



## **Diplomarbeit**

# **Berechnung von faserverstärkten Bauteilen unter hochdynamischer Belastung**

**von Bernhard Krugfahrt**

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugtechnik  
Vorstand: Univ.-Prof. Dr. techn. W. Hirschberg

und bei

CW Concept Consulting GmbH  
8101 Gratkorn

Betreuer: Dr. techn. M. Hirz  
Graz, im Februar 2010

The logo for FTG, with 'FTG' in a bold, blue, italicized font.

Diese Arbeit unterliegt der Veröffentlichungssperre bis 12.03.2015.

## **Danksagung**

Ich bedanke mich bei meinen Eltern, Freunden und meiner Frau für die Unterstützung bei dieser Diplomarbeit.

Weiters bedanke ich mich bei Dr. techn. Mario Hirz für die Betreuung und Hilfestellung.

Ein Dank gilt auch der Firma CW Concept Consulting GmbH und im Besonderen DI Ferdinand Schwinger für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

### **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

## Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich besonders durch ihre spezifischen Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit, Festigkeit, Energieabsorptionsvermögen und geringer Dichte aus. Aus diesem Grund werden immer mehr Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt. Speziell im Bereich der Verkehrstechnik wird dieser Werkstoff seit einigen Jahren vermehrt eingesetzt. Die Auslegung von kohlefaserverstärkten Bauteilen hinsichtlich der Bauteilsteifigkeiten erfolgt auch durch Unterstützung der FE-Methode. Kommt es jedoch bei der Anwendung zu einem Materialversagen im Bauteil, wie z.B. bei Crashelementen, erfolgt die Auslegung – bis jetzt aufgrund fehlender, effizienter Simulationsmethoden – auf Basis von Versuchen. Zur Abbildung und Analyse der einzelnen Versagensmechanismen von Mehrschichtverbunden mittels FE-Simulation ist ein detaillierter Modellaufbau der einzelnen Lagen erforderlich, wodurch der damit verbundene Rechenaufwand steigt. Dies hat zur Folge, dass detaillierte FE-Analysen von Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen, die auch das Bruchverhalten beschreiben, mit den derzeitigen Rechenkapazitäten nicht in zufrieden stellenden Rechenzeiten durchführbar sind.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Entwicklung einer Methode, um bei impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen, mit Hilfe der FE-Berechnung mit dem expliziten Solver LS-DYNA, Bauteilversagen im Schichtverbund in akzeptablen Rechenzeiten abbilden zu können. Die entwickelte Methode basiert auf der Verwendung zweier gekoppelter Modelle. Im Gesamtmodell ist die gesamte zu untersuchende Geometrie dargestellt. Der kohlefaserverstärkte Bauteil ist mit vereinfachtem Modellierungsansatz für Mehrschichtverbunde abgebildet. Bei Erreichen eines kritischen Belastungszustands werden die auftretenden Lasten auf ein genaueres, lokal begrenztes Modell, dem Detailmodell, übertragen und auf ein mögliches Bauteilversagen hin untersucht. Bei Feststellung eines Materialversagens in der Detailmodell-Simulation wird dieses durch Änderung der Materialeigenschaften im Gesamtmodell zu den entsprechenden Zeiten und Bereichen übertragen. Der Ablauf dieser Kopplung erfolgt alternierend bis zum vorgegebenen Simulationsende.

Somit können Bauteilbelastungen und Materialversagen möglichst genau ermittelt werden, ohne dass ein detailliertes Gesamtmodell, mit den damit einhergehenden hohen Rechenzeiten, verwendet wird. Dies ermöglicht künftig – mithilfe weiterer Untersuchungen – die Simulation von aufwändigen Lastfällen, wie z.B. in der Gesamtfahrzeugsimulation, bei denen Bauteilversagen von faserverstärkten Kunststoffen mit einem detaillierten Modellaufbau berücksichtigt werden, in akzeptablen Rechenzeiten.

## **Abstract**

Fibre composite materials have exceptionally good characteristics in relation to stiffness, strength, energy absorption and low density. For this reason more and more components are made of fibre composite materials. Especially in the field of traffic engineering the use of these materials is increasing during the last years. The dimensioning of the stiffness for carbon fibre reinforced components is supported by the FE-method. If there is any component material failure when applying, e.g. for crash elements, dimensioning of these parts will be done on the basis of tests – so far due to missing efficiently working simulation methods. A detailed modelling of each layer is necessary for representing and analysing the several failure mechanisms of multi-layer composites with FE-simulation. This causes the increasing of computational efforts. Therefore a detailed FE-analysis of components made of fibre composite materials can't be simulated with the current calculating capacities in an acceptable time.

This thesis is about developing a method to represent material failure of impact loaded multi-layer fibre composite components with FE-simulation in satisfying computing time. The FE-simulation works with the explicit LS-DYNA solver. The developed method is based on the use of two coupled models. The complete model shows the entire geometry. Fibre composite material components are represented in a simplified way. When a critical load case is achieved the appeared loads will be transferred to an exact, localised detail model to analyse a possible material failure. If realising any material failure in the detail model simulation it will be transferred by changing the material properties in the complete model at the adequate times and sectors. This procedure of coupling works iterative until the predetermined end of the simulation.

Therefore component loading and material failure can be detected exactly without the need of a specified complete model followed from high computing time. In future this method and supporting analyses enable to simulate complex load cases, e.g. full vehicle simulations, under consideration of the failure of fibre composite components with a detailed model in an appropriate time.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Faserverbundwerkstoffe</b>	<b>2</b>
2.1 Versagensarten von Faserverbundlaminaten aus UD-Schichten	6
<b>3. Finite-Elemente-Methode</b>	<b>9</b>
3.1 Elementtypen	9
3.2 Modellierung von Faserverbundwerkstoffen	10
3.2.1 Homogenisierung 1	12
3.2.2 Homogenisierung 2	12
3.2.3 Homogenisierung 3	13
3.3 Materialmodell Typ 54	14
3.4 Materialvalidierung eines Karbonlagenaufbaus aus Twill-Gewebe	17
3.5 Steigerung der Aussagesicherheit und Genauigkeit einer FE-Analyse	19
3.5.1 Netzverfeinerung bei einer LS-DYNA-Simulation	22
3.5.2 Einfluss der Elementkantenlänge bei Materialversagen	26
<b>4. Detailmodell</b>	<b>28</b>
4.1 Detaillierter Modellaufbau für Mehrschichtverbunde	29
4.1.1 Klebekontakt zur Verbindung der einzelnen Lagen	30
4.1.2 Kohäsive Elemente zur Verbindung der einzelnen Lagen	33
4.1.3 Solid-Elemente zur Verbindung der einzelnen Lagen	35
<b>5. Prinzip der Methode</b>	<b>39</b>
5.1 Allgemeine Beschreibung des Methodenablaufs	40
5.2 Beispielhafter Ablauf der Methode	40
5.3 Teilprozesse im Methodenablauf	43
5.3.1 Teilprozess 1: Flexibler Simulationsabbruch aufgrund kritischer Belastungen	44
5.3.2 Teilprozess 2: Übergabe der Belastungen eines Teilbereichs im GM an ein DM	46
5.3.3 Teilprozess 3: Erstellung des DM	50
5.3.4 Teilprozess 4: Übertragung der Schädigung an das GM	64
5.3.5 Teilprozess 5: Restart einer gestoppten Simulation	76

5.4 Optimierungsansätze zum Methodenablauf _____	81
5.4.1 Abbildung von Einspannungen im DM _____	81
5.4.2 Testen der optimalen Wegvorgaberrate und der Dämpfung für die neutrale Lage ____	84
5.4.3 Auswirkung der Reibung zwischen Impactor und Platte auf die Spannungen im DM _	86
5.4.4 Test der Methode bis zum Erreichen eines ersten kritischen Wertes im GM _____	88
<b>6. Simulation von Lastfällen mit der entwickelten Methode _____</b>	<b>96</b>
6.1 Simulation des Lastfalls A _____	96
6.1.1 Beschreibung des Ablaufs _____	96
6.1.2 Simulationsergebnis mit der entwickelten Methode _____	100
6.2 Simulation des realen Fallturmversuchs _____	102
6.2.1 Beschreibung des Ablaufs _____	106
6.2.2 Simulationsergebnis mit der entwickelten Methode _____	109
6.3 Zusammenfassung zur Simulation der Lastfälle _____	111
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick _____</b>	<b>112</b>
<b>Literaturverzeichnis _____</b>	<b>115</b>
<b>Abbildungsverzeichnis _____</b>	<b>118</b>
<b>Tabellenverzeichnis _____</b>	<b>122</b>
<b>Formelverzeichnis _____</b>	<b>123</b>

## Formelzeichen

$a$	Beschleunigung
$c$	Schallgeschwindigkeit
$E$	Elastizitätsmodul
$E_a$	Elastizitätsmodul in Faserrichtung
$E_b$	Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung
$e_c$	Fehlerkriterium für Faserdruck
$e_d$	Fehlerkriterium für Matrixdruck
$e_f$	Fehlerkriterium für Faserzug
$e_m$	Fehlerkriterium für Matrixzug
$F$	Kraft
$F_N$	Normalkraft
$F_S$	Querschubkraft
$G_{ab}$	Schubmodul in Lagenebene
$l_c$	Charakteristische Länge
$m$	Masse
$s$	Weg
$S_c$	Schubfestigkeit
$t$	Zeit
$v$	Geschwindigkeit
$X_c$	Druckfestigkeit in Faserrichtung
$X_t$	Zugfestigkeit in Faserrichtung
$Y_c$	Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung
$Y_t$	Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung
$\beta$	Gewichtungsfaktor
$\varepsilon$	Dehnung
$\nu$	Poissonzahl
$\rho$	Spezifische Dichte
$\sigma$	Spannung
$\sigma_{aa}$	Spannung in Faserrichtung
$\sigma_{ab}$	Schubspannung in der Lagenebene
$\sigma_{bb}$	Spannung quer zur Faserrichtung
$\sigma_N$	Normalspannung

$\sigma_s$	Querschubspannung
$\tau$	Schubspannung

## Abkürzungen

Al-Leg.	Aluminium-Legierung
Al-Li-Leg.	Aluminium-Lithium-Legierung
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
E-Modul	Elastizitätsmodul
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DL-Modell	Delaminationsmodell
DM	Detailmodell
FB-Modell	Faserbruchmodell
FE	Finite Elemente
FHG	Freiheitsgrade
FVW	Faserverbundwerkstoffe
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GM	Gesamtmodell
h-Verfeinerung	Elementdurchmesser-Verfeinerung
IP	Integrationspunkt
krit.	Kritisch
p-Verfeinerung	Polynom-Verfeinerung
Ti-Leg.	Titan-Legierung
UD	Unidirektional

# 1. Einleitung

Bei der Entwicklung von Verkehrsmitteln stehen Ziele wie Gewichtsersparnis und Steigerung der Sicherheit immer mehr im Vordergrund. Da diese Anforderungen durch die Verwendung von FVW sehr gut erfüllt werden können, kommen diese seit einigen Jahren zunehmend im Bereich der Verkehrstechnik zum Einsatz. Dieser Werkstoff zeichnet sich besonders durch die spezifischen Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte aus. Weiters besitzen FVW ein besonders gutes Crashverhalten und werden somit auch für Crashelemente eingesetzt. Die Auslegung von FVW-Bauteilen ohne Berücksichtigung des Materialversagens ist mit Hilfe der FE-Methode gut möglich. Hingegen erfolgt die Auslegung von Bauteilen unter Crash- und Impactbelastung aufgrund fehlender, effizienter Simulationsmethoden mittels Versuchen.<sup>1</sup>

Der Grundstein dieser Arbeit wurde bereits mit den abgeschlossenen Projekten Fahrzeugtechnik und Werkstoffkunde zur Entwicklung einer Crashbox in Sandwichbauweise geschaffen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Impactversuche auf Karbonplatten durchgeführt und mit LS-DYNA simuliert. Es zeigte sich, dass das Abbilden des elastischen Verformungsverhaltens der Karbonplatten mittels LS-DYNA sehr gut funktioniert. Für die genaue Abbildung und Analyse von Materialversagen im Laminataufbau eines FVW mit Hilfe der FE-Simulation ist ein detaillierter Modellaufbau notwendig. Dies hat einen hohen Rechenaufwand zur Folge, sodass derartige Untersuchungen von Bauteilen mit den jetzigen Rechenkapazitäten nicht in zufrieden stellenden Rechenzeiten durchführbar sind.

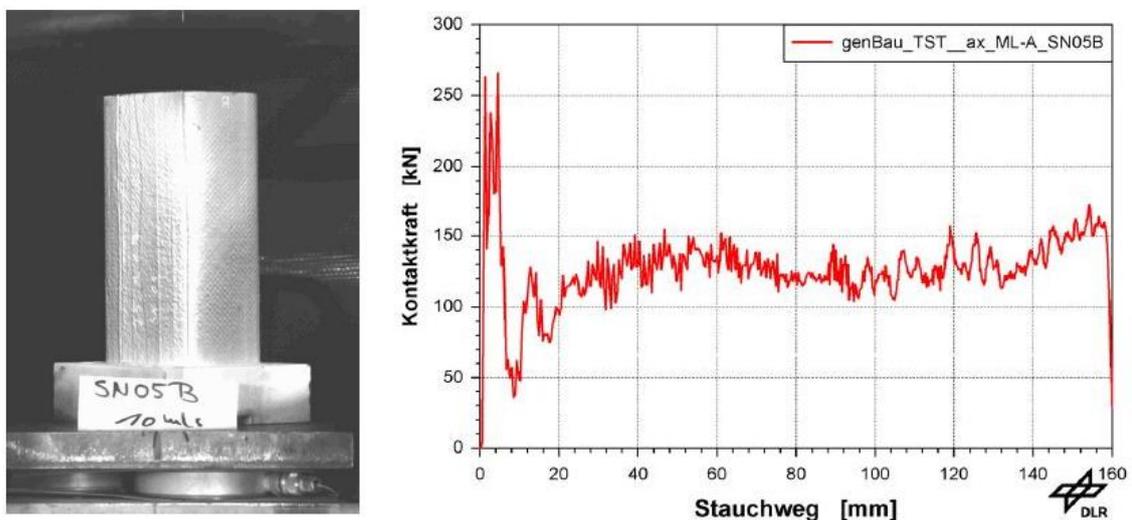
Aufgrund dieser Thematik ergibt sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit mit dem Ziel: Entwicklung einer Methode, um bei impactbelasteten, kohlefaserverstärkten Bauteilen mit Hilfe der FE-Berechnung – mit dem expliziten FE-Solver LS-DYNA – Bauteilversagen im Schichtverbund in akzeptablen Rechenzeiten abbilden zu können.

---

<sup>1</sup> Vgl. Morthorst, Marion: Modellierung des Crashverhaltens konischer Faserverbundstrukturen, TU Braunschweig, Dissertation, 2007, S. 1

## 2. Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich besonders durch ihre spezifischen Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit und Festigkeit aus. Weiters ist das Crashverhalten von FVW z.B. im Vergleich zu metallischen Werkstoffen um vieles besser. Untersuchungen zeigen, dass Crashelemente aus FVW ein hohes spezifisches Energieabsorptionsvermögen und ein stabiles Lastniveau aufweisen. Aus diesem Grund sind Faserverbundstrukturen im Bereich des Insassenschutzes besonders interessant.<sup>2</sup> Metallische Bauteile versagen unter Crashbelastung hauptsächlich durch Beul-, Falt- und Bruchversagen. Dabei wird die Crashenergie durch Fließen bzw. Plastifizieren abgebaut. Bei FVW hingegen wird die Energie überwiegend durch sukzessive mikro- und makromechanische Bruchvorgänge sowie durch Beul- und Faltvorgänge abgebaut.<sup>3</sup> Abbildung 2-1 zeigt das gute Crashverhalten von FVW anhand eines axialen Stauchversuchs. Dieser Versuch wird mit einer Fallmasse von 220 kg und einer Nenngeschwindigkeit von 10 m/s durchgeführt. Aus der dynamischen Stauchlastkurve ist ersichtlich, dass die Probe sukzessive und nicht plötzlich versagt. Dadurch stellt sich ein stabiles Lastniveau über den Stauchweg ein.



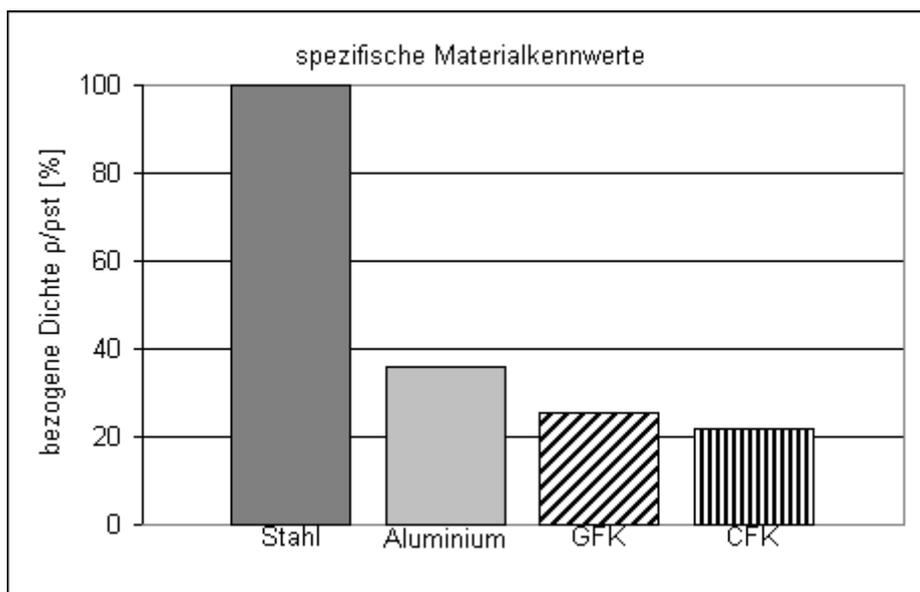
**Abbildung 2-1 Probekörper für Stauchversuch mit dynamischer Stauchlastkurve**

Quelle: Adamski, Pawel u. Elsenhans, Herbert: Untersuchungen zur Modellierung von Strukturen aus FKV unter Crashbelastung mit Hilfe von Mehrschalenmodellierungen, In: 7. LS-DYNA Anwenderforum, 2008, Bamberg

<sup>2</sup> Vgl. Morthorst, S.1

<sup>3</sup> Vgl. Flemming, Manfred: Faserverbundbauweisen, Springer Verlag, 2003, S. 523

Durch die geringe Dichte sind CFK-Teile auch sehr gut für Sportwagen in Leichtbau-Technologie geeignet, wie z.B. bei Lamborghini. Durch die Gewichtsreduktion verbessern sich das Leistungsgewicht und damit die Fahrleistung. In weiterer Folge reduzieren sich dadurch der Kraftstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>4</sup> Diese Vorteile ermöglichen einen Bau von sehr sparsamen Fahrzeugen, wie den L1 von Volkswagen mit einer Gesamtmasse von 380 kg, einen Durchschnittsverbrauch von 1,38 l Diesel und einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von nur 36 g/km.<sup>5</sup> Anwendung finden CFK hauptsächlich im Rennsport oder in Fahrzeugen, die im höheren Preissegment, wie z.B. Audi R8, angesiedelt sind. Die Herstellung von Faserverbundteilen erfolgt heute noch zu einem großen Teil händisch, so dass für den zukünftigen Einsatz in der Großserie eine Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie erforderlich ist.<sup>6</sup> Die Abbildung 2-2 zeigt dazu den Dichtevergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe bezogen auf Stahl. Daraus ist ersichtlich, dass CFK etwa um 80 % leichter sind als Stahl.



**Abbildung 2-2 Dichtevergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe bezogen auf Stahl**

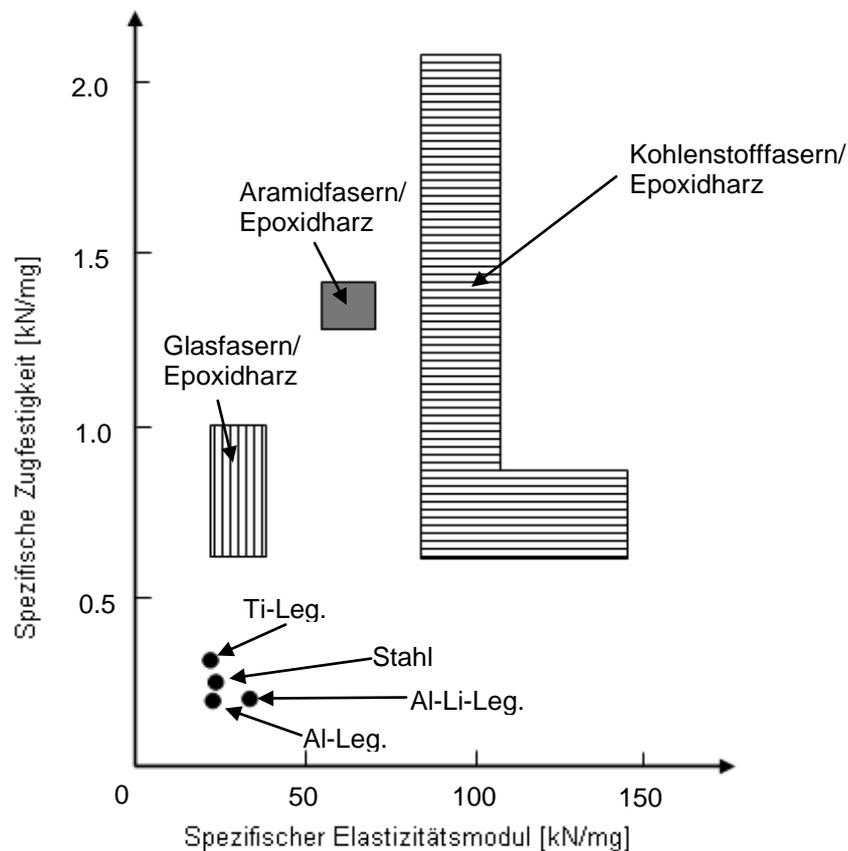
Quelle: Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer Verlag, 2007, S. 631

<sup>4</sup> Vgl. Speed-magazin.de, Verfügbar unter: <http://www.speed-magazin.de/index.php?topic=news/story&ID=18617&serie=tuning>, [Datum des Zugriffs: 29.10.2009]

<sup>5</sup> Vgl. Volkswagen Media Service, Verfügbar unter: [https://www.volkswagen-media-services.com/medias\\_publish/ms/content/de/pressemitteilungen/2009/09/15/auf\\_den\\_punkt\\_durchbruch\\_standard.gid-oeffentlichkeit.html](https://www.volkswagen-media-services.com/medias_publish/ms/content/de/pressemitteilungen/2009/09/15/auf_den_punkt_durchbruch_standard.gid-oeffentlichkeit.html), [Datum des Zugriffs: 29.10.2009]

<sup>6</sup> Vgl. Audi Pressemitteilung, Verfügbar unter: [https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/presskit/2009/09/11/leichtbau/strategische\\_ausrichtung\\_standard.gid-oeffentlichkeit.html](https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/presskit/2009/09/11/leichtbau/strategische_ausrichtung_standard.gid-oeffentlichkeit.html), [Datum des Zugriffs: 30.10.2009]

Aufgrund der geringen Dichte und der hohen Festigkeiten sind im Vergleich der spezifischen Festigkeitseigenschaften die Hochleistungsverbundwerkstoffe den metallischen Werkstoffen – auf die Dichte bezogen - überlegen.



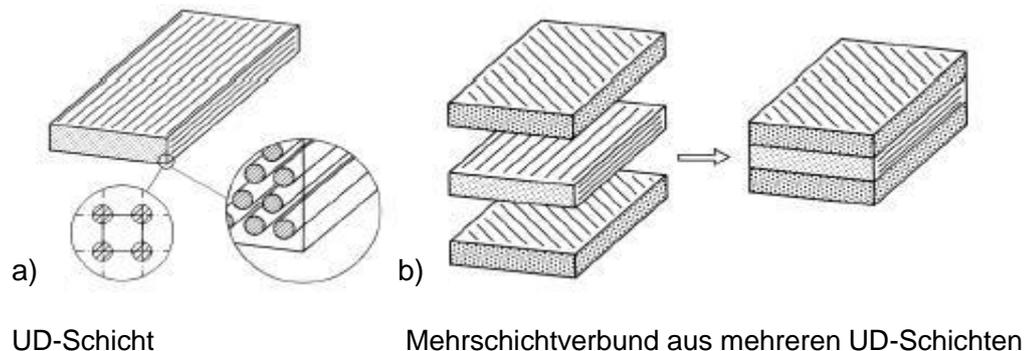
**Abbildung 2-3 Spezifische Materialkennwerte - unidirektional faserverstärkte Polymere im Vergleich zu Metallen**

Quelle: Janda, Ralf: Kunststoffverbundesysteme, VCH Verlagsgesellschaft, 1990, S. 133

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten für den Aufbau von faserverstärkten Kunststoffteilen. In dieser Diplomarbeit wird im Speziellen auf die Simulation von kohlefaserverstärkten Mehrschichtverbunden eingegangen. Derartige Mehrschichtaufbauten können mittels verschiedener Faserhalbzeugen, wie z.B. UD-Schichten, Gewebeschichten, Gelege, Prepregs, usw. realisiert werden.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Vgl. Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer Verlag, 2007, S. 14

Abbildung 2-4 zeigt den Aufbau eines Mehrschichtverbundes mittels UD-Schichten.



**Abbildung 2-4 Aufbau eines Mehrschichtverbundes**

Quelle: Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer Verlag, 2007, S. 15

Im Gegensatz zu isotropen Konstruktionswerkstoffen, wie z.B. Stahl und Aluminium, spielen bei faserverstärkten Mehrschichtverbunden zusätzliche Variablen eine Rolle, die Steifigkeit und Festigkeit dementsprechend beeinflussen:

- Anzahl der Schichten
- Anteil von Faser und Matrix in einer Schicht
- Faserrichtungen der einzelnen Schichten
- Dicke der einzelnen Schichten
- Schichtenreihenfolge<sup>8</sup>

Aufgrund fehlender effizienter Simulationsmethoden erfolgt die Auslegung von Crashelementen bis heute auf Basis von Versuchen. Durch die hohe Anzahl an verschiedenen Parametern, die den Aufbau von Faserverbundstrukturen beeinflussen, wie z.B. Materialzusammensetzung und Gelegearchitektur, ist eine solche Analyse zurzeit sehr zeit- und kostenintensiv. Hinsichtlich der Auslegung von Bauteilen mit Hilfe der FE-Simulation ist das Versagensverhalten von FVW durch intensive Forschungsarbeiten trotz ausgeprägter Anisotropie relativ gut beschreibbar. Dagegen ist das Verhalten unter Crash- und Impactbelastung noch nicht hinreichend wissenschaftlich erforscht und die Entwicklung von Schädigungsmodellen für den Postdamage-Bereich Gegenstand aktueller Forschungen.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Vgl. Schürmann, S. 15

<sup>9</sup> Vgl. Morthorst, S. 1

## 2.1 Versagensarten von Faserverbundlaminaten aus UD-Schichten

Das komplizierte Versagensverhalten ist durch vielschichtige Versagensformen geprägt. Dabei wird zwischen Faser- und Matrixversagen unterschieden. Diese differenzieren sich stark im Verhalten; beide weisen jedoch ein Spröbruchverhalten auf. Eine spezielle Versagensform der Matrix tritt ein, wenn die Bruchebene mit der Grenzfläche zweier Laminate zusammenfällt. Dabei entsteht ein interlaminarer Bruch und man spricht von Delamination.<sup>10</sup>

Bei der Bestimmung der Festigkeit wird zwischen vier Basisbeanspruchungen unterschieden:

- Längs-Beanspruchung  $\sigma_{\parallel}$
- Quer-Beanspruchung  $\sigma_{\perp}$
- Quer-Parallel-Schubbeanspruchung  $\tau_{\perp\parallel}$
- Quer-Quer-Schubbeanspruchung  $\tau_{\perp\perp}$

Bei Normalbeanspruchung muss weiters zwischen Zug- und Druckbeanspruchung unterschieden werden, da diese verschiedene Versagensformen hervorrufen.<sup>11</sup>

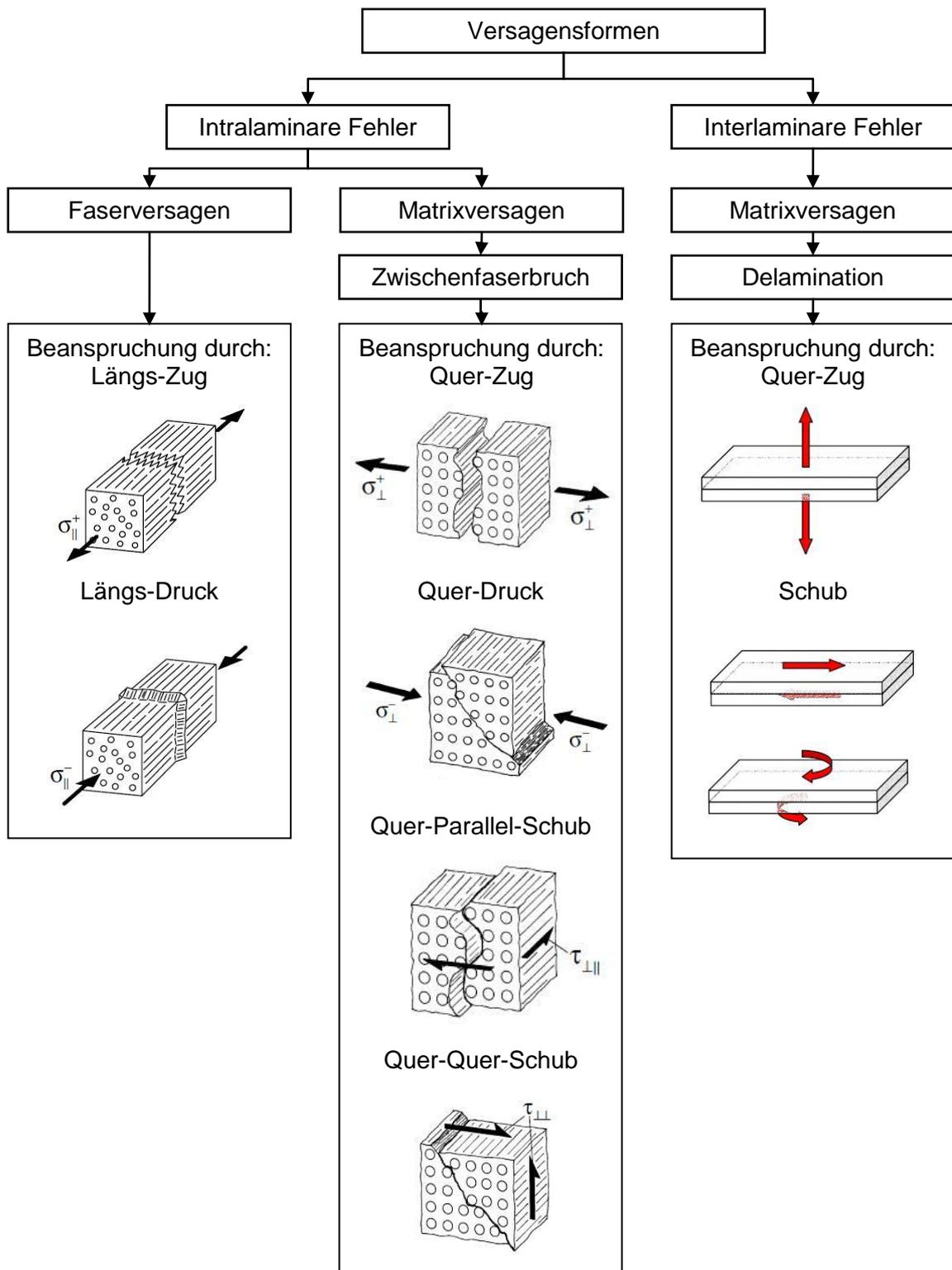
Der am häufigsten auftretende Zwischenfaserbruch ist jener, der durch Quer-Zugbeanspruchung verursacht wird.<sup>12</sup> Abbildung 2-5 zeigt einen Überblick der Versagensformen von Faserverbundlaminaten anhand von UD-Lagen.

---

<sup>10</sup> Vgl. Kärker, Luise: Effiziente Simulation von Schlagschädigungen in Faserverbund-Sandwichstrukturen, TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2007, S. 52

<sup>11</sup> Vgl. Schürmann, S. 345

<sup>12</sup> Vgl. Schürmann, S. 368



**Abbildung 2-5 Versagensformen von Faserverbundlaminaten aus UD-Schichten**  
 In Anlehnung an: Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer Verlag, 2007, S. 346-368 und Middendorf, Peter: Composites – Materialmodellierung und Anwendungen im Flugzeugbau, In: 3. LS-DYNA Anwenderforum, 2004, Bamberg

Das Versagen einzelner verbundener Lagen hat nicht zwingend das Gesamtversagen des Bauteils zur Folge. Des Weiteren ist eine Lastübertragung der Fasern bei auftretender Delamination trotzdem noch möglich. FVW reagieren aufgrund ihrer ausgeprägten Orthotropie und des geschichteten Aufbaus äußerst sensibel auf Querstöße. Diese verursachen interlaminare Schubspannungen und führen zu Matrixrissen und Delamination. Analoge Vorgänge sind auch bei Crashbelastungen zu beobachten.<sup>13</sup> Für die Destruktion der Grenzschichten zwischen den Einzellagen ist nur ein geringer Energieaufwand nötig, da keine hochfesten Fasern zerstört werden müssen. Vernachlässigt man Delaminationsversagen bei impactbelasteten Bauteilen kann das Verformungsverhalten und somit auch die Energieaufnahme des Bauteils nicht richtig wiedergegeben werden.<sup>14</sup> Um das Versagen sowohl qualitativ als auch quantitativ korrekt darstellen zu können, muss somit für die numerische Simulation von impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen eine geeignete Modellierung mit einem passenden Materialmodell gewählt werden.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup> Vgl. Middendorf, Peter: Composites – Materialmodellierung und Anwendungen im Flugzeugbau, In: 3. LS-DYNA Anwenderforum, 2004, Bamberg

<sup>14</sup> Vgl. Morthorst, S.32

<sup>15</sup> Vgl. Middendorf, Peter

### 3. Finite-Elemente-Methode

„Die Finite-Elemente-Methode ist die Methode der endlich großen Elemente.“<sup>16</sup> Diese Methode hat sich im Ingenieurwesen für Berechnungsaufgaben im Bereich des Maschinen-, Apparate- und Fahrzeugbaus schon seit einiger Zeit durchgesetzt. Da die FE-Methode schon in einem frühen Stadium der Produktentwicklung eingesetzt werden kann, trägt dieses Verfahren zu einer wesentlichen Verkürzung der Produktionszeit und somit auch zu einer Reduktion der Entwicklungskosten bei. Durch Rechnersimulationen im Stadium der Bauteil- und Strukturentwicklung wird die Arbeit der Ingenieure rationalisiert und qualitativ optimiert.<sup>17</sup> Entsprechend dem Stand der Technik gibt es zahlreiche Hersteller verschiedener Universalprogramme, wie z.B. Nastran, Abaqus, Ansys, Marc, LS-DYNA, Pamcrash, usw. Diese Programme unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die meisten Systeme sind zuerst für lineare Elastomechanik entwickelt und anschließend mit Modulen der nichtlinearen Festigkeitsberechnung, Dynamik und Wärmeleitung ergänzt worden.<sup>18</sup>

Für die Simulationen in dieser Arbeit wird LS-DYNA Version 971sR4.2.1, Revision 53450 verwendet.

#### 3.1 Elementtypen

FEM-Programme bieten eine große Auswahl an verschiedenen Elementen an. Diese können in Stab-, Balken-, Scheiben-, Platten-, Schalen-, Volumen- und Kreisring-Elementen eingeteilt werden.<sup>19</sup> Abbildung 3-1 zeigt dazu einen Überblick der Elementtypen in LS-DYNA.

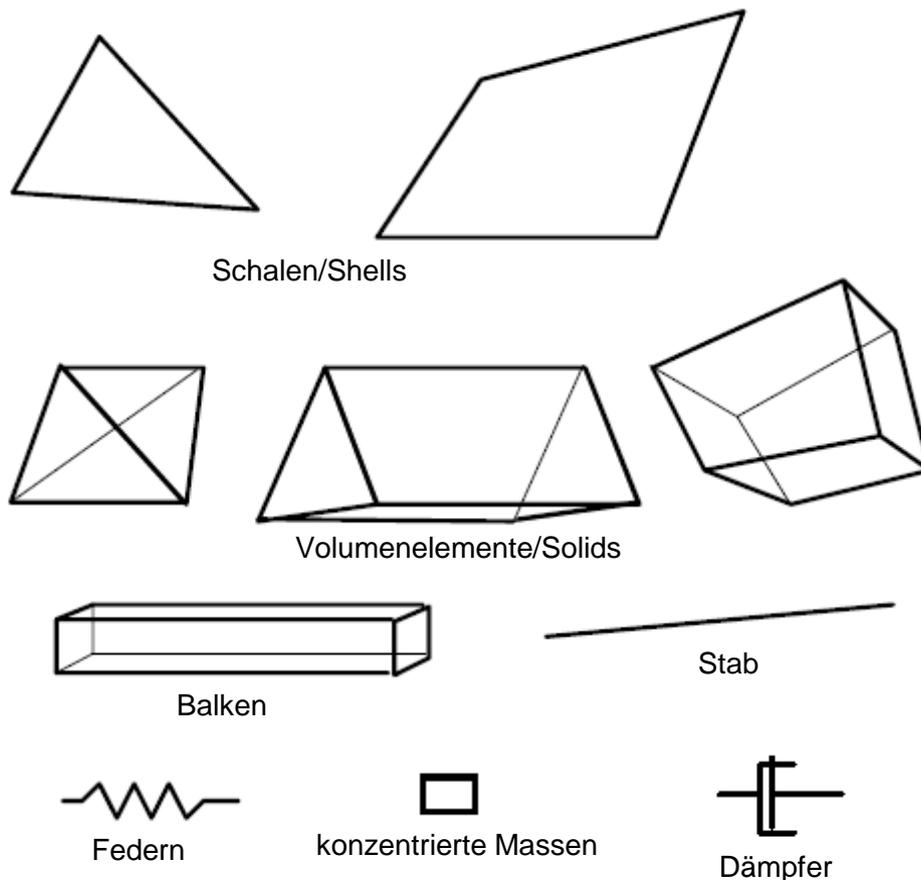
---

<sup>16</sup> Groth, Peter: FEM-Anwendungen: Statik-, Dynamik- und Potenzialprobleme mit professioneller Software lösen, Springer Verlag, 2001, S. 1

<sup>17</sup> Vgl. Klein, Bernd: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Springer Verlag, 2007, S. 1

<sup>18</sup> Vgl. Klein, S. 3

<sup>19</sup> Vgl. Klein, S. 93



**Abbildung 3-1 Elemente in LS-DYNA**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 1 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 41

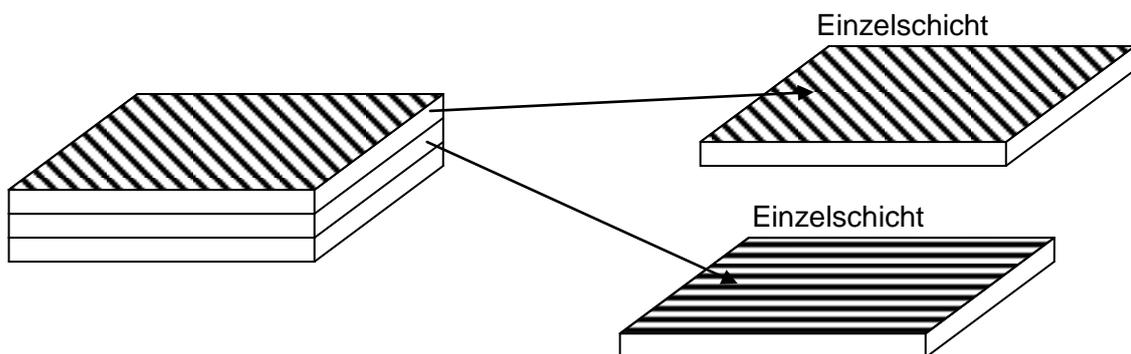
### 3.2 Modellierung von Faserverbundwerkstoffen

Die Materialmodellierung von FVW kann auf verschiedenen Approximationsstufen erfolgen. Dabei unterscheidet man zwischen der Mikro- und Makromechanik. Anwendung findet die Mikromechanik für die Modellierung des mechanischen Zusammenwirkens der Matrix mit den einzelnen eingebetteten Fasern. Dies ermöglicht einen Aufschluss über die Beanspruchung der jeweiligen Einzelfasern, der Matrix und der Grenzflächen durch Belastung. Während der mikromechanische Ansatz für werkstoffkundliche Betrachtungen herangezogen wird, verwendet man den makromechanischen Ansatz zur mechanischen Analyse von Mehrschichtverbunden. Bei der Makromechanik werden nicht die Spannungen der zahlreichen einzelnen Fasern einer Schicht im Verbund analysiert, sondern des gesamten Verbundes und der Einzelschichten. Die kleinste zu betrachtende Einheit ist die

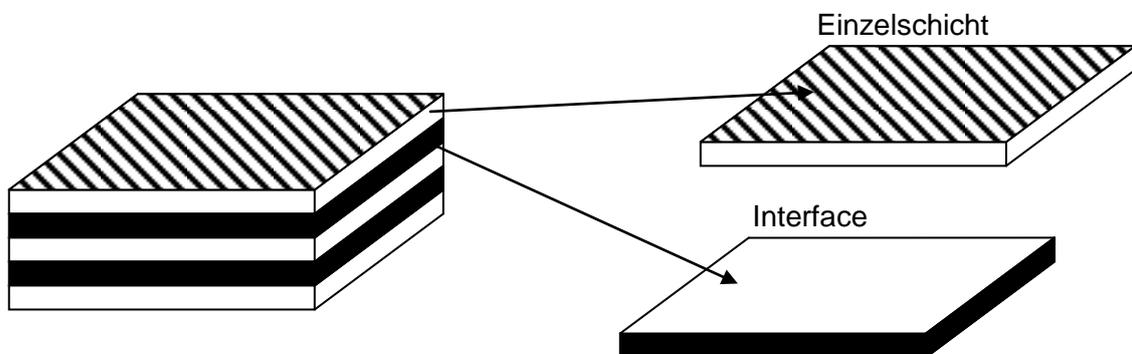
Einzelschicht unter der Annahme, dass diese makromechanisch ein homogenes Kontinuum ist.<sup>20</sup>

Weiters gibt es noch die Möglichkeit zur Modellierung von Mehrschichtverbunden auf Basis der Mesomechanik. Dies ist eine Werkstoffmodellierung, die zwischen Mikro- und Makroebene einzustufen ist. Dabei wird das Laminat, aus zwei elementaren Teilbereichen bestehend, der Lamineinzelschicht und dem interlaminaren Interface, betrachtet. Falls Delamination bei der Bauteilanalyse eine Rolle spielt, erfolgt die Abbildung der Grenzschicht zwischen den Laminatschichten mit dem Interface. Dies unterliegt der Annahme, dass die Schädigung einer Einzelschicht über die Dicke konstant ist, die Schädigung jedoch von Schicht zu Schicht unterschiedlich sein kann.<sup>21</sup>

Somit ist für eine sinnvoll Analyse eines Mehrschichtverbundes unter Impactbelastung eine Approximation auf der Makro- oder Mesomodellebene zu wählen.



**Abbildung 3-2 Makromodell des Laminataufbaus**



**Abbildung 3-3 Mesomodell des Laminataufbaus**

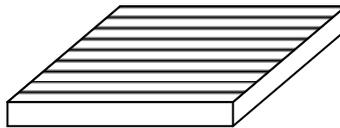
<sup>20</sup> Vgl. Schürmann, S. 16 u. 17

<sup>21</sup> Vgl. Morthorst, S. 22 u. 23

Für die Homogenisierung eines Mehrschichtverbundes gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten.

### 3.2.1 Homogenisierung 1

Die Abbildung des gesamten Lagenaufbaus erfolgt in einer Shell-Lage oder mittels Solids. Dies hat zur Folge, dass für jeden unterschiedlichen Lagenaufbau Materialtests notwendig sind, um die orthotropen Eigenschaften des gesamten Aufbaus in einem Materialmodell abbilden zu können. Somit gestaltet sich der Modellaufbau einfach und die erforderlichen Rechenzeiten sind dementsprechend gering. Aufgrund der stark vereinfachten Modellierung des Schichtenverbundes ist die Lokalisierung von Spannungsspitzen in den einzelnen Lagen nicht möglich. Weiters ist das Abbilden der einzelnen Versagensmechanismen getrennt voneinander nicht realisierbar.

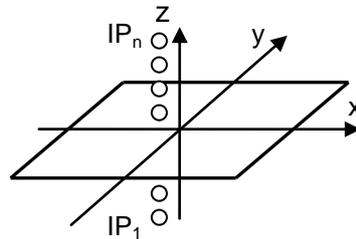


**Abbildung 3-4 Homogenisierungsmöglichkeit 1 eines Mehrschichtverbundes**  
Quelle: Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAmore GmbH, 2007

### 3.2.2 Homogenisierung 2

Die einzelnen Lagen sind entsprechend ihrer Eigenschaften in den Integrationspunkten über den Schalenquerschnitt eines Shell-Elements abgebildet. Diese Homogenisierung entspricht der Modellierung des Mehrschichtverbundes auf Basis der Makromechanik. Dies hat den Vorteil des einfachen Modellaufbaus mit dennoch geringen Rechenzeiten. Im Gegensatz zu Homogenisierung 1 kann hier der Lagenaufbau variiert werden, ohne dass zusätzliche Materialtests notwendig sind. Des Weiteren sind eine Lokalisierung von Spannungsspitzen in den einzelnen Lagen und das Abbilden des elastischen Materialverhaltens sehr gut möglich. Bei Anwendung dieser Homogenisierung können Versagensmechanismen nur bedingt getrennt voneinander abgebildet werden, da Faser und Matrix in einem Materialmodell berücksichtigt sind. Infolgedessen ist das Feststellen von

Delamination mit diesem Modell nicht möglich. Anwendung findet dieser Homogenisierungstyp – bei der entwickelten Methode – bei der Modellierung des GM (Kapitel 3.4).



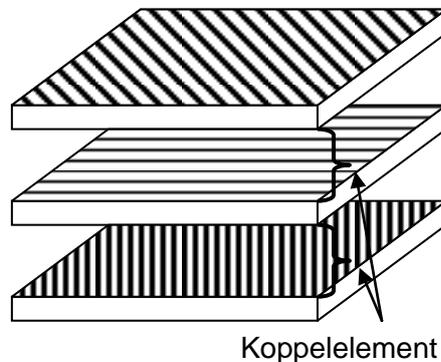
**Abbildung 3-5 Homogenisierungsmöglichkeit 2 eines Mehrschichtverbundes**  
Quelle: Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAmore GmbH, 2007

### 3.2.3 Homogenisierung 3

Jede Lage wird gesondert mit Shells modelliert und mit Koppellementen miteinander verbunden. Eine Modellierung der einzelnen Lagen mittels Solids ist grundsätzlich möglich, ergibt jedoch aufgrund der kleinen Elementkantenlängen einen sehr kleinen kritischen Zeitschritt. Bei der Verwendung von Schalen-Elementen für die Lagen steht zwar kein vollständiger 3D-Spannungszustand zur Verfügung, jedoch kann der Einfluss der Normalspannung auf die intralaminare Versagensanalyse vernachlässigt werden. Die Kopplung der einzelnen Lagen kann mittels kohäsiver Elemente, Solids oder durch Klebekontakte erfolgen. Die Koppellemente bilden dabei sowohl das Materialverhalten der Harzphase als auch die interlaminare Schichtablösung ab. Diese Homogenisierung entspricht der Modellierung des Mehrschichtverbundes auf Basis der Mesomechanik. Diese Modellierung ermöglicht, Delamination separat abzubilden. Die Approximation des Mehrschichtverbundes des DM erfolgt durch die Homogenisierung 3 (Kapitel 4).

Mit diesem Typ kann das elastische Materialverhalten sehr gut dargestellt werden. Durch das getrennte Abbilden von Faser und Matrix ist ein separates Beurteilen der Spannungen und ein Berücksichtigen von Delamination möglich. Weiters ist eine Variierung des Lagenaufbaus möglich, ohne dass zusätzliche Materialtests notwendig sind. Jedoch gestaltet sich der Modellaufbau komplexer und auch die Materialvalidierung ist entsprechend aufwändiger. Durch die Abbildung der dünnen Grenzschichten zwischen den Lagen erhöht sich aufgrund der Abhängigkeit des kritischen Zeitschritts von der Elementgröße der Rechenaufwand deutlich. Dadurch ist eine Anwendung dieser Homogenisierung auf

große Bauteile oder auf Komponenten in Gesamtfahrzeugsimulationen mit den aktuellen Rechenkapazitäten nicht sinnvoll möglich.



**Abbildung 3-6 Homogenisierungsmöglichkeit 3 eines Mehrschichtverbundes**  
Quelle: Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAmore GmbH, 2007

### 3.3 Materialmodell Typ 54

Für die Abbildung des orthotropen Verhaltens einer kohlefaserverstärkten Lage stehen zahlreiche Materialmodelle in LS-DYNA zu Verfügung. Der Materialtyp \*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE (Materialmodell 54) hat sich für Schalen-Elemente bei FVW-Bauteilen bewährt. Mit diesem Typ erfolgt die Beschreibung des orthotropen Materialverhaltens bis zum Materialversagen einer UD-Schicht linear elastisch. Zudem ist für die Berücksichtigung von Versagen das Festigkeitskriterium nach CHANG/CHANG implementiert.<sup>22</sup>

Dieses Materialmodell kann Versagen aufgrund folgender Beanspruchungen berücksichtigen:

- Faserversagen durch Längs-Zug/Druck-Beanspruchung
- Matrixversagen durch Quer-Zug/Druck-Beanspruchung
- Versagen aufgrund von Quer-Parallel-Schub-Beanspruchung

---

<sup>22</sup> Vgl. hierzu und im Folgenden: Hallquist, John: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006 S. 349-351

Die Steuerung der Versagensformen erfolgt durch die Angabe von Festigkeitsgrenzen und durch Fehlerparameter. Kommt es zum Versagen, werden die Steifigkeitseigenschaften diskontinuierlich auf Null degradiert.

Ein Versagen tritt ein wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:

- Das CHANG/CHANG Fehlerkriterium in Faserrichtung ist erfüllt.
- Die Dehnung wird in Faserrichtung überschritten.
- Die effektive Dehnung wird überschritten.
- Die Zeitschrittweite sinkt unter eine vorgegebene Grenze.

Dieses Materialmodell bietet den Vorteil der guten Anpassbarkeit an experimentelle Versuche. Da es hauptsächlich für UD-Schichten gedacht ist, spricht man bei Matrixbeanspruchung von Belastungen quer zur Faserrichtung. Prinzipiell sind die Versagensmechanismen für UD-Schichten ausgelegt, jedoch ist durch eine entsprechende Wahl der Parameter dieser Typ auch für Gewebelagen anwendbar.

Die Fehlerkriterien nach CHANG/CHANG werden wie folgt berechnet.

$\sigma_{aa} > 0$ , <b>Faserzugbeanspruchung</b>	<b>bei Versagen</b>
$e^2_f = \left( \frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left( \frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0, \text{Versagen} \\ < 0, \text{elastisch} \end{cases}$	$\Rightarrow E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0$

**Formel 3-1 Berechnung des Fehlerkriteriums für Faserzugbeanspruchung nach CHANG/CHANG**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 201

$\sigma_{aa} < 0$ , <b>Faserdruckbeanspruchung</b>	<b>bei Versagen</b>
$e^2_c = \left( \frac{\sigma_{aa}}{X_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0, \text{Versagen} \\ < 0, \text{elastisch} \end{cases}$	$\Rightarrow E_a = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0$

**Formel 3-2 Berechnung des Fehlerkriteriums für Faserdruckbeanspruchung nach CHANG/CHANG**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 201

$\sigma_{bb} > 0$ , <b>Matrixzugbeanspruchung</b>	<b>bei Versagen</b>
$e^2_m = \left( \frac{\sigma_{bb}}{Y_t} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0, \text{Versagen} \\ < 0, \text{elastisch} \end{cases}$	$\Rightarrow E_b = \nu_{ba} = 0 \rightarrow G_{ab} = 0$

**Formel 3-3 Berechnung des Fehlerkriteriums für Matrixzugbeanspruchung nach CHANG/CHANG**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 201

$\sigma_{bb} < 0$ , <b>Matrixdruckbeanspruchung</b>	<b>bei Versagen</b>
$e^2_d = \left( \frac{\sigma_{bb}}{2S_c} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left( \frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0, \text{Versagen} \\ < 0, \text{elastisch} \end{cases}$	$\Rightarrow E_b = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0$ $\rightarrow G_{ab} = 0$

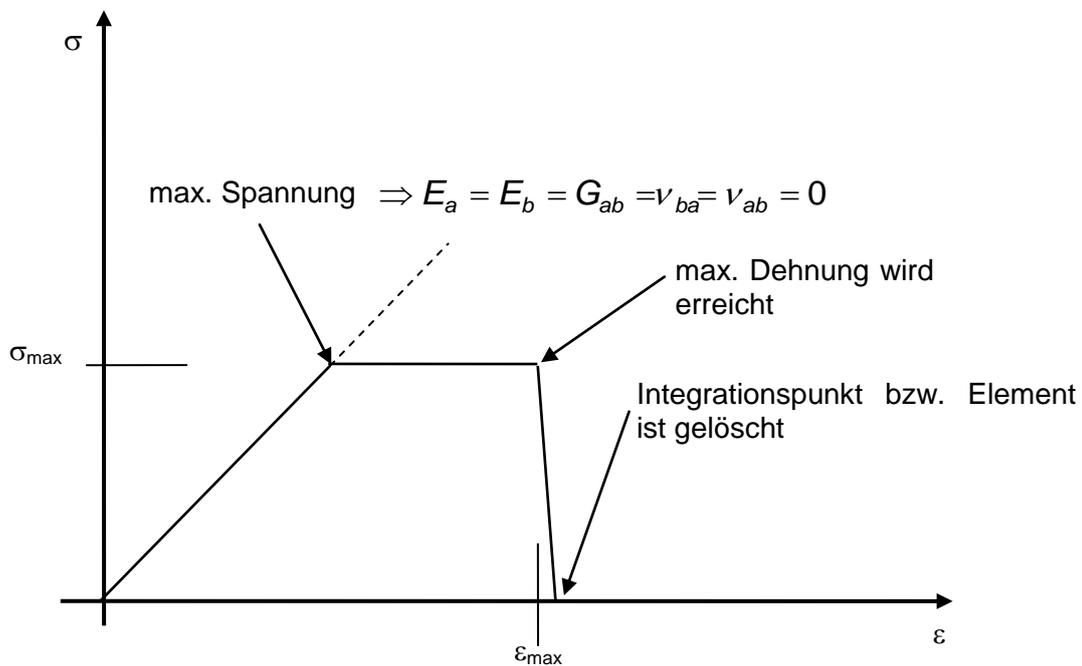
**Formel 3-4 Berechnung des Fehlerkriteriums für Matrixdruckbeanspruchung nach CHANG/CHANG**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 201

Informationen über den Status der einzelnen Fehlerkriterien in den Integrationspunkten eines Elements können durch die Verwendung von sogenannten History-Variablen ausgeschrieben werden.

Mit der Verwendung der Parameter FBRT und YFAC kann nach dem Versagen aufgrund von Matrixdruck die Zug- bzw. Druckfestigkeit in Faserrichtung herabgesetzt werden. Mit dem Parameter SOFT ist es möglich, die E-Module und die Festigkeit von Elementen, die an geschädigte Elemente angrenzen, herabzusetzen. Kommt es zu einem Versagen aller Integrationspunkte im geschichteten Lagenaufbau (Homogenisierung 2), wird das ganze Element gelöscht.

Die Abbildung 3-7 zeigt beispielhaft das Werkstoffverhalten mit Faserbruch in einem  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm infolge axialer Zugbelastung.



**Abbildung 3-7 Beispiel eines  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramms**

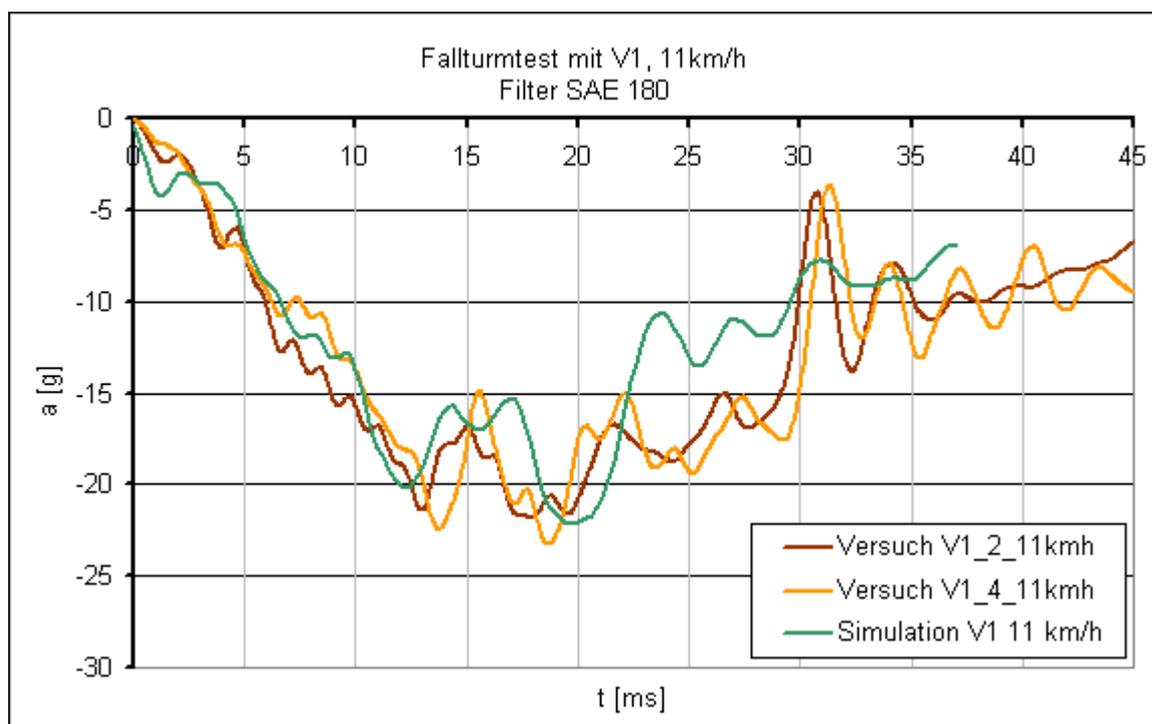
In Anlehnung an: Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAMore GmbH, 2007

Für eine detaillierte Beschreibung des Materialtyps sei hier auf die LS-DYNA Manuals verwiesen.

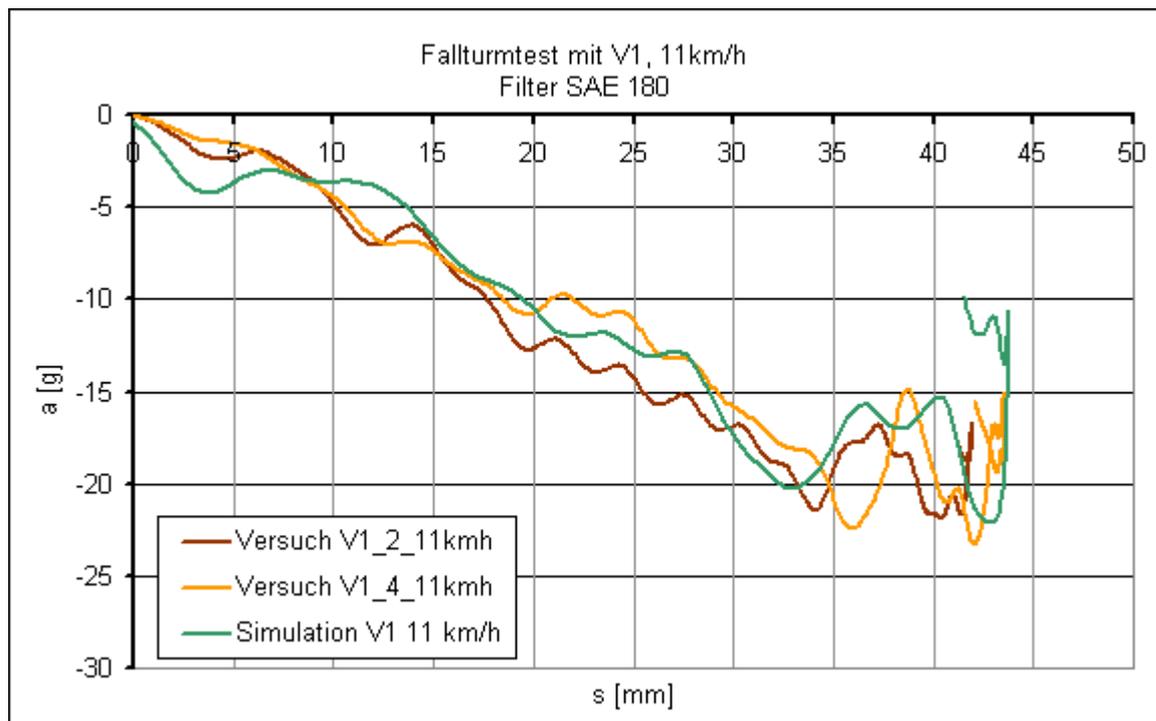
### 3.4 Materialvalidierung eines Karbonlagenaufbaus aus Twill-Gewebe

Die Basis dieser Arbeit wurde in den Projekten Fahrzeugtechnik und Werkstoffkunde gelegt. Ziel dieser Projekte war die Entwicklung einer Crashbox in Sandwichbauweise mittels Aluwaben und CFK. Zur Ermittlung von Materialkennwerten für die Auslegung der

Crashbox mithilfe der Simulation waren zahlreiche Versuche notwendig. Dabei handelte es sich um Fallturmversuche, bei denen verschiedene Lagenaufbauten mit einem zylindrischen Impactor und Auftreffgeschwindigkeiten von 8, 11 und 14 km/h untersucht wurden. Die Herstellung der Karbonplatten erfolgte aus Twill-Gewebe. Zusätzlich wurden Impactortests auf Honeycomb- und Sandwichstrukturen mit 15 und 19 km/h durchgeführt. Anhand dieser Versuche konnte das Honeycomb- und Karbonmaterial mit LS-DYNA validiert werden. Die validierten Materialkarten berücksichtigen kein Materialversagen, eignen sich jedoch sehr gut, um die Bauteilsteifigkeit in der Simulation abzubilden. Die gute Darstellung der Materialsteifigkeit mit dem validierten Karbonmaterial zeigt z.B. die Auswertung der Impactorbeschleunigung des Fallturmversuchs mit einer Auftreffgeschwindigkeit von 11 km/h und einer CFK-Platte aus 6 Lagen.



**Abbildung 3-8 Auswertung des Fallturmversuchs mit 11 km/h von Simulation und Versuch, Beschleunigung über die Zeit**



**Abbildung 3-9 Auswertung des Fallturmtests mit 11 km/h von Simulation und Versuch, Beschleunigung über den Impactorweg**

Die maximale Beschleunigung und der Impactorweg der Simulation stimmen mit den Versuchen sehr gut überein. Der Lagenaufbau ist durch die Homogenisierung 2 und den Materialtyp 54 in LS-DYNA abgebildet. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird diese Art der Modellierung eines CFK-Bauteils bei der GM-Erstellung verwendet.

### 3.5 Steigerung der Aussagesicherheit und Genauigkeit einer FE-Analyse

Grundsätzlich rechnet ein FE-Programm mit allen Daten, die formal korrekt eingegeben werden. Das Ergebnis der Simulation muss dahingehend kontrolliert werden, ob das berechnete Verhalten dem tatsächlichen entspricht, da es durch zahlreiche Fehlerquellen beeinflusst werden kann. Eine unkorrekte physikalische Annahme der Randbedingungen führt zu falschen Lagerreaktionen und Spannungsverteilungen. Zudem können bei falscher Wahl der Elementform die Reaktionen der Bauteile nicht ausreichend wiedergegeben und die tatsächliche Spannungsverteilung nicht erfasst werden. Eine zu stark vereinfachte Bauteilgeometrie kann zu nicht vorhandenen Spannungsspitzen führen.

Des Weiteren ist es nicht möglich, mit einem zu groß gewählten FE-Netz eine sichere Aussage zu treffen.<sup>23</sup>

Die absolute Genauigkeit kann mittels der FE-Methode nicht erzielt werden, jedoch gibt es Möglichkeiten, diese zu verbessern.<sup>24</sup>

- a) Netzverfeinerung: Die auftretenden Spannungsunterschiede innerhalb eines Elements und zu den Nachbarelementen sollen nicht zu groß sein. Aus diesem Grund soll das FE-Netz in Bereichen mit Spannungsspitzen feinmaschiger sein.
- b) Harmonisierung von Elementformen: Je mehr die Elementform der jeweiligen Idealform entspricht, desto bessere Ergebnisse erzielt man.
- c) Verwendung von Viereck- und Hexaederelementen: Lineare Dreieck- oder Tetraederelemente verhalten sich zu steif und bilden daher das reale Verhalten nicht korrekt ab. Daher soll die Verwendung von Viereck- oder Hexaederelemente vorgezogen werden.
- d) Verwendung von Elementen höherer Ordnung: Die Approximation des Elementverhaltens erfolgt durch Polynome höherer Ordnung.

Bei der FE-Methode wird das Verhalten näherungsweise mittels linearer Gleichungen beschrieben. Dieses gilt nur mit unendlich kleinen (infinitesimalen) Elementen. Die Realität fordert jedoch endlich große (finite) Elemente. So kann das reale Verhalten umso besser abgebildet werden, je feiner das FE-Netz ist.<sup>25</sup> Die hohe Anzahl an Elementen führt wiederum zu längeren Rechenzeiten.<sup>26</sup> Dieser Zusammenhang stellt in der Praxis eine Diskrepanz dar. Einerseits sollen mit der FE-Simulation sehr gute Ergebnisse erzielt werden, andererseits darf der erforderliche Rechenaufwand nicht zu groß sein. In Bezug auf die Verringerung der Elementgröße spricht man auch von der h-Verfeinerung – aufgrund der Veränderung des relativen Elementdurchmessers  $h$ . Bei Veränderung der Elementordnung verwendet man auch den Begriff der p-Verfeinerung. Durch das Approximieren des Elementverhaltens durch Polynome höherer Ordnung steigt die Genauigkeit der Elemente, da eine größere geometrische Genauigkeit bei der Modellierung und aufgrund der größeren Anzahl der Knotenfreiheitsgrade eine höhere Informationsdichte erreicht wird.

---

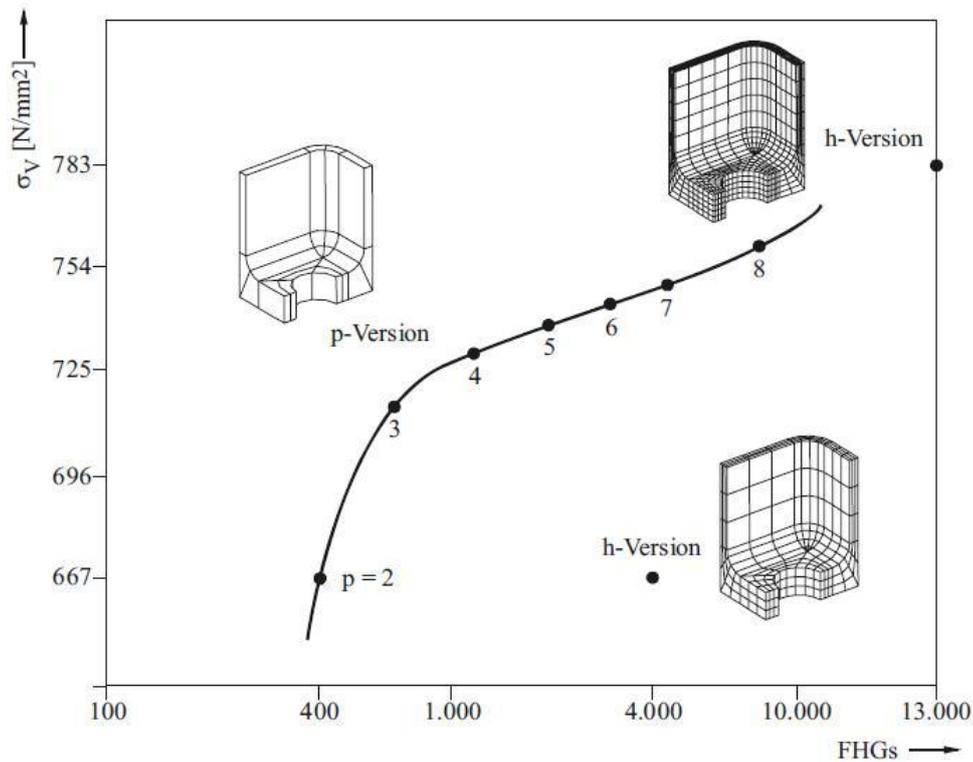
<sup>23</sup> Vgl. Klein, S. 8

<sup>24</sup> Vgl. Fröhlich, Peter: FEM-Anwendungspraxis: Einstieg in die Finite Elemente Analyse Deutsch/Englisch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2005, S. 67

<sup>25</sup> Vgl. Groth, S. 1

<sup>26</sup> Vgl. hierzu und im Folgenden: Klein, S. 8-9

Die Abbildung 3-10 zeigt die Auswirkungen der p- und h-Verfeinerung in Abhängigkeit der Freiheitsgrade auf die maximale Spannung. Dabei handelt es sich um eine Viertelsymmetrie einer Nietbrücke.



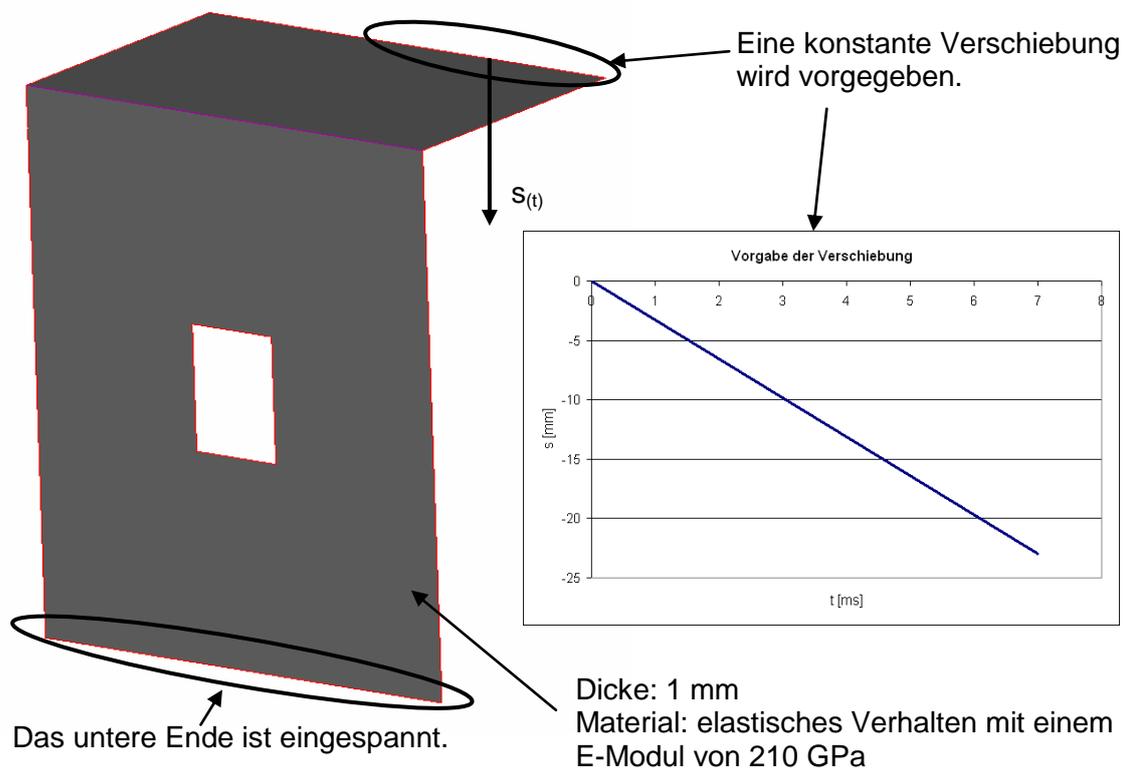
**Abbildung 3-10 Spannungsauswertung in der Nietbrücke mit einer h- und p-Version**  
 Quelle: Klein, Bernd: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Springer Verlag, 2007, S. 9

Im Diagramm sind zwei Ergebnisse der Modellierungen mit h-Verfeinerung dargestellt. Die erste Variante verfügt über 2.250 Volumen-Elemente (entspricht 4.000 FHG). Die größte Spannungsspitze liegt bei  $667 \text{ N/mm}^2$ . Bei einer Verdoppelung der Elementanzahl auf 4.450 (entspricht 13.000 FHG) steigt die Spannungsspitze auf  $783 \text{ N/mm}^2$ . Dies entspricht einer relativen Erhöhung der Spannungsspitze um 15 %. Bei der Untersuchung der Geometrie mittels einer p-Verfeinerung sind 18 Volumen-Elemente (entspricht 3.100 FHG) ausreichend.

Bei Anwendungen in der Praxis hat sich die h-Methode durchgesetzt. Die Gründe dafür liegen in der viel höheren Berechnungsgeschwindigkeit und in der fortgeschrittenen Entwicklung der Berechnungsmöglichkeiten nichtlinearer Probleme.<sup>27</sup>

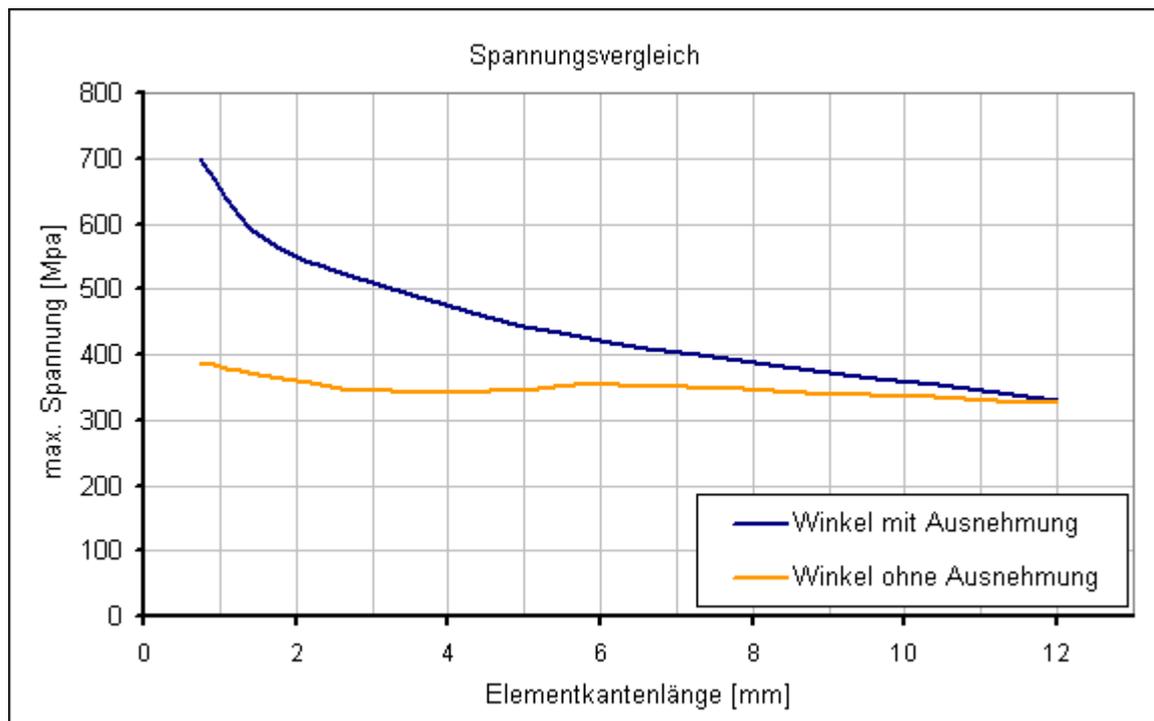
### 3.5.1 Netzverfeinerung bei einer LS-DYNA-Simulation

Die Untersuchung des Einflusses der Elementkantenlänge auf die maximale Spannung in LS-DYNA erfolgt mit einem einfachen Lastfall. Dabei wird ein Winkel einmal mit und einmal ohne Ausnehmung am unteren Ende eingespannt und am oberen Ende, bis zur Bauteilmitte, eine konstante Verschiebung vorgegeben. Dadurch ergibt sich ein asymmetrischer Belastungszustand des Winkels. Für einen Spannungsvergleich werden diese mit unterschiedlichen Elementkantenlängen vernetzt. Hierfür wird die Von-Mises-Spannung herangezogen.



**Abbildung 3-11 Lastfall zur Untersuchung des Einflusses der Elementkantenlänge**

<sup>27</sup> Vgl. Gebhardt, Christof: Finite Elemente in der Produktentwicklung, In: CAD WORLD, März 1999, S. 38



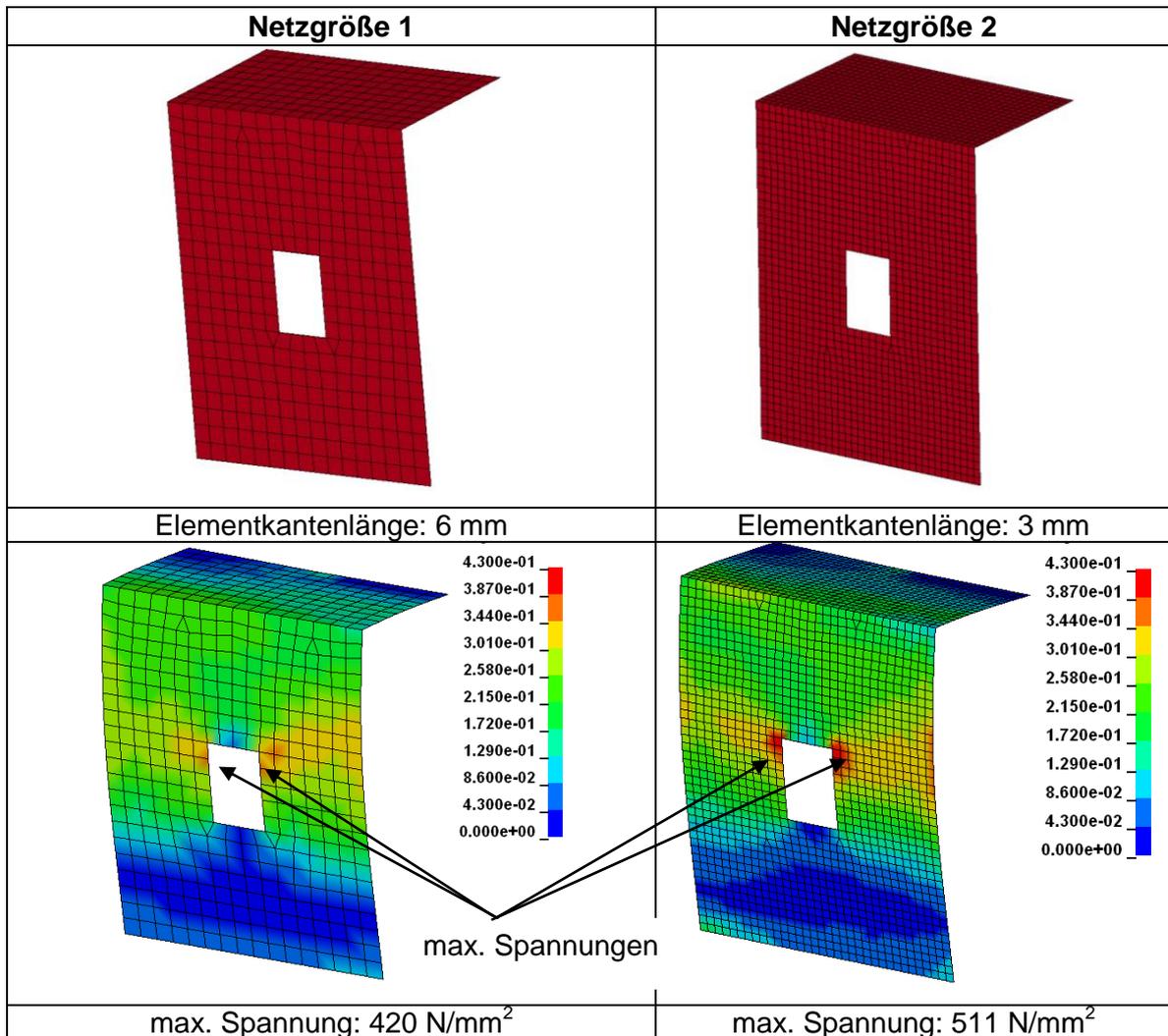
**Abbildung 3-12 Vergleich der maximalen Spannungen in Abhängigkeit der Elementkantenlänge**

Dieser Vergleich zeigt, dass die Elementkantenlänge einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungen hat. Bei dem Winkel mit Ausnehmung ist ein starker Anstieg der maximalen Spannung mit abnehmender Elementkantenlänge erkennbar.

Grund dafür ist, dass die Ecken in der Ausnehmung keine Radien aufweisen und somit Kerben mit einem Kerbradius von 0 darstellen. Weiters wird durch die Verwendung eines Materialtyps mit elastischem Verhalten kein Fließen in den Kerben möglich. Somit treten hohe Spannungen am Kerbgrund auf, die mit zunehmend feinem FE-Netz genauer lokalisiert werden.<sup>28</sup>

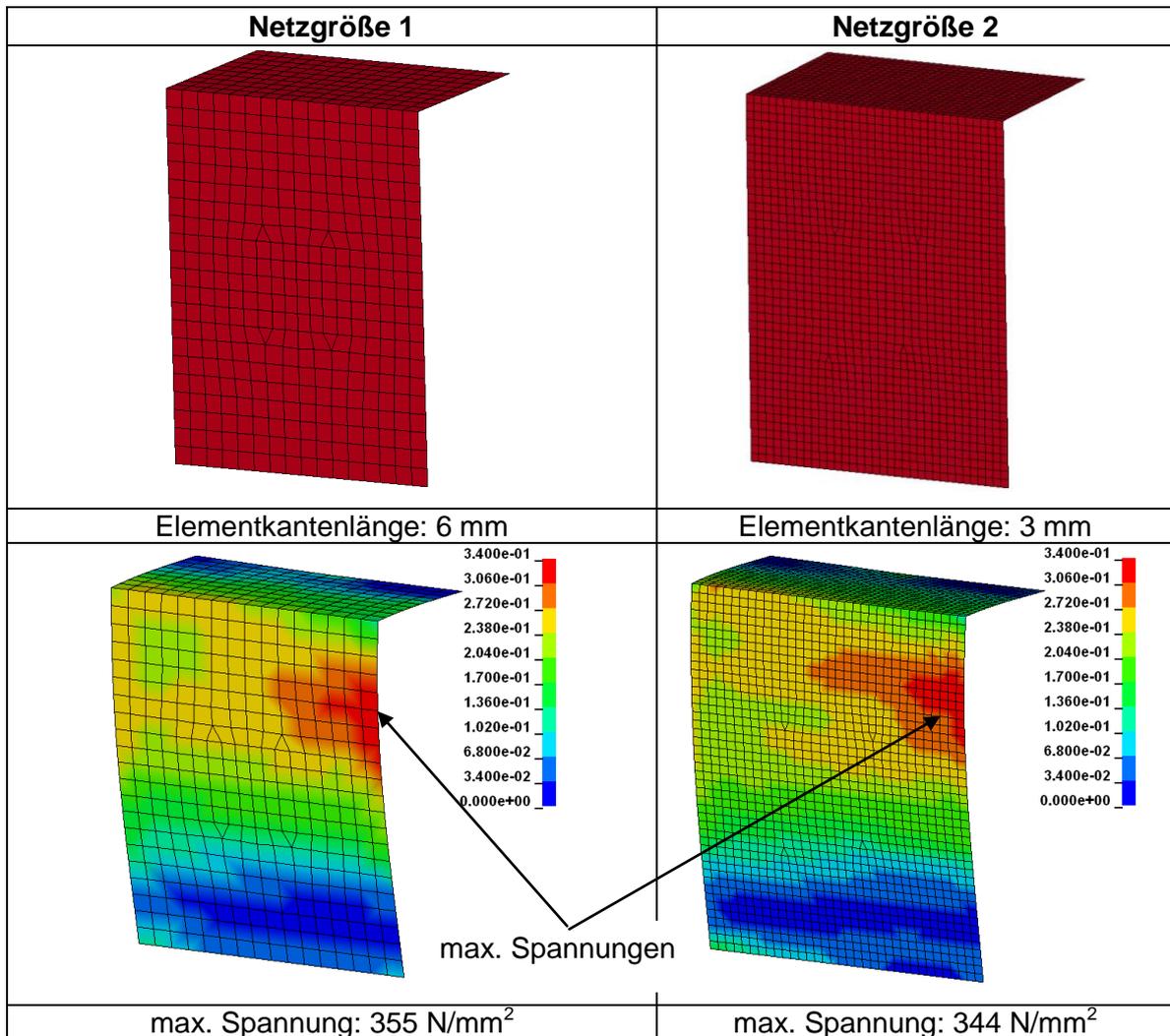
Im Gegensatz dazu hat die Elementkantenlänge bei der einfacheren Bauteilgeometrie ohne Ausnehmung nur geringen Einfluss auf die maximale Spannung. Es tritt ein großflächiger Bereich mit hohen Spannungen am Bauteilrand auf.

<sup>28</sup> Vgl. Radaj, Dieter und Vormwald, Michael: Ermüdungsfestigkeit, Springer Verlag, 2007, S. 147-179



**Abbildung 3-13 Spannungsvergleich zweier unterschiedlicher Netzgrößen bei 6 ms, Winkel mit Ausnehmung**

Bei der Winkelgeometrie mit Ausnehmung und mit Netzgröße 1 (6 mm) beträgt die maximale Spannung 420 N/mm<sup>2</sup> und mit Netzgröße 2 (3 mm) 511 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund der kleineren Elementkantenlänge bei Netzgröße 2 muss für die Simulation, wie aus Formel 3-5 ersichtlich ist, ein kleinerer Zeitschritt gewählt werden. Durch die größere Elementanzahl und den kleineren Zeitschritt ergibt sich eine um den Faktor 4,6 längere Rechenzeit mit Netzgröße 2.



Zur Abbildung und Lokalisierung einer Crashfront in einem Mehrschichtverbund haben sich Elementkantenlängen von 2 bis 3 mm bewährt. Kleinere Elementkantenlängen erfordern viel längere Rechenzeiten, liefern jedoch keine wesentlich besseren Ergebnisse. Hingegen kann die Crashfront mit Elementkantenlängen von mehr als 5 mm nicht ausreichend genau abgebildet werden.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Vgl. Holzapfel, Martin: Numerische Nachbildung der Crashfront von faserverstärkten Strukturen mit Hilfe von Mehrschalenmodellen, In: 6. LS-DYNA Anwenderforum, 2007, Frankenthal

Der kritische Zeitschritt ist abhängig von der charakteristischen Elementkantenlänge und der Schallgeschwindigkeit.

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_c}{c}$$

**Formel 3-5 Berechnung des kritischen Zeitschritts in LS-DYNA**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006, S. 491

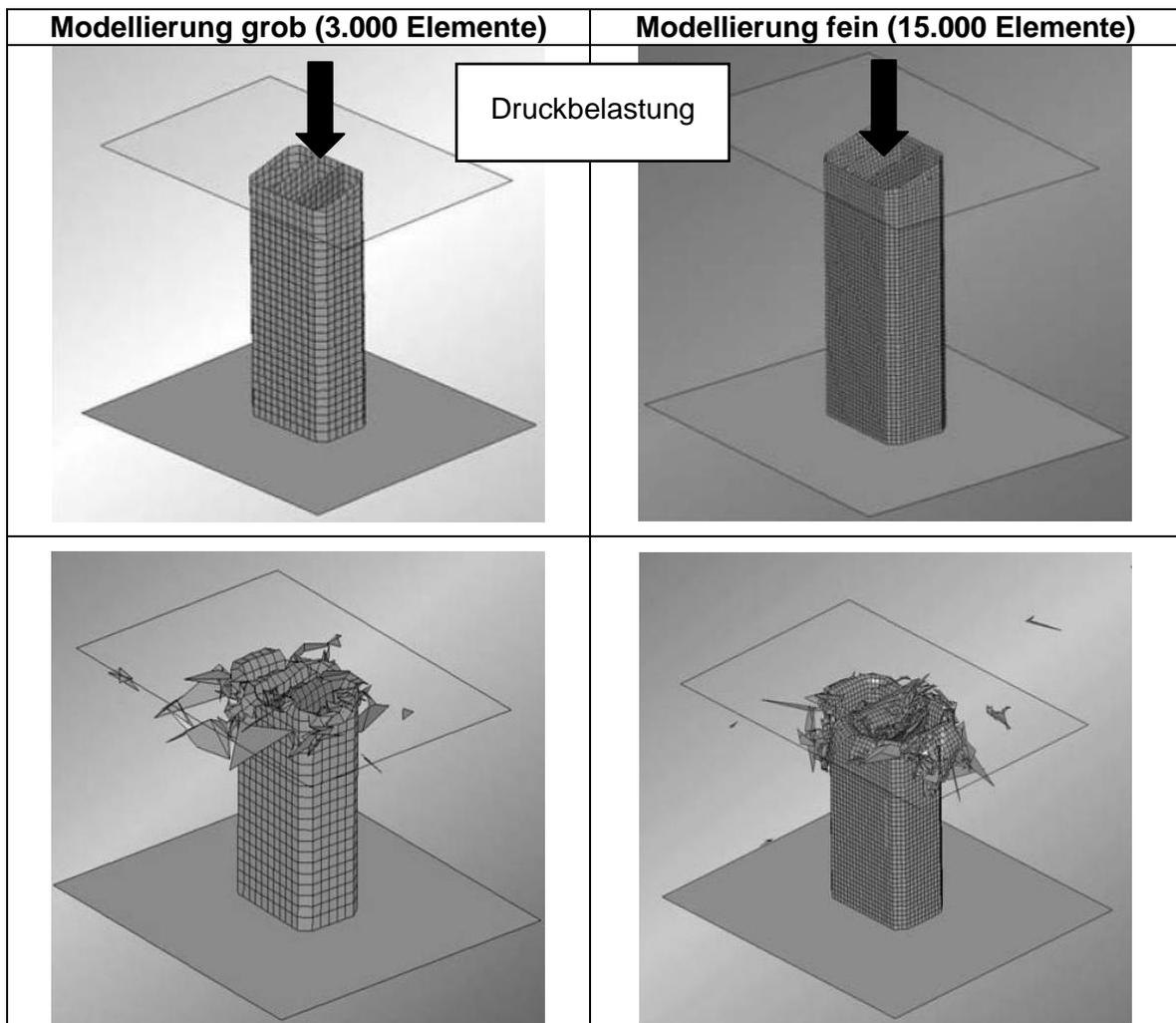
$$c_{2D} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}}$$

**Formel 3-6 Berechnung der Schallgeschwindigkeit in einem Shell-Element**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006, S. 491

### 3.5.2 Einfluss der Elementkantenlänge bei Materialversagen

Bei Verwendung einer Materialdefinition mit Bruchkriterium, wobei Elemente bei Überschreiten eines kritischen Zustands gelöscht werden, ist ein feines Netz im versagenden Bereich notwendig. Grund dafür ist einerseits, dass durch die kleine Elementkantenlängen eine genauere Lokalisierung der maximalen Spannung und somit des versagenden Bereichs möglich ist. Andererseits können durch Löschen von Elementen mit kleiner Elementkantenlänge lokales Versagen und Risse realistischer abgebildet werden und es kommt dabei nicht zu einer plötzlichen, großflächigen Schwächung in Modell. Dies veranschaulicht der in Abbildung 3-14 dargestellte Lastfall. Ein Profil wird unter Berücksichtigung von Materialversagen durch eine Platte gestaucht. Zum Vergleich erfolgt die Abbildung des Bauteils mit zwei unterschiedlichen Netzgrößen– mit grober (3.000 Elemente) und feiner Modellierung (15.000 Elemente). Daraus ist ersichtlich, dass das Versagen bzw. Umbiegen der Profilwände unter der Platte mit dem feinen Modell besser in der Simulation dargestellt wird.



**Abbildung 3-14 Einfluss der Elementkantenlängen bei einer Crashanalyse mit Materialversagen**

Quelle: Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAmore GmbH, 2007

Bei der entwickelten Methode zur Simulation von impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen mittels zweier gekoppelter Modelle werden die Vorteile der Homogenisierung 2 (mittels einer Reihe Shells) und der Homogenisierung 3 (Lagen und Matrix getrennt modelliert) ausgenutzt. Dazu wird die Homogenisierung 2 bei der GM-Simulation zur Abbildung der gesamten Bauteilsteifigkeit bzw. der Bauteilverformung und bei der Lokalisierung von möglichen Materialversagensbereichen verwendet. Die Approximation des lokal begrenzten DM erfolgt durch die Homogenisierung 3; dies ermöglicht eine Abbildung der Versagensmechanismen Faser- und Matrixbruch sowie den Spezialfall Delamination. Durch eine Verfeinerung des DM-Netzes gegenüber dem GM, ist eine genauere Lokalisierung von Spannungsspitzen im Bauteil sowie eine bessere Abbildung der Versagensmechanismen möglich.

## 4. Detailmodell

Beim Start der Diplomarbeit wurde davon ausgegangen, dass ein funktionierendes Materialmodell mit zugehörigem Modellierungsansatz zum detaillierten Abbilden von Versagensmechanismen für CFK unter Impactbelastung zur Verfügung steht. Da dies jedoch nicht der Fall war, wurde im Zuge dieser Arbeit eine geeignete Modellierung für das DM ausgetestet. Es sollte eine möglichst stabile Homogenisierungsmöglichkeit für FVW gefunden werden, um diese Diplomarbeit trotzdem weiterführen zu können. Die Entwicklung eines neuen Modellierungsansatzes oder Materialtyps für FVW wurde nicht weiter verfolgt, da hierin nicht die zentrale Thematik bestand und dies einen beträchtlichen Mehraufwand bedeutet hätte. Jedoch ist für die entwickelte Methode ein rechenfähiges DM erforderlich, da andernfalls die Übergabe von Belastungen und Schädigungen zwischen DM und GM nicht getestet werden können.

Mit dem entwickelten DM soll es möglich sein, intra- und interlaminare Fehler getrennt voneinander berücksichtigen zu können. Dies wird mit dem entwickelten Modell erfüllt, jedoch sind die Versagensmechanismen nicht genau mit Versuchen validiert.

Zur Simulation von faserverstärkten Kunststoffen gibt es noch keine allgemein anwendbare Berechnungsmethode. Besonders die stabile Simulation von Versagensinitiierung und Schadensausbreitung ist schwierig. Grund dafür ist, dass es noch keine Standardmaterialmodelle gibt, die eine Dehnratenabhängigkeit des Materialverhaltens berücksichtigen. Weiters ist das Materialverhalten im Nachversagensbereich sowie dessen Einfluss noch Thema zahlreicher Forschungen. Gerade bei der Berechnung und Auslegung von Crash- und Impactbelastungen spielt der Nachversagensbereich eine wesentliche Rolle, da besonders bei diesen Anwendungsgebieten der Vorteil des hohen Energieabsorptionsvermögens von CFK-Strukturen genutzt werden möchte.<sup>30</sup>

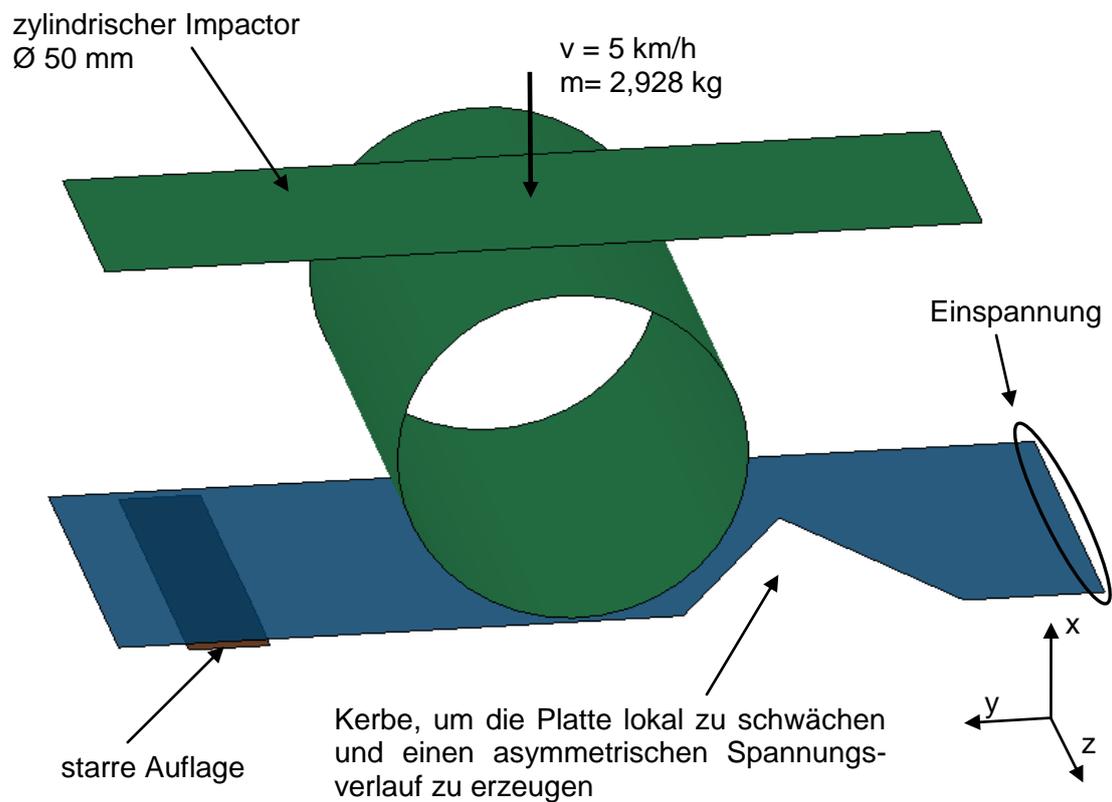
---

<sup>30</sup> Vgl. Morthorst, S. 2

## 4.1 Detaillierter Modellaufbau für Mehrschichtverbunde

Wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, kann die Homogenisierung des Lagenaufbaus in LS-DYNA auf verschiedene Arten erfolgen. Bei der Homogenisierung für das DM ist besonders das getrennte Abbilden von intra- und interlaminaren Fehlern von Bedeutung. Dies kann mit der Homogenisierung 3 realisiert werden. Dafür werden Schalen-Elemente zur Modellierung der Laminatschichten verwendet. Für die einzelnen Lagen wird der Materialtyp 54 verwendet. Die Kopplung der einzelnen Lagen kann mittels Klebekontakten, kohäsiver Elemente und Solids erfolgen. Diese bilden dabei das Materialverhalten der Harzphase wie auch die interlaminare Schichtablösung ab. In dieser Arbeit werden alle drei Möglichkeiten zur Kopplung der Lagen untersucht.

Zum Vergleich und Testen der einzelnen Varianten wird folgender Lastfall verwendet. Die CFK-Platte ist auf einer Seite eingespannt und auf der anderen Seite durch eine feste Auflage abgestützt. Um die Platte lokal zu schwächen und einen komplexeren Spannungszustand in der Platte zu bekommen, ist diese mit einer Kerbe versehen. Die Platte ist 140 mm lang und 100 mm breit, sie besteht aus 4 Gewebelagen mit einer Ausrichtung von  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ . Die Platte wird mit einem zylindrischen Impactor mit einer Masse von 2,9 kg und einer Auftreffgeschwindigkeit von 5 km/h belastet. Der Impactor ist in Schussrichtung geführt, was einem geführten Fallturmversuch entspricht. Für einen Vergleich der Simulationen wird die Beschleunigung im Impactor ausgewertet. Dieser Lastfall wird in weiterer Folge als Lastfall A bezeichnet und ist in Abbildung 4-1 dargestellt.



Lagenaufbau der CFK-Platte  
4 Gewebelagen mit  $0^\circ\text{-}90^\circ\text{-}90^\circ\text{-}0^\circ$   
Abmessungen: 140 x 100 mm  
Dicke: 0,8 mm

**Abbildung 4-1 Lastfall A zur Entwicklung eines DM**

#### 4.1.1 Klebekontakt zur Verbindung der einzelnen Lagen

Bei Homogenisierung 3 können als Interface Klebekontakte zwischen den einzelnen Lagen verwendet werden. Das Versagen der Klebekontakte kann kraft- bzw. spannungsgesteuert erfolgen.<sup>31</sup> Das Versagen ist bei den LS-DYNA-Klebekontakten \*CONTACT\_TIEBREAK\_NODES\_TO\_SURFACE und \*CONTACT\_TIEBREAK\_NODES\_ONLY kraftgesteuert, bei den Kontakten \*CONTACT\_AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK und \*CONTACT\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK dagegen spannungsgesteuert. Für die Versagenskriterien der Klebeverbindungen werden Normal- und Scherbelastungen berücksichtigt. Mit der Formel 4-1 wird

<sup>31</sup> Vgl. hierzu und im Folgenden: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS´S MANUAL VOLUME 1 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 362-389

das Versagen der Klebekontakte berechnet. Die Klebeverbindung zwischen den Elementen wird gelöst, wenn der Wert des berechneten Versagenskriteriums  $\geq 1$  ist.

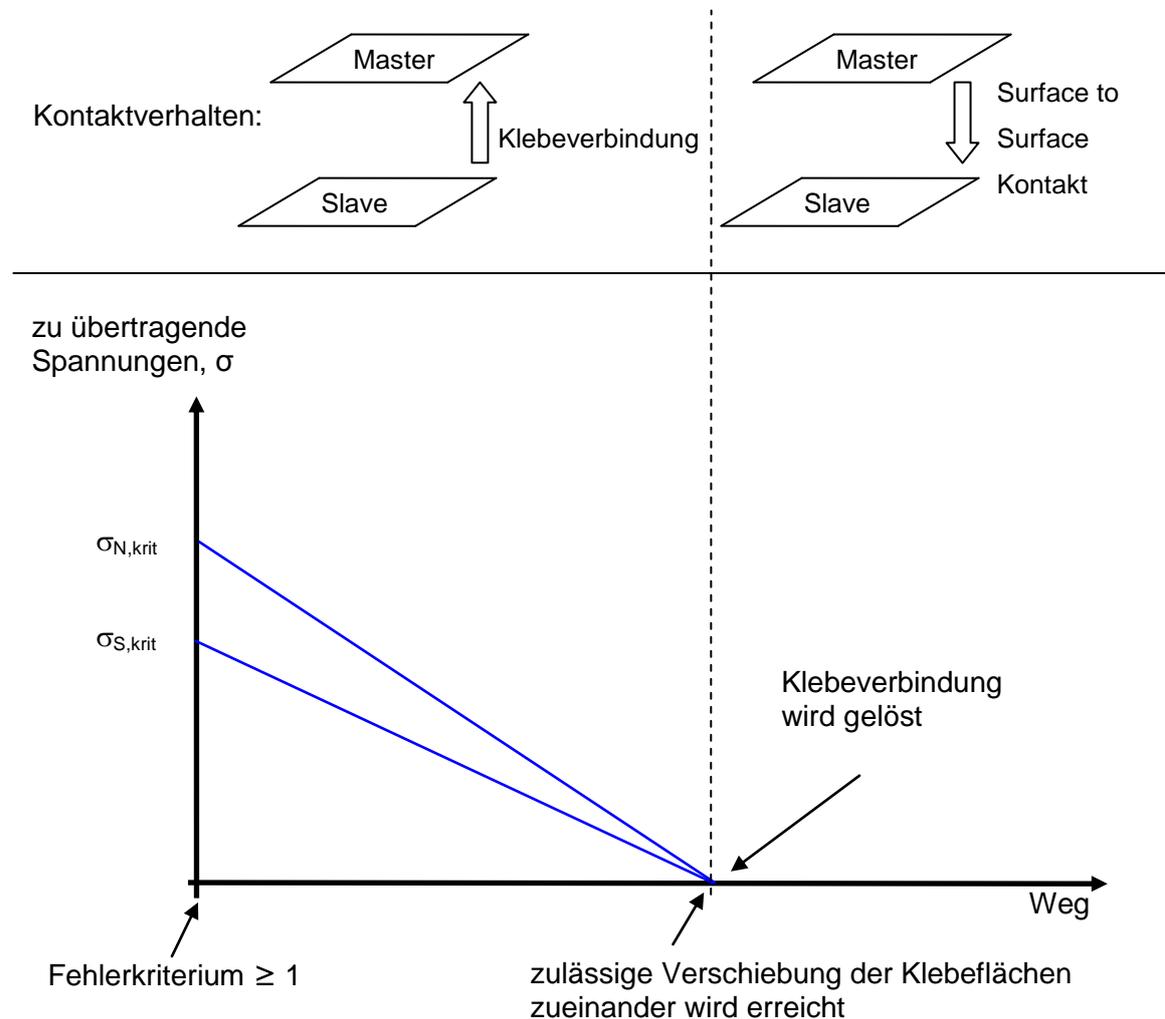
<b>Spannungsgesteuert</b>	<b>Kraftgesteuert</b>
$\left( \frac{ \sigma_N }{ \sigma_{N,krit} } \right)^2 + \left( \frac{ \sigma_S }{ \sigma_{S,krit} } \right)^2 \geq 1$	$\left( \frac{ F_N }{ F_{N,krit} } \right)^2 + \left( \frac{ F_S }{ F_{S,krit} } \right)^2 \geq 1$

**Formel 4-1 Berechnung des Fehlerkriteriums in spannungs- und kraftgesteuerten Klebeverbindungen**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 1 Version 971,  
Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 378 und S. 387

Bei den Untersuchungen wird der Kontakttyp `*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK` mit der Option 8 verwendet. Bei diesem Kontakt bleibt die Klebeverbindung bis zum Erreichen des Fehlerkriteriums aufrecht. Bei Erreichen des Fehlerkriteriums der Klebeverbindung wird eine Verschiebung der beiden Verbindungsflächen zueinander zugelassen. Dabei nimmt die zu übertragende Kraft linear bis zum Erreichen des zulässigen Verschiebungswertes ab. Wird die maximal zulässige Verschiebung erreicht, kommt es zu einer Lösung der Klebeverbindung. Danach wirkt ein „AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE“-Kontakt zwischen den Elementen. Dadurch können sich die Elemente, ohne sich zu durchdringen, zueinander bewegen.

In der Abbildung 4-2 ist das Verhalten der Klebeverbindung bei Erreichen des Fehlerkriteriums bis zum völligen Lösen der Verbindung dargestellt.



**Abbildung 4-2 Beschreibung des Kontaktverhaltens der verwendeten Klebeverbindung**

Die zahlreichen durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die Simulation – bei Verwendung eines Klebekontaktes als Koppellement bei einem Mehrschichtverbund aus mehr als drei Lagen – leicht instabil wird. Die Änderung der Parameter Master/Slave im Kontakt, Zeitschrittreduzierung, Elementtyp und Hourglasscontrol, Kontaktsteifigkeiten, Kontaktdicken, Dämpfungen im Kontakt, globale Dämpfung von Knoten sowie Simulation mit single/double precision führen zu keiner wesentlichen Verbesserung der Stabilität der Simulation. Zusätzlich ergibt sich die Problematik, dass dieser Kontakttyp nicht auf Dreieckselemente anwendbar ist. Deshalb ist die Homogenisierung 3 mit Klebekontakten zur Kopplung der Lagen für die DM-Modellierung nicht geeignet.

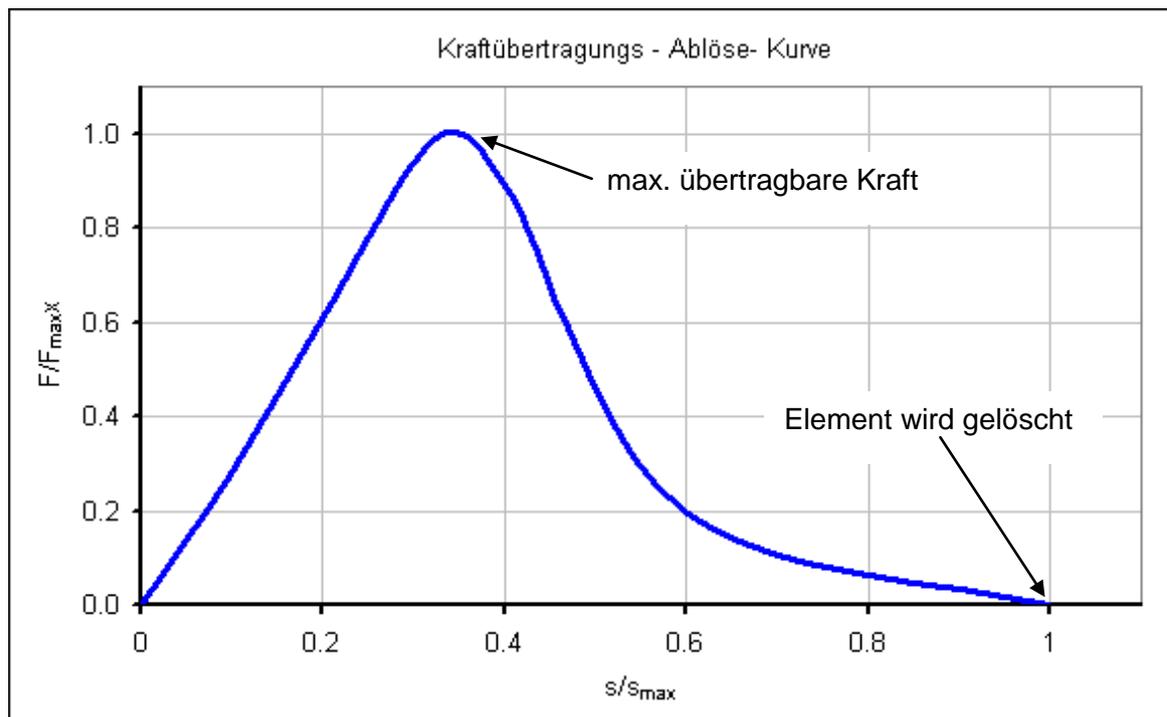
#### 4.1.2 Kohäsive Elemente zur Verbindung der einzelnen Lagen

Kohäsive Elemente zwischen den einzelnen Lagen verhalten sich wie nicht lineare Federn. Sie werden als Solid-Elemente modelliert und jedoch als Elemente mit einem Volumen von 0 behandelt. Aus diesem Grund spielt die kleine Elementkantenlänge über die Solid-Dicke bei der Zeitschrittberechnung keine Rolle. Zur Verbindung von Schalen- und Solid-Elementen steht jeweils eine Elementformulierung zur Verfügung. Nach dem Erreichen des Versagenskriteriums wird das kohäsive Element gelöscht und es besteht keine weitere Verbindung zwischen den Laminaten. Für kohäsive Elemente stehen eigene Materialtypen in LS-DYNA zur Verfügung. Die einzelnen Materialtypen unterscheiden sich hauptsächlich in ihrem Verhalten bei Versagen. Bei den Untersuchungen wird der Materialtyp \*MAT\_KOHÄSIVE\_GENERAL (Mat186) verwendet. Durch die Definition einer normierten Kraftübertragungs-Ablöse-Kurve, der maximal übertragbaren Last in Normal- und Tangentialrichtung und der Energiefreisetzungsraten, wird das Delaminationsverhalten zwischen den Lagen beschrieben. Mittels einer mathematischen Beziehung werden die Kraftübertragungs-Ablöse-Kurven für Normal- und Tangentialrichtung auf eine Kurve für den jeweiligen Belastungszustand im Laminat umgerechnet.<sup>32</sup>

In Abbildung 4-3 ist ein Beispiel für eine normierte Kraftübertragungs-Ablöse-Kurve dargestellt. Dabei steigt mit zunehmender Belastung des kohäsiven Elements der Widerstand bis zum Erreichen der maximal übertragbaren Last. Danach nimmt der Widerstand bis zum maximalen Verformungsweg ab, bei dem das kohäsive Verbindungselement gelöscht wird.

---

<sup>32</sup> Vgl. hierzu und im Folgenden: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS´S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 716-719

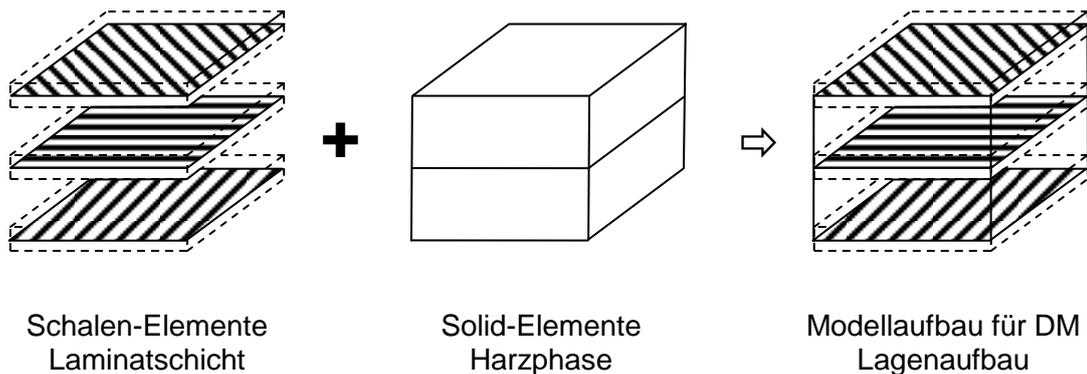


**Abbildung 4-3 Beispiel einer normierten Kraftübertragungs-Ablöse-Kurve zur Beschreibung der Delamination mittels kohäsiver Elemente**

Trotz zahlreicher Parameteruntersuchungen wird die Simulation bei einem mehrlagigen Schichtaufbau bei Auftreffen des Impactors auf das kohlefaserverstärkte Bauteil leicht instabil. Weiters werden kohäsive Elemente in Pentaform nicht unterstützt, was speziell eine Modellierung von komplexen Bauteilgeometrien sehr erschwert. Deshalb wird die Homogenisierung 3 mit kohäsiven Elementen zur Kopplung der Lagen für die DM-Modellierung nicht verwendet.

#### 4.1.3 Solid-Elemente zur Verbindung der einzelnen Lagen

Bei dieser Möglichkeit erfolgt die Kopplung der einzelnen Lagen mittels Solid-Elementen, wobei sich die Solid- und die Schalen-Elemente die Knoten teilen.



**Abbildung 4-4 Modellierung des Schichtaufbaus für das DM**

Diese Art zur Modellierung des Lagenaufbaus erweist sich bei der Simulation eines mehrlagigen Schichtaufbaus als besonders stabil. Das entwickelte DM kann intra- und interlaminaire Fehler getrennt voneinander berücksichtigen, wobei das Materialversagen im Zuge dieser Diplomarbeit nicht mit realen Versuchen validiert ist. Diese Variante der Homogenisierung des Lagenaufbaus findet in weiteren Publikationen Anklang und erzielt auch dort sehr gute Ergebnisse.<sup>33</sup>

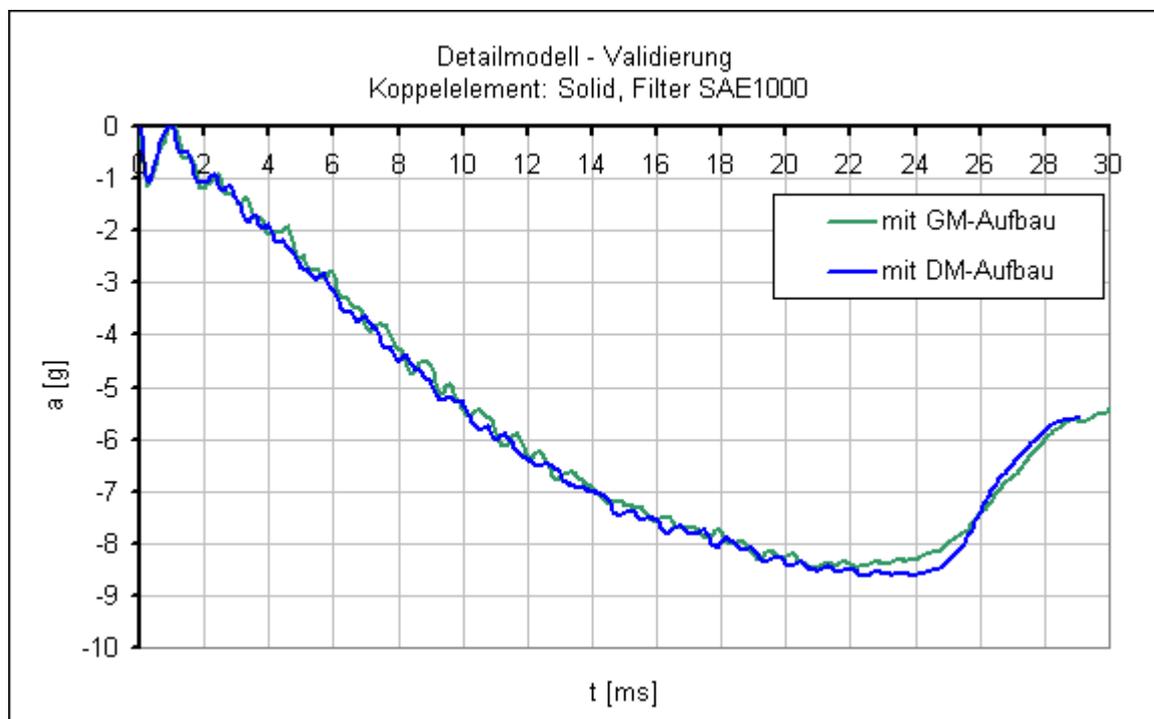
Das Materialmodell 54 \*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE wird für die Schalen-Elemente herangezogen. Für die Solid-Elemente wird das Materialmodell 59 \*MAT\_COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID\_MODEL verwendet. Dieses Materialmodell ist speziell für Solid-Elemente mit orthotropen Materialeigenschaften und elastisch-plastischen Verhalten geeignet. Weiters kann Materialversagen damit berücksichtigt werden. Durch die Angabe von maximalen Spannungen in jeder Materialachse und der Scherspannungen werden die jeweiligen Materialgrenzen definiert.

Um die entwickelte Methode später zur Berechnung von kohlefaserverstärkten Bauteilen mit zwei gekoppelten Modellen testen und vergleichen zu können, ist es notwendig, dass das DM mit dem GM validiert ist. D.h., das DM soll ohne Materialversagen die gleichen Steifigkeiten aufweisen wie das GM. Für diesen Zweck wird der am Anfang dieses

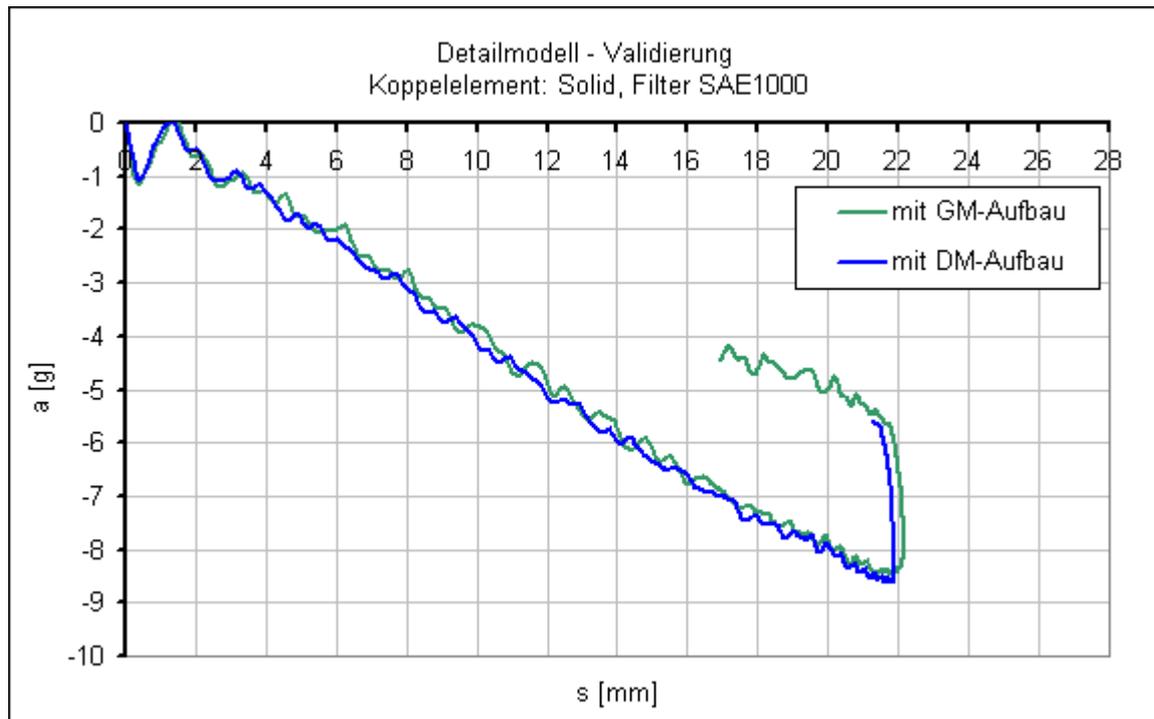
<sup>33</sup> Vgl. Morthorst, S. 40

Kapitels beschriebene Lastfall A herangezogen. Zuerst wird dieser Lastfall mit dem GM-Aufbau simuliert. Für die Lagen wird die bereits validierte Materialkarte aus dem beschriebenen Projekt zur Entwicklung einer Crashbox in Sandwichbauweise verwendet. Anschließend wird der gesamte Lastfall mit dem DM simuliert. Zum Vergleich der Steifigkeiten der beiden Modelle wird die resultierende Beschleunigung des Impactors über die Zeit und den Verformungsweg ausgewertet. Um die Steifigkeiten des DM an das GM anzupassen, werden die Materialeigenschaften der Schalen und Solids so lange verändert, bis die Beschleunigung und die Verformung mit dem GM übereinstimmen. Dabei stellt sich beim DM ein bestimmtes Verhältnis der E-Module zwischen den Schalen und Solids ein. Dieses wurde im Rahmen der Validierung empirisch ermittelt. Für die Solids dürfen nicht die Kennwerte der reinen Harzphase eingesetzt werden. Dies würde zu einer zu schubweichen Approximation des Lagenaufbaus führen, da die Harzelemente die Schubbelastung zwischen den einzelnen Lagen übertragen.

Abbildung 4-5 zeigt den Beschleunigungsverlauf des Impactors über die Zeit und Abbildung 4-6 die Beschleunigung über den Weg. Beide Verläufe spiegeln das Validierungsergebnis des DM-Aufbaus wider.



**Abbildung 4-5 DM-Validierung, Impactorbeschleunigung über Zeit**



**Abbildung 4-6 DM-Validierung, Impactorbeschleunigung über die Verformung**

Aus diesen Vergleichen ist ersichtlich, dass sowohl die Beschleunigung als auch der Verformungsweg bei der Simulation mit DM- und GM-Aufbau ohne Materialversagen übereinstimmen und somit der DM-Aufbau mit dem GM-Aufbau sehr gut validiert ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften der Schalen-Elemente können die Spannungen zwischen dem DM- und GM-Aufbau nicht direkt miteinander verglichen werden. Durch die Modellierung des DM-Aufbaus mit Schalen und Solids ist der E-Modul der Schalen-Elemente kleiner, als beim GM-Aufbau. Um die maximalen Spannungen in den einzelnen Lagen jedoch trotzdem miteinander vergleichen zu können, ist eine Umrechnung auf Basis des Hooke'schen Gesetzes erforderlich. Dieses kann aufgrund des linearen Materialverhaltens der Lagen bei DM- und GM-Aufbau ohne Materialbruch angewendet werden.

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

**Formel 4-2 Hooke'sches Gesetz**

Quelle: Beitz, Wolfgang. und Grote Karl-Heinz: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 2001, C4

Wie in Abbildung 4-6 ersichtlich, stimmt die Impactorbeschleunigung über den Weg bei den Simulationen mit DM- und GM-Aufbau sehr gut überein. Deshalb können die

Dehnungen in den Lagen gleich gesetzt werden  $\varepsilon_{DM} = \varepsilon_{GM}$ . Durch Umformung des Hooke'schen Gesetzes ergibt sich folgende Beziehung der Spannungen zwischen den Simulationen mit DM- und GM-Aufbau.

$$\begin{array}{l} \sigma_{GM} = E_{GM} \times \varepsilon_{GM} \\ \sigma_{DM} = E_{DM} \times \varepsilon_{DM} \end{array} \quad \varepsilon_{GM} = \varepsilon_{DM} \Rightarrow \frac{E_{GM}}{E_{DM}} = \frac{\sigma_{GM}}{\sigma_{DM}} = \text{Verhältnis X}$$

#### **Formel 4-3 Beziehung der Spannungen mit DM- und GM-Aufbau**

Dieses Verhältnis ermöglicht einen Vergleich der Spannungen des DM-Aufbaus mit jenen des GM-Aufbaus. Wie bereits dargestellt ergibt sich dieses Verhältnis aus der Validierung des DM-Aufbaus mit dem GM-Aufbau.

Die DM-Validierung hat gezeigt, dass die Simulationen mit der Verwendung von Solids als Koppellement auch bei großen Verformungen und einer größeren Anzahl von Lagen sehr stabil sind. Die sehr dünnen Solid-Elemente wirken sich jedoch negativ auf den kritischen Zeitschritt und somit auf die Rechenzeiten aus. Deshalb kann diese Modellierung mit den aktuellen Rechenkapazitäten nicht auf große kohlefaserverstärkte Bauteile oder Komponenten, wie z.B. in Gesamtfahrzeugsimulationen, angewendet werden. Diese detaillierte Modellierung wird bei der entwickelten Methode nur auf sehr kleine Teilbereiche eines Bauteils in einer gesonderten DM-Analyse angewendet. Dadurch können diese mit akzeptablen Rechenzeiten durchgeführt werden.

## 5. Prinzip der Methode

Die Berechnung des Materialversagens erfolgt mit zwei gekoppelten Modellen. Im GM wird der kohlefaserverstärkte Bauteil mit einem vereinfachten Modellierungsansatz für FVW gebildet. Bei Erreichen eines kritischen Belastungszustands, der auf ein mögliches Materialversagen hinweist, werden die auftretenden Lasten auf ein genaueres DM übertragen. Dieses DM ist lokal auf den Bereich mit einem möglichen Versagen begrenzt und weist einen genaueren Modellierungsansatz des Lagenaufbaus auf. Mit diesem Modell wird das Bauteilversagen lokal berechnet. Bei auftretendem Versagen im DM wird diese Schädigung an das GM übergeben und die GM-Simulation fortgesetzt, bis neuerlich kritische Belastungen im Bauteil auftreten. So können die Bauteilbelastungen durch die Verwendung eines lokal begrenzten DM möglichst genau ermittelt werden, ohne dass ein detailliertes GM verwendet wird, das mit erhöhten Rechenzeiten einhergeht.

Abbildung 5-1 zeigt das Grundschaema der Berechnungsmethode von Materialversagen von kohlefaserverstärkte Bauteilen mittels zweier gekoppelter Modelle.

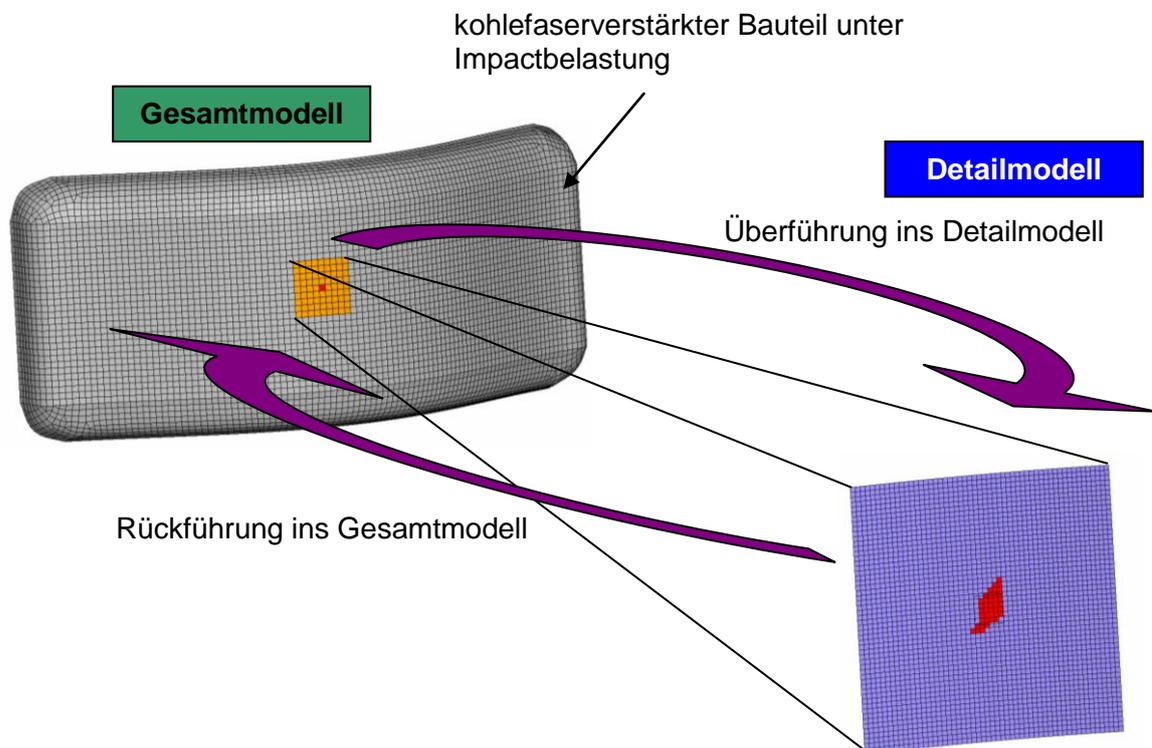


Abbildung 5-1 Grundschaema der Methode

## 5.1 Allgemeine Beschreibung des Methodenablaufs

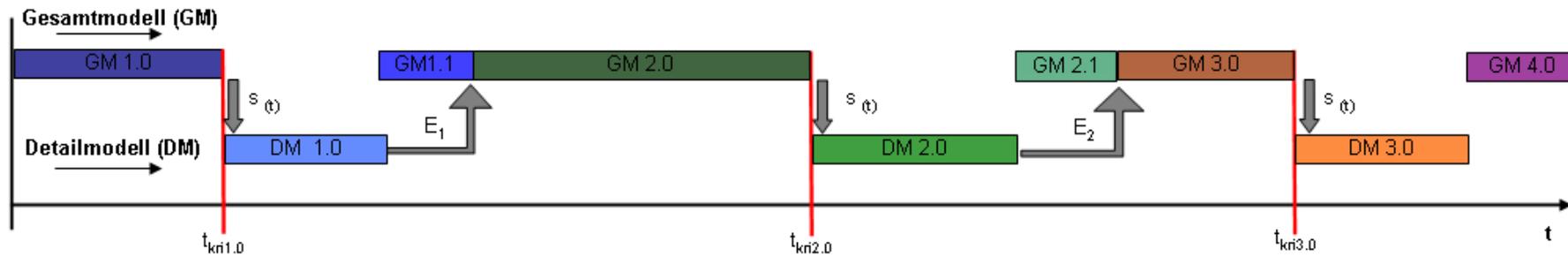
Die Methode basiert auf der Verwendung von zwei gekoppelten Modellen: einem GM und einem DM. Im GM wird der gesamte Lastfall mit dem kohlefaserverstärkten Bauteil abgebildet. Für die Modellierung des kohlefaserverstärkten Bauteils wird der vereinfachte Modellierungsansatz – die Homogenisierung 2 (mit einer Reihe Shells) für FVW – verwendet. Die dynamische Simulation wird bei  $t_0$  gestartet. Beim Start der GM-Simulation werden kritische Werte, z.B. Spannungen, definiert. Diese sollen auf ein mögliches Materialversagen in der CFK-Struktur hinweisen, sodass die Simulation bei Erreichen bei  $t_{krit.}$  gestoppt wird. Von dem ermittelten kritischen Bereich wird ein lokal begrenztes DM erstellt. In diesem wird die Bauteilgeometrie mit einem feineren Netz abgebildet und der mehrschichtige Lagenaufbau mit der Homogenisierung 3 (einzelne Lagen mittels Shells und Solids als Koppellemente) modelliert. Dadurch ist es möglich, intra- und interlaminare Fehler im kohlefaserverstärkten Bauteil getrennt voneinander abzubilden. Durch das feinere Netz können die Bauteilgeometrie und Spannungsspitzen präziser abgebildet und lokalisiert werden. Im nächsten Schritt wird die DM-Simulation gestartet, um ein mögliches Versagen mit Bruchzeitpunkt festzustellen. Dafür wird dem DM die Verformung, die bereits mit der GM-Simulation ermittelt worden ist, über die Zeit vorgegeben. Kommt es in der DM-Simulation zu einem Materialversagen, wird die Simulation gestoppt. Anschließend wird das Bauteilversagen an das GM übertragen. Dazu werden im GM die Materialeigenschaften der Elemente bei den entsprechenden Zeiten und in den Bereichen verändert. Durch diese Anpassung im GM verhält sich dieses, als wäre es im GM zum Materialversagen gekommen. Anschließend wird die GM-Simulation weitergeführt, bis wiederum ein kritischer Wert erreicht wird. In weiterer Folge wird neuerlich eine DM-Simulation des neuen kritischen Bereichs durchgeführt und das Versagen an das GM übertragen. Diese Prozedur wiederholt sich solange, bis das vorgegebene Simulationsende erreicht wird.

## 5.2 Beispielhafter Ablauf der Methode

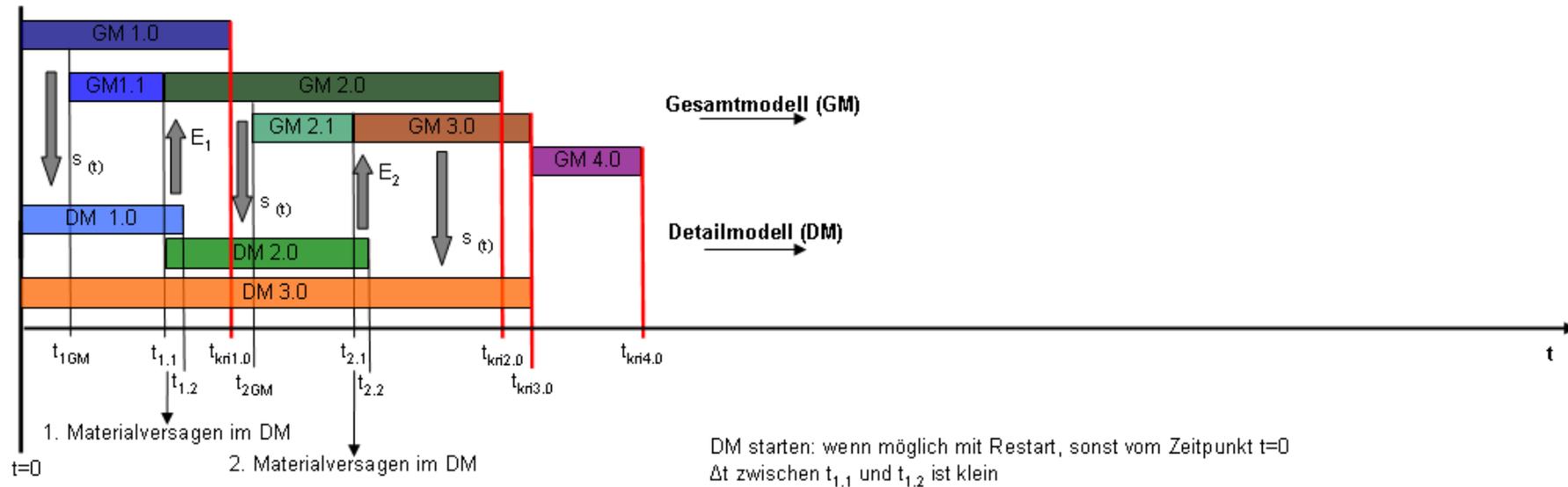
Der Ablauf der Methode wird anhand eines Beispiels erklärt. Dieser Ablauf ist in Abbildung 5-2 auf zwei unterschiedlichen Zeitachsen dargestellt. Auf der ersten Zeitachse ist die Methode als zeitlicher Ablauf; auf der zweiten über den zeitlichen Ablauf des mit der Simulation untersuchten Ereignisses dargestellt. In diesem Beispiel wird bei der GM-Simulation dreimal ein kritischer Wert ( $t_{krit.}$ ) erreicht. Dabei wird zweimal ein Versagen in der CFK-Struktur festgestellt.

Die GM-Simulation GM1.0 wird bei  $t=0$  gestartet. Bei  $t_{krit1.0}$  wird das erste Mal ein kritischer Wert erreicht und die Simulation unterbrochen. Von dem kritischen Bereich wird ein DM DM1.0 erstellt und die Verformung über die Zeit, welche zuvor in der GM-Simulation ermittelt worden ist, den Elementen vorgegeben. Zum Zeitpunkt  $t_{1.1}$  kommt es zum ersten Materialversagen im DM und die Simulation wird kurz darauf bei  $t_{1.2}$  gestoppt. Um bei dem GM genau zum Zeitpunkt, bei dem ein Versagen auftritt, die Schädigung zu implementieren und die Simulation wieder starten zu können, ist eine Zwischensimulation GM1.1 nötig. Dazu wird von der vorausgegangenen GM-Simulation beim letzten vorhandenen Ergebnis-File (in LS-DYNA d3plot genannt), bei dem noch kein Versagen aufgetreten ist, ein Restart durchgeführt und bis zum Zeitpunkt  $t_{1.1}$ , bei dem im DM ein Versagen detektiert wurde, gerechnet. Die Bedeutung und Notwendigkeit des d3plot-Files werden in Kapitel 5.3.5 erläutert. Anschließend wird die Schädigung  $E_1$  des entsprechenden Bereichs an das GM2.0 übertragen und die Simulation bei  $t_{1.1}$  weitergeführt. Bei  $t_{krit2.0}$  wird erneut ein kritischer Zustand im selben Bereich wie zuvor im GM erreicht, der auf ein Versagen hinweisen könnte. Da der kritische Bereich derselbe ist, kann die DM-Simulation DM1.0 beim Zeitpunkt  $t_{1.1}$  neu gestartet und die Verformung über die Zeit aus der GM-Simulation GM2.0 vorgegeben werden. Diese Simulation heißt DM2.0. Bei dieser kommt es bei  $t_{2.1}$  zum zweiten Materialversagen und die Simulation wird gestoppt. Für die Übergabe der Schädigung an das GM zum detektierten Bruchzeitpunkt wird erneut eine Zwischensimulation GM2.1 durchgeführt. Bei der Zeit  $t_{2.1}$  wird dem GM3.0 die Schädigung durch eine Materialanpassung  $E_2$  übergeben und die GM-Analyse weitergeführt. Bei  $t_{krit3.0}$  wird wiederum ein kritischer Belastungszustand – jedoch in einem anderen Bereich des Bauteils – festgestellt und die Simulation gestoppt. Von diesem Bereich wird ein neues DM3.0 erstellt. Diese DM-Simulation wird bei  $t=0$  im unverformten Zustand gestartet. Die Verformung über die Zeit wird erneut vorgegeben. Bei dieser DM-Simulation wird kein Materialversagen bis  $t_{krit3.0}$  festgestellt. Deshalb kann die GM-Simulation GM4.0 bei  $t_{krit3.0}$  ohne Veränderungen gestartet werden.

**Zeitlicher Ablauf der Methode:**



**Zeitlicher Ablauf des mit der Simulation untersuchten Ereignisses:**



**Abbildung 5-2 Methodenablauf auf zwei unterschiedlichen Zeitachsen**

### 5.3 Teilprozesse im Methodenablauf

Für den Ablauf der Methode mit LS-DYNA ist eine Reihe von zahlreichen Teilprozessen notwendig. Einige davon sind nicht direkt in LS-DYNA verfügbar. Zur Realisierung dieser Teilprozesse müssen Möglichkeiten gefunden bzw. entwickelt werden.

Teilprozess 1: Flexibler Simulationsabbruch aufgrund kritischer Belastungen

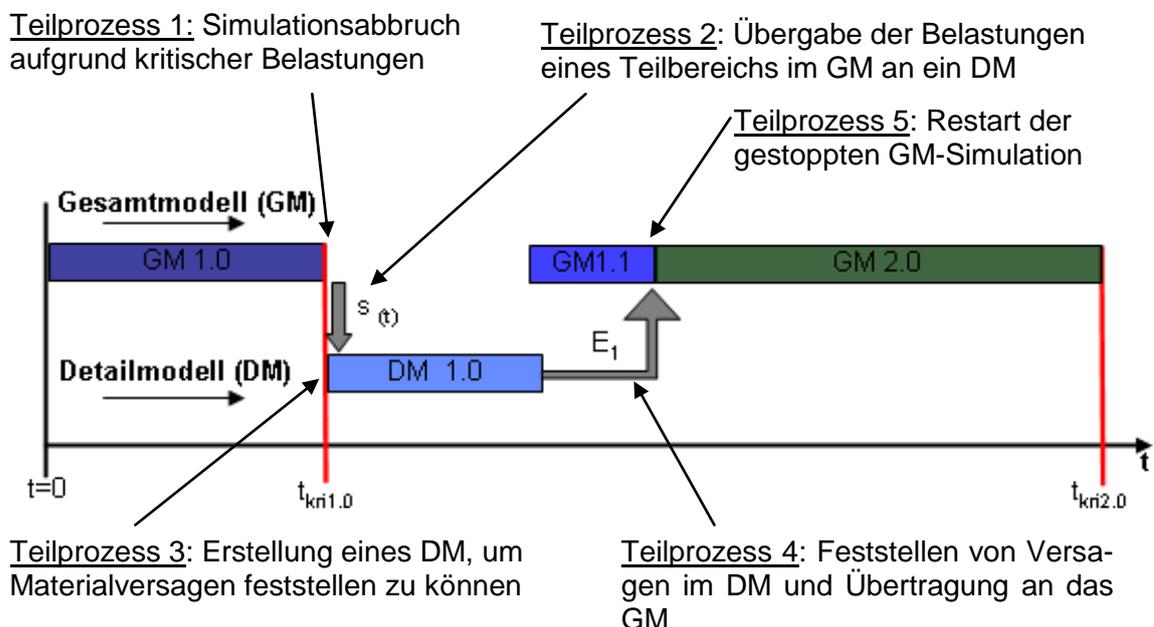
Teilprozess 2: Übergabe der Belastungen eines Teilbereichs im GM an ein DM

Teilprozess 3: Erstellung des DM

Teilprozess 4: Übertragung der Schädigung an das GM

Teilprozess 5: Restart einer gestoppten Simulation

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Methode sollen sämtliche Teilprozesse so gestaltet werden, dass eine spätere vollständige Automatisierung des gesamten Ablaufs möglich ist.

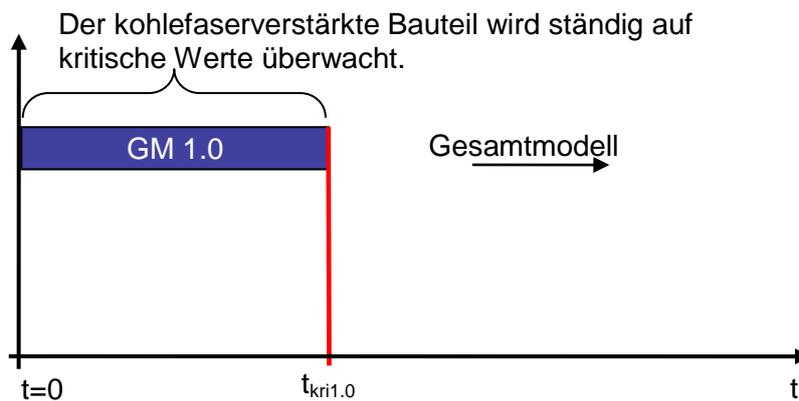


**Abbildung 5-3 Notwendige Teilprozesse zur Realisierung des Methodenablaufs**

Vorrangig werden die Möglichkeiten zur Realisierung der Teilprozesse beschrieben, die bei der entwickelten Methode angewendet werden. Weitere untersuchte Möglichkeiten, welche sich als nicht anwendbar herausstellten, werden nur kurz erläutert.

### 5.3.1 Teilprozess 1: Flexibler Simulationsabbruch aufgrund kritischer Belastungen

Wie bereits bei der Beschreibung der Methode erklärt, wird der kohlefaserverstärkte Bauteil während der Simulation mit dem GM ständig auf einen vorgegebenen kritischen Wert, z.B. Spannung, überwacht. Dieser kritische Wert weist auf ein mögliches Materialversagen in der CFK-Struktur hin, sodass die Simulation bei Erreichen bei  $t_{krit.}$  gestoppt wird.



**Abbildung 5-4 Teilprozess 1: Überwachen der GM-Simulation auf kritische Werte**

Der GM-Lagenaufbau erfolgt mit der Homogenisierung 2. Das bedeutet, die einzelnen Lagen werden entsprechend ihrer Eigenschaften in den Integrationspunkten über den Schalenquerschnitt der Elemente abgebildet. Für den GM-Aufbau wird das Materialmodell 54 verwendet.

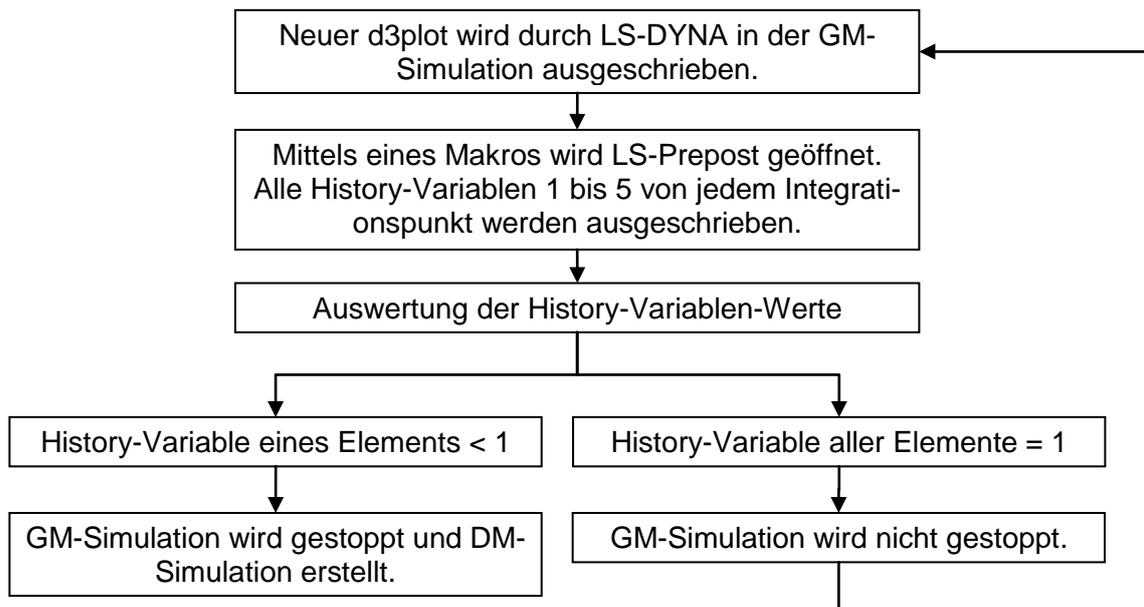
Mit Materialmodell 54 ist es möglich, sogenannte History-Variablen auszuschreiben. Diese enthalten Informationen über den Status der einzelnen Fehlerkriterien in den Integrationspunkten eines Elements. Tabelle 5-1 zeigt, welche Informationen in den History-Variablen für jeden Integrationspunkt ausgeschrieben werden können.

History-Variable	Beschreibung	Wert
1. $e_f(i)$	Faserzug	= 1 => kein Versagen (elastisch) ≤ 1 => Versagen
2. $e_c(i)$	Faserdruck	
3. $e_m(i)$	Matrixzug	
4. $e_d(i)$	Matrixdruck	
5. $e_{fail}$	Effektive Dehnung	
6. $d_{am}$	allgemeiner Versagensparameter	= -1 => Element ist intakt = $10^{-8}$ => Element in Crashfront = 1 => Element hat versagt

**Tabelle 5-1 Inhalt der History-Variablen**

Quelle: Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS'S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007, S. 202

Die Speicherung der History-Variablen erfolgt im d3plot-File. Das d3plot-File ist ein binäres Outputfile, das LS-DYNA bei der Simulation erstellt. Es enthält Informationen über Knoten und Elemente, um die Berechnung im Pre-Prozessor grafisch darzustellen. Um während der laufenden GM-Simulation die History-Variable auswerten zu können, wird mittels eines Makros jedes neu erstellte d3plot-File in LS-Prepost (Pre-Prozessor) eingeladen und die History-Variablen 1 bis 5 von jeder Lage als ASCII-Daten ausgeschrieben. Anschließend werden die History-Variablen überprüft. Ist ein Wert  $\leq 1$ , weist dies auf ein mögliches Versagen hin und die GM-Simulation wird gestoppt. Dieser Ablauf ist in der Abbildung 5-5 dargestellt.



**Abbildung 5-5 Prozessablauf zur Feststellung kritischer Werte während der GM-Simulation**

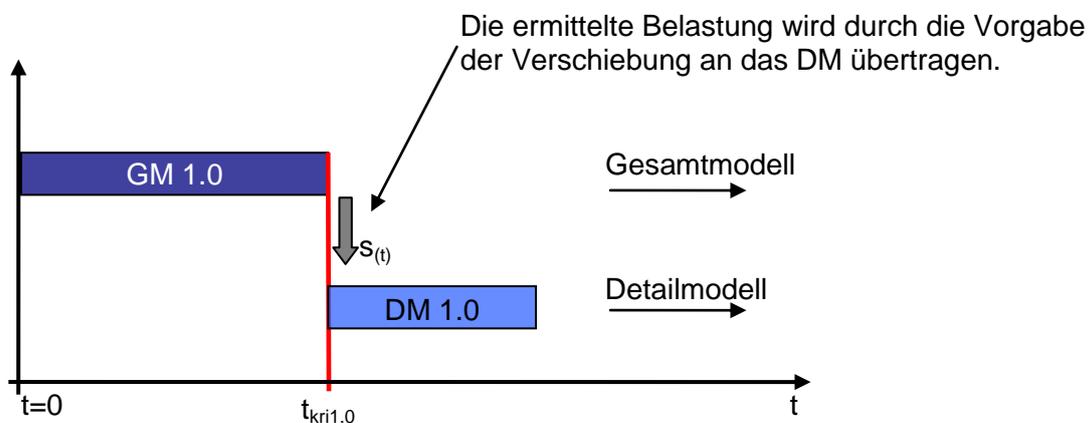
Eine weitere Möglichkeit zur Feststellung einer kritischen Belastung im GM basiert auf der Auswertung des während der Berechnung erstellten log-Files. In diesem werden simulationsrelevante Informationen während der laufenden Simulation ausgeschrieben. Es wird dokumentiert, wenn ein Element während der Rechnung versagt bzw. gelöscht wird. Diese Information kann auch als Abbruchkriterium der GM-Simulation verwendet werden. Der Nachteil dieser Methode ist, dass es zu einem gesamten Versagen des Lagenaufbaus in einem Element kommen muss, damit ein Element gelöscht wird. Dadurch können Grenzfälle, bei denen nicht alle Integrationspunkte eines Elements versagen, nicht berücksichtigt werden.

Ein weiterer Aspekt für die History-Variablen-Auswertung ist die Rechenzeiteinsparung, da es beim ersten Versagen in einem Integrationspunkt zum sofortigen Stopp kommt. Aus diesem Grund wird die History-Variablen-Auswertung zur Steuerung des Abbruchkriteriums der GM-Simulation verwendet.

### 5.3.2 Teilprozess 2: Übergabe der Belastungen eines Teilbereichs im GM an ein DM

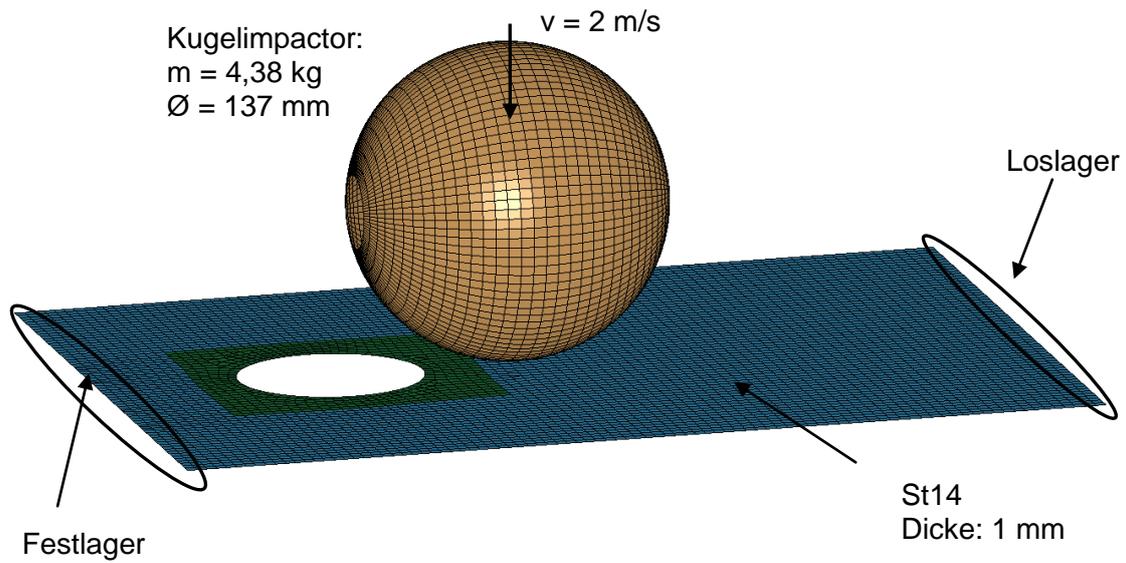
Die Methode zur Berechnung von Materialversagen mittels zweier gekoppelter Modelle basiert auf dem Prinzip, dass im GM die Belastung des kohlefaserverstärkten Bauteils ermittelt und wenn nötig, diese zur Berechnung von Versagen an ein genaueres DM übergeben wird.

Grundsätzlich ist die Übergabe von Belastungen zweier Modelle durch die Vorgabe von Kräften oder Verformungen möglich. Bei der entwickelten Methode wird die Belastung durch die Vorgabe der Verformung über die Zeit am DM angebracht. Dazu werden die Verschiebungen der Knoten im GM vom kohlefaserverstärkten Bauteil ausgeschrieben und dem DM vorgegeben. Das Zeitintervall zur Ausgabe der Verschiebungen der Knoten im GM kann frei gewählt werden, sollte jedoch so groß sein, dass die Bauteilverformung mit dem DM gut abgebildet werden kann. Zur Verschiebungsvorgabe der Knoten über die Zeit im DM wird die LS-DYNA-Karte \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_NODE verwendet.



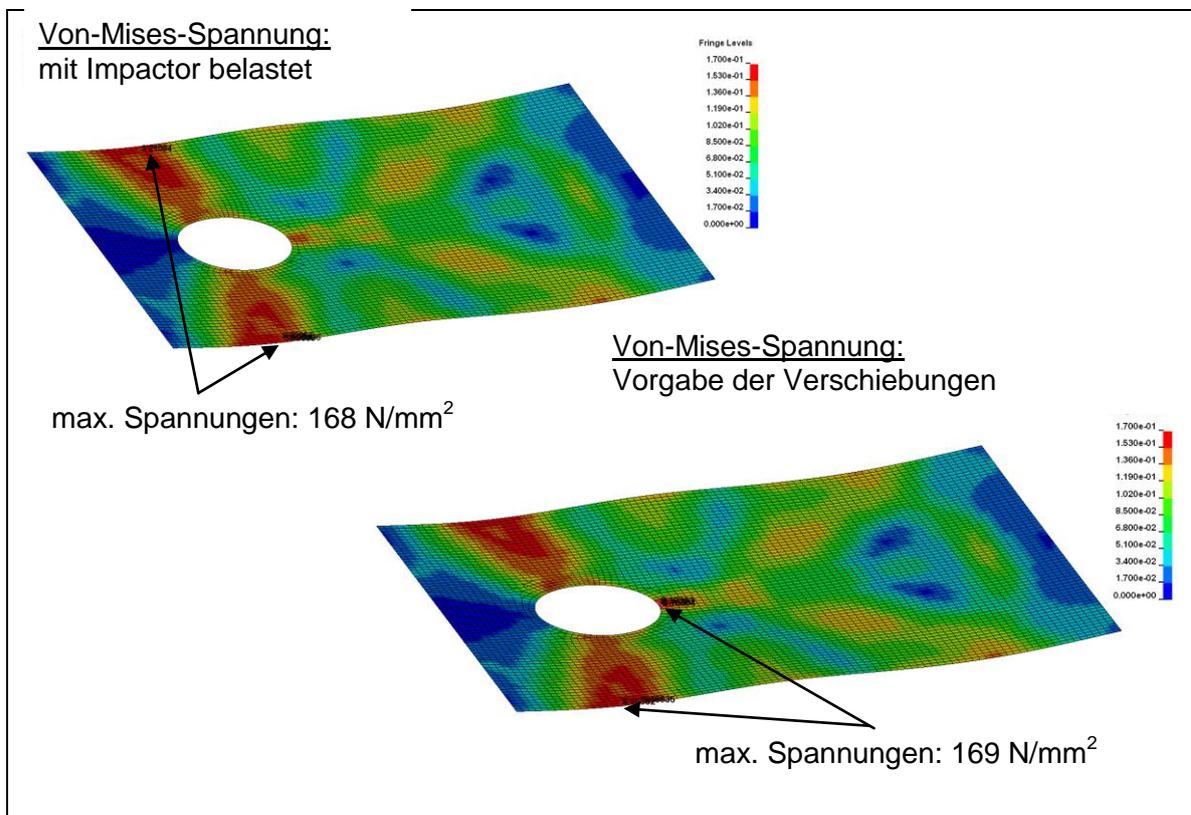
**Abbildung 5-6 Teilprozess 2: Übergabe der ermittelten Belastung an das DM**

Der Vorgang des Ausschreibens und der Vorgabe der Knotenverschiebung an ein anderes Modell wird mit Lastfall B getestet. Eine rechteckige Stahlplatte mit einem Loch aus St14 und 1 mm Wandstärke ist durch Los- und Festlager gelagert und wird mit einem Kugelimpactor belastet. Zuerst wird der gesamte Lastfall simuliert und die Verschiebungen der Knoten über die Zeit gespeichert. Die Ausschreiberate für die Knotenverschiebungen beträgt 0,25 ms. Anschließend wird eine zweite Simulation erstellt, in der nur die gesamte Platte mit dem gleichen Netz abgebildet ist. Die Platte wird durch die Vorgabe der Verschiebungen der einzelnen Knoten – die in der ersten Simulation ermittelt worden sind – verformt.

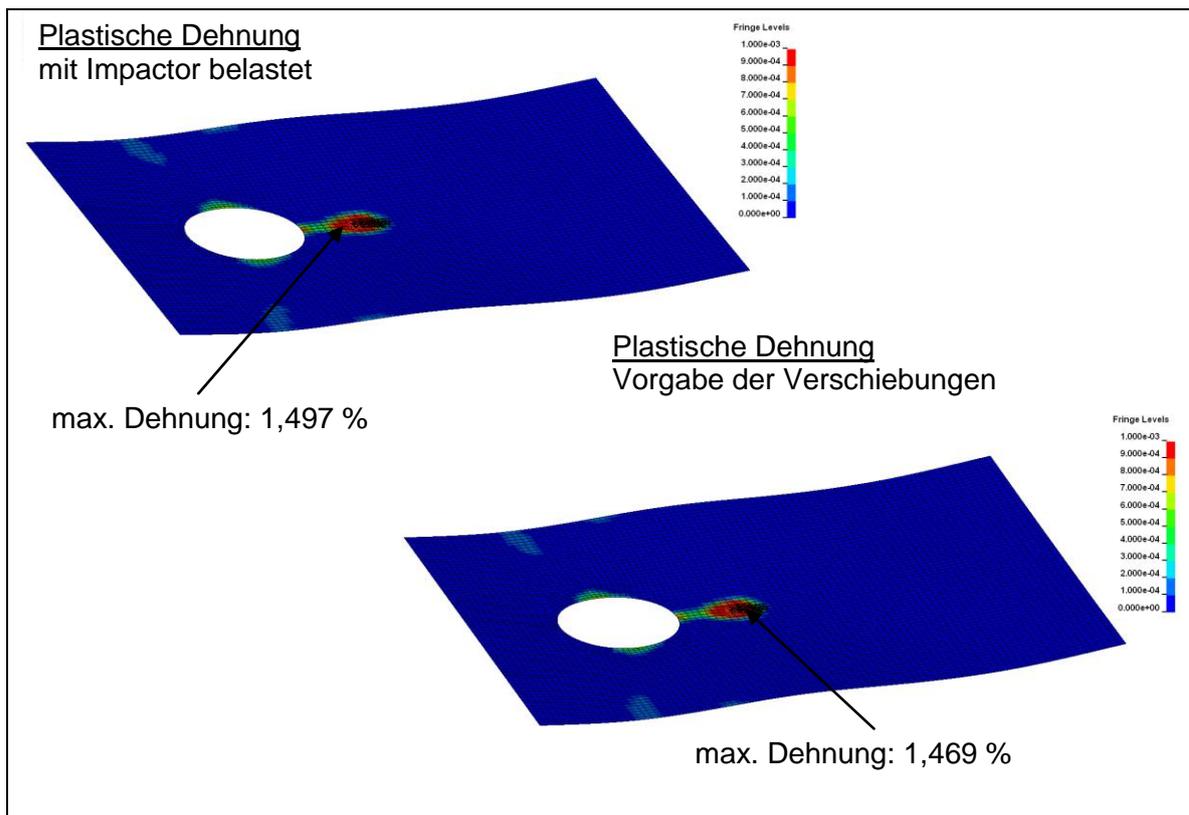


**Abbildung 5-7 Lastfall B, Testen der Lastübergabe durch Vorgabe der Verschiebung**

Um die Ergebnisse beider Simulationen zu vergleichen, werden die Von-Mises-Spannung und die plastische Dehnung bei 6 ms ausgewertet.



**Abbildung 5-8 Spannungsvergleich: Belastung durch den Impactor und Vorgabe der Knotenverschiebungen**



**Abbildung 5-9 Vergleich der plastischen Dehnung: Belastung durch den Impactor und Vorgabe der Knotenverschiebungen**

Da die Spannungen und Dehnungen sowohl in ihrem Verlauf als auch in ihrer Größe sehr gut übereinstimmen, erfolgt die Übergabe der Belastung vom GM and das DM durch die Vorgabe von Bauteilverformungen.

Weiters wurde die Möglichkeit zur Übergabe der Belastungen mittels Kräften untersucht. Zur Ausschreibung von auftretenden Kräften in einer Simulation stehen folgende Möglichkeiten in LS-DYNA zur Verfügung:

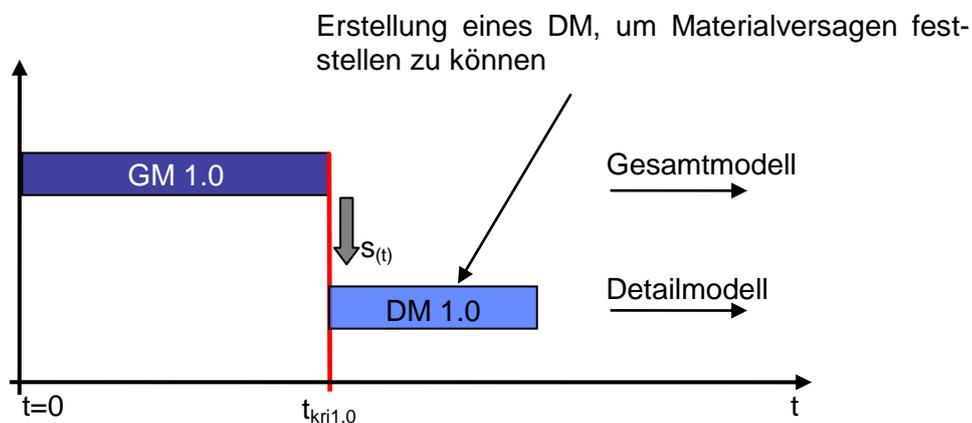
- \*DATABASE\_CROSS\_SECTION und \*DATABASE\_SECFORC dienen zum Ausschreiben von Kräften an vordefinierten Querschnitten. Die Querschnitte zur Kraftausgabe müssen bei Simulationsstart definiert werden, deswegen ist diese Möglichkeit für die Methode nur begrenzt nutzbar.
- \*DATABASE\_NODAL\_FORCE\_GROUP und \*DATABASE\_NODFOR unterstützen die Ausgabe von äußeren Kräften an Knoten. Die Reaktionskräfte sind innerhalb des Bauteils 0, somit kann diese Möglichkeit nicht für die Übertragung von Belastungen an das DM genutzt werden.

- \*DATABASE\_BNDOUT wird für die Auswertung der erforderlichen Kräfte herangezogen, die notwendig sind, um eine vordefinierte Knotenverschiebung zu erreichen. Diese Möglichkeit ist somit nicht für die Methode anwendbar.
- \*DATABASE\_RCFORC, \*CONTACT\_FORCE\_TRANSDUCER und \*DATABASE\_NCFORC dienen zur Ausgabe von Kontaktkräften. Diese Möglichkeit ist somit nicht für die Methode anwendbar.

Die Erstellung des DM soll möglichst flexibel sein, d.h. das DM soll von jedem beliebigen Bereich des GM erstellt werden können. Da ein Ausschreiben von Knotenkräften jedoch nur über vordefinierte Querschnitte im GM bei Simulationsstart möglich ist, wird die Übergabe der Belastungen an das DM mittels Kräften nicht verwendet.

### 5.3.3 Teilprozess 3: Erstellung des DM

Ziel ist die Entwicklung einer Möglichkeit, ein detailliertes DM zu erstellen, mit dem Materialversagen abgebildet werden kann.

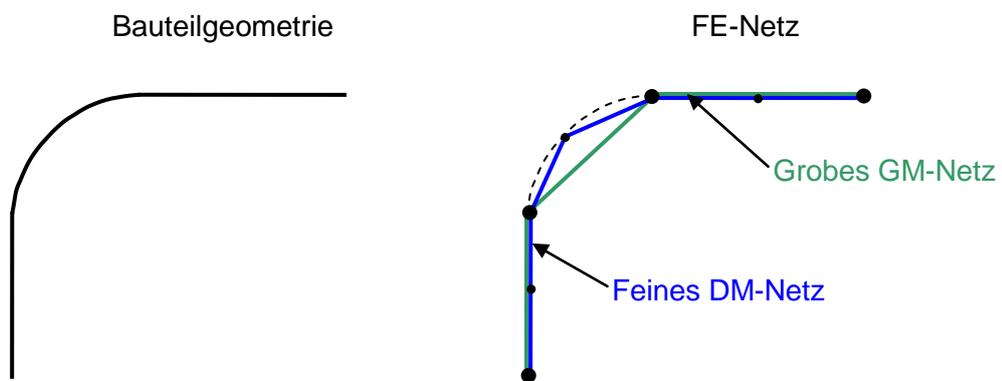


**Abbildung 5-10 Teilprozess 3: Erstellung des DM**

Die Modellierung des Lagenaufbaus im DM erfolgt mit der Homogenisierung 3. Weiters soll durch eine Netzverfeinerung die Genauigkeit einer DM-Simulation gesteigert werden. Durch ein feineres Netz können das reale Verhalten besser abgebildet, die Spannungsunterschiede besser aufgelöst und Spannungsspitzen besser lokalisiert werden. Ziel ist es, eine Möglichkeit zu finden, bei der sich das fein vernetzte DM so verhält, als wäre das GM mit einem feinem Netz simuliert worden, obwohl dem DM nur die Randbedingungen des GM übergeben werden. Die zu diesem Thema ausgearbeiteten Möglichkeiten basieren

alle auf dem Prinzip, dass die Belastung des GM durch zeitliche Vorgabe der Verschiebung der Knoten an das DM übertragen wird.

Die Netzverfeinerung des DM erfolgt durch ein einfaches Teilen der GM-Elemente, wobei die neu erstellten Knoten auf die Bauteilgeometrie projiziert und anschließend nicht weiter modifiziert werden. Dadurch wird die Geometrie des Bauteils, speziell bei Radien, detaillierter abgebildet.



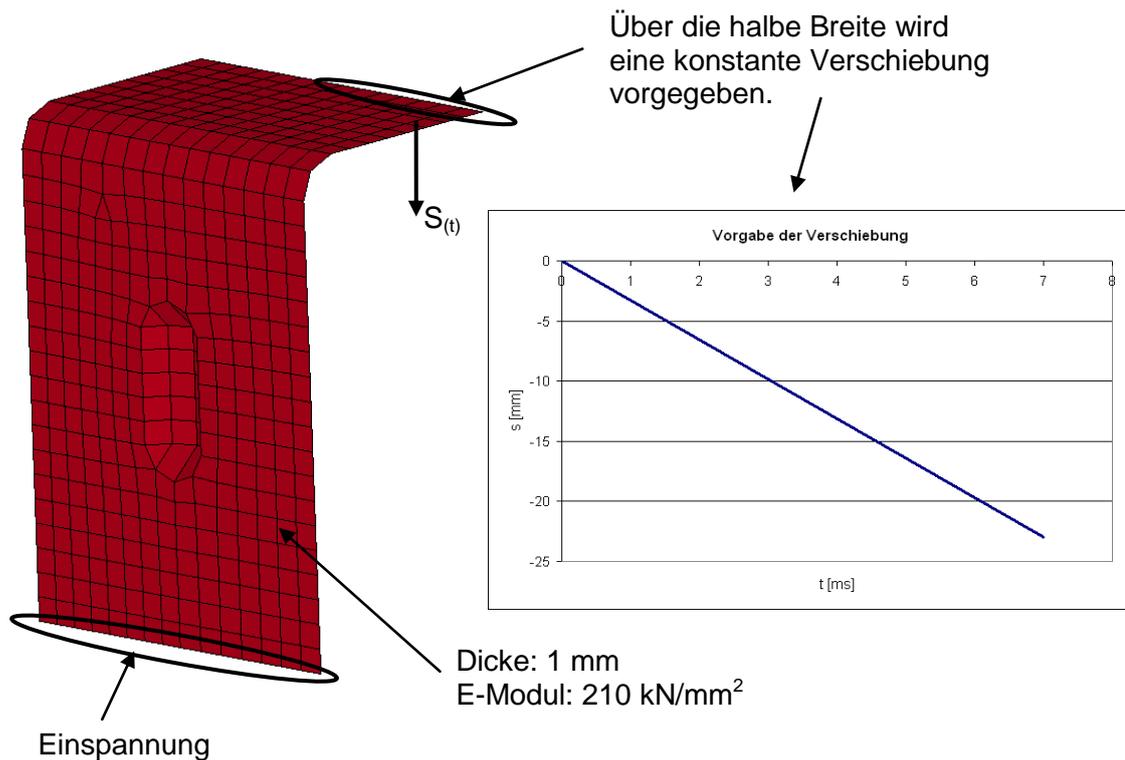
**Abbildung 5-11 Verbesserte Abbildung der Bauteilgeometrie durch ein feines DM-Netz**

Bei den Untersuchungen erfolgt die Netzverfeinerung immer durch eine Teilung der GM-Elemente in vier DM-Elemente, wobei auch eine andere Teilung möglich ist. Zum leichteren Vergleich der ausgearbeiteten Möglichkeiten zur Verbesserung des Verformungsverhalten des DM-Netzes ist das DM – wie das GM – nur mit einer Reihe Schalen über die Dicke vernetzt. Abbildung 5-12 zeigt die Bauteilgeometrie mit GM-Netz und dem feinen DM-Netz.

Geometrie	GM-Netz	DM-Netz

**Abbildung 5-12 Netzdarstellungen für die Untersuchung der DM-Erstellung**

Um die einzelnen untersuchten Möglichkeiten zur Verbesserung des Verformungsverhaltens des DM zu testen, wird folgender Lastfall verwendet. Ein Winkel, der mit einer Sicke versehen ist, wird an der unteren Seite eingespannt. An der oberen Seite wird bis zur halben Breite eine konstante Verschiebung vorgegeben. Der Winkel ist aus einem elastischen Material und 1 mm dick.



**Abbildung 5-13 Lastfall zum Vergleich der untersuchten Möglichkeiten zur Verbesserung des DM-Verformungsverhaltens**

Um den Einfluss der Netzgröße auf die auftretenden Spannungen zu zeigen, wird der Lastfall mit dem groben GM-Netz und dem feinen DM-Netz simuliert. Abbildung 5-14 zeigt die Auswertung der Von-Mises-Spannung bei 6 ms beider Modelle.

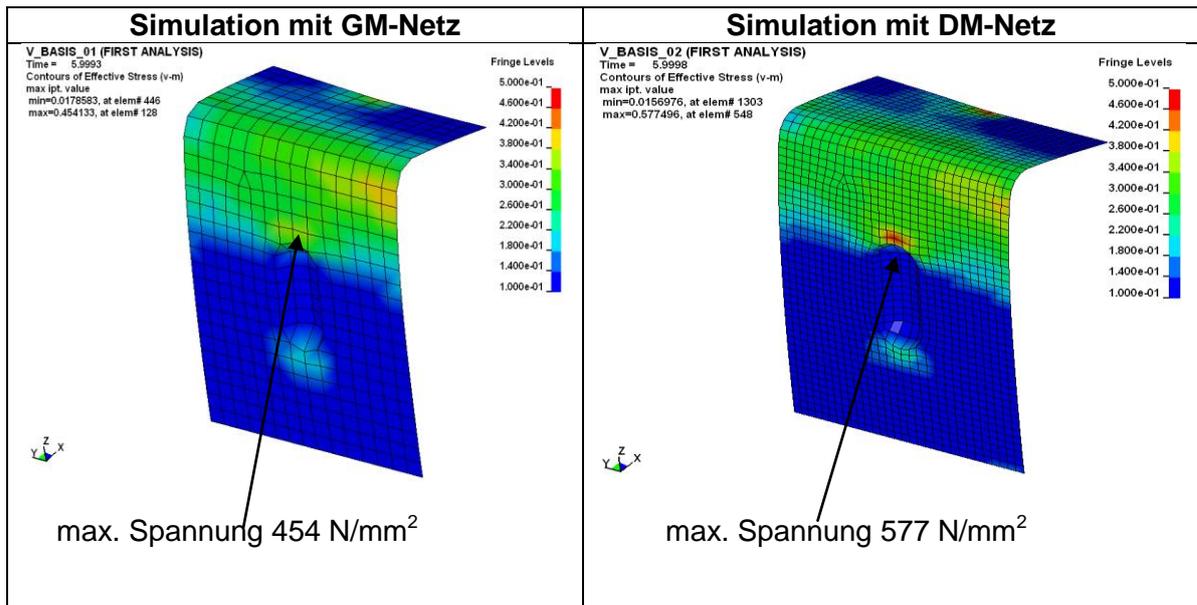


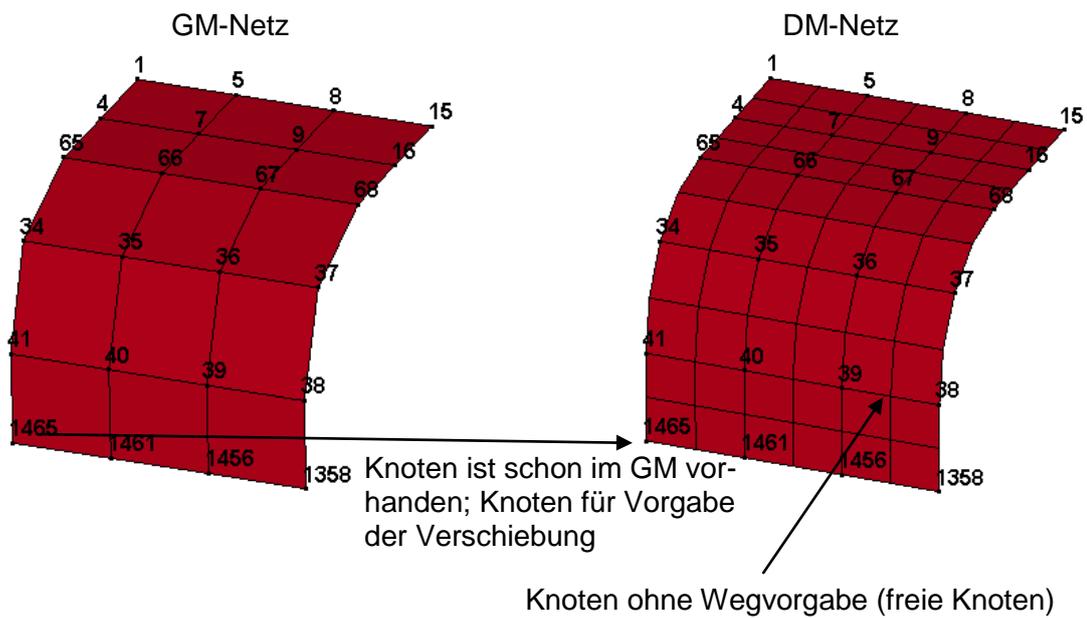
Abbildung 5-14 Auswertung der Von-Mises-Spannung bei 6 ms

Bei dieser Geometrie mit Sicke ist der Spannungsunterschied zwischen den beiden Netzgrößen beträchtlich. Mit der feinen Modellierung beim DM-Netz werden die Radien speziell bei der Sicke besser abgebildet. Dazu wird der kleine Bereich mit hohen Spannungen mit einer höheren Anzahl von Elementen dargestellt, was wiederum zu einer besseren Auflösung der Spannungen in diesem Bereich führt. Dies zeigt die Notwendigkeit des feinen Netzes bei der DM-Simulation.

Die beste und auch verwendete Möglichkeit zur Verbesserung des Verformungsverhaltens des DM bei Vorgabe der Verformungen aus dem GM wird im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

Da das feine Netz des DM durch Teilen der GM-Elemente erstellt wird und somit die Knoten des GM erhalten bleiben, können den Knoten des DM, die auch im GM vorhanden sind, die Verschiebungen bei der DM-Simulation vorgegeben werden. Dadurch können sich die Knoten in Abhängigkeit der Bauteilsteifigkeit ohne Wegvorgabe frei verschieben.

Abbildung 5-15 zeigt links einen Ausschnitt eines GM-Netzes, bei dem die Verschiebungen aller Knoten über die Zeit gespeichert werden. Rechts ist das feine DM-Netz mit den Knoten, die schon im GM-Netz vorhanden sind und welchen die Verschiebung bei der DM-Simulation vorgegeben wird, zu sehen. Dazwischen liegen im DM-Netz Knoten ohne Wegvorgabe, sie werden in diesem Zusammenhang als freie Knoten bezeichnet.



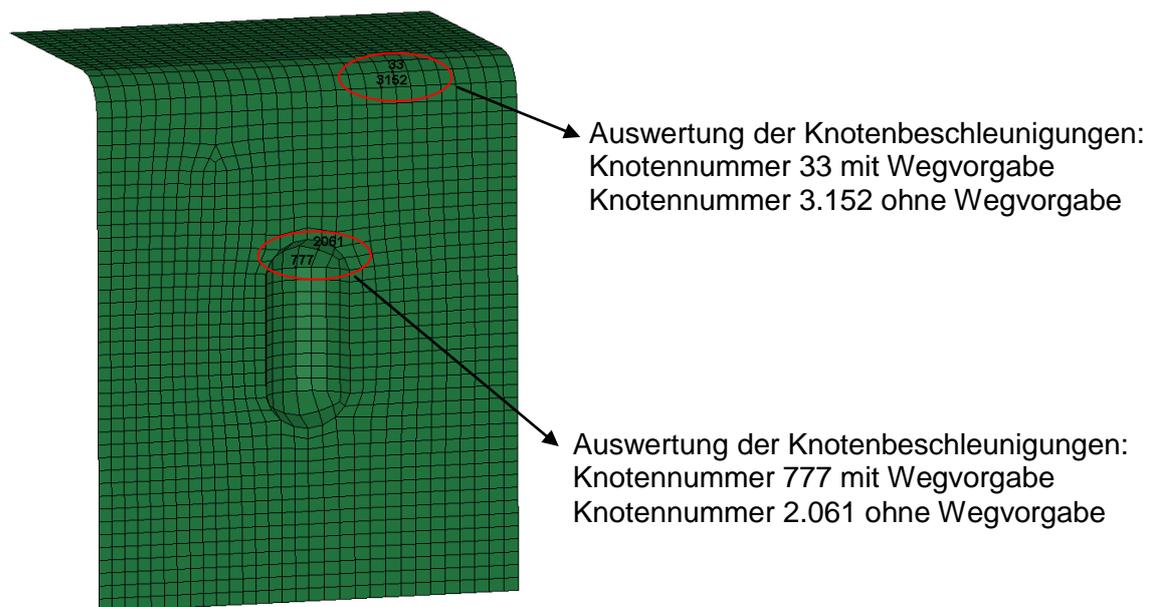
**Abbildung 5-15 Prinzip zur Verbesserung des Verformungsverhalten des DM bei Vorgabe der Verformungen**

Zum Test der Methode wird dieses Prinzip bei dem zuvor genannten Lastfall angewendet. Abbildung 5-16 zeigt die Spannungsauswertung der Simulationen mit dem GM- und DM-Netz und unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz.

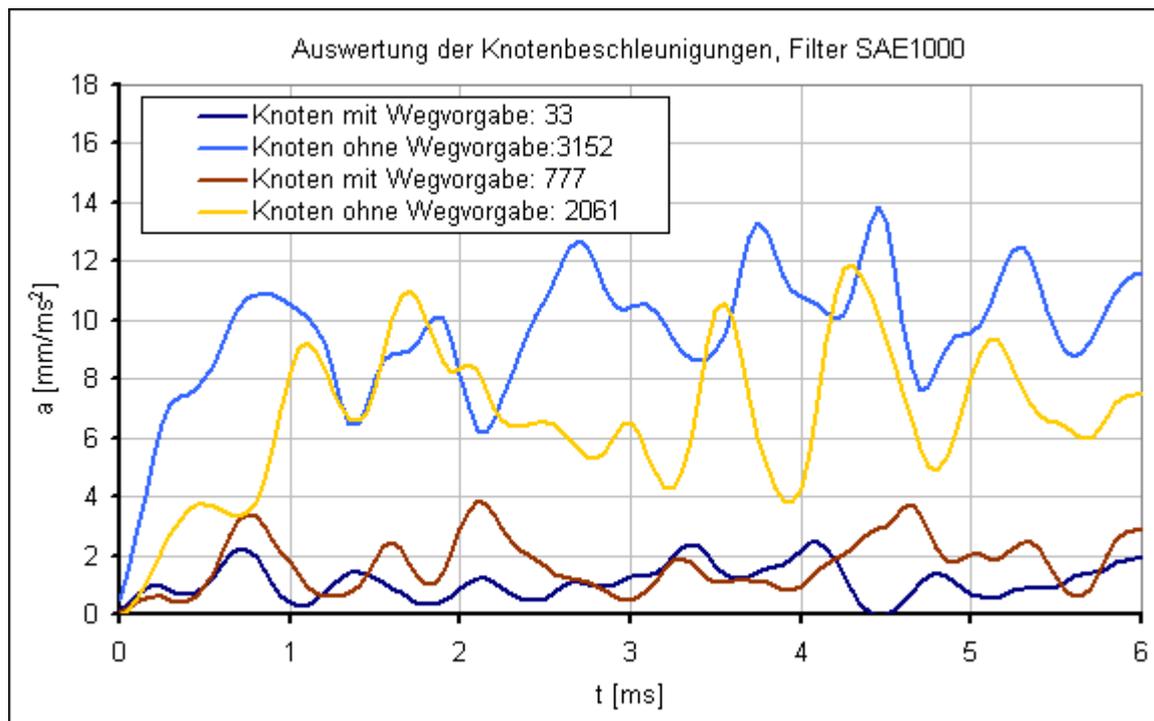
Simulation mit GM-Netz	Simulation mit DM-Netz	Simulation unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz
<p>max. Spannung: 454 N/mm<sup>2</sup></p>	<p>max. Spannung: 577 N/mm<sup>2</sup></p>	<p>max. Spannung: 659 N/mm<sup>2</sup></p>

**Abbildung 5-16 Auswertung der Spannungen**

Aus diesem Vergleich ist ersichtlich, dass das Verhalten des DM-Netzes durch die Anwendung des Prinzips gut funktioniert, jedoch die maximalen Spannungen zu groß sind. Den Grund dafür zeigt die nachstehende Auswertung der Beschleunigungen von Knoten mit und ohne Wegvorgabe. Es ist ersichtlich, dass die freien Knoten (ohne Wegvorgabe) höhere Beschleunigungen aufweisen.



**Abbildung 5-17 Übersicht der Knoten für die Beschleunigungsauswertung**



**Abbildung 5-18 Auswertung von Knotenbeschleunigungen unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz**

Durch die Einführung einer globalen Dämpfung des DM-Netzes werden die Beschleunigungen der freien Knoten reduziert. Damit die freien Knoten nicht zu sehr in ihrer Bewegung eingeschränkt werden und sich zu träge verhalten, darf der Dämpfungsfaktor nicht zu groß gewählt werden. Eine weitere Variante, die Beschleunigungen der freien Knoten zu reduzieren, ist das Herabsetzen der Materialdichte. Da diese Möglichkeit weniger effizient ist und – wie aus Formel 3-5 zur Bestimmung des Zeitschritts ersichtlich ist – dies zu längeren Rechenzeiten führt, wird diese nicht verwendet. Abbildung 5-19 zeigt den Spannungsvergleich, jedoch ist nun bei der Simulation unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz mit einer vorgegebenen globalen Dämpfung gerechnet worden.

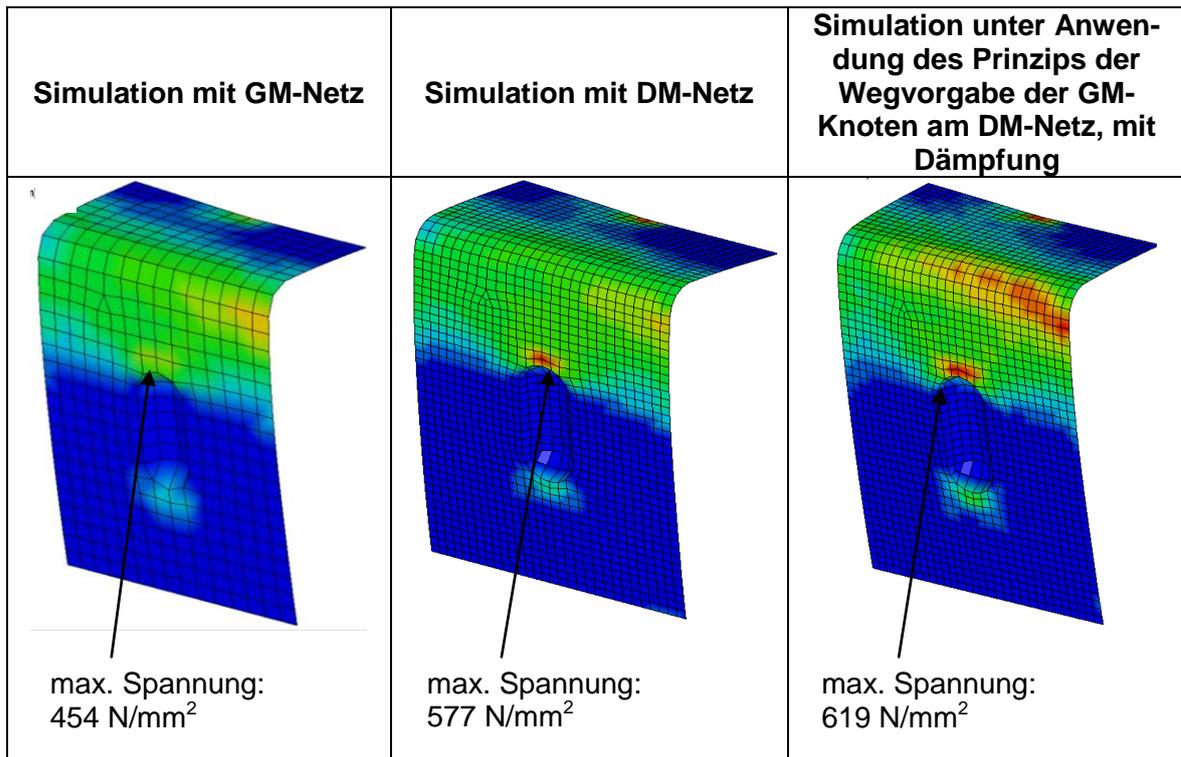


Abbildung 5-19 Auswertung der Spannungen mit Dämpfung der freien Knoten

Die Auswirkung der Dämpfung ist auch bei den Beschleunigungen der freien Knoten ersichtlich.

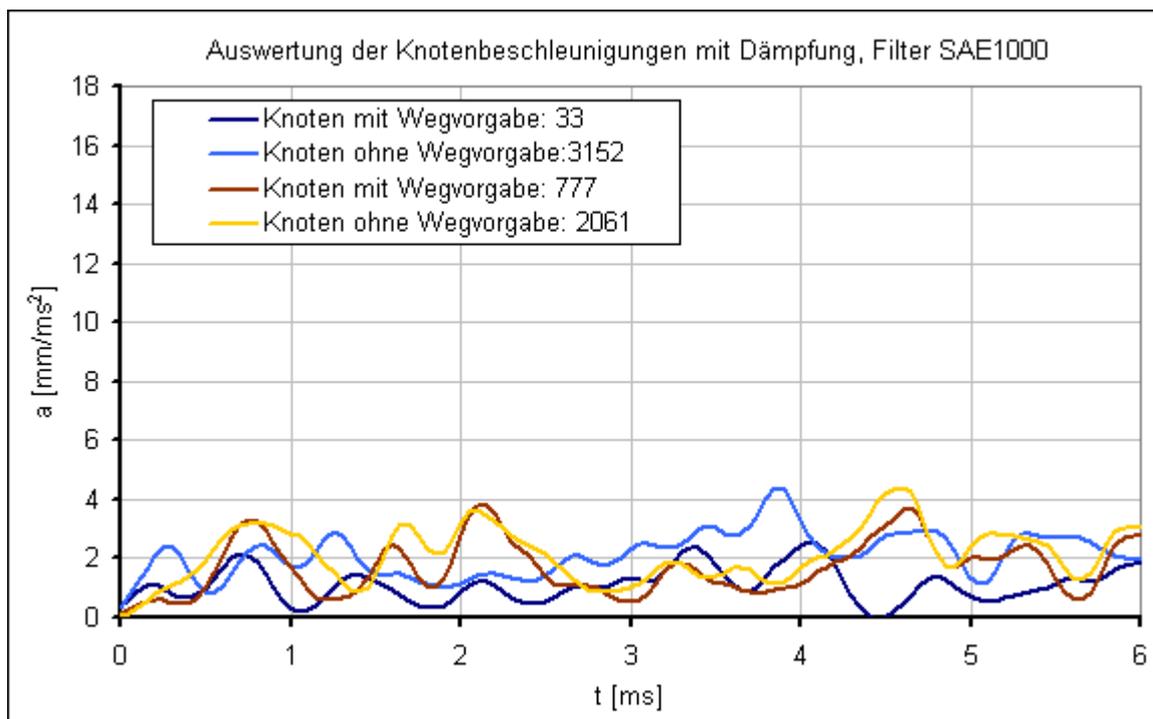
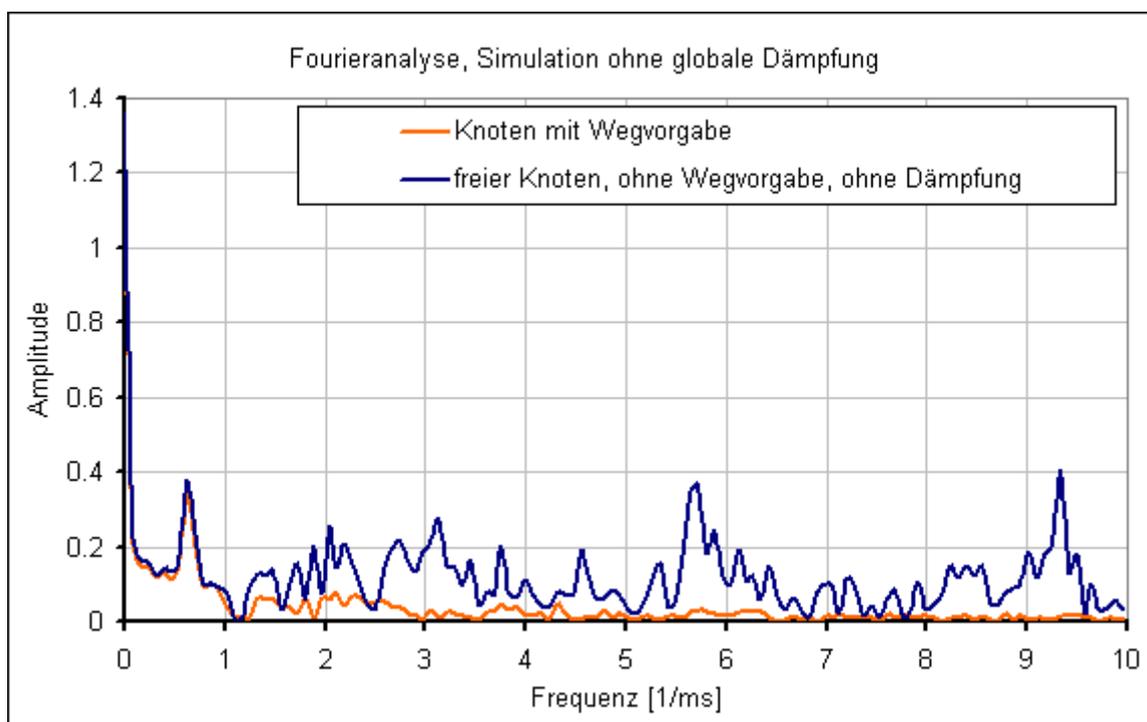
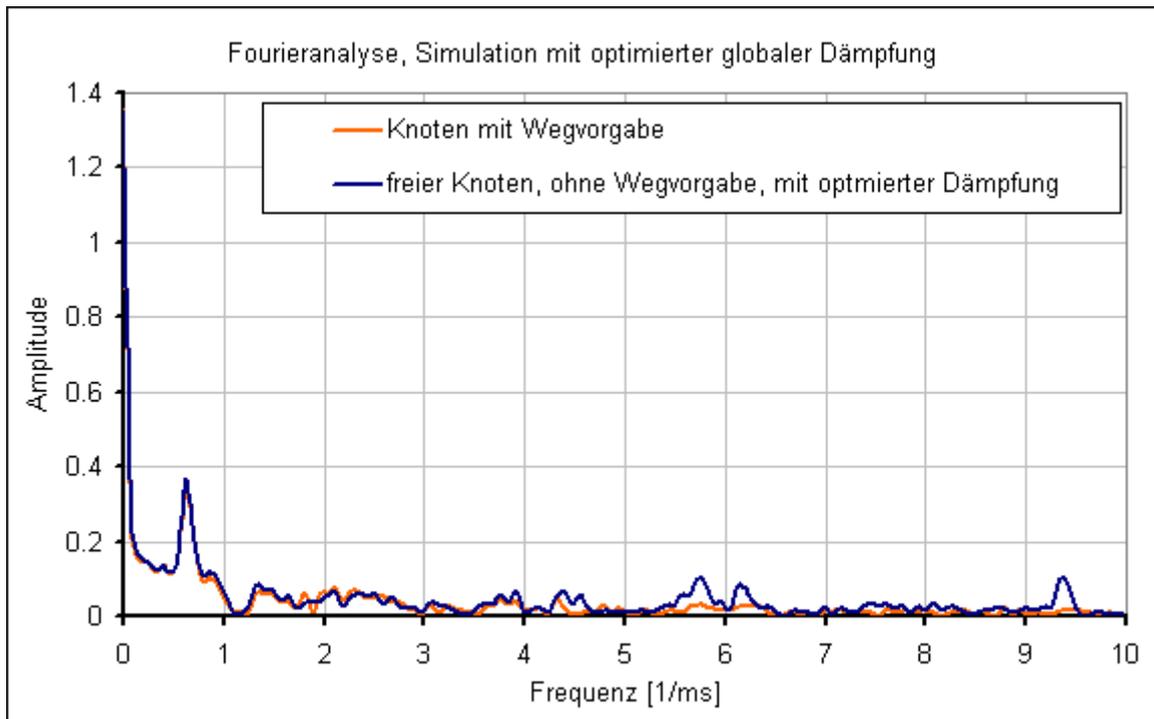


Abbildung 5-20 Auswertung von Knotenbeschleunigungen unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz mit Dämpfung

Durch die Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz mit Dämpfung gleichen sich die Spannungsverläufe, die maximalen Spannungen sind jedoch zu hoch. Da bei der entwickelten Methode zur Berechnung von Materialversagen von kohlefaserverstärkten Bauteilen mittels zweier gekoppelter Modelle für das DM die Homogenisierung 3 verwendet wird, werden die freien Knoten noch zusätzlich in ihrer Bewegung eingeschränkt und die Verformungen entsprechen besser der Realität. Dies wird in Abschnitt 5.4.2 verdeutlicht. Für die Optimierung des Dämpfungsfaktors werden von den Knoten – mit und ohne Wegvorgabe – die Knotengeschwindigkeiten ausgewertet und eine Fourieranalyse durchgeführt. Dabei wird der Dämpfungsfaktor so lange verändert, bis die freien Knoten gleichschwingen wie die Knoten mit Wegvorgabe. Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 zeigen eine Fourieranalyse zweier benachbarter Knoten mit und ohne Wegvorgabe.



**Abbildung 5-21 Fourieranalyse zweier benachbarter Knoten mit und ohne Wegvorgabe und ohne globale Dämpfung**

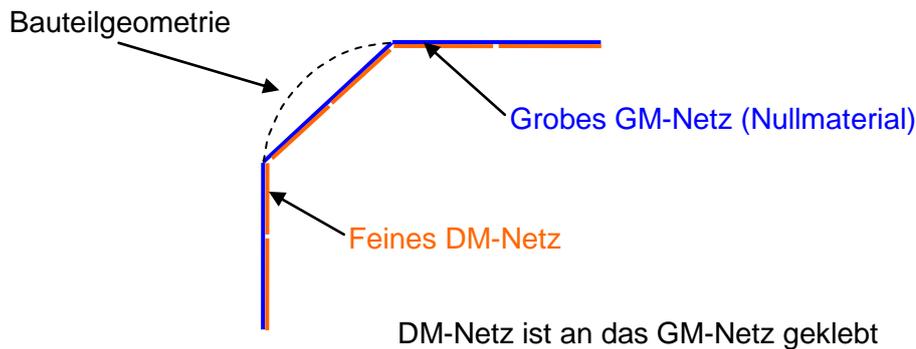


**Abbildung 5-22 Fourieranalyse zweier benachbarter Knoten mit und ohne Wegvorgabe und mit optimierter globaler Dämpfung**

In weiterer Folge wird dieses feine Netz für die DM-Simulation mit der Vorgabe der Knotenverschiebungen und mit optimierter Dämpfung als neutrale Lage bezeichnet.

Um das Verformungsverhalten des DM-Netzes zu verbessern sind noch folgende drei Möglichkeiten untersucht worden:

Variante 1: Das DM ist bei der DM-Simulation durch einen Klebekontakt an das GM angebunden. In der GM-Simulation werden die Verschiebungen der Knoten ausgeschrieben. Bei der DM-Simulation wird den Elementen des GM ein Nullmaterial zugewiesen und die Verschiebung der Knoten aus der GM-Simulation vorgegeben. Das DM ist mit einem Klebekontakt an das GM geklebt und wird dadurch verformt. Durch die Verklebung des feinen DM-Netzes and das grobe GM-Netz kommt es zu keiner Verbesserung des Verformungsverhalten des DM. Weiters wird mit dem DM-Netz die Bauteilgeometrie auch nicht genauer abgebildet.



**Abbildung 5-23 Aufbau der DM-Simulation mit Möglichkeit 1**

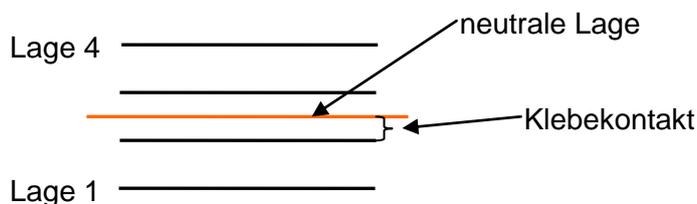
Durch die Verklebung des feinen DM-Netzes mit dem groben GM-Netz können die Spannungen nicht feiner aufgelöst werden. Aufgrund der unzureichenden Verbesserung des Verformungsverhaltens und der Spannungsabbildung des DM gegenüber dem GM wird diese Möglichkeit nicht verwendet.

Variante 2: Bei dieser Möglichkeit werden die LS-DYNA-Karten \*INTERFACE\_COMPONENT\_SEGMENT und \*INTERFACE\_LINKING\_SEGMENT genutzt. Bei der GM-Simulation werden die Elemente des GM als Referenznetz angegeben. Bei der anschließenden DM-Simulation werden die Verformungen des Referenznetzes an das DM übertragen. Tests haben jedoch gezeigt, dass diese Möglichkeit nur genutzt werden kann, wenn das DM-Netz die gleiche Netzgröße besitzt wie das Referenznetz. Aus diesem Grund ist diese Möglichkeit für die DM-Simulation nicht geeignet.

Variante 3: Das GM- und DM-Netz ist bei der GM- und DM-Simulation durch einen Klebekontakt miteinander verbunden. Durch ein jeweiliges Umstellen des Materialtyps auf ein Nullmaterial in der entsprechenden Simulation können die dazugehörigen Informationen der Verformung aus jeder Simulation gewonnen werden. Um eine genauere Auflösung der Verformungen für das feine DM-Netz zu erhalten, sind das GM- und DM-Netz in der GM-Simulation verklebt und die Verformungen des DM werden ausgeschrieben. Dabei steht das DM-Netz in Kontakt mit dem Impactor und dem DM ist ein Nullmaterial zugewiesen, wodurch sich die kleinen Elementkantenlängen nicht negativ auf den Zeitschritt auswirken. Somit wird bei der GM-Simulation die Verformung durch das DM und die Bauteilsteifigkeit durch das GM abgebildet. Bei der folgenden DM-Untersuchung werden die ermittelten Verformungen an das DM übergeben. Die Untersuchungen dieser Möglichkeit

haben gezeigt, dass die GM-Simulation im Auftreffbereich des Impactors sehr instabil ist und somit nicht als zuverlässige Möglichkeit angewendet werden kann.

Für die Vorgabe der Verformung des DM ist die Verbindung der neutralen Lage mit diesem erforderlich. Bei der entwickelten Methode wird die ermittelte Belastung im GM durch die Vorgabe der Knotenverschiebung an das DM übertragen. Das Prinzip wird anhand eines Bauteils mit einer Reihe Schalen getestet. Die entwickelte Methode wird jedoch an kohlefaserverstärkten Bauteilen aus mehreren Lagen angewendet. Deshalb muss zur Vorgabe der Verformung des DM die neutrale Lage an die nächstgelegene Lage im Schichtenverbund des DM geklebt werden. Abbildung 5-24 zeigt den prinzipiellen Aufbau des DM mit der neutralen Lage.



**Abbildung 5-24 Prinzipaufbau des DM mit der neutralen Lage**

Für den Klebekontakt stehen in LS-DYNA zahlreiche Kontaktarten zur Verfügung. Grundsätzlich gibt es zwei Klebekontaktarten:

- constraint-basierend
- penalty-basierend

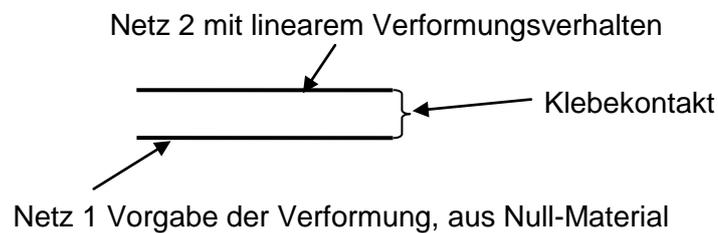
Bei dem constraint-basierenden Kontakttyp wird der zu klebende Knoten direkt auf die Klebefläche hinverschoben und damit verklebt. Bei dem penalty-basierenden Klebekontakt hingegen wird der zu klebende Knoten nicht auf die Klebefläche hinverschoben, er besitzt immer den vorgegebenen Abstand. Wird der Abstand zur verklebenden Fläche aufgrund von Verformungen zu gering, kommt es zu Durchdringungen und der Knoten wird sofort wieder durch eine Kraft auf seinen vorgegebenen Abstand verschoben. Von jeder Klebekontaktart gibt es in LS-DYNA noch zahlreiche Varianten.<sup>34</sup>

Für die Verklebung der nächstgelegenen Lage im Schichtenverbund im DM mit der neutralen Lage ist ein Klebekontakt erforderlich, der die Verformungen sehr gut übertragen

---

<sup>34</sup> Vgl. LS-DYNA Support, Verfügbar unter: <http://www.DYNAsupport.com/howtos/contact/tied-tied-offset-and-tiebreak-contacts/?searchterm=constraint%20based> [Datum des Zugriffs: 22.12.2009]

kann, ohne dass die Simulation instabil wird. Für den Test der einzelnen Kontaktarten wird der bereits beschriebene Lastfall B verwendet. Dafür wird zuerst der Lastfall simuliert und die Verschiebung der Knoten im Zeitintervall von 0,25 ms ausgeschrieben. Diese Simulation wird als Basis zum Vergleich der Kontaktarten verwendet. Für die Untersuchungen der Klebekontakte wird das Netz der Platte kopiert. Netz 1 wird ein Null-Material zugewiesen und die Verformung über die Zeit vorgegeben; Netz 2 ein Material mit linearem Verformungsverhalten. Diese beiden werden zum Testen der verschiedenen Klebekontakte miteinander verklebt.



Die beiden Netze sind in der Simulation deckungsgleich.

#### **Abbildung 5-25 Prinzipaufbau zur Untersuchung der Klebekontakte**

Um die Kontaktarten zu vergleichen, werden die Von-Mises-Spannung und die plastische Dehnung in der Platte von der Basissimulation mit dem Netz 2 verglichen. Am besten entspricht der Klebekontakt \*CONTACT\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE\_OFFSET\_TITLE den Anforderungen, welcher zur Gruppe der penalty-basierenden gehört. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Basissimulation mit den Simulationen, bei denen die beiden Netze mit diesem Kontakt verklebt sind. Die Auswertung erfolgt bei 6 ms.

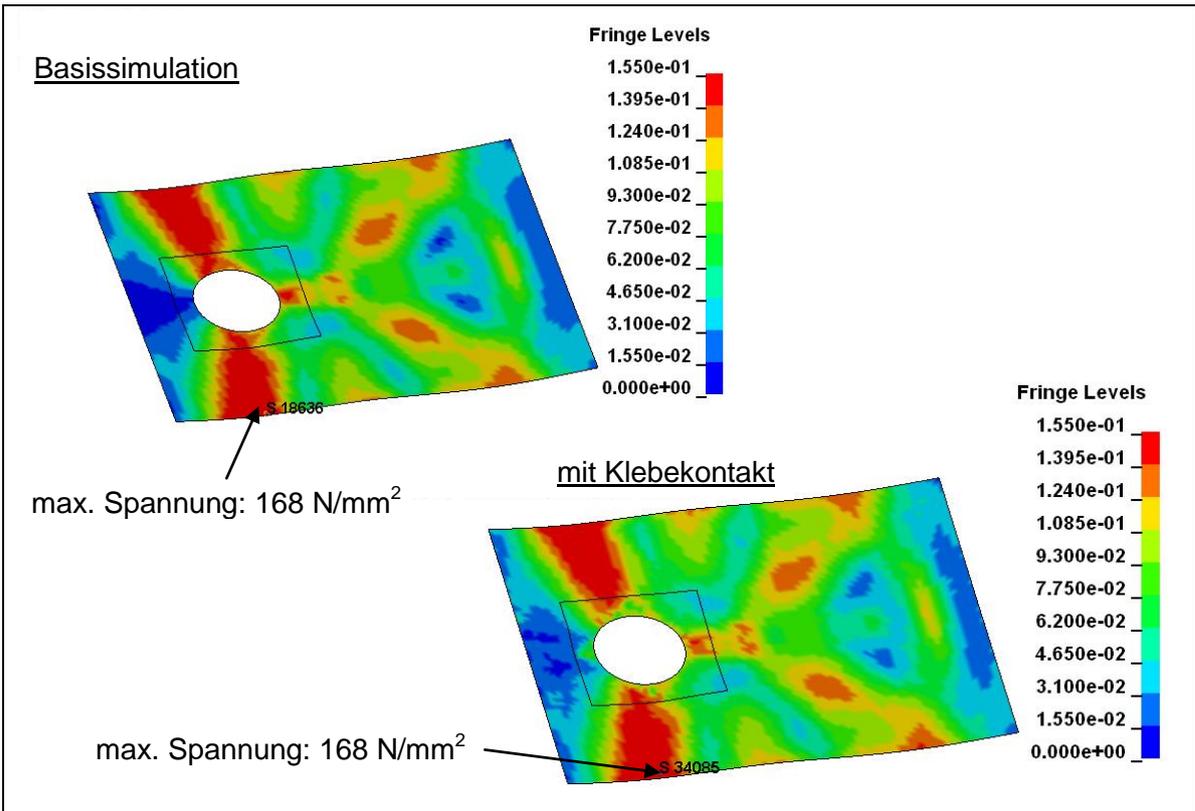


Abbildung 5-26 Auswertung der Von-Mises-Spannung der Basissimulation und der Simulation mit Klebekontakt

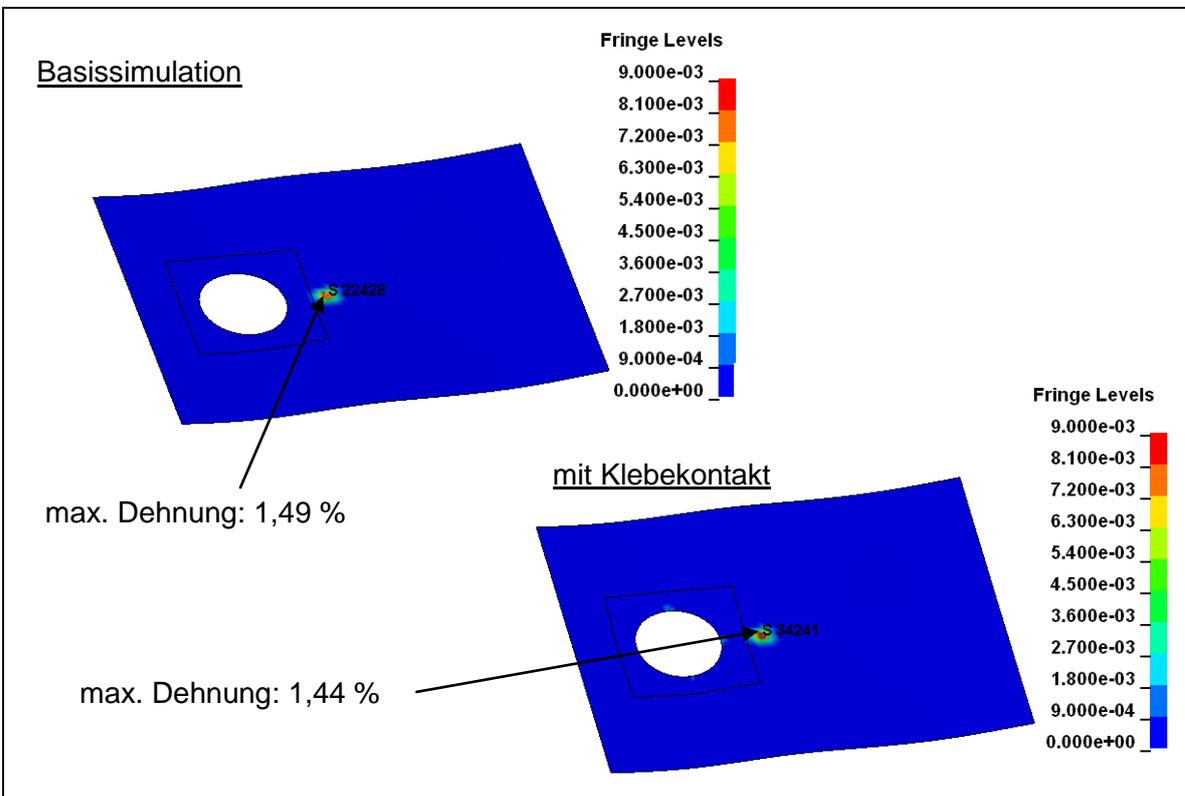


Abbildung 5-27 Auswertung der plastischen Dehnung der Basissimulation und der Simulation mit Klebekontakt

Aus diesem Vergleich ist ersichtlich, dass die maximalen Spannungen und Dehnungen sowie die Verteilung in der Platte gut mit der Basissimulation übereinstimmen. Somit können die Verformungen mit diesem Klebekontakt gut an das DM übertragen werden.

Weiters wurden noch die Klebekontakte \*CONTACT\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE, \*CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_OFFSET\_TITLE und \*CONTACT\_TIED\_SHELL\_EDGE\_TO\_SURFACE getestet. Keiner von diesen konnte jedoch die Ansprüche besser erfüllen.

#### 5.3.4 Teilprozess 4: Übertragung der Schädigung an das GM

Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Entwicklung der Methode liegt, wurden detaillierte Untersuchungen zum Thema Materialversagen nicht angestrebt. Jedoch sollen bei der entwickelten Methode auftretende Schädigungen im DM an das GM übertragen und in der darauf folgenden GM-Analyse das Materialversagen berücksichtigt werden können. Dies erfolgt durch eine Änderung der Bauteilsteifigkeit im entsprechenden Bereich.

Es werden Möglichkeiten gezeigt, um bei der DM-Analyse auftretende intra- und interlaminaire Fehler an das GM weitergeben zu können. Aufgrund eines fehlenden validierten DM, das Materialversagen abbildet, stellen diese Modelle prinzipielle Ansätze dar.

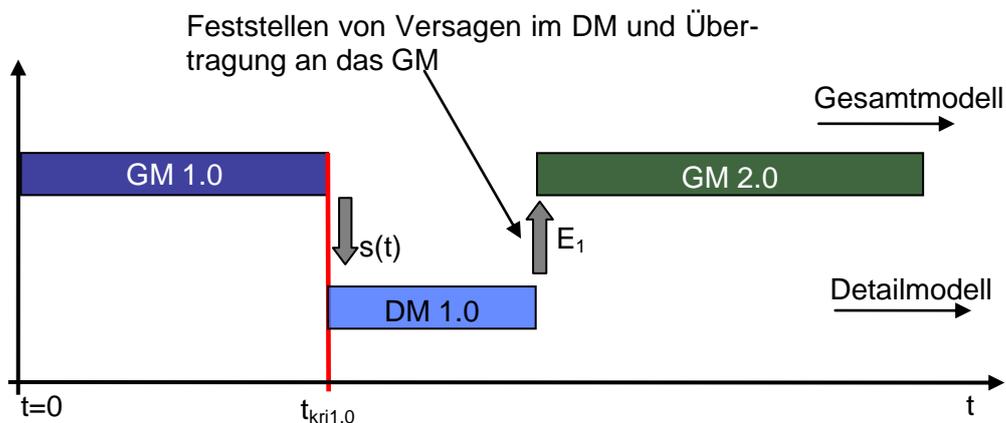


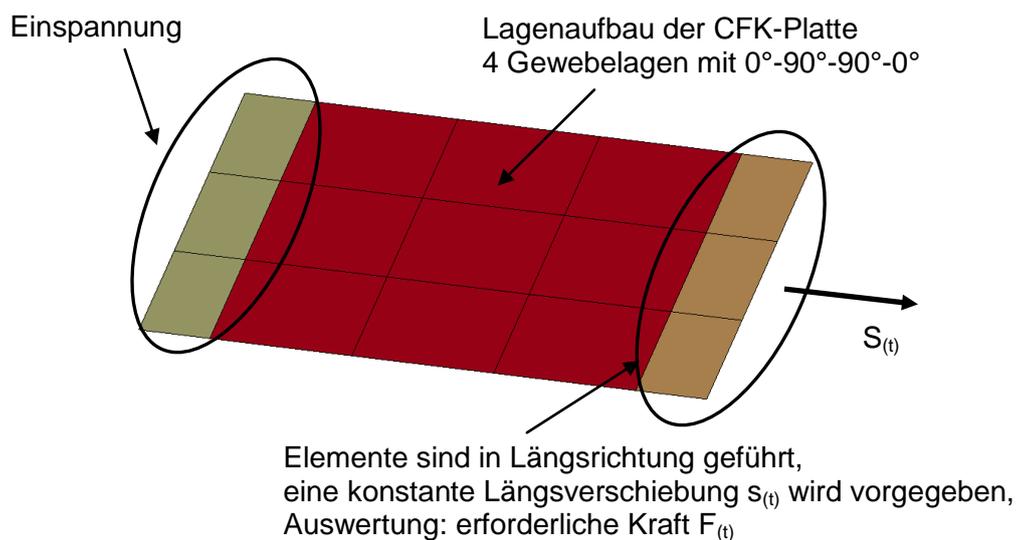
Abbildung 5-28 Teilprozess 4: Übertragung der Schädigung an das GM

Das Detektieren von Materialversagen in der DM-Simulation erfolgt durch die Auswertung des log-Files der Simulation. Dabei werden bei einem auftretenden Bruch das versagende Element und der dazugehörige Zeitpunkt ausgeschrieben. Somit ist es möglich, den Bereich und den Zeitpunkt des Versagens festzustellen und die DM-Simulation zu stoppen. Anschließend kann die Schädigung an das GM übertragen werden.

Die beiden Versagensformen Faserbruch und Delamination werden aufgrund ihrer Häufigkeit bei impactbelasteten Bauteilen für die entwickelte Methode unter Verwendung zweier gekoppelter Modelle implementiert. Dafür wird Versagen in der Schalenebene – in Form von Faserbruch anhand einfacher axialer Zugsimulationen – untersucht. Der Materialbruch zwischen den Lagen – in Form von Delamination – wird durch Biegesimulationen analysiert.

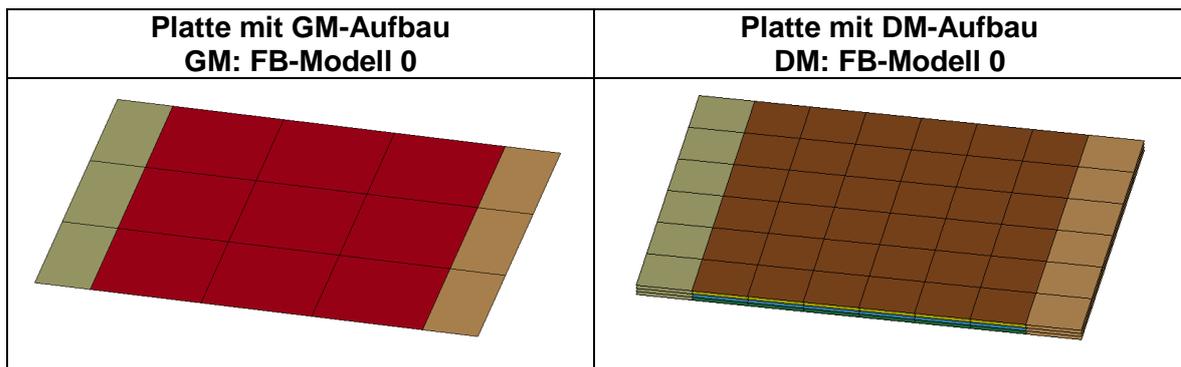
#### a) Berücksichtigung von Versagen in der Schalenebene

Zur Untersuchung von Versagen in der Schalenebene wird folgender Lastfall verwendet. Eine ebene Platte aus vier Lagen ( $0^\circ\text{-}90^\circ\text{-}90^\circ\text{-}0^\circ$ ) ist auf einer Seite eingespannt. Der anderen Seite wird eine geführte konstante Längsverschiebung vorgegeben. Dazu erfolgt die Auswertung der dafür notwendigen Verschiebungskraft.



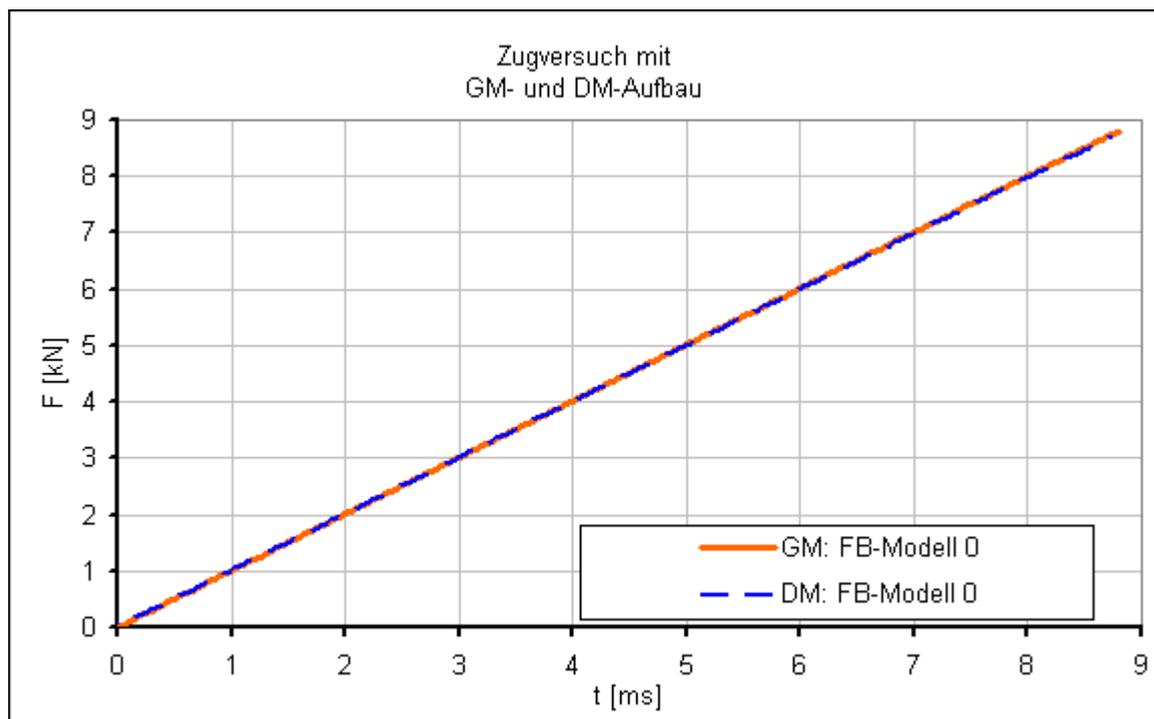
**Abbildung 5-29 Lastfall zur Untersuchung von Versagen in der Schalenebene**

Dieser Lastfall wird einmal mit dem GM- und einmal mit dem DM-Aufbau simuliert. Für die Materialien werden die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen, für den elastischen Bereich validierten Materialkarten, verwendet.



**Abbildung 5-30 Modellaufbau zur Untersuchung von Versagen in der Schalenebene**

Für den Vergleich wird der Lastfall zuerst mit dem GM- und DM-Aufbau ohne Berücksichtigung von Materialversagen simuliert und die erforderliche Kraft für die Verschiebung ausgewertet. Wie in Abbildung 5-31 ersichtlich, stimmen die beiden Kraftverläufe sehr gut überein, was eine sehr gute Validierung des GM und DM widerspiegelt.



**Abbildung 5-31 Erforderliche Kräfte für Zugversuch mit GM und DM-Aufbau**

Bei der entwickelten Methode wird die Schädigung in Form von Faserbruch durch ein Herabsetzen des E-Moduls der Lage im betroffenen Bereich des GM berücksichtigt. Kommt es zu einem Faserbruch im DM, wird das jeweilige Element in der entsprechenden Lage gelöscht. Da jedoch das Netz im DM feiner ist als im GM, ist es im GM nicht möglich, einem gleich großen begrenzten Bereich wie im DM eine Schädigung zuzuweisen.

Das bedeutet, wenn z.B. ein Schalenelement im GM durch vier Schalen-Elemente im DM abgebildet ist, kann die Schädigung eines Elements im DM nur an das gesamte Element im GM übertragen werden.

Um den Einfluss der gelöschten Elemente im DM zu untersuchen und mit dem GM validieren zu können, werden Simulationen mit DM-Aufbau durchgeführt, bei denen Versagen in den Lagen bei Simulationsstart besteht. Um dies zu realisieren, erfolgt von Beginn an eine Löschung einzelner Elemente im Lagenaufbau des DM. Dazu werden im GM die E-Module der betroffenen Elemente und Lagen angepasst.

Für diese Untersuchung werden fünf verschiedene Modelle aufgebaut. FB-Modell 0 stellt das unbeschädigte Ausgangsmodell dar. Bei FB-Modell 1 ist ein Element in der obersten Lage, bei FB-Modell 2 sind zwei Elemente nebeneinander in der obersten Lage, bei FB-Modell 3 zwei Elemente nebeneinander in den oberen beiden Lagen und bei FB-Modell 4 ist ein Element in den oberen beiden Lagen entfernt.

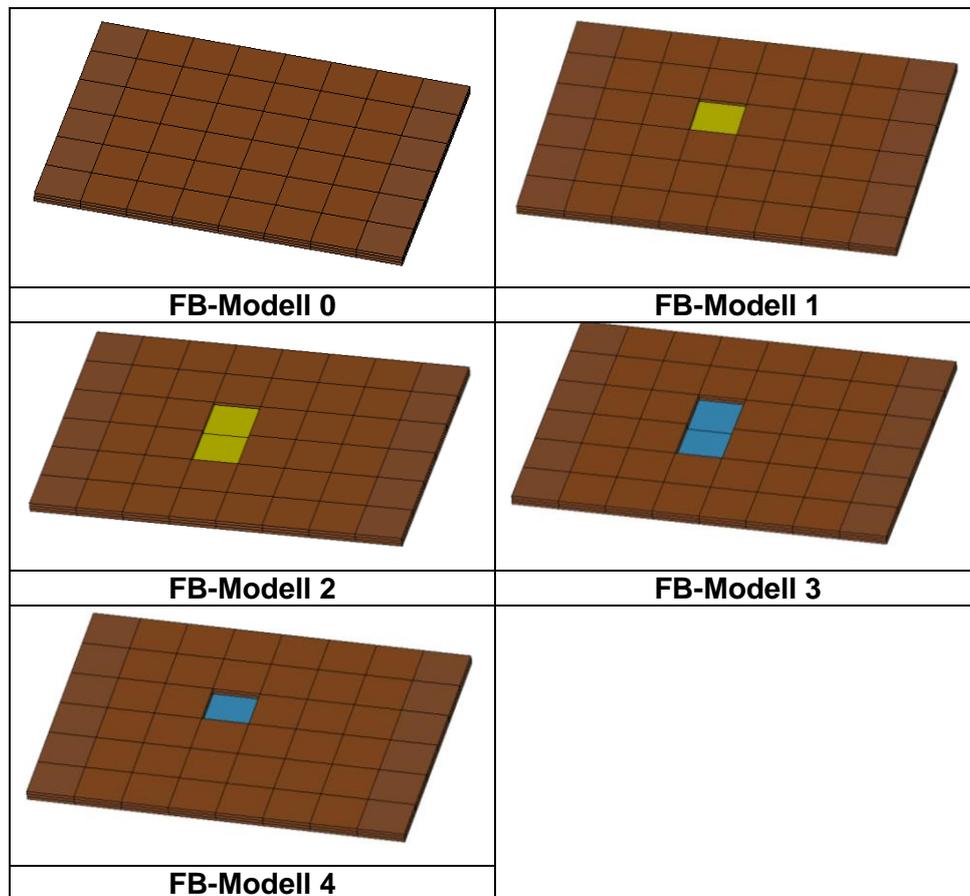
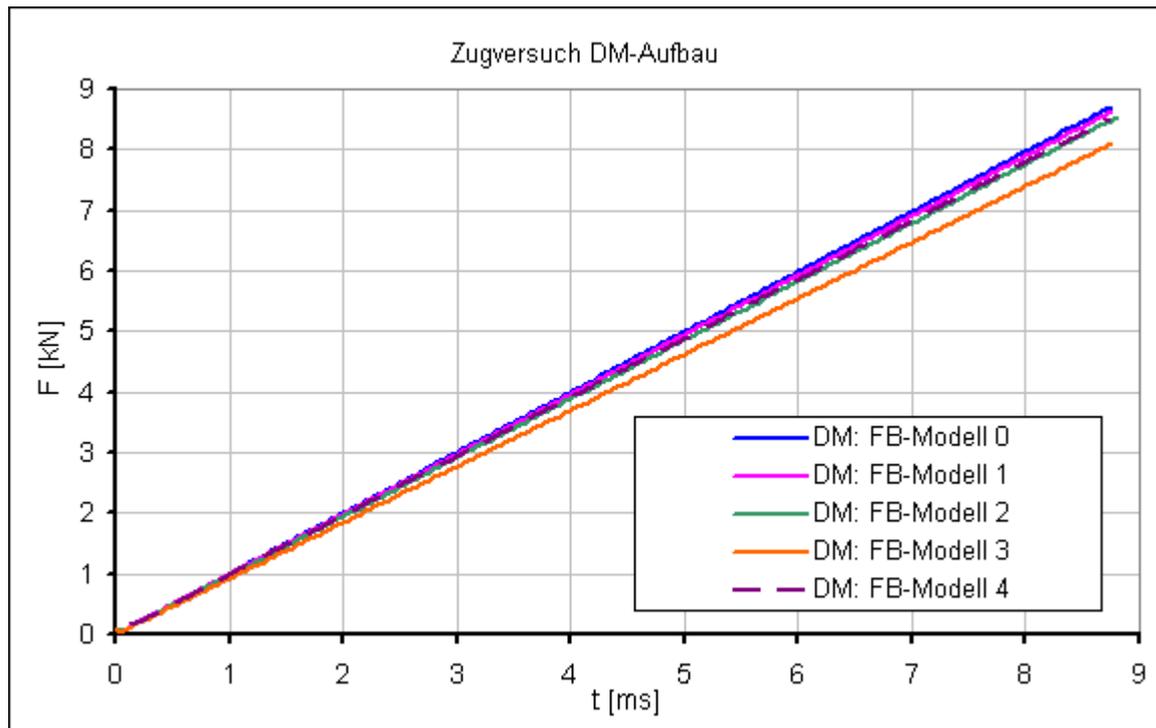


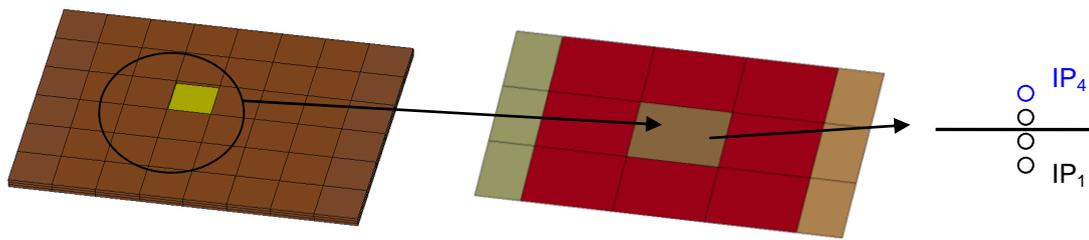
Abbildung 5-32 DM zur Faserbruchuntersuchung

In Abbildung 5-33 sind die erforderlichen Kräfte für die vorgegebene Verschiebung aller Modelle dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Kraft mit steigender Anzahl der gelöschten Elemente abnimmt. Die Lage des Elements im Lagenaufbau spielt bei reiner Zugbelastung keine Rolle. Dies zeigen die Kraftverläufe der FB-Modelle 2 und 4, bei denen zwei Elemente nebeneinander bzw. übereinander gelöscht worden sind.



**Abbildung 5-33 Kraftauswertung der Faserbruchuntersuchung mit DM-Aufbau**

Um dieses Verhalten im GM berücksichtigen zu können, wird der E-Modul der entsprechenden Lage im GM in Abhängigkeit der Anzahl der versagenden Elemente im DM, die innerhalb des GM-Elements liegen, verändert. Kommt es z.B. bei der DM-Simulation zu Versagen in der obersten Lage, wird bei der GM-Simulation des obersten Integrationspunkts der E-Modul, in Abhängigkeit der Anzahl der gelöschten Elemente im DM, verändert. Mit dieser Methode werden alle FB-Modelle mit GM-Aufbau validiert.

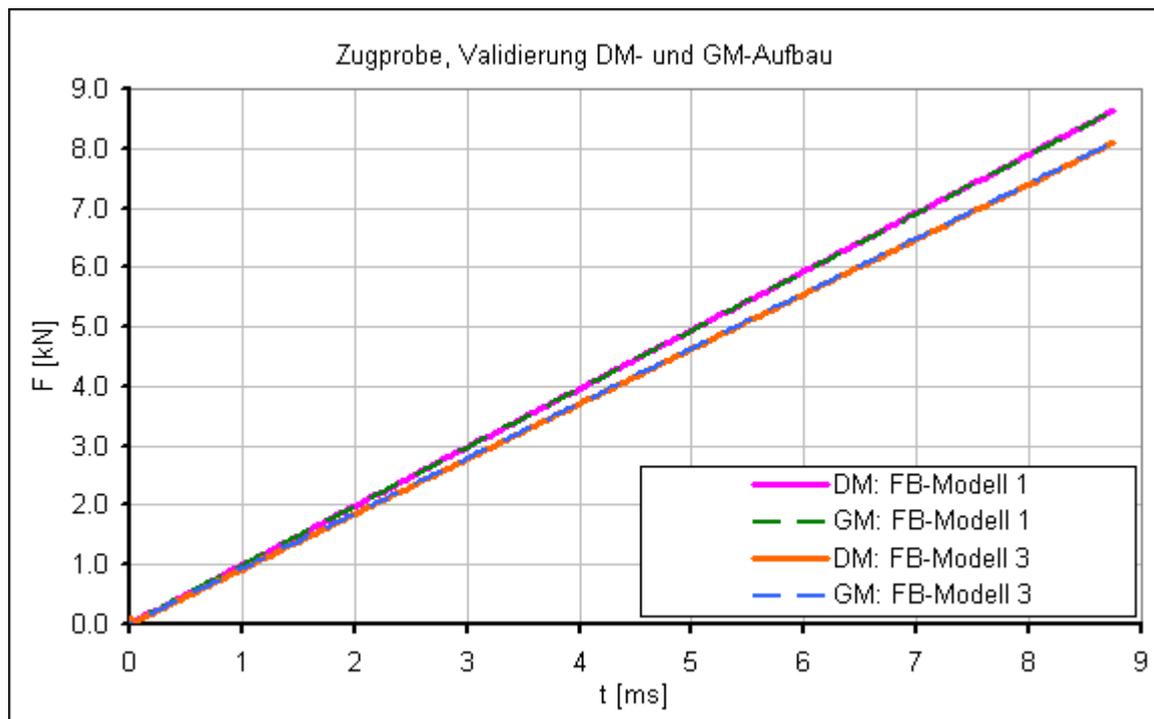


Versagen eines Elements im DM

Der E-Modul des entsprechenden Elements und Integrationspunkts im GM wird verändert (IP<sub>4</sub>).

**Abbildung 5-34 Anpassung der Materialeigenschaften im GM bei Versagen einer Lage**

Die Validierung der GM-Simulationen zeigt, dass die Zugsteifigkeit des GM durch Anpassung des E-Moduls der entsprechenden Elemente gut an die des DM angepasst werden kann. In den Abbildungen 5-36 und 5-37 sind die Kraftverläufe der validierten FB-Modelle dargestellt.



**Abbildung 5-35 Faserbruchvalidierung der FB-Modelle 1 und 3**

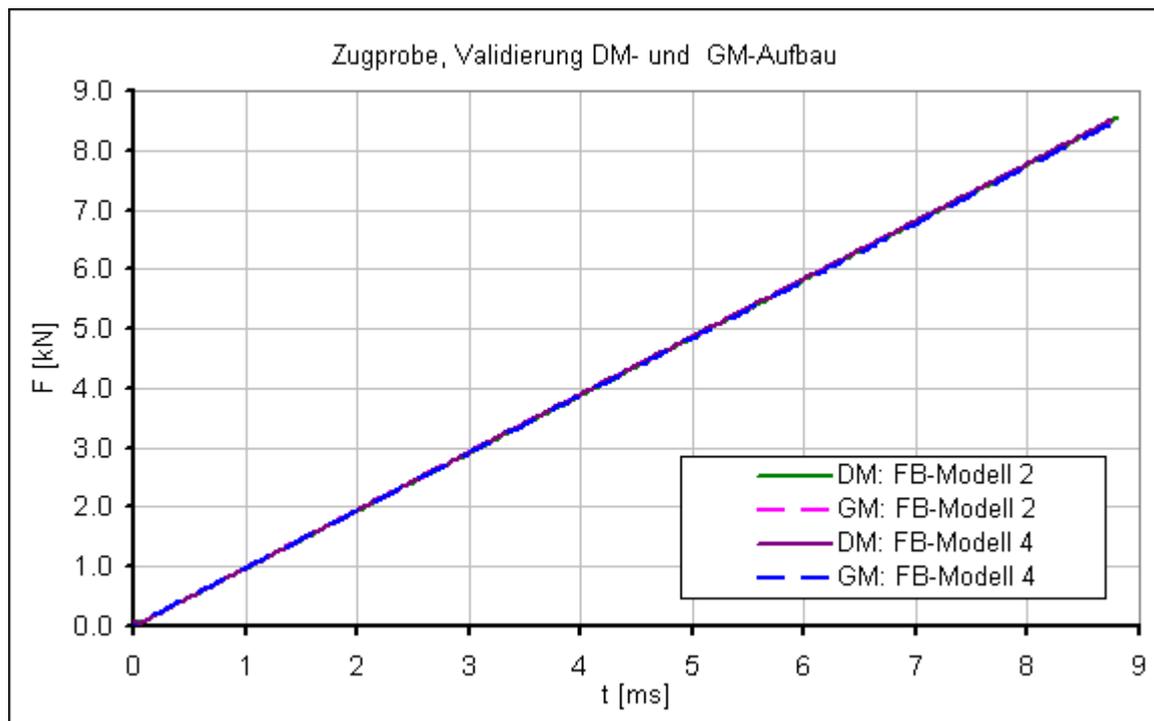
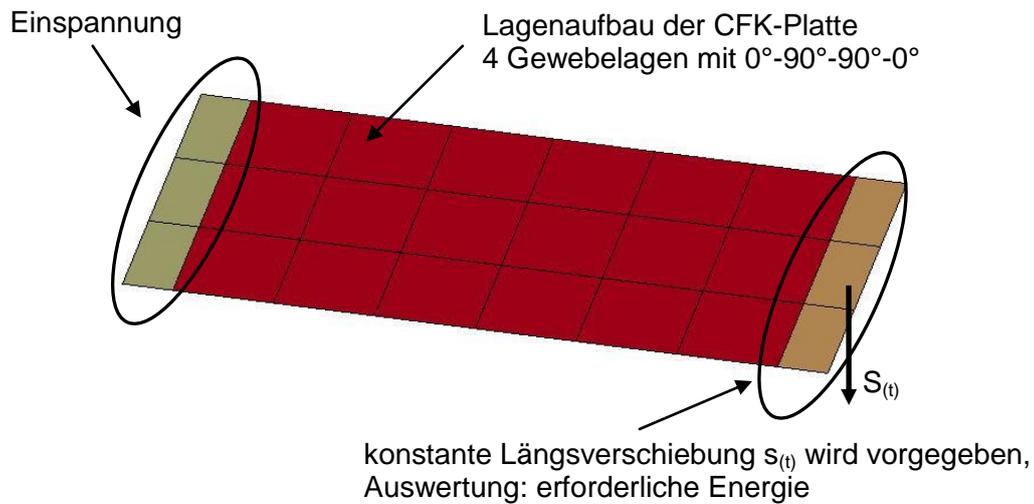


Abbildung 5-36 Faserbruchvalidierung der FB-Modelle 2 und 4

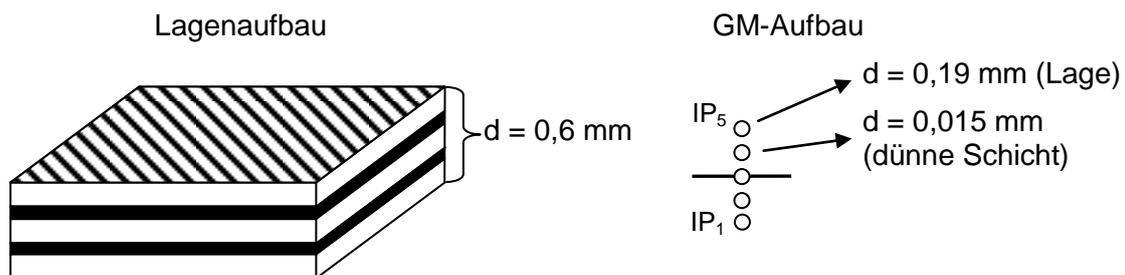
#### b) Berücksichtigung von Versagen zwischen den Schalen-Elementen

Für diese Untersuchungen wird folgender Lastfall verwendet. Eine ebene Platte aus vier Lagen ( $0^\circ\text{-}90^\circ\text{-}90^\circ\text{-}0^\circ$ ) ist auf einer Seite eingespannt, auf der anderen Seite wird eine konstante Verschiebung normal zur Platte vorgegeben. Dabei wird die notwendige Energie für die Verschiebung ausgewertet. Durch diese Belastung wird die Platte auf Biegung beansprucht und die Matrix zwischen den einzelnen Lagen auf Schub belastet. Diese Art der Beanspruchung, wie sie auch bei impactbelasteten Bauteilen auftritt, kann bei entsprechend hoher Belastung zu Delamination führen. Aus diesem Grund eignet sich dieser Lastfall besonders zur Untersuchung dieser Versagensform.



**Abbildung 5-37 Lastfall zur Untersuchung von Delamination**

Das Spezielle bei auftretender Delamination ist, dass die Fasern im Bauteil weiterhin Lasten übertragen können. Dies muss auch nach der Übergabe der Schädigung vom DM an das GM mit dem GM gewährleistet sein. Deshalb kann Delamination im GM nicht durch Herabsetzen des E-Moduls von den betreffenden Elementen berücksichtigt werden. Im GM ist der Lagenaufbau in einer Reihe Schalen homogenisiert. Um damit Delamination abbilden zu können, muss die Definition des Lagenaufbaus modifiziert werden. Dafür wird eine zusätzliche, sehr dünne Schicht zwischen den einzelnen Lagen hinzugefügt und die Dicke der einzelnen Lagen so reduziert, dass die Gesamtdicke des Lagenaufbaus weiterhin passend ist. Die dünne Schicht weist zunächst die Materialeigenschaften einer Lage auf. Bei Übertragung von Delamination vom DM an das GM wird die Steifigkeit der dünnen Schicht im entsprechenden Bereich des GM reduziert. Dadurch wird die Schubsteifigkeit – wie bei der Delamination – über die Dicke reduziert und die einzelnen Fasern bzw. Lagen können weiterhin Kräfte übertragen. Aufgrund der Definition von Schalen-Elementen ist ein Feststellen von Delamination mit diesem Modellaufbau jedoch nicht möglich.



**Abbildung 5-38 GM-Aufbau zur Abbildung von Delamination**

Um die Auswirkungen der dünnen Lagen im GM-Aufbau feststellen zu können, wird mit diesem Modellaufbau der in Kapitel 4.1 beschriebene Lastfall A ohne Materialversagen simuliert. Abbildung 5-39 zeigt dazu die Auswertung der Beschleunigungen des Impactors der Simulationen mit den verschiedenen GM-Aufbautypen.

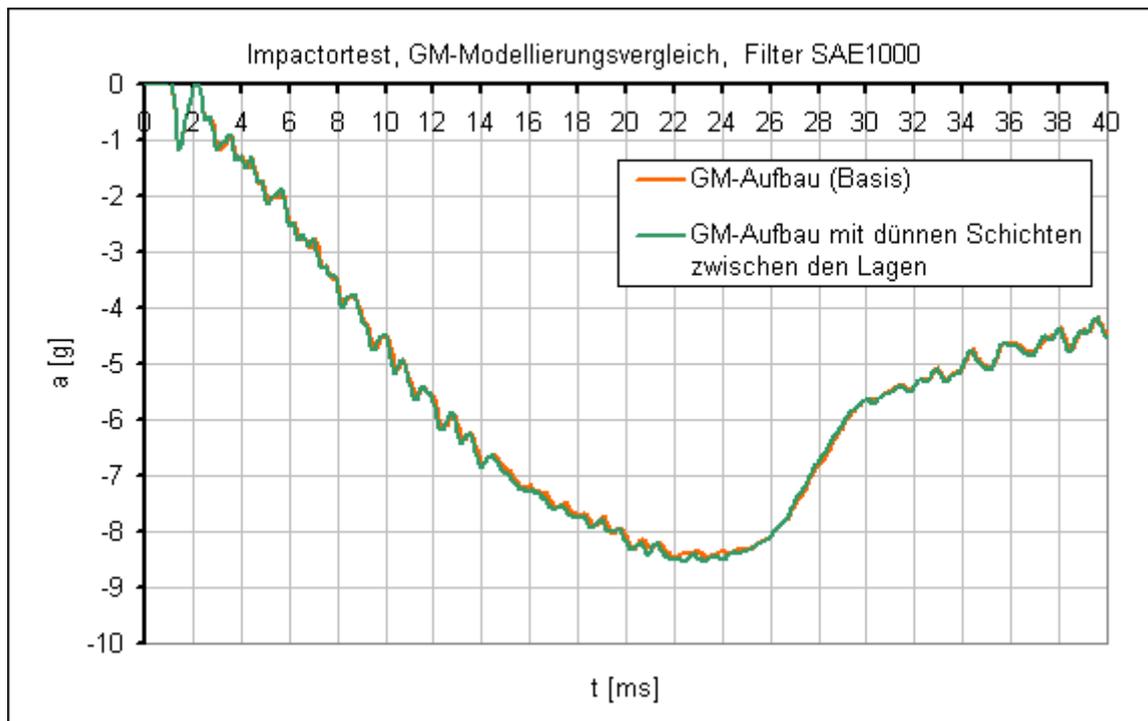


Abbildung 5-39 Vergleich der Beschleunigungen mit verschiedenen GM-Aufbauten

Der geänderte Lagenaufbau mit einer dünnen Schicht zwischen den einzelnen Lagen hat keinen Einfluss auf die Biegesteifigkeit und somit auch nicht auf den Beschleunigungsverlauf des Impactors.

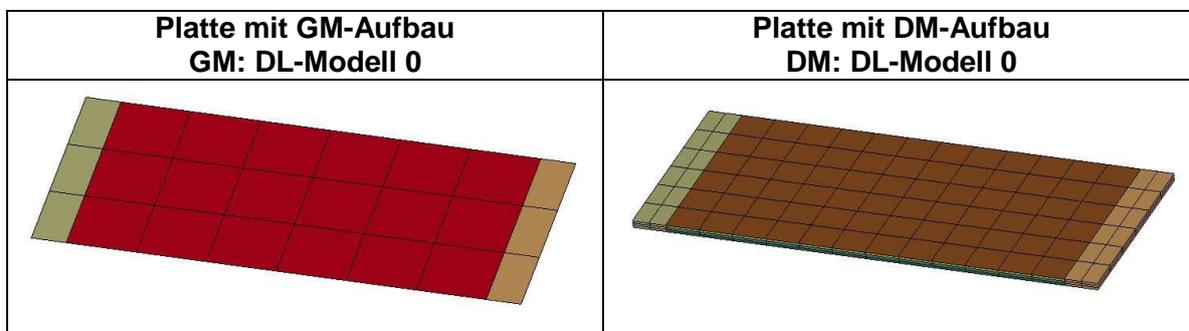
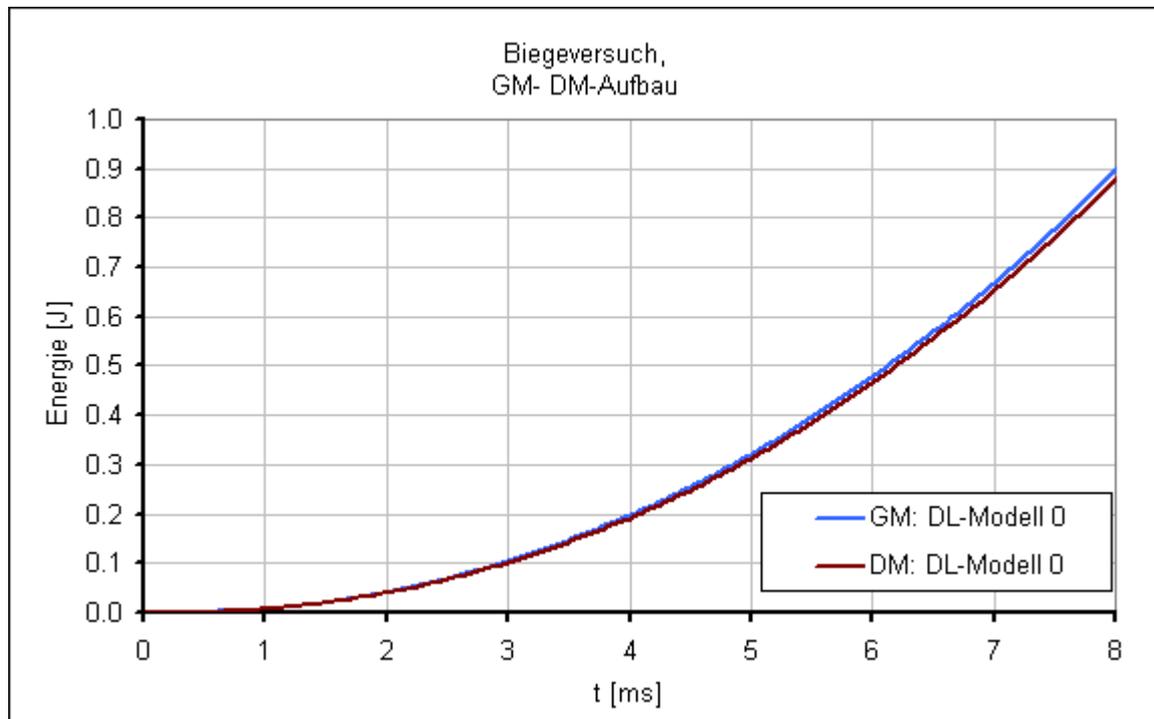


Abbildung 5-40 Modellaufbau zur Untersuchung von Delamination

Zum Vergleich der beiden Modelle wird zuerst der Lastfall ohne Berücksichtigung von Materialversagen simuliert und die erforderliche Energie für die Verschiebung ausgewertet. Die Energieverläufe beider Modelle stimmen sehr gut überein.



**Abbildung 5-41** Erforderliche Energien für Biegeversuch mit GM- und DM-Aufbau

Um den Einfluss von Delamination im DM untersuchen und mit dem GM validieren zu können, werden Simulationen mit DM-Aufbau durchgeführt, bei denen von Beginn an Delamination auftritt. Zu diesem Zweck werden einzelne Koppелеlemente von Beginn an aus dem DM gelöscht. Im GM wird die Steifigkeit der entsprechenden dünnen Schichten zwischen den Lagen reduziert. Für diese Untersuchung werden zwei verschiedene Modelle aufgebaut. Bei DL-Modell 1 sind die Koppелеlemente im Einspannbereich in der obersten Lage entfernt. Zusätzlich sind bei DL-Modell 2 die Koppелеlemente beim Lastangriff in der untersten Lage entfernt.

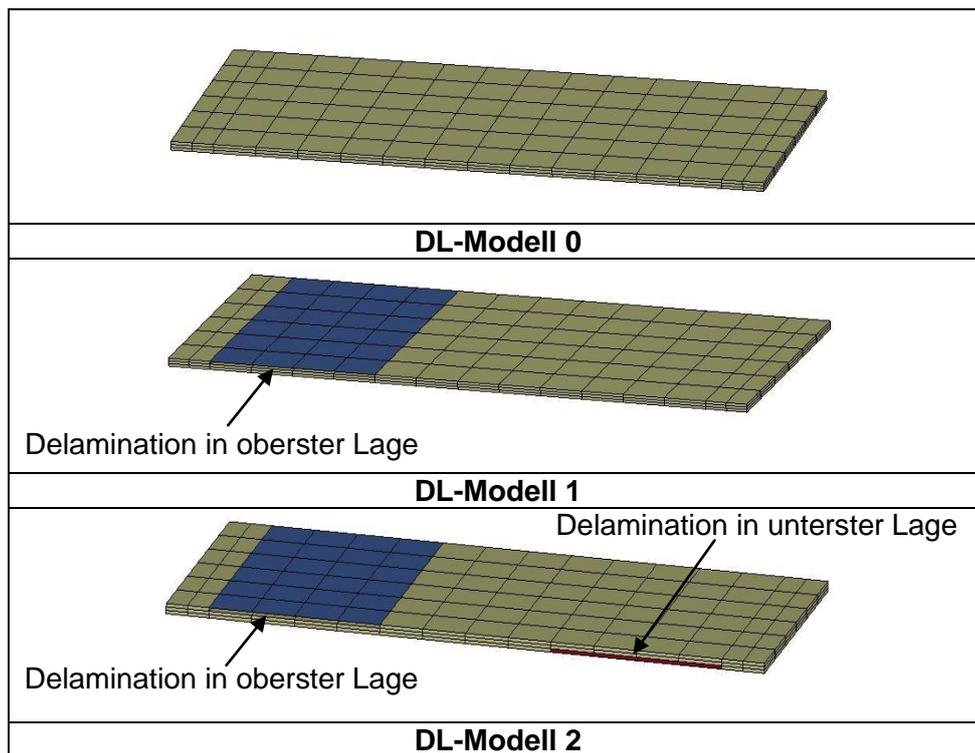


Abbildung 5-42 Übersicht der DM zur Delaminationsuntersuchung

Die Auswertung der notwendigen Energien für die vorgegebene Verschiebung zeigt, dass sich die Biegesteifigkeit mit zunehmender Delamination reduziert.

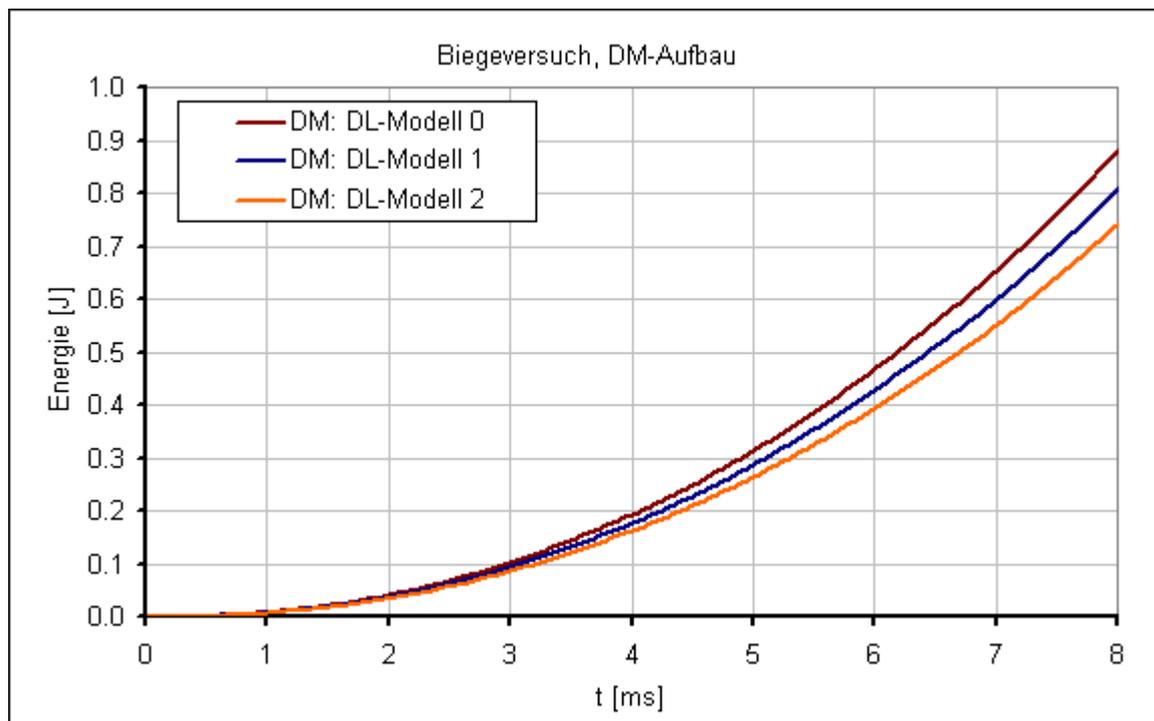
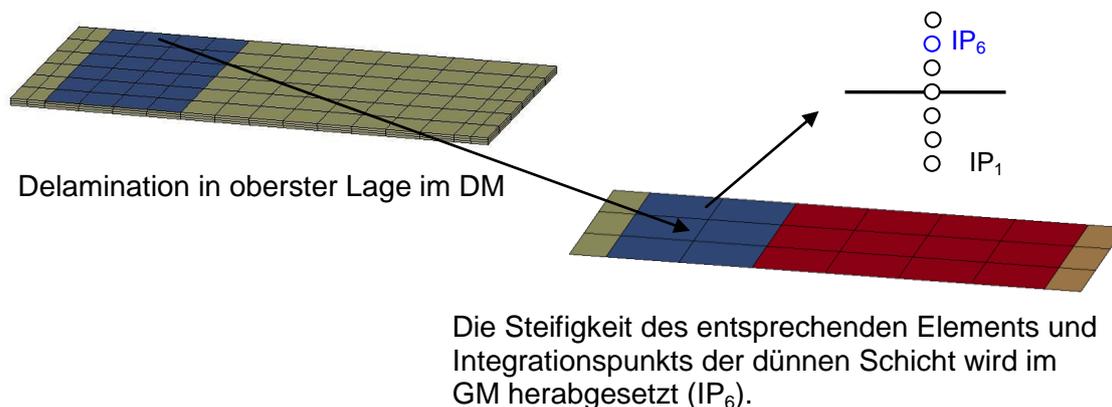


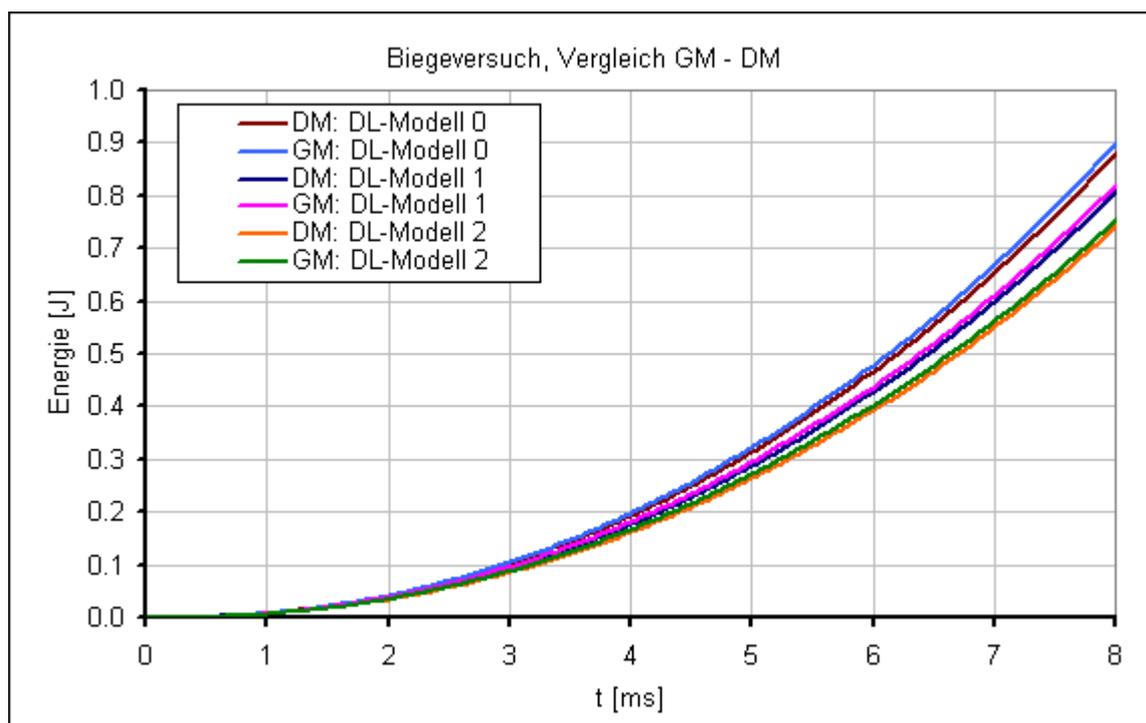
Abbildung 5-43 Auswertung der Delaminationsuntersuchung anhand des DM-Aufbaus

Durch die feinere Vernetzung des DM kann nicht jede beliebig kleine Delamination mit dem GM berücksichtigt werden. Zum Bewerten und Testen dieser Methode wird Delamination mit dem GM erst berücksichtigt, wenn es im DM bei mehr als zwei Elementen im Bereich eines Elements des GM zur Delamination kommt.



**Abbildung 5-44 Anpassung der Materialeigenschaften im GM bei Delamination**

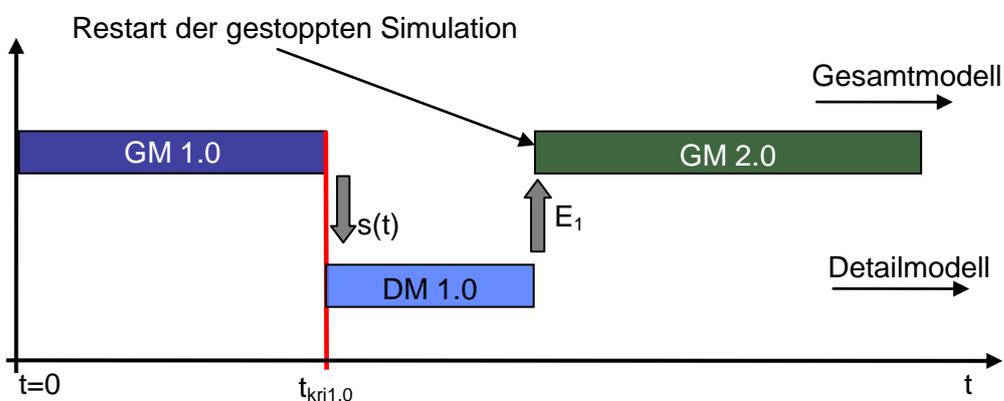
Durch das Herabsetzen des E-Moduls der entsprechenden dünnen Schicht zwischen den Lagen im GM passt die Biegesteifigkeit des GM mit der des DM zusammen. Somit stellt diese Modellierung eine gute Möglichkeit zum Abbilden von Delamination dar. Nachfolgend sind die Energieverläufe der validierten DL-Modelle dargestellt.



**Abbildung 5-45 Delaminationsvalidierung der DL-Modelle 1 und 2**

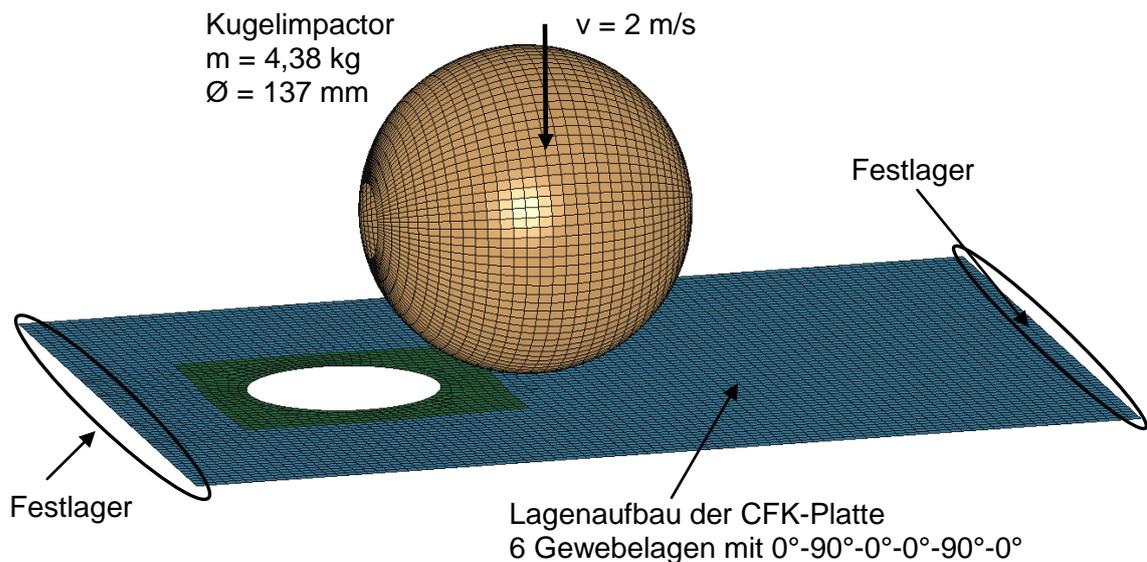
### 5.3.5 Teilprozess 5: Restart einer gestoppten Simulation

Diese Methode zur Simulation von kohlefaserverstärkten Bauteilen unter Berücksichtigung von Materialversagen basiert auf dem Informationsaustausch zwischen GM und DM. Bei festgestelltem Materialversagen im DM muss dieses in der anschließenden GM-Simulation berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, die GM-Simulation zu einer bestimmten Zeit zu stoppen, von einzelnen Elementen die Materialeigenschaften zu verändern und die Simulation wieder weiterzuführen.



**Abbildung 5-46 Teilprozess 5: Restart einer gestoppten Simulation**

Zum Entwickeln und Testen einer geeigneten Methode zur Erstellung einer Restart-Simulation wird in Anlehnung an Lastfall B folgender Testaufbau erstellt. Eine CFK-Platte aus sechs Gewebelagen des bereits validierten Materials wird durch einen Kugelimpactor mit einer Auftreffgeschwindigkeit von 2 m/s belastet. Um höhere Beschleunigungen und Belastungen in der Platte zu bekommen, wird diese mittels zweier Festlager gelagert.



**Abbildung 5-47 Lastfall zum Testen der Restart-Simulationen**

Als Basissimulation wird der Lastfall zuerst ohne Unterbrechung bis 15 ms simuliert. Anschließend wird diese Simulation von Beginn an neu gerechnet und zu einer bestimmten Zeit gestoppt. An diesem Zeitpunkt werden mittels verschiedener Methoden Restart-Simulationen erstellt und diese weiter gerechnet. Zur Bewertung und zum Vergleich der einzelnen Methoden werden die Beschleunigung des Impactors, sowie die Spannungen und Dehnungen in der Platte, mit der Basissimulation verglichen. Damit eine Restart-Simulation physikalisch vollständig definiert ist, müssen Spannungen und Dehnungen in den Elementen sowie die Geschwindigkeiten der einzelnen Knoten zu einem bestimmten Simulationsstartzeitpunkt definiert sein.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, um eine Restart-Simulation in LS-DYNA zu erstellen: mit dem Befehl \*Restart in LS-DYNA oder per manueller Methode.

#### **a) Der \*Restart-Befehl in LS-DYNA**

Dabei kann jede Simulation zu einem bestimmten Zeitpunkt unterbrochen werden und LS-DYNA schreibt den Zustand bei Simulationsunterbrechung automatisch in ein binäres File. Dieses dient als Basis für die Restart-Simulation. Dabei können vor dem Restart zahlreiche Modifikationen, wie z.B. Rechenzeit, Impactorgeschwindigkeit oder Randbedingungen, etc. durchgeführt werden. Eine Änderung der Element- bzw. Materialeigenschaften ist jedoch nicht möglich, somit ist diese Variante für die entwickelte Methode nicht anwendbar.

## b) Die manuelle Methode

Hier werden Verformungen, Spannungen, Dehnungen sowie die Geschwindigkeiten der einzelnen Knoten beim gewünschten Zeitpunkt der Simulation ausgeschrieben. Durch das Abspeichern dieser Daten im ASCII-Format kann ein Restart-Input einfach erstellt werden, indem die Element- und Materialeigenschaften verändert werden. Die Ausschreibung der zu initialisierenden Spannungen und Dehnungen für den Restart-Input erfolgt mittels der LS-DYNA Karte \*INTERFACE\_SPRINGBACK\_LSDYNA oder aus dem sogenannten im ASCII-Format vorliegenden elout-File der gestoppten GM-Simulation. Bei Verwendung der Daten aus dem elout-File ist eine zusätzliche Umformatierung nötig.

Die verformte Geometrie und die einzelnen Knotengeschwindigkeiten werden mittels LS-Prepost des entsprechenden Berechnungsschrittes ausgeschrieben. Um die Spannungen und Dehnungen aus der Simulation ausschreiben bzw. auch initialisieren zu können, müssen die Parameter STRFLG und SIGFLG vor dem Start in LS-DYNA auf 1 gesetzt werden. Somit sind alle erforderlichen Daten für die Erstellung eines Restart-Inputs vorhanden. Da die aktuellen Knotengeschwindigkeiten und die Verformungen direkt nur mit LS-Prepost über die d3plots ausgeschrieben werden können, sind die dargestellten GM-Zwischensimulationen GM1.1 und GM2.1 nötig.

Zur Vermeidung von künstlichem Schwingen durch Kontaktkräfte am Beginn der Simulation müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Diese möglichen Schwingungen werden durch Kontaktkräfte, wie z.B. zwischen Impactor und Bauteil oder Bauteil mit anderen Bauteilen hervorgerufen.

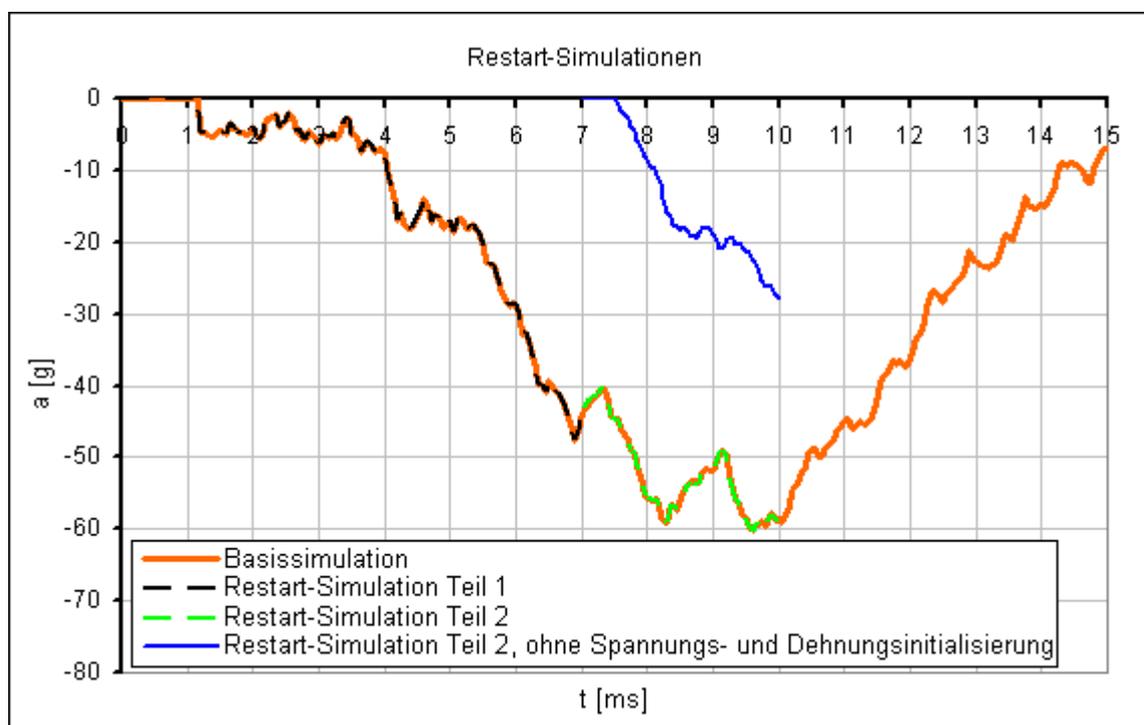
Eine Alternative dazu ist die Verwendung der LS-DYNA Karte \*CONTROL\_DYNAMIC\_RELAXATION. Dabei wird die neu gestartete Restart-Simulation mit der verformten Geometrie sowie den Spannungen und Dehnungen initialisiert. Nach der dynamischen Relaxation werden dann die einzelnen Knotengeschwindigkeiten aufgebracht und die eigentliche Simulation gestartet. Da diese Methode wesentlich größere Rechenzeiten zur Folge hat, wird sie nicht verwendet.

Die beschriebene Methode zur Erstellung einer Restart-Simulation wird beim zuvor gezeigten Lastfall bei 7 ms angewendet. Für einen Vergleich der Varianten werden die Beschleunigung des Impactors sowie die Spannungen und Dehnungen in der Platte mit der Basissimulation gegenübergestellt. Zusätzlich wird eine Restart-Simulation bei 7 ms

erstellt, bei der keine Spannungen und Dehnungen von der vorhergehenden Simulation bei Simulationsstart initialisiert werden, um deren Auswirkungen auf den Beschleunigungsverlauf des Impactors zu sehen.

Beschreibung	Rechenzeit
Basissimulation	0-15 ms
Restart-Simulation Teil 1	0-7 ms
Restart-Simulation Teil 2	7-10 ms
Restart-Simulation Teil 2, ohne Spannungs- und Dehnungsinitialisierung	7-10 ms

**Tabelle 5-2 Beschreibung der Restart-Simulationen**



**Abbildung 5-48 Beschleunigungsauswertung der Restart-Simulationen**

Die Auswertungen der Impactorbeschleunigungen zeigen, dass der Beschleunigungsverlauf der Simulation Teil 2 durch diese Methode identisch ist mit jener der Basissimulation. Hingegen zeigt die Beschleunigungsauswertung der Simulation Teil 2, ohne Spannungs- und Dehnungsinitialisierung einen völlig anderen Kurvenverlauf.

In den folgenden Abbildungen werden die Spannungen in der Elementebene und die Dehnungen in Längsrichtung der Restart-Simulation Teil 2 mit der Basissimulation bei 9 ms verglichen.

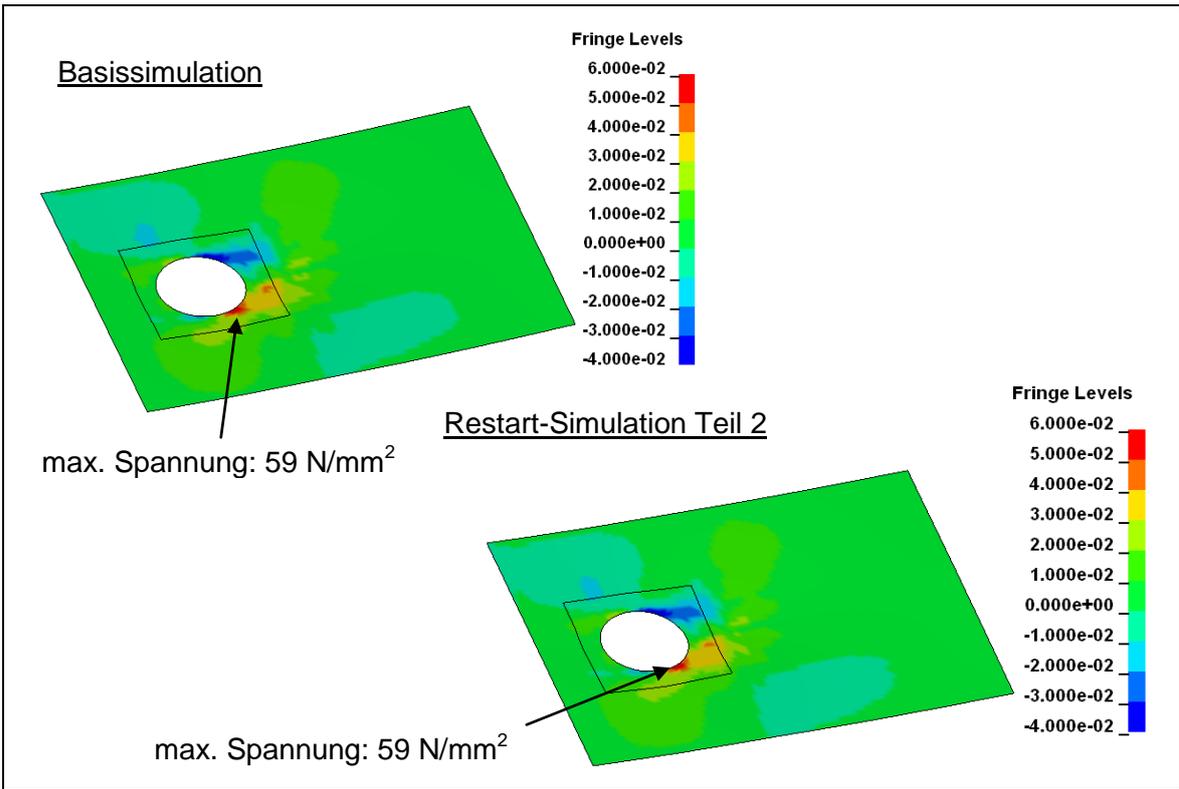


Abbildung 5-49 Auswertung der Spannung in der Elementebene der Basissimulation und der Restart-Simulation Teil 2

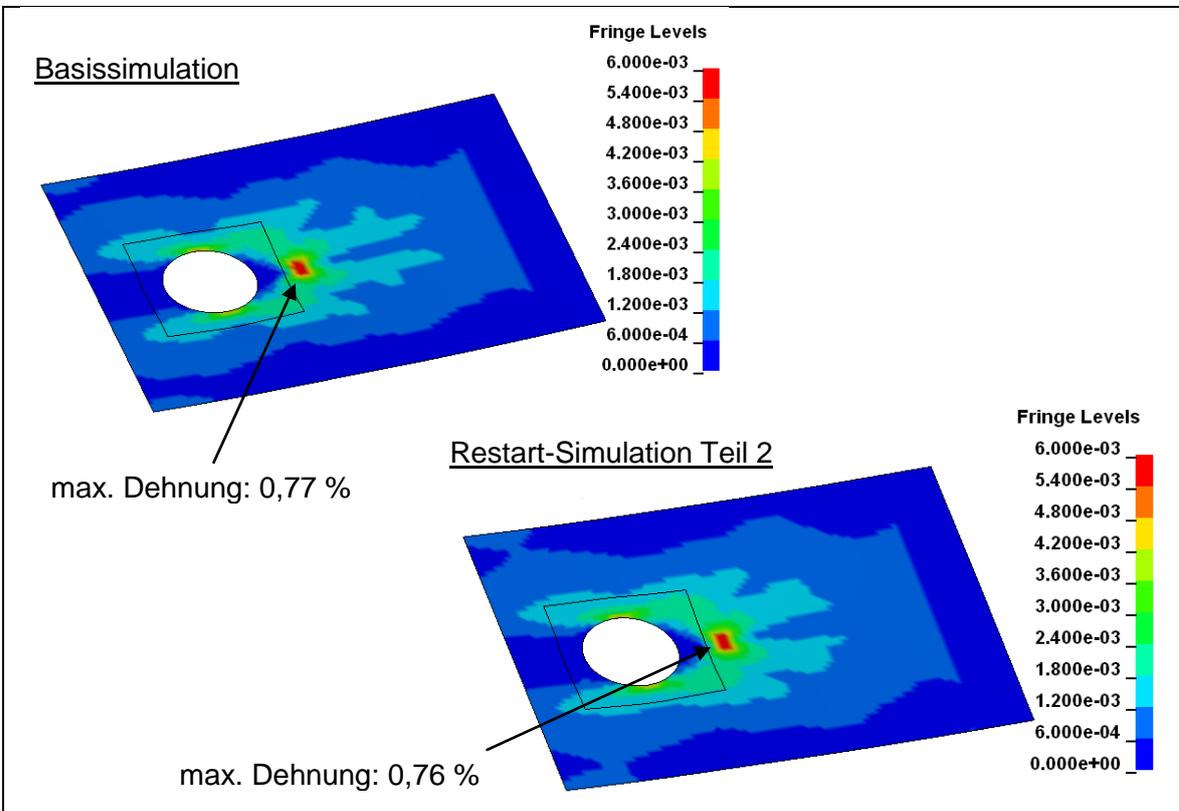


Abbildung 5-50 Auswertung der Dehnung in Längsrichtung der Basissimulation und der Restart-Simulation Teil 2

Da sowohl der Beschleunigungsverlauf als auch die maximalen Spannungen und Dehnungen und die Verteilung in der Platte bei 9 ms sehr gut mit der Basissimulation übereinstimmen, wird diese Methode zur Erstellung von Restart-Simulationen verwendet.

## 5.4 Optimierungsansätze zum Methodenablauf

Der Ablauf und das Prinzip der entwickelten Methode zur Berechnung von impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen unter Berücksichtigung von Versagen werden anhand des im Kapitel 4.1 beschriebenen Lastfalls A getestet. Da die Methode zu diesem Zeitpunkt noch nicht automatisiert war, werden die einzelnen Schritte im Ablauf, wie z.B. Simulationsabbruch aufgrund kritischer Belastung im GM, Erstellung des DM usw., händisch durchgeführt. Um Einflüsse und Auswirkungen auf das Ergebnis der Methode festzustellen, werden Parameter im Ablauf verändert.

Folgende Parameter und deren Effekte werden untersucht:

- Abbildung von Einspannungen im DM
- Austesten der optimalen Wegvorgaberate und Dämpfung für die neutrale Lage
- Auswirkung der Reibung zwischen Impactor und Platte auf die Spannungen im DM
- Test der Methode bis zum Erreichen eines ersten kritischen Wertes im GM

### 5.4.1 Abbildung von Einspannungen im DM

Bei der DM-Simulation wird die Verformung des Bauteilausschnitts durch die Vorgabe der Knotenverschiebung der neutralen Lage erzielt. Da jedoch beim DM-Aufbau jede Lage ausmodelliert ist, müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, um den Einspannungsbereich korrekt abbilden zu können. Für diese Untersuchung wird der bereits beschriebene Lastfall A simuliert. Dazu werden die Knotenverschiebungen aus der GM-Simulation alle 0,2 ms ausgeschrieben. In einer weiteren Simulation wird diese Verformung mittels der entwickelten Methode zur Verformung des DM auf die gesamte Bauteilgeometrie und über die gesamte Rechenzeit angewendet.

Folgende Abbildungen zeigen die Spannungsauswertungen in y-Richtung beider Simulationen in der oberen und unteren Lage bei 15 ms.

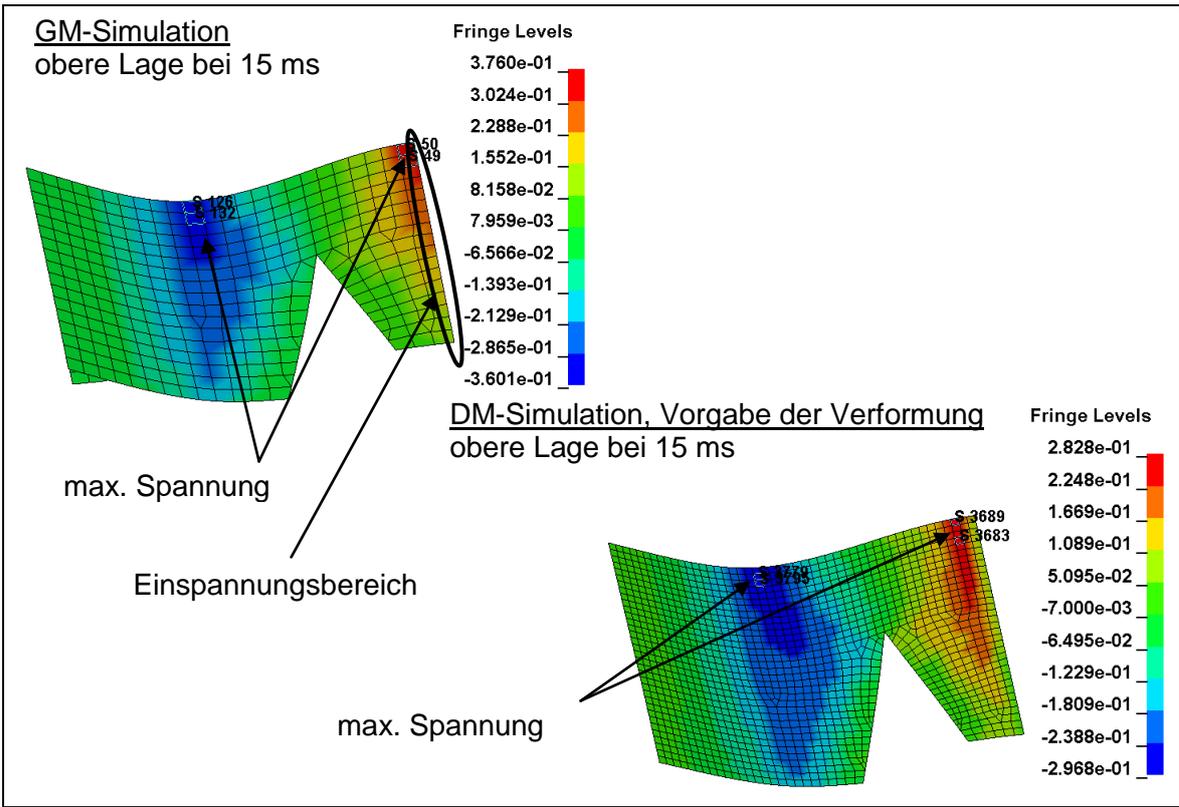


Abbildung 5-51 Spannungsvergleich in y-Richtung in der oberen Lage

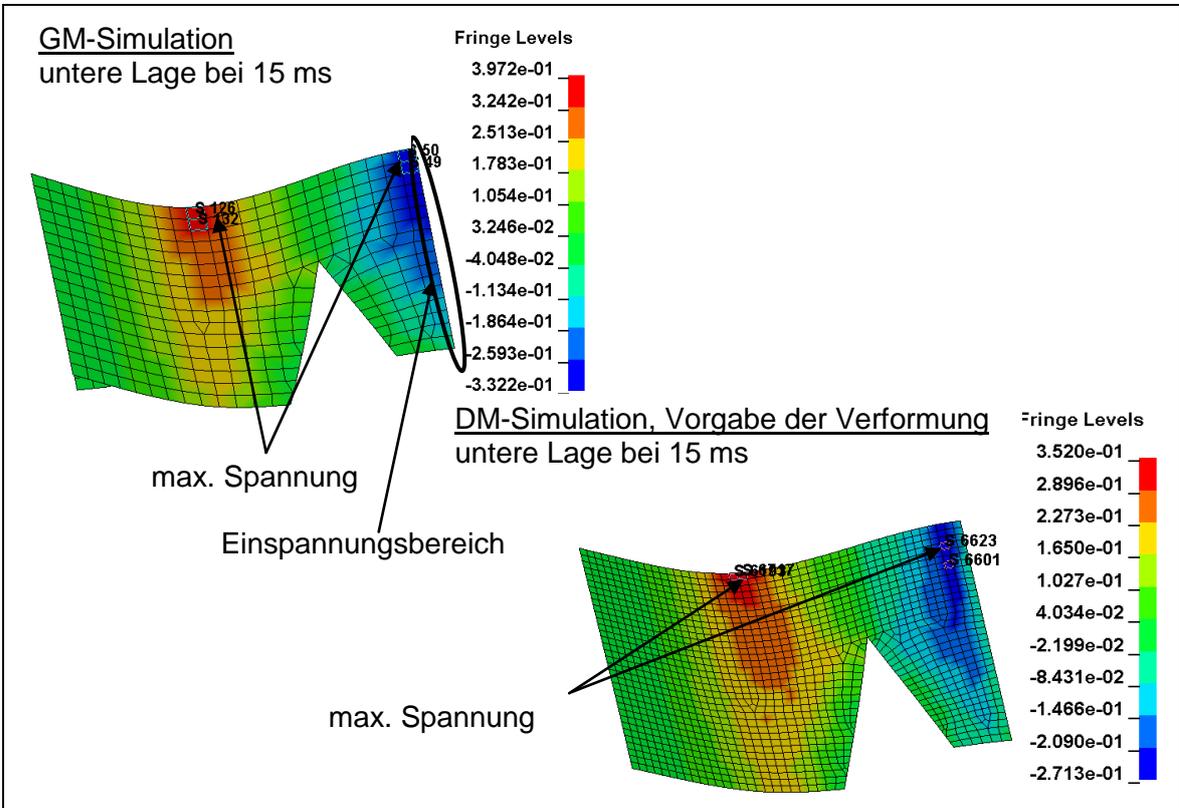
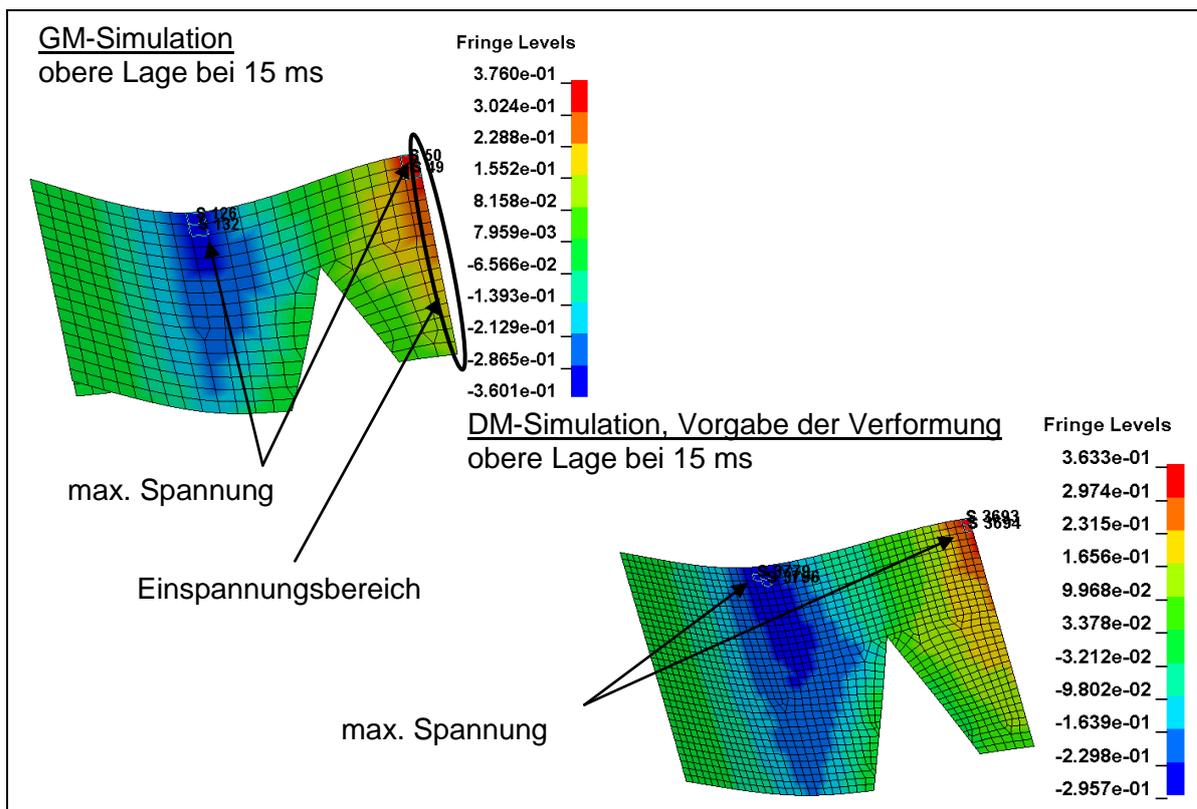
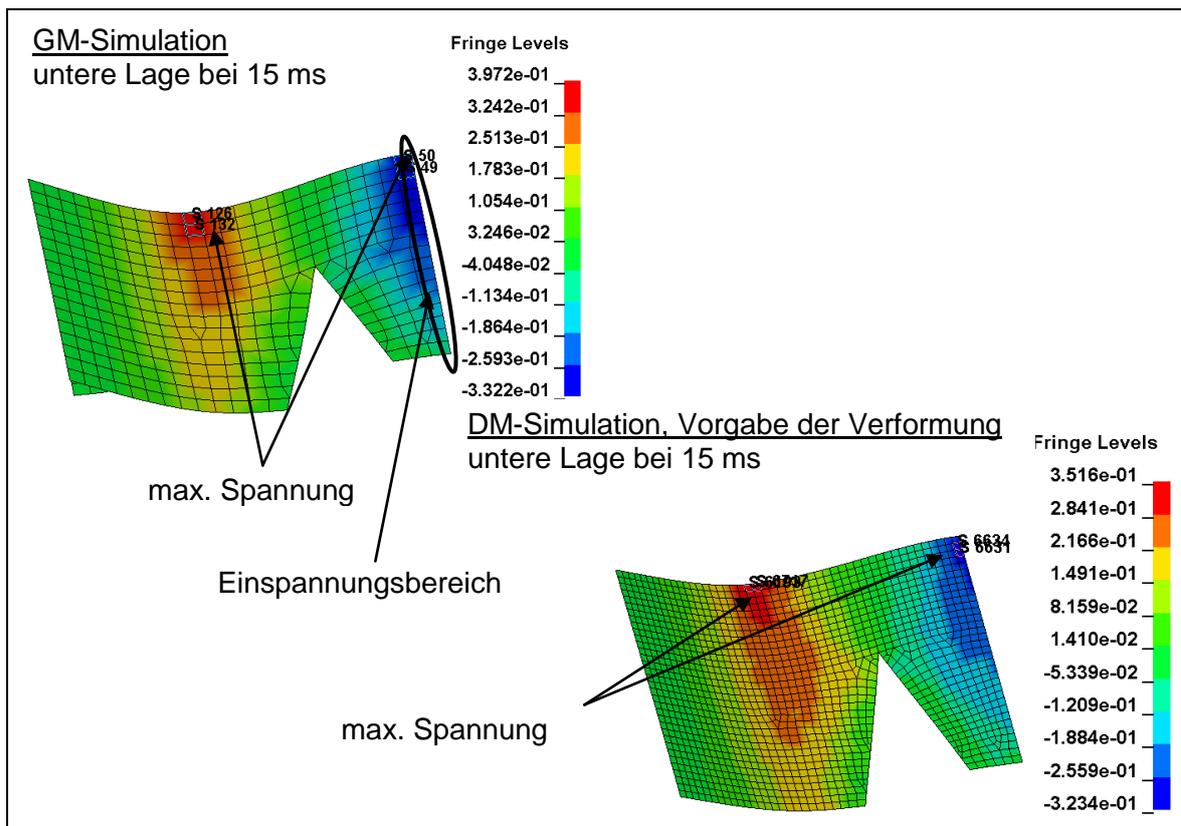


Abbildung 5-52 Spannungsvergleich in y-Richtung in der unteren Lage

Aus diesem Vergleich ist ersichtlich, dass die maximalen Spannungen bei der DM-Simulation mit Wegvorgabe nicht direkt im Einspannbereich auftreten. Grund dafür ist, dass die Knoten im Einspannungsbereich des DM nicht gesperrt sind und es ein paar Elemente braucht, um die Kräfte in den Elementen aufbauen zu können. Deshalb muss die Einspannung bei der DM-Simulation über die gesamte Dicke mit berücksichtigt werden. Im folgenden Vergleich wird die Einspannung im DM durch ein entsprechendes Sperren der einzelnen Knoten berücksichtigt.



**Abbildung 5-53 Spannungsvergleich in y-Richtung in der oberen Lage unter Berücksichtigung der Einspannung**



**Abbildung 5-54 Spannungsvergleich in y-Richtung in der unteren Lage unter Berücksichtigung der Einspannung**

Durch das zusätzliche Sperren der Knoten im DM gleicht die Spannungsverteilung im Einspannbereich jener der GM-Simulation.

#### 5.4.2 Testen der optimalen Wegvorgaberate und der Dämpfung für die neutrale Lage

Für diese Untersuchung wird Lastfall A verwendet. Die Knotenverschiebungen für die DM-Simulationen werden alle 0,2, 0,1 und 0,05 ms aus der GM-Simulation ausgeschrieben. Zum Vergleich der einzelnen DM-Simulationen mit unterschiedlichen Wegvorgaberaten werden diese mit der gesamten Bauteilgeometrie und über die gesamte Rechenzeit durchgeführt. Weiters wird, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, jede DM-Simulation mit optimiertem Dämpfungsfaktor für die neutrale Lage simuliert.

Die Auswertung der maximalen Spannungen in y-Richtung in der oberen und unteren Lage, sowie der verklebten Lage mit der neutralen Lage erfolgt bei 6, 15 und 25 ms. Die größten Spannungen treten jeweils im Auftreffbereich des Impactors und im Einspannbereich auf und sind in Abhängigkeit ihrer Lage im Lagenaufbau positiv oder negativ.

In Tabelle 5-3 sind die maximalen Spannungen der jeweiligen DM-Simulationen mit und ohne Dämpfung gegenübergestellt.

Zeit [ms]	Lage	Bezeichnung					
		DM-Simulation Wegvorgaberate: 0,2		DM-Simulation Wegvorgaberate: 0,1		DM-Simulation Wegvorgaberate: 0,05	
		mit Dämpfung	ohne Dämpfung	mit Dämpfung	ohne Dämpfung	mit Dämpfung	ohne Dämpfung
6	obere	-123 136	-129 137	-126 137	-130 137	-128 136	-135 135
	untere	-124 138	-126 140	-121 138	-121 141	-121 141	-119 149
	verklebte	-50 72	-54 70	-48 71	-56 72	-48 69	-54 70
15	obere	-295 363	-302 363	-295 360	-302 361	-295 360	-297 359
	untere	-323 351	-323 357	-322 347	-320 351	-320 345	-320 344
	verklebte	-127 188	-127 193	-126 185	-126 188	-126 184	-126 183
25	obere	-368 443	-370 444	-368 446	-370 447	-368 446	-367 445
	untere	-403 437	-403 435	-406 438	-405 435	-406 438	-401 434
	verklebte	-160 226	-160 223	-161 224	-160 219	-160 225	-157 222
Grün = Spannungen im Auftreffbereich Blau = Spannungen im Einspannungsbereich Spannungen in N/mm <sup>2</sup>							

**Tabelle 5-3 Vergleich der DM-Simulationen mit verschiedenen Wegvorgaberaten**

Der Vergleich zeigt, dass die unterschiedlichen Wegvorgaberaten mit optimierter Dämpfung der neutralen Lage keinen wesentlichen Einfluss auf die maximalen Spannungen in den einzelnen Lagen haben. Weiters ist ersichtlich, dass sich die Dämpfung der neutralen Lagen nicht wesentlich auf die maximalen Spannungen in den Lagen auswirkt. Wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, spielt die Dämpfung bei einem einlagigen Schichtaufbau eine wesentlich größere Rolle, da die Bewegung der freien Knoten der neutralen Lage bei einem Schichtaufbau aus mehreren Lagen eingeschränkt wird und dies somit ein zu großes Schwingen vermeidet. Dennoch wird zur Vermeidung von nicht realen Schwingungen im System weiter mit einer Dämpfung der neutralen Lagen gerechnet.

### 5.4.3 Auswirkung der Reibung zwischen Impactor und Platte auf die Spannungen im DM

In der GM-Simulation treten an der Oberfläche des kohlefaserverstärkten Bauteils Kräfte infolge des Impactoraufschlags auf, die Reibungskräfte hervorrufen. Bei der DM-Simulation wirken durch die Vorgabe der Verformung keine direkten Kontaktkräfte auf die Oberfläche; die Auswirkungen auf die Spannungen im DM werden im folgenden Abschnitt untersucht. Zuerst wird generell der Einfluss der Reibung zwischen Impactor und Platte bewertet. Dazu wird der bereits beschriebene Lastfall A mit einem Reibungskoeffizienten zwischen Impactor und Platte von 0 und ungleich 0 simuliert. Ausgewertet wird dabei jeweils die Impactorbeschleunigung.

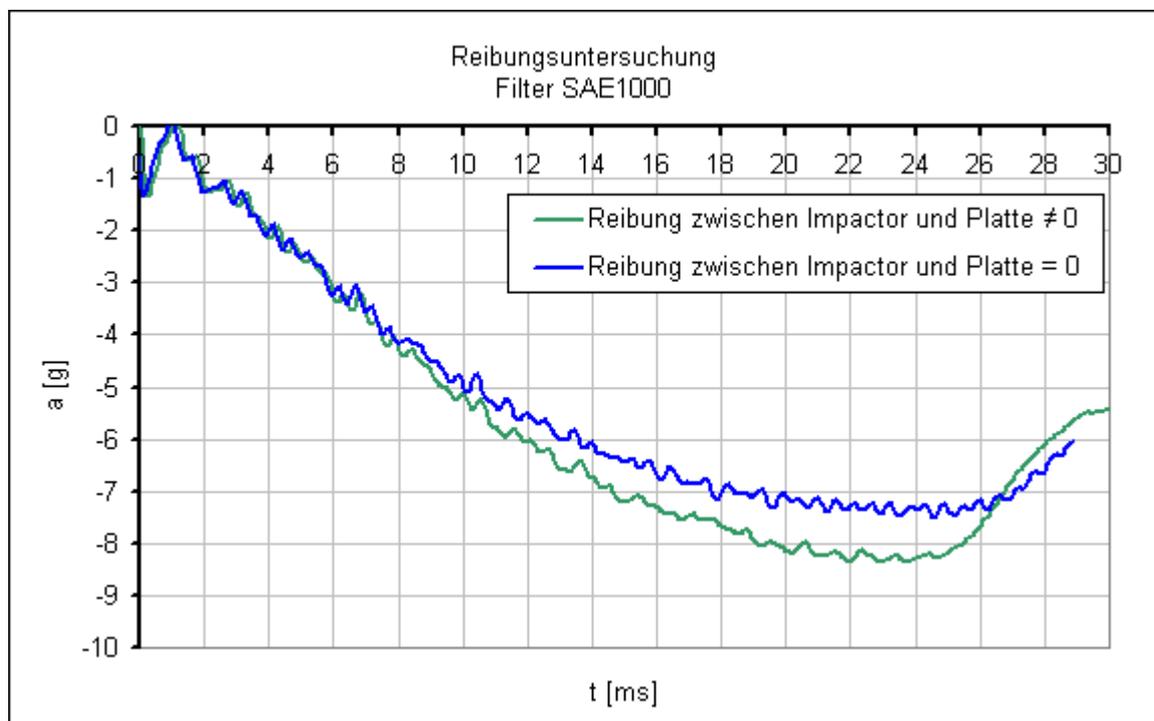
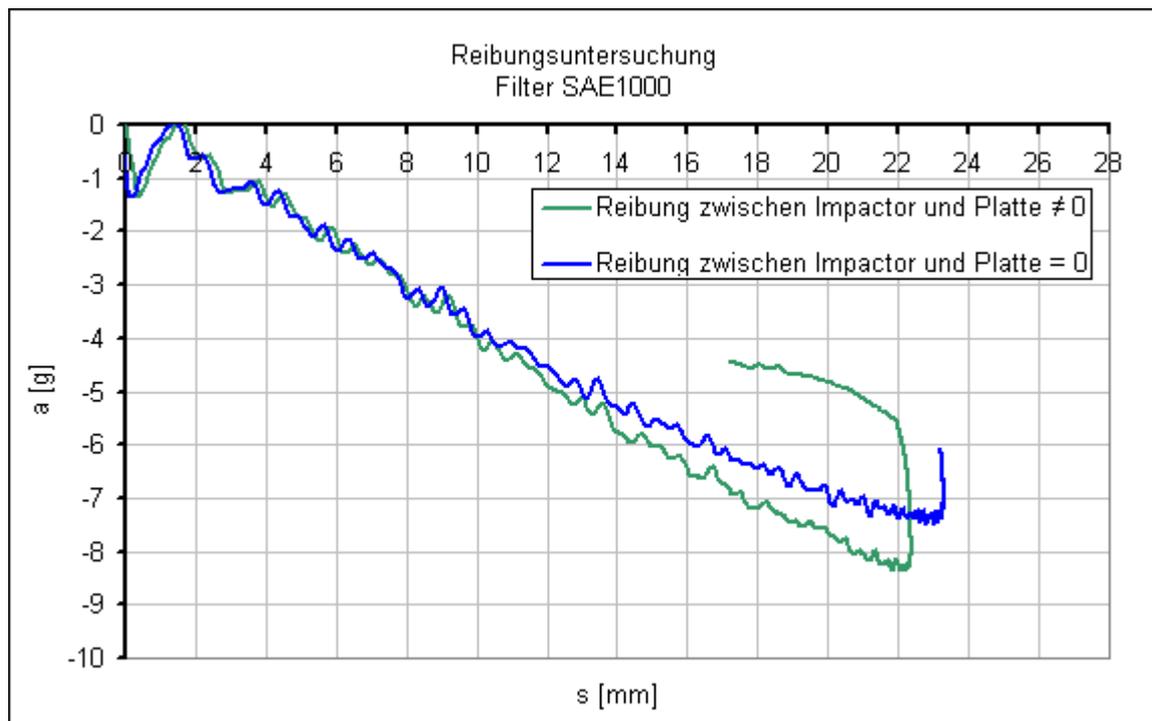


Abbildung 5-55 Einfluss der Reibung bei Impactorbeschleunigung über die Zeit



**Abbildung 5-56 Einfluss der Reibung bei Impactorbeschleunigung über die Verformung**

Bis ca. 8 ms ist kein Unterschied im Beschleunigungsverlauf erkennbar. Danach wird der Impactor bei der Simulation mit einem Reibungskoeffizienten von 0 langsamer verzögert und die Platte mehr verformt.

Um den Einfluss der Reibung zwischen Impactor und Platte auf die Spannungen in der oberen Lage festzustellen, wird eine DM-Simulation mit der gesamten Bauteilgeometrie und über die gesamte Rechenzeit durchgeführt. Die Knotenverschiebungen dafür werden aus der GM-Simulation verwendet, bei der die Reibung zwischen Impactor und Platte 0 beträgt. Weiters wird zusätzlich eine GM-Simulation erstellt, bei der die Platte die gleiche Homogenisierung aufweist, wie die DM-Simulation. Zum Vergleich der Spannungen in der oberen Lage werden diese Simulationen zusätzlich auch mit einem Reibungskoeffizienten ungleich 0 durchgeführt. Die Auswertung der Spannungen in der oberen Lage erfolgt bei 6, 15 und 25 ms. Sind die Abweichungen der maximalen Spannungen zwischen den Simulationen mit und ohne Reibungskoeffizient gleich, kann darauf geschlossen werden, dass die Reibung zwischen Impactor und Platte keinen direkten Einfluss auf die Spannungen in der Kontaktlage haben.

Tabelle 5-4 zeigt eine Gegenüberstellung der maximalen Spannungen in der oberen Lage, die in diesem Fall jene Lage ist, die in Kontakt mit dem Impactor steht.

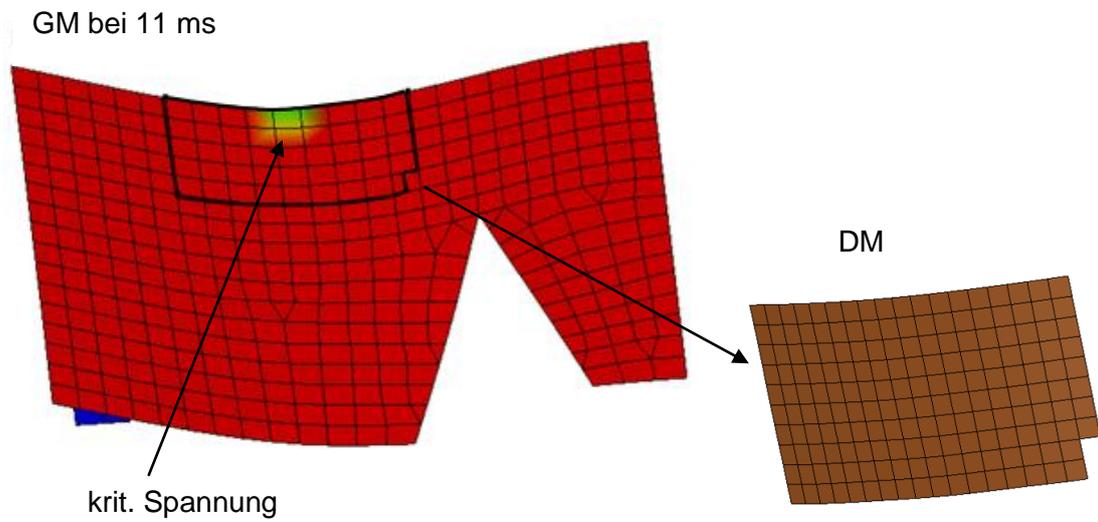
Zeit [ms]	Lage	Bezeichnung					
		Reibung = 0			Reibung ≠ 0		
		DM-Simulation	GM-Sim. mit DM-Aufbau	Abweichung in %	DM-Simulation	GM-Sim. mit DM-Aufbau	Abweichung in %
6	obere	-123	-127	3,3	-123	-127	3,3
		140	133	-5,0	136	128	-5,9
15	obere	-295	-345	16,9	-295	-350	18,6
		378	375	-0,8	363	354	-2,5
25	obere	-377	-463	22,8	-368	-453	23,1
		480	489	1,9	443	462	4,3
Grün = Spannungen im Auftreffbereich Blau = Spannungen im Einspannungsbereich Spannungen in N/mm <sup>2</sup>							

**Tabelle 5-4 Vergleich der Simulationen mit Reibung und ohne Reibung zwischen Impactor und Platte**

Die Abweichungen der Spannungen in der oberen Lage zwischen der DM-Simulation und der GM-Simulation mit DM-Aufbau sind mit und ohne Reibung zwischen Impactor und Platte fast gleich groß. Somit haben die Reibung bzw. die Reibkräfte infolge des Impactoraufschlags nur Einfluss auf die zeitliche Verformung der Platte. Die Reibkräfte an der Oberfläche wirken sich jedoch nicht direkt auf die Spannungen in der oberen Lage aus.

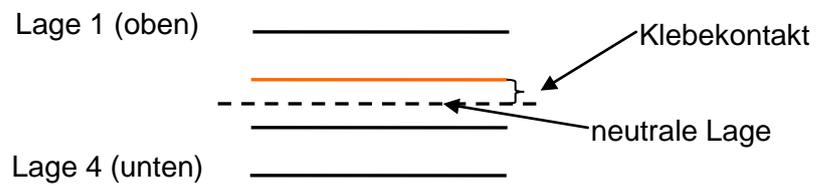
#### 5.4.4 Test der Methode bis zum Erreichen eines ersten kritischen Wertes im GM

Der Test der gesamten Methode erfolgt bis zum Erreichen eines ersten kritischen Wertes im GM mit Lastfall A. Als kritischer Wert für das GM wird eine Spannung von 300 N/mm<sup>2</sup> in Faserrichtung angenommen. Bei Erreichen dieser Spannung bei ca. 11 ms wird die GM-Simulation abgebrochen und händisch eine DM-Simulation des kritischen Bereichs erstellt. Um die Spannungen in der DM-Simulation zu überprüfen, wird zusätzlich eine GM-Simulation mit der Homogenisierung des DM erstellt. Die ermittelten Spannungen mit dieser Simulation stellen das ideale Ziel für die DM-Simulation dar. Von diesen beiden Analysen werden die Spannungen jeweils in y-Richtung im kritischen Bereich jeder Lage bei 9 und 11 ms verglichen. Die Wegvorgaberate für die DM-Simulation beträgt 0,2 ms.



**Abbildung 5-57 Erster kritischer Bereich im GM mit dazugehörigem DM**

In Abbildung 5-58 wird der DM-Aufbau durch vier Lagen inklusive der verklebten neutralen Lage dargestellt.



**Abbildung 5-58 Modellaufbau des DM zum Testen der Methode**

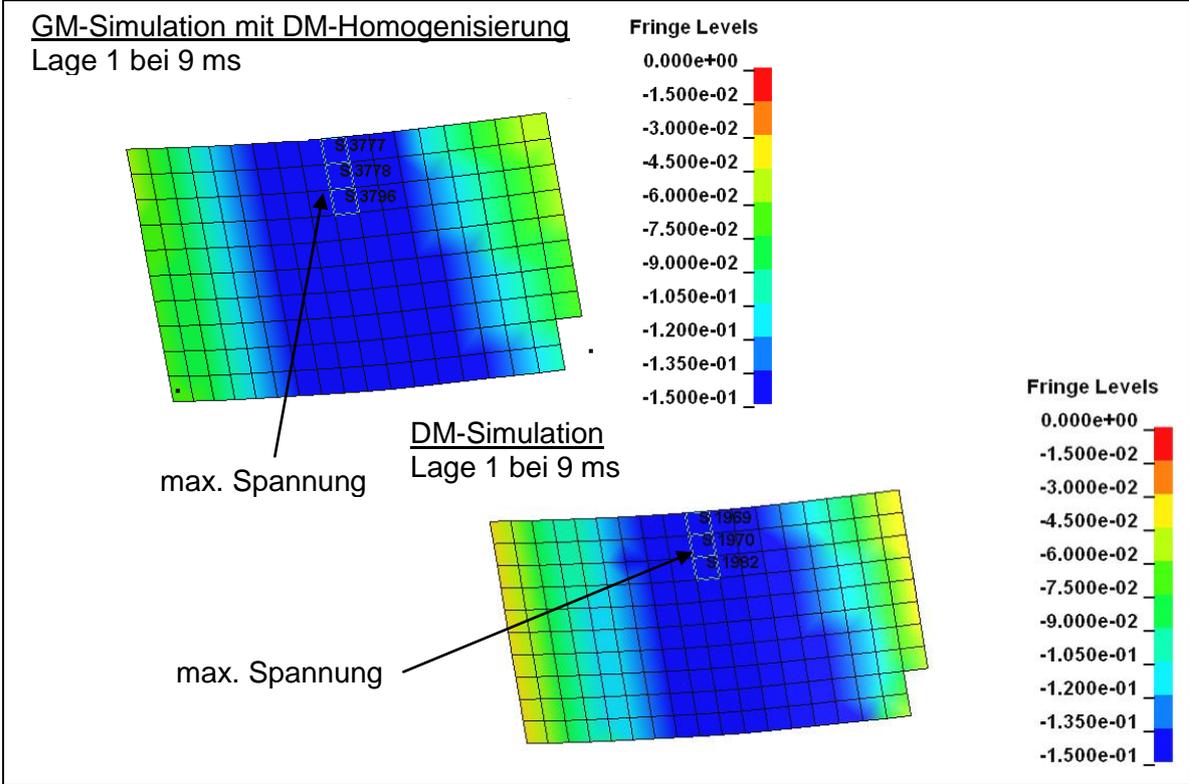


Abbildung 5-59 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 1 bei 9 ms

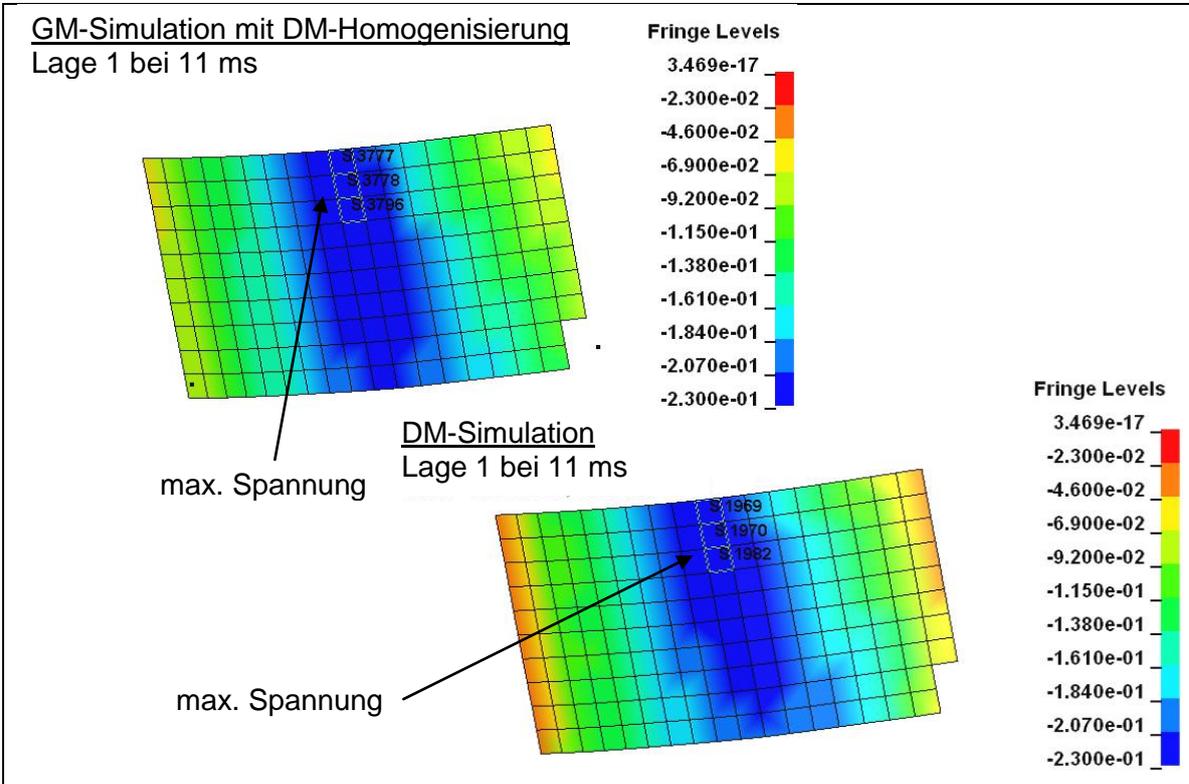


Abbildung 5-60 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 1 bei 11 ms

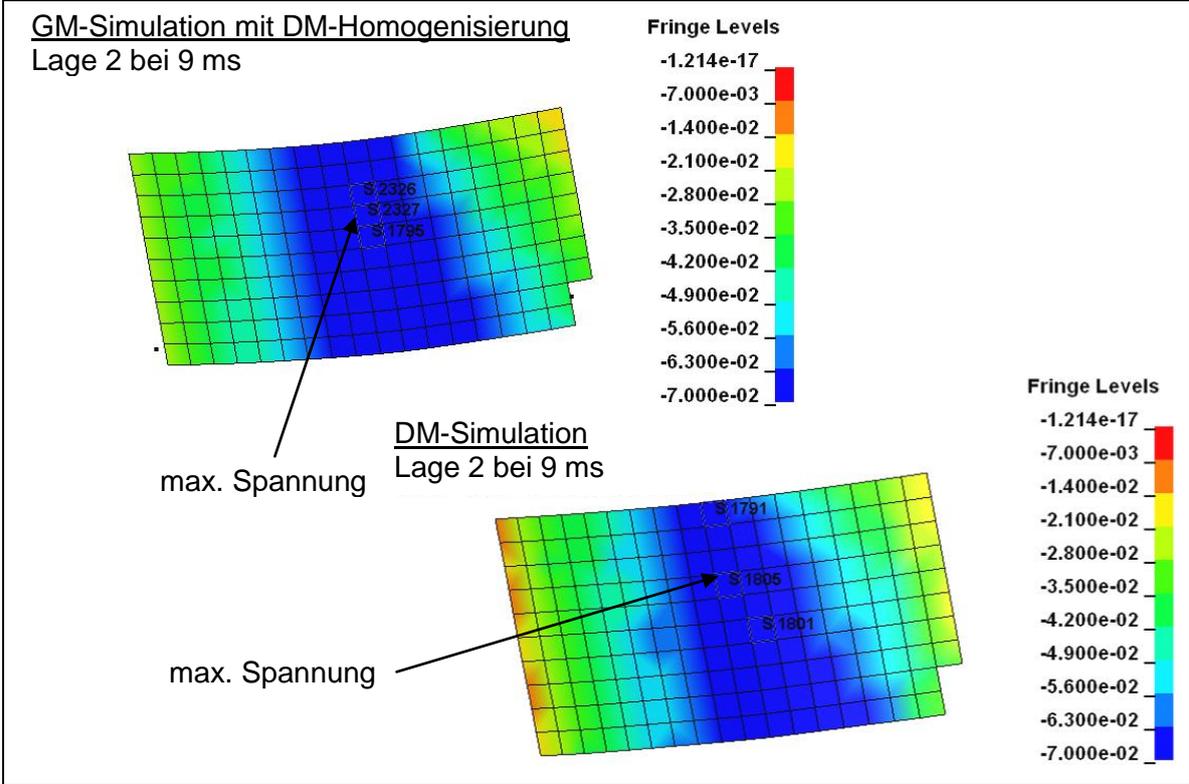


Abbildung 5-61 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 2 bei 9 ms

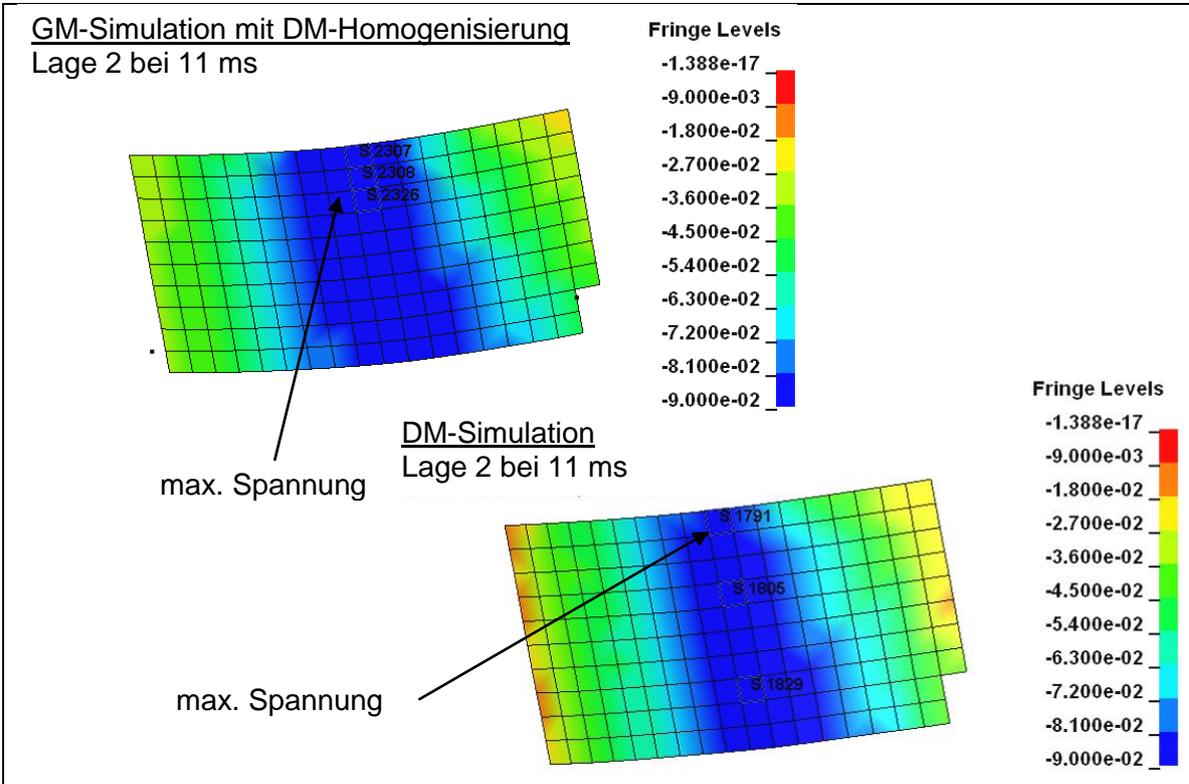


Abbildung 5-62 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 2 bei 11 ms

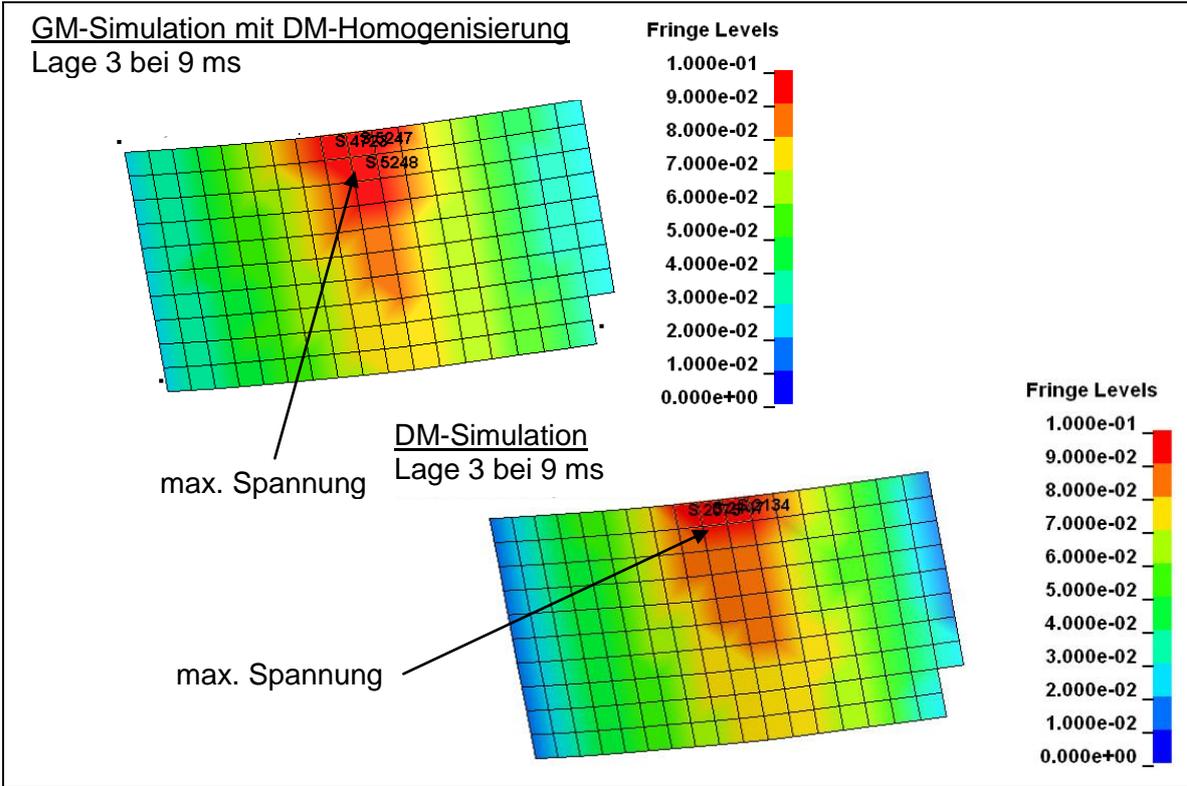


Abbildung 5-63 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 3 bei 9 ms

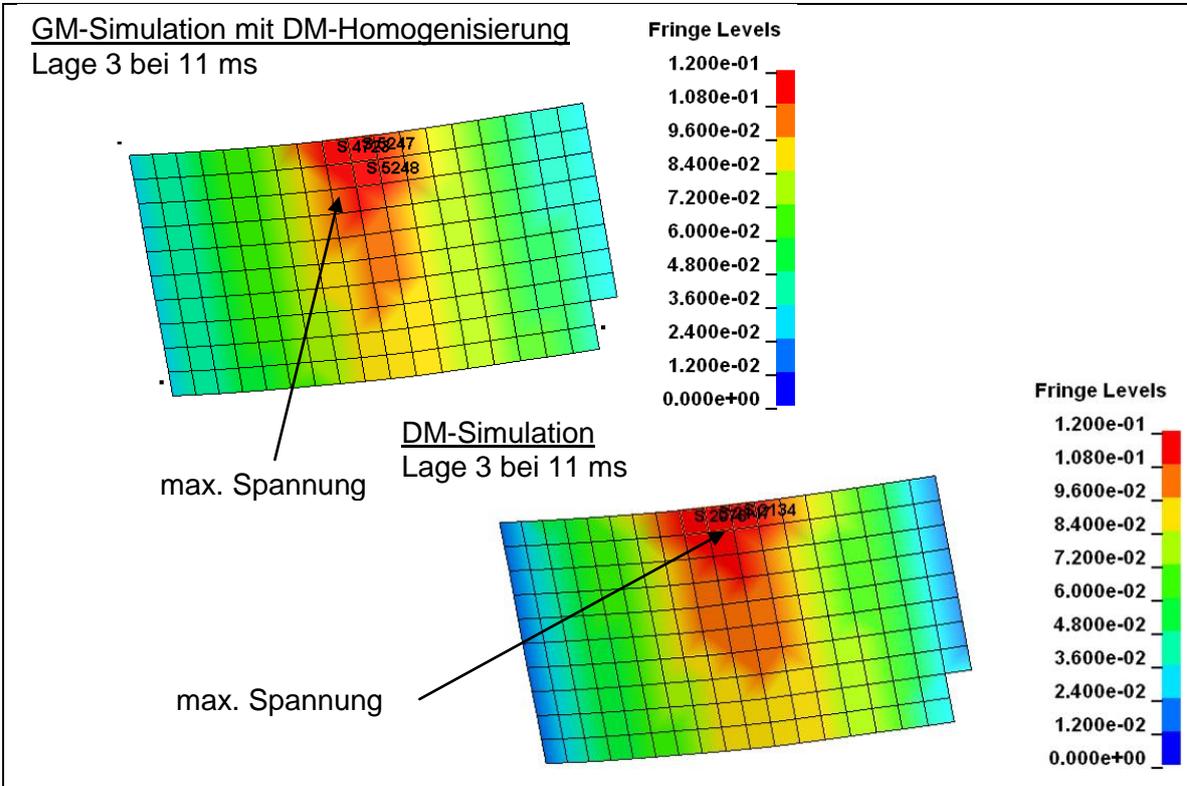


Abbildung 5-64 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 3 bei 11 ms

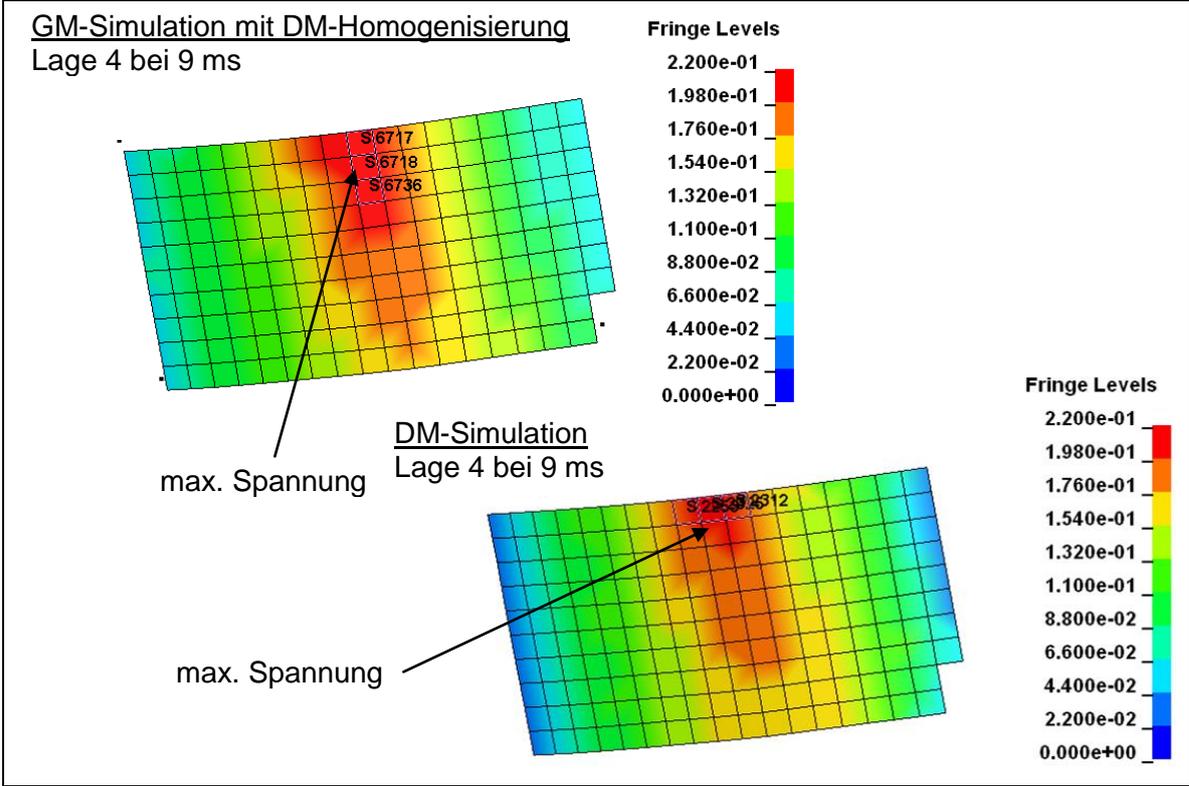


Abbildung 5-65 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 4 bei 9 ms

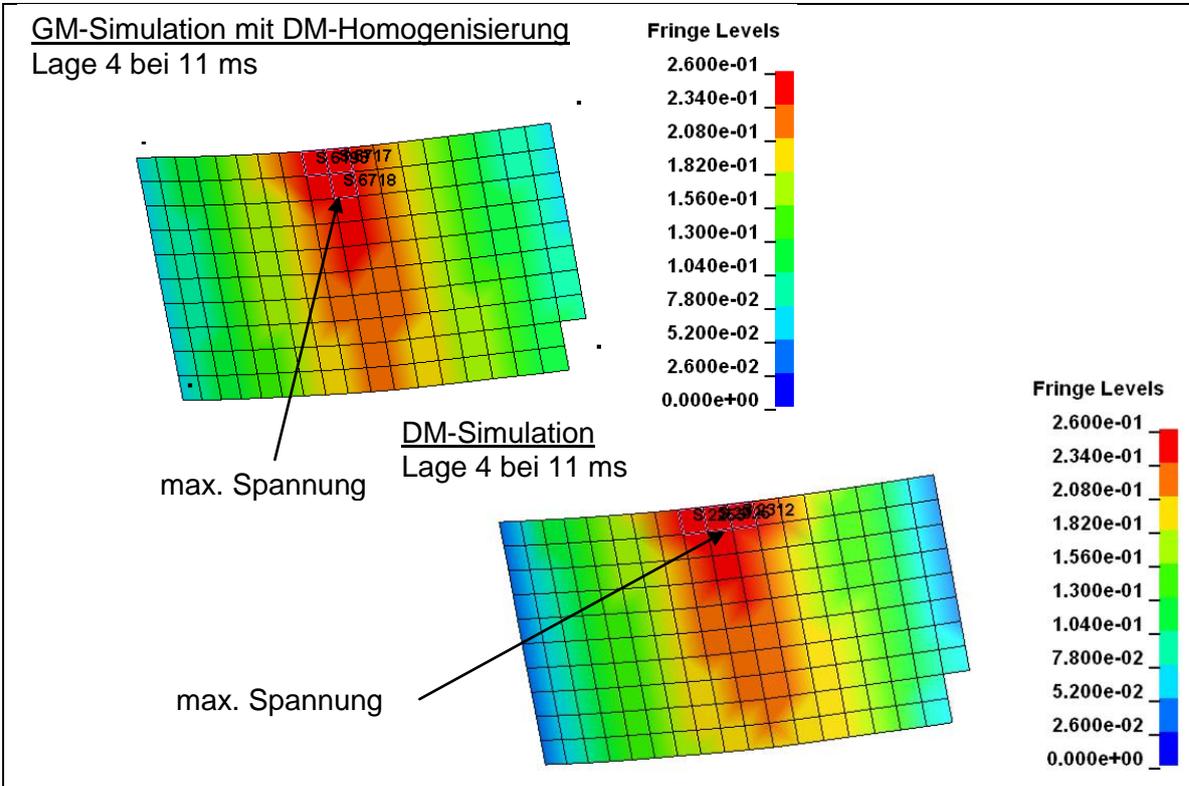


Abbildung 5-66 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 4 bei 11 ms

Sowohl die Spannungsverläufe der DM-Simulation, als auch die maximalen Spannungen stimmen in allen Lagen sehr gut mit der GM-Simulation mit DM-Aufbau überein. Dazu werden die Spannungen der DM-Simulation, der GM-Simulation und der GM-Simulation mit DM-Aufbau miteinander verglichen. Um die Spannungen der Simulationen mit GM-Aufbau mit den anderen vergleichen zu können, müssen diese, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, über das Verhältnis der E-Module umgerechnet werden.

Zeit [ms]	Lage	Bezeichnung					
		GM-Sim. mit DM-Aufbau	DM-Simulation	Abweichung der DM-Sim. zur GM-Sim. mit DM-Aufbau	GM-Simulation (Spannungen auf DM korrigiert)	Abweichung der DM-Sim. zur GM-Sim.	Abweichung der GM-Sim. mit DM-Aufbau zur GM-Sim.
9	1	-214	-191	-10,7 %	-225 (-164,55)	16,1 %	30,0 %
	2	-89	-85	-4,4 %	-70 (-51,19)	66,1 %	73,9 %
	3	107	99	-7,4 %	88 (64,36)	53,8 %	66,3 %
	4	233	213	-8,5 %	245 (179,17)	18,9 %	30,0 %

Tabelle 5-5 Vergleich der maximalen Spannungen des kritischen Bereichs bei 9 ms, Spannungen in N/mm<sup>2</sup>

Zeit [ms]	Lage	Bezeichnung					
		GM-Sim. mit DM-Aufbau	DM-Simulation	Abweichung der DM-Sim. zur GM-Sim. mit DM-Aufbau	GM-Simulation (Spannungen auf DM korrigiert)	Abweichung der DM-Sim. zur GM-Sim.	Abweichung der GM-Sim. mit DM-Aufbau zur GM-Sim.
11	1	-259	-236	-8,8 %	-274 (-200,38)	17,8 %	29,3 %
	2	-107	-104	-2,8 %	-88 (-64,36)	61,6 %	66,3 %
	3	125	121	-3,2 %	110 (80,44)	50,4 %	55,4 %
	4	278	260	-6,5 %	294 (215,01)	20,9 %	29,3 %

Tabelle 5-6 Vergleich der maximalen Spannungen des kritischen Bereichs bei 11 ms, Spannungen in N/mm<sup>2</sup>

Aus diesen Gegenüberstellungen ist ersichtlich, dass die entwickelte Methode zur Berechnung der Belastungen mit einem lokal begrenzten DM sehr gut funktioniert. Es passen sowohl die Spannungsverläufe als auch die maximalen Spannungen sehr gut mit der

GM-Simulation mit DM-Aufbau zusammen. Die Auswertung zeigt, dass die ermittelten Spannungen mit der DM-Simulation niedriger sind, als bei der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Generell sind die Abweichungen der DM-Simulation zur GM-Simulation mit DM-Aufbau kleiner, als zur GM-Simulation, welche als Basis für die DM-Simulation dient. Die Ergebnisse sind als besonders gut einzustufen, da das verwendete DM sicherlich, wie in Kapitel 4 beschrieben, noch Entwicklungspotenzial aufweist. Speziell die Materialeigenschaften der Solids, die als Koppelement in der DM-Simulation dienen, müssen anhand von Versuchen noch weiter erforscht werden.

## 6. Simulation von Lastfällen mit der entwickelten Methode

Zum Testen der entwickelten Methode für die Simulation von impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen unter Berücksichtigung von Bauteilversagen mittels zweier gekoppelter Modelle werden zwei Lastfälle simuliert. Bei diesen Lastfällen handelt es sich um den bereits in Kapitel 4.1 beschriebenen Lastfall A und um einen realen Fallturmversuch auf eine ebene Platte.

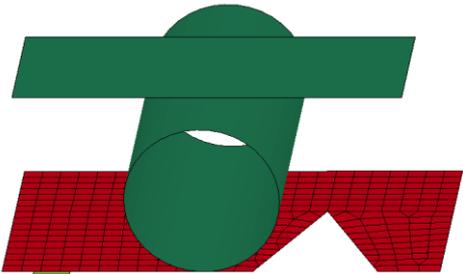
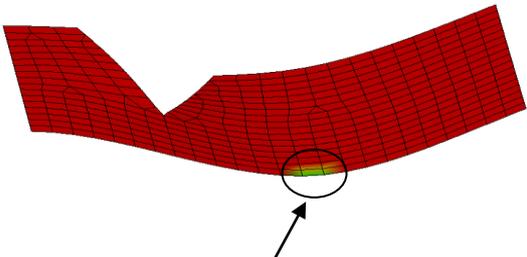
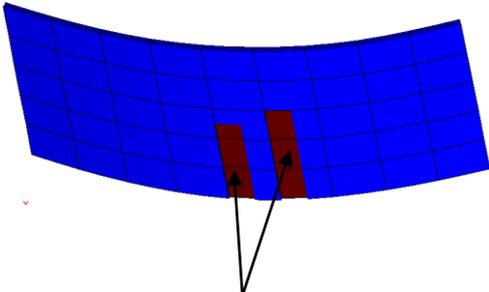
### 6.1 Simulation des Lastfalls A

Für diese Untersuchung wird Lastfall A verwendet. Zum Testen der Methode wird Versagen in der Schalenebene infolge von Faserzug bzw. Faserdruck berücksichtigt. Um ein Versagen bei diesem Lastfall herbeizuführen, sind die zulässigen Spannungen und Dehnungen frei gewählt. Für den Vergleich des mit der Methode ermittelten Beschleunigungsverlaufs des Impactors wird zusätzlich jeweils eine GM-Simulation mit GM- und DM-Aufbau erstellt. Diese beinhalten die gesamte Bauteilgeometrie und werden, bis nachdem Bauteilversagen auftritt, durchgeführt. Die zulässige Spannung der GM-Simulation mit GM-Aufbau beträgt in Faserrichtung  $430 \text{ N/mm}^2$  und die Dehnung  $0,75 \%$ . Um die Simulationen mit den unterschiedlichen Modellaufbauten miteinander vergleichen zu können, werden die Spannungen, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, mit dem Verhältnis der E-Module der Schalen-Elemente des GM- und DM-Aufbaus umgerechnet. Die Simulation mit der entwickelten Methode wird so lange gerechnet, bis das Materialversagen aus dem Beschleunigungsverlauf des Impactors ersichtlich ist. Die Wegvorgaberate der DM-Simulation und der Kontrollzeitschritt zur Überwachung von kritischen Werten in der GM-Simulation beträgt  $0,2 \text{ ms}$ .

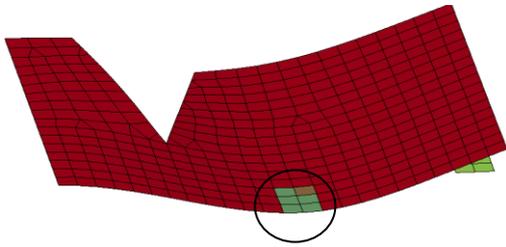
#### 6.1.1 Beschreibung des Ablaufs

Die GM-Simulation wird gestartet, bei  $13,6 \text{ ms}$  wird der erste kritische Bereich festgestellt und die Simulation unterbrochen. Der kritische Bereich liegt im mittleren Teil der Platte, wobei die unterste Lage am meisten belastet wird. Von diesem Bereich wird eine DM-Simulation erstellt. In dieser kommt es zu einem Versagen in der untersten Lage bei  $13,23 \text{ ms}$ . Die DM-Simulation wird gestoppt und die ermittelte Schädigung der Schalen-

Elemente wird an das GM bei 13,2 ms übertragen und weitergerechnet. Bei 13,6 ms wird ein neuer kritischer Bereich im GM festgestellt. Dieser tritt im Einspannungsbereich auf und betrifft die oberste Lage. Von diesem kritischen Bereich wird wiederum eine DM-Simulation erstellt, jedoch wird damit bis 13,6 ms kein Versagen festgestellt. Die GM-Simulation wird ohne Änderungen weitersimuliert und bei 13,8 ms unterbrochen, da erneut ein kritischer Bereich bei der Einspannung festgestellt wird. In der nachfolgenden DM-Simulation kommt es zu einem Versagen bei 13,7 ms. Die Schädigung wird an die GM-Simulation übertragen und bei 13,7 ms gestartet. Nach 0,2 ms werden erneut kritische Bereiche in der Plattenmitte und im Einspannbereich festgestellt, jedoch wird davon keine neue DM-Simulation erstellt. In Abbildung 6-1 ist die zeitliche Abfolge der Simulation des Lastfalls A mit der entwickelten Methode dargestellt.

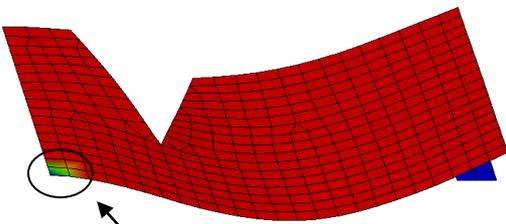
GM-Simulation	DM-Simulation des kritischen Bereichs
<p data-bbox="256 920 608 949"><u>1) Start der GM-Simulation</u></p> 	
<p data-bbox="256 1373 762 1435"><u>2) GM-Simulation wird bei 13,6 ms unterbrochen</u></p>  <p data-bbox="371 1731 632 1760">1. kritischer Bereich</p>	<p data-bbox="836 1373 1246 1402"><u>3) DM-Simulation bei 13,23 ms</u></p>  <p data-bbox="855 1731 1355 1760">Shells versagen in der untersten Lage</p>

4) GM-Simulation wird bei 13,2 ms neu gestartet



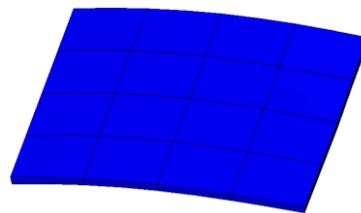
Materialanpassung im GM

5) GM-Simulation wird bei 13,6 ms unterbrochen



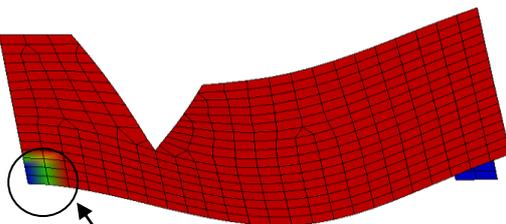
2. kritischer Bereich

6) DM-Simulation bei 13,6 ms



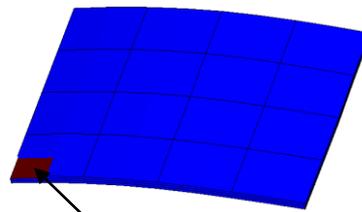
kein Versagen im DM bis 13,6 ms

7) GM-Simulation wird bei 13,8 ms unterbrochen



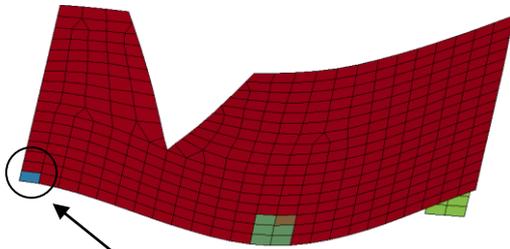
3. kritischer Bereich

8) DM-Simulation bei 13,7 ms



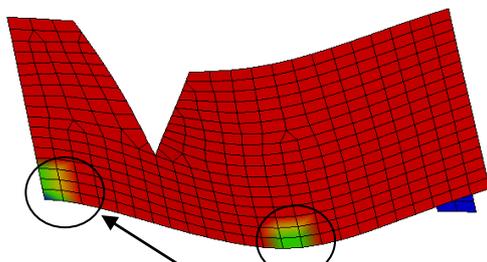
Shell versagt in der obersten Lage

9) GM-Simulation wird bei 13,7 ms  
neu gestartet



Materialanpassung im GM

10) GM-Simulation wird bei 13,9 ms  
unterbrochen

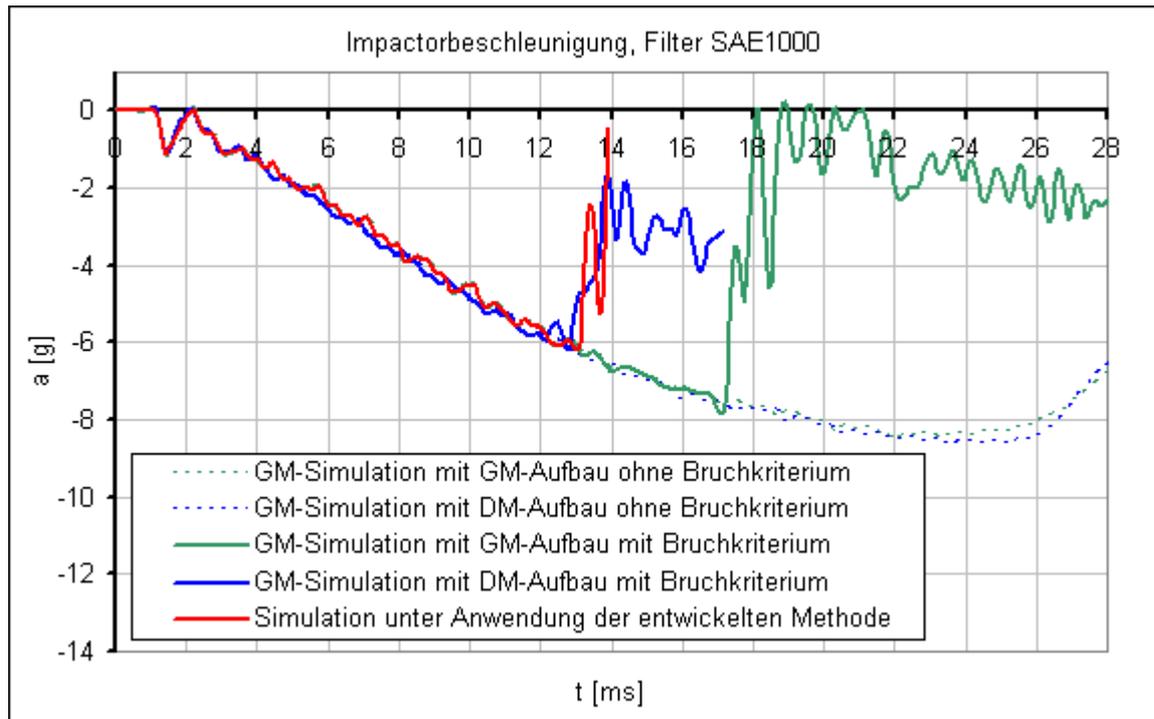


kritische Bereiche

Abbildung 6-1 Zeitliche Abfolge der Simulation des Lastfalls A mit der entwickelten Methode

### 6.1.2 Simulationsergebnis mit der entwickelten Methode

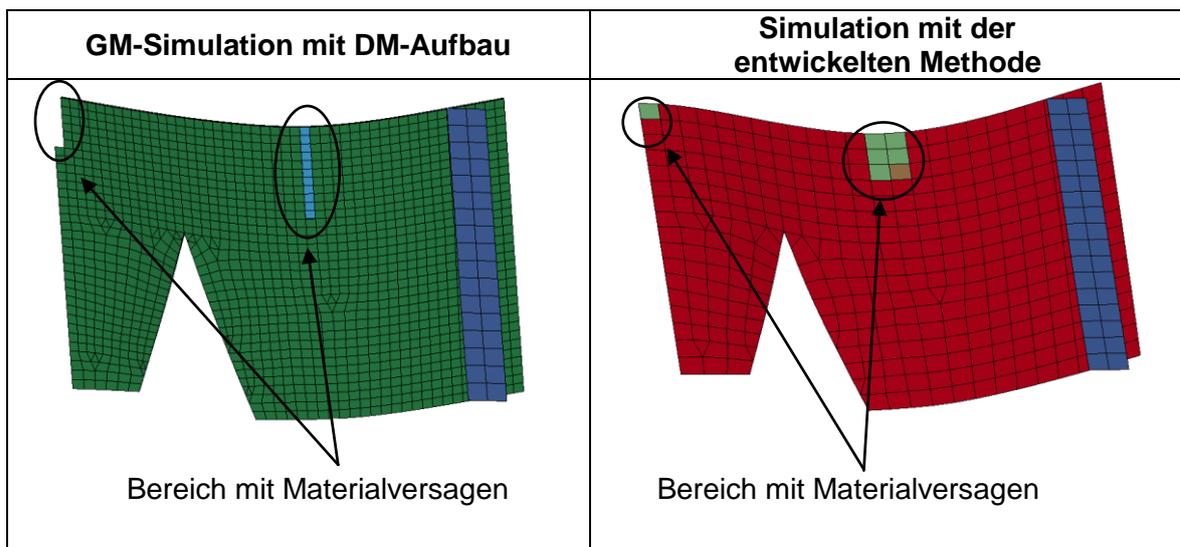
Abbildung 6-2 zeigt den Vergleich der Impactorbeschleunigung der Simulation unter Anwendung der entwickelten Methode.



**Abbildung 6-2 Impactorbeschleunigungen bei Lastfall A**

Das Materialversagen in der Platte ist durch den starken Einbruch im Beschleunigungsverlauf sehr gut erkennbar. Bei der GM-Simulation mit GM-Aufbau kommt es bei 17,2 ms und in der GM-Simulation mit DM-Aufbau bei 12 ms zu Materialversagen. Durch das feinere DM-Netz werden, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, die Bauteilspannungen besser aufgelöst. Dadurch werden in Bereichen mit hohen Belastungen die Spannungsspitzen genauer lokalisiert und die zulässigen Grenzwerte schneller erreicht. Dies spiegelt auch den zeitlichen Unterschied des Beschleunigungsabfalls aus der GM-Simulation mit GM- und DM-Aufbau wider. Der Beschleunigungsverlauf aus der Simulation, unter der Anwendung der entwickelten Methode, stimmt sehr gut mit dem aus der GM-Simulation mit DM-Aufbau überein. Weiters tritt der festgestellte Zeitpunkt des Materialversagens nur ein wenig später ein, als bei der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Daraus ist ersichtlich, dass speziell die Übergabe der Belastungen eines Teilbereichs im GM an das DM sehr gut funktioniert. Weiters wird das aus der DM-Simulation ermittelte Materialversagen in der Schalenebene sehr gut mit dem GM abgebildet. Dies zeigt der sofortige Abfall des

Beschleunigungsverlaufs nach dem ersten Übertragen der Schädigung aus der DM-Simulation an das GM bei 13,2 ms. Die mit der entwickelten Methode festgestellten Bereiche, in denen es zu Materialbruch kommt, entsprechen denen der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Sie sind jedoch in der GM-Simulation mit DM-Aufbau ein wenig größer. Für die genauere Untersuchung des zeitlichen Verlaufs des Materialversagens müsste die Simulation mit der entwickelten Methode länger gerechnet werden. Dies erfordert jedoch einen automatisierten Ablauf.



**Abbildung 6-3 Materialversagensbereiche bei Lastfall A**

Den größten Nutzen der entwickelten Methode zur Berechnung von FVW unter Berücksichtigung von Materialversagen stellt jedoch die Rechenzeiterparnis dar. Dies zeigt die Auswertung der notwendigen Rechenzeiten für die Simulationen:

- a) Simulation unter Anwendung der entwickelten Methode
- b) GM-Simulation mit GM-Aufbau mit Bruchkriterium
- c) GM-Simulation mit DM-Aufbau mit Bruchkriterium

Zum Vergleich werden die erforderlichen Rechenzeiten bis zur Simulationszeit von 0,7 ms nach dem ersten Materialversagen in der jeweiligen Simulation herangezogen. Die GM-Simulation mit DM-Aufbau erfordert die größte Rechenzeit, sie stellt 100 % dar. Die Simulation unter Anwendung der entwickelten Methode benötigt nur ca.  $\frac{1}{4}$  der Rechenzeit gegenüber der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Diese Reduzierung kommt durch die Ausnutzung der geringen erforderlichen Rechenzeiten mit dem GM-Aufbau zu Stande. Die Modellierung dieses einfachen Lastfalls kommt mit relativ wenigen Elementen aus.

Bei aufwändigeren Simulationen ist der Nutzen der entwickelten Methode dementsprechend größer.

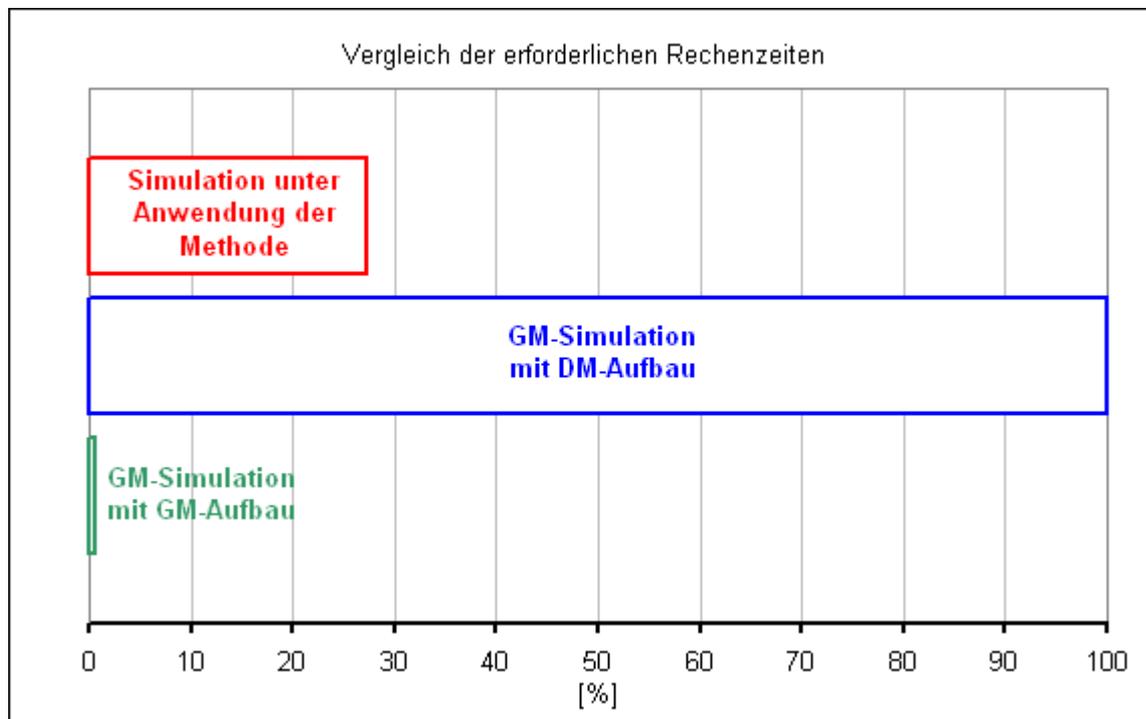
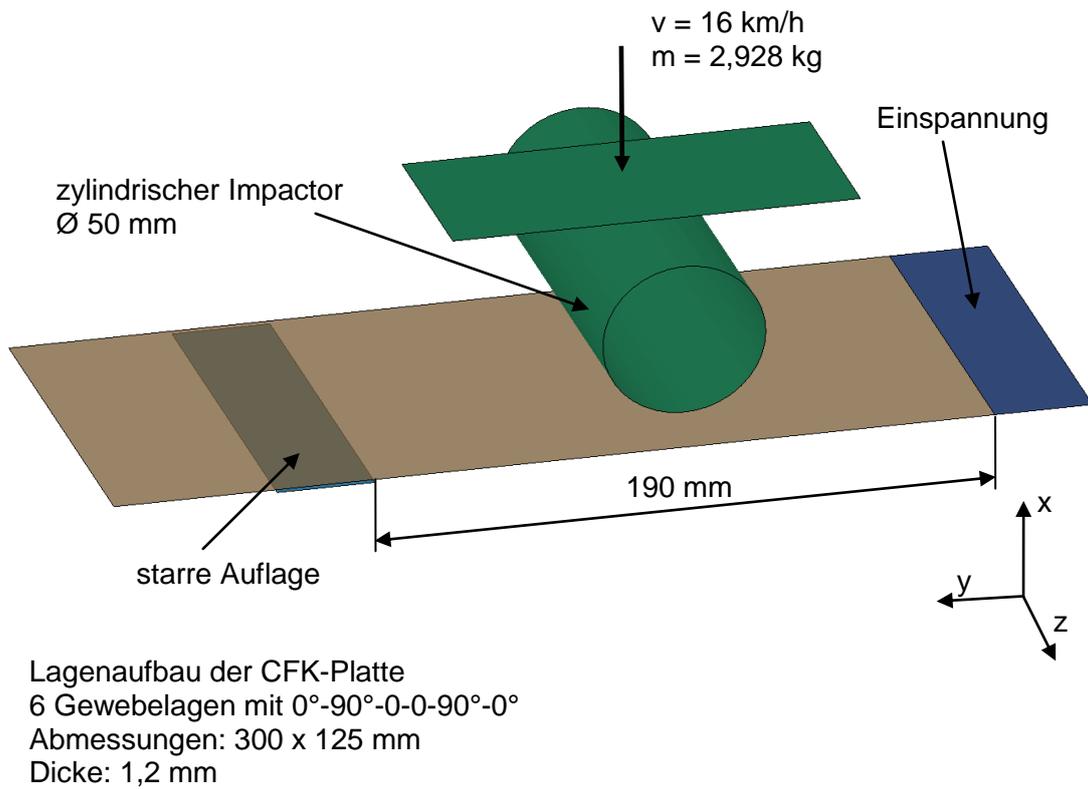


Abbildung 6-4 Vergleich der erforderlichen Rechenzeiten für den Lastfall A

## 6.2 Simulation des realen Fallturmversuchs

Bei diesem Versuch handelt es sich um einen Fallturmtest, der im Rahmen des Projekts zur Entwicklung einer Crashbox für Materialversuche durchgeführt wurde. Dabei wird eine ebene Platte (300 x 125 mm) aus 6 Lagen Karbon auf einer Seite fest eingespannt und auf der anderen Seite durch eine starre Auflage abgestützt. Der Abstand zwischen den beiden Lagern beträgt 190 mm. Die Platte wird durch einen in Fallrichtung geführten zylindrischen Impactor mit einer Masse von 2,9 kg und einer Auftreffgeschwindigkeit von 16 km/h belastet. Die Platte ist mit einem Lagenaufbau von 0°-90°-0°-0°-90°-0° aufgebaut. Ausgewertet wird die Beschleunigung des Impactors. Das verwendete Karbonmaterial ist im elastischen Bereich validiert, siehe Kapitel 4.1.3.



**Abbildung 6-5 Aufbau des realen Fallturmversuchs**

Im Versuch kommt es im Bereich der Einspannung bei ca. 23 ms zu Materialversagen. Der Bruch tritt dabei über die gesamte Plattenbreite auf. Die Fasern versagen jedoch nicht zur Gänze über die gesamte Plattendicke, sodass diese nicht in zwei Teile getrennt wird.



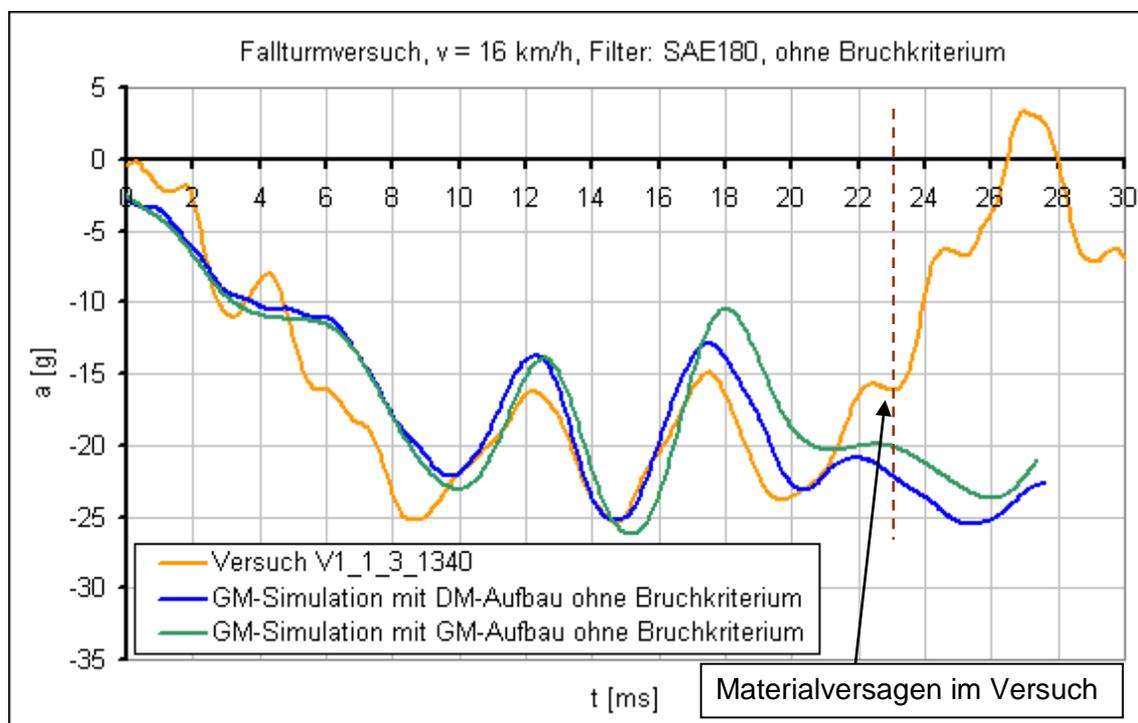
Bruch bei Einspannung



Bruchkante

**Abbildung 6-6 Karbonplatte nach dem Fallturmversuch**

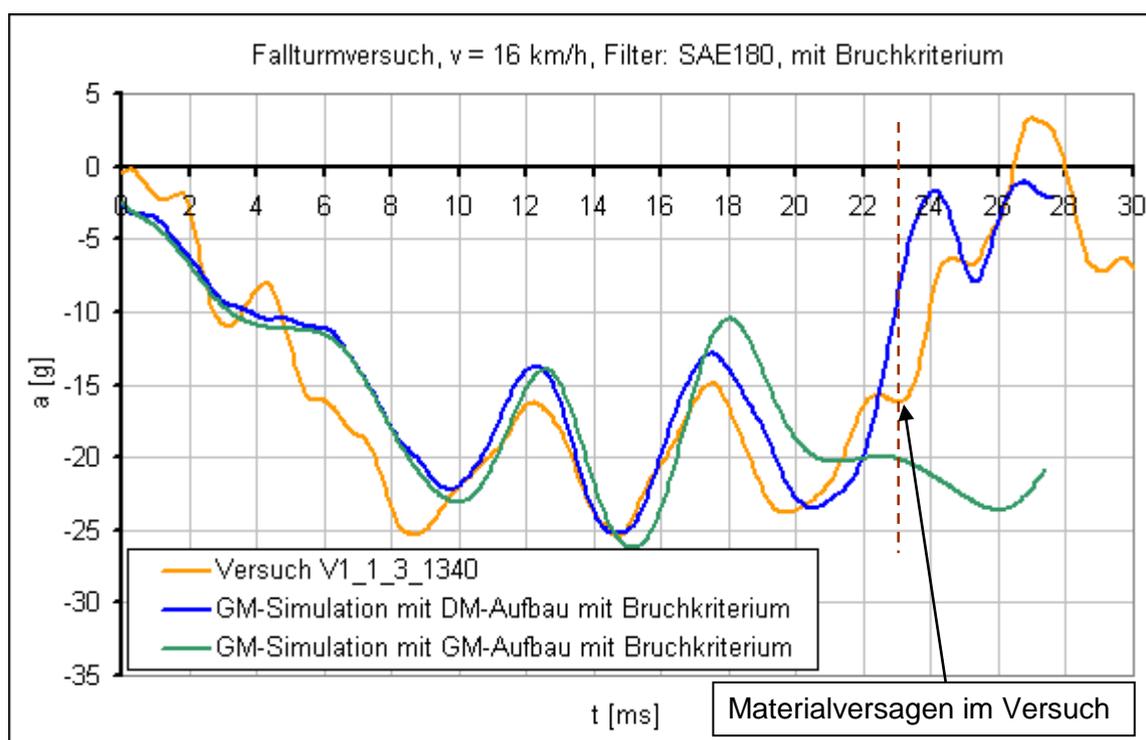
Dieser Versuch wird zuerst ohne Berücksichtigung von Materialversagen mit GM- und DM-Aufbau simuliert. Abbildung 6-7 zeigt die Auswertung des Beschleunigungsverlaufs des Impactors. Weiters ist noch der Zeitpunkt des Materialversagens im Versuch mit einer vertikalen Linie eingezeichnet. Der Versatz der Beschleunigungskurven aus der Simulation zum Zeitpunkt 0 kommt zustande, da der Impactor gegenüber dem Versuch bei Simulationsbeginn nahe an der Platte positioniert ist und das Beschleunigungssignal nur eine geringe Zeit vor dem Impact aufgezeichnet wird. Aufgrund der Filterung und Verschiebung des Beschleunigungsverlaufs zum Auftreffzeitpunkt des Impactors kommt es zu einem Versatz beim Zeitpunkt  $t = 0$ .



**Abbildung 6-7 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs**

Im nächsten Schritt wird das Materialversagen in der Simulation berücksichtigt. Dazu werden die zulässigen Werte für Spannungen und Dehnungen der Fasern bei der Simulation mit DM-Aufbau so lange verändert, bis der Bruchzeitpunkt mit dem Versuch übereinstimmt. Dabei kommt es in der Simulation – wie im Versuch – zum Materialbruch entlang der Einspannung. Das Bruchbild passt gut mit dem Versuch zusammen, der Bruchverlauf ist jedoch nicht mit dem Versuch validiert. Dies spielt jedoch zum Testen der entwickelten Methode keine Rolle. Für die Simulation mit GM-Aufbau werden die zulässigen Spannungen, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, mit dem Verhältnis der E-Module der Schalen-Elemente des GM- und DM-Aufbaus umgerechnet. Eine iterative Anpassung dieser Werte

bei der Simulation mit GM-Aufbau ergibt einen anderen Wert für die zulässigen Spannungen, da dabei das größere FE-Netz mitberücksichtigt wird. Dies hätte auch eine Verfälschung des direkten Vergleichs der Simulationen zur Folge. Schlussendlich werden für die DM-Simulation auch die Materialdaten der validierten GM-Simulation mit DM-Aufbau verwendet. Abbildung 6-8 zeigt die Beschleunigungsverläufe des Impactors mit Berücksichtigung von Materialversagen in der Simulation.

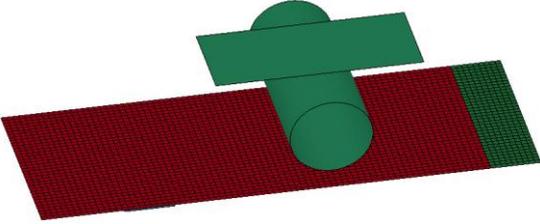


**Abbildung 6-8 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs unter Berücksichtigung von Materialbruch**

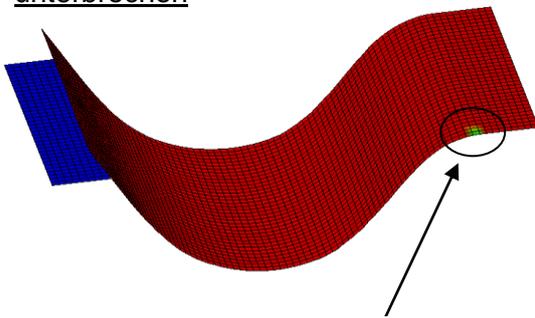
In der Simulation mit dem DM-Aufbau kommt es bei 22,35 ms zum ersten Materialversagen im Einspannungsbereich. Der Beschleunigungsverlauf konvergiert sehr gut mit dem Versuch. In der Simulation mit dem GM-Aufbau kommt es mit den vorgegebenen zulässigen Werten zu keinem Versagen in der Platte. Mit diesen ermittelten Materialdaten für das DM wird der Versuch, unter Anwendung der entwickelten Methode, simuliert. Die Wegvorgaberate der DM-Simulation und der Kontrollzeitschritt zur Überwachung von kritischen Werten in der GM-Simulation beträgt 0,2 ms. Bei diesem Lastfall kommt es in sehr kurzer Zeit zu einem großflächigen Materialversagen. Deshalb wird die im DM ermittelte Schädigung innerhalb eines Zeitintervalls von 0,05 ms zusammengefasst an das GM übertragen. Der Lastfall wird mit der entwickelten Methode so lange simuliert, bis das Materialversagen gut im Beschleunigungsverlauf ersichtlich ist.

### 6.2.1 Beschreibung des Ablaufs

Start der GM-Simulation: bei 23,75 ms wird der erste kritische Bereich festgestellt und die Simulation unterbrochen. Der kritische Bereich liegt am Rand der Platte bei der Einspannung. Es erfolgt eine DM-Simulation von diesem Bereich. Mit dieser wird ein Versagen in der obersten Lage am Rand der Platte bei 23,1 ms festgestellt. Dieses Versagen wird bei 23,05 ms auf das GM übertragen und die GM-Simulation bis zum nächsten Feststellen eines neuen kritischen Bereichs weitergerechnet. Stopp der GM-Simulation nach 0,2 ms, da ein neuer kritischer Bereich über die gesamte Plattenbreite bei der Einspannung festgestellt wird. Bei der anschließenden DM-Simulation von diesem Bereich kommt es bei 23,15 ms zu einem Versagen von mehreren Elementen. Dabei tritt ein Faserbruch über die gesamte Plattenbreite in der untersten Lage und ein Einriss an der oberen Seite der Platte im Einspannungsbereich auf. Das gesamte Versagen wird bei 23,1 an das GM übertragen und die GM-Simulation weitergeführt. Bei 23,3 ms wird ein neuerlicher kritischer Bereich bei der Einspannung festgestellt, jedoch wird davon keine neue DM-Simulation erstellt. In Abbildung 6-9 ist die zeitliche Abfolge der Simulation des Lastfalls mit der entwickelten Methode dargestellt.

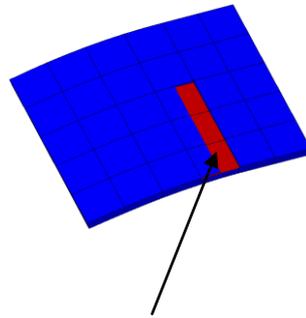
<b>GM-Simulation</b>	<b>DM-Simulation des kritischen Bereichs</b>
<p data-bbox="256 1227 608 1261">1) <u>Start der GM-Simulation</u></p> 	

2) GM-Simulation wird bei 23,75 ms unterbrochen



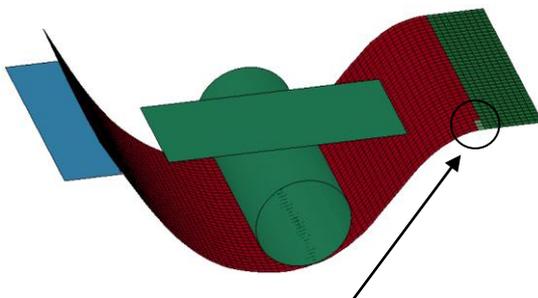
1. kritischer Bereich

3) DM-Simulation bei 23,1 ms



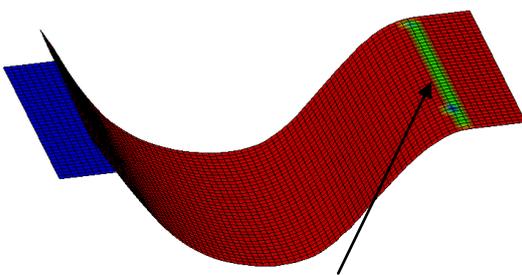
Shells versagen in der obersten Lage

4) GM-Simulation wird bei 23,05 ms neu gestartet



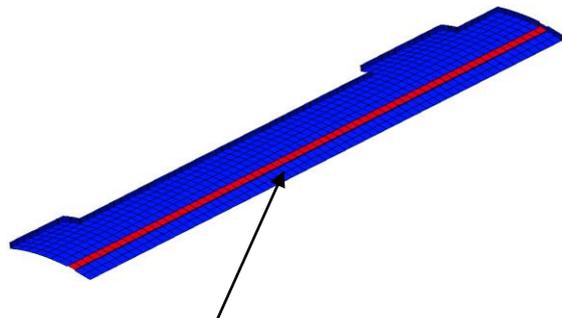
Materialanpassung im GM

5) GM-Simulation wird bei 23,25 ms unterbrochen

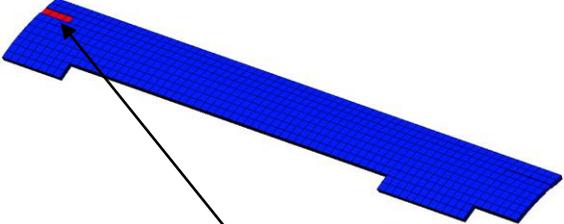
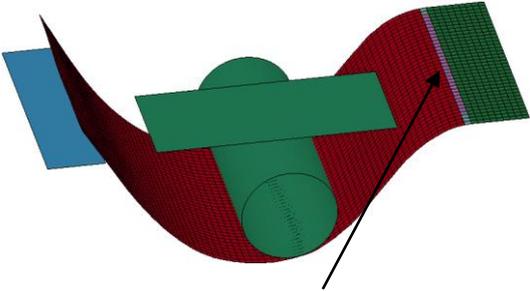
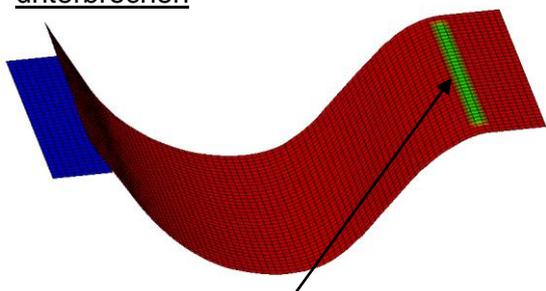


2. kritischer Bereich

6) DM-Simulation bei 23,15 ms



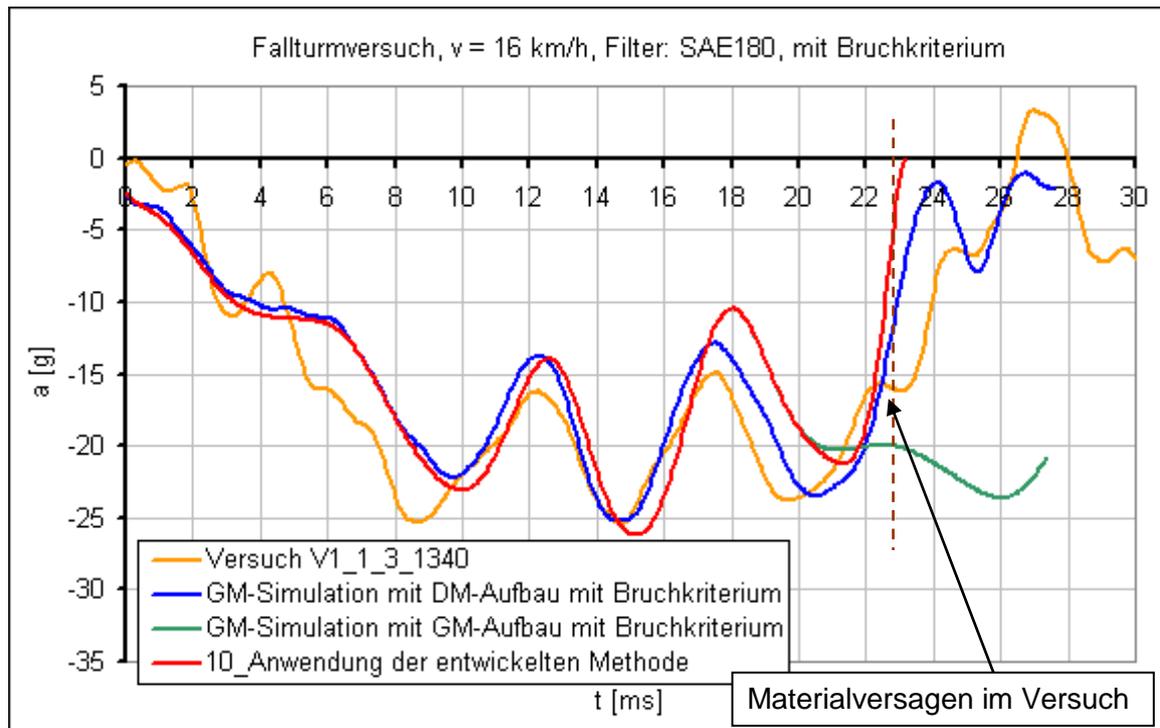
Shells versagen in der untersten Lage

	 <p>Shells versagen in der obersten Lage</p>
<p><u>9) GM-Simulation wird bei 23,1 ms neu gestartet</u></p>  <p>Materialanpassung im GM</p>	
<p><u>10) GM-Simulation wird bei 23,3 ms unterbrochen</u></p>  <p>3. kritischer Bereich</p>	

**Abbildung 6-9 Zeitliche Abfolge der Simulation des Fallturmversuchs mit der entwickelten Methode**

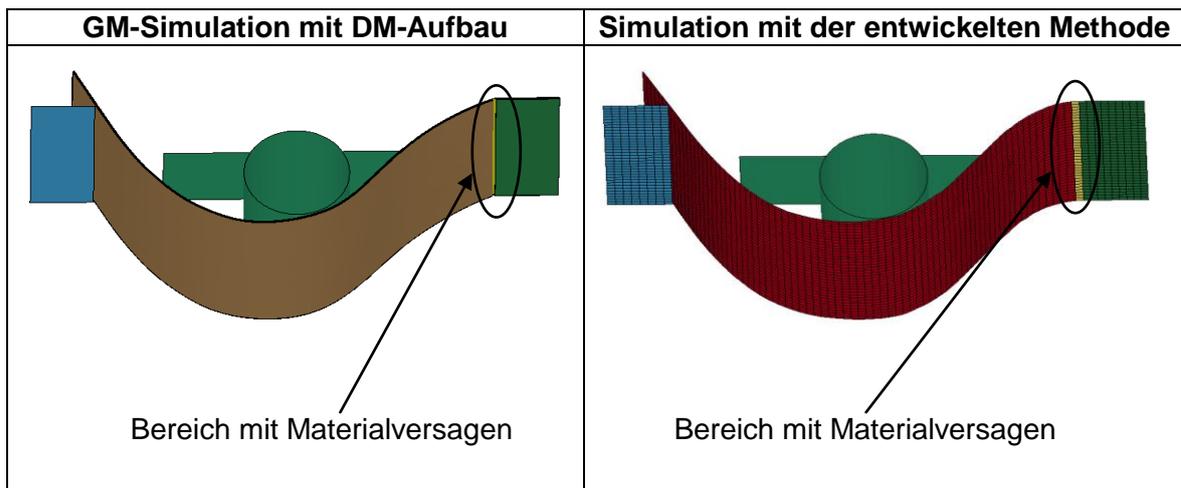
## 6.2.2 Simulationsergebnis mit der entwickelten Methode

Für den Vergleich der Simulationen werden die Beschleunigungsverläufe des Impactors ausgewertet.



**Abbildung 6-10 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs mit der entwickelten Methode**

Im Versuch beginnt die Platte bei ca. 23 ms im Einspannbereich zu brechen. Mit der GM-Simulation mit DM-Aufbau wird bei 22,35 ms und bei der Simulation unter Anwendung der entwickelten Methode bei 23,1 ms das erste Versagen im Einspannbereich festgestellt. Dies zeigt, dass der Zeitpunkt des ersten Materialversagens sehr gut bestimmt werden kann. Weiters stimmen die Bereiche, in denen es bei der Simulation mit der entwickelten Methode zu einem Materialversagen kommt, sehr gut mit denen der GM-Simulation mit DM-Aufbau überein. Für die genauere Untersuchung des zeitlichen Verlaufs des Materialversagens müsste die Simulation mit der entwickelten Methode länger gerechnet werden. Dies erfordert jedoch einen automatisierten Ablauf der entwickelten Methode.



**Abbildung 6-11 Materialversagensbereiche bei Fallturmversuch**

Die Auswertung der erforderlichen Rechenzeiten für die Simulationen zeigt die große Rechenzeiterparnis durch die Verwendung der entwickelten Methode. Dafür werden die notwendigen Rechenzeiten der GM-Simulation mit DM-Aufbau mit Bruchkriterium und der Simulation mit der entwickelten Methode miteinander verglichen. Die GM-Simulation mit GM-Aufbau wird dazu nicht herangezogen, da es dabei zu keinem Materialversagen kommt. Obwohl dies ein Lastfall mit einer geringen Anzahl von Elementen ist, sind die Rechenzeiten für die GM-Simulation mit DM-Aufbau schon sehr hoch. Zum Vergleich werden von den jeweiligen Simulationen die erforderlichen Rechenzeiten bis zur Simulationszeit von 0,25 ms nach dem ersten Materialversagen ausgewertet. Die GM-Simulation mit DM-Aufbau erfordert die größte Rechenzeit, sie stellt 100 % dar. Die Simulation unter Anwendung der entwickelten Methode hingegen benötigt knapp 90 % weniger Rechenzeit. Gerade bei der Bestimmung des Bruchzeitpunkts in einem Bauteil aus Faserverbundwerkstoffen oder auch bei der Materialvalidierung ist diese Rechenzeiterparnis von großer Bedeutung. Somit sind Lastfälle mit einem detaillierten FE-Modell zur Bestimmung von Materialversagen mit den jetzigen Rechenkapazitäten in geringen bzw. zufriedenstellenden Rechenzeiten durchführbar.

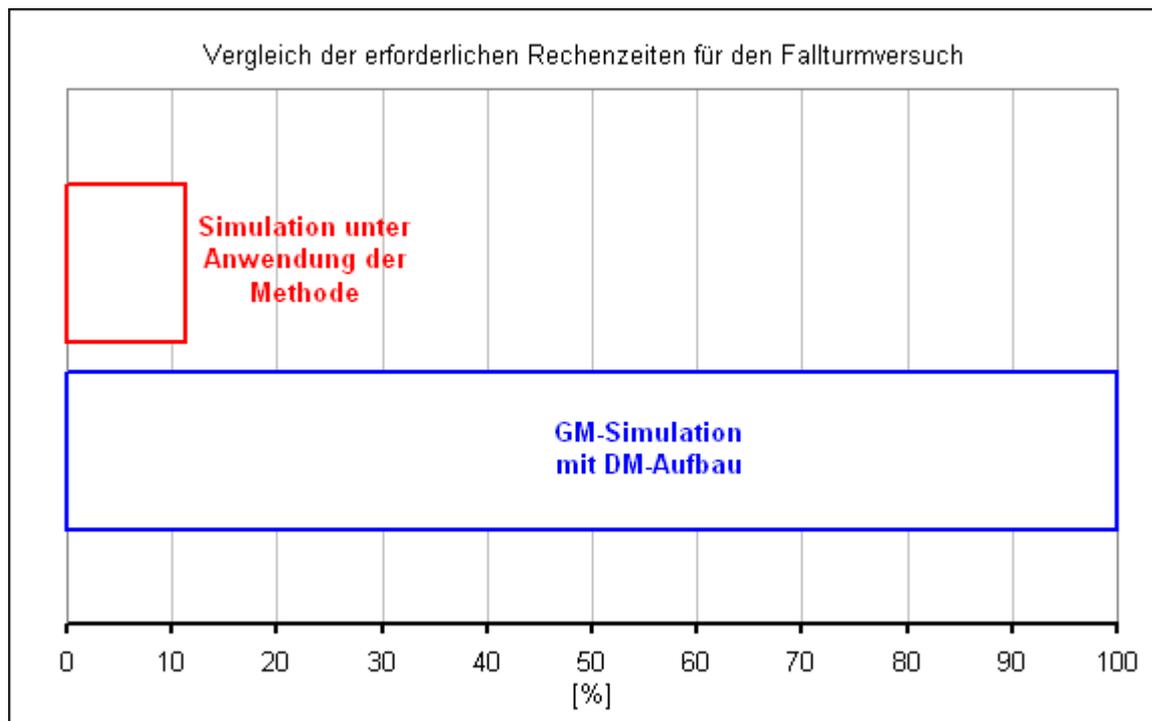


Abbildung 6-12 Vergleich der erforderlichen Rechenzeiten für den Fallturmversuch

### 6.3 Zusammenfassung zur Simulation der Lastfälle

Die Simulation der Lastfälle mit der entwickelten Methode hat in beiden Fällen gezeigt, dass der Bruchzeitpunkt und auch der ermittelte Versagensbereich sehr gut mit der GM-Simulation mit DM-Aufbau übereinstimmen. Weiters konvergieren die mit der entwickelten Methode ermittelten Impactorbeschleunigungsverläufe sehr gut mit dem Versuch bzw. der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Die DM-Simulation und die anschließende GM-Simulation bei der entwickelten Methode zeigen sich im Verformungsverhalten ein wenig zu weich, da der versagende Bereich kleiner ist und der ermittelte Bruchzeitpunkt später auftritt als der bei der GM-Simulation mit DM-Aufbau. Diese Situation kann sicherlich mit einem validierten DM und einer validierten Übergabe der Schädigung vom DM an das GM verbessert werden. Diese beiden Einflussfaktoren werden hierbei durch prinzipielle Lösungsansätze abgebildet – deren Entwicklung wurde in dieser Arbeit jedoch nicht angestrebt. Der große Nutzen der Rechenzeiterparnis mit der entwickelten Methode ist aber bei beiden Anwendungen sehr gut ersichtlich. Obwohl in beiden Lastfällen der faserverstärkte Bauteil mit relativ wenigen Elementen abgebildet wird, ergibt sich eine Rechenzeiterparnis von mindestens 75 %. Bei aufwändigeren Simulationen ist der Nutzen der entwickelten Methode von noch größerer Bedeutung.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich sowohl durch ihre spezifischen Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit und Festigkeit, als auch durch ihr hohes spezifisches Energieabsorptionsvermögen aus. Deshalb wird im Bereich der Verkehrstechnik seit einigen Jahren vermehrt auf Faserverbundwerkstoffe gesetzt, speziell bei der Anwendung als Crashelemente. Zurzeit werden kohlefaserverstärkte Kunststoffe hauptsächlich für Fahrzeuge in höheren Preissegmenten verwendet. Durch die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien kommt der Werkstoff jedoch immer mehr zum Einsatz. Die Auslegung von Bauteilen – besonders von Crashelementen aus Faserverbundwerkstoffen – erfolgt aktuell aufgrund fehlender effizienter Simulationsmethoden auf Basis von Erfahrungswerten und Versuchen. Die Abbildung der anisotropen Bauteilsteifigkeiten ohne Materialversagen ist mit der FE-Methode sehr gut möglich, hingegen ist die Simulation von Crashmechanismen noch nicht ausreichend geklärt.

Zur Abbildung und Analyse der einzelnen Versagensmechanismen in der FE-Simulation ist ein detaillierter Modellaufbau der einzelnen Lagen erforderlich. Dies hat einen sehr hohen Rechenaufwand zur Folge, sodass eine detaillierte FE-Analyse von Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen mit den jetzigen Rechenkapazitäten nicht in zufriedenstellenden Rechenzeiten durchführbar ist. Aus dieser Problematik heraus entstand diese Arbeit mit dem Ziel: Entwicklung einer Methode, um bei impactbelasteten kohlefaserverstärkten Bauteilen mit Hilfe der FE-Berechnung mit dem expliziten FE-Solver LS-DYNA Bauteilversagen im Schichtverbund in akzeptablen Rechenzeiten abbilden zu können. Die Methode basiert auf der Verwendung von zwei gekoppelten Modellen: einem Gesamtmodell und einem Detailmodell. Mit dem Gesamtmodell wird der gesamte Lastfall abgebildet sowie die Bauteilverformung ermittelt. Das Detailmodell dient zur genaueren Untersuchung von Materialversagen in kritischen Bereichen. Bei der Gesamtmodell-Simulation ist der zu untersuchende Bauteil mit einem vereinfachten Modellansatz für Faserverbundwerkstoffe abgebildet. Mit diesem ist es möglich, die Steifigkeit und somit die Verformung des Bauteils ohne Materialversagen in der Simulation sehr gut abzubilden. Wird in der Gesamtmodell-Simulation ein kritischer Belastungszustand, wie z.B. eine kritische Spannung, der auf ein mögliches Materialversagen in einem Bereich des Bauteils hinweisen könnte, festgestellt, wird diese Simulation unterbrochen. In der anschließenden lokal begrenzten Detailmodell-Simulation wird dieser Bereich auf ein mögliches Versagen hin untersucht. Dazu wird der kritische Bereich des kohlefaserverstärkten Bauteils mit einem

feineren FE-Netz und mit einem detaillierten Modellierungsansatz für den Lagenaufbau abgebildet. Mit diesem Ansatz ist es möglich intra- und interlaminare Fehler im kohlefaserverstärkten Bauteil getrennt voneinander abzubilden und somit eine genaue Versagensanalyse durchzuführen. Weiters werden die Bauteilgeometrie durch ein feineres FE-Netz bei der Detailmodell-Simulation genauer abgebildet und somit Spannungsspitzen genauer lokalisiert. Die in der Gesamtmodell-Simulation ermittelten Belastungen werden an das Detailmodell durch die Weitergabe der Verformungen übergeben. Dazu werden die Knotenverschiebungen des Bauteils bei der Gesamtmodell-Simulation in einem bestimmten Zeitintervall abgespeichert. Diese Verformung über die Zeit wird dem Detailmodell durch die sogenannte neutrale Lage in der Mitte des Lagenaufbaus vorgegeben. Kommt es in der Detailmodell-Simulation zu einem Materialversagen, wird diese gestoppt und das Versagen wird an das Gesamtmodell übertragen. Dies erfolgt durch eine Änderung der Materialeigenschaften im Gesamtmodell bei den entsprechenden Zeiten und Bereichen. Anschließend wird die Gesamtmodell-Simulation weitergerechnet, bis neuerlich eine kritische Belastung im Bauteil auftritt. Dieser Ablauf wiederholt sich solange, bis das vorgegebene Simulationsende erreicht wird. Somit ist es möglich, die Bauteilbelastungen und das Materialversagen möglichst genau zu ermitteln, ohne dass ein detailliertes Gesamtmodell verwendet wird – mit den damit einhergehenden hohen Rechenzeiten.

Obwohl die in dieser Arbeit simulierten Lastfälle mit einer relativ geringen Anzahl von Elementen abgebildet werden können, ergibt sich bei der Verwendung der entwickelten Methode eine Rechenzeiterparnis von mindestens 75 % gegenüber der Gesamtmodell-Simulation mit detailliertem Modellaufbau. Dadurch wird es in Zukunft möglich – mithilfe weiterführender Untersuchungen – aufwändige Simulationen, wie z.B. Gesamtfahrzeugsimulationen, bei denen Bauteilversagen von faserverstärkten Kunststoffen mit einem detaillierten Modellaufbau abgebildet werden soll, in akzeptablen Zeiten durchzuführen. So werden durch die Rechenzeiteinsparung mit der entwickelten Methode gewisse Simulationsthemen überhaupt erst möglich und durchführbar.

Die bisherigen Simulationen mit der Anwendung der entwickelten Methode haben gezeigt, dass die Übergabe der Belastung des Bauteils von der Gesamtmodell- an die Detailmodell-Simulation mittels Vorgabe der Verformungen sehr gut funktioniert. Zudem gelingt auch die Übergabe der ermittelten Schädigung in der Detailmodell- an die Gesamtmodell-Simulation durch die Änderung der Materialeigenschaften der entsprechenden Lage im Gesamtmodell sehr gut. Somit können Zeitpunkt des Materialversagensbeginns und auch Bereiche in denen Materialversagen auftritt mit der entwickelten Methode sehr

zufriedenstellend bestimmt werden. Lediglich die Größe der festgestellten Bruchstellen ist kleiner, als jene, die bei der Gesamtmodell-Simulation mit Detailmodell-Aufbau auftreten. Zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Methode müssen daher das Detailmodell und die Übergabe der Schädigung des Detailmodells an das Gesamtmodell durch Materialversuche von kohlefaserverstärkten Bauteilen noch weiter untersucht werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz für den Detailmodell-Aufbau hat gezeigt, dass sich dieser zum Abbilden von Materialversagen und für eine Weiterentwicklung gut eignet. Dieser Modellierungsansatz zeichnet sich besonders durch getrennte Abbildbarkeit intra- und interlaminarer Fehler sowie durch die Stabilität der Simulation bei großen Verformungen aus.

Zur effizienten Anwendung und Weiterentwicklung der Methode muss der Ablauf im nächsten Schritt automatisiert werden. Bereits bei der Methodenentwicklung im Rahmen dieser Arbeit wurde darauf geachtet, dass die Automatisierung und Programmierung einzelner Vorgänge möglichst einfach durchzuführen sind.

Die Methode ist für die Simulation von Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen entwickelt worden, jedoch kann diese durch geringe Abänderungen auch für die Analyse von Bauteilen aus isotropen Materialien verwendet werden. Ein Anwendungsbeispiel dafür ist die Free-Motion-Headform-Simulation. Darunter versteht man gesetzliche Überprüfungen des Fahrzeuginnenraums. Bei derartigen Lastfällen kommt es oft zum Versagen an Rippen von Verkleidungsteilen im Fahrzeuginnenen. Dabei stellt sich die Problematik, dass die Rippen aufgrund des globalen Zeitschritts nicht ausreichend fein vernetzt werden können und somit die Geometrie, die auftretenden Spannungen und eine etwaige Rissbildung nicht genau genug abgebildet werden können. Eine Abhilfe kann durch die Anwendung der entwickelten Methode geschaffen werden. Somit ergibt sich für diese künftig ein großes Anwendungsspektrum.

## Literaturverzeichnis

Buch:

Beitz, Wolfgang. und Grote Karl-Heinz: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 2001

Flemming, Manfred: Faserverbundbauweisen, Springer Verlag, 2003

Fröhlich, Peter: FEM-Anwendungspraxis: Einstieg in die Finite Elemente Analyse Deutsch/Englisch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2005

Groth, Peter: FEM-Anwendungen: Statik-, Dynamik- und Potenzialprobleme mit professioneller Software lösen, Springer Verlag, 2001

Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS´S MANUAL VOLUME 1 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007

Hallquist, John: LS-DYNA KEYWORD USERS´S MANUAL VOLUME 2 Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007

Hallquist, John: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006

Klein, Bernd: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Springer Verlag, 2007

Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer Verlag, 2007

Janda, Ralf: Kunststoffverbundsysteme, VCH Verlagsgesellschaft, 1990

Radaj, Dieter und Vormwald, Michael: Ermüdungsfestigkeit, Springer Verlag, 2007

Artikel aus einem Fachmagazin:

Gebhardt, Christof: Finite Elemente in der Produktentwicklung, In: CAD WORLD, März 1999, S. 38

Artikel aus einem Tagungsband:

Adamski, Pawel u. Eisenhans, Herbert: Untersuchungen zur Modellierung von Strukturen aus FKV unter Crashbelastung mit Hilfe von Mehrschalenmodellierungen, In: 7. LS-DYNA Anwenderforum, 2008, Bamberg

Holzapfel, Martin: Numerische Nachbildung der Crashfront von faserverstärkten Strukturen mit Hilfe von Mehrschalenmodellen, In: 6. LS-DYNA Anwenderforum, 2007, Frankenthal

Middendorf, Peter: Composites – Materialmodellierung und Anwendungen im Flugzeugbau, In: 3. LS-DYNA Anwenderforum, 2004, Bamberg

Moncayo, David: Einleitung in die technische Berechnung von Faserverbundstrukturen, DYNAMore GmbH, 2007, Stuttgart

Dissertation:

Kärker, Luise: Effiziente Simulation von Schlagschädigungen in Faserverbund-Sandwichstrukturen, TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2007

Morthorst, Marion: Modellierung des Crashverhaltens konischer Faserverbundstrukturen, TU Braunschweig, Dissertation, 2007

Aus dem Internet:

Audi Pressemitteilung, Verfügbar unter: [https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/presskit/2009/09/11/leichtbau/strategische\\_ausrichtung.standard.gid-oeffentlichkeit.html](https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/presskit/2009/09/11/leichtbau/strategische_ausrichtung.standard.gid-oeffentlichkeit.html), [Datum des Zugriffs: 30.10.2009]

LS-DYNA Support, Verfügbar unter: <http://www.DYNAsupport.com/howtos/contact/tied-tied-offset-and-tiebreak-contacts/?searchterm=constraint%20based> [Datum des Zugriffs: 22.12.2009]

Speed-magazin.de, Verfügbar unter: <http://www.speed-magazin.de/index.php?topic=news/story&ID=18617&serie=tuning>, [Datum des Zugriffs: 29.10.2009]

Volkswagen Media Service, Verfügbar unter: [https://www.volkswagen-media-services.com/medias\\_publish/ms/content/de/pressemitteilungen/2009/09/15/auf\\_den\\_punkt\\_durchbruch.standard.gid-oeffentlichkeit.html](https://www.volkswagen-media-services.com/medias_publish/ms/content/de/pressemitteilungen/2009/09/15/auf_den_punkt_durchbruch.standard.gid-oeffentlichkeit.html), [Datum des Zugriffs: 29.10.2009]

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Probekörper für Stauchversuch mit dynamischer Stauchlastkurve	2
Abbildung 2-2 Dichtevergleich verschiedener Konstruktionswerkstoffe bezogen auf Stahl	3
Abbildung 2-3 Spezifische Materialkennwerte - unidirektional faserverstärkte Polymere im Vergleich zu Metallen	4
Abbildung 2-4 Aufbau eines Mehrschichtverbundes	5
Abbildung 2-5 Versagensformen von Faserverbundlaminaten aus UD-Schichten	7
Abbildung 3-1 Elemente in LS-DYNA	10
Abbildung 3-2 Makromodell des Laminataufbaus	11
Abbildung 3-3 Mesomodell des Laminataufbaus	11
Abbildung 3-4 Homogenisierungsmöglichkeit 1 eines Mehrschichtverbundes	12
Abbildung 3-5 Homogenisierungsmöglichkeit 2 eines Mehrschichtverbundes	13
Abbildung 3-6 Homogenisierungsmöglichkeit 3 eines Mehrschichtverbundes	14
Abbildung 3-7 Beispiel eines $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramms	17
Abbildung 3-8 Auswertung des Fallturmversuchs mit 11 km/h von Simulation und Versuch, Beschleunigung über die Zeit	18
Abbildung 3-9 Auswertung des Fallturmversuchs mit 11 km/h von Simulation und Versuch, Beschleunigung über den Impactorweg	19
Abbildung 3-10 Spannungsauswertung in der Nietbrücke mit einer h- und p-Version	21
Abbildung 3-11 Lastfall zur Untersuchung des Einflusses der Elementkantenlänge	22
Abbildung 3-12 Vergleich der maximalen Spannungen in Abhängigkeit der Elementkantenlänge	23
Abbildung 3-13 Spannungsvergleich zweier unterschiedlicher Netzgrößen bei 6 ms, Winkel mit Ausnahme	24
Abbildung 3-14 Einfluss der Elementkantenlängen bei einer Crashanalyse mit Materialversagen	27
Abbildung 4-1 Lastfall A zur Entwicklung eines DM	30
Abbildung 4-2 Beschreibung des Kontaktverhaltens der verwendeten Klebeverbindung	32
Abbildung 4-3 Beispiel einer normierten Kraftübertragungs-Ablöse-Kurve zur Beschreibung der Delamination mittels kohäsiver Elemente	34
Abbildung 4-4 Modellierung des Schichtaufbaus für das DM	35
Abbildung 4-5 DM-Validierung, Impactorbeschleunigung über Zeit	36
Abbildung 4-6 DM-Validierung, Impactorbeschleunigung über die Verformung	37
Abbildung 5-1 Grundschemata der Methode	39

Abbildung 5-2 Methodenablauf auf zwei unterschiedlichen Zeitachsen _____	42
Abbildung 5-3 Notwendige Teilprozesse zur Realisierung des Methodenablaufs _____	43
Abbildung 5-4 Teilprozess 1: Überwachen der GM-Simulation auf kritische Werte ____	44
Abbildung 5-5 Prozessablauf zur Feststellung kritischer Werte während der GM- Simulation _____	46
Abbildung 5-6 Teilprozess 2: Übergabe der ermittelten Belastung an das DM _____	47
Abbildung 5-7 Lastfall B, Testen der Lastübergabe durch Vorgabe der Verschiebung__	48
Abbildung 5-8 Spannungsvergleich: Belastung durch den Impactor und Vorgabe der Knotenverschiebungen _____	48
Abbildung 5-9 Vergleich der plastischen Dehnung: Belastung durch den Impactor und Vorgabe der Knotenverschiebungen _____	49
Abbildung 5-10 Teilprozess 3: Erstellung des DM _____	50
Abbildung 5-11 Verbesserte Abbildung der Bauteilgeometrie durch ein feines DM-Netz	51
Abbildung 5-12 Netzdarstellungen für die Untersuchung der DM-Erstellung _____	51
Abbildung 5-13 Lastfall zum Vergleich der untersuchten Möglichkeiten zur Verbesserung des DM-Verformungsverhaltens _____	52
Abbildung 5-14 Auswertung der Von-Mises-Spannung bei 6 ms _____	53
Abbildung 5-15 Prinzip zur Verbesserung des Verformungsverhalten des DM bei Vorgabe der Verformungen _____	54
Abbildung 5-16 Auswertung der Spannungen _____	54
Abbildung 5-17 Übersicht der Knoten für die Beschleunigungsauswertung _____	55
Abbildung 5-18 Auswertung von Knotenbeschleunigungen unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz _____	56
Abbildung 5-19 Auswertung der Spannungen mit Dämpfung der freien Knoten _____	57
Abbildung 5-20 Auswertung von Knotenbeschleunigungen unter Anwendung des Prinzips der Wegvorgabe der GM-Knoten am DM-Netz mit Dämpfung _____	57
Abbildung 5-21 Fourieranalyse zweier benachbarter Knoten mit und ohne Wegvorgabe und ohne globale Dämpfung _____	58
Abbildung 5-22 Fourieranalyse zweier benachbarter Knoten mit und ohne Wegvorgabe und mit optimierter globaler Dämpfung _____	59
Abbildung 5-23 Aufbau der DM-Simulation mit Möglichkeit 1 _____	60
Abbildung 5-24 Prinzipaufbau des DM mit der neutralen Lage _____	61
Abbildung 5-25 Prinzipaufbau zur Untersuchung der Klebekontakte _____	62
Abbildung 5-26 Auswertung der Von-Mises-Spannung der Basissimulation und der Simulation mit Klebekontakt _____	63

Abbildung 5-27 Auswertung der plastischen Dehnung der Basissimulation und der Simulation mit Klebekontakt _____	63
Abbildung 5-28 Teilprozess 4: Übertragung der Schädigung an das GM _____	64
Abbildung 5-29 Lastfall zur Untersuchung von Versagen in der Schalenebene _____	65
Abbildung 5-30 Modellaufbau zur Untersuchung von Versagen in der Schalenebene ____	66
Abbildung 5-31 Erforderliche Kräfte für Zugversuch mit GM und DM-Aufbau _____	66
Abbildung 5-32 DM zur Faserbruchuntersuchung _____	67
Abbildung 5-33 Kraftauswertung der Faserbruchuntersuchung mit DM-Aufbau _____	68
Abbildung 5-34 Anpassung der Materialeigenschaften im GM bei Versagen einer Lage	69
Abbildung 5-35 Faserbruchvalidierung der FB-Modelle 1 und 3 _____	69
Abbildung 5-36 Faserbruchvalidierung der FB-Modelle 2 und 4 _____	70
Abbildung 5-37 Lastfall zur Untersuchung von Delamination _____	71
Abbildung 5-38 GM-Aufbau zur Abbildung von Delamination _____	71
Abbildung 5-39 Vergleich der Beschleunigungen mit verschiedenen GM-Aufbauten ____	72
Abbildung 5-40 Modellaufbau zur Untersuchung von Delamination _____	72
Abbildung 5-41 Erforderliche Energien für Biegeversuch mit GM- und DM-Aufbau ____	73
Abbildung 5-42 Übersicht der DM zur Delaminationsuntersuchung _____	74
Abbildung 5-43 Auswertung der Delaminationsuntersuchung anhand des DM-Aufbaus	74
Abbildung 5-44 Anpassung der Materialeigenschaften im GM bei Delamination _____	75
Abbildung 5-45 Delaminationsvalidierung der DL-Modelle 1 und 2 _____	75
Abbildung 5-46 Teilprozess 5: Restart einer gestoppten Simulation _____	76
Abbildung 5-47 Lastfall zum Testen der Restart-Simulationen _____	77
Abbildung 5-48 Beschleunigungsauswertung der Restart-Simulationen _____	79
Abbildung 5-49 Auswertung der Spannung in der Elementebene der Basissimulation und der Restart-Simulation Teil 2 _____	80
Abbildung 5-50 Auswertung der Dehnung in Längsrichtung der Basissimulation und der Restart-Simulation Teil 2 _____	80
Abbildung 5-51 Spannungsvergleich in y-Richtung in der oberen Lage _____	82
Abbildung 5-52 Spannungsvergleich in y-Richtung in der unteren Lage _____	82
Abbildung 5-53 Spannungsvergleich in y-Richtung in der oberen Lage unter Berücksichtigung der Einspannung _____	83
Abbildung 5-54 Spannungsvergleich in y-Richtung in der unteren Lage unter Berücksichtigung der Einspannung _____	84
Abbildung 5-55 Einfluss der Reibung bei Impactorbeschleunigung über die Zeit _____	86
Abbildung 5-56 Einfluss der Reibung bei Impactorbeschleunigung über die Verformung	87
Abbildung 5-57 Erster kritischer Bereich im GM mit dazugehörigem DM _____	89

Abbildung 5-58 Modellaufbau des DM zum Testen der Methode _____	89
Abbildung 5-59 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 1 bei 9 ms_____	90
Abbildung 5-60 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 1 bei 11 ms_____	90
Abbildung 5-61 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 2 bei 9 ms_____	91
Abbildung 5-62 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 2 bei 11 ms_____	91
Abbildung 5-63 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 3 bei 9 ms_____	92
Abbildung 5-64 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 3 bei 11 ms_____	92
Abbildung 5-65 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 4 bei 9 ms_____	93
Abbildung 5-66 Spannungsvergleich des kritischen Bereichs in Lage 4 bei 11 ms_____	93
Abbildung 6-1 Zeitliche Abfolge der Simulation des Lastfalls A mit der entwickelten Methode _____	99
Abbildung 6-2 Impactorbeschleunigungen bei Lastfall A_____	100
Abbildung 6-3 Materialversagensbereiche bei Lastfall A_____	101
Abbildung 6-4 Vergleich der erforderlichen Rechenzeiten für den Lastfall A _____	102
Abbildung 6-5 Aufbau des realen Fallturmversuchs _____	103
Abbildung 6-6 Karbonplatte nach dem Fallturmversuch _____	103
Abbildung 6-7 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs _____	104
Abbildung 6-8 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs unter Berücksichtigung von Materialbruch _____	105
Abbildung 6-9 Zeitliche Abfolge der Simulation des Fallturmversuchs mit der entwickelten Methode _____	108
Abbildung 6-10 Impactorbeschleunigungen des Fallturmversuchs mit der entwickelten Methode _____	109
Abbildung 6-11 Materialversagensbereiche bei Fallturmversuch _____	110
Abbildung 6-12 Vergleich der erforderlichen Rechenzeiten für den Fallturmversuch ____	111

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1 Inhalt der History-Variablen _____	45
Tabelle 5-2 Beschreibung der Restart-Simulationen _____	79
Tabelle 5-3 Vergleich der DM-Simulationen mit verschiedenen Wegvorgaberaten ____	85
Tabelle 5-4 Vergleich der Simulationen mit Reibung und ohne Reibung zwischen Impactor und Platte _____	88
Tabelle 5-5 Vergleich der maximalen Spannungen des kritischen Bereichs bei 9 ms, Spannungen in N/mm <sup>2</sup> _____	94
Tabelle 5-6 Vergleich der maximalen Spannungen des kritischen Bereichs bei 11 ms, Spannungen in N/mm <sup>2</sup> _____	94

## Formelverzeichnis

Formel 3-1 Berechnung des Fehlerkriteriums für Faserzugbeanspruchung nach CHANG/CHANG _____	16
Formel 3-2 Berechnung des Fehlerkriteriums für Faserdruckbeanspruchung nach CHANG/CHANG _____	16
Formel 3-3 Berechnung des Fehlerkriteriums für Matrixzugbeanspruchung nach CHANG/CHANG _____	16
Formel 3-4 Berechnung des Fehlerkriteriums für Matrixdruckbeanspruchung nach CHANG/CHANG _____	16
Formel 3-5 Berechnung des kritischen Zeitschritts in LS-DYNA _____	26
Formel 3-6 Berechnung der Schallgeschwindigkeit in einem Shell-Element _____	26
Formel 4-1 Berechnung des Fehlerkriteriums in spannungs- und kraftgesteuerten Klebeverbindungen _____	31
Formel 4-2 Hooke'sches Gesetz _____	37
Formel 4-3 Beziehung der Spannungen mit DM- und GM-Aufbau _____	38