

Validierung der Finite-Elemente Festigkeitsberechnung mit Daten aus dem Laborversuch

Masterarbeit

Erstellt für:

SIEMENS AG Österreich

Eingereicht an der:

Technischen Universität Graz

Institut für Leichtbau

Vorstand: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer-Universität: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser

Betreuer-SIEMENS: Dipl.-Ing. Klaus Bouvier-Azula

Vorgelegt von:

Klaus Johannes Gradl

Graz, im März 2013

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

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am 22.03.2013


.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

22.03.2013
.....
date


.....
(signature)

Vorwort:

Diese Arbeit wurde mir von der SIEMENS AG Österreich in Graz ermöglicht und entstand in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau der Technischen Universität Graz.

Für die Bereitstellung und Betreuung des Themas möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl. –Ing. Dr. techn. Thomas Moshhammer und bei Herrn Dipl. –Ing. Klaus Bouvier-Azula von der SIEMENS AG Österreich bedanken. Für die gute Betreuung und Unterstützung von Seiten der Universität gebührt Herrn Ass. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Christian Moser (Institut für Leichtbau der TU Graz) und seinen Assistenten großer Dank.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Dipl. –Ing. Werner Mössler und seine Arbeitskollegen, die immer wieder mittels neuen Ideen und Anregungen, einen ganz besonderen Beitrag zum Gelingen dieser Masterarbeit geleistet haben.

Meiner Familie, besonders meinen Eltern gebührt mein ganz persönlicher Dank, da sie mir mein Studium ermöglichten und mich in allen Lebenslagen unterstützten.

Abschließend möchte ich mich noch ganz besonders bei meiner Freundin Carolin für die moralische Unterstützung während meines ganzen Studiums bedanken.

Klaus Johannes Gradl

Kurzfassung

Für den Festigkeitsnachweis von Drehgestellrahmen bei Schienenfahrzeugen nach der DIN EN 13749 sind folgende Schritte vorgeschrieben: Berechnung, statischer Laborversuch, Ermüdungsversuch im Labor und Streckenversuch. Durch die Gegenüberstellung der einzelnen Berechnungsschritte mit dem dazugehörigen Versuch, kann eine Aussage über die Güte des Auslegungsprozesses getroffen werden. Das Ziel dieser Arbeit war die Analyse bekannter Einflüsse auf die Festigkeitsberechnung nach der Methode der Finiten-Elemente, um eine bessere Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus Berechnung und Laborversuch zu erreichen. Zusätzlich wurde der für die Umsetzung dieser Maßnahmen notwendige zeitliche Mehraufwand bei der Analyse mitberücksichtigt. Die Ergebnisse zeigten, dass beim Einsatz der richtigen Maßnahmen, bereits durch geringen Aufwand, eine zum Teil wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen den beiden Disziplinen erreicht werden kann.

Abstract

According to DIN EN 13749 any structural analysis of a trailer bogie has to include the following steps: calculation, static laboratory test, fatigue laboratory test and on-track test. In order to evaluate accuracy of the currently applied calculation procedures, calculated values have to be compared with laboratory test results. The main objective of this thesis was to examine how certain known finite element calculation input factors influence the error between calculation and lab tests. Further, the additional time required to incorporate these factors into the calculation was evaluated. Using this methodology it was possible to clearly show that when the correct methods are applied, already a small increase in calculation time can considerably reduce the error between calculation and lab test results.



[SIEMENS]

Inhaltsverzeichnis:

1. Begriffe.....	1
2. Einleitung.....	3
2.1 Ausgangssituation	3
2.2 Aufgabenstellung und Ziele	5
3. Der statische Festigkeitsversuch	8
3.1 Der statische Laborversuch.....	10
3.1.1 Versuchsaufbau	10
3.1.2 Messtechnik	11
3.1.2.1 Dehnungsermittlung am Bauteil.....	11
3.1.2.2 Messen der Reaktionskräfte	14
4. Grundlagen der Festigkeitsberechnung von Drehgestellrahmen	15
4.1 Das Schalenelement	16
4.2 Das parabolische Tetraeder-Element.....	22
4.3 Das lineare Balken-Element.....	25
4.4 Das Constraint-Element	26
5. Arbeitsablauf	27
5.1 Modellierung	27
5.2 Berechnen der Spannungen	29

5.3	Positionierung und Auswertung der virtuellen Messstellen.....	30
5.4	Berechnung des Verzerrungstensors.....	31
5.5	Beispiel zur DMS-Auswertung mit anschließender Gegenüberstellung.....	33
6.	Gegenüberstellung	40
6.1	Einteilung der Messstellen in Gruppen.....	40
6.2	Repräsentative Beispiele für jede Gruppe	42
7.	Analyse.....	48
7.1	Überprüfung der Reaktionskräfte	48
7.2	Einfluss der Netzgröße.....	52
7.3	Exakte Positionierung von Dehnungssensoren	55
7.3.1	Einfluss auf einen DMS durch horizontale Positionsabweichung	55
7.3.2	Einfluss auf einen DMS durch vertikale Positionsabweichung	60
7.4	Beeinflussung durch Abweichungen von der Nennblechdicke	62
7.5	Einfluss durch die Art der Krafteinleitung	65
7.6	Modellierung von gedrungenen Strukturen	69
7.6.1	Verfeinerung des lokalen Schalennetzes	69
7.6.2	Grenzen des verwendeten Schalen-Elementes	72
7.7	Verwendung von Tetraeder-Elementen	74
7.8	Sonderfall: Messstelle L106_4	77
8.	Ergebnis	80

9. Ausblick	83
10. Literaturverzeichnis	85

1. Begriffe

Validierung

Die Validierung ist ein Verfahren, welches durch Berechnung und/oder Versuch nachweist, dass die verwendete Methode imstande ist, richtige Ergebnisse zu liefern beziehungsweise dass das System in jeder Hinsicht die technische Spezifikation erfüllt, einschließlich der Anforderungen aufgrund von Vorschriften für dieses System [DIN EN 15827: 2011, S. 11].

Verifikation

Die Verifikation ist ein Verfahren, welches durch Vergleich oder Versuch nachweist, dass ein analytisches Ergebnis oder ein Schätzwert eine ausreichende Genauigkeit aufweist [DIN EN 15827:2011, S. 11].

Standardlastfall

Standardlastfälle sind beliebig angenommene Werte für Belastungen, zum Beispiel 1000 Newton, mit denen die Festigkeitsberechnung der Struktur durchgeführt wird. Diese Standardlasten werden anschließend zur Weiterverarbeitung mit Faktoren multipliziert, um die tatsächlichen Ergebnisse für die Beanspruchung zu erhalten. Der Grund für die Verwendung von Standardlasten ist, dass die zeitintensive Festigkeitsberechnung nicht erneut durchgeführt werden muss, wenn sich die Zahlenwerte der Lasten nachträglich verändern.

Erweiterte Messunsicherheit

„Die angegebene erweiterte Messunsicherheit ist die Standardunsicherheit der Messung, multipliziert mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$, berechnet auf der Basis einer Normalverteilung, die einer Wahrscheinlichkeit von 95% entspricht [ADUNKA 2007, S. 99]“.

GAP

Als GAP wird in dieser Arbeit der Abstand in Richtung der Ordinate zwischen zwei Kurven in einem Diagramm bezeichnet.

Computersoftware - Fatigue Assessment („FatAss“)

Das Programm Fatigue Assessment, ist eine von der Abteilung „Festigkeitsberechnung“ verwendete Computersoftware, die zur Weiterverarbeitung von Rechenergebnissen aus Simulationsberechnungen eingesetzt wird.

Häufig verwendete Abkürzungen:

- DMS ... Dehnmessstreifen
- EN ... Europäische Norm
- EVZ ... Ebener Verzerrungszustand
- FEM ... Finite-Elemente Methode
- FHG ... Freiheitsgrad

2. Einleitung

In diesem Kapitel wird zuerst die aktuelle Vorgangsweise der Festigkeitsberechnung für Drehgestellrahmen beschrieben und anschließend werden Aufgabenstellung und Ziele näher erläutert.

2.1 Ausgangssituation

Drehgestellrahmen von Hochgeschwindigkeitszügen sind hochbelastete Strukturbauteile. Sie stellen das Bindeglied zwischen Radsatz und Wagenkasten (Aufbau) dar. Somit sind sie für die sichere Beförderung der Fahrgäste von großer Wichtigkeit und dürfen in den vorgeschriebenen 30 Einsatzjahren nicht versagen.

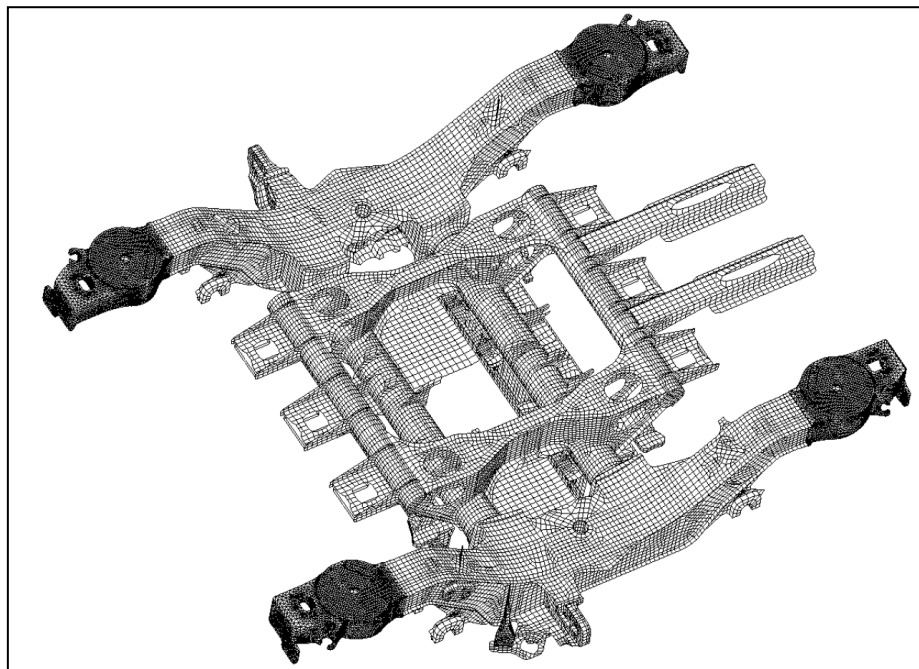


ABBILDUNG 1: BEISPIEL FÜR EINEN DREHGESTELLRAHMEN [SIEMENS].

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, erfolgt der für die Auslegung des Drehgestellrahmens notwendige Festigkeitsnachweis nach EN 13749. Diese Europäische Norm legt das Verfahren für eine zufriedenstellende Konstruktion von Drehgestellrahmen fest und beinhaltet ein Validierungsprogramm. Das Ziel des

Validierungsprogrammes ist der Nachweis darüber, dass die Konstruktion des betreffenden Bauteils, die in der technischen Spezifikation festgelegten Anforderungen erfüllt. Weiters muss nachgewiesen werden, dass das Verhalten des nach Entwicklungsvorgaben hergestellten Drehgestellrahmens einen zufriedenstellenden Betrieb ohne Auftreten von Versagen durch Bruch, bleibender Verformung oder Ermüdungsrisse erlaubt. Die Strukturbauteile müssen dabei analysiert werden, um zu zeigen, dass sie den Lasten, denen sie ausgesetzt sind, standhalten können. Das Validierungsprogramm für die Festigkeit eines Drehgestellrahmens muss aus folgenden Punkten bestehen:

- Berechnungen
- Statische Laborversuche
- Ermüdungsversuche im Labor
- Streckenversuche

[DIN EN 13749:2011, S. 7-10]

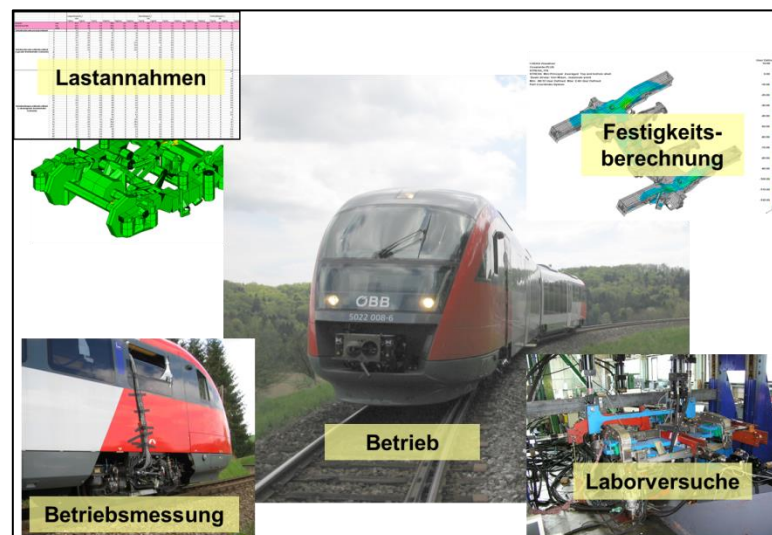


ABBILDUNG 2: ANFORDERUNGEN DES IN DER DIN EN 13749 DEFINIERTEN VALIDIERUNGSPROGRAMMES FÜR DIE ZULASSUNG VON DREHGESTELLRAHMEN [SIEMENS].

2.2 Aufgabenstellung und Ziele

Um Informationen über die Güte des Berechnungssystems für die Auslegung von Drehgestellrahmen zu bekommen, muss nun eine vollständige Validierung des Drehgestellrahmens, basierend auf den Berechnungs- und Versuchsdaten aus dem Validierungsprogramm, erfolgen. Hierfür sind drei Schritte notwendig:

1. Validierung: Statischer Versuch – Finite Elemente Rechnung
2. Validierung: Ermüdungsversuch – Betriebsfestigkeitsberechnung
3. Validierung: Betriebsmessung – Lastannahmen

[DIN EN 13749:2011, S. 8-9]

ZU 1): DIE DURCH STATISCHE LABORVERSUCHE ERREICHBAREN VALIDIERUNGSZIELE SIND:

- Die Ermittlung der realen Beanspruchung an den Messstellen unter synthetischen Lasten;
- Die Ermittlung funktionaler Parameter der Strukturkomponenten wie z.B. die Verwindesteifigkeit des Drehgestellrahmens;
- Die Verifikation statischer Festigkeitsanforderungen;
- Die Verifikation des Simulationsmodells;
- Die Verifikation des Versuchsaufbaus einschließlich des Aufbaus für den Ermüdungsversuch;
- Eine Lebensdauerabschätzung, basierend auf gemessenen Beanspruchungen unter synthetischen Lasten und einer theoretischen Ermüdungshypothese.

[DIN EN 13749:2011, S. 38]

ZU 2): DIE DURCH ERMÜDUNGSVERSUCHE ZU ERREICHENDEN VALIDIERUNGSZIELE SIND:

- Die Verifikation und/oder die Ermittlung des Ermüdungsverhaltens der Bauteilkomponenten unter synthetischen Lasten;
- Die Verifikation der Konstruktionsannahmen bezüglich Ermüdungsverhalten der tatsächlichen Einzelteile und ihrem erzeugten Qualitätsniveau wie z.B. die Verifikation der Bewertungsklassifizierung und empirische Beurteilung der Herstellungsmängel.

[DIN EN 13749:2011, S. 45]

ZU 3): DIE DURCH DIE BETRIEBSMESSUNG ZU ERREICHENDEN VALIDIERUNGSZIELE SIND:

- Der Nachweis, dass unter betriebsnahen Einsatzbedingungen die lokalen Beanspruchungskollektive innerhalb zulässiger Grenzen liegen;
- Absicherung der Lastannahmen und des Designs.

[DIN EN 13749:2011, S. 12]

Aus jedem dieser Punkte kann eine Vielzahl an Informationen gewonnen werden, wobei erst durch die Validierung aller drei Punkte, diese vollständig durchgeführt ist und eine Aussage über die Güte der angewandten Berechnungsverfahren getroffen werden kann. In dieser Arbeit wird nun der erste Schritt abgehandelt: **Die Validierung der Finite-Elemente Festigkeitsberechnung für Drehgestellrahmen mit den Daten aus dem statischen Laborversuch.**

Dafür wird die Masterarbeit in die folgenden drei Teilbereiche gegliedert:

- **Nachbilden des Prüfstandaufbaues in der Simulationssoftware**

Um ein aussagekräftiges Ergebnis aus der Prüfstandsrechnung zu erhalten, muss der Prüfstandaufbau im Simulationsprogramm so nah wie möglich dem realen Aufbau im Laborversuch entsprechen. Dies umfasst das korrekte Abstützen des Drehgestellrahmens sowie die korrekte Krafteinleitung in die Struktur.

- **Vergleich der Rechenergebnisse mit den Daten aus dem Laborversuch**

Dabei werden die Messergebnisse der Dehnmessstreifen aus dem statischen Laborversuch mit den ermittelten Dehnungen aus der Prüfstandssimulation in einem Diagramm miteinander verglichen und vorhandene Abweichungen beurteilt.

- **Analyse von Gründen für eventuelle Abweichungen**

Um die Gründe der Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen und den Versuchsdaten analysieren zu können, werden die einzelnen Messstellen je nach Grad der Übereinstimmung in verschiedene Gruppen unterteilt, wovon dann je ein oder mehrere charakteristische Stellvertreter je Gruppe genauer analysiert werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Suche nach einfach zu realisierenden Lösungsansätzen, welche mit geringem Zeitaufwand zu einer deutlich besseren Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen führen und in den Arbeitsablauf der Festigkeitsberechnung übernommen werden können.

3. Der statische Festigkeitsversuch

Der statische Festigkeitsversuch kann virtuell durch eine Festigkeitsberechnung simuliert oder mittels eines Laborversuchs durchgeführt werden. „Statisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die vorgegebenen Lasten zeitlich konstant sind und dem zu prüfenden Bauteil bis Erreichen eines statischen Zustandes aufgeprägt werden. Dabei werden die durch die statische Belastung erreichten Beanspruchungen im Drehgestellrahmen lokal mittels Dehnmessstreifen ermittelt und mit den daraus errechneten Oberflächendehnungen dokumentiert. Die Randbedingungen des Laborversuches und der Berechnung müssen soweit wie möglich gleich gestaltet werden, um eine nachfolgende Gegenüberstellung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Der Versuchsaufbau zur Aufnahme bzw. Lagerung des Prüflings wurde so ausgelegt, dass sich der Bauteil möglichst frei verformen kann und die Aufteilung der äußeren Belastungen möglichst gleichmäßig und praxisgerecht erfolgt. Die Prüfung des Rahmens erfolgte in normaler Einbaulage (Primärfederauflage unten, Sekundärfederauflage oben) [SIEMENS].

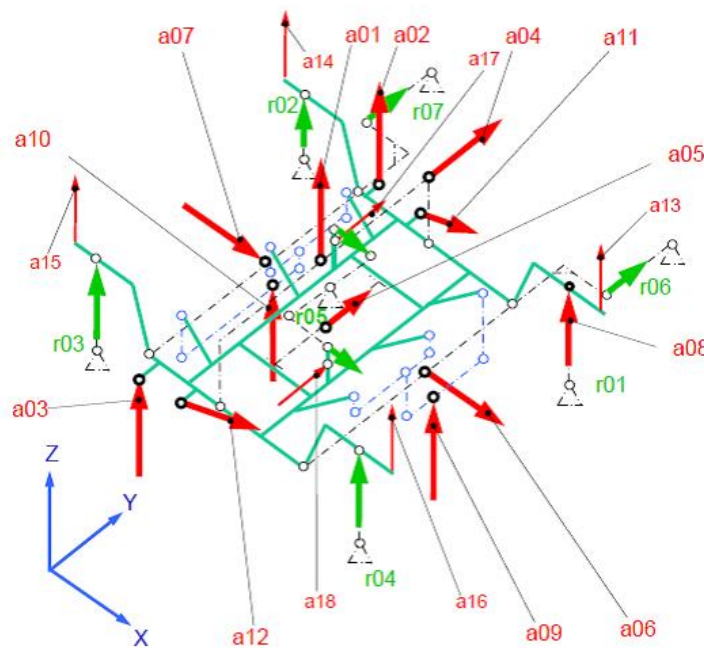


ABBILDUNG 3: PRÜFSTANDSSHEMA EINES DREHGESTELLRAHMENS FÜR DEN FESTIGKEITSVERSUCH [SIEMENS].

In Abbildung 3 stehen die roten und mit einem „a“ gekennzeichneten Pfeile für die Aktionskräfte, welche durch hydraulische Zylinder aufgebracht werden und die grünen und mit einem „r“ gekennzeichneten Pfeile für die Reaktionskräfte. Alle Reaktionskräfte werden mittels Kraftmessdosen ermittelt.

Die für den statischen Festigkeitsversuch verwendeten Lasten werden durch aufwendige Simulationen in Kombination mit Daten aus Streckenmessungen von der Abteilung „Lastannahmen“ festgelegt.

DIE STATISCHEN LASTEN BESTEHEN AUS FOLGENDEN DREI GRUPPEN:

- Die im Betrieb maximal auftretenden Kräfte
- Kombinierte Kräfte
- Sonderlastfälle

TABELLE 1: BEISPIEL FÜR EINE LASTFALL AUS KOMBINIERTEN KRÄFTEN [SIEMENS].

Lastfall	Sekundärfedern [kN]	Querkraft Sekundärfedern [kN]	Querkraft Querpuffer [kN]	Längskraft vorne [kN]	Längskraft hinten [kN]	Verwindung [‰]
	a01	a04	a05	a06	a07	a08
LF 4.01	-527	18,4	123,6	-	-	10

3.1 Der statische Laborversuch

Der Laborversuch wurde in einem staatlich geprüften Festigkeitslabor durchgeführt. Der Prüfling war der in dieser Arbeit zu untersuchende Drehgestellrahmen. Die Versuche wurden mit einem servohydraulischen System bei Raumtemperatur durchgeführt.

Bei einem Laborversuch wird das reale Bauteil, in diesem Falle der gesamte Drehgestellrahmen, unter synthetischen Randbedingungen belastet. Vor dem Beginn des statischen Laborversuchs, wurden Vorversuche mit Betriebslasten durchgeführt. Diese dienten der exakten Justierung des Prüfaufbaues (gleichmäßige Verteilung der Kräfte) sowie der Beseitigung von fertigungsbedingten Eigenspannungen im Drehgestellrahmen und im Prüfaufbau.

3.1.1 Versuchsaufbau

Der Prüfaufbau befindet sich auf einem massiven Prüffundament mit Aufspannfeld. Die Hauptkomponenten des Prüfaufbaus bestehen aus einem Prüfportal, einer Konsole zur Aufnahme der Querkräfte und zwei in Längsrichtung angeordneten Konsolen zur Einleitung der Längskräfte.

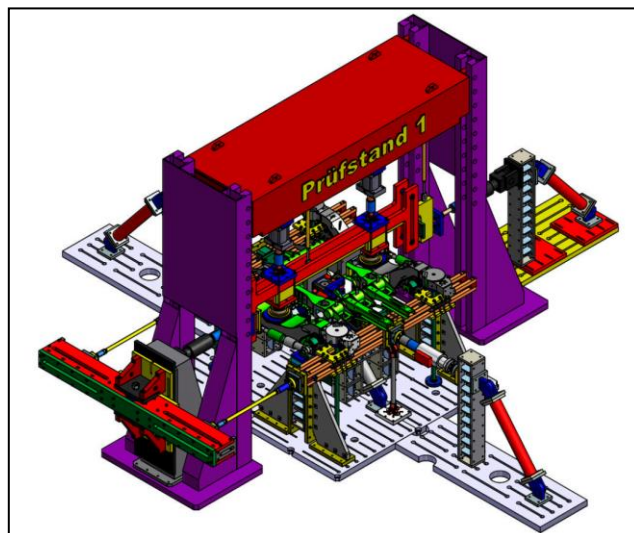


ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHER PRÜFSTANDSAUFBAU [SIEMENS].

Beim Versuchsaufbau mussten einige Vereinfachungen getroffen werden, da es nicht möglich ist, das gesamte Drehgestell (bestehend aus Drehgestellrahmen, Lagergehäuse, Radsatzwellen und vielem mehr), am Prüfstand aufzubauen und dabei jedoch nur den Drehgestellrahmen zu testen. So erfolgte die Ermittlung der Belastungen ohne die Berücksichtigung von Massenkräften des Drehgestellrahmens beziehungsweise translatorischen oder rotatorischen Massenträgheitskräften der Radsätze. Die Radsatzwelle wurde durch eine Ersatzachse ersetzt, welche aus vier fest miteinander verbundenen Profilrohren besteht. Die Radsatzlagergehäuse wurden durch Ersatzlagergehäuse ersetzt und die Längsabstützung wurde mit Hilfe einer Lemniskatenführung und zwei Stangen mit Kraftaufnehmern realisiert [SIEMENS].

3.1.2 Messtechnik

Ein Laborversuch ist immer mit einem enormen mess- und regeltechnischen Aufwand verbunden. In diesem Kapitel wird das Messprinzip zur Messung der Dehnung sowie zur Messung der Reaktionskraft genauer erklärt.

3.1.2.1 Dehnungsermittlung am Bauteil

Die DMS wurden in den hochbelasteten Bereichen des Prüflings appliziert. Die genaue Position der am Drehgestellrahmen applizierten Dehnmessstreifen ist mittels Messstellenplan festgelegt.

DIE PRINZIPIELLEN EIGENSCHAFTEN VON DEHNMESSSTREIFEN:

- Bestehen aus einem dünnen Widerstandsdraht;
- Kunststoffolie überträgt Dehnung verlustfrei auf Draht;
- Änderung des Ohm'schen Widerstandes durch Querschnitts- und Längenänderungen;
- Änderung des Widerstandes ist proportional zur Dehnung;
- DMS erfassen Oberflächendehnungen;
- Gültig bis Dehnungen von ca. 0,4% - 1,0%;

[CELIGOJ 2004, S. 41]

Zu Abbildung 5: 1. Träger (z.B. Polyimid), 2. Anschlußdrähte, 3. Kleber (z.B. Phenolharz), 4. Messdraht (z.B. Konstantan 20 μm), 5. Bauteil

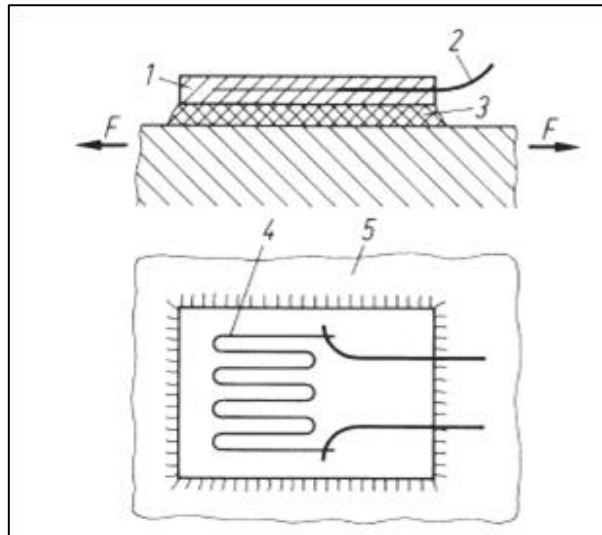


ABBILDUNG 5: PRINZIPIELLER AUFBAU EINES DMS [GROTE 2007, S. W15].

Beim diesem statischen Laborversuch wurden zwei unterschiedliche Arten von Dehnmessstreifen verwendet.

Zum einen der lineare DMS, welcher die auftretende Dehnung in seiner Achsrichtung erfassen kann und zum anderen die DMS-Rosette. Diese besteht aus drei Dehnmessstreifen mit sich kreuzenden Messgitter-Achsen und dient zur Erfassung des ebenen Dehnungszustandes an der Messstelle [HOFFMANN 1987, S. 51].

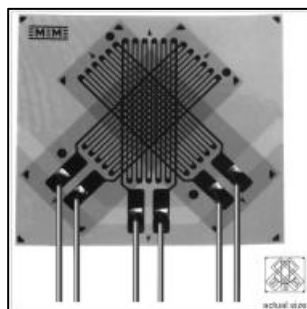


ABBILDUNG 6: DMS-ROSETTE [SIEMENS]

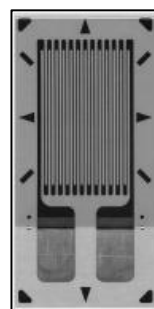


ABBILDUNG 7: LINEARER DMS [SIEMENS]

DIE DMS-MESSKETTE BESTEHT AUS:

- Dehnmessstreifen (Rosette C2A-06-250WW-120 / Linearer DMS CEA-06-250UW-120)
- Elektrische Leitungen
- Messverstärker („DEWE-51-PCI-128“)

Die DMS sind über eine „Viertelbrücken-3-Leiter Schaltung“ an den Messverstärker angeschlossen. Die Kalibrierung der DMS erfolgte vor Beginn der statischen Versuche mittels einer Nebenschluss-Kalibrierung.

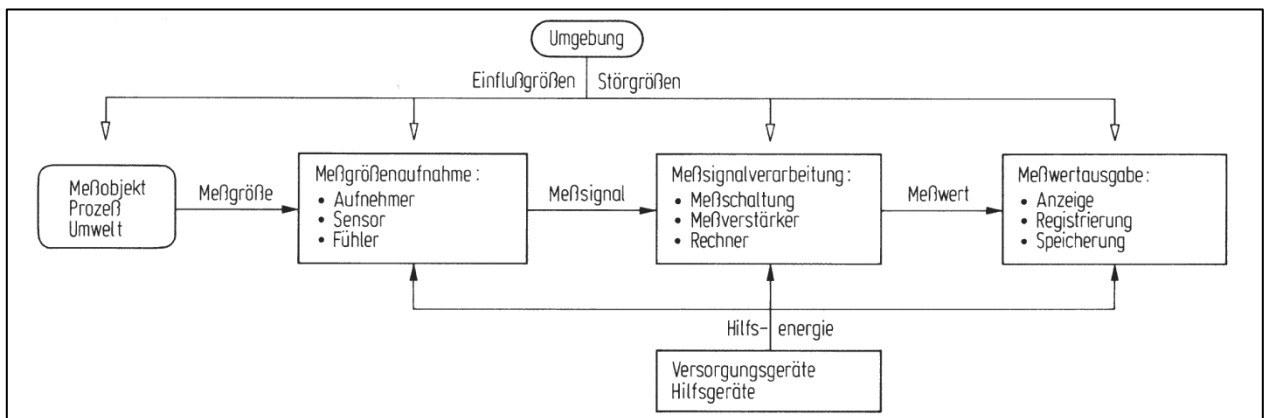


ABBILDUNG 8: MESSKETTE [GROTE 2007, S. W2].

Die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$, 95% Niveau) der DMS-Messkette wurde vom Prüfinstitut mit $u_{E, Messkette} = \pm 2\%$ angegeben.

3.1.2.2 Messen der Reaktionskräfte

An allen Einspannstellen wurden die Reaktionskräfte gemessen. Dabei ist es besonders wichtig, dass andere messtechnisch erfasste Effekte (z.B. Querempfindlichkeit) keinen Einfluss auf die zu messenden Kraftgrößen haben. Für die Kraftmessung verwendete das Prüfinstitut selbstgebaute Kraftaufnehmer, die nach dem Prinzip des Zug-, Druckstab-Federkörpers arbeiten.

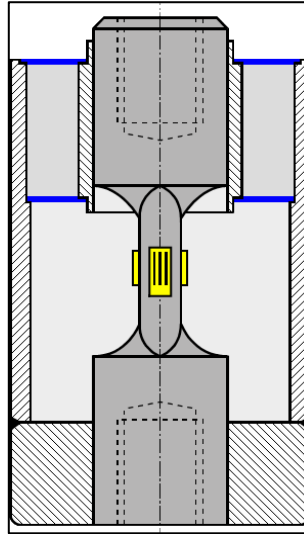


ABBILDUNG 9: KRAFTAUFNEHMER ZUG-, DRUCKSTAB MIT DMS
[LAIBLE 2006, WIKIMEDIA COMMONS].

Die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$, 95% Niveau) der Kraftmesskette wurde vom Prüfinstitut mit $u_{F, \text{Messkette}} = \pm 1,15\%$ dokumentiert.

4. Grundlagen der Festigkeitsberechnung von Drehgestellrahmen

Die Festigkeitsberechnung von Drehgestellrahmen erfolgt nach der Methode der Finiten-Elemente. Das Ziel ist die Berechnung der Verschiebungen sowie der Spannungen in jedem Punkt des Bauteils. Die Methode der Finiten-Elemente ist ein Werkzeug für die Näherungslösung partieller Differentialgleichungen. Als Grundlage für die verschiebungsbezogene Finite-Elemente-Lösung gilt das Prinzip der virtuellen Verschiebungen, welches auch als Prinzip der virtuellen Arbeit bezeichnet wird [Bathe 2002, S. 186].

Dieses Prinzip besagt:

„Wenn sich der (...) Körper im Gleichgewicht befindet, muss für beliebige, kompatible, kleine, dem Körper im Gleichgewichtszustand erteilte, virtuelle Verschiebungen, die bei und entsprechend den vorgeschriebenen Verschiebungen Null sind, die gesamte innere virtuelle Arbeit gleich der gesamten äußeren virtuellen Arbeit sein.“ [BATHE 2002, S. 186]

$$\underbrace{\int_V \delta u_i (\tau_{ji,j} + f_i^B - \rho a_i) dV}_{\text{virtuelle Arbeit im Inneren}} + \underbrace{\int_S \delta u_i (f_i^S - \tau_{ji} n_j) dS}_{\text{virtuelle Arbeit auf der Oberfläche}} = 0 \quad \dots(1)$$

[CELIGOJ 1998, S. 1-4]

Die für die Finite-Elemente Rechnung notwendige Diskretisierung des Bauteils kann durch unterschiedliche Elemente erfolgen, wobei sich jedes Element durch unterschiedliche Eigenschaften und Einsatzbereiche auszeichnet. In dieser Arbeit kamen folgende Typen von Elementen zum Einsatz:

- Das lineare viereckige Schalenelement (*NX-Ideas 6*)
- Das parabolische Tetraeder-Element (*SIEMENS NX 8.5*)
- Das lineare Balken-Element (*NX-Ideas 6, SIEMENS NX 8.5*)
- Das Constraint-Element (*NX-Ideas 6, SIEMENS NX 8.5*)

4.1 Das Schalenelement

Schalenelemente sind flache 3-dimensionale Elemente, welche sowohl Lasten quer zur Ebene aufnehmen können, wie zum Beispiel das Plattenelement, als auch Lasten in der Ebene aufnehmen können, wie zum Beispiel das Scheibenelement. Das Schalenelement besitzt somit eine Längstragfähigkeit (Scheibenelement) und eine Biegetragfähigkeit (Plattenelement). Der Einsatzbereich dieses Schalenelementes sind dünnwandige Bauteile mit zum Teil mehrachsigen Belastungen sowie auch gekrümmte Schalen [Müller 2007, S. 142-143].

In der Abbildung 10 wird das Entstehen eines einfachen Schalenelements aus der Überlagerung eines Scheibenelements mit einem Plattenelement an Hand des Vier-Knoten-Schalen-Elements dargestellt. Dabei werden die Freiheitsgrade von Scheibe (2 FHG) und Platte (3FHG) zusammengeführt, wodurch fünf natürliche Freiheitsgrade pro Knoten entstehen.

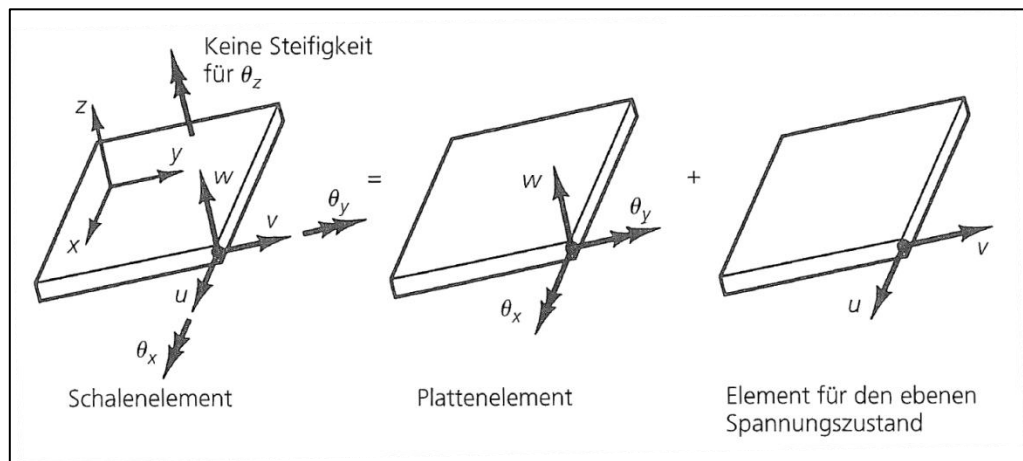


ABBILDUNG 10: DIE ENTSTEHUNG EINES SCHALENELEMENTS AUS DER ÜBERLAGERUNG EINES PLATTENELEMENTS MIT EINEM ELEMENT FÜR DEN EBENEN SPANNUNGSZUSTAND (SCHEIBENELEMENT) [BATHE 2002, S. 244].

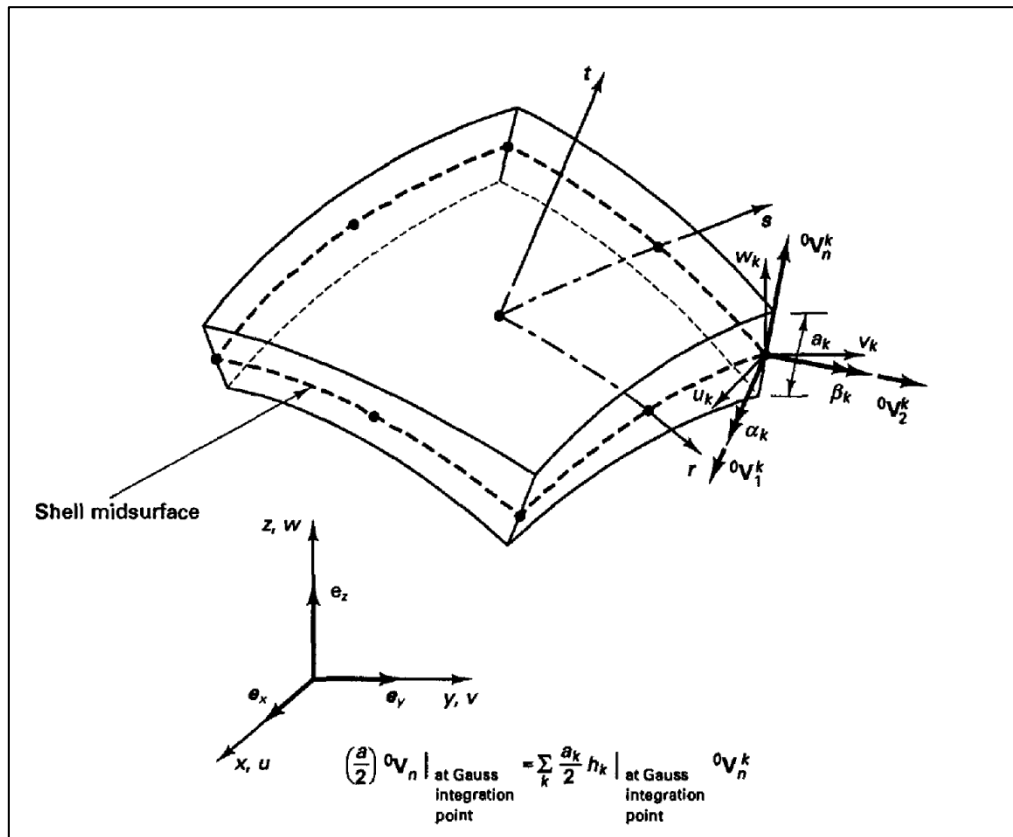


ABBILDUNG 11: ALLGEMEINES 9-KNOTEN SCHALENELEMENT [BATHE 2002, S. 512].

Für die Verschiebungskomponenten aus Abbildung 11 erhält man:

$$u(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k u_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{nx}^k \quad \dots (2)$$

$$v(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k v_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{ny}^k \quad \dots (3)$$

$$w(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k w_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{nz}^k \quad \dots (4)$$

Dabei erfasst V_n^k den Zuwachs des Richtungskosinus von ${}^0V_n^k$:

$$V_n^k = {}^1V_n^k - {}^0V_n^k \quad \dots (5)$$

Definition der zwei Einheitsvektoren ${}^0\mathbf{V}_1^k$ und ${}^0\mathbf{V}_2^k$, welche orthogonal zu ${}^0\mathbf{V}_n^k$ sind:

$${}^0\mathbf{V}_1^k = \frac{\mathbf{e}_y \times {}^0\mathbf{V}_n^k}{\|\mathbf{e}_y \times {}^0\mathbf{V}_n^k\|_2} \quad \dots (6)$$

$${}^0\mathbf{V}_2^k = {}^0\mathbf{V}_n^k \times {}^0\mathbf{V}_1^k \quad \dots (7)$$

Wenn nun α_k und β_k die Drehungen des Richtungsvektors ${}^0\mathbf{V}_n^k$ um die Vektoren ${}^0\mathbf{V}_1^k$ und ${}^0\mathbf{V}_2^k$ sind, ergibt sich, da α_k und β_k kleine Winkel sind:

$$\mathbf{V}_n^k = -{}^0\mathbf{V}_2^k \alpha_k + {}^0\mathbf{V}_1^k \beta_k \quad \dots (8)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (8) in die Gleichungen (2), (3) und (4) erhält man:

$$u(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k u_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2x}^k \alpha_k + {}^0V_{1x}^k \beta_k) \quad \dots (9)$$

$$v(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k v_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2y}^k \alpha_k + {}^0V_{1y}^k \beta_k) \quad \dots (10)$$

$$w(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k w_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k (-{}^0V_{2z}^k \alpha_k + {}^0V_{1z}^k \beta_k) \quad \dots (11)$$

Mit den Gleichungen (9), (10), (11) sowie (2), (3) und (4) können nun die Element-Matrizen eines rein verschiebungsbezogenen Elements in der üblichen Weise berechnet werden.

[BATHE 2002, S. 511-514]

Die Grundvoraussetzung für die Anwendung von Schalenelementen ist, dass die Struktur in einer Richtung dünn ist. Wird diese Forderung erfüllt, können näherungsweise folgende Schlussfolgerungen angenommen werden:

- „Die Spannung über die Dicke, d. h. senkrecht zur Mittelfläche der Platte/Schale ist Null“.
- „Die Materieteilchen, die sich ursprünglich auf einer Geraden senkrecht zur Mittelfläche der Platte/Schale befinden, bleiben während der Deformation auf einer Geraden. Nach der Kirchhoffschen Theorie werden Schubverformungen vernachlässigt und die Geraden bleiben während der Deformation Geraden senkrecht zur (deformierten) Mittelfläche. Die Reissner-Mindlinsche Theorie berücksichtigt Schubverformungen; daher bleibt die ursprünglich zur Mittelfläche normale Gerade während der Deformation i. allg. nicht gerade und nicht senkrecht zur (deformierten) Mittelfläche.“

[BATHE 2002, S. 235]

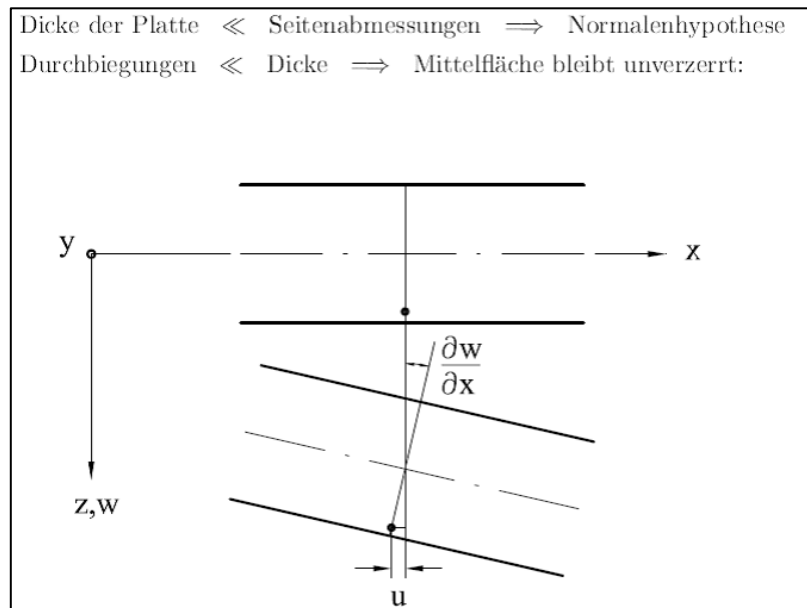


ABBILDUNG 12: PRINZIP DER KIRCHHOFF'SCHEN PLATTENTHEORIE [CELIGOJ 1998, S. 8-1].

Für die Prüfstandssimulation des Drehgestellrahmens wurden Schalenelemente nach der Reissner-Mindlinschen Plattentheorie verwendet, welche transversale Schubverformungen berücksichtigen.

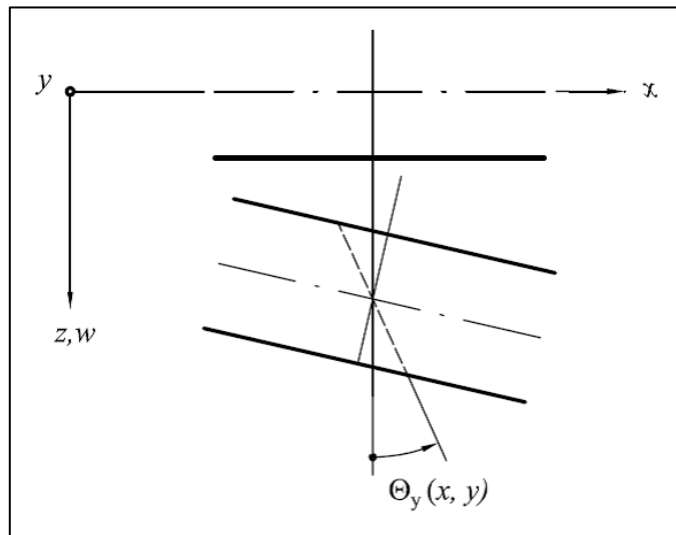


ABBILDUNG 13: PRINZIP DER REISSNER-MINDLINSCHEN PLATTENTHEORIE
[CELIGOJ 1998, S. 8-16].

Die Eigenschaften des verwendeten Schalenelements lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das Schalenelement ist im 3-dimensionalen Raum (x-y-z) definiert.
- Es eignet sich für 3-dimensionale, flächige Bauteile, wobei darauf zu achten ist, dass die Dicke im Vergleich zu Breite und Länge klein ist.
- Es besitzt sechs Freiheitsgrade an jedem Knoten:
3 translatorische FHG (u_x u_y z_u) und
3 rotatorische FHG (ROT_x , ROT_y , ROT_z).
- Befinden sich nicht alle vier Eckpunkte in einer Ebene, so ist das Schalenelement verdreht. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Genauigkeit der Rechenergebnisse.
- Mögliche Beanspruchungen im Element sind Membranspannung, Biegespannung und Schubspannung. Zwischen der Oberseite und der Unterseite ist dies jedoch nur als linearer Verlauf möglich.

[MÜLLER 2007, S. 143]

Für die Auslegungsrechnung von Drehgestellrahmen werden momentan lineare Vier-Knoten-Schalenelemente verwendet, wofür es mehrere Gründe gibt. Der Hauptgrund dafür ist die ausgereifte Methodik der Schweißnahtbewertung für diese Schalenelemente. Weitere Gründe wie einfach zu realisierende Blechstärkenvariationen, einfaches Ändern der Kontur und kürzere Rechenzeiten beziehungsweise geringere Datenmengen verlieren auf Grund der immer leistungsfähiger werdenden Computer, mehr und mehr an Bedeutung.

4.2 Das parabolische Tetraeder-Element

Das Tetraeder-Element zählt zu den Volumenelementen und gewinnt durch die ständig steigende Computerleistung an Bedeutung. Der Einsatz von Volumenelementen erfolgt meist bei dickwandigen oder massiven Bauteilen. Der Grund für den häufigen Einsatz von Tetraeder-Elementen liegt hauptsächlich in der Einfachheit der Netzerzeugung mit diesem Elementtyp, da das Tetraeder-Netz in den meisten Simulationsprogrammen automatisch erzeugt werden kann.

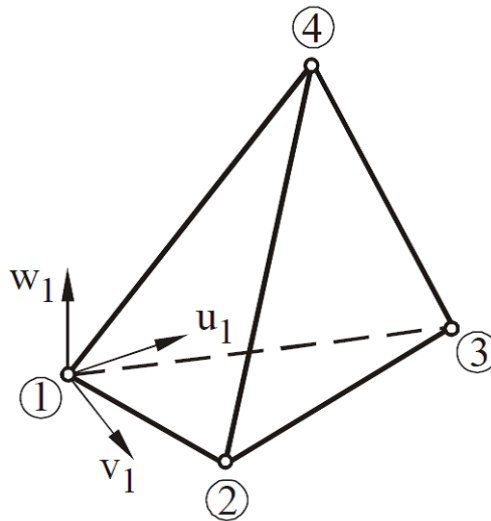


ABBILDUNG 14: EIN LINEARES TETRAEDER-ELEMENT [KLEIN 2012, S. 171].

Beim Tetraeder-Element werden bei jedem Knoten drei Verschiebungskomponenten (u_i , v_i , w_i) zugelassen. Die dazugehörigen drei Kraftkomponenten sind dementsprechend N_{xi} , N_{yi} und N_{zi} . Der für das Tetraeder-Element einfachste lineare Verschiebungsansatz lautet demzufolge:

$$u(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z \quad \dots (12)$$

$$v(x, y, z) = \alpha_5 + \alpha_6 \cdot x + \alpha_7 \cdot y + \alpha_8 \cdot z \quad \dots (13)$$

$$w(x, y, z) = \alpha_9 + \alpha_{10} \cdot x + \alpha_{11} \cdot y + \alpha_{12} \cdot z \quad \dots (14)$$

Da hier keine der Richtungen bevorzugt wird, müssen sich aus dem Pascal'schen Dreieck ebenfalls alle Richtungskopplungen ergeben.

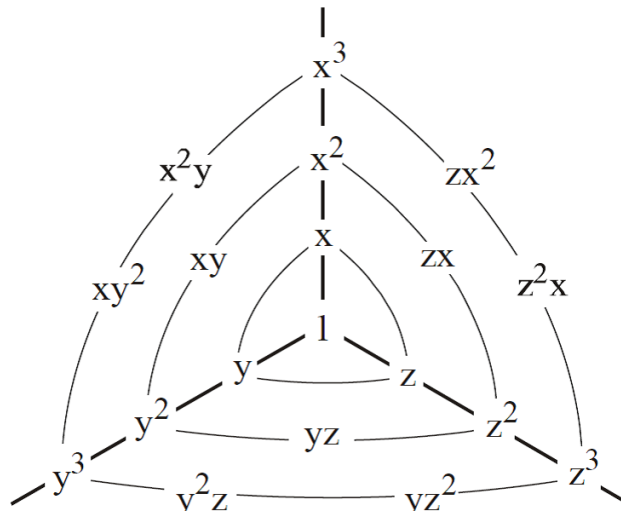


ABBILDUNG 15: DAS DREIDIMENSIONALE PASCAL'SCHE DREIECK [KLEIN 2012, S. 171].

Das Pascal'sche Dreieck kann zur Entwicklung der linearen und quadratischen Ansätze für alle relevanten Volumengeometrien verwendet werden. So auch für das in der Finite Elemente Rechnung verwendete parabolische (10 Knoten) Tetraeder-Element.

[KLEIN 2012, S. 171-172]

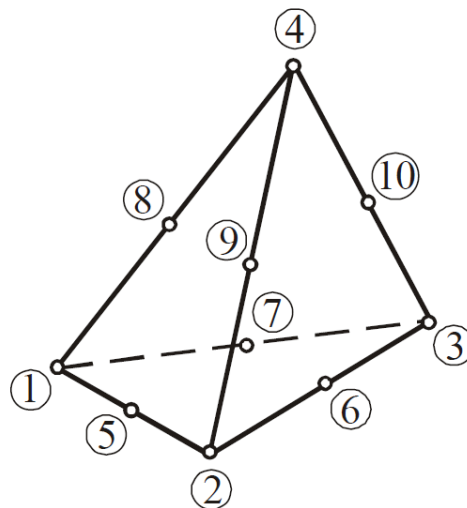


ABBILDUNG 16: PARABOLISCHE TETRAEDER-ELEMENT [KLEIN 2012, S. 172].

Die Eigenschaften des zur Berechnung verwendeten parabolischen Tetraeder-Elements lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das Tetraeder-Element ist im 3-dimensionalen Raum (x-y-z) definiert.
- Es besitzt drei translatorische Freiheitsgrade (u_i , v_i , w_i) an jedem Knoten.
- Mögliche Beanspruchungen im Element sind Normalspannungen und Schubspannungen, sowie Dehnungen in allen drei Raumrichtungen.
- Die Spannung innerhalb eines parabolischen Tetraeder-Elements ist linear, das bedeutet, der Spannungszustand zwischen zwei Knoten errechnet sich als Gerade und die Verformung erfolgt auf Grund der Zwischenknoten parabolisch [Koehldorfer 2005, S.198].
- Es eignet sich für 3-dimensionale, massive, dicke Bauteile mit vergleichbar großen Abmessungen in allen drei Richtungen.

[MÜLLER 2007, S. 150-152]

Durch den Einsatz von Tetraeder-Elementen, der zu einer 3-dimensionalen Bauteilanalyse führt, steigt die Anzahl der Elemente und Knotenpunkte gegenüber einer ebenen Betrachtungsweise stark an. Dies führt zu großen Gesamtmatrizen mit größeren Bandbreiten. Zur Lösung dieser sind große Rechenleistungen erforderlich. Beim Einsatz von Volumen-Elementen sind die Variation von Blechstärken und das Ändern der Kontur an lokalen Stellen immer mit dem Erstellen eines neuen Netzes über das gesamte Bauteil verbunden. Dies kann in Abhängigkeit vom Bauteil, der Elementgröße und der Rechenleistung zum Teil erheblichen Zeitaufwand bedeuten. Deshalb muss beim Einsatz von Tetraeder-Elementen beziehungsweise generell beim Einsatz von Volumen-Elementen das Ziel sein, möglichst wenige dafür aber höherwertige Elemente zu verwenden [KLEIN 2012, S. 170].

4.3 Das lineare Balken-Element

Zur Nachbildung des Prüfstandsbaus wurden lineare Balken-Elemente verwendet. Das Balken-Element verfügt an jedem Knotenpunkt über sechs Freiheitsgrade, die sich in drei translatorische und in drei rotatorische Freiheitsgrade aufteilen. Das Element ist in der Lage Axialkräfte (N_i), Drehmomente (T_i) sowie in zwei Ebenen Querkräfte (Q_{yi} , Q_{zi}) und Biegemomente (M_{yi} , M_{zi}) zu übertragen [KLEIN 2012, S. 93].

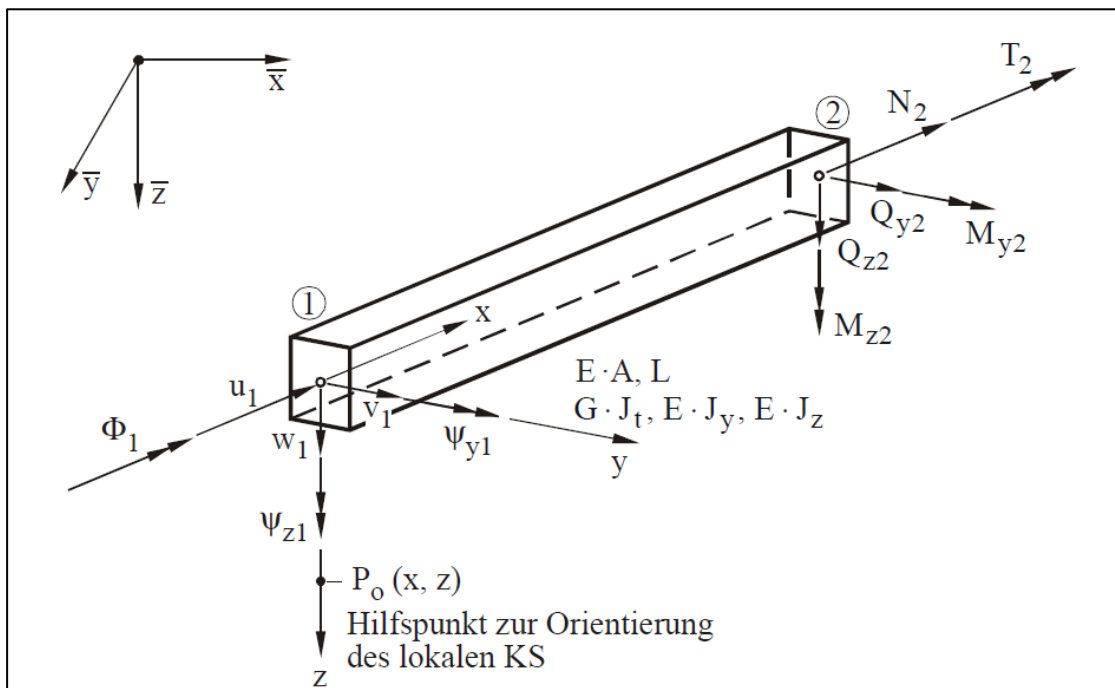


ABBILDUNG 17: LINEARES BALKENELEMENT [KLEIN 2012, S. 93]

Die linearen Balken-Elemente übernehmen bei der Prüfstandssimulation des Drehgestellrahmens die Aufgabe der Einspannung. In Sonderfällen werden diese Elemente auch verwendet, um bei der Krafteinleitung etwaige Anbauteile zu modellieren, welche einen großen Einfluss auf die Art der Krafteinleitung haben, wie zum Beispiel der Knochen bei der Drehdämpferkonsole.

4.4 Das Constraint-Element

Das Constraint-Element ist ein starres Kopplungselement und wird für verschiedenste Zwecke in der Finite-Elemente Rechnung verwendet. Dazu zählen Aufgaben wie die Krafteinleitung, die Kraftableitung/Einspannung oder die Verbindung unterschiedlicher Elementtypen wie zum Beispiel Volumenelemente mit Schalenelemente [KLEIN 2012, S. 309].

Der prinzipielle Aufbau eines Constraint-Elements besteht aus einem zentralen Hauptknoten (C) über den z.B. eine Kraft eingeleitet werden kann. Von diesem Hauptknoten verteilt sich dann die Kraft auf die beliebig ausgewählten Unterknoten. Dabei wird jeder Unterknoten mit gleich großer Kraft beaufschlagt.

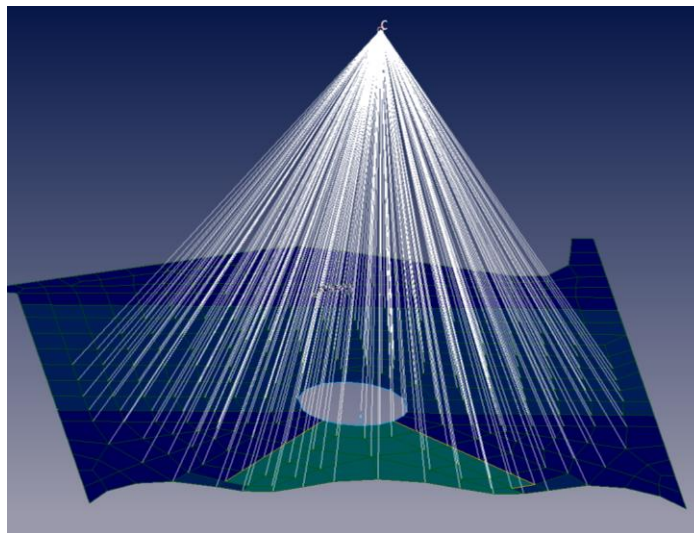


ABBILDUNG 18: CONSTRAINT-ELEMENT ZUR KRAFTEINLEITUNG.

5. Arbeitsablauf

Es werden nun die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Schritte zur Erfüllung der Aufgabenstellung angeführt und näher erklärt.

5.1 Modellierung

Die große Herausforderung in der Modellierung liegt darin, den Aufbau des Laborversuches so genau wie möglich, virtuell am Computer nachzubilden. Dies erfolgt in diesem Fall mit der Simulationssoftware *NX I-deas 6* und nach der Methode der Finiten-Elemente. Die größte Schwierigkeit bei der Versuchsrechnung ist, alle wesentlichen Einflussfaktoren des Laborversuches wahrzunehmen und diese so weit als möglich in das Simulationsmodell zu integrieren. Einflussfaktoren, welche kaum beziehungsweise nur unter großem Aufwand berücksichtigt werden können, sind zum Beispiel:

- Exakte Reibungswerte von Gelenken
- Steifigkeiten von Abstützstangen
- Einfluss von Vorspannkräften durch Anbauten
- Kontaktprobleme (überall dort, wo mittels einer Platte Kräfte auf das Bauteil eingeleitet werden)
- Eigenspannungen des Prüfobjektes

Deshalb ist es unumgänglich, bei der Erstellung des Simulationsmodells gewisse Vereinfachungen zu treffen.

Zur statischen Festigkeitsberechnung wird die Finite-Elemente Methode angewandt. Dabei wird durch die notwendige Diskretisierung des Simulationsmodells durch die „Finiten-Elemente“ die Geometrie des Modells dauerhaft verfälscht, wodurch gewisse Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden müssen. Darüber hinaus verfügen die dafür verwendeten Elemente zum Teil über sehr unterschiedliche Eigenschaften und Einsatzgebiete, welche in *Kapitel 4. Grundlagen der Festigkeitsberechnung von Drehgestellrahmen* genau erklärt werden.

In Abbildung 19 wird der erste Schritt, die Modellbildung, zum besseren Verständnis nochmals erläutert. Dabei wird der reale Prüfstands Aufbau durch den Einsatz von linearen Balken-Elementen im Simulationsprogramm so real wie möglich nachgebildet und in das bestehende FE-Modell des Drehgestellrahmens integriert. Das Resultat daraus ist ein virtueller Prüfstand, mit dem der statische Laborversuch nachgerechnet werden kann.

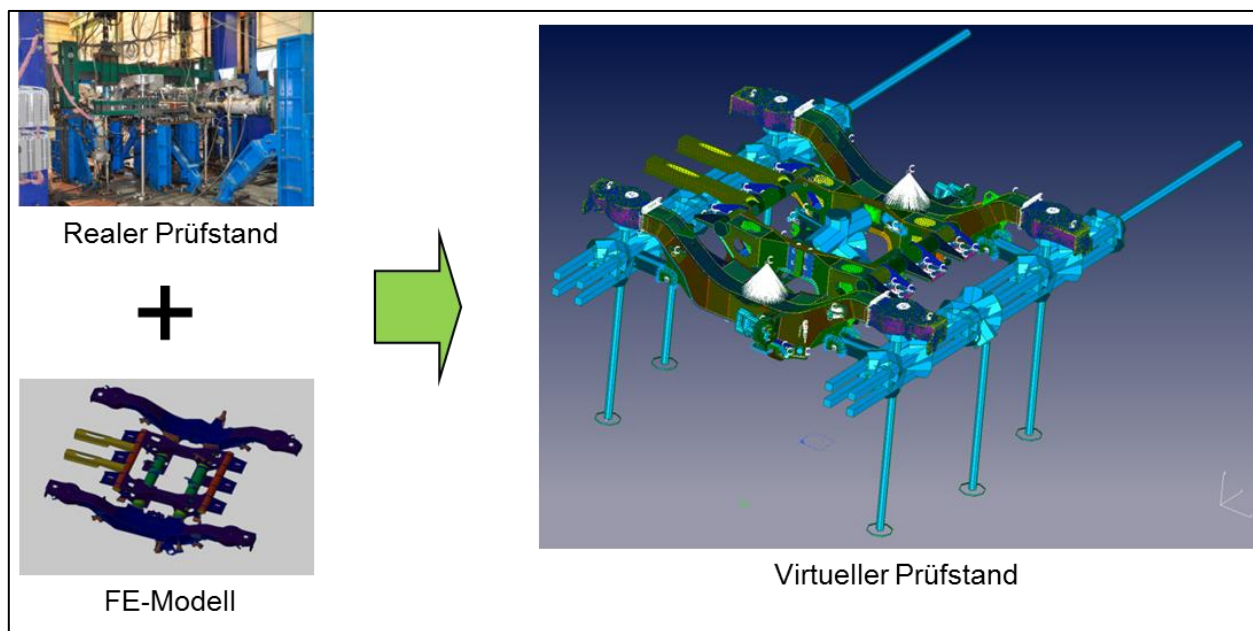


ABBILDUNG 19: ERSTER SCHRITT - MODELLBILDUNG

5.2 Berechnen der Spannungen

Für das Berechnen der Spannungen des Drehgestellrahmens beim statischen Laborversuch, werden Standardlastfälle verwendet. Das bedeutet, dass jeder hydraulische Zylinder hintereinander einmalig mit einer gewissen Kraft beaufschlagt wird. Dieser Berechnungsschritt erfolgt im Simulationsprogramm *NX I-deas 6*. Mithilfe einer Lastfallmatrix werden aus den Ergebnissen der Standardlastfälle, im Programm *Fatigue Assessment*, durch richtiges Multiplizieren die realen Beanspruchungen errechnet.

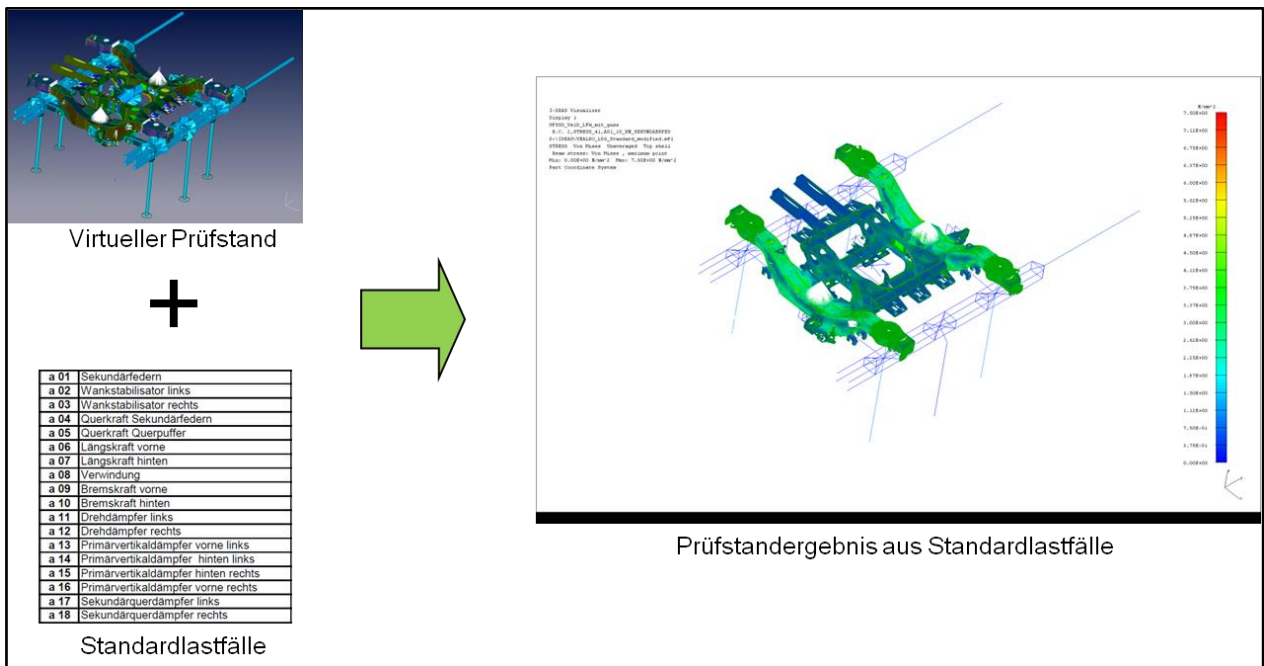


ABBILDUNG 20: BERECHNUNG DER PRÜFSTANDERGEBNISSE.

5.3 Positionierung und Auswertung der virtuellen Messstellen

Bei herkömmlichen FE-Simulationsprogrammen hat man die Einschränkung, dass Ergebnisse (Spannungen, Verschiebungen) nur von Knotenpunkten ausgewertet und weiterverarbeitet werden können. Da, wie später noch genau analysiert wird, die exakte Position eines Dehnmessstreifens sehr großen Einfluss auf das Ergebnis hat, müssen virtuelle DMS unabhängig von der Lage der Knotenpunkte frei positioniert werden können. Diese Möglichkeit bietet das Programm *Fatigue Assessment*. Es errechnet Spannungen und Verschiebungen durch lineare Interpolation der umliegenden Knotenpunkte auf jede beliebige Position am Bauteil. Durch die dadurch erreichte gute Übereinstimmung der DMS-Positionen zwischen Laborversuch und Berechnung, erhält man die Möglichkeit einer guten Vergleichbarkeit der DMS-Ergebnisse zwischen dem Laborversuch und der FE-Prüfstandssimulation. Als Ergebnis bekommt man pro DMS die Spannungen und Dehnungen zu jedem Lastfall.

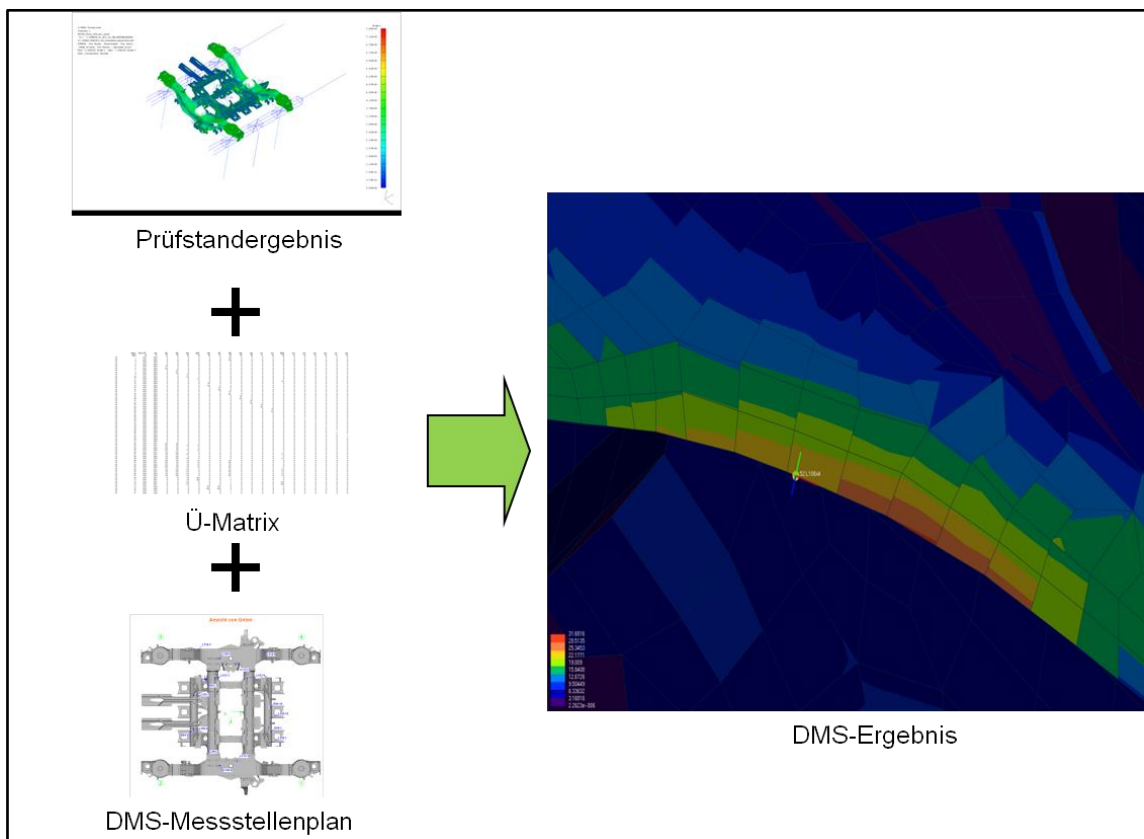


ABBILDUNG 21: POSITIONIERUNG/AUSWERTUNG DER DMS.

5.4 Berechnung des Verzerrungstensors

Als DMS-Ergebnis aus dem Laborversuch / der Prüfstandssimulation erhält man die gemessenen Dehnungen in Richtung der einzelnen Dehnmessstreifen. Um nun einen Vergleich zwischen den beiden Varianten zu ermöglichen, erfolgt die Berechnung des Verzerrungstensors für jeden einzelnen Dehnmessstreifen in der x-y-Ebene.

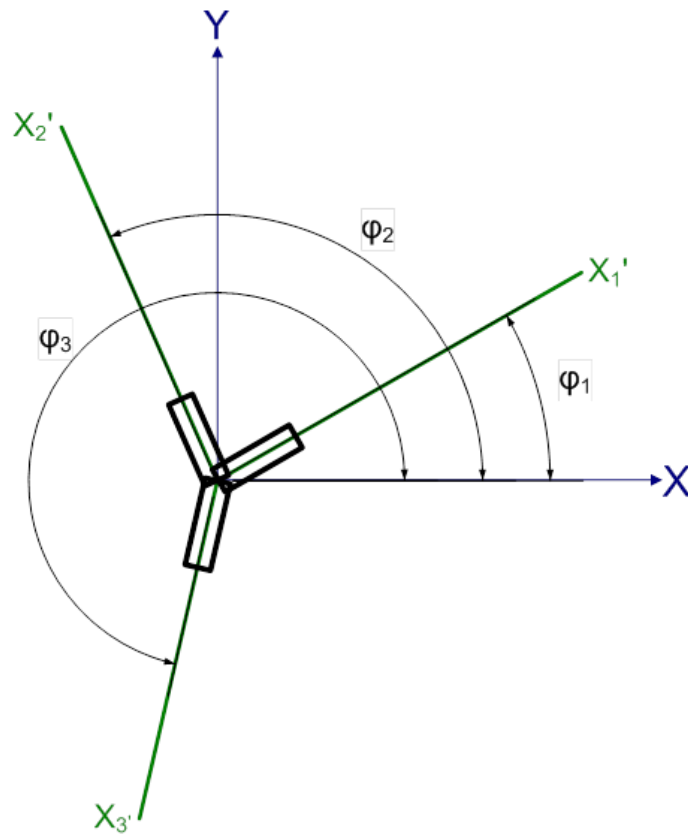


ABBILDUNG 22: AUF EINER KÖRPEROBERFLÄCHE IN EINEM MESSPUNKT AUFGEBRACHTE DMS MIT BELIEBIGEN WINKELN.

Die für die Berechnung des Verzerrungstensors \underline{V} notwendigen Formeln nach [CELIGOJ 2004, S. 42] lauten:

$$\varepsilon_{\varphi_1} = \varepsilon_{xx} \cdot \cos^2(\varphi_1) + \varepsilon_{yy} \cdot \sin^2(\varphi_1) + 2\varepsilon_{xy} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_1) \quad \dots (15)$$

$$\varepsilon_{\varphi_2} = \varepsilon_{xx} \cdot \cos^2(\varphi_2) + \varepsilon_{yy} \cdot \sin^2(\varphi_2) + 2\varepsilon_{xy} \cdot \sin(\varphi_2) \cdot \cos(\varphi_2) \quad \dots (16)$$

$$\varepsilon_{\varphi_3} = \varepsilon_{xx} \cdot \cos^2(\varphi_3) + \varepsilon_{yy} \cdot \sin^2(\varphi_3) + 2\varepsilon_{xy} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \cos(\varphi_3) \quad \dots (17)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} \quad \dots (18)$$

Durch Umformen und anschließendes Auflösen der Gleichungen (15), (16) und (17) erhält man ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} . Durch Anwendung der Formel (18) ist der Verzerrungstensor \underline{V} letztendlich vollständig befüllt und sieht folgendermaßen aus:

$$\Rightarrow \underline{V} := \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad \dots (19)$$

Dieser Berechnungsablauf muss nun mit jedem Dehnmessstreifen für jeden einzelnen Lastfall durchgeführt werden. Diese Berechnungen wurden mit dem Programm *Microsoft Excel 2010* automatisiert umgesetzt.

5.5 Beispiel zur DMS-Auswertung mit anschließender Gegenüberstellung

In diesem Kapitel wird für die Messstelle R03_1 der Verzerrungstensor aus den gemessenen Dehnungen des Laborversuches errechnet und anschließend in einer Gegenüberstellung mit den Dehnungen aus der Prüfstandssimulation verglichen.

Die Messstelle R03_1 entspricht einer DMS-Rosette und befindet sich am Obergurt des Langträgers im ersten Quadranten des Drehgestellrahmens.

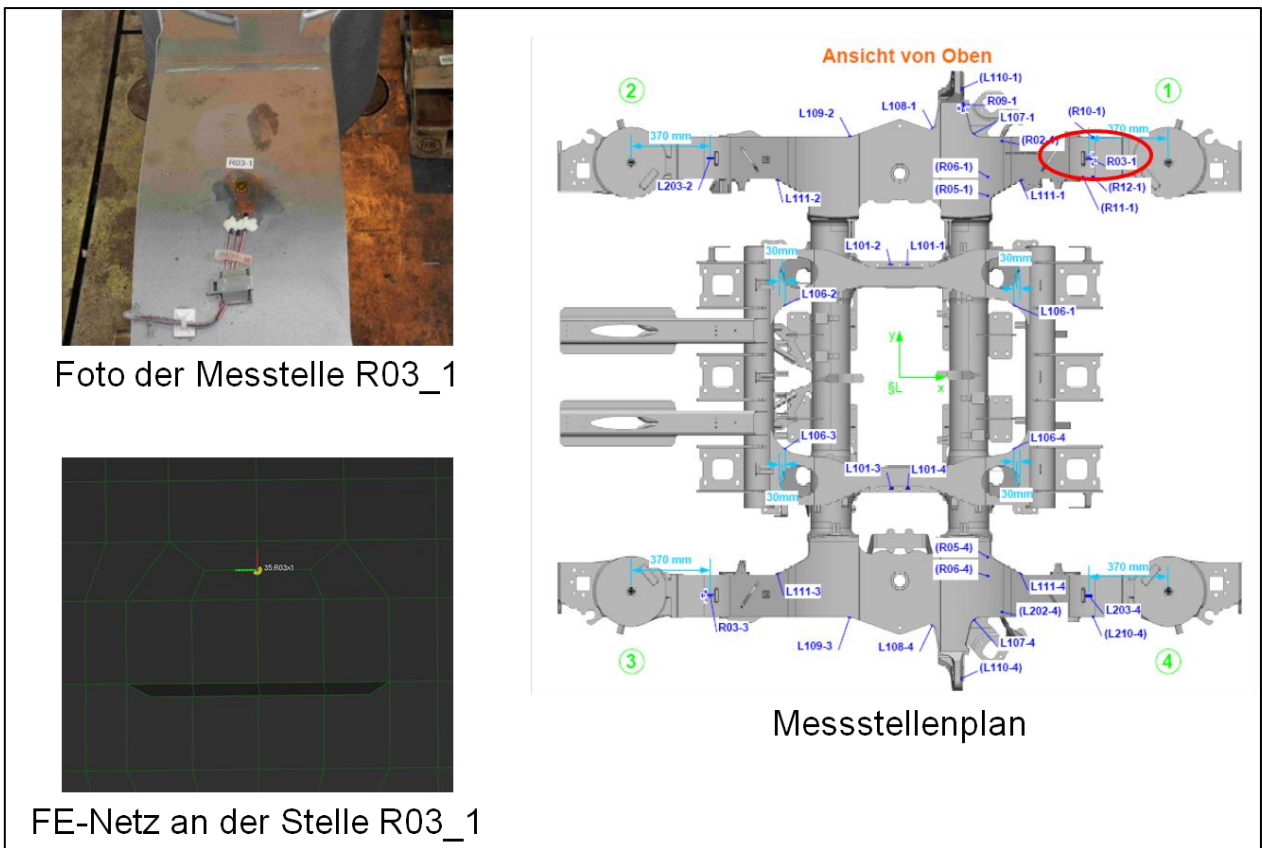


ABBILDUNG 23: POSITION DER MESSSTELLE R03_1

Im Laborversuch wurden an der Messstelle R03_1 unter Lastfall 1.01 folgende Werte für die Dehnung gemessen:

$$\varepsilon_a = -128,25 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m}$$

$$\varepsilon_b = -262,45 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m}$$

$$\varepsilon_c = -81,15 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m}$$

Dabei ist die Ausrichtung und Beschriftung der DMS-Rosette wie folgt definiert:

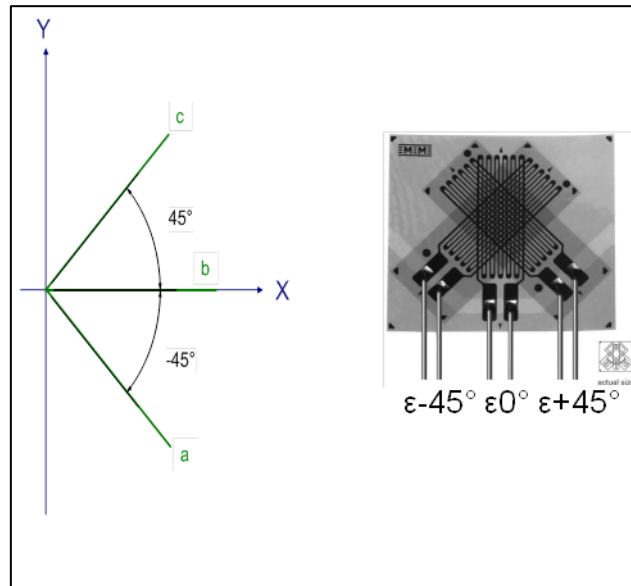
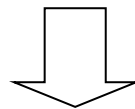


ABBILDUNG 24: AUSRICHTUNG DER DMS-ROSETTE IM BEISPIEL R03_1.

Nun können die Werte für ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} mit Hilfe der Formeln (15), (16), (17) und (18) nach entsprechendem Umformen errechnet werden. Diese Ausdrücke können jedoch für den Fall der DMS-Rosette mit einer $(-45^\circ, 0^\circ, +45^\circ)$ Anordnung, durch folgende spezielle Werte trigonometrischer Funktionen, stark vereinfacht angeschrieben werden.

$$\cos(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \cos(-45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \cos(0^\circ) = 1$$

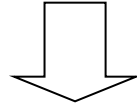
$$\sin(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \sin(-45^\circ) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad \sin(0^\circ) = 0$$



$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_a + \varepsilon_c - \varepsilon_{xx}$$

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_c - \varepsilon_a$$



$$\underline{V} = \begin{bmatrix} -262,45 & 23,55 \\ 23,55 & 53,05 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \frac{m}{m}$$

Dieser Verzerrungstensor muss nun für jeden Lastfall berechnet werden. Das gleiche Prozedere ist für die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation durchzuführen. Dafür ist die Option des Programms *FatigueAssessment*, sich den Verzerrungstensor fertig berechnet ausgeben zu lassen, sehr nützlich.

Mit Hilfe des Verzerrungstensors kann der dazugehörige Mohr'sche Verzerrungskreis, auch Mohr'scher Dehnungskreis genannt, konstruiert werden. Die Größe der Hauptdehnungen (ε_1 , ε_2) können im Mohr'schen Dehnungskreis direkt als Schnittpunkte des Kreises mit der σ – Achse abgelesen werden, ebenso die dazugehörigen Drehwinkel φ_1 und φ_2 .

Wie in Abbildung 25 ersichtlich, ist der Größenunterschied zwischen den Hauptdehnungen ε_1 und ε_2 im Vergleich zu den Dehnungen ε_{xx} und ε_{yy} sehr klein. Das deutet darauf hin, dass an der Messstelle R03_1 unter Lastfall 1.01 ein beinahe reiner 1-dimensionaler Verzerrungszustand vorliegt. Dies ist durch die Lage der Messstelle am Langträger sowie durch die Belastung über die Sekundärfedern begründbar und dient somit als Plausibilitätskontrolle für das Rechenergebnis.

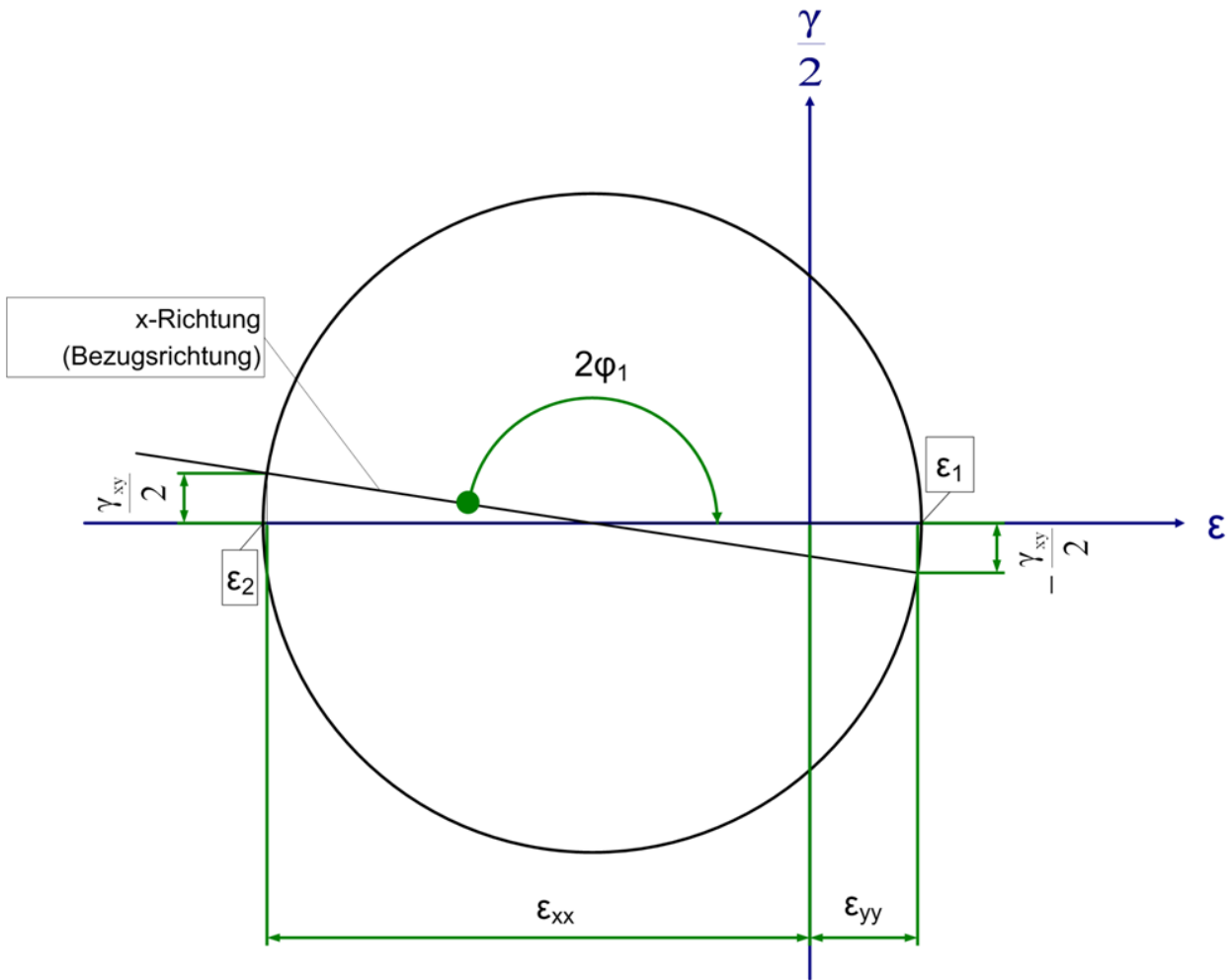


ABBILDUNG 25: MOHR'SCHER DEHNUNGSKREIS DER MESSSTELLE R03_1 DURCH DIE MESSERGEBNISSE AUS DEM STATISCHEN LABORVERSUCH.

Zur Gegenüberstellung beziehungsweise um einen Vergleich der Dehnungen von Laborversuch und Prüfstandssimulation durchführen zu können, ist der Verzerrungstensor in einen Skalar umzurechnen. Dafür wird die Vergleichsdehnung ε_v aus dem Verzerrungstensor gebildet. Das Ziel dabei ist, die Hauptdehnungen zu einem Skalar zusammenzufassen.

Die Vergleichsdehnung nach Von Mises ist anwendbar für duktile Werkstoffe, welche

- beim Auftreten plastischer Verformung oder
- bei schwingender Beanspruchung durch Dauerbruch versagen.

Vergleichsdehnung nach Von Mises:

$$\varepsilon_V = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} \quad \dots (20)$$

$$\varepsilon_V = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 - \varepsilon_{xx} \cdot \varepsilon_{yy} + 3 \cdot \varepsilon_{xy}^2} \quad \dots (21)$$

[Szabó 1977, S. 363-371]

Angewandt auf den Verzerrungstensor aus dem Beispiel R03_1 für den Lastfall 1.01 ergibt sich die Vergleichsdehnung nach Gleichung (21) wie folgt:

$$\varepsilon_V = \frac{2}{3} \sqrt{(-262,45)^2 + (53,05)^2 - (-262,45) \cdot (53,05) + 3 \cdot (23,55)^2} = 196,96 \mu\text{m/m}$$

Zusammengefasst bedeutet das für DMS-Rosetten, dass für die Gegenüberstellung der Dehnungen aus der Prüfstandssimulation mit den Dehnungen aus dem Laborversuch, zuerst der Verzerrungstensor für jeden einzelnen Lastfall berechnet werden muss. Im Anschluss daran kann die zum Vergleich geeignete, skalare Vergleichsdehnung nach Von Mises berechnet werden.

Bei den Ergebnissen der linearen Dehnungsmessstreifen liegt bereits als Ergebnis ein Skalar vor und deshalb wurde für die anschließende Gegenüberstellung lediglich der Betrag gebildet.

Die anschaulichste Art der Gegenüberstellung ist die in Form eines Diagramms. Es ist für jeden einzelnen DMS ein Diagramm zu erstellen, wobei auf der Abszisse die Lastfälle und auf der Ordinate die Dehnungen mit der Einheit [$\mu\text{m/m}$] aufgetragen werden.

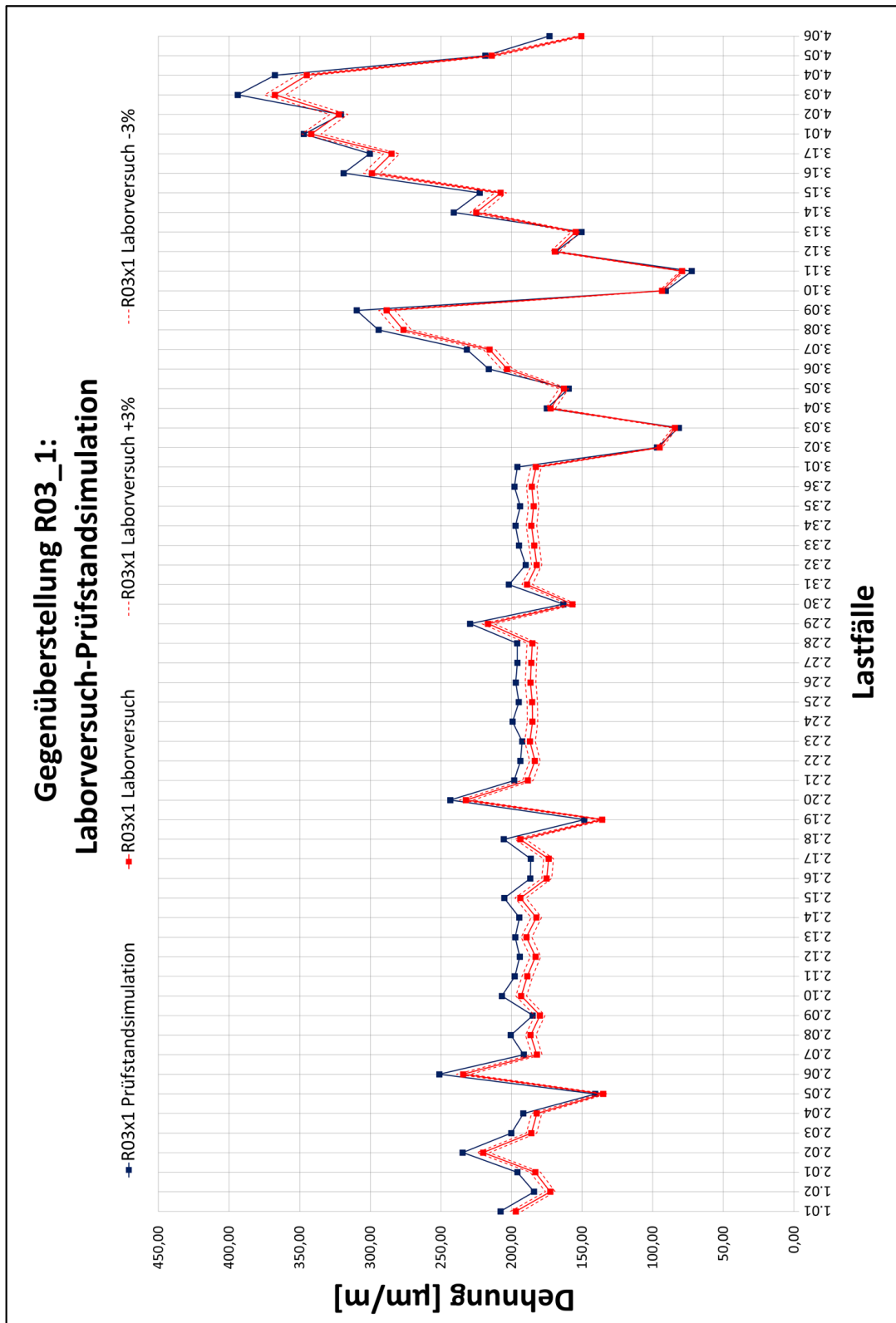


ABBILDUNG 26: GEGENÜBERSTELLUNG DER DEHNUNG VON LABORVERSUCH UND PRÜFSTANDSIMULATION DES DEHNMESSSTREIFENS AN DER MESSSTELLE R03_1.

In Abbildung 26 ist eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Dehnungen im Laborversuch und den errechneten Dehnungswerten zu erkennen. Die Kurvenverläufe sind über alle Lastfälle weitestgehend synchron. Der Abstand in Richtung der Ordinate zwischen den beiden Kurvenverläufen (GAP) ist über alle Lastfälle überwiegend konstant und als gering einzustufen. Bei den Ergebnissen aus dem Laborversuch wurde die laut Prüfinstitut angegebene erweiterte Messunsicherheit der DMS-Messkette in Form von Rot gestrichelten Linien mitberücksichtigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die Genauigkeit der Messergebnisse aus dem Laborversuch nicht mehr genauer eingegangen.

Für die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation kann kein genauer Unsicherheitsfaktor angegeben werden, da es für die Erstellung eines virtuellen Prüfstandsmodells unumgänglich ist, Vereinfachungen zu treffen. Auf einige dieser Vereinfachungen beziehungsweise Ungenauigkeiten wird in Kapitel 7 genauer eingegangen.

6. Gegenüberstellung

Für die Gegenüberstellung der Dehnungen aus Laborversuch und Prüfstandssimulation wurden für alle 55 DMS, Diagramme erstellt.

6.1 Einteilung der Messstellen in Gruppen

Auf Grund der Vielzahl an Diagrammen wurden die einzelnen Messstellen in vier Gruppen eingeteilt:

- *Gruppe A: Keine/geringe Abweichungen über alle Lastfälle*
In dieser Gruppe befinden sich ausschließlich Diagramme, bei denen die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch über einen identen Kurvenverlauf verfügen und deren maximaler GAP $\pm 30\mu\text{m}/\text{m}$ bei keinem der Lastfälle überschritten wird.
- *Gruppe B: Konstante Abweichungen über alle Lastfälle*
In dieser Gruppe befinden sich Diagramme, bei denen zwar die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch über einen identen Kurvenverlauf verfügen, jedoch der GAP über alle Lastfälle einen konstanten Wert jenseits von $\pm 30\mu\text{m}/\text{m}$ aufweist.
- *Gruppe C: Lokale Abweichungen*
In dieser Gruppe befinden sich Diagramme, bei denen die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch weitestgehend über einen identen Kurvenverlauf verfügen, jedoch bei gewissen Lastfällen große Abweichungen auftreten.

– *Gruppe D: Kein identer Kurvenverlauf*

In dieser Gruppe befinden sich Diagramme, bei denen die Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch über weite Teile keinen identen Kurvenverlauf aufweisen.

Gruppen von Messpunkten:

A) Keine/geringe Abweichungen über alle Lastfälle

B) Konstante Abweichungen über alle Lastfälle

C) Lokale Abweichungen

D) Kein identer Kurvenverlauf

Quadrant			
1	2	3	4
L101-1	L101-2	L101-3	L101-4
L102-1		L102-14	
		L103-3	L103-4
	L104-2	L104-3	
	L105-2	L105-3	
L106-1	L106-2	L106-3	L106-4
L107-1			L107-4
L108-1			L108-4
	L109-2	L109-3	
L110-1			L110-4
L111-1	L111-2	L111-3	L111-4
		L112-3	L112-4
L113-1			L113-4
	L201-2		
			L202-4
	L203-2		L203-4
			L210-4
		R01-3	
R02-1			
R03-1		R03-3	
R04-1	R04-2		R04-14
R05-1			R05-4
R06-1			R06-4
	R07-12	R07-34	
			R08-4
R09-1			
R10-1			
R11-1			
R12-1			

ABBILDUNG 27: ERGEBNISSE AUS DER GEGENÜBERSTELLUNG VON LABORVERSUCH UND PRÜFSTANDSIMULATION.

6.2 Repräsentative Beispiele für jede Gruppe

Als repräsentative Beispiele dienen die in Abbildung 27 markierten Messstellen.

Gruppe A: Keine/geringe Abweichungen über alle Lastfälle

MESSSTELLE R06-4:

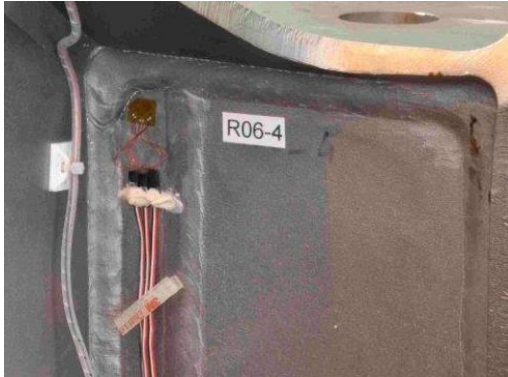


ABBILDUNG 28: R06_4 IM
LABORVERSUCH.

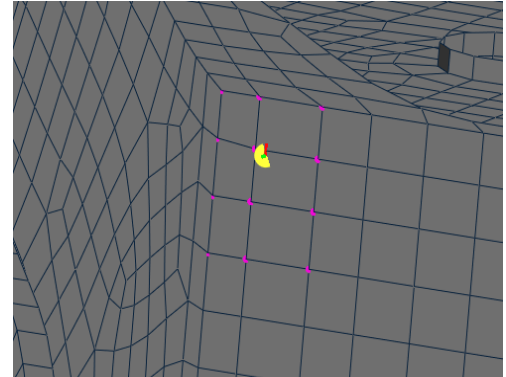


ABBILDUNG 29: R06_4 IM
SIMULATIONSMODELL.

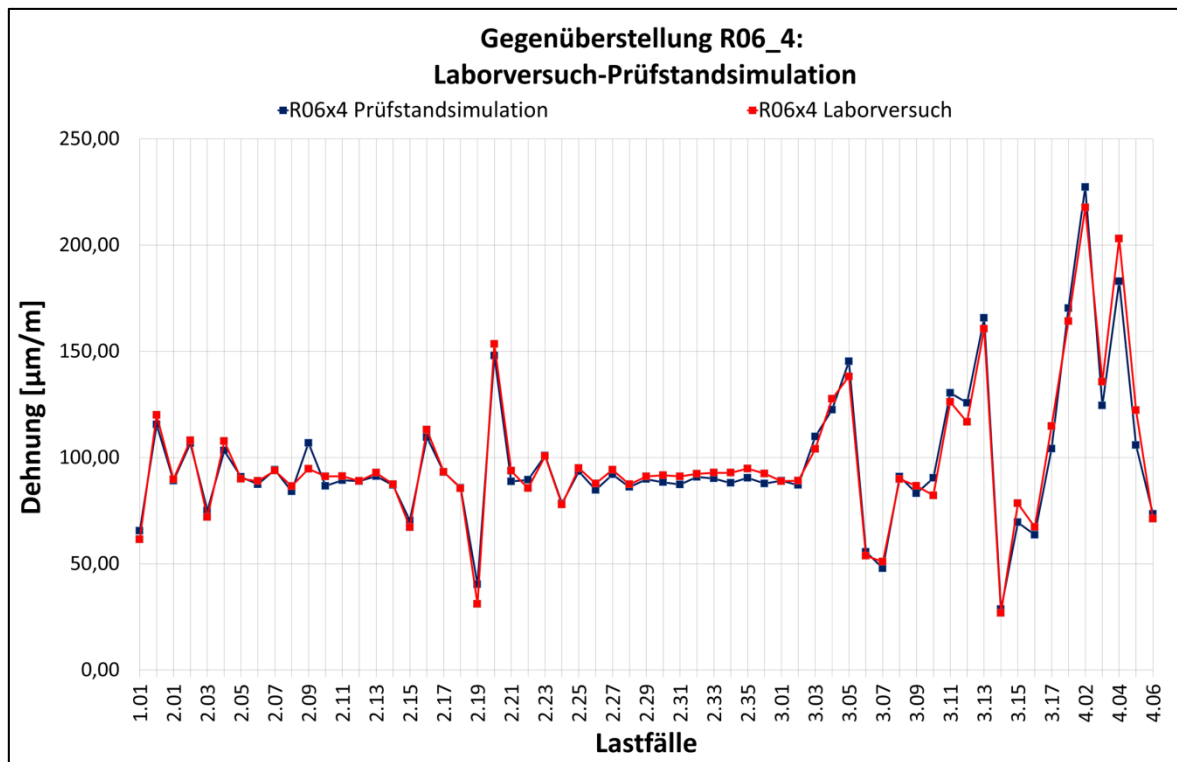


ABBILDUNG 30: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER
MESSSTELLE R06_4.

Gruppe B: Konstante Abweichungen über alle Lastfälle

MESSSTELLE L108-4:



ABBILDUNG 31: L108_4 IM
LABORVERSUCH.

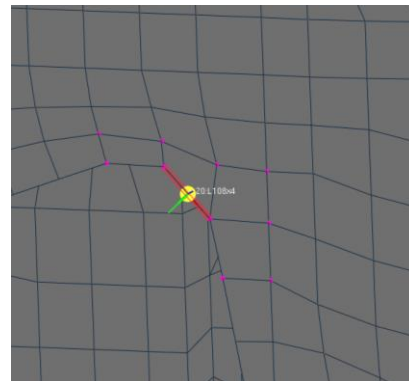


ABBILDUNG 32: L108_4 IM
SIMULATIONSMODELL.

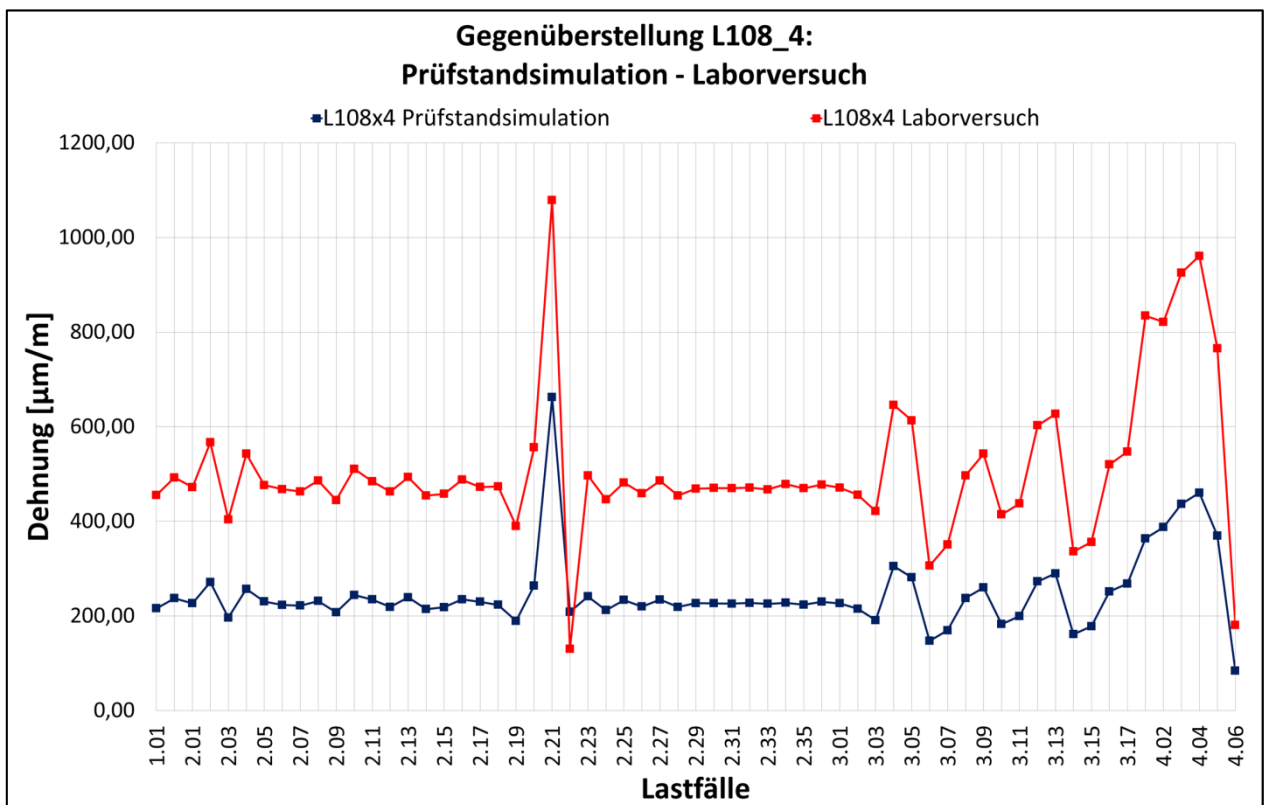


ABBILDUNG 33: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER
MESSSTELLE L108_4.

Gruppe C: Lokale Abweichungen

MESSTELLE L101-1:

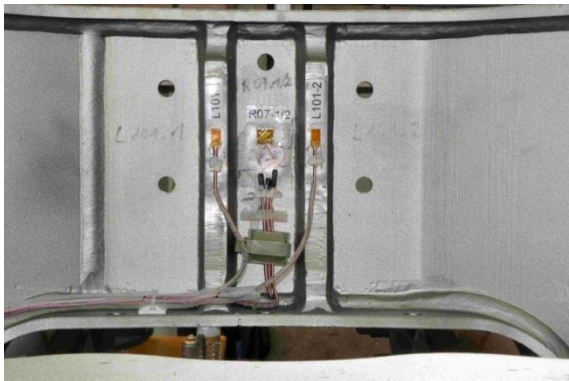


ABBILDUNG 34: L101_1 IM LABORVERSUCH.

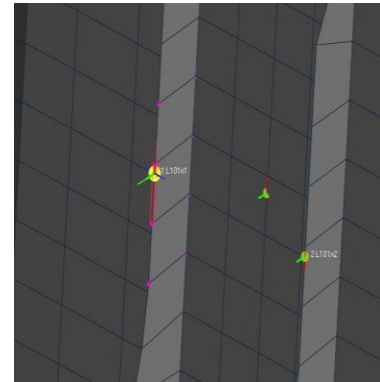


ABBILDUNG 35: L101_1 IM SIMULATIONSMODELL.

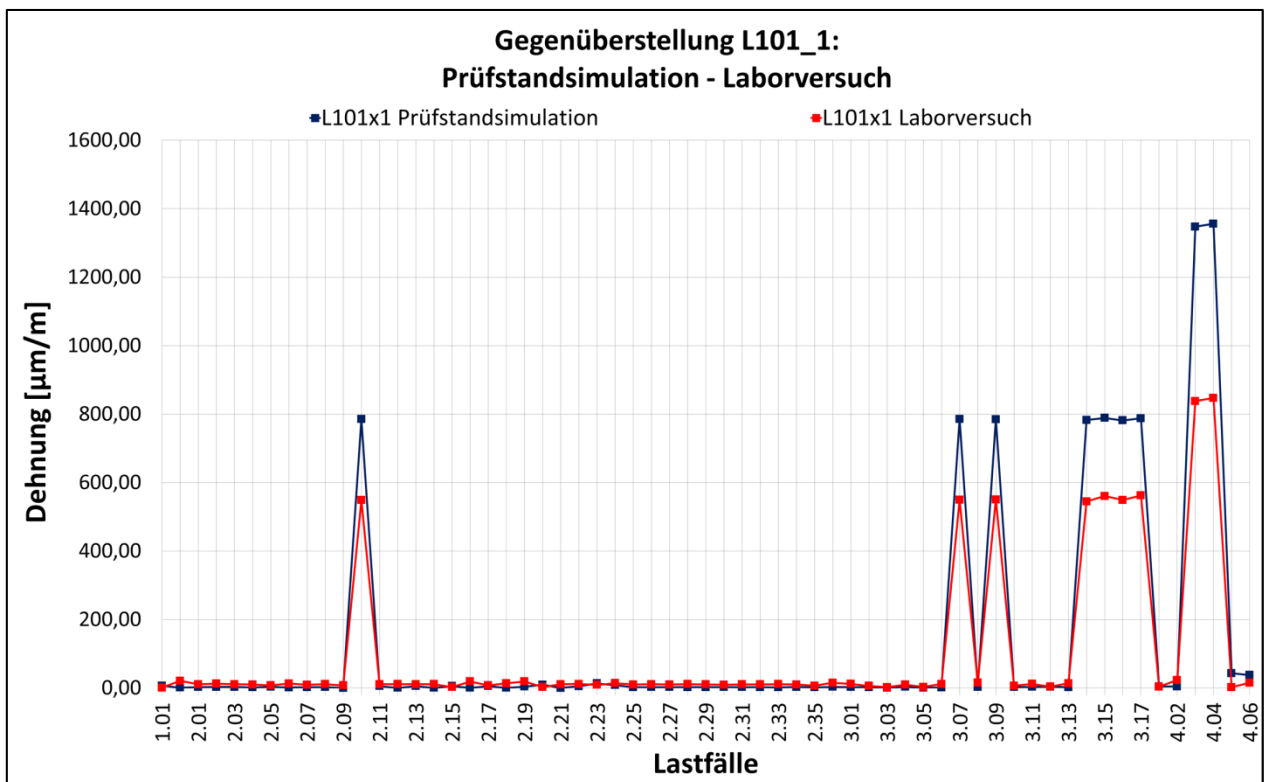


ABBILDUNG 36: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER MESSTELLE L101_1.

MESSSTELLE L102-1:

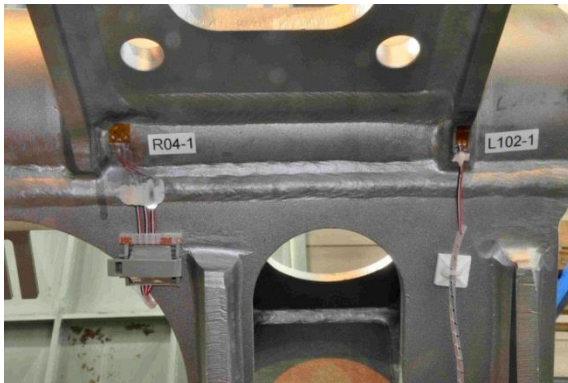


ABBILDUNG 37: L102_1 IM LABORVERSUCH.

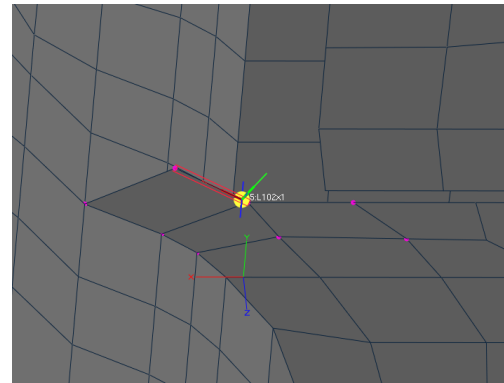


ABBILDUNG 38: L102_1 IM SIMULATIONSMODELL.

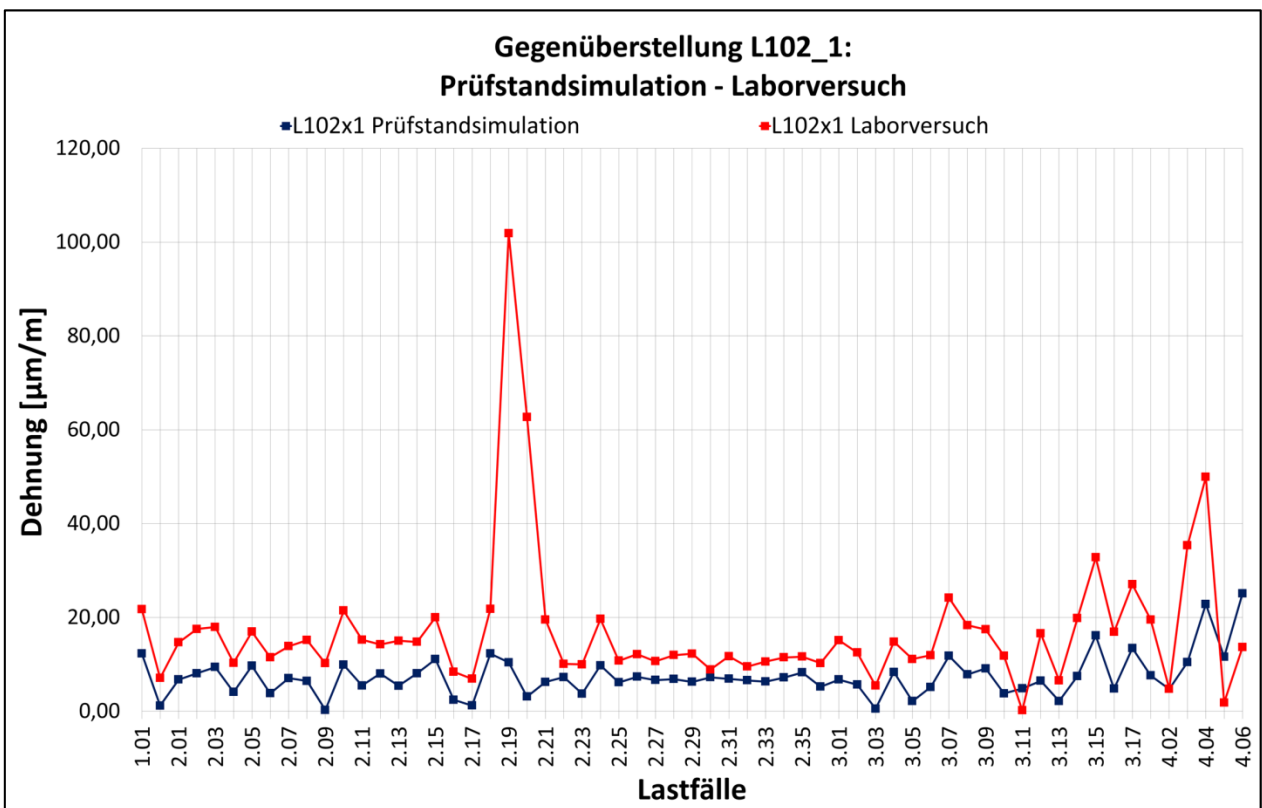


ABBILDUNG 39: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER MESSSTELLE L102_1.

MESSSTELLE L110-4:



ABBILDUNG 40: L110_4 IM
LABORVERSUCH.

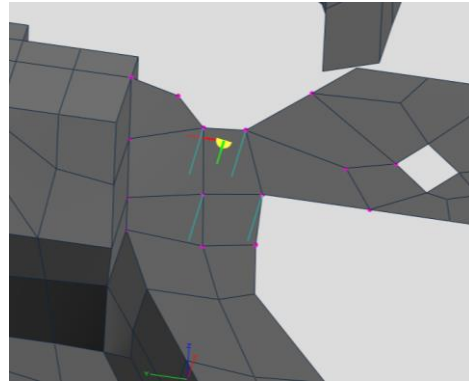


ABBILDUNG 41: L110_4 IM
SIMULATIONSMODELL.

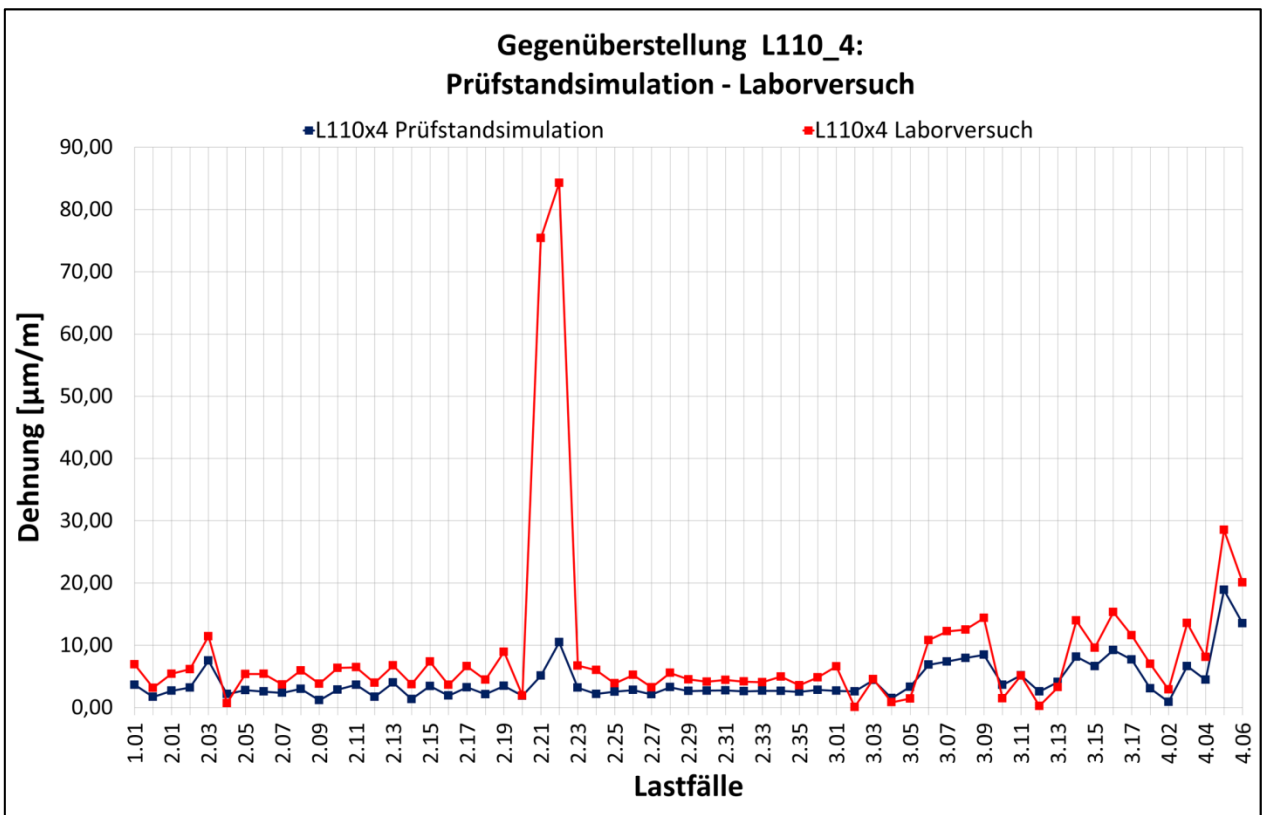


ABBILDUNG 42: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER
MESSSTELLE L110_4.

Gruppe D: Kein identer Kurvenverlauf

MESSSTELLE L106-4:

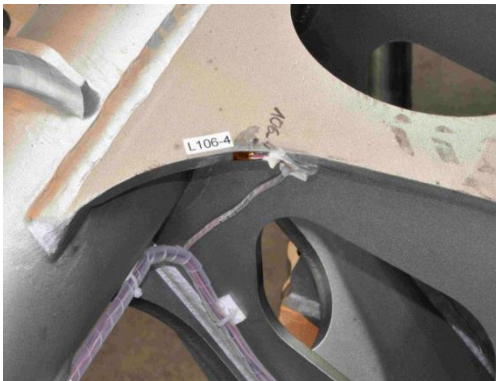


ABBILDUNG 43: L106_4 IM
LABORVERSUCH.

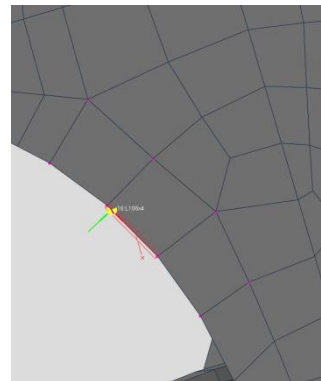


ABBILDUNG 44: L106_4 IM
SIMULATIONSMODELL.

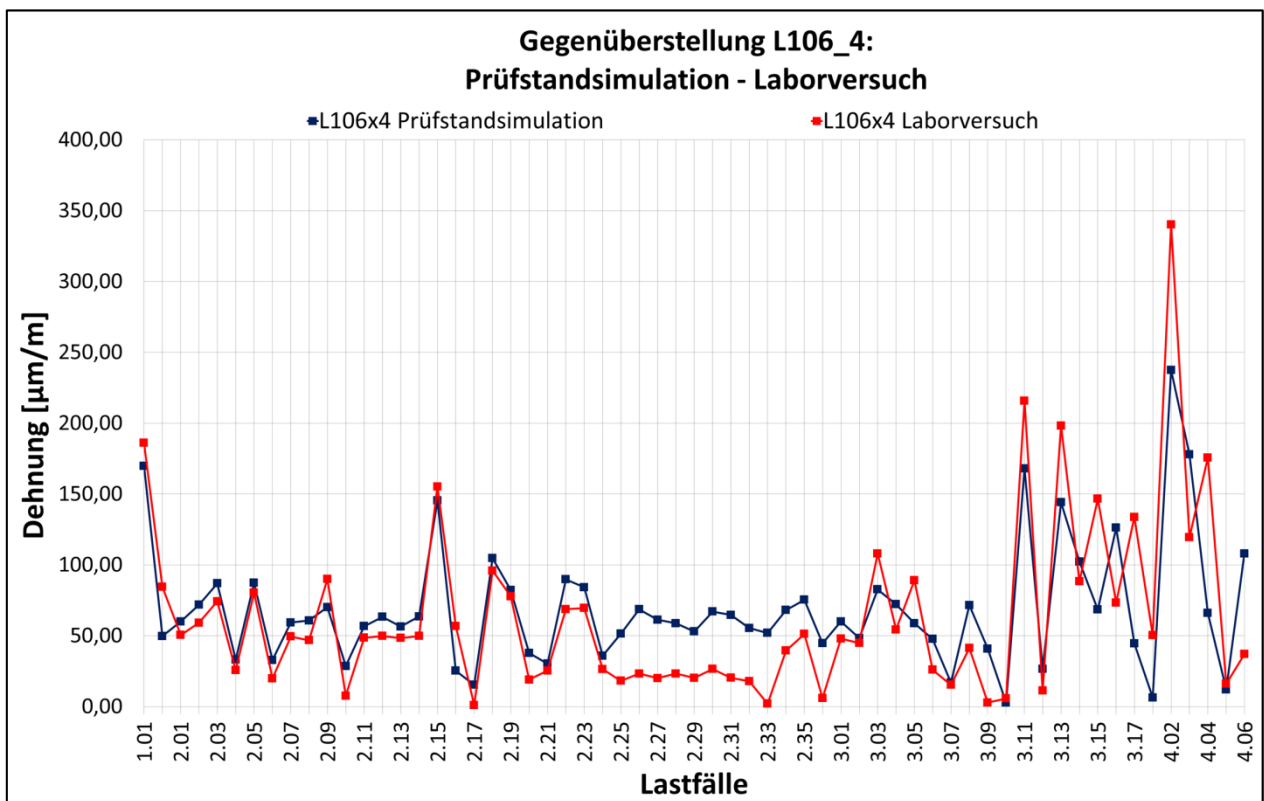


ABBILDUNG 45: GEGENÜBERSTELLUNG - LABORVERSUCH-PRÜFSTANDSIMULATION AN DER
MESSSTELLE L106_4.

7. Analyse

Die Gründe für die Abweichungen zwischen den Dehnungen im Laborversuch und den Dehnungen in der Prüfstandssimulation werden durch systematisches Abarbeiten bestimmter Einflüsse analysiert. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Prüfstandssimulation, da diese einfach angepasst, verändert und schnell neu gerechnet werden kann. Die möglichen Einflüsse auf die Unterschiede werden in der Fachliteratur genau diskutiert und sind weitgehend bekannt. Deshalb liegt in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk darauf herauszufinden, welche Einflüsse bei der Berechnung von Drehgestellrahmen große Auswirkungen auf die Ergebnisse haben und wie diese mit möglichst geringem Mehraufwand für zukünftige Berechnungsmodelle minimiert werden können.

7.1 Überprüfung der Reaktionskräfte

Beim statischen Festigkeitsversuch des Drehgestellrahmens befinden sich an allen Einspannstellen Kraftmessdosen, deren Zweck es ist, die auftretenden Reaktionskräfte zu messen. Dazu wurde zu Beginn des Laborversuches jeder der 18 hydraulischen Zylinder (Aktuator) einzeln mit einer definierten Last hintereinander beaufschlagt. Dadurch entstanden durch jeden einzelnen Aktuator Kräfte, die in die Struktur des Drehgestellrahmens eingeleitet und über die Einspannstellen wiederum abgeleitet wurden. Diese an den Einspannstellen auftretenden Kräfte werden Reaktionskräfte genannt. Die im statischen Laborversuch gemessenen Reaktionskräfte sind in *Abbildung 3: Prüfstandsschema eines Drehgestellrahmens für den Festigkeitsversuch* als grüne Pfeile dargestellt und mit einem „r“ gekennzeichnet. Wobei diese in folgende Gruppen unterteilt sind:

- r01 ... r04 Abstützung der Vertikalkräfte
- r05 Abstützung der Längskräfte (Drehzapfen)
- r06 ... r07 Abstützung der Querkräfte

Es muss zu aller erst sichergestellt werden, dass sich bei einem Prüfstands Aufbau keine Stellen befinden, an denen unbeabsichtigt Kräfte ein- beziehungsweise abgeleitet werden. Das heißt, der Zahlenwert der aufgetragenen Last muss mit der Summe aller gemessenen Reaktionskräfte übereinstimmen. Diese Überprüfung ist für die Prüfstands Simulation und für den Laborversuch durchzuführen. Mögliche Fehlerursachen können eine fehlerhafte Prüfstands dokumentation beziehungsweise ein Fehler beim Prüfstands Aufbau sein.

Durch einen Vergleich der auftretenden Reaktionskräfte aus dem Laborversuch, mit den Reaktionskräften aus der Prüfstands Simulation, kann die globale Steifigkeit des Drehgestellrahmens auf Übereinstimmung überprüft werden.

Die globale Steifigkeit gibt Aufschluss darüber, wie die in die Struktur eingeleiteten Kräfte zu den jeweiligen Einspannstellen weitergeleitet werden. Stimmen die Kräfte zwischen Laborversuch und Prüfstands Simulation überein, verhält sich die globale Struktur der beiden Rahmen gleich. Das ist eine für alle weiteren Betrachtungen essentielle Voraussetzung. Abweichungen können sich zum Beispiel durch fälschlicherweise weggelassene Bauteile des Drehgestellrahmens in der Prüfstands Simulation ergeben, um die Komplexität des Modells bewusst zu reduzieren.



ABBILDUNG 46: VERTIKAL- UND QUERKRAFTABSTÜTZUNG

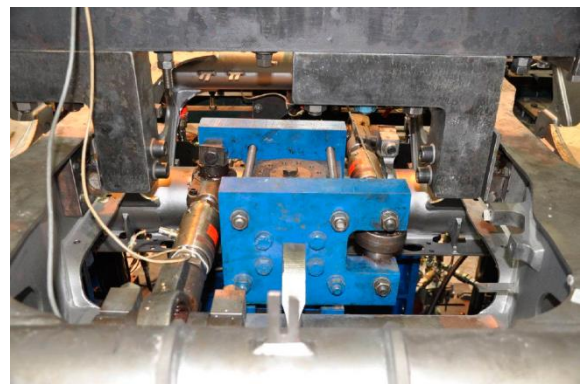


ABBILDUNG 47: LÄNGSKRAFTAUFNAHME (DREHZAPFEN)

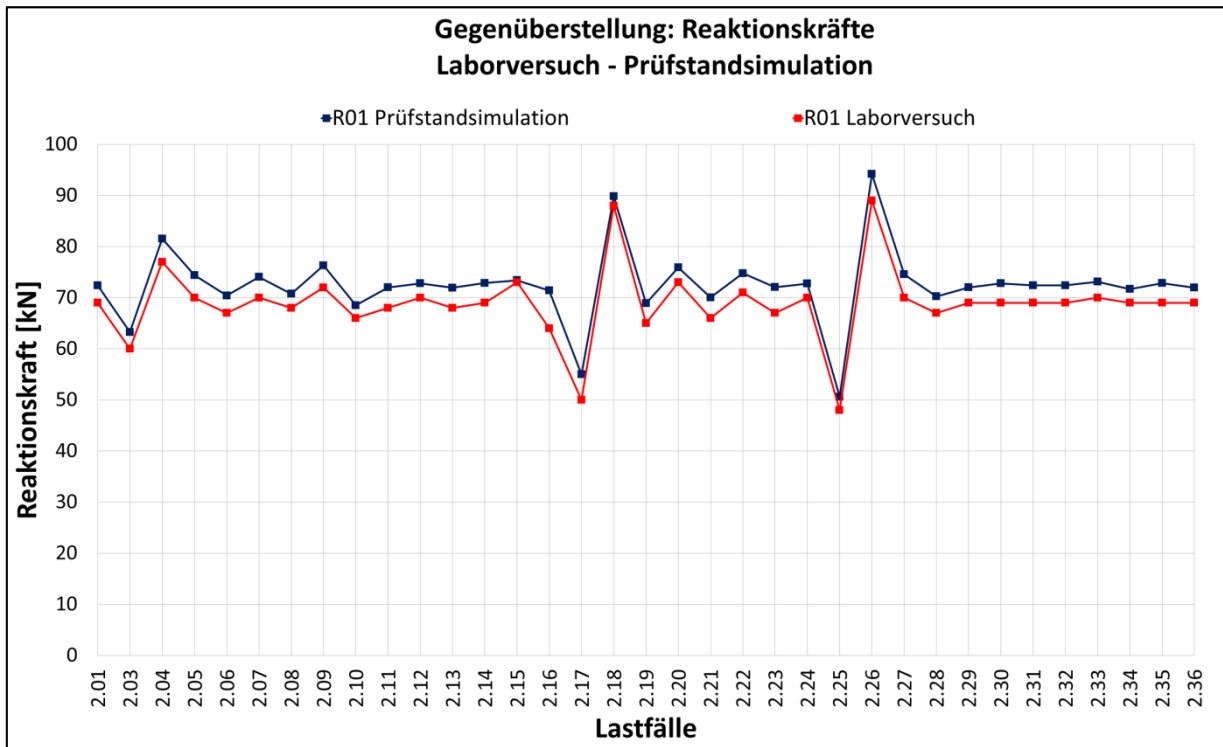


ABBILDUNG 48: GEGENÜBERSTELLUNG VON LABORVERSUCH UND PRÜFSTANDSIMULATION AM BEISPIEL R01 FÜR DIE VERTIKALE ABSTÜTZUNG.

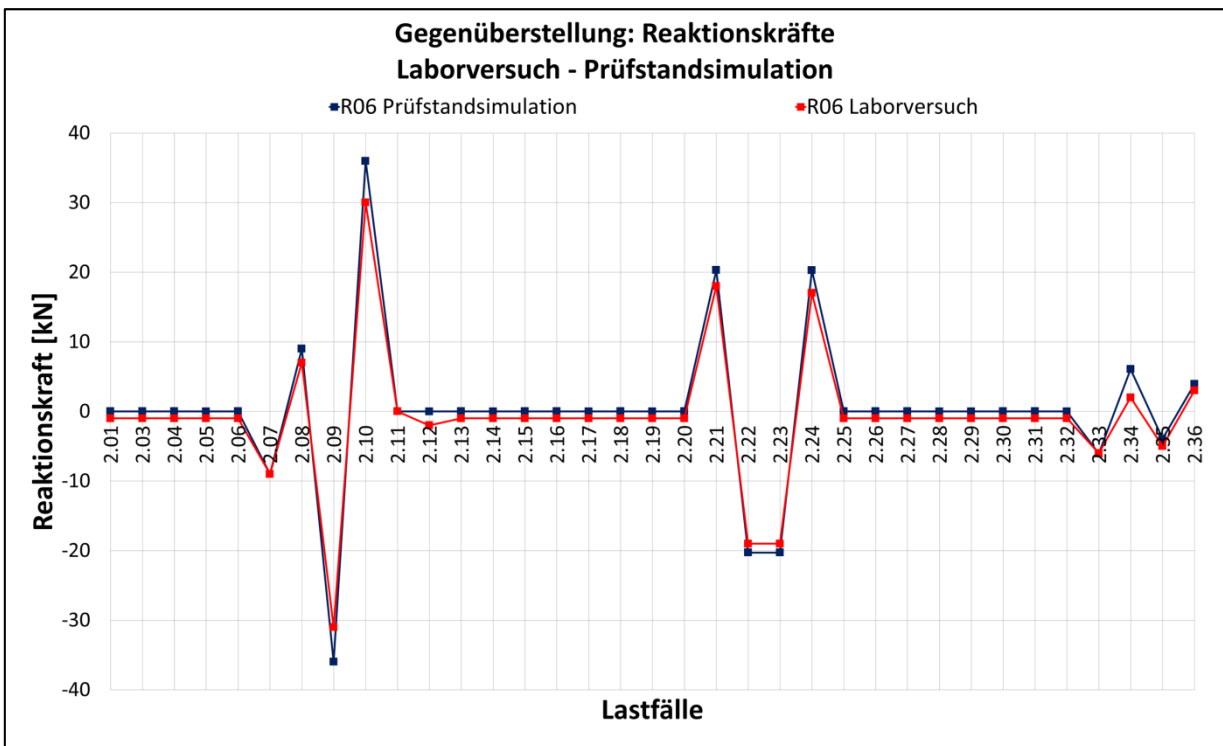


ABBILDUNG 49: GEGENÜBERSTELLUNG VON LABORVERSUCH UND PRÜFSTANDSIMULATION AM BEISPIEL R06 FÜR DIE ABSTÜTZUNG IN QUERRICHTUNG.

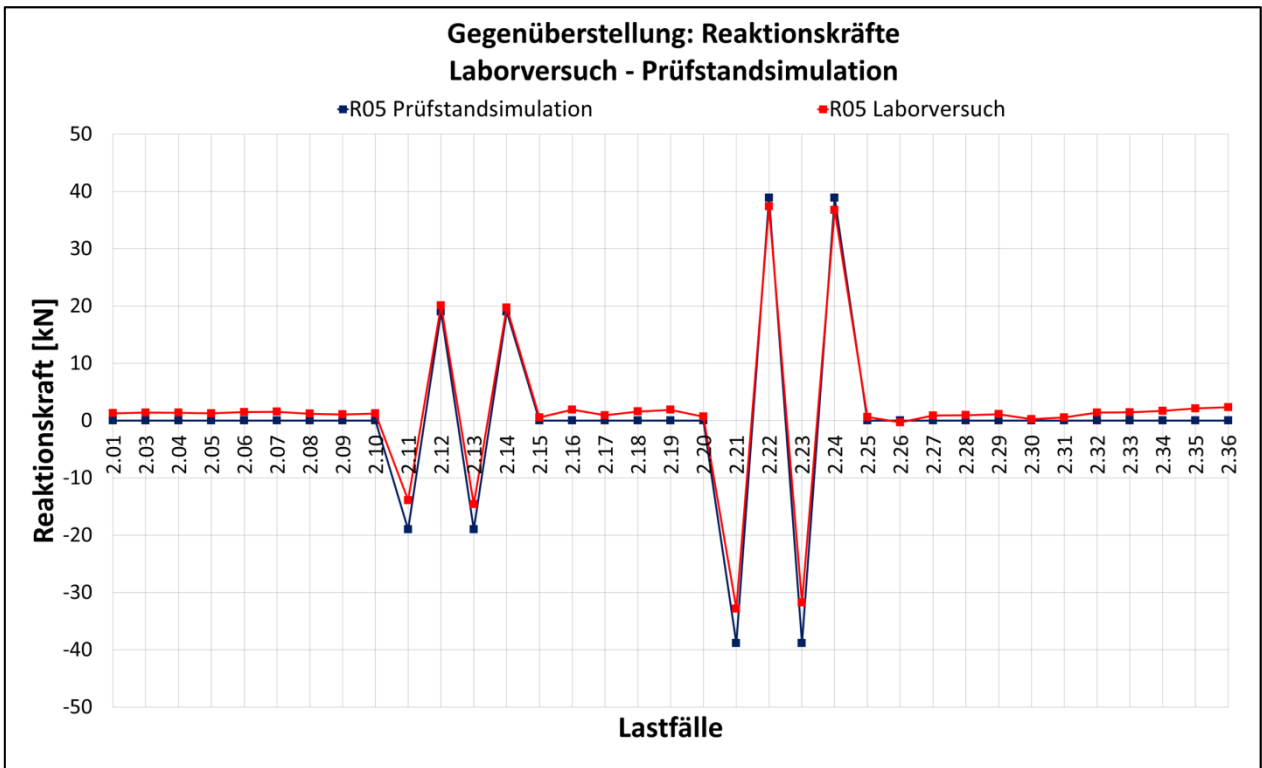


ABBILDUNG 50: GEGENÜBERSTELLUNG VON LABORVERSUCH UND PRÜFSTANDSIMULATION AM BEISPIEL R05 FÜR DIE ABSTÜTZUNG IN LÄNGSRICHTUNG.

Aus den Diagrammen in den Abbildungen 48, 49 und 50 ist eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Reaktionskräften aus dem Laborversuch und den ermittelten Werten aus der Prüfstandssimulation ersichtlich. Dadurch wird eine Analyse der weiteren Einflussgrößen ermöglicht.

7.2 Einfluss der Netzgröße

Die Netzgröße eines Finite-Elemente Modells hat starken Einfluss auf die lokale Steifigkeit des zu untersuchenden Bauteils. Das Ergebnis eines Finite-Elemente Modells kann durch die Verwendung einer falschen Netzgröße stark verfälscht werden.

Als allgemeine Regel für die Elementteilung gilt, dass an Stellen mit vermuteter hoher Spannungskonzentration das Netz engmaschig ausgeführt werden soll, wobei das Netz an Stellen mit einer gleichmäßigen Spannungskonzentration eher grob sein darf [KLEIN 2012, S. 311].

Diese allgemeine Regel erfordert vom Berechnungsingenieur viel Erfahrung und ist keine Garantie für ein „gutes Netz“. Weiters gibt es auch Gründe, um an gewissen Stellen ein bewusst grobes Netz zu erstellen. Diese Strategie wird zum Beispiel im Bereich von Schweißnähten verfolgt, was wiederum mit der Auslegungsrechnung von Schweißnähten zusammenhängt.

Um eine monotone Konvergenz zu erreichen, müssen die verwendeten Elemente vollständig sein und die Elemente sowie das Netz Kompatibilität aufweisen. Werden diese Voraussetzungen erfüllt, so kann durch schrittweises Verfeinern des FE-Netzes, die Genauigkeit erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass das alte Netz in das neue Netz eingebettet sein soll. Das bedeutet im mathematischen Sinn, dass der neue Raum von Finite-Elemente-Interpolationsfunktionen den zuvor verwendeten alten Raum enthält. Das wird durch die Unterteilung eines zuvor verwendeten Elements in zwei oder mehrere Elemente erreicht. Mit dieser Methode der Netzverfeinerung nimmt die Dimension des Finite-Elemente-Lösungsraums so lange kontinuierlich zu, bis dieser schließlich die exakte Lösung enthält [BATHE 2002, S. 268-269].

Für die Untersuchung wurde die Strukturkerbe L108_4 des Drehgestellrahmens ausgewählt. Die Messstelle befindet sich am Obergurt des Langträgers. Der Dehnungssensor ist an dieser Stelle ein linearer Dehnmessstreifen im vierten Quadranten. Das Schalennetz wurde an dieser Stelle schrittweise verfeinert und die Dehnung ist dabei jeweils in der Mitte des Kreisbogens ausgewertet worden. Der Radius der Strukturkerbe beträgt $R = 30\text{mm}$, der Öffnungswinkel $\alpha = 100^\circ$.

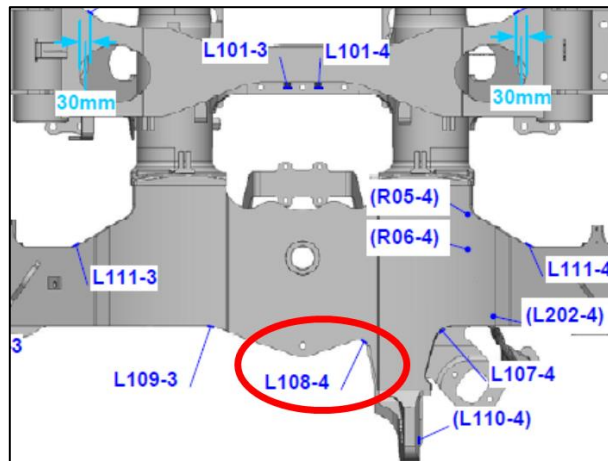


ABBILDUNG 51: DMS-MESSSTELLE L108_4.

Das ursprüngliche Simulationsmodell verwendete für die Nachbildung dieser Kerbe zwei Schalenelemente. Die weiteren Simulationen wurden mit 4 Elementen, 8 Elementen, 12 Elementen, 24 Elementen und 48 Elementen für diese Strukturkerbe durchgeführt. Wie in Abbildung 53 ersichtlich, liegen die Ergebnisse von 24 Elementen und 48 Elementen sehr nahe zusammen. Das bedeutet, dass man sich der exakten Lösung gut angenähert hat und deshalb wurde die Verfeinerung des Netzes bei 48 Elementen gestoppt.

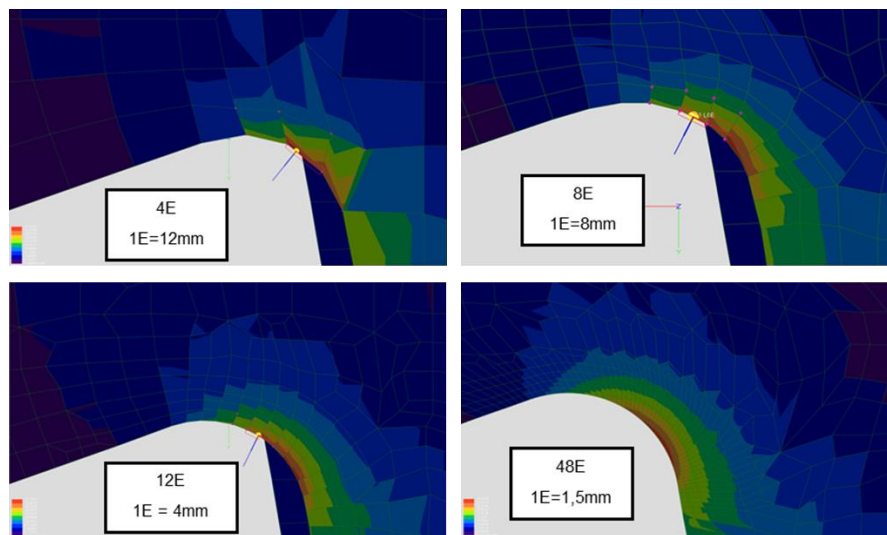


ABBILDUNG 52: VERFEINERTE NETZE MIT SPANNUNGSERGEBNISSEN DURCH EINEN AKTIVEN AKTUATOR A11 AN DER MESSSTELLE L108_4.

Die annähernd exakte Lösung aus der Prüfstandssimulation liefert etwas höhere Zahlenwerte für die Dehnungen, als die gemessenen Dehnungen aus dem Laborversuch. Daraus kann man schließen, dass noch weitere Einflüsse auf diese hier vorliegenden Ergebnisse wirken. Es ist aber deutlich zu erkennen, dass sich die

Dehnungen bereits durch den Einsatz von nur 8 Elementen sehr nahe an der näherungsweise „exakten Lösung“ befinden und diese zugleich auch zu einer wesentlich besseren Übereinstimmung mit den Dehnungen aus dem Laborversuch führen würden.

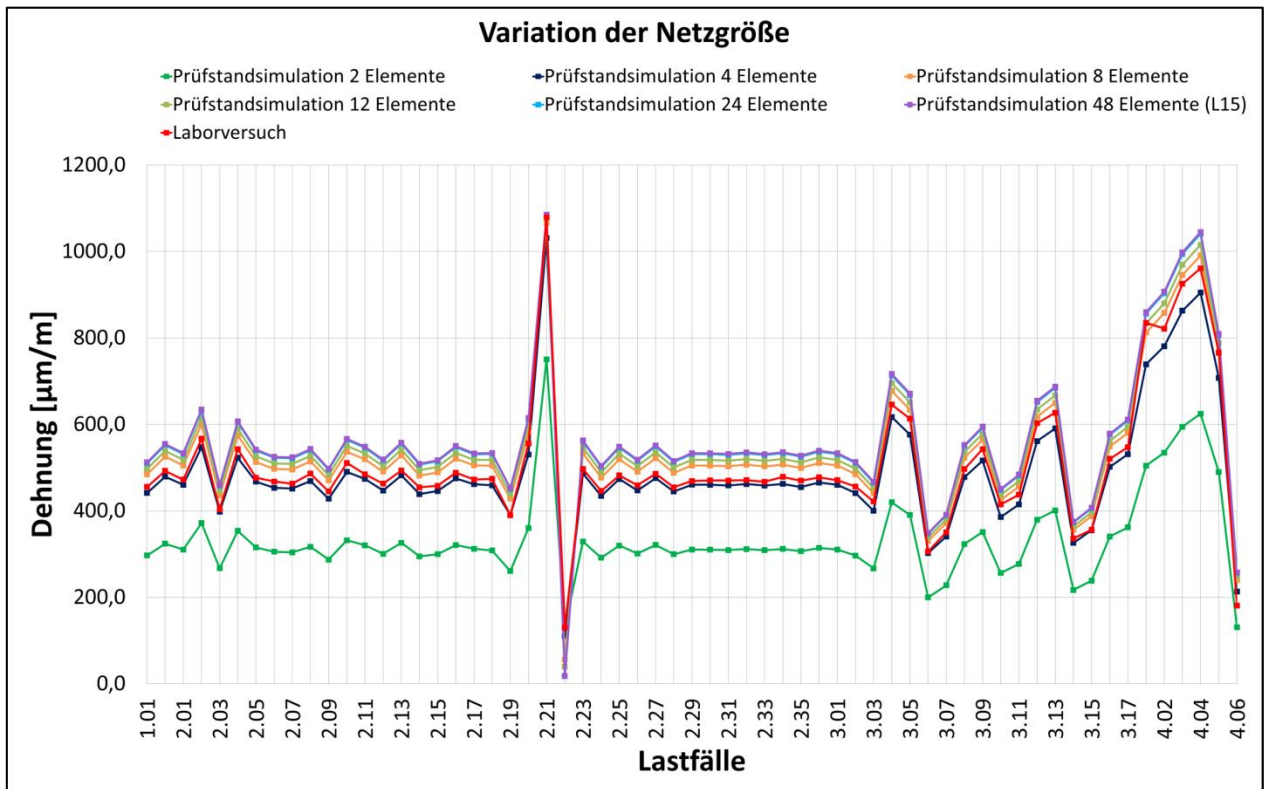


ABBILDUNG 53: SCHRITTWEISES VERFEINERTES FE-NETZES DER MESSSTELLE L108_4.

7.3 Exakte Positionierung von Dehnungssensoren

Für den Laborversuch gibt es eine interne Anleitung, nach der Dehnmessstreifen positioniert werden müssen:

Die Bemaßung der DMS bezieht sich immer auf die Mitte des Messgitters. Wenn nicht anders spezifiziert, sind die DMS wie folgt anzuordnen:

- *DMS sind immer in 2mm Abstand von der Schweißnaht zu positionieren*
- *DMS sind in Bögen immer in Bogenmitte zu platzieren*
- *DMS sind an Stirnflächen von Blechen immer mittig anzubringen*
- *Das Messgitter b , muss bei gestapelten DMS-Rosetten immer normal zur Schweißnaht stehen.*

[SIEMENS]

Diese Anforderungen können jedoch sowohl in der Prüfstandssimulation als auch im Laborversuch nicht immer vollständig erfüllt werden. Als Gründe für Abweichungen kann für die Prüfstandssimulation die für die Finite-Elemente Methode notwendige Diskretisierung der Geometrie genannt werden, wobei sich beim Laborversuch eher Probleme durch Messungenauigkeiten bzw. durch fehlende Messmöglichkeiten ergeben.

7.3.1 Einfluss auf einen DMS durch horizontale Positionsabweichung

Für diese Untersuchung wird wiederum die Strukturkerbe L108_4 mit dem verfeinerten Netz von 48 Elementen verwendet. Der Grund liegt darin, dass die Kerbe, modelliert man diese mit 48 Elementen, der realen Kerbe aus der Fertigung geometrisch am nächsten kommt. Über einen großen Teil der Kerbe wurden im Abstand von 1,5mm, an der Stirnseite virtuelle DMS positioniert.

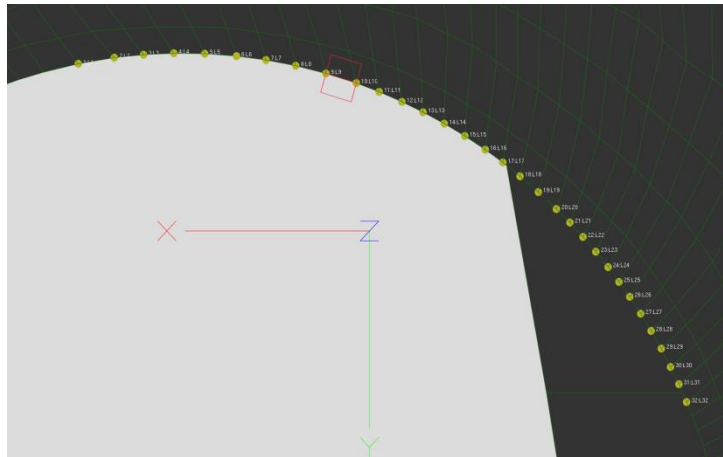


ABBILDUNG 54: VERTEILUNG DER VIRTUELLEN DEHNMESSSTREIFEN ÜBER DIE STRUKTURKERBE L108_4.

Die Auswertung der Dehnmessstreifen über alle Lastfälle erfolgte wiederum in einem Diagramm, wobei zusätzlich das Ergebnis aus dem Laborversuch dargestellt wurde.

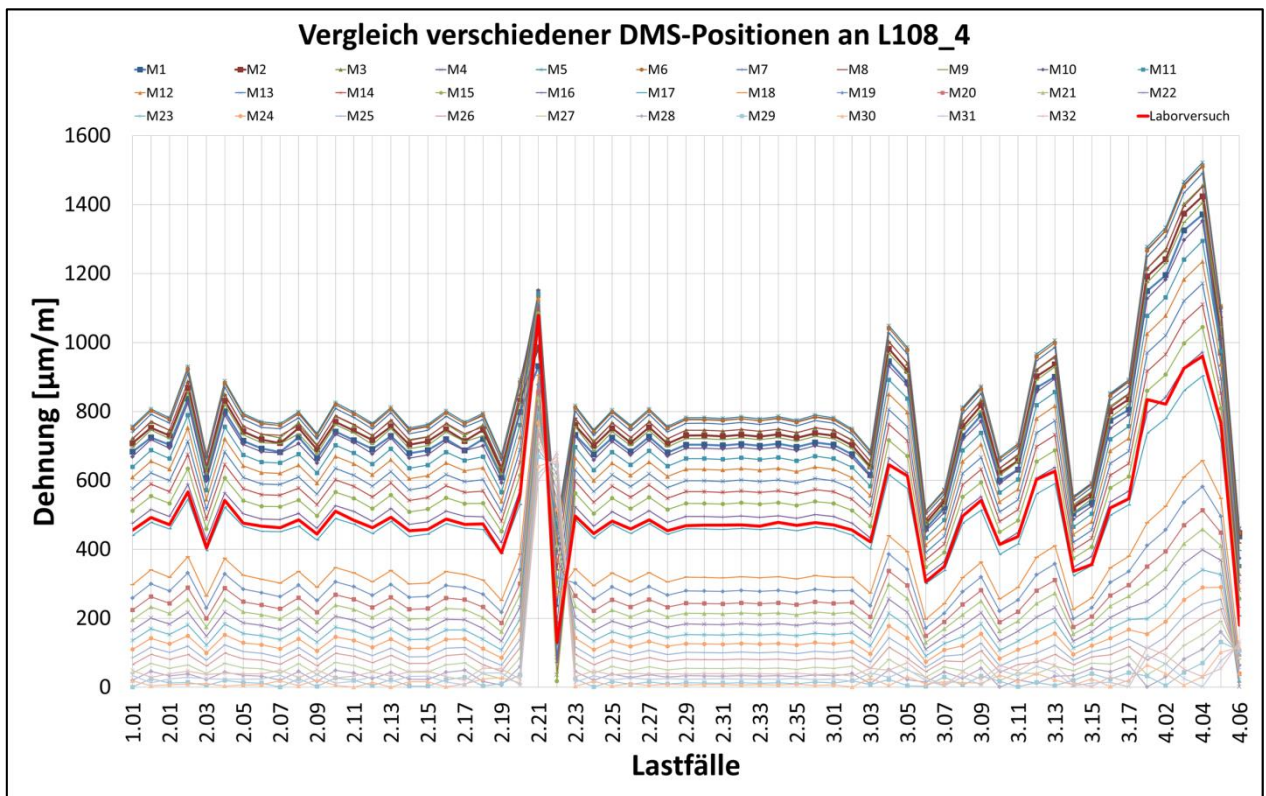


ABBILDUNG 55: VERGLEICH VERSCHIEDENER DMS-POSITIONEN AN DER MESSSTELLE L108_4.

Um ein aussagekräftigeres Diagramm zu erhalten, lässt sich die laut Anweisung geometrisch exakte Position des DMS mit Hilfe einer geeigneten Konstruktion im Programm *NX I-deas 6* bestimmen. Somit befindet sich die geometrisch exakte Position des DMS laut Definition an der Stelle M15.

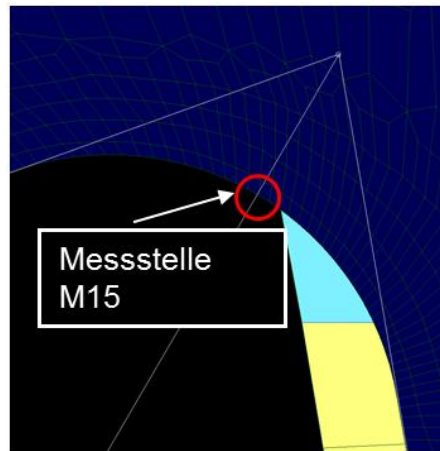


ABBILDUNG 56: ERMITTLUNG DER EXAKTEN DMS-POSITION.

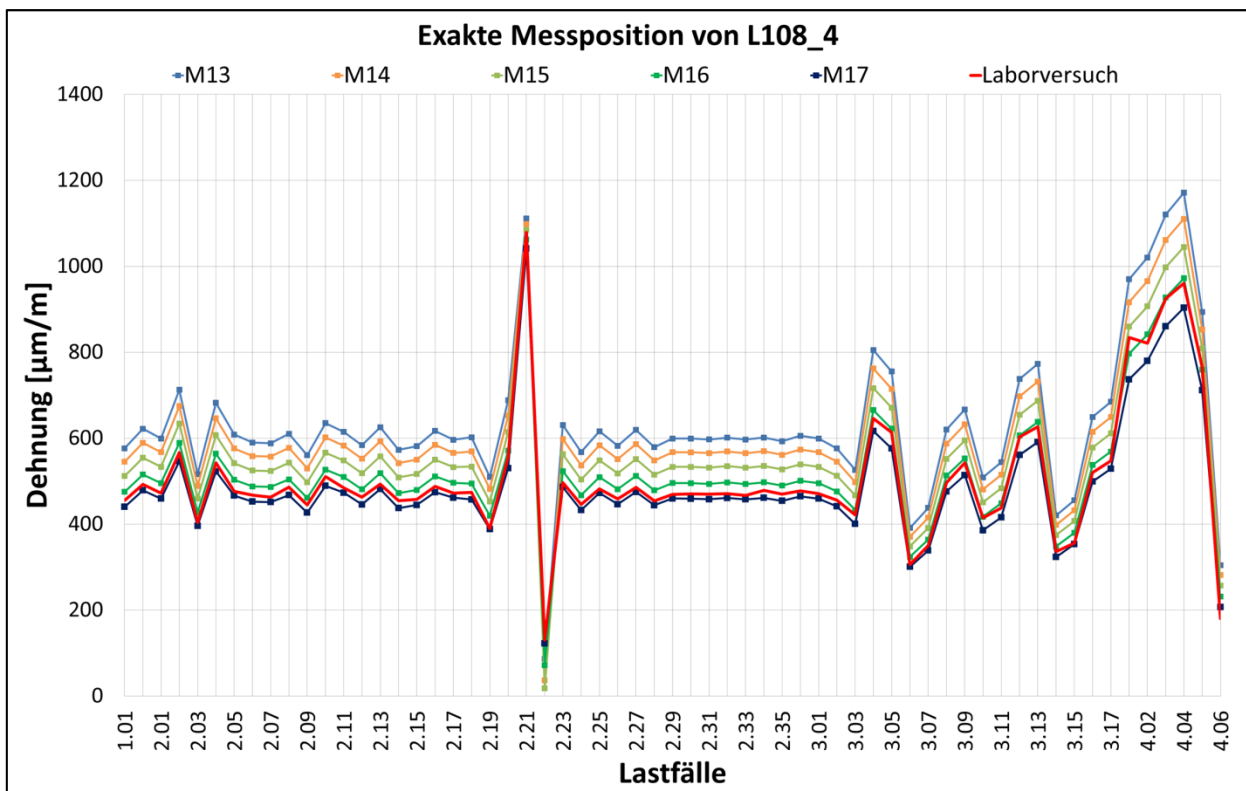


ABBILDUNG 57: GEGENÜBERSTELLUNG DER THEORETISCH EXAKTEN POSITION DES VIRTUELLEN DMS MIT DEM DMS AUS DEM LABORVERSUCH.

In Abbildung 57 ist ersichtlich, dass sich die Dehnungen aus dem Laborversuch zwischen den Messstellen M16 und M17 aus der Prüfstandssimulation befinden. Die Dehnungen aus der geometrischen Mitte der Strukturkerbe liegen etwas darüber. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die ausgegebenen Dehnungen der virtuellen Dehnmessstreifen rein punktuell sind. Im Vergleich dazu hat der im Laborversuch verwendete reale Dehnmessstreifen eine Länge von 6mm und eine Breite von 4mm. Das bedeutet, dass es sich hierbei um gemittelte Dehnungen in einem Bereich von 6mm mal 4mm handelt. Geht man davon aus, dass der DMS im Laborversuch geometrisch exakt positioniert wurde, so müssen für ein aussagekräftiges Ergebnis aus der Prüfstandssimulation die Dehnungen der Messpunkte M13, M14, M15, M16 und M17 auf den Mittelwert gebracht werden. Daraus folgt dann eine Mittelung der Dehnungen über 6mm Länge.

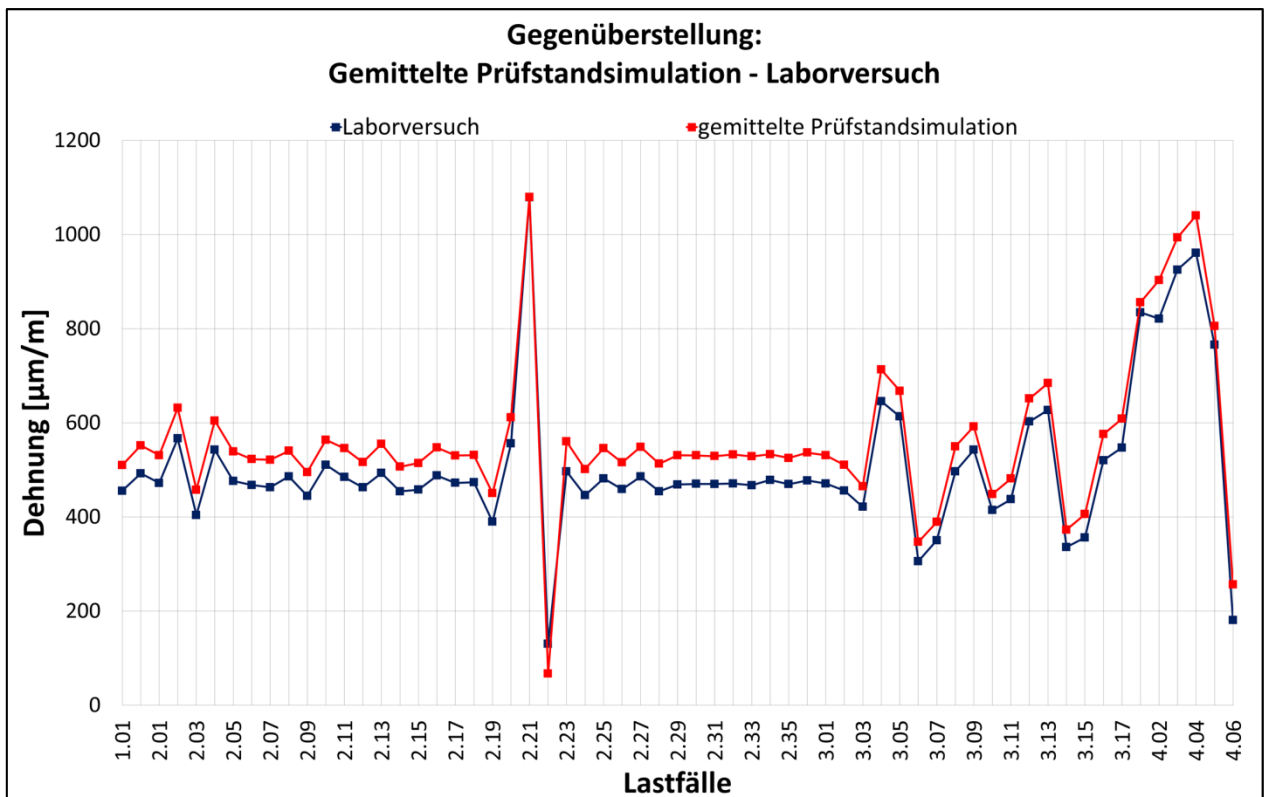


ABBILDUNG 58: GEGENÜBERSTELLUNG DER GEMITTELTEN PRÜFSTANDSERGEBNISSE MIT DEM ERGEBNIS AUS DEM LABORVERSUCH.

Der GAP aus der Abbildung 58 zwischen den Dehnungen aus dem Laborversuch und der Prüfstandssimulation lässt die Vermutung zu, dass die DMS-Positionen zwischen dem realen Laborversuch und der Prüfstandssimulation an der Messstelle L108_4 nicht vollständig übereinstimmen. Dieses Problem kann jedoch durch die Einflüsse von Fertigungstoleranzen, Messungenauigkeiten des Messwerkzeuges für die Positionierung des DMS am realen Drehgestell und Ungenauigkeiten bei der Diskretisierung des Simulationsmodells, nur äußerst aufwendig minimiert werden.

7.3.2 Einfluss auf einen DMS durch vertikale Positionsabweichung

Für die Untersuchung des durch eine vertikale Lageänderung entstehenden Einflusses auf einen DMS, wird der virtuelle DMS sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene in der geometrischen Mitte positioniert und von da aus, jeweils in 0,7mm Schritten zweimal in y - Richtung nach oben bzw. nach unten verschoben.

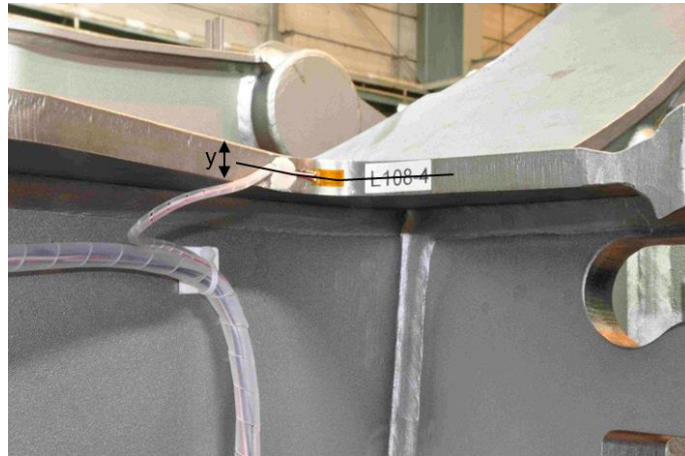


ABBILDUNG 59: VERTIKALE LAGEÄNDERUNG DES DMS L108_4.

Abbildung 60 zeigt, dass die Beeinflussung des Messergebnisses eines virtuellen DMS durch vertikale Lageänderung der Messstelle L108_4 geringer ist, als durch eine horizontale Lageänderung. Diese Aussage ist jedoch nur für die hier betrachtete Messstelle gültig und kann nicht ohne zusätzliche Untersuchungen auf andere Strukturkerben verallgemeinert werden. Der Grund dafür ist, dass die Art der Beanspruchung in der lokalen Kerbe, bei diesen Untersuchungen einen großen Einfluss hat. Die Art der Beanspruchung kann sich jedoch von Messstelle zu Messstelle stark verändern. Im vorliegenden Fall handelt es sich um den Obergurt des Langträgers, der hauptsächlich Membranspannungen ausgesetzt ist. Bei Blechen mit großem Biegespannungsanteil können sich im Gegensatz dazu große Unterschiede der Spannungen über die Blechdicke ergeben. Die Ergebnisse aus 7.3.1 und 7.3.2 dienen aus diesem Grund vor allem dazu, ein Gefühl für die Größe von möglichen Einflüssen durch Ungenauigkeiten bei der Positionierung von Dehnmessstreifen zu bekommen, um in Zukunft vermehrt darauf achten zu können.

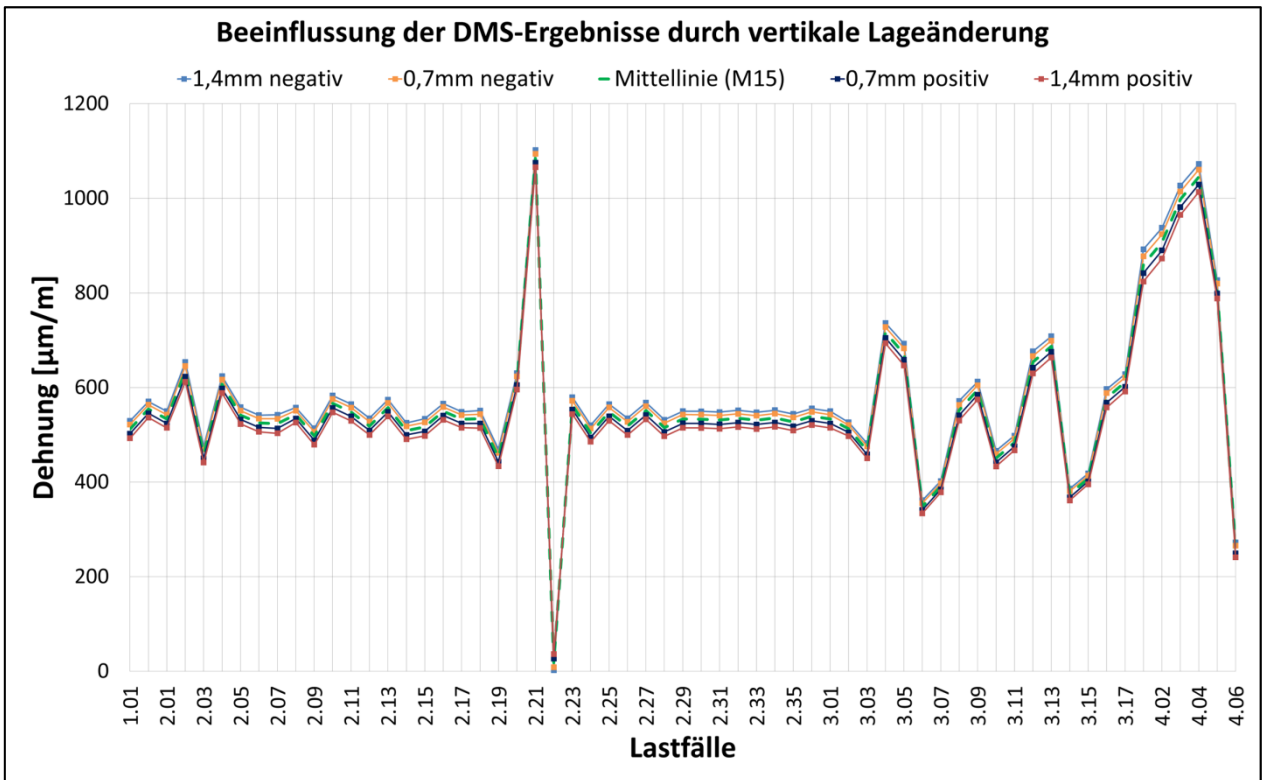


ABBILDUNG 60: DER EINFLUSS VERTIKALER LAGEÄNDERUNG AUF DEN DMS AN DER MESSSTELLE L108_4.

7.4 Beeinflussung durch Abweichungen von der Nennblechdicke

Die in der Fertigung zum Bau des Drehgestellrahmens verwendeten Bleche sind durch den Standard EN 10029:1991 genormt. Diese Norm beinhaltet die zulässigen Grenzmaße für die Dicke der einzelnen Blechstärken.

TABELLE 2: GRENZABMAßE FÜR DIE DICKE VON BLECHEN [EN 10029:1991, S. 4].

Nennstärke	Grenzabmaße der Dicke (siehe 7.1.1) ¹⁾					
	Klasse A		Klasse B		Klasse C	
	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß
≥ 3 < 5	-0,4	+0,8	-0,3	+0,9	0	+1,2
≥ 5 < 8	-0,4	+1,1	-0,3	+1,2	0	+1,5
≥ 8 < 15	-0,5	+1,2	-0,3	+1,3	0	+1,7
≥ 15 < 25	-0,6	+1,3	-0,3	+1,6	0	+1,9
≥ 25 < 40	-0,8	+1,4	-0,3	+1,9	0	+2,2
≥ 40 < 80	-1,0	+1,8	-0,3	+2,5	0	+2,8
≥ 80 < 150	-1,0	+2,2	-0,3	+2,9	0	+3,2
≥ 150 ≤ 250	-1,2	+2,4	-0,3	+3,3	0	+3,6

¹⁾ Die Grenzabmaße gelten nicht für durch Schleifen ausgebesserte Zonen (siehe 7.1.2)

Wird nun für die jeweilige Nennstärke das „obere Abmaß“ halbiert und die Nennstärke dazu addiert, so erhält man das obere Grenzmaß für die jeweilige Blechstärke.

Beispiel: Berechnung des unteren und oberen Grenzmaßes für ein Blech der Klasse C in Tabelle 2, mit einer Nennstärke von 16mm.

$$\text{Unteres Grenzmaß} = 16\text{mm} + 0\text{mm}/2$$

$$\text{Unteres Grenzmaß} = 16\text{mm}$$

$$\text{Oberes Grenzmaß} = 16\text{mm} + 1,9\text{mm}/2$$

$$\text{Oberes Grenzmaß} = 16,95\text{mm}$$

Das bedeutet, dass ein zugekauftes Blech mit einer Blechstärke von 16mm, eine Dicke zwischen 16 mm und 16,95mm aufweisen muss. Diese Situation stellt für die Auslegungsrechnung des Drehgestellrahmens eine sehr große Herausforderung dar. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass für die Auslegungsrechnung mit der Finite-Elemente-Methode, die genormten Mindestdicken der Bleche herangezogen werden müssen, um den schlechtesten Fall abzudecken.

Um herauszufinden, ob die verbauten Bleche stark von der Mindestdicke abweichen, wurde von mir eine kleine Anzahl an Blechen in der Fertigung vermessen. Durchgeführt wurden die Messungen mit einer Schiebelehre des Typs „Mitutoyo“ der Genauigkeitsklasse 0,05mm.

Um ein Möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu bekommen, wurden die Messungen direkt in der für dieses Drehgestell zuständigen Fertigungsstraße durchgeführt. Der Grund für die geringe Anzahl an Messungen pro Blechstärke, liegt an der zum Teil sehr schweren Zugänglichkeit zu Bauteilen innerhalb der Fertigung.

TABELLE 3: IN DER FERTIGUNG GEMESSENE BLECHDICKEN.

Nennmaß	Messung I [mm]	Messung II [mm]	Messung III [mm]	Mittelwert [mm]	Zulässige Obergrenze [mm]
8mm	8,45	8,4	8,3	8,38	8,85
14mm	14,65	14,8	14,75	14,73	14,85
16mm	16,65	16,5	16,55	16,57	16,95
18mm	18,6	18,75	18,55	18,63	18,95
20mm	20,75	20,6	20,55	20,63	20,95

Um den Einfluss der Materialdicke auf die Ergebnisse der Finite-Elemente Rechnung zu untersuchen, wurde wieder die Messstelle L108_4 herangezogen, da diese mit bereits 48 Elementen gut nachgebildete Strukturkerbe gute Voraussetzungen besitzt, ein aussagekräftiges Ergebnis zu liefern. Es wurden zwei Prüfstandsimulationen durchgeführt. Dabei wurden immer alle im Drehgestell verwendeten Blechstärken

verändert, um nicht nur lokale Auswirkungen zu berücksichtigen. Im ersten Schritt wurden die Blechstärken auf die Mitte des Toleranzbereiches angehoben. Im darauffolgenden Schritt wurden die maximal zulässigen Blechstärken verwendet.

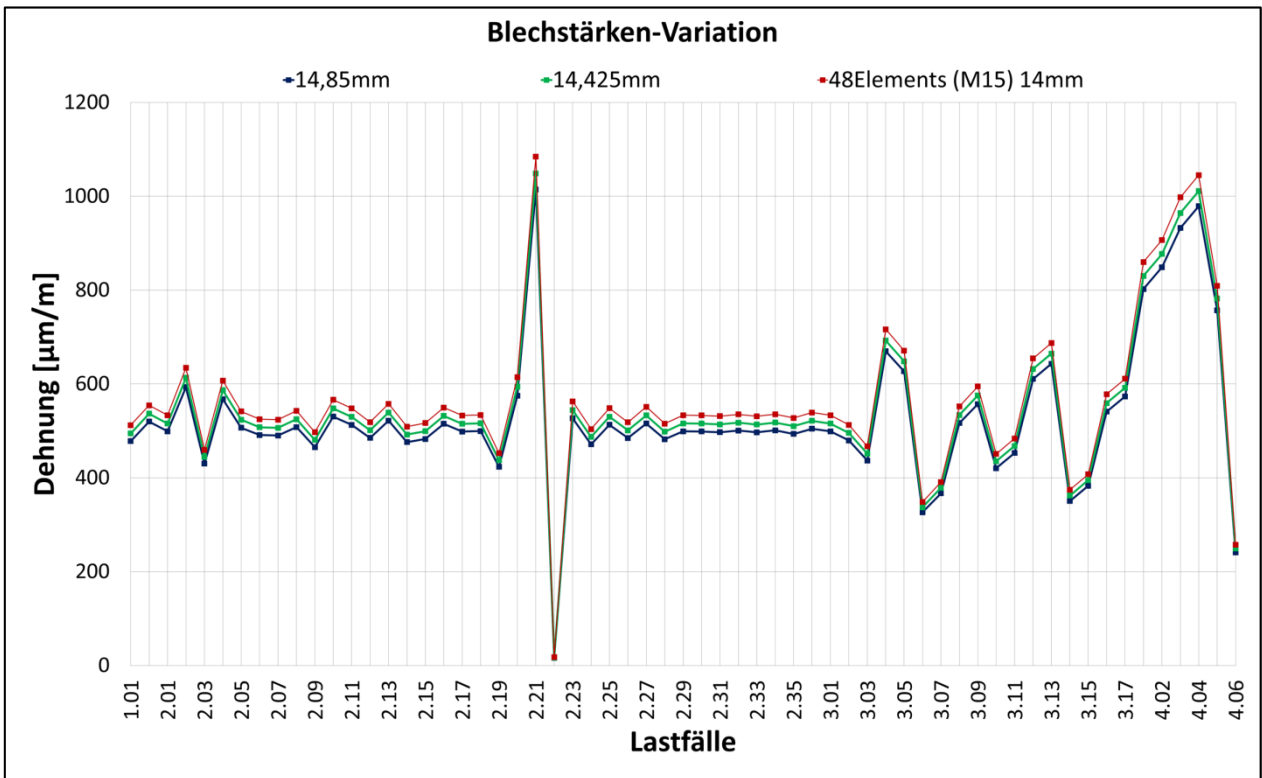


ABBILDUNG 61: VARIATION DER BLECHSTÄRKE AN DER MESSSTELLE L108_4.

Wie erwartet ist in Abbildung 61 ersichtlich, dass die Dehnungen in der Messstelle durch die zunehmende Blechdicke abnehmen. Dieser Einfluss kann nur durch engere Toleranzen minimiert werden, was mit steigenden Kosten von Seiten des Blechlieferanten verbunden ist.

Eine besondere Situation, die sich aufgrund der schwankenden Blechdicken ergeben kann und eventuell einen großen Einfluss auf die Struktur des Drehgestells haben könnte, entsteht beim Aufeinandertreffen zweier Bleche, bei dem sich eine Blechstärke im untersten und eine Blechstärke im obersten Toleranzbereich befindet. Dieser Fall wurde in dieser Arbeit nicht untersucht und wird in *Kapitel 9: Ausblick* festgehalten.

7.5 Einfluss durch die Art der Krafteinleitung

Bei der Prüfstandssimulation werden für die Aufbringung von Lasten in die Struktur die bereits behandelten Constraint-Elemente verwendet. Diese starren Kopplungselemente dienen zur Krafteinleitung in die Struktur des Drehgestellrahmens. In der realen Struktur entspricht die Krafteinleitung meist einem sehr komplexen Kontaktzustand.

Als Kontaktzustand bezeichnet man den Kontakt zwischen zwei oder mehreren Körpern. Dies führt zu einem nicht-linearen Verhalten, welches sich nur äußerst schwierig berechnen lässt. Kontaktprobleme sind sehr vielfältig und umfassen den reibungsfreien Kontakt bei kleinen Verschiebungen genauso wie den reibungsbehafteten Kontakt unter allgemeinen nichtelastischen Bedingungen und großen Verzerrungen. In all diesen Fällen kann zwar die gleiche Formulierung des Kontaktzustandes verwendet werden, jedoch kommen hier zusätzlich zu den geometrischen und materiellen Nichtlinearitäten auch noch durch die Kontaktbedingungen verursachte Nichtlinearitäten hinzu [BATHE 2002, S.737].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kontaktrechnung nicht weiter betrachtet, da sie für den alltäglichen Einsatz bei der Simulation von Drehgestellrahmen zu zeitintensiv wäre und somit keine Alternative darstellt.

Hier wird nun anhand der Messstelle L101_1 der Einfluss von verschiedenen Arten der Krafteinleitung genauer untersucht. Die Messstelle L101_1 befindet sich an der Querpufferkonsole, auf der Stirnseite einer zur Verstärkung der Struktur eingebauten Rippe. Wie bereits *in Abbildung 36: Gegenüberstellung - Laborversuch-Prüfstandssimulation an der Messstelle L101_1* ersichtlich ist, herrscht zwischen den Dehnungen aus der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch bei gewissen Lastfällen ein großer GAP. In diesem Fall sind die Dehnungen der Prüfstandssimulation an der Messstelle L101_1 immer dann zu groß, wenn an der Rückseite der Querpufferkonsole der Aktuator aktiv ist. Das bedeutet, dass die an dieser Stelle in die Struktur eingeleitete Kraft, in der Prüfstandssimulation eine zu große lokale Verformung bewirkt, welche auf eine falsche Modellierung der Krafteinleitung hindeutet. Im ursprünglichen Modell wurde die Last mittels Constraint-Elementen auf eine Schalenplatte übertragen. Von dieser

Platte aus wird über Beam-Elemente und erneut über Constraint-Elemente die Last in die Bohrungen des Querpuffers eingeleitet.

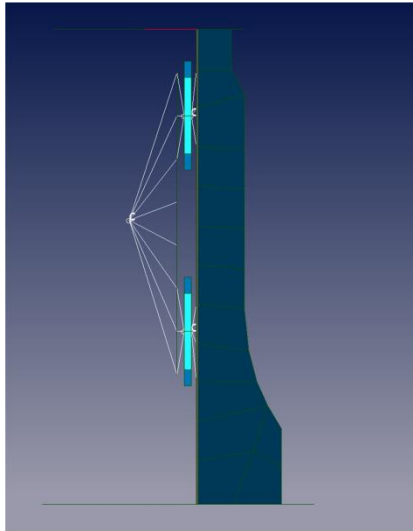


ABBILDUNG 62: KRAFTEINLEITUNG MITTELS EINER SHELL-PLATTE, BEAM-ELEMENTEN UND CONSTRAINT-ELEMENTEN.

Beim Einsatz dieses Elements, können Probleme auftreten, wenn die darunter liegende Struktur „weich“ konstruiert ist, da somit unverhältnismäßig große Verformungen auftreten.

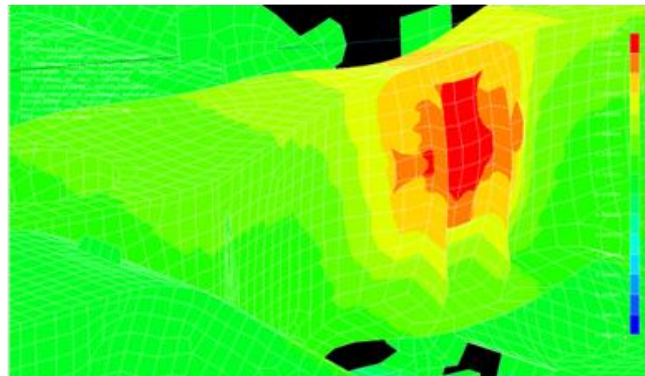


ABBILDUNG 63: VERFORMUNGEN AUF GRUND DER IN ABBILDUNG 62 VERWENDETEN KRAFTEINLEITUNG.

Um dieses Problem zu minimieren, wurde versucht, die Schalen-Platte, die Beam-Elemente und die Constraint-Elemente, durch einen Volumenkörper (Solid) in Form einer Platte zu ersetzen. Wichtig ist dabei, dass diese Platte über die gleiche Diskretisierung des FE-Netzes verfügt, wie die Struktur der Konsole, an der die Platte angefügt werden soll. Mit dem Befehl „Knoten verschmelzen“ im Programm *NX I-deas 6*

können die übereinander liegenden Knoten miteinander verschmolzen werden. Damit kann ohne zusätzliche Kontaktstelle, die Solid-Platte nahtlos an die Querpufferkonsole angeschlossen werden.

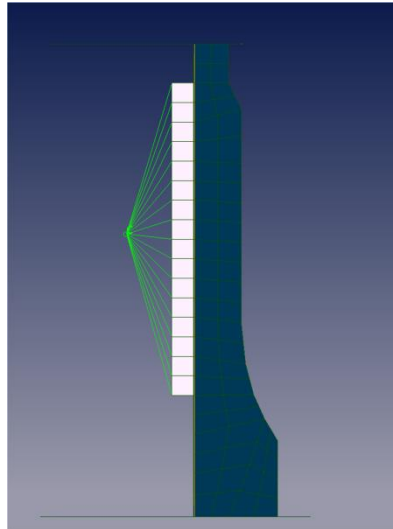


ABBILDUNG 64: KRAFTEINLEITUNG MIT EINER 10MM DICKEN SOLID-PLATTE.

Durch das verwenden der 10mm dicken Solid-Platte als Krafteinleitung in die Struktur, konnte eine deutliche Reduktion der lokalen Verformungen erreicht werden.

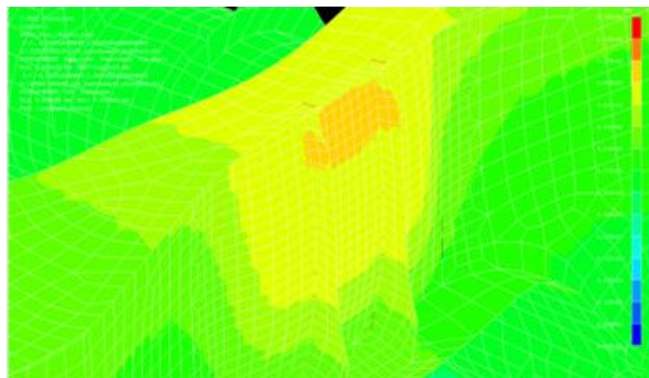


ABBILDUNG 65: VERFORMUNGEN AUF GRUND DER IN ABBILDUNG 64 VERWENDETEN KRAFTEINLEITUNG IN DIE QUERPUFFERKONSOLE.

Im Diagramm in der Abbildung 66 wird ersichtlich, dass die in der Prüfstandssimulation ermittelten Dehnungen deutlich minimiert werden konnten. Dies führt dazu, dass die errechneten Dehnungen nun sogar niedriger ausfallen, als die Werte aus dem Laborversuch. Das zeigt, dass die Krafteinleitung über eine in die Struktur des Drehgestellrahmens integrierte Solid-Platte, die Verformungen stark reduzieren kann.

Entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat hier jedoch die Dicke der durch Volumenelemente erzeugten Platte. Die Krafteinleitungsstellen bei Drehgestellrahmen sind oftmals ähnlich, sodass für alle häufig vorkommenden Krafteinleitungsstellen, die schlechte Übereinstimmungen liefern, eine Art Katalog erstellt werden kann, welcher die Solldicken für die Solid-Platte enthält. Um Werte für die notwendige Dicke der Platte an dieser Stelle zu bekommen, müsste die Krafteinleitungsstelle zuerst mit einer vollständigen Kontaktrechnung nachgerechnet werden. Daraus würde man als Ergebnis, annähernd exakte Werte für die Dehnungen an dieser Stelle bekommen. Anschließend ist die Simulation mit der Solid-Platte so oft zu wiederholen, bis diese Ergebnisse mit den annähernd exakten Dehnungen eine zufriedenstellende Übereinstimmung haben.

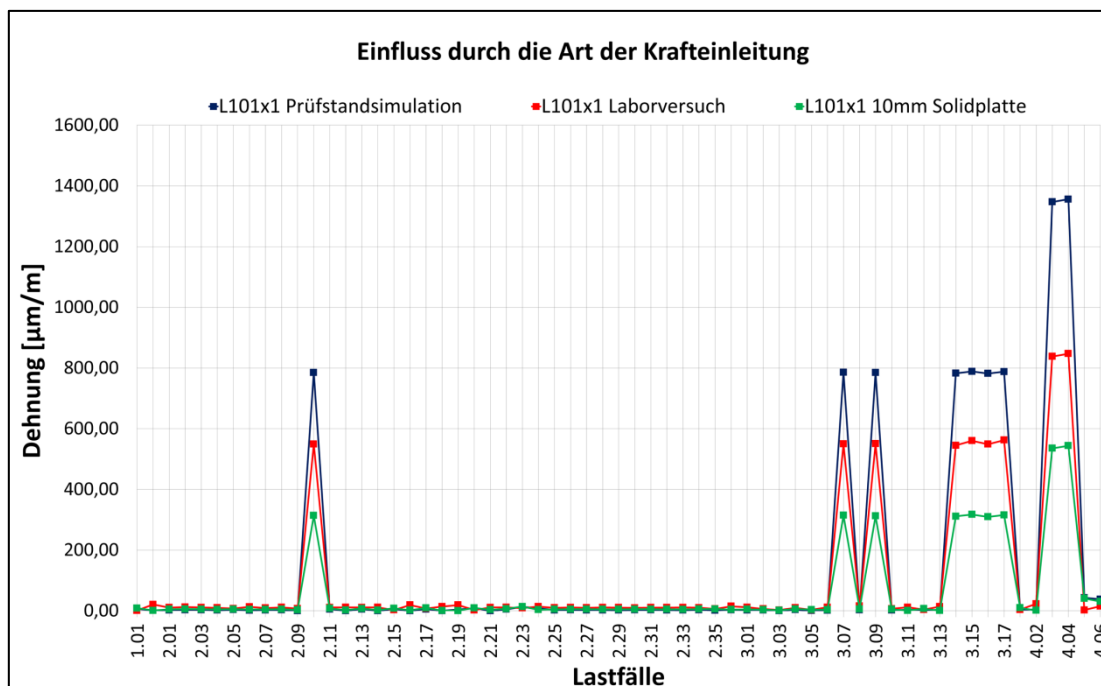


ABBILDUNG 66: BEEINFLUSSUNG DER DEHNUNGEN DURCH UNTERSCHIEDLICHE ARTEN DER KRAFTEINLEITUNG.

7.6 Modellierung von gedrunghenen Strukturen

Eine gedrunghene Struktur ist gekennzeichnet durch eine massive, kompakte Konstruktion eines Bauteils. Bei einem so komplexen Bauteil wie einem Drehgestellrahmen, stellen diese Strukturen für die Diskretisierung eine besondere Herausforderung dar. Als Beispiel für gedrunghene Strukturen werden die in Abbildung 37 und Abbildung 40 dargestellten Messstellen L102_1 und L110_4 herangezogen.

In den Diagrammen in Abbildung 39 und Abbildung 42 fällt auf, dass die lokalen Abweichungen immer bei jenen Lastfällen auftreten, bei denen der örtlich in unmittelbarer Nähe befindliche Aktuator aktiv ist. Das deutet darauf hin, dass das dort im Einsatz befindliche Schalenelement nicht im Stande ist, die Situation im Bauteil richtig wieder zu geben.

7.6.1 Verfeinerung des lokalen Schalennetzes

Es soll nun untersucht werden, ob durch ein starkes Verfeinern des lokalen FE-Netzes an gedrunghenen Strukturen, bessere Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation gewonnen werden können. Dazu wurden die Netze um den Dehnungssensor deutlich verfeinert und die Berechnung der Prüfstandssimulation erneut durchgeführt. Das Diagramm für die Messstelle L102_1 in Abbildung 68 zeigt durch die Netzverfeinerung keine Verbesserung der Prüfstandssimulationsergebnisse. Daraus kann darauf geschlossen werden, dass an dieser Stelle der Fehler nicht durch die Netzgröße beeinflusst wird.

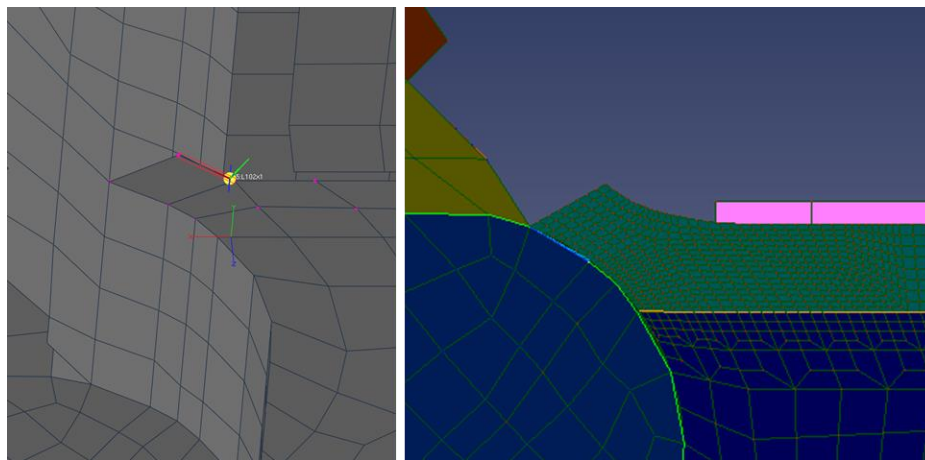


ABBILDUNG 67: MESSSTELLE L102_1 MIT DEM ORIGINALNETZ AUF DER LINKEN SEITE UND DAS VERFEINERTE NETZ IM BEREICH DER MESSSTELLE AUF DER RECHTEN SEITE.

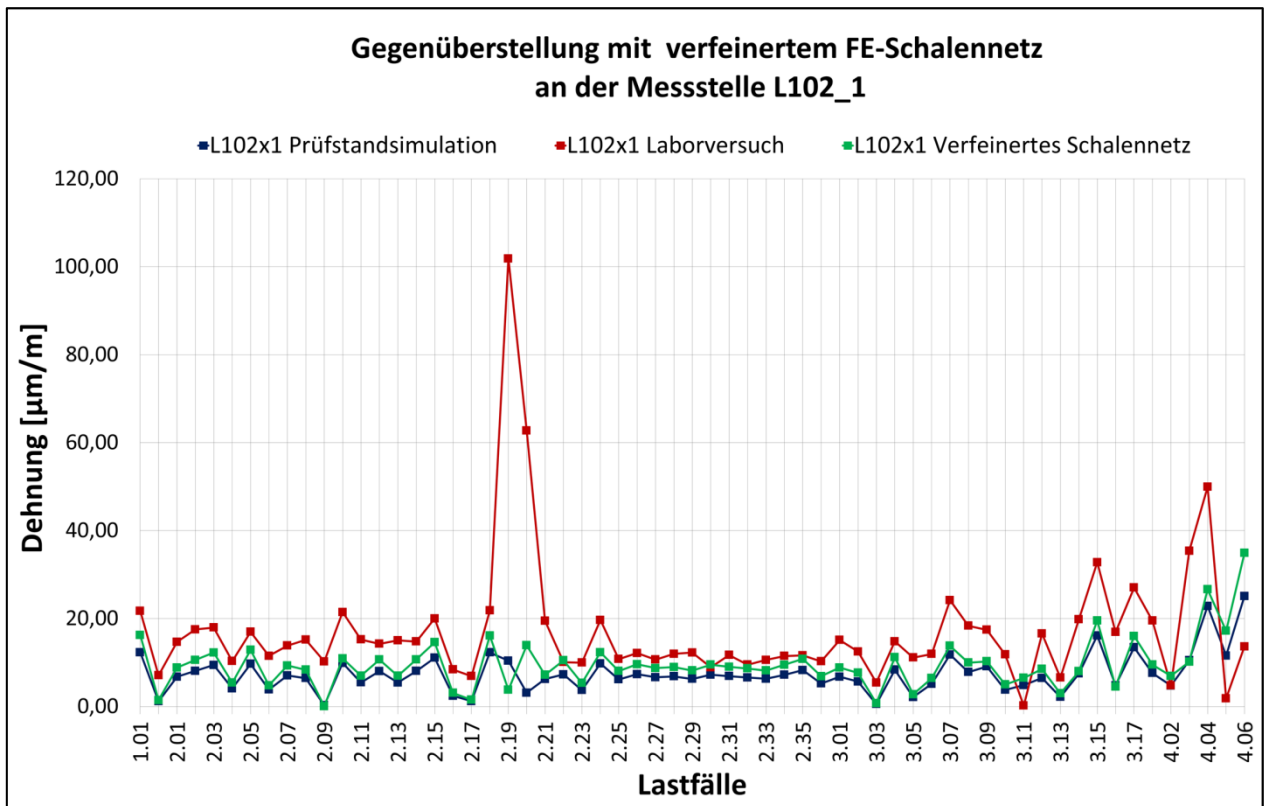


ABBILDUNG 68: GEGENÜBERSTELLUNG DER DEHNUNGEN AN DER MESSSTELLE L102_1 MIT VERFEINERTEM SCHALENNETZ.

Im Gegensatz dazu zeigt das Diagramm für die Messstelle L110_4 in Abbildung 70, durch das lokal verfeinerte Netz, eine leichte Verbesserung der Situation. Die aus der Prüfstandssimulation gewonnenen Dehnungen bei den Lastfällen LF 2.21 und LF 2.22

sind zwar betragsmäßig viel zu klein, zeigen jedoch durch das feinere Netz einen ähnlichen Dehnungsverlauf über die Lastfälle wie der Laborversuch. Auf Grund der viel zu kleinen Zahlenwerte kann auch hier davon ausgegangen werden, dass noch andere Einflüsse auf die gedrungene Struktur wirken.

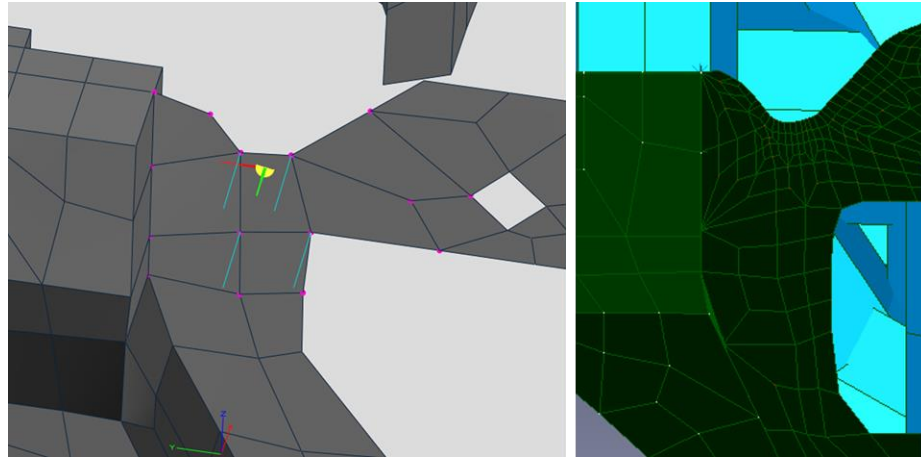


ABBILDUNG 69: MESSSTELLE L110_4 MIT DEM ORIGINALNETZ AUF DER LINKEN SEITE UND DEM VERFEINERTEN NETZ IM BEREICH DER MESSSTELLE AUF DER RECHTEN SEITE.

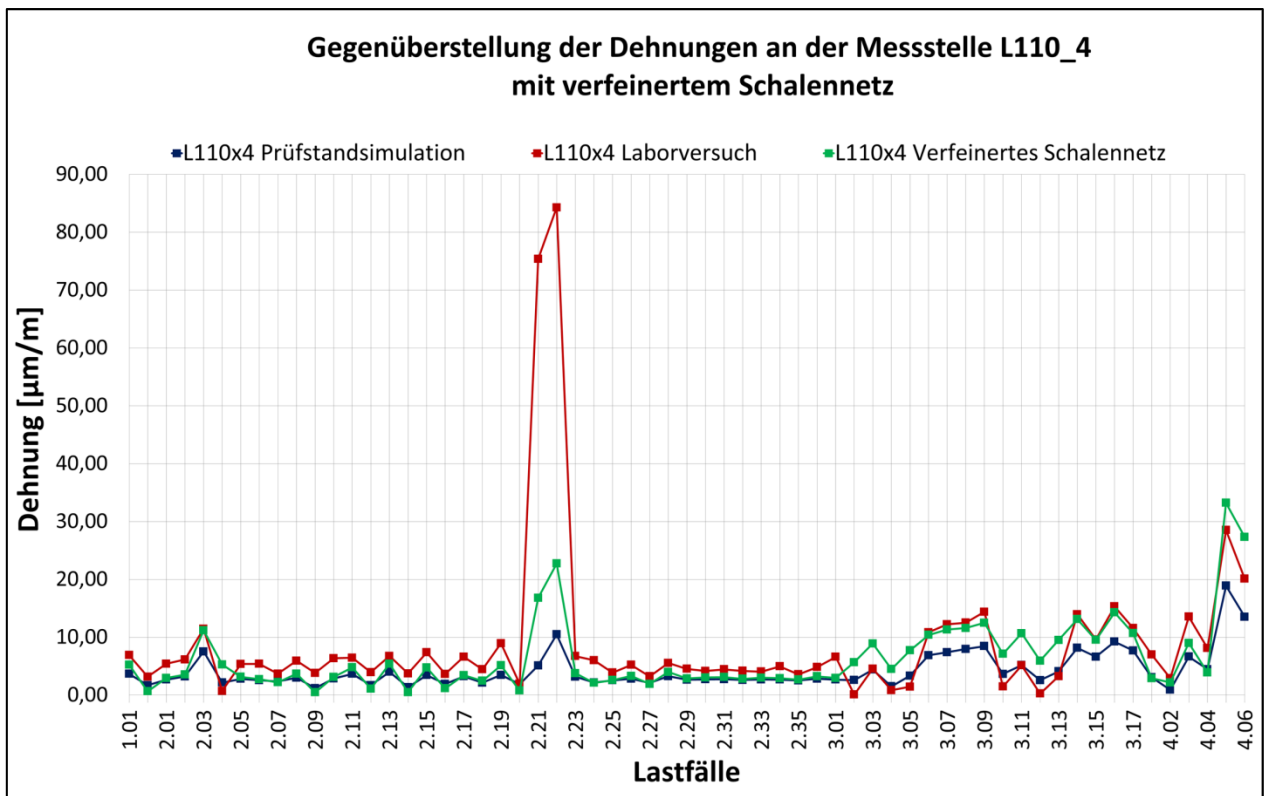


ABBILDUNG 70: GEGENÜBERSTELLUNG DER DEHNUNGEN AN DER MESSSTELLE L110_4 MIT VERFEINERTEM SCHALENNETZ.

7.6.2 Grenzen des verwendeten Schalen-Elementes

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Verfeinern des Schalennetzes im Bereich von gedrunenen Strukturen, kaum zu sichtbaren Verbesserungen der Ergebnisse aus der Prüfstandssimulation beiträgt. Ein Grund dafür ist die bei gedrunenen Strukturen durch Schalenelemente falsch nachgebildete lokale Steifigkeit.

Lokale Steifigkeit:

Die Steifigkeit ist die Eigenschaft eines Körpers oder einer Struktur, einer Verformung einen Widerstand entgegen zu setzen. Die Steifigkeit ist im unverformten Zustand unwirksam [STELZMANN 2008, S. 12].

Bei gedrunenen Strukturen besteht das Problem, dass Schalenelemente nicht die Möglichkeit haben, die lokale Steifigkeit richtig wiederzugeben. Dieses Problem wird noch verstärkt, wenn sich zusätzlich in unmittelbarer Nähe Schnittstellen mit anderen Blechen oder mit Schweißnähten befinden.

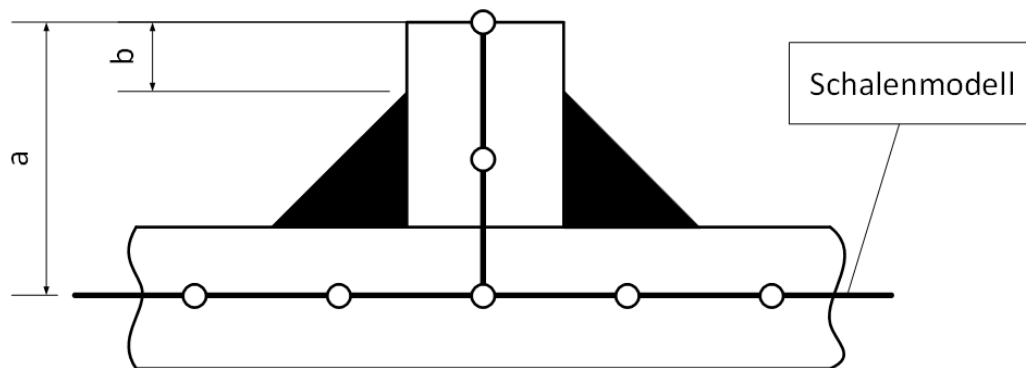


ABBILDUNG 71: GEGENÜBERSTELLUNG EINES SCHALENMODELLS IM VERGLEICH ZUM REALEN BAUTEIL ANHAND EINER GEDRUNENEN STRUKTUR.

In Abbildung 71 ist die reale Struktur sowie das dazugehörige Schalenmodell dargestellt. Daraus ist gut ersichtlich, dass die Steifigkeit der realen Struktur, welche zusätzlich durch eine Schweißnaht gestützt ist, wesentlich höher ausfällt, als die Steifigkeit des Schalenmodells.

Abbildung 72 und Abbildung 73 sind Beispiele, welche diese Situation an der Struktur des Drehgestellrahmens wiedergeben.

Daraus ist ersichtlich, dass gedrungene Strukturen mit Schalenelementen nicht zufriedenstellend nachgebildet werden können.

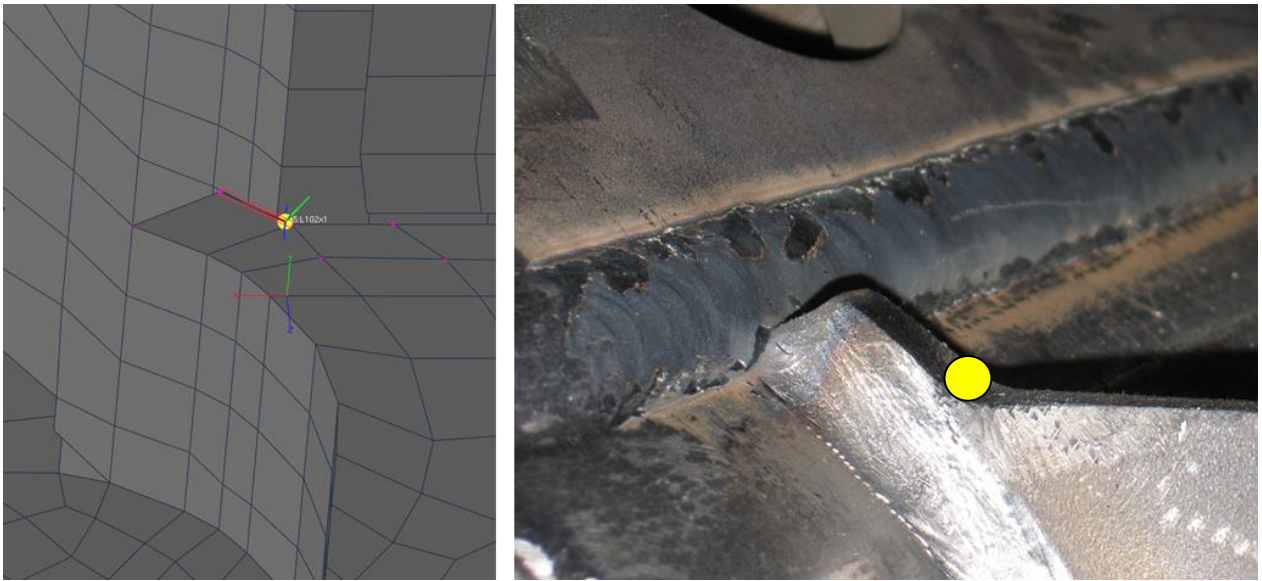


ABBILDUNG 72: LINKS - DIE STRUKTURKERBE IM FE-MODELL MIT SCHALENELEMENTEN;
RECHTS - DIE KERBE IN DER REALITÄT MIT ÜBERGREIFENDER SCHWEISSNAHT IN DAS
ANSCHLIESSENDE BLECH.

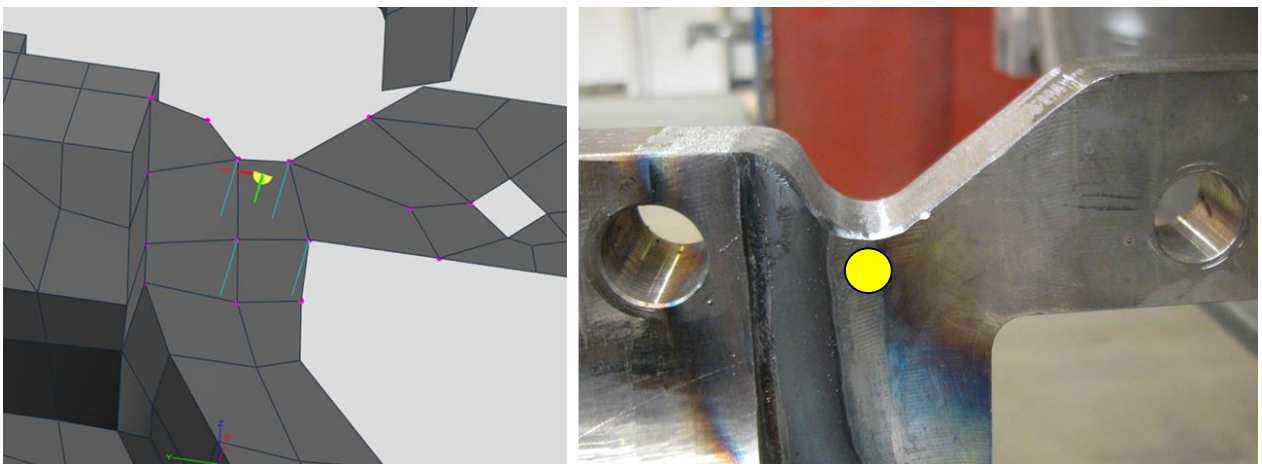


ABBILDUNG 73: LINKS - DIE STRUKTURKERBE IM FE-MODELL MIT SCHALENELEMENTEN;
RECHTS – DIE KERBE IN DER REALITÄT MIT SCHWEISSNAHT.

7.7 Verwendung von Tetraeder-Elementen

Das Tetraeder-Element zählt zu den Volumenelementen. Durch die Verwendung von Volumenelementen können gedrungene Strukturen viel besser nachgebildet werden als mit Schalenelementen. Mit Volumenelementen ist es möglich, Schweißnähte in der Simulation realitätsnah nachzubilden. Dies führt dazu, dass die lokale Steifigkeit aus der Simulation, der realen Steifigkeit sehr nahe kommt. Der Grund für den Einsatz von parabolischen Tetraeder-Elementen, das heißt, das Tetraeder-Element verfügt über 10 Knotenpunkte, liegt in der Einfachheit der Netzerzeugung mit diesen Elementen. Für das Erstellen des FE-Netzes für die Prüfstandssimulation mit Volumenelementen, wurde die Software *SIEMENS NX 8.5* verwendet. Bei der Erstellung des Netzes wurde darauf geachtet, dass keine Übergänge zwischen Schalenelementen und Volumenelementen auftreten. Deshalb wurde der gesamte Drehgestellrahmen als Volumenmodell mit Tetraeder-Elementen erstellt. Um die Anzahl der Elemente und somit die Rechenzeit zu begrenzen, wurde der Rahmen bewusst grob vernetzt, mit Ausnahme der für diese Arbeit interessanten Stellen. Im Bereich der Messstellen L102_1; L106_4 und L110_4, wurde ein feines Netz mit einer Kantenlänge von 1,5mm erstellt. Für das Lösen des Gleichungssystems wurde als Solver *NX NASTRAN* eingesetzt.

Im Diagramm in Abbildung 75 zeigt sich, dass an dieser Stelle mit Tetraeder-Elementen eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden kann.

Die Tetraeder-Elemente in Abbildung 77 liefern jedoch kein zufriedenstellendes Ergebnis. An dieser Messstelle müssen noch weitere Einflüsse herrschen, welche sich zum Beispiel aus den Eigenschaften des für die Finite-Elemente Berechnung verwendeten Elementtyps oder auch aus dem Unterschied zwischen idealer und realer Geometrie ergeben.

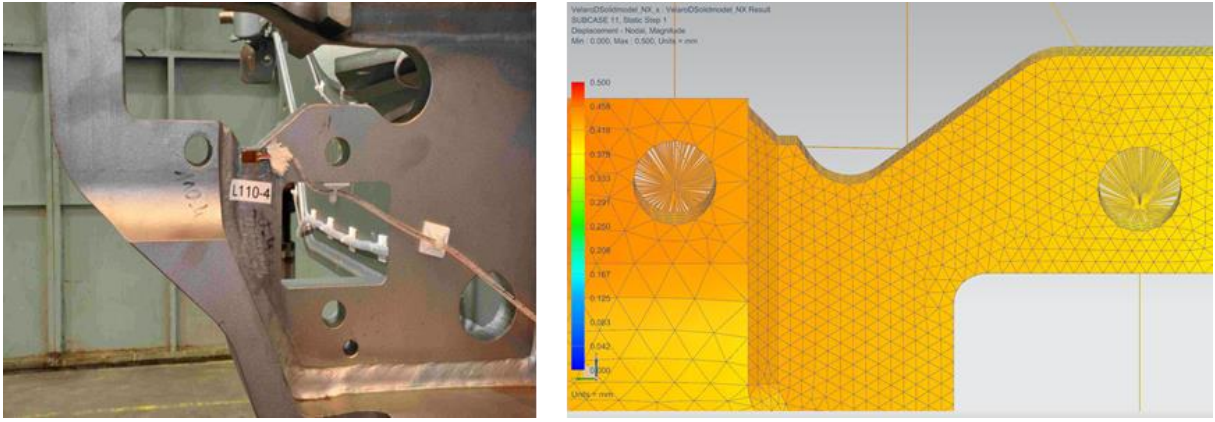


ABBILDUNG 74: MESSSTELLE L110_4 LINKS IN DER REALITÄT UND RECHTS ALS VOLUMENMODELL AUS TETRAEDER-ELEMENTEN.

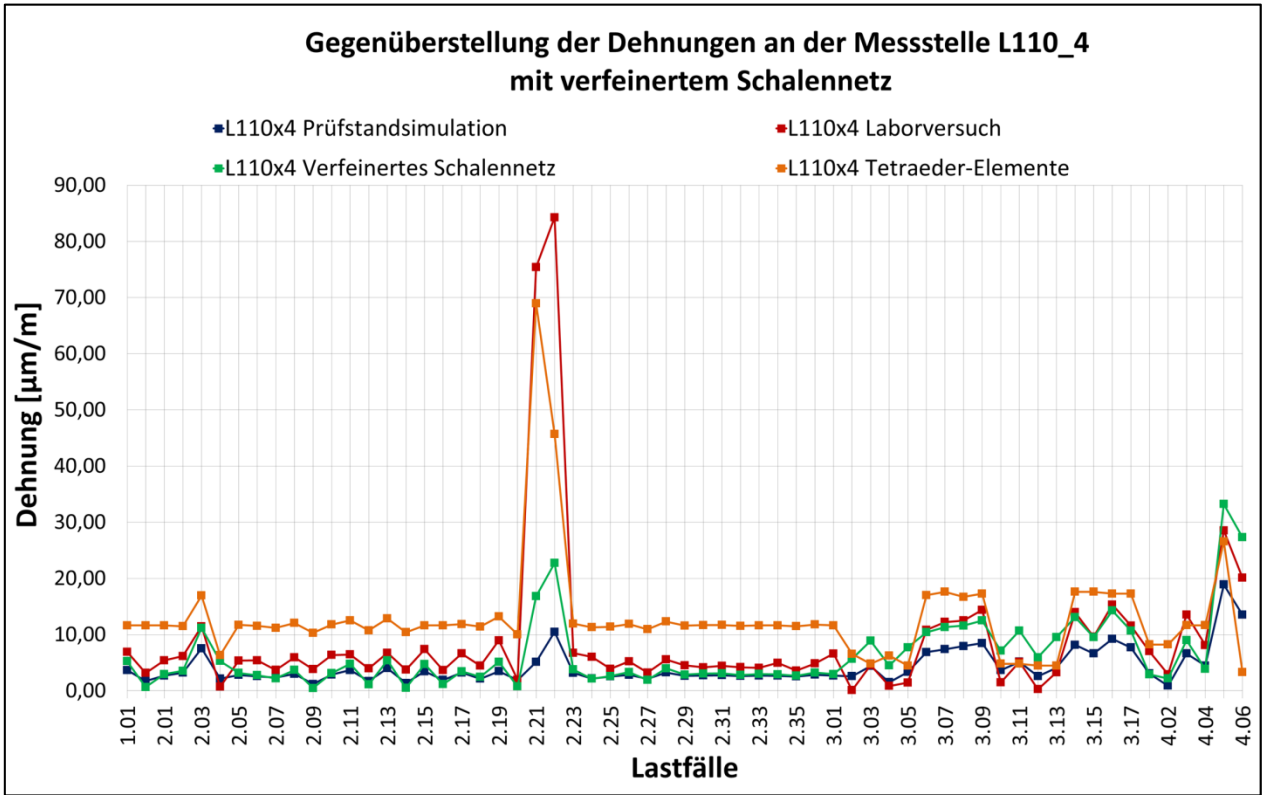


ABBILDUNG 75: L110_4 - GEGENÜBERSTELLUNG DER DEHNUNGEN AUS DEM LABORVERSUCH, MIT DEN DEHNUNGEN AUS DEN PRÜFSTANDSIMULATIONEN.

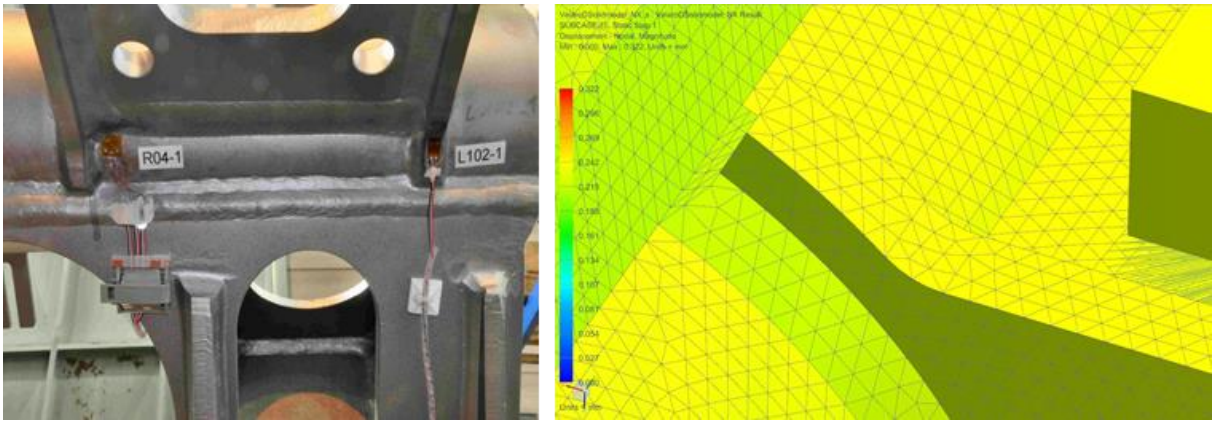


ABBILDUNG 76: MESSSTELLE L102_1 LINKS IN DER REALITÄT UND RECHTS ALS VOLUMENMODELL AUS TETRAEDER-ELEMENTEN.

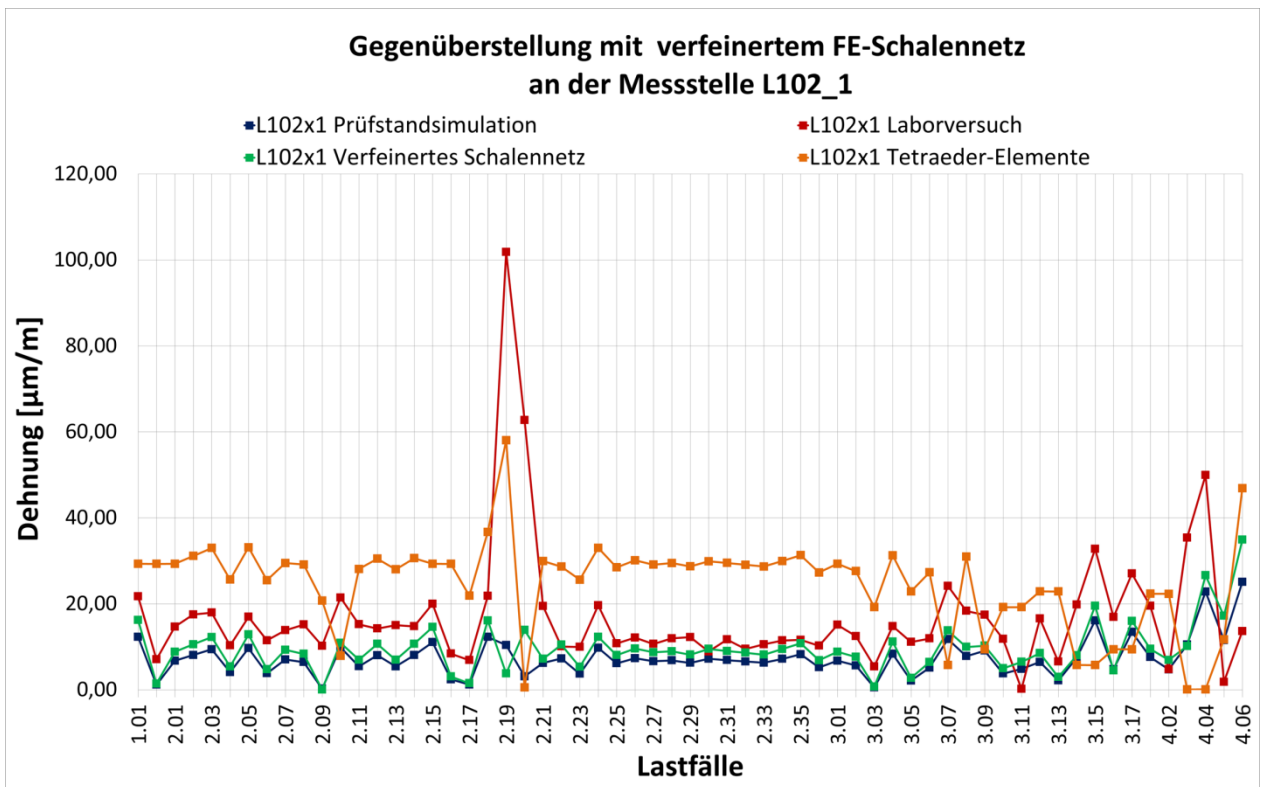


ABBILDUNG 77: L102_1 - GEGENÜBERSTELLUNG DER DEHNUNGEN AUS DEM LABORVERSUCH, MIT DEN DEHNUNGEN AUS DEN PRÜFSTANDSIMULATIONEN.

7.8 Sonderfall: Messstelle L106_4

Die Messstelle L106_4 befindet sich am Querträger und hat bei der Simulation mit Schalenelementen bis zum Lastfall 2.24 eine gute Übereinstimmung zwischen den Dehnungen der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch aufgewiesen. Ab LF 2.24 ist jedoch kein identer Verlauf zwischen Simulation und Laborversuch erkennbar. Diese Stelle ist laut Definition ein Einsatzgebiet für Schalenelemente, da der Dehnmessstreifen auf der Stirnseite eines langen, dünnen Blechstreifens positioniert ist. Eine durchgeführte Verfeinerung des Schalen-Netzes führte jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse. Es sollte nun an dieser Messstelle untersucht werden, ob durch den Einsatz von Tetraeder-Elementen eine bessere Übereinstimmung erreicht werden kann. Wie bereits bei den anderen Messstellen wo Tetraeder-Elemente zum Einsatz kamen, wurde auch an dieser Stelle das Netz lokal stark verfeinert. Die Kantenlänge betrug wiederum 1,5mm.

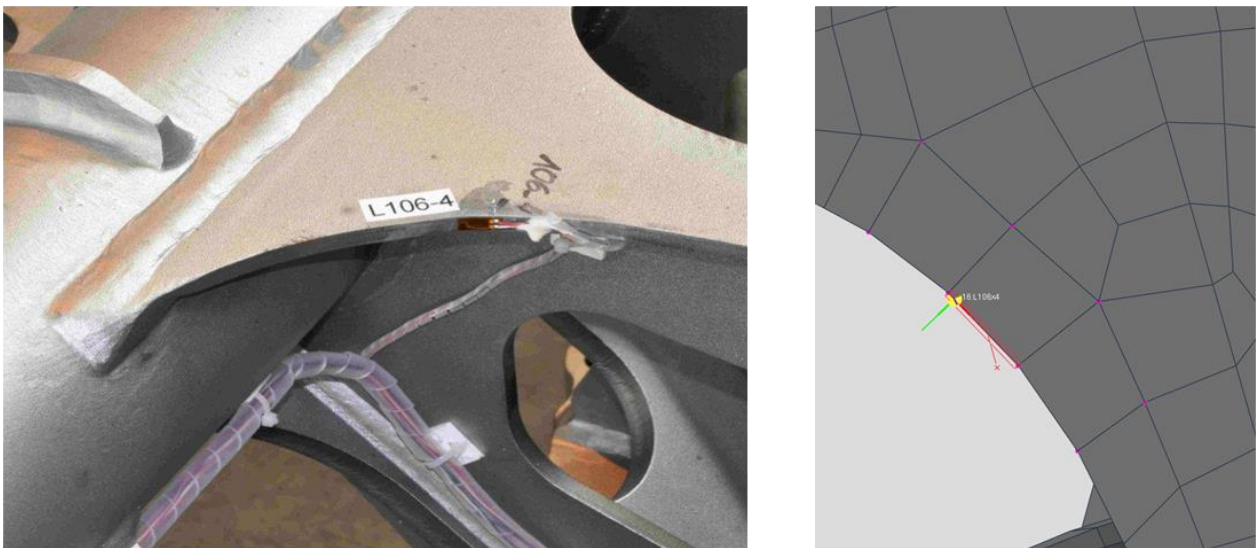


ABBILDUNG 78: MESSTELLE L106_4
LINKS - DIE ORIGINALSTELLE IM LABORVERSUCH
RECHTS- DER VIRTUELLE DMS AM SCHALENMODELL.

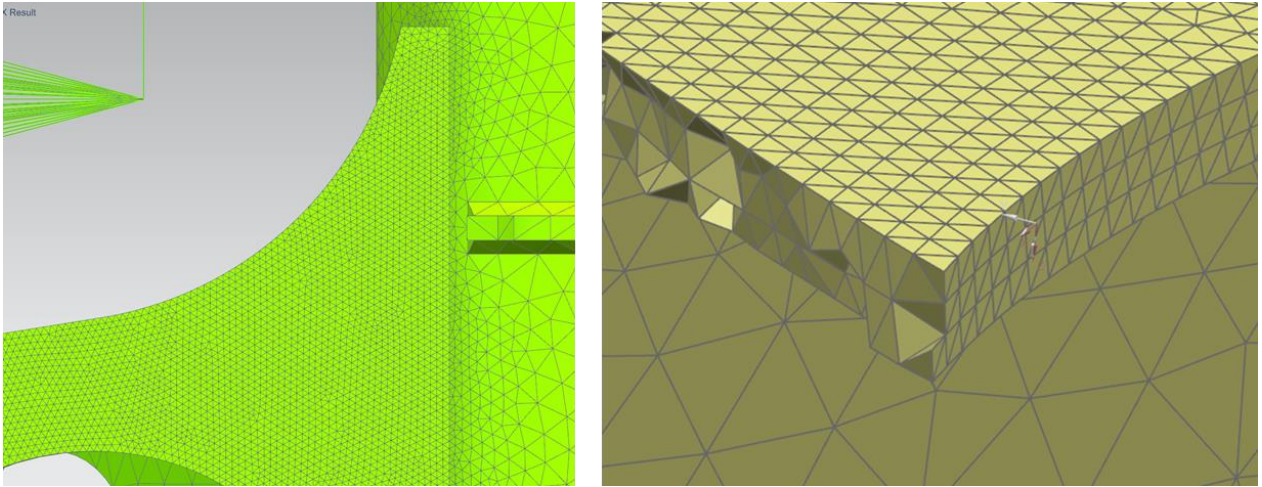


ABBILDUNG 79: MESSSTELLE L106_4
 LINKS – MODELLIERT ALS VOLUMENMODELL
 RECHTS – QUERSCHNITT DURCH DAS VOLUMENMODELL AN DER MESSSTELLE.

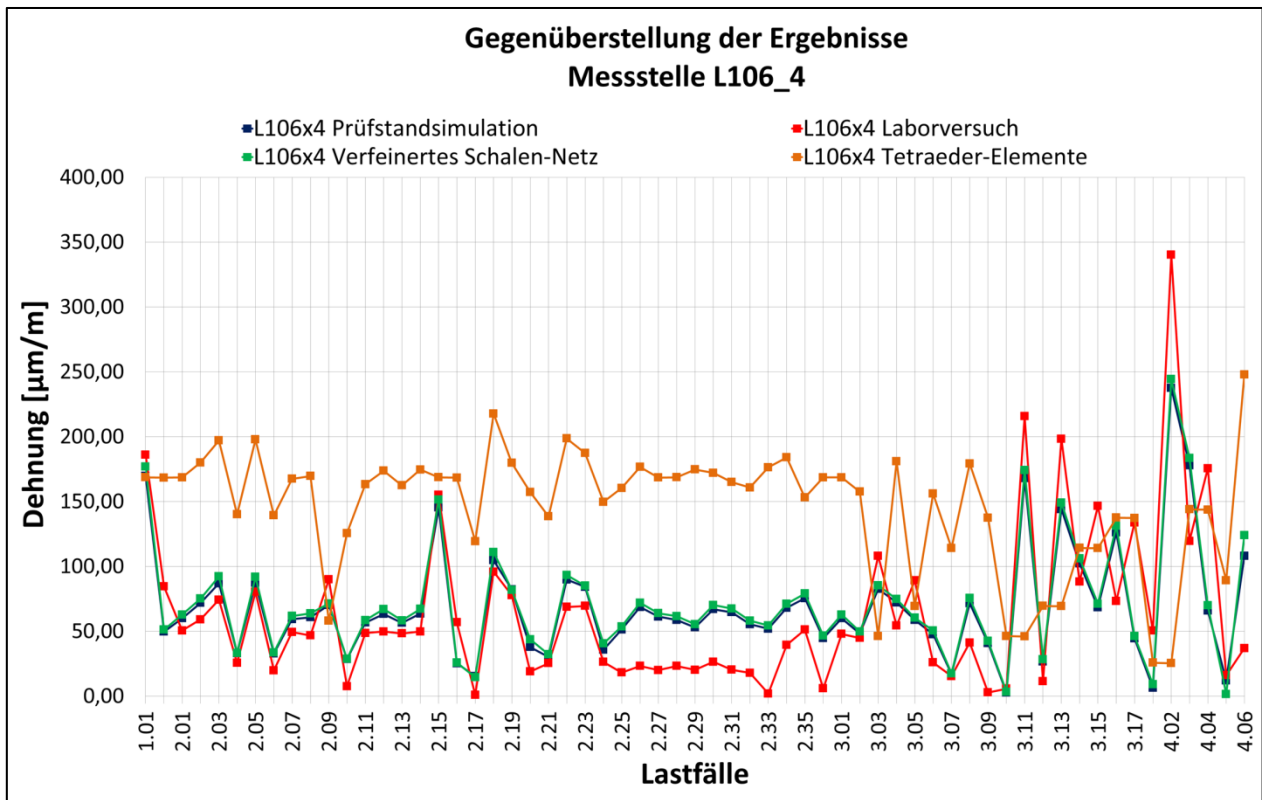


ABBILDUNG 80: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERMITTELTEN DEHNUNGEN AUS DEM LABORVERSUCH UND AUS DEN PRÜFSTANDSIMULATIONEN AN DER MESSSTELLE L106_4.

Das Diagramm in Abbildung 80 zeigt ein erschreckendes Ergebnis aus der Prüfstandssimulation mit Tetraeder-Elementen. Die Dehnungen von „L106_4 Tetraeder-Element“ zeigen keine Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der Prüfstandssimulation mit Schalenelementen beziehungsweise auch keine Übereinstimmung mit den gemessenen Dehnungen im Laborversuch. Dieses Ergebnis zeigt, dass Tetraeder-Elemente an dünnen, langgezogenen Bauteilen, zu einer viel schlechteren Übereinstimmung mit dem Laborversuch führen können, als Schalenelemente. Dies ist eine Konsequenz aus den im Kapitel 4.2 erklärten Eigenschaften und Anwendungsbereichen für parabolische Tetraeder-Elemente. Somit ist ein Einsatz von Tetraeder-Elementen bei der Simulation von Drehgestellrahmen lediglich für gedrungene Strukturen als sinnvoll anzusehen.

8. Ergebnis

Um Aufschluss über die Güte des Berechnungssystems zu bekommen, muss eine vollständige Validierung des Drehgestellrahmens basierend auf den Berechnungs- und Versuchsdaten erfolgen. Das Ziel dieser Arbeit war nun, den ersten Schritt der vollständigen Validierung durchzuführen und die mittels Dehnmessstreifen gemessenen Dehnungen auf dem Prüfstand, mit den ermittelten Dehnungen aus der Finite-Elemente Rechnung zu vergleichen, um Modell und Prüfstand zu validieren.

Dafür wurden im ersten Teil der Arbeit, die Dehnungen an den Messstellen aus dem Laborversuch, mit den ermittelten Dehnungen aus der Prüfstandssimulation miteinander verglichen. Diese Gegenüberstellung lieferte für einen Großteil der Messstellen ein zufriedenstellendes Ergebnis. Jedoch gibt es auch Messstellen, die keine ausreichende Übereinstimmung zwischen der Prüfstandssimulation und dem Laborversuch lieferten. Das bedeutet, dass die Validierung zwischen Modell und Prüfstand zumindest an diesen Messstellen als nicht erfolgreich anzusehen ist.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden mögliche Ursachen untersucht, die für die Abweichungen der Dehnungen zwischen Laborversuch und Prüfstandssimulation verantwortlich sein könnten. Im Vorfeld dieser Untersuchungen wurde erfolgreich die Übereinstimmung der globalen Steifigkeit des Drehgestellrahmens zwischen Laborversuch und Simulation mittels eines Vergleiches der Reaktionskräfte durchgeführt.

An für Schalenelemente geeigneten Bauteilstrukturen kann durch eine Verfeinerung des lokalen FE-Netzes, eine deutlich bessere Übereinstimmung der Dehnungsergebnisse erreicht werden. Es gibt jedoch gute Gründe für ein teilweise bewusst grob erstelltes FE-Schalennetz. Dies steht mit der momentan verwendeten Methode für die Schweißnahtbewertung in Zusammenhang, da nach dieser Methode, das Netz im Bereich der Schweißnaht nicht zu engmaschig sein darf. Andererseits spielt der notwendige Zeitbedarf, welcher für die Erstellung eines feinen Netzes und die anschließenden Berechnungen stark zunimmt, auch eine große Rolle.

Für gedrungene Strukturen trägt die Maßnahme der Netzverfeinerung nicht zur Verbesserung der Situation bei. An diesen Stellen ist der Einsatz von Volumen-Elementen zielführender. In dieser Arbeit wurde dafür das parabolische Tetraeder-Element ausgewählt. Dadurch konnten zum Teil gute Übereinstimmungen erreicht werden. Die Verwendung von Tetraeder-Elementen für dünne Bauteilstrukturen ist jedoch problematisch, da obwohl ein sehr feines Netz (1,5mm Kantenlänge) erzeugt wurde, an diesen Stellen keine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht werden konnte. Deshalb ist es für die Wahl des richtigen Elementtyps besonders wichtig, sich im Voraus zu überlegen, um welche Art von Struktur es sich dabei handelt und wie diese beansprucht und verformt wird.

Großen Einfluss auf das Ergebnis hat weiters die Position des Dehnungssensors. Wie anhand einer Messstelle untersucht wurde, können bereits wenige Millimeter Verschiebung in die Längsrichtung des Sensors, großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Deshalb muss ein besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, dass die Positionen des Dehnmessstreifens zwischen dem Laborversuch und der Prüfstandssimulation, eine größtmögliche Übereinstimmung besitzen. Dies ist jedoch durch die Messbarkeit beziehungsweise durch die Messgenauigkeit im Laborversuch nur eingeschränkt möglich. Die Diskretisierung der Struktur durch Finite-Elemente, welche die Kontur des Bauteils stark verändert und eine gleiche Positionierung des Dehnungssensors an nur sehr fein vernetzten Strukturen ermöglicht, stellt ein weiteres Problem für eine gute Übereinstimmung der Messpositionen dar.

Auch die Krafteinleitung in die Struktur, kann auf die sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Dehnungssensoren, große Auswirkungen auf die Messergebnisse haben. Diese lassen sich durch die zusätzliche Verwendung von Platten aus Volumenelementen minimieren. Für eine exakte Lösung dieses Problems ist jedoch eine etwas aufwendigere Kontaktrechnung durchzuführen.

Durch die Toleranzen für Blechdicken, können ebenfalls Einflüsse auf das Ergebnis festgestellt werden. Dieses Problem entsteht dadurch, dass für die Simulation die vom Hersteller garantierten Mindeststärken der jeweiligen Blechdicken verwendet werden, da die tatsächlichen Blechstärken zum Zeitpunkt der Auslegungsrechnung noch nicht bekannt sind. Eine Lösung dafür könnte lediglich durch strengere Toleranzen im Bereich des Einkaufs für Bleche erzielt werden.

Es gibt eine Vielzahl an möglichen Einflüssen auf die Prüfstandssimulation, welche es sehr schwierig machen, eine sehr gute Übereinstimmung für alle Messstellen eines Drehgestellrahmens zu erhalten. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, alle Einflüsse richtig abzuschätzen und diese bei der Simulation mit ausreichender Genauigkeit in die Berechnung mit einzubeziehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nun einige aus der Fachliteratur bereits bekannten Einflüsse auf die FE-Simulation untersucht und die daraus entstandenen Auswirkungen auf die Drehgestell-Prüfstandssimulation analysiert. Das Ergebnis zeigt, dass an manchen Stellen durch nur geringen Mehraufwand eine bereits deutlich bessere Übereinstimmung erreicht werden kann. Es sind jedoch auch Messstellen vorhanden, die lediglich durch intensiven Zeitaufwand ein besseres Ergebnis erreichen beziehungsweise selbst dann noch keine zufriedenstellenden Resultate liefern.

9. Ausblick

Aus dem bearbeiteten Themenbereich ergeben sich folgende weiterführende Analysen, welche in nachfolgenden Arbeiten untersucht werden können.

- **Nichtlineare Berechnung von „Problem-Messstellen“.**

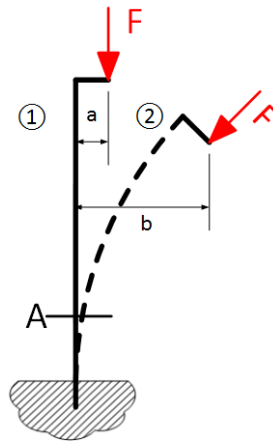


ABBILDUNG 81: DAS VERHALTEN EINER IDEALEN LINEAREN STRUKTUR IN SITUATION 1 UND DAS VERHALTEN EINER REALEN/NICHTLINEAREN STRUKTUR IN SITUATION 2.

- **Erstellung eines Volumen-Simulationsmodells mit Hexaeder-Elementen anstatt mit Tetraeder-Elementen.**

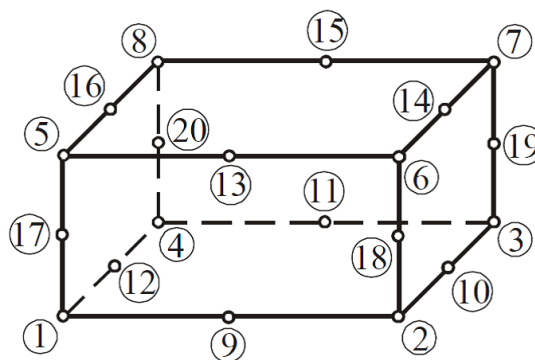


ABBILDUNG 82: HEXAEDER-ELEMENT [KLEIN 2012, S. 172]

- **Vollständige Kontaktrechnung an einer Krafteinleitungsstelle.**

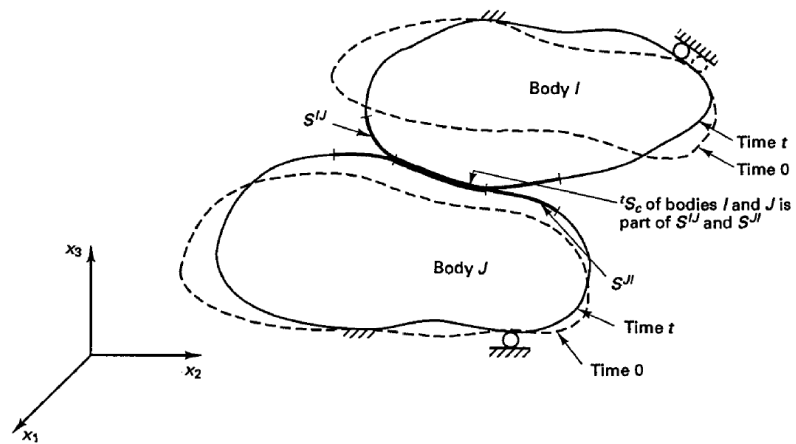


ABBILDUNG 83: KÖRPER DIE ZUR ZEIT T IN KONTAKT SIND
[BATHE 2002, S. 738]

- **Betrachtung von Stellen, an denen die minimale Blechstärke und die maximale Blechstärke aufeinander treffen.**
- **Beurteilung der Nichtlinearitäten des Werkstoffes.**

10. Literaturverzeichnis

Bücher:

Bathe, KJ 2002, *Finite-Elemente-Methoden*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Grote, KH & Feldhusen, J 2007, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Hoffmann, K 1987, *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnmeßstreifen*, 1. Auflage, Druckerei Drach Pfungstadt, Darmstadt.

Klein, B 2012, *FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*, 9. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Koehldorfer, W 2005, *Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien.

Mönch, E 1981, *Einführungsvorlesung Technische Mechanik*, 4. Auflage, Oldenbourg-Verlag, München.

Müller, G & Groth, C 2007, *FEM für Praktiker – Band 1: Grundlagen*, 8. Auflage, Expert Verlag, Renningen.

Stelzmann, U 2008, *FEM für Praktiker – Band 2: Strukturodynamik*, 5. Auflage, Expert Verlag, Renningen.

Szabó, I 1972, *Höhere Technische Mechanik*, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Skripten:

Celigoj, CC 2004, *Festigkeitslehre – Strength of Materials*, Vorlesungen & Übungen, Version 4.1, Institut für Festigkeitslehre – Technische Universität Graz.

Celigoj, CC 1998, *Methode der Finiten Elemente – Finite Element Method*, Vorlesungen & Übungen, Version 2.1, Institut für Festigkeitslehre – Technische Universität Graz.

Normen:

DIN EN 10029:1991, *Warmgewalztes Stahlblech von 3mm Dicke an – Grenzabmaße, Formtoleranzen*, zulässige Gewichtsabweichungen, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 13749:2011, *Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 15827:2011, *Bahnanwendungen – Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke*, Beuth Verlag, Berlin.

Dokument:

SIEMENS AG Österreich , interne Unterlagen.

Internetquelle:

Laible, M 2006, *Zug-/Druckstab-Federkörper*, Wikimedia Commons, gesehen am 23.03.2013, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZugDruckstab_WZ.gif.