

MASTERARBEIT



Gestaltoptimierung und Auslegung einer Winkelführungsplatte mittels der Methode der Finiten Elemente mit integrierter Bauteilverifikation

verfasst von

Herwig R. Juster

eingereicht am

KKV - Lehrstuhl für Konstruieren in Kunst- und Verbundstoffen

Leitung: O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Wörndle

Betreuung: Dipl.-Ing. Herwig Mießbacher

Dipl.-Ing. Mag. Stephan Reinthaler

Begutachtung: O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Wörndle

Montanuniversität Leoben

Leoben, 08.02.2012



semperform® 

SEMPERIT 



KONSTRUIEREN IN KUNST-
UND VERBUNDSTOFFEN

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, den 15.03.2012

(Herwig R. Juster)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit hätte nicht ohne das Mitwirken zahlreicher Kollegen, Freunde, Mitmenschen und Geldgeber gelingen können. Ich möchte ihnen an dieser Stelle aus tiefstem Herzen meinen Dank aussprechen und hoffe, niemanden zu vergessen:

Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Wörndle sowie Herrn Dipl.-Ing. Peter Zaucher möchte ich für die universitäre Betreuung dieser Arbeit sowie für die Durchsicht derselben danken.

Ganz besonders möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. Armin Holzner und Herrn Dipl.-Ing. Herwig Mießbacher danken für die Möglichkeit, diese Arbeit in der Firma Semperit Technische Produkte GmbH durchzuführen, sowie Frau Dipl.-Ing. Mag. Silke Koch, auf deren Anregung diese Arbeit zurückgeht.

Dipl.-Ing. Mag. Stephan Reinthaler gebührt mein besonderer Dank für die Betreuung der Arbeit und die zahlreichen konstruktiven Hilfestellungen auf dem Gebiet der FE-Simulation. Meinen Fragen hat er sich stets angenommen und mit vielen hilfreichen Gesprächen und Anregungen weitergeholfen.

Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Herwig Mießbacher, der als Leiter dieses Projektes mich stets tatkräftig unterstützt hat und mit Engagement, Interesse und Reisebereitschaft zur Seite stand.

Auch möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Firma Semperit für das kollegiale Arbeitsklima bedanken und allen involvierten Personen, die es ermöglichten, ein reichhaltiges Wissen im Zuge dieser Arbeit erlangen zu können.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich nicht nur bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat, sondern auch während des gesamten Studiums immer mit Unterstützung bei Seite stand.

Kurzfassung

Mit der Forderung nach Einsparung von Zeit und Kosten bei der Bauteilentwicklung gewinnt die rechnerische Auslegung von hochbeanspruchten Spritzgussbauteilen zunehmend an Bedeutung. Kunststoffe dringen immer mehr in Anwendungsbereiche vor, die bisher nur Metallwerkstoffen vorbehalten war. Einer dieser Anwendungsbereiche sind Schienenbefestigungssysteme.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Winkelführungsplatte, welche die Schiene seitlich im Schienenbefestigungssystem führt, in Zusammenarbeit mit der Firma Semperit Technische Produkte GmbH untersucht.

Das Schienenbefestigungssystem besteht aus einer Schwelle, welche die Schiene trägt und deren Belastungen auf den Gleis-Unterbau überträgt sowie die Spurweite sicherstellt. Die Schwelle besitzt zwei W-förmige Vertiefungen um die Winkelführungsplatten aufnehmen zu können. Innerhalb des Winkelführungsplatten-Paares steht die Schiene auf einer Schienenzwischenlage direkt auf der gesamten Breite der Betonschwelle auf. Die Winkelführungsplatten und die dazugehörigen Spannklemmen sind mit je zwei Schwellenschrauben in die Kunststoffdübel der Schwelle geschraubt.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen Vorschlag für eine Gestaltoptimierung der Winkelführungsplatte für das Befestigungssystem im Schienenoberbau mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente zu ermitteln. Es wird ein geeignetes Finite-Element System, bestehend aus Winkelführungsplatte, Spannklemme, Schienenzwischenlage und Schwelle, erstellt. Im Zuge der Arbeit werden Werkstoff- und Bauteilprüfungen durchgeführt, um eine Verifikation der Simulationsergebnisse zu erhalten. Die Simulation der bestehenden Winkelführungsplatte erfolgt unter Berücksichtigung ausgewählter Lastfälle und Einsatzbedingungen. Anhand der ermittelten Daten aus den Simulationen werden Vorschläge für eine Gestaltoptimierung erarbeitet.

Ein Nicht-Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Berechnung des gesamten Gleiskörpers. Durch eine entsprechende Annahme von Randbedingungen und Vereinfachung erfolgt eine Näherung an den gesamten Gleiskörper. Eine Detailanalyse und eine Bauteilprüfung der optimierten Winkelführungsplatte werden nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

Abstract

Polymers penetrate more and more in areas of applications which were previously only reserved for metallic materials. One of these applications includes rail fastening systems. In addition, new methods and tools to support the product development process in the field of injection moulded parts have gained considerably importance.

The purpose of this study was a shape optimization and design of a guide angle plate for a rail fastening system, using the method of finite elements. The project was developed in collaboration with Semperit Technische Produkte GmbH.

The rail fastening system consists of a threshold, which supports the rail and transfers their loads to the track-structure and ensures the gauge. The threshold has two W-shaped depressions to accommodate the angled guide plates. Between such a guide angle plate pair stands the rail, which is separated from ground with a rail liner directly on the entire width of the concrete sleeper. The guide angle plates and associated clamps are screwed with two coach screws into the plastic anchors of the threshold.

The aim of this thesis was to develop a simulation model for a shape optimization of the angular guide plate for mounting the track superstructure system. In order to determine it, the method of finite elements was used. It is a finite-element system, consisting of angular guide plate, tension clamp, rail liner, and threshold. In the course of the work, material and component testing were performed to obtain a verification of the simulation results. The sizing of the angular guide plate was studied taking into consideration of selected load cases and operating conditions. Based on the data obtained from the simulations a proposal for a shape optimization was achieved.

Although the entire track body was not simulated, an approximation of it was found by assuming certain boundary conditions. A detailed analysis and component testing of the optimized angle guide plate are not performed in this work.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1	AUFGABENSTELLUNG.....	1
1.2	ZIEL DER ARBEIT	3
1.3	AUFBAU DER ARBEIT	3
2	GRUNDLAGEN	4
2.1	DIE FINITE ELEMENTE METHODE (FEM).....	4
2.1.1	<i>Das Prinzip der virtuellen Arbeit</i>	<i>4</i>
2.2	DIE FINITE ELEMENTE ANALYSE (FEA).....	5
2.2.1	<i>Anwendungsbereiche der FE-Analyse</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Ablauf einer FE-Analyse.....</i>	<i>6</i>
2.2.3	<i>Fehlerquellen einer FE-Analyse</i>	<i>7</i>
2.3	DIE NUMERISCHE SIMULATION MIT FE-ANALYSE.....	8
2.3.1	<i>Geometrie und Material Winkelführungsplatte</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Diskretisierung der Winkelführungsplatte</i>	<i>8</i>
2.3.3	<i>Geometrie und Material der Schienenzwischenlage</i>	<i>9</i>
2.3.4	<i>Diskretisierung der Schienenzwischenlage</i>	<i>9</i>
2.3.5	<i>Geometrie und Material der Spannklemme.....</i>	<i>9</i>
2.3.6	<i>Diskretisierung der Spannklemme.....</i>	<i>9</i>
2.4	PROGRAMMPAKET MSC.MARC/MENTAT ZUR FE-ANALYSE.....	10
3	VERIFIKATION VON GRUNDDATEN FÜR DIE FE-SIMULATION	11
3.1	DER RUNDEISENBIEGEVERSUCH	11
3.1.1	<i>Materialcharakterisierung PA 6-GF30 und Verifikation</i>	<i>12</i>
3.1.2	<i>Abschließende Betrachtungen</i>	<i>15</i>
3.2	ZEITSTAND - RELAXATIONSVERSUCH.....	16
3.3	ZEITSTAND – KRIECHVERSUCH.....	17
3.4	MATERIALPARAMETER FÜR SCHIENENZWISCHENLAGE	18
3.4.1	<i>Zug/Druckversuch.....</i>	<i>19</i>
3.4.1.1	<i>Versuchsdurchführung</i>	<i>19</i>
3.4.1.2	<i>Ergebnisse</i>	<i>19</i>
3.4.2	<i>Reibverhalten einer Schiene gegenüber Schienenzwischenlage</i>	<i>20</i>
3.4.2.1	<i>Versuchsdurchführung</i>	<i>21</i>
3.4.2.2	<i>Ergebnisse</i>	<i>21</i>
3.5	SCHLUSSFOLGERUNG.....	22
4	ERARBEITUNG DES FE-MODELLS UND VERIFIZIERUNG.....	23
4.1	VEREINFACHUNGEN DES FE-MODELLS.....	23
4.2	BERECHNUNGEN	26
4.2.1	<i>Berechnung Standardmodell Wfp 14K12.....</i>	<i>27</i>
4.2.1.1	<i>Belastungsfall Montage Wfp und Überfahrt</i>	<i>28</i>
4.2.1.2	<i>Referenzversuch Einsenkung Schienenzwischenlage</i>	<i>29</i>

Inhaltsverzeichnis

4.2.2	<i>Ergebnisse Belastungsfall Montage Wfp und Überfahrt</i>	30
4.2.2.1	<i>Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse</i>	33
4.2.3	<i>Berechnung Bogenfahrt und Worst-Case Szenario</i>	35
4.2.3.1	<i>Belastungsfälle</i>	35
4.2.3.2	<i>Referenzversuch nach EN 13146-4 und 13481-2</i>	37
4.3	ERGEBNISSE BELASTUNG NACH EN 13146-4 UND WORST-CASE BELASTUNG	39
4.3.1	<i>Grafische und numerische Darstellung der Ergebnisse</i>	39
4.3.1.1	<i>Tabellarische Übersicht der Simulationsergebnisse</i>	41
4.3.2	<i>Abschließende Betrachtungen der Zusammenhänge und Trends</i>	48
5	VORSCHLAG GESTALTOPTIMIERTE WFP	50
5.1	GESTALT- UND TOPOLOGIEOPTIMIERUNG	50
5.2	OPTIMIERUNGSZIELE	51
5.3	GEGENÜBERSTELLUNG SIMULATIONSERGEBNISSE	51
5.4	ENTWURF GESTALTOPTIMIERTE WFP.....	52
5.4.1	<i>Gestaltungsrichtlinien für Rippen</i>	53
5.4.2	<i>Fertigungsgerechte Gestaltung von Rippen</i>	53
5.4.3	<i>Erstellung verrippte Wfp</i>	54
5.5	AUSBlick VERRIPPTE WFP	55
6	ZUSAMMENFASSUNG	56
7	LITERATURVERZEICHNIS	58
8	ANHANG	59
8.1	VERGLEICH WFP14K12 MONTAGE 18 kN UND 68 kN	59
8.2	VERGLEICH WFP14K12 MONTAGE 18 kN, BOGENFAHRT (CEN-13146), WORST-CASE BELASTUNG	63
8.3	VERGLEICH WFP14K12 MONTAGE 18 kN, BOGENFAHRT (CEN-13146), WORST-CASE BELASTUNG – RÜCKANSICHTEN	73
8.4	VERGLEICH VERRIPPTE WFP, MONTAGE 18 kN UND 68 kN	77
8.5	DIREKTER VERGLEICH PRINCIPAL CAUCHY STRESS MIN	82
8.6	DIREKTER VERGLEICH PRINCIPAL CAUCHY STRESS MAX	83
8.7	DIREKTER VERGLEICH CONTACT NORMAL FORCE.....	84
8.8	DIREKTER VERGLEICH PRINCIPAL CAUCHY STRESS MIN (RÜCKANSICHT).....	85
8.9	DIREKTER VERGLEICH PRINCIPAL CAUCHY STRESS MAX (RÜCKANSICHT).....	86
8.10	DIREKTER VERGLEICH CONTACT NORMAL FORCE.....	87
8.11	DURCHGEFÜHRTE SIMULATIONEN MIT RECHENZEITEN.....	88
8.12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	90
8.13	TABELLENVERZEICHNIS.....	92
8.14	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	92

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Aufgabenstellung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Winkelführungsplatte für ein Schienenbefestigungssystem für Betonschwelle in Zusammenarbeit mit Semperit Technische Produkte Gesellschaft mbH. untersucht und die Geometrie kunststoffgerecht optimiert.

Ein Schienenbefestigungssystem für Betonschwellen besteht aus einer Schwellenschraube aus Stahl mit einem Schraubdübel aus Kunststoff, einer Spannklemme aus Federstahl, einer Schienenzwischenlage aus Gummi und der Winkelführungsplatte, gefertigt aus Kunststoff (Abbildung 1) [1].

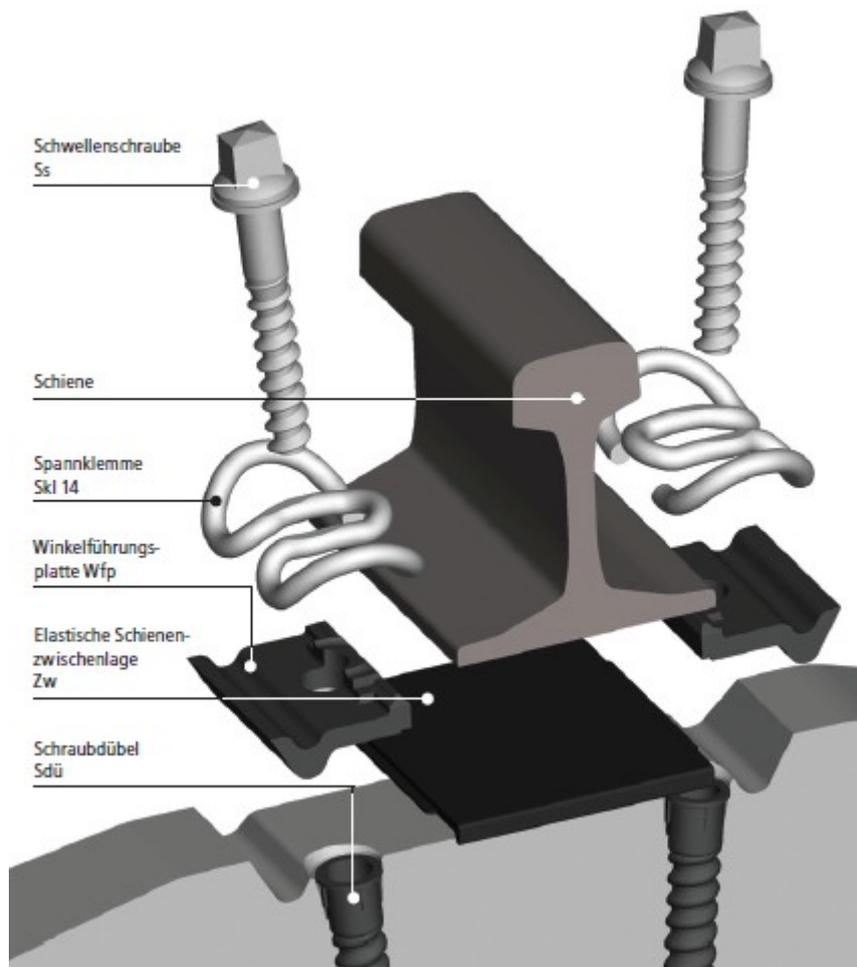


Abbildung 1: Schienenbefestigungssystem bestehend aus Schwellenschraube, Spannklemme, Winkelführungsplatte, Elastische Schienenzwischenlage und Schraubdübel [1]

Die Schiene liegt direkt auf der Betonschwelle und wird durch eine elastische Schienenzwischenlage getrennt. Die in der Abbildung 1 ersichtliche W-förmige Spannklemme hält mit den äußeren Federarmen die Schiene dauerhaft kraftschlüssig auf der Betonschwelle verspannt. Seitlich wird die Schiene durch die Winkelführungsplatten geführt, die einen spurgenaugen Schienenkanal bilden. Die über die Schiene eingeleiteten Kräfte werden über die Winkelführungsplatte (Abbildung 2) direkt auf die Betonschwelle übertragen. Die Schwellenschraube wird hierbei nicht auf Biegung oder Abscherung beansprucht. Durch die Mittelschleife der Spannklemme, die den Schienenfuß überragt, besitzt das Befestigungssystem eine zweite Steifigkeit, die sich im steilen Verlauf der Federkennlinie äußert. Hierdurch wird eine Überbeanspruchung der Federarme und somit eine plastische Verformung ausgeschlossen. Gleichzeitig dient die Mittelschleife als Kippschutz für die Schiene.



Abbildung 2: Draufsicht (links oben), Rückansicht (links unten) und Seitenansicht (rechts) der Winkelführungsplatte

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Masterarbeit ist es, nach Erarbeitung eines geeigneten FE-Modells, einen Vorschlag zur Gestaltoptimierung der Winkelführungsplatte 14K12 für das Befestigungssystem im Schienenoberbau zu erarbeiten. Hierfür ist die Detailanalyse des bestehenden Bauteils unter der Berücksichtigung ausgewählter Lastfälle notwendig. Anhand der ermittelten Daten soll eine Optimierung und Auslegung der Geometrie erfolgen, wobei die Optimierung als iterativer Prozess angesehen wird. Desweiteren werden eine Werkstoff- und Bauteilprüfungen durchgeführt, um eine Verifikation der Simulationsergebnisse zu erhalten und eine Aussage über die Genauigkeit der FE-Simulation treffen zu können.

Die Berechnungen in der vorliegenden Arbeit erfolgten mit Hilfe der Finite Elemente (FE) Methode. Sie wurden mit Programmen von der Firma MSC durchgeführt. Zur Bestätigung der Berechnungen wurden die Ergebnisse laufend mit entsprechenden Versuchen verifiziert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Aufgabenstellung wurde bereits eingangs kurz beschrieben. Die Arbeit ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird auf die Grundlagen der FE-Methode und deren Einsatz zur Optimierung dreidimensionaler Strukturen eingegangen, sowie der Allgemeine Ablauf einer FE-Berechnung und das Modell des Schienenbefestigungssystems mit Winkelführungsplatte vorgestellt.

Im zweiten und dritten Teil der Arbeit, welche den Kern der Arbeit bilden, werden die einzelnen Lastfälle beschrieben und die Ergebnisse der numerischen Simulation in Unterkapiteln ausführlich dokumentiert.

Im abschließenden Teil der Arbeit erfolgen eine Zusammenfassung der Aufgabenstellung und der Vorgehensweise, sowie eine Interpretation der im Zuge der Optimierung der Winkelführungsplatte gefundenen Ergebnisse mit einer Darstellung der Verbesserungsvorschläge.

2 Grundlagen

2.1 Die Finite Elemente Methode (FEM)

In der Entwicklung von Bauteilen sind an vielen Stellen mechanische Analysen durchzuführen, um das entsprechende Verhalten der Lösung zu überprüfen. In Folge wird aufgrund der Analyseergebnisse eine Optimierung angestrebt.

Das mechanische Verhalten von Systemen wird durch die Gesetze der Physik und der Technischen Mechanik beschrieben. Dies erfolgt im Allgemeinen durch Differentialgleichungssysteme, welche sich nur für einfache Fälle geschlossen d.h. durch Integration, gelöst werden können. Im komplizierteren Fall ist keine geschlossene Lösung der Differentialgleichungssysteme möglich.

Die FE-Methode ist ein numerisches Lösungsverfahren für Differentialgleichungssysteme, die das mechanische Verhalten von Systemen beschreiben.

Die Zerlegung eines beliebigen verformbaren Körpers in einzelne endliche Teile stellt den Grundgedanken der Finiten Elemente Methode dar. Die einzelnen endlichen Teile hängen in den sogenannten Knotenpunkten zusammen. In diesen Knotenpunkten werden die bedeutsamen stetigen Veränderungen des Problems durch ihre Werte in den Knotenpunkten dargestellt. Dies bedeutet, dass stetige Funktionen durch ein System von endlich vielen Knotenparametern ersetzt werden. Durch das zusammensetzen der Lösungen der einzelnen Teile erhält man eine Näherungslösung für das idealisierte Gesamtgebilde [2].

2.1.1 Das Prinzip der virtuellen Arbeit

Das Prinzip der virtuellen Arbeit bzw. ein Variationsprinzip stellen die Grundlage der FE-Methode dar. Solch ein Prinzip wird mittels Differentialgleichungsformulierung durch integrale Mittelwertbildung realisiert. Ein Elementnetz wird über den Bereich gezogen und anschließend werden Ansatzfunktionen in jedem der Elemente eingeführt. Die Ansatzfunktionen werden mit den Funktionswerten in den Knoten gewichtet und die Integralausdrücke durch algebraische Ausdrücke ersetzt. Die Erstellung des Gleichungssystems für die Knotenfreiheitsgrade erfolgt elementweise. Dadurch wird mit der FE-Methode auch die Berechnung irregulärer Tragwerke mit allgemeiner Berandung, Diskontinuitäten und Materialinhomogenitäten, da die Struktur elementweise erfasst wird, möglich. Nichtlinearitäten stellen keine Umstände dar. Obwohl der Aufbau des Gleichungssystems elementweise erfolgt, gelangt man

letztlich zu knotenbezogenen Gleichungen, die wiederum Differenzgleichungen entsprechen [2].

Wird ein System mit virtuellen Verschiebungen beaufschlagt, so wird virtuelle Arbeit geleistet. Diese ist das Produkt der virtuellen Verschiebungen mit den ansetzenden Kräften. Das Prinzip der virtuellen Arbeit muss für jedes einzelne Finite Element gelten.

Das zuvor beschriebene geforderte Gleichgewicht wird in der Gleichung 1 mathematisch dargestellt. Die Summe der gesamten virtuellen Arbeit δW , welche durch innere und äußere Kräfte und virtuelle Verschiebungen hervorgerufen wird, ist Null.

$$\delta W = \sum \delta W = \delta W_{\text{innere}} + \delta W_{\text{äußere}} = 0 \quad (1)$$

2.2 Die Finite Elemente Analyse (FEA)

2.2.1 Anwendungsbereiche der FE-Analyse

Am Beginn einer FE-Analyse muss festgestellt werden, welche Ziele angestrebt werden. Man unterscheidet je nach den erforderlichen Berechnungsergebnissen zwischen:

- Globalen Untersuchungen
- Lokalen Untersuchungen
- Detailanalysen

Eine globale Analyse (z.B. ein komplettes Flugzeug) erlaubt einen höheren Abstraktionsgrad des Modells. Das Modell soll in erster Linie dem wesentlichen mechanischen Globalverhalten genügen. Bei einer lokalen FE-Analyse (z.B. eine Laderaumsektion) werden Teilbereiche eines Systems untersucht. Häufig ergeben sich die hierfür notwendigen Randbedingungen aus zuvor durchgeführten globalen Analysen. Bei lokalen Modellen kommt es auf die Formgenauigkeit des Modells an, da bei dieser Art der Analyse Optimierungen und Stabilitäten untersucht werden. Mit Detailanalysen sind Berechnungen in sehr gezielt ausgewählten Bereichen z.B. Untersuchung einer Schweißnaht gemeint [3].

2.2.2 Ablauf einer FE-Analyse

Die Berechnung von Bauteilen mit Finiten Elementen erfordert im Allgemeinen die Bereitstellung, Verwaltung und Auswertung großer Datenmengen. Diese Daten müssen kontrolliert werden, um sicherzustellen, dass die Berechnungsergebnisse im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen richtig sind. Daher ist es sinnvoll, die Berechnungsprogramme in einzelne Arbeitsschritte zu gliedern (Abbildung 3) [3].

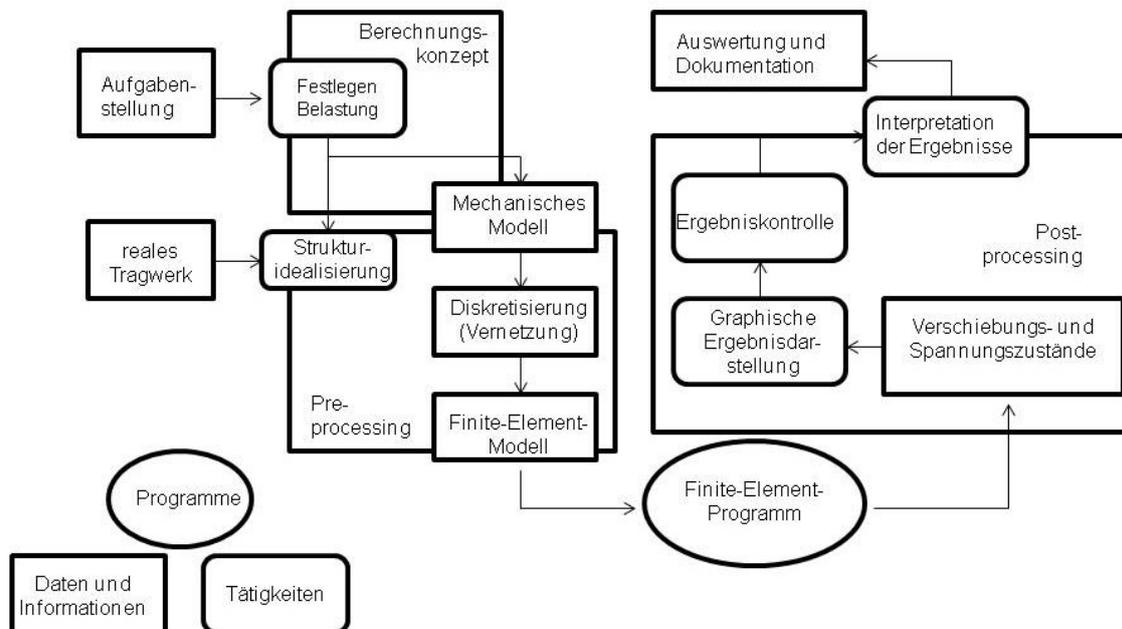


Abbildung 3: Allgemeiner Ablauf einer FE-Analyse [3]

Der Aufbau eines FE-Methoden Programmes gliedert sich in drei Hauptabschnitte:

1. Preprocessor: FE-Modell erstellen durch Diskretisierung der Struktur, Aufbringen von Randbedingungen und Belastungen, Angaben zu Werkstoffen und Geometrien sowie Zusammenstellung der Lastfälle
2. Solver: Einlesen der Eingabedaten und anschließend Aufbau einer lokalen Elementsteifigkeitsmatrix. Anschließend Transformation der lokalen Elementsteifigkeitsmatrix in die globale Elementsteifigkeitsmatrix und Aufbau der globalen Gesamtsteifigkeitsmatrix.
3. Postprocessing: Darlegung der Ergebnisse aus der FE-Berechnung

Die Interpretation der Ergebnisse aus der FE-Methode erfordert ein umfassendes Verständnis der mechanischen Zusammenhänge im Bauteil, der getroffenen Vereinfachungen zur Idealisierung sowie der Funktionsweise des gewählten Lösungsalgorithmus. Im Allgemeinen muss bei der Anwendung der FE-Methode ein Verständnis für die Physik, Mechanik und Kraftflüsse des Bauteils vorhanden sein [2].

2.2.3 Fehlerquellen einer FE-Analyse

Die FE-Methode stellt ein wichtiges ingenieurmäßiges Werkzeug dar und ist als solches auch fehlerbehaftet. Es muss daher die Sensibilität gegenüber möglichen Fehlerquellen wachsen, denn überall wo Menschen Abläufe steuern, können sich Fehler einstellen.

Neben den anwendungstechnischen Ungenauigkeiten gibt es auch rein mathematische Ungenauigkeiten. Bei der FE-Methode handelt es sich um ein mathematisches Näherungsverfahren und eine Fehlertoleranz der Simulationsrechnung ist somit durch den Lösungsalgorithmus vorgegeben [5].

In der Tabelle 1 sind die möglichen Fehlerquellen bei einer FE-Analyse dargestellt.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die mit Hilfe der heutigen Rechnersysteme verfügbare Rechenleistung eine Behandlung außergewöhnlich umfangreicher Strukturen, deren visuelle Darstellung trotz Diskretisierung fast der einer realen Struktur gleichkommt, möglich ist. Unsicherheiten und Parametervariabilität, die in Modellen wie auch in der Realität immer vorhanden sind, müssen in einer geeigneten Form z.B. richtige Elementauswahl bei Diskretisierung, berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Fehlerquellen bei FE-Analyse [5]

	Anwender	Programm-Handhabung
Pre-Processing	<ul style="list-style-type: none"> • Falsche Idealisierung • Schlechte Elementwahl • Verletzte Kompatibilität • Ungenaue Materialdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Vernetzung • Schlechte Elementformulierung • Kein Elementcheck
Lösungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Randbedingungen • Schlechtes Lösungsverfahren • Zu grobes Konvergenzkriterium 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu ungenauer Gleichungslöser • Ungenaue Rückrechnung • Warnungen ignorieren
Post-Processing	<ul style="list-style-type: none"> • Falsche Selektion 	<ul style="list-style-type: none"> • Falsche Mittelung • Falsche Darstellung

2.3 Die Numerische Simulation mit FE-Analyse

2.3.1 Geometrie und Material Winkelführungsplatte

Die Geometriedaten werden von der verwendeten Form der Winkelführungsplatte 14 K 12 übernommen. Die Winkelführungsplatte 14 K 12 besitzt eine Länge von 110 mm und eine Breite von 80 mm. Der Durchmesser der Bohrung zur Aufnahme der Schwellenschraube beträgt 30 mm.

Beim Material handelt es sich um ein Polyamid 6, welches mit 30 Gewichtsprozent Glasfasern verstärkt ist. Der Hersteller des Polyamids ist die Firma BASF SE. Die genaue Bezeichnung lautet Ultramid® B3EG6.

2.3.2 Diskretisierung der Winkelführungsplatte

In der FE-Methode muss die wirkliche Geometrie durch Einzelemente diskretisiert werden. Vor dem Vernetzen erfolgt das Abschätzen des Kraftflusses im Bauteil, um Bereiche mit hohen Spannungsgradienten zu erkennen. Diesen Bereichen soll eine

höhere Netzfeinheit zugewiesen werden, um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen. Ebenso soll die Verwendung von sehr spitzen oder stumpfen Elementen vermieden werden [4].

Für ein relativ kompliziertes Bauteil, welches im 3D-CAD-System vorliegt, ist die übliche Vorgehensweise, die Daten ins FE-Programm zu übertragen und dort weiter zu verwenden. Dies führt in den meisten Fällen zu Volumenelementen und hier bevorzugt zu Tetraedern. Diese sind besser automatisch generierbar.

Für die Berechnung werden mittels Tet-Mesher 61069 vier-knotige tetraedische Elemente für das Solid generiert und anschließend mittels der Methode der adaptiven Vernetzung, Bereiche mit höherer Belastung verfeinert.

2.3.3 Geometrie und Material der Schienenzwischenlage

Die Geometriedaten werden von der verwendeten Form der Schienenzwischenlage ZW 700 übernommen. Die Schienenzwischenlage ZW 700 besitzt eine Länge von 190 mm und eine Breite von 150 mm. Die Dicke beträgt 7 mm.

Die Schienenzwischenlage ZW 700 besteht aus einem Elastomer des Polymer-Typs Styrol-Butadien-Rubber (SBR) und Naturkautschuk (NR).

2.3.4 Diskretisierung der Schienenzwischenlage

Für die Vernetzung wird gleich wie bei der Winkelführungsplatte ein Tet-Mesher eingesetzt, welcher 71028 vier-knotige tetraedische Elemente für das Solid generiert.

2.3.5 Geometrie und Material der Spannklemme

Die Geometriedaten werden von der verwendeten Form der Spannklemme SKL 14 übernommen. Die Spannklemme SKL 14 besitzt eine Länge von 140 mm und eine Breite von 85 mm.

Beim Material der Spannklemme SKL 14 handelt es sich um einen Federstahl, der einem mit Si legiertem Kohlenstoffstahl vom Typ 38Si7 zuzuordnen ist.

2.3.6 Diskretisierung der Spannklemme

Für die Vernetzung wird gleich wie bei der Winkelführungsplatte ein Tet-Mesher eingesetzt, welcher 75553 vier-knotige tetraedische Elemente für das Solid generiert.

2.4 Programmpaket MSC.MARC/Mentat zur FE-Analyse

Die Anfertigung des Rechenmodells erfolgt mit Hilfe des Programmpaketes MSC.MARC/Mentat 2010. Das Programm basiert auf den implizierten Lösungsverfahren von Differentialgleichungen.

Mit dem Programmpaket sind lineare und nicht-lineare Strukturanalysen möglich und der Einsatz des Programmes ist somit auch für große Verformungen von Kunststoffen sowie hyperelastischen Materialien gegeben.

Für die Modellierung und Diskretisierung wird die Programmkomponente Patran verwendet.

Als Solver dient die Programmkomponente Mentat, welches ein interaktives Programm zur Aufbereitung und Verarbeitung von Daten mit Hilfe der Finiten Elemente Methode ist [11].

3 Verifikation von Grunddaten für die FE-Simulation

3.1 Der Rundeisenbiegeversuch

Der Rundeisenbiegeversuch dient zur Überprüfung der Beschaffenheit des Bauteils nach der Konditionierung. Es wird hierbei ein Rundeisen, welches einen Durchmesser von 20 mm aufweist, auf die Unterseite der Winkelführungsplatte aufgelegt. Anschließend wird kraft geregelt, mittels einen Stempel, eine Deformation herbeigeführt, wobei das Bauteilversagen erst bei überschreiten eines bestimmten Wertes, nämlich 15 kN erfolgen darf. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 4 dargestellt. Die Winkelführungsplatte liegt auf Schleifleinen, welche als Zwischenlage dienen, auf und die Prüfgeschwindigkeit des Stempels beträgt 5 mm/min. Die Prüfung erfolgt in Luft laut DBS 918 280.

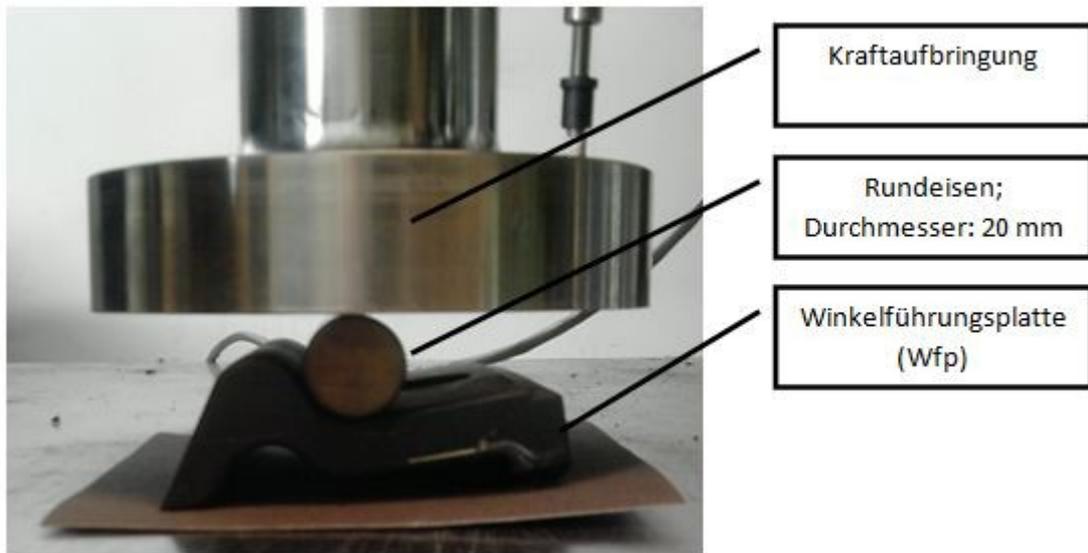


Abbildung 4: Prüfaufbau des Rundeisenbiegeversuches

Der Rundeisenbiegeversuch wurde als Referenzversuch zur Beurteilung der Wahl des Biegeelastizitätsmoduls ausgewählt, da dieser das Gesamtsystem mit allen Faktoren wie Spannungszustände, Verhalten der einzelnen Glasfasern im Bauteil, Verteilung der Glasfasern, Anisotropie widerspiegelt.

Aus dem Rundeisenbiegeversuch wird die Kraft über den Weg aufgenommen und in einer Kurve dargestellt. Im Simulationsprogramm wird der Versuchsaufbau in Form einer vereinfachten Modellbildung nachgestellt (Abbildung 5) und anschließend nach erfolgter Simulationsberechnung ebenfalls das Diagramm mit Kraft über den Weg ermittelt. Die so ermittelten Kurven werden miteinander verglichen und eine Darstellung des Modellverhaltens zur Realität wird hierdurch aufgezeigt.

3. Verifikation von Grunddaten für die FE-Simulation

Anschließend wird, aufbauend auf den erhaltenen Kurvenverläufen, im Kraft-Weg Diagramm eine Materialcharakterisierung hinsichtlich Biegeelastizitätsmodul möglich.

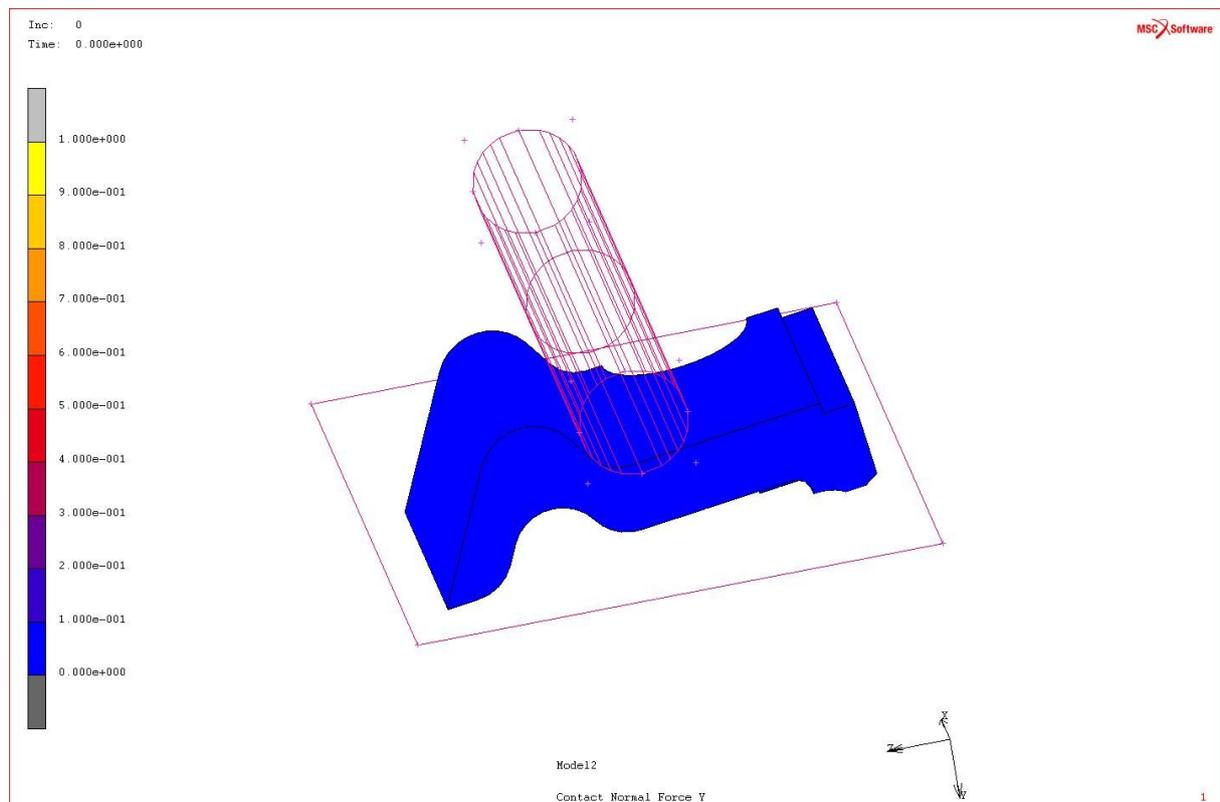


Abbildung 5: Simulationsmodell des Rundisenbiegeversuches: Halbmodell der Winkelstützplatte mit Rundisen

3.1.1 Materialcharakterisierung PA 6-GF30 und Verifikation

Bei der Verifikation treten verschiedene Fragestellungen auf wobei die Wichtigste hierbei ist: Wie genau muss die Verifikation des Materialmodells "Kunststoff" sein damit es einfach aber hinreichend genau ist?

Nach der FE-Modellerstellung durch Diskretisierung der Struktur, Aufbringen von Randbedingungen und Belastungen wurde eine Simulation gestartet. Um die Symmetrie der Wfp auszunutzen, wird ein Halbmodell erstellt. Die verwendeten Materialdaten sind aus dem Materialdatenblatt entnommen und in das Materialmodell eingespeist wurden. Das Ergebnis der Simulation ist in der Abbildung 7, gemeinsam mit der Gegenüberstellung des praktischen Versuches dargestellt. Für den praktischen Versuch wurde der Mittelwert aus drei, im Spritzgießprozess hergestellten Schüssen, ermittelt. Die Abbildung 6 stellt die Streuung des Schusses 1 gegenüber. Die Streuung kann als gering erachtet werden. Das Spritzgießwerkzeug nimmt acht Formnester auf, wobei jedes Formnest einen Probekörper darstellt.

3. Verifikation von Grunddaten für die FE-Simulation

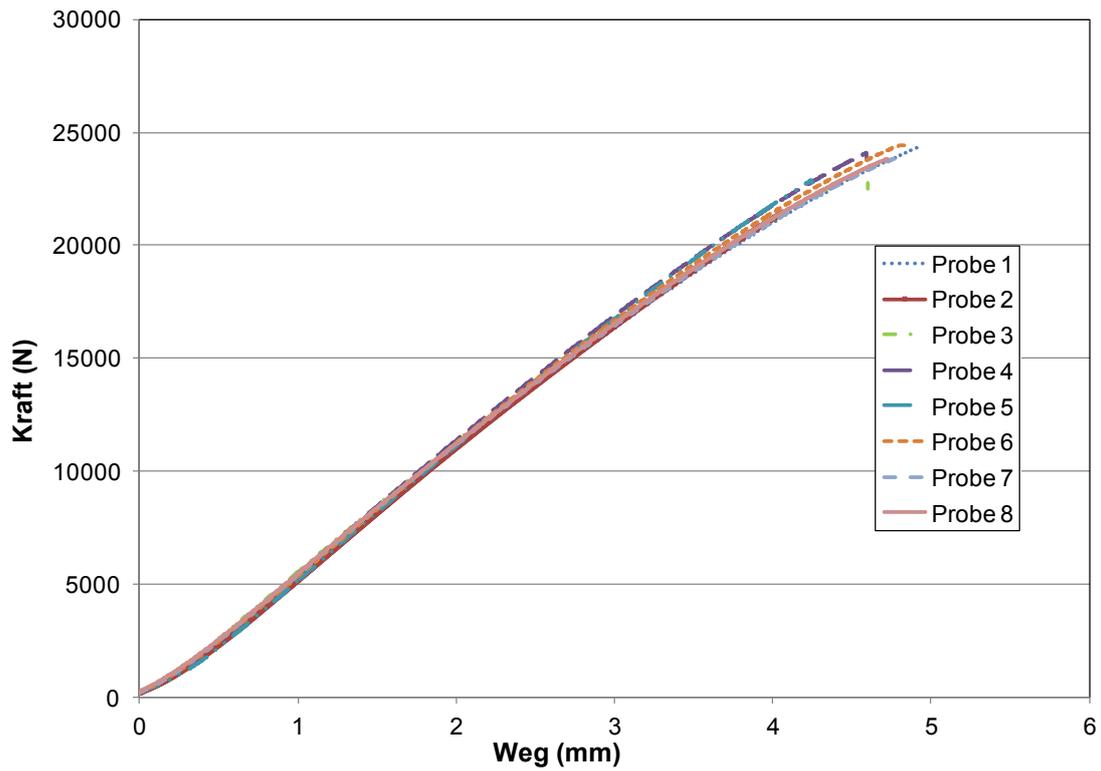


Abbildung 6: Streuung der geprüften Teile; Schuss 1, Probe 1 bis 8

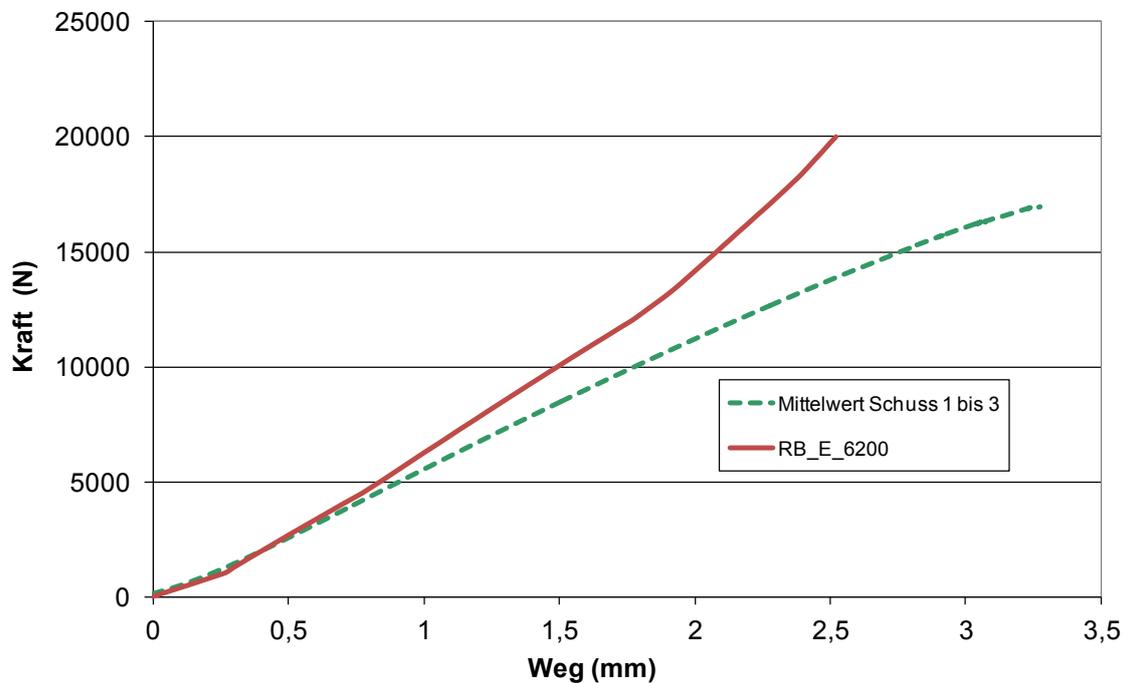


Abbildung 7: Vergleich *Rundeisenbiegeversuch: Simulation* ($E=6200$ MPa; durchgezogene, rote Linie) mit *praktischen Versuch* (strichlierte, grüne Linie)

Der Literaturwert von PA6-GF30 für den Elastizitätsmodul liegt bei 9500 MPa im trockenen Zustand und für den konditionierten Zustand beträgt dieser 6200 MPa. Die Elastizitätsmodul Werte sind nur bedingt Aussagekräftig, da diese an unidirektionalen Prüfkörpern geprüft werden. Die Wfp besitzt jedoch eine komplexe Faserorientierung. Basierend auf diesen Werten und den damit verbundenen Kurvenverlauf wurde eine Annäherung des Biegeelastizitätsmoduls durchgeführt. Es ist deutlich noch das zu steife Materialverhalten der berechneten Wfp ersichtlich. Als erster Verbesserungsschritt wurde der Elastizitätsmodul (E-Modul) der Wfp von 6200 MPa auf 5506 MPa reduziert. Der E-Modul von 5506 MPa wurde analytisch aus dem Kurvenverlauf des Kraft-Weg-Diagrammes des praktischen Referenzversuches ermittelt. Der so erhaltende Kurvenverlauf ist in der Abbildung 8 ersichtlich.

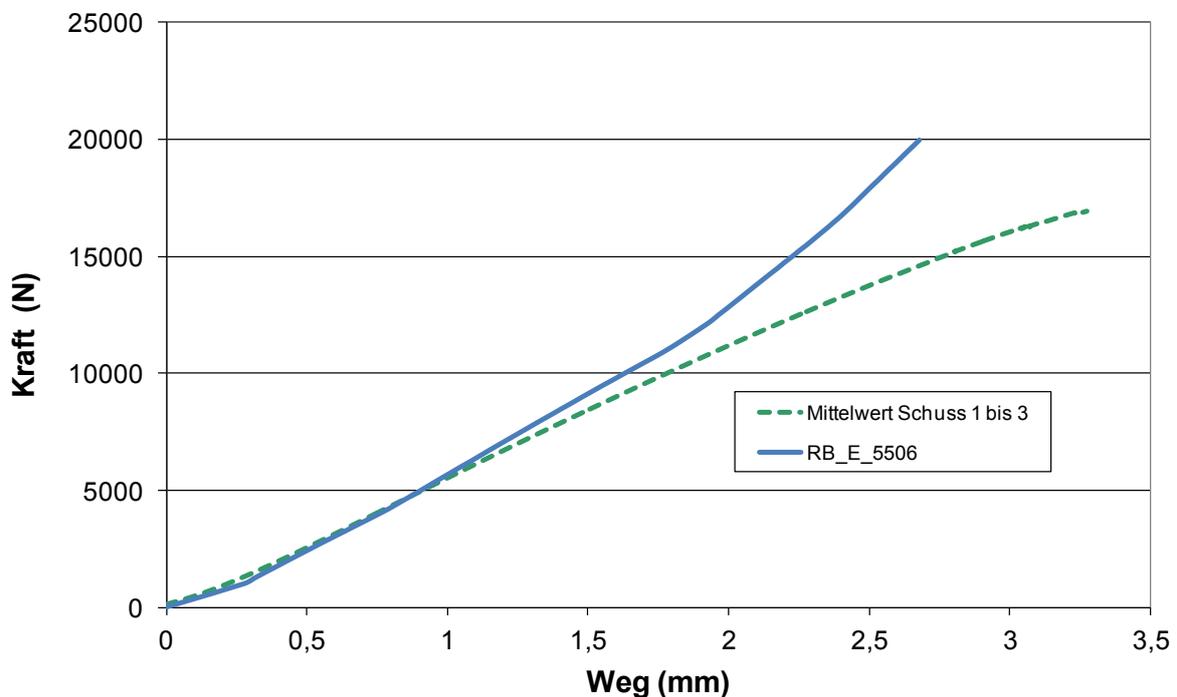


Abbildung 8: Vergleich Rundeisenbiegeversuch: Simulation ($E=5506$ MPa; durchgezogene, blaue Linie) mit praktischen Versuch (strichlierte, grüne Linie); Verifikation E-Modul von 6200 MPa auf 5506 MPa

Noch immer liegt ein zu steifes Materialverhalten des Kunststoffes zugrunde und die Abweichung von praktischer Versuchskurve zu Simulationskurve liegt bei 18%. Betrachtet man den Kurvenverlauf der Simulation näher, tritt ab 10.5 kN ein steilerer Anstieg und kein Abflachen der Kurve, wie in der Kurve, basierend auf den praktischen Versuchen, auf. Dieser Verlauf begründet sich aufgrund der elastischen Deformation der Wfp im praktischen Versuch. Im Auflagerbereich der Wfp kommt es zu einer Druckverformung. Diese wird in der Simulation als elastische Deformation wiedergegeben.

Es wurden verschiedene Optionen des Simulationsprogrammes und deren Einfluss auf die Berechnung untersucht. Die Option "Plasticity" dient zur besseren Abbildung des plastischen Verhaltens bei Kunststoffen, wobei hier eine Fließspannung definiert werden muss, welche wiederum experimentell ermittelt wird. Diese Funktion des Simulationsprogrammes hat sich jedoch als eingeschränkt anwendbar auf den vorliegenden Lastfall herausgestellt und eine Verbesserung des Kraft-Weg-Verlaufes geht mit dieser Funktion auch nicht einher.

Ein weiterer Einflussparameter stellt die Reibung zwischen Rundeisen und Wfp sowie Wfp und Schleifpapier. Durch Korrektur der Reibungskoeffizienten konnte eine Verbesserung des Materialmodells herbeigeführt werden.

Die durchgeführte Simulation bei einem E-Modul von 5000 MPa und mit einem Reibungskoeffizienten von 0.1 zwischen Wfp und Rundeisen ergab einen Kurvenverlauf (Siehe Abbildung 9) welcher dem realen Kurvenverlauf gut annähert und widerspiegelt. Die Abweichung über den Kurvenverlauf betrachtet liegt im Bereich von 6.5 %.

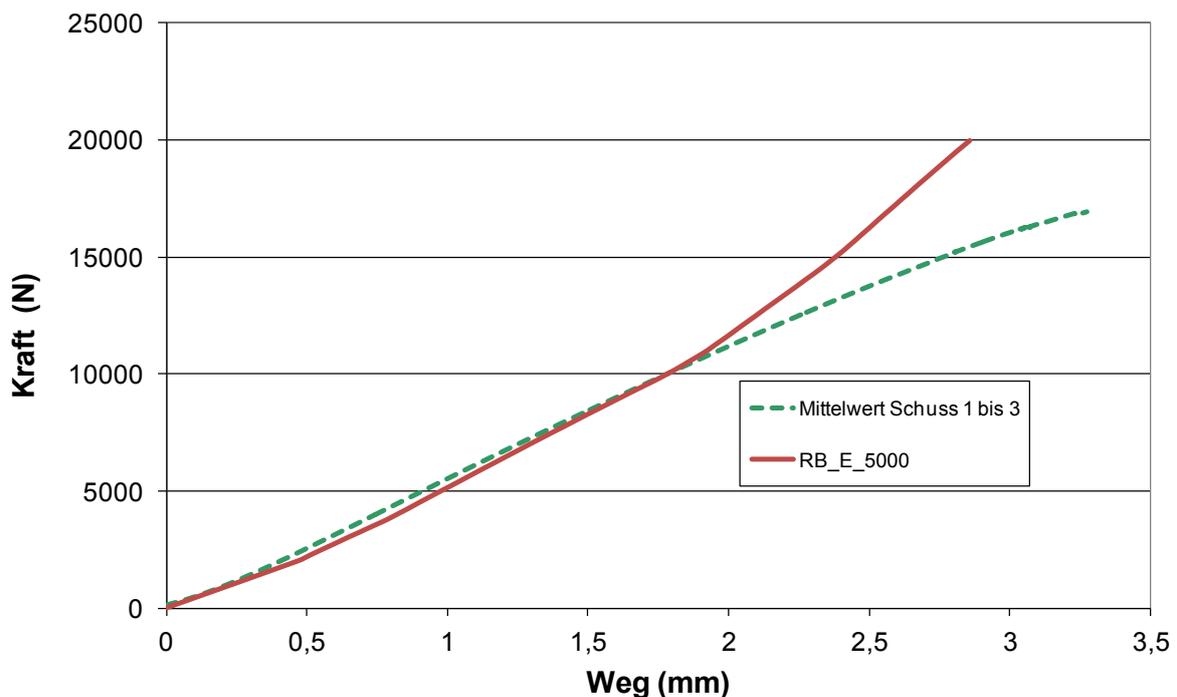


Abbildung 9: Vergleich Rundeisenbiegeversuch: Simulation ($E=5000$ MPa; durchgezogene, rote Linie) mit praktischem Versuch (strichlierte, grüne Linie); Verbesserungen des FE-Materialmodells

3.1.2 Abschließende Betrachtungen

Das schrittweise Verifizieren der Simulation über eine Handkorrektur mittels Stufen-Lösungsverfahren eignet sich am besten um ein Materialmodell für weitere Lastfälle

zu erhalten. Die Ergebnisse und die Kurvenverläufe der Simulationen des Rundeisenbiegeversuches zeigen im Vergleich zum praktischen Rundeisenbiegeversuches ein deutlich steiferes Materialverhalten d.h. der Widerstand der Wfp gegen Verformung durch eine Kraft ist höher. Die Begründung liegt darin, dass eine exakte Darstellung der Orientierungen der Glasfasern im Bauteil nicht im Detail realisierbar ist. Das Bauteil zeigt in der Realität ein weicheres Fließverhalten.

Da für nachfolgende Betrachtungen linear-elastisches Verhalten zu Grunde liegt, ist eine Übereinstimmung der Kurvenverläufe in diesem Bereich (10 kN) von praktischen Versuch und Simulation von Interesse. Bei einer Belastung von 10 kN betragen die Randfaserspannungen 40 MPa und diese liegen deutlich im Bereich des linear-elastischen Materialverhaltens.

Die Übernahme des E-Moduls aus dem einachsigen Zugversuch ist ebenfalls nicht zielführend, da hierbei zu viele Faktoren unberücksichtigt bleiben und der hierbei ermittelte E-Modul Schwankungen um bis zu 25 % innerhalb einer Messserie aufweist.

Dies führt zu einem Materialmodell, welches das Bauteil „Wfp“ nicht realitätsgerecht darstellen kann.

3.2 Zeitstand - Relaxationsversuch

Um das Montageverhalten der Wfp über einen längeren Zeitraum zu überprüfen wurde der 60 Stunden Langzeitversuch durchgeführt. Die hier ermittelten Werte dienen zur Abschätzung des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens der Wfp bei langfristig wirkender Biegebeanspruchung. Bei der Bauteilauslegung der Wfp durch eine Übertragung der Prüfergebnisse in die Praxis stellt die Beeinflussung durch Temperatur- und Umweltbedingungen einen zu beachtenden Einflussfaktor dar.

Im durchgeführten Zeitstand-Biegeversuch wird eine zuvor definierte Deformation auf konstantem Niveau gehalten. Der Kraftabfall in Abhängigkeit der Zeit wird ermittelt. Aufgrund des visko-elastischen Verhaltens des Kunststoffes unter Belastung tritt eine Relaxation (Entspannung) der vorliegenden Spannungen im Bauteil, welcher zeitlich verzögert ist, auf.

Die definierte konstante Deformation beträgt 1.8 mm und die Kraft orientiert sich an der Fließgrenze der Wfp im Rundeisenbiegeversuch. Die Fließgrenze liegt bei 10 kN Kraft. Der Versuchsaufbau besteht aus den gleichen Komponenten wie beim Rundeisenbiegeversuch in Abschnitt 3.1.

In der Abbildung 10 ist der Verlauf des Kraftabfalles über die Zeit dargestellt. Zu Beginn der Belastungsphase werden 9.5 kN Kraft über den Stempel auf die Wfp ausgeübt. Am Ende der 60 Stunden stellt sich ein Wertenniveau von 6.5 kN ein.

Abschließend lässt sich feststellen, dass ein Eindruck für das Verhalten und Eigenschaften des Bauteils unter konstanter Deformation, gemessen über einen Zeitraum von 60 Stunden, gewonnen werden konnte.

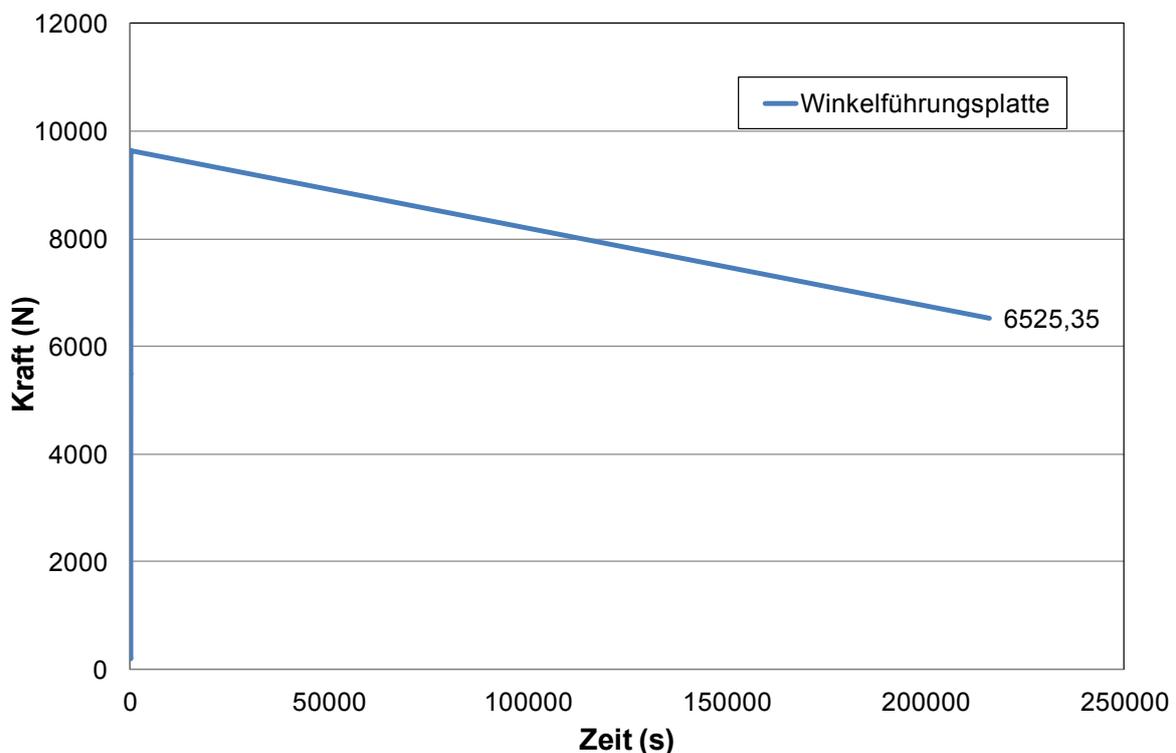


Abbildung 10: Zeitstand-Relaxationsversuch; Durchgezogene Linie: Abfall der Kraft von 9.5 kN auf 6.5 kN nach 60 Stunden Belastung

3.3 Zeitstand – Kriechversuch

Im durchgeführten Zeitstand-Kriechversuch, welcher 60 Stunden umfasst, wird eine zuvor definierte Kraft auf konstantem Niveau gehalten. Die Deformation in Abhängigkeit der Zeit wird ermittelt.

Die definierte konstante Kraft beträgt 10 kN und die Deformation der Wfp beträgt, durch Absenkung des Kraftstempels, 1.8 mm. Der Versuchsaufbau besteht aus den gleichen Komponenten wie beim Rundeisenbiegeversuch in Abschnitt 3.1

In der Abbildung 11 ist der Verlauf der Deformation der Wfp über die Zeit dargestellt. Zu Beginn der Belastungsphase wird die Wfp mittels Stempel auf 1.8mm mit einer Kraft von 10 kN deformiert. Am Ende der 60 Stunden stellt sich ein Wertenniveau von 2.6 mm ein.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass ein Eindruck für das Verhalten und Eigenschaften des Bauteils unter konstanter Krafteinwirkung, gemessen über einen Zeitraum von 60 Stunden, gewonnen werden konnte.

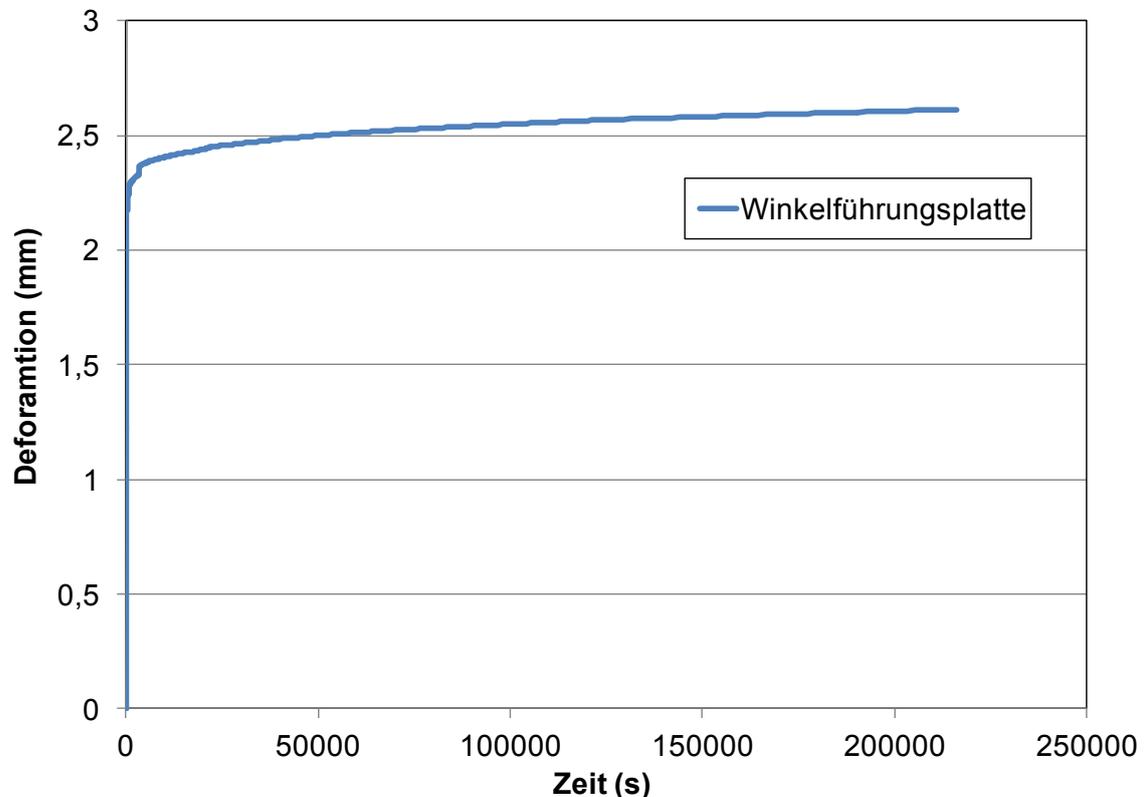


Abbildung 11: Zeitstand-Kriechversuch; Durchgezogene Linie: Zunahme der Deformation von 1.8 mm auf 2.6 mm nach 60 Stunden Belastung

3.4 Materialparameter für Schienenzwischenlage

Die Schienenzwischenlage ZW 700 besteht, wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, aus einem Syrol-Butadien-Elastomer (SBR). Die Materialparameter für die FEM-Simulation werden aus dem Zug/Druckversuch mittels Hantelprüfkörper ermittelt. Bei dem Zug/Druckversuch mittels Hantelprüfkörper handelt es sich um nichtgenormte firmeninterne Versuche. Durch eine Integration der nichtgenormten Prüfmethode in den genormten Zugversuch wird eine Durchführung mit der Zugprüfmaschine vom Typ Zwick/Roel Z005 möglich. Die Aufnahme der Dehnmessdaten sowie der Kräfte erfolgte über die Aufzeichnungssoftware *testXpert*.

3.4.1 Zug/Druckversuch

Der Zug/Druckversuch liefert Messdaten, mit deren Hilfe eine Anpassung des Materialgesetzes von Mooney-Rivlin an einen axialen Zug- und Druckbeanspruchungen ermöglicht wird [6].

3.4.1.1 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung werden drei hantelförmige Prüfkörper (Abbildung 12) mit einem Durchmesser von 14.6 mm und einer Messlänge von 19.5 mm für die Elastomermischung A203 erstellt. Die Elastomermischung A203 wird für die Herstellung der Schienenzwischenlage verwendet.



Abbildung 12: Hantelprüfkörper

Für die Prüfung wurden die Dehnungsamplitude mit 100% und die Stauchung mit -10 % vorgegeben. Die Kräfte wurden wie bei einem Zugversuch nach ISO 37 mittels Kraftmessdose gemessen. Die Dehnungen wurden über die Position der optischen, punktförmigen Aufnehmer am Hantelkörper ermittelt. Mit der Zuhilfenahme der Aufzeichnungssoftware erhält man die bereits ausgewerteten technischen Spannungs- und Dehnungsdaten. Es reichen drei Zyklen aus, um einen stabilen Zustand zu erreichen und somit den Mullins-Effekt (Spannungsentfestigungseffekte als Konsequenz aus dem Reißen bzw. dem Wiederverbinden von Polymerketten [6]) zu berücksichtigen. Die Prüfung wurde im klimatisierten Labor bei $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

3.4.1.2 Ergebnisse

Zur Ermittlung der Parameter für das in MSC.MARC implementierte Materialmodell Mooney (3 Parameter) wurde die Belastungskurve des fünften Zyklus (Abbildung 13) herangezogen.

Beim Ansatz nach Mooney werden die Materialeigenschaften durch die Parameter der Gleichung 2 an die Spannungs-Dehnungskurve angepasst [6].

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

C_{10}/C_{01} Materialkonstanten; $(C_{10})=(C_{01})=Pa$

I_i erste Invariante des Cauchy-Greenschen Deformationstensors; $(I_1)=1$

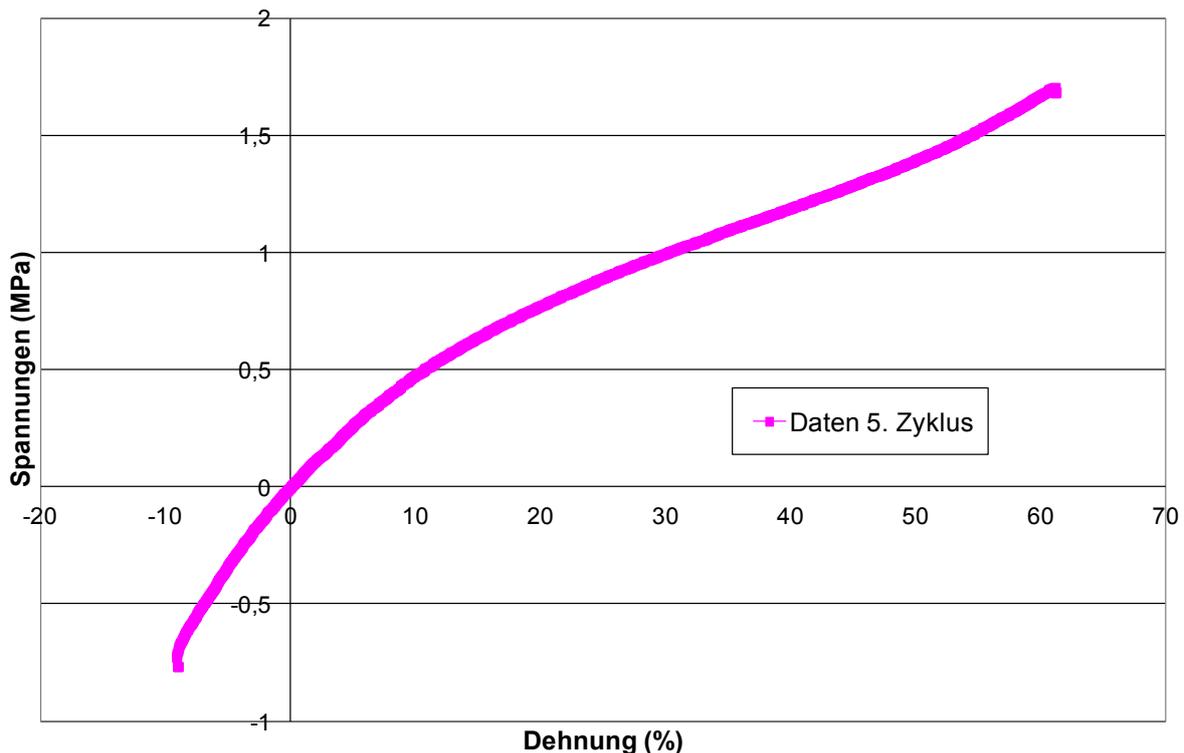


Abbildung 13: Spannungs-Dehnungskurve beim Zug/Druckversuch

Mit den ermittelten Parametern ($C_{10}=0.31$, $C_{01}=0.10$ und $C_{11}=0.03$) wurde das Materialmodell anschließend in die Materialeigenschaften der Schienenzwischenlage übergeführt. Mit dem Materialmodell wird das Materialverhalten der Schienenzwischenlage gut abgebildet.

3.4.2 Reibverhalten einer Schiene gegenüber Schienenzwischenlage

Der Reibungskoeffizient zwischen Schiene und Schienenzwischenlage bzw. Spannklemme hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der numerischen Simulation. Zu seiner Bestimmung wurden Messungen an einem Reibungsprüfstand im Labor des Institutes für Infrastruktur, Arbeitsbereich Eisenbahnwesen an der Universität Innsbruck durchgeführt.

3.4.2.1 Versuchsdurchführung

Für diesen Versuch wurde eine Schwelle des Oberbausystems W 14 mit dazugehöriger Schiene, Spannklemme SKL 14, Schienenzwischenlage ZW 700 und Winkelführungsplatte 14K12 im Labor aufgebaut.

Die Schwelle wurde um 90° gedreht auf einer Arbeitsplatte befestigt, so dass die Schiene in vertikaler Richtung mit einer Hydropulsanlage gezogen werden konnte. Die Durchschubversuche erfolgten mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten ($v = 0.6 \text{ mm/s}$, $v = 1.7 \text{ mm/s}$ – entsprechend DIN 53375 und $v = 5 \text{ mm/s}$) und zwei unterschiedliche Temperaturen ($T = -25^\circ\text{C}$ und $T = +20^\circ\text{C}$) für die ausgewählte Schienenzwischenlage ZW 700.

Die Ausziehungskraft wurde mittels Kraftmessdose, der Durchschubweg mit einem Wegaufnehmer gemessen. Je Geschwindigkeitsstufe wurden drei Versuche gefahren. Im Zuge dessen wurden die größten Durchschubweg, Durchschubkraft und Spannungen an den Spannklemmen mitaufgezeichnet.

3.4.2.2 Ergebnisse

Für die Auswertung wurde die Niederhaltekraft aus den aufgezeichneten Spannungen an den Federarmen berechnet. Die Durchschubkraft erhält man durch direktes ablesen an der Kraftmessdose. Die Reibungszahl wird aus dem Quotient aus Durchschubkraft und Niederhaltekraft gebildet. Die Gleitreibungszahl ergibt sich aus dem Mittelwert aus dem Verlauf der Reibungszahlen im Bereich zwischen 5 und 25 mm Durchschubweg (Bereich der Gleitreibung). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 dargestellt. Dabei handelt es sich um den Mittelwert aus drei Versuchen. Die Ermittlung der Gleitreibungszahlen wurde an der Universität Innsbruck durchgeführt.

Tabelle 2: Gleitreibungszahlen für die Schienenzwischenlage ZW 700 [Bericht Universität Innsbruck]

Zwischenlage	Gleitgeschwindigkeit (mm/s)	Versuchstemperatur (°C)	
		T = -25	T = +20
		Gleitreibungszahl (f)	
ZW 700	0.6	0.32	0.74
	1.7	0.33	0.77
	5.0	0.36	0.82

Die durchgeführten Reibungsversuche dienen hauptsächlich dazu, die Größenordnung der Reibungskoeffizienten vernünftig einschätzen zu können. Der Reibungskoeffizient wurde anschließend im Bereich der gemessenen Werte in der Simulation variiert und so angenommen, dass das Simulationsmodell bestmöglich mit der Praxis übereinstimmt.

3.5 Schlussfolgerung

Die Grundvoraussetzung einer erfolgreichen und verlässlichen Dimensionierungsberechnung mittels der Methode der Finiten Elemente stellt die wirklichkeitsnahe Beschreibung des Werkstoffverhaltens und die richtige Annahme der Randbedingungen (Reibung) dar.

Für die FE-Bauteilanalyse ist der Übergang auf mehrdimensionale Geometrien und Lastfälle notwendig. Die experimentelle Bestimmung der werkstoffabhängigen Modellparameter wird mit zunehmender Komplexität der Stoffgleichungen aufwendiger. Dies wiederum hat Einfluss auf die Berechnungszeiten (CPU-Zeit) des jeweiligen Gesamtmodells. Es liegt daher am Konstrukteur individuell für jede Dimensionierung ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Bestimmung der Modellparameter und richtige Implementierung im FE-Programm finden [7].

4 Erarbeitung des FE-Modells und Verifizierung

In Zeiten steigender Energie und Rohstoffkosten wird es immer wichtiger, vorhandene Materialien bestmöglich auszunutzen. Einer der Aufgaben als Kunststoff-Ingenieur ist daher auch, nicht nur die Funktionen von Neuentwicklungen zu optimieren, sondern diese auch auf ihre Materialausnutzung hin kritisch zu untersuchen.

Die Materialausnutzung kann einerseits über Verbesserungen der Werkstoffeigenschaften und spezielle Arten der Produktion erhöht werden, andererseits besteht auch die Möglichkeit der Optimierung der geometrischen Struktur eines Bauteils.

4.1 Vereinfachungen des FE-Modells

Die Baugruppe Schienenbefestigungssystem W 14 liegt als 3D CAD Modell vor und beschreibt somit exakt die geometrischen Verhältnisse. Basierend auf diesen Daten werden Vereinfachungen vorgenommen.

Die Berechnung eines gesamten Gleiskörpers (600 mm langes Schienenprofil) wird nicht durchgeführt, sondern mit Hilfe einer entsprechenden Annahme von Randbedingungen, welche im Nachfolgenden erläutert werden, wird eine Näherung an das Gesamtgleiskörpersystem ermöglicht.

Aufgrund der Symmetrie des Schienenbefestigungssystems (Abbildung 14) ist es sinnvoll, dass Berechnungsmodell, ausgehend von einem Vollmodell, auf ein Halbmodell zu reduzieren. In der Abbildung ist das Halbmodell mit eingezeichneter Symmetrieebene ersichtlich.

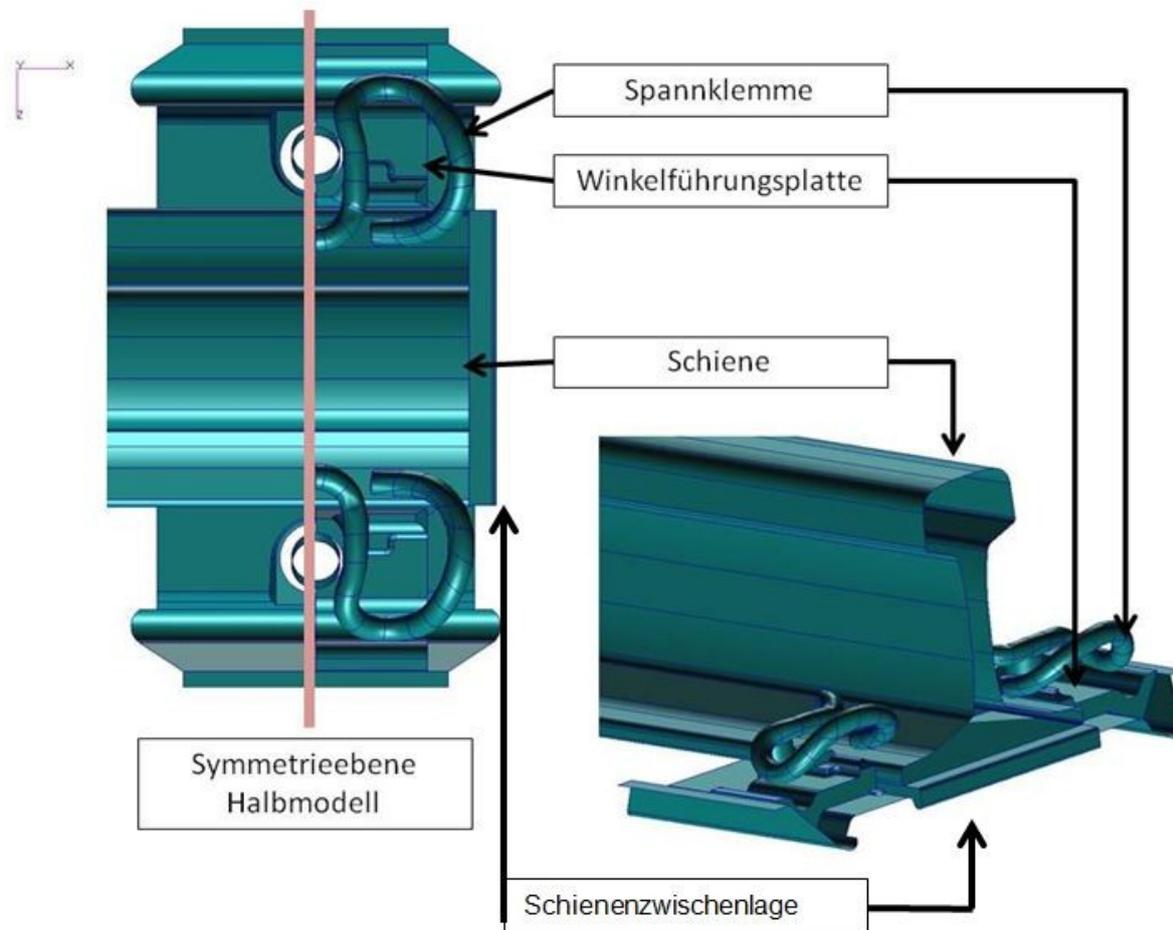


Abbildung 14: Draufsicht (links): Halbmodell des Schienenbefestigungssystem W14 mit Symmetrieebene (rote, durchgezogene Linie); Seitenansicht (rechts)

Durch den gezielten Einsatz von Symmetriebedingungen ergeben sich die gleichen Aussagen wie für ein Vollmodell. Die Vorteile dabei sind neben wesentlich kürzeren Rechenzeiten eine geringere Modellgröße und ein besserer Umgang mit dem Modell [3].

Für den Elastizitätsmodul der Winkelführungsplatte wird der in Abschnitt 3.1 ermittelte Wert ($E=5000 \text{ MPa}$) verwendet.

Im Simulationsmodell erfolgt eine Näherung von physikalischen Parametern. Die in den Referenzversuchen vorhandenen und genormten Bedingungen werden auch in der Simulation umgesetzt. Die Vereinfachungen sind nachfolgend beschrieben. Es erfolgt eine Vernachlässigung der Abnutzung des Materials der Wfp, Spannklemme und Schienenzwischenlage, der chemischen und physikalischen. Der Unterbau, die Schwelle und die Schiene wurden starr angenommen, da ihre Steifigkeit um ein Vielfaches höher ist. Die wesentlichen Parameter und Vereinfachungen sind in der Tabelle 3 dargestellt. Die Beziehungen der Reibkoeffizienten sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

Auf das FEM-Modell werden anschließend, entsprechend der Lastfälle, die Randbedingungen aufgebracht:

- Die Schiene und die Schwelle sind als Starrkörper ausgeführt
- Sperrung der Verschiebung in x-Richtung von Wfp, ZW, und Spannklemme in der Symmetrieebene
- Im Belastungsfall 2 erfolgt die Krafteinleitung mittels Kontrollknoten; Die Verdrehung der Schiene entlang allen Raumachsen wird mittels Hilfsknoten am Starrkörper Schiene unterdrückt

Tabelle 3: Parameter und Vereinfachungen FE-Modell

Element	Materialmodell	Eigenschaft	Elementtyp und Anzahl		
			Elementtyp	Volumen	Anzahl
<i>Winkelführungsplatte</i>	E=5000 MPa	Verformbarer Körper	vier-knotige Tetraeder	Volumen	61069
<i>Schienezwischenlage</i>	Mooney 3 Parameter	Verformbarer Körper	vier-knotige Tetraeder	Volumen	71028
<i>Spannklemme</i>	E=206.000 MPa	Verformbarer Körper	vier-knotige Tetraeder	Volumen	75553
<i>Schwellenschraube</i>	$F_v=17.5$ kN	Wirkt als Kraft auf Klemme			
<i>Schiene</i>	3D-Oberfläche	UIC 60, Starrkörper	Vierecke	Fläche	25
<i>Betonschwelle</i>	3D-Oberfläche	Starrkörper	Vierecke	Fläche	34

Tabelle 4: Verwendete Reibkoeffizienten des FE-Modells

	<i>Winkelführungsplatte</i>	<i>Schienezwischenlage</i>	<i>Spannklemme</i>	<i>Betonschwelle</i>	<i>Schiene</i>
<i>Winkelführungsplatte</i>		0.5	0.1	0.5	0.5
<i>Schienezwischenlage</i>	0.5			0.5	0.3
<i>Spannklemme</i>	0.1				0.3

4.2 Berechnungen

Für die Berechnungen sind zwei Geometrien der Wfp zu untersuchen. Das Standardmodell „Wfp 14K12“ (Abbildung 15) und ein Vorschlag eines verrippten

Modells (Abbildung 15) der Wfp der Produktentwicklung aus der Division Formartikel. Globales Ziel der Berechnungen ist ein aufzeigen des Kraftflusses am Bauteil unter verschiedenen Belastungsannahmen.

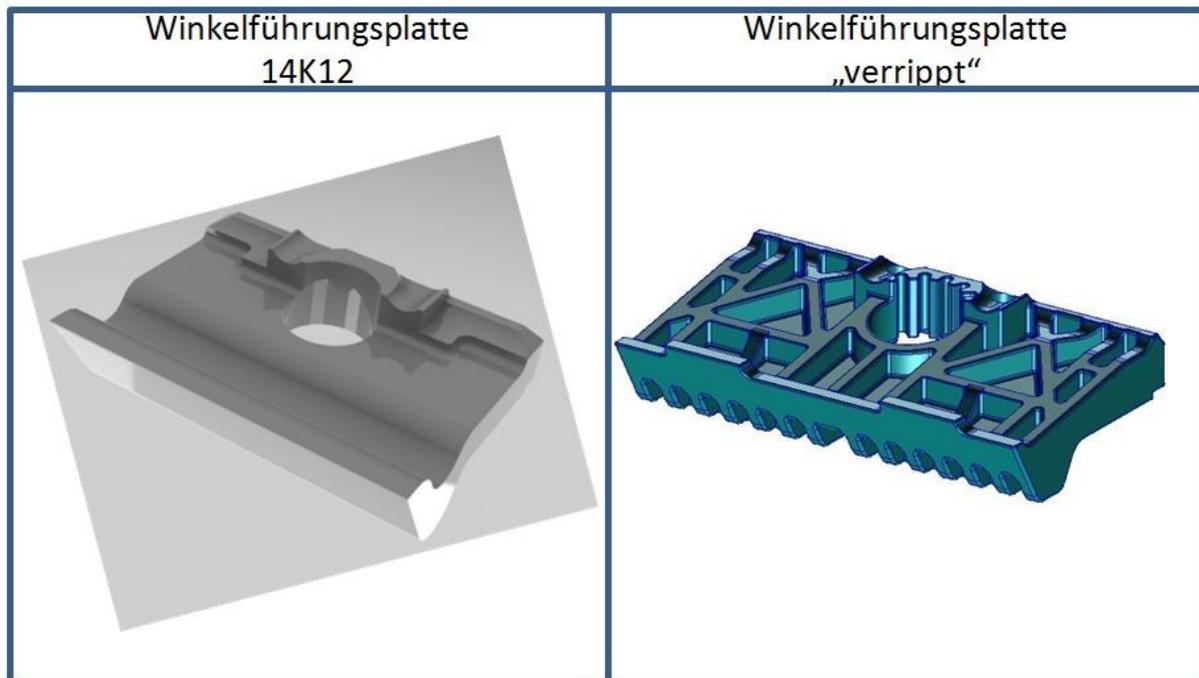


Abbildung 15: Darstellung der zu berechnenden Winkelführungsplatten

4.2.1 Berechnung Standardmodell Wfp 14K12

Für die Berechnung der Winkelführungsplatte im Schienenoberbaugesamtsystem wurden drei kombinierte Lastfälle ausgewählt. Bei den Lastfällen handelt es sich um:

- Erarbeitung eines geeigneten FE-Modells
 - Ziel: Verifikation Gesamtmodell (physikalisch richtiges Verhalten)
- Montagevorgang der Wfp und anschließender quasistatischer Überfahrt
 - Ziel: Verifikation Verformungsverhalten ZW (Materialmodell ZW, Reibungskoeffizienten)
- Nachrechnung Dauerlastversuch EN 13481-2 und EN 13146-4
 - Ziel: Verifikation Verformungsverhalten Wfp (Schienenfußverschiebung)
- Bogenfahrt (Worst-Case Betrachtung)
 - Ziel: Verwendung für Optimierung Wfp

Als praktischer Referenzversuch für den Montagevorgang und Überfahrt dient die Ermittlung der statischen Federkennziffer der Schienenzwischenlage ZW 700 nach

DBS 918235, gemessen als Sekantensteifigkeit zwischen 18 und 68 kN, sowie die Einsenkungen der SZL bei diesen Belastungen.

Als praktischer Referenzversuch für die Rundbogenfahrt dient der Scherenhebelschwingversuch nach EN 13146-4 und Belastungen nach EN 13481-2.

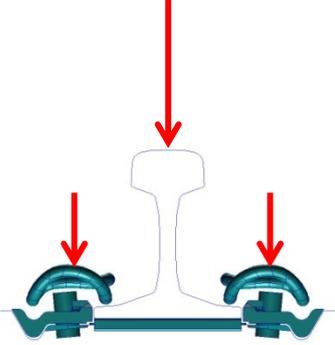
4.2.1.1 Belastungsfall Montage Wfp und Überfahrt

Mit Hilfe dieses Belastungsfalles erfolgt eine Verifikation des Gesamtmodellsystems, im speziellen das Einfederungsverhalten der SZL (Gesamtvorspannung SZL: $2 \times 9 = 18$ kN, In Summe: 18kN). Weiteres wird die Belastung und Verformung der Wfp beim Montagevorgang ersichtlich. Im Folgenden wird das Verhalten der Wfp im Montagevorgang und anschließender Überfahrt eines Rades (Belastung=50 kN; entspricht einer Gesamtbelastung der Zwischenlage von 68 kN) mit einer Achslast von 210 kN in der Simulation quasistationär abgebildet.

Zunächst werden die Federarme der Spannklemme auf den Schienenfuß geschoben und mit einer vertikalen Kraft von 17.5 kN (Halbmodell) belastet. Die Kräfte werden auf die Spannklemme so aufgeteilt, dass sie nur in der Auflagefläche der Schwellenschraube, welche nicht simuliert wird, wirken. Die Belastung von 17,5 kN auf die Spannklemme berechnet sich aus den praktischen Durchschubversuchen. Die hier gemessene Kontaktkraft der Klemme auf die Schiene beträgt 9 kN und die Kontaktkraft der Spannklemme auf die Auflagerfläche der Wfp (Sicke) beträgt ebenfalls 9 kN (In Summe 18 kN). Durch ein Stufen-Lösungsverfahren wurde die notwendige Kontaktkraft für die Simulation ermittelt. Diese beträgt 6,5 kN im Kontaktbereich von Spannklemme auf Schiene, sowie 6,5 kN im Bereich der Sicke der Wfp. Am Ende des Montagevorganges muss die Mittelschleife der Spannklemme die Auflagerrippe der Winkelführungsplatte berühren. Der Sickenbereich der Wfp liegt zu Beginn des Montagevorganges in der Betonschwelle und durch das Einschrauben der Schwellenschraube, simuliert durch die Kraftaufbringung auf die Spannklemme, wird diese zwangsverformt. Der Bereich der Klemmauflage der Wfp liegt nun vollständig auf der Betonschwelle auf. Nach der Montage befindet sich die Winkelführungsplatte in einem vorgespannten Zustand, wobei die Belastung im Bereich der Wfp-Oberseite hauptsächlich eine Zugbelastung darstellt. Nach diesem Zeitpunkt wird die Einfederung der Schienenzwischenlage ausgewertet und dargestellt. Im Anschluss an den Montagevorgang erfolgt die Belastung der Schiene mittels einer, symmetrisch an der Schienenkopfoberfläche angreifenden, Punktlast von 25 kN (Halbmodell). Am Ende des Belastungsvorganges wird ebenfalls die Einfederung der Schienenzwischenlage ermittelt, sowie die maximale Randfaserspannung an der Winkelführungsplatte.

In der Tabelle 5 sind die einzelnen Belastungsfälle aufgelistet und in der Abbildung 16 wird schematisch der Montagevorgang in der Simulation dargestellt.

Tabelle 5: Belastungsfälle Montagevorgang und Überfahrt

Belastungsfall	Beschreibung	Schematische Darstellung
1.1	Absenken Wfp in Betonschwelle	
1.2	Aufbringen der Kraft (17.5 kN \cong Schraubkraft) auf Spannklemme und kraftschlüssige Befestigung der Schiene mit Betonschwelle	
1.3	Aufbringen der Punktlast von 25 kN auf Schienenkopf in Symmetrieebene	

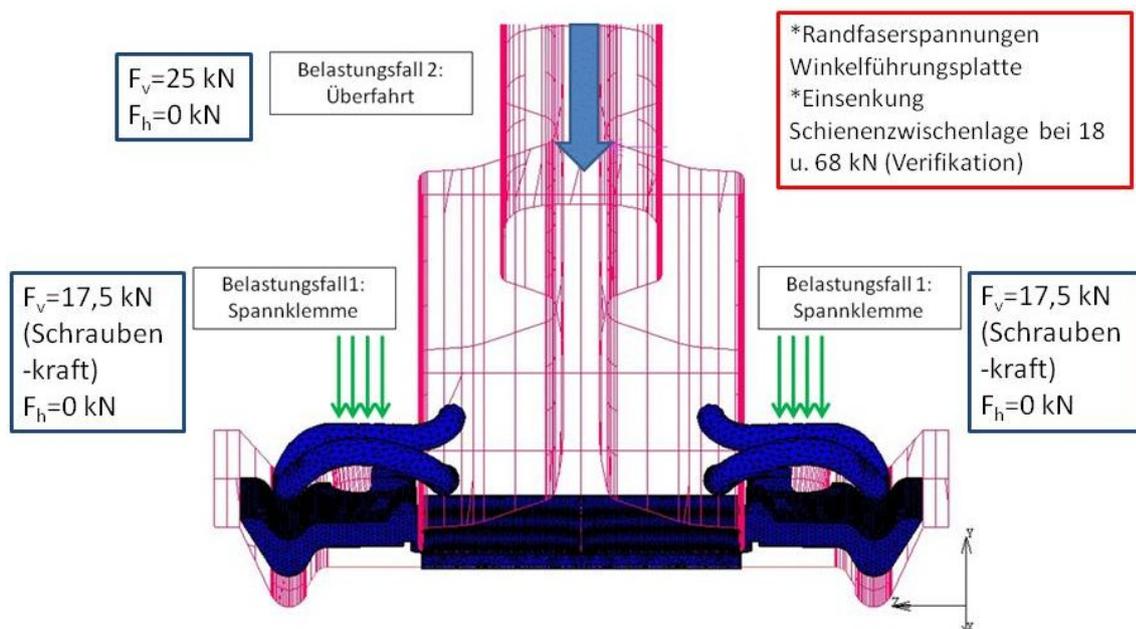


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Belastungssituation für den Montagevorgang und anschließender Überfahrt

4.2.1.2 Referenzversuch Einsenkung Schienenzwischenlage

Wie in Abschnitt 4.4.2 bereits erwähnt wurde, dient die Messung der Einsenkung der Schienenzwischenlage bei 18 und 68 kN als praktischer Referenzversuch zur Abgleich der Simulationsergebnisse. Die Prüfnorm für diesen Versuch ist die DBS 918235. Als Prüfmittel wird eine Prüfmaschine vom Typ Zwick 1484, ein zusätzlicher externer Wegaufnehmer und eine Prüfsoftware verwendet. In der Abbildung 17 ist

der schematische Prüfaufbau dargestellt. Die Schienenzwischenlage wird für die Prüfung zwischen zwei Druckplatten gelegt, welche durch zwei Blatt Schleifleinen getrennt sind. Der Wegaufnehmer liegt frei an den Druckplatten auf. Zur Ermittlung der Druck-Formänderungskurve sind zunächst zwei Setzzyklen durchzuführen. Danach ist ein aufzuzeichnender Messzyklus ohne Erholung durchzuführen. Die Prüfgeschwindigkeit ist 2 kN/ s bis ein Endwert von 100 kN erreicht ist.

Es werden sechs Schienenzwischenlagen nacheinander gemessen und die Einsenkung der SZL bei 18 und 68 kN ermittelt. Als weitere Auswertung dient die statische Federkennziffer der SZL, gemessen als Sekantensteifigkeit zwischen 18 und 68 kN. Dieser Wert dient als Verifizierung des praktischen Versuches selbst. Der Wert der statischen Federkennziffer muss zwischen 60 und 80 kN/mm liegen.

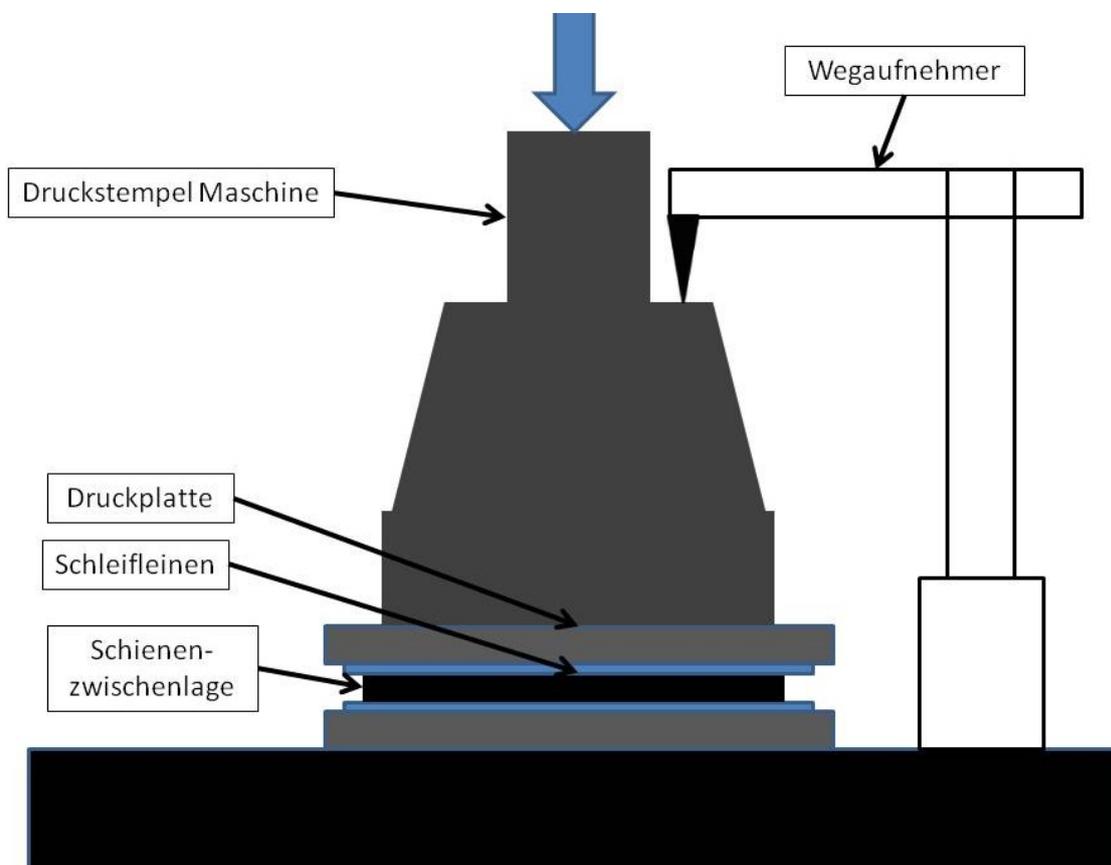


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Ermittlung der Einsenkungen der SZL bei 18 und 68 kN

4.2.2 Ergebnisse Belastungsfall Montage Wfp und Überfahrt

Die nachfolgende Tabelle 6 stellt die Ergebnisdaten der Berechnung der Belastungsfälle gegenüber.

Betrachtet man den Federweg der Schienenzwischenlage bei einer Belastung von 18 kN (Ende Montagevorgang) so stellt sich ein Federweg von 0,5 mm im Praxisversuch und 0,85 in der Simulation ein. Berücksichtigt man die getroffenen Randbedingungen und Vereinfachungen, dann wird deutlich, dass die Berechnungsergebnisse im richtigen Größenordnungsbereich liegen und für die Verifikation verwendbar sind. Dasselbe gilt für die Belastung von 68 kN (Ende Überfahrt) und damit zeigt die FEM-Rechnung gute Übereinstimmung mit der Realität.

Durch die Bauteilbelastung treten Randfaserzugspannungen auf. Diese entstehen durch das Aufkippen der Wfp beim Montagvorgang aufgrund von Passungsunterschieden zwischen Wfp und Betonschwelle. Das Aufkippen der Wfp beträgt 1.2 mm. Weiteres ist die Höhe der Randfaserzugspannungen stark von der Schwellengeometrie abhängig.

Die nachfolgende Tabelle stellt ebenfalls die Ergebnisse der Ermittlung der statischen Federkennziffer c_{stat} und Einsenkung der ZW bei 18 und 68 kN dar. Es zeigt sich eine ausreichend genaue Berechnung der ZW-Einfederungswege. Die Abbildung 18 zeigt die Kurvenverläufe des Einfederungsversuches.

Tabelle 6: Ergebnisse der Simulation für den Montagevorgang (Belastungsfall 1.2) und Überfahrt (Belastungsfall 1.3)

	Wfp 14K12 (Prüfergebnisse an Bauteilen; Mittelwert aus 6 Prüfungen)	Wfp 14K12 (Simulation)	Wfp verrippt (Simulation)
Einfederung SZL	Federweg in mm		
Weg bei 18 kN (mm)	0.5	0.85	
Weg bei 68 kN (mm)	1.26	1.3	
Federkennziffer C (kN/mm)	Mittelwert Serie (6 SZL)		
	65.6		
Max. Randfaserspannung (MPa)		35 (bei 1.2 mm aufkippen)	20-35

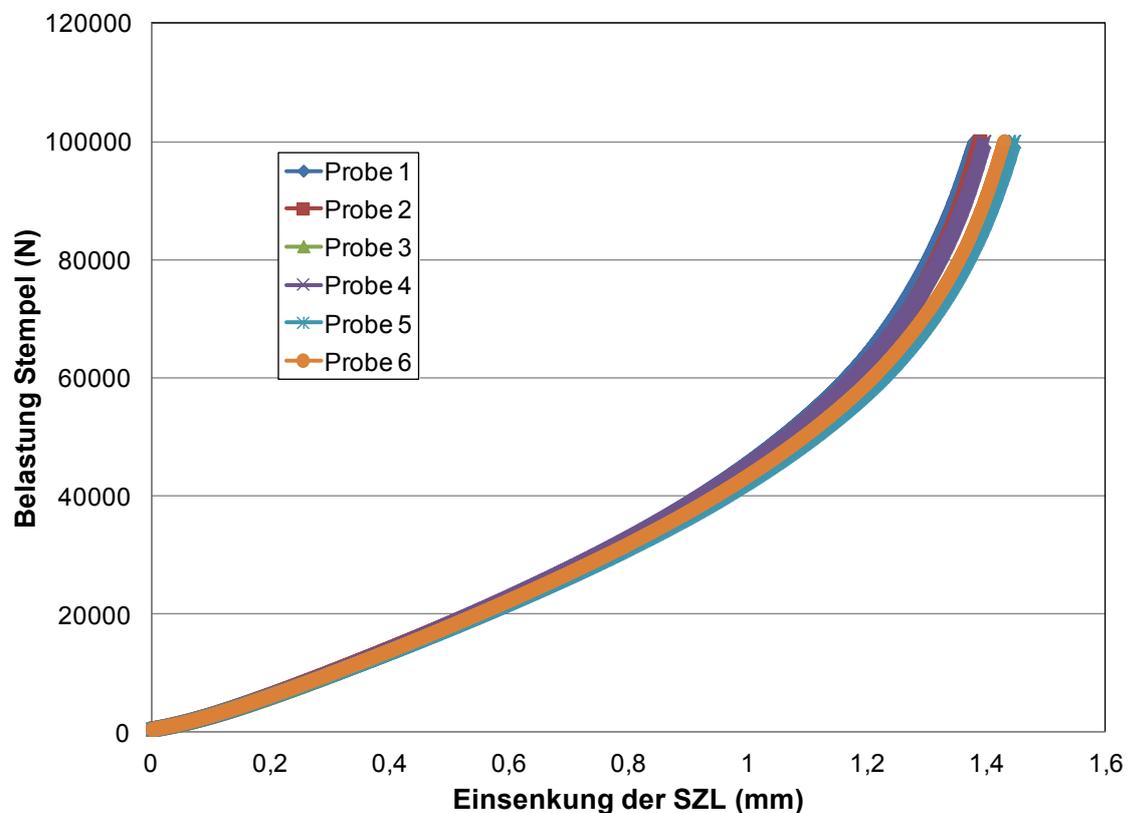


Abbildung 18: Kurvenverläufe des statischen Einfederungsversuches, Probe 1 bis 6

4.2.2.1 Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse

Um eine erste Übersicht über die Spannungsverläufe zu erhalten bietet sich die Mises Vergleichsspannung an. Im Belastungsfall Montage Wfp und anschließender Überfahrt stehen die Randfaserbereiche im Vordergrund.

Die Mises Vergleichsspannung muss jedoch differenziert betrachtet werden, da sie eine fiktive einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer mehrachsiger Spannungszustand. Weiteres werden Zug- und Druckspannungen nicht getrennt dargestellt. Im Finiten Elemente Solver werden die Spannungen zudem nicht direkt, sondern mittels einer Nachlaufrechnung aus den Verformungen, genauer aus deren Ableitungen gebildet. Alle Fehler an der Diskretisierung haben somit direkte Auswirkung auf das Spannungsfeld.

In der Abbildung 19 sind die Mises Spannungsverläufe an der Wfp14K12 ersichtlich. Die Spannungen sind am Ende des Belastungsfalles „Montage“ ($F=18$ kN) in Form eines Farbplotes dargestellt. Im Sickenbereich der Wfp treten Druckspannungen und im Randfaserbereich Zugspannungen. Entscheidend für das Versagen des Bauteils sind die maximalen Randfaserzugspannungen.

In der Abbildung 20 sind die Mises Spannungsverläufe an der verrippten Wfp ersichtlich. Die Spannungen sind am Ende des Belastungsfalles „Montage“ ($F=18$ kN) in Form eines Farbplotes dargestellt. In dieser Abbildung ist deutlich ersichtlich, dass die höchsten Spannungen ($\sigma=35$ MPa) am Rippenkreuzungspunkt auftreten und nicht wie bei der Standard Wfp am Rand. Dies zeigt auch den Einfluss und somit auch Vorteil einer Rippenausführung auf, da die Spannungen und somit der Kraftfluss gelenkt werden kann.

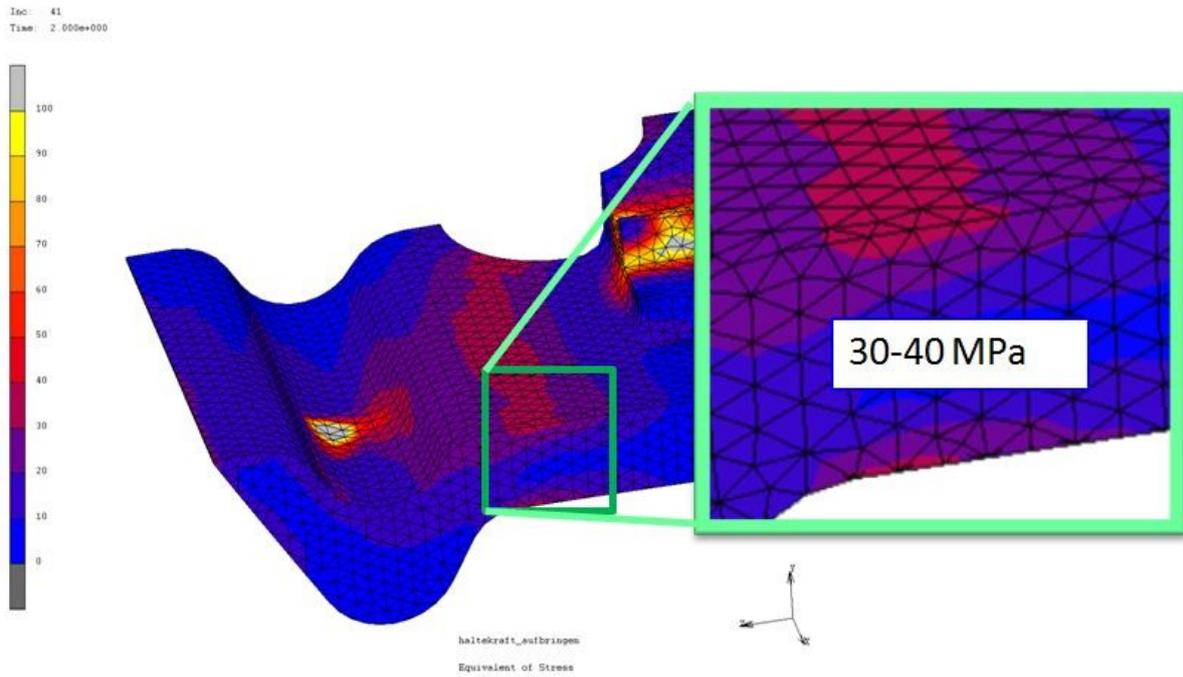


Abbildung 19: Spannungsverteilung mit max. Randfaserspannung

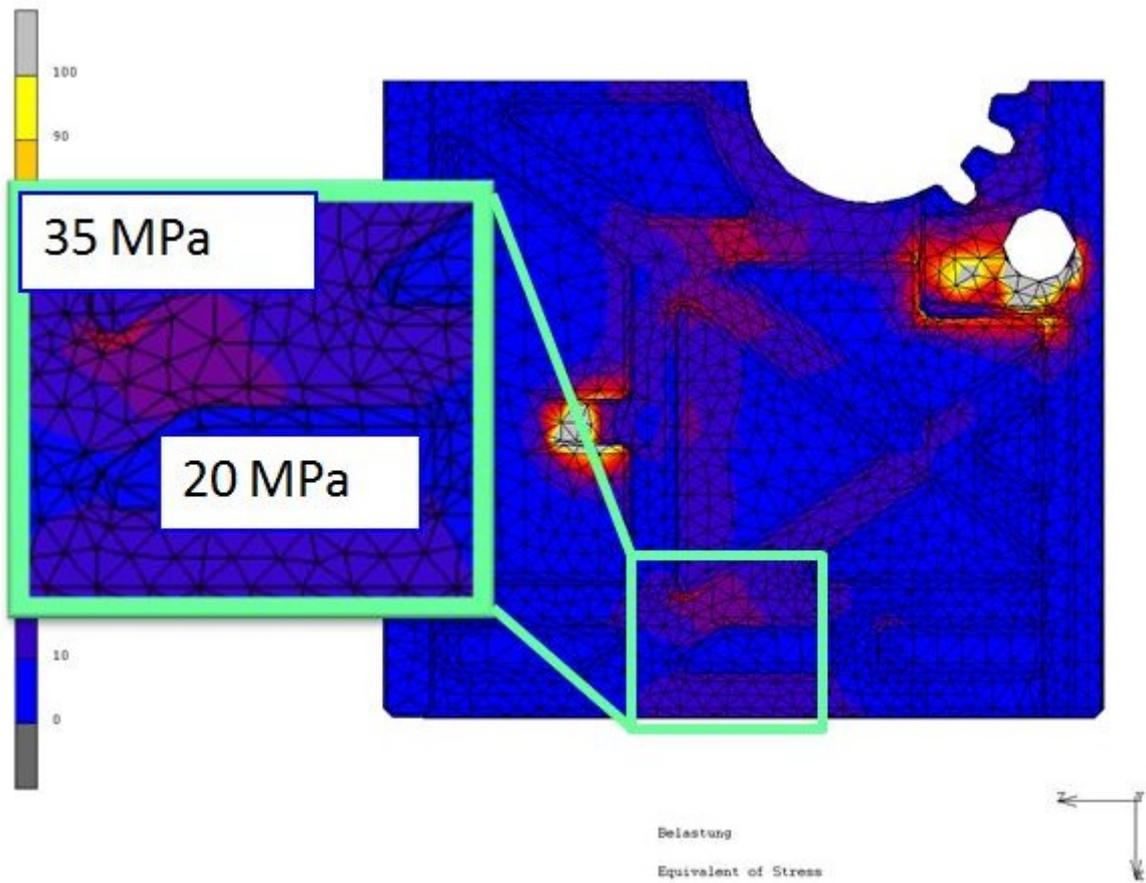


Abbildung 20: Spannungsverteilung mit max. Randfaser; verrippte Wfp

4.2.3 Berechnung Bogenfahrt und Worst-Case Szenario

4.2.3.1 Belastungsfälle

Betrachtet man die Bogenfahrt eines Schienenfahrzeuges, so wirken auf das Schienenfahrzeug Zentrifugalkräfte, die es aus dem Schienenrundbogen tragen möchten. Diese Fliehkräfte (=Scheinkräfte) sind umso stärker, je schärfer ein Rundbogen d.h. je kleiner der Krümmungsradius, ist und je schneller das Schienenfahrzeug fährt. Diese Kraft ist zum Quadrat der Geschwindigkeit proportional. Bei doppelter Geschwindigkeit ist die Zentrifugalkraft viermal so hoch [9].

Die zuvor beschriebenen Belastungen im Verlauf der Rundbogenfahrt haben Einfluss auf das Schienenbefestigungssystem. Um die Funktionsfähigkeit der Wfp im System zu überprüfen, werden die Belastungsfälle nach EN-13146 und die Bogenfahrt simuliert. Im Folgenden wird das Verhalten der Wfp im Montagevorgang und anschließender Überfahrt eines Rades im Bogen quasistationär abgebildet. Der Montage Vorgang ist ident mit dem in Abschnitt 4.4.1.1 dargestellten Belastungsfall. Nach Beendigung des Montagevorganges beginnt der Belastungsfall Rundbogenfahrt, wobei hier unterschieden wird zwischen zwei Belastungshöhen. Einerseits die Lastaufbringung angelehnt an die Norm EN 13146 (Lastfall 2.a) und andererseits einer definierten Worst-Case Belastung (Lastfall 2.b).

Beide Lastfälle haben den gleichen Lastangriffspunkt (Abbildung 21), jedoch unterscheiden sie sich in der Höhe der Belastung. Beim EN 13146 Lastfall wird die maximale resultierende Belastung von 75 kN in eine horizontale Kraftkomponente von $F_h=40.9$ kN und eine vertikale Kraftkomponente von $F_v=62.9$ kN aufgeteilt. Hiermit ist eine Verifikation der Rechnung mit den Ergebnissen einer realen EN-Prüfung möglich. Beim Worst-Case Belastungsfall werden auf denselben Lastangriffspunkt eine vertikale Kraftkomponente von 40 kN und eine horizontale Kraftkomponente von 100 kN eingeleitet. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Worst-Case Betrachtung können für die Optimierung der Wfp verwendet werden.

Bei der Auswertung der Lastfälle steht neben der Lokalisierung der Spannungsfelder an der Winkelführungsplatte auch die horizontale Verschiebung des Schienenfußes im Vordergrund. Die horizontale Verschiebung des Schienenfußes dient zur Verifizierung des Simulationsmodells Bogenfahrt mit dem praktischen Scherenhebelschwingversuch (EN 14146).

In der Abbildung 21 ist das Belastungsszenario der Rundbogenfahrt schematisch dargestellt. Deutlich erkennbar ist der resultierende Lastangriffspfeil, der sich in eine horizontale und vertikale Komponente aufteilt (grüne Pfeile).

In der Tabelle 7 sind die einzelnen Belastungsfälle aufgelistet.

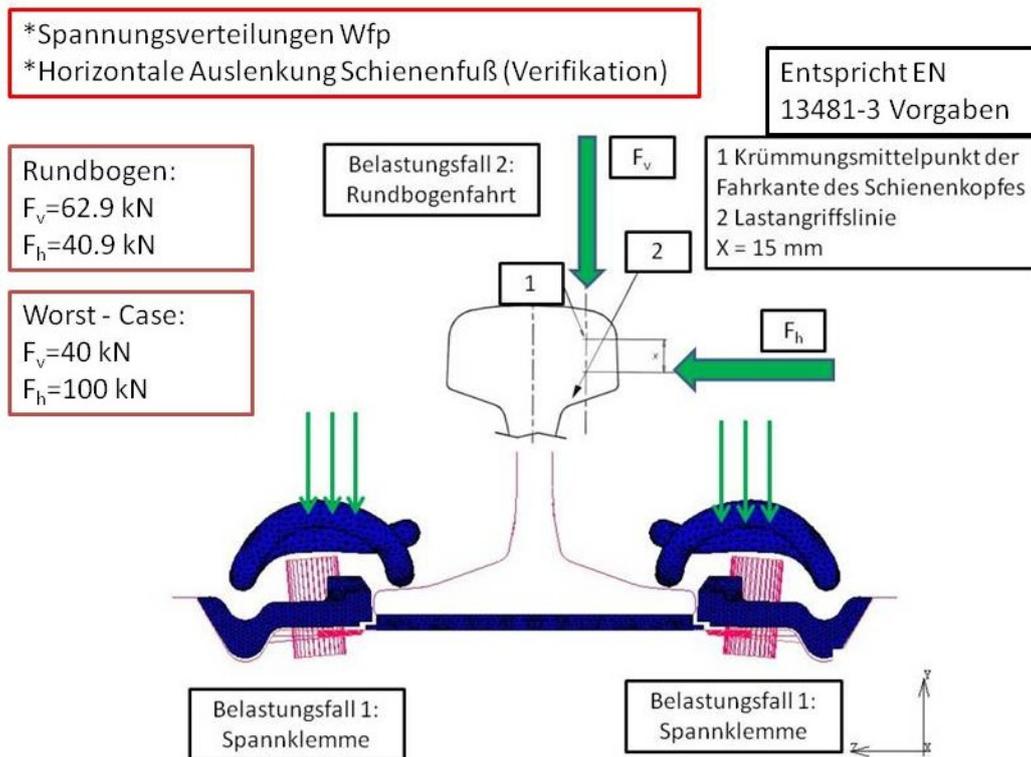


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Belastungsfalles Rundbogenfahrt mit vertikalen und horizontalen Kraftangriffspunkt

Auf das FEM-Modell werden anschließend, entsprechend der Lastfälle, die Randbedingungen aufgebracht:

- Die Schiene und die Schwelle sind als Starrkörper ausgeführt
- Sperrung der Verschiebung in x-Richtung von Wfp, ZW, und Spannklammer in der Symmetrieebene
- Im Belastungsfall Bogenfahrt erfolgt die Krafteinleitung mittels Kontrollknoten; Die Verdrehung der Schiene entlang der Y- Raumachse wird mittels Hilfsknoten am Starrkörper Schiene unterdrückt

Tabelle 7: Übersicht über den Ablauf der Belastungsfälle

Belastungsfall	Beschreibung	Schematische Darstellung
2.1	Absenken Wfp in Betonschwelle	
2.2	Aufbringen der Kraft (17.5 kN \triangleq Schraubenkraft) auf Spannklemme und kraftschlüssige Befestigung der Schiene mit Betonschwelle	
2.3.a	Aufbringen der Punktlast von 75 kN auf Schienenkopf in Symmetrieebene lt. EN-13146;	
2.3.b	Aufbringen der Punktlast von 75 kN auf Schienenkopf in Symmetrieebene lt. Worst-Case Belastung;	

4.2.3.2 Referenzversuch nach EN 13146-4 und 13481-2

Um eine richtige Beurteilung der Simulationsergebnisse vornehmen zu können, wird parallel dazu der Dauerschwingversuch, auch als Scherenhebelschwingversuch bezeichnet, nach EN 13146-4 am Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau an der Technischen Universität in München durchgeführt.

Der Scherenhebelschwingversuch ist ein Laborverfahren zur Aufbringung wiederkehrender Belastungen, repräsentativ für die Verschiebungen, die vom Verkehr auf Eisenbahngleisen hervorgerufen werden. Dieser Versuch wird zur Bewertung der Langzeitleistung direkter Befestigungssysteme verwendet und gilt für das gesamte Schienenbefestigungssystem [10].

Für den Dauerschwingversuch (Abbildung 22) ergibt sich laut der Norm eine Oberlast von $P_v/\cos \alpha = 75 \text{ kN}$, bei einem Lasteinleitungswinkel von $\alpha = 33^\circ$. Daraus errechnet sich für die Durchführung eines Scherenhebelschwingversuchs eine Oberlast von $2 \times \cos(33^\circ) \times 75 \text{ kN} = 125,8 (\pm 2) \text{ kN}$. Die für den Dauerversuch verwendeten Schienenstücke 60 E1 sind gemäß der DIN EN 13481-2 um das erforderliche Maß $X = 15 \text{ mm}$ abgefräst. Die Unterlast bei der Versuchsdurchführung beträgt $2 \times \cos(33^\circ) \times 5 \text{ kN} = 8,4 \text{ kN}$ bei einer Belastungsfrequenz von $4 (\pm 1) \text{ Hz}$. Damit wurde der Versuch für die Bezugswerte der Auswirkungen von Dauerbelastungen einer Radsatzlast von 225 kN (Richtwert) bzw. 260 kN (Auslegungssachslast) und

Gleisbogenhalbmesser von $> 150 \leq 400$ m nach Tabelle 1 der DIN EN 13481-2 durchgeführt.

Für den Vergleich mit der Simulation sind jedoch nur die Ergebnisse der statischen Voreichung des Schienenfußes (Einsenkung in Schienenzwischenlage; horizontale Verschiebung des Fußes) von Bedeutung und nicht der eigentliche Dauerschwingversuch, da dies in der Simulation nicht abgebildet wird.

•Horizontale Verschiebung des Schienenfußes nach Belastung

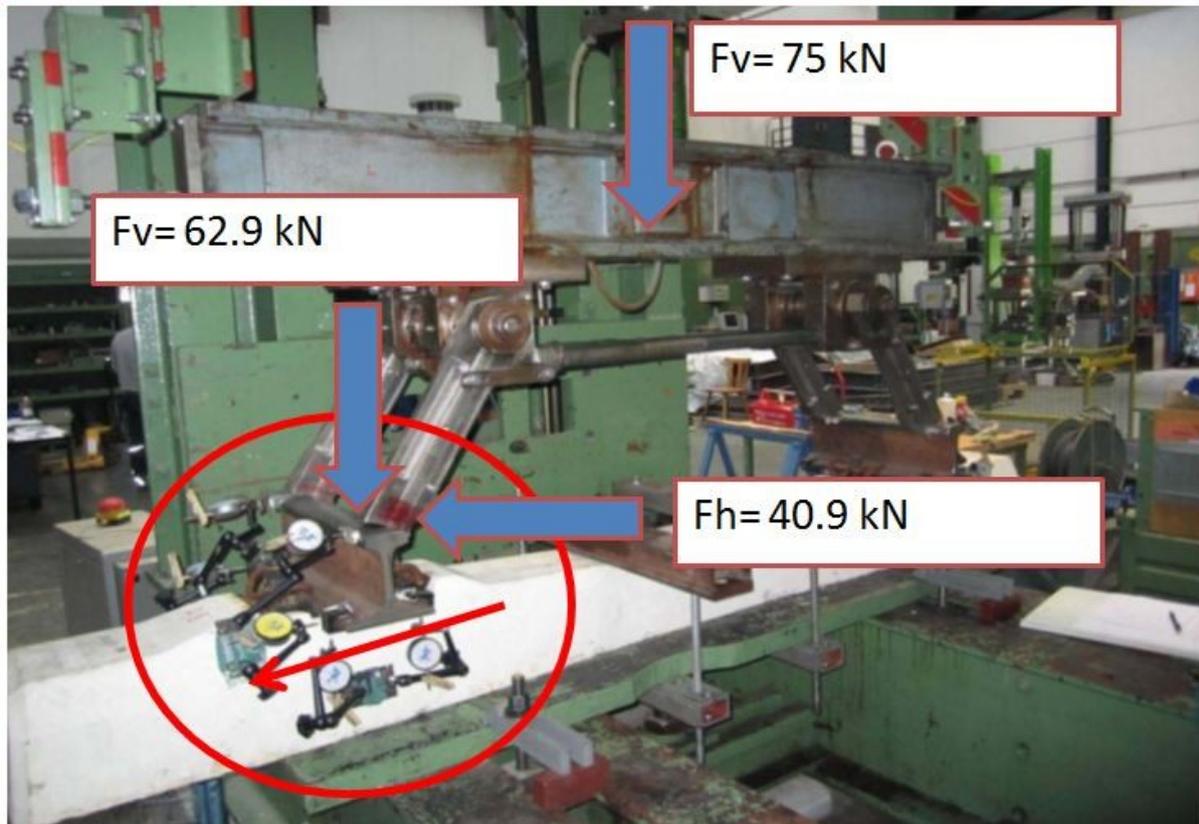


Abbildung 22: Prüfaufbau des Scherenhebelschwingversuches; $\alpha = 33^\circ$, $X = 15$ mm

Um eine Verifikation der Worst-Case Belastung bei Bogenfahrt zu ermöglichen, wurden in einem Gleisabschnitt verschiedene Messsensoren angebracht. Das Kippen des Gleisbogen (Kopf und Fuß) konnte so ermittelt werden. Die Strecke weist Bögen mit verschiedenen Radien auf und eignet sich daher bestens für ein Worst-Case Szenario bzw. Belastung. Die Messung wurde zur Gänze durch die Österreichischen Bundesbahnen durchgeführt.

4.3 Ergebnisse Belastung nach EN 13146-4 und Worst-Case Belastung

Wie in Abschnitt 4.4.3.1 bereits erläutert, wird zur Verifikation der Funktionalität des Simulationsmodelles die horizontale Verschiebung des Schienenfußes ermittelt. Dies erfolgt am Ende des Belastungsfalles 2.3.a und 2.3.b.

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Ermittlung der Schienenfußverschiebung abgebildet.

Tabelle 8: Ergebnisse Belastung nach EN und Worst-Case

	Wfp 14K12 (TUM)	Wfp 14K12 (Simulation)
CEN 13146	Bericht 2799	
Schienenfußverschiebung horizontal (mm)	0.6	0.701 (89 % Abbruch $\triangleq F_V=56 \text{ kN} / F_H=36.5 \text{ kN}$)
Worst-Case Belastung	Erfahrungswert ÖBB	
Schienenfußverschiebung horizontal (mm)	0.5	0.51 (70% Abbruch $\triangleq F_V=29 \text{ kN} / F_H=44 \text{ kN}$)

Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse wird folgendes, in Zusammenhang mit der Berechnung selber, ersichtlich:

- Die Lastfälle 2.3.a und 2.3.b konnten nicht vollständig berechnet werden
- Grund ist die Verletzung des Konvergenzkriteriums
- Die Randbereiche der ZW im Außenbereich der Schiene deformieren sich zu stark
- Die Verzerrung einzelner Knoten in diesem Bereich ist zu groß

Trotzdem ist festzuhalten, dass die so ermittelten Ergebnisse im Toleranzbereich der Verifikation liegen. In diesem Zusammenhang darf man nicht die Komplexität des Simulationsmodelles vernachlässigen.

4.3.1 Grafische und numerische Darstellung der Ergebnisse

Neben der Verifikation der Simulation selber mittels horizontaler Schienenverschiebung sind auch die Spannungsverläufe mit der Hilfe einer gekoppelten grafischen-numerischen Auswertung mit einzubeziehen.

Bei weiterführenden Untersuchungen mit Hilfe der FEM-Rechnung wurden deshalb auch die Verläufe der Spannungen untersucht. Die Eingabe- und Ausgabekennwerte der FEA erfolgt auf Basis der wahren Dehnung ε und der wahren Spannung σ . Dies bedeutet, jeweils auf die aktuelle Probenlänge und den aktuellen Probenquerschnitt bezogen. Die wahre Spannung σ berechnet sich aus der technischen Dehnung ε_t und der technischen Spannung σ_t wie folgt:

Wahre Dehnung (Hencky-Dehnung) in %:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_t + 1) \quad (4)$$

Wahre Spannung (Cauchy-Spannung) in N/mm²:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{(1 - \nu \cdot \varepsilon_t)} \quad (6)$$

Basierend auf diesen Hintergrund erfolgt die Auswertung der Spannungen im Programm MSC MARC. Unter Auswertung der Spannungen wird zunächst die Zuordnung der Spannungskomponenten zu den jeweiligen Elementtypen verstanden. Im Anschluss daran erfolgt die Ermittlung der Mises-Vergleichsspannung oder der Hauptspannungen. Bei der Auswertung der Spannungen bieten sich mit dem Programmsystem MSC MARC verschiedene Möglichkeiten an. Es ist jedoch notwendig, dass sich der Anwender Klarheit über die unterschiedlichen Spannungen verschafft, welche im Programm ermittelt bzw. ausgegeben werden [3].

Im Folgenden werden die Spannungsfelder der im System außen und innenliegenden Winkelführungsplatten dargestellt und auf deren Verläufe näher eingegangen. Die horizontale Kraft zeigt in die Richtung der außenliegenden Wfp. In der Abbildung 23 ist das Gesamtmodell mit dazugehöriger Definition von außen und innenliegender Winkelführungsplatte. Im Anhang 8.1 bis 8.10 sind die Spannungs- und Dehnungsverläufe der außen- und innenliegenden Wfp in den verschiedenen Belastungsfällen im Detail dargestellt. Ausgegeben wurde der Principal Cauchy Stress Max in MPa, welche die maximalen lokalen Zugspannungen im Bauteil aufzeigt sowie der Principal Cauchy Stress Min in MPa, welcher minimalen lokalen

die Druckspannungen im Bauteil darstellt. Für die Auswertung der Dehnungen wurde der Principal Total Strain Max (Dehnungen zufolge Zugbelastung) und Principal Total Strain Min (Dehnungen zufolge Druckbelastung) verwendet.

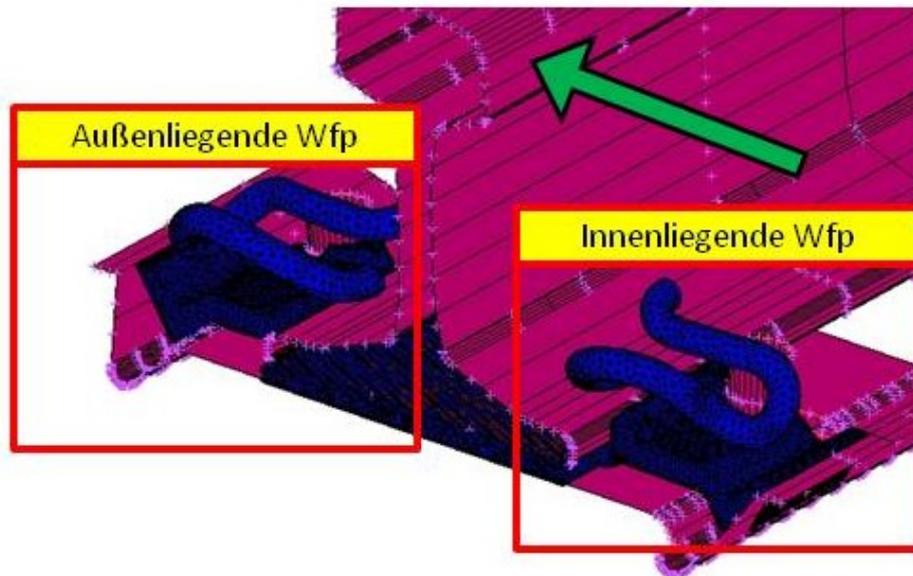


Abbildung 23: Gesamtsystem mit Definition außen- und innenliegende Wfp

Für die Spannungsanalyse werden die Chauchy-Spannungen ausgegeben. Bei der Betrachtung der auftretenden Spannungen wird deutlich, dass die Winkelführungsplatte Zugspannungsbereiche und Druckspannungsbereiche aufweist.

4.3.1.1 Tabellarische Übersicht der Simulationsergebnisse

Die Abbildung 24 zeigt die Positionen der Ergebnisse, welche in der Tabelle 9 dargestellt sind.

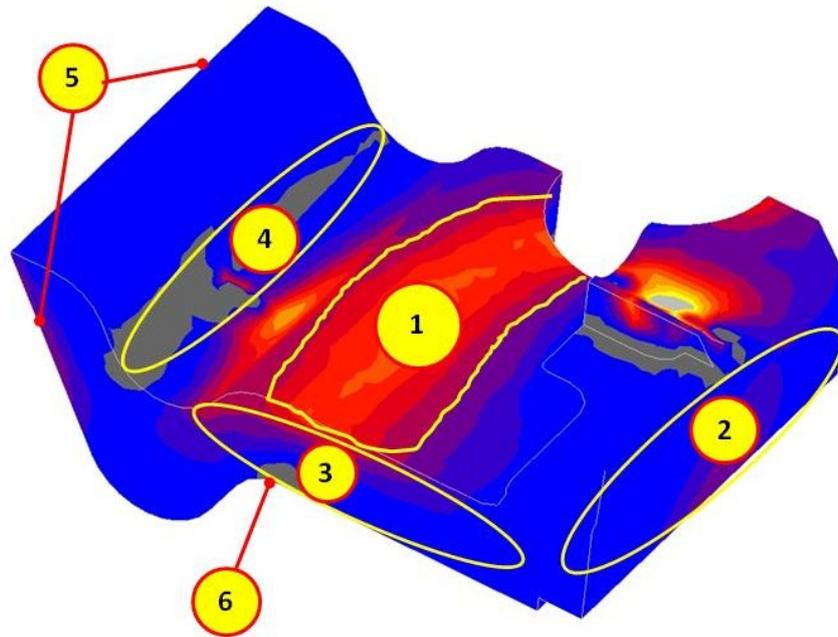


Abbildung 24: Lage der Positionen 1 bis 6 für die numerische Ergebnissdarstellung

Tabelle 9: Übersicht der Simulationsergebnisse

Lastfall Position	Montage (Außen/Innen)		Überfahrt-gerade (Außen/Innen)		EN-13146-4 ($F_V=56$ kN / $F_H=36.5$ kN), (Außen/Innen)		Worst-Case ($F_V=29$ kN / $F_H=44$ kN), (Außen/Innen)	
	Nummer 1 σ_{Max} (MPa) ϵ_{Max} (%)	42	42	42	42	42	48	44
	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	0.6	0.2
Nummer 2 σ_{Min} (MPa) ϵ_{Min} (%)	0	0	0	0	-90	0	-135	0
	0	0	0	0	1.8	0	2.7	0
Nummer 3 σ_{Min} (MPa) ϵ_{Min} (%)	-15	-15	-15	-15	-30	-15	-45	-15
	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0.9	0.3
Nummer 4 σ_{Min} (MPa) ϵ_{Min} (%)	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250	-250
	5	5	5	5	3	3	3	5
Nummer 5 σ_{Min} (MPa) ϵ_{Min} (%)	0	0	0	0	-30	0	-45	0
	0	0	0	0	0.6	0.6	0.9	0.3
Nummer 6 σ_{Min} (MPa) ϵ_{Min} (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Im Nachfolgenden werden bestimmte Ergebnisse von Positionen näher beschrieben.

- Positionsnummer 1:

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die äußere Winkelführungsplatte am Ende des Belastungsfalles 2.3.a. Ausgegeben wurde der Principal Cauchy Stress Max in MPa sowie der Principal Cauchy Stress Min in MPa. Die Zugspannungen breiten sich von der Bohrung weg sowie in der Mitte der Wfp aus. Die höchste Belastung liegt bei 42 MPa im Bereich mit der Positionsnummer 1 der Abbildung 25. Die Zugspannungen entstehen durch die Geometrie der Wfp und der Betonschwelle, da diese sich wie ein Kragträger mit außenangreifender Last verhalten. Die Sicke der Wfp stellt hierbei das eingespannte Ende dar. Die Zugspannungen am Ende des Montagevorganges sowie am Ende der Belastungsfälle unterscheiden sich nicht im quantitativen Verlauf und in der Höhe ist hier kein Ansteigen erkennbar. Desweiteren besteht kein Unterschied im Verlauf der Zugspannungen zwischen außen- und innenliegender Wfp. Dies wird durch die Abbildungen im Anhang 8.1 verdeutlicht. Im Auflagebereich der Spannklemme ergeben sich Zug- und Druckspannungen. Die Höhe der Zug- und Druckspannungen entsprechen jedoch nicht der Realität, da die Simulationen einer linear-elastischen Annahme zugrunde liegen. In der Realität tritt ein visko-elastisches Verhalten der Wfp auf.

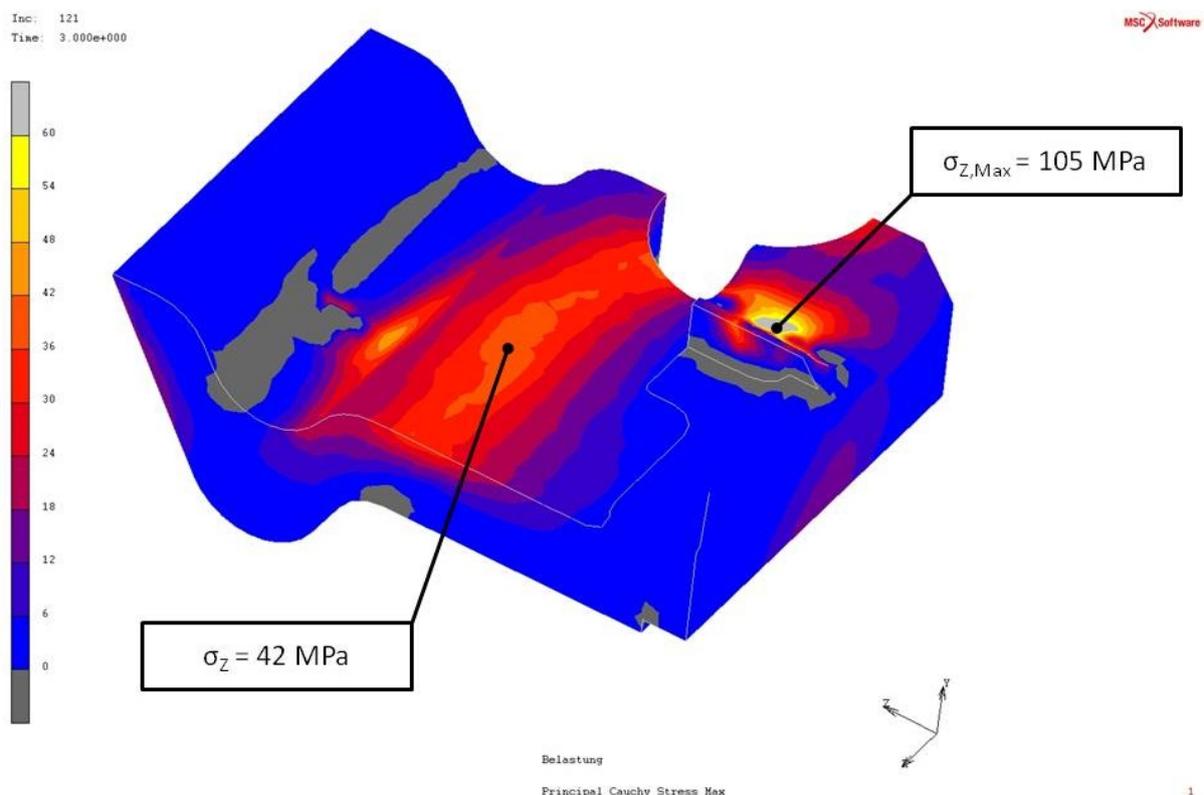


Abbildung 25: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles 2.3.a, außenliegende Wfp

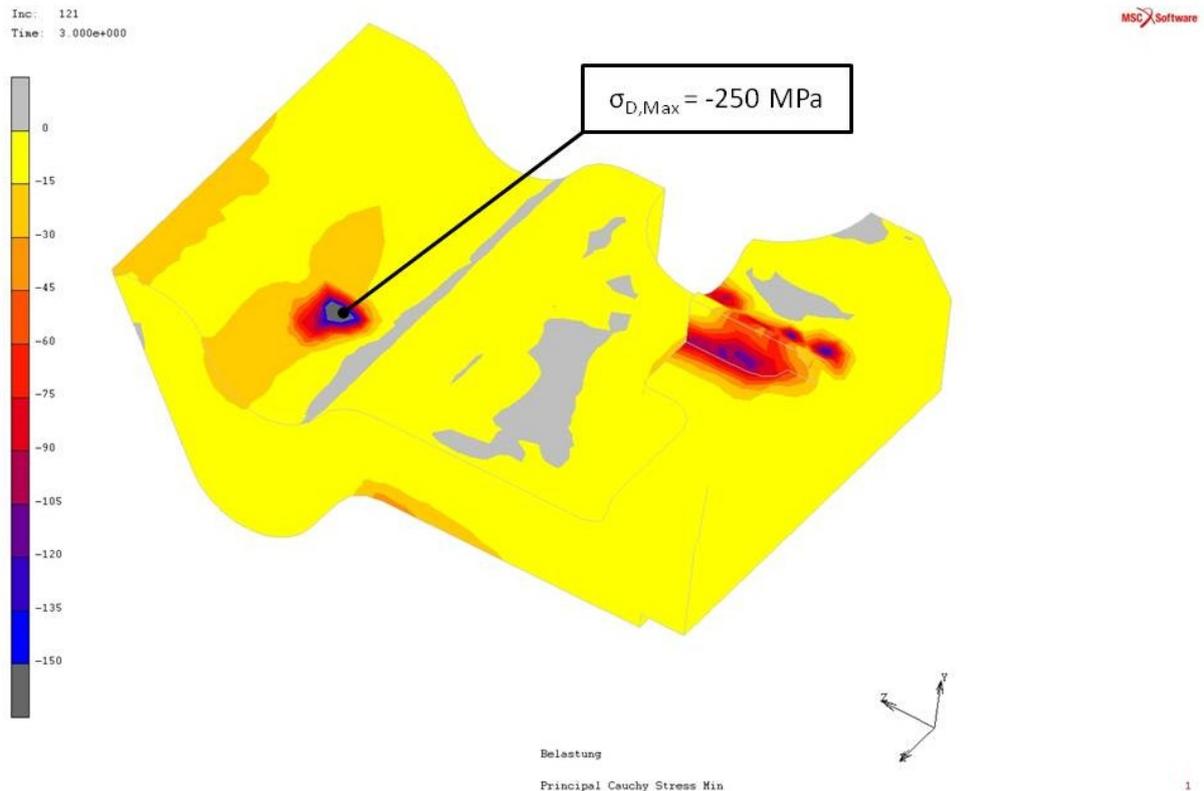


Abbildung 26: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles 2.3.a, außenliegende Wfp

Betrachtet man die numerischen Werte der Bogenfahrt und Worst-Case Belastung für die Position 1, so ist hier ein Anstieg der Zugspannungen feststellbar. Der Anstieg der Belastung tritt ein, da die äußere Wfp die erhöhte horizontale Belastung aufnehmen muss. Im Vergleich zum Anstieg der Druckspannungen ist dieser jedoch gering.

- Positionsnummer 2:

Im Belastungsfall Bogenfahrt und Worst-Case wird der Anstieg der Druckspannungen im Bereich der Position 2 der äußeren Wfp erkennbar, da aufgrund der Belastungssituation die Schiene in horizontaler Richtung verschoben wird. Die Ausbreitung (Abbildung 27 und 28) ist jedoch nicht gleichmäßig, sondern in Richtung der Bohrung abfallend. Die Bohrung stellt eine Weichheit des Bauteiles dar und der Kraftfluss nimmt in diesen Bereich ab. Die im System innenliegende Wfp weist im Gegensatz dazu geringe Druckspannungen im Bereich der Position 2 auf, da sich der Schienenfuß aufgrund der Belastungssituation von der Wfp entfernt.

4. Erarbeitung des FE-Modells und Verifizierung

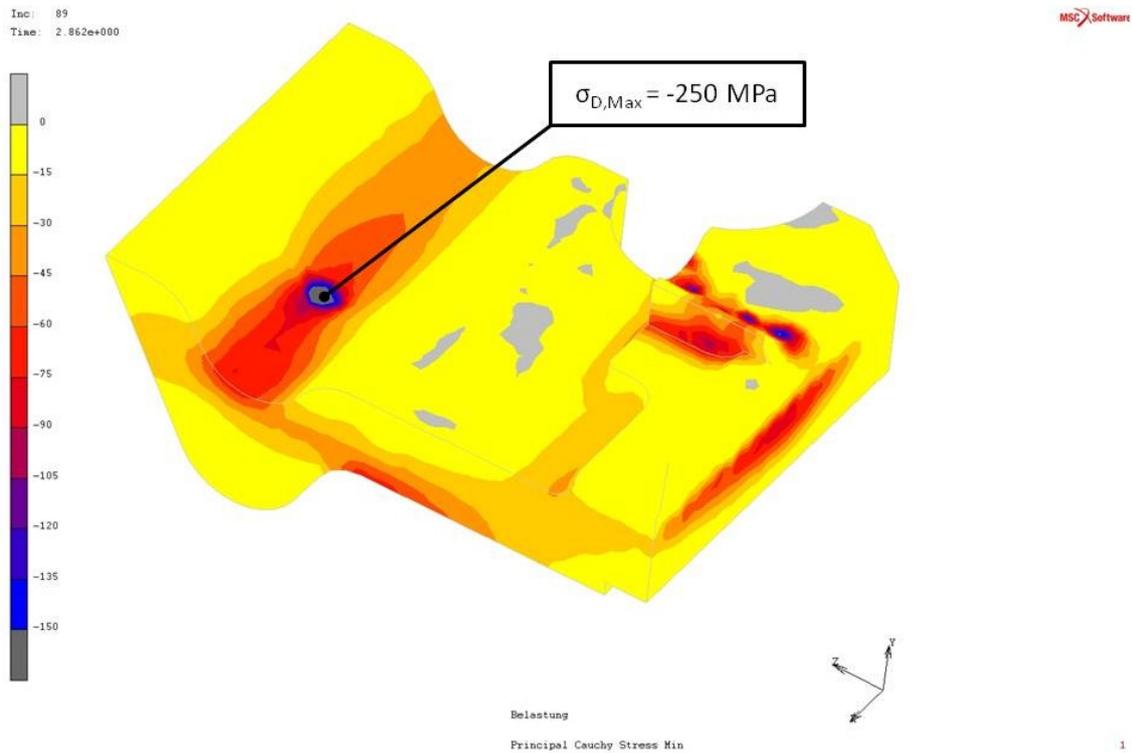


Abbildung 27: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

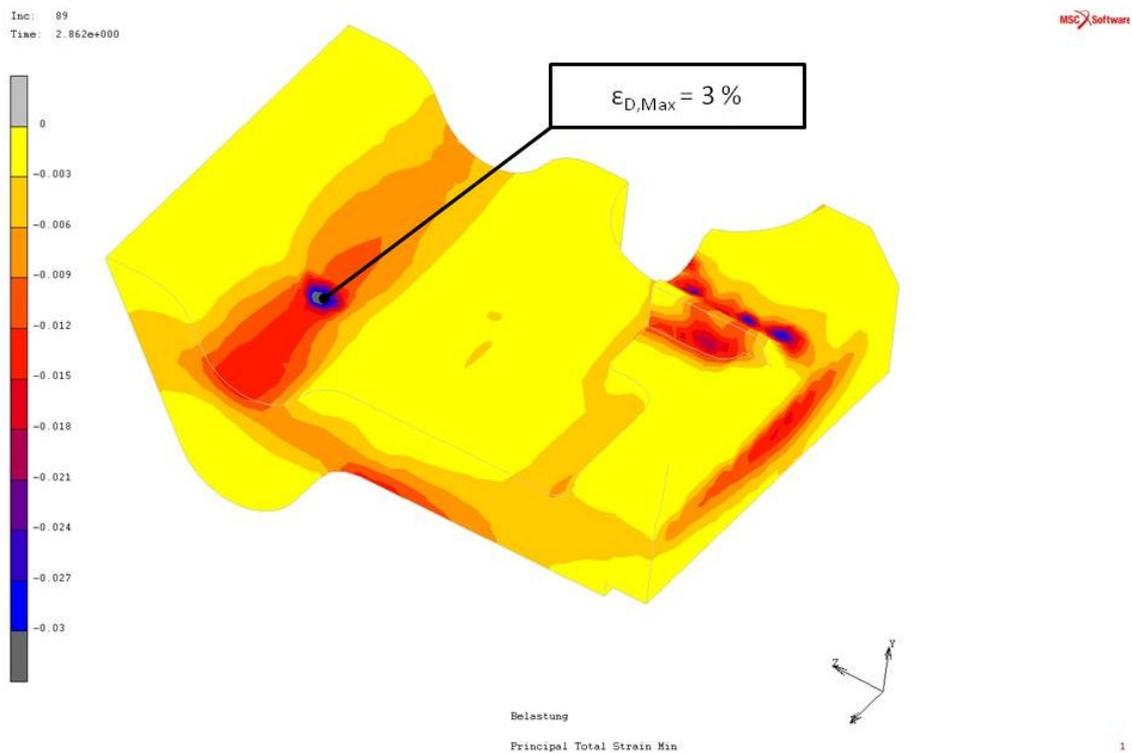


Abbildung 28: Dehnungen zufolge Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

4. Erarbeitung des FE-Modells und Verifizierung

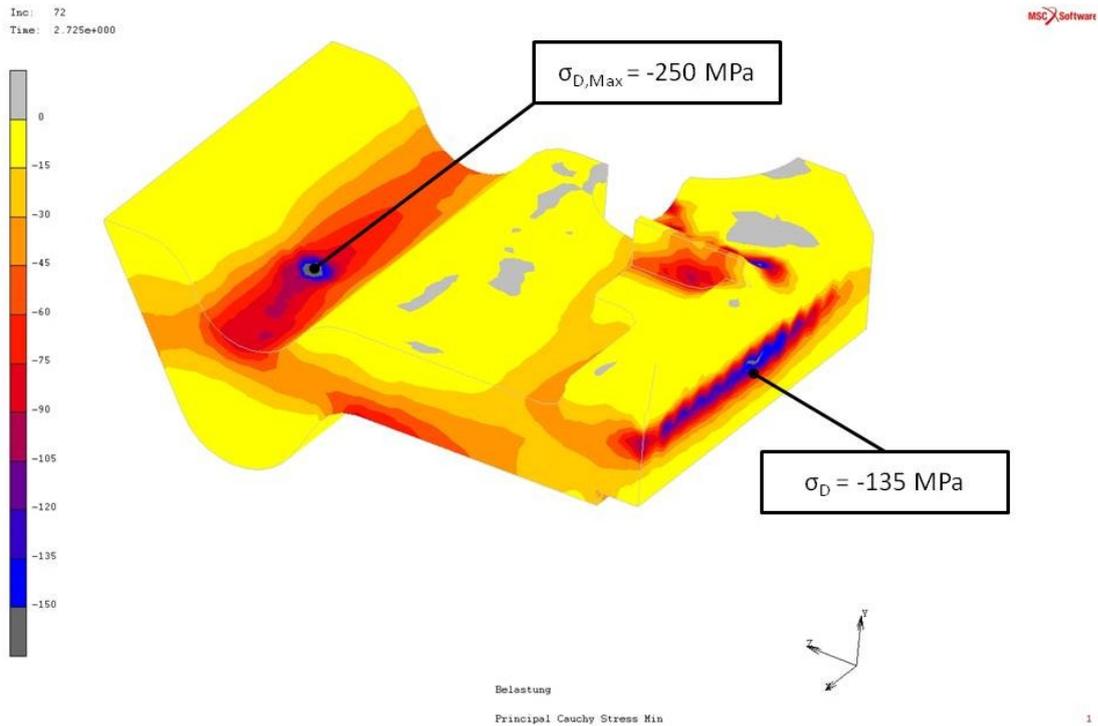


Abbildung 29: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst-Case, außenliegende Wfp

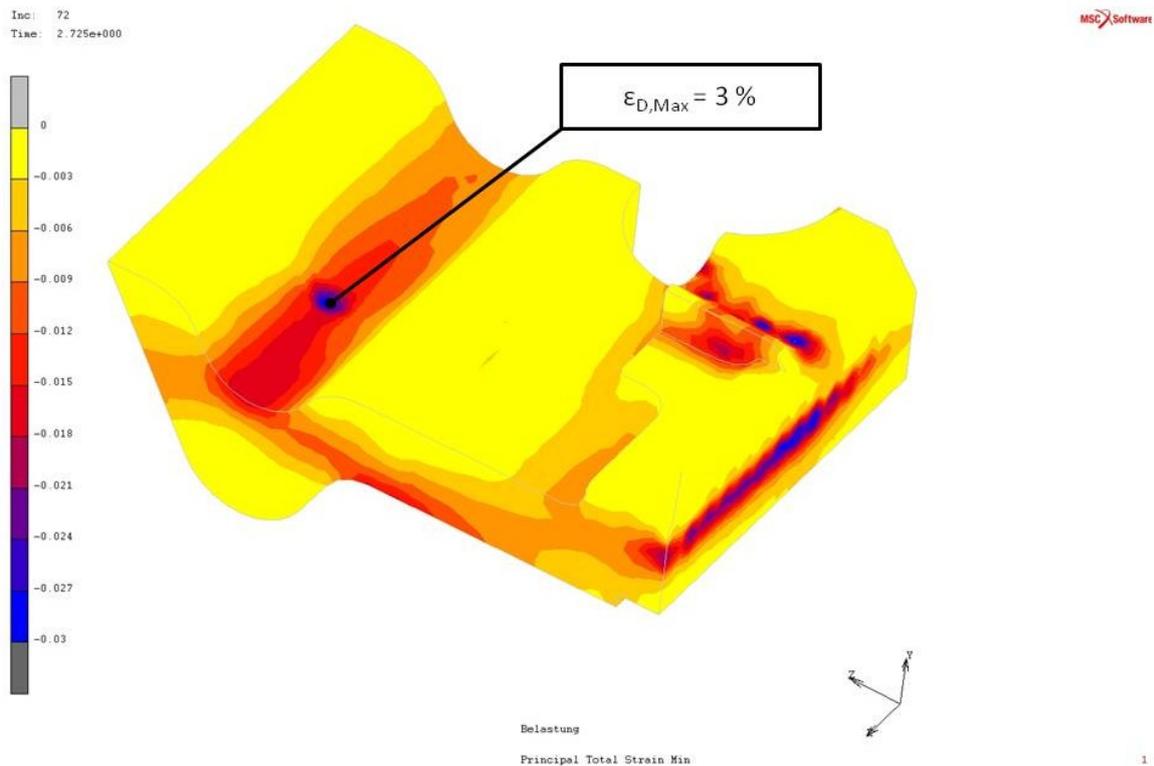


Abbildung 30: Dehnungen zufolge Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst -Case, außenliegende Wfp

- Positionsnummer 3:

Die numerische Auswertung des Bereiches 3 für die Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung verdeutlicht den Kraftflussverlauf im Bauteil. Die Druckspannungen breiten sich in der Ebene aus. Dies hat einen geschlossenen Kraftfluss von Kraffteinleitung der Schiene (Position 1 und 2) über den Bereich 3 und Ableitung über die Sicke (Position 4) in die Betonschwelle. Die Sicke stellt ebenfalls eine Weichheit im Gesamtsystem Wfp dar. Die Abbildungen 27 und 29 zeigen dies auf (hohe Druckspannungen in diesem Bereich).

- Position 5:

Die Position 5 betrachtet die Rück- und Unterseite der Wfp. Betrachtet man die Abbildungen 31 und 32, so zeigen diese die Kraffteinleitung in die Betonschwelle, wobei ein Maximum der Zugspannungen im Bereich der aufliegenden Spannklemme in der Sicke auftritt. Über die Spannklemme werden im Lastfall 2.3.b Kräfte von der Schiene aufgenommen und über die Wfp in die Betonschwelle eingeleitet.

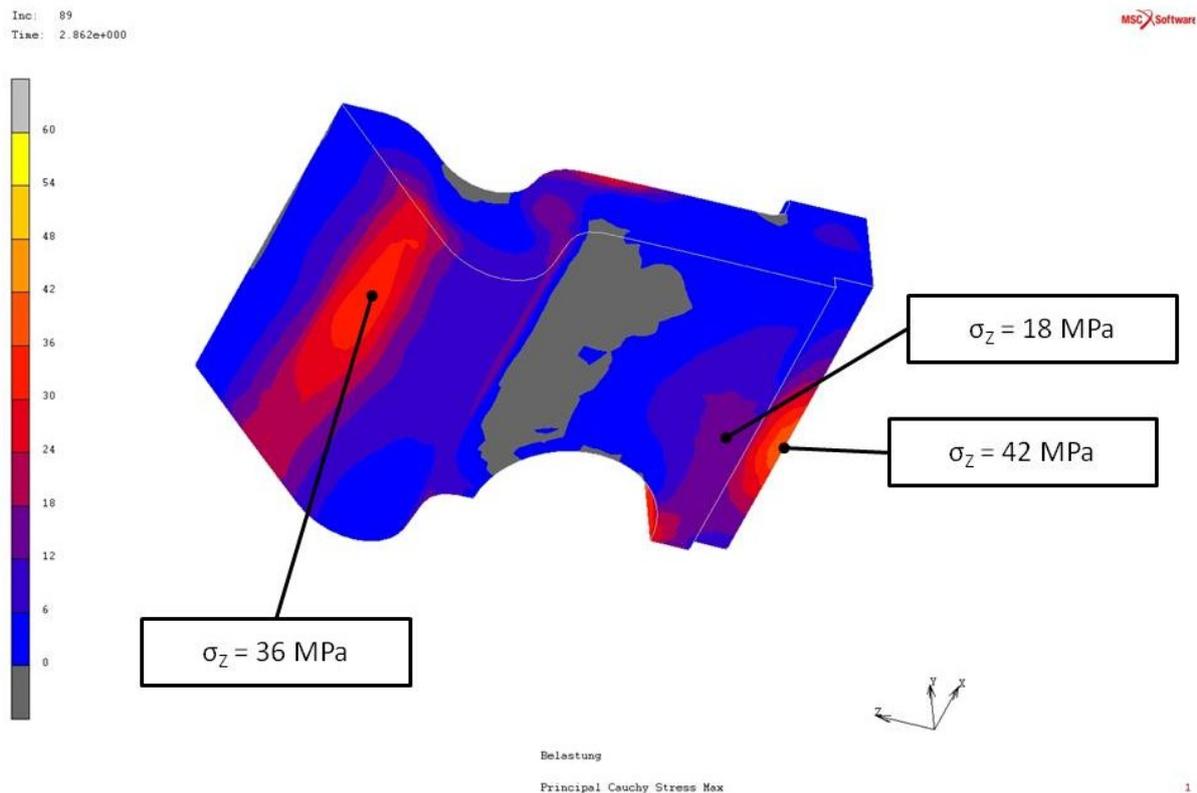


Abbildung 31: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

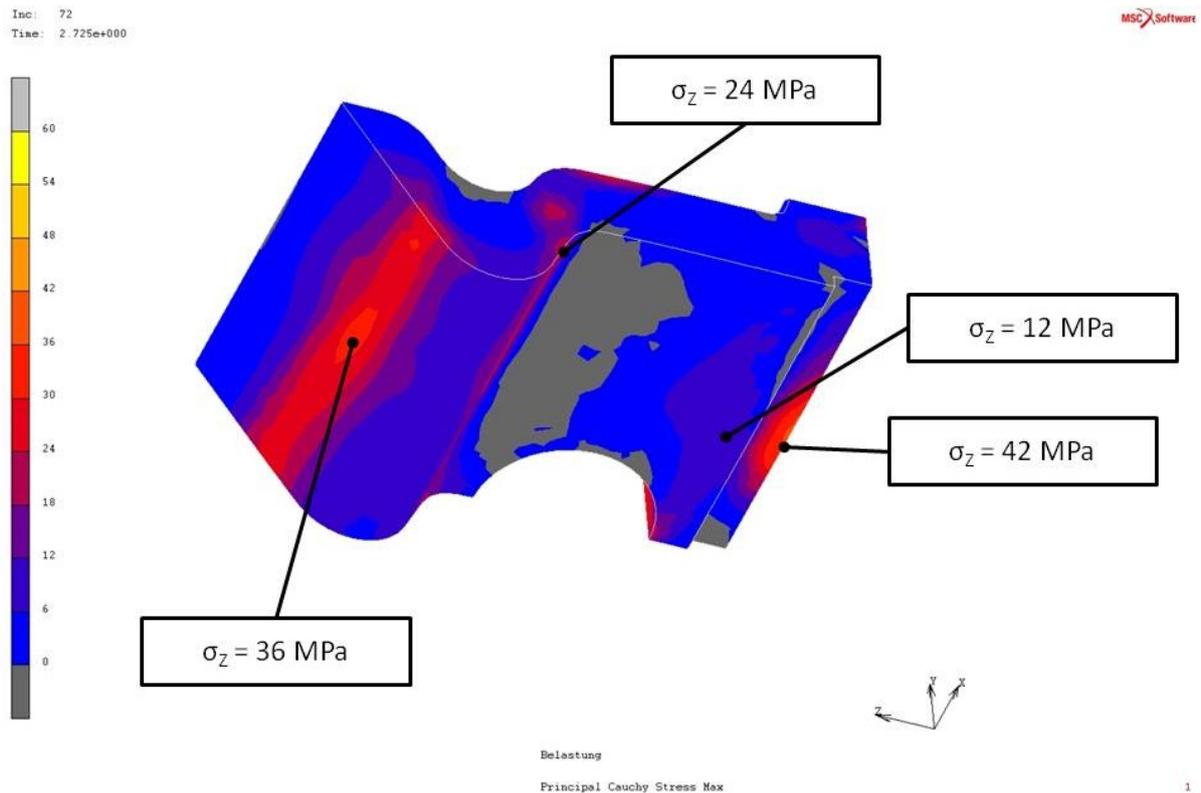


Abbildung 32: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst-Case, außenliegende Wfp

4.3.2 Abschließende Betrachtungen der Zusammenhänge und Trends

Zusammenfassend kann man folgendes festhalten:

- Für den Werkstoff Kunststoff sind Zugbelastungen kritischer als Druckbelastungen. Bei der Auslegung von Bauteilen aus Kunststoffen muss auf die maximale Zug- und Druckspannungen Rücksicht genommen werden, da Kunststoffe, im Vergleich zu Metallen, bei der Bauteilauslegung an die Materialbelastungsgrenzen geführt werden.
- Die Winkelführungsplatte besitzt Zug- und Druckspannungsbereiche.
- Die Druckspannungen zeigen den Kraftfluss im Bauteil auf. Die Druckbelastungen entstehen durch das aufliegen des Schienenfußes entlang der Kante im Bereich der Position 2 bei der Bogenfahrt und der Worst-Case Belastung.
- Die Maximalwerte der Druckspannungen nehmen mit steigender Belastung zu, während der qualitative Verlauf hingegen ähnlich bleibt. Die Maximalwerte der Zugspannungen bleiben gleich, jedoch der qualitative Verlauf verändert

sich (Verkleinerung der Flächen). Die Zugspannungen am Ende des Montagevorganges sowie am Ende der Belastung bei der Worst-Case Belastung unterscheiden sich nicht im quantitativen Verlauf und in der Höhe ist hier nur ein geringes Ansteigen erkennbar. Der Montagevorgang und somit der Vorspannvorgang ist der bestimmende Faktor für den Zugspannungsverlauf und dessen Höhe.

- Aufgrund von Konvergenzproblemen der ZW konnte die angestrebte Belastung für das System nicht erreicht werden. Die Auswertungen bei der Bogenfahrt beziehen sich statt der vertikalen Kraft von 62,9 kN auf eine vertikale Kraft von 55,9 kN (89 %) und die horizontale Kraft beläuft sich auf 36,4 kN. Bei der Worst-Case Belastung wurden maximale vertikale Kräfte von 29 kN (72 %) und maximale horizontale Kräfte von 44 kN (72%) erreicht.
- Durch die Vernachlässigung der Fixierung der Spannklemme in y-Richtung, stellen die Zugspannungen ein höheres Niveau dar, als es in der Wirklichkeit auftreten würde.
- Im Zuge der Simulationen wurde auch eine Rechenzeitoptimierung durchgeführt. Somit konnte die Rechenzeit um bis zu 50 % bei allen Lastfällen gesenkt werden.

5 Vorschlag gestaltoptimierte Wfp

5.1 Gestalt- und Topologieoptimierung

Bei der Gestaltoptimierung werden Modifikationen an der Bauteiloberfläche vorgenommen, um Beanspruchungsmaxima, die zum Versagen eines Bauteils führen, zu reduzieren. Die gewünschte Zielfunktion z.B. maximale von Mises Vergleichsspannung wird in die gewünschte Richtung hin verändert. Die Gestaltoptimierung wird erst bei Bauteilen verwendet, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Stadiums des Konstruktionsprozesses befinden. Die Optimierung darf die Herstellbarkeit nicht durch Änderung der Bauteilgestalt einschränken [8].

Anders als bei der Gestaltoptimierung handelt es sich bei der Topologieoptimierung um ein numerisches Simulationsverfahren zur Ermittlung der optimalen Materialverteilung in einem vorgegebenen Bauraum. Basierend auf einem FE-Modell werden Elemente, welche nicht im Kraftfluss liegen, aus dem Bauteil entfernt. Das so erhaltene Bauteil wird anschließend mittels eines CAD kompatiblen Format exportiert [8].

Bei dem Bauteil Winkelführungsplatte wird das Verfahren der parametrischen Gestaltoptimierung eingesetzt. In der Abbildung 33 ist ein möglicher Ablauf einer Gestalt- und Topologieoptimierung dargestellt.

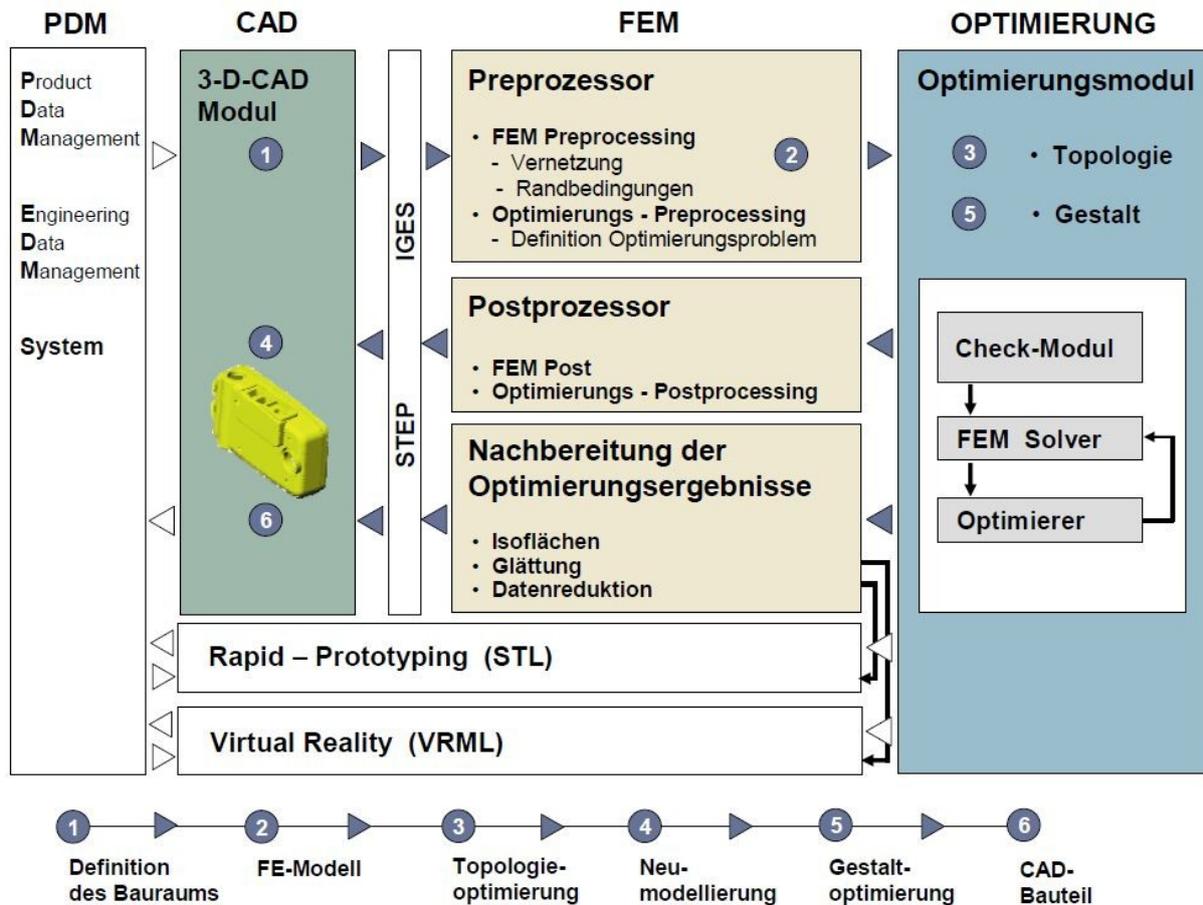


Abbildung 33: Möglicher Ablauf einer Gestalt- und Topologieoptimierung [8]

5.2 Optimierungsziele

Ziel ist es, eine Alternative zur jetzigen Winkelführungsplattengeometrie aufzuzeigen. Der Schwerpunkt der Gestaltoptimierung liegt bei einer Reduktion der vorhandenen Spannungs- und Dehnungsverläufe, um die Lebensdauer zu erhöhen, bei gleichzeitiger Steifigkeitserhöhung. Insofern ist auch eine Gewichtsminimierung, sowie eine Verbesserung der Zykluszeit im Fertigungsprozess in Betracht zu ziehen.

5.3 Gegenüberstellung Simulationsergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die wesentlichen Ergebnisse der Simulation der verschiedenen Lastfälle, sowie auch in der Praxis ermittelte Verifikationsergebnisse gegenüber gestellt.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der wesentlichen Simulations- und Verifikationsergebnisse

	Wfp 14K12 (Praxis)	Wfp 14K12 (Simulation)	Wfp verrippt (Simulation)
Einfederung SZL	Federweg in mm		
Weg bei 18 kN (mm)	0.5	0.85	/
Weg bei 68 kN (mm)	1.26	1.3	/
Federkennziffer C (kN/mm)	Mittelwert Serie (6 SZL)		
	65.6	/	/
Max. Randfaserspannung (MPa)	/	35	20-35
CEN 13146	Bericht 2799		
Schienenfußverschiebung horizontal (mm)	0.6	0.701 (89 % Abbruch)	
Worst-Case Belastung	Erfahrungswert ÖBB		
Schienenfußverschiebung horizontal (mm)	0.5	0.51 (70% Abbruch)	

5.4 Entwurf gestaltoptimierte Wfp

Für die Gestaltoptimierung der Wfp sollen folgende allgemeine Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt werden:

- Kraftflüssen sollen auf direkten Wegen aufgenommen werden
- Und anschließend weitergeleitet werden
- Materialstärken folgen dem Spannungsniveau (z.B. Verrippung)

- Möglichst alle Strukturteile an der Lastaufnahme beteiligen
- Das System innerhalb von festgelegten Randbedingungen (abschnitt Lastfälle festgelegt) optimieren
- Rippen zur Krafeinleitung und Biegesteifigkeitserhöhung verwenden

5.4.1 Gestaltungsrichtlinien für Rippen

Um die vorhandene Wfp kunststoffgerecht auszulegen, bietet sich die Verwendung einer Rippenstruktur an. Bei der Auslegung von Rippen müssen verschiedene für das Bauteil vorteilhafte Konstruktionsaspekte berücksichtigt werden. Diese sollen hier beschrieben werden [12].

- Rippenhöhe:

Um eine Versteifungswirkung durch Rippen zu erreichen, sollte deren Höhe ein Vielfaches der zu versteifenden Wanddicken betragen. Als zweckmäßig hat sich eine Rippenhöhe vom 5 bis 10-fachen der Wanddicke herausgestellt.

- Rippenanzahl:

Die Versteifung einer Platte nimmt mit der Anzahl der Rippen linear zu. Allerdings kann eine verrippte Platte durch die Erhöhung der Rippenhöhe deutlich mehr als durch die Erhöhung der Rippenzahl versteift werden.

- Rippenkreuzungspunkte:

Um eine Erhöhung der Rippenstabilität zu Erhöhen, werden diese miteinander verbunden. Bei Beanspruchungen entstehen in ihnen Kerbspannungen, die entscheidend für die Haltbarkeit des Knotens und des ganzen Bauteils sind.

- Rippenlage:

Rippen sollen in Belastungsrichtung an der auf Zug beanspruchten Seite angebracht werden. Quer zur Beanspruchung liegende Rippen wirken sich negativ auf die Festigkeit des Bauteils aus.

5.4.2 Fertigungsgerechte Gestaltung von Rippen

Bei der Auslegung eines im Spritzguß gefertigten Bauteils, welches Rippen aufweist, sollen folgende Faktoren beachtet werden [12]:

- Rippendicke:

Diese sollte nicht mehr als das 0,5 bis 0,7 fache der Wanddicke betragen.

- Rundungsradius:

Beeinflusst die Kühlzeit wie auch die Wanddicke im gleichen Maße.

- Anspritzrichtung:

Die Anspritzrichtung sollte in der Längsachse der Rippen gewählt werden. Bei faserverstärkten Bauteilen müssen die Ecken und Kanten mit großen Radien versehen werden.

5.4.3 Erstellung verrippte Wfp

Nach der Analyse der globalen Spannungsbilder in Abschnitt 4 dieser Arbeit, können verschiedene konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden. Die Abbildung 34 zeigt den globalen Kraftfluss der Winkelführungsplatte bei dem Lastfall Bogenfahrt.

Ziel ist es, eine verrippte Struktur entlang des Kraftflusses zu legen, um eine optimale Weiterleitung von Spannklemme und Schiene über Winkelführungsplatte in die Betonschwelle zu ermöglichen. Die roten Pfeile in der Abbildung stellen die äußeren Kräfte dar und die gelben bilden den Kraftfluss auf der Wfp.

Die Abbildung 35 stellt den Entwurf für eine gestaltoptimierte Wfp dar. Der Wfp besitzt nun einen breiteren Auflagebereich für die Schiene, welcher zur Sicke hin abnimmt. Die Rippen sind sowohl in Kraftflussrichtung als auch in einen Winkel von 45° zur Normalrichtung angeordnet. Im Bereich der Bohrung kommen auch Rippen zum Einsatz, welche den Kraftfluss in das Zentrum der Wfp weiterleiten.

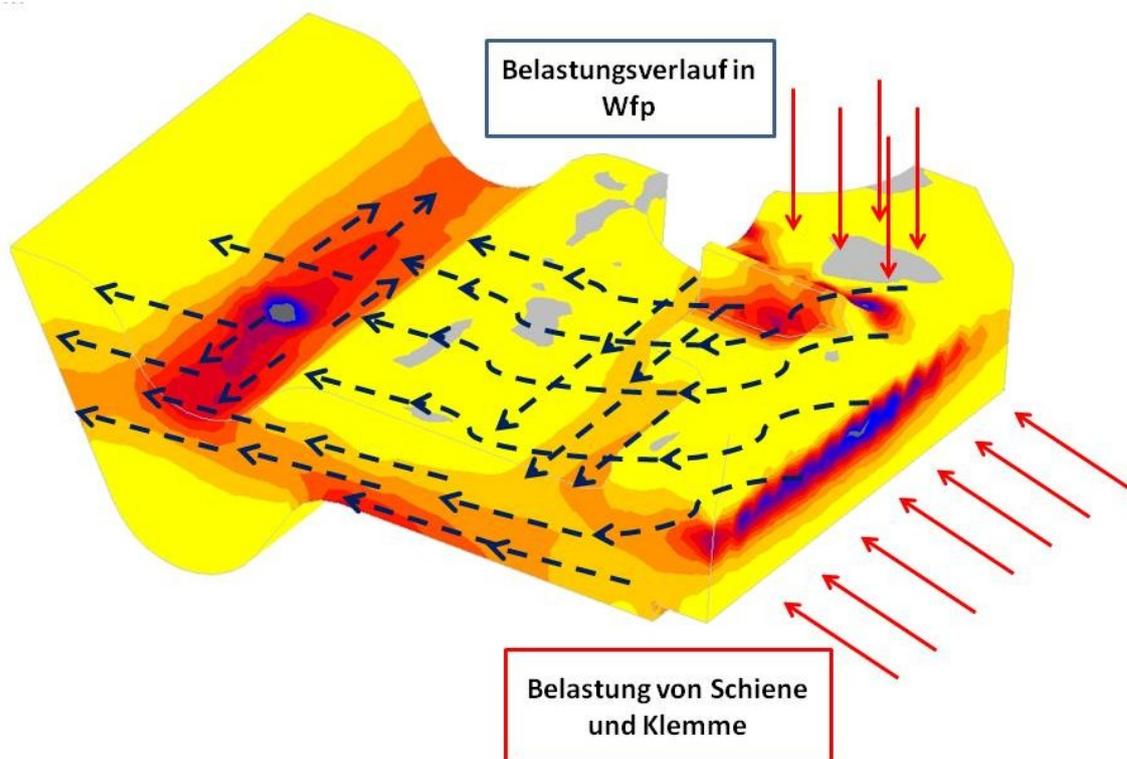


Abbildung 34: Kraft- und Spannungsverläufe der Wfp bei Belastung Rundbogenfahrt

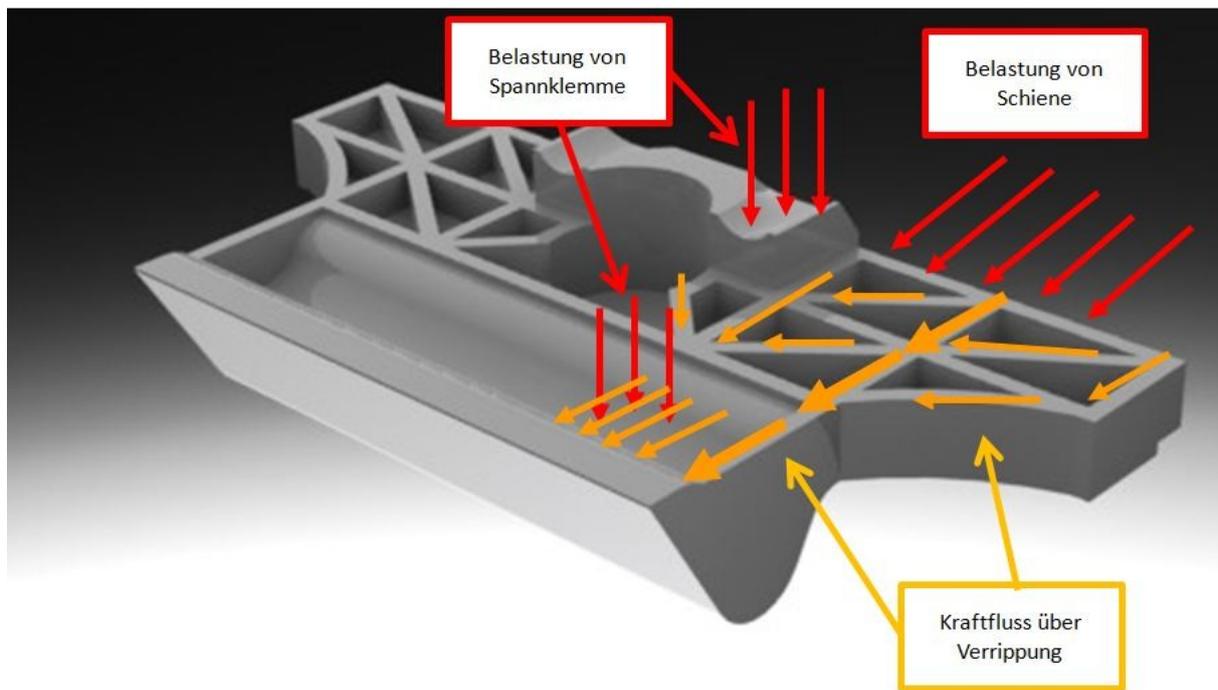


Abbildung 35: Verrippte Struktur der Wfp mit eingezeichnetem Kraftfluss

5.5 Ausblick verrippte Wfp

Die in dieser Arbeit entworfene verrippte Wfp bedarf noch weiterführende Untersuchungen. Im Nachfolgenden sind die Möglichen Fortsetzungspunkte aufgelistet:

- Ergänzend zur Gestaltoptimierung sollte eine Topologieoptimierung durchgeführt werden
- Den Entwurf der verrippten Wfp ins Simulationsmodell aufnehmen und verifizieren
- Hybriden aus Gestalt- und Topologieoptimierung erstellen
- Spritzgußsimulationen
- Aussagen über technischen Einsatz der verrippten Wfp treffen
- Musterformfertigung und Bauteilprüfung
- Einbau in Strecke

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Winkelführungsplatte für ein Schienenbefestigungssystem in Zusammenarbeit mit der Firma Semperit Technische Produkte GmbH untersucht.

Mittels Finite-Elemente Berechnungen werden die Beanspruchungszustände der Winkelführungsplatte sowie das gesamte Schienenbefestigungssystem unter verschiedenen Belastungen ermittelt. Anhand von ausgewählten Lastfällen und Einsatzbedingungen erfolgt eine Gestaltoptimierung der Winkelführungsplatte.

Zu Beginn der Arbeit standen das Festlegen der Belastungen und das Aufstellen des Berechnungskonzeptes. Es wurde ein geeignetes Finite-Element System, bestehend aus der Winkelführungsplatte, Spannklemme, Schienenzwischenlage und Schwelle erstellt. Dazu wurde im Pre-Processing das Mechanische Modell des Schienenbefestigungssystemes mittels Diskretisierung in ein Finite-Element Modell umgewandelt. Um das Pre-Processing erfolgreich abzuschließen, müssen verschiedenen Materialkennwerte, welches jedes der verwendeten Materialien im Simulationsmodell wiedergibt, ermittelt werden. Die Winkelführungsplatte besteht aus Polyamid 6 mit 30% Glasfaserverstärkung. Da die Lage der einzelnen Glasfasern für die Simulation nicht bekannt ist, erfolgt die Ermittlung des Materialkennwertes E-Modul über einen ausgewählten Bauteilversuch (Rundeisenbiegeversuch). Der Rundeisenbiegeversuch dient der Überprüfung der Beschaffenheit des Bauteils nach der Konditionierung. Hierbei wird kraft geregelt mittels eines Stempels eine Deformation der Winkelführungsplatte herbeigeführt. Dieser Versuch wurde ausgewählt, da er das Gesamtsystem mit allen Faktoren (Spannungszustände, Anisotropie) der Winkelführungsplatte wiedergibt. Derselbe Versuch wurde mittels Finite-Elemente Rechnung nachgerechnet und mittels Stufen-Lösungsverfahren konnte ein E-Modul von 5000 MPa ermittelt werden, der ein ähnliches Verformungsverhalten des Bauteils wiedergibt, wie der reale Versuch. Desweiteren wurden die Materialparameter der Schienenzwischenlage über einen Zug/Druck Versuch festgestellt. Abschließend wurde auch die Auswirkung des Reibverhaltens der Schiene gegenüber der Schienenzwischenlage auf die Ergebnisse der Simulation untersucht. Somit war das Pre-Processing abgeschlossen und die Berechnungen, nach auftragen der Randbedingungen und Vereinfachungen (Halbmodell), dem Solver übergeben.

Ein Nicht-Ziel dieser Forschungsarbeit war die Berechnung des gesamten Gleiskörpers. Es stand die Erstellung eines Finite-Elemente System für die

Befestigung im Vordergrund. Durch Festlegung der Randbedingungen und Vereinfachung erfolgt eine Näherung an den gesamten Gleiskörper.

Die Auswahl der Berechnungen beschränkte sich auf zwei kombinierte Lastfälle. Im Lastfall eins wurden der Montagevorgang und anschließend eine quasistatische Überfahrt eines Rades nachgerechnet. Durch den Lastfall eins erfolgt die Verifikation des Schienenzwischenlagen-Verformungsverhaltens (FE-Simulation vs. Bauteilprüfung) bei dem Montagevorgang und nach der quasistatischen Überfahrt. Der Referenzversuch wurde nach der DBS 918235 durchgeführt. Der Vergleich mit dem praktischen Versuch ergab einen ausreichenden Abgleich (Abweichung kleiner 20 %) der Simulation mit der Realität.

Im zweiten Lastfall erfolgt die Simulation des Montagevorganges der Winkelführungsplatte mit anschließender Aufbringung der maximalen Last entsprechend der EN 13146-4 Dauerlastversuch (Scherenhebelschwingversuch) von 75 kN. Desweiteren wurde eine Worst-Case Belastung von horizontal 100 kN und vertikal von 40 kN simuliert. Dies soll eine Bogenfahrt eines Zuges bei einem Bogenradius kleiner gleich 250 Metern darstellen. Die Verifizierung der Berechnung wurde anhand der Ergebnisse eines realen Scherenhebelschwingversuches (Dauerlastversuch nach EN 13146-4) durchgeführt. Dabei wurde die horizontale Schienenfußverschiebung ausgewertet. Für das Worst-Case Szenario dienen Messungen welche direkt am Bogengleis abgenommen wurden. In beiden Lastfällen konnte eine erfolgreiche Verifikation der Simulation erfolgen. Diese Verifikationen gehören dem Post-Processing Abschnitt dieser Arbeit an und dienen der Ergebniskontrolle.

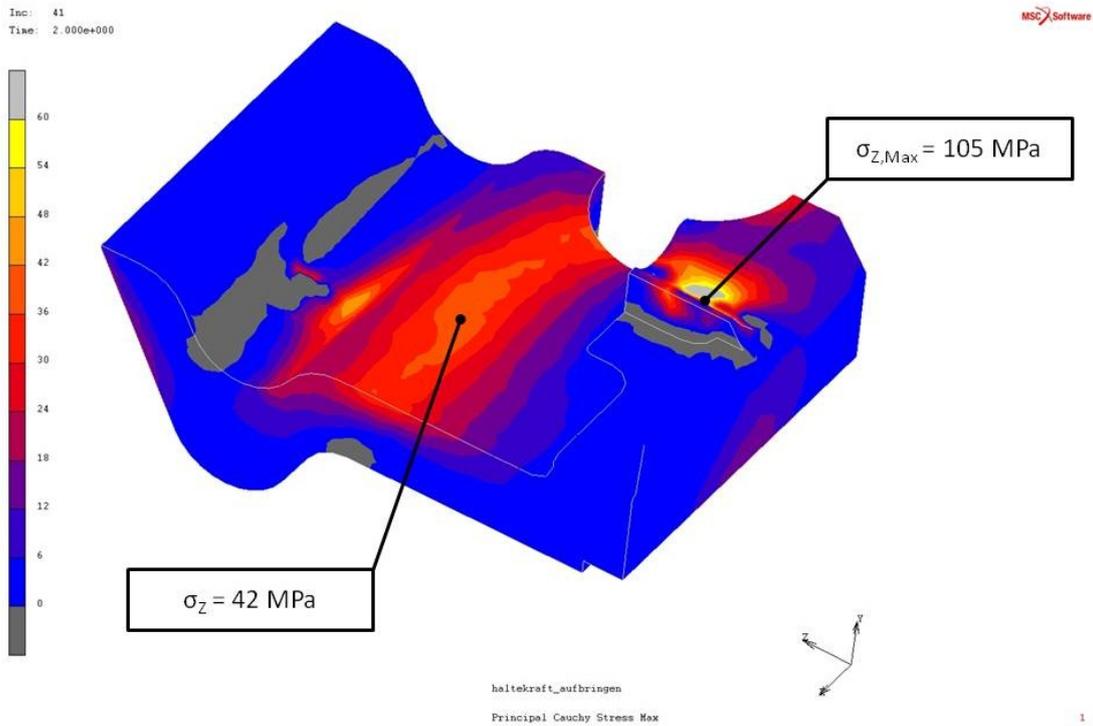
Anhand der nun ermittelten Daten aus den Simulationen wurde ein Vorschlag für eine Gestaltoptimierung der Winkelführungsplatte erarbeitet und in dieser Arbeit vorgestellt. Eine Detailanalyse und eine Bauteilprüfung der optimierten Winkelführungsplatte konnte nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden. Es wurden jedoch Empfehlungen für weitere Maßnahmen zur Produktentwicklung der Gestaltoptimierten Winkelführungsplatte dargestellt.

7 Literaturverzeichnis

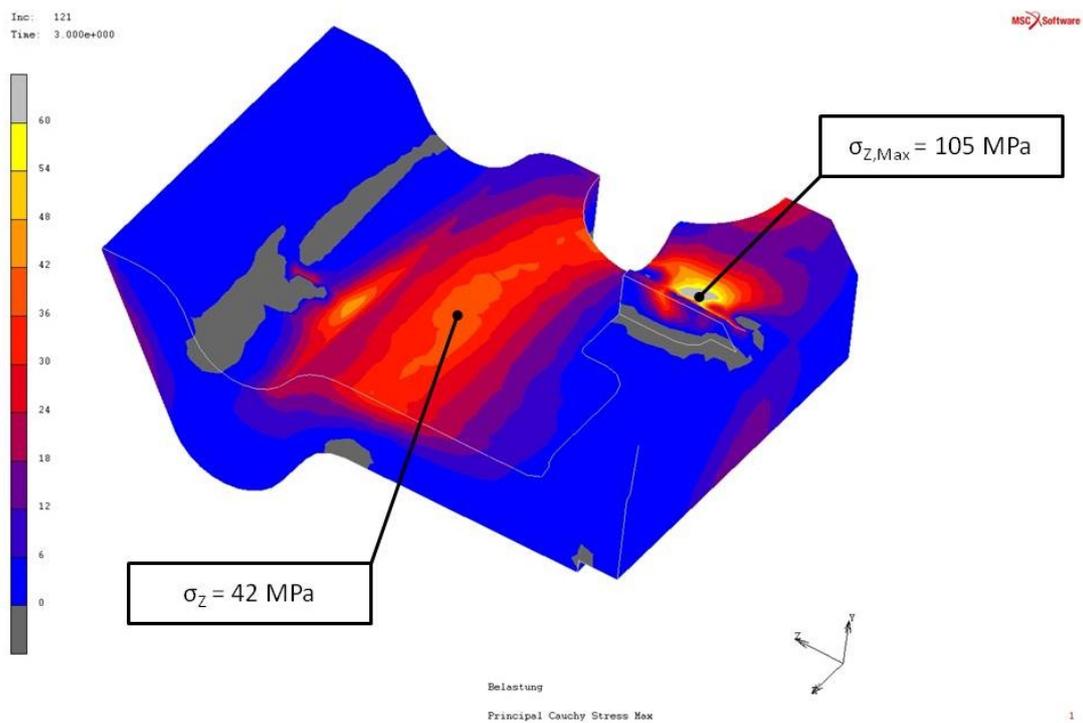
- [1] *Vossloh Fastening Systems*: Schienenbefestigungssysteme für Betonschwellen System W14, InformationsBroschüre, 2011
- [2] *Hahn, H.G.*: Methoden der finiten Elemente in der Festigkeitslehre, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1982
- [3] *Meinken, A.*: Finite Elemente in der Praxis, Grundlagen und Beispiele für die Anwendung von MARC/Mentat, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001
- [4] *Schwarz, H.R.*: Methode der Finiten Elemente, Teubner Verlag, Stuttgart, 1991
- [5] *Klein, B.*: FEM: Grundlagen und Anwendungen der finite-Elemente-Methode im Maschinen und Fahrzeugbau, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [6] *Arthofer, F.*: Ermittlung der Materialparameter von Kautschukmischungen für die Finite Elemente Berechnung, Bakkalaureatsarbeit am Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, 2009
- [7] *Michaeli, W.*: Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren, Hanser-Verlag, München, 1995
- [8] *Steinbichler G.*: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung, Dissertation an der Technischen Fakultät Erlangen, Universität Erlangen, 2008
- [9] *Tipler, P.*: Physik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994
- [10] *Norm CEN 13146-4*: Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme Teil 4: Dauerschwingversuch, Comité Européen de Normalisation, Brüssel, 2002
- [11] *MSC.Marc Volume A*: Theory and User Information, Los Angeles, 2010
- [12] *Ehrenstein, G.W.*: Mit Kunststoffen konstruieren, Carl Hanser Verlag, München, 2002

8 Anhang

8.1 Vergleich Wfp14K12 Montage 18 kN und 68 kN



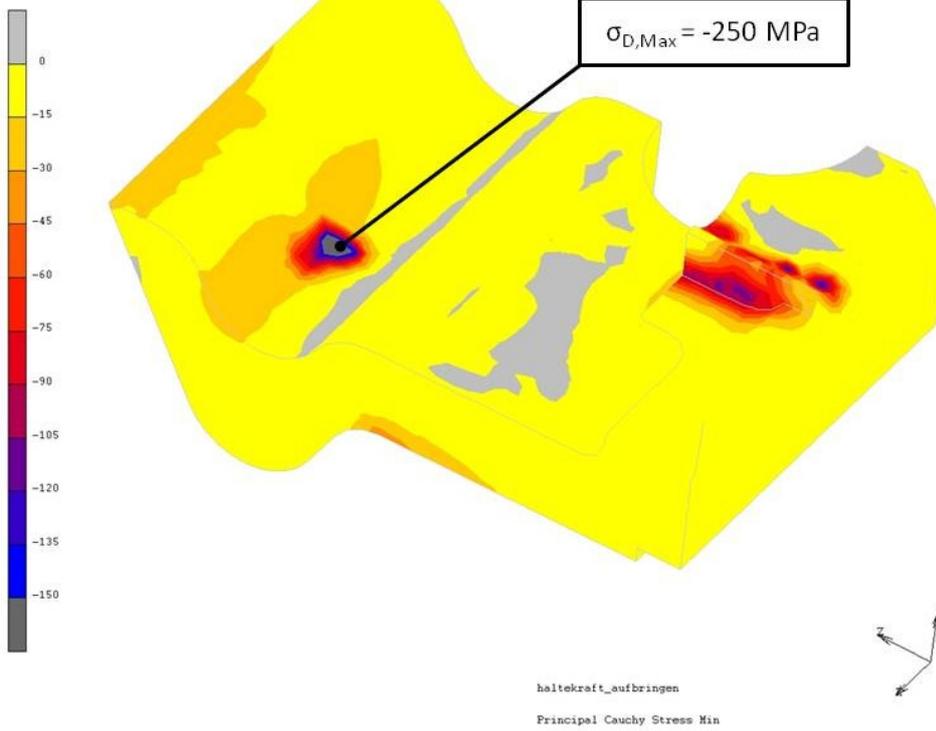
Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Max



Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=68 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Max

Inc: 41
Time: 2.000e+000

MSC Software

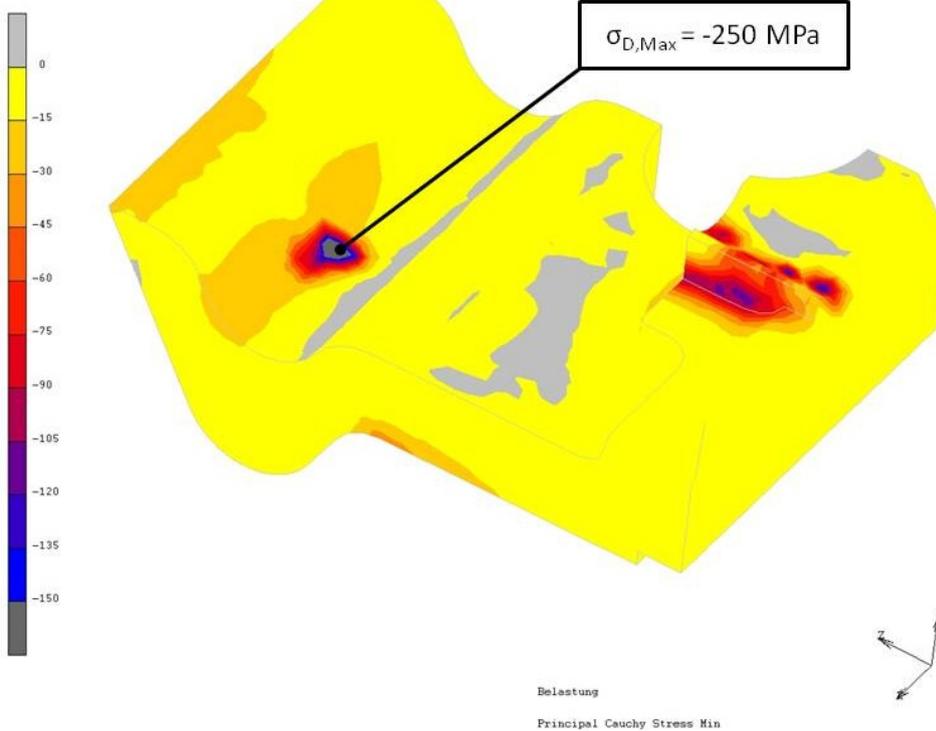


1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_V = 18 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Min

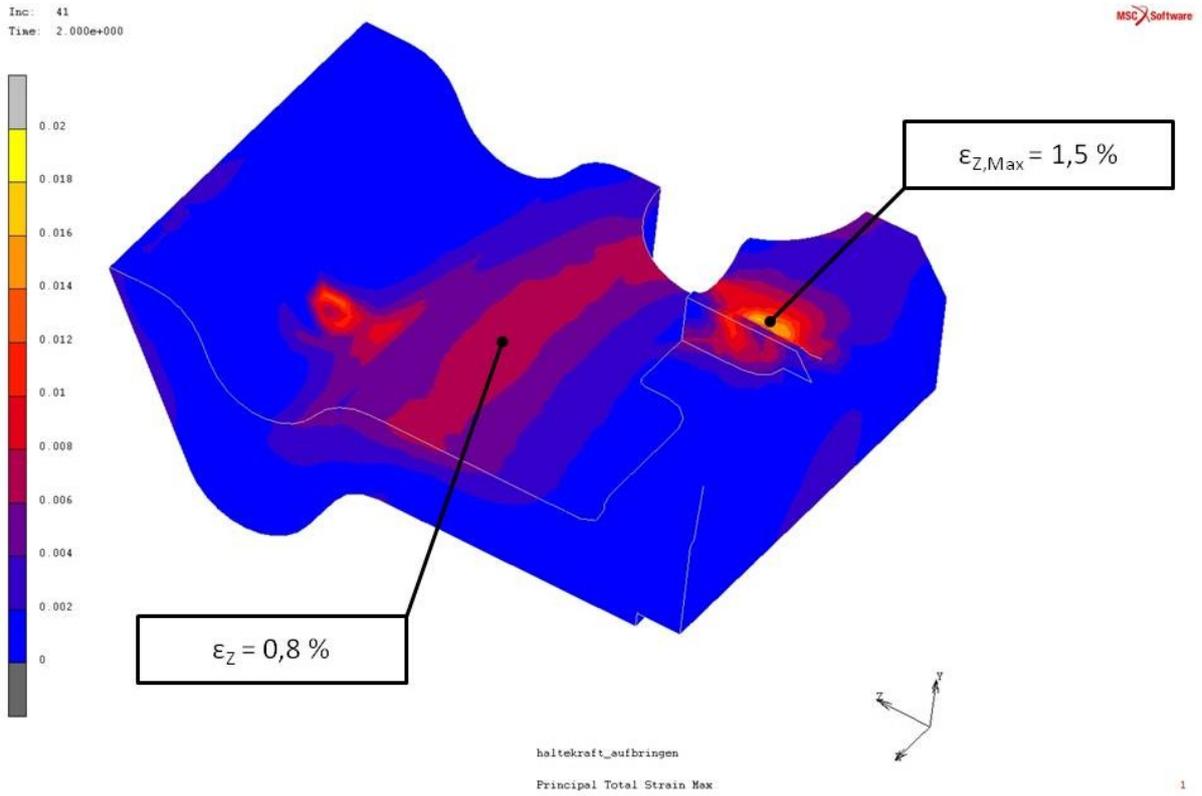
Inc: 121
Time: 3.000e+000

MSC Software

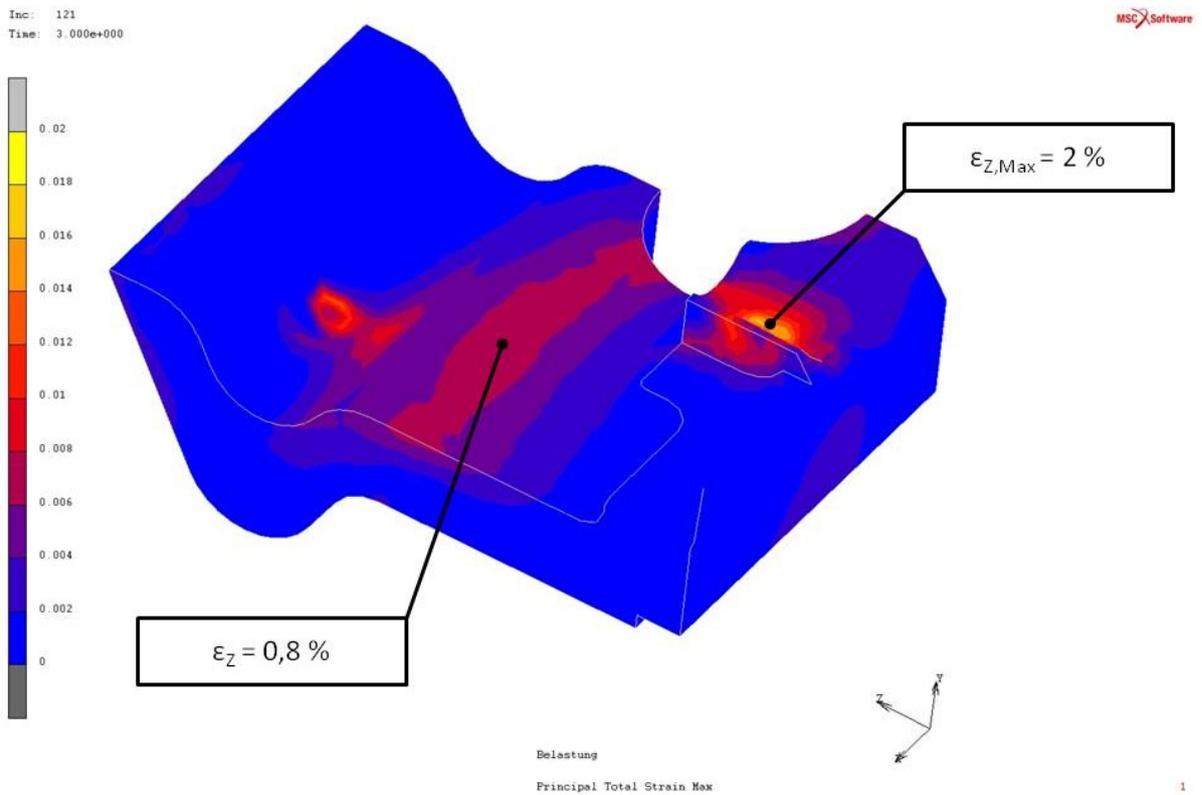


1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_V = 68 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Min

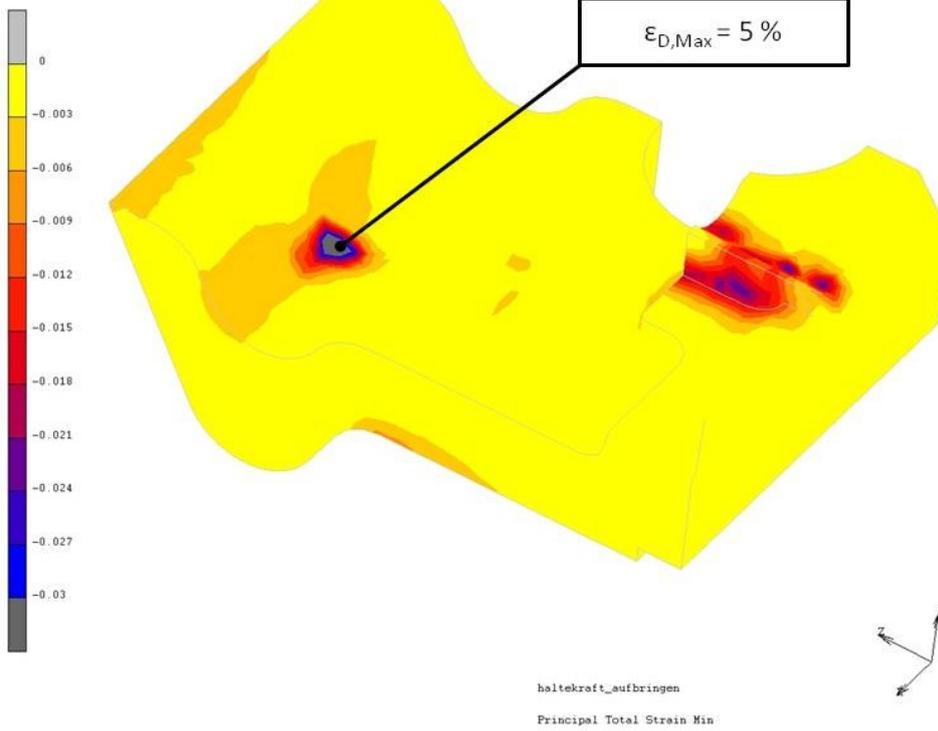


Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18$ kN – Principal Total Strain Max



Außenliegende Wfp, Montage, $F_V= 68$ kN – Principal Total Strain Max

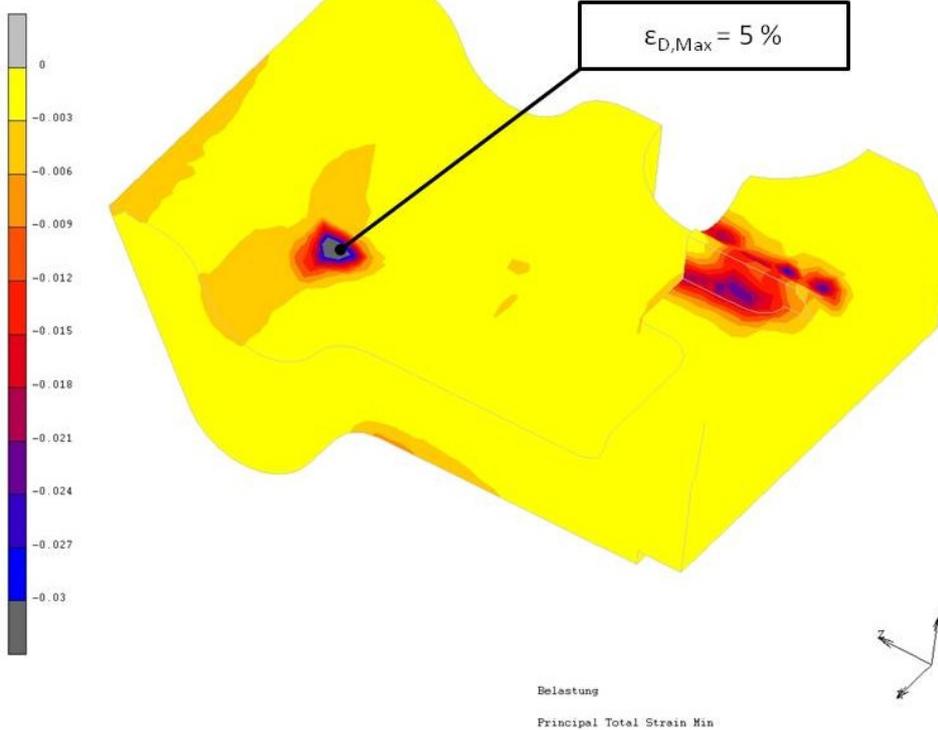
Inc: 41
Time: 2.000e+000



1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_V = 18 \text{ kN}$ – Principal Total Strain Min

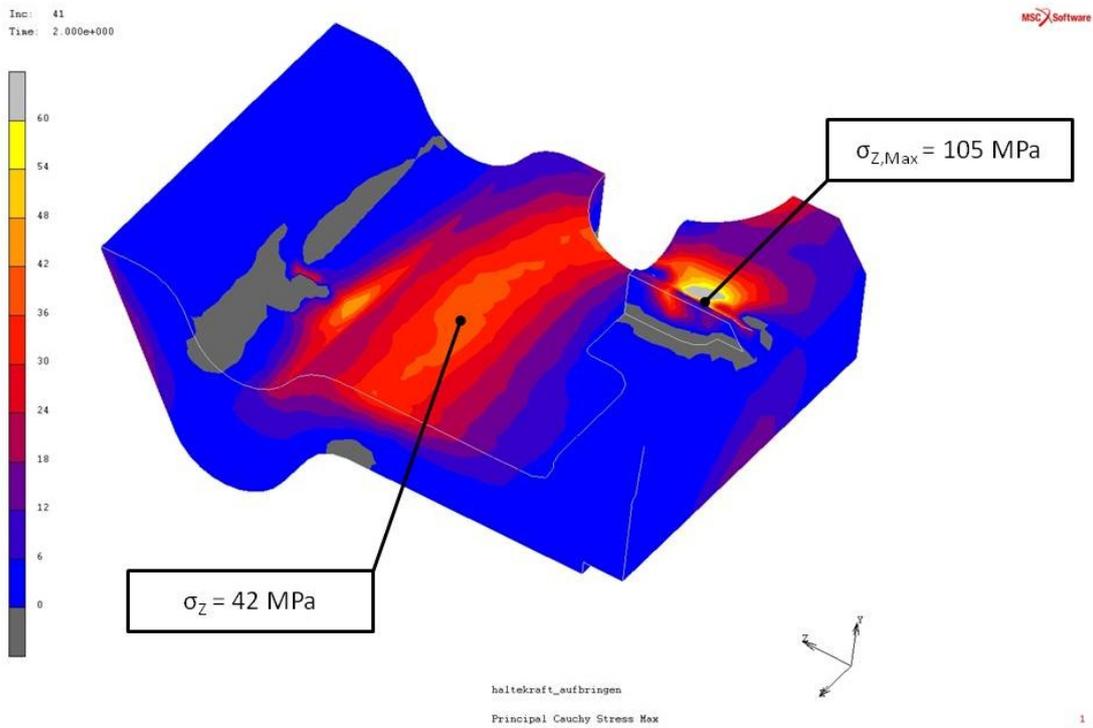
Inc: 121
Time: 3.000e+000



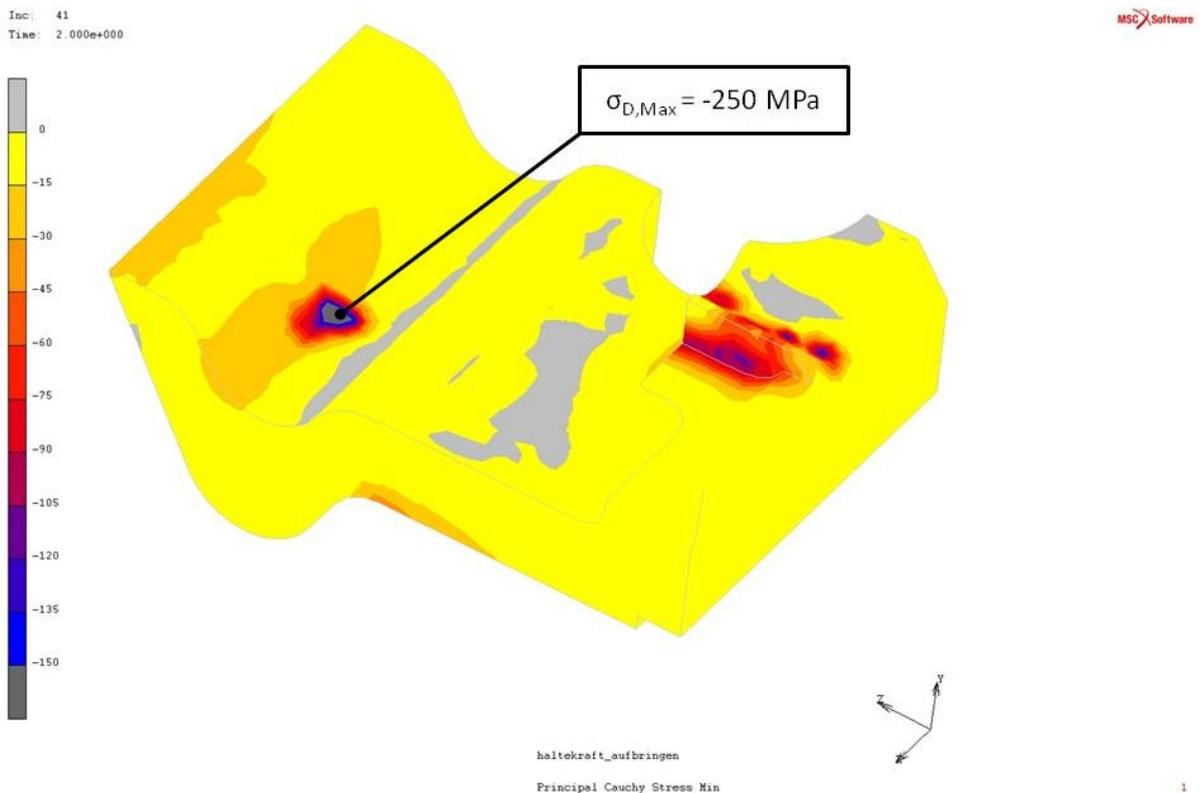
1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_V = 68 \text{ kN}$ – Principal Total Strain Min

8.2 Vergleich Wfp14K12 Montage 18 kN, Bogenfahrt (CEN-13146), Worst-Case Belastung



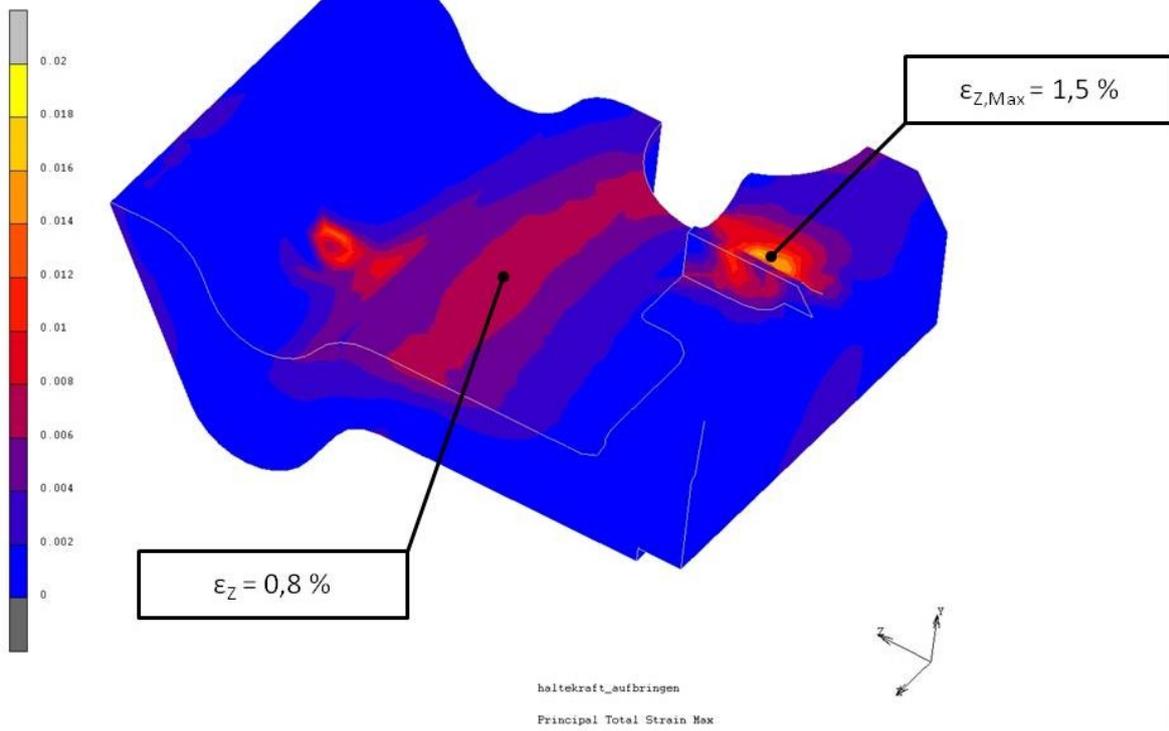
Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Max



Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Min

Inc: 41
Time: 2.000e+000

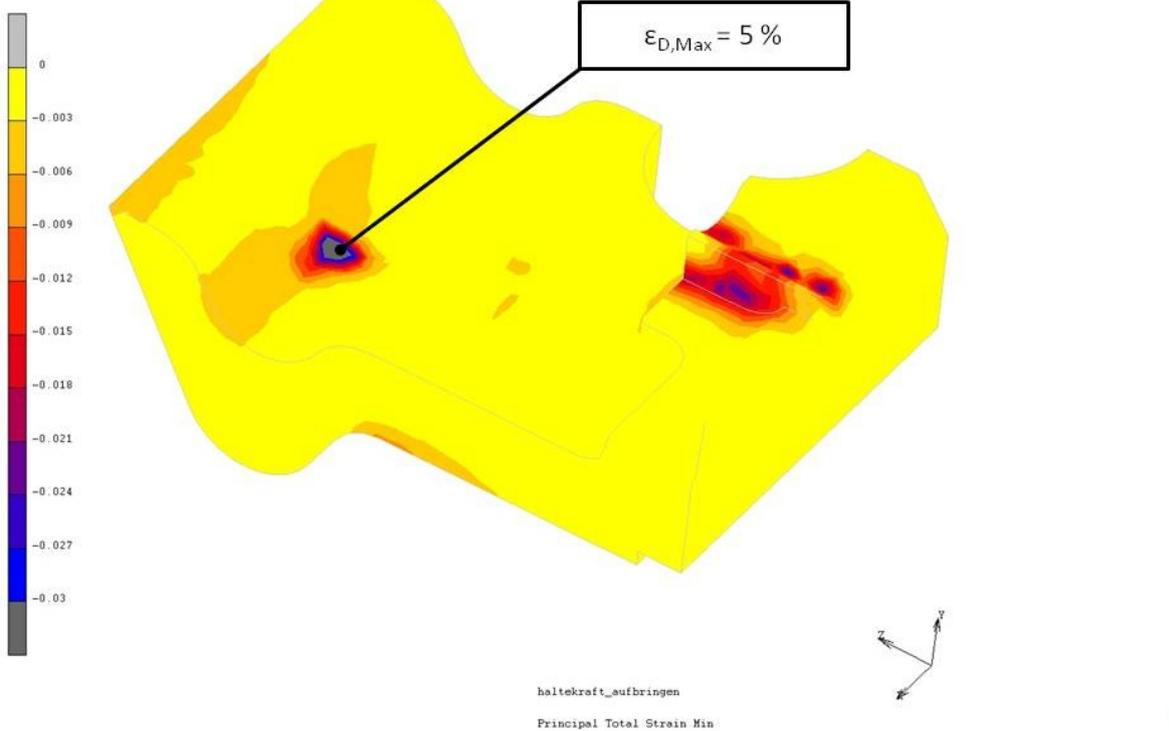
MSC Software



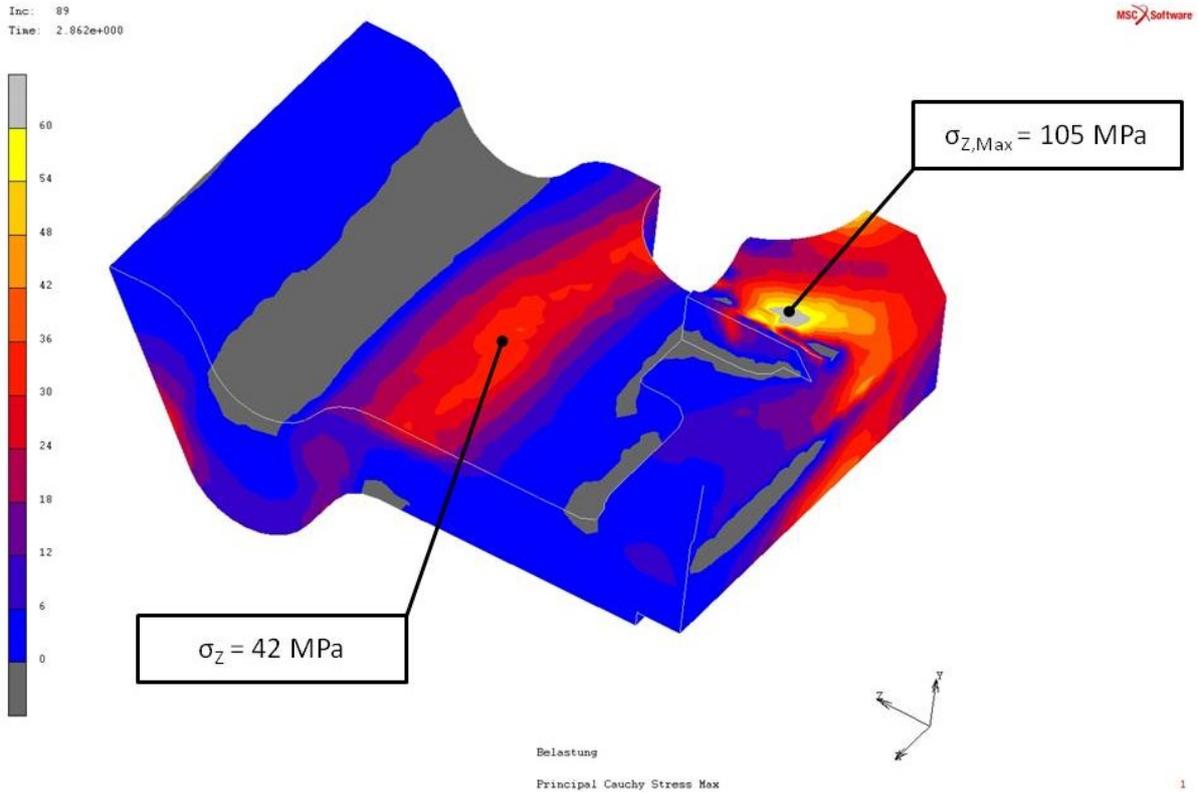
Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18$ kN – Principal Total Strain Max

Inc: 41
Time: 2.000e+000

MSC Software

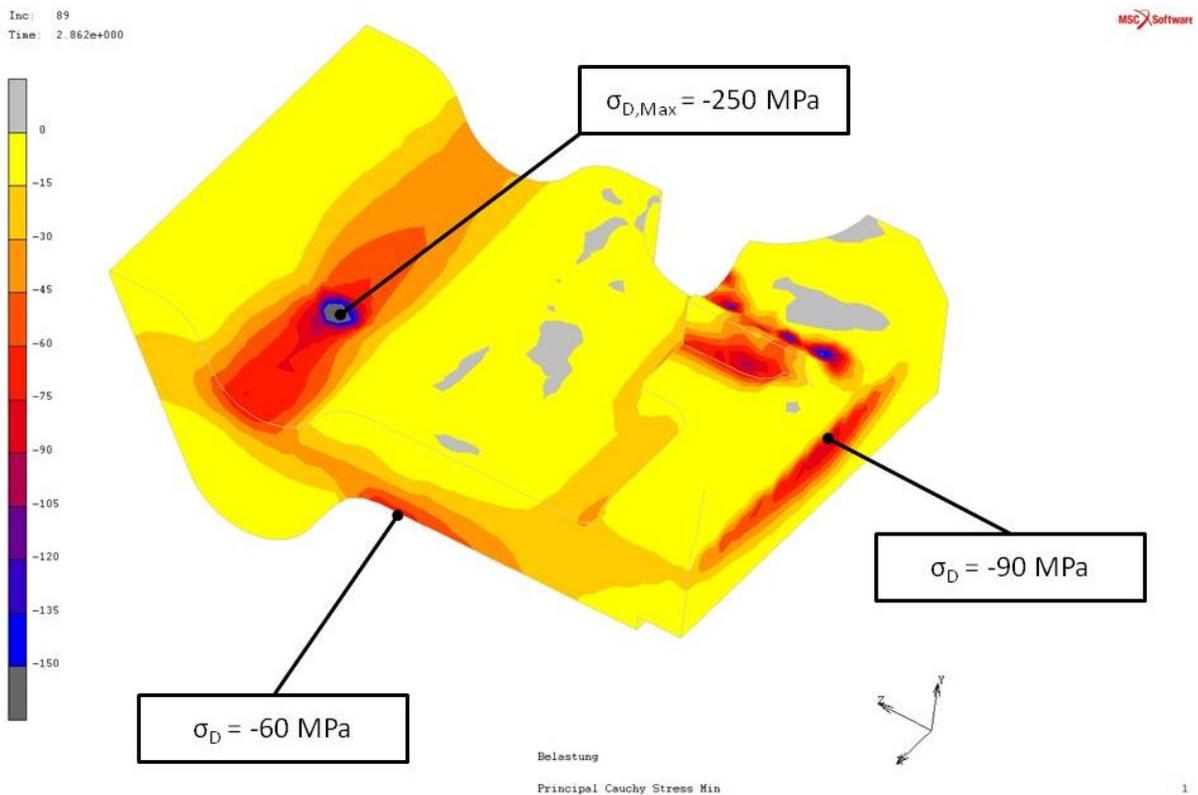


Außenliegende Wfp, Montage, $F_V= 18$ kN – Principal Total Strain Min



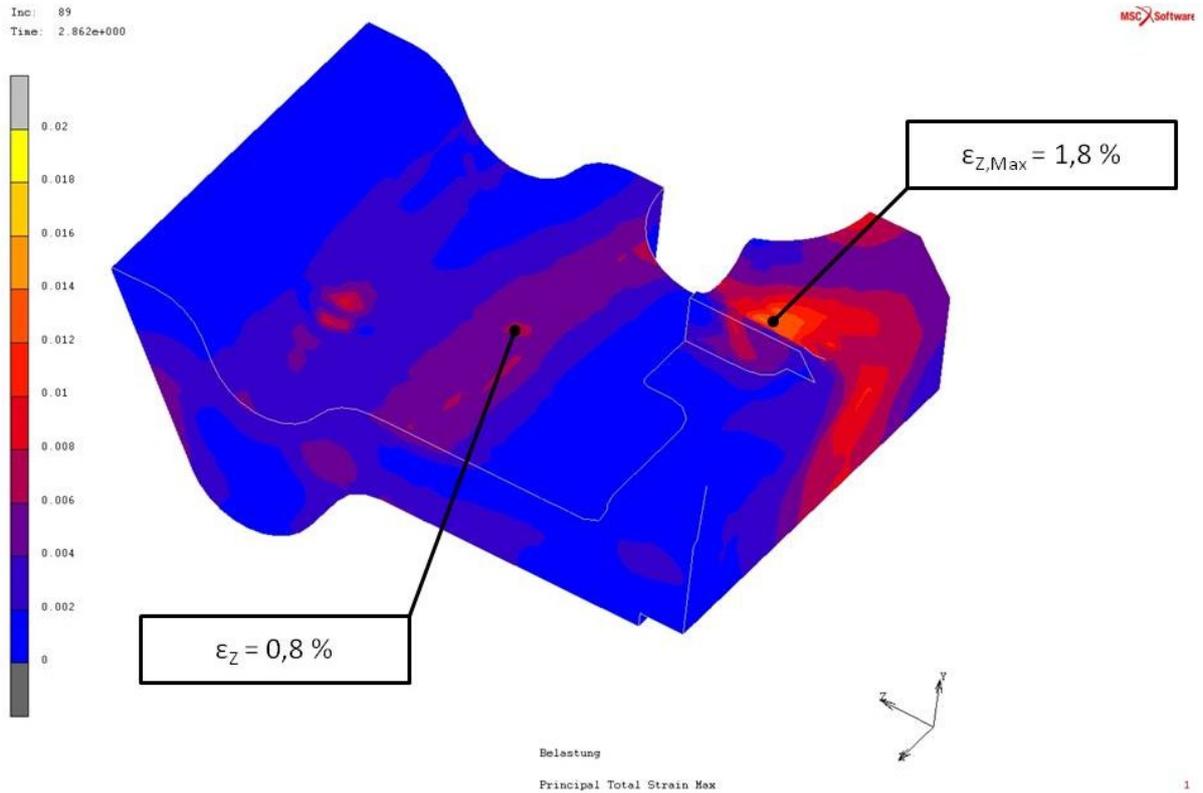
Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,

Principal Cauchy Stress Max



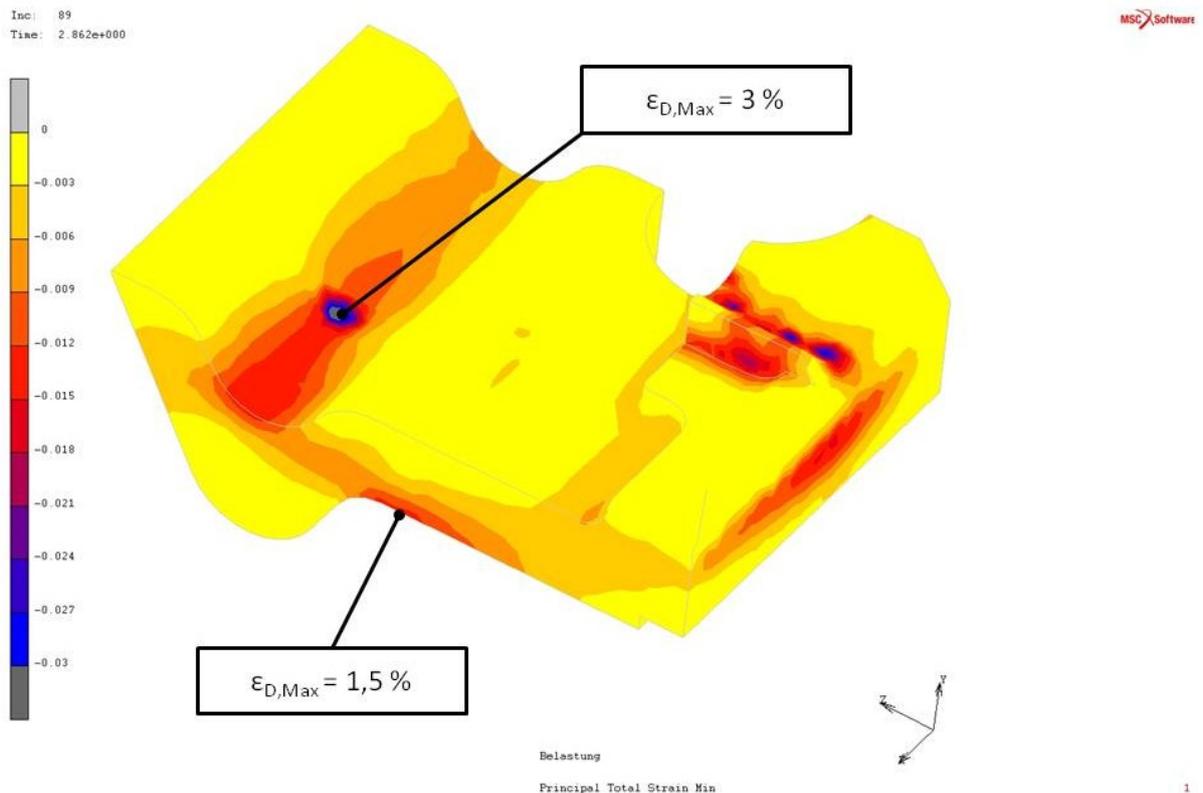
Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,

Principal Cauchy Stress Min

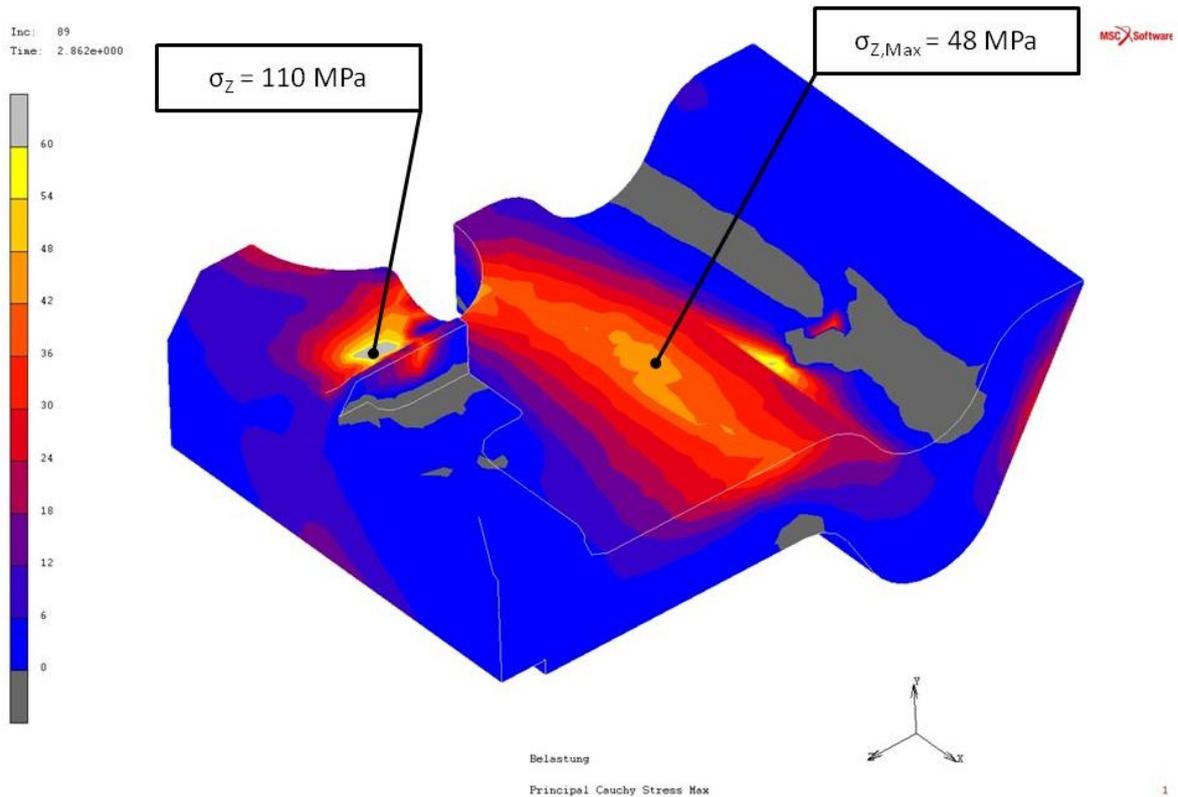


Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,

Principal Total Strain Max

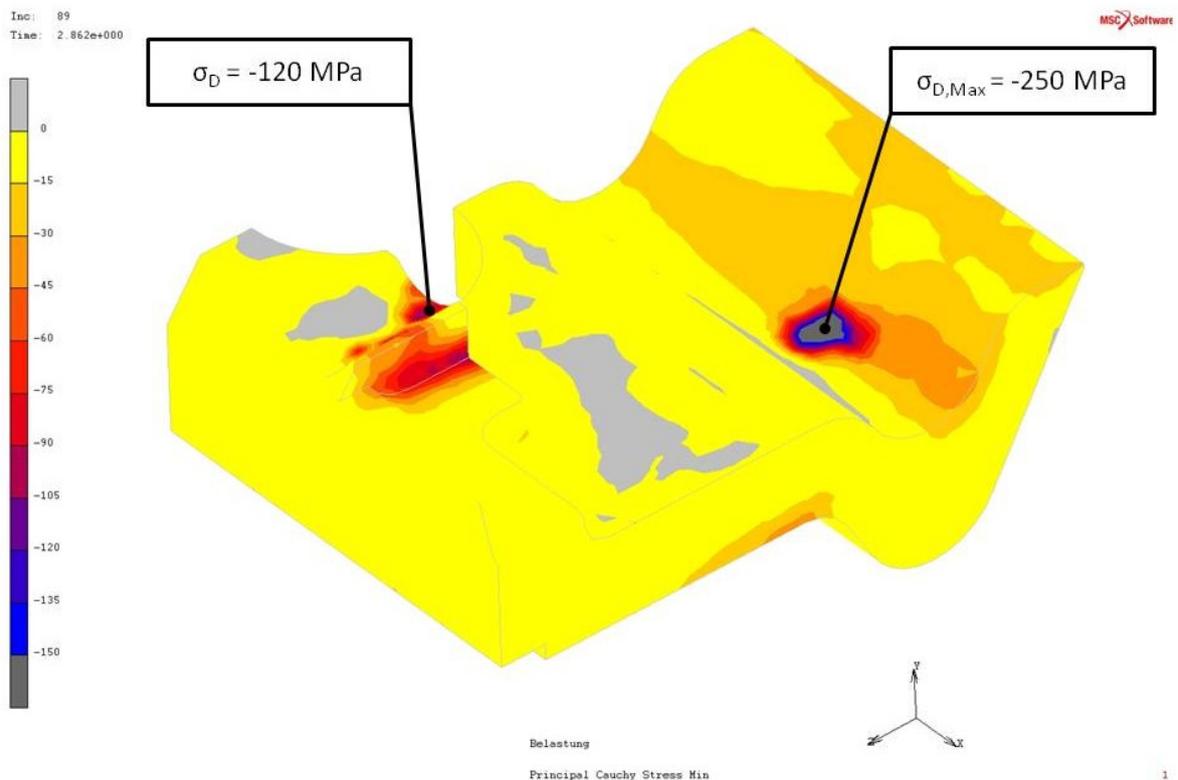


Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$, Principal Total Strain Min



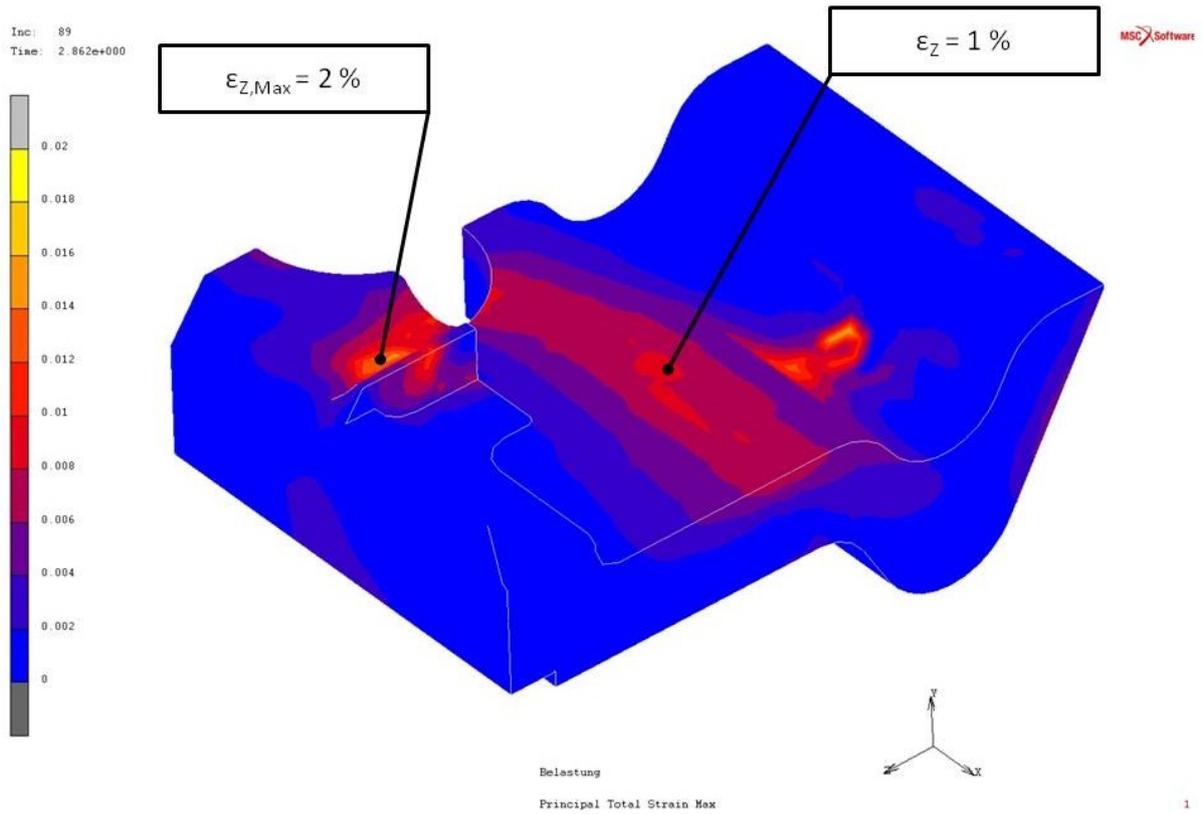
Innenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,

Principal Cauchy Stress Max

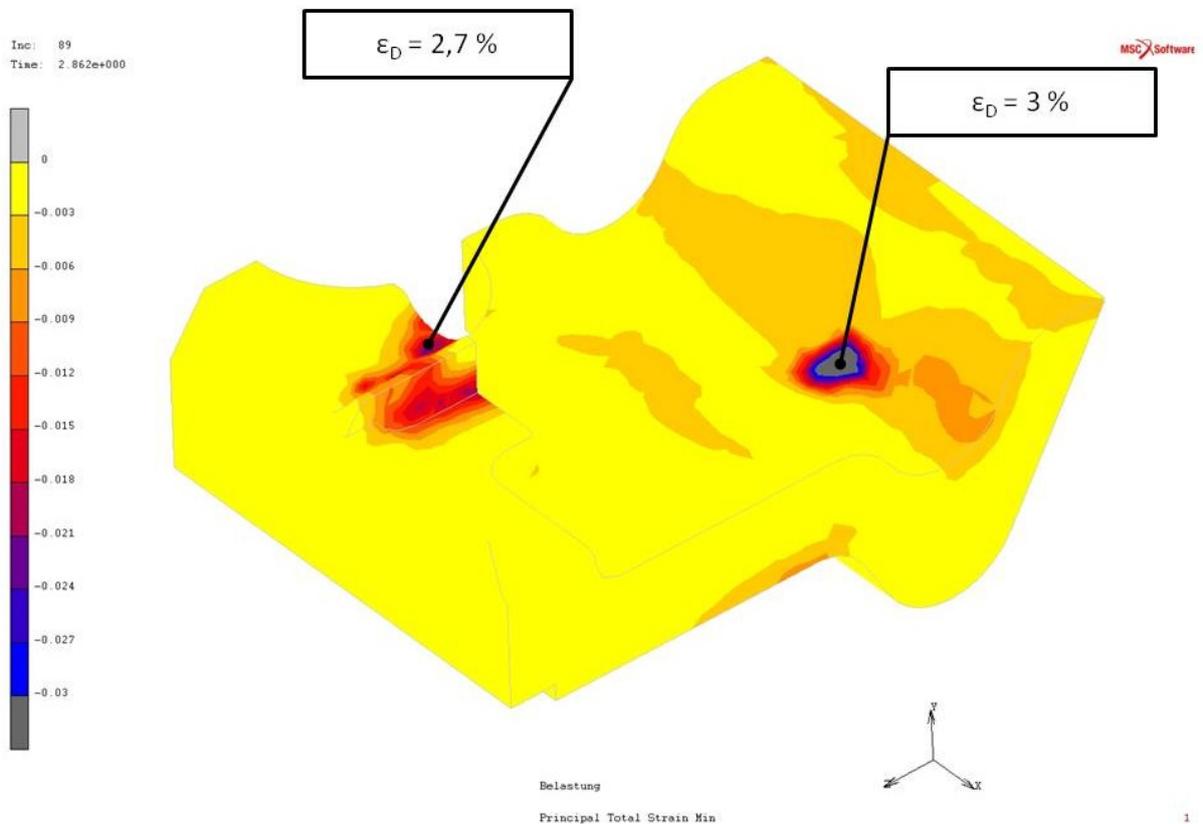


Innenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,

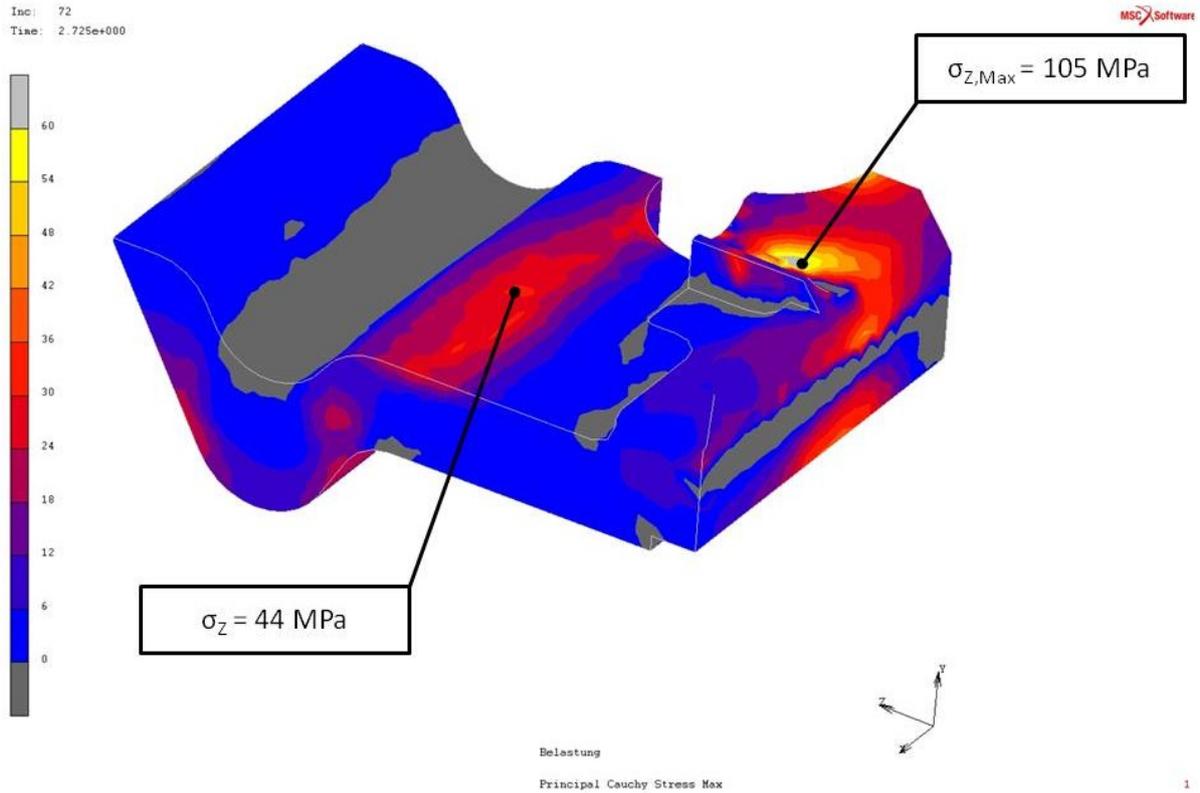
Principal Cauchy Stress Min



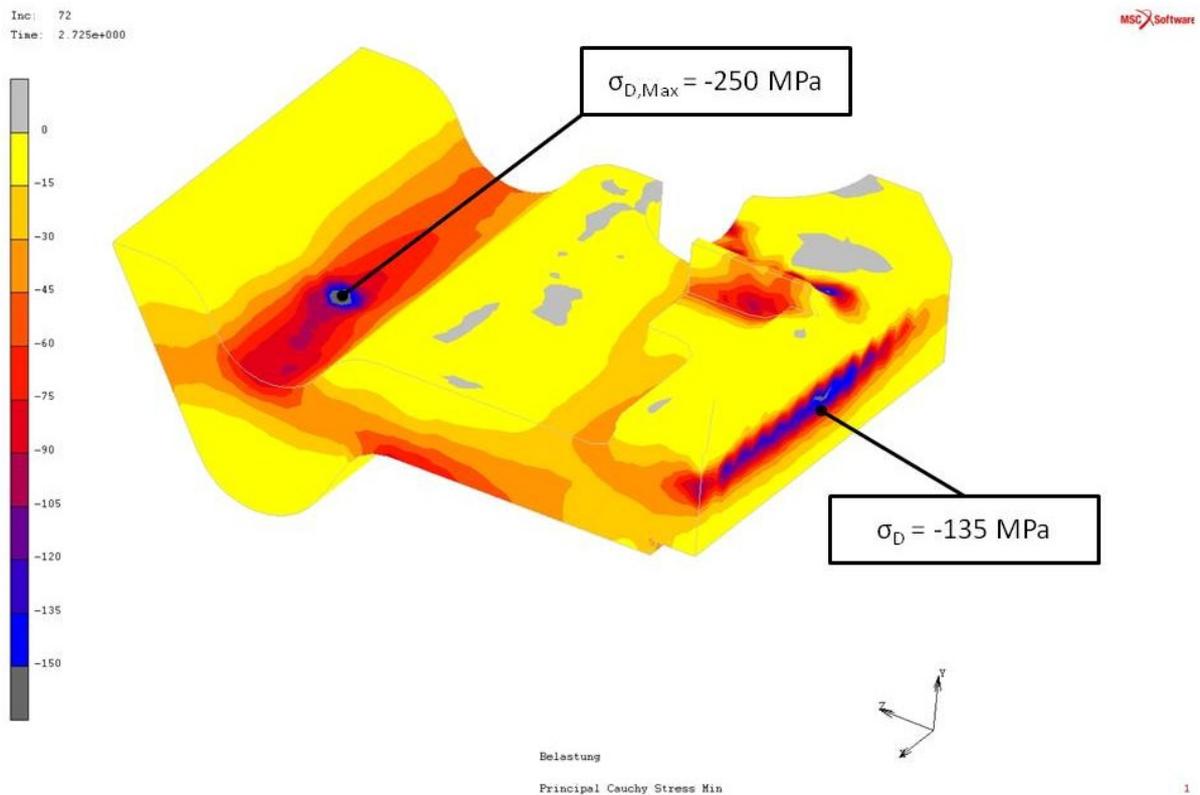
Innenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$,
Principal Total Strain Max



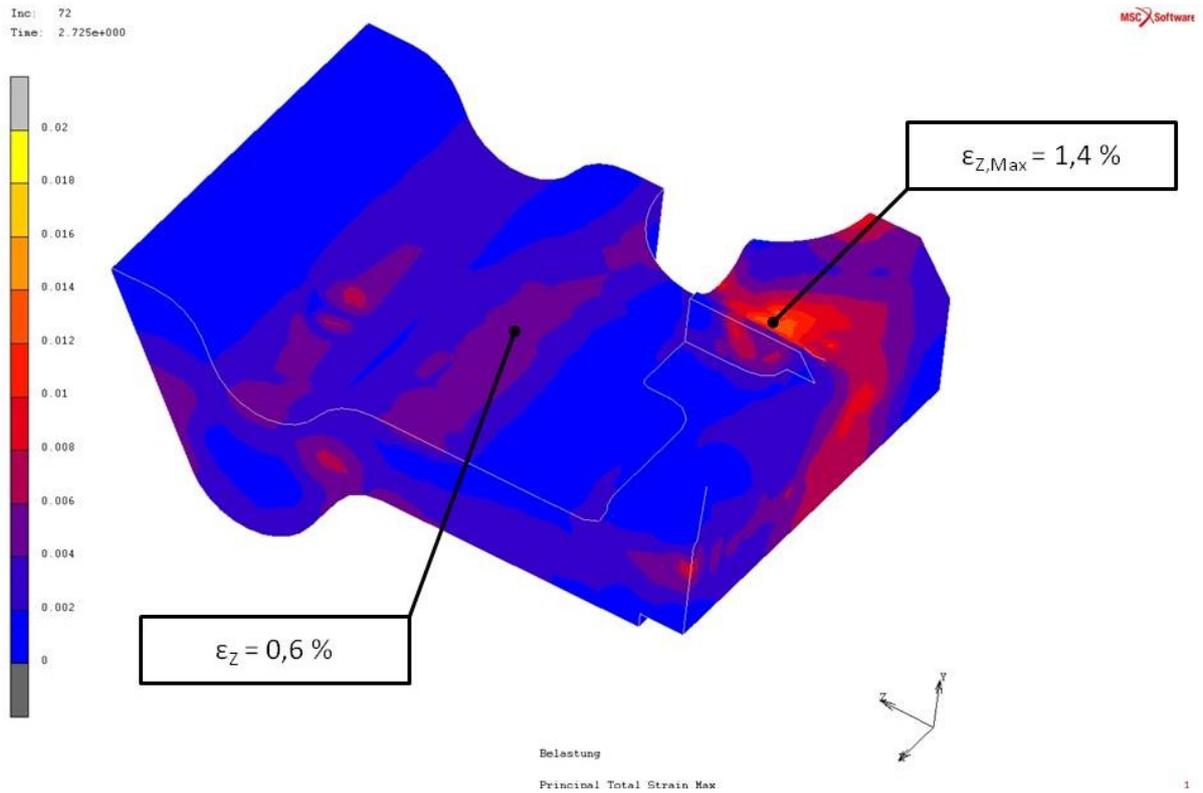
Innenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56 \text{ kN}$, $F_H = 36.5 \text{ kN}$, Principal Total Strain Min



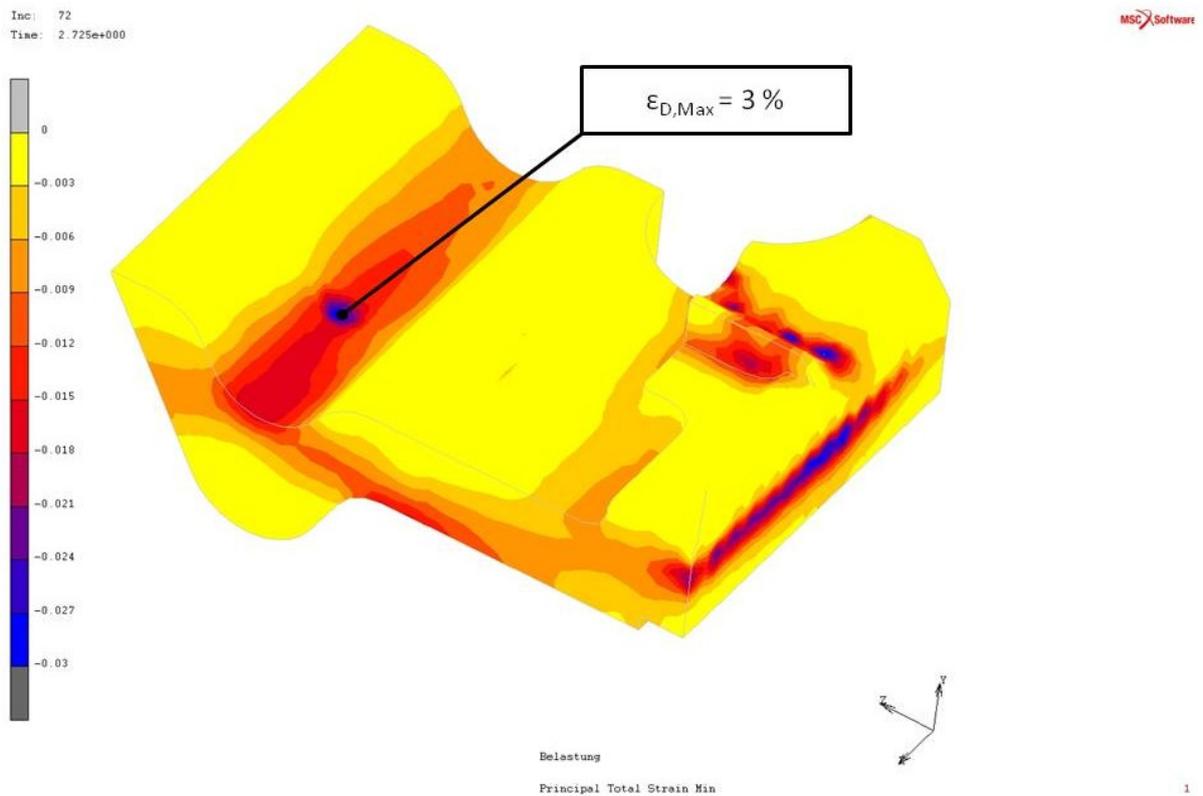
Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Max



Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Min



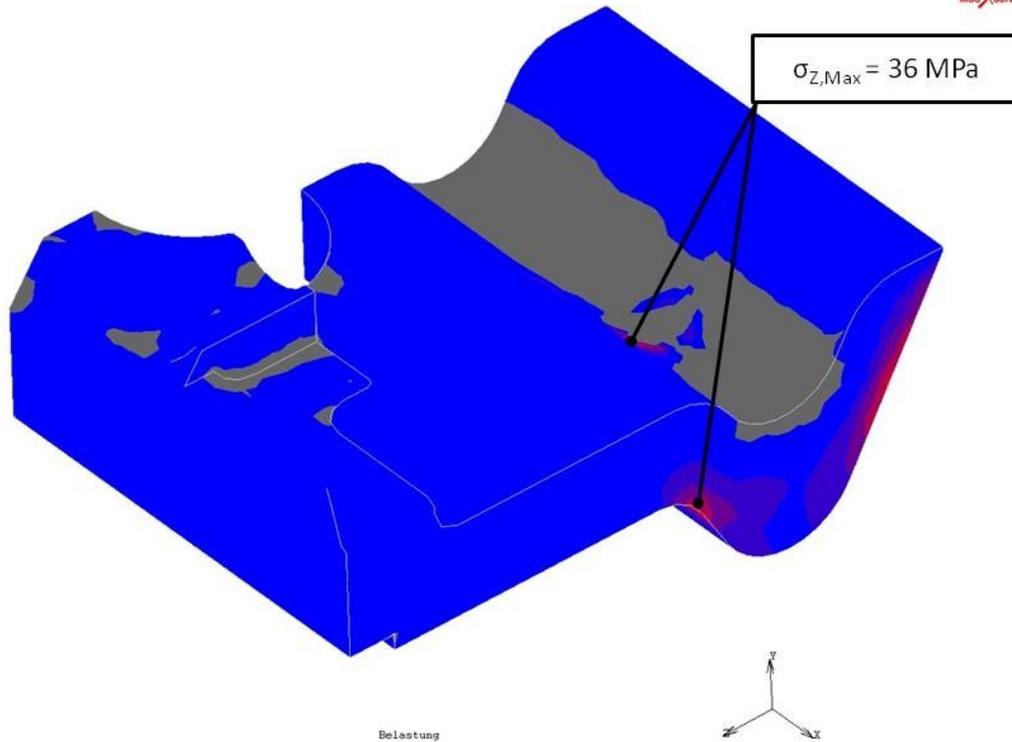
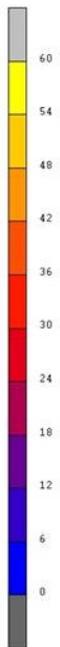
Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Total Strain Max



Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Total Strain Min

Inc: 72
Time: 2.725e+000

MSC Software



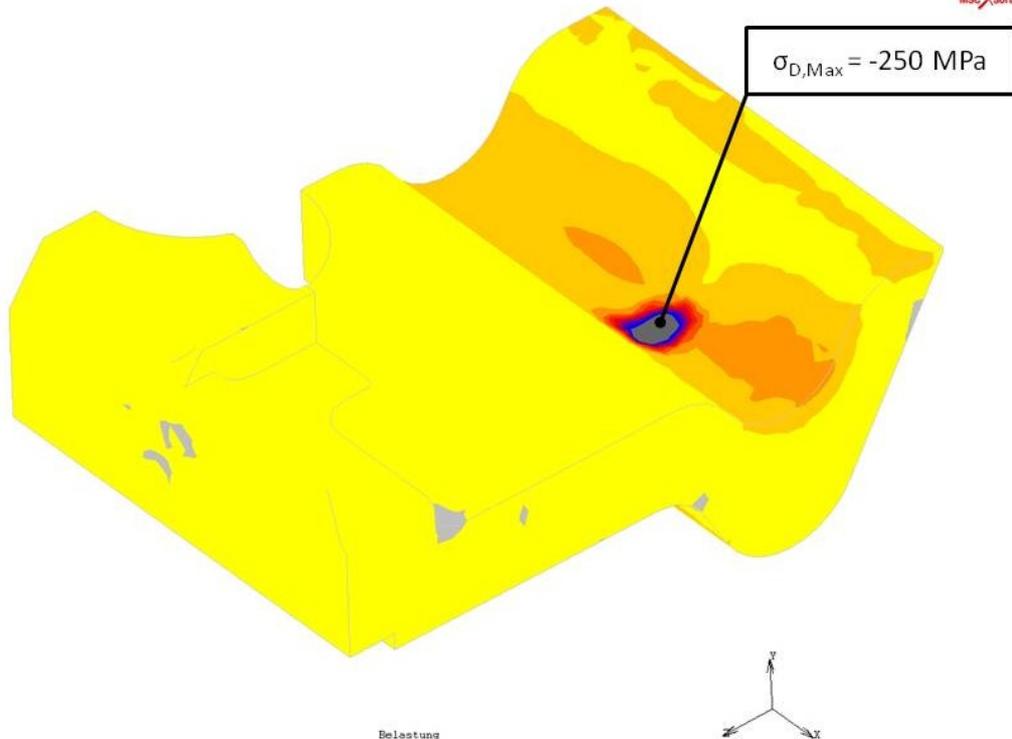
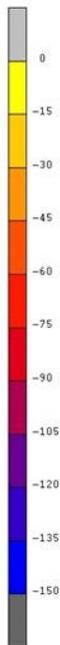
Belastung
Principal Cauchy Stress Max

1

Innenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Max

Inc: 72
Time: 2.725e+000

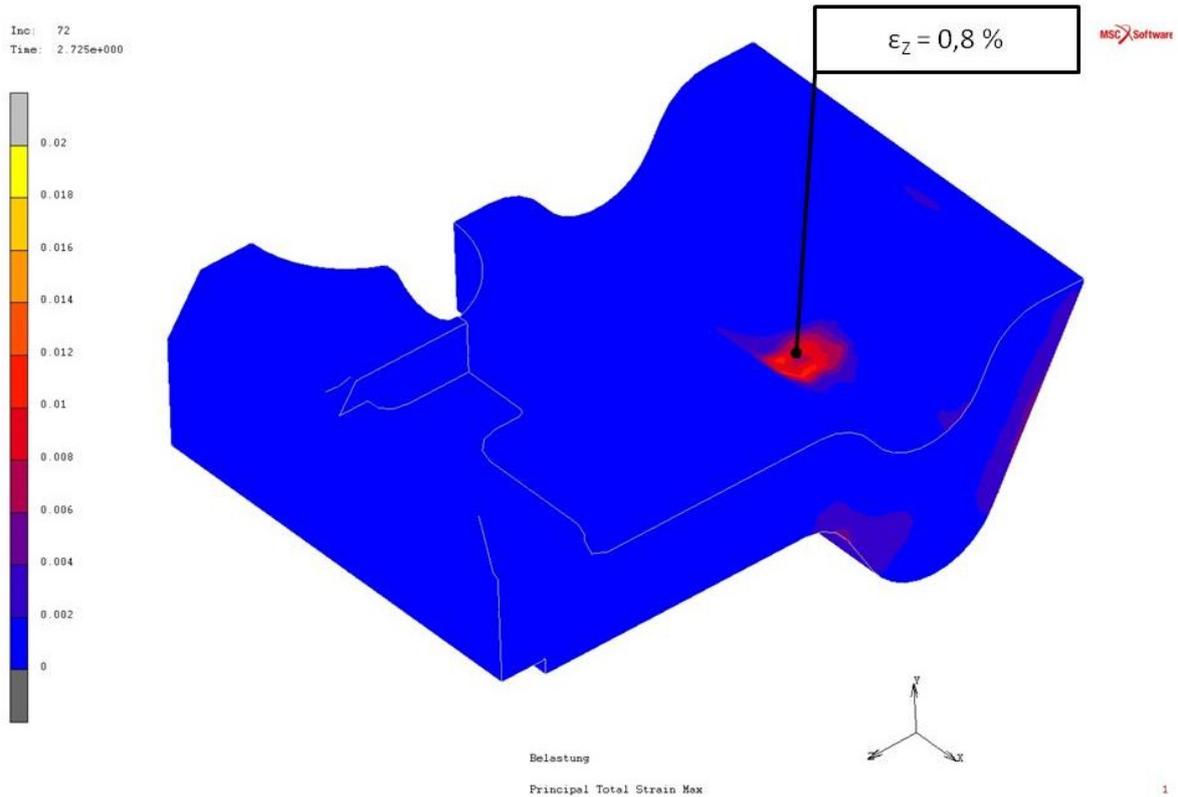
MSC Software



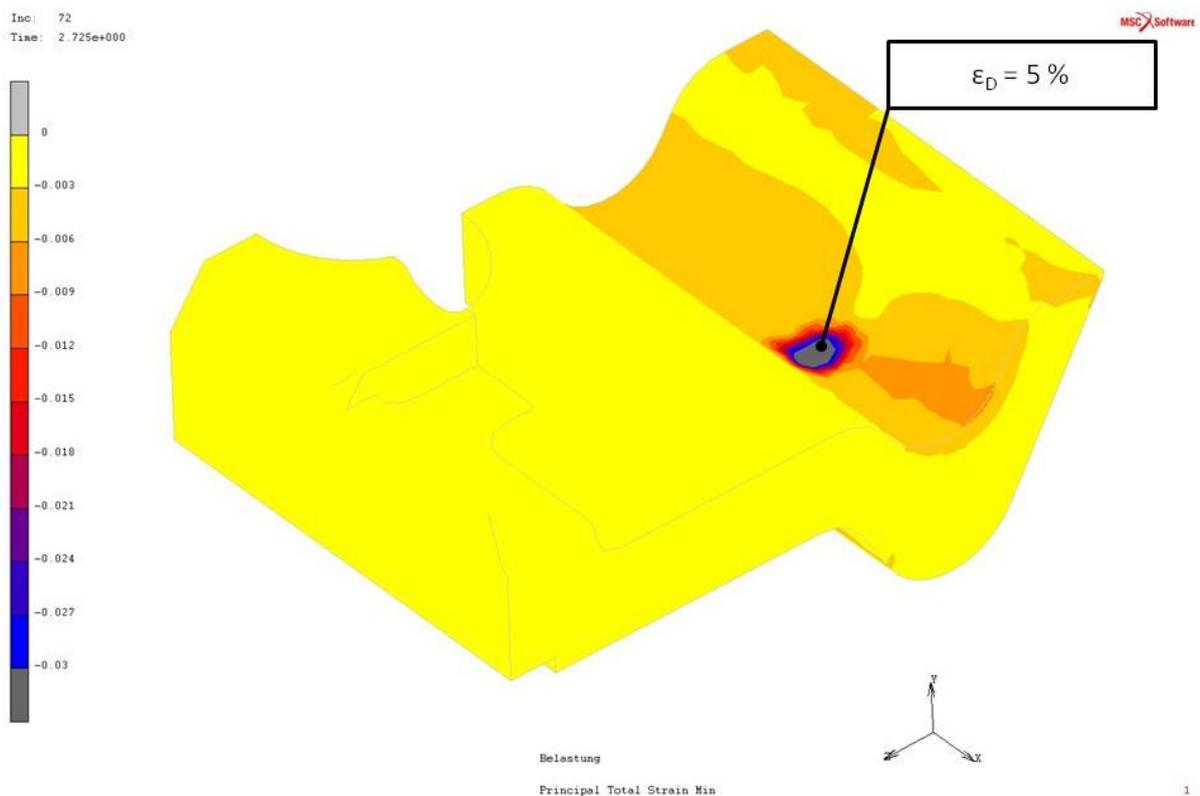
Belastung
Principal Cauchy Stress Min

1

Innenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Min

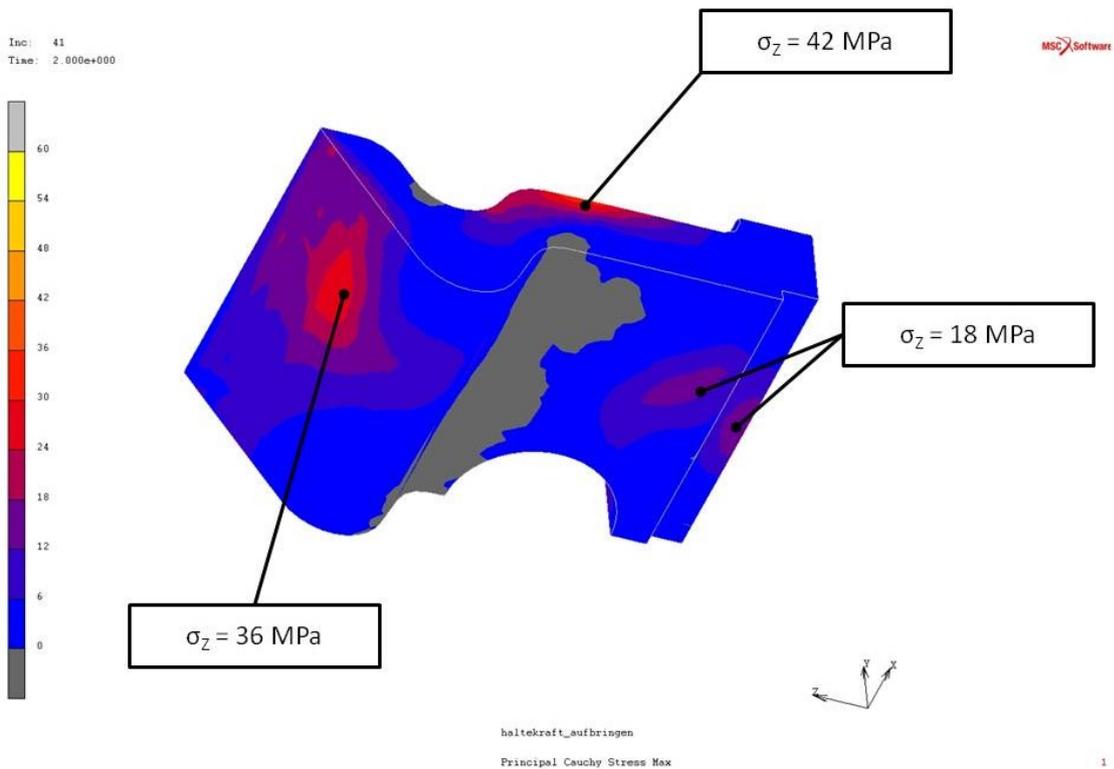


Innenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Total Strain Max

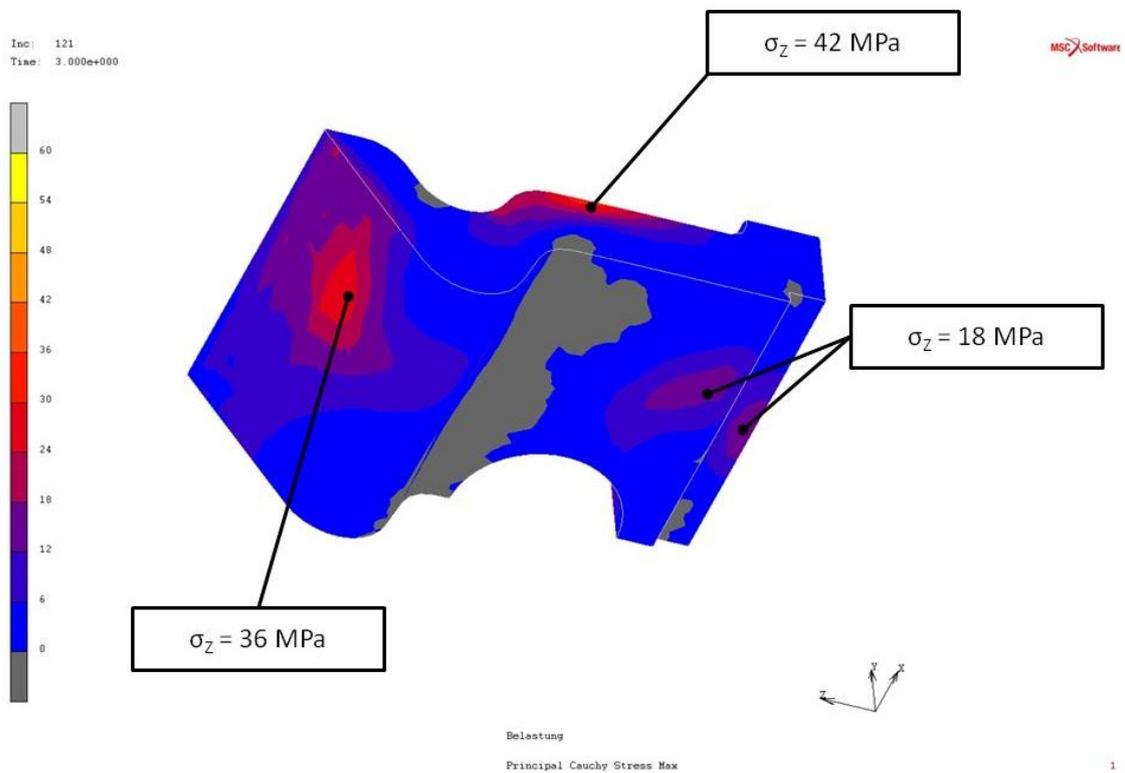


Innenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Total Strain Min

8.3 Vergleich Wfp14K12 Montage 18 kN, Bogenfahrt (CEN-13146), Worst-Case Belastung – Rückansichten

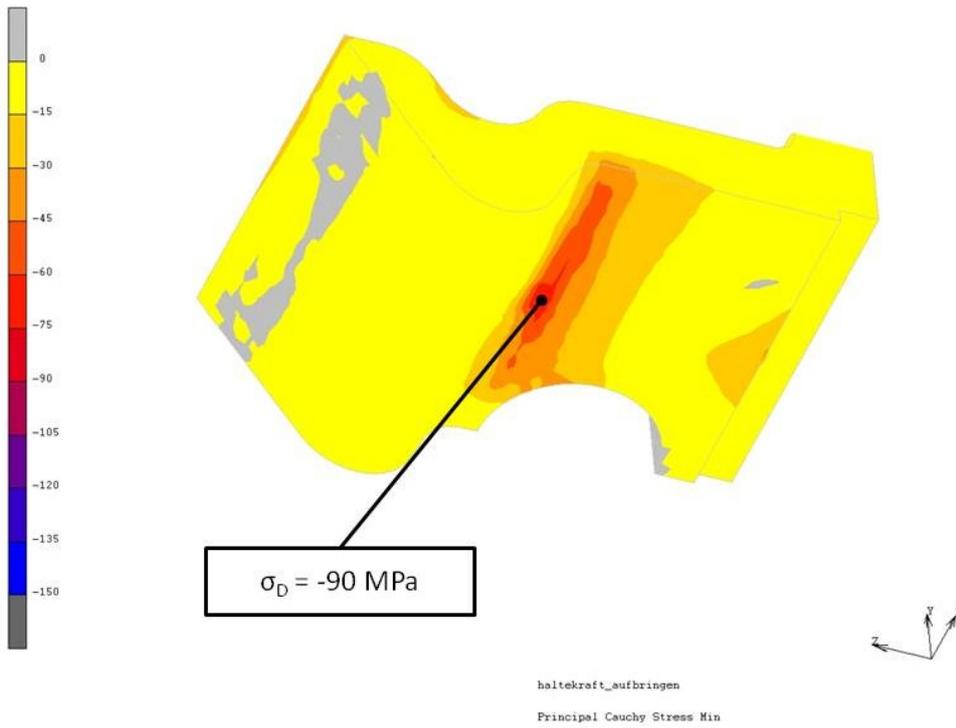


Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Max



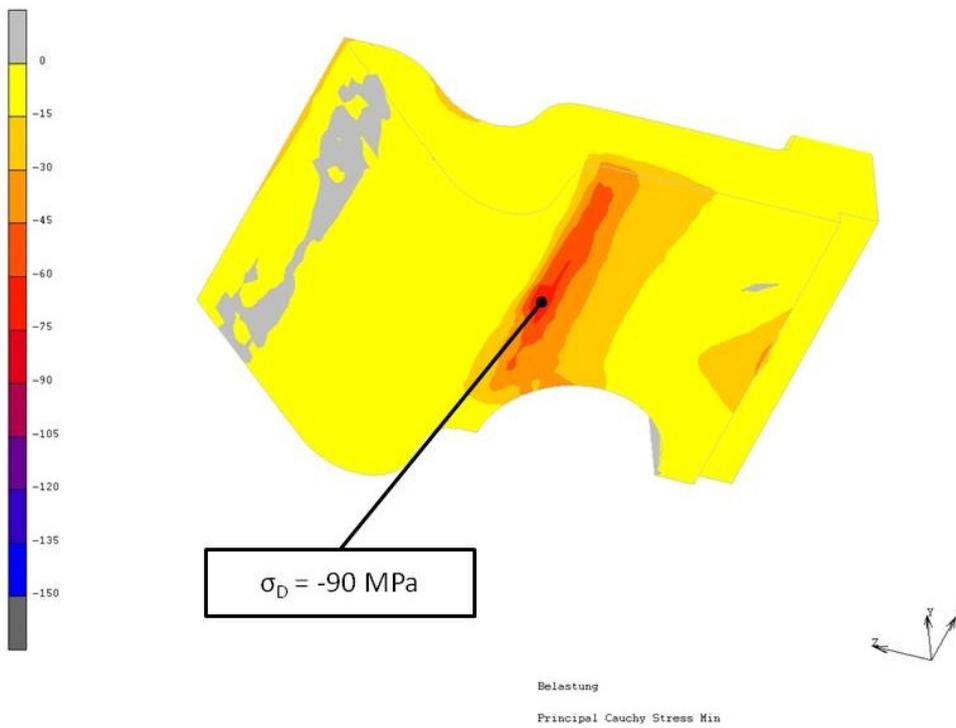
Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=68 \text{ kN}$ – Principal Cauchy Stress Max

Inc: 41
Time: 2.000e+000



Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=18$ kN – Principal Cauchy Stress Min

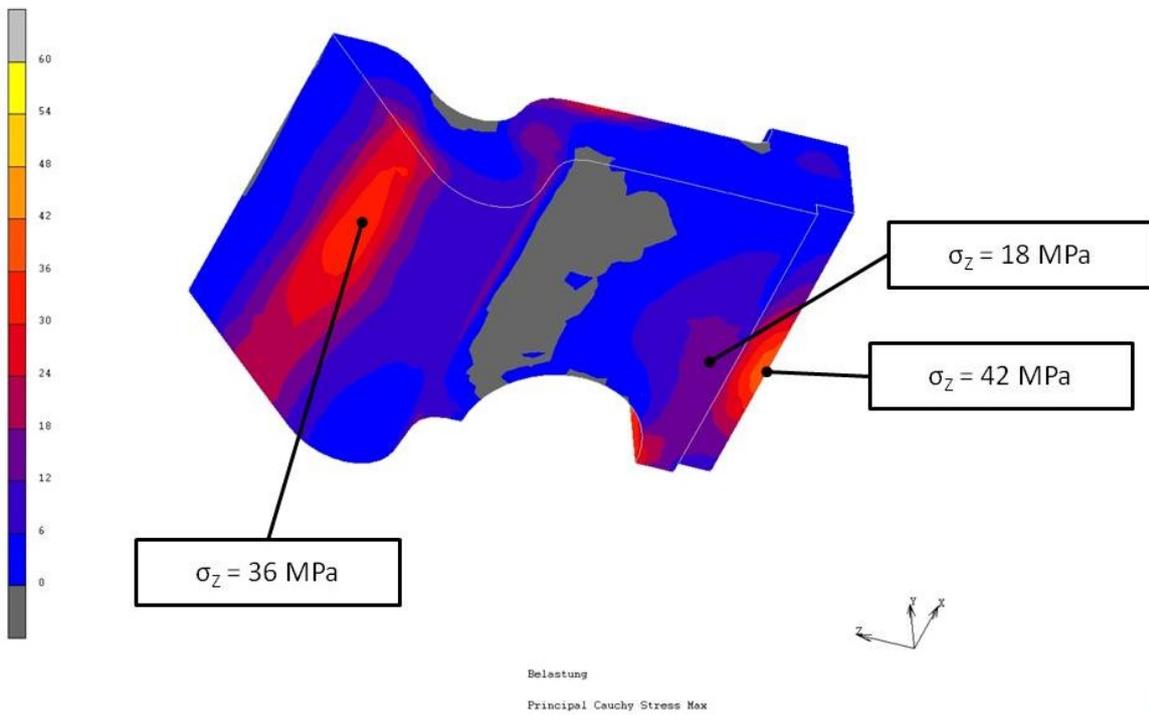
Inc: 121
Time: 3.000e+000



Außenliegende Wfp, Montage, $F_V=68$ kN – Principal Cauchy Stress Min

Inc: 89
Time: 2.862e+000

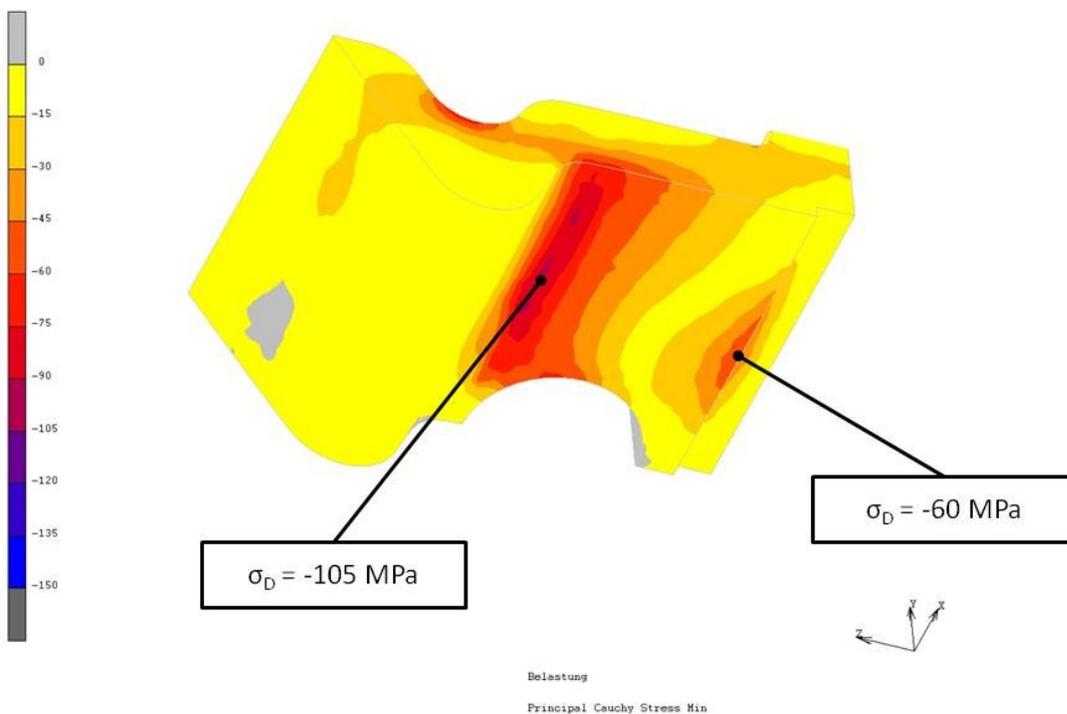
MSC Software



Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56$ kN, $F_H = 36.5$ kN,
Principal Cauchy Stress Max

Inc: 89
Time: 2.862e+000

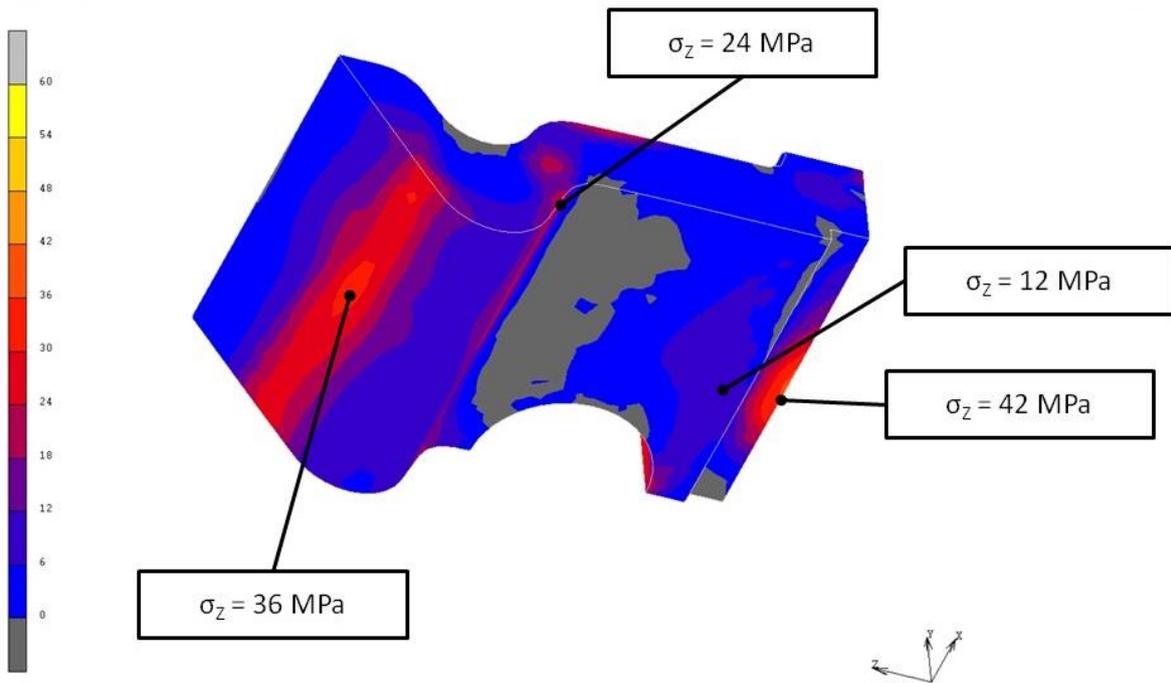
MSC Software



Außenliegende Wfp, Bogenfahrt, $F_V = 56$ kN, $F_H = 36.5$ kN,
Principal Cauchy Stress Min

Inc: 72
Time: 2.725e+000

MSC Software



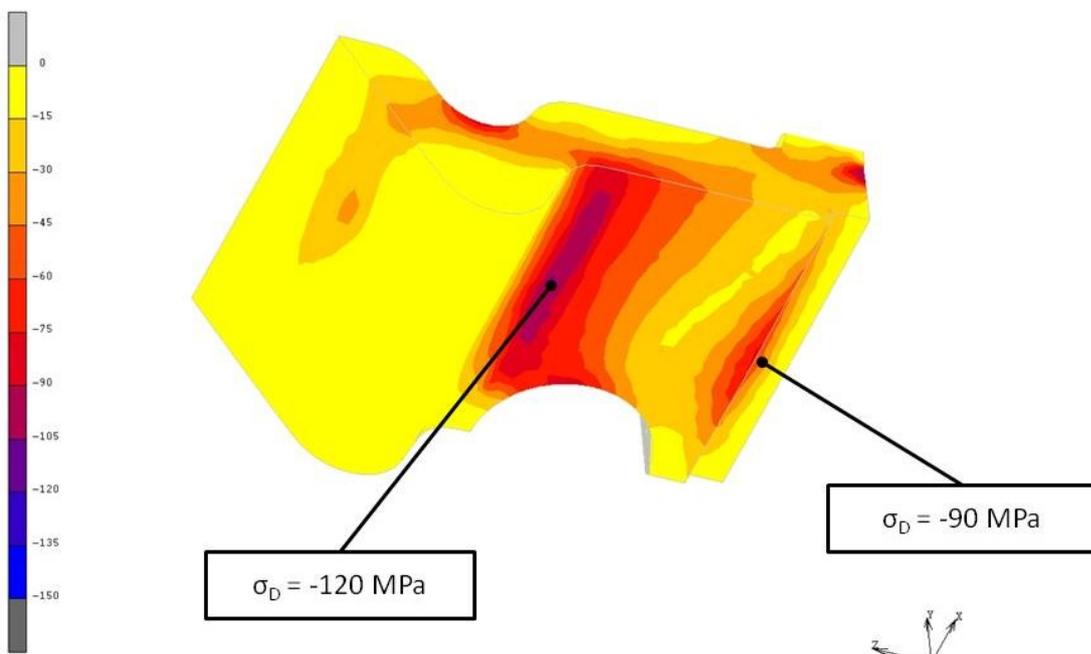
Belastung
Principal Cauchy Stress Max

1

Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Max

Inc: 72
Time: 2.725e+000

MSC Software

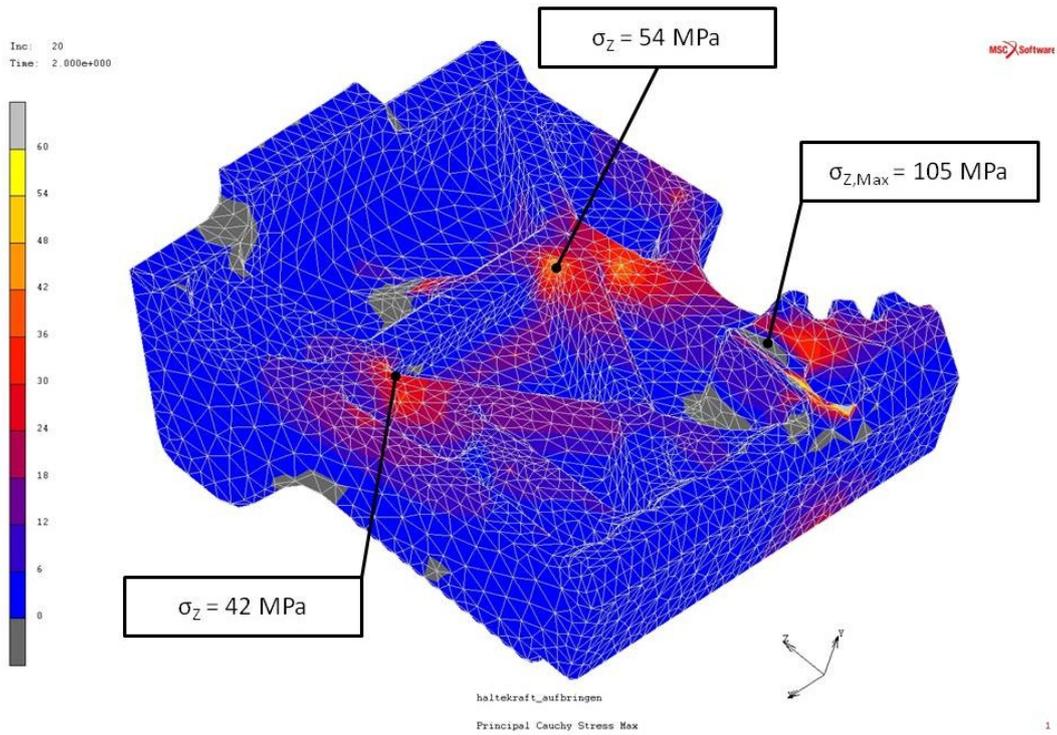


Belastung
Principal Cauchy Stress Min

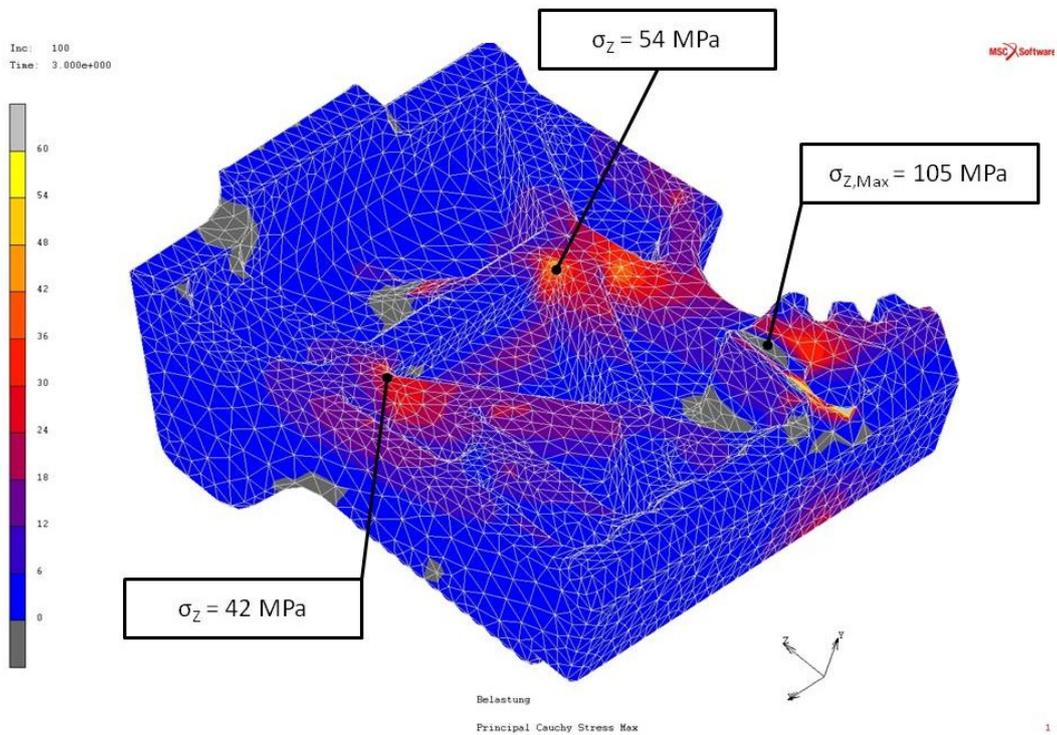
1

Außenliegende Wfp, Worst-Case Belastung, $F_V = 29 \text{ kN}$, $F_H = 44 \text{ kN}$,
Principal Cauchy Stress Min

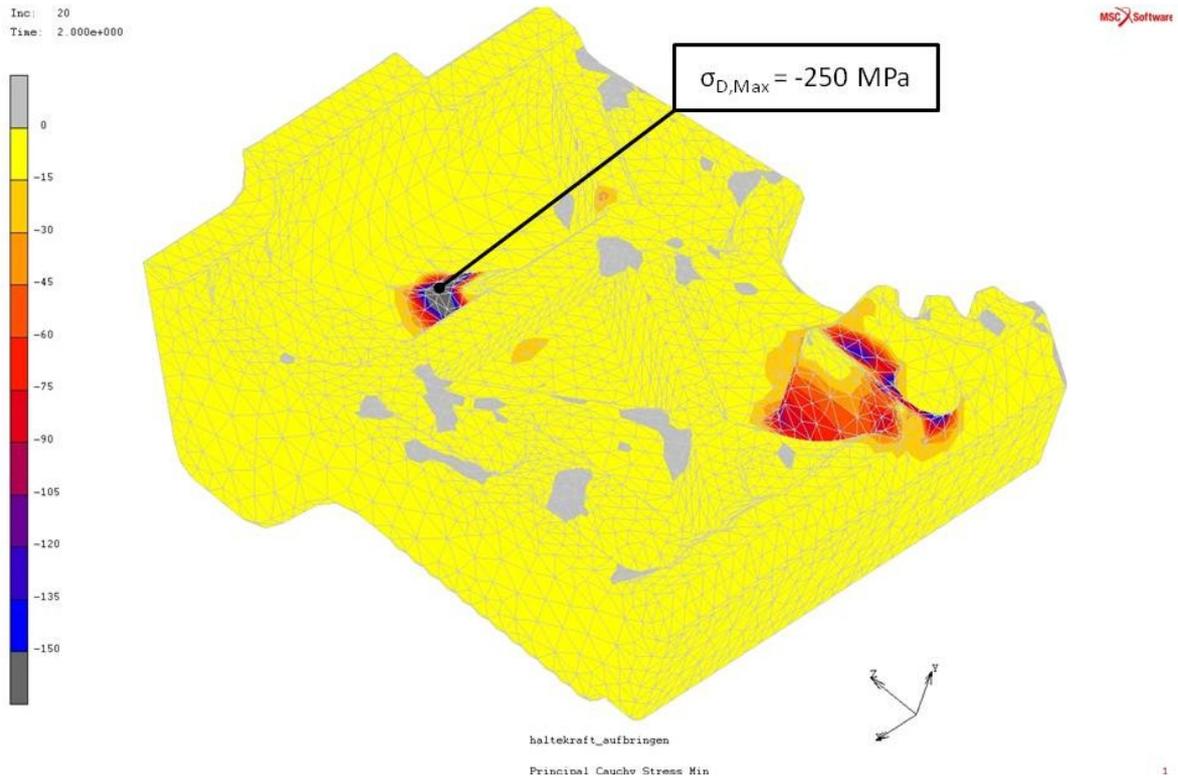
8.4 Vergleich verrippte Wfp, Montage 18 kN und 68 kN



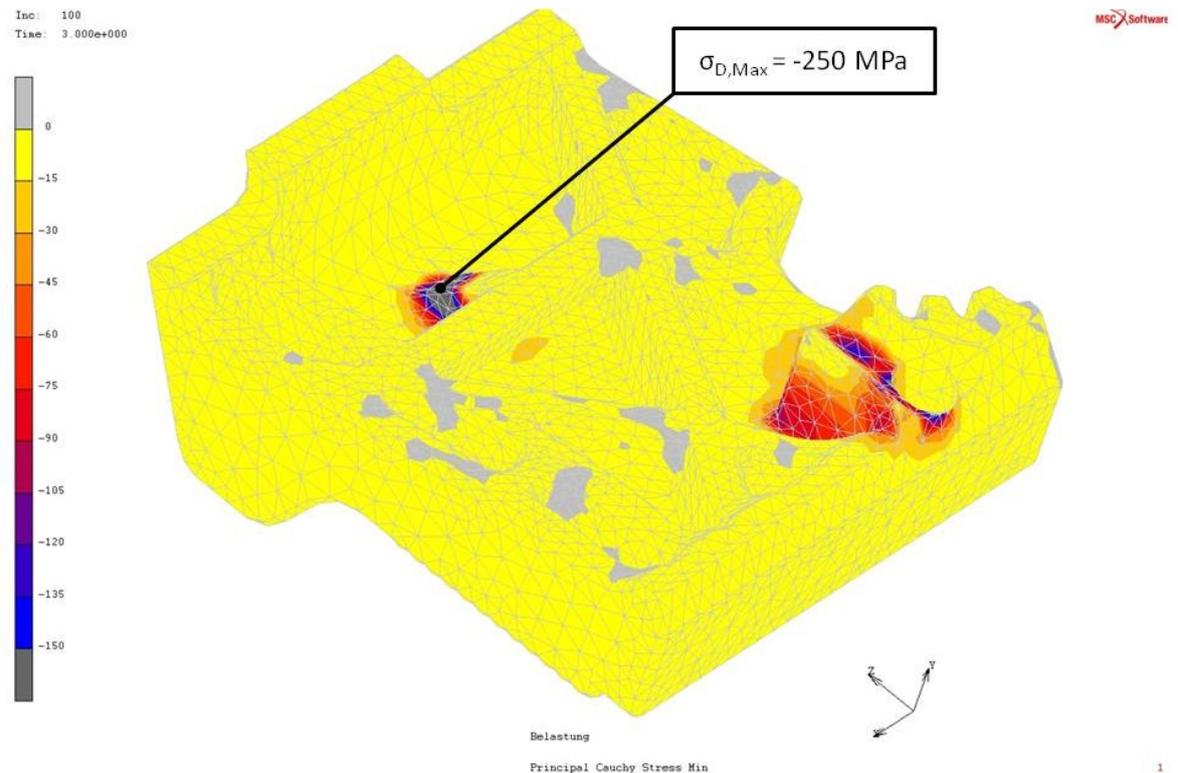
Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=18 \text{ kN}$, Principal Cauchy Stress Max



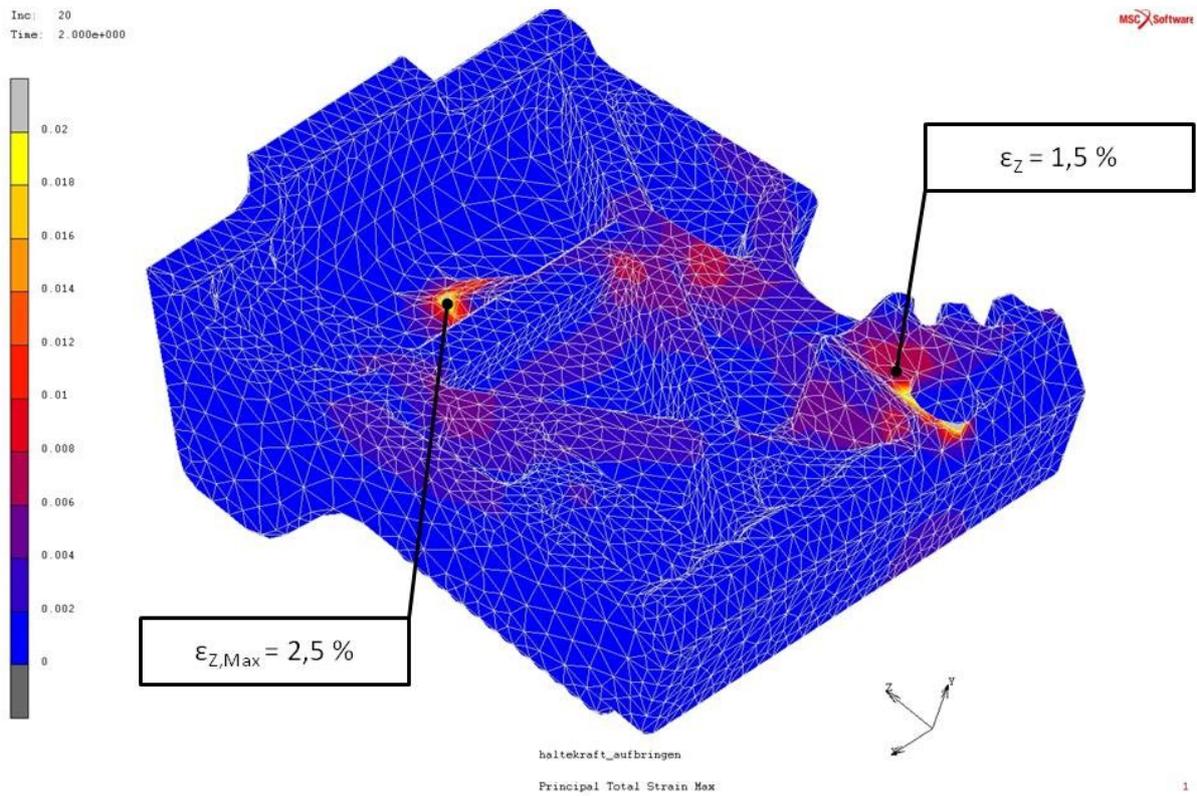
Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68 \text{ kN}$, Principal Cauchy Stress Max



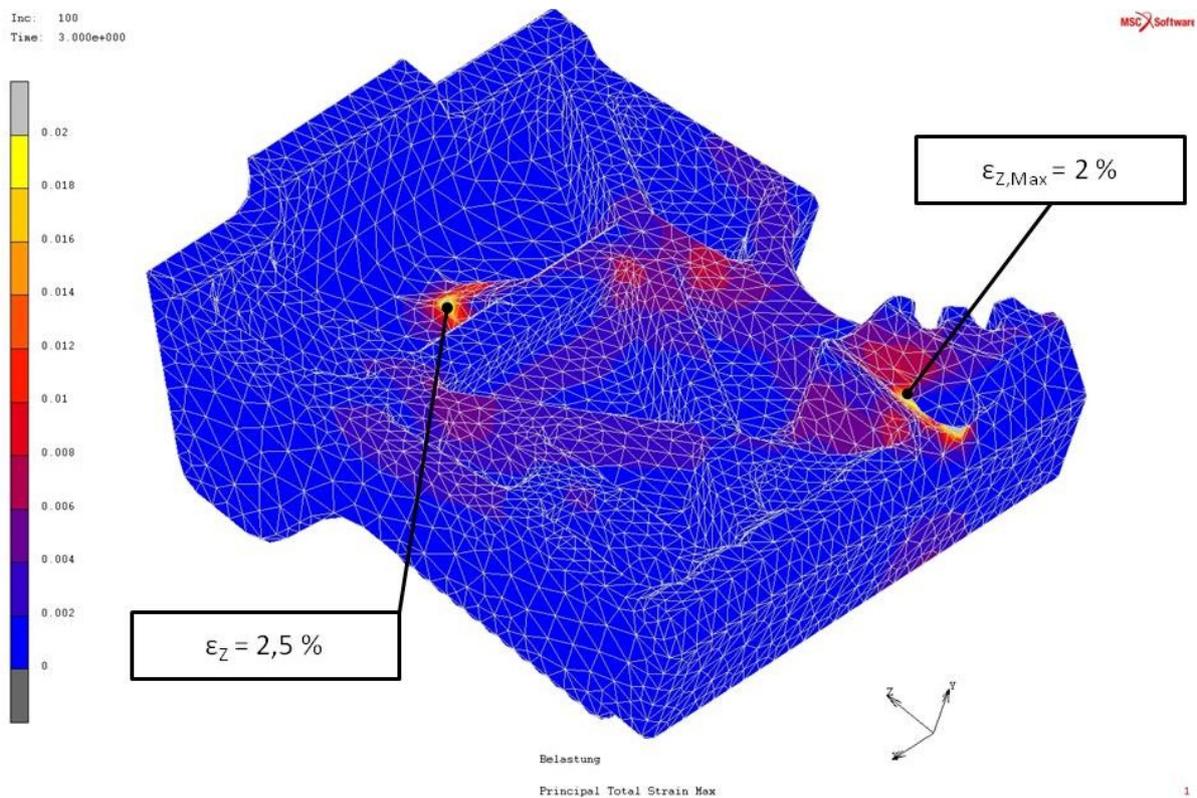
Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=18 \text{ kN}$, Principal Cauchy Stress Min



Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68 \text{ kN}$, Principal Cauchy Stress Min



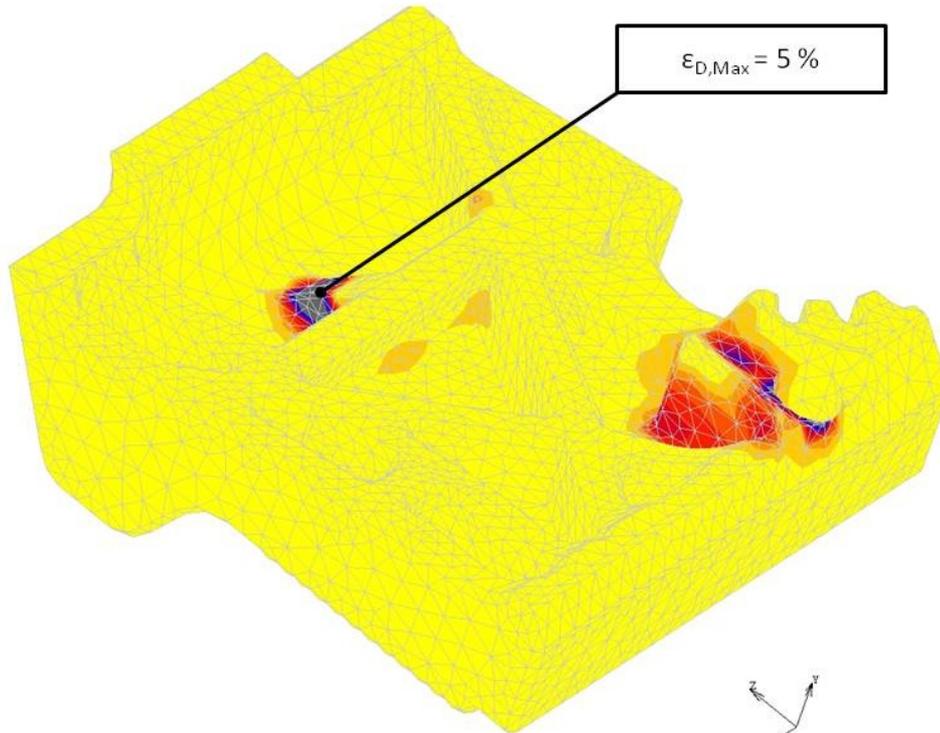
Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=18$ kN, Principal Total Strain Max



Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68$ kN, Principal Total Strain Max

Inc: 20
Time: 2.000e+000

MSC Software



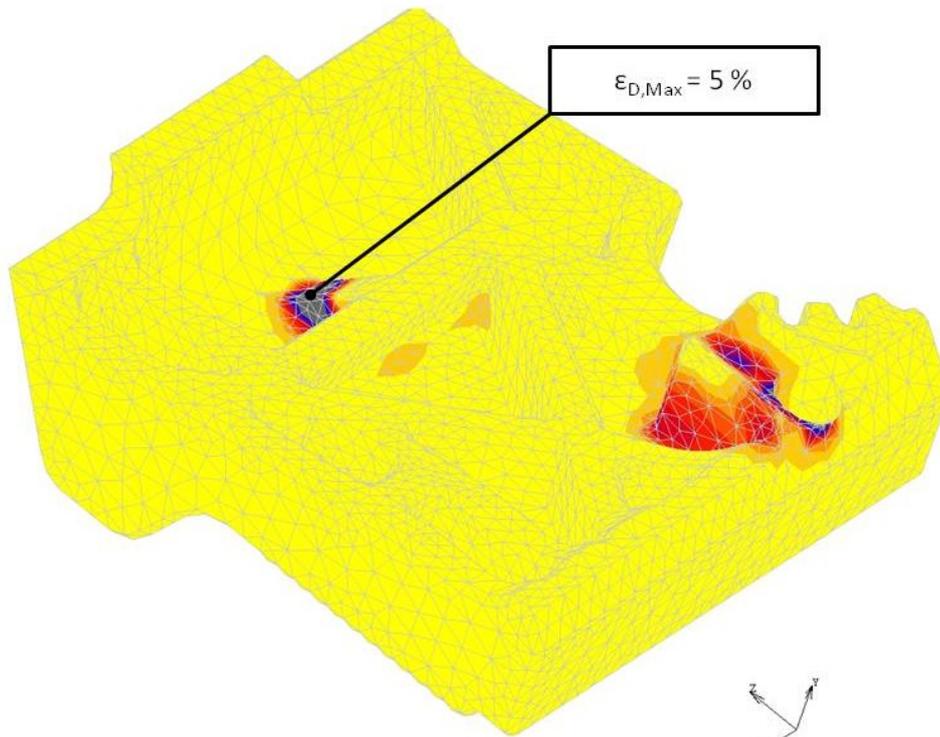
haltekraft_aufbringen
Principal Total Strain Min

1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=18$ kN, Principal Total Strain Min

Inc: 100
Time: 3.000e+000

MSC Software



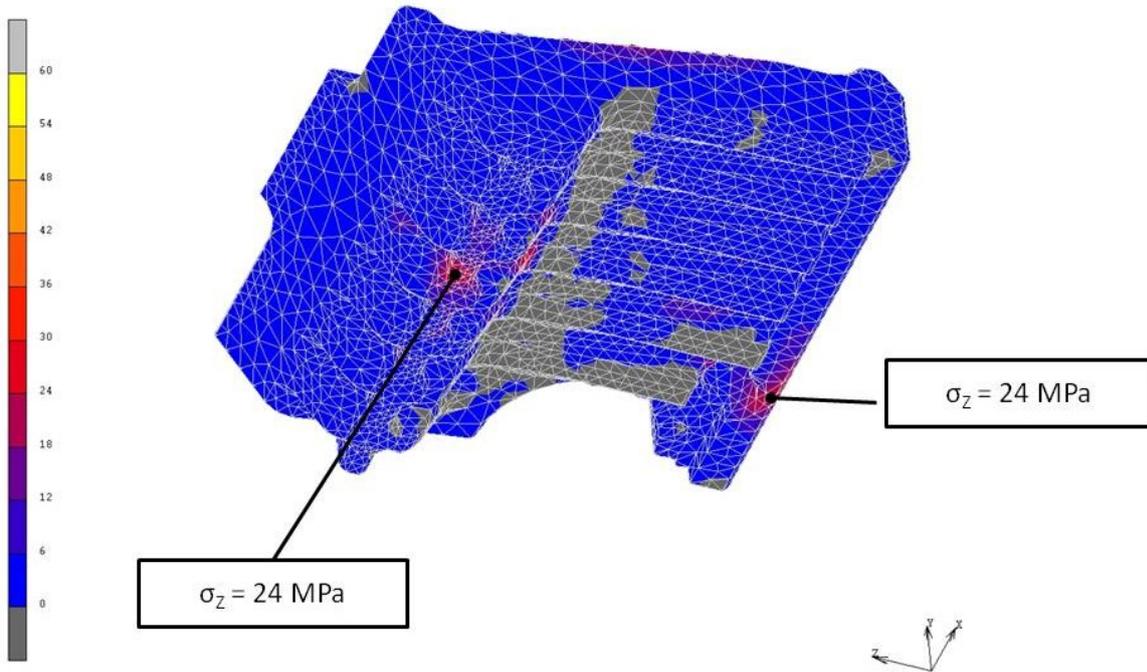
Belastung
Principal Total Strain Min

1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68$ kN, Principal Total Strain Min

Inc: 100
Time: 3.000e+000

MSC Software



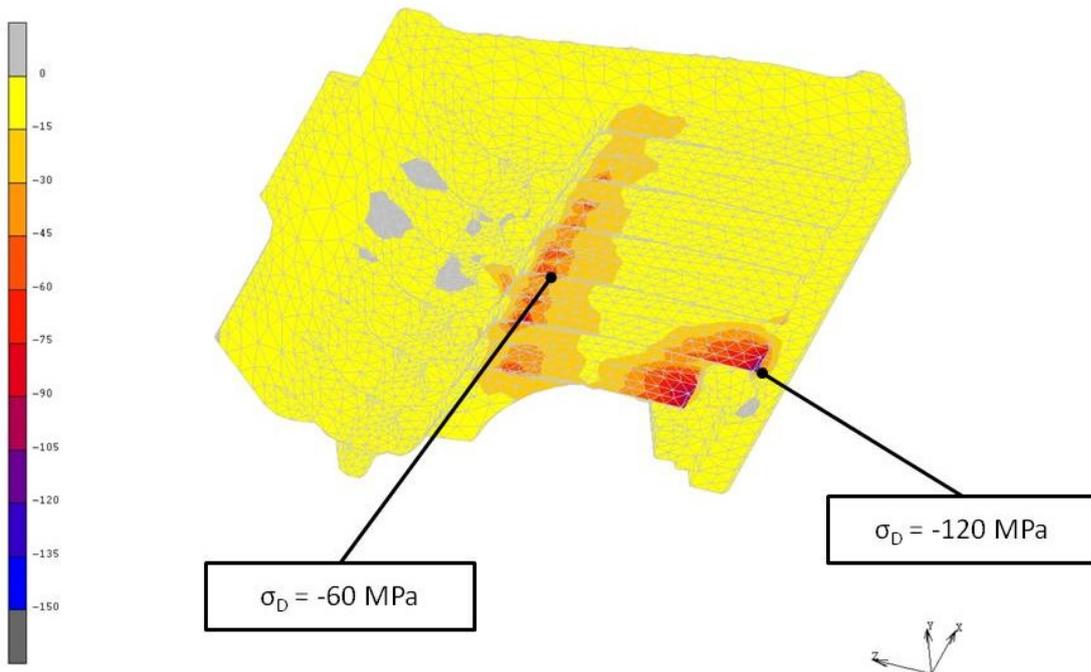
Belastung
Principal Cauchy Stress Max

1

Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68$ kN, Principal Cauchy Stress Max

Inc: 100
Time: 3.000e+000

MSC Software

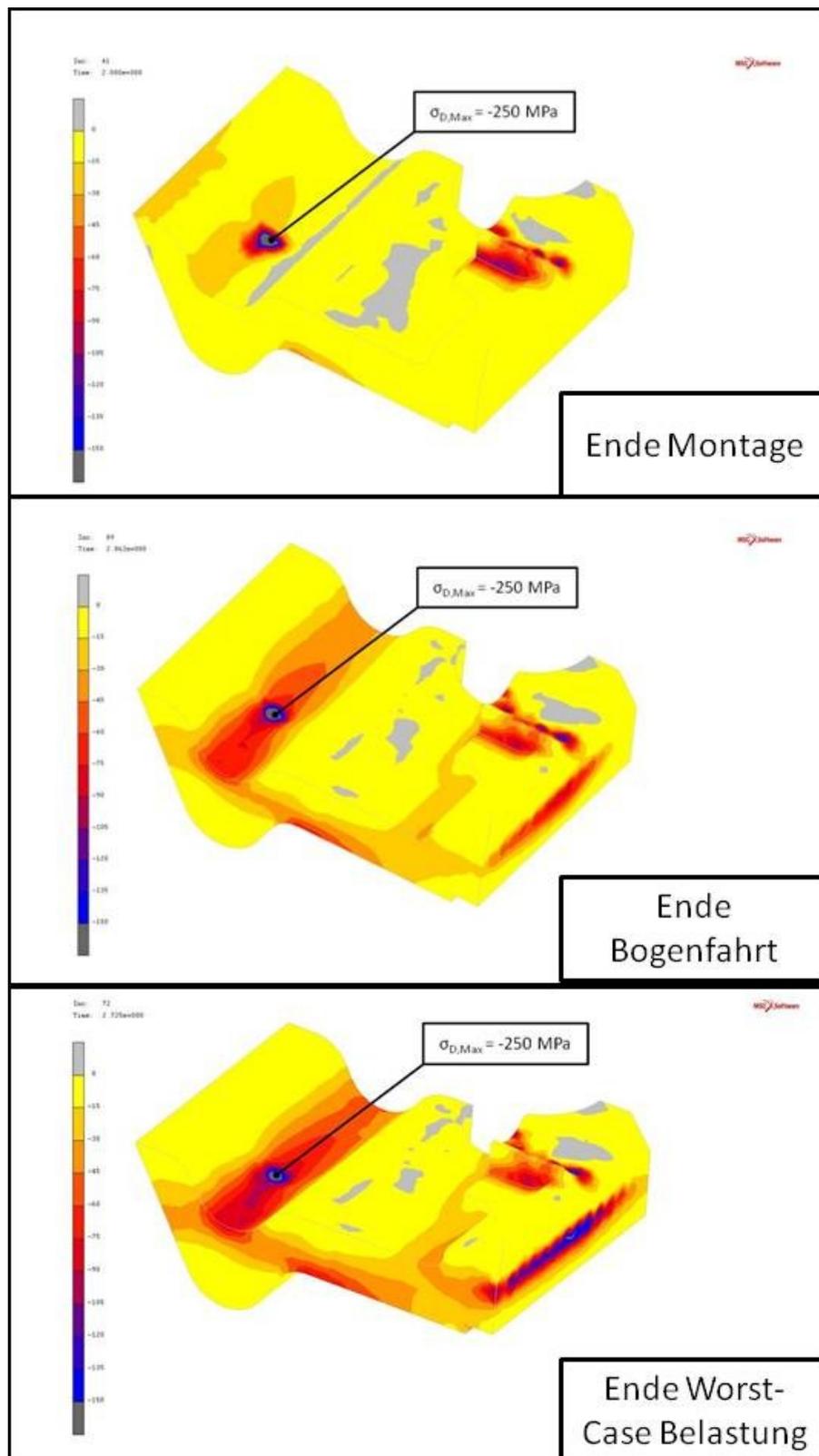


Belastung
Principal Cauchy Stress Min

1

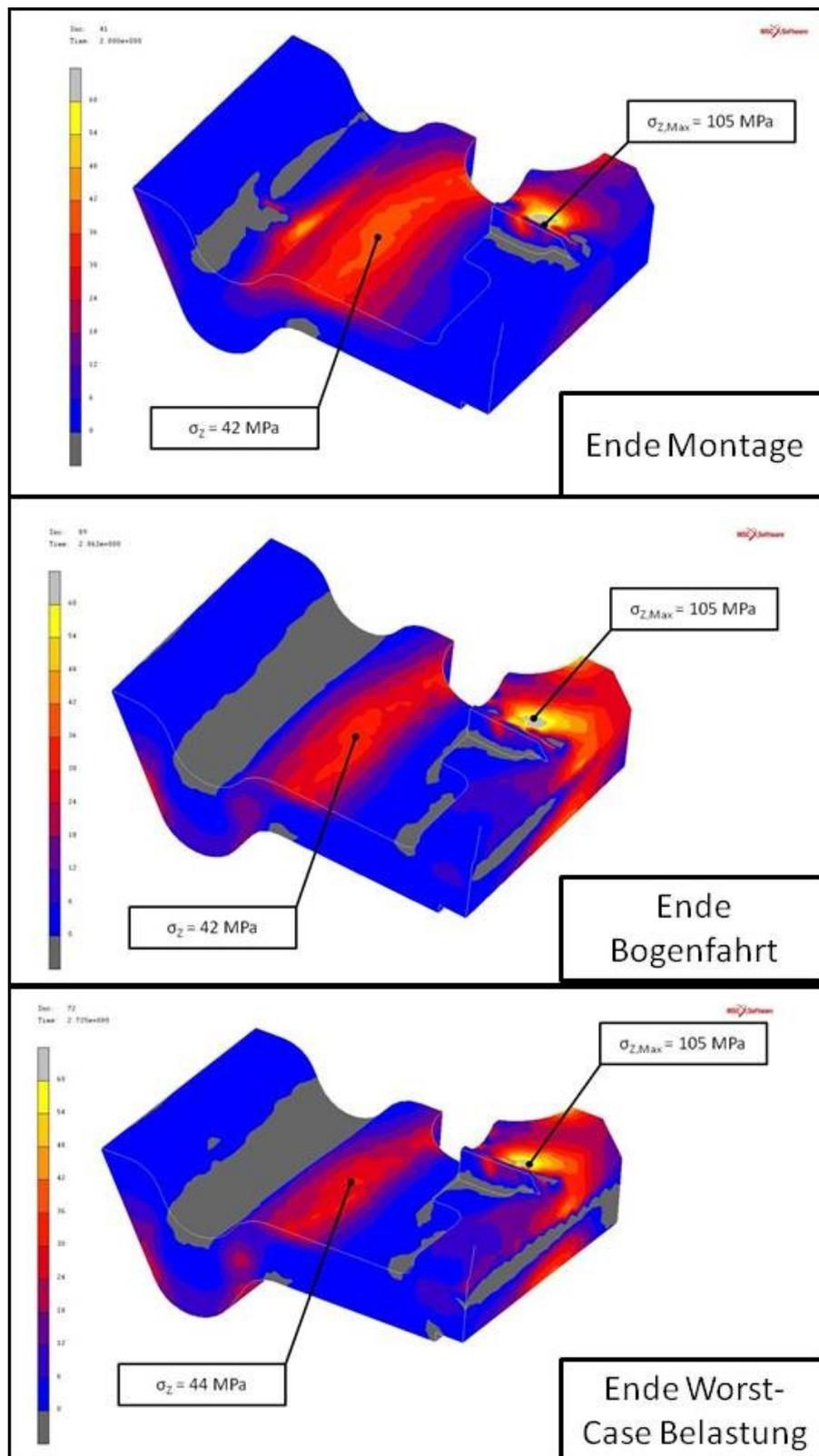
Außenliegende Wfp, Montage, $F_v=68$ kN, Principal Cauchy Stress Min

8.5 Direkter Vergleich Principal Cauchy Stress Min



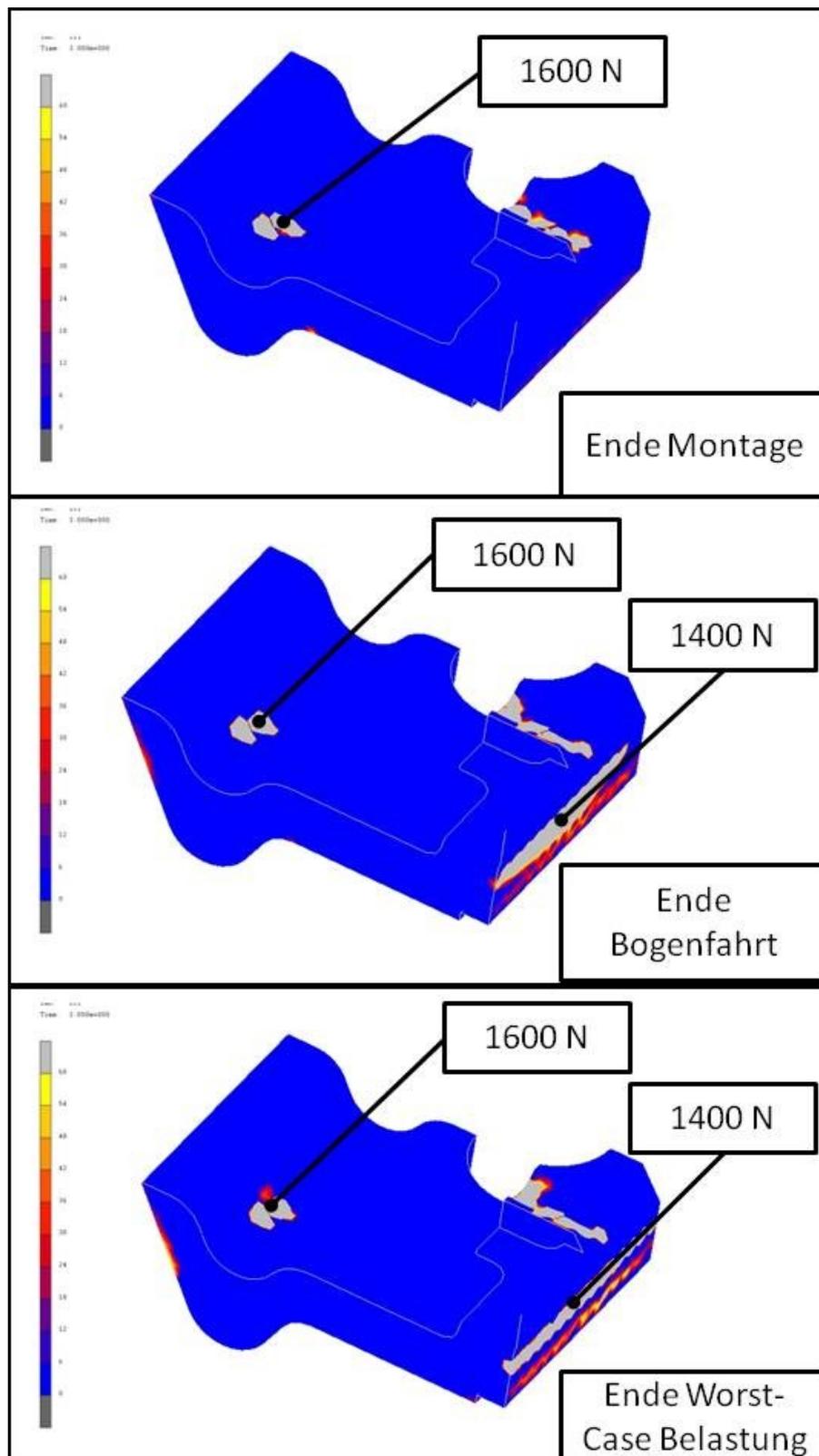
Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Principal Cauchy Stress Min (MPa)

8.6 Direkter Vergleich Principal Cauchy Stress Max



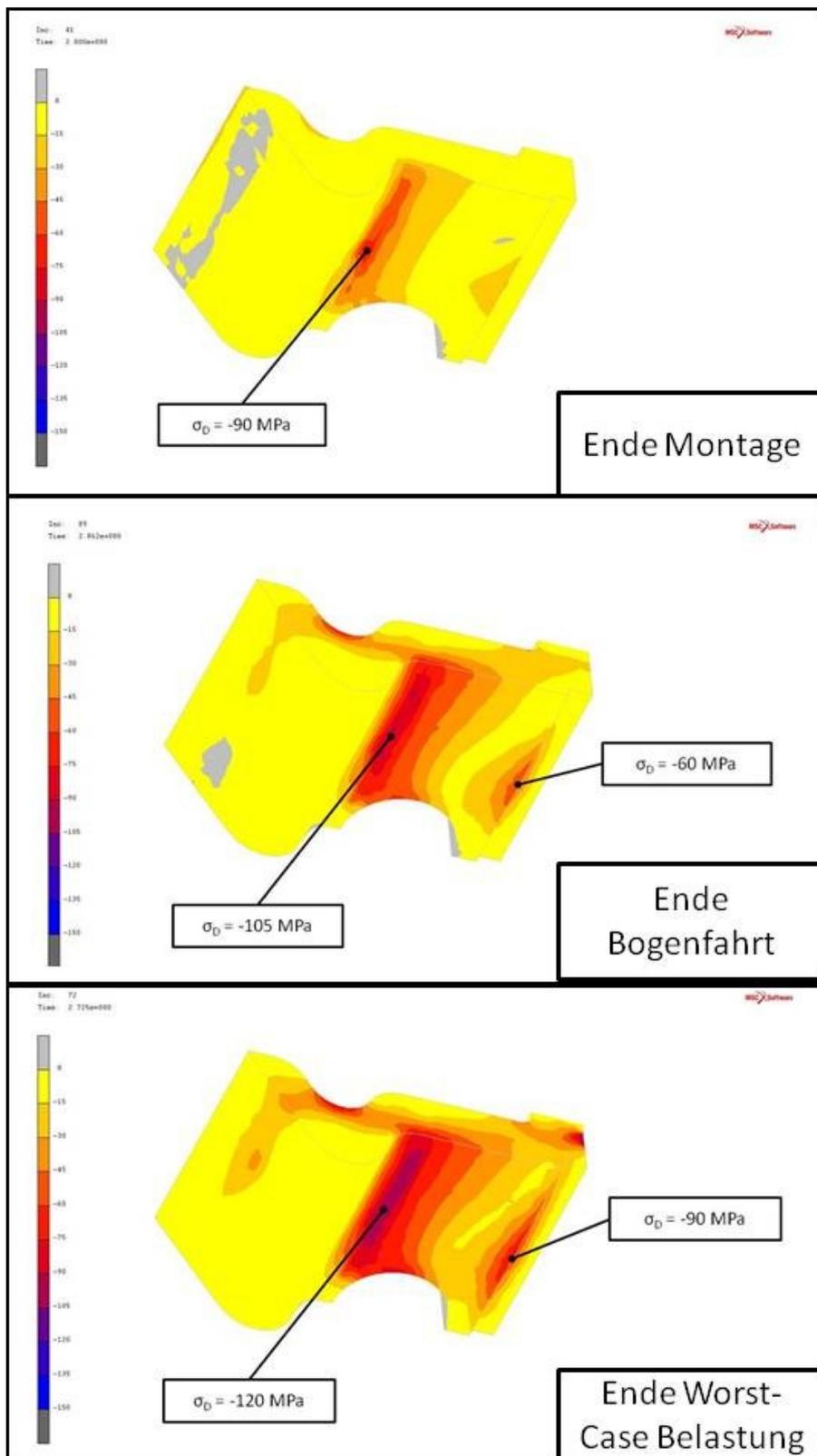
Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Principal Cauchy Stress Max (MPa)

8.7 Direkter Vergleich Contact Normal Force



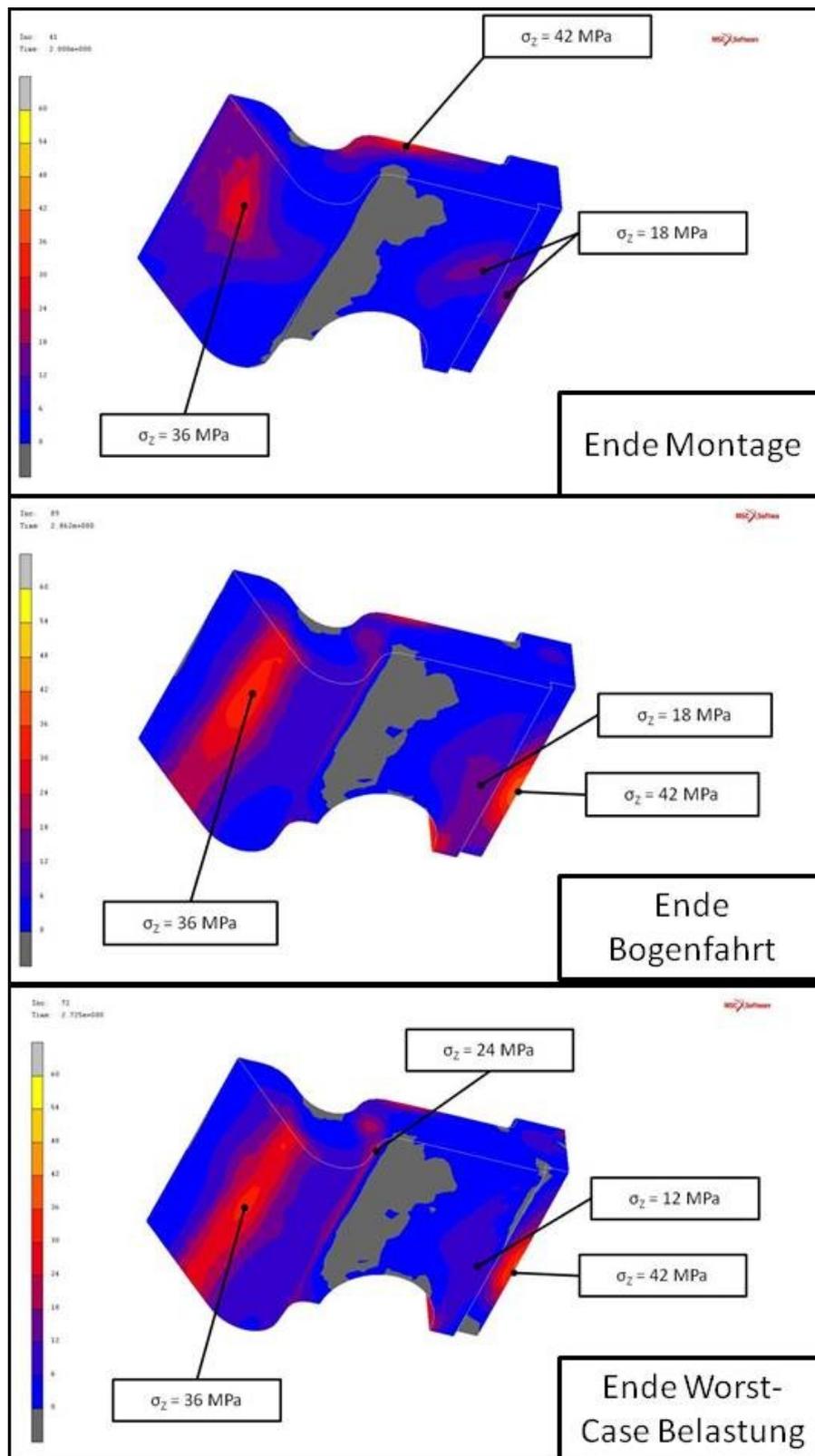
Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Contact Normal Force (N)

8.8 Direkter Vergleich Principal Cauchy Stress Min (Rückansicht)



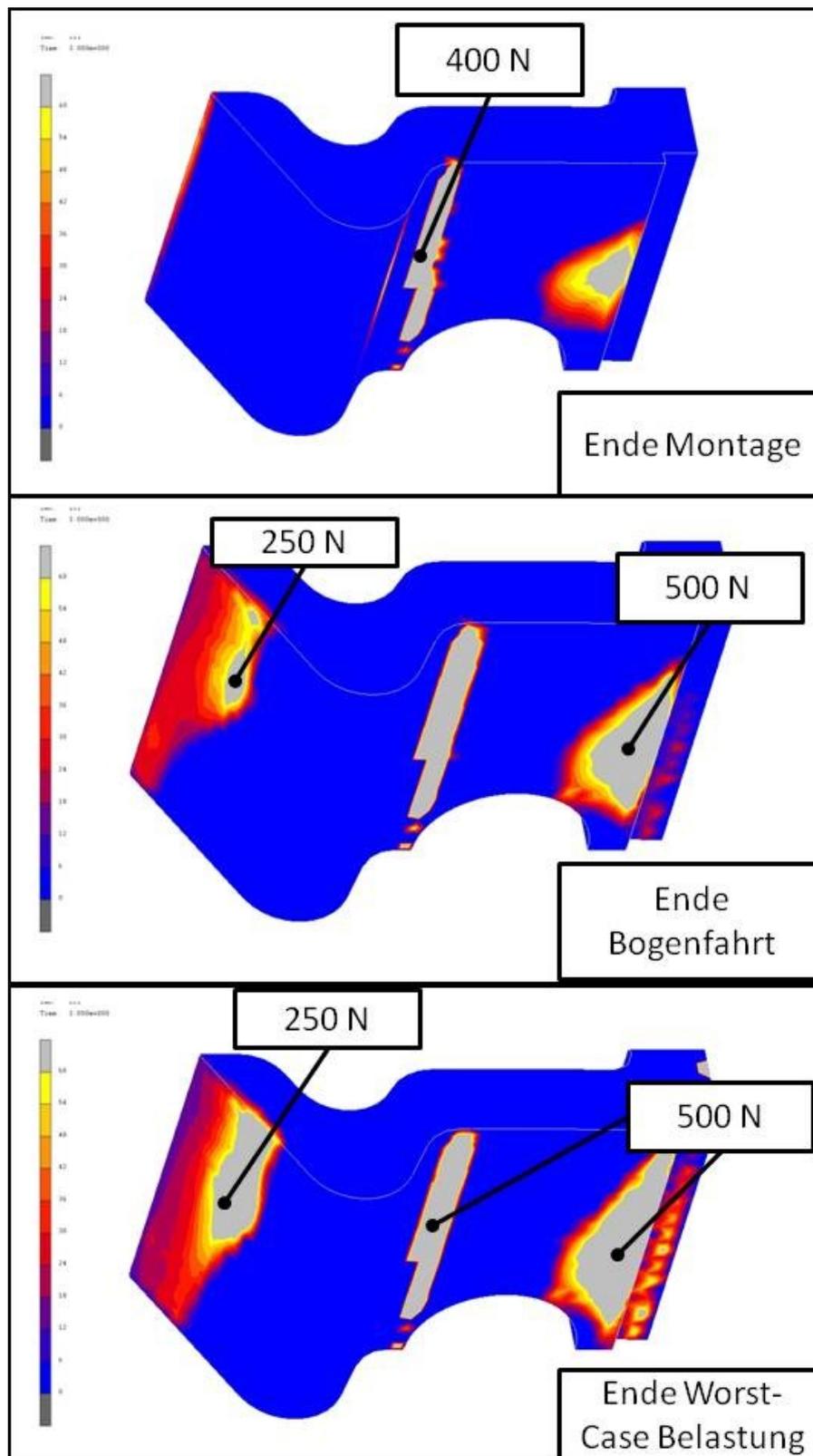
Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Principal Cauchy Stress Min (MPa), Rückansicht

8.9 Direkter Vergleich Principal Cauchy Stress Max (Rückansicht)



Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Principal Cauchy Stress Max (MPa), Rückansicht

8.10 Direkter Vergleich Contact Normal Force



Außenliegende Wfp, Montage, Bogenfahrt und Worst-Case Belastung im direktem Vergleich – Contact Normal Force (N), Rückansicht

8.11 Durchgeführte Simulationen mit Rechenzeiten

Bezeichnung	Datum	Dauer [min]
Rundeisenbiegeversuch		
RB_Aufbau_Loadcases.mud	18.05.2011	20
rundeisenbiegeversuch.mud	17.05.2011	30
rundeisenbiegeversuch_v1.mud	17.05.2011	30
rundeisenbiegeversuch_v2.mud	19.05.2011	30
rundeisenbiegeversuch_v2_CurveFit.mud	19.05.2011	45
rundeisenbiegeversuch_v2_curvefit_job_e_4800_ys_900.t16.mud	14.07.2011	45
rundeisenbiegeversuch_v3.mud	21.06.2011	45
rundeisenbiegeversuch_v4.mud	21.06.2011	45
RB_verippt_4.mud	04.08.2011	60
RB_Versuch_VerippteGeom_V3.mud	03.08.2011	60
RB_Versuch_VerippteGeom_V3.mud	08.08.2011	60
RB_Versuch_VerippteGeom_V3.mud	08.08.2011	60
Montageversuch		
Discret_Rigid.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_00.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_01.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_02.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_02_druckma.t16.mud	02.09.2011	5
discret_rigid_03.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_04.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_05.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_06.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_07.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_08.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_09.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_10.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_11.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_12.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_13.mud	01.09.2011	5
discret_rigid_14.mud	01.09.2011	5
elastUnt_Schiene_00.mud	05.09.2011	5
elastUnt_Schiene_01.mud	05.09.2011	5
elastUnt_Schiene_02.mud	05.09.2011	5
elastUnt_Schiene_03.mud	05.09.2011	5
elastUnt_Schiene_04.mud	05.09.2011	5
elastunt_traeger_02_2010.mud	05.09.2011	5
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_52_7kn.mud	28.07.2011	300
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_222_22kn.mud	29.07.2011	300
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_250kn.mud	29.07.2011	480
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_250kn_ueberf_50kn.mud	01.08.2011	480
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_250kn_ueberf_50kn_V2.mud	02.08.2011	480
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_362kn.mud	28.07.2011	300
wfp_1_15mmspalt_E_5000_F_481kN.mud	21.07.2011	300
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_481kn_ueberf_50kN.mud	22.07.2011	480
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_583.3kn_2Pkt.mud	21.07.2011	480
wfp_1_15mmspalt_e_5000_f_583.3kn_2pkt_ueberf_50kn.mud	21.07.2011	480
wfp_3d_v9ck_1_15mm_Spalt.mud	31.08.2011	300

8. Anhang

wfp_e_5000_f_js.mud	20.10.2011	180
wfp_e_5000_f_js_08.mud	04.11.2011	180
wfp_e_5000_f_js_F_600.mud	07.11.2011	180
wfp_e_5000_f_jspr.mud	20.10.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm.mud	23.08.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v2.mud	12.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v2_discrRig.mud	02.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v3.mud	12.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v4.mud	16.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v5.mud	19.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v6.mud	19.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v7.mud	27.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v8.mud	28.09.2011	180
wfp_e_5000_f_montage_ueberf_hm_v9.mud	28.09.2011	180
Montage Verrippte Wfp - Entwurf DF		
wfp_verippt_e_5000_f_250kn.mud	04.08.2011	300
wfp_verippt_e_5000_f_250kn_hm.mud	30.08.2011	720
wfp_verippt_e_5000_hm_v1.mud	28.09.2011	600
wfp_verippt_e_5000_js.mud	16.11.2011	200
wfp_verippt_V4_e_5000_js.mud	02.12.2011	200
Rundbogenfahrt + Cen Wfp14K12		
Wfp_e_5000_CEN_hm.mud	29.08.2011	300
wfp_e_5000_cen_hm_v2.mud	09.09.2011	600
wfp_e_5000_cen_hm_v3.mud	12.09.2011	600
wfp_e_5000_cen_hm_v4.mud	15.09.2011	600
wfp_e_5000_cen_hm_v5.mud	15.09.2011	600
wfp_e_5000_cen_hm_v6.mud	30.09.2011	600
Wfp_e_5000_f_250kN_BoFa.mud	05.08.2011	300
wfp_e_5000_f_250kn_bofa_V2.mud	25.08.2011	600
wfp_e_5000_f_250kn_bofa_v3.mud	19.09.2011	600
wfp_e_5000_f_js_cen.mud	15.11.2011	200
wfp_e_5000_f_js_cen_wc.mud	05.12.2011	200
wfp_e_5000_f_js_cen_wc_breitSch.mud	13.12.2011	200
wfp_e_5000_f_js_cen_wc_Fkleiner.mud	13.12.2011	200
wfp_verippt_e_5000_js_CEN.mud	21.11.2011	200
wfp_verippt_e_5000_js_cen_V2.mud	28.11.2011	200
wfp_verippt_e_5000_js_cen_V3.mud	29.11.2011	200
	Gesamt [min]	15765
	Gesamt [std]	262,75
	Gesamt [tg]	10,9479167

8.12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schienenbefestigungssystem bestehend aus Schwellenschraube, Spannklemme, Winkelführungsplatte, Elastische Schienenzwischenlage und Schraubdübel [1]

Abbildung 2: Draufsicht (links oben), Rückansicht (links unten) und Seitenansicht (rechts) der Winkelführungsplatte

Abbildung 3: Allgemeiner Ablauf einer FE-Analyse [3]

Abbildung 4: Prüfaufbau des Rundeisenbiegeversuches

Abbildung 5: Simulationsmodell des Rundeisenbiegeversuches: Halbmodell der Winkelführungsplatte mit Rundeisen

Abbildung 6: Streuung der geprüften Teile; Schuss 1, Probe 1 bis 8

Abbildung 7: Vergleich Rundeisenbiegeversuch: Simulation ($E=6200$ MPa; durchgezogene, rote Linie) mit praktischen Versuch (strichlierte, grüne Linie)

Abbildung 8: Vergleich Rundeisenbiegeversuch: Simulation ($E=5506$ MPa; durchgezogene, blaue Linie) mit praktischen Versuch (strichlierte, grüne Linie); Verifikation E-Modul von 6200 MPa auf 5506 MPa

Abbildung 9: Vergleich Rundeisenbiegeversuch: Simulation ($E=5000$ MPa; durchgezogene, rote Linie) mit praktischen Versuch (strichlierte, grüne Linie); Verbesserungen des FE-Materialmodells Abbildung 36: Zeitstand-Relaxationsversuch; Durchgezogene Linie: Abfall der Kraft von 9.5 kN auf 6.5 kN nach 60 Stunden Belastung

Abbildung 10: Zeitstand-Relaxationsversuch; Durchgezogene Linie: Abfall der Kraft von 9.5 kN auf 6.5 kN nach 60 Stunden Belastung

Abbildung 11: Zeitstand-Kriechversuch; Durchgezogene Linie: Zunahme der Deformation von 1.8 mm auf 2.6 mm nach 60 Stunden Belastung

Abbildung 12: Hantelprüfkörper

Abbildung 13: Spannungs-Dehnungskurve beim Zug/Druckversuch

Abbildung 14: Draufsicht (links): Halbmodell des Schienenbefestigungssystem W14 mit Symmetrieebene (rote, durchgezogene Linie); Seitenansicht (rechts)

Abbildung 15: Darstellung der zu berechnenden Winkelführungsplatten

Abbildung 16: Schematische Darstellung der Belastungssituation für den Monatgevorgang und anschließender Überfahrt

Abbildung 17: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Ermittlung der Einsenkungen der SZL bei 18 und 68 kN

Abbildung 18: Kurvenverläufe des statischen Einfederungsversuches, Probe 1 bis 6

Abbildung 19: Spannungsverteilung mit max. Randfaserspannung

Abbildung 20: Spannungsverteilung mit max. Randfaser; verrippte Wfp

Abbildung 21: Schematische Darstellung des Belastungsfalles Rundbogenfahrt mit vertikalen und horizontalen Kraftangriffspunkt

Abbildung 22: Prüfaufbau des Scherenhebelschwingversuches; $\alpha = 33^\circ$, $X = 15 \text{ mm}$

Abbildung 23: Gesamtsystem mit Definition außen- und innenliegende Wfp

Abbildung 24: Lage der Positionen 1 bis 6 für die numerische Ergebnissdarstellung

Abbildung 25: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles 2.3.a, außenliegende Wfp

Abbildung 26: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles 2.3.a, außenliegende Wfp

Abbildung 27: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

Abbildung 28: Dehnungen zufolge Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

Abbildung 29: Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst-Case, außenliegende Wfp

Abbildung 30: Dehnungen zufolge Druckspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst -Case, außenliegende Wfp

Abbildung 31: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles En 13146-4, außenliegende Wfp

Abbildung 32: Zugspannungen am Ende des Belastungsfalles Worst-Case, außenliegende Wfp

Abbildung 33: Möglicher Ablauf einer Gestalt- und Topologieoptimierung [8]

Abbildung 34: Kraft- und Spannungsverläufe der Wfp bei Belastung Rundbogenfahrt

Abbildung 35: Verrippte Struktur der Wfp mit eingezeichneten Kraftfluss

8.13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fehlerquellen bei FE-Analyse [5]

Tabelle 2: Gleitreibungszahlen für die Schienenzwischenlage ZW 700 [Bericht Universität Innsbruck]

Tabelle 3: Parameter und Vereinfachungen FE-Modell

Tabelle 4: Verwendete Reibkoeffizienten des FE-Modells

Tabelle 5: Belastungsfälle Montagevorgang und Überfahrt

Tabelle 6: Ergebnisse der Simulation für den Montagevorgang (Belastungsfall 1.2) und Überfahrt (Belastungsfall 1.3)

Tabelle 7: Übersicht über den Ablauf der Belastungsfälle

Tabelle 8: Ergebnisse Belastung nach EN und Worst-Case

Tabelle 9: Übersicht der Simulationsergebnisse

Tabelle 10: Gegenüberstellung der wesentlichen Simulations- und Verifikationsergebnisse

8.14 Verwendete Abkürzungen und Symbole

Wfp	Winkelführungsplatte
ZW	Schienenzwischenlage
SKL	Spannklemme
EN	European Standard
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
SBR	Styrol-Butadien-Rubber
NR	Natural-Rubber
PA6-GF30	Polyamid 6 mit 30% Volumenfüllung an Glasfasern
E-Modul	Elastizitätsmodul in N/mm ²
DBS	Deutsche Bahn Standard
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen

Bzw	Beziehungsweise
d.h.	Das heißt
vs.	versus
ε	Dehnung in %
σ	Spannung in N/mm ²