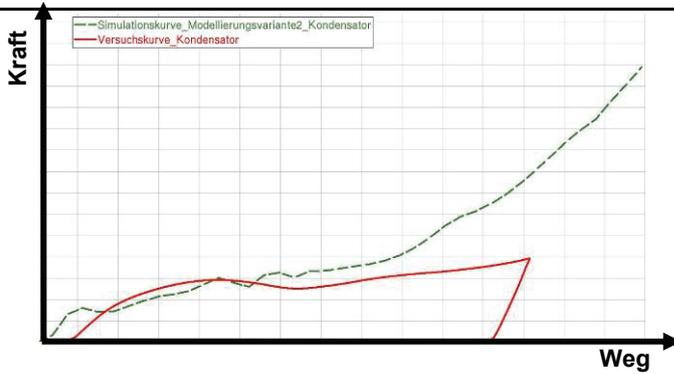


Fig. 4-12 Kraft-Weg-Kurven Versuch und Simulation

4.3 Variante 3 - Vollständige Abbildung der Rechteckrohre durch Schalenelemente

In Modellvariante 3 werden die Geometrie der Rechteckrohre vollständig durch Schalenelemente beschrieben (Fig 4-12).

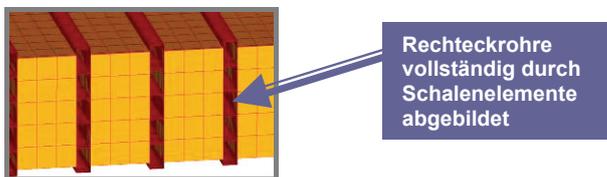


Fig. 4-13 Kühlermatrix Modellvariante 3

Diese Variante erlaubt, das Versagen der Lötverbindungen zwischen Wellrippen und Rechteckrohren mit Hilfe eines Tiebreak-Kontakts zu simulieren. Der Modellierungsansatz V3 zeigt ein numerisch empfindliches Verhalten. Die stark verzerrten Schalenelemente (Fig. 4-14) können aufgrund numerischer Instabilitäten zu einem vorzeitigen Abbruch der Rechnungen führen. Eine homogene Blockbildung im Druckbereich des Stempels wird nicht erreicht.

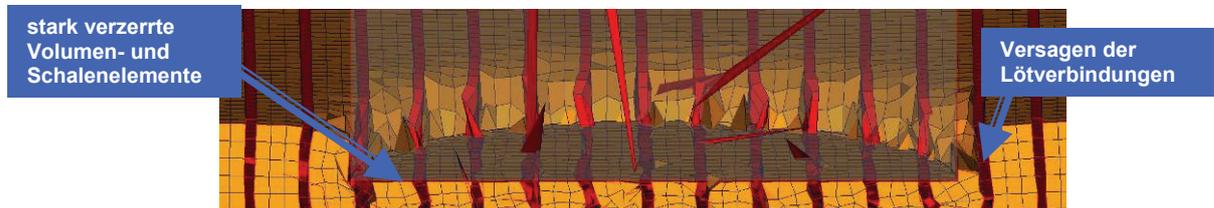


Fig. 4-14 Lokaler Deformationsbereich Modellvariante 4

Durch die geometrisch exakte Abbildung der Flachrohre zeigt die Modellvariante 4 eine ausgeprägte Instabilitätsphase, wie sie auch im Versuch (rot) zu beobachten war (Fig. 4-15).

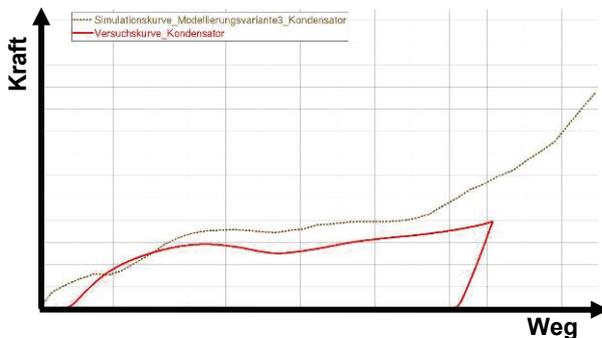


Fig. 4-15 Kraft-Weg-Kurven Versuch und Simulation

4.4 Variante 4 – Erhöhung der numerischen Stabilität

Der Ansatz 4 stellt eine Erweiterung der Modellvariante 3 dar und wurde gewählt, um numerische Instabilitäten zu unterdrücken und gleichzeitig das Abreißen der Lötverbindungen zu ermöglichen. Zwischen die Schalenelemente der Rechteckrohre sind zusätzliche Volumelemente eingefügt (Fig. 4-16).

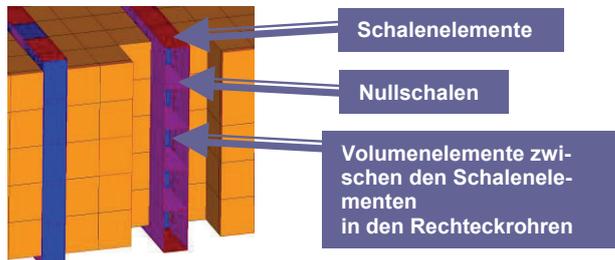


Fig. 4-16 Kühlermatrix Modellvariante 4

Die Rechteckrohre werden als Kontinuum abgebildet und die physikalischen Eigenschaften durch das MAT_MODIFIED_HONEYCOMB-Material [1] definiert. Modellvariante 4 zeigt kein numerisch sensibles Verhalten. Die Instabilitäten der Variante 3 treten bei diesem Modellierungsansatz nicht auf. Fig. 4-17 zeigt eine kontrollierte Verformung der Volumelemente in Wellrippen und Flachrohren. Fig. 4-18 zeigt das Versagen des Kontakts im Randbereich des Stempels.

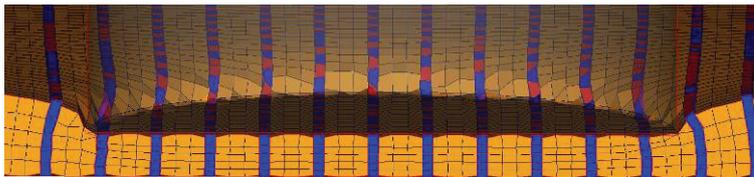


Fig. 4-17 lokaler Verformungsbereich Modellvariante 4



Fig. 4-18 Randbereich

Der flache Anstieg der Simulationskurve resultiert aus den Materialparametern der Volumelemente in den Rechteckrohren (Fig. 4-19). Durch Parametervariation lässt sich die Anfangssteifigkeit des Komponententests (rot) gut approximieren.

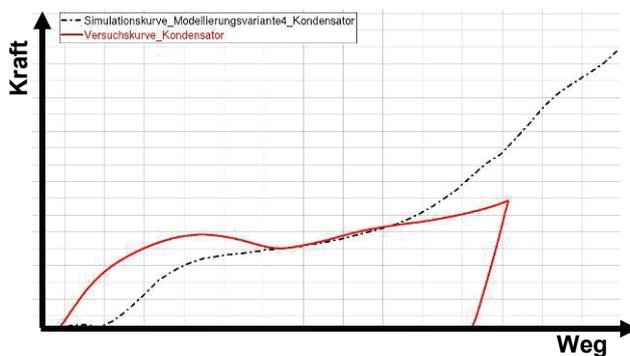


Fig. 4-19 Kraft-Weg-Kurven Versuch und Simulation

4.5 Gegenüberstellung von Simulations- und Testkurven

Fig. 4-20 stellt die Kurven der vier Modellierungsvarianten zusammen mit der Testkurve (rot) in einem Schaubild dar.

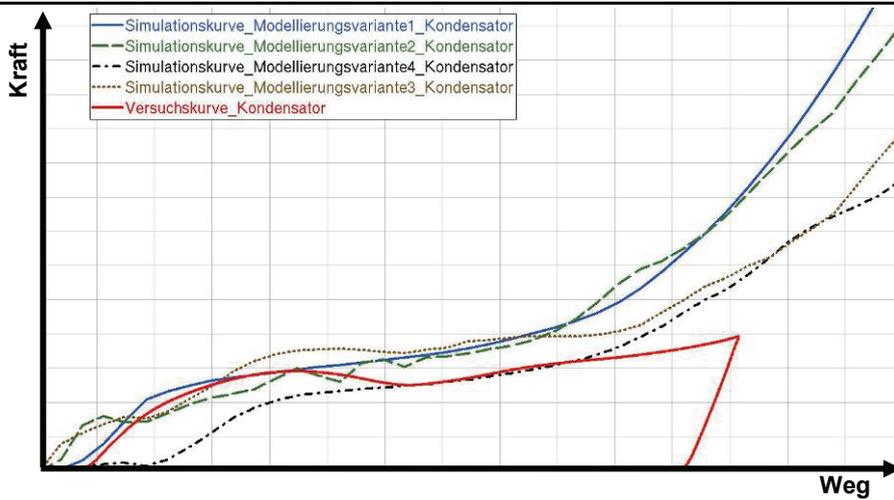


Fig. 4-20 Test- und Simulationskurven

4.6 Simulation der Druck- und Biegeversuche am Gesamtmodul

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Simulationsmodelle für den Druckversuch (Fig. 4-21) und den Biegeversuch (Fig. 4-22) am Gesamtmodul. Als Modellierungsbasis wurde die Variante 3 gewählt.

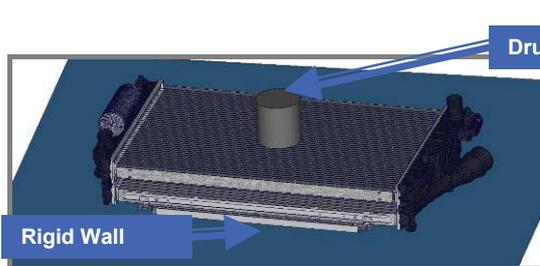


Fig. 4-21 Druckversuch Gesamtmodul

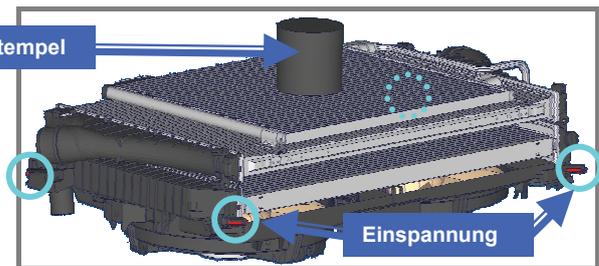


Fig. 4-22 Biegeversuch am Gesamtmodul

Die Simulationsmodelle zeigen sowohl für die Verformungsmuster als auch für das kinematische Verhalten eine gute Korrelation zu den durchgeführten Komponententests. Die folgende Übersicht stellt verschiedene Deformationsphasen der durchgeführten Simulationen für die Druck- und Biegeversuche am Gesamtmodul dar.

Druckversuch ohne Lüftereinheit:

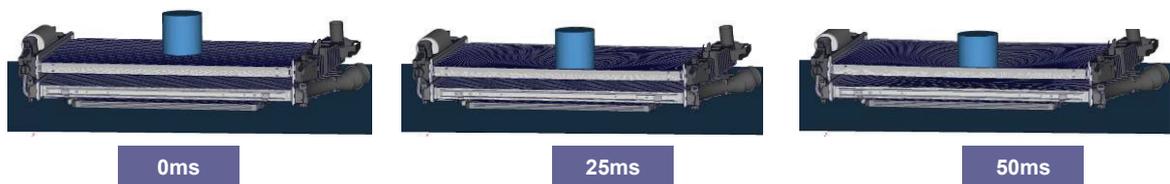


Fig. 4-23 Deformationsphasen Druckversuch ohne Lüftereinheit

Biegeversuch ohne Lüftereinheit:

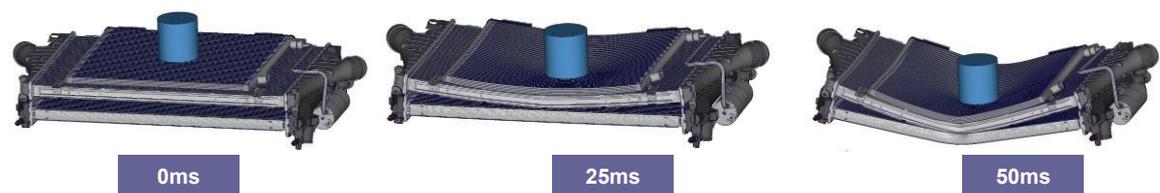


Fig. 4-24 Deformationsphasen Biegeversuch ohne Lüftereinheit

Biegeversuch mit Lüftereinheit:



Fig. 4-25 Deformationsphasen Biegeversuch mit Lüftereinheit

In den Verformungsbildern ist zu erkennen, dass sich bei den modellierten Schraubverbindungen das gleiche Verhalten wie in den Komponententests einstellt. Die Verbindungen bilden ein Drehgelenk und verteilen die Lagerkräfte. Wie in den Komponententests tritt in den Simulationen des Biegeversuchs ein Versagen in den Clipsverbindungen zwischen Lüftereinheit und Kühler auf. Die erhöhte Belastung in den Schraubverbindungen führt zum Materialversagen im Gehäuse der Lüftereinheit (Fig. 4-26).



Fig. 4-26 Biegeversuch am Gesamtmodul

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurden die ersten Schritte für eine testbasierte Modellierung von Package-Komponenten durchgeführt. Für diese ersten experimentellen und analytischen Studien wurden Komponententests definiert, die in vereinfachter Form das Deformationsverhalten in einem Crashszenario widerspiegeln. Die Ergebnisse bilden die Basis für weitere Validierungen. Die Komponententests am Gesamtmodul zeigen eine gute Wiedergabe des kinematischen und physikalischen Verhaltens.

Die Modellvarianten V1 bis V4 sind reine FE-Ansätze und weisen bezüglich eines Optimums zwischen Modellierungsaufwand, physikalischer Relevanz und CPU-Zeit spezifische Beschränkungen auf. Ein Hauptproblemfeld bei dieser Package-Modellierung bildet die numerische Stabilität der FE-Ansätze (massive Hourglass-Effekte, bei Elementkompressionen > 90%).

Eine Lösungsalternative bietet die Erweiterung des FE-Ansatzes mit netzfreien Methoden (EFG) oder Partikel-Methoden (SPH) (Fig. 5-1). Das Ziel ist die Kopplung zwischen FE- und netzfreien

Modellen, um die extrem kritischen Netzdeformationen im FE-Bereich zu minimieren und gleichzeitig die CPU-Zeit von assoziierten netzfreien Bereichen zu reduzieren. Die Bilder 5-1 bis 5-3 zeigen im Vergleich die Simulation des Druckversuchs an dem Kondensatormodul.

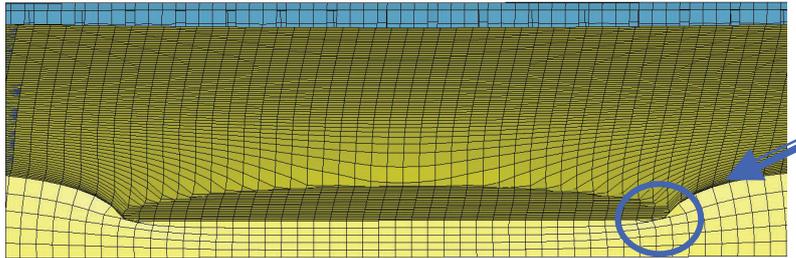


Fig. 5-1: FE-Modell Variante 1

stark verzerrte Elemente im Randbereich, die zum vorzeitigen Abbruch der Simulation geführt haben

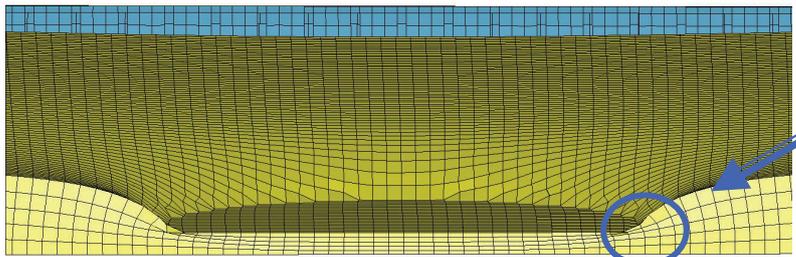


Fig. 5-2: gekoppeltes FE- und EFG-Modell Variante 1

Glättung der Verformung durch EFG-Ansatz
→ Stabilität der Simulation ist gewährleistet für große lokale Deformationen

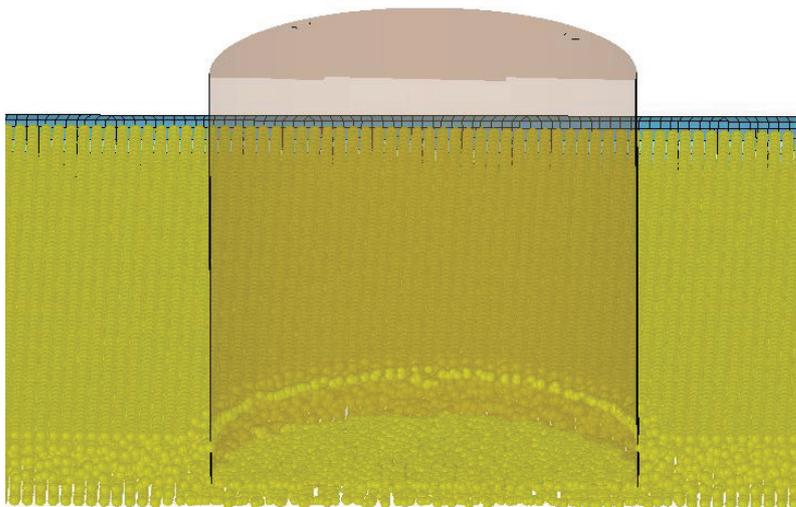


Fig. 5-3: gekoppeltes FE- und Partikel-Modell Variante 1

Stabile Simulation für große Deformationen mit lokalem Materialversagen.
Beschränkungen in der Implementierung von Materialmodellen (z.B: MAT_26, MAT_126)

6 Literaturverzeichnis

- [1] LS-Dyna Keyword User's Manual Version 971, LSTC, 2006
- [2] LS-Dyna Theoretical Manual, LSTC, 2005